

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

EAF用耐火物の最近の適用結果

Application Results of Newly Developed EAF Refractories

鳥越 淳志
Atsushi TORIGOE

富谷 尚士
Hisashi TOMIYA

藤吉 亮磨
Ryoma FUJIYOSHI

国井 仁
Hitoshi KUNII

品川技報

EAF用耐火物の最近の適用結果

Application Results of Newly Developed EAF Refractories

鳥 越 淳 志^{*1}

Atsushi TORIGOE

藤 吉 亮 磨^{*3}

Ryoma FUJIYOSHI

富 谷 尚 士^{*2}

Hisashi TOMIYA

国 井 仁^{*4}

Hitoshi KUNII

要 旨

当社で開発したEAF用耐火物のうち、側壁用高耐食性れんがHIDEN、EBT用チューブ、底吹き用ノズル、出鋼孔用スライドバルブSGV、ABB式直流電気炉用炉底電極れんが、バックライニング用高耐消化性れんがについて、特徴と代表的な事例を述べた。これら耐火物の適用により、耐火物寿命の延長や操業の効率化を図ることが可能である。

Abstract

We will explain the characteristics of our newly developed EAF refractories using typical examples. By applying sidewall refractories with high corrosion resistance, HIDEN and EBT tube, bottom blowing nozzle, slide gate valve for tapping, ABB type bottom electrode in DC furnace, and high slaking resistant bricks for back lining. Our customers can improve refractory performance and operation efficiency.

1. 緒言

よく知られているように、鉄鋼製品の溶製プロセスには高炉(Blast Furnace;BF)を用いる方法と電気炉(Electric Arc Furnace;EAF)を用いる方法がある。BFでは原料の鉄鉱石をコークスで還元して溶銑を得、それを転炉(Basic Oxygen Furnace;BOF)で脱炭して溶鋼とし、さらに二次精錬を行って製品とする。一方、EAFでは電極からアークを発生させて原料であるスクラップを溶解して溶鋼を得、二次精錬処理をして製品とする。

1. Introduction

As is well known in the industry, there are two primary methods to produce steel products; blast furnace (BF) and electric arc furnace (EAF). In the BF process, pig iron is produced by reducing the raw materials of iron ore and coke. The pig iron is then de-carbonized by converter (Basic Oxygen Furnace) and further refined in a secondary process to produce a molten steel product. In the EAF process, molten steel is produced by melting the scrap

^{*1} 技術研究所 第1研究部 第1研究室 室長 General Manager, Shaped Refractories R&D Sec., Research Dept. No.1, Research Center

^{*2} 西日本工場 岡山製造部 技術室 主任部員 Assistant Manager, Technical Sec., Okayama Plant, West Japan Works

^{*3} 技術研究所 第1研究部 第1研究室 Shaped Refractories R&D Sec., Research Dept. No.1, Research Center

^{*4} 東日本工場 湯本製造部 技術室 主任部員 Staff Manager, Technical Sec., Yumoto Plant, East Japan Works

現在、世界的にはBFを用いた鉄鋼製造プロセスが主流である。原料である鉄鉱石と石炭の資源開発と物流は大きな規模で国際的に実施されており、継続的な多くの鉄鋼需要がある社会にはBFとBOFを使用する方法が適している。一方、多くの鉄スクラップとそれを回収するシステムがある社会ではEAFから製造される鉄鋼製品の割合が増えつつある。これについて、将来の鉄鋼需要とスクラップの発生量をシミュレーションし、EAFがメインになるとの予測が公表されている¹⁾。これに対して、技術開発によりBFの操業環境や効率が大幅に向上していること、実際には鉄スクラップの回収量が鉄鋼需要に比較して少ないこと、などから今後もBFが主流でありつづけると予測する報告²⁾もある。いずれの技術が将来の主流になるのか、は別にして、米国ではすでに70%近い粗鋼がEAFで製造されており、今後先進国を主体にEAFの比率が高まっていくと見られる。

EAFは、その登場から現在まで多くの技術革新がなされ、操業が効率化されてきた^{3),4)}。また、それらの発展と期を一にして、耐火物も発展を遂げ、操業の効率化に寄与してきた^{5),6)}。本報では当社で開発したEAF用耐火物のうち、側壁用れんが、偏芯炉底出鋼（Eccentric Bottom Tapping ; EBT）用チューブ、底吹き用ノズル、出鋼孔用スライドバルブ、ABB式直流EAF（DC-EAF）炉底電極用れんが、バックライニング用高耐消化性れんが、について、最近の開発とその適用による操業の効率化について示す。

2. EAF側壁用高耐食性れんが HIDDEN

EAFは、酸素インジェクションによりFeの酸化に伴う発熱も利用して昇熱を行っているため、FeOを生成する。同時にインジェクションする炭材によってFeOの還元が生じるもののスラグは比較的多くのFeOを含有している。また、EAFで精錬処理を行う場合も多く、スラグの侵食力は高い。加えて、ホットスポット部における溶湯温度の過度な上昇はそれによる反応速度の増大やスラグの粘性低下に伴う煉瓦表面のコーティング層減少などで耐火物の損耗速度を増大させる。このよ

by an arc generated from an electrode. The molten steel is then sent to secondary refining. The steel manufacturing process using a blast furnace is the mainstream worldwide today.

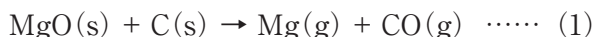
Iron ore and coal, the primary raw materials used in the BF and BOF have well developed resource and distribution systems which are necessary to supply them on a global scale. It is very suitable for a society with a large continuous steel demand. At the same time, the ratio of steel products made by EAF is increasing in our society, which is equipped with systems that can efficiently collect and recycle steel scrap. According to R. Waugh et al., the future steel demand and scrap generation suggests the EAF process will become the main method¹⁾.

In contrast, there is a report²⁾ that the BF will continue to be the mainstream in the future. This is because of the operational environment and efficiency of the BF has been greatly improved by technological development, and the actual steel scrap supply is insufficient for steel demand. No one knows for sure if the EAF or BF system will be the mainstream of the future but approximately 70% of crude steel can be made in the United States by EAF. The EAF ratio will grow for mainly developed countries in the future. In the EAF, much innovation has been accomplished and the efficiency of operation has been improved^{3),4)}. In addition, new refractory technology has developed and contributed to the efficiency of operation^{5),6)}. In this report, we describe the recent development and the efficiency of operation by the application of our newly developed EAF refractories. These include sidewall refractories with high corrosion resistance ; HIDDEN, EBT tubes, bottom blowing nozzles, slide gate valves for tapping, ABB type bottom electrodes in DC furnace, and high slaking resistance bricks for the back lining.

うに、EAF側壁の耐火物はスラグによる溶損が主な損傷要因で、耐食性の高いMgO-Cれんがが適用される。

MgO-Cれんがの耐食性は、使用原料の純度を向上させたり金属添加物の適正化による緻密化を図ることで向上されてきた。これに対し、梅田ら⁷⁾はBOF用MgO-Cれんがにおいて稼働面として露出する前に受ける熱負荷の影響に着目し、繰り返し加熱を与えた試料に対して侵食試験を行った。その結果、繰り返し加熱により著しく侵食が増大しており、加熱によって組織劣化が進行したためとした。このコンセプトはEAFでも同様であると考え、加熱による組織劣化の抑制が損耗速度の低減に有効であると考えた。

MgO-Cれんがにおける組織劣化は、式(1)に示すマグ・カーボン反応の進行で生じる。



Carniglia⁸⁾は、BOF用れんがを用いて式(1)の反応について詳細に検討し、この反応は、反応によって生成したガスのれんが組織内の拡散が律速しているとした。この知見によれば、Mg(g)のれんが組織内での拡散速度を低下させることで組織劣化が抑制され、損耗速度を低下させることができる。この仮定に基づき、当社はれんがの粒度構

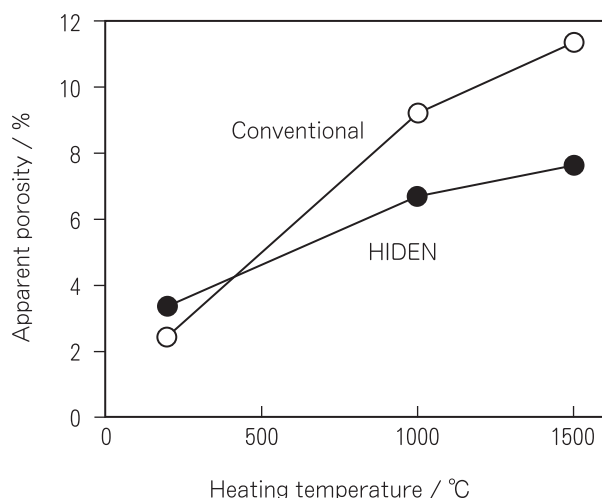
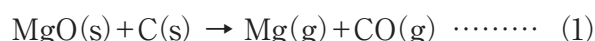


Fig.1 Comparison of apparent porosity variation of HIDEN and conventional MgO-C brick as a function of heating temperature.

