

## 耐火物の補修技術

## Repairing Technology of Refractories

伊藤 智\*  
Satoru ITOU

## 抄 録

鉄鋼プロセスでは、上工程を中心に、多くの耐火物が使用されている。最初に施工したものを限界まで使うだけでなく、部分交換や補修を行いながら、寿命延長をはかっている。補修には、補修必要場所への補修材の搬送方法や補修対象の熱の有無等に応じて、様々な技術が用いられている。代表的な補修技術の概要を述べたのちに、日本製鉄(株)と黒崎播磨(株)で開発した連続・瞬間混練技術を用いた新しい吹付補修技術について報告した。

## Abstract

Many refractories are lined for vessels and furnaces in ironmaking and steelmaking process. They wear out until the thickness for the initial lining reaches the safety limit. The life is extended by performing partial replacement of bricks or repair. Various repair methods are used depending on how the repair material is transported to the repair location and the temperature at the repair location. This paper outlines the typical repair technology, and then reports on a new gunning repair technique using continuous instantaneous kneading technology developed by Nippon Steel Corporation and Krosaki Harima Corporation.

## 1. 緒 言

鉄鋼プロセスでは、上工程を中心に、多くの耐火物が使用されている。稼働初期に施工したのちは、部分貼り換え、または補修を行いながら、残厚や構造上の限界に達するまで使用する。例えば、転炉であれば、パーマライニングとしてMgOれんがを、ウェアライニングとしてMgO-Cれんがを施工する。その後、吹錬を行っていき、壁残厚等が使用限界に達すると、再度耐火物の施工を行う。この間、炉寿命を延長するために、損耗する出鋼孔は交換し、壁は吹付や焼付、溶射と呼ばれる補修を行っていく。このように耐火物設備は、最初に施工したものを限界まで使うだけでなく、部分交換や補修を行いながら、寿命の延長を図って使用している。本報告では、補修技術について整理したのち、日本製鉄(株)と黒崎播磨(株)が共同開発した新しい吹付補修技術について報告する。

## 2. 耐火物の補修技術

## 2.1 補修技術の種類

補修技術として、色々な方法が実用化されている。主な

補修方法としては、乾式吹付、湿式吹付、溶射、圧入、焼付、パッチングなどがある。補修必要場所への搬送方法としては、高圧空気を使って搬送する方法、ポンプで圧力をかけて搬送する方法、補修部位にそのまま持っていく方法に分けられる。また、補修対象に熱がある場合は熱間補修、ない場合は冷間補修と呼ぶが、補修方法により、熱間補修が可能な方法、冷間補修が可能な方法、両方可可能な方法に分けることもできる。ここでは、代表的な補修方法である乾式吹付、湿式吹付、溶射、圧入、焼付について、技術の詳細を述べる。

## (1) 乾式吹付

図1に乾式吹付の施工機器構成を示す。粒度調整した材料とバインダーを混ぜた粉体を材料タンクから必要量切り出したのち、高圧空気で圧送し、ノズル先端で水を添加し、被射体に吹付ける。シンプルな構造でメンテナンスも容易である。材料は補修対象に合わせて設定され、バインダーとしては珪酸塩系やりん酸塩系、樹脂ピッチ系などが用いられる。珪酸塩系、りん酸塩系は、硬化特性上高温域での使用も可能である。装置の簡便性と、冷間、熱間を問わず使用可能なことから、広く利用されている。しかしながら、

\* 東日本製鉄所 製鋼部 炉材室長 茨城県鹿嶋市光3 〒314-0014

ノズル先端で水を添加するため、材料と水の混合が不十分になりやすく、水量が多くなるなど課題もある。

## (2) 湿式吹付

乾式吹付の混合の課題を解決する手段の一つとして湿式吹付方法がある。図2に施工機器の構成を示す。水で混練したものを圧送し、ノズル先端で急結材を添加して、被射体に吹付ける工法である。急結材には、アルカリ性溶液などが用いられる。圧送ポンプとしては、スクイズ式、ダブルピストン式、スクリュウ式などがある。湿式吹付は、事前に混練するため、乾式吹付より水分を減らせ気孔率を下げ耐用性を向上できるメリットはあるが、圧送するためにキャストブルより水分は多くなる。また、材料を混練後に圧送するため、施工後材料がホースなどに残り、材料ロスが大きいという課題もある。この湿式吹付工法導入による日本製鉄の改善事例として、東日本製鉄所君津地区(以下君津と表記)<sup>1)</sup>や名古屋製鉄所<sup>2)</sup>で、混銑車に適用した事例が報告されている。

