

転炉装入壁用長寿命 MgO-C 耐火物の開発： 高破壊靱性 MgO-C 耐火物の適用

Long-life MgO-C brick for converter charging pad: Development of high-fracture-energy MgO-C brick

富田大輔*, 寺坂知幸*, 城戸有史**

Daisuke TOMITA*, Tomoyuki TERASAKA* and Naofumi KIDO**

要 旨

転炉装入壁は、スクラップおよび溶銑装入時の機械的衝撃や熱的負荷に常時晒されるため、耐火物にとって最も過酷な損耗部位の一つである。従来、この部位の耐火物には、主に高熱間強度を有する MgO-C 耐火物が適用されてきたが、スクラップ率の増加が予測される中、さらなる長寿命化が求められている。本研究では、実機損耗分析に基づき、従来の熱間強度重視のアプローチを見直し、耐火物の破壊靱性が耐用性に与える影響に着目した。重錘落下試験および Work of fracture 法による破壊エネルギー向上が亀裂発生後の進展抑制に極めて有効であることを実証した。特に、従来の材料と比較して破壊エネルギーを大幅に向上させた新規 MgO-C 耐火物 (TOUGHMAX™) を開発し、その高い亀裂進展抑制効果を確認した。改善材は、熱間強度や耐食性、耐熱衝撃性においても優れた特性を示し、実機試験では損耗速度を最大 50% 改善する良好な結果が得られた。

Abstract

Bricks at charging pad of converter are thought to be worn by several mechanisms by the operational conditions such as scrap charge, hot metal charge and blowing. Conventionally, materials with higher strength were studied as a countermeasure. In this study, based on analysis of actual equipment wear, the conventional approach that emphasized hot strength was reviewed. "Fracture Energy" is focused on as a new index of evaluation. Heavy weight drop test was demonstrated and high fracture energy by work of fracture method are extremely effective in suppressing crack propagation after crack generation. And finally, a new material (TOUGHMAX™) having higher fracture energy was developed. It was confirmed that the material which has high crack propagation suppression effect. The developed material was showed excellent characteristics about hot strength, corrosion resistance, and thermal shock spalling resistance, and trialed in actual converter vessels. The improved new MgO-C qualities show 50 % better performance than conventional ones as maximum.

1. 緒言

鉄鋼生産プロセスにおいて、転炉は基幹的な役割を果たす製鋼炉であり、その内張りに使用される MgO-C 耐火物は、高温かつ過酷な作業環境での安定稼働を支える重要な材料である。特に、転炉の装入壁は、スクラップ装入時の激しい機械的衝撃および溶銑装入時の熱的負荷を直接的に受けるため、転炉耐火物の中でも最も損耗が激しい

1.Outline

MgO-C bricks are used as a wear lining materials in converter because of their high resistance against corrosion and against spalling in both thermal and mechanical. The damage pattern of refractory in converter differs depending on the application. So, it is common to optimize the material selection on each part. In this study, charging pad is the target. In general, condition in charging pad is quite complicated compared to other parts, because the bricks are

* 窯炉製造事業部 窯炉技術部 マネージャー Manager, Furnace Refractories Technology Department, Furnace Refractories Division
** 窯炉製造事業部 窯炉技術部 部長 General Manager, Furnace Refractories Technology Department, Furnace Refractories Division

部位の一つとして知られている。これにより、装入壁の耐用寿命は転炉全体の操業効率を左右する主要因となっている。

これまで、装入壁用耐火物の長寿命化に向けて、多くの材料設計研究が実施されてきた。従来の設計思想では、スクラップによる耐火物表面の凹みが主な損耗要因であると考えられ、その対策として、高熱間強度を有する耐火物の開発が主流であった¹⁻³⁾。しかし、近年のカーボンニュートラルへの社会的要求の高まりに伴い、転炉におけるスクラップ装入比率の増加が予想されており、これまでのアプローチでは対応しきれない新たな耐久性向上が強く求められている。

そこで本研究では、転炉装入壁における耐火物の損耗メカニズムを再評価し、従来の熱間強度重視の設計思想では捉えきれなかった新たな耐用性向上の指標を探索した。実機使用後耐火物の詳細な分析に基づき、スクラップ衝撃による亀裂の発生と進展が耐火物損耗に大きく寄与していることを明らかにした。この知見に基づき、耐火物の破壊靱性が装入壁用耐火物の長寿命化において極めて重要な特性であるとの仮説が立てられた⁴⁾。

本研究の目的は、この仮説を検証し、高破壊靱性を有する新規 MgO-C 耐火物(TOUGHMAX™)を開発することである。開発された耐火物は、スクラップ衝撃に対する亀裂進展抑制能を大幅に向上させ、転炉装入壁の耐用寿命の飛躍的な延長に貢献することを目指した。

2. 損耗の特徴と要因

2・1 損耗要因の再評価と従来材の設計

転炉装入壁用耐火物は、**図 1**に示すようにスクラップ装入および溶銑装入時の機械的衝撃、熱的衝撃、さらにスラグによる化学的侵食など、複数の複雑な損耗要因に晒される。この中でも、スクラップ装入および溶銑装入時の機械的衝撃が、装入壁における主要な損耗要因の一つであると考えられてきた。従来、スクラップや溶銑に対する抵抗性を高めるため、高熱間強度を有する材料が装

damaged by impact force from both scrap and molten iron.

Therefore, it is one of the most severely damaged area in the converter, and there have been many studies on the material development in the past. Conventionally, the main factor of wear on bricks was thought that surface of bricks get dented by charged scrap. Thus materials with higher strength were studied as a countermeasure¹⁻³⁾. However, the material for this area still needs to be improved its durability. Because the scrap ratio in converters is expected to increase as world aims carbon-neutral. So, the demand for longer service life of refractory at charge pad is also expected to increase.

Therefore, in this study, it was reevaluated that the wear mechanism of brick in the converter charging pad. And, it was searched that new indicators for durability improvement could not be fully understood by the conventional design concept in which hot strength emphasized. Based on a detailed analysis of bricks after actual use, it was clarified that the initiation and propagation of cracks due to scrap impact contributes significantly to refractory wear. Based on this knowledge, it was hypothesized that the fracture energy of refractory is an extremely important property for extending the service life of refractory for charging pad⁴⁾.

