

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

高炉樋用不定形パーマライニングの改善

Improved Permanent Lining for BF Trough with Unshaped Materials

中 坊 一 也

Kazuya NAKABO

飯 田 貴 志

Takashi IIDA

北 村 匡 譜

Masatsugu KITAMURA

品川技報

高炉樋用不定形パーマライニングの改善

Improved Permanent Lining for BF Trough with Unshaped Materials

中 坊 一 也^{*1}
Kazuya NAKABO

飯 田 貴 志^{*2}
Takashi IIDA

北 村 匡 譜^{*3}
Masatsugu KITAMURA

要 旨

高炉樋用パーマライニングは近年不定形化される事例が増えている。不定形化においては耐食性、耐スポーリング性および強度の確保が課題となる。材料面ではパーマライニング用のケミカルボンドキャストブルを開発した。高耐食性、高耐スポーリング性、高強度を示し、パーマライニングに適した材質となっている。さらに、構造面では乾式振動成型材を活用した構造を適用することで、亀裂の抑制、鉄皮保護に優れた効果を得ることができる。

Abstract

Recently, cases of constructing the permanent lining of the blast furnace trough with unshaped refractories have been increasing. When introducing unshaped refractories to the permanent lining, ensuring sufficient corrosion resistance, spalling resistance and mechanical strength is important.

In terms of applied materials, we developed a chemical bonded castable material suitable for the permanent lining which has high corrosion resistance, high spalling resistance and high strength. Moreover, in terms of improvement in structure, we have been able to provide a new structure utilizing a dry vibration material which has an excellent effect on reducing cracks and protecting the steel shell.

1. 諸言

パーマライニングは、ウェアライニングが異常に損傷した際の溶融物の漏出を防止することと、断熱をはかり鉄皮などの構造物を保護することを目的に設けられる。亀裂や目地に浸透しやすい性質を有する溶銑の流路である高炉樋においては、前者の役割が特に重要である。そのため、高炉樋のパーマライニングに適用される耐火物にはウェアライニング用の材料に準じた耐食性のほか、耐熱スポーリング性や機械的強度が求められる。さ

1. Introduction

Permanent lining is installed for the purpose of preventing molten metal and slag from leaking out and protecting the steel shell by heat insulation. The former function is more critical for the permanent lining of the blast furnace trough through which molten iron flows because molten iron has a low viscosity and easily penetrates the cracks or the joints of bricks. Therefore, refractories for the permanent lining of the blast furnace trough are required to

^{*1} 技術研究所 第2研究部 Research Dept. No. 2, Research Center

^{*2} 技術研究所 第2研究部 主任研究員 Managing Research Engineer, Research Dept. No. 2, Research Center

^{*3} 技術研究所 第2研究部 室長 Team Manager, Research Dept. No. 2, Research Center

らに、長期間それらの性能を維持することも求められる。

近年高炉樋では、れんがに代えて不定形耐火物をパーマライニングに採用する事例が増えている。本報では樋不定形パーマライニングの構造および適用する材料の改善について述べる。

2. 不定形化の利点と課題

Fig. 1にれんがによるパーマライニングの一例を示す。高アルミナ質れんがや炭化ケイ素含有れんがなどが用いられる。れんがは一般的に強度が高く、長期間使用時にも機械的損傷は起こりにくい。しかし、れんがによる施工体は目地が多く存在するため、長期間の使用により目地が開いたりれんががせり出したりなどの構造的欠陥の発生や、目地が溶融物の漏出経路となる可能性が欠点となる。またれんが積みには大きな労力と時間がかかること、補修が難しいことも短所である。

このようなれんがによるパーマライニングと比較して、パーマライニングを不定形化する利点としては施工が簡便で所要時間が短くて済むこと、目地損傷のリスクを抑えられることがあげられる。また、形状に制約のあるれんがと異なり、施

have high spalling resistance and mechanical strength as well as a high corrosion resistance comparable to that of materials for the wear lining. In addition, the performance needs to be retained for a long term.

Recently, cases of applying unshaped refractories to the permanent lining of the blast furnace trough have been increasing. In this paper, we describe the developments of materials and structures for the permanent lining of the blast furnace trough.

