

連携記事

窯炉用れんがの技術動向

Technical Trends of Refractory Bricks for Steel Industry Furnaces

黒崎播磨(株)
技術研究所
マネージャー 清水公一
Koichi Shimizu

黒崎播磨(株)
技術研究所
マネージャー 塩濱満晴
Michiharu Shiohama

1 はじめに

耐火物は、鉄鋼を生産するうえで欠かすことのできない存在である。耐火物の約8割(79.0%)¹⁾は鉄鋼業で消費される。このため、耐火物の損耗抑制、窯炉の高寿命化のための技術開発(材料のみならず、内張構造設計、耐火物施工法、操炉技術)が進められ²⁾、2020年度現在の鉄鋼用耐火物の原単位は約9 kg/ton-steel¹⁾と、1950年度³⁾の10分の1以下となっている。

耐火物を構成する原料を製造するために、多量のエネルギーが費やされている⁴⁾。マグネシア・カーボンれんがに使用される電融マグネシア(MgO)を例にとると、天然鉱物であるマグネサイト(MgCO₃)を焼成、熱分解することで仮焼マグネシアを得、さらにそれをアーク炉で溶融することで、大結晶かつ緻密な電融マグネシアとし、れんが原料として使用する際に所期の耐食性が得られるようにしている。化石燃料使用によるCO₂発生を抑制し、地球温暖化の進行を遅らせるカーボンニュートラルが世界的課題となっている現在、耐火物の高耐用化による耐火物原単位の低減もさることながら、耐火物のリサイクルによって耐火物原料の使用を抑制することはまさに今日的課題である。また、産業活動による環境破壊が問題となっている現在、六価クロムの発生源となりうるクロム含有耐火物からの脱却も大きな課題である。

さらに、高齢化社会に伴い労働力人口が減少する中、労働集約型産業の典型である築炉作業は後継者不足、労働力不足に直面している。この問題への対応も喫緊の課題である。

本稿では、各種窯炉の内張りに使用されるれんがである窯炉用れんがを主とし、上述の課題への対応状況を、耐火物技術協会の協会誌である「耐火物」に掲載された内容を中心に整理したので以下に報告する。

2 使用後れんがのリサイクル

鋼の連続鋳造における流量制御装置として、2~3枚の孔の空いた平滑な耐火物の板を摺動させることによって開閉、流

量調整を行うスライディングノズル(SN)が一般に適用されている(スライドゲート(SG)、スライドバルブ(SV)などとも呼ばれる。以下、SN)。摺動する耐火物の板であるSNプレートれんがの損傷は多くの場合、内孔付近および摺動面の一部に限局されるが、従来は当該部位の損傷が進んだ時点で耐火物の寿命とされ、交換、廃棄されていた。

廃棄物コストおよび耐火物コストの削減を目的に、プレートれんがの再生が検討、適用されている。取鍋用SNプレートを例にとると、内孔付近をコアボーリングし、新たに用意したリングれんがを取り付け、もとの背面側を研磨し新たな摺動面とする方法⁵⁾、内孔付近だけではなく摺動面の損傷部を含む卵型の領域を交換式のコアブロックとする方法⁶⁾などが報告されている。

前者の実施形態を図1に示す。(a) 使用後プレートれんがは、内孔と摺動面(図示の上面)が損傷している。(b) 内孔付近をコアボーリングで除去し、(c) 再生用リングれんがを

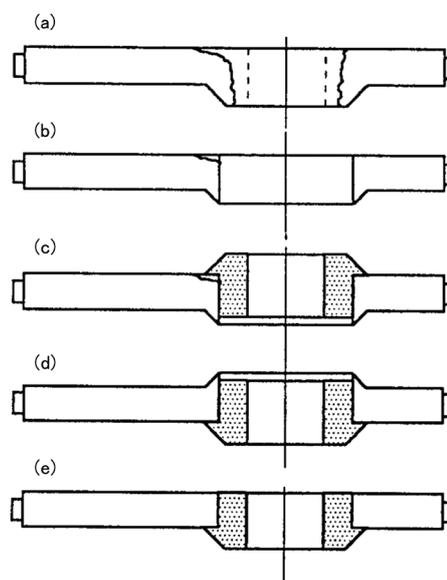


図1 製鋼用取鍋SNプレートの再生使用プロセスの例⁵⁾

装着する。(d) れんがの摺動面と背面を反転、(e) 新たに摺動面となる面を研磨、再生用リングれんがと本体れんがが同一平面になるように仕上げ、再生プレートれんがの完成となる。この再生方法は原則として1回のみ実施可能である。

