

取鍋用流し込み材の軽量化についての検討

Study of Weight Saving for Ladle Castables

難 波 誠^{*1}
Makoto NAMBA

佐々木 久 晴^{*2}
Hisaharu SASAKI

西 村 雅 史^{*3}
Masafumi NISHIMURA

Abstract

In the steel making process, the reduction of heat loss caused by heat being absorbed and stored in refractories is highly effective for lowering molten steel temperature drop. We studied to make ladle castables with low heat capacity and lightweight. Hollow alumina aggregate is used in alumina magnesia castables in order to reduce weight. Application of the hollow alumina to alumina magnesia castable was examined, and an appropriate additive amount and grain size were found. The effect of the heat loss reduction attained by the new lightweight castable was calculated with an actual ladle model.

1. 緒言

現在、地球温暖化対策が盛んに唱えられており、環境対策技術には高い関心が寄せられている。各種窯炉において熱ロス抑制方法の検討が活発となっており、製鋼用取鍋においても溶鋼の温度ドロップ抑制の要望が強い¹⁾。取鍋における熱ロス（損失）の割合をFig. 1に示す。溶鋼からの熱損失割合を考えると鉄皮からの熱放散よりも耐火物への蓄熱により損失していることが分かる。すなわち取鍋において耐火物への蓄熱を抑制することが、最も溶鋼温度ドロップ抑制効果が高い。本報告では、耐火物中への抜熱抑制を目的に、取鍋内張り材の軽量化、低熱伝導化に向けて検討を行った。軽量化の手法として、アルミナ・マグネシア質流し込み材に中空アルミナ骨材を用いた。過去にアルミナ・スピネル質に中空アルミナを適用し、温度ドロップ抑制、ビルドアップの低減について効果を見出したとの報告がある²⁻³⁾が、現在

1. Introduction

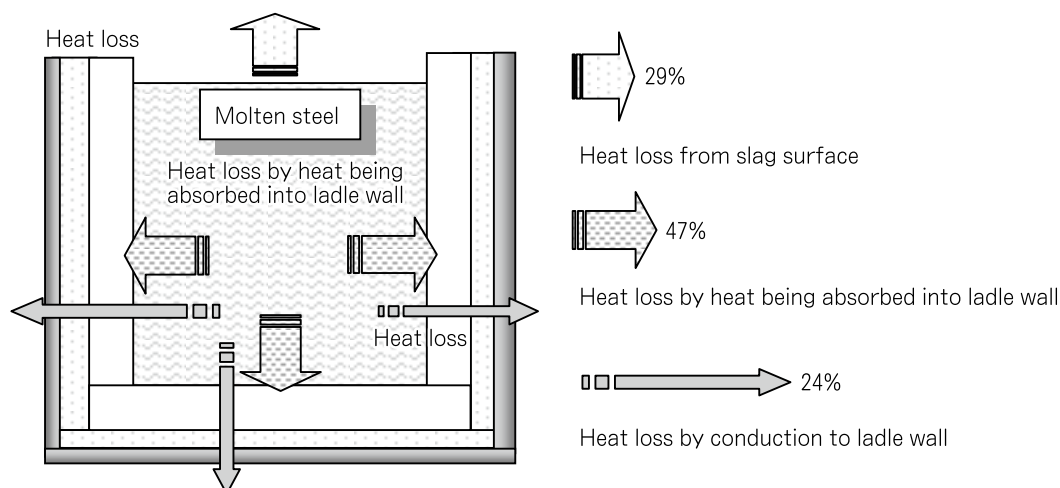
Countermeasures for global warming are being taken now. Environmental technology is very important. Heat loss in various furnaces was examined. Demands for controlling molten steel temperature drop in the ladle are strong. Fig. 1 shows the rate of heat loss from molten steel in the ladle. It is thought that the ratio of heat loss by heat stored in the ladle wall is higher than heat loss by conduction to shell. Reducing the rate of heat loss by heat stored in refractories is highly effective for controlling molten steel temperature drop.

We carried out research in order to make ladle wall material with low thermal conductivity and lightweight. Hollow alumina aggregate was used for the alumina magnesia castable as a technique of weight reduction. There have

^{*1} 技術研究所 第2研究グループ グループマネージャー Manager, Unshaped Refractories R&D Group, Research Center

^{*2} 技術研究所 第2研究グループ チームリーダー Team Manager, Unshaped Refractories R&D Group, Research Center

^{*3} 技術研究所 第2研究グループ Unshaped Refractories R&D Group, Research Center

Fig. 1 Thermal analysis of ladle.¹⁾

取鍋用ワーク材として主流であるアルミナ・マグネシア質へ適用した報告は見られない。

軽量取鍋内張り材を用いた場合のメリットとして、低熱伝導率化による熱放散(溶鋼温度ドロップ抑制)に加え、施工所要量の低減が考えられる。一方、懸念される問題点として、流動性の悪化、骨材の分離、強度低下、耐スラグ性の低下等が考えられる。