2. Advantages and Problems in Applying Unshaped Refractories

An example of brick permanent lining is shown in Fig. 1. High alumina bricks and silicon carbide-containing bricks are used for this lining. Bricks generally have high strength so they can prevent mechanical damage even if they are used for a long term. However, the brick lining has many joints, so there is a possibility that molten iron and slag leaks out through an opening in the joints or the movement of bricks causing structural defects after long term use. Another weak point is that a lot of work and time are necessary for construction and partial repairing is difficult.

Meanwhile, linings composed of unshaped materials have the following merits; construction is easy, the required time is shorter and there is no risk of damage caused by joints. Because there is little dimensional constraint for designing the lining, the lining thickness can be freely modified, and several materials can be combined to improve the lining life.

On the other hand, monolithic linings have some problems such as excessive load on refractories and steel shell due to lack of stress relaxation by joints and the risk of cracks easily reaching the backside of refractories. So the

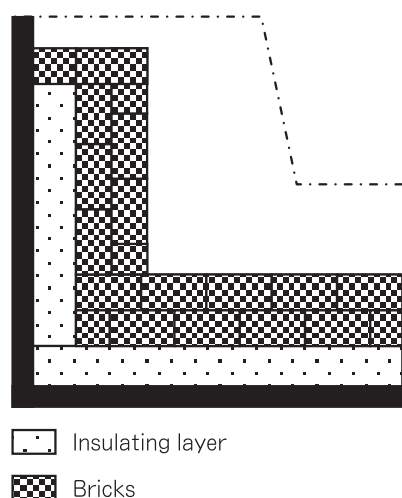


Fig. 1 Schematic view of brick permanent lining example.

工厚さをある程度自由に設定できるため、複数の材質を組み合わせることで機能性を高めることが可能である。一方で問題点は、目地による応力緩和が望めないため、耐火物や鉄皮に応力負荷が発生しやすいこと、一体の施工体となるため亀裂発生時に背面まで貫通してしまう危険性が高いことがあげられ、不定形パーマライニングの構造や適用する材料には、これらの問題点を可能な限り解消する工夫が求められる。

3. 不定形パーマライニング構造の改善

3. 1 キャスタブル適用構造

Fig. 2(a)は最も基本的な不定形パーマライニング構造である。鉄皮側に断熱吹付け材を施工することで必要な断熱性を確保し、内側にウェアライニングのバックアップ機能を有する流し込み材を配している。吹付け材を施工後、施工枠を設置し流し込み材を流し込むだけで施工が完了するた

materials and structures for permanent linings have to be designed to solve the above problems as much as possible.

3. Improvement in Structure of Unshaped Material Permanent Lining

3. 1 Castable refractory applied lining

A typical example of a permanent lining made with unshaped materials is shown in Fig. 2(a). An insulating gunning material is applied on the side nearest to the steel shell to ensure heat insulation, and a castable material which has the function of backing up the wear lining is applied on the inside. The construction process, which consists of only gunning, setting the mold and casting, is very simple, making shorter construction period possible. However, a simple monolithic lining can be prone to cracks easily forming leakage paths for molten iron

