

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

高破壊靱性MgO-Cれんがの適用による
転炉装入壁の損傷速度低減

Reduction of Wear Rate of B.O.F. Charging Pad
by Application of High Fracture Toughness
MgO-C Brick

藤 吉 亮 磨

Ryoma FUJIYOSHI

鳥 越 淳 志

Atsushi TORIGOE

飯 田 敦 久

Atsuhisa IIDA

吉 岡 宏 樹

Hiroki YOSHIOKA

品川技報

高破壊靱性MgO-Cれんがの適用による転炉装入壁の損傷速度低減

Reduction of Wear Rate of B.O.F. Charging Pad by Application of High Fracture Toughness MgO-C Brick

藤 吉 亮 磨^{*1} 飯 田 敦 久^{*2}
Ryoma FUJIYOSHI Atsuhisa IIDA
鳥 越 淳 志^{*3} 吉 岡 宏 樹^{*4}
Atsushi TORIGOE Hiroki YOSHIOKA

要 旨

転炉装入壁のスクラップ装入による損耗について、実験室でのスクラップ落下衝撃試験と実炉テストで検討した。それらの結果より、実炉で起こるれんがの損傷はスクラップ衝突による破壊と亀裂の伸展および連結によって生じており、機械的衝撃に強い高破壊靱性MgO-Cれんがの適用が有効であると結論された。

Abstract

In this paper, the development of MgO-C bricks, designed for the basic oxygen furnace (BOF) taking into account the mechanical impact of scrap charge on the charging pad is described. In order to clarify the influence of scrap charging on the wear of the BOF charging pad accurately, a steel block dropping experiment was carried out, followed by industrial trials. According to the results of the experiment and industrial trials, it was verified that charging pad wear is a result of the linking of cracks, which were initiated and propagated by mechanical shock induced by scrap collision. Thus, it is concluded that the application of high fracture toughness MgO-C brick, which shows excellent crack propagation resistance, is effective.

1. 緒言

鉄鋼生産においては、主要原料として石炭を多量に使用することから、多くのCO₂ガスを排出しているのが現状である。日本が排出するCO₂ガスの内、鉄鋼が占める割合は全体の12%程度である。その中でも高炉は排出ガス量が最も多く、全体の40%を占める。CO₂削減を目的に、転炉にスクラップを投入し精錬を行う取り組みが行われており、

1. Introduction

Steel making is an industry which emits large amounts of green house gases since coal is used as reduction agent for iron ore as well as fuels of blast furnace (BF) iron making process. Therefore, the steel industry accounts for 12% of CO gas emissions in Japan and 40% of CO gas emitted from integrated steel mills comes from BF's. Hence, steel scrap charging in the

*1 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

*2 西日本工場 岡山製造部 第1製造室 室長 General Manager, Manufacturing division No.1, Okayama Plant, West Japan Works

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

*4 西日本工場 岡山製造部 技術室 Technical Sec., Okayama Plant, West Japan Works

転炉へのスクラップ投入量は年々増加している。

転炉に装入されたスクラップが直撃する部分は、装入壁 (Charging Pad) と呼ばれる。転炉装入壁は、Fig.1に示すように装入されたスクラップや溶銑が当たる部位である。従って、装入壁はスクラップ落下による機械的衝撃や摩耗の影響を受け、スクラップ量が増えるほど一般壁よりも損傷が激しくなる。また、スクラップには重量屑と呼ばれる単重500kg以上の重量物もあり、重量屑使用量の増加に伴って損耗速度が増加することが知られている^{1), 2)}。

装入壁は転炉を操作室側に傾動させたときに炉口から下へ覗き込んだ所に位置しているため熱間観察が困難で、さらにサンプリング装置付解体機が届かない位置なのでサンプル回収も困難な部位である。熊井らは熱間で鉄球を落下させ、れんがに衝撃を加えて損傷させるべく、熱間耐衝撃試験装置を考案し、転炉れんがの損傷解析を行った³⁾。しかし、試験に用いたれんがはドロマイト質の焼成れんがが主であり、現在広く使用されているMgO-Cれんがの報告は行われていない。