2. High Corrosion Resistance Bricks for EAF Side Wall ; HIDEN

EAF treatment utilizes an exothermal reaction with oxidation of Fe by oxygen injection and increase in molten steel temperature generating FeO. While reduction of FeO is performed by injection of carbonaceous materials, the slag contains relatively higher FeO. EAF steels are generally treated by the refining process in the EAF and the refining slag is also highly erosive. In addition, excessive increase in molten steel temperatures at “hotspots” increase the wear rate of the bricks due to the increase in the reaction velocity and thin coating layer on the brick surface by the viscosity drop in the slag. In such case, MgO-C brick with corrosion resistance is applied as the EAF side wall refractory because the damage factor is mainly erosion by slag.

The corrosion resistance of the MgO-C brick has been improved by use of high purity raw materials and densification by adjusting the metal addition. In contrast, Umeda and et.al⁷⁾ paid close attention to the influence of the heat load received from the exposed BOF MgO-C bricks and examined the effect of cyclic thermal treatment on the corrosion resistance of the samples. As a result, erosion was markedly enhanced by cyclic thermal treatment and deterioration of the structure progressed by heating. This concept was similar to an EAF and it was thought that restraint of deterioration of brick texture by cyclic thermal treatment would be effective for reducing the wear rate. Deterioration of the MgO-C brick occurs through the progression of the MgO-C reaction as shown in Eq.(1).



Carniglia⁸⁾ examined the reaction in Eq.(1)

成や製造プロセスを検討，れんが組織を緻密化することで $\text{Mg}(\text{g})$ の拡散を抑制し，加熱後気孔率の低い MgO-C れんがHIDENを開発した。

Fig.1にHIDENの気孔率を汎用品と比較して示す。製品（ $200^\circ\text{C} \geq$ ）の気孔率は同等であるが， 1000°C ， 1500°C での加熱後気孔率はHIDENの方が小さい。Fig.2は同じ純度の原料を用いて粒度や製法を調整し，焼成後の気孔率を変化させた同組成の MgO-C れんが試作品に対する侵食試験結果である。焼成後の気孔率と侵食指数は比例関係に

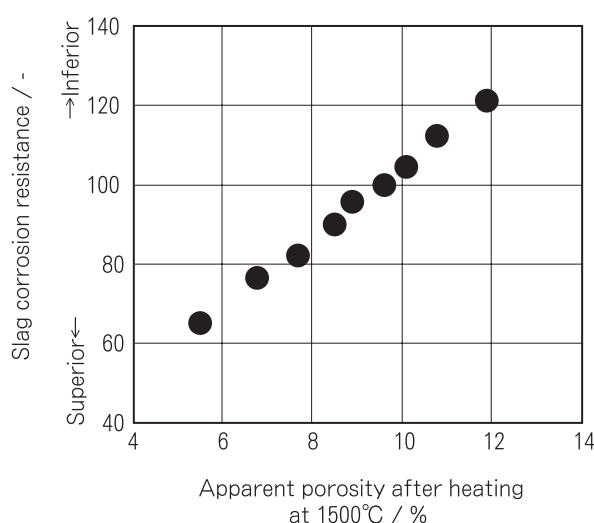


Fig.2 Variation of MgO-C Brick corrosion resistance as a function of apparent porosity after heating.

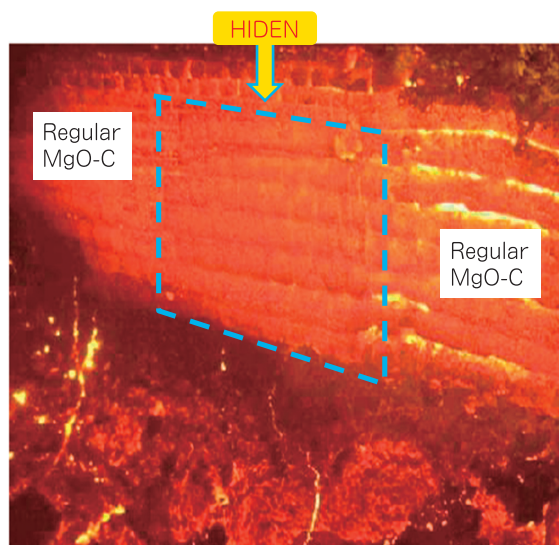


Fig.3 Wear status of HIDEN and regular MgO-C brick of an EAF.

using a BOF brick in detail and stated that the rate-determining step is the diffusion of the gas formed by this reaction to the brick structure. According to this knowledge, deterioration of brick structure is controlled by reducing the diffusion speed of $\text{Mg}(\text{g})$ in the brick and can reduce the wear rate. Based on this assumption, we examined the particle size and manufacturing process of the brick, and controlled the diffusion of $\text{Mg}(\text{g})$ by making a dense brick texture. As a result, we have developed low porosity MgO-C bricks called “HIDEN”.

Figure 1 shows the apparent porosities of HIDEN and conventional products. Apparent porosity of the products ($200^\circ\text{C} \geq$) is equal, but after heating to 1000°C and 1500°C the porosity of HIDEN is small. Figure 2 shows the erosion test result of MgO-C brick samples that changed in porosity after firing. Raw materials of same purity were used with various particle sizes and manufacturing methods. The erosion index is proportional to porosity after firing.

We evaluated HIDEN indicating such a characteristic at actual EAF. Figure 3 shows the test results, the HIDEN installed area clearly protrudes. Figure 4 shows the microstructure after use of HIDEN and conventional products. In the HIDEN specimen, the embrittled layer at the hot face was thin, as we were able to confirm an embrittlement suppressant effect even after use.

Due to the HIDEN high corrosion resistance with a minimized metal addition, the rise in modulus of elasticity after heating is low and the risk of spalling is less, thus, we can expect better corrosion-resistance and further improvement by decreasing the carbon content. As mentioned above, there is a significant amount of FeO in EAF slag. For this reason the erosion speed of low carbon type HIDEN decreases since the C contained in MgO-C brick disappears by the

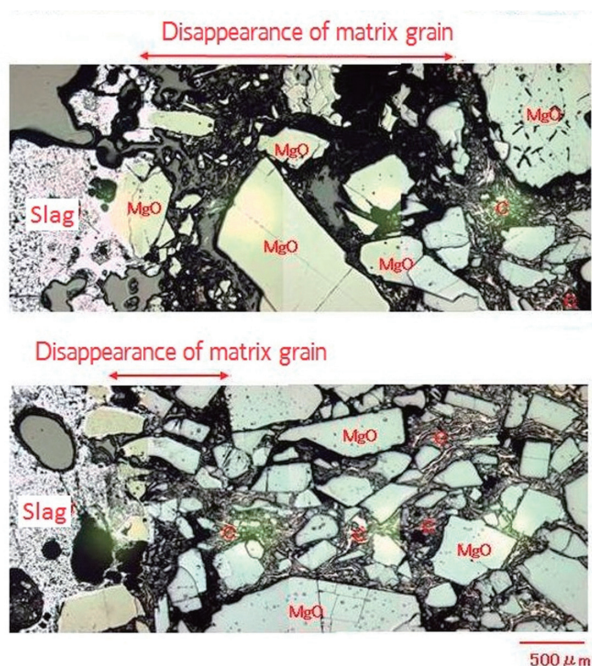
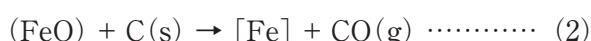


Fig.4 Microstructures of HIDDEN and conventional MgO-C brick after use.

