

鉄鋼製造設備からの熱放散の低減に寄与する最近の耐火物開発

飯田正和, 浅川幸治, 白石安生*, 川崎 修*

品川リフラクトリーズ(株) 技術研究所 〒705-8577 岡山県備前市伊部 707

Recent Development of Refractories for Reducing Heat Emission from Steel Making Vessels

Masakazu IIDA, Koji ASAKAWA, Yasuo SHIRAIISHI and Osamu KAWASAKI

Research Center, Shinagawa Refractories Co., Ltd., 707, Imbe, Bizen, Okayama 705-8577, Japan

キーワード: SDGs, 熱伝導率, 断熱, 熱放散, 耐火物

1 緒言

SDGsは国連が目指す多岐にわたる17の目標であり、産業界の技術開発によりブレイクスルーするものも含まれる。その中で耐火物関連産業の技術が直接貢献できるゴールはNo.7, 12, 13であろう。No.7「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」は、生産を含む企業全体の活動で使用するエネルギーをクリーンエネルギーに変換しつつ、エネルギー消費量そのものを減らす技術開発、No.12「つくる責任、つかう責任」は、環境や人体への影響の小さい製品を供給し使用後は適正に廃棄、さらにリサイクルを推進し、産業廃棄物による環境負荷を最小限に抑えることで鉱物資源の保全を図る技術開発といえよう。また、No.13「気候変動に具体的な対策を」はCO₂排出低減の技術開発がメインであろう。CO₂排出削減に取り組むためにはあらゆる活動のカーボンフットプリントを正確に評価することが望ましく、世界的な枠組み作りが進められている。一方、その枠組みが整備されてから行動するのは問題の先送りである。そこで、多くの企業は個々の取り組みで可能な技術開発に着手している。

耐火物製造や耐火物製品が使用される高温産業で消費されるエネルギーが全てクリーンエネルギーでまかなえるようになるにはかなり時間がかかると思われ、現時点では使用するエネルギーを可能な限り低減することが重要となる。その手段のひとつは耐火物が製造、施工されて使用開始されるまでに消費するエネルギーの低減で、焼成温度の低下、不焼成れんがや不定形耐火物の適用拡大があげられる。

一方、熱伝導率の低い耐火物を使用して高温設備の炉体からの熱放散を低下、ユーザーが消費するエネルギーを低減することでもCO₂排出削減に貢献できる。これらはSDGsの中に位置付けられる以前から温暖化対策や省エネとして継続して取り組んできた活動である。本報では品川リフラクトリーズおよびイソライト工業の取り組みの中から、高温設備からの熱放散の低減に貢献する技術開発と今後の課題について、多量のエネルギーを消費する鉄鋼製造

工程における高温プロセスで用いられる設備を例にして述べる。

2 溶鉄や溶融スラグに接触する設備からの熱放散低減

2・1 ワークライニングの低熱伝導率化と背面断熱

溶融金属や溶融塩に接触する容器からの熱放散を低減する目的は搬送時における溶融物温度の低下を抑制することで初期に投入するエネルギーを低減することである。鉄鋼用の設備に代表されるように、溶融物に接触する耐火物は溶損やスポーリング等で激しく侵食される。そのため溶融物に接触するワークライニングには侵食に対する抵抗性が高い耐火物を用い、溶融物と接触しない背面側に熱伝導率の低い断熱材を配して炉体からの熱放散の低減を図ることが一般的である。

これに対して、溶融物温度の低下抑制の観点からはワークライニングの低熱伝導率化も効果がある¹⁻³⁾。図1に溶

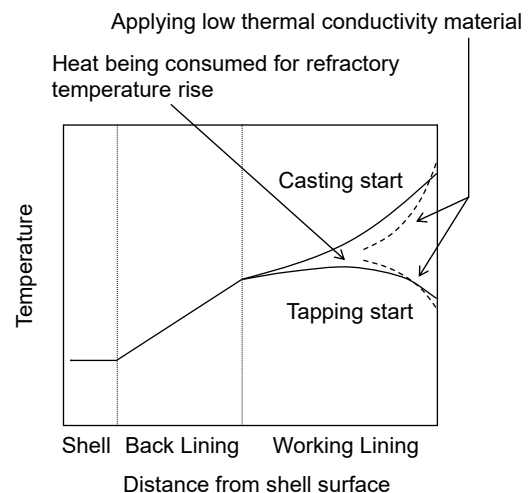


Fig. 1 Conceptual image of the heat being consumed for temperature rise of lining refractory of steel ladle.