これに対し、摺動面の損傷部を含む領域も交換式とする後者は複数回の再生が可能と報告されている。ただし、後者では元のプレート構造が複雑であり、再生率が低いとむしろコスト上昇につながることも考えられる。

使用後のSNプレートを別用途に転用する検討もなされている。例えば、鋼の最終的な成分調整を行う二次精錬炉であるRH (Ruhrstahl-Heraeus) 脱ガス装置の浸漬管外周部は、一般にアルミナ (Al₂O₃) 系キャストブル (流し込み材) が適用されるが、取鍋溶鋼のスラグが付着し除去作業が必要となる。これに対し、使用後SNプレートを外周部に施工することによって、スラグ付着が抑制されることが報告⁷⁾されている。

使用後耐火物 (れんがだけではなく、不定形耐火物を含む) を破碎し、耐火物の出発原料として適用する取り組みが広くなされている。製鉄所構内におけるリサイクルの事例⁸⁾ (図2) では、材質ごとに回収・選別された使用後耐火物は、リフティングマグネットによる地金除去、手選別によって地金・スラグを除去、さらに粉碎処理、磁力選別によって鉄分 (金属相、酸化鉄) を徹底的に除去する。さらに、スラグによる耐火物の変質部を選別除去するために、色彩選別機とエアージェンを用いた自動選別を行うことで、より高品質なりサイクル原料を得ることができるとしている。

高品質なりサイクル原料を得るための手法として、上記以外にも様々な方法が検討されている。例えば、約10mm程度に粉碎した使用後マグネシア・カーボンれんがに解砕機で圧力を加えながら連続的に微粉を除去することによって、マグネシア骨材と微粉を効率よく分離し、不純物の少ないマグネシア原料を得る方法⁹⁾が紹介されている。また、同じく粉碎した使用後マグネシア・カーボンれんがをロータリーキルンで酸化焼成処理することによってカーボンを除去し、微粉部に多く含まれる不純物を集塵によって除去、高純度のマグネシア原料を得る方法¹⁰⁾も紹介されている。

粉碎された使用後耐火物は、耐火物の出発原料以外に、製鋼プロセスの副原料にも用いられる。その例として、LF (Ladle Furnace) 処理における取鍋耐火物中のマグネシア溶出の抑制のために添加されている軽焼ドロマイト (マグネシアと石灰 (CaO) が主成分) を、取鍋の使用後マグネシア・カーボンれんが、同じくアルミナ・マグネシア・カーボンれんがで置換、電気炉の造滓剤である石灰をAOD (Argon Oxygen Decarburization) 炉の使用後ドロマイトレんがで置換した事例¹¹⁾が紹介されている。

③ クロムフリー化

原料として、クロマイト (理論式: FeCr₂O₄、但し耐火物用原料はマグネシオクロマイト MgCr₂O₄ 組成であることがほとんど) を主鉱物相とするクロム鉄鉱とマグネシアからなる

