



# 鉄鋼用耐火物技術の将来像

## Future Prospects of Refractories Technology in Steel Industries

澤野清志  
Kiyoshi Sawano

新日本製鐵(株)  
環境・プロセス研究開発センター  
無機材料研究開発部 部長

### 1 はじめに

耐火物技術は鉄鋼プロセスに欠くことのできない技術であり、その発展とともに進歩してきたといっても過言ではなく、また耐火物技術が伴わなかったために実現しなかった鉄鋼プロセスも数多い。近年では鉄鋼プロセスの変化が大きくないために、耐火物技術ももっぱらコストダウンあるいは環境問題などと関連づけられることが多くなっている。

また、これまで圧倒的に技術的優位を保ってきた日本の鉄鋼業（鉄鋼用耐火物技術もこれに含まれるが）も、外国からの追い上げが急であり、これまでのように安閑とはしてられない状況でもある。今後、我々が更に発展して日本の鉄鋼業が将来ともリーダーとしての地位を保つためにも、鉄鋼用耐火物技術というものは不可欠のものである。

その一方で、国内においては高炉の長寿命化、コークス炉の老朽化などからこれら長寿命炉に関連する耐火物・築炉技術の担保、向上に対する懸念も呈されている。

本稿では最近の耐火物技術の進展について述べるととも

に、今後の耐火物技術のめざす方向についても展望する。

### 2 耐火物使用の変遷

鉄鋼に使用される耐火物は最近ではほぼ飽和してきているものの、一貫して減少してきている。その結果として、総合耐火物原単位は10kg/t-steel or pig ironを切るレベルになってきている(図1)<sup>1)</sup>。個々の窯炉別の原単位でみると、1~2kg/t-steel or pig ironであり、これより大幅な減少は期待できない(図2)<sup>2)</sup>。最近では原単位の減少もあるが、原単価の低減という観点で安価耐火物の使用とくに輸入耐火物の使用というトレンドが見られ、その結果として平均耐火物単価の低下につながっており、耐火物原単価は減少している。

また、海外と比較すると、1980年頃にかなり差のあった原単位も、ここ数年では大差ないまでに追い上げられている。これは耐火物の使用量が転炉鋼比率、連铸比率などと強くリンクしていることにもよるが、技術革新の速度に対して、技

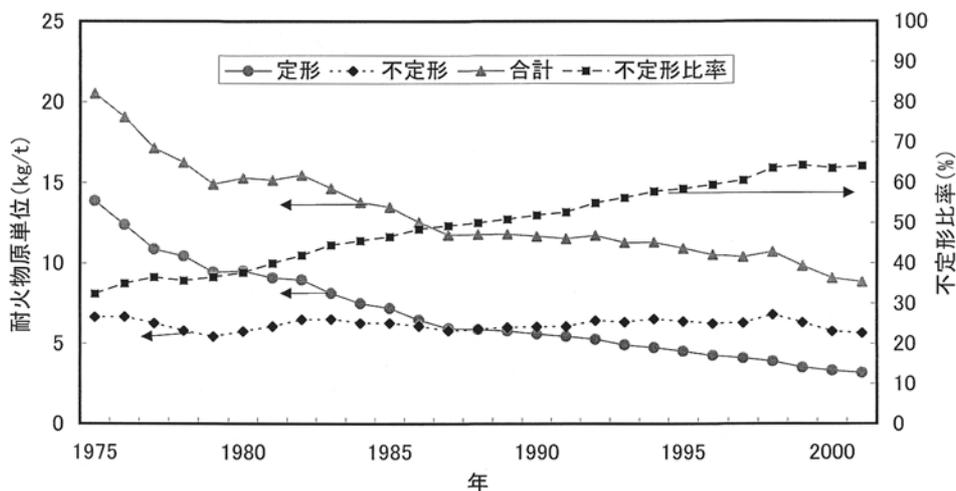


図1 鉄鋼用耐火物原単位と不定形比率の推移

術の拡散速度の方が速いという相対的な問題であろう。

一方、技術的にみると今日にいたるまでには数多くの蓄積があり、その結果として現在窯炉に使用されている耐火物が存在していることは論を待たない。その全てを述べるのは不可能であるが、最近進展のあった技術のうちのいくつかについて紹介する。

