

連携記事

取鍋の不定形化技術の変遷と将来像

Steel Ladle Castable History and Future Vision

品川リファクトリーズ(株)
取締役専務執行役員

金重利彦
Toshihiko Kaneshige

品川リファクトリーズ(株)
執行役員

難波 誠
Makoto Namba

1 はじめに

各種工業炉の内張りに使用される耐火物は、断熱材を別にすると耐火れんがと不定形耐火物に大別される。不定形耐火物は製品段階では粉体であり、現地施工する際に定形れんがのような形状の制約がないため、このように呼ばれている。その施工体にはれんが築炉時のような目地がないため、海外ではモノリシック（一体物）耐火物と呼ばれる場合もある。

国内の不定形耐火物の生産量は、昭和37年度には全耐火物生産量の2.5%にすぎない存在であったが、平成5年にはれんがの生産量を抜き、現在では60%を超えている。このような「耐火物の不定形化」の背景には、不定形材料の進歩もさることながら、れんがの築炉では考えられないほどの目覚ましい施工技術の発展がある。特に1973年のオイルショックを契機とした材料製造コストや施工（築炉）コストの削減が、その発展を加速した。

耐火物の不定形化の中でも、溶鋼取鍋はその規模と技術的重要性から不定形化の象徴的な存在である。このイノベーションを実現した低セメント・キャストブル材料は、当初は

欧米での研究開発が先行したが、日本でも築炉工不足を背景として鉄鋼メーカーと耐火物メーカーの共同開発が強力に進められ、1980年代の半ばから世界的にもこの分野をリードしてきた。

本稿ではこうした取鍋不定形化技術の変遷と将来像を述べる。

2 取鍋の耐火物ライニングと不定形化の利点

取鍋の耐火物ライニングは使用条件に応じて各所さまざまであるが、代表的な例を図1に示す。二次精錬が行われない鑄込み専用鍋ではスラグライン部にろう石・炭化珪素質れんがが、鋼浴部にはろう石質れんがが広く使用されている。れんが施工鍋でもLF等の二次精錬が行われる場合は、スラグライン部にMgO-Cれんがを、鋼浴部には残存膨張性を付与したAl₂O₃-MgO-Cれんがを使用するが多い。取鍋の不定形化は高炉一貫製鉄所における大型取鍋で先行し、二次精錬操業に対応するためスラグライン部のみはMgO-Cれんが（またはマグクロ質れんが）を使用し、鋼浴部を流し込み材、

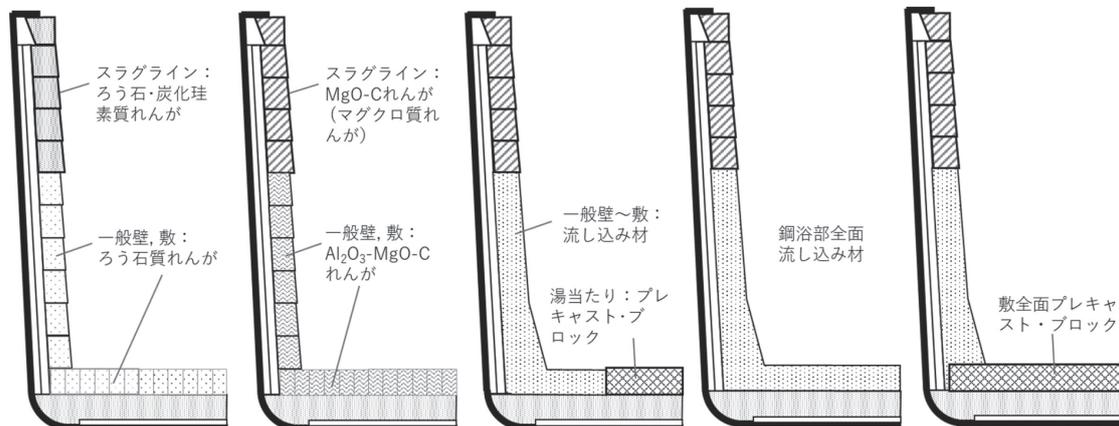


図1 取鍋の耐火物ライニング

敷部を流し込み材とプレキャスト・ブロックで構成するのが一般的である。

不定形耐火物の特徴を表1に、不定形化を促進する要因を表2に示す。鉄鋼用耐火物における不定形化は、当初は加熱炉や高炉種で進められ、1970年代末から溶鋼取鍋の不定形化の取組みが始まった。当時、不定形化を促進した最大の要因は各種製造業の急拡大に伴う人手不足であった。

不定形耐火物の特徴として忘れてはならないのは、省エネルギー、環境改善、施工の機械化・自動化である。この3つのキーワードは、今後の持続的な地球環境の実現に向けてますます重要な意味を持ってくる。さらに時代は環境社会へと急激に変化しており、不定形化をさらに推進する土壌が整ったと言える。