そこで今回は、MgO-Cれんがを用いた衝撃試験

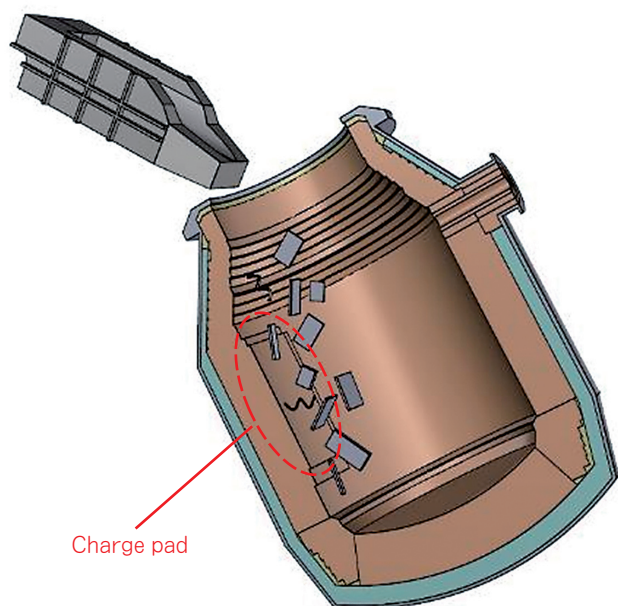


Fig.1 Schematic illustration of scrap impact damage of BOF charge pad.

basic oxygen furnace (BOF) is increasing year by year since it decreases use of hot metal from the BF.

The Charging pad is the area in which pig iron and steel scrap attack directly as shown in Fig.1. Thus, this area suffers considerable mechanical impact from steel scrap collision. It is well-known that the wear rate of the charging pad increases proportionally as scrap quantity and heavy scrap (over 500kg) rate increases^{1), 2)}. Practically, daily based observation of the charging pad is difficult since it is on the same side as the operation room where one can observe the in-furnace status when the vessel is tilted. In addition, brick sampling after use is also difficult because it is too far from the mouth to obtain the bricks by using a sampling tool equipped demolishing machine. Hence, off-line experiments are necessary to understand how the scrap collision influences wear.

Kumai et. al.,³⁾ created an apparatus for a steel ball dropping experiment under hot conditions and evaluated the hot mechanical impact resistance. According to the experimental results, they discussed brick wear caused by mechanical shock. However, the bricks that they subjected to the experiment were the burned dolomite bricks while unburned MgO-C bricks have been the most popular for BOF during these past several decades.

In this study, therefore, a steel block dropping experiment was carried out for MgO-C brick and charging pad brick wear mechanism was hypothesized. Based on the hypothesis, new materials for the charging pad were developed and their effectiveness was validated by commercial application.

2. Steel Block Dropping Experiment

2. 1 Experimental method

In order to evaluate the influence of mechanical shock on the wear status of MgO-C brick, a steel block dropping experiment was carried out. Figure 2 and 3 show a schematic illustration and

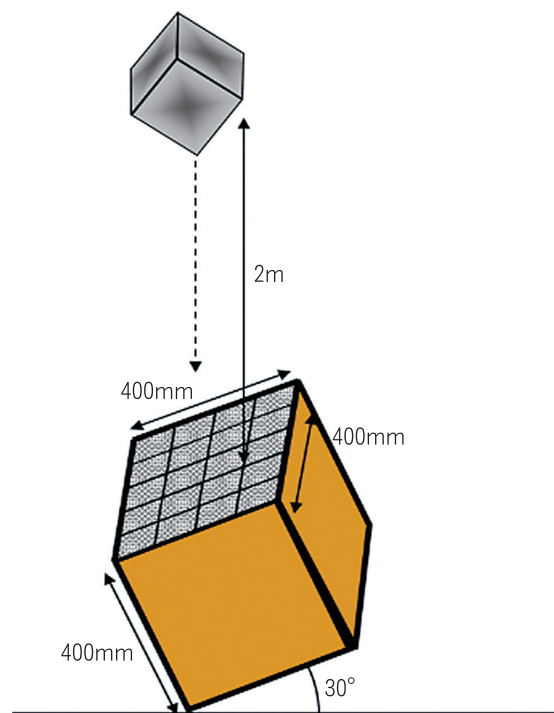


Fig.2 Schematic illustration of the scrap drop impact test.