アルミナ・マグネシア質キャストブルへの中空アルミナ適用を検討するにあたり、予想される問題点の確認を行うとともに、適当な添加量、添加粒度を求めた。その後実機取鍋モデルを想定し、熱ロス低減の効果を検証した。

2. 実験

2.1 供試々料

供試々料として $\text{MgO} = 7\%$ 、 $\text{SiO}_2 = 1\%$ クラスのアルミナ・マグネシア質キャストブルを用いた。

ベース試料(サンプルNo.1)は骨材として焼結アルミナ(嵩比重=3.75)を使用し、その他の試料は中空アルミナ骨材の粒度と添加量を変化させた。中空アルミナは焼結アルミナと比較すると非常に低嵩比重(嵩比重: -5mm=約0.9, -3mm=約1.1)なためvol%で添加量を検討し、相当量の焼結アルミナの各粒度と置換した。供試々料の概要をTable 1に示す。

been reports of applying hollow alumina for alumina-spinel castable in the past, and having confirmed the effect of controlling molten steel temperature drop and the decreasing build-up on the ladle wall. There have been no articles however, about applying hollow alumina to alumina magnesia castable, which is an important ladle material.

If lightweight castable is adapted to actual furnaces, many merits will be had such as low thermal conductivity to control molten steel temperature drop, and weight reduction will reduce casting requirements. But it is feared that reducing the flow ability will cause separation of alumina aggregates, which will reduce strength, and reducing corrosion resistance.

Applying hollow alumina to alumina magnesia castable was examined. The expected problems were confirmed. And appropriate additive amounts and grain sizes were examined. After that, a ladle model was assumed. And the effect of the heat loss decrease was verified.

2. Experimental Procedures

2.1 Test sample

We used ladle castable ($\text{MgO}=7\%$, $\text{SiO}_2=1\%$)

Table 1 Properties of castables

Sample No.		1	2	3	4	5	6	7
Hollow Alumina /vol% (/mass%)	-5mm	—	10 (2.6)	15 (4.1)	20 (5.7)	—	—	—
	-3mm	—	—	—	—	10 (3.1)	15 (4.9)	20 (6.8)

2. 2 試験項目

中空アルミナの適用が取鍋内張り材の各種特性に与える影響を調査した。

2. 2. 1 施工性

各サンプルの練り性状を確認するため、V5フロー（5秒間振動フロー）値を190～210mmの範囲で調整した際の各サンプルの混練に必要な添加水分量を確認した。また骨材の分散の様子を確認するため115×114×65mmの形状にサンプルを鑄込み、それぞれ60秒間振動を加えた。その後切断面を観察し、中空アルミナ骨材が均等に分散しているかどうかを確認した。

2. 2. 2 品質特性

各サンプルの特性値（曲げ強さと圧縮強さはJIS R 2553に準ず、見掛け気孔率と嵩比重はJIS R 2205に準ず）を測定した。曲げ強さは40mm×40mm×160mm、圧縮強さと気孔率と嵩比重は40mm×40mm×40mmのサンプルを作成し105℃-24h乾燥後、1000℃-3h加熱後、1500℃-3h加熱後の条件にて測定した。

2. 2. 3 耐スラグ性

各サンプルの耐食性を調査するため回転ドラム侵食試験を行った。熱源はアーク加熱を用い試験温度は1650℃-3hで行った。スラグは転炉スラグ（C/S=3、FeO=25%）を用いた。

2. 2. 4 耐熱スポーリング性

耐熱スポーリング性の評価を行うため電気炉を使用し以下の試験を行った。

試験片寸法：230×114×65mm（並型形状）

加熱方法：片面加熱冷却

加熱温度、時間、回数：

（1500℃-45分⇔常温-15分）×8回

for this study. Sintered alumina (bulk density=3.75) was applied to the base sample (sample No.1) as an aggregate. Hollow alumina was applied to the other samples as an aggregate, and we changed the amount and grain size of the hollow alumina. Hollow alumina(bulk density: -5mm≒0.9, -3mm≒1.1) has a much lower bulk density than sintered alumina, so that the additive amount was studied by using vol%, and we substituted hollow alumina of the same grain size sintered alumina. Table 1 shows the properties of the test sample.

2. 2 Experiment item

We examined the influence of applying the hollow alumina to alumina magnesia castable on each property.

2. 2. 1 Installation properties

To confirm the installation properties, we measured the amount of water addition when flow ability was set to V5 flow value=190～210mm. 115×114×65mm samples were made to confirm the dispersibility of hollow alumina, and we added vibration for 60 seconds. After that, we observed the cut surface, and we confirmed the Decentralization of hollow alumina.

2. 2. 2 Properties

Each property of the samples was measured (Modulus of rupture and cold crushing strength in compliance with JIS R 2553, Bulk density and apparent porosity in compliance with JIS R2205. 40×40×160mm samples were made to measure Modulus of rupture, and 40×40×40mm samples were made to measure the cold crushing strength, Bulk density and apparent porosity. We measured each samples after drying at 105℃-24h, after heating 1000℃-3h and 1500℃-3h.