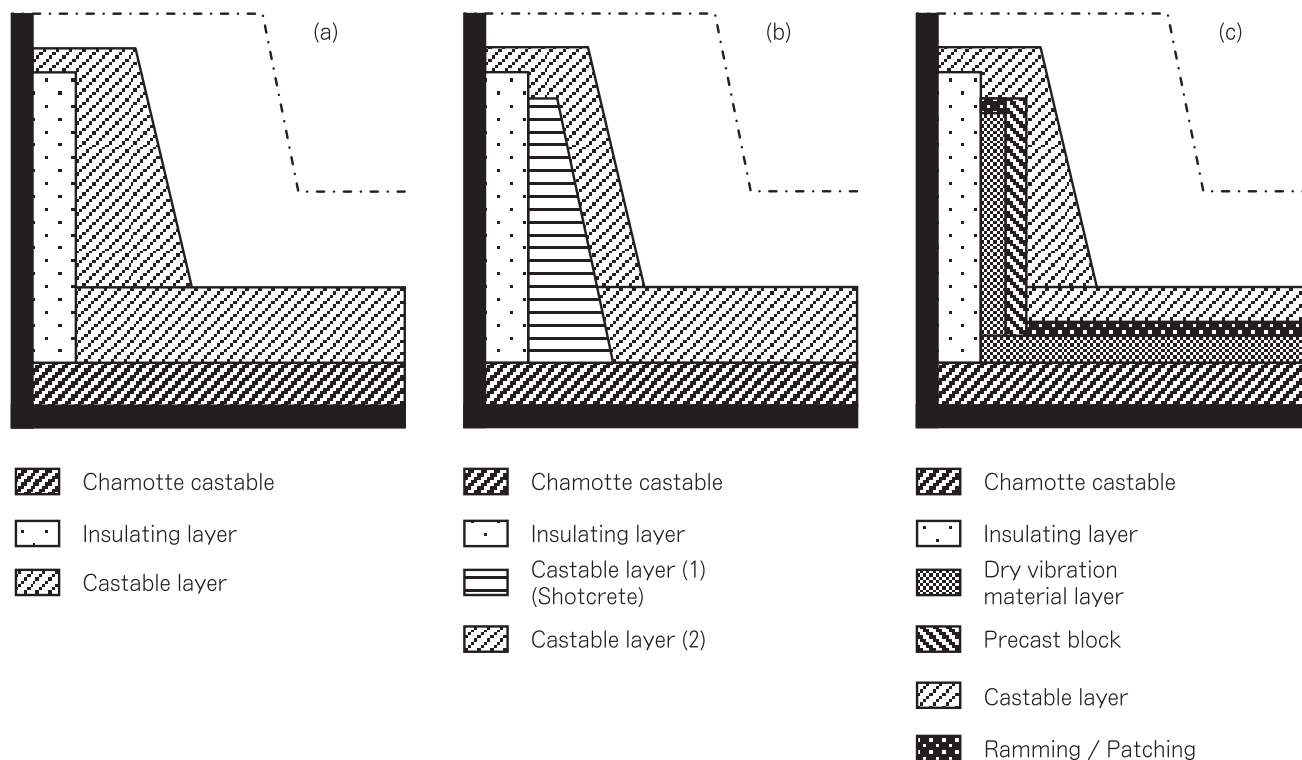


Fig. 2 Schematic view of monolithic permanent lining examples; (a) Single-layered castable lining, (b) Double-layered castable lining, (c) Dry vibration material applied lining.

め、簡便で所要時間を短縮できる。しかし、パーマライニング全体が一体の施工体となるため、亀裂が発生すると貫通し溶融物漏出の経路が形成されやすく、安全性が低い問題がある。

そこで、この点を改良した構造をFig. 2(b)に示す。この構造では流し込み材層を独立した二層にし、層の境界で亀裂の進展を止める設計としている。また、層ごとに性質の違う材質を施工することでより安全性の高い施工体とすることができ、外側の流し込み層(1)を酸化の問題が無く断熱性の高いアルミナ-シリカ質の材料とすることで、長期安定性の向上および鉄皮への熱負荷軽減効果を得ている。また、枠設置が不要な湿式吹付け工法を採用することで^{1), 2)}、短期間で施工を可能としている。

3. 2 乾式振動成型材適用構造

流し込み材を適用した構造においては、複層化により貫通亀裂のリスクを低くすることができるが、各々の層は一体の施工体となるため応力緩和能が低く、亀裂に対しては本質的に弱い欠点を持つ。また、長期にわたり高温にさらされ層と層が焼き付いてしまうと独立性が損なわれ、境界での亀裂進展防止効果が得られない可能性がある。

これらの問題を解消し、より安全性を高めた乾式振動成型材適用構造をFig. 2(c)に示す。乾式振動成型材は振動充填により施工される粉末状耐火物であり、構造体としての強度を持たないため、壁部への施工はあらかじめプレキャストブロックを設置して空間を確保した上で行う。この材料は施工後も粉末状態であるため、亀裂は本質的に発生しえない。そのため流し込み材に亀裂が発生しても、それが背部まで貫通するリスクを極めて低く抑制することが可能である。

and slag.