地球環境対策としての不定形耐火物の将来像は後述するとして、まず取鍋の不定形化の経緯を紹介する。

3 溶鋼取鍋の不定形化の経緯

3.1 流し込み施工以前

溶鋼取鍋に使用される耐火物は、戦後の鉄鋼業の発展と製造プロセスの変化に対応して、施工面でも材質面でも大きく変化してきた。その変化は製鉄所毎にかなり異なるが、代表

表1 不定形耐火物の特徴

1. 製造時の省エネルギー
2. 生産コストの低減
3. 在庫負担の減少
4. 環境改善
5. 設計の自由度拡大
6. 目地なし一体構造
7. 容易な補修
8. 施工の機械化、自動化

表2 不定形化を促進する要因

1. 定形耐火物との比較
 - ・高耐用性に基づく相対的増加
 - ・施工を含めた経済性の差
2. 社会環境の変化
 - ・省人化，省力化への対応
 - ・作業環境への対応
 - ・自然環境への対応（廃棄物）
3. 不定形耐火物技術の進展
 - ・材質の変化（原材料の開発）
 - ・特性の変化
4. 周辺技術の発展
 - ・施工機器の開発
 - ・計測技術の開発（保守点検）

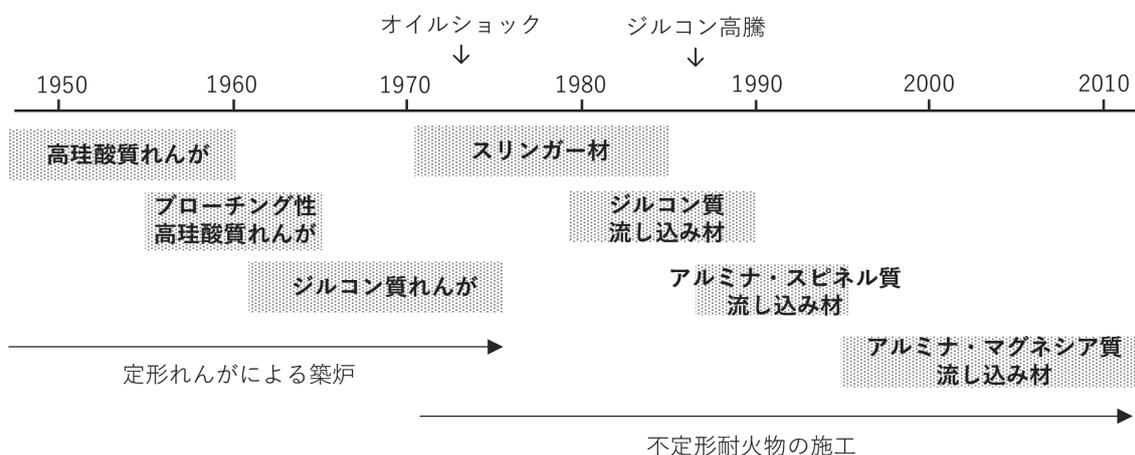


図2 高炉メーカーにおける取鍋鋼浴部耐火物の変遷 (代表例)

れんが、セミジルコン質れんが（ろう石を添加したジルコン質れんが）が広く使用されるようになった。

一方、粗鋼生産量の増大と共に熟練した築炉工の確保が課題となり、不定形化による内張り施工の機械化が志向された。取鍋の不定形化においては、1回の施工に使用される耐火物量が多いにも関わらず、短時間での施工が要求され、かつ定形耐火物と同程度の耐用性が求められた³⁾。取鍋の不定形化技術として最初に導入されたのは欧州で開発されたスリンガー工法であった。これは高速で回転するインペラーの遠心力を利用して練土を投射して充填する方法で、省力化と施工時間の短縮には有効であったものの、二次精錬の導入によって苛酷化した使用条件下では安定した耐用が困難となり、スリンガー施工に代る新しい不定形耐火物の開発が必要となった。

3.2 流し込み材による取鍋不定形化の確立

スリンガー施工に代る施工方法として、ラミング法、振動成形法、流し込み法等の各種の方法が開発・実用化された。この中でキャストブルによる流し込み施工は、他の施工方法

と比較して、①高密度の施工体が得られる、②継ぎ足し補修が可能である、③施工時間が短い、④設備が比較的簡単である、といった特徴があり、1970年代末頃からスリンガー施工に代って取鍋の不定形化工法として定着した。流し込み施工の代表例を図3に示す。

低セメントキャストブルが開発される以前、キャストブルと言えば $Al_2O_3-SiO_2$ 系骨材65~85%にアルミナセメントを15~35%添加して製造されたもので、施工時には8~20%程度の多量の水が添加されるものであった³⁾。したがって、材料特性はアルミナセメント由来の数%のCaO成分によって低融物が生成されるため、耐熱性に劣り、しかも水分添加量が多いため高い充填密度を得ることも難しかった。そのため適用場所も条件の厳しくない低温度用雰囲気を中心に、溶銑や溶鋼に触れる部位には使用できなかった。

