

## 耐火物技術の進展と今後の展望

## Progress and Perspective of Refractory Technology

後藤 潔\*  
Kiyoshi GOTO  
池本 正  
Tadashi IKEMOTO

花桐 誠司  
Seiji HANAGIRI

河野 幸次  
Kohji KOHNO

松井 剛  
Tsuyoshi MATSUI

## 抄 録

低コストで安定した鉄鋼製造プロセスと高品質鉄鋼製品製造を実現するべく、耐火物技術は工夫を重ねてきた。とりわけ耐火物消費量の多い製鋼工程では、多くの技術開発を進めてきた。転炉用MgO-Cれんがでは主原料を高純度化し添加物を工夫し、さらに耐スポーリング性の優れた低黒鉛材質の開発を進めている。二次精錬窯炉および取鍋では不定形耐火物の適用を推進してきた。連続 casting では非金属介在物付着メカニズムの解明とそれに基づいた開発、局部溶損に対処する方法の検討を進めてきた。また補修においては用途に応じた工法を開発し、さらには診断と組み合わせることで高精度化を図っている。

## Abstract

**Refractory technology has been making vigorous effort to reinforce stable high-quality steel production at low cost. Service life of MgO-C brick lining for BOF is prolonged with utilization of pure raw materials, application of various additives and reduction of graphite with less thermal spalling. Monolithic refractories are applied to degasser vessels and steel teeming ladles. For continuous casting, anti-clogging materials for SEN (submerged entry nozzle) are developed based on clogging mechanism study, and anti-corrosion material for powder line is studied. Then, developed repairing methods, especially assisted by diagnosing system, support us to prolong refractory lining life.**

## 1. はじめに

耐火物は鉄鋼製造に不可欠であり、プロセスとコストに影響を与える重要な要素である。耐火物技術は鉄鋼製造技術と共に発展し、その進歩を支えて来ている。製鋼工程において消費される耐火物は製鉄工程における全体量の約3分の2と大きな割合を占める。内張り耐火物の寿命を延ばし、鉄鋼生産を安定させると共に、コストを抑え、さらには鋼の品質を向上させるため、使用環境に応じて耐火物を適切に選定し配置しなければならない。製鋼工程においては窯炉・部位毎に溶鉄の性質、スラグの組成、雰囲気、温度、あるいは耐火物に求められる機能が大きく異なるため、それぞれに応じてきめ細かく耐火物を工夫する必要がある。ここでは製鋼窯炉設備毎に進められてきている耐火物の開発改善を概観するとともに、今後の展望についても述べる。

## 2. 耐火物技術の進展

## 2.1 転炉用耐火物

## (1) これまでの転炉用耐火物の経緯

転炉では、高炉で生産された銑鉄に含まれるC, Si, Mn, P, Sなどの成分調整を行うため、操業温度が1600~1700℃と高く、吹錬時に発生する溶融酸化物(スラグ)は塩基性のため、従来より転炉炉壁には、塩基性かつ融点の高い酸化物であるMgO, CaO系の耐火物が用いられてきた。

1960~1970年代においてはドロマイト系(タールボンドドロマイトレんが、焼成マグネシア・ドロマイトレんが等)の耐火物が開発、適用されてきたが、ドロマイト系れんがの使用時の消化、高熱膨張によるスポールの問題、さらなる高耐用化のニーズからドロマイト-Cれんがが開発を經由し、1980年代にMgO-Cれんがが開発された<sup>1)</sup>。MgO-Cれんがが転炉用耐火物として1980年代に広く普及することになった理由は、ドロマイトの消化問題を解消し、マ

\* 設備・保全技術センター 無機材料技術部長 Ph.D 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