2. 2. 3 Corrosion resistance

A rotary drum corrosion test was performed to confirm the corrosion resistance of each

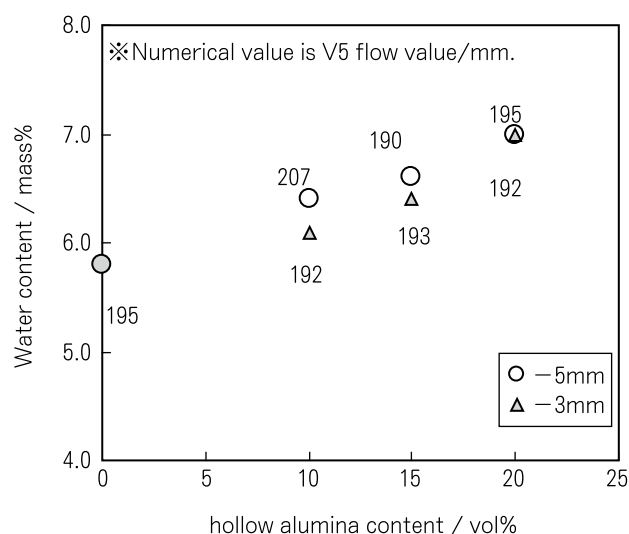


Fig. 2 Relation of hollow alumina content, V5 flow value and water content.

2. 2. 5 熱伝導率

熱線法を用いて熱伝導率の測定を行った。測定サンプルはNo.1, No.2, No.3, No.4とし、形状は115×114×65mmで、1000℃-3h焼成して作成した。

3. 試験結果

3. 1 施工性

3. 1. 1 流動性

Fig. 2に各サンプルの中空アルミナ添加量の変化に伴う添加水分量 (mass%) とV5フロー値の関係を示す。

V5フロー値190~210mmを目安に調節して混練を行うと、添加水分量は中空アルミナ添加量 (-5mm, -3mm) の増加に従い若干の増加傾向を示した。

3. 1. 2 中空アルミナ骨材の分散性

Fig. 3に成型後各サンプルの切断面写真を示す。尚、粒径の大きな中空アルミナ骨材を丸で囲み標記した。

切断面の様子から、中空アルミナ骨材が目立った分離は見られず、略均等に骨材が分散していることが確認された。マトリックスの粘りにより分離が抑制できていると考えられる。

sample. The heat source was an electric-arc element, the examination temperature was 1650℃-3h, and converter slag (C/S=3, FeO=25%) was used.

2. 2. 4 Thermal spalling resistance

To evaluate the thermal spalling resistance of each sample, the following test was performed using on electric furnace.

Sample size: 230×114×65mm (standard brick)

Heat method: One side heating cooling

Heat temperature, time, and frequency: (1500℃-45min ⇔ 20℃-15min) × 8times.

2. 2. 5 Thermal conductivity

The thermal conductivity was measured by hot wire method. Sample No.1,2,3,4 were measured, and we made 115×114×65mm samples and used those samples after heating at 1000℃-3h.

3. Results

3. 1 Installation properties

3. 1. 1 Flow ability

Fig. 2 shows the relation among amount of the hollow alumina content, V5 flow value and water content (mass %).

When the water content was adjusted and mixed so that the V5 flow value might become 190~210mm, the water content showed some increasing tendencies with increased hollow alumina (-5mm, -3mm) contents.

3. 1. 2 Hollow alumina dispersibility

Cut surface pictures of each samples are shown in Fig. 3. In addition, big grain size hollow alumina aggregate is circled.

From the appearance of the cut surfaces, it was confirmed that hollow alumina aggregate didn't separate, and had been dispersed. It is thought that the separation was controlled by the viscosity of the matrix.

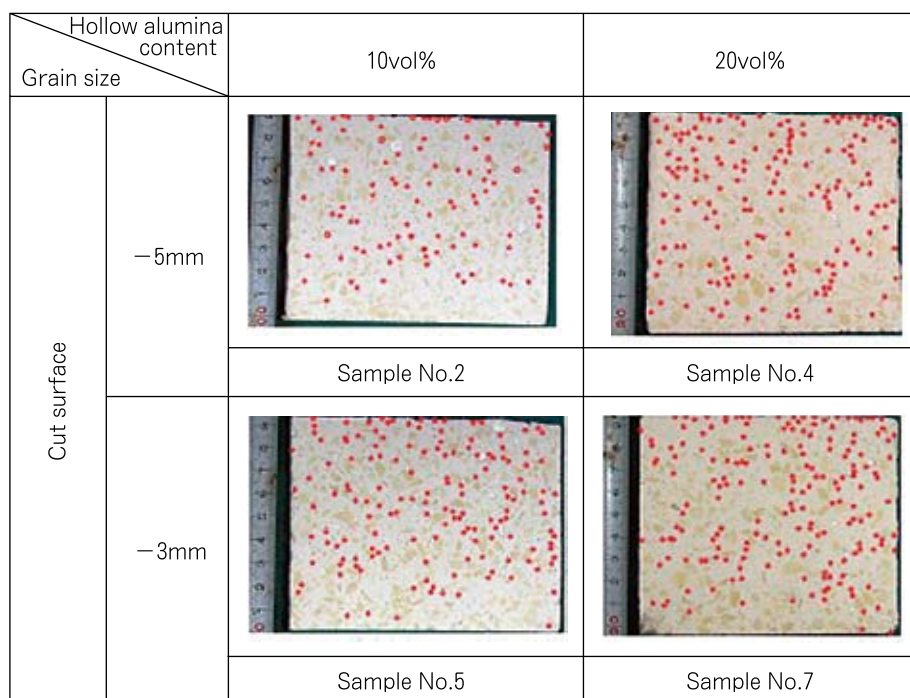


Fig. 3 Appearance of hollow alumina dispersion.

