

## 複合吹錬転炉用耐火物技術

© 1990 ISIJ  
/////////  
技術報告  
/////////

国米博之\*・西尾英昭\*

## Refractory Technologies Combined Blowing Converters

Hiroyuki KOKUMAI and Hideaki NISHIO

## Synopsis :

Today's combined blowing converters have been lined almost with MgO-C bricks.

In this paper, wear mechanism of MgO-C bricks particularly for sidewall and tuyere bricks was researched, and then the refractory technologies such as designing of brick qualities, study of brick shapes for tuyeres and of brickwork structure were discussed.

As the result, a small amount addition of Al-Mg alloy to MgO-C bricks showed a great improvement on the oxidation resistance of the bricks.

And the investigation results also indicated that the size distribution with fine grains was quite effective for the densification of brick texture.

Giant vacuum press with super high pressure was introduced to manufacture big size tuyere bricks and bottom bricks.

On the brickwork structure for body and bottom lining, thermal stresses were calculated and the applicable lining method which could reduce them was studied.

**Key words :** refractory ; converter ; top and bottom blowing ; MgO-C brick ; wear.

## 1. 緒 言

転炉用耐火物としてマグネシア-カーボンれんがが出現したことが、複合吹錬を転炉製鋼法の主流にした。高性能耐火物の開発が新しい製鋼プロセスを可能にした代表的な例である。

マグネシア-カーボン（以下 MgO-C と記す）れんがは電気炉のホットスポット用として実績を挙げていたが、転炉の底吹き法の羽口に試用された結果、その優れた熱スポーリング性からその他の既存の耐火物をはるかに超えた成績が得られ、たちまちのうちに羽口用耐火物として主力の位置を占めた。以来、複合吹錬法が開発されるとともに羽口に使用されるのみならず、転炉内張用、出鋼口用としても使用範囲を着実に広げ、複合吹錬を支える主役となるまでに成長した。

本稿ではこの間の品質（材質設計）、製造技術、使用技術（炉壁内張の長尺一層巻き構造・炉底の真円巻・炉底コーナー部の球面構造等）の進歩および変遷について記述するとともに現在抱えるいくつかの課題について言及した。

新しい製鋼プロセスが新しい耐火物を世に出し、次にその耐火物の発展が当プロセスの技術的優位性を高めていった過程を示す。

## 2. MgO-C れんがの損傷機構

耐火物の改良・開発には、使用後れんがの損傷原因解析が重要な意味をもっている。MgO-C れんがの最近の進歩について述べるに当たり、まず、その損傷機構について概説する。

Photo. 1 に複合吹錬転炉の炉底羽口および炉壁（トラニオン部）に使用された MgO-C れんがの切断面を示す。炉壁に使用されたれんがは、緻密な組織を有し切断面は滑らかでき裂も認められない。稼働面からゆるやかに損傷したことが想像される。一方羽口れんがは、表面の凹凸が大きく、また稼働面に平行に近い大小のき裂が多く見られる。れんがの組織は緻密さを保っている。したがって表面からのゆるやかな損傷に加えて、稼働面から 20~50 mm 付近のき裂から不規則に損傷したと推定される。

次に Photo. 2 にこれられんがの稼働面付近の反射顕

平成 2 年 3 月 12 日受付 (Received Mar. 12, 1990)

\* 品川白煉瓦(株)岡山工場 (Okayama Works, Shinagawa Refractories Co., Ltd., 88 Higashikatayama Bizen 705)

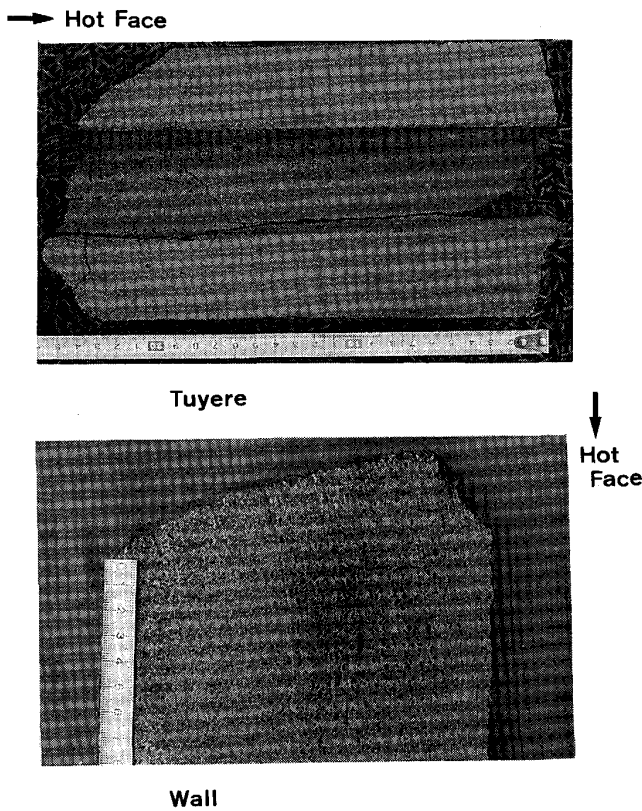


Photo. 1. Cut faces of used bricks.