ある。

このような特徴を示すHIDDENを実際のEAFで評価した。テスト時の写真をFig.3に示す。HIDDENを施工した範囲が明らかに突出している。Fig.4は使用後の微構造をHIDDENと従来品で比較したものである。

HIDDENは、マトリックス粒子が消失した脆化層が薄く、脆化抑制効果が実使用後も確認できた。HIDDENは金属添加物量を最小限にしつつ高耐食性を図っているため、加熱後の弾性率上昇が穏やかであり、割れリスクが小さくなる方向で、カーボンの減量による耐食性のさらなる向上が期待できる。上述したように、EAFのスラグはFeOが多く、MgO-Cれんが中のCは式(2)で示される液相酸化によっても消失するため、れんが中のカーボンは少ない方が溶損速度は小さくなる。



そこで、HIDDENを適用したEAFにおいて、亀裂・剥離の状況を観察しながら徐々にカーボンを減量する検討を行った。その結果、Fig.5に示すように、このEAFにおいてはHIDDENのカーボンを

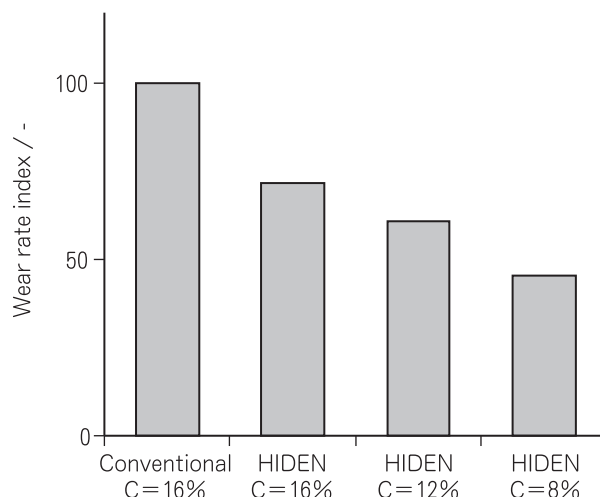
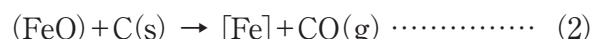


Fig.5 Influence of carbon fraction of HIDDEN on wear rate of an EAF.

reaction of liquid phase oxidation as shown in Eq.(2).



Therefore, in an EAF where HIDDEN was applied, we performed a test to reduce the carbon gradually while observing for any cracks and/or spalling. The reason was that there was no cracking or spalling even when we reduced the carbon of HIDDEN in this EAF. HIDDEN was able to reduce the wear rate as shown in Fig.5. The wear speed of the EAF sidewall was decreased by applying the MgO-C brick HIDDEN with a controlled embrittlement layer and ultimately overall brick structure, improving the EAF operation by extending the campaign life. After applying standard HIDDEN in an actual furnace we saw improvement, so we expect even better EAF productivity when we fine tune the materials while observing their use in operation.

3. EBT Tube Refractories

As for EAF to ladle tapping systems, there are tilting spouts and bottom tapping types. There are Concentric Bottom Tapping (CBT)

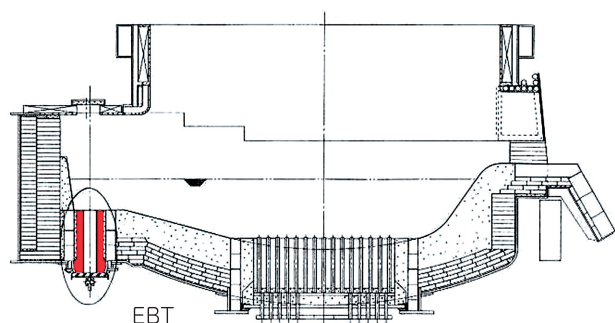


Fig.6 Schematic image of EAF equipped with EBT.

減量しても亀裂・剥離の問題はなく、損耗速度の低減を図ることができた。

緻密化により組織脆化を抑制したMgO-CれんがHIDENの適用によりEAF側壁の損耗速度が低減、寿命延長によるEAF稼働率の向上が可能となる。実使用にあたっては、標準的なHIDENを適用した後、状況を観察しながら材質のチューニングを行うことで稼働率の最大化が期待される。

3. EBTチューブ用耐火物

EAFで溶製された鋼の取鍋への出鋼方式には、出鋼孔から樋を通じて取鍋に排出される傾注式出鋼と、炉底の出鋼孔から直接取鍋に排出する炉底出鋼がある。炉底出鋼には、中央炉底出鋼(Concentric Bottom Tapping; CBT)と偏芯炉底出鋼(Eccentric Bottom Tapping; EBT)があり、EBT出鋼の適用が広がっている。Fig.6にEBTの設置イメージを示す。EBTの適用により水冷領域の拡大が可能となり、耐火物コストが低減したほか、スラグ流出量が低減し鋼の清浄度が高くなり、出鋼時間の短縮により稼働効率の向上が図られた³⁾。EBTの出鋼孔はEBTチューブと呼ばれる円筒状の耐火物が適用される。EBTチューブにはMgO-Cれんがが使用されるのが一般的で、リング状のれんがを積み重ねたものが適用される場合が多い。しかし、この場合目地を起点とした損傷が進むと、充填砂が噛み込んでブリッジングを起こし開孔不良を引き起こしたり上部のれんがが浮上するリスクがあるため、当社は一体型のチューブ

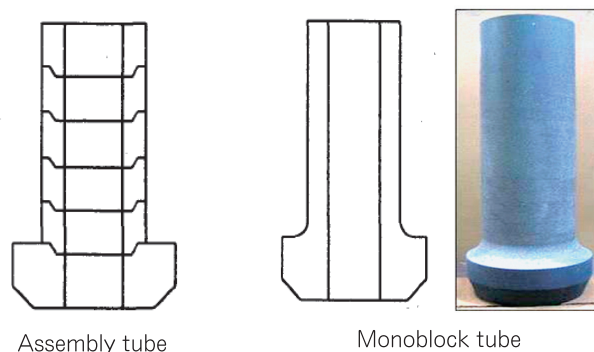


Fig.7 Assembled EBT tube and monoblock EBT tube.

and Eccentric Bottom Tapping (EBT), and EBT systems that have begun to expand. Figure 6 shows an installation image of EBT. An application of EBT allows the expansion of the water cooling area, decreases the refractories cost and the discharge quantity of the slag into ladle, improving the quality of the steel. The operation efficiency was also improved by shortening the tapping time³⁾. Cylindrical refractories are applied to the steel taphole that are called EBT tubes. MgO-C bricks are usually used in the EBT tubes, in which the bricks are placed on top of one another to form a ring. We have adopted the monoblock tube because clogging of filling sand in the joint can lead to bridging causing opening failure. The upper bricks are at risk of floating when the damage starts from the joint area (Fig.7).

When tapping the furnace repeatedly, the EBT tube gradually wears and the inside diameter of tube increases, so it is changed regularly. It is preferable to synchronize the timing of the exchange with the timing of EAF maintenance. Therefore the initial inside diameter of the EBT tube is determined from the wear rate and the exchange timing according to the inside diameter. As a result the tapping time is longer with the small inside diameter of the EBT in the early stages, and operation efficiency lowers. In

Table 1 Typical qualities of MgO-C and Al₂O₃-MgO-C for EAF

	MgO-C C=20%	MgO-C C=12%	Al ₂ O ₃ -MgO-C C=9%
After drying			
Apparent porosity / %	3.7	4.2	4.6
Bulk density / -	2.81	3.02	3.06
Cold crushing strength / MPa	34	39	63
After fired at 1500°C for 3h			
Apparent porosity / %	11.4	9.5	8.8
Bulk density / -	2.72	2.97	3.01
Cold crushing strength / MPa	25	31	49
Hot modulus of rupture at 1400 / MPa	10.3	12.4	15.7

を採用している (Fig.7)。

EBTチューブは出鋼を繰り返すと徐々に損耗して内径が拡大するため、定期的に交換される。交換のタイミングはEAFのメンテナンスのタイミングに一致させることが好ましく、内径の損耗速度と交換タイミングから、EBTチューブの初期内径が決められる。そのため、EBTチューブ交換初期の内径が小さい時期は出鋼時間が長く、稼働効率が低くなる。すなわち、損耗速度の低いEBTチューブを使用することで初期内径を大きくすることができ、EAFの稼働効率を向上させることができる。

EBTチューブの損耗機構は出鋼に巻き込まれたスラグによる溶損と溶鋼流による摩耗が主である。EAFにおける精錬処理は溶製する鋼種によって多岐に渡っており、塩基度の低いスラグ組成となる精錬処理もある。また、操業や構造によってEBTチューブに熱スポーリングを生じやすい場合とそうでない場合がある。このようないろいろなケースに対応するために、当社はいくつかの材質をラインナップしている。Table 1に代表的な3材質の標準品質を示す。いずれも耐食性、耐摩耗性に考慮した緻密質れんがであり、(A)はカーボン量が20%で汎用性の高い材質、(B)はカーボン量を低減し高強度とした高耐摩耗性材質で、熱スポーリングの影響が小さいEAFに使用される。(C)は低CのAl₂O₃-MgO-C材質で、スラグ塩基度の低い操業をしているEAFに使用され、高い

other words, the initial inside diameter can be increased by using an EBT tube with a low wear rate and improve operation efficiency of EAF.