を行い、れんがの損傷を確認した。そこから実炉で起こるれんがの損傷を推定した上で、新規材質の開発、実炉テストを行った。

2. スクラップ落下衝撃試験

2. 1 試験方法

MgO-Cれんがを用いたスクラップ落下衝撃試験を行った。試験の概略図をFig.2に、外観をFig.3に示す。試験には1,200℃で3時間還元焼成した高強度品を使用した。形状は100×80×400mmであり、20本のれんがを組み合わせて使用した。れんがは鉄板を用いて拘束し、水平から30°傾けた面にスクラップを想定した12kgの直方体の鉄片を試料上部2mの高さから落下させる試験を行い、れんがの状態を観察した。

2. 2 試験結果と考察

試験後のれんが表面の写真をFig.4に示す。鉄片衝突部位が削り取られ欠損している様子が観察された。鉄片が衝突したれんがの外観写真をFig.5に示す。欠損部位かられんが内部へ亀裂が伸展していることが分かった。

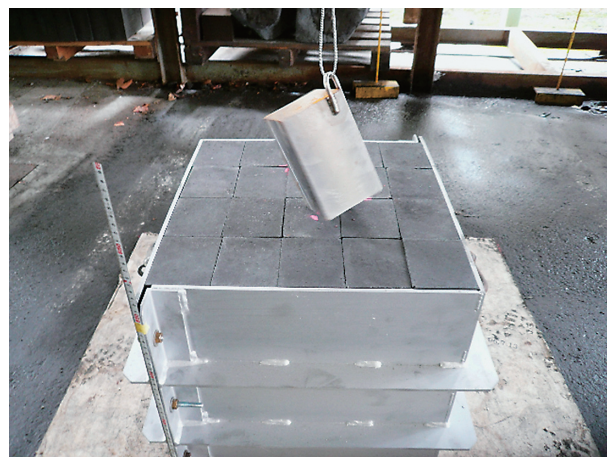


Fig.3 The appearance of the scrap drop impact test.

external appearance of the experiment, respectively. 20 samples in shape of 100×80×400mm of high strength MgO-C bricks, which had been pre-heated at 1400℃ for 3h in a coke breeze, were assembled and tightened with steel plates. Onto the brick surface of an assembly that was tilted 30° from the horizontal surface, a 12kg steel block was dropped down from 2m height followed by observation of the damage status of the brick.

2. 2 Experimental results and discussion

Figure 4 shows the damage status of the test sample after the steel block was dropped onto the brick. Obviously, the part at where the steel block collided was scraped off. The External appearance of the brick that the steel block collided with is shown in Fig.5. A crack can be observed that propagated from the scraped area to the inside of the assembly.

The result suggests that the charging pad wear of the BOF is a result of the linking of cracks, which were initiated and propagated by mechanical shock induced by scrap collision. In order to improve bricks wear resistance to the damage described above, two methods were assumed as follows; inhibition of crack initiation by improving strength and inhibition of crack propagation by improving fracture toughness. On the bases of the assumption, improvements

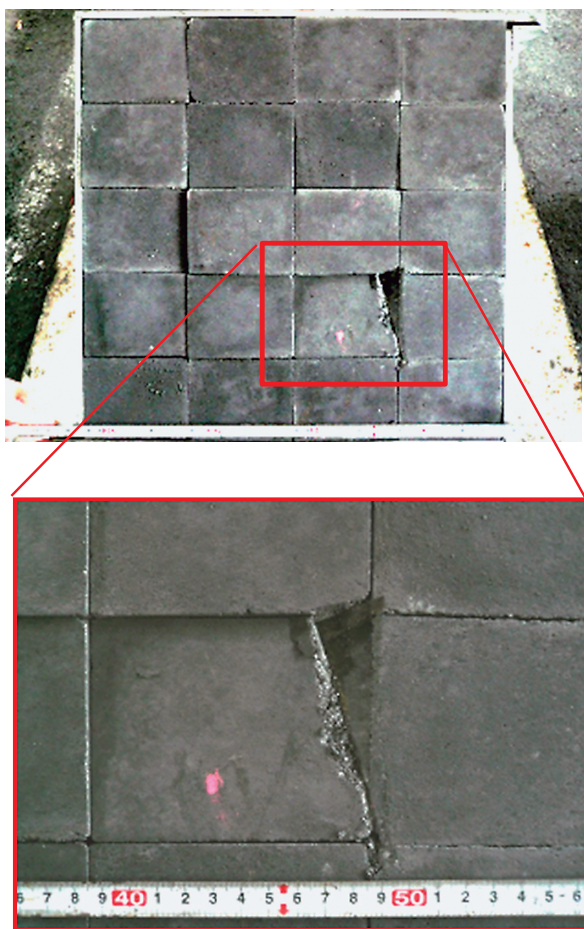


Fig.4 Photos of the surface after the test.