Fig. 2(b) shows the improved lining designed to prevent the leakage problem. In this structure, there are two castable refractory layers, and the structure is designed to stop the extension of the crack at the boundary between layers. Moreover, it can further enhance safety by applying materials different in characteristics on each layer.

In the lining in Fig. 2(b), alumina-silica castable is applied to the outside layer and has the effect of improving long-term stability and reducing thermal load on steel shell because it is free from oxidation problems and has high thermal insulation. Furthermore, application of the shotcrete method^{1), 2)} requires no installation form, enabling shortened installation time.

3. 2 Dry vibration material applied lining

Although the risk of crack penetration can be reduced by applying the multilayer, each castable materials layer is a monolithic body with a low stress relaxing ability. Therefore, castable linings essentially cannot eliminate the possibility of cracking. Furthermore, if the each layer is bonded together after long term use, the possibility of cracking is enhanced.

A structure created with dry vibration material which can solve these problems and improve reliability is shown in Fig. 2(c). The dry vibration material is a dry powder which is installed by the vibration-filling method. In the case of side wall installation, it is necessary to install wall blocks in advance to ensure the space for installation of dry vibration material because the material has little mechanical strength.

Because the dry vibration material remains in a powder condition even after installation, essentially no cracks can occur in the layer of this material. Hence, even if cracks occur in the castable material layer, risk of the crack

4. パーマライニング用不定形材の開発

4. 1 パーマライニング用キャストブル

4. 1. 1 設計思想

長期間使用されるパーマライニング用キャストブルには、耐食性の高さに加えそれを長く維持することが求められる。また、溶融物漏出の主要因となる亀裂を抑制すべく高い耐スポーリング性が求められる。さらには、補修のためにウェアライニングを解体する場合に、パーマライニングは解体されずに健全に残存する必要がある、高強度であることが必須条件である。

樋ウェアライニング用キャストブルには炭素原料を積極的に活用したアルミナ-炭化ケイ素-炭素系材料が一般的に使用されるが^{3),4)}、炭素原料は酸化に弱く、長期間使用されるパーマライニングには適さない。そこで比較的酸化に強い炭化ケイ素を多く活用したアルミナ-炭化ケイ素質をパーマライニング用キャストブルの基本組成とし、炭化ケイ素原料は耐酸化性に優れたものを選択的に使用した。

さらに、ウェアライニングほどの高温に曝されることが少なく、焼結による強度発現が生じにくいパーマライニングにおいて十分な強度を確保するため、比較的低温でも強度発現が期待できるケミカルバインダー系を採用した。

4. 1. 2 特性評価

Fig. 3にウェアライニング用メタルライン材と、パーマライニング用キャストブルの侵食試験結果を示す。また、Table 1にそれらの化学組成を示す。長期使用時の耐食性の変化を把握する目的で、実際の樋で使用されたものと未使用のものとを比較評価した。パーマライニング用キャストブルについては、約1年稼働し、約1,020千トン通銑後の樋で回収した材料からウェアライニングに隣接する部位を切り出して試験に供した。ウェアライニング用材料についても同じ樋で使用され、同じ期間残存した材料を回収し、パーマライニン

g penetration to the back side can be drastically reduced.

4. Development of Unshaped Materials for Permanent Lining

4. 1 Castable material for permanent lining

4. 1. 1 Design concept

Castable materials for the permanent lining should maintain high corrosion resistance for a long term. High spalling resistance is also required to reduce cracking which is the main cause of leakage of molten iron and slag. Furthermore, the castable materials must have high mechanical strength to prevent damage caused by demolition of the wear lining during the repairing process.

Alumina-silicon carbide-carbon materials containing a relatively large amount of carbon raw materials are generally used for the wear lining of the trough^{3),4)}, however, they are not suitable for the permanent lining for which long term use is required because carbon raw material is easily oxidized. Accordingly, we applied an alumina-silicon carbide material with a relatively large amount of silicon carbide, which is resistant to oxidation, for the permanent lining. Silicon carbide raw materials with especially superior oxidation resistance were selectively used.