As for the wear mechanism of the EBT tube, abrasion by the flow rate of molten steel and erosion by slag inclusions in the tapping steel is important. There are many refining treatments in EAF operations according to steel class, and one of them is low basicity slag composition. In addition, there may be a high occurrence of thermal spalling in an EBT tube depending upon operation and structure. We have a line-up of some materials to support such various cases. Table 1 shows the standard quality of 3 representative materials. All materials are high density bricks with high corrosion and abrasion resistance; (A) quantity of carbon 20% with general versatility, and (B) reduced carbon content with high abrasion resistance and high strength, for use in an EAF where the effect of spalling is small, (C) Low C Al₂O₃-MgO-C materials used for an EAF operating with low slag basicity and shows high abrasion resistance.

Figure 8 shows the abrasion test results of (A)-(C). All samples show high abrasion resistance, and in the low carbon materials abrasion resistance is better. Figure 9 shows the relationship between wear rate of EBT tube at EAF with low basicity operation and laboratory abrasion index of (A)-(C). The wear rate decreases in proportion to an abrasion index, and the correlation between EBT tubes wear rate and abrasion resistance is high. As shown in Fig.10, our EBT tube maintains a good texture and properties even after use. By applying (C) in this EAF, we were able to extend the initial diameter of EBT in the early stages, and improve the operation rate by shortening the tapping time just after the EBT exchange.

	(A) MgO-C (C=20%)	(B)MgO-C (C=12%)	(C) Al ₂ O ₃ -MgO-C(C=9%)
Appearance			
Cut surface			
Abrasion index	100	86	59

Fig.8 Abrasion test results of bricks for EBT tube.

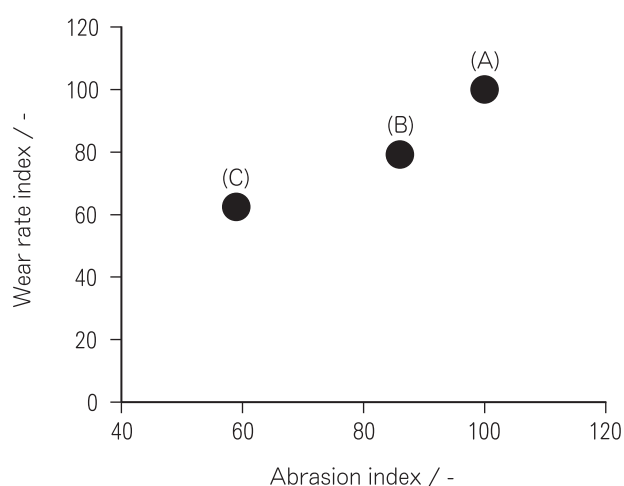


Fig.9 Variation of wear rate of EBT tube as a function of abrasion index obtained from an EAF which operates with low basicity slag.

(C) C=9% Al₂O₃-MgO-C bricks

	Apparent porosity / %	Bulk density / -
a	8.5	3.02
b	8.7	3.00
c	9.0	2.99

Fig.10 Cut surface and properties of the EBT tube after used for 90heats.

耐摩耗性を示す。

Fig.8に(A)～(C)の熱間摩耗試験結果を示す。いずれの試料も高い耐摩耗性を示すが、カーボン量の少ないものの摩耗が小さい。Fig.9に低塩基度で操業した実EAFのEBTチューブで使用された(A)～(C)の損耗速度を実験室で評価された熱間摩耗指数に対して示す。損耗速度は摩耗指数に比例して低下し、EBTチューブの損耗速度は耐摩耗性と相関が高いことがわかる。Fig.10に示すよ

In this way, we can improve the wear rate by making the materials of the EBT tube wear in coordination with the operation of EAF. If wear rate can be decreased, we are able to increase the initial diameter with the aim life and contribute to improving the operation rate of the EAF.

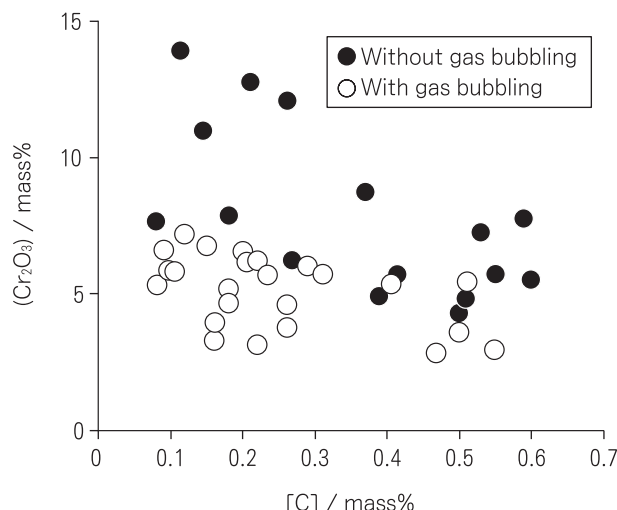


Fig.11 Variation of (Cr₂O₃) as a function of [C].

うに、当社のEBTチューブは使用後もしっかりと組織と良好な物性を維持している。このEAFでは(C)を適用することで初期の孔径を拡大することができ、EBT交換直後の出鋼時間短縮による稼働率向上を図ることができた。

このように、EAFの操業に合わせてEBTチューブの材質を適正化することで損耗速度の低減を図ることができる。損耗速度が低減できれば、目標寿命に合わせて初期孔径を大きくすることが可能となり、EAFの稼働率向上に寄与する。

4. EAF底吹き用耐火物

EAFでの精錬中における炉底部からの不活性ガス吹き込みは、溶鋼攪拌による精錬効率向上で、未溶解スクラップの解消、合金歩留りの向上、電力原単位の低減、操業時間の短縮を図ることができ^{4),9)-14)}、特に高グレードステンレス鋼や特殊鋼の溶製に有効である。Fig.11に福本ら⁹⁾が示した底吹きの効果を読み取って示す。ガス吹き込みにより、[C]の優先酸化が生じ、Crの歩留まりが向上していることが示されている。ガスの吹き込みは、MgO-Cレンガ中に多数のステンレス細管を配置したMulti-Hole Plug (MHP)を用いて行われる。底吹き耐火物の基本構造と一般的な損傷形態をFig.12に示す。

Fig.12に示したように、底吹きを行うEAFの炉

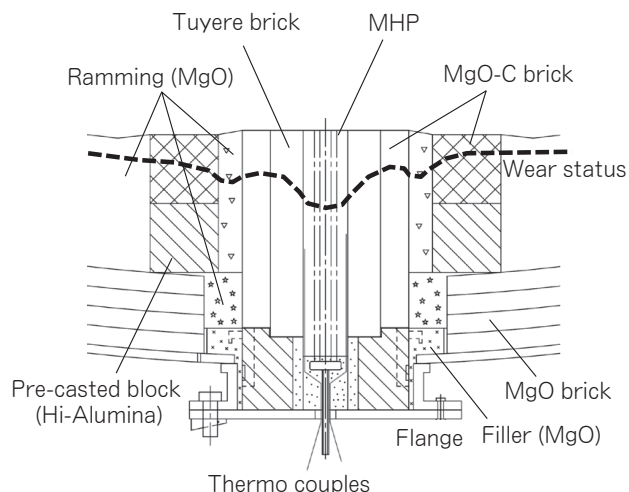


Fig.12 Basic design and typical wear status for bottom blowing refractories.