この結果から、装入壁に使用されているMgO-Cれんがはスクラップ衝突時の亀裂の発生と伸展および連結により損傷すると考えられる。このような損傷の低減には亀裂の発生を抑えること、すなわち強度の向上と、亀裂の伸展を抑えること、すなわち破壊靱性の向上の2つの手段が考えられる。このような仮説に基づき、装入壁用材質として高強度化、および高破壊靱性化の検討を行った。

3. 装入壁用MgO-Cれんが

3.1 金属適正化による高強度材質

MgO-Cれんがの高強度化には金属添加物の増量が効果的である^{4)~6)}。ただし、金属添加量の増量は耐スポーリング性の低下を招くため⁷⁾、必要最小限の添加で効率よく金属の添加効果を発揮できることが望ましい。

同じ金属種を同じ量添加したMgO-Cれんがに

Crack propagation



Fig.5 The appearance of the bricks after the test.

of strength and fracture toughness were studied.

3. Improvement of MgO-C Brick for BOF Charging Pad

3.1 Metallic additive optimized high strength material

In order to improve strength, an increase in metallic additives is effective^{4)~6)}. Since including excessive amount of metallic additives deteriorates spalling resistance⁷⁾, it is necessary to achieve target strength by including a minimum amount of metallic additives. Figure 6 shows the hot modulus of ruptures (HMORs) of the MgO-C bricks containing equivalent amount of metallic additives. The difference in HMOR is attributable to the difference in the distribution status of the metallic additives. This technology was applied to the high strength material described in this paper.

3.2 Matrix reinforced high fracture toughness material

Suitable reinforcement of matrix structure suppresses crack propagation resulting in increase in fracture toughness. Figure 7 shows the crack propagation path observed in a post bending test specimen. Thanks to the zigzag

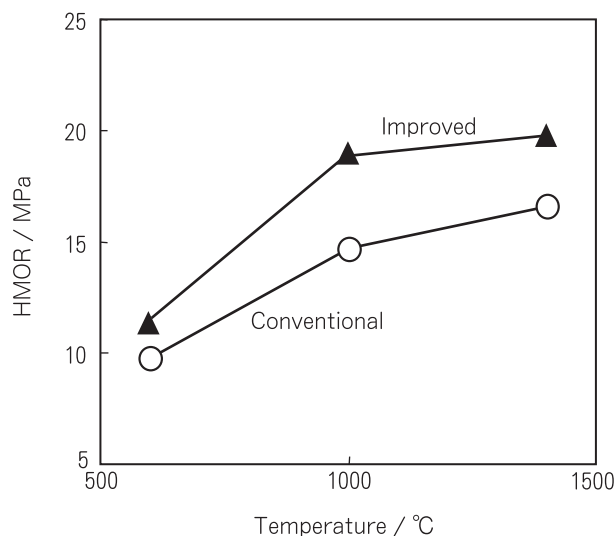


Fig.6 Influence of metal distribution configuration in MgO-C brick on HMOR.

ついて、添加物の分布組織の違いによる熱間強度の違いを評価した結果をFig.6に示す。高強度品はこの手法を使い、添加金属の分布を均質にすることで、効率良く金属の添加効果を発揮できるように組織を改質したものである。

3. 2 マトリックス組織強化による高破壊靱性材質

マトリックス組織強化により発生した亀裂の進展を抑制することで破壊に対する抵抗性、すなわち破壊靱性を向上させることができる。Fig.7に曲げ試験後の試料に観察された亀裂進展経路を示す。マトリックス組織強化品は、亀裂の伸展がジグザグ状の経路となっており、マクロ的な亀裂の伸展が抑制されている。これは破壊の際に生じる亀裂の枝分かれや、黒鉛の引き抜き効果が現れるためであると考えられている⁸⁾。

3. 3 カーボンボンド強化による高破壊靱性材質

Fig.7から亀裂の伸展は、MgO粒子と黒鉛の間や空隙など、マトリックス組織の弱い部分をつなぐように伸展していることがわかる。従って、マトリックス組織の構造上の弱面を強化することで、亀裂伸展に対する抵抗性を高めることができると考えられる。そのために、ピッチを利用してカーボンボンドを強化することが有効である。適切なピッチ添加による組織強化の様子を確認した