* イソライト工業(株)
〒441-0201 愛知県豊川市萩町向山7

鋼鍋ライニングの casting 直前と受鋼直前の温度分布を模式的に示す。受鋼すると溶鋼の熱はワークライニングの温度上昇に消費され、 casting により空鍋になるとライニングに蓄積された熱は炉内側に放出される。このとき、ワークライニングの熱伝導率が低い場合溶鋼保持中の温度上昇が遅いためライニングに蓄積される熱は少なく、溶鋼の温度低下を軽減できる。加えて放熱時は熱伝導率が低い方がライニングの温度は下がりにくく、これも受鋼後の溶鋼温度の低下抑制に寄与する。一方、背面鉄皮表面からは熱伝達と放射で継続的に熱が放出され、これを低減するには背面側の断熱がより有効である。

このことから、溶融物温度の低下抑制にはワークライニングの低熱伝導率化と背面断熱を適切に組み合わせることが重要である。

2・2 ワークライニングの低熱伝導率化

耐火物の熱伝導率は多孔化して、すなわち密度を低下させて低減するのが一般的で、程度の差はあるが損耗速度の増大を伴い、特にスラグラインで顕著となる。それに対して品川リファクトリーズは、微構造の適正化で密度や耐食性を維持しながら熱伝導率を20～30%低下させた黒鉛含有れんがを開発している¹⁾。この技術は各種黒鉛含有不焼成れんがに応用可能で、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ れんがが使用されている混鉄車、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ れんがや MgO-C れんがが使用されている溶鋼鍋に適用可能である。実際に、ライニングとして MgO-C れんがが使用されている電気炉メーカーのLF鍋¹⁾やメタルラインに $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 流し込み材を使用している溶鋼鍋スラグラインの MgO-C れんがに適用し、効果が認められている²⁾。

このようなワークライニング材の熱伝導率を低下させる技術の効果を、溶鋼鍋を例にした伝熱計算で見積もった³⁾。計算モデルは、図2に示す軸対称モデルとした。スラグラインに MgO-C れんがを、メタルラインに $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ れんがを使用した溶鋼鍋を想定し、開発品の熱伝導率は実測と外挿から従来品より約22～26%低い値を、温度依存性を考慮して設定した。開発品の熱容量は従来品と同じ値を用い、密度は製品に合わせメタルライン材では同等、スラグライン材では0.3%大きくなるとした。

計算は、4時間で炉内表面雰囲気温度が1000℃になる予熱条件とし、その後1600℃の溶鋼を受鋼し1.5時間保持、30分かけて湯面レベルを下げながら casting 時、1.5時間空鍋となる状態を繰り返した。なお、溶鋼保持中LF等の加熱による溶鋼温度上昇は考慮せず、 casting 時以外は蓋をしている条件とした。計算の結果、温度変化は5chで周期的定常状態となった。

図3にそれぞれの材質を使用した場合の受鋼および casting

直前のライニング内温度分布の計算結果を示す。熱伝導率を低下させた開発品を使用することでライニングへの蓄熱量を低減できることが示されている。 casting 直前の温度分布に着目すると、熱伝導率の低い開発品を使用することで温

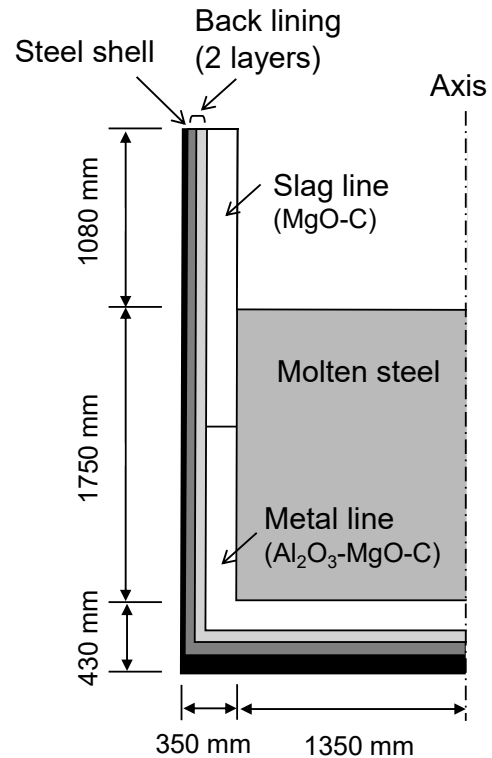


Fig. 2 Thermal calculation model of steel ladle.