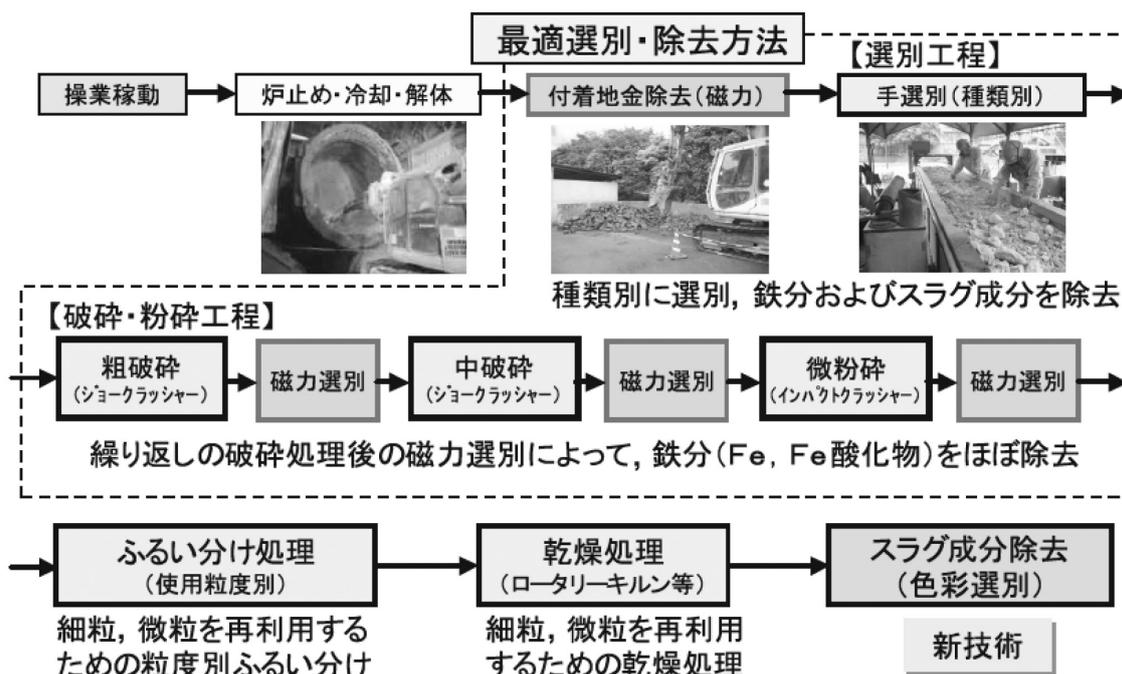


図2 製鉄所における使用後耐火物の回収・選別処理フローの例⁸⁾

マグネシア・クロムれんがは、人体に有害な六価クロムを生じ得る。1970年代にセメント用ロータリーキルン使用後マグネシア・クロムれんがの六価クロムによる公害が問題となつてから、同用途のクロムフリー化（主にマグネシア・スピネルれんがへの置換）が検討され¹²⁾、2015年現在、同用途のマグネシア・クロムれんがの使用比率はわずか2.2%とごく一部を残すのみ¹³⁾となっている。図3にセメント用ロータリーキルン向け耐火物におけるクロムフリー化の進展を示す。

製鋼用耐火物においても、マグネシア・クロムれんがのクロムフリー化が進んでおり、例えば、マグネシアを主体とし少量の酸化物（チタニア (TiO₂) とアルミナ¹⁴⁾、イットリア (Y₂O₃)¹⁵⁾ など）を添加した焼成クロムフリーれんがのRH脱ガス装置下部槽への適用が試験されている。また、マグネシア・カーボンれんがはこれまで主に製鋼用転炉・電気炉で適用されているが、RH脱ガス装置下部槽のクロムフリー化を目的とした適用¹⁶⁾も進められている。低炭素鋼を溶製する設備での使用であるため、溶鋼中へのカーボンの溶出（カーボンピックアップ）抑制を目的に、また低熱伝導率による熱ロス低減を目的に、れんがの低カーボン化^{17,18)}が検討されている。さらに進んで、黒鉛を含有しないRH脱ガス装置用不焼成マグネシアれんがも開発¹⁹⁾されている。

また、溶鋼用取鍋内の温度・成分均一化を目的に底部から溶鋼中にガスを吹き込むのに用いられる多孔質耐火物であるポーラスプラグでは、これまで耐食性強化などの目的で少量のクロミア (Cr₂O₃) をアルミナに添加するのが一般的であったが、クロムフリー化を目的にジルコン (ZrSiO₄)²⁰⁾、スピネル (MgAl₂O₄)^{21,22)}、酸化亜鉛 (ZnO)²³⁾ で置換したれんがが提案されている。

一方、廃棄物処理を目的とした溶融炉は数種類の形式があるが、このうち、酸化雰囲気で作業される炉では、アルミナ・

クロミアれんがまたはキャストブル、マグネシア・クロムれんがなどクロムを含む耐火物が使用されるのが一般的^{24,25)}である。セメント用ロータリーキルン用耐火物や製鋼用耐火物と同様、クロムフリー化の取り組み²⁶⁻²⁸⁾が行われている。

4 れんがの不焼成化

表1に示すとおり、鉄鋼用耐火物の不定形化率は60%を超えている。不定形耐火物のほとんどはキャストブルや吹き付け材のように水と練り混ぜて窯炉に直接施工されるため、不焼成耐火物といえる。また、窯炉用れんがの中でマグネシア・カーボンれんがに代表されるカーボン含有れんがの大半は、フェノール樹脂などの接着剤によって結合される不焼成れんがである。一方、マグネシア・クロムれんがに代表される（カーボン不含有）塩基性れんがは、かつては苦汁（にがり）