### 3 最近の耐火物技術の進展

#### 3.1 不定形耐火物の使用拡大

最近の技術的なトレンドで大きなもののひとつは、更なる不定形化の進展であろう。図1に定形耐火物と不定形耐火物の原単位の推移と不定形比率を示す<sup>1)</sup>。定形耐火物がほぼ一貫して減少しているのに対して、不定形耐火物は最近でこそほぼ横ばいであるが、相対的な比率（不定形比率）は一貫して上昇している。その要因は多くあるが、ここではその中の大きなものとして補修技術の進歩と不定形窯炉の拡大をとりあげ、以下例をあげて紹介する。

##### 3.1.1 補修技術の進展（ショットクリート工法の例）

補修技術は吹付け補修、溶射補修などがあるがいずれも一長一短があり、コスト的にインシヤルライニングに対して大幅に劣ることから、流し込みの補助的な意味合いが強く、ライニングバランスを維持できる限り使用を最小化するような方向が一般的であった。

これに対して、近年土木分野でもちいられている新湿式吹付け施工法（ショットクリート工法）が耐火物に導入されることにより、吹付け施工体の耐用性の大幅向上が図られている（図3）<sup>3)</sup>。これは流し込み材に近い比較的低水分の材料をポンプ圧送し、ノズル先端で急結剤を含む水分を高圧エアとともに吹き込んで吹付ける方法で、従来の吹付けよりむしろ流し込みに近い物性の施工体が得られる。これによりこれまでより補修量を増やして寿命延長を図ってもメリットが享受

でき、操業の幅が広がった。これは熱間での補修では十分でないものの、現在では従来の乾式吹付け補修の多くを置き換え、一部インシヤルライニングへの適用も行われている。

##### 3.1.2 不定形窯炉の拡大（RHの例）

窯炉別の不定形化状況から見ると高炉樋、溶鋼鍋、連铸タンディッシュなどが中心になるが、最近では二次精錬（RH）のアルミナスピネル質材料による不定形化が報告されている（図4、5）<sup>4)</sup>。これは単なる不定形比率の向上、継ぎ足しによるコスト低減の視点のみならず、マグクロレンがを使用しないことによる環境問題への寄与も大きい。

この技術はRHという高温、高攪拌精錬炉において、これまでの不定形では不十分であった耐用性を実用レベルまで向上できたことと、これまでの不定形耐火物技術では困難であったライニングの厚い不定形耐火物の乾燥という技術を、取鍋乾燥に開発されたマイクロ波乾燥技術<sup>5)</sup>を利用することによって実現した。

マイクロ波乾燥技術は通常のバーナーあるいは熱風乾燥と異なり不定形耐火物および水分自身を直接発熱させる内部加熱技術であるため、ライニング内の温度が均一で乾燥速度が速くなるのが特徴である。これにより厚肉ライニングを短時間に乾燥することが可能になり取鍋に比較してライニング厚