これに対し、溶銑や溶鋼に接する部位にも適用可能な低水分施工のキャストブルとして、1970年代末に実用化されたのはクレーボンドキャストブルであった⁷⁾。クレーボンドキャストブルは粘土の凝集性を活かした材料で、まず高炉種材の不定形化に

表3 溶鋼取鍋の耐火物品質の変遷（代表例）

	化学組成(mass%)				嵩比重	見掛気孔率(%)	圧縮強さ(MPa)	残存線変化(%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	MgO				
高珪酸質れんが	62	35	-	-	2.10	23.5	26	-1.26
ブローチング性高珪酸質れんが	79	19	-	-	2.22	13.5	44	+6.50
ジルコン質れんが	36	4	57	-	3.52	17.0	75	データ無
高珪酸質スリンガー材	93	4	-	-	1.68	29.5	20	+8.00
ジルコン質スリンガー材	63	8	24	-	2.17	21.8	52	+2.46
ジルコン質流し込み材	46	-	48	-	2.86	22.1	24	+3.45
アルミナ・スピネル質流し込み材	-	89	-	7.5	2.80	17.8	49	+0.11
アルミナ・マグネシア質流し込み材	0.4	89.5	-	7.5	2.83	24.3	102	+1.78

注：不定形耐火物は焼成後の品質を示す。また残存線変化は、定形れんがは再加熱後の、不定形耐火物は焼成後の耐火物の寸法変化率を示す。

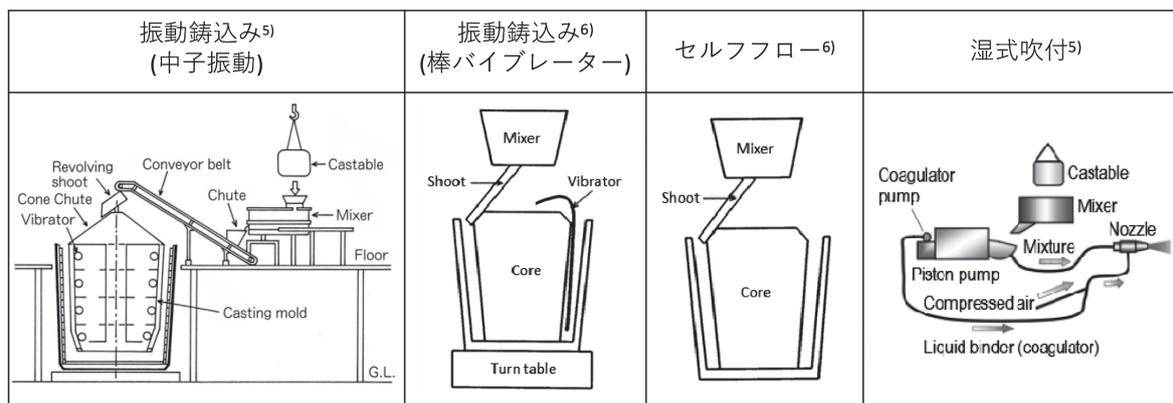


図3 取鍋の不定形耐火物施工方法

適用されたのち、取鍋の側壁の不定形化に実用化された。

一方、アルミナセメントを活用したセメントボンドキャストابلにおいても、セメント添加量を数%と大幅に減らし、ミクロン単位の超微粉を使用すると共に、セメントと超微粉を水中で分散させるための解膠分散剤を使用することで、低水分で施工が可能な低セメントキャストابلが開発された。これによって従来の汎用キャストابلの課題を解消し、溶銑・溶鋼に接する部位に使用可能なセメントボンド材料が可能となった。図4に示すように、同じ低水分施工であっても低セメント材料の方がクレーパーボンド材料よりも乾燥後の強度が高く、安定した耐用が得られるため、80年代初頭には溶鋼取鍋の不定形化技術として確立した⁸⁾。

この時期のキャストابل材料はジルコン質（またはセミジルコン質）であった。ジルコン質キャストابلは使用後の稼働面（焼結層）の背面が脆化しているためドレッサーで削れやすく、継ぎ足し補修による延命が容易であった。1979年にはジルコン質クレーパーボンド・キャストابلによる“エンドレス施工”によって、1,313 heatsという高寿命も報告された⁹⁾。また、ジルコン質の流し込み施工鍋では同材質のれんが施工鍋と比較して耐火物コストが約18%低減したという報告もある¹⁰⁾。

こうして1982年頃には「不定形耐火物は成熟期を迎えた」と考えられ³⁾、「不定形耐火物の需要は今後増加するか」という討論会も開催された¹¹⁾。

3.3 低セメントキャストابل材料の高アルミナ化

ジルコン原料の活用と低セメントキャストابلの開発により、1980年代初期には溶鋼取鍋の不定形化技術は確立された。しかしその後、取鍋用キャストابلはジルコン原料の枯渇に伴う価格の高騰を契機とした脱ジルコン化と、高清浄鋼溶製のためのシリカレス化の視点から材料が高アルミナ質（アルミナ・スピネル質、アルミナ・マグネシア質）へ変化していく¹²⁾。