## (3) 圧入

圧入は、図3に示すように、混練物をポンプにて施工場所に圧送し、補修部位に材料を圧入する方法である。圧入補修の適用例としては、RH(真空脱ガス)設備の浸漬管及び下部槽還流管部の補修が挙げられ、鉄製の中子を入れ、残存れんが部と中子間に混練物を圧入する。その他、転炉

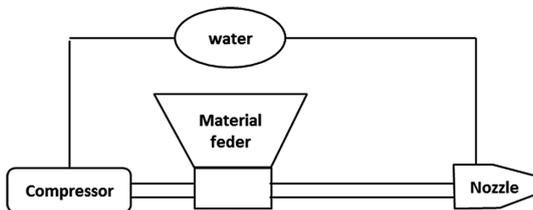


図1 乾式吹付装置構成  
Outline of dry gunning system

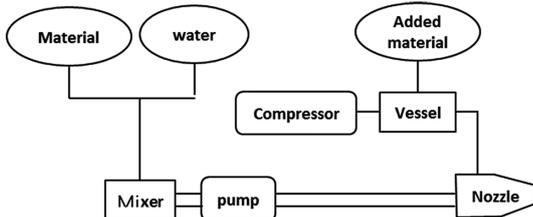


図2 湿式吹付装置構成  
Outline of shotcrete system

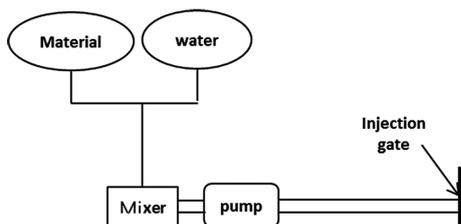


図3 圧入補修概要  
Outline of injection process

炉底交換時に交換炉底と本体との隙間に圧入する例や、熱風炉や高炉の鉄皮の高温部にて鉄皮とれんが間に材料を圧入する例などがある。

## (4) 溶射

溶射とは、補修面に熔融または半熔融状態で材料を吹付けて補修する方法である。耐火物補修に適用されている溶射補修方法としては、図4に示すように、バーナーから酸素、プロパンと共に微粉の耐火材料を噴射し、火炎の熱で耐火材料を熔融させて補修面に吹付ける火炎溶射法と、図5<sup>3)</sup>に示すように、耐火材料に金属シリコンを混ぜて酸素で搬送し、補修面の熱を利用して金属と酸素のテルミット反応を起して耐火材料を接着させるテルミット法が利用されている。火炎溶射法は、1980年代に日本製鉄にて実用化され、転炉<sup>4,5)</sup>、溶鋼鍋<sup>6)</sup>、コークス炉<sup>7)</sup>の補修に適用されてきた。2000年代、コークス炉炭化室の内部を診断し補修するため、壁診断装置と溶射装置を組み込んだ診断補修装置を開発し、各所に展開した<sup>8)</sup>。テルミット法は、図6<sup>3)</sup>に示すように、装置が簡便で吹付ノズルを人手で扱うことができるため、主にコークス炉の窯口の壁補修に使用されている。

## (5) 焼付

焼付補修は、耐火材料にバインダーとしてフェノールレジンやピッチを加えたものを、炉内に袋ごと入れ、炉の熱でバインダーを軟化と硬化をさせて、施工体を作る方法である。熱がある状態では流動性もあるが、バインダーの揮発分がなくなり硬化するのに時間を要する点や、垂直壁などには施工できない問題点もある。主な適用先は転炉となっている。

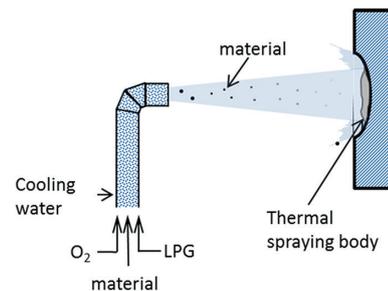


図4 火炎溶射法概要  
Schematic diagram of flame gunning

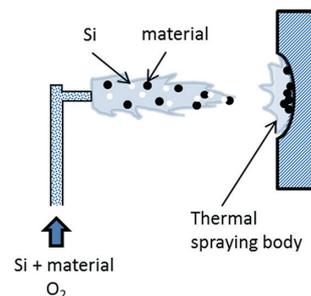


図5 テルミット法概要<sup>3)</sup>  
Schematic diagram of thermit thermal spraying<sup>3)</sup>