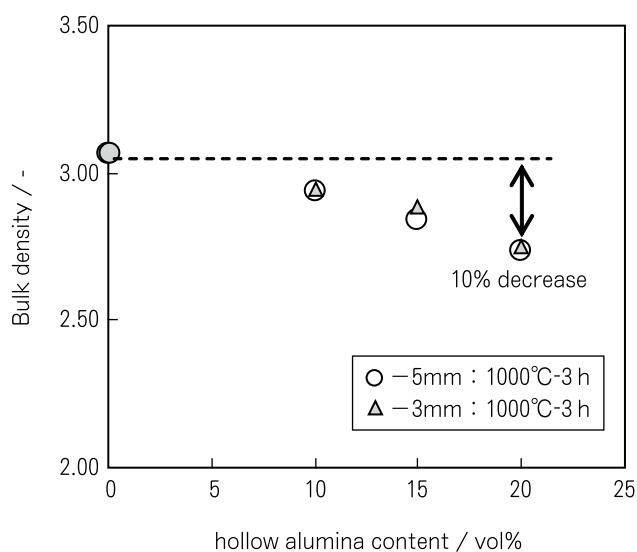


Fig. 4 Bulk density after 1000°C-3h.

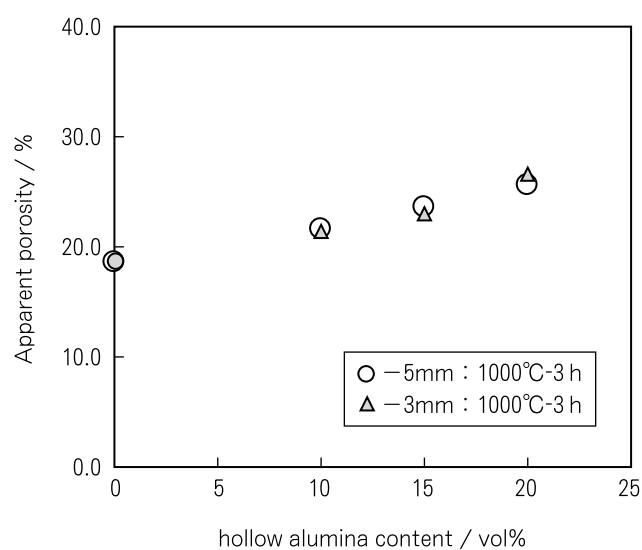


Fig. 5 Apparent porosity after 1000°C-3h.

3. 2 品質特性

3. 2. 1 嵩比重, 見掛け気孔率について

中空アルミナ添加量の増加に伴う1000°C-3h加熱後嵩比重の変化をFig. 4に, 見掛け気孔率の変化をFig. 5に示す。

中空アルミナ添加量の増加に従い嵩比重の減少

3. 2 Properties

3. 2. 1 Bulk density and apparent porosity

Fig. 4 and Fig. 5 show the relation between the hollow alumina content, bulk density and apparent porosity after 1000°C-3h heating.

The Bulk density decreased with the increase

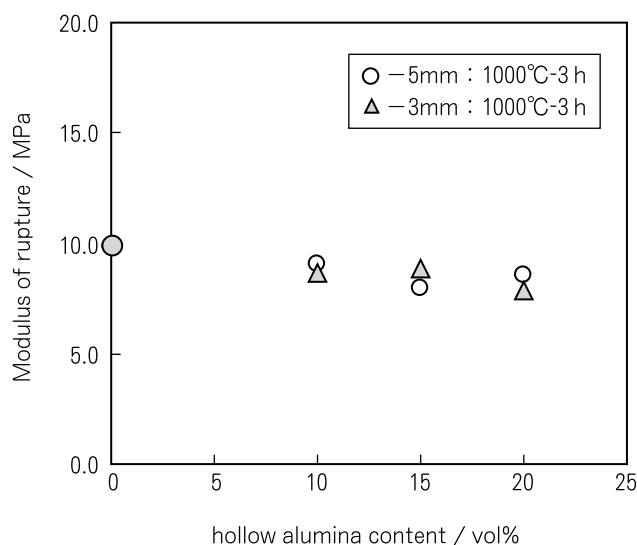


Fig. 6 Modulus of rupture after 1000°C-3h.