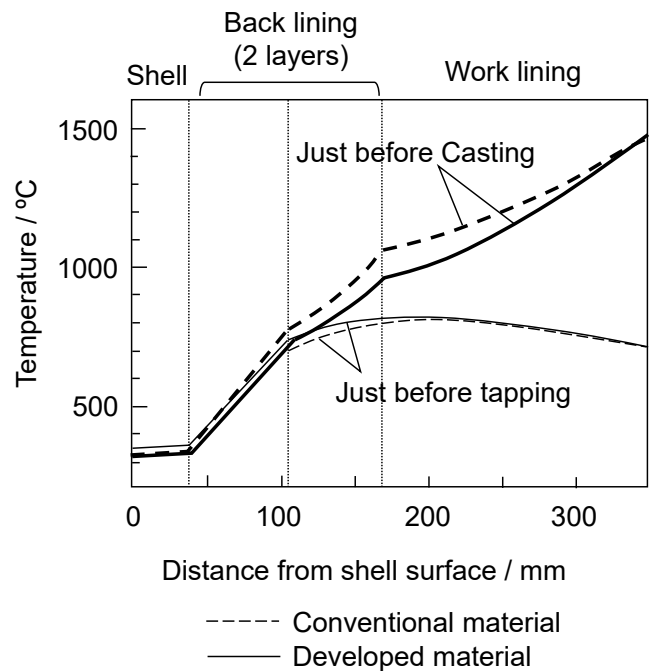


Fig. 3 Difference in calculated temperature distribution in steel ladle lining between conventional material lining and developed material lining.

度勾配が大きく、ライニング内温度が低くなっている。これより溶融物の耐火物への浸透厚みが低減し、耐用性の面でもよい影響を与えると考えられる。

同様な計算をワークライニングの熱伝導率を変化させて行い、溶鋼温度への影響を見積もった。図4に熱伝導率(指数表示)が casting 直前の溶鋼温度に与える影響を示す。熱伝導率10%の低減につき、約1℃の溶鋼温度の低下抑制効果があると算出された。

このように、溶鋼温度低下には溶鋼保持時の鉄皮表面からの放熱と空炉時の稼働面側からの放熱の両方が影響して

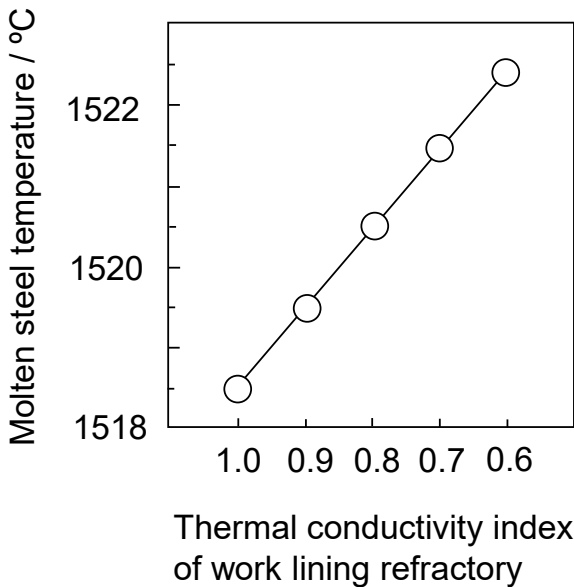


Fig. 4 Calculation results of influence of thermal conductivity of work lining on molten steel temperature just before casting start.

おり、損耗速度を考慮した上でワークライニングの熱伝導率と背面断熱を最適化することが重要である。

2・3 背面断熱

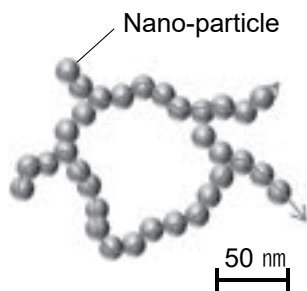
背面側の断熱は鉄皮や炉体を高温から保護する目的でパーマライニングと鉄皮の間に断熱材を配置することで行われる場合が多い。伝統的な断熱材としては粘土質の断熱れんがに加え、パーライトやバーミキュライトといった軽量粒子を利用した不定形耐火物があげられる。さらに、近年の断熱への関心の高まりを受け背面側の断熱材にも新しい技術が開発されている。