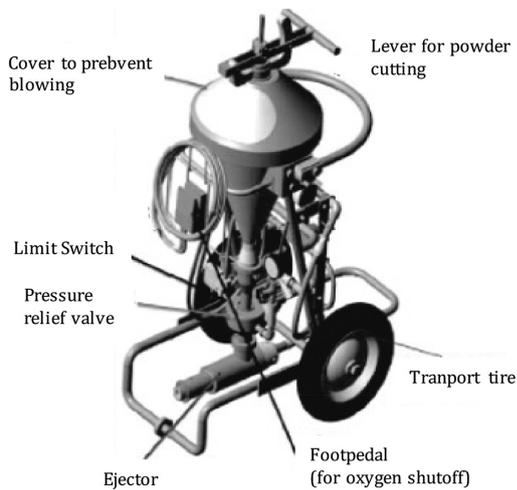


図6 テルミット溶射補修装置例<sup>3)</sup>  
Example of thermit thermal spraying repair equipment<sup>3)</sup>

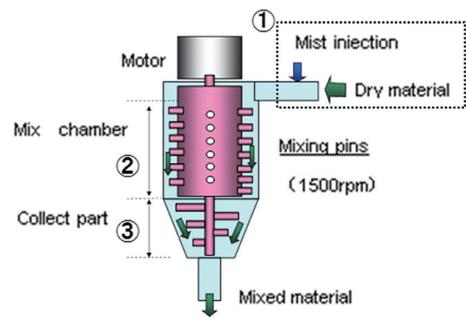


図7 連続・瞬間混練機構  
Mixing mechanism of H-QMI

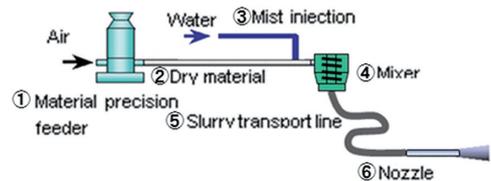


図8 連続・瞬間混練吹付装置構成  
Schematic diagram of H-QMI

## 2.2 新吹付工法

前節で、従来までの一般的な補修技術を紹介した。このうち熱間補修として乾式吹付、冷間補修として乾式吹付、湿式吹付がよく用いられるが、それぞれ混練性、材料ロスなどの課題がある。日本製鉄では、黒崎播磨と共同でこれらの課題を解決した施工技術を開発したので、以下に述べる。

### 2.2.1 連続・瞬間混練吹付補修技術 (Hot-Quick Mixing & Mist Injection : H-QMI)<sup>9, 10)</sup>

#### (1) 連続・瞬間混練吹付補修技術概要

熱間補修には乾式吹付が用いられるが、ノズル直前で水が添加されるため、①混練性が不十分であり、それを補うために添加水分が過剰傾向となり、高气孔または不均質な施工体が形成され、施工体物性が低下する、②付着し難い、③粉塵が発生する等の問題がある。この問題を解決すべく、瞬時に耐火原料と添加水分との混和を可能とする“連続・瞬間混練機構”を開発し、これを従来の乾式吹付システムに組み込んだ。これにより、①低水分化、②組織の緻密化、③付着性向上、④高耐用化、⑤低発塵化を達成した。

図7に導入した機構を示す。①搬送されてきた材料に、加圧エアにより水を微粒化させ材料と濡れやすくするミスト水添加機構<sup>11)</sup>により、水を添加し、②微粉の凝集力を上回る大きな剪断力の付与を狙い、従来の2桁以上の加速度を生じる高速回転の混練ピン(1500rpm)で混練し、混練ピンと外筒との間隙に混練された材料が遠心力により側壁に付着し、混練ピンにより剪断されつつ下方に送られ、③絞りにて集合され、再び気流により後方の搬送ライン、吹付ノズルへ搬送される。

