

鹿島 2 製鋼における転炉耐火物の改善

加藤健佑, 伊藤 智

日本製鉄(株) 鹿島製鉄所 〒314-0014 茨城県鹿嶋市光 3 番地

Improvement of MgO-C Bricks for the BOF Converter in Kashima No.2 Steelmaking Plant

Kensuke KATO, Satoru ITO

Nippon Steel Corporation 3, Hikari, Kashima City, Ibaraki Prefecture 314-0014, Japan

キーワード：転炉, MgO-Cレンガ, 装入壁, 高強度化

1 緒言

1.1 鹿島製鉄所の製鋼プロセスフロー

鹿島製鉄所は図1に示す2つの製鋼工場を有し、年間合計750万トンの粗鋼生産能力を誇り、日本製鉄(株)国内の主要な生産拠点のひとつである。一製鋼工場では、KR脱硫-脱りん炉-脱炭炉 (IR脱硫) -RHのプロセスにより低りん・低硫鋼の溶製が可能となし、ラインパイプや造船向けの厚板

から自動車向けの薄板まで多種多様なスラブを製造している。二製鋼工場では、KR脱硫-転炉-RHのプロセスにより薄板汎用鋼を大量製造しており、年間450万トンの粗鋼生産能力を有している。

二製鋼工場では連铸能力が転炉能力よりも高く、製造能力向上のため2010年にヒートサイズを増加させている。2010年以前の装入スクラップ量及び寿命の平均値を100と

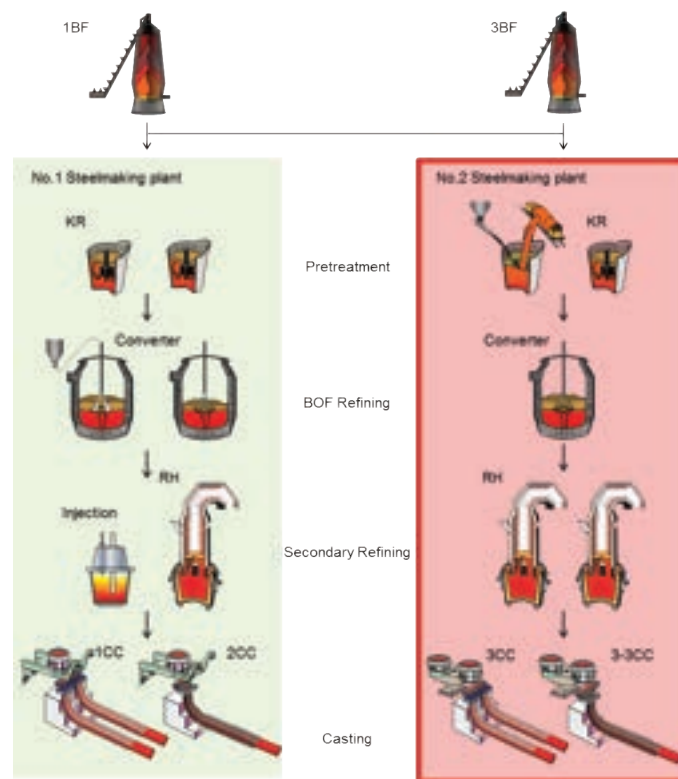


Fig. 1 Process flow of steelmaking plants in Kashima works.

第7回鉄鋼用耐火物専門委員会 発表
投稿責任者：加藤健佑

した場合の装入スクラップ量と炉寿命の関係を図2に示す。転炉では、装入溶銑量に加えて装入スクラップ量を増加することで出鋼量を確保しており、これに伴って炉寿命が低下する傾向となっている。

1・2 鹿島2製鋼転炉の課題

転炉では耐食性に優れたMgO骨材及び耐熱衝撃性に優れた黒鉛を主原料とし、樹脂及び金属添加物等を副原料とするMgO-Cれんがが内張耐火物として使用されている。転炉では部位ごとの損傷要因が異なることに対応して、それぞれに最適な具備特性を有するれんがを使用するゾーンライニング¹⁻⁴⁾を採用している。しかし、各部位の損傷を完

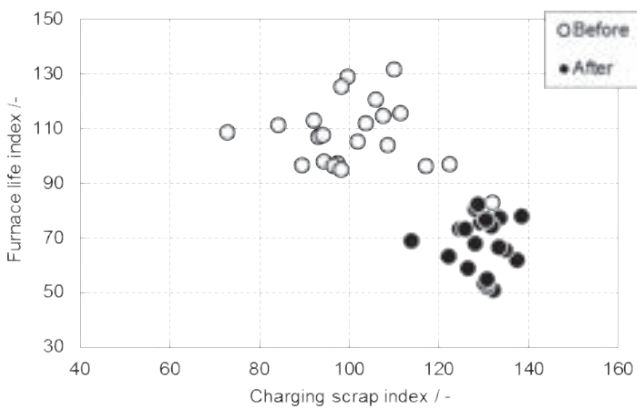


Fig. 2 Relationship between charging scrap and the furnace life index.