4. Bottom Blowing Refractories for EAF

Blowing can improve the refining process of molten steel stirring, reduce occurrences of undissolved scrap, improve alloy yield ratio, reduce electric power consumption, and shorten the operation time^{4),9)-14)}. Inert gas blowing during bottom EAF treatment is particularly effective for producing high grade stainless and specialty steel. Figure 11 shows the effect of bottom blowing as shown by Fukumoto and others⁹⁾. The preferential oxidation of [C] occurs because of gas blowing, and shows that Cr yield improves. Gas blowing is performed using the Multi-Hole Plug (MHP) where a large number of stainless steel narrow tubes are arranged in MgO-C brick.

Figure 12 shows the standard damage and basic structure of bottom blowing refractories. As shown in the heavy dotted curve in Fig.12, that damage occurred partially due to abrasion and thermal spalling in the MHP area for gas blowing. Abrasion occurs because of the violent turbulence of molten steel suspending carbonaceous material and refining agent at the gas blowing part. It is thought that the abrasion is

底はMHP部が局部的に損傷し、その要因は摩耗と熱スポーリングである。摩耗はインジェクションされた炭材や精錬処理剤を懸濁させた溶鋼のガス吹き込み部における激しい乱流によって生じる。摩耗は、微視的に見れば物質同士の衝突による細かい亀裂の発生と、発生した亀裂が進展して生じる微細な破壊の総和と考えられる¹⁵⁾。

熱スポーリングは不活性ガス吹き込みによる冷却によって発生する急激な温度勾配で生じる強い熱応力によって引き起こされる。熱スポーリングは、単純に考えると、温度差で生じるひずみ量の差に起因して発生する応力が耐火物の破壊強度を上回って亀裂が発生する現象である。この応力 σ はひずみ量の差を $\Delta \varepsilon$ 、耐火物の弾性率を E として式(3)で表わされる。

$$\sigma = \Delta \varepsilon \cdot E \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

このような損耗を示す底吹きノズル用の耐火物としては、カーボンボンドの適正化により組織を強化した高耐摩耗性MgO-Cれんがの適用が有効である。カーボンボンドによる組織強化は材料の弾性率を低下させるとともに破壊仕事を増大させるからである。これについてFig.13で示す。Fig.13は、曲げ試験における試料の荷重と変位を

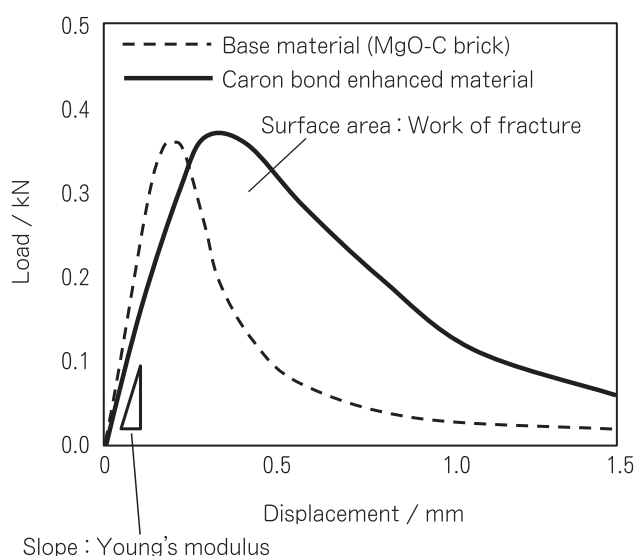


Fig.13 Effect of carbon bond enhancement on work of fracture.

a grand total of the micro fractures resulting from fine crack initiations and propagations caused by the collision of particles¹⁵⁾.

Thermal spalling is caused by strong thermal stress occurring from the cooling caused by the inert gas. Thermal spalling is a phenomenon occurring when the stress is caused by a difference of the distortion quantity over a difference in temperature, and exceeding the fracture strength of the bricks. This stress σ , difference of strain $\Delta \varepsilon$, the modulus of elasticity of bricks E is expressed as Eq.(3).

$$\sigma = \Delta \varepsilon \cdot E \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

When such bottom blowing bricks wear is indicated, application of high abrasion resistant MgO-C brick with strengthened carbon bond is effective. This is due to the reinforcement of the carbon bond reducing the modulus of elasticity of the materials, and it increases the work of fracture. Figure 13 shows the plotted load and the displacement of the sample in the bending test. The early degree of inclination in this figure is equivalent to the modulus of elasticity, and the maximum load supports the fracture strength. A crack occurs with the maximum load. In addition, the area of the part surrounded in a plot supports the work of fracture consumed by the destruction of the sample, and the area after the maximum load showed the work consumed to propagate the crack. As shown in Fig.13, the reinforcement of the carbon bond is effective for increasing the work of fracture and drop in the modulus of elasticity, particularly the increase in the work of fracture is consumed from the propagation of crack. As shown in Eq.(3), the reduction in the modulus of elasticity reduces thermal stress, and raises resistance for the generation of the crack. Improvement of the work of fracture raises the resistance for crack propagation. In this way,

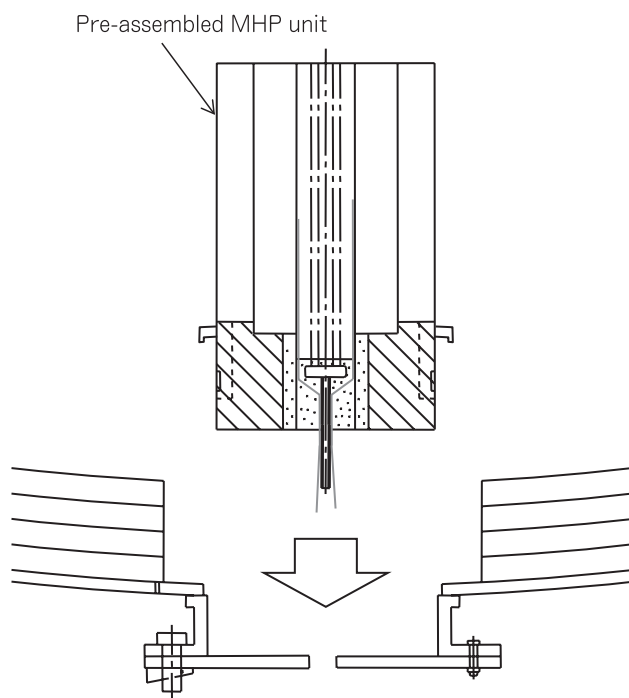


Fig.14 Installation of Pre-assembled MHP unit to EAF bottom.

プロットしたものである。この図における初期の傾きは弾性率に、荷重の最大値は破壊強度に対応しており、荷重の最大値で亀裂が発生する。また、プロットで囲まれた部分の面積は試料の破壊に消費された仕事に対応し、荷重が最大値を示した後の面積は、発生した亀裂の進展に消費される仕事である。Fig.13より、カーボンボンドの強化は弾性率の低下と破壊仕事の増大、特に、亀裂の進展に消費される破壊仕事の増大に有効であることがわかる。弾性率の低減は式(3)でわかるように、発生する熱応力を低減させ、亀裂の発生に対する抵抗性を高める。破壊仕事の向上は亀裂の進展に対する抵抗性を高める。このように、カーボンボンドの強化により、耐摩耗性と耐スポーリング性を高めることができる。

Fig.12に示されている熱電対は残厚センサーとして機能し、熱電対が切れたタイミングでガス吹きを停止し補修を行うことで漏鋼を防止することができる。Fig.12において、下部のフランジを開けることで使用後のMHPを容易に取り外すことができる。また、MHPと羽口れんがを一体化し

by reinforcement of the carbon bond, we can improve the abrasion and spalling resistance.

The thermocouple shown in Fig.12 performs the role of backup sensor, to prevent the leakage of molten steel by stopping gas blowing when the thermocouple reaches a set point, then repairs can be made. In Fig.12, we can remove MHP after use, by opening a flange at the lower part. In addition, as shown in Fig.14, installation is easy using a hanging jig because the MHP unit is a monoblock structure comprised of a MHP and tuyere brick.

As mentioned above, MgO-C brick which is superior in thermal spalling and abrasion resistance is used for the MHP unit, but local erosion of the gas blowing area cannot be avoided. Therefore we developed a combination tuyere system¹⁴⁾. Figure 15 shows a summary of the combination tuyere. The combination tuyere uses two tuyeres in a pair and the stainless pipes are set buried in the second tuyere. When they operate in this condition, tuyere #1 is initially used until #2 tuyere wears sufficiently to expose the stainless pipes. When the wear reaches the stainless tubes buried in the second tuyere exposed to bath level, gas blowing starts. Gas blowing starting of the second tuyere is also regard as sensor of the remaining thickness. At this time, gas blowing of first tuyere stops and repairing begins. After repairs, we can continue to use the #2 tuyere until the remaining material of the second tuyere reaches the management value. In this way, the combination tuyere system uses the partial damage of the tuyere effectively to extend the life of the bottom.