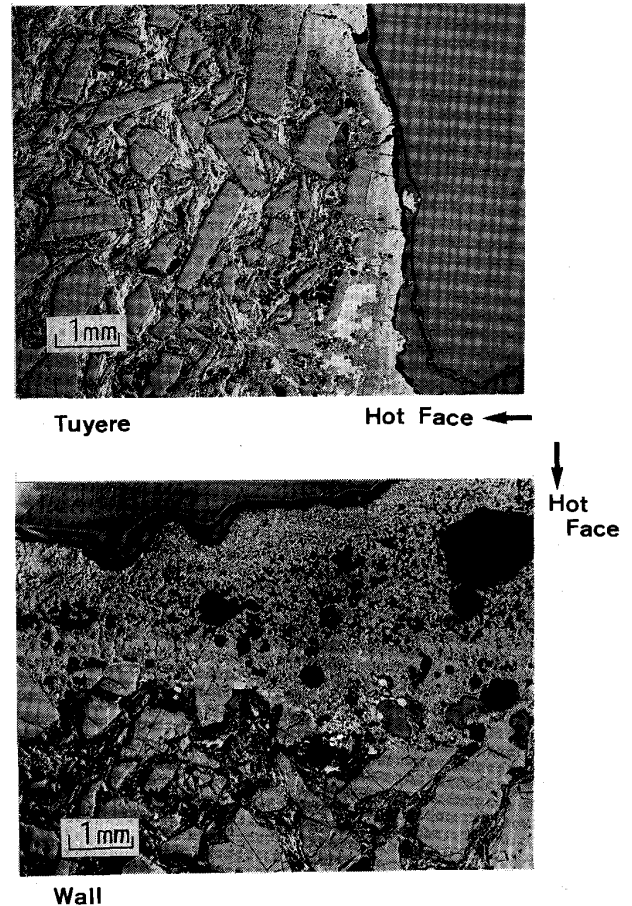


Photo. 2. Microstructure of used bricks.

微鏡写真を示す。炉壁使用後れんがでは、稼動面に約 2 mm 厚さのスラグが付着している。付着スラグ層の内側には粒鉄が多く認められる。れんがの稼動表面付近は、れんがの主構成成分である黒鉛が大部分消滅し、あるいは、形態的に細くなっており、この部分へのスラグの侵入も認められる。一方羽口れんがでは MgO 中に多量の FeO が固溶し MgO の粒成長が見られる。また、黒鉛の消滅も認められる。

Fig. 1 に炉壁に使用された MgO-C れんがの各部位における残留カーボン量を示す。使用前の状態に比べると、どの位置でも残留カーボン量が減少しており、特に稼動面から 50 mm 深さまでは大幅な減少となっている。これらに伴い、Fig. 2 に示すように見掛け気孔率や通気率も稼動面に近づくにつれて大きくなる傾向がある。

次に、未使用れんがをカーボンブリーズに埋め、1000°C および 1500°C で加熱しそれを常温まで冷却、これを繰り返した場合のれんがの気孔率の変化を Fig. 3 に示した。酸化しない条件下で気孔率が增大しており、実際の場合には更に酸化雰囲気加わることから、気孔率が增大していることは、十分想定される。

以上から MgO-C れんがの損傷は次のように進行すると考えられる。

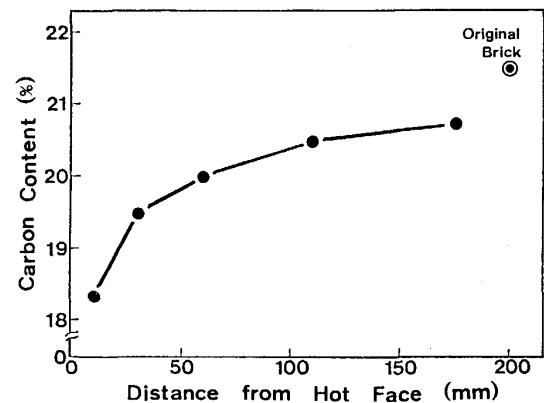


Fig. 1. Change of carbon content after use.

- (1) 使用時の温度変化により組織がゆるみ、通気率、気孔率が增大する。
- (2) 気孔を通じて黒鉛の酸化が進行する。スラグ中の FeO によっても黒鉛の酸化が進行する<sup>1)</sup> (その結果として稼動面に粒鉄が残留する)。
- (3) スラグ中の FeO は MgO に固溶し MgO を低融点化しその溶損を促進する。この現象は酸化性ガス底吹き吹錬の場合の羽口れんがに特に強い。すなわち羽口直

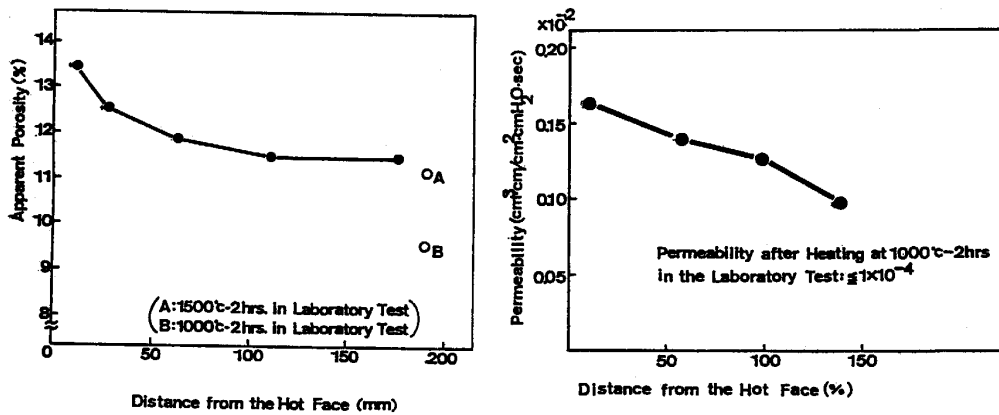


Fig. 2. Change of apparent porosity and permeability after use.