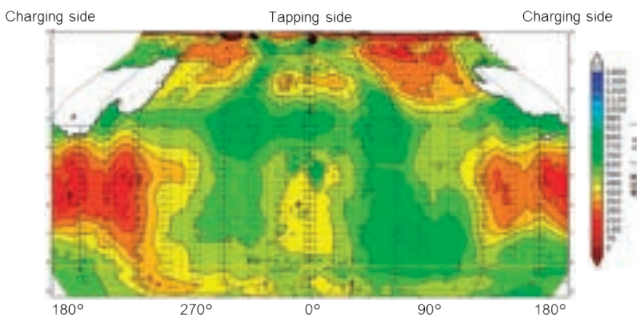


Fig. 3 Color map showing the MgO-C brick thickness at the end of a BOF campaign.

全に均一にすることは困難であり、転炉の操業形態に応じて損傷ネックとなる部位が発生する場合が多い。

鹿島2製鋼転炉の損傷プロフィール例を図3に示す。図中の色は耐火物の厚みを示しており、他部位よりも先行して装入側の耐火物厚みが減少する傾向となっている。装入側の耐火物は、稼働初期は補修せずに操業しているが、損傷速度が他部位と比較して約5倍程度と大きい為、損傷状況に応じ図4に示す型銑スラグコーティング補修により装入壁を保護している。しかし、補修のみでは十分な耐用を得られておらず、転炉耐火物の損傷ネック部位となっている。

そこで、装入壁れんがが材質の改善による転炉耐火物の寿命向上を図った。

2 MgO-Cれんがが材質の改善

2・1 改善方針

鹿島2製鋼転炉において、装入壁の損傷を低減するためには、型銑スラグコーティング補修を実施するのみでなく、耐火物の材質改善が求められる。鹿島2製鋼転炉では、スクラップが多量に投入される為、スクラップ装入時に生じる機械的な損傷が主な課題であると考えられる。そこで、装入壁れんがの耐用向上策として、高強度化を指針として材質改善を行った。

転炉用MgO-Cれんがは、図5に示す通りMgO粒子、鱗状黒鉛、酸化防止材及びバインダーであるフェノール樹脂で構成されており、粒子結合力の向上やマトリックス強度の

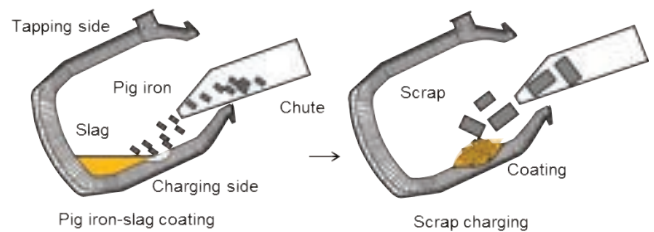


Fig. 4 Schematic view of the coating with pig iron and slag procedure.

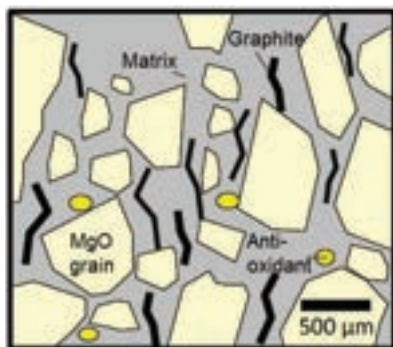


Fig. 5 Schematic view of the MgO-C and techniques to enhance mechanical properties.