図8に装置構成を示す。①材料の定量切り出し機構、②乾粉材料搬送、③ミスト水添加機構、④連続・瞬間混練機構、⑤スラリー搬送ライン及び、⑥吹付ノズルから構成される。施工能力は最高100kg/min、添加水分率は従来の2



図9 H-QMIシステムを搭載した転炉用吹付装置外観  
Gunning machine with H-QMI for converter

～3割低減を可能とした。

#### (2) 転炉への適用

図9に連続・瞬間混練機構を組み込んだ自走式の転炉用熱間吹付装置の外観を示す。転炉向けの追加条件として、ノズル冷却が必要であること、また最適な接着性を確保するために吹付部位、施工面の温度に応じて水量調整をしやすい必要があるため、手元で吹付ノズル内での追加水を添加する機構を追加している。転炉用装置の施工能力は100kg/min、最適な添加水分率は28～35%で施工される。転炉向け材料は、基本的に従来の乾式吹付材の使用も可能である。

図10に連続・瞬間混練有無での物性の比較を示す。H-QMIの適用により施工体品質は大幅に向上していることがわかる。図11に転炉トラニオン部への吹付状況及び残存状況を示す。施工性に問題はなく、乾式吹付施工と比較し、水分の均一分散による施工水分量の低減及び付着性向上による施工体厚み確保が図れている。また、低水分化が図れたことで、僅か数分で溶銑装入が可能となり、補修時間短縮効果も得られている。従来の乾式吹付では4～5チャージの耐用が、H-QMIでは9チャージでも残存があり、2倍以上の耐用があることが確認された。転炉用としては、室

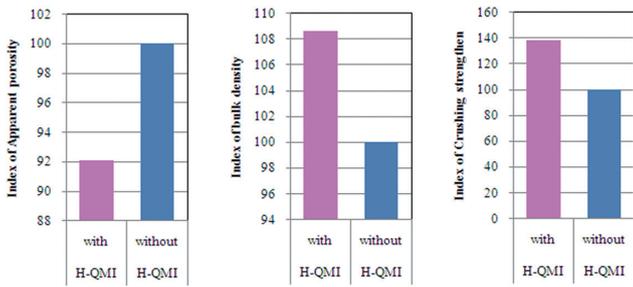


図10 連続・瞬間混練機能効果の評価  
Effect of H-QMI in three physical properties of casted gunning slurry mixed with or without H-QMI

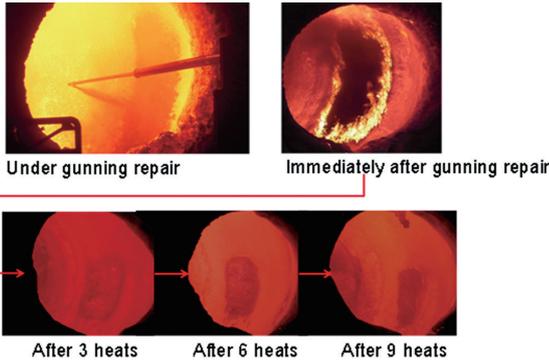


図11 転炉トラニオン部への吹付状況と残存状況  
Gunning performance and residual materials in trunnion zone of a converter

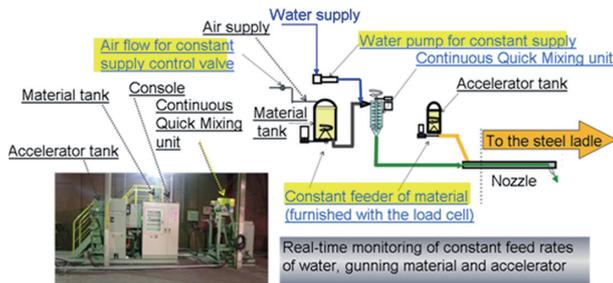


図12 溶鋼鍋用 H-QMI 装置  
Gunning machine with H-QMI for ladle

蘭製鉄所（以下室蘭と表記）、東日本製鉄所鹿島地区において実機化適用されている。

(3) 溶鋼鍋への適用

図12に溶鋼鍋用のH-QMIを示す。溶鋼鍋では転炉とは異なり大量のノズル冷却水を必要としないことから、一層の低水分化が可能である。更なる施工体品質向上を目的に、急結剤添加ラインを別に設け、定量切り出した急結剤をノズル手前で定量供給し、急結剤分散性を高める機構としている。溶鋼鍋用装置の施工能力は20~40kg/min、最適な添加水分率は10~13%で施工される。