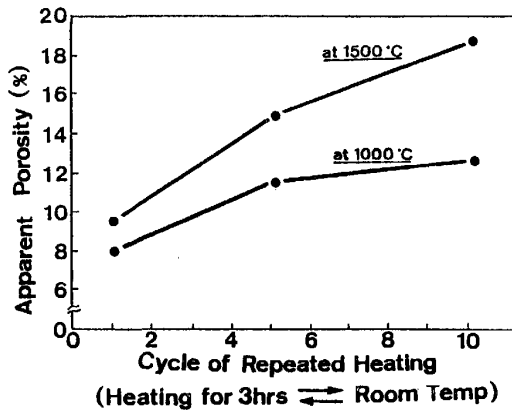


Fig. 3. Change of apparent porosity under repeated heating.

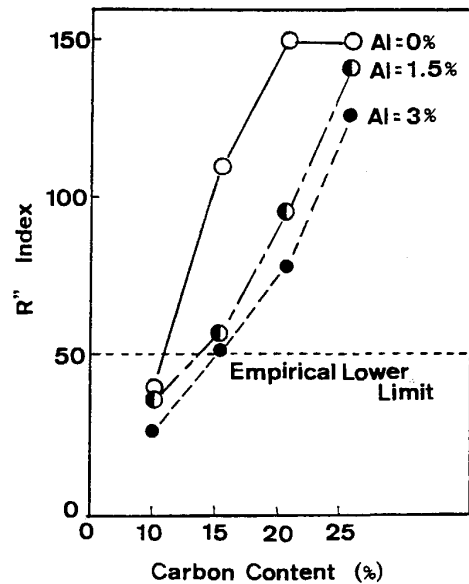


Fig. 4. Relationship between  $R''$  index and carbon content.

上部で多量に生成する FeO の影響を強く受けるからである。

(4)羽口れんがの場合は、スポーリングによりき裂が発生し、その部分から剥落する。

以上から MgO-C れんがの耐用性を向上させるための重要なポイントが低気孔率化、耐酸化性の向上、更には耐スポーリング性の向上にあることが理解される。

### 3. MgO-C れんがの最近の進歩

#### 3.1 材質

##### 3.1.1 耐スポーリング性の改善

前述のように羽口れんがは、明らかにスポーリングによる剝離損傷がある。また、炉壁れんがでさえもスポーリング損傷の可能性<sup>2)</sup>がある。しかし、現在のところこの現象を効果的に抑止する方法は確立されていないといえる。最も効果が認められるのは添加黒鉛の増量である。黒鉛含有量と耐スポーリング性の関係を Fig. 4 に示した。ここに示している熱衝撃破壊抵抗性は次式<sup>3)</sup>によ

て算出した。

$$R'' = \frac{\sigma_f(1-\nu)}{\alpha \cdot E} \cdot \frac{K}{\rho \cdot C}$$

ただし

$\sigma_f$ : 強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\alpha$ : 熱膨張係数 (1/°C × 10<sup>6</sup>)

$E$ : 弾性率 (kgf/mm<sup>2</sup>)

$\rho$ : 嵩比重

$C$ : 比熱 (kcal/kg°C)

$\nu$ : ポアソン比 (0.3 とした)

$K$ : 熱伝導率 (kcal/m·h·°C)

さらに、本図には筆者らの経験から、実際に炉壁や羽口に使用した場合にスポーリング傾向の出にくくなる熱衝撃破壊抵抗係数の経験的下限值を記入した。おおむね

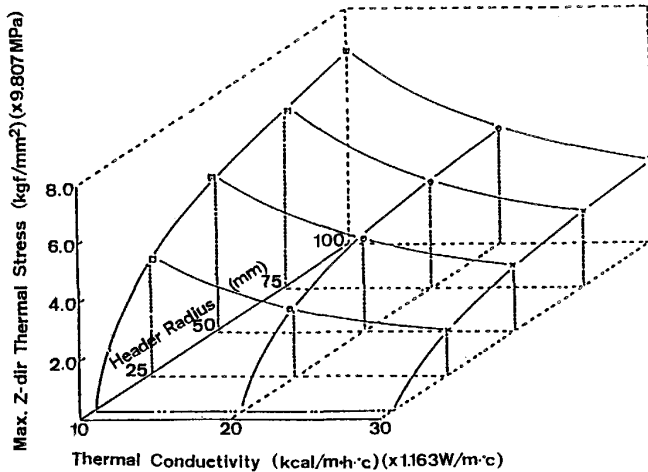


Fig. 5. Relationship between thermal conductivity, header radius and maximum Z-direction thermal stress of tuyere brick.