We also adopted a chemical binder which gives some strength even at low temperature to ensure enough strength as a permanent lining, where the strength increase of castable material by sintering does not progress much because the permanent lining is not exposed to high temperatures like the wear lining.

4. 1. 2 Evaluation of characteristics

We carried out a comparative evaluation comparing materials used in an actual trough with unused materials in order to grasp the

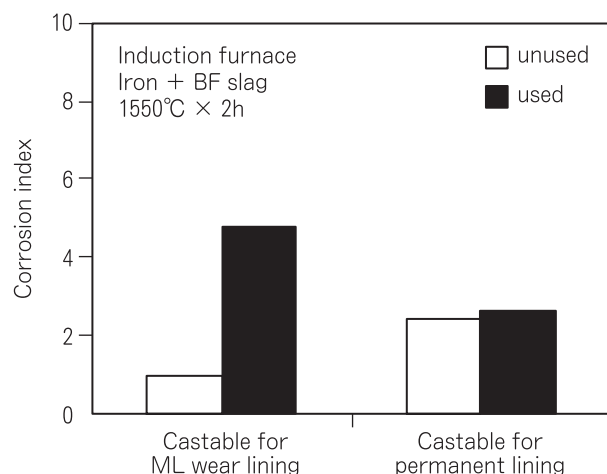


Fig. 3 Result of corrosion test with unused and used castable for wear lining and permanent lining.

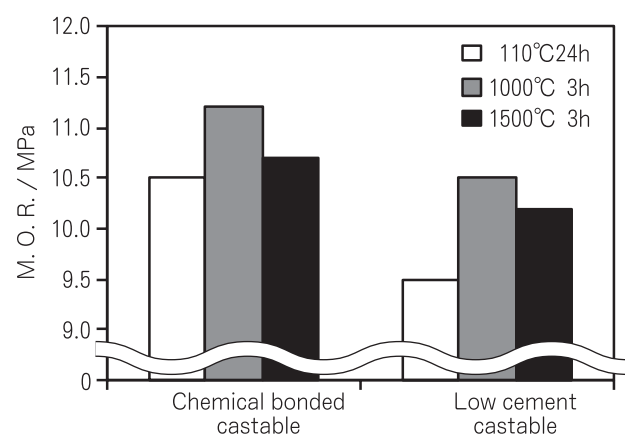


Fig. 4 Comparison of modulus of rupture between chemical bonded castable and low cement castable.

グに隣接する部位から試験片を切り出して試験に供した。

ウェアライニング用の材料は未使用の状態では高い耐食性を示したが、施工後長期間経過したものでは、耐食性が大幅に低下した。これに対してパーマライニング用キャストブルは未使用の状態ではウェアライニング用の材料の耐食性に劣るが、施工後長期間経過しても耐食性はほとんど変化せず、施工後1年経過した段階ではウェアライニング用の材料よりも良好な耐食性を示した。

Table 1 Chemical composition of castable and dry vibration material for permanent lining (/mass%)

	Castable for permanent lining	Castable for metal line of trough	Dry vibration material for permanent lining.
Al ₂ O ₃	70	67	93
SiO ₂	8	1	2
MgO	-	13	-
SiC	20	11	-
C	-	6	2

change in corrosion resistance caused by long term use. The results of the corrosion test of the castable materials for the metal line of the wear lining and for the permanent lining are shown in Fig. 3 and the chemical composition of these samples is shown in Table 1.

Specimens of the used permanent lining castable were taken from castable used for about one year (1.02 million tons of molten iron through put). The wear lining castable specimens were taken from the part adjacent to the permanent lining.

The unused wear lining material showed high corrosion resistance, but its corrosion resistance was lowered by long term use. On the other hand, the permanent lining material showed lower corrosion resistance than the wear lining material, however, the resistance did not deteriorate much even after long term used. When it was used for about one year, the permanent lining material showed better corrosion resistance than the wear lining material.

Fig. 4 shows the modulus of rupture of the permanent lining castable and the low cement castable which has the same composition as the permanent lining material and uses cement as the binder. The chemical bonded castable showed higher strength than the cement-bonded castable over the whole temperature range, especially under 1000°C.