In this research, the objectives are to verify the above hypothesis and to develop a new MgO-C refractory (TOUGHMAX™) with higher fracture energy than conventional materials. The developed material is designed to enhance resistance to crack propagation compared with existing materials, thereby significantly improving durability at the converter charging pad is expected.

2. Wear factor and characteristics

2・1 Conventional material design concept

Figure 1 shows a relationship between converter operation and wear factors of bricks. Bricks for charging pad are exposed to several different wear patterns, as shown in **Fig.1**. Therefore, it is one of the most severely damaged area in the converter. Conventionally, the main factor of wearing on bricks was thought that surface of bricks get dented by charged scrap. Therefore, materials with higher strength were adopted as a countermeasure for a long time¹⁻³⁾. In this report, the validity of this mechanism

Operation	Scrap Charging	Hot Metal Charging	Blowing
Image			
Wear Mechanism	Impact by scrap	<ul style="list-style-type: none"> •Abrasion by Hot Metal •Thermal shock 	Corrosion by slag
Required Properties	Hot Modulus of Rupture	<ul style="list-style-type: none"> •Hot Modulus of Rupture •Thermal spalling resistance 	Corrosion resistance

Fig. 1 Wear mechanism and requirement of MgO-C bricks for converter charging pad.

入壁に適用されてきた¹⁻³⁾。しかし、この設計の妥当性を改めて検証するため、本研究では高熱間強度を有する従来の MgO-C 耐火物（以下、従来材）の実機使用後状態を詳細に分析した。

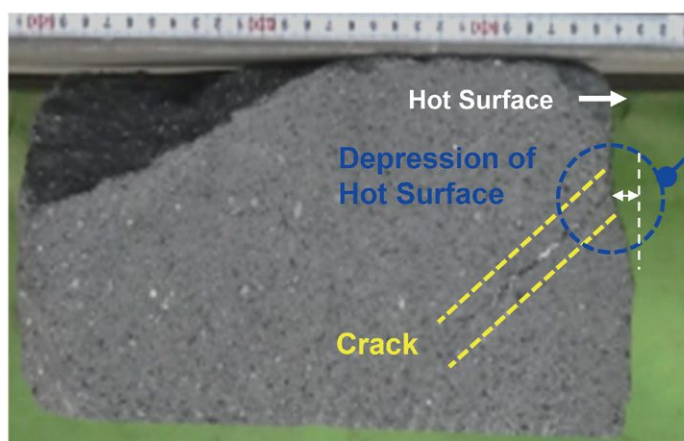
2・2 実機損耗メカニズムの分析

実機にて使用された装入壁用耐火物の切断面分析を実施した。図 2 にその代表的な観察結果を示す。写真の右側が操業に晒される稼働面方向である。分析の結果、以下の二つの特徴的な損耗形態が確認された。一つは稼働面に明瞭な凹みが観察され、その凹みを起点として耐火物内部へ向かう亀裂の発生が確認された。もう一つは、稼働面から耐火物の内側に向けて斜めに貫通する内部亀裂

of wear was confirmed. Thus analysis of bricks used at charging pad was conducted.

2・2.1. Wear mechanism

Figure 2 shows cross section of a Used brick taken from charging pad. The right side of the photo is the hot face. There are two points to be focused on. First, There an indent at the hot face which is an original point of internal crack. Second, this internal crack runs through inside brick diagonally to the hot face, not vertical or parallel. The length of crack was about 100mm. In general, the original length of bricks used to charging pad for converter is around from 700 to 1000 mm. Therefore, it can be said that



Point (1) : Depression
Depression of hot surface was observed at the starting point of the internal crack.

Point (2) : Internal Crack
Internal crack was observed running diagonally through inside of the brick from the hot surface.

Fig. 2 Cross section of a used brick taken from charging pad.

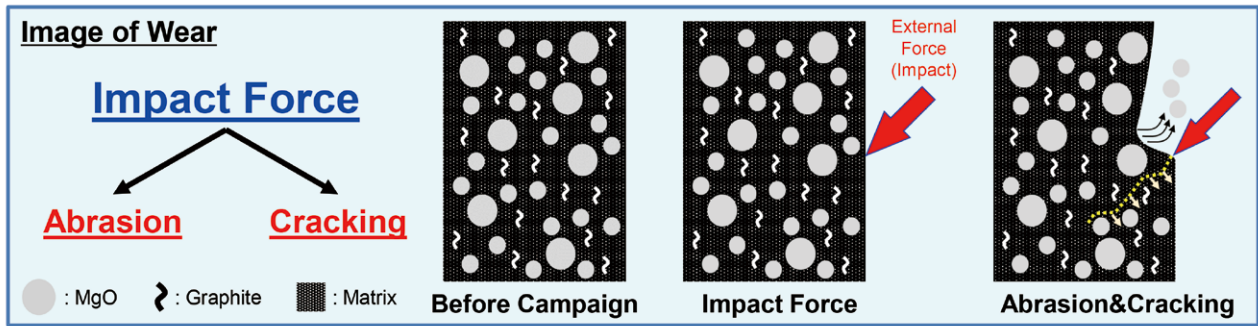


Fig. 3 Image of estimated wear mechanism in MgO-C bricks for converter charging pad.