背面側に断熱れんがを配置する場合、ワークとパーマからなる耐火物ライニング厚を維持すると炉内容積が小さくなり、炉内容積を維持するとライニングの厚みが薄くなる。断熱層が薄い層厚で十分な効果を示せばこれらの変化を小さくすることができることから、非常に熱伝導率の低い断熱材が開発されている。その断熱機能をパーマライニングの更新時期まで維持させるためには、耐火物から受ける繰り返し荷重で容易に塑性変形するものは好ましくない。

イソライト工業はマイクロポラス素材をベースに組織と製造プロセスを適正化することで、新しいボード状の超低熱伝導率断熱ボード (Ultra-low thermal conductivity board (以下, ULλと示す)) を開発している⁴⁵⁾。図5にULλに適用されている超低熱伝導率化技術を概念的に示す。ULλは、ナノ粒子構造の制御による熱伝導と対流熱伝達の低減に加え、熱ふく射の低減も組み合わせている。

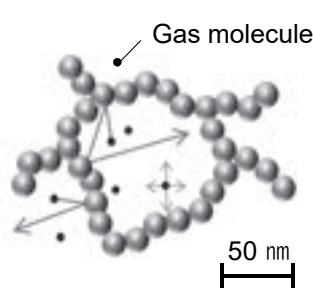
図6に各種断熱材の熱伝導率に与える温度の影響を示す。ULλは温度グレードが1400℃の高温用(以下, ULλ-

1. Conduction



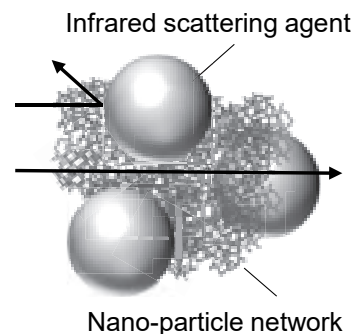
Reducing thermal conduction through Nano-particle network by minimizing contacting area.

2. Convection



Reducing convection heat transfer by controlling void size to be smaller than mean free path of gas molecules under normal pressure.

3. Radiation



Reducing heat radiation, which is dominant heat transmission factor at high temperature, by suppressing infrared radiation by combing the infrared scattering agent.

Fig. 5 Technologies applied for micro-porous-based ultra-low thermal conductivity board (ULλ).

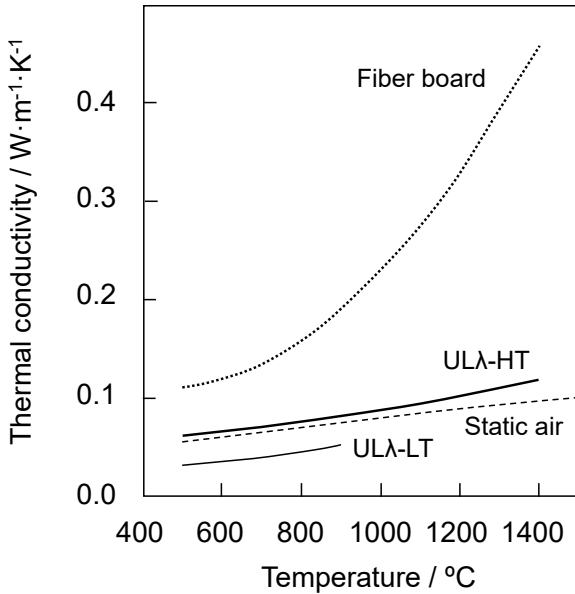


Fig. 6 Influence of temperature on thermal conductivity of insulating materials.

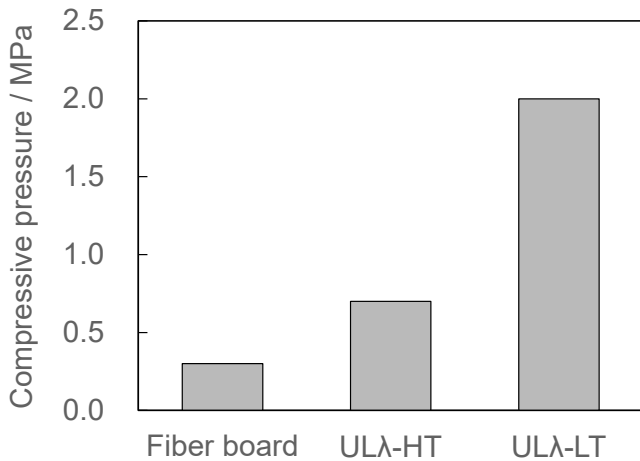


Fig. 7 Pressure generated by insulation materials to which 10 % compressive deformation were imposed.