表1 鉄鋼用耐火物の原単位と不定形化比率^{1,3,29,30)}

年度	原単位 [kg/t-steel]	不定形化率 [%]
1950	127.0	31.5
1960	77.0	38.9
1970	29.1	18.9
1980	15.3	37.7
1990	11.5	51.9
2000	9.0	63.6
2010	7.4	69.9
2020	9.0	61.1

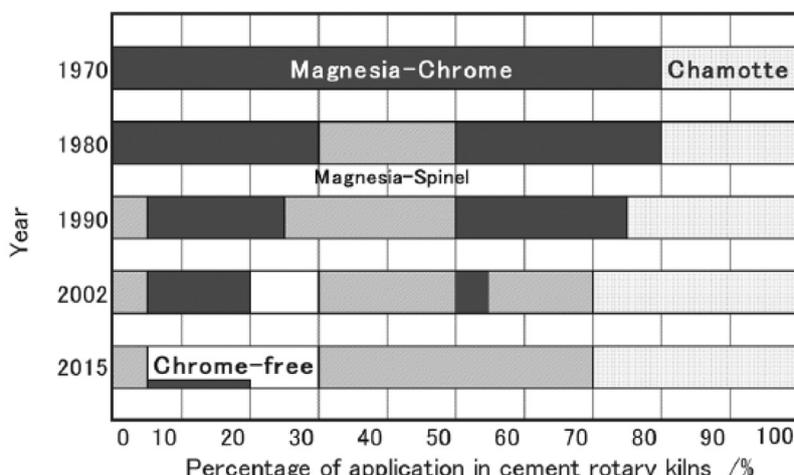


図3 セメント用ロータリーキルン向け耐火物におけるクロムフリー化の進展¹³⁾

を結合剤とする不焼成れんがも存在したが、高温での熱間特性改善、侵食に対する抵抗性付与を目的として1700℃以上の高温で焼成した製品が広く使用されるようになった³¹⁾。また、ウェアライニングの背面に施工されるパーマメント耐火物は、ウェア耐火物よりも長期間使用されることから、受熱に対する寸法安定性などを重視し焼成れんがが使用される例がほとんどである。

これに対し、海外では2022年に入ってマグネシア・クロムれんがの不焼成化³²⁾、不焼成高アルミナれんがの製鋼用取鍋パーマメントライニングへの適用³³⁾などが報告されている。不焼成化に伴う技術的課題の存在は想定されるが、カーボンニュートラルが世界的な課題である現在、同様の取り組みは今後盛んになるものと予想される。

5 築炉・解体作業の効率化

耐火れんがの施工は一般に築炉工によって行われているが、高齢化、後継者不足などによって築炉工の人員そのものが不足しつつある³⁴⁾。また、築炉期間中は炉の操業ができないため、生産量への影響を最小化するために、築炉工期の短縮が求められている。

これらに対する解決策のひとつが、不定形耐火物の適用による築炉機械化である。例えば、溶鋼用取鍋の鋼浴部は従来、ジルコン質、アルミナ・シリカ (SiO₂) 質などの耐火れんがが使用されていたが、1980年前後からキャストブルの適用が進み、現在では中心的工法となっている³⁵⁾。図4に、1970～1990年頃の溶鋼用取鍋耐火物の原単位、不定形耐火物の比率、施工方法および材質の推移を示す。同様の動きは高炉の出鉄樋、連続鋳造用タンディッシュ、加熱炉などに広がった³⁶⁾。ま

たコークス炉では、キャストブルを事前に鑄込んで製造したプレキャストブロックなどの大型ブロックをクレーンで移送し所定の場所に積みつける工法³⁷⁾の開発が進められている。

しかしながら、製鋼用耐火物として使用される、マグネシアなどを主成分とする塩基性耐火物は、流し込み材施工時に使用される水分を乾燥させる工程で消化 (水和) が発生しやすいなどの問題があり、不定形耐火物の適用による築炉機械化が困難である。特に、高炉を有する大手鉄鋼メーカーにおいて製鋼プロセスの中核を担う転炉は、(炉容にもよるが) 約500tのれんがをライニングする巨大な窯炉であり、築造されるれんがも最大で長さ1mを超えるなど非常に大きく、築炉機械化の必要性が高い。このため、軽労化、作業効率向上を目的に、れんがを吸着して吊り上げるバランスーの導入³⁸⁾が1980年代からなされている。また、さらに進んで、転炉れんが搬送・築造の自動化³⁹⁾が1990年代から実用化されている。図5に転炉自動築炉装置の概要を示す。装置は転炉炉体直下の受滓台車の線路を使用して移動でき、(1) 炉底の取り付け、取り外しを行う炉底交換装置、(2) 炉下から炉内へれんがを自動搬送する築炉タワー、(3) 炉壁へ自動でれんが積みする築炉ロボットから構成される。