が観察された。これらの亀裂の長さは最大で約 100 mm に達した。転炉装入壁に適用される耐火物の一般的な長さが 700 mm から 1000 mm であることを考慮すると、この 100 mm の亀裂は耐火物全体の健全性に深刻な影響を与えるものである。

これらの観察結果に基づき、スクラップ装入時の外部応力によって、耐火物表面に発生した亀裂が内部へと進展し、最終的な剥離に至る損耗メカニズムを推定した(図 3)。これは、単なる「摩耗」ではなく、亀裂の発生と進展が耐用性低下の主要因である可能性を示唆している。

3. 評価方法

3.1 重錘落下試験

実機で確認された損耗形態、すなわちスクラップによる表面の凹みと亀裂の発生および進展による剥離を模擬するため、重錘落下試験を実施した。これにより、これらの損耗形態に対して要求される耐火物の特性を評価することを目的とした。

試験の概略を図 4 に示す。先端が頂角 90° の円錐状の重錘を一定の高さから耐火物試料に自由落下させ、衝撃後の試料に生じる貫入痕深さおよび亀裂深さを評価した。重錘の重量は 10 kg で高さ 1.5 m から落下させた。また試験片は 1400 °C で 10 時間還元焼成した 100 × 100 × 230 mm の直方体の試料を用い、周囲を 4 面拘束した状態で試験した。図 5 は、重錘落下衝撃試験後の試料切断面写真である。重錘落下点には明確な凹みが観察され、その下部には凹みの先端部を起点として一直線に下部へ進展する亀裂が確認された。これら

this internal crack is "very long".

Figure 3 shows estimation about wear mechanism of bricks at charging pad, which explains the condition of internal structure of bricks before operation. It is estimated as "Abrasion" and "Cracking". The circles represent MgO and the wavy lines are graphite. It can be assumed that the impact force by charged scrap is applied from the right side of the image. As a result, it is estimated that scrap charge generates cracking and abrasion of bricks.

3. Evaluation methods

3.1. Heavy weight drop test

Bricks used at charging pad have two wear patterns. First, indent caused by scrap. Second, Fell-off caused by crack generation and propagation. In order to clarify the required properties in material against these two types of wear patterns caused by scrap, heavy weight drop test which simulates scrap impact was conducted.

A schematic illustration of the test is shown in Fig.4. The depth of indent and crack propagation in the specimens were measured after dropping a corn shaped with 90°apex angle weight. The weight was 10kg and dropped from height of 1.5 m. The test was conducted on a 100×100×230 mm rectangular specimen that was coked at 1400 °C for 10 hours and constrained on four sides around. Figure 5 shows the cross section after heavy weight drop test. An indent was found at the weight drop point, and a crack progressed downwards from the tip of the indent. Moreover, the crack progressed straight. These phenomena looked similar to what is observed in the

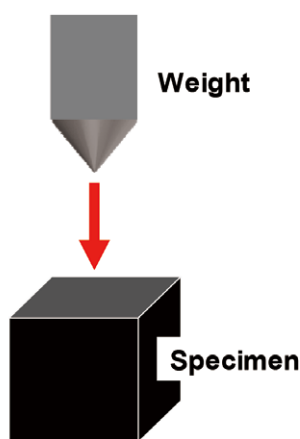


Fig. 4 Schematic image of the heavy weight indenter drop test.

の損傷形態は、実機使用後耐火物で観察された形態(図2)と類似しており、重錘落下試験が装入壁におけるスクラップ衝撃による損傷を適切に模擬していることを示唆している。この結果から、装入壁用耐火物には亀裂の発生および進展を抑制する特性が極めて重要であることが示唆された。

3・2 破壊エネルギー

亀裂の進展が主要な損耗要因であるとの知見に基づき、耐火物の破壊エネルギーを、亀裂進展に対する抵抗性を測る有望な指標として位置付け、Work of Fracture法で測定した⁴⁾。

破壊エネルギーは、図6に示すような装置で、1400℃で10時間還元焼成したノッチ入り(13mm)の試験片(40×40×160mm)を準備し、スパン140mmで3点曲げ試験を行い、試料が破壊されるまでの荷重と試料変位をデジタル画像相関法により計測した^{5,6)}。そして破壊エネルギーは式1を用いて計算した。

$$\gamma = W / (2A) \quad (1)$$

ここで、 γ は破壊エネルギー、 W は荷重変位曲線下側の面積(仕事量)、 A は破断分投影面積である。

破壊エネルギーは、材料が破壊に至るまでに吸

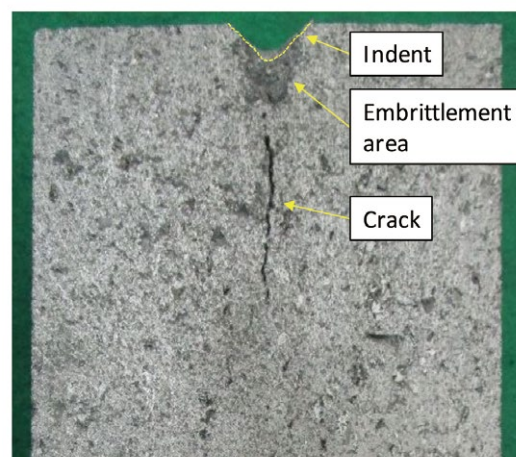


Fig. 5 Cross section of sample after the heavy weight indenter drop test.

bricks after actual use (Fig.2). These results suggest that heavy weight drop test can be an effective method to simulate wear patterns of refractory at charge pad of actual converter.

3・2. Fracture energy

Next, the fracture energy was evaluated⁴⁾ by the equipment shown in Fig.6. The specimens of 40×40×160mm with a 13mm notch was prepared with coking at 1400℃ for 10h. The specimens were evaluated by a three point bending test with a span of 140mm. Displacement was measured by digital image correlation method (DICM)^{5,6)}. The fracture energy was calculated using equation①.