HTと示す)と900 °Cの低温用(以下, ULA-LTと示す)がある。ファイバーボードに比較して特に高温で低熱伝導率を示し, ULA-HTの熱伝導率は静止空気相当, ULA-LTは静止空気より低い熱伝導率を示す。図7に各種断熱材を圧縮して10 %変位させたときの応力を示す。開発したULに観測された高い圧縮応力は変形しても弾性を維持していることを示し, 塑性変形しにくいことがわかる。

図8, 9にULを10秒間飽水させて再乾燥した後の外観, 曲げ強度をそれぞれ示す。ULは耐水性に優れており, 多量の水を使い多湿環境にさらされる不定形ライニングでも使用が可能である。上述のように, 開発したULは混鉄車や溶鋼鍋といった厳しい使用環境下でも断熱性能を長期間維持できると考えられる。

I.D.	External image	Linear shrinkage / %
ULA-HT		0.1
ULA-LT		1.0
Reference*		7.4

* General micro-porous product

Fig. 8 External images of post-water absorbed ULs and general micro-porous product.

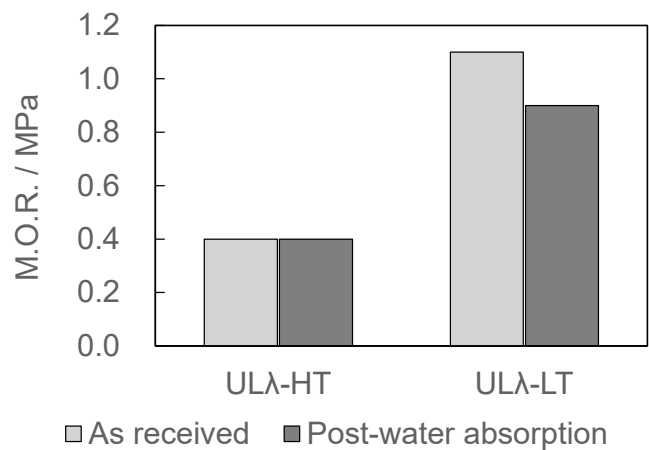


Fig. 9 Influence of water absorption on M.O.R. of ULs.

3 溶融物に接触しない設備からの熱放散低減

3・1 新しい低熱伝導率耐火物

耐火物が溶融物に接触しない場合, 耐火物の損耗は著しく小さく, ファイバー製品を多用し放熱を抑制している。しかし, 使用環境によっては多孔質で比較的強度の低いファイバーでは耐久性が不十分な場合があり, 一定の強度を維持している低熱伝導率耐火物の開発が進められている。

これに関して, 近年は不定形耐火物の開発が進められており, 高アルミナ品とカルシウムヘキサアルミネート(以下, CA₆と示す)骨材品について述べる⁶⁾。表1に工業炉用の不定形耐火物, ファイバーブランケット, およびULのかさ密度, 曲げ強度, 熱伝導率を示す。表1でわかるように, 新開発の断熱ハイアルミナ質流し込み材(Developed 1)は汎用品レベルの強度を示す断熱流し込み材で, 同じく新開発のCA₆骨材品(Developed 2)は熱伝導率がさらに低い流し込み材である。CA₆骨材は微細な空隙を有する熱伝導率の低い多孔質骨材で, 耐熱性, 耐食性に優れたた

Table 1 Typical properties of thermal insulation materials

	Maximum service temperature / °C	Bulk Density / kg·m ⁻³	Modulus of Rupture / MPa	Thermal conductivity at 500 °C / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
High-alumina Castable	1550	2100	3.5	0.84
Insulation Castable	1550	1350	1.5	0.64
Developed 1 High-alumina	1500	1800	5.0	0.64
Developed 2 CA ₆ aggregate	1600	1200	1.0	0.32
Fiber Castable 1	1200	1120	1.9	0.31
Fiber Castable 2	1300	1250	2.5	0.35
Fiber Castable 3	1500	1030	2.4	0.37
General RCF Blanket	1400	130	-	0.12
General PCW Blanket	1600	130	-	0.12
General AES Blanket	1200	130	-	0.10
Micro-porous ULA-LT	900	410	1.1	0.03
Micro-porous ULA-HT	1400	430	0.4	0.06

Values of castables were evaluated after heated at 1000 °C.