転炉の炉壁れんがはバチ形のれんがを用いて水平に積むのが一般的であるが、経年劣化による炉殻の歪み、れんがの寸法公差などの要因のため、各段毎に寸法調整したれんがをその場加工し挿入する「攻め」が必要となり、築造自動化の障害となる。このため、築造自動化では炉壁れんがを水平ではなくらせん状に築造することによって、各段毎の「攻め」を不要としている。なお、転炉では一般に、不焼成れんがであるマグネシア・カーボンれんがが適用されており、空目地 (からめじ：れんが間の目地にモルタル塗布を行わないこと) で築造される。

一方、RH脱ガス装置では焼成品であるマグネシア・クロ

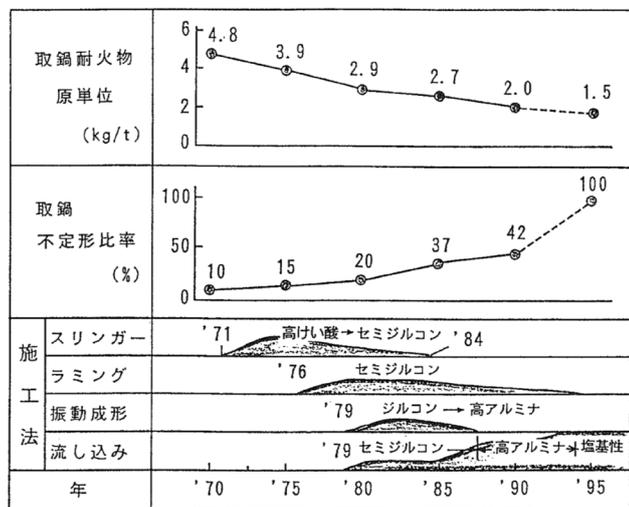


図4 製鋼用取鍋の耐火物原単位、不定形化、施工法の推移 (1970年以降)³⁵⁾

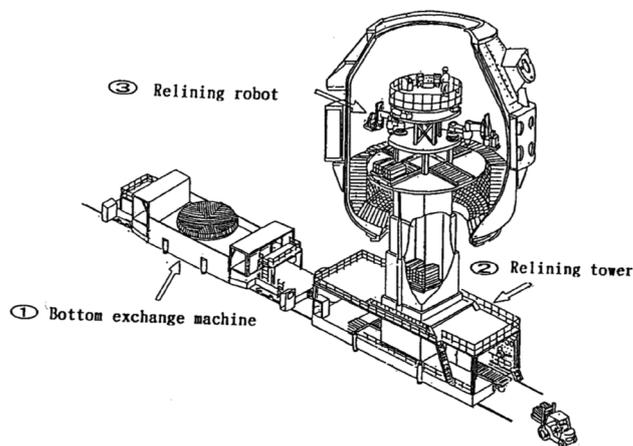


図5 製鋼用転炉自動築造設備の概要³⁹⁾

ムれんがが適用される例が多く、焼成れんがの寸法公差を吸収するなどの目的で、一般にモルタル目地とすることから、築造の機械化はさらに困難である。また、損傷の大きい下部槽は複数の炉殻を有し交換式とすることで築造・解体と操業を並行して行うことが可能であるが、上部槽は一般に操業位置での築造となることから、築炉期間中は操業が不可能である。このため、一部の鉄鋼メーカーでは築炉工期短縮を目的に、上部槽れんがの築造に「ブロック施工」⁴⁰⁾が導入されている。