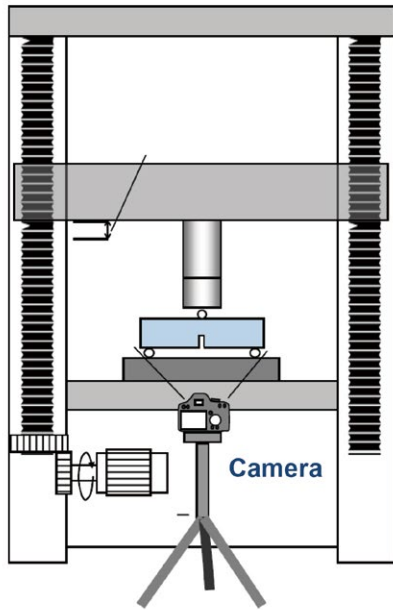
$$\gamma = W / (2A) \quad \textcircled{1}$$

γ : fracture energy

W : area under load-displacement curve(workload)

A : projected area of fracture surface

In this report, this is the most important characteristic. This is because crack propagation is one of the damage factors caused by scrap impact. Fracture energy can be a promising index to evaluate resistance against this factor. Fracture energy is explained in short as a total energy which is applied into the specimen until it is fractured by external load. Generally, this refers to strain toughness, and here we show the relationship between displacement and load. Therefore, the fracture energy represents



Three - point bending test device

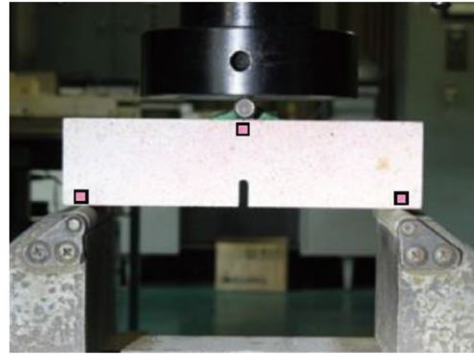


Fig. 6 Schematic image of fracture test.

収めるエネルギー総量を示し、一般的には図 7 に模式的に示す荷重 - 変位曲線の面積として定義される。主に二段階に分けられる。

Phase-1: 材料内部の亀裂発生までに要するエネルギーに相当する。

Phase-2: 亀裂発生後、破壊に至るまでのエネルギーに相当する。

the area under the displacement and load curve.

Figure 7 shows a comparison of the load-displacement curves. This curve is formed in two stages.

The first phase is a corresponding energy applied to the specimen until initial crack generates inside.

The second phase is an applied energy after crack generation until the fracture of the specimen.

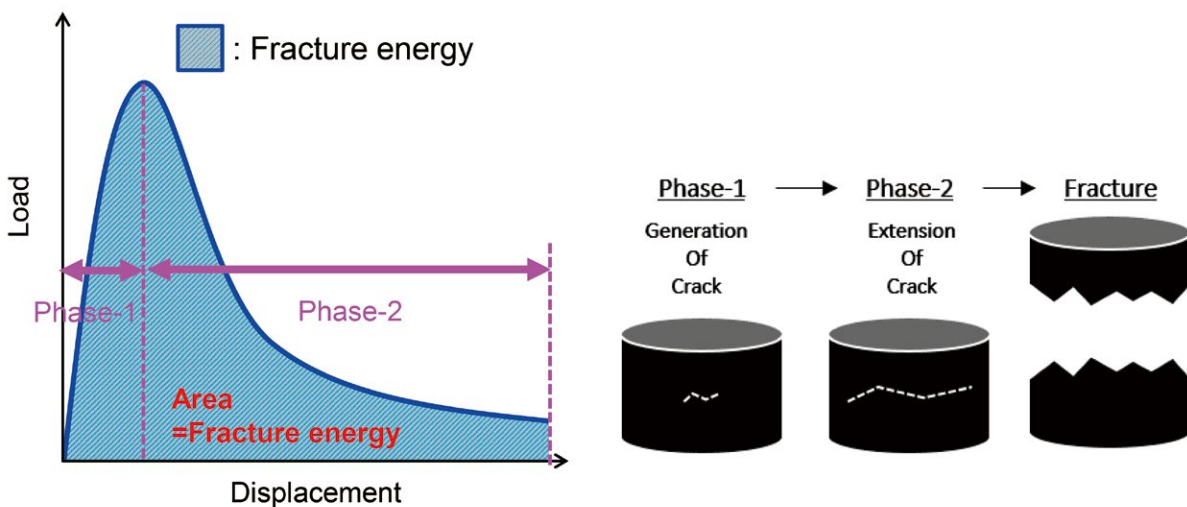


Fig. 7 Schematic image of Load – Displacement curve.

3・3 衝撃損耗に関連した評価

重錘落下試験で確認された貫入および亀裂損耗と、耐火物の各種物性値との関連性を調査した。その結果、**図 8** に熱処理後曲げ強さ（1400℃で10時間還元焼成）と貫入痕深さの間に負の相関関係が、**図 9** に破壊エネルギーと亀裂深さの間に負の相関関係が認められた。すなわち、曲げ強さが高いほど貫入痕深さは低減する傾向が、破壊エネルギーが高いほど亀裂深さは低減する傾向が確認された。これらの結果は、MgO-C耐火物の衝撃損耗を低減するために、これらの特性の向上が不可欠であることを示唆している。特に、**図 9** の破壊エネルギーと亀裂深さの関係はより強い相関性を示しており、破壊エネルギーの向上が衝撃損耗低減においてより重要な要素であることが示唆される。

3・3. Evaluation of related properties related to impact damage

Important properties in refractory against the wear such as indent or crack propagation were surveyed. **Figure 8 and 9** are the results. Modulus of rupture (after coking at 1400°C for 10h) correlates with indent depth, and fracture energy correlates with depth. In other words, these are the required properties for MgO-C bricks to reduce impact damage.

Especially, the correlation between fracture energy and crack length is strong. So improvement of fracture energy is important for better performance of MgO-C bricks at actual converter charging pad.

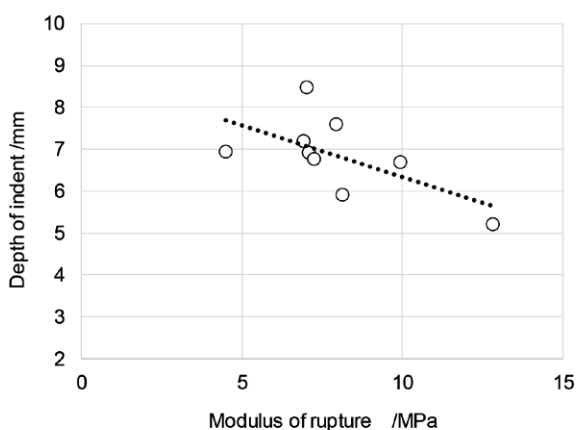


Fig. 8 Relationship between modulus of rupture and depth by heavy indenter drop test.