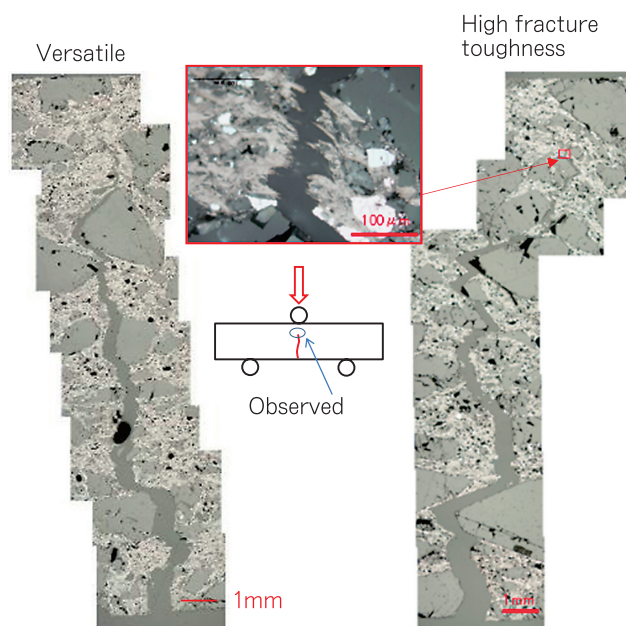


Fig.7 Crack propagation path observed in MgO-C bricks after bending test.

propagation of the crack, macroscopic overall crack propagation is suppressed in the case of the matrix reinforced material. This is considered attributable to the crack branch effect and pull-out effect of flake graphite⁸⁾.

3. 3 Carbon bond enhanced high fracture toughness material

As can be seen in Fig.7, the crack tends to propagate along the pore or interparticle plane between graphite and magnesia, which are considered to be structurally weak. Thus, strengthening the weak structure was considered to be an effective measure for improving crack propagation resistance. In order to strengthen it, carbon bond enhancement by suitable utilization of pitch is one of the effective measures. Figure 8 represents the carbon deposition in the pores and interparticle voids. It strengthens the weak structure such as pore or interparticle plane, resulting in fracture toughness improvement.

Table 1 summarizes typical properties of the three materials described above. The purities of the raw materials contained in the materials are exactly the same.

写真をFig.8に示す。MgO粒子と黒鉛の間や、空隙にピッチが侵入し、炭化している様子が観察できる。このようにカーボンボンド強化品はMgO粒子と黒鉛の間に形成されたカーボンボンドにより、構造上の弱面を強化することで破壊靱性を向上させたものである。

上記3種類のMgO-Cレンガの代表品質をTable 1に示す。全てのサンプルは同純度の原料を使用した。

4. 荷重－変位曲線測定

4. 1 測定方法

破壊靱性評価は、荷重－変位曲線から求めた静的破壊エネルギーで行った。また、熱間曲げ強度は荷重-変位曲線の最大値から求めた。測定は3点曲げ試験で行い、スパン100mm、クロスヘッド速度0.1mm/minの条件で行った。荷重の測定と同時に試験片中央部（荷重点直下）の曲げ変

4. Load-displacement Curves

4. 1 Evaluation method

Strength and fracture toughness of the materials were evaluated by three point bending experiment at 800°C in an argon gas stream. After heated at 1,200°C for 3h the 40×15×150mm specimens were subjected to the evaluation. The Loading span and cross head speed were 100mm and 0.1mm/min, respectively. Laser displacement gauge was employed to measure the displacement of the central part of the specimen, that is, just opposite the position of the loading point.

The strength and fracture energy of the specimens were determined from maximum load and integral of load-displacement curves, respectively.

4. 2 Results

The Load-displacement curves of the three materials are compared in Fig.9. The initial slope and maximum load correspond to the hot static modulus of elasticity and HMOR, respectively. Cracks are considered to initiate at the maximum load point and propagate through the load relaxation stage of the load-displacement curve. Since MgO-C bricks contain large amounts of flat shaped flake graphite, the load decreases moderately compared to the traditional embrittle burned brick that shows abrupt decrease of load. The fracture toughnesses of the bricks were evaluated by fracture energies determined by integral of load-displacement curves.