従来の築炉作業では、槽内に単品のれんがを搬入し、築炉工がその場で一個一個のれんがにモルタルを塗布、施工していく。これに対しブロック施工では耐火物メーカーの工場で複数のれんがをモルタル接着したブロック状の施工体を製品として出荷、ユーザーである鉄鋼メーカーに納入する。鉄鋼メーカーではこの施工体を天井クレーンなどで上部槽内に搬入し施工する。調整作業のため、ブロック間の一部は単品のれんがを用いその場で築造されるが、大半の築炉作業を上部槽の外である耐火物メーカーの工場で行うことによって、築炉工期の短縮が可能となる。図6にRH上部槽のブロック施工に用いられるブロックの例を示す。バチ形のれんがを周方向(水平方向)に10個程度、高さ方向にも10個程度、モルタルで接着、一体のブロックとしたものである。

使用後耐火物の解体は、建設業界で使用される手持ち式のコンクリートブレイカー、または一般的な建設機械である油圧ブレイカーに取り付けたチゼル(たがね)で行うことが多いが、転炉の出鋼口スリーブのような筒状の耐火物を操業中のチャージ間という短時間で交換するために、迅速に除去する、ウェア耐火物の変質層のみを除去し表面にキャストブルなどの不定形耐火物を継ぎ足し施工する、などのニーズに対応し、ブレイカーのような打撃力ではなく、建設用途向けのビットを応用し、耐火物を正確かつ迅速に削る技術が実用

化⁴¹⁾されている。

6 おわりに

ここまで、窯炉用れんがを中心とした耐火物を取り巻く現在の課題とそれに対する取り組みについて述べてきた。

冒頭に述べたとおり、鉄鋼用耐火物は国内の耐火物需要の約8割を占めており、そのニーズはこれまでも耐火物の技術動向に大きな影響を与えてきた。一例を挙げると、転炉用マグネシア・カーボンれんがは底吹き転炉羽口での採用(1977年)を皮切りに、複合吹錬転炉の導入とともに各所で採用され、わずか数年で既存のドロマイトれんがの大半に取って代わった⁴²⁾。今後、ゼロカーボン・スチールに向けた動き、例



図6 RH脱ガス装置・上部槽ブロック施工に用いられるブロックの例 (Online version in color.)

鉄鋼分野における技術開発		2020	2030	2040	2050	2100
COURSE50	所内水素(COG)利用による高炉内の水素還元比率アップ 高炉ガスからのCO2分離	R&D	導入			
Super COURSE50	外部水素利用による高炉によるさらなる水素還元比率アップ (大量の水素供給が可能となる前提)		R&D	導入		
水素還元製鉄	石炭を利用しない水素還元製鉄		R&D	導入		
CCU	副生ガスからのカーボンリサイクル		R&D	導入		
CCS	副生ガスからのCO2回収		R&D	導入		
社会共通基盤としての技術開発		2020	2030	2040	2050	2100
カーボンフリー電力	脱炭素電源(原子力、再生可能、化石+CCS) 次世代電力系統、電力貯蔵等		R&D	導入		
カーボンフリー水素	低コスト・大量水素の製造・輸送・貯蔵技術開発		R&D	導入		
CCS/CCU	CO2分離貯留・利用技術開発 社会的課題の解決(貯留場所、パブリックアクセプタンス等)		R&D	導入		

図7 ゼロカーボン・スチール実現のための超革新技術開発に向けたロードマップ⁴³⁾ (Online version in color.)

えば高炉への水素還元導入、水素還元製鉄⁴³⁾の進展が耐火物の損傷に影響を及ぼすこと、それに伴い、耐火物に求められる具備特性も変化することが考えられる。その内容が明らかとなれば、そのニーズへの対応が今後数十年の耐火物の技術動向の大きな潮流となることが予想される。