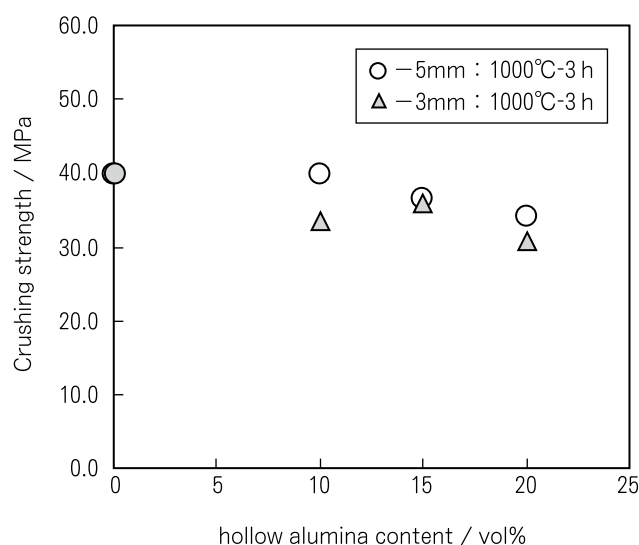


Fig. 7 Crushing strength after 1000°C-3h.

が見られた。また、それに伴い見掛け気孔率も増加傾向にある。中空アルミナの粒度による違いは認められなかった。

3. 2. 2 曲げ強さ、圧縮強さについて

中空アルミナ添加量の増加に伴う1000°C-3h加熱後曲げ強さの変化をFig. 6に、圧縮強さの変化をFig. 7に示す。

曲げ強さは中空アルミナ添加量の増加に伴い低下し、20vol%添加すると10MPa→8MPaとなった。圧縮強さも40MPa→30MPaへ低下したが、-3mm使用品と比較して-5mm使用品の方が強度が高い傾向となった。

3. 3 回転ドラム侵食試験結果

回転ドラム侵食試験後サンプルの切断面写真をFig. 8に示す。また、中空アルミナ添加量と侵食量、スラグ浸潤量の関係をFig. 9に示す。

中空アルミナの添加量の増加に従い、耐食性は低下する傾向であるが、耐スラグ浸潤性は溶損の影響を受けていると考えられ、傾向がやや不明瞭な結果となった。

中空アルミナ粒度の影響については、-3mm使用品は-5mm使用品と比較して添加量が15vol%までは耐食性にやや優れる傾向となったが、添加量が15vol%から20vol%にかけて-3mm使用品の溶損が急に大きくなった。

in hollow alumina content. And the apparent porosity increased with the increase in hollow alumina content. There was no difference caused by the hollow alumina grain size.

3. 2. 2 Modulus of rupture and cold crushing strength

Fig. 6 and Fig. 7 show the relation between modulus of rupture, cold crushing strength and hollow alumina content after 1000°C-3h heating.

The Modulus of rupture decreased with the increase in hollow alumina content. When a hollow alumina content of 20vol% was added, the modulus of rupture decreased from 10MPa to 8MPa. Similarly, the cold crushing strength decreased from 40MPa to 30MPa. However, the -5mm hollow alumina sample had a tendency to have higher strength than the -3mm hollow alumina used sample.

3. 3 Rotary drum corrosion test results

The cut surface pictures of each sample after the rotary drum corrosion test are in Fig. 8. Fig. 9 shows the relation between the hollow alumina content, and the corrosion depth and slag penetration depth.

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7
Cut surface							
Corrosion depth /mm	9.0	10.5	11.6	11.8	9.5	10.1	12.6
Penetration depth /mm	5.4	5.9	5.6	5.8	6.6	7.1	6.4

Fig. 8 Results of corrosion test.

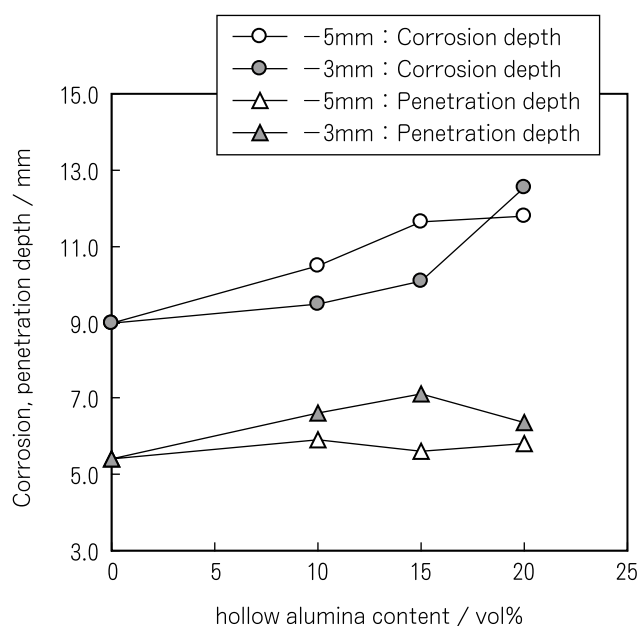


Fig. 9 Results of corrosion test.