これらの値より高い熱衝撃抵抗性を有する材料は、スポーリング損傷が非常に小さい。これらの結果から、羽口れんがとしては黒鉛 25% 以上含有した MgO-C れんがの使用が増している。ただし、酸化性ガス底吹きの場合、黒鉛の酸化を厳しく抑制することが重要である。

しかし、羽口れんがの場合スポーリングを十分に抑えることは非常に難しいことから新たな工夫もなされている。

Fig. 5 に羽口れんがの熱応力計算結果を示す。これは定常操業状態を想定した熱伝導率-小口半径-最大発生熱応力の関係を示している。これによると小口半径が小さい方が、また、れんが熱伝導率の大きい方が熱応力を減少することが可能といえる。しかし、通常転炉羽口に使用されているれんがは小口半径約 50 mm、熱伝導率 20~30 kcal/m·h·°C 程度で、き裂発生を防止することは計算上困難となる。(通常のれんが断面は四角形であるが、ここではそれと等断面積の円形断面を想定し計算した。この時の断面半径を小口半径と表現している。)

このため羽口れんがを断熱構造にする<sup>4)</sup>。すなわち、内管によって断熱性を得、外管として MgO-C れんがのき裂防止を検討した。Fig. 6 にその場合の応力解析の結果を示す。これによると断熱材の厚みを大きくすることにより、外管 MgO-C の熱応力は緩和される。この結果をもとにした実炉でもその効果が確認されている。

### 3.1.2 組織の緻密化

組織の緻密化には後述する製造法に負うところが大きい。ここでは従来から進められている、主に粒度構成の改善効果について述べる。

MgO-C れんがの損傷では、れんがの微粉部分が先行

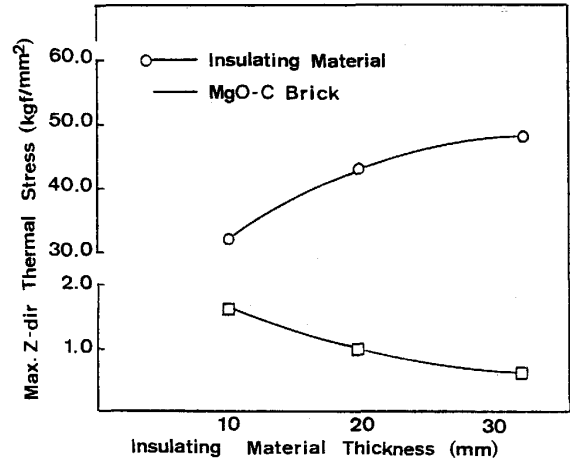


Fig. 6. Relationship between insulating material thickness and maximum Z-direction thermal stress of double pipe type tuyere brick.

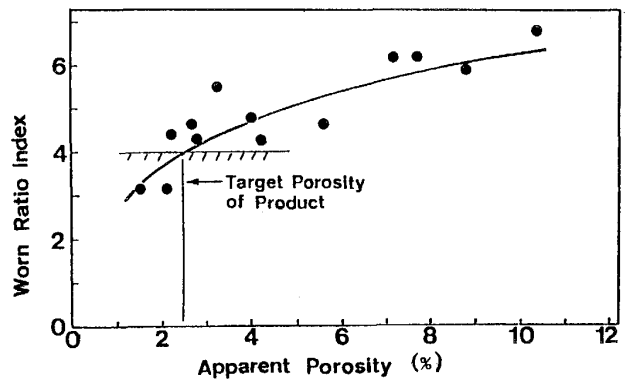


Fig. 7. Relationship between worn ratio and apparent porosity of MgO-C brick for BOF.

溶損する。したがって、耐食性に優れた骨材、例えば電融 MgO の使用も重要であるが、微粉部分の構成がより重要である。Fig. 7 に MgO-C れんがの気孔率と耐食性の関係を示した。明らかに気孔率の低いれんがは耐食性に優れている。

一方、マトリックスとしての微粉部分の緻密性を検討するために次のような調査を行った。すなわち、MgO と黒鉛量比の異なるいくつかの MgO-C れんがを試作し、その密度を測定し、れんがの微粉部の密度計算、緻密性の比較を行い Fig. 8 に示した。図中の破線は、1 mm 以上の骨材の分の気孔量を考慮し、1 mm 以下の部分について計算により求めた嵩比重である。一方実線で示した値は、れんが製造時に 1 mm 以上の骨材を使用せず、1 mm 以下の粒でのみ構成したれんがの嵩比重を示している。横軸の値はそれぞれ相応する点をとって示している。これによると、1 mm 以上の骨材を配合して製造した 1 mm 以下の部分より、1 mm 以下の粒だけで

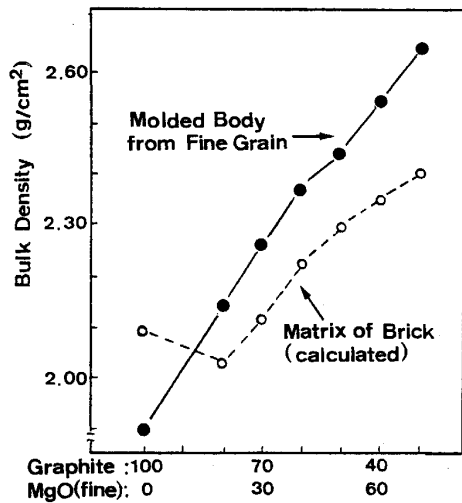


Fig. 8. Density of matrix part of brick and molded body from fine grain.