In the EAF, there is AC-EAF producing an arc between three movable electrodes and scrap or molten steel with a three-phase AC current. DC-EAF produces an arc between an anode bottom electrode and upper cathode movable electrode through the scrap or molten

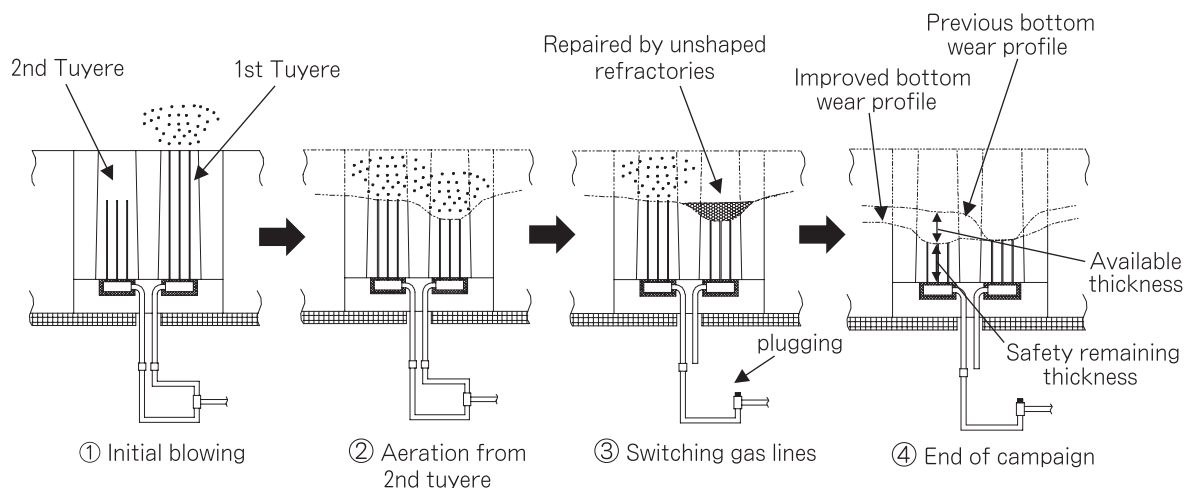


Fig.15 Schematic illustration of application of combination tuyere.

たMHPユニットとすることで、Fig.14に示すように、取付けの工数を大幅に削減することも可能である。

上述のように、EAFの底吹き用耐火物として耐熱スポーリング性、耐摩耗性に優れたMgO-Cれんがを使用しているが、ガス吹き込み部が先行して局部損傷することは避けられない。そこで、当社はコンビネーション羽口システムを開発した¹⁴⁾。Fig.15にコンビネーション羽口の概要を示す。コンビネーション羽口は2つの羽口を一对で用いるもので、2番羽口にはステンレスの細管群がれんが中に埋め込まれた状態でセットされている。この状態で操業すると、1番羽口部が先行して損耗、周辺部は1番羽口に追従するように損耗する。損耗が進行すると、2番羽口に埋め込まれていた細管が炉底に露出、ガス吹きを開始する。2番羽口のガス吹き開始は残厚を検出するセンサーでもあり、このタイミングで1番羽口からのガス吹きを停止し、補修を行う。その後は2番羽口を使用しながら2番羽口の残厚が管理値に達するまで操業できる。このように、コンビネーション羽口システムは、羽口部の局部損傷を巧みに利用して炉底の寿命を延長する技術である。

EAFには、3相交流電流（AC）を用い、3本の可動電極とスクラップまたは溶鋼の間でアークを発生させるAC-EAFと直流（DC）に変換した

steel with direct current（DC）。

A magnetic field is produced in a DC-EAF due to the electric current, and it is said that the bottom blowing does not generally perform well due to the existence of stirring by electromagnetic force³⁾, but there is a report that states that it is effective for the resolution of inactive regions by stirring the molten steel around the bottom¹³⁾。

5. Slide Gate Valve for EAF Tapping¹⁶⁾

When tapping from EAF to ladle at the final stage, there is some possibility of slag contamination into the ladle. In contrast, the large quantity of slag contamination can be reduced by applying the slide gate valve (SGV). This permits improvement of the second refinement efficiency and steel quality control. As shown in Fig.16, our SGV system can be easily mounted and removed.

Figure 17 summarizes our SGV system. Our SVG system is the same structure used for continuous casting, and consists of an upper nozzle, a top plate, a lower plate, and a lower nozzle. The upper nozzle connects with the tapping hole, and molten steel is drained from the lower

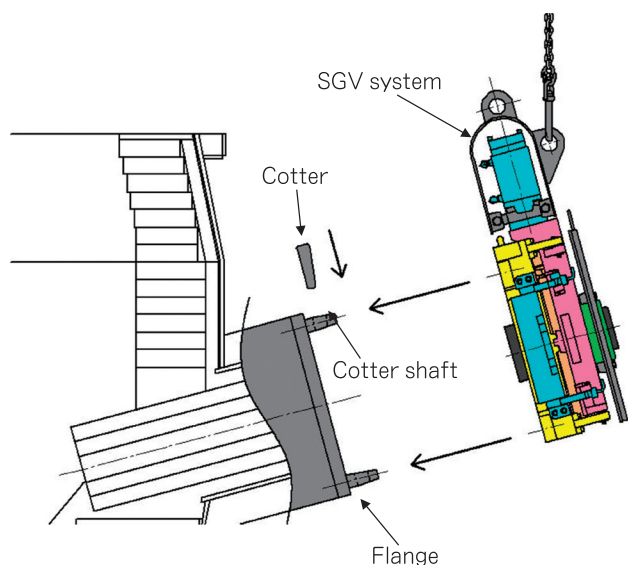


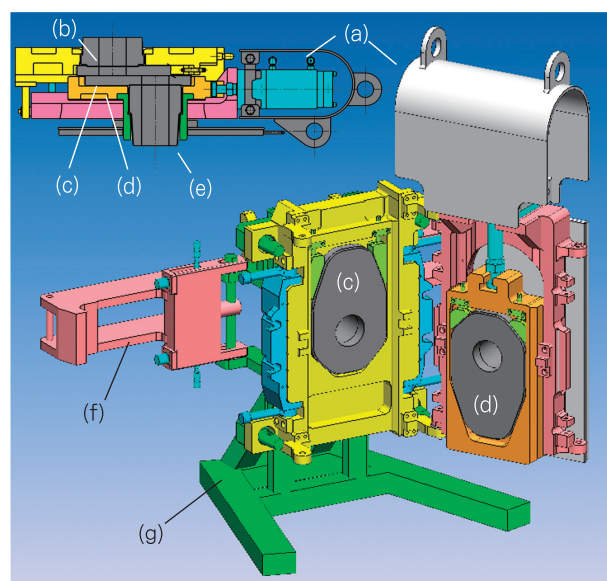
Fig.16 Installation of SGV system to the spout of EAF.

電流を用い、陽極側炉底電極と陰極側上部可動電極との間でスクラップまたは溶鋼を介してアークを発生させるDC-EAFがある。DC-EAFは電流の回りに磁界が生じ、電磁力による溶鋼攪拌が生じるため一般的に底吹きは行われないとされている³⁾が、湯溜まり周辺部の攪拌が強化され不活性領域の解消に効果的であるとの報告もある¹³⁾。

5. EAF出鋼孔用スライドゲートバルブ (SGV)¹⁶⁾

EAFからの出鋼末期、炉体を元に戻す時は、取鍋内に少量のスラグが混入する。これに対し、スライドゲートバルブ (SGV) を取り付けることでスラグの取鍋への混入量を大幅に軽減でき、二次精錬効率の向上、鋼成分制御の厳格化、などが可能となる。当社のSGVシステムはFig.16に示すように容易に取り付けおよび取り外しが可能である。

Fig.17に整備架台にセットされたSVGシステムの状態を示す。SVGシステムは、連続鋳造に用いられているものと同じ構造で、上ノズル、上プレート、下プレート、下ノズルからなる。上ノズルが出鋼孔に接続し下ノズルから溶鋼が溶鋼鍋に排出され、プレートが褶動することでバルブの開閉が行われる。EAFのSGVに用いられるプレートは、Fig.18に示すように、大型でリング部とそれを取り囲む外周部の2材質からなる。



(a)	SGV system
(b)	Upper nozzle
(c)	Upper plate
(d)	Lower plate
(e)	Lower nozzle
(f)	Cramp arm
(g)	Maintenance stand

Fig.17 Schematic images of SGV system set on the maintenance stand.

nozzle to the steel ladle. The opening and shutting of the valve is carried out by sliding plate. The plate used for the SGV of the EAF consists of an inner ring and outer part made from two separate materials as shown in Fig.18.