溶鋼鍋用材料については、 $Al_2O_3$ - $MgO$  質材をベースとし更なる混練性の効果を得るために、超微粉原料と減水剤を添加し、一層の低水分化を図っている。図13に添加水分と超微粉原料添加量の相関図を示す。超微粉原料添加により、流し込み材と乾式吹付材の中間レベルまで添加水分量

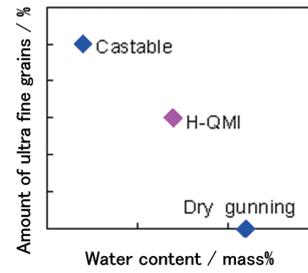


図13 添加水分と超微粉原料添加量の関係  
Correlation between water amount in slurry and amount of ultra fine grains in three different application methods

表1 H-QMI 用材料の品質例  
Typical properties of the material used for H-QMI

Installation method	H-QMI
Application	Ladle
Chemical compositions / mass%	
$Al_2O_3$	74
$MgO$	15
$SiO_2$	5

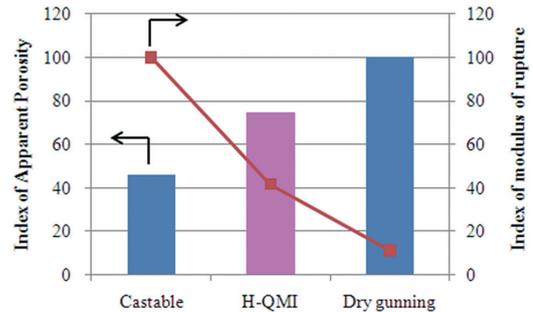


図14 3施工方法での見掛け気孔率と曲げ強さの比較  
Comparison of apparent porosity and modulus of rupture of the material applied in three different application methods

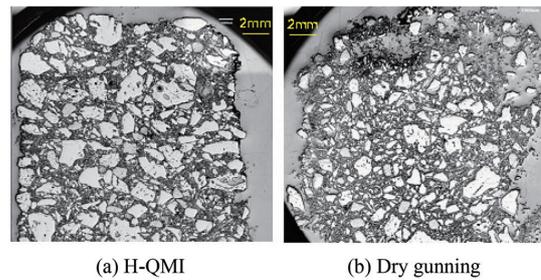


図15 H-QMI と従来吹付時の施工体ミクロ組織比較  
Microscopic section view of the material gunned (a) H-QMI method and (b) Dry gunning method

が低減できることがわかる。この結果、熱間吹付条件下での施工体特性が大きく改善され、更なる高耐用化が可能となった。表1にH-QMI材料の品質例を示す。図14に従来施工体とH-QMI施工体、流し込み施工体の見掛け気孔率と曲げ強さの比較を示す。添加水分減及び混練性向上効果により、従来施工より緻密化及び曲げ強さ向上が見られる。

図15にH-QMIと従来の乾式吹付時の施工体組織を示す。両施工体を比較すると、H-QMI施工体組織は低水分

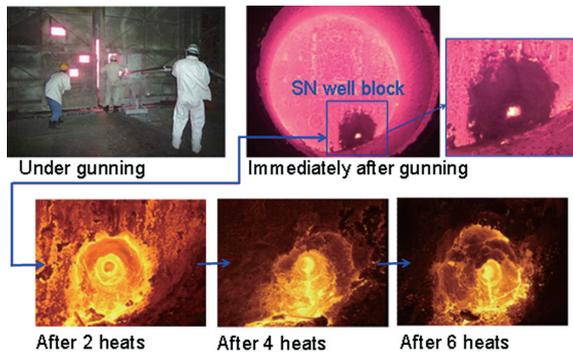


図 16 稼働溶鋼鍋スライディングノズル羽口周辺への吹付状況と残存状況

Gunning performance around the sliding nozzle (SN) well block of hot steel ladle and durability in the hot services

化により緻密化しているため粒同士が密集し、マトリックス間の空隙が少なくなっていることがわかる。図 16 には溶鋼鍋スライディングノズル羽口まわり部への吹付状況及び残存状況を示す。H-QMI 工法の適用では 5～6 チャージの耐用が確認され、従来乾式吹付での 2～3 チャージの耐用と比較して 2 倍以上の耐用があることが確認できた。溶鋼鍋については、室蘭のほか、君津<sup>12,13</sup>にも導入され、寿命延長、コスト改善に効果を上げている。