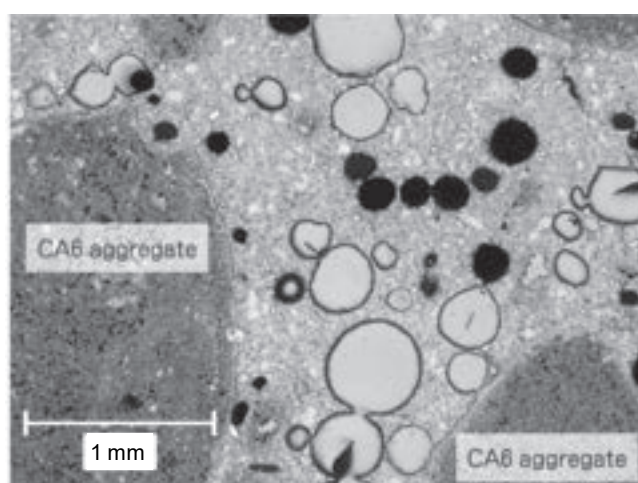


Fig. 10 Microscopic image of developed material containing CA₆ aggregate.

め適用が広がっている。この骨材に加えてマトリックスの気孔を制御し、適切な微構造（図10）とすることで適正な機械的特性を持つ超低熱伝導率流し込み材を得る。このような好ましい特性を示すCA₆骨材の用途を広げるため、流し込み材の他に吹き付け材とこて塗り材も製品化している。

表1に示すファイバーキャストブル（Fiber castable）1～3は、ファイバーを多量に含有する流し込み材である。

ファイバー形状と添加材の最適化で流し込み施工を可能とした。プレキャストで複雑な形状に成形することも可能で、用途の拡大が期待されている。

3・2 新しいファイバー製品

セラミックスファイバーは人工鉱物繊維の中でも高温耐用に優れた耐火断熱繊維の総称である。リフラクトリーセラミックスファイバー（以下、RCFと示す）は非晶質繊維に分類され、その特性から1000 °Cを超える環境で使用され、アスベストの代替品として、重要な役割を担ってきた。

同時に、RCFの安全性についても評価が進められ、RCFは1988年には国際がん研究機関（IARC）により「人に対する発がんの可能性はある」としてグループ2Bに、1997年にはEU指令（97/60/EC）において「カテゴリー 2」に、それぞれ指定された。日本においても、2015年の労働安全衛生法の改正でRCFは特化則の管理第2物質に指定され、使用時の管理の強化が必要となった。そのような中でRCFから、規制対象外のアルカリアースシリケート（以下、AESと示す）ウールやアルミナファイバー（以下、AFと示す）への置き換えが進んできた⁷⁾。

AESウールはRCFよりも耐熱性が低く、高温用RCFの一部はAFへ代替されている。しかしAFは高価であるため、

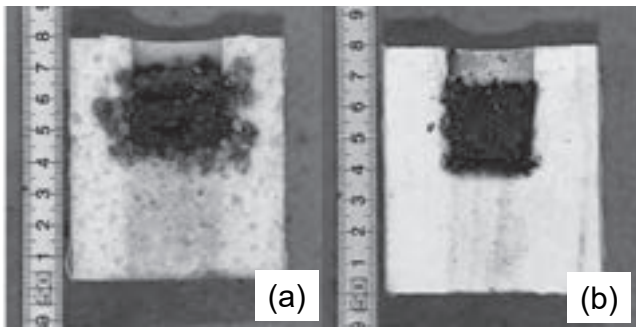


Fig. 11 Cross section of the crucible-shape refractory samples that had retained mill scale in their hollow after heating at 1500 °C for 9 h. (a) Low cement dense high-alumina castable, (b) Light weight insulating castable containing CA₆ aggregate.