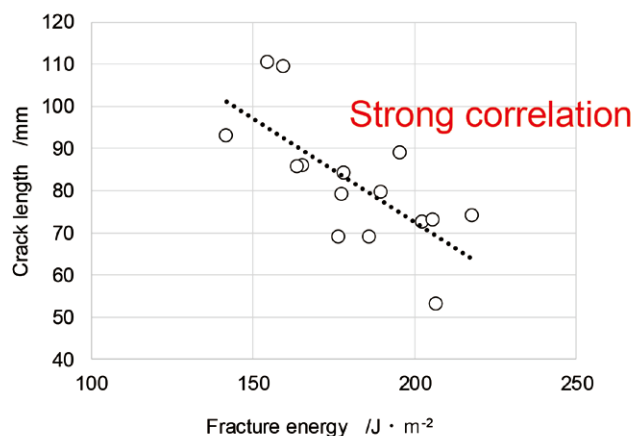


Fig. 9 Relationship between fracture energy and crack length.

【Operation】
Scrap Charging



【Wear Mechanism】
1) Abrasion
2) Cracking (by mechanical force)



【Approach of improvement】
○ Conventional : Increase of HMOR
★ New : Increase of Fracture Energy

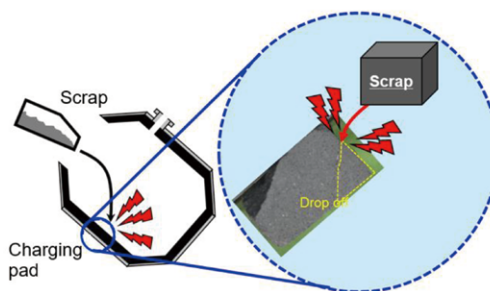


Fig. 10 Image of internal crack generation at charging pad and countermeasure.

3・4 破壊エネルギー ～主要特性の検討事項～

図 10 に、破壊エネルギーの纏めを示す。転炉装入壁においては、スクラップ装入による摩耗、亀裂が想定される。従来は熱間強度を重視していた。改善アプローチとして、今破壊エネルギーを向上させることが、より重要であると考えた。

4. 材料の改善

装入壁は様々な操業要因の影響を受けるが(図 11)、本研究では特にスクラップ装入時の衝撃による損耗、とりわけ亀裂発生後の進展に対する抑制効果に焦点を当て、破壊エネルギーの向上を目的とした材料改善を行った。表 1 に従来材と併せ 4 種類の改善材の特性を示す。改善材 A は、破壊エネルギーに加え、他の特性のバランスを考慮した材質である。改善材 B と C は、破壊エネルギーに加え、強度も考慮した材質である。改善材 D は、最も破壊エネルギーに特化した材質である。

3・4. Fracture energy

～Consideration of key property～

Figure 10 shows the summary of the explanation about fracture energy. It is assumed that bricks at charging pad of converter mainly have wear pattern of abrasion and cracking by scrap charge. Conventionally, materials tended to be designed having higher strength as a method of improvement. However, "fracture energy" was more focused on for an improvement in this study.

4. Material improvement

MgO-C bricks at charge pad of converter are exposed to various operational condition (Fig.11). This time, resistance against scrap impact was focused on. Especially, fracture energy was also focused on which was thought to be another important factor to evaluate the ease of crack propagation. General information of improved materials are shown in Table 1. Material A was considered that has a good balance between fracture energy and other characteristics. Material B and C were considered to have not only strength but also fracture energy. Material D was the most specialized for fracture energy.

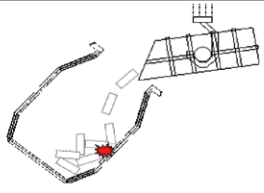
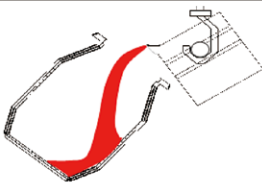
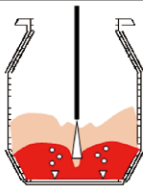
Operation	Scrap Charging	Hot Metal Charging	Blowing
Image			
Wear Mechanism	Impact by scrap	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasion by Hot Metal • Thermal shock 	Corrosion by slag
Required Properties	<ul style="list-style-type: none"> • Hot Modulus of Rupture • Fracture energy 	<ul style="list-style-type: none"> • Hot Modulus of Rupture • Thermal spalling resistance 	Corrosion resistance

Fig. 11 Wear mechanism and new requirement in MgO-C bricks for converter charging pad.

Table 1 Physical properties and characteristics of improved materials

Materials		Conventional	Improved_A	Improved_B	Improved_C	Improved_D
Chemical Composition / mass%	MgO	80	80	80	79	80
	C	15	15	15	15	15
Measurement examples (After coking at 1400°C)						
Bulk density	/-	2.92	2.87	2.86	2.85	2.80
Apparent porosity	/%	8.7	8.4	9.0	9.2	9.4

4・1 破壊エネルギー

図 12 に、従来材を含む 5 種類の材料の荷重-変位曲線を示す。従来材は最大荷重（すなわち亀裂発生強度）は比較的高かったものの、最大荷重発現後の荷重低下が急峻であった。これは、亀裂発生後の進展が速いことを示している。一方、改善材は、特に改善材 D において、最大荷重発現後の荷重低下が非常に緩やかであるという特徴を示した。この緩やかな荷重低下は、亀裂発生後も耐火物がエネルギーを吸収し続け、亀裂の進展速度が抑制されていることを示唆している。

各材質の破壊エネルギー指数を図 13 に示す。全ての改善材において、従来材と比較して破壊エネルギーが向上しており、特に改善材 B～D では 1.5 倍以上の向上が確認され、開発材 D に至っては約 2 倍の破壊エネルギーを示した。この結果は、改善材がスクラップ衝撃に対する亀裂進展抑制効果を著しく高めていることを強く示唆している。

亀裂進展様式の視覚的な証拠として、重錘落下試験後の試料の切断面写真を比較した（図 14）。従来材では亀裂がほぼ一直線に進展しているのに対し、改善材では亀裂が一直線ではなく、より複雑な経路を辿って進展していることが観察された。この複雑な亀裂進展は、亀裂先端でのエネルギー散逸メカニズムが導入され、結果として亀裂の進展速度が遅延していることを示唆しており、高破壊エネルギーと整合性のとれた結果である。

4・1. Fracture energy

Figure 12 shows the load-displacement curves of these five materials. Black color is for the conventional material. The conventional material shows relatively higher value as maximum than the other ones, while depression after reaching to the maximum load is much faster. On the other hand, the depression of load in the improved materials become more gentle than the conventional material after the maximum values. Especially, material D has the most gentle depression of load.