### 2.2.2 自動補修技術 (Quick Mixing Shot : QMS)<sup>14,15)</sup>

冷間補修では、施工体の緻密度を上げ耐用性を改善するため、添加水分の低減が要求される。しかし、従来のショットクリート工法は、乾粉材料に水を添加して混練したのち、混練物を吹付ノズル先端まで圧送等で搬送して吹付を実施する。しかしながら、圧送性付与分の水分が増量となり、施工体の耐用性として充分なものが得られていない。また、施工後の洗浄作業も時間を要する。そこで、前述の連続・瞬間混練技術を利用した自動補修技術を黒崎播磨と共同で開発した。

#### (1) 連続・瞬間混練吹付補修技術のメカニズム

前項で述べた熱間補修向けの連続・瞬間混練技術は、連続混練等の利点はあるものの、そのまま冷間の施工に適用すると、①不十分な混練状態、②混練後の高粘性材料の吹付ノズルまでの搬送距離に制約がある等の問題点がある。混練強化策として、材料の混練時間の延長を狙い、材料の混練機構内における滞留時間の延長を図った。具体的には、図 17 に示すように、下方ほど広がる円錐台形とした外筒の回転化により、材料は遠心力により外筒内面に付着滞留し、更に混練ピンによる剪断、圧縮及び延伸力がその滞留層に対し作用し、混練材料は下流(図中下方)へ円滑に移動する。混練材は、滞留時間中にこの作用を繰り返し受けるため連続的に瞬間混練が可能となる。

混練後の材料の吹付ならびに吹付場所までの搬送を一体化する機構として、ロータリーショット<sup>16)</sup>の機構を応用し、エアを用いず遠心力を利用する方法を採用した。図 18

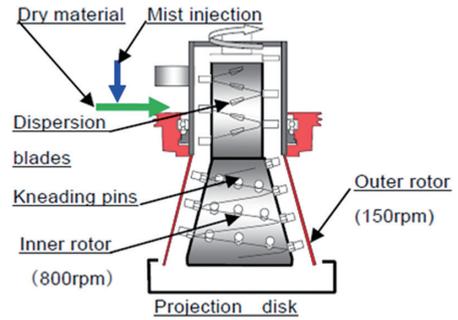


図 17 連続・瞬間混練装置  
Schematic diagram of quick mixing equipment

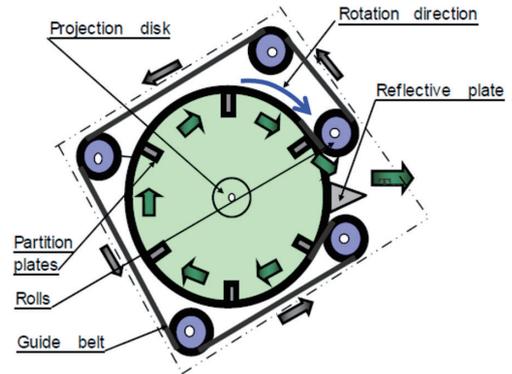


図 18 材料投射メカニズム  
Projection mechanism

に示すように、①外筒の出口に接するように配置された投射円盤、②円盤の外側に巻きつけて駆動され開放部を設けたベルト、③開放部から投射された材料に方向性や流束形状を整える反射板からなる。これらの機構要素を用い、投射流束の速度や断面寸法の任意の制御により材料の付着性を最適化できる。

#### (2) 連続・瞬間混練吹付用材料

熱間補修に用いられる連続・瞬間混練吹付補修技術と比較して、本工法は連続・瞬間混練機構内での材料の滞留時間の延長により混練性は向上したが、バッチ式混練と比較して短時間混練のため、解膠性の良い材料が必要である。また、本工法では、ショットクリート工法にみられる圧送性付与のための過剰な微粉は必要なく低減が可能であり、施工体の物性向上に期待が持てる。現行ショットクリート材をベースとして微粉部を減らす粒度構成を検討し、混練性、付着性、物性の向上を図った。表 2 に QMS 施工体とショットクリート施工体の物性を比較した。図 19 には、それぞれの組織写真を示す。QMS 材は、ショットクリート施工体と比較して、低水分、緻密質な施工体が形成されることがわかる。