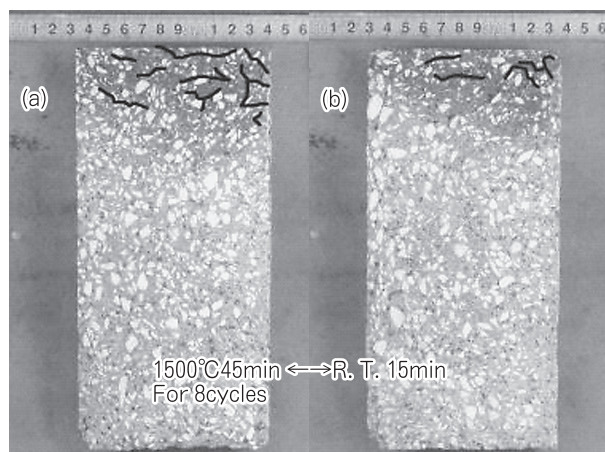


Fig. 5 Result of spalling test ; (a) low cement castable, (b) chemical bonded castable.

Fig. 4にパーマライニング用キャストブルと、同じ組成でバインダーとしてセメントを用いた低セメントキャストブルの加熱後の曲げ強さを示す。全温度域でケミカルボンドキャストブルが高い強度を示し、特に1000℃以下の温度で高い強度を示した。

また、スポーリング試験の結果をFig. 5に示す。試験は1500℃片面加熱45分、室温15分放冷を8回繰り返し、亀裂の発生状況を比較することにより行った。低セメントキャストブル(Fig. 5(a))では多数の亀裂が発生していたのに対し、ケミカルボンドキャストブル(Fig. 5(b))では亀裂発生は少数にとどまっております、耐スポーリング性に優れた材料であるといえる。

4. 2 パーマライニング用乾式振動成型材

4. 2. 1 設計思想

乾式振動成型材は不定形材の一種で、現在不定形材の主流となっている流し込み材とは異なり、水分を添加せず乾燥粉末状の材料を投入し、振動を与えることで粒子の自重で自然充填させ施工体を得る。流し込み材と比較して施工が簡便、乾燥が不要であり爆裂のリスクがない、またスタンプ材等と比較して施工ムラが生じにくく均一な施工体が得られるという特徴を有している。これらの

The results of the spalling test are shown in Fig. 5. The test was carried out by the following method; one side of the specimens was heated at 1500℃ for 45 minutes and cooled at room temperature for 15 minutes. This procedure was repeated alternately 8 times, after that, the specimens were compared for the occurrence of cracks. As shown in Fig. 5(a), many cracks were observed in the specimen of the low cement castable material. On the other hand, fewer cracks were observed in the specimen of the chemical bonded castable material. This result indicates that the chemical bonded castable material is also superior in spalling resistance.

4. 2 Dry vibration material for permanent lining

4. 2. 1 Design concept

Dry vibration material is one of the unshaped refractories that is installed in a dry powder condition by the vibration-filling method without adding water unlike mainstream unshaped refractories such as castables. In comparison with castables, dry vibration material has the advantages of easy installation and no risk of steam explosion during drying. It also has the advantage in forming a uniform installation body in comparison with ramming material because the ramming often causes unevenness in density due to a level of skill of workers. Based on these characteristics, dry vibration materials are utilized as a repairing material for some furnaces, and were also used as the wear lining for blast furnace troughs around the 1980's.

General dry vibration materials have certain strength by the effect of binder. As for the dry vibration material for the permanent lining of the trough, we designed the material to have little strength even after heating on the basis