Figure 13 shows index of fracture energy. All improved materials have higher fracture energy. Especially, material B, C and D has 1.5 times or even higher fracture energy values than the conventional material, and the highest is in material D which has almost double. From this result, it is considered as the improved materials have much better ability to suppress crack propagation.

Pictures after test in both conventional and improved materials are shown. Figure 14(a) is the specimen of the conventional material. The crack runs almost straight. On the other hand, Fig. 14(b) is the specimen of improved material D. Crack doesn't run straight, but in a complex pattern. It is assumed that this complex cracking pattern makes depression of strength more gentle which would result in increase of fracture energy.

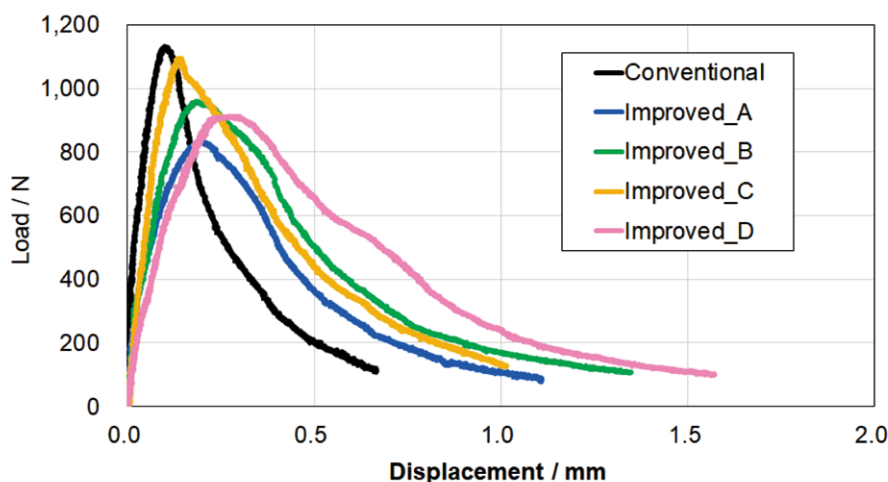


Fig. 12 Load-displacement curves of each sample.

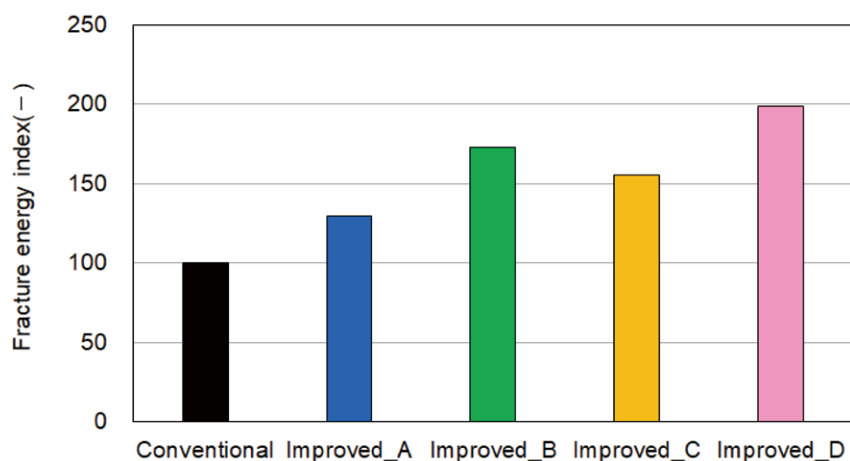


Fig. 13 Fracture energy index of each sample.

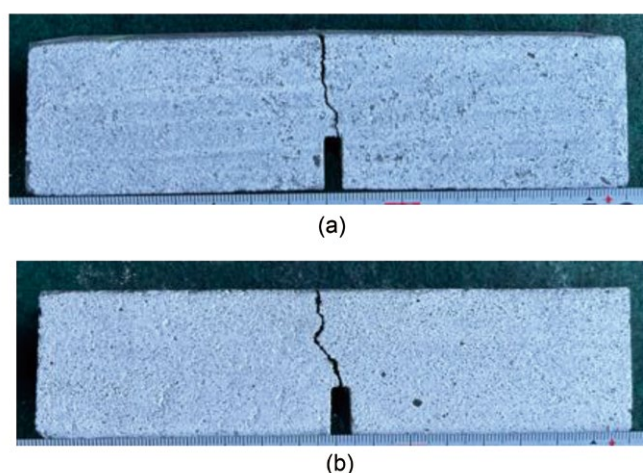


Fig. 14 Specimen after work of fracture test. (a):Conventional, (b):Improved_D

4・2 その他の特性

熱間曲げ強さは従来から重要な指標とされており、各材料の熱間曲げ強さを測定した(図15)。改善材は従来材よりも若干熱間強度が低い。

次に、耐熱衝撃性も、溶銑装入時の温度変動を考慮すると、装入壁用耐火物にとって不可欠な特性である。5種類の材料について溶銑浸漬法による耐熱衝撃性評価を実施した。溶銑中に試料を浸漬させ、その後コークス中で冷却を実施した。この浸漬及び冷却を5回繰返し、試験後試料より、亀裂の発生有無を観察した(図16)。従来材では軽微な亀裂が確認されたものの、改善材においては亀裂の発生が認められなかった。このことから、改善材は従来材と比較して耐熱衝撃性も向上している事が確認された。

4・2. Other characteristics

Figure 15 shows values of hot modulus of rupture. Hot modulus of rupture is also considered to be one of the necessary properties for charging pad bricks. The improved materials have slightly low hot strength than conventional one.