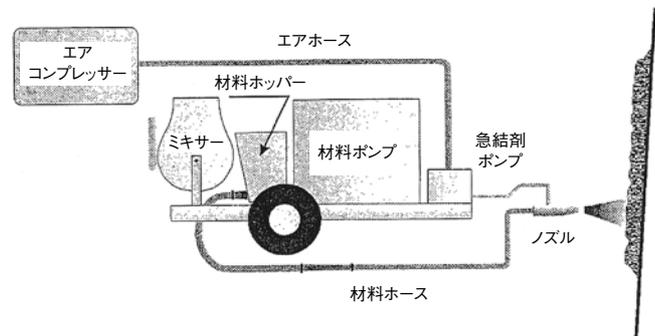


図3 新湿式吹付け（ショットクリート工法）の概要図

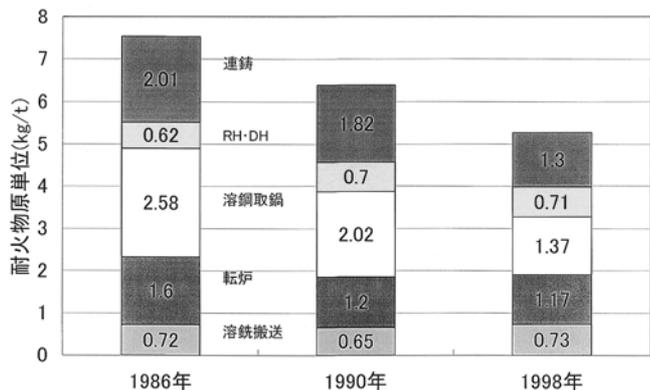


図2 窯炉別の年代別耐火物原単位推移

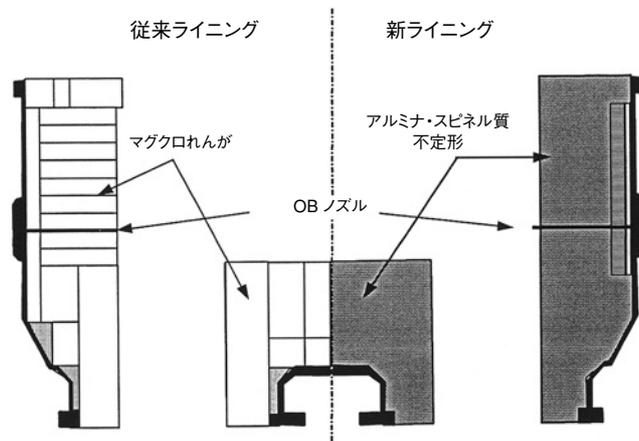


図4 RHの不定形化の概念図



## 4 耐火物技術の展望と将来像

将来の耐火物技術について全て言及することはもちろんできないが、将来的に避けて通れない技術の方向、および現状に対してより良い方向に進んでもらいたい技術の方向について、若干私見も交えて述べてみたい。

### 4.1 環境問題

一般論での環境問題は誰しも異論のないところであろう。鉄鋼業で耐火物関連の環境問題でいうと有害廃棄物と廃棄炉材であると考えられ、以下これらについて述べる。

鉄鋼用耐火物において有害物の可能性が最も大きいものはマグクロレンが起因の6価クロム問題であろう。使用しているときには3価であるクロムが強塩基性溶液に接触すると酸化されて6価に変化する可能性がある。現在は回収して安全に処理をしているために問題になっていないが、事故の可能性は否定できない。これを6価に変わらないような処理をする研究も進んでいるが、本質的な解決はマグクロレンを使用しないことであり、主要な用途である二次精錬設備 (RH など) の脱マグクロ化は上述のようにいくつかの試みがなされており今後に期待が持てる。

廃棄炉材は全体の量的な観点からいうとスラグ、ダストなど鉄鋼業での副生物に比較するとはるかに少ない。しかし、廃棄炉材については過去廃棄されていた有価物である使用後耐火物の有効利用という視点が重要であり、これを生かす技術が中心になろう。これらの中心となる炉材のリサイクルを中心に述べる。

使用後炉材はスラグ浸透、多種材料の混合 (不定形での複数の骨材/バインダー、あるいはウェアとパーマなど) がある状態であり、そのままでは不十分でありリサイクル率をあげて廃棄物を減少するためにはさまざまな視点での取り組みが必要であり、それらについて考えてみたい。

まず、リサイクルの技術についての基本的な視点は、平板な言葉であるが、ライフサイクルを意識した技術である。単なる使用後炉材の再使用ではなく、製造・使用・回収・分別・処理・再使用のライフサイクルで最適化するようなシステムを造りあげてゆくことに他ならない。この視点で個々の技術を組み上げてゆくことになるが、それらのなかのキー技術について考えると以下ようになる。

#### ①耐火物種類の統合、削減

現在の耐火物は各窯炉についてのコスト、寿命などを最適化する、いわば全体からいえば極大値を求めるような取り組みが多く、その結果として日本の耐火物の種類は世界的に見てもかなり多い。リサイクルは同一窯炉内では限界があることから、より全体を見た材料設計・選定

を考慮する必要がある。例えば、窯炉間でのリサイクルを容易にするように同種材料を使用するなどは今後積極的に試みられるべきであろう。

#### ②回収耐火物の処理技術

リサイクルに供する使用後耐火物はスラグ浸透層などの除去、所定の粒度への粉碎・分級などの処理がリサイクル率向上の必要技術である。これらは天然原料を利用するときと類似の技術であり、鉄鋼メーカーと耐火物メーカーあるいは原料メーカーとの協力が望まれる。

#### ③リサイクル全体マップ

リサイクルは窯炉毎の最適化を超えて、全体のバランスを考えることが必要である。使用後炉材の発生量バランス、回収、分別などのことまで考慮して鉄鋼プロセス窯炉全体にわたってのマップを作成し、それから個別のインシヤルライニング、補修材などを選定することで全体最適化が可能になる。