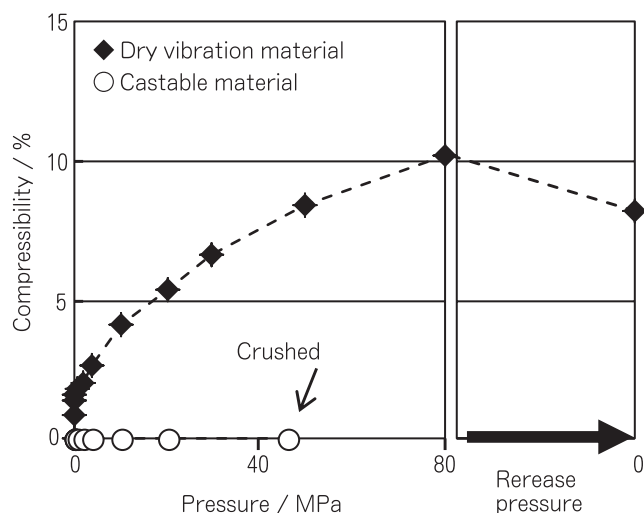


Fig. 6 Compressibility of dry vibration material.

特徴を生かし各窯炉の補修用の材料として使用されており、高炉樋用としても1980年ごろウェアライニング用に使用されていた。

一般的な乾式振動成型材は結合剤等の効果により一定の強度を有するが、パーマライニングに適用するにあたり、亀裂の発生や進展を防止するため使用中も粉末状態を維持するのが好ましいと考え、加熱されてもほとんど強度が発現しない設計とした。また粉末状態を維持することにより大きな可縮性を付与でき、熱膨張によって周囲の構造体に発生する応力を緩和して耐火物や鉄皮構造物を保護する効果が期待できると考えた。

4. 2. 2 特性評価

Table 1にパーマライニング用乾式振動成型材の化学組成を示す。耐食性や長期安定性を考慮し、高アルミナ組成としている。Fig. 6に乾式振動成型材を加圧した際の圧縮率の変化を示す。圧縮率は円筒容器に材料を振動充填した後、上方より一定速度で加圧板を降下させときの変位より求めた。この材料は大きな可縮性を有しているほか、圧力解放時にはある程度の弾性回復挙動を示している。このことは乾式振動成型材が周囲構造体の応力緩和に有効だけでなく、冷却による圧力解

of the concept that it is desirable to keep the dry material in a powder condition to prevent cracking and crack propagation. In addition, the dry material can have a large compressibility as long as it retains a powder condition, hence it can be expected to protect refractories and steel shell by relaxing the stress caused by the thermal expansion difference in and around the permanent lining.

4. 2. 2 Evaluation of performance

Chemical composition of the newly developed dry vibration material for the permanent lining is shown in Table 1. The material has a high-alumina composition in consideration of corrosion resistance and long term stability. Compressibility of the material is shown in Fig. 6. The compressibility was obtained by measuring the displacement of the pressure head when the pressure head on the material filled in cylindrical mold with vibration was pushed down at constant speed.

The dry vibration material showed a large compressibility property and a good elastic recovery property. This indicates that the dry vibration material is not only effective in relaxation of stress but also effective in preventing the appearance of a gap caused by pressure releasing at the time of cooling.

The result of the corrosion test is shown in Fig. 7. The specimens were prepared by filling materials into the mold with vibration and heating at 200°C for 24 hours. There was no leakage of molten iron or slag through the dry material specimen and the dry vibration material showed a corrosion resistance close to the castable material for the permanent lining.

Strength of dry vibration material increases slightly after heating because of containing minimum quantity of binder for preventing flowing out, but the strength decreases and

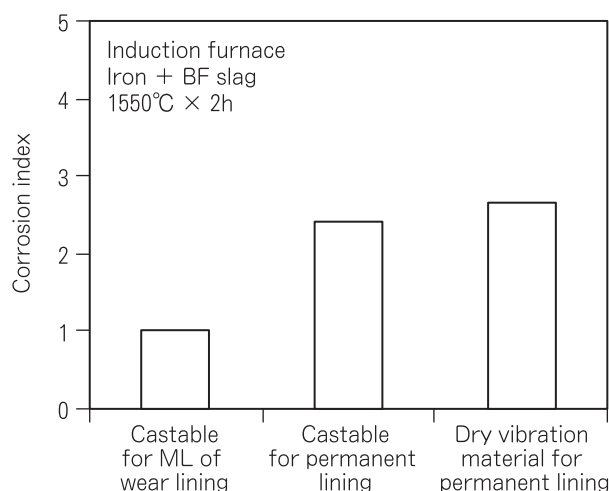


Fig. 7 Result of corrosion test with castable for ML wear lining, castable for permanent lining and dry vibration material for permanent lining.