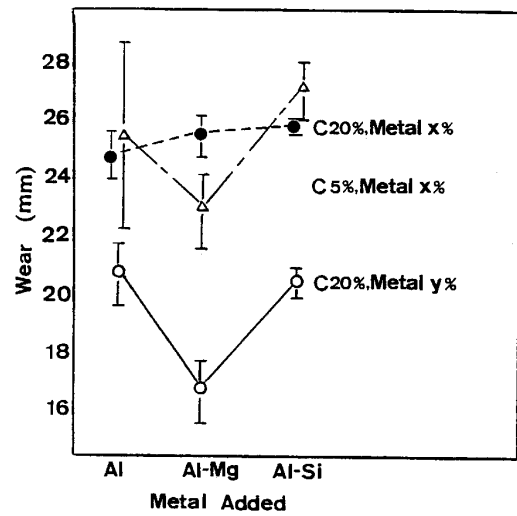


Fig. 10. Wear of metal containing magnesia carbon bricks by rotary slag test using CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag.

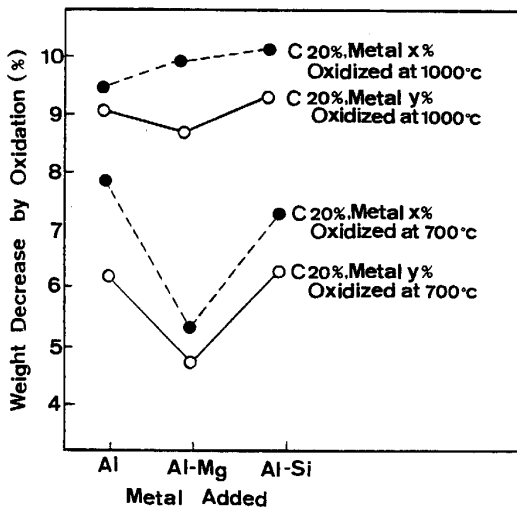


Fig. 9. Weight decrease of metal containing magnesia carbon bricks by oxidation.

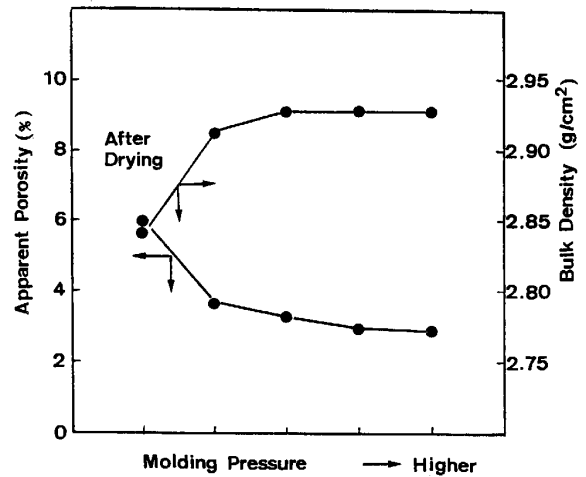


Fig. 11. Relationship between molding pressure and density.

製造したれんがの方が緻密である。

このような知見をもとに 1 mm 以下の粒のみで製造された MgO-C れんがは現在主に羽口や出鋼口で使用されている。

### 3.1.3 耐酸化性の改善

耐酸化性の改善には、れんがの緻密化が最重要でありそれを補うために易酸化性金属<sup>5)</sup>や金属炭化物<sup>6)</sup>が使用されてきた。また、低温で熔融しやすいガラス質物質も添加使用される<sup>7)</sup>。金属や金属炭化物の添加は酸化性ガスに対して、黒鉛より先に酸化し安定な酸化物となり、気孔を封鎖するとともに新しい結合組織が形成されることを期待している。ガラス質物質は、粘稠な融液物となり気孔を封鎖することが期待される。最近の特徴はこれ

ら以外に合金の使用が進んだ点である。

Fig. 9 および Fig. 10 にアルミニウム-マグネシウム合金を添加した場合の効果を示している<sup>8)</sup>。アルミニウム金属やアルミニウム-シリコン合金に比して、生成する酸化脱炭層の厚さは約 1/2 となり、耐食性もある場合には約 2 倍に向上している。