高温耐熱性を兼ね備えたAESウールの要望もあり、1400 °Cグレードまで対応できるようになっている。これらの2次製品、ブロック、ボード、特殊成形品、タッピング材などの不定形品は、作業環境負荷の少ない低熱伝導率製品として市場に流通し始めている^{8,9)}。

3・3 各種設備への適用例

<加熱炉>

銅片の加熱炉炉体の内面側は敷、バーナータイル等の一部を除きほぼファイバー製品で構成されている。しかし、多くの加熱炉で銅片搬送に採用されているウォーキングベーム方式のスキッドは強度が必要で、流し込み材が使用される場合が多い。スキッドは鉄製のパイプの周囲を不定形耐火物で覆っているもので、冷却水を流してパイプを保護している。スキッドの耐火物の熱伝導率が低ければ冷却水によって持ち出される熱が少なくなり、炉のエネルギー消費を低減することができる。

このスキッドにはCA₆骨材を使用した低熱伝導率流し込み材が適すると考えられる^{6,10)}。それは断熱性に優れるとともに加熱により銅片表面に生じる酸化物であるミルスケールとの反応性が低いからである。図11に、耐火物で作製したるつぼにミルスケールを入れて1500 °Cで9時間加熱した後の切断面を示す。耐火物として汎用ハイアルミナ流し込み材 (a) とCA₆骨材品 (b) を用い比較した。図11に明らかなように、CA₆骨材品は耐ミルスケール性に優れる。

本セクションの冒頭に述べたように、加熱炉にはボードやブランケット等、多くのファイバー製品が用いられる。その中で、主として用いられる箇所は天井部であるが、近年まではRCFが使用されてきた。しかしながら2015年のRCF規制により現在ではAFへの置き換えが進んでいる。AFはRCFよりも高価ではあるものの耐ミルスケール性に優れており、寿命延長によるメンテナンスの軽減が期待さ

れている。

<製鋼容器等の蓋>

溶融物に接触しない設備には溶鋼鍋やタンディッシュの蓋がある。溶鋼鍋の蓋には空鍋時の耐火物ライニングの温度を高く保つことで耐火物のスポーリング損傷を抑制しつつ、受鋼直後の溶鋼温度の低下を低減するという極めて重要な役割がある¹¹⁾。タンディッシュの蓋にも铸造中の溶鋼温度を維持する断熱が期待されている。

これらの蓋は可動式の設備であり、振動や衝撃が加わる。またスプラッシュの飛散もありファイバー製品のみを配置すると耐久性に問題が生じる。そのため多くの場合汎用の粘土質流し込み材が用いられるが、3・2で述べたハイアルミナ質の低熱伝導率流し込み材やCA₆骨材品、ファイバーキャストブルを用いることで蓋の保温性を高めることが可能となる。新開発の断熱ハイアルミナ質流し込み材 (Developed 1)⁶⁾ は断熱性を維持しつつ耐久性を飛躍的に高めた実績があり、ファイバーキャストブルは蓋の縁の部分で良好に使用されている。

これらに加え、蓋の背面側をULλのようなマイクロポラス製品やファイバー製品で断熱することで効果はさらに大きくなると考えられる。

<各種熱処理炉>

本報では鉄鋼製造用設備の中でも特にエネルギー消費の大きい高温プロセスにおける断熱について示した。これら以外にも多くの設備からの放熱を低減することは有効で、新しいマイクロポラス製品ULλやファイバー製品の使用が有効である。

各種熱処理炉においては広く断熱材が使用されてきたものの、過酷な条件での使用は控えられてきた。しかしながら、近年では二酸化炭素排出低減を目的とした省エネルギーが見直されており、雰囲気の影響を受けない不定形バックアップ材部分にはマイクロポラス製品が使用され、雰囲気の影響が少ない天井部では不定形からファイバーへ置き換える事例が増えてきている。今後も使用環境を考慮した断熱材の使用が進むと考えられる。

4 今後の課題

本報で示したように、高温設備からの熱放散低減に関して多くの材料技術が開発されてきているが、現段階ではあまり広がっていない。これは、これら新技術を採用したものが比較的高価格であったり、現状の施工プロセスを変更する必要があったりするためと考えられる。産業界は厳しい国際競争に曝されており、コスト競争力の確保も重要である。このように、SDGsの理念を現状の枠組みのまま一社または一国のみで推進するには限界があり、世界的なレベルでの仕組み作りが必要である。

さらに、例えばある耐火物製造工場でCO₂排出を大幅に削減させた高耐用品が生産できたとしても、その製品を実現するために必要な原料の製造や運搬の過程でむしろ多くのCO₂が排出されているなら、CO₂排出を削減できたとは言えない。このような観点から、製品のライフサイクルで発生するあらゆるカーボンフットプリントを評価し、それを低減することが企業の利益につながる仕組が必要となる。SDGs No.17「パートナーシップで目標を達成しよう」にのっとったフェアな国際ルール作りと公正な競争により、これらの技術の拡大が加速すると考えられる。