表4には様々な組成のキャストابلを溶鋼取鍋でテストした結果を示す⁵⁾。マグネシア主体の塩基性材料は耐食性に優れたものの、耐スラグ浸潤性が劣るために剥離損傷が生じやすい。Al₂O₃-SiO₂系の高アルミナ質材料は塩基性材料よりも耐スラグ浸潤性が良好であるが、二次精錬時のスラグに対して耐食性の点で限界がある。総合的に、アルミナ原料にスピネル(MgO・Al₂O₃)原料を組み合わせたアルミナ・スピネル質材料の優位性が見出され、この材料系での研究開発が進んだ。

溶鋼取鍋の一般壁でアルミナ・スピネル質キャストابلが優れた耐用性を示す要因のひとつに、そのスラグ浸潤抑制メカニズムがある^{13,14)}。CaO-FeO-SiO₂系のスラグがキャストابلのマトリックスに浸透していく際、浸透成分中のCaOはAl₂O₃と反応してCA₆などのCaO-Al₂O₃系鉱物を生成する。またFeO成分はスピネル中に固溶していく。その結果、浸透成分はSiO₂に富む粘稠な性状となり、スラグ浸透が抑制される。

1990年代になるとアルミナ・マグネシア質の検討が進ん

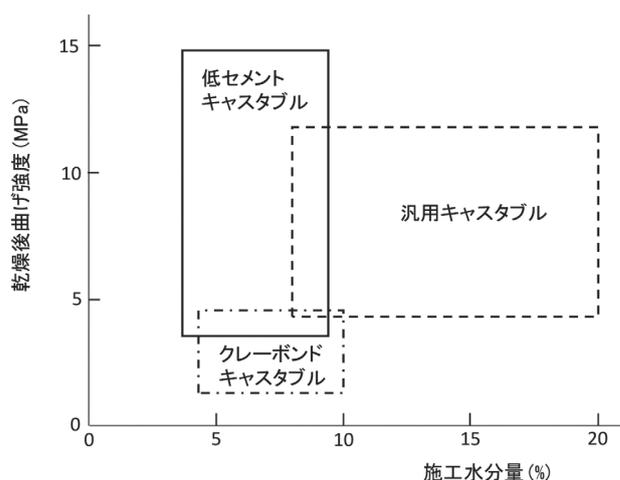


図4 キャスタブル耐火物の施工水分量と乾燥後強度

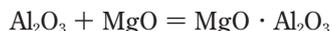
表4 各種キャストابل材料と取鍋鋼浴部での使用結果

材質	マグネシア質	高アルミナ質 Al ₂ O ₃ =60-70%	高アルミナ質 Al ₂ O ₃ > 80%	ジルコン質	アルミナ・スピネル質	アルミナ・マグネシア質
スラグへの性質*						
・耐食性	◎	△	○	△	◎	◎
・耐浸潤性	×	○	△	◎	△-○	◎
・耐ビルドアップ性	×	○	△	◎	△	△
取鍋鋼浴部寿命*	○	△	○	△ (◎)**	◎	◎
熱伝導率(W/m・K)	4.4	1.7	1.7	1.2	2.9	3.0
比熱(J/kg・K)	1210	1090	1090	670	1130	1150
施工重量(kg/m ³)	2800	2750	2850	3050	3100	3150
熱損失防止*	×	○	△	◎	△	△

*相対評価：良好◎>○>△>×, **エンドレス施工時

だ。図5に示すように、ジルコン質、アルミナ・スピネル質、アルミナ・マグネシア質と材質の変更によって取鍋寿命が向上した⁵⁾。

アルミナ・マグネシア質はアルミナ原料とマグネシア微粉とを組み合わせた材質であり、加熱時にこの両者が反応して、以下の式に従い二次スピネルを生成する。



この反応は体積膨張を伴うため、アルミナ・マグネシア質キャストابلはスピネル生成反応が生じる1200℃～1400℃において急激な膨張を示し、冷却後も残存する。また、この膨張は気孔率の増大を伴い、多孔質な組織となる。しかし、荷重下では膨張が抑制されるような柔らかな残存膨張性であるため、周囲が拘束された状態となる実炉においては膨張が構造的に制限され、試験室での評価時のような解放状態で加熱した場合と比較して緻密化する^{15,16)}。

3.4 敷部の不定形化

取鍋の敷部は、壁部と比較して大きな溶鋼圧力を受けて耐火物にスラグ浸潤が進みやすい。え、転炉や電気炉から受鋼する湯当たり部では大きな熱衝撃を受けるため剥離損傷が進みやすい。そのため、側壁に比べて耐火物ライニングが厚く、不定形化においては乾燥時の爆裂対策が重要である。また、施工時にはキャストابلを水平に展開させるため、棒パイプレーターを用いた重筋作業が必要となる。さらに、周囲が固定されているため、耐火物の熱膨張による迫り上がりも懸念される。