#### (3) 溶鋼鍋への適用

図 20 に九州製鉄所大分地区(以下大分と表記)へ導入した実例を示す。装置全体を溶鋼鍋に載せ掛け使用する方法を採用した。これは、溶鋼鍋径が大きく、QMS 混練投射部を中心配置とすると、施工面までの距離が遠くなり、

表2 QMS と従来ショットクリート材の物性比較  
Typical properties of QMS and shotcrete material

Installation method	QMS	Shotcrete
Chemical compositions / mass%		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	82	82
MgO	12	12
Apparent porosity / %		
110°C×24h	21.4	23.4
1500°C×3h	26.0	28.6
Bulk density / g·cm <sup>-3</sup>		
110°C×24h	2.93	2.87
1500°C×3h	2.74	2.68
Modulus of rupture / MPa		
110°C×24h	5.1	3.8
1500°C×3h	25.0	18.5
Permanent linear change / %		
1500°C×3h	+1.36	+0.53
1500°C×12h	+1.38	+0.35
Water addition / mass%	7.7	8.8

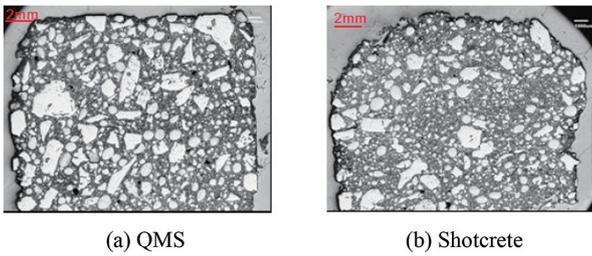


図19 QMS とショットクリートの組織写真

Microstructure of the gunning bodies of QMS and shotcrete

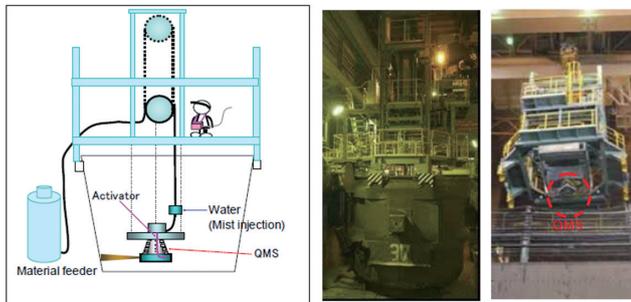


図20 大分への適用例  
QMS for ladle in Oita

付着性の低下が考えられるためである。QMS 混練投射部を偏心配置することで、投射部本体を回転させるため、装置構造が複雑化するが、施工面までの距離を狭めることが可能となり付着性の向上を図ることができる。図21には室蘭へ導入した実例を示す。門型台車にQMSが搭載されており、門型台車を移動させることにより溶鋼鍋とのセットが調整される。QMS 混練投射部は溶鋼鍋中心配置となっており、投射部を円周方向に回転させることにより施工体が形成される。中心配置により、溶鋼鍋とのセットの簡易化による施工の効率化、システムの簡略化のメリットがある。