Table 2 shows the summary of the materials for the SGV system. The upper nozzle uses MgO-C materials with high corrosion resistance and the lower nozzle uses Al₂O₃-C materials with high thermal spalling resistance. As for the plate ring, ZrO₂ materials with high corrosion resistance are used to reduce enlargement of the bore by erosion. The outer part is made of high Al₂O₃ materials with high heat resistance.

We confirmed safe and efficient installation and disassembly work of the SGV system at the EAF, and plate/nozzle exchange of an installed

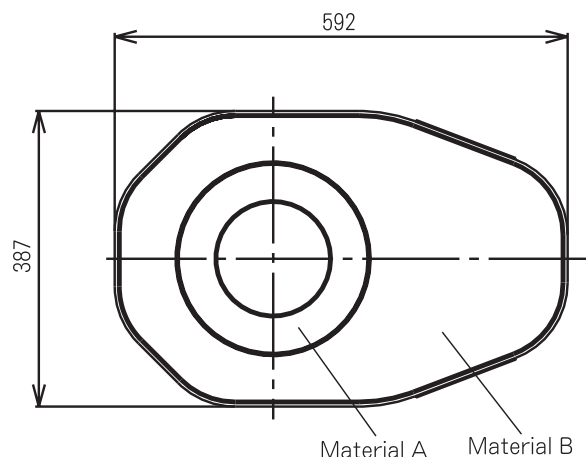


Fig.18 Refractory brick for plate of SGV system for EAF spout.

Table 2にSGVシステムに使用される耐火物の材質をまとめる。上ノズルは出鋼孔の材質同様、耐食性に優れるMgO-C質を適用し、熱スポーリングを生じる下部ノズルには Al_2O_3 -C材質を使用している。プレートについて、リング部は溶損による孔径拡大が生じるため耐食性に優れる ZrO_2 質を配置し、外周部には耐熱性に優れる高強度 Al_2O_3 質を用いている。

このSGVシステムのEAFへの取付けおよび取外し作業が迅速に行えること、また、SGVシステムの耐火物交換作業も迅速に実施可能なことは実EAFで確認している。このシステムは、樋出鋼方式、炉底出鋼方式いずれの方式へも適用が可能である。

6. ABB式DC-EAF炉底電極用MgO-Cれんが¹⁷⁾

現在稼働しているEAFの多くはAC-EAFであるが、DC-EAFはAC-EAFに比較して電力ならびに電極や耐火物の所要原単位が小さく、また、騒音・フリッカーも少ない特徴があるため³⁾適用が広がっている。DC-EAFの陽極となる炉底電極の方式はCLECIM-IRSID式とMAN-GHH式、ABB式の3つに大別される。CLECIM-IRSID式とMAN-GHH式は棒鋼と耐火物を組み合わせたものを炉底電極としているのに対し、ABB方式は導電性を有する耐火物自体を炉底電極としている。当社は、ABB式炉底電極用れんが導電性と耐

Table 2 Refractory materials for SGV system

Parts	Material
Upper nozzle	MgO-C
Plate material A	ZrO_2
Plate material B	Al_2O_3
Lower nozzle	Al_2O_3 -C

SGV system is possible as well. Spout tapping and bottom tapping is also possible with this system.

6. MgO-C Bricks for ABB Type DC-EAF Bottom Electrode

Up to now most of operating EAF was AC-EAF. But in DC-EAF, the consumption rate of electric power, electrode and refractories is less than AC-EAF, and there are characteristic of less noise and flicker so nowadays DC-EAF has been widely applied³⁾. The bottom electrode for anode DC-EAF can be roughly classified into three types CLECIM-IRSID type, MAN-GHH type and ABB type. The ABB type utilizes conductive refractories as a bottom electrode whereas CLECIM-IRSID and MAN-GHH type use steel pins combined with refractories for the bottom electrode. We have developed MgO-C bricks which have high durability and conductivity for ABB type bottom electrodes¹⁰⁾.

Bottom electrode bricks play a role as the electrode itself. Due to electricity loss occurring if the electrical resistance of the brick is large, it is desirable for small electrical resistance levels. As a matter of course, superior durability is preferable. In cases where we checked the electrode brick during dismantling, metal penetration had occurred at the joint of the bricks and sometimes spalling was seen at the refractory hot faces during the skull removal. We estimate that these main damage factors arise from brick joints opening during heating and cooling. Therefore, reduction in brick

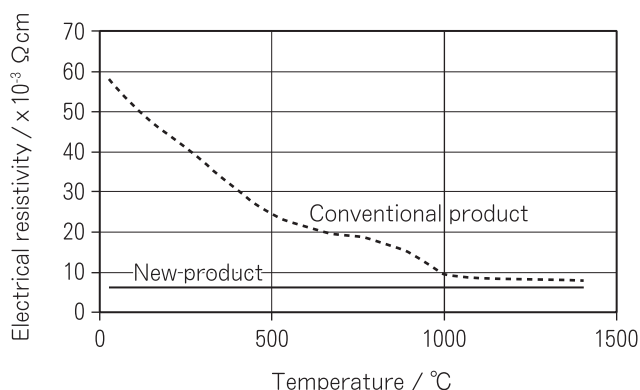


Fig.19 Electric specific resistances of MgO-C bricks for bottom anode of ABB type DC-EAF.

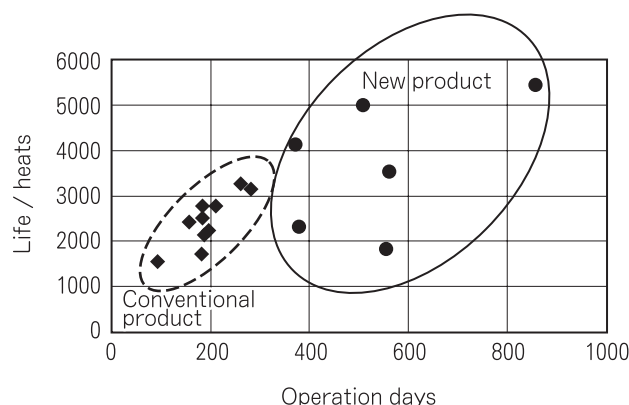


Fig.21 Service life of an of ABB type DC-EAF.

用性を兼ね備えたMgO-Cれんがを開発した¹⁰⁾。

炉底電極部れんがは、れんが自体が電極の役割を果たす。れんがの電気抵抗が大きいと電力のロスが生じるので、電気抵抗値は小さい方が好ましい。また、当然のことながら耐用性に優れる方が好ましい。実機解体時の電極れんがを見ると、れんが目地間に侵入した地金とれんがが一体化し、地金除去時に稼働面近傍のれんがが剥離する場合が見られる。これらの損傷は、稼働時の加熱・冷却によって生じる目地開きが主要因と考えられ、電極れんがの耐用向上には、膨張の低減による容積安定性や適度な残存膨張性付与によるれんが収縮抑制などが重要である。

当社のABB式炉底電極用れんがは、低温から高温にわたって小さい電気抵抗を示し(Fig.19)、低い熱膨張率と大きい残存膨張を示す(Fig.20)。こ

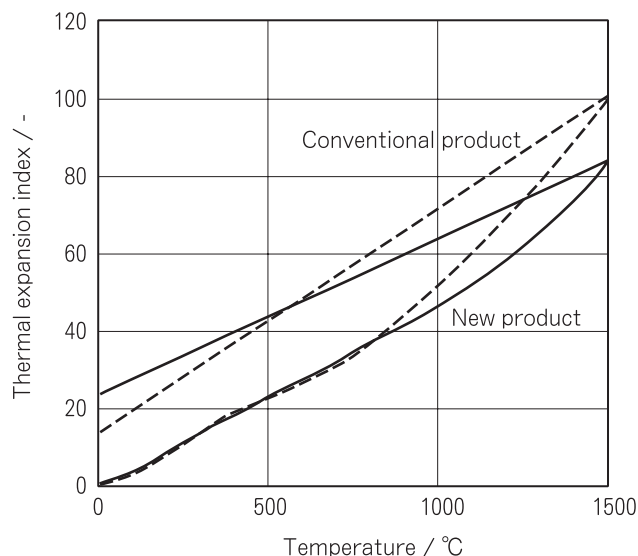


Fig.20 Thermal expansion behaviors of MgO-C bricks for bottom anode of ABB type DC-EAF.

shrinkage by a moderate residual expansion is important to improve the durability of the electrode brick.