こうした事情から、敷部の現地施工化が進められたのは壁部より遅く、アルミナ・スピネル質キャストابلが広まった1990年頃からである¹⁷⁻¹⁹⁾。それ以前は、湯当たり部に大型プレキャストブロックを適用し、周囲をジルコン質や高アルミナ質の耐火れんがで施工するライニングが一般的であった。その後、プレキャストブロックと現地流し込み施工の組み合わせ

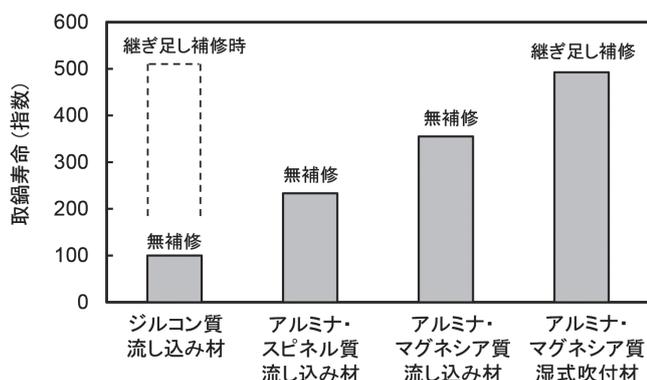


図5 不定形耐火物の改良による取鍋寿命の延長

方として、①複数の大型プレキャストブロックを敷き詰める方法^{20,21)}、②湯当たり部のみ肉厚のプレキャストブロックで補強し、周囲を現地流し込み施工する方法、③湯当たり部と一般敷部を同時に現地流し込み施工する方法、が採用され、現在に至っている(図1)。また、敷部の流し込み施工において棒パイプレーターによる重筋作業を解消させるため、振動なしに自重で水平に流動するセルフフローキャストابلの導入も行われた⁶⁾(図3)。

材料的には、事前に管理された条件下で緻密な施工体を得ることができるプレキャストブロックが耐用性に優れているが、周囲との境界が先行して損傷する場合がある。セルフフロー材料は施工面で簡便であるが、通常のキャストابل材料よりも施工水分量がやや多いため、緻密な施工体を得るには不利である。そのため、溶鋼取鍋の使用条件と運用条件に応じたライニング構成を選択することが重要である。

3.5 湿式吹付施工

流し込み工法に対し、施工棒を使用しない湿式吹付施工(ショットクリート工法)も行われている^{5,22)}。ショットクリート工法は、流し込み施工と同じように大型ミキサーで水を加えて混練した材料をピストンポンプを介して圧送し、圧搾空気とともに送られた凝集剤を配管先端に取り付けたノズルにて混合・吹付する工法である(図3)。この工法は1978年に国内で開発されていたが、当時の設備ではハンドリングに難点があり、1999年に海外の動向を受けて国内でも注目された。

吹付施工には乾式と湿式がある。電気炉の補修等、一般的に行われている吹付施工は、材料が粉体のまま空気輸送され、ノズル先端で水と凝集剤と混合されて吹付施工されるもので、乾式吹付けと呼ばれる。乾式は大型ミキサーを必要としないが、緻密な施工体を得るのは困難であり、耐用性に劣る。これに対し、ショットクリート工法とは、いわば流し込み材料(キャストابل)を吹付け施工する方法であり、大型ミキサーやポンプ等の施工機器を必要とした大掛かりな設備となるが、流し込み材と同等の緻密な施工体と耐用性を得ることができる。また、部分補修や継ぎ足し補修だけでなく、流し込みに代わりイニシャル施工用としても適用されている。さらに、センシング技術、ロボティクス技術と組み合わせることで、施工面のプロフィールに応じた自動吹付け施工も可能である¹²⁾(図6)。

3.6 キャスタブルの低水分化技術

低セメントキャストابلの開発においては、アルミナセメント添加量の低減による低CaO化に加え、超微粉と分散剤の活用による低水分施工化が鍵であった。低水分化は、施工体の気孔率を低減することで耐食性を向上させることに加え、

中間温度域での材料強度を高めることで稼働面（焼結層）との強度ギャップを低減し、剥離損傷を抑制する効果がある。

条件をそろえるため、品川技報に掲載された精錬炉用キャストブルの施工水分量の推移を図7に示す。原料の形状、粒度構成、超微粉と分散剤の最適化など、あらゆる手法が追及された結果、添加水分3.5～4.5%での現地施工品が開発されている¹²⁾。

ただし、セメント添加量の低減や施工水分量の低減といったキャストブル品質の改良手法は、施工時の硬化時間が温度の影響を受けやすい、低通気性のため急加熱乾燥では爆裂する場合がある、といった欠点もある。そのため、それを使いこなすためには耐火物メーカーとユーザーが連携した厳格な施工管理が必要となる。海外でも溶鋼取鍋の不定形化は盛んに取り組まれているが、定着した事例が少ない一因はこの点にあると思われる。