酸化抵抗性の向上は MgO-C れんがにとって永遠のテーマであり、この改善には今後とも最大の努力を払ってゆかねばならない。

### 3.2 れんが製造技術

転炉の高寿命指向により内張耐火物の大型化が進んでいる。大型化は単に形状が大きくなるだけでなく、小形状の物と同レベルの特性を保持していなければならない

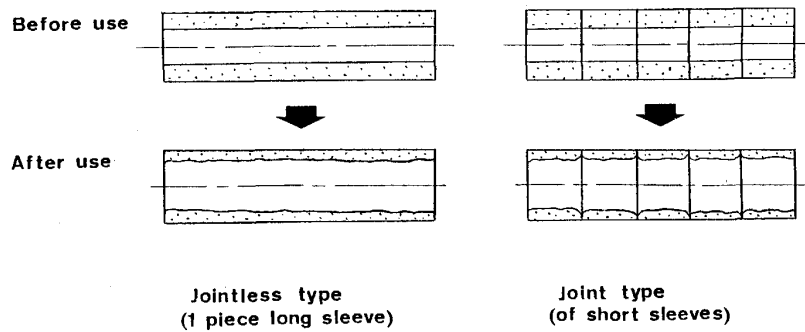


Fig. 12. Damage formations of tapping hole sleeves.

いことは言うまでもない。繰り返し述べてきたように MgO-C れんがは緻密に成形しなければならないことは当然である。Fig. 11 にはれんが製造時の成形圧力と製品の気孔率の関係を示した。現在転炉では、おおむね気孔率 3% 以下のれんがが使用されている。したがって気孔率 2.5% 以下のれんがを製造するには  $2 \text{ t/cm}^2$  以上の成形圧力が必要となる。

一方、れんがの長さ寸法は従来 720 mm 程度が最大であり、これを超える長さを必要とする場合は、2本のれんがを継ぐことが常識であった。しかし継ぎ合わせた部分では残厚を有しながら抜け落ちる現象があるため、近年長尺一層れんが張りが主流となり 720 mm 以上の長さすなわち 810 mm, 900 mm あるいは 1000 mm 以上の長さが必要となった。これらの長さのれんがを  $2 \text{ t/cm}^2$  以上の成形圧力で成型するには総圧力 2000~3000 t のプレスが必要である。

炉壁れんがの大型化と共に出鋼口れんがの大型化も著しい。例えば出鋼口スリーブは従来短い(約 200~300 mm)スリーブが数本継ぎ合わせて使用されてきた。近年これを一体化したスリーブが製造されている<sup>9)</sup>。Fig. 12 に示すように、明らかに従来の欠点(継ぎ目の優先的溶損)を克服するものになっている。

### 3.3 れんが積み構造

#### 3.3.1 炉壁れんが積み構造

炉壁のれんが積み構造の改良の成果は、炉壁と炉床の継ぎ部の球面構造であろう。複合吹錬転炉では溶鋼の攪拌が激しく、この部分の損傷が増大している。Fig. 13 にこの部分の従来構造と球面構造の一例を示した。また、この二つの構造で発生する熱応力解析結果を Fig. 14 に示した。

従来構造では、炉底れんがの膨張移動が下部炉壁れんがに突き当たり大きな応力を発生する。これに対し球面構造では炉底の動きが比較的スムーズに炉壁に伝えられ、応力が一か所に大きく集中することが避けられる。

この構造の採用により損傷の様相が Fig. 13 に示した

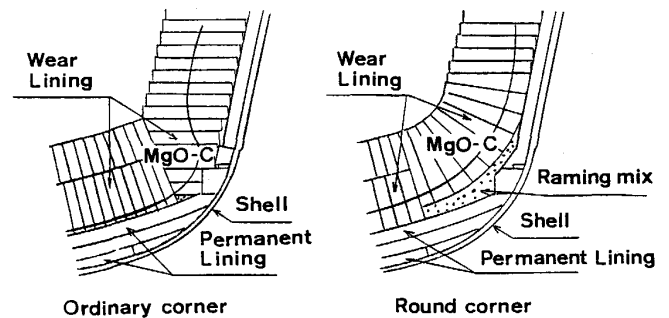
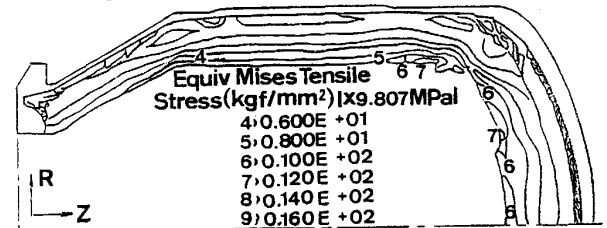


Fig. 13. Corner structures of ring bond lining.

#### Ordinary corner



#### Round corner

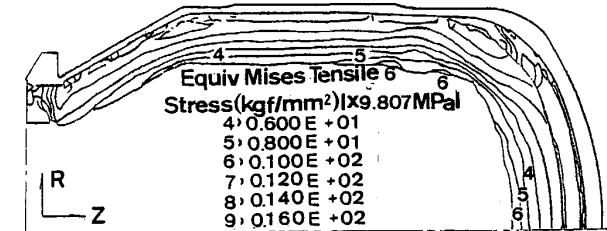


Fig. 14. Contour of equivalent mises tensile stress.