グネシアと黒鉛の複合組織による耐スラグ侵食性を大幅に向上させたのに加え、熱膨張の低い黒鉛がマグネシアの熱間での膨張挙動を吸収することにより耐スポール性が飛躍的に向上したことによる。すなわち、MgO-Cれんがは従前の耐火物の宿命的課題であった耐食性(スラグへの溶出抵抗性)と耐スポーリング性の二率背反性を同時に解決した画期的な技術であり、耐火物の歴史の中でも日本が誇るべき技術の一つとされている。

1990年代以降も転炉長寿命化に應えるため、MgO-Cれんがの耐用性向上のために様々な開発が行われてきた。代表的な開発内容としては、実炉使用時の黒鉛酸化抑制の観点より金属AlやAl-Mg金属、 $B_4C$ 、 $CaB_6$ 等の硼化物系添加物の適用が図られ、一方、スラグによる耐食性向上を目的にマグネシア粒の高純度化、粗大結晶化、および黒鉛の高純度化、粗粒化等の改善等が行われてきた<sup>2-4)</sup>。

## (2) 今後の転炉用耐火物の開発動向

今後の転炉用MgO-Cれんがの開発動向について、鉄鋼を取り巻く環境とさらなる高耐用化ニーズを踏まえ、MgO-Cれんがの方向性について述べる。

現在の転炉用MgO-Cれんがは中国産輸入耐火物が大半を占めているが、耐用の過酷な出鋼壁などは現在も国産MgO-Cれんがの高耐用化が求められている。そのような状況において、直近では中国からの輸入黒鉛原料の電子材料への需要も高く、価格高騰化、および高品位の黒鉛原料枯渇化が足元の課題になっている。また、転炉の耐火物、鉄皮からの放散熱の低減も従来からの課題として未だ解決されていない。

このような課題に対して、今後の転炉用耐火物の開発方向として、高耐用化、低黒鉛化、低熱伝導化、省資源化、リサイクル促進等が挙げられる。新日本製鐵はそのようなニーズを捉え、これらの課題解決に大きく寄与するために、現在、低黒鉛MgO-Cれんがの開発に着手している。

従来の黒鉛15%~20%の黒鉛添加率のMgO-Cれんがに対し、黒鉛添加率10%以下をターゲットに進めている。この開発において、技術的課題は黒鉛を従来の約2/3~1/2とすることにより、低熱伝導率は必然的に図れるものの、MgO-Cれんがの有する優れた耐スポーリング性を低下させることなく、耐食性の向上を図ることであり、そのためには一層の組織の緻密化を図りつつ、耐スポーリング性を維持することが重要である。現在、新日本製鐵は耐食性の向上に対して、耐火物組織の緻密化、すなわち低気孔率化を狙い、耐スポーリング性を維持するために、ナノサイズのカーボン原料に着眼し<sup>5-8)</sup>、開発を進めてきた。

図1には活用しているナノサイズのカーボン原料の透過型電子顕微鏡写真を示す。形態は数ナノ~数十ナノメートルのナノ粒子から成る凝集系の粒子が発達しているのが特徴である。図2はこのナノ粒子を微量に添加した低黒鉛

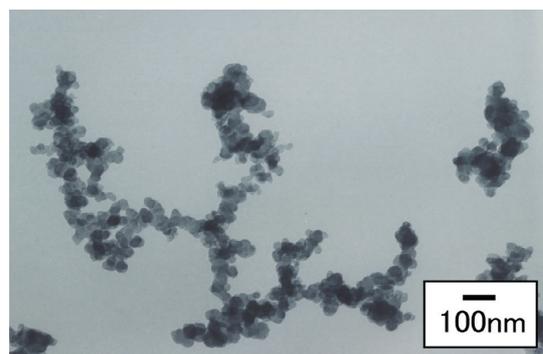


図1 ナノカーボン粒子の透過電子顕微鏡像  
TEM images of nano size carbon blacks

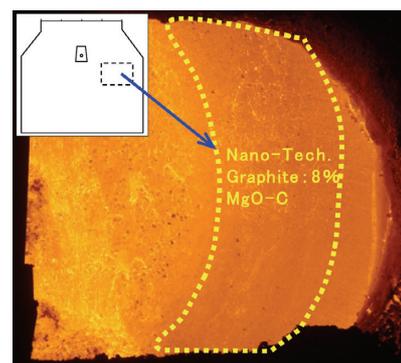


図2 実炉試験中の試験れんがの状況(周囲は通常品)  
Out view of test brick surrounded by conventional brick under operation