放時に隙間が発生するのを抑制する効果も期待できる。

Fig. 7に侵食試験結果を示す。試験用試料は成形用容器に振動充填した乾式振動成型材を200℃で24時間加熱して得た。試験中に材料が流失することはない、パーマライニング用キャストブルに準ずる耐食性を示した。加熱された乾式振動成型材は流出防止用のバインダーによってわずかに強度を発現するが、さらに加熱することで強度を失って容易に粉末状に戻り、稼働中は鉄皮保護の効果を発揮する。また、溶融物に接するような高温にさらされると、高温用バインダーによって硬化し溶出を防ぐ (Fig. 8)。このことより、万が一溶融物に曝された場合にも容易に流出したり溶損したりすることはないといえる。

5. まとめ

パーマライニングは不定形化によってれんが施工から省力化、工期短縮が可能である。不定形化の課題として、耐食性や長期安定性の確保、および貫通亀裂の抑制があげられる。これらの課題に対し、長期にわたり高い耐食性を維持し、耐スポー

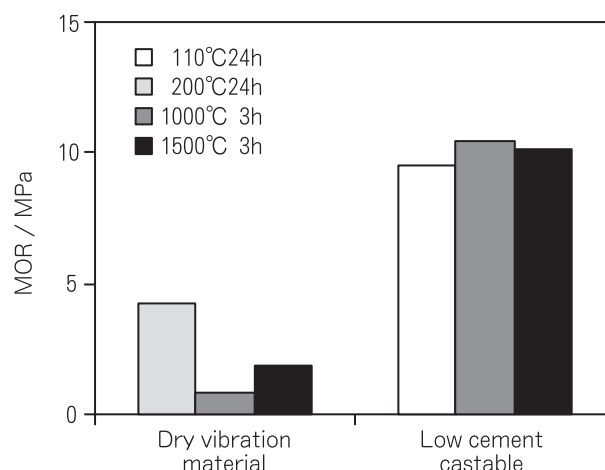


Fig. 8 Modulus of rupture of dry vibration material and low cement castable.

returns to a powder state easily when the temperature becomes higher, so the material is effective in protecting the steel shell during service. Moreover, when the dry vibration material is heated to a temperature of molten iron or slag, the material is hardened by the effect of another binder (Fig. 8). Due to this behavior of hardening, even if the material is exposed to the melt, it is possible to prevent the collapse or erosion of dry material.

5. Summary

By applying unshaped materials, the work and the time required to construct the permanent lining can be reduced. The problems which needed to be solved when applying unshaped materials to the permanent lining are retaining a high corrosion resistance for long term use and reduction of crack penetration.

In order to solve these problems, we developed a new castable for the permanent lining which has not only high spalling resistance and high strength, but can also retain high corrosion resistance for a long term. We also developed a

リング性や強度特性に優れるパーマライニング用キャストブルを開発した。また、貫通亀裂のリスクを大幅に抑制し、かつ優れた応力緩和能により鉄皮等の構造物を保護可能なパーマライニング用乾式振動成型材を開発した。これらの材料を組み合わせることで適用することにより、優れた性能を長期間安定して発揮する不定形パーマライニングを提供することが可能となった。

dry vibration material for the permanent lining which can reduce drastically the risk of crack penetration and can protect the peripheral structures such as the steel shell by its stress relaxation ability. By applying these materials in combination, we have been able to provide a permanent lining composed of unshaped materials which performs stably for a long term.

References

- 1) Y. Hamazaki, T. Kaneshige, S. Nagai, H. Sumimura and M. Namba : Shinagawa Technical Report, **41**, 7-14 (1998)
- 2) R. Nakamura, T. Kaneshige, H. Sumimura and M. Namba : Shinagawa Technical Report, **43**, 59-66 (2000)
- 3) M. Kitamura, K. Enoki : Shinagawa Technical Report, **48**, 51-56 (2005)
- 4) M. Kitamura, T. Iida, Y. Niiya : Shinagawa Technical Report, **53**, 65-68 (2010)