Next, spalling resistance is also evaluated. Thermal shock resistance is also considered to be one of the necessary properties for charging pad bricks. This is because of the temperature shock occurs when the molten iron is charged. Figure 16 shows cross section of the specimens after thermal spalling test on the referred 5 materials. Spalling resistance was evaluated by Hot metal dip test. A little crack was observed in conventional material which is because it is designed to have high strength. On the other hand, no cracks were observed in the improved materials. The improved materials also have better thermal shock resistance.

転炉ではスラグによる侵食もあるので、侵食試験結果を図 17 に示す。改善材 A～C は、従来材と同等またはそれ以上の優れた耐食性を示した。改善材 D は、従来材と比較して若干の耐食性低下が認められたが、破壊エネルギーが約 2 倍に達するという顕著な改善を示しており、スクラップ衝撃の影響が特に大きい部位での適用効果が期待される。

Figure 17 shows Corrosion index. In addition to significantly higher fracture energy in material A,B and C, the corrosion resistance is also good. And, in Material D, though corrosion resistance is a little bit worse, fracture energy is 2 times higher. It is expected to show a good performance at the area where bricks are exposed to a heavy damage by scrap.

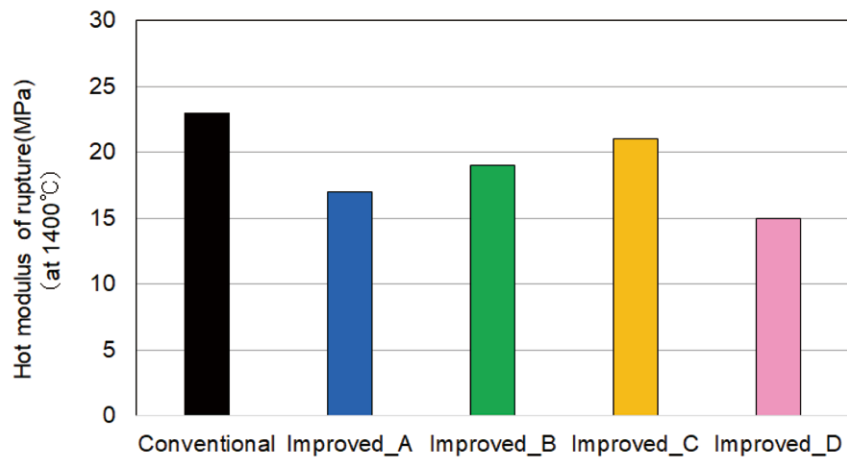


Fig. 15 Hot modulus of rupture of each sample. (at 1400°C)

Materials	Conventional	Improved_A	Improved_B	Improved_C	Improved_D
Cross section after thermal shock spalling test					
Evaluation	Below Average	Excellent	Very Good	Very Good	Excellent

Fig. 16 Cross section after hot metal dip spalling test.

Corrosion Test
1750°C × 5hr (30 min × 10 cycle)

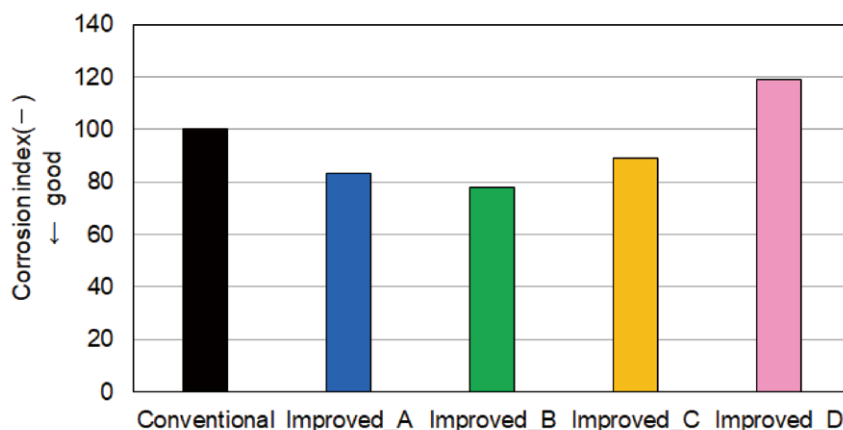


Fig. 17 Corrosion index of each sample.

4・3 特性比較のまとめ

表 2 に、各材質の主要特性比較のまとめを示す。全ての改善材は従来材よりも高破壊エネルギーを有している。加えて、他の重要特性（熱間曲げ強さ、耐熱衝撃性、耐食性）も総合的に考慮されており、バランスの取れた材質設計が達成されている。これにより、改善材はスクラップ衝撃に対する耐性だけでなく、装入壁に要求される多様な操業条件に対応可能な性能を有することが示された。

4・3. Summary of characteristic comparison

Table 2 shows summary of characteristic comparison. All Improved materials have higher fracture energy. And, it also has other good properties. As a result, improved materials are well-balanced materials. At charging pad, refractory is exposed to several factors of operation not only impact by scrap also various others. Therefore, it needs to have considered in several properties to show good performance there. The improved material is currently being used in actual furnaces.

Table 2 Comparison of characteristics

Materials		Conventional	Improved_A	Improved_B	Improved_C	Improved_D
Chemical Composition / mass%	MgO	80	80	80	79	80
	C	15	15	15	15	15
Summary of characteristic comparison						
Fracture energy		Below Average	Average	Very Good	Very Good	Outstanding
Hot bending strength		Excellent	Very Good	Very Good	Very Good ~Excellent	Average
Thermal spalling resistance		Below Average	Excellent	Very Good	Very Good	Excellent
Corrosion resistance		Very Good	Excellent	Excellent	Excellent	Average

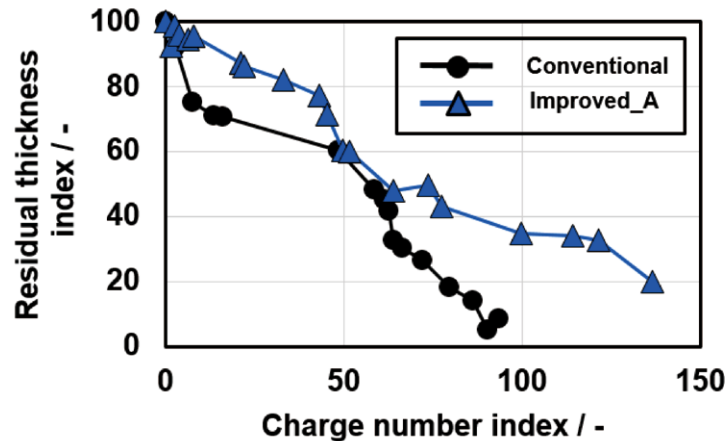


Fig. 18 Transition of residual thickness index in MgO-C bricks at converter charging pad.