MgO-Cれんがを新日本製鐵の転炉のトラニオン側壁にライニングし、その耐用性の実機評価を行ったときの状況であるが、従来の高黒鉛タイプ(黒鉛量18mass%)のMgO-Cれんがに比べて、耐用性の優れていることを確認した<sup>9)</sup>。現在、同様の低黒鉛MgO-Cれんがの適用試験をさらに行っているところであり、それらの結果を確認して今後の低黒鉛化を検討していく。

## 2.2 二次精錬用耐火物

二次精錬とは、従来転炉、電気炉において行ってきた精錬反応を分割して、後工程で仕上げ精錬する工程である。1950年代に、鋼中水素の脱ガスをDH、RH等の装置で行ったのが始まりで、以降VOD、AOD等の種々の装置が実用化されてきた。近年OB(酸素吹き込み)あるいはAr吹き込みによる脱炭促進、Al昇熱、フラックス吹き込みによる脱硫等の機能が付加され、耐火物の使用環境はますます厳しくなっている。二次精錬は他の設備とは異なり、高温・真空下で精錬を実施するため、真空下での耐火物の安定性が必要である。

このため長年、塩基性のマグネシア・クロム質(マグクロ)れんがが使用されてきた。マグクロれんがは使用する原料によって3つに分類される。マグネシアとクロム鉄鉱を主原料とし、高温で焼成したダイレクトボンドれんが、

マグネシアとクロム鉄鉱，電融マグクロ（マグネシアとクロム鉄鉱を事前に電気炉で融解した原料）を50%程度用いたセミリボンれんが，マグネシアと電融マグクロのみを用いたリボンれんがである。又高耐食性を狙って酸化クロムを添加し<sup>10</sup>，焼成したマグクロれんがも開発されており，それぞれ具備特性に応じた部位毎に使用されている。

又近年ではクロムフリー化が進められ，MgO-Cれんがの適用<sup>11</sup>，不定形化等が実施されてきた。新日本製鐵では1996年に大分製鐵所で熱風マイクロ波乾燥装置を導入し，RH下部槽の不定形化を世界で初めて実現した<sup>12</sup>。君津製鐵所でも不定形化が進められ，アルミナ・スピネル質キャストابلやアルミナ・マグネシア質吹き付け材が使用されるようになった<sup>13</sup>。RHでは局部的な損傷部を熱間で補修し，寿命延長を図る補修技術が採用されている。マグネシアやドロマイト等を熱間で吹付ける乾式吹付け，溶射補修，浸漬管や下部槽に中子をセットし，アルミナ・マグネシア系材料を圧送する圧入補修等が代表的な補修技術である。

又下部槽の寿命延長を図る方法として，片槽連続使用や待機時の保熱強化等も実施されている<sup>14</sup>。浸漬管は内周にれんが，外周にアルミナ・マグネシア質キャストابلが施行されているが，芯金の変形でキャストابلに亀裂が入るケースが多い。この芯金変形を抑制する目的で，平均粒径が $10\mu\text{m}$ 以下の噴霧を直接鉄皮に吹きかけるフォグ冷却も採用されている<sup>10</sup>。このように使用する耐火物材質の開発，補修，操業条件の緩和，芯金構造改善等の努力により近年では1000ch以上の寿命も達成されている。