現地施工に対し、プレキャストブロックは流し込み材を専門工場にて製造するため、厳密な施工管理が可能である。特に振動テーブル等により十分な振動を掛けて製造されるため、低水分での施工に有利である。実際、取鍋湯当り部において、低水分施工したプレキャストブロックでは現地流し込み施工に比較して耐用向上効果が得られている¹²⁾。

3.7 その他の技術動向

取鍋用キャストブルのバインダーシステムとしては低セメント系が主流であるが、バインダーにコロイダルシリカを適用したケミカルボンド品も使用される¹²⁾。

不定形化を行った溶鋼取鍋においてもスラグライン部のみはMgO-Cれんが等の耐火れんがで築造する場合が多い。しかし、スラグライン部用の高耐食性流し込み材としてマグネシア・ジルコン質またはマグネシア・ジルコニア質²³⁾、MgO-CaO-Al₂O₃質²⁴⁾など新規材料を開発し、取鍋内張の全

不定形化を達成した事例も報告されている。

施工後の乾燥ではガスバーナー加熱が一般的であるが、1979年から熱風マイクロ波乾燥も実用化されている^{25,26)}。ガスバーナー乾燥法に比べて熱風マイクロ波乾燥法では、不定形耐火物表面と背面との温度勾配がつきにくく均一に乾燥されるため、内部蒸気圧の上昇による爆裂や剥離を防止するのに有効である。また、熱風マイクロ波乾燥では乾燥時間を大幅に短縮することで消費エネルギーやCO₂排出量の削減が可能である。

4 取鍋不定形化の将来像

4.1 熱損失低減

取鍋内の溶鋼温度の低下つまり熱損失には、①溶鋼表面からの熱放散による熱損失、②耐火物を通して鉄皮より放散する熱損失、③耐火物内に蓄熱されることで消費される熱損失、がある²⁷⁾。それぞれの対策を表5にまとめた。

①の熱損失は取鍋に断熱材を内張した蓋をかけることで大きく抑制される²⁷⁾。蓋の内張り断熱材が溶鋼の飛散で損傷する場合でも、高強度軽量キャストブルを内張することで数年以上の高寿命を得ることができる²⁸⁾。

②の熱損失抑制は鉄皮の内側に断熱材を適用することで抑制できる。断熱ボードを用いた断熱ライニングはオイルショック後に各種窯炉で試され、溶鋼取鍋でも効果が認められた²⁹⁾。しかし、内張り耐火物の温度が上昇して損耗速度が増加する傾向があること、厚みのある断熱ボードでは漏鋼リスクがあることから等から定着してはいなかった。近年、極めて熱伝導率が低いマイクロポア断熱材が開発され、薄い厚みでも高い断熱効果が得られることから導入が進んでいる^{30,31)}。

③の熱損失では取鍋ライニング内での非定常な温度分布を考慮する必要がある。取鍋は鑄込み終了後は空鍋となり、耐



図6 取鍋の自動湿式吹付施工 (Online version in color.)

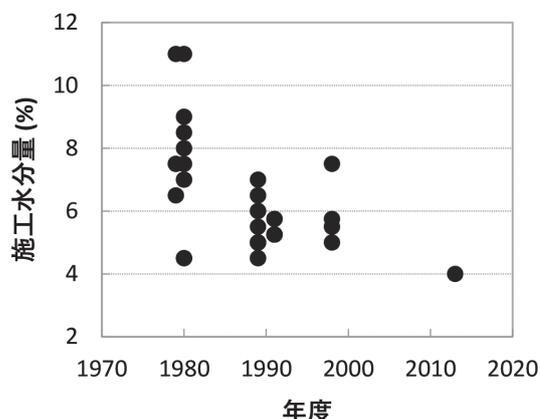


図7 精錬炉用キャストブルの施工水分量の推移

火物に蓄熱されていた熱が稼働面を通して雰囲気中に放散する。この蓄熱損失分は次の受鋼時に溶鋼から熱供給され、受鋼後1.5時間程度でほぼ定常状態に達する。これが耐火物蓄熱による溶鋼からの熱損失であり、耐火物の熱容量だけでなく、空鍋時にどれだけ熱が放散するか、すなわち耐火物の熱伝導率と取鍋の運用方法が影響する^{27,32)}。

伝熱解析によれば、上記3つの熱損失のうち③の耐火物蓄熱が最も大きな割合を占め、新鍋の場合で47%、残厚が薄い場合でも40%の熱損失を占める。そのため間欠使用される取鍋において、熱損失抑制の点では低熱伝導率、低熱容量の耐火物が適している。