参考文献

- 1) 耐火物協会：耐火物協会会報, No.853, (2021).
- 2) 杉田清：鉄と鋼, 65 (1979) 9, 1462.
- 3) 杉田清：耐火物, 49 (1997) 7, 374.
- 4) 太田豊彦：第48・49回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1977), 1.
- 5) 桑原明夫, 三木隆, 川村俊夫, 伏見哲郎：耐火物, 47 (1995) 7, 348.
- 6) 高垣壮平, 會田公治, 濱本直秀, 佐伯恒信：耐火物, 68 (2016) 4, 181.
- 7) 特開2009-263693公報, (2009).
- 8) 花桐誠司, 松井泰次郎：耐火物, 63 (2011) 3, 114.
- 9) 田中雅人, 山本健三, 吉富丈記：耐火物, 63 (2011) 4, 180.
- 10) 塩谷巧, 西村尚之：耐火物, 66 (2014) 7, 312.
- 11) 高橋元, 津野雅英, 速石正和：耐火物, 52 (2000) 4, 178.
- 12) 大橋浩二, 行繩次夫：耐火物, 32 (1980) 7, 371.
- 13) 大野誠, 藤井実香子, 吉川尚吾, 尾関文仁：耐火物, 68 (2016) 9, 424.
- 14) 中森義巳, 菅野司, 向所実, 成田力也, 土成昭弘, 古川邦男, 北井恒雄：耐火物, 49 (1997) 8, 478.
- 15) 清水公一, 保木井利之, 浅野敬輔, 古澤正夫, 三木隆：耐火物, 53 (2001) 2, 84.
- 16) 広木伸好, 戸崎泰之, 三木隆, 田畑勝弘, 西尾英昭, 伊東克則：耐火物, 39 (1987) 5, 273.
- 17) 柿原昌佳, 多田秀徳, 飯田栄司：耐火物, 61 (2009) 6, 285.
- 18) 津田智裕, 松堂人士, 中谷友彦, 池内康, 小出邦博, 副田知美：耐火物, 65 (2013) 7, 293.
- 19) 富田雄也, 田中雅人, 阿南貴大, 平初雄：耐火物, 67 (2015) 12, 606.
- 20) 河野静一郎, 土成昭弘：耐火物, 59 (2007) 7, 334.
- 21) 河野静一郎, 土成昭弘：耐火物, 60 (2008) 5, 238.
- 22) 安井公宏, 高橋優介, 吉金仁基, 今枝孝文, 副田知美：耐火物, 72 (2020) 7, 275.
- 23) 大内龍哉, 古川兼士, 吉富丈記：耐火物, 64 (2012) 1, 30.
- 24) 石井浩二, 藤江博司：耐火物手帳 改訂12版, 耐火物技術協会, (2015), 476.
- 25) 吉見靖隆：耐火物, 66 (2014) 9, 471.
- 26) 三島昌昭, 津田秀行, 保木井利之, 浅野敬輔：耐火物, 57 (2005) 6, 337.
- 27) 津田秀行, 北沢浩, 鈴木孝：耐火物, 60 (2008) 5, 231.
- 28) 西田一城：耐火物, 64 (2012) 9, 452.
- 29) 耐火物協会：耐火物協会会報, No.637, (2003).
- 30) 耐火物協会：耐火物協会会報, No.733, (2011).
- 31) 小形昌徳：耐火物手帳 改訂12版, 耐火物技術協会, (2015), 147.
- 32) B.Borges, C.Pagliosa, M.Borges, A.Campos, V.Madalena and V.C.Pandolfelli : UNITECR 2022 Proceedings, Chicago, The American Ceramic Society, (2022), <https://bulletin-archive.ceramics.org/1n7kccc/> (参照日：2022-8-1).
- 33) J.A.P.Sardelli, C.Pagliosa and M.Borges : UNITECR 2022 Proceedings, Chicago, The American Ceramic Society, (2022), <https://bulletin-archive.ceramics.org/1n715j2/> (参照日：2022-8-1).
- 34) 石松宏之, 小瀨政和, 長坂正, 浅山拓一, 上床芳博, 藤原剛：耐火物, 61 (2009) 2, 60.
- 35) 大石泉：第145回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1992), 1.
- 36) 杉田清：製鉄・製鋼用耐火物, 日本鉄鋼協会監修, 地人書館, (1995), 116.
- 37) 特開2019-218421号公報, (2019).
- 38) 西谷輝行, 松岡尚, 高島靖, 中本武志, 村上嘉昭：耐火物, 41 (1989) 12, 665.
- 39) 岡中義次, 天野正彦, 筒井直樹, 倉吉和美：耐火物, 48 (1996) 2, 67.
- 40) 特開2005-48240公報, (2005).
- 41) 内田貴之, 矢田谷嘉一：耐火物, 60 (2008) 9, 498.
- 42) 平櫛敬資：発展する耐火物工学 その歩みと展望, 耐火物技術協会, (1987), 38.
- 43) 日本鉄鋼連盟：日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン『ゼロカーボン・スチールへの挑戦』(2018. 11公表, 2019. 9 / 2020. 6追補), https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/zerocarbonsteel/documents/zerocarbon_steel_honbun_JISF.pdf (参照日：2022- 7- 20)

(2022年11月4日受付)