### 2.3 取鍋用耐火物

溶鋼取鍋には当初，高珪酸質（ろう石質）れんがが使用されていたが1960年代から始まる二次精錬-連続鋳造法の普及により，内張り耐火物の使用条件が苛酷化し，ジルコン質れんがに切り替わった<sup>15</sup>。そして1970年頃からの築炉作業の機械化，省力化を目的とした耐火物の不定形化の流れと，高纯净度鋼のニーズに対応するための耐火物のシリカレス化を背景として1980年代後半にアルミナ・スピネル質キャストابل<sup>16</sup>が開発されてきた歴史がある。

アルミナ・スピネル質キャストابلは溶鋼取鍋に定常的に使用されたが，中間修理時の補修材使用量の削減と大修理寿命の長寿命化のニーズが顕在化した。溶鋼取鍋にアルミナ・スピネル質キャストابلを適用した場合には，側壁部ではスラグ浸透に起因して起こる構造スポーリングにより数部では前記の構造スポーリングに加え，耐火物自体の発生熱応力により引き起こされる迫り上がりや迫り割れにより損耗する<sup>17-20</sup>。このような，アルミナ・スピネル質キャストابلの損耗を低減するために開発されたのがアルミナ・マグネシア質不定形耐火物である<sup>21</sup>。

アルミナ・マグネシア質キャストابلはアルミナ・スピネル質キャストابلと比較すると，熱間線膨張と発生熱応力の二つの特性において，大きく異なる。アルミナ・マグネシア質の熱膨張曲線<sup>22</sup>およびアルミナ・スピネル質キャストابلの熱間線膨張曲線<sup>23</sup>によれば，アルミナ・マグネシア質キャストابلは約1400℃以上の温度から急激に膨張する。これは，主に体積膨張を伴うスピネルの生成によるものである。これに対してアルミナ・スピネル質キャストابلでは急激な膨張は生じない。

実機ではアルミナ・マグネシア質キャストابلは拘束されているため，稼働面側で生じるこのような大きな膨張は，耐火物の組織の緻密化（開気孔径の減少）に寄与し，スラグ浸透を抑制する効果をもたらす。一方，アルミナ・スピネル質キャストابلは稼働面側での大きな膨張は発現されないため，耐火物の組織の緻密化は起こらず，スラグ浸透を抑制することができない。このようなことから，アルミナ・マグネシア質キャストابلはアルミナ・スピネル質キャストابلよりもスラグ浸透が起こり難いため，構造スポーリングによる損耗が抑制されることになる。

アルミナ・スピネル質，アルミナ・マグネシア質キャストابلの発生熱応力曲線<sup>20</sup>によれば，アルミナ・マグネシア質の発生熱応力の最大値は，アルミナ・スピネル質のそれよりも低くなっていることが分かる。これは，アルミナ・マグネシア質はアルミナ・スピネル質よりも迫り上がりや迫り割れが発生するリスクが低いことを示す。

以上のことから，アルミナ・マグネシア質キャストابلはアルミナ・スピネル質キャストابلに比べ，スラグ浸透が起こり難く，かつ，耐火物自体の発生熱応力も低い特性を有することから，溶鋼取鍋に使用されるに至っている。なお，アルミナ・スピネル質キャストابلではせり上がりのリスクを低減するために焼結に伴う収縮を制御し，取鍋への適用が可能となっている。

新日本製鐵では他社に先駆けて溶鋼取鍋へのキャストابل適用を進め，側壁と敷部の不定形化を達成した<sup>24</sup>。また塩基性キャストابلを開発し取鍋の全不定形化も成し遂げた<sup>25</sup>。

今後，アルミナ・マグネシア質キャストابلを長期間，安定的に使用するためには，使用中にキャストابلに発生する亀裂からの地金侵入を抑制することが課題となる<sup>21,26</sup>。キャストابلへの地金侵入の原因となる亀裂の発生は，キャストابلの使用時の組織変化によりもたらされる。それ故に，アルミナ・マグネシア質不定形耐火物の焼結性や高温下でのクリープ性の評価を基に，使用中の組織変化の起こり難い最適な材料設計技術を確立することが重要となる。