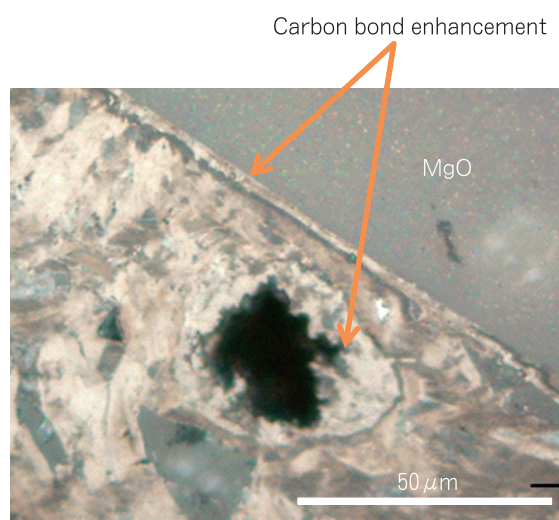


Fig.8 Carbon bond enhancement.

Table 1 Properties of MgO-C bricks

		High strength	Matrix reinforcement	Carbon bond enhancement
Chemical composition / mass %	MgO	77	79	79
	C	15	13	14
Typical propertie	Apparent porosity / %	3.0	3.8	1.0
	Bulk specific gravity / -	2.99	2.97	2.92

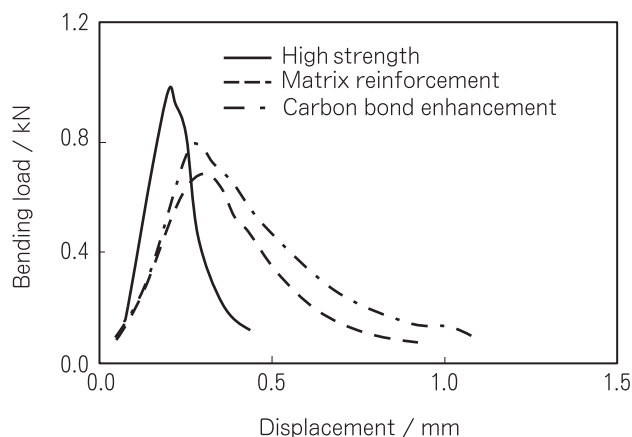


Fig.9 Load-Displacement curve obtained from a three-point bending test.

位置をレーザー式変位計で測定し、荷重－変位曲線を求めた。試料はコークスブリーズ中1,200℃で3時間焼成後のものを40×15×150mmに切り出して用い、3点曲げ試験はAr雰囲気800℃の熱間で行った。

4. 2 測定結果

測定により求めた荷重－変位曲線をFig.9に示す。荷重の増加に対する変位の増加の程度が静弾性率に相当し、曲線の頂点が破壊の開始点を表している。MgO-Cれんがは扁平な鱗状黒鉛を多量に含むため、亀裂伸展への抵抗性は一般の酸化物系れんがよりも大きい。そのため、一般の酸化物系れんがは破断後の荷重が急激に開放されるのに対し、MgO-Cれんがは亀裂発生後に緩やかな荷重減少を示す。荷重－変位曲線の面積は亀裂の発生と伸展に要する破壊エネルギーに相当し、これが大きな材料を破壊靱性が高いとした。

高強度品は亀裂発生までの最大荷重、つまり熱間曲げ強度が一番大きかった。マトリックス組織強化品、カーボンボンド強化品は高強度品に比べ、曲げ強度は小さいものの、亀裂発生後も緩やかな荷重減少が起こっていることがわかった。測定により求めた熱間曲げ強度をFig.10に、荷重－変位曲線の亀裂伸展領域の面積から求めた破壊エネルギーをFig.11に示す。マトリックス強化品、カーボンボンド強化品はどちらも破壊エネルギーが大きくなり、破壊靱性に優れたMgO-Cであった。

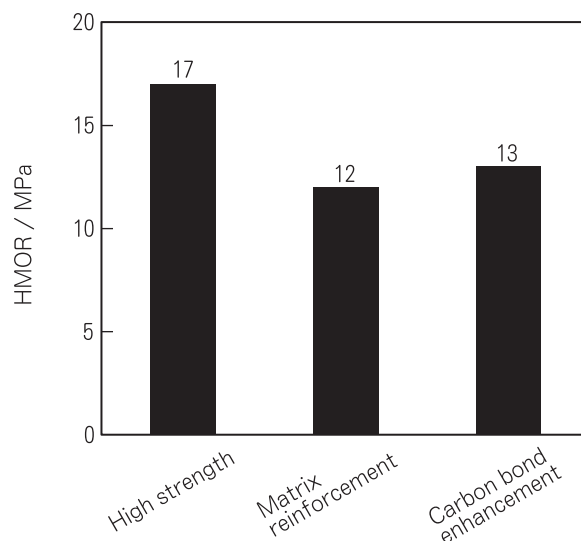


Fig.10 HMOR of MgO-C Bricks.