しかし、取鍋耐火物の歴史的な変遷は溶鋼からの熱損失を大きくする方向に変化してきた³²⁾。二次精錬の導入以前に取鍋で広く使用されたろう石質れんがは熱伝導率、熱容量とも低く、熱損失抑制に有利であった。ジルコン質はかさ比重が大きい、比熱が小さい特徴があり、熱容量としてはろう石について小さい。アルミナ質はジルコン質よりも熱容量が大きく、高アルミナ質(アルミナ・スピネル質、アルミナ・マグネシア質)のキャストブルもアルミナ質れんがに近い。対策として熱容量や熱伝導率を低減した内張り用キャストブルも開発されているが、耐用面を含めた一層の改良が必要である。

また、スラグライン部のMgO-Cれんがや鋼浴部に使用されるAl₂O₃-MgO-Cれんがは、酸化物系耐火物に比べて熱伝導率が大きいだけでなく熱容量も大きい。電気炉の取鍋ではAl₂O₃-MgO-Cれんがが使用されている場合が多く、不定形化は熱損失抑制に有効である。設備面や運用面で不定形化が難しい場合は、アルミナ・マグネシア質キャストブル材料を定形れんが化した製品を用いて同様の効果を得ることができる²¹⁾。

4.2 耐火物のLCAとリサイクル

オイルショック後の省エネ対策と現在のサステナビリティ対策との大きな違いは、エネルギー消費量やCO₂排出量がLCA(ライフサイクル・アセスメント)の視点で評価される点である。

流し込み材がジルコン質から高アルミナ質(アルミナ・スピネル質、アルミナ・マグネシア質)に変わって取鍋寿命が向上した要因として、スピネル骨材またはスピネル生成反応

を利用した浸潤抑制機構に加えて、アルミナ骨材に電融原料が適用された影響が大きい。表6に示すように、電融原料の製造時に排出されるCO₂排出量は耐火物製造時のそれよりも一桁大きい^{33,34)}。

オイルショック後、焼成工程がない不定形耐火物は焼成耐火れんがと比較して省エネ的であるといわれたが、電融原料を主原料とする場合、原料の製造段階まで遡って評価すると一概にそうとはいえない。これはMgO-Cれんが等の不焼成れんがの場合も同様で、不定形耐火物や不焼成れんがは製品段階で耐火物の結合組織が発達していないため、その耐食性は骨材自体の耐食性に依存する傾向がある。

ただし、不定形耐火物は継ぎ足し補修が可能であり、耐火れんがと比較して廃棄する耐火物量を抑制できる。流し込み材がジルコン質から高アルミナ質に変わって、ジルコン質の特徴であった稼働面背部の脆化層生成が無くなり、また操業条件によってはスラグのビルドアップが増加したため、継ぎ足し補修を繰り返す「エンドレス使用」は下火になったが、地球環境対策の視点から改めて取り組む価値がある。

また、使用後耐火物をリサイクルして活用できれば、LCAとしての省エネに極めて有効である。使用後耐火物を再利用する上で重要なのはスラグ浸潤層を取り除く点であるが、従来、使用後れんがで行われてきたケレン作業(手作業でスラグ浸潤層を取り除く作業)は不定形耐火物には適さなかった。しかし現在では、色彩選別機によって浸潤層を効果的に取り除くことができるため、使用後キャストブル材料のリサイクル活用が広がっている³⁵⁾。

表6 耐火物製造時のCO₂排出量

製造プロセス	製品	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ ・t ⁻¹)
耐火物製造時 ³³⁾	焼成耐火れんが	450
	不焼成耐火れんが	230
	不定形耐火物	12
原料製造時 ³⁴⁾	鱗状黒鉛	360
	ばん土頁岩(焼)	513
	ボーキサイト(焼)	441
	焼結アルミナ	1,148
	電融アルミナ	3,198
	炭化珪素	9,491

表5 取鍋内の溶鋼の熱損失経路とその対策

溶鋼の熱損失の経路	対策
① 溶鋼表面からの熱放散による熱損失	・断熱蓋の適用
② 耐火物を通して鉄皮より放散する熱損失	・耐火物背面への断熱材の適用
③ 耐火物内に蓄熱されることで消費される熱損失	・熱容量(かさ比重×比熱)が小さな耐火物の使用 ・熱伝導率の低い内張り耐火物の使用

4.3 自動化

使用後耐火物をリサイクル使用することを前提とすると、その製造、使用、再生原料化という一連のプロセスは地産地消型が適している。また労働人口が減少していく中でこの一連のプロセスを効果的に運用するには、各工程で自動化を進める必要がある。さらに、貴重な耐火性資源を用いる耐火物消費量を最小限に抑えるためには、目地損傷やれんがの脱落といった短命トラブルを防止することに加え、損傷プロフィールに応じた継ぎ足し補修を行うことが有効である。

こうした時代の要請を考えると、耐火物の将来像として有望なのは定形れんがよりも不定形耐火物である。また、不定形耐火物の自動吹付工法では、3D造形やセンシング技術を応用した自動診断補修の仕組みが導入されているとも言える。