### 2.4 連続鋳造用耐火物<sup>27</sup>

連続鋳造（連鋳）用耐火物に関する技術的な取り組みの

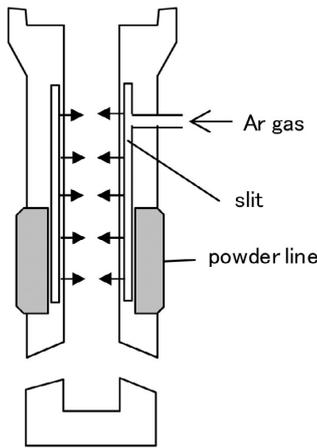


図3 浸漬ノズル断面の模式図  
Schematic drawing of a submerged entry nozzle

多くは、注入用耐火物、すなわち主として浸漬ノズルに関して行われてきた。図3に一般的な浸漬ノズルの模式図を示す<sup>28)</sup>。連铸のチャージ規制理由は浸漬ノズルの寿命であり、寿命を律速する二大原因は浸漬ノズルへの非金属介在物（介在物）（脱酸生成物やタンディッシュ（TD）スラグ）ならびに地金の付着と局部溶損である。この付着と局部溶損は、浸漬ノズルが炭素含有耐火物であることと鑄型で使用されるということに起因している。以下、これらの課題に対する技術的な取り組みについて述べる。

#### (1) 付着対策

地金付着はスーパーヒートが小さい、あるいはTDでの溶鋼温度下がりが多いなど、鋼種依存性が大きいと考えられる。したがって、操業改善による付着防止が最も有効である。ノズル側の対策としては、断熱スリットを浸漬ノズルに設置する方法があるが、広く採用されるには至っていない。

一般的に広く行われている付着対策は浸漬ノズルや上ノズルからのArガス吹き込みであり、一定の介在物付着防止効果および浮上除去効果が認められている。

溶鋼と接触するノズル壁面（内孔体）の材質を改善することで介在物の付着を抑制する取り組みは、過去数多く行われてきた。ひとつはスライディングノズル（SN）を使用することに起因するノズル内孔流れの不均一を解消することで介在物の付着を抑制する方法であり、内孔体に段差を設置した構造や、旋回羽根を設置した構造など<sup>29)</sup>が提案されている。

浸漬ノズルの材質はアルミナ・シリカ・黒鉛質が最も一般的である。通常はシリカを省略してアルミナ・黒鉛質（AG質）と呼ばれる。しかしAG質は、浸漬ノズルとして使用された1970代から介在物の付着が問題となってきた。その原因はAG質中のシリカが、黒鉛およびバインダーとして添加されている樹脂に起因するカーボンと共存してい

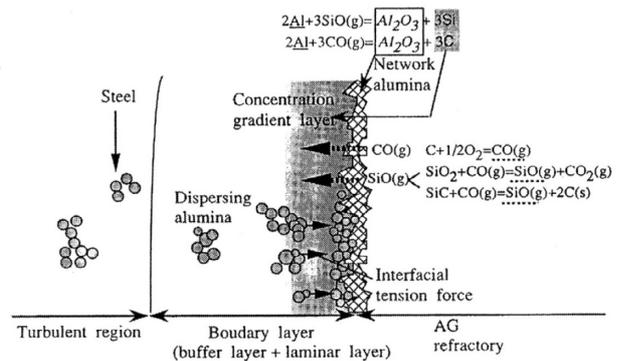


図4 浸漬ノズルへの介在物付着の模式図  
Adhesion mechanism of alumina inclusions

るため、使用中にガス化反応を起こし、鋼中のsol-Alを酸化してアルミナを生成したり、ガス化した成分が溶鋼中に拡散し壁面に濃度勾配を形成して介在物を付着するためである。このように、AG質はその材質自体に介在物を付着させる原因があるので、内孔体をAG以外の材質すなわち、難付着材質にするのが、もうひとつの方法である。図4にAG質の内孔体への介在物付着の模式図<sup>30)</sup>を示す。