3. 4 スポーリング試験結果

スポーリング試験結果をFig. 10に示す。

中空アルミナ適用による耐熱スポーリング性の低下は見られず、むしろ向上する結果となった。

3. 5 熱伝導率

各サンプルの測定温度毎の熱伝導率をFig. 11

Corrosion resistance decreased with the increase in hollow alumina content. However, Slag penetration resistance was thought to have been influenced by corrosion, and the tendency was indistinct.

About the influence of the hollow alumina grain size, the -3mm hollow alumina sample had superior corrosion resistance compared with the -5mm hollow alumina sample up to an addition of 15vol%. Though, the corrosion depth of the -3mm hollow alumina sample grew suddenly when the hollow alumina addition was increased from 15vol% to 20vol%.

3. 4 Thermal spalling test results

Fig. 10 shows the thermal spalling test results.

No decrease in thermal spalling resistance because of hollow alumina addition was seen.

3. 5 Thermal conductivity

Fig. 11 shows the thermal conductivities of the samples.

Thermal conductivity decreased with the

Sample No.	1	2	3	4
Cut surface				
Evaluation	B	B	A	A

Sample No.	5	6	7
Cut surface			
Evaluation	B	B	A

Good=A>B=Bad

Fig. 10 Results of thermal spalling test.

に示す。

中空アルミナの添加量の増加に従い熱伝導率は低下する傾向である。中空アルミナ20vol%適用サンプルNo.4はベース（サンプルNo.1）と比較して1000℃の熱伝導率において約27%の低減が見られた。

3. 6 実験結果のまとめ

- ・中空アルミナを20vol%添加することにより添加水分量がベース材と比較して約1.2mass%増加する。しかし、練り性状に問題はなくまた骨材

increase in hollow alumina content. No.4 conductivity was about 27% lower than No.1 when the samples were heated at 1000℃.

3. 6 Conclusion of test results

- ・ Water content increased 1.2% in the light-weight product (hollow alumina=20vol%) with increased hollow alumina content compared with the ordinary product.

But it was confirmed that the hollow alumina aggregate didn't separate, and had been

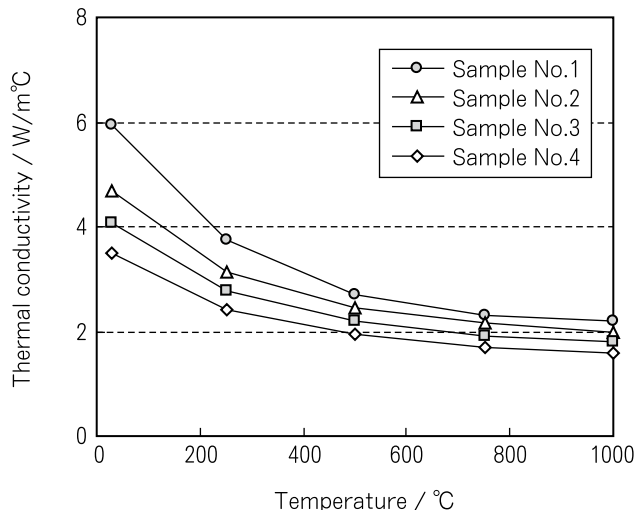


Fig. 11 Thermal conductivity of samples.

の目立った分離も見られなかった。-5 mm, -3 mm共に20vol%の添加量までなら十分に施工可能と考えられる。

- ・ 1000℃加熱後強度は中空アルミナの添加量の増加に従い低下する。しかし20vol%の添加でも曲げ強さ8MPa, 圧縮強さ30MPaであり, この範囲であれば過去の実績から実機適用可能であると考ええる。
- ・ 中空アルミナの添加量の増加に従い耐食性は低下する傾向にある。
- ・ 中空アルミナの添加による, 耐熱スポーリング性の低下は認められない。
- ・ 中空アルミナの粒度について, -5 mmと-3 mmを20vol%適用したサンプルを比較すると, 施工性, 嵩比重は略同等であり, 加熱後強度, 耐熱スポーリング性についても大きな差は見られなかった。

以上の結果から, 中空アルミナ20vol%までの添加量であれば実機施工が可能であると考えられるが, 耐スラグ性は低下するため適用する取鍋の状況を事前に精査する必要がある。

dispersed. It is thought that lightweight products can be cast on the actual furnace by using -5mm and -3mm aggregate, if the additive amount is about 20vol% or less.

- ・ The Modulus of rupture decreased with the increase in hollow alumina content. But with a hollow alumina addition of 20vol%, the Modulus of rupture was 8MPa and cold crushing strength was 30MPa. It is thought by past results that lightweight products can be cast on the actual furnace if the addition is about 20vol% or less.
- ・ Corrosion resistance decreased with the increase in hollow alumina content.
- ・ No decrease in thermal spalling resistance because of hollow alumina addition was seen.
- ・ When -5mm and -3mm aggregate additions were compared. Installation properties, bulk density, heated strength and heat spalling resistance were almost same.

From these results, it is thought that lightweight products can be cast on an actual furnace lining, if the additive amount is about 20vol% or less. But corrosion resistance decreased. So it is necessary to examine the actual ladle condition beforehand.