5 まとめ

日本が主導した耐火物イノベーションのひとつである溶鋼取鍋の不定形化について、戦後の経緯の概要と将来像を述べた。

今後、耐火物を取り巻く環境問題と資源リサイクルは避けて通れない地球規模的な問題であり、真摯に取り組まなければならない課題である。また、廃棄物を出さないことも重要であり、使用方法等を含めた総合的な検討が必要である。

これらの課題は不定形耐火物が得意とする範疇であり、不定形耐火物だからこそ実現可能なことも少なくなく、柔軟な発想による広い視野に立った研究開発が益々重要となろう。

参考文献

- 1) 杉田清：製鉄・製鋼用耐火物—高温への挑戦の記録，日本鉄鋼協会監修，地人書館，(1995)，272.
- 2) 西尾英昭：耐火物，56 (2004) 1, 2.
- 3) 戸田増實：品川技報，32 (1989)，19.
- 4) 耐火物手帳改訂12版，耐火物技術協会編，(2015)，192.
- 5) 中村良介，金重利彦，松村浩二，佐々木久晴：品川技報，42 (1999)，7.
- 6) 井手浩二，片岡稔，古田和浩，川瀬義明，磯村福義，中野謙二，美濃茂，先納義高：耐火物，48 (1996) 7, 380.
- 7) 藤本章一郎，内田良彦，多喜田一郎：耐火物，30 (1978) 5, 299.
- 8) 成瀬庸一：耐火物，40 (1988) 1, 2.
- 9) 山口力，永楽益夫，八百井英雄：耐火物，31 (1979) 10, 540.
- 10) 松生昭，宮川三郎，小笠原一紀，南部正夫，桑山道弘：耐火物，39 (1987) 6, 337.
- 11) 討論会「不定形耐火物の需要は今後増加するか—その論拠と問題点」，耐火物，34 (1982) 12, 681.
- 12) 西村雅史，浅川幸治：品川技報，63 (2020)，17.
- 13) 森淳一郎，坂口雅幸，吉村松一，小口征男，川上辰男：耐火物，41 (1989) 7, 348.
- 14) 浅野貞，寄田栄一，山村隆，浜崎佳久，金重利彦，難波誠：耐火物，43 (1991) 4, 193.
- 15) 難波誠，金重利彦，浜崎佳久，西尾英昭，海老沢功夫：耐火物，48 (1996) 3, 129.
- 16) 中坊一也，西田茂史：品川技報，60 (2017)，110.
- 17) 落合勇司，松尾勝良，大島隆三，大手彰：耐火物，46 (1994) 11, 558.
- 18) 加藤久樹，高橋達人，近藤恒雄，小倉康嗣：耐火物，48 (1996) 3, 142.
- 19) 古田和浩，井手浩二，川瀬義明，山口一成，溝部有人：耐火物，48 (1996) 8, 404.
- 20) 八反田浩勝，加藤晁夫，森本茂：耐火物，51 (1999) 4, 211.
- 21) 石原英治，西村雅史：品川技報，65 (2022)，24.
- 22) 榎本亮治，稲葉英明，井坂剛，大坪祐二，古賀正徳，山口一成：耐火物，51 (1999) 3, 137.
- 23) 八百井英雄，中川仁，松本修美，磯部利弘，多喜田一郎，末川幸弘：CAMP-ISIJ，5 (1992)，248.
- 24) 中川仁，中村幸弘，田村信一，中村壽志，天野正彦，筒井直樹：耐火物，51 (1999) 6, 326.
- 25) 落合常巳，池田順一，糸井英信，西谷輝行：耐火物，33 (1981) 7, 365.
- 26) 平初雄，斉藤吉俊，内之倉克巳，澤野清志，笠原始，天野雅彦，祐成史郎，片岡厚一郎：耐火物，55 (2003) 1, 19.
- 27) 西正明，木谷福一，高橋達人，寺田修，森下紀秋：耐火物，33 (1981) 5, 240.
- 28) 浅川幸治，鈴木悠人，飯田正和，末武伸介：品川技報，65 (2022)，43.
- 29) 杉田宏，前仏忠，浅見肇：耐火物，33 (1981) 12, 685.
- 30) 古川邦男，佐藤久，宮原正純，石本勝浩：耐火物，49 (1997) 10, 574.
- 31) 井上明彦，細原聖司，清田禎公：JFE技報，38 (2016)，69.
- 32) 小形昌徳：金属，81 (2011) 9, 745.
- 33) 畠田文比古：Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, 10 (2003)，377.
- 34) 田村信一，成田暢彦：耐火物，59 (2007) 8, 397.
- 35) 花桐誠司，松井泰次郎，新保章弘，麻生誠二，犬塚孝之，松田強志，榊澄生，中川仁：新日鉄技報，388 (2008)，93.

(2022年11月4日受付)