難付着材質には大きく分けて2つある。ひとつは反応してガス化するCとSiO<sub>2</sub>を共存させないカーボンフリー材質<sup>30)</sup>を内孔体に適用するもので、八幡製鐵所で実用化されている。もうひとつは内孔体壁面に液相を生成させ溶鋼と濡れやすい材質にして、介在物の内孔体壁面への付着力を小さくするものである。ジルコニア・ライム・カーボン質（ZCG質）が君津製鐵所で使用されている<sup>31)</sup>。またドロマイト・グラファイト質（DG質）、ドロマイト質<sup>32)</sup>が提案されている。最近報告された通電型のノズル<sup>33)</sup>も内孔体壁面の濡れ性を向上させるものである。以上の難付着材質の課題は適用鋼種の拡大と効果の持続性であり、浸漬ノズルの付着は操業に与える影響が大きいいため、今後も開発が続くと思われる。

#### (2) 局部溶損対策<sup>34)</sup>

鑄型には溶鋼の酸化防止、鑄型内の介在物吸収、鑄型への凝固シェルの焼き付き防止ならびに均一な抜熱を目的として連铸パウダー（フラックス）が使用されている。この連铸パウダーは鑄型内のメニスカスで浸漬ノズルを局部溶損<sup>35)</sup>し、浸漬ノズルの寿命を律速する原因となる。したがって、パウダーと接する浸漬ノズル外周部のパウダーライン（PL）には、AG質よりも耐食性の良好なジルコニア・黒鉛質（ZG質）が使用されている。浸漬ノズルの寿命を向上させるもうひとつの方法は、このZG質の耐用を向上させるものである。

ZG質は連铸パウダーと鑄型内で接触すると骨材のZrO<sub>2</sub>粒子の脱安定化と細粒化が生じる。この脱安定化と細粒化はZrO<sub>2</sub>粒子に特有の現象であり、この細粒化したZrO<sub>2</sub>粒

子が連铸パウダー中に離脱していくことでZG質の溶損が進行すると考えられてきた。したがって、ZG質の耐用をさらに向上させる方法として、 $ZrO_2$ 粒子の脱安定化と細粒化に及ぼす $ZrO_2$ 骨材の粒度<sup>36,37)</sup>、 $ZrO_2$ の含有量<sup>38)</sup>、 $ZrO_2$ の安定化度<sup>39)</sup>、黒鉛純度<sup>40)</sup>、見掛け気孔率の影響<sup>41)</sup>などが調査されてきた。

しかし、 $ZrO_2$ 粒子の脱安定化と細粒化については連铸パウダーの組成、特に塩基度の影響も大きいと思われる<sup>42)</sup>。また、細粒化した $ZrO_2$ 粒子はPL稼働面でバリヤーとなつて溶損を抑制する作用<sup>43)</sup>もある。したがって、今後さらなるZG質の耐用向上を実現するには、連铸パウダー組成の影響を加味し連铸パウダーによるZG質の変化を動的に調査することが重要となろう。

## 2.5 補修・診断技術

耐火物の補修はオンラインの熱間、オフラインの冷間でそれぞれ行われる。熱間補修としては吹き付け、圧入、投げ込み焼き付け、スラグコーティングなどが行われ、また冷間補修としては吹き付け、パッチングに加えて差し替え、継ぎ足し、鍍塗りなどの方法が取られる。これらの中で近年大きく発展したのは吹き付け補修である。新日本製鐵は吹き付け補修工法の開発を進め、窯炉の安定稼働と耐火物コスト低減を推し進めている。