ように一変した<sup>10)</sup>。

#### 3.3.2 炉底れんが積み構造<sup>11)</sup>

炉底の内張りれんがは、底吹き羽口の設置により

- 高温にさらされる。
- 鋼浴中での攪拌が著しい。
- 羽口および羽口周辺部は温度変化が大きい。

・羽口が固定されるため局部的な応力の発生がある。等の影響を強く受ける。このような条件下で、特に羽口とその周辺は先行損傷する機会が多い。この損傷を軽減するため、前記のような材質上の改善のみならず、れんが積み構造の改善も極めて重要である。れんが積み構造改善のポイントは以下の2点であろう。

- ・温度変動および羽口の拘束による発生応力が緩和できる構造
  - ・構造体としてタイトにれんが積みできる構造
- 現在複合吹錬炉底構造としては、真円積み構造、網代積み構造、平行積み構造が実施されている。

(1) 真円積み構造

Fig. 15 に示すように炉芯を中心にしたリング積みによって構成され、各リングのれんが形状が炉底球面の中心に向かって構成されている。この構造の採用により Fig. 13 に示す炉底コーナー部の球面構造が可能となる。

(2) 網代積み構造

Fig. 16 に示すように、炉芯位置で炉底球面の中心に向かって設定された四方迫りれんが形状により、各列ごとにれんが積みを行い、90°ごとにかみ合わせながら向

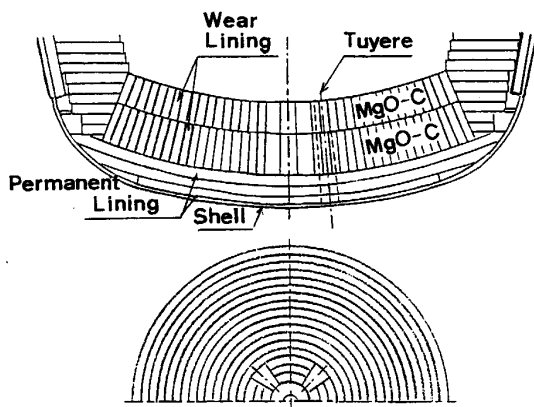


Fig. 15. Ring bond structure.

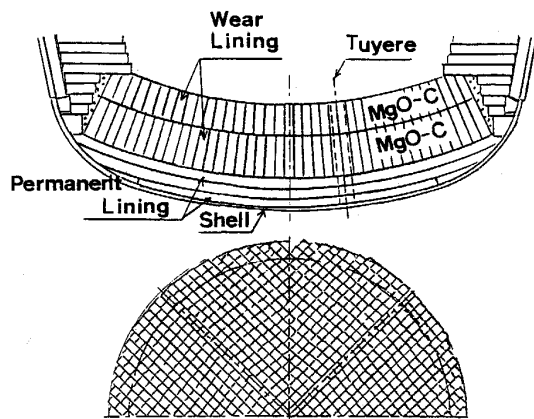


Fig. 16. Herringbone bond structure.

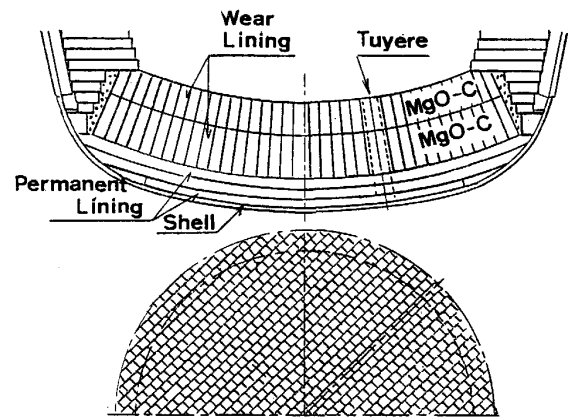
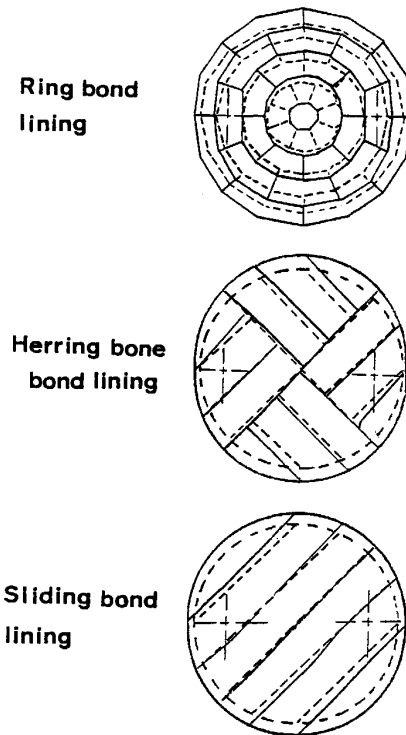


Fig. 17. Sliding bond structure.



Dash line : Before deformation  
Solid line : After deformation

Fig. 18. Deformation drawing of bottom blocks.