このような技術を総合することでリサイクル率を向上させることが重要であるが、基本的に発生する使用後炉材を最少にするような、長寿命化技術、補修技術などが重要であることは言うまでもない。また、耐火物にとどまらず、スラグ、ダストなどより幅広い発生物との組み合わせも考慮したい。また、リサイクル先も炉材→炉材だけでなく、副原料などその他の用途を広く考える必要がありそうである。

### 4.2 長寿命窯炉関連技術

高炉はこの20年で6年程度であった寿命が、15年以上に延長した。これに関しては、炉底カーボンブロック、ステーブ、操業など多くの技術開発があった。それに対して、熱風炉、コークス炉の寿命は高炉のそれに対して大幅に長いことから、それらに対する技術開発は余り行われてこなかった。とくにコークス炉に関しては国内ではもうかなり長期間建設が行われていないことから、これに関連する、特に建設に関する技術は長期間にわたって担保することをあまり顧みられてこなかった。今後、現行炉の炉齢も進んでいることから老朽更新を迎えるが、このときの建設に関わる技術をどうするかという懸念がある。

この長寿命炉の問題の技術的な部分としては非常に複雑なれんが構造体であるコークス炉、熱風炉などの設計、築炉技術、更に拡げていうと、れんが製造技術が担保できなくなりつつあることである。これは1社で担保できるようなものでなく、結果としてこのような状況になってきている。世界的に見ればコークス炉を建設できる国はドイツ、中国などあるが、鉄鋼先進国としての日本としてどのようにしなければならぬかを考える時期になってきている。今後、各社が競争、エゴを越えて日本鉄鋼業のために協調してゆくべき課題の一

つであると考える。

技術的に見ると、複雑なれんが構造体に関しては有限要素法などでの加熱時の変形、応力解析などによる技術的解明はできておらず、また、それらの計算に必要な耐火物の物性、例えばけい石れんがの高温での弾性率、組成変形特性、長期にわたる劣化挙動などは最近ではほとんど報告されていない。技術担保はこれらの地道な努力の積み重ねであり、これらは一社の負担ではできないことから、公共機関などの協力も仰いで進められることを望むものである。

次に現状の耐火物技術を展望したときに、今後の目指すべき耐火物技術についていくつか考えるところを述べてみたい。

### 4.3 不定形耐火物の将来像

上述の通り、不定形耐火物は大きく進展してきているが、これまでの道程から今後の方向を示唆するような点が見受けられる。以下にそれらについて考えてみたい。

#### 4.3.1 材料・施工一貫最適化

これまでの不定形耐火物の発展は比較的一本道の、耐火物メーカーが製鉄所内の与えられた条件において鉄鋼メーカーとともに不定形化設備を投資し、材料をそれにあわせて開発・改善してゆくというパターンが一般的だったといえる。また、製鉄所では複数の耐火物メーカーが競争状態にあるとその条件のなかでの性能・コストなどの競争原理の中に置かれるために全体を見ての一貫最適化については不十分でないかと考えられる。

一方、れんがなどではもともと耐火物メーカーが自社内で工程を保有して、管理された条件の中で製造が行われて製品が納入されるのに対して、不定形耐火物は製鉄所の現地施工であることから、本来ならば耐火物メーカー内で行われるのと同様な厳密な製造管理が行われるべきであるが、実際には必ずしもそうっていないのが実態であろう。

例えばれんがについてみると、耐火物メーカーでのMgO-Cれんがの坏土の調整工程のなかの、配合粉末、バインダーなどの混合、混練などのプロセスでは、温度、(場合によっては湿度)などを管理し、混練機などの設備の保全なども坏土の状態を見ながら、その後の工程でれんがに不良が発生しないように細心で管理されている。不定形の施工現場でも、このような細心の注意と温度などのプロセスパラメータの管理、安定化が行われれば、それだけで性能向上につながることは容易に推定できる。これについては既に一部の取り組みは始まっており、更なる展開を期待するものである<sup>13)</sup>。

#### 4.3.2 不定形耐火物構造

現在の不定形化された窯炉構造は、鉄鋼プロセスから規定されたものであるのはもちろんであるが、それ以外に、不定形化される前のれんが積み構造のときの構造を踏襲しているものも少なからずある。もちろん鉄皮構造から見直しをしなければならぬ場合のコスト負担など避けて通れない障害も数多くあるが、不定形の特性を生かした構造を考えることに価値を見出したい。