The brick for our ABB type bottom electrodes shows low electrical resistance from low temperature to high temperature (Fig.19) and low thermal expansion and high residual expansion (Fig.20). Figure 21 shows the actual test results of our developed products having these properties. The developed product enables stable operation by the superior characteristic and greatly contributes to the life improvement for the ABB type bottom electrode.

7. High Slaking Resistance MgO Bricks for Permanent Lining

As shown in Fig.12, burned MgO bricks have been widely used for permanent bricks of EAF. Permanent brick need to have a stable minimum performance for a long term without deterioration in order to prevent EAFs from steel leakage even if the local erosion and partial loss of the working bricks. Taking the erosive qualities of the EAF slag aforementioned in section 2

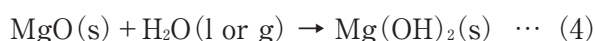
Table 3 Typical qualities of magnesia bricks with high slaking resistance

	Conventional	High slaking resistance
Chemical composition /mass%		
MgO	93.5	93.1
SiO ₂	2.0	2.0
Fe ₂ O ₃	0.8	0.8
Al ₂ O ₃	1.0	1.0
CaO	1.6	1.6
Apparent porosity /%	19.0	19.1
Bulk density /-	2.85	2.85
Cold crushing strength /MPa	57	60

これらの具備特性を有する開発品を実機でテストした結果をFig.21に示す。開発品は優れた特性から安定した操業を可能にし、ABB式炉底電極の寿命向上に大きく寄与している。

7. パーマライニング用 高耐消化性MgOれんが

Fig.12に示されている様に、EAFのパーマレンがとして焼成MgO質れんがが使用されるのが一般的である。パーマレンがには、組織劣化をおこさず長期にわたって安定していること、局部溶損や脱落などでワーク耐火物が消失しても漏鋼をおこさない最低限の耐用性を示すこと、が要求される。2項で述べたようにEAFのスラグは侵食力が高いので、耐熱性と耐食性に優れ、アルカリガスなどによる侵食に対しても良好な抵抗性を示すMgO質れんがが用いられる。しかし、MgOは式(4)に従って水と反応して水和物を形成、体積膨張によって崩壊する「消化現象」を示す欠点がある。



特に、EAFは側壁を水冷ジャケットで冷却しており、水冷ジャケットから漏水するリスクがある。また、炉内に放水して炉を冷却する場合もある。これらによりMgOれんがが消化しトラブルに至る可能性がある。

これに対して、当社は極めて消化しにくい耐消化性MgOれんがを開発した。代表品質をTable 3に、オートクレーブを用いた消化試験結果を

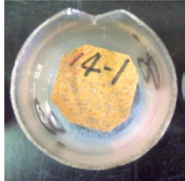
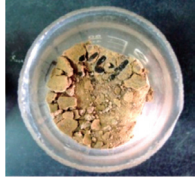
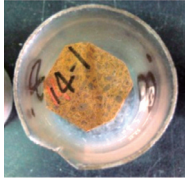
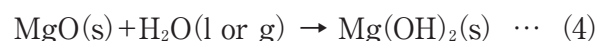
	Conventional products	High slaking resistance products
Before test		
After autoclave test 0.3MPa-3h		
Weight change (%)	+5.4	+0.1

Fig.22 Autoclave test results of magnesia bricks.

into account, MgO brick have been used due to their high heat and corrosion resistance, and good resistance to alkali gas erosion. However, MgO forms a hydrate in a reaction with water according to Eq.(4).



So there is the disadvantage of a slaking phenomenon causing collapse by volume expansion.

Particularly, the EAF sidewall is cooled by a water-cooling jacket and is at risk of water leaks. In addition, sometimes a customer sprinkles water into the furnace for cooling purposes. Herewith, slaking of MgO bricks occurs and there is a possibility of failure.

In contrast, we have developed extremely high slaking resistant MgO brick. Table 3 shows the representative quality, and slaking test results using an autoclave shown in Fig.22. The chemical compositions and quality properties of high slaking resistant MgO bricks and conventional products are almost equal but the new products have excellent slaking resistance. A hydration reaction caused by water entering the furnace during repairs or from the water leaks can

Fig.22に示す。耐消化性MgOれんがの化学組成や品質特性は一般品とほぼ同じであるにも関わらず、優れた耐消化性を有している。従って、水冷ジャケットからの漏水や炉補修時の散水などに起因する急激な水和反応を大幅に低減できる。また、季節要因などで長期的に徐々に生じる消化に起因するれんが組織の脆化も極めて進行し難く、パーマれんがの劣化に伴う更新頻度の低減と炉補修時間の短縮などに貢献できる。

8. 結言

当社は、EAF用耐火物として様々な優れた特性を有するユニークなれんがを開発し、寿命向上、操業の効率化に寄与している。今後とも各EAFの操業条件にあった製品の開発、供給に努め、更なる操業の効率化に貢献していく。

be reduced by utilizing this new product. In addition, the brick embrittlement due to slaking gradually occurs over a period of time may be difficult to detect. Therefore, this new product can contribute to reducing furnace repair time and reduction in the renewal of the permanent lining.

8. Conclusion

We are continuously developing various superior bricks for the EAF which can directly contribute to the extension of life and improving efficiency of furnace operation. From this period, our focus is to develop the products in accordance with an operating condition of each EAF, continuously improving operation efficiency.

References

- 1) R. Waugh : Ironmaking & Steelmaking, **43** [4] 258-263 (2016).
- 2) D. Collins : Ironmaking & Steelmaking, **43** [4] 252-257 (2016).
- 3) T. Noda and K. Izumi : Tetsu-to-Hagané, **77** [6] 723-734 (1991).
- 4) G. A. Irons : Iron & Steel Technology, **2** [7] 110-122 (2005).
- 5) A. Hanna and K. Zettl : AISTech 2014 Proceedings, Association for Iron & Steel Technology, (2014).
- 6) G. Buchebner, A. Hanna and K. Zettl : AISTech 2014 Proceedings, Association for Iron & Steel Technology, (2014).
- 7) S. Umeda, T. Ikemoto, and T. Matsui : Taikabutsu, **59** [10] 544-551 (2007).
- 8) S.C. Carniglia : American Ceramic Society Bulletin, **52** [2] 160-165 (1973).
- 9) I. Fukumoto, K. Takami, T. Irie and K. Kawakami, Tetsu-to-Hagané, **78**, T161-164, (1992).
- 10) M. Uemura, H. Nabeshima, T. Ishiguro, H. Kato, I. Oyamada, Tetsu-to-Hagané, **78**, T189-192, (1992).
- 11) B. Li : ISIJ Int., **40**, 853-869 (2000).
- 12) S. Saito, H. Yamazoe, AISTech 2014 Proceedings, Association for Iron & Steel Technology, (2014), pp.1343-1352.
- 13) M. Ramírez, J. Alexis, G. Trapaga, P. Jönsson, J. McKelliget, ISIJ Int., **41**, 1146-1155 (2001).
- 14) S. Imai, M. Takai, Shinagawa Technical Report, **55** 47-52 (2012).
- 15) R. Fujiyoshi, M. Iida, A. Iida, A. Torigoe, H. Yoshioka : Dai 4 kai Tekkou-you Taikabutsu Senmon linkai Hokokushu, Technical Association of Refractories Japan, (2016) pp.1-7.
- 16) A. Takata, K. Yamamoto, T. Saeki, M. Kajimura : Shinagawa Technical Report, **55** 41-46 (2012).
- 17) Y. Hanafusa, H. Tomiya, K. Mori : Shinagawa Technical Report, **59** 127-131 (2016).