Techniques to enhance strength and inhibition of strength loss

- (1) Reduction of the carbon content
- (2) Increase of the anti-oxidant content
- (3) Optimization of particle size distribution
- (4) Adoption of a more suitable binder system

向上により、高強度化が図られている。また過去知見⁵⁻¹⁰⁾では、繰り返し熱負荷による強度低下の抑制やれんがの高強度化によって、機械的な損傷を低減する手法が報告されている。しかし、実機適用について多くは議論されていない。そこで、強度低下抑制や高強度化の効果を実機にて検証することとした。

これまで鹿島2製鋼転炉において実施した主な改善手法として、①黒鉛量低減、②酸化防止材増量、及び③粒度構成の変更が挙げられ、これらの手法を用いた高強度化によって耐用向上効果を得ている。しかし依然として耐用は不足しており更なる改善が必要である。一方で、同様の手法によるさらなる高強度化は、耐スポーリング性の低下を引き起こす可能性がある。そこで、新たな手法として、④バインダー種の変更を行い、弾性率低減と組織劣化抑制及び高強度化を図った。

2・2 MgO-Cれんが材質の試作

鹿島2製鋼転炉における装入壁れんが材質の一覧を表1に示す。従来材のCase I は黒鉛量18%であり、Case II は低黒鉛化及び酸化防止材を増量した材質で実機にて改善効果が得られた材質である。今回はさらにバインダー種を変更した新規材質Case IIIを検討した。Case IIIはCase IIとベースとして粒度構成とバインダー種を変更した材質であり、Case IIと比較して熱間曲げ強度及び耐熱衝撃性の指標である強度を弾性率で除したS/Eも改善する結果が得られた。

2・3 バインダー種変更による改善効果の検証

バインダー種変更の効果を検証するため、Case IIとCase IIIを対象に物性比較試験を実施した。Case II及びCase IIIの繰り返し加熱前後での強度と弾性率の変化率を図6に示す。各材質について1400℃で5時間焼成し、室温まで冷却する操作を1サイクル実施した後の曲げ強度と弾性率をベンチマークとして使用し、同様の操作を5サイクル繰り返した場合の物性値の変化を比較した。どちらの値についても繰り返し加熱後の物性値の維持率はCase IIIで高く、高強度化及び組織劣化抑制が達成されていると考えられる。

溶銑浸漬法による熱衝撃試験の結果を図7に示す。両材質の試験片を1650℃の溶銑に90秒間浸漬した後、30秒間水冷する操作を3サイクル繰り返し実施し、切断面の亀裂発生状況を評価した。Case IIと比較しCase IIIは亀裂が少な

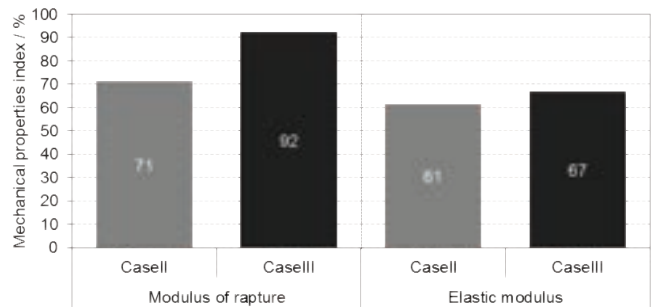


Fig. 6 Comparison of the mechanical properties of Case II and III MgO-C samples, before and after single and multiple firings at 1400 °C.

Table 1 Samples of MgO-C refractories

Samples		Case I	Case II	Case III
Compositions / mass%	MgO	78	80	80
	F. C	18	15	15
Anti-oxidant content	Al	○	◎	◎
	Si	-	○	○
	B ₄ C	○	○	○
Binder type		A	A	B
Bulk density / g·cm ⁻³		2.92	2.99	3.00
Apparent porosity / %		3.0	2.9	3.0
Compressive strength / MPa		35.0	40.0	39.0
Elastic modulus after firing at 1400 °C / GPa		15.0	24.0	25.0
Modulus of rupture at 1400 °C / MPa		15.5	22.0	23.5
Thermal shock damage resistance S/E ×10 ⁻³ / -		1.03	0.92	0.94

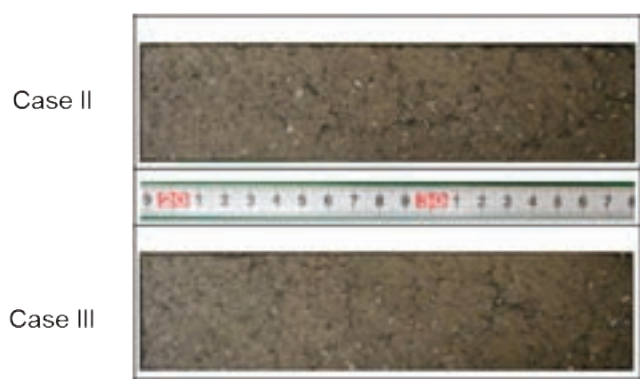


Fig. 7 The cross section surface of samples of Case II and Case III after thermal shock testing.