過去ファインセラミックスの黎明期に、何でも既存の高温用途の金属構造体をそのまま置き換えるという試みが行われた。これの結果および結論はセラミックスにはセラミックス用の構造設計が必要である、ということであった。

不定形耐火物構造についても構造の考え方からスタートした地道な取り組みを期待したい。

### 4.4 ハイブリッド窯炉構造

大きな流れである不定形耐火物使用比率上昇についてと、その展望については述べてきた。不定形耐火物はれんがでは十分でない補修・継ぎ足しによる寿命延長や限界までの使用、形状の自由度の高さなどメリットは非常に多い。しかし、一方で不定形耐火物を使用するに従って、その限界も明らかになってきている。例えば、スラグ浸潤防止などに有効なカーボン系材料の利用には不向き、向上してきたとはいえ耐用性での劣位などである。これら不定形とれんがの中間段階としてプレキャストブロックが注目されてきている<sup>14)</sup>。これはあらかじめ管理された工場において、不定形耐火物を所定の形状に成形するために、特性が優れていることと、鑄込み成形であるためれんがに比べて形状の自由度が高いという特徴がある。

今後の窯炉の耐火物設計においては、これら、少なくとも3形態の耐火物を適材適所に使い分けてゆくことが期待できる。例えば円、直線などの単純形状部分にはれんが、複雑形状部分にはプレキャストと不定形などのハイブリッド構造を考えることで、より高度な窯炉設計が可能になろう。

### 4.5 機能付与型耐火物

これまでは窯炉を中心に述べてきたが、別の視点として耐火物に耐熱材料、ライニング材料以上の機能を付与できることが耐火物の付加価値を上げ、コスト削減のみの視点からの脱却が可能になる。例でいえば、完全アルミナ付着フリーのノズルが開発できれば連鑄操業へのインパクトは計り知れない。また、例えば、溶鋼清浄化機能のある耐火物、精錬機能のある耐火物なども可能性がある。

これ以外にも断熱、冷却などの熱的機能、通電などの電氣的機能など耐熱機能以外の機能から耐火物を見直してみるこ

とも大切かもしれない。

## 5 おわりに

以上、かなり私見も入ったが、鉄鋼用耐火物技術の今後の方向性についてこれまでの技術の流れから展望した。これら将来像は必ずしもこの通りであるかどうかはわからないが、読者が今後の鉄鋼用耐火物技術を考える上での参考になれば幸いである。

もちろんここで述べた将来の方向については単独の企業でできるようなことではなく、鉄鋼会社間の協力のような同業者間での協力、あるいは鉄鋼会社、耐火物メーカー、築炉メーカー間の協力のような窯炉を取り巻く業界間の協力、産官学の協調など、幅広い協力・協調体制も必要になる。日本の鉄鋼用耐火物技術の強化のため、各々の自我を越えた強調と、競争とのバランスが求められている。

### 参考文献

- 1) 出典：耐火物協会会報，耐火物協会
- 2) 出典：耐火物原単位調査表，鉄鋼連盟
- 3) J.P.Sutton, M.Kataoka, K.Kawasaki, M.Koga and Y.Tsuji, Proc. of UNITECR' 97, (1997), 593.
- 4) 新日鐵大分：第62回鉄鋼協会生産技術部門耐火物部会資料，耐62-09 (1997)
- 5) 落合常巳，池田順一，糸井英信，西谷輝行：耐火物，33 (1981)，365.
- 6) 例えば 西正明，松村豪夫，古野好克：耐火物，45 (1993)，493.
- 7) 例えば 俵正憲，藤井幸一郎，谷口忠行，萩原真治，木林強，田中基博：耐火物，46 (1994)，533.
- 8) 平櫛敬資，鹿野弘，堀誠，上出希安：耐火物，38 (1986)，601.
- 9) 渡辺明，高橋宏邦，松木俊幸，高橋政成：耐火物，36 (1984)，680.
- 10) 花桐誠司，原田茂美，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 (1992)，490.
- 11) 川鉄水島：第66回日本鉄鋼協会生産技術部門耐火物部会資料，耐66-8 (1999)
- 12) K.M.Goodson, N.Donaghy and R.O.Russell: Iron and Steelmaker, June (1995), 31.
- 13) 川鉄水島：第58回日本鉄鋼協会生産技術部門耐火物部会資料，耐58-19 (1995)
- 14) 例えば 八反田浩勝，加藤晃夫，森本茂：耐火物，51 (1999)，211.

(2002年5月21日受付)