以前から行われてきたのは乾式吹き付け工法である。材料を気流搬送し、ノズル先端で水分を添加して被補修体に吹き付ける方法である。この方法は簡便であるが、施工体は多孔質で耐用性は低い。これに対して、1990年代末以降に発展してきたのが湿式吹き付け工法である。キャストブル耐火物のように混練した材料をポンプ圧送し圧縮空気ですりつぶして吹き付けるショットクリート工法<sup>44)</sup>は、乾式吹き付けの場合よりも緻密な施工体を形成することができ、多くの窯炉の補修に活用されている。回転装置により遠心力で投射するロータリーショット工法<sup>45)</sup>は、ショットクリート工法よりも添加水量を減らすことができ、さらに緻密な施工体が得られる。また時間当たりの施工量が多く、少ないオペレーターで実行できることも特徴である。

湿式吹き付けは施工体が緻密で耐用性は優れるものの、施工体の爆裂が懸念されるため熱間補修には適さず、また混練された材料を用いるため、機器の洗浄に手間が掛かり、作業が煩雑になりがちである。熱間吹き付けが可能で簡便さと耐用性の両立を目指して開発されたのが、気流搬送した材料にミスト注水し、ノズル内部で混合させながら吹き付ける補修法 (Mist Injection Shot)<sup>46)</sup>、および気流搬送した材料を連続的に混練しながら吹き付ける瞬間・連続混練吹き付け工法(H-QMI: Hot Quick Mixing Injection & Mist Injection)<sup>47)</sup>である。前者は比較的簡便で、取鍋羽口や脱ガス槽浸漬管の補修などに活用されている。後者は比較的耐用性が高く、転炉や溶鋼鍋などで活用されている。

補修は耐火物ライニングの損耗状況を正確に診断した上で行うことで確実に無駄のないものとなる。従来は人の目に頼っていた診断にプロフィールメーターを取り入れ、定量的な診断と正確な補修が可能となった。取鍋等の局部溶損をレーザープロフィールメーターにより発見し、当該部位に熱間吹き付けを行うことで寿命を延長し、かつ吹き付け材使用量を削減することができた<sup>48)</sup>。また、診断装置と高耐用の溶射補修法とを組み合わせた装置はコークス炉用に展開され、炉寿命を延長することができた<sup>49)</sup>。

## 3. まとめ

製鋼プロセスは絶えず変化し、これを支えるために耐火物も常に変化している。革新的なプロセスの成立に向けて今後も耐火物技術を構成する材料、構造、施工、診断、補修の各技術にさらに磨きをかけると共に、省エネルギー・省CO<sub>2</sub>に向けた断熱技術、省資源化に対応するリサイクル技術などについても引き続き鋭意取り組み、製鉄技術の一翼を担って行く。

### 参照文献

- 1) 高長茂幸 ほか:セラミックス. 35 (8), 613 (2000)
- 2) 渡辺 明 ほか:耐火物. 38 (11), 740 (1986)
- 3) 倉田浩輔 ほか:耐火物. 43 (11), 534 (1989)
- 4) 花桐誠司 ほか:耐火物. 43 (11), 627 (1991)
- 5) Tamura, S. et al.: Proceedings UNITECR2003 Congress. Osaka, Japan, 2003-10, p. 517
- 6) Takanaga, S. et al.: Proceedings UNITECR2003 Congress. Osaka, Japan, 2003-10, p. 521
- 7) 田村信一 ほか:新日鉄技報. (388), 18 (2008)
- 8) Tamura, S. et al.: Taikabutsu Overseas. 30 (4), 275 (2010)
- 9) Tanaka, M. et al.: Proceedings UNITECR2011 Congress. Kyoto, Japan, 2011-11, 2-E-18
- 10) 加茂百紀 ほか:耐火物. 50 (2), 84 (1998)
- 11) 桐生幸雄 ほか:耐火物. 39 (2), 33 (1987)
- 12) 祐成史郎 ほか:材料とプロセス. 11 (1), 173 (1998)
- 13) 伊藤 智 ほか:新日鉄技報. (388), 62 (2008)
- 14) 山本慎一 ほか:耐火物. 56 (2), 90 (2004)
- 15) 杉田 清:製鉄・製鋼用耐火物. 初版. 東京, 地人書館, 1995, p. 272
- 16) 永井 敏 ほか:耐火物. 42 (8), 418 (1990)
- 17) 飯田敦久 ほか:耐火物. 53 (3), 116 (2001)
- 18) 加藤久樹 ほか:耐火物. 48 (3), 142 (1996)
- 19) 古田和浩 ほか:耐火物. 48 (8), 404 (1996)
- 20) 石川 誠 ほか:耐火物. 51 (3), 144 (1999)
- 21) 布袋屋道則 ほか:耐火物. 48 (11), 611 (1996)
- 22) 永井 敏 ほか:耐火物. 40 (5), 284 (1988)
- 23) 山村 隆 ほか:耐火物. 43 (12), 676 (1991)
- 24) 倉田浩輔 ほか:耐火物. 43 (4), 175 (1991)