4. Consideration (steady heat transfer calculations)

4. 1 Set up of actual ladle model

The actual ladle model was made to verify the weight reducing effect when the lightweight ladle castable was adapted for an actual ladle. The actual ladle model is shown in Fig. 12.

4. 2 Result of steady heat transfer calculations

Steady heat transfer was calculated with the ladle model shown in Fig. 12. Sample No.1 and sample No.4 (hollow Alumina=20vol%) were

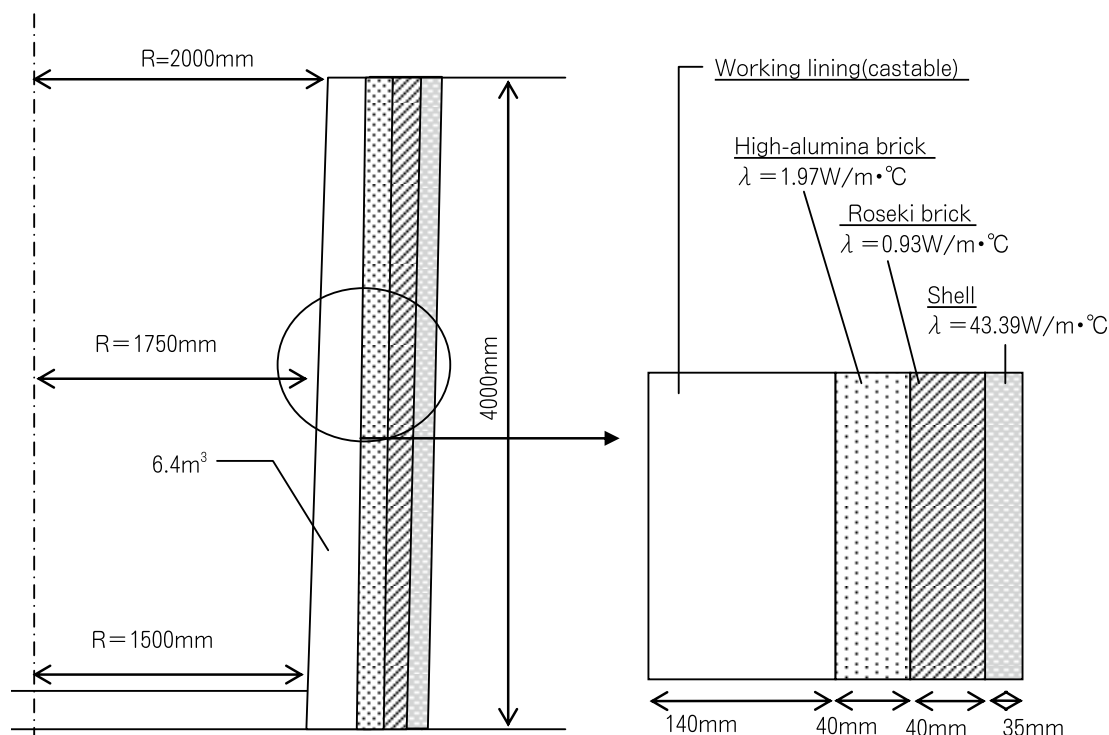


Fig. 12 Ladle model.

4. 考察（定常伝熱計算）

4. 1 実機取鍋モデルの設定

今回検討した軽量化取鍋内張り材を実機に適用した場合の効果を検証するため取鍋モデルを設定した。取鍋モデルFig. 12に示す。

4. 2 定常伝熱計算結果

Fig. 12に示した取鍋モデルを用いて定常伝熱計算を行った。計算はサンプルNo.1と中空アルミナ20vol%適用サンプルNo.4を用いて比較した。結果をFig. 13に示す。

サンプルNo.1と比較して中空アルミナ20vol%適用サンプルNo.4に以下の効果が見られた。

熱伝導率が低下したことにより、内張り材での温度勾配が急になっており、内張り背面温度が107℃低下した（No.1=979℃、No.4=872℃）。またこれらの影響により鉄皮温度も33℃低下した（No.1=364℃、No.4=331℃）。

温度勾配が急になった事によりスラグと耐火物が反応する温度域（1500℃で反応すると仮定し、線を記入）が稼働面側に移動する。1500℃の温度

used to calculate. The results are shown at Fig. 13.

The following effects were seen in sample No.4 (hollow Alumina=20vol%) compared with sample No.1.

The decrease in thermal conductivity made the thermal gradients become steep in the working lining, and the back surface temperature decreased to 107℃ (No.1=979℃, No.4=872℃). the shell temperature also decreased to 33℃ (No.1=364℃, No.4=331℃) by these effects.

The heating range (It is assumed that a reaction occurs at 1500℃, The line is drawn) in which slag reacts with material moved to the working side as thermal gradients grow steep. It was understood that the 1500℃ temperature region moved to the working side by 7.5mm. This will have the effect of reducing the slag penetration depth in an actual ladle. The Difference of thermal gradient is seen more markedly in actual ladles than in the corrosion test sample.