く、また亀裂サイズも小さくなることが分かった。これらの結果から、バインダー種の変更によって耐熱衝撃性が改善されたと考えられる。

2・4 実機試験材質の検討及び選定

更なる高強度化を図る為に、バインダー種を変更した上で黒鉛量を低減した材質を検討した。黒鉛量15%であるCase IIIのベースとして、黒鉛量のみを変更し13%及び11%に低減したCase IV及びCase Vを試作した。Case III, Case IV及びCase Vの物性一覧を表2に示す。黒鉛量低減に伴って、冷間圧縮強度及び熱間曲げ強度が向上する結果となった。しかし、強度の向上に伴って弾性率も上昇しており、結果として耐熱衝撃性の指標であるS/Eは低下する傾向であった。前述の通り、バインダー種変更による耐熱衝撃性

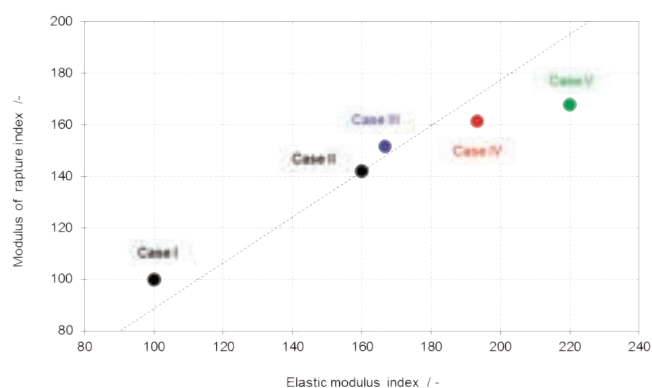


Fig. 8 The map of elastic modulus and Modulus of rupture for Case I to Case V samples.

の向上は得られているものと考えられるが、過去知見と同様に黒鉛量低減による耐熱衝撃性の低下は免れない結果となった。

表1及び表2に示した5材質の弾性率と強度の関係を図8に示す。なお、各材質の指数はCase Iの弾性率及び強度を100とした場合の値を示している。前述の通りCase I及びCase IIと比較して、Case III, Case IV及びCase Vでは強度が向上する結果であった。一方で耐熱衝撃性の指標であるS/Eでは、Case IIIでは改善しているのに対してCase IV及びCase Vでは低下傾向であり、特にCase Vは稼動初期の熱スポーリングが懸念された。これらの結果から、Case III及びCase IVの2材質を実機試験に供することとした。

Table 2 Samples of MgO-C refractories

Samples		Case III	Case IV	Case V
Compositions / mass%	MgO	80	82	84
	F. C	15	13	11
Anti-oxidant content	Al	◎	◎	◎
	Si	○	○	○
	B ₄ C	○	○	○
Binder type		B	B	B
Bulk density / g·cm ⁻³		3.00	3.04	3.07
Apparent porosity / %		3.0	2.8	2.7
Compressive strength / MPa		39.0	41.0	42.0
Elastic modulus after firing at 1400 °C / GPa		25.0	29.0	33.0
Modulus of rupture at 1400 °C / MPa		23.5	25.0	26.0
Thermal shock damage resistance S/E ×10 ⁻³ / -		0.94	0.86	0.79

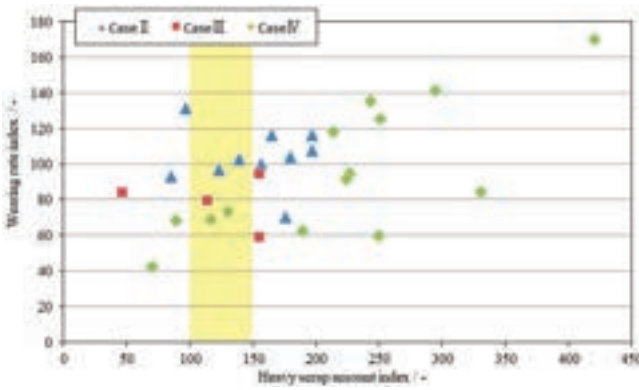


Fig. 9 Relationship between the amounts of charged heavy scrap, and the wear rate of the charging sidewall.