The high strength material showed a maximum value of the HMOR. While the HMORs of the matrix reinforced material and carbon bond enhanced material were relatively lower, load relaxation of these two materials proceeded slowly. As a result, the fracture energies of these two materials are expected to be higher. The HMORs and fracture energies of these materials are shown in Figs.10 and 11, respectively. Both matrix reinforcement and carbon bond enhancement are effective for gaining fracture energy, that is, these two MgO-C bricks exhibit excellent fracture toughness.

5. Commercial Applications

On the bases of experimental evaluation, three materials were applied to the charging pad of the commercially operated BOF. Wear rate of those materials are compared in Fig.12. Influences of HMOR and fracture energy on wear rates are demonstrated in Figs.13 and 14, respectively. While no obvious correlation was found between wear rate and HMOR, the wear rate decreases proportionally as fracture energy increases. This fact suggests that inhibition of crack propagation by improving fracture energy is effective compared to improving the HMOR.

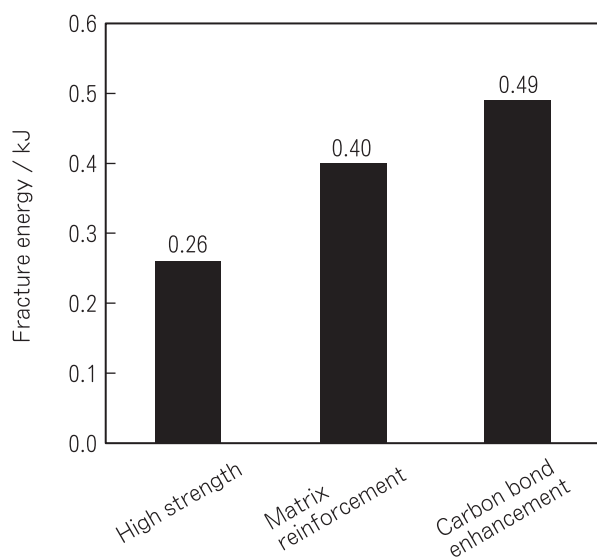


Fig.11 Fracture energy of MgO-C Bricks.

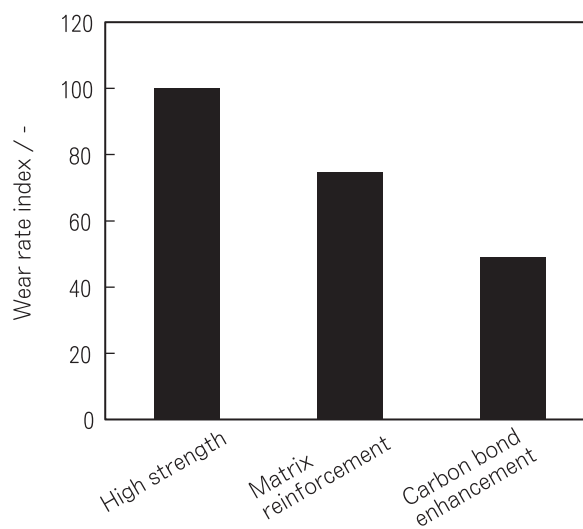


Fig.12 Wear rate index.

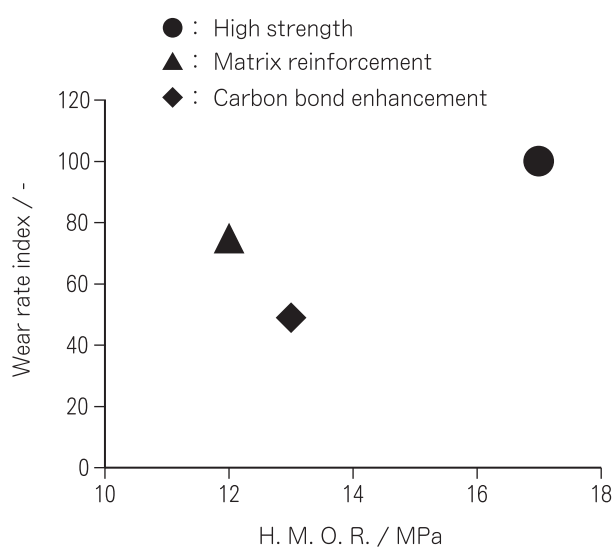


Fig.13 Relationship between wear rate index and HMOR.