きを変える構造である。この構造は従来から採用されている方法であるが炉底最外周にスタンプ施工が必要となる。

(3) 平行積み構造

Fig. 17 に示すように網代積み構造と同様に設定された四方迫りれんが形状により、各列を同方向にれんが積みする構造である。この構造は、各列の長手方向で羽口の列を干渉させないようにれんが積みを行い、羽口間の拘束による応力の緩和をはかった構造である。炉底最外周にスタンプ施工を行うのは、網代積み構造と同じであ

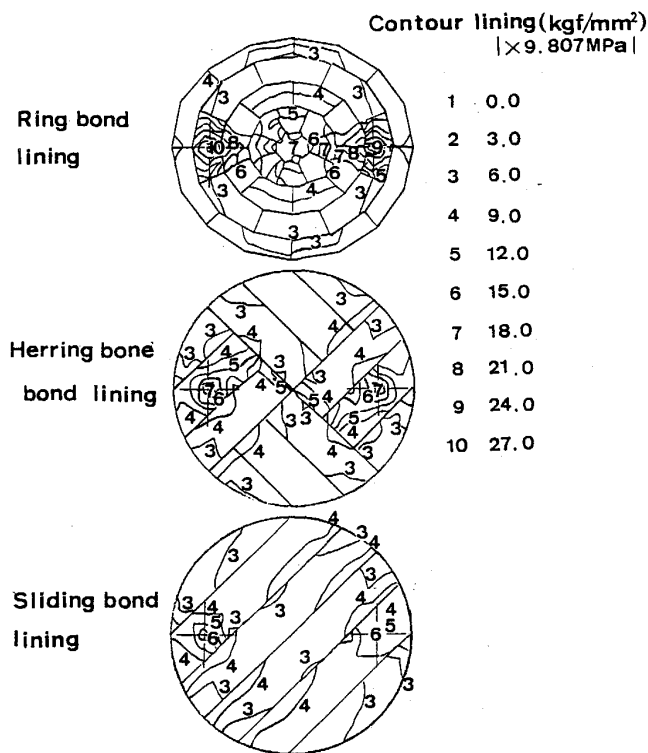


Fig. 19. Contour drawings of equivalent tensile stress for bottom blocks.

る。

以上のような炉底れんが積み構造の中に、固定点として羽口が設置された時の発生応力が最も小さくなるような構造が、複合吹錬法の炉底構造として適していることは言うまでもない。

一例として横一列に四か所の羽口が設置されている場合の炉底構造について応力計算を実施した。Fig. 18に本計算での変形図を示す。真円積み構造の場合、羽口を結ぶ方向の変形拘束度が最も大きく、その列方向に偏平となる。つまり、羽口拘束によって羽口列方向に対する熱膨張移動は阻害されるが、羽口を結ぶ方向に直角な方向には変形しやすいためである。網代積み構造の場合は、ほぼ円に近い変形状態であるが、隣りあう1/4ブロックをおしのけようとする力によって拘束力が発生している。平行積み構造では外周部に対する移動が容易になされ、羽口間の拘束はかなり小さく、変形は最も円形に近くなる。

これらの構造に対する発生熱応力を相当ミーゼス応力分布で表したものが Fig. 19 である。真円積み構造の場

合の応力レベルが最も高く、網代積みと平行積み構造の方は応力レベルが低い。これらのことによって羽口を拘束点と考えた場合は、その干渉を極力小さくさせるれんが構造設計をする必要がある。

本計算の結果から考察すれば、比較的平坦な炉底構造の発生熱応力を緩和するには、平行積み構造が最も有利であるといえよう。

#### 4. 結 言

複合吹錬転炉に使用される MgO-C れんがの品質と使用技術（主としてれんが積み構造）について記述した。

1) MgO-C れんがの耐用性を向上させるポイントは低気孔率化、耐酸化性および耐スポーリング性の向上にある。

2) 羽口れんがの耐スポーリング性の向上には黒鉛添加量の増量および断熱構造が採用されている。

3) 低気孔率化すなわち組織の緻密化には細粒（径1mm以下）を使った粒度構成が有力である。また形状の大型化のため高出力の成型機が必要となった。

4) 耐酸化性の改善はれんがの緻密化が最重要であり更に易酸化性合金等が添加されているが永遠の課題である。

5) れんが積みでは発生応力を緩和する構造、構造体としてタイトにれんが積みができる構造が種々考案され適用されつつある。

#### 文 献

- 1) 高橋達人, 木谷福一, 丹村洋一, 長谷川輝之, 白谷勇介, 平賀紀幸: 鉄と鋼, **68** (1982), S995
- 2) 西尾英昭, 三好俊三, 内田茂樹: 品川技報 (1986) 30, p. 23
- 3) 宗宮重行: 第47・48回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会編) (1977), p. 180
- 4) 北野嘉久, 反町健一, 久我正昭, 中田謹司, 鈴木文仁: 鉄と鋼, **70** (1984), S949
- 5) 山口明良: 耐火物, **38** (1986), p. 506
- 6) 山口明良: 耐火物, **35** (1983), p. 617
- 7) 倉田浩輔, 松井泰次郎, 河野幸次: 耐火物, **41** (1989), p. 634
- 8) T. MATSUMURA, S. UTO, K. HOSOKAWA and M. GEJI: Taikabutsu Overseas, **8** (1988) 4, p. 24
- 9) 国米博之, 西尾英昭, 隠明寺準治, 横木英治: 品川技報 (1988) 30, p. 123
- 10) 久保吉一, 八木重器, 丹野良紀, 佐藤光信, 森 明義: 鉄と鋼, **72** (1986), S155
- 11) 河島壽一, 姉崎正治, 八木重器, 竹原 繁, 三好俊三, 伏井芳宏, 松田 学: 品川技報 (1990) 33, p. 103