3 実機適用結果

無補修時の装入壁の損傷速度を比較することで、れんが材質の改善効果を評価した。既述の通り、装入壁の損傷はスクラップの投入による機械的な損傷によるものと考えられる。転炉に投入するスクラップは多種多様な形状及び重量のスクラップを混合しているが、特に単体の重量が大きいスクラップ（重量屑）による機械的な損傷が大きくなると推察される。そこで、重量屑の投入量に対する装入壁れんがの損傷速度を比較することによって、材質改善の効果を検証することとした。

スクラップ中の重量屑量指数と無補修時の装入壁れんがの損傷速度指数を図9に示す。なお、横軸は現在の重量屑量の平均値、縦軸は従来材の損傷速度の平均値を100とした場合の各材質の値を示している。重量屑量指数が増加するに従って、装入壁の損傷速度指数が増加する傾向であった。一般的な重量屑量の範囲である重量屑量指数100~150の間で各材質の損傷速度指数を比較すると、従来材Case IIと比較してCase III及びCase IVの損傷速度が低減していることが確認された。なお、改善材質のCase IVを実機適用した際、重量屑量指数200以上の範囲で損傷速度が大幅に増加しているが、操業影響で一時的に重量屑量が大幅に増加した期間であり、他材質での実績が無いため今回の評価からは除外した。

図9における重量屑量指数100~150の範囲での各材質の平均損傷速度指数を図10に示す。Case IIに対してCase IIIでは約20%、Case IVでは約29%の損傷低減がなされており、強度低下の抑制及び高強度化による改善効果が確認された。その結果、装入壁れんがの初期損傷速度の低減により、炉代通算の装入壁の耐用は従来材と比較して約19%改善の見通しが得られた。

4 まとめ

装入壁れんがの損傷速度低減による転炉寿命の向上を図

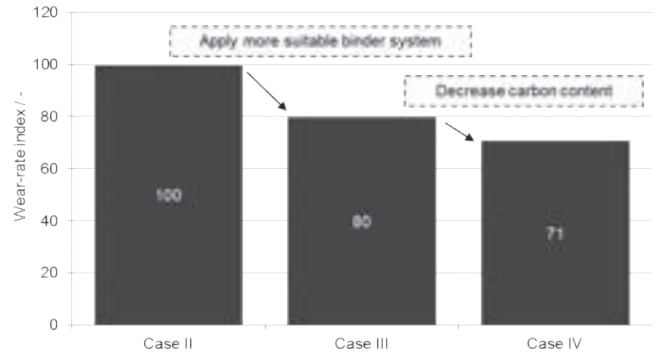


Fig. 10 Comparison of the wear-rate of samples for field trials.

り、下記の結果が得られた。

1) 装入壁れんが材質の高強度化

①黒鉛量低減、②酸化防止材の増量、③粒度構成の変更に加えて、④バインダー種の変更によって、繰り返し加熱による強度低下を抑制し、れんがの高強度化を達成した。

2) 装入壁の耐用改善

実機試験において重量屑量に対する無補修時の損傷速度を評価した結果、従来材と比較してCase IIIで20%、Case IVで29%の耐用改善が達成された。これにより、炉代を通した装入壁の耐用で約19%改善の見通しが得られた。

参考文献

- 1) 河野拓夫, 田畑 昭:耐火物, 32 [10] 163-169 (1980).
- 2) 内村良治, 熊谷正人, 森本忠志, 針田 彬, 大石 泉, 小笠原一紀:川崎技報, 15 137-145 (1983).
- 3) 高長茂幸:耐火物, 44 [4] 211-218 (1992).
- 4) 小形昌徳, 飯田敦久:耐火物, 66 [9], 432-442 (2014).
- 5) 林 聡, 高橋宏邦, 渡辺 明, 尾坂明義, 三浦嘉也: J. Ceram. Soc. Jpn, 102 [1] 23-28 (1994).
- 6) 林 聡, 高橋宏邦, 渡辺 明, 尾坂明義, 三浦嘉也: J. Ceram. Soc. Jpn, 102 [5] 476-481 (1994).
- 7) 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).
- 8) 藤吉亮磨, 飯田正和, 飯田敦久, 鳥越淳志: Proceedings of the 15th UNITECR, Santiago, Chile, Sep.26-29, 120-124 (2017).
- 9) 梅田真悟, 池本 正, 松井泰次郎:耐火物, 59 [10] 544-551 (2007).
- 10) 梅田真悟, 今川浩志, 池本 正, 松井泰次郎:耐火物, 60 [2] 88-89 (2008).