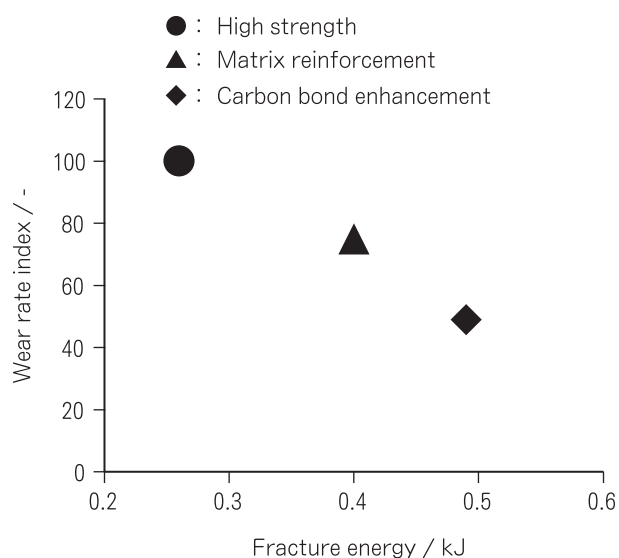


Fig.14 Relationship between wear rate index and fracture energy.

5. 実炉使用結果

検討結果をもとに、開発した製品を実炉の装入壁にて評価した結果をFig.12に示す。また、それぞれの製品の損傷速度指数と熱間強度の関係をFig.13に、損傷速度指数と破壊エネルギーの関係をFig.14に示す。損傷速度指数は、熱間曲げ強度の相関は弱かったが、破壊エネルギーが大きくなると直線的に低下した。このことから実炉での損

Thus, it was validated that high fracture toughness material is suitable for BOF charging pads which are impacted by large amounts of steel scrap.

6. Conclusion

In order to investigate the wear of the BOF charging pad caused by steel scrap charging, a steel block dropping experiment was performed.

傷に対しては、高強度化による破壊の抑制より、むしろ破壊エネルギーの増大による亀裂伸展抵抗の向上が有効であり、高破壊靱性MgO-Cレンガが適すると結論される。

6. まとめ

転炉用装入壁の損傷要因解明のため、スクラップ落下衝撃試験を行った。実験の結果、装入壁の損傷要因はスクラップ衝突による亀裂の発生と伸展および連結によって生じる破壊であると考え、亀裂の発生を抑制する高強度品と、亀裂の伸展を抑制する高破壊靱性MgO-Cレンガの開発を行った。

開発したMgO-Cレンガを実炉にて評価した結果、高破壊靱性品が良好な結果であり、亀裂伸展の抑制が有効であることがわかった。

According to the observation of steel scrap impacted part of post-experiment brick, it was hypothesized that the wear is a result of crack initiation and propagation caused by scrap collision. Based on the hypothesis, high strength material that suppresses crack initiation and two high fracture toughness materials that suppress crack propagation were developed.

As a result of commercial application of these three materials, it was clarified that inhibition of crack propagation by improving fracture toughness is essential for reduction of wear of BOF charging pad.

References

- 1) H. Fukuoka, K. Asano, S. Harada, S. Yamamoto, T. Shimao : Taikabutsu, **38** [4] 27-34 (1986).
- 2) A. Watanabe, O. Okamura, M. Yasuhiro : Taikabutsu, **33** [2] 15-20 (1981).
- 3) H. Kumai, H. Shimizu : Taikabutsu, **24** [12] 258-263 (1964).
- 4) J. Yu, A. Yamaguchi : Taikabutsu, **50** [11] 612-616 (1998).
- 5) I. Oishi, K. Ogasahara, T. Yamaguchi, M. Yokaoi : Taikabutsu, **33** [9] 517-520 (1981).
- 6) T. Horio, H. Fukuoka, K. Asano : Taikabutsu, **37** [6] 330-334 (1985).
- 7) K. Ichikawa, K. Itoh, K. Saito, Y. Hoshiyama : Taikabutsu, **44** [2] 75-82 (1992).
- 8) S. Tsuboi, I. Yamashita, K. Nonobe, H. Takahashi : Taikabutsu, **51** [12] 638-643 (1999).