(4) 実機適用結果

図22に大分におけるQMS材とショットクリート材の耐

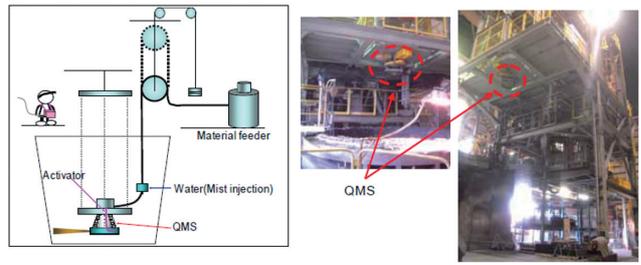


図21 室蘭への適用例  
QMS for ladle in Muroran

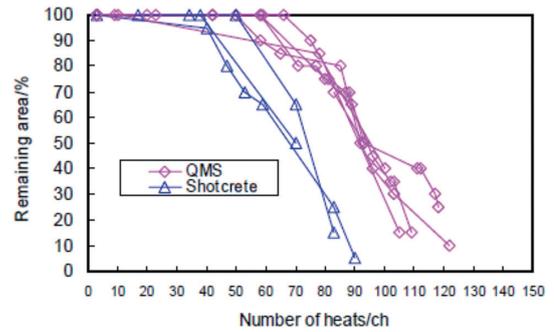


図22 大分における溶鋼鍋の耐用比較  
Comparison of service life of ladle in Oita

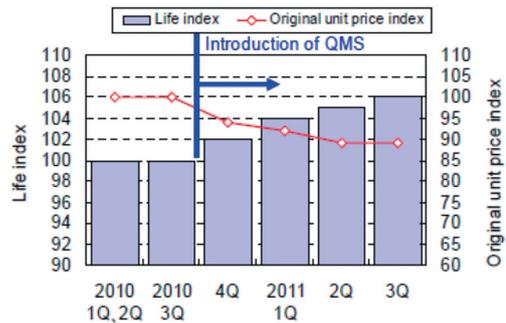


図23 大分における寿命とコスト推移  
Change of life and cost in Oita

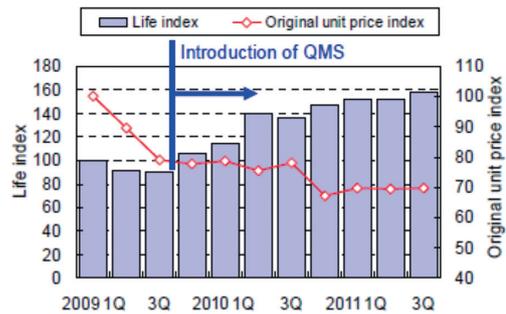


図24 室蘭における寿命とコスト推移  
Change of life and cost in Muroran

用比較を示す。70～80 チャージ時の残存率を比較すると、ショットクリート材 50～60%の残存率に対して、QMS 材 70～80%と高耐用性を確保することができた。QMS 材高耐用化の要因として、低水分化による緻密質施工体の形成と共に、溶鋼鍋全面にわたる均一な施工体形成も高耐用化につながったものと推察する。図23に大分、図24に室

蘭における寿命とコストの推移を示す。開発した連続・瞬間混練吹付装置を利用した自動補修技術の導入により、高耐用化が発揮され寿命が延長し、コスト低減に寄与できている。

### 3. 結 言

鉄鋼業における耐火物使用にあたっては、補修技術が必須であり、吹付、溶射などの技術が発展してきた。このうち、広く用いられている吹付補修において、日本製鉄と黒崎播磨との共同で、連続・瞬間混練技術を開発し、熱間用と冷間用に適用した。その結果、寿命とコストを大幅に改善することができた。

### 謝 辞

新吹付工法の開発とその適用については、NS エンジニアリング(株)中井榮氏、ならびに、黒崎播磨(株)の関氏、佃氏、古田氏の御尽力によるものであり、篤く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 伊藤智：耐火物技術協会精錬用耐火物専門委員会報告集. 93, 41 (2003)
- 2) 山田泰宏 ほか：耐火物. 63 (7), 333 (2011)
- 3) 本田和寛 ほか：耐火物. 65 (9), 439 (2013)
- 4) 前田一夫 ほか：耐火物. 36 (11), 654 (1984)
- 5) 村瀬照善 ほか：耐火物. 36 (2), 104 (1984)
- 6) 麻生誠二 ほか：耐火物. 46 (8), 416 (1994)
- 7) 平藪敬資 ほか：耐火物. 33 (11), 599 (1981)
- 8) 境田道隆 ほか：新日鉄技報. (384), 63 (2006)
- 9) 花桐誠司 ほか：耐火物. 64 (3), 120 (2012)
- 10) 古田洋一 ほか：耐火物. 64 (3), 121 (2012)
- 11) Mizuma, Y. et al.: UNITECR 2011, 31-A-5, 4 (2011)
- 12) 竹内宏典 ほか：耐火物. 65 (1), 28 (2013)
- 13) 飯尾裕太郎 ほか：耐火物. 70 (11), 547 (2018)
- 14) 花桐誠司 ほか：耐火物. 65 (1), 30 (2013)
- 15) 古田洋一 ほか：耐火物. 65 (1), 32 (2013)
- 16) 今川浩志 ほか：耐火物. 60 (9), 488 (2008)



伊藤 智 Satoru ITOU  
東日本製鉄所 製鋼部 炉材室長  
茨城県鹿嶋市光3 〒314-0014