5 結言

耐火物関連産業は、断熱技術の開発により高温設備の炉体からの熱放散を低下させることで消費エネルギーを低減、CO₂排出量を低減することができる。これは、SDGs No.13「気候変動に具体的な対策を」への直接的な貢献である。熱放散の低減には設備の背面側の断熱に加え、ワークライニングの低熱伝導率化も有効であり、耐火物やファイバー、マイクロポラス品の新しい技術が開発されている。カーボンフットプリントを評価するフェアな国際ルールにのっとった公正な競争により新技術の適用推進が期待される。

文献

- 1) 鳥越淳志, 星山泰宏, 野村 修, 大熊賢一, 生駒龍弥: 耐火物, 50 [10] 549 (1998).
- 2) 萩原眞治, 榎谷勝利, 沖村利昭, 鳥越敦志, 星山泰宏, 内田茂樹: 耐火物, 53 [6] 339-344 (2001).
- 3) 内田茂樹, 野村 修: 耐火物, 52 [12] 640-650 (2000).
- 4) 末吉 篤, 角村尚紀, 上道健太郎: 耐火物, 68 [6] 245-248 (2016).
- 5) 三宅 健, 末吉 篤, 橋本敏昭: 耐火物, 70 [3] 126 (2018).
- 6) 西村雅史, 浅川幸治: 工業加熱, 58 [3] 1-5 (2021).
- 7) 橋本敏昭: 耐火物, 69 [1] 2-9 (2017).
- 8) 岸川雄祐, 白石安生, 橋本敏昭: 耐火物, 72 [5] 212-216 (2020).
- 9) 堀場弘輝: 耐火物, 72 [9] 386-388 (2020).
- 10) 八尋信一, 菅原正彦, 奥野浩英, 阿部恭久, 寺島英俊, 天野正彦: 耐火物, 59 [8] 424-429 (2007).
- 11) 西 正明, 木谷福一, 高橋達人, 寺田 修, 森下紀秋: 耐火物, 33 [5] 240-248 (1981).

略歴



飯田正和
 1989年3月 岡山大学 理学部 地学科 卒業
 1989年4月 川崎炉材(株) (現品川リフラクトリーズ(株)) 入社
 技術研究所
 1991年7月 川崎製鉄(株) (現 JFEスチール(株)) 新素材研究センター
 1994年1月 川崎炉材(株) 製品開発部
 2002年4月 同 玉島製造部
 2003年4月 同 製品開発部
 2009年10月 品川リフラクトリーズ(株) 技術研究所 第3研究グループ マネージャー
 2014年4月 同 技術研究所 第1研究部長
 2018年4月 同 技術研究所長



浅川幸治
 1993年3月 近畿大学 理工学部 応用化学科 卒業
 1993年4月 川崎炉材(株) (現品川リフラクトリーズ(株)) 入社 製品開発部長付
 1994年4月 同 築炉事業部 千葉事業所
 1997年4月 同 製品開発部
 1997年6月 川崎製鉄(株) (現 JFEスチール(株)) 水島製鉄所 製鋼部 炉材技術室
 1998年6月 川崎炉材(株) 製品開発部
 1999年4月 同 営業部 倉敷営業所
 2002年4月 同 製品開発部
 2009年10月 品川リフラクトリーズ(株) 技術部 カスタマーサービス室
 2011年4月 同 赤穂工場 赤穂製造部
 2018年4月 同 同技術研究所 第2研究部長



白石安生
1996年3月 神奈川大学大学院 工学研
究科 修士課程修了
1996年4月 イソライト工業(株) 入社
技術研究所
2000年8月 Isolite Insulating Firebrick
Sdn.Bhd.
2003年9月 当社 中央研究所
2009年4月 同 耐火断熱れんが事業部
製造技術 グループ長
2010年8月 Isolite Insulating Firebrick
Sdn.Bhd.
Managing Director
2018年4月 当社 技術開発本部 技術研
究所長
2021年7月 Isolite Ceramic Fibers
Sdn.Bhd.
Managing Director



川崎 修
1994年3月 名古屋工業大学 工学部
卒業
1994年4月 イソライト工業(株) 入社
技術研究所
2000年10月 Isolite Insulating Firebrick
Sdn.Bhd.
2005年4月 当社 断熱事業本部エンジ
ニアリング部開発グループ
2010年4月 同 工業炉事業部工事グル
ープ長
2015年4月 同 技術開発本部技術部長
2019年4月 同 ファーネスエンジニア
リング部長