5. 実炉適用の例

改善材の実炉における性能検証は、その有効性を裏付ける重要なステップである。図 18 に、従来材と開発材 A の実炉での損耗推移を示す。操業回数に対する残寸の指数化された値から、改善材 A は、従来材と比較して損耗速度が約 40 % 改善されたことが確認された。また、炉内観察において急激な残寸低下やスポーリング損傷は認められなかった。さらに、改善材 B は A と違う別の製鉄所にて実炉評価され、損耗速度で約 50 % の改善効果が確認された。これらの実炉評価結果は、高破壊エネルギーを有する TOUGHMAX™ シリーズが、実際の転炉操業環境下においても顕著な長寿命化効果を発揮することを明確に実証している。これは、本研究で提唱した「破壊エネルギー向上」というアプローチが、実際の耐火物損耗問題に対する有効な解決策であることを裏付けるものである。

6. 結論

本研究では、転炉装入壁用 MgO-C 耐火物の長寿命化という課題に対し、従来の熱間強度重視の設計思想を見直し、破壊エネルギーを新たな主要指標として確立した。実機損耗メカニズムの分析と精密な材料評価を通じて、スクラップ衝撃によって誘起される亀裂の発生と進展が、耐火物の耐久性を決定する支配的な要因であることを明確

5. Example of test result

Figure 18 shows the transition of residual thickness index which were measured at an actual converter charging pad. The horizontal axis shows “index of campaign life”, and the vertical axis shows “index of residual thickness”. Sudden reduction of residual thickness wasn’t observed, which tells that there was no spalling. The wear rate of improvement material A is clearly reduced compared to the conventional material. Ultimately, the wear rate improved by approximately 40 %. Improved material B has also been evaluated in a different actual furnace from material A. The wear rate was improved by approximately 50 %. It is obvious that the application of products (TOUGHMAX™) with higher fracture energy can provide good performance in actual converter.

6. Conclusion

Converter charging pad is one of the most severe area for refractory. Therefore, demand in performance improvement is thought to increase. In contrast to conventional materials which are designed to have high strength, it was found that fracture energy is more important guideline. Through analysis of wear mechanism in bricks after actual use and precise material evaluation, it was clarified that the crack generation and propagation caused by charged scrap is the dominant factor determining the durability of refractories.

Based on this knowledge, a series of new MgO-C quality has been developed (TOUGHMAX™).

に示した。

この知見に基づき、高い破壊エネルギーを有する新規 MgO-C 耐火物「TOUGHMAX™」シリーズを開発した。実炉での適用でも顕著な効果が確認された。実炉適用結果から、転炉装入壁は、れんがの亀裂進展から損耗が進むため、破壊エネルギー向上が有効で、高熱間強度が重要な特性ではない事がわかった。この成果は、本研究が提唱する「破壊エネルギーの向上」という設計アプローチの有効性を強力に裏付けるものである。

文 献

- 1) 花桐誠司, 原田俊哉, 麻生誠二, 藤原茂, 安井宏, 高長茂幸, 高橋宏邦, 渡辺明: 耐火物, **44** [9] 490-498 (1992).
- 2) 高長茂幸: 耐火物, **44** [4] 211-218 (1992).
- 3) 波多江英一郎, 吉富丈記, 原田正博, 規工川昭二, 俵正憲, 藤井幸一郎, 谷口忠行: 第 84 回精錬用耐火物専門委員会報告集, 耐火物技術協会 (1994) pp.60-66
- 4) 林国郎, 田中俊隆, 福井雅男, 西川友三: 耐火物, **32** [6] 312-316 (1980)
- 5) 岸本一輝, 塩濱満晴, 後藤潔, 森川勝美, 佐藤貴史, 松井俊介, 筒井康志: 第 9 回鉄鋼用耐火物研究会報告集, 耐火物技術協会 (2021) pp.61-68
- 6) 神尾英俊: 耐火物, **70** [9] 465-471 (2018)

本報告は、以下の報文に、加筆、再構成して転載したものである。

Daisuke Tomita et al.: Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, AISTech 2025 pp.2695-2703 (2025)

TOUGHMAX™ series are products that take into consideration of fracture energy. Materials with higher fracture energy are showing better performance than the conventional materials at actual converter charging pad. From actual converter vessels at charging pad, the wear of converter vessels at charging pad are caused by crack propagation in bricks. So, it is clarified that high fracture energy is effective. In contrast, it is clarified that high hot strength isn't effective. This result strongly supports the effectiveness of the “fracture energy” design concept proposed in this study.

References

- 1) Seiji Hanagiri et al.: Taikabutsu, **44** [9] 490-498 (1992)
- 2) Shigeyuki Takanaga.: Taikabutsu, **44** [4] 211-218 (1992).
- 3) Eiichirou Hatae et al.: Special committee of the 84th Symposium on refractories for refining, Technical Association of Refractories, Japan(1994) pp.60-66
- 4) Kunio Hayashi et al.: Taikabutsu, **32** [6] 312-316 (1980)
- 5) Kazuki Kishimoto et al.: Proceeding of the 9th Symposium on Refractories for Iron and steel, Technical Association of Refractories, Japan(1994) pp.60-66
- 6) Hidetoshi Kamio.: Taikabutsu, **70** [9] 465-471(2018)

This paper is reprinted with some additions and reconstructions to the following paper:

Daisuke Tomita et al.: Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, AISTech 2025 pp.2695-2703 (2025)