- 25) 八百井英雄 ほか:材料とプロセス. 5 (1), 248 (1992)  
 26) 金谷 智 ほか:耐火物. 48 (11), 586 (1991)  
 27) 池本 正:炭素含有耐火物. 初版. 岡山, 岡山セラミックス技術振興財団, 2006, p. 156  
 28) 杉田 清:製銑・製鋼用耐火物. 初版. 東京, 地人書館, 1995, p. 302  
 29) 広木伸好 ほか:品川技報. 36, 75 (1993)  
 30) 松井泰次郎 ほか:耐火物. 49 (2), 64 (1997)  
 31) 田中和明 ほか:材料とプロセス. 4 (1), 220 (1991)  
 32) 緒方浩二 ほか:耐火材料. 152, 24 (2004)  
 33) Sato, Y. et al.: Proceedings UNITECR2011 Congress. Kyoto, Japan, 2011-11, 2-A-14  
 34) 森川勝美:炭素含有耐火物. 初版. 岡山, 岡山セラミックス技術振興財団, 2006, p. 130  
 35) 向井楠宏 ほか:耐火物. 42 (12), 710 (1990)  
 36) 林 安茂 ほか:耐火物. 42 (11), 668 (1990)  
 37) 内田和秀 ほか:耐火物. 53 (5), 274 (2001)  
 38) 市川健治 ほか:耐火物. 41 (11), 644 (1989)  
 39) 武下繁行 ほか:材料とプロセス. 1 (4), 1101 (1988)  
 40) 大門雅也 ほか:耐火物. 41 (11), 645 (1989)  
 41) 吉次大典 ほか:耐火物. 57 (3), 124 (2005)  
 42) 遠藤理恵 ほか:耐火物. 63 (3), 123 (2011)  
 43) 池本 正 ほか:耐火物. 51 (11), 588 (1999)  
 44) 釘宮昌寛 ほか:耐火物. 51 (11), 599 (1999)  
 45) 今川浩志 ほか:新日鉄技報. (388), 87 (2008)  
 46) 松井 剛 ほか:材料とプロセス. 24, 147 (2011)  
 47) 花桐誠司 ほか:耐火物. 64 (3), 120 (2012)  
 48) 新保章弘 ほか:耐火物. 61 (3), 143 (2009)  
 49) 境田道隆 ほか:新日鉄技報. (384), 63 (2006)



後藤 潔 Kiyoshi GOTO  
 設備・保全技術センター 無機材料技術部長  
 Ph.D  
 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



松井 剛 Tsuyoshi MATSUI  
 設備・保全技術センター 無機材料技術部  
 主任研究員 博士 (工学)



花桐誠司 Seiji HANAGIRI  
 設備・保全技術センター 無機材料技術部  
 炉材技術企画グループ グループリーダー



池本 正 Tadashi IKEMOTO  
 設備・保全技術センター 無機材料技術部  
 主任研究員 工学博士



河野幸次 Kohji KOHNO  
 設備・保全技術センター 無機材料技術部  
 炉材エンジニアリンググループ マネジャー