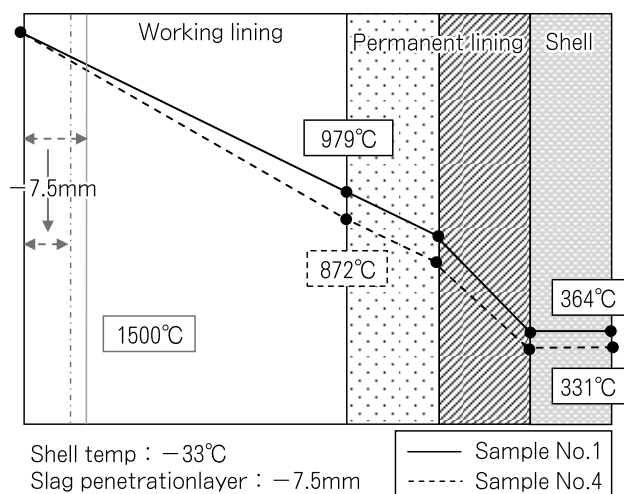


Fig. 13 Thermal gradient in ladle wall.

域を考えると稼働面側に7.5mm移動することが分かった。このことより、回転ドラム侵食試験よりも温度勾配の差が出やすい実炉においてはスラグ浸潤抑制効果が期待される。

4. 3 溶鋼温度低下抑制効果について

Table 2に熱流束計算結果、溶鋼温度低下抑制効果を示す。計算はサンプルNo.1と中空アルミナ20vol%適用サンプルNo.4を用いて行い結果を比較した。

計算結果よりサンプルNo.4では熱流束が1476 W/m²低下した (No.1=9516 W/m², No.2=8040 W/m²)。

これらの結果から、熱放散のみの溶鋼温度低下速度の差を求めると、中空アルミナ20vol%適用サンプルNo.4に-1.46℃/hの溶鋼温度ドロップ抑制効果があることが分かった。

5. まとめ

取鍋用アルミナ・マグネシア質キャストブルの軽量化に向けて、骨材に中空アルミナの適用を検討したところ以下の知見が得られた。

- ①中空アルミナ骨材の添加が施工性に与える影響は少なく、20vol%程度の添加量であれば、実機施工が可能と考える。

Table 2 The effect of the actual furnace application

	Sample No.1	Sample No.4
Heat flux W/m ²	9516	8040
Molten steel temperature drop °C/h	—	-1.46

4. 3 Controlling molten steel temperature drop

Heat flux and the effect of controlling molten steel temperature drop are shown in Table 2.

The result of sample No.1 and Sample No.4 were compared.

From the calculation results, Heat flux decreased 1476 W/m² (No.1=9516 W/m², No.4=8040 W/m²).

From those results, it was understood that the effect of controlling molten steel temperature drop is -1.46℃/h in sample No.4 (hollow alumina=20vol%).

5. Conclusion

We examined the use of hollow alumina in alumina magnesia castable in order to make a ladle wall material with low heat capacity and lightweight. The following were clarified.

- ①The influence of hollow alumina aggregate addition on Installation properties is little. It is thought that lightweight products can be cast on the actual furnace if the additive amount is about 20vol% or less.
- ②The corrosion resistance and after heating strength have a tendency to be decreased by adding hollow alumina aggregate.
- ③The bulk density decreases by 11.1% when hollow alumina is added in 20vol%, and the effect of a decrease in thermal conductivity was achieved. There were no differences in

- ②中空アルミナ骨材の添加によって耐食性及び加熱後強度は低下する傾向にある。
- ③中空アルミナを20vol%添加すると嵩比重が11.1%低減し、熱伝導率の低下効果が得られた。添加粒度の違いによる軽量化効果の差は見られなかった。
- ④中空アルミナ骨材を20vol%添加した材料を無添加材料と比較して、モデル鍋による定常伝熱計算を行ったところ鉄皮温度は約33℃低下する結果となった。
- ⑤定常伝熱計算結果より、温度勾配が急になり、スラグと反応する温度域が稼働面側に移動するスラグ浸潤抑制効果が期待できることが分かった。

the effect of weight reduction by the difference of the aggregate addition grain size.

- ④From the results of heat transfer calculations using an actual ladle model, the shell temperature was reduced by 33℃, compared with an ordinary product.
- ⑤The heating ranges at which slag reacts with material move towards the working lining side, as temperature gradients become steep. This will reduce slag permeation depth in an actual ladles.

References

- 1) Thermal analysis of ladle: NKK technical report (1987)
- 2) H. Nakajima, S. Sudo, N. Hosi, T. Yukinawa, R. Ikuta: Taikabutu, **46** [9] 461-462 (1994).
- 3) S. Sudo, N. Hosi, T. Miwa, T. Yukinawa, R. Ikuta: Taikabutu, **45** [11] 665 (1993).
- 4) K. Sugita: Refractory for the pig iron making and steel making 6 (1995)
- 5) R. Nakamura, T. Kaneshige, H. Sasaki, M. Namba: Shinagawa Technical Report, **46**, 35-44 (2003)
- 6) Ceramic data book: Industrial product technological society 31-39 (1976)