



高炉の長寿命化に貢献する 耐火物技術

銑鋼一貫製鉄所のシンボルである高炉。内部で進行する高温のダイナミックな反応は、外側の優れた耐火物によって守られている。耐火物技術の進歩により、かつて数年程度と言われていた高炉の寿命は15年以上に伸びている。とくに高炉の炉底に使われるカーボンブロックは耐熱性だけでなくすぐれた耐食性、熱伝導性を発揮することが求められ、長年にわたり材料開発が進められてきた。最近では材料開発だけにとどまらず、施工技術などを含めた総合的な視点からのアプローチが進められている。



高炉炉底部の耐火物改修工事(上)、改修後の高炉(下)

鉄鋼技術の進歩は耐火物技術とともに

幕末の日本で、開国を迫る欧米列強と戦うため、国内では自前の大砲を製造しようと、銑鉄を高温で溶かす反射炉の建設に乗り出した。当時は佐賀、薩摩、水戸などの各藩が、オランダの書物を翻訳して築炉技術を学び、建設を始めたという。



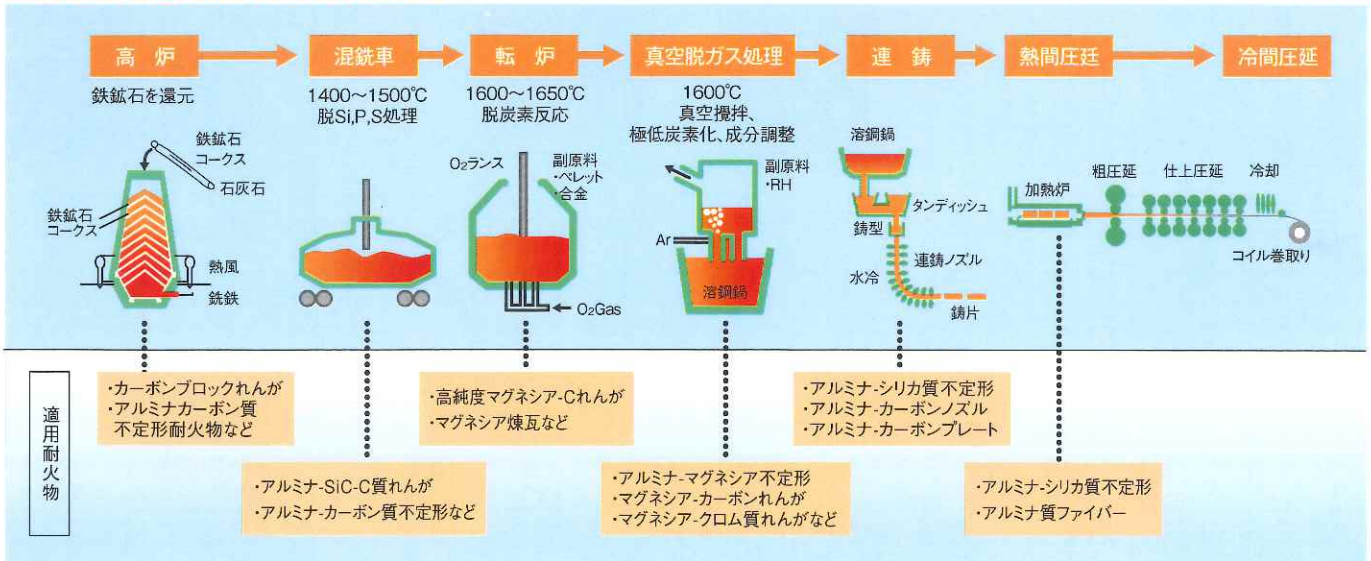
1853年に建設された反射炉(伊豆・韮山)。高さ約15mの炉の内部は耐火れんが積みでできている。(写真提供:伊豆の国市)

1853年に建設された伊豆・韮山の反射炉も、その1つとして知られている。じつは、韮山の反射炉を建設できた理由の1つに、良質な耐火れんがが入手できたことがある。建設地に程近い伊豆・天城山中の白土を原料として耐火れんがを製造したところ、1700℃の高温にも耐える優秀な耐火物ができあがったという。

今も昔も、鉄作りと高温のプロセスは切り離せない。そこには必ず優れた耐火物があり、製品の高い品質を実現するとともに、操業の安全を守ってきた。

製鉄所では、製銑、製鋼の各工程において溶解処理や製銑処理、搬送などを目的とした各設備に、最適な耐火物が使用されている。数多くの耐火物は、材質、形態などによっていろいろな種類に分類できる。まず材質で見ると、マグネシア、アルミナ、シリカなどの酸化物系、炭化物系や窒化物系などの物質が使用される。これらの材料は、成分系により、酸性、中性、塩基性、非酸化物系のように分類されることが多い。また材料の形態により、耐火れんがのような定形耐火物と、キャストブル(耐火骨材と

■鉄鋼製造プロセスと各プロセスの使用耐火物



松井泰次郎、花桐誠司；セラミックデータブック2009、Vol.37 図1を元に作成

水硬性セメントを混合した耐火物)のような不定形耐火物に大別される。

■高炉内の反応によって使い分けられる耐火物

高炉内で起こるダイナミックな反応はよく知られているが、反応の状態に応じて温度や装入物の衝撃などの条件が変化するため、その部位毎に最適な耐火物が選択されている。

高炉は鋼板製の鉄皮に覆われ、内部は耐火物で内張りされたトックリ型の構造をしており、炉頂から投入された原料の鉄鉱石とコークスが層をなして交互に積み重なっている。上部のシャフト部では、下部の羽口から吹き込まれる熱風や酸素と鉄鉱石が反応して、鉄鉱石を溶かしながら還元反応が起こる。液状になった溶銑は炉の中を流れ落ちて炉底に溜まり、銑鉄として出銑される。

次に、高炉内の各箇所で使用される耐火物を見てみよう(次ページ図参照)。まず高炉の上部は、材料が投入され、高温のガスが上ってくる箇所である。ここには、断熱性やガスに対する耐食性に優れた粘土質の不定形耐火物を使用される。

炉頂から装入された原料は、シャフト部では固形物であり、高炉内壁と接しながら下へと落ちていく。そこで内壁の耐火物は、物理的な衝撃や摩耗に耐えられなければならない。同時に、高温ガス(約2000℃)との接触やその急激な温度変化に耐えられる、耐熱衝撃性が求められる。ここで使用される耐火物は高アルミナレンガである。

シャフト下部には、熱風を吹き込む羽口などがあり、溶銑の熱影響やアルカリなどの化学作用を受ける。ここでは、ステープ(冷却装置)に耐火物として高アルミナレンガが使用されている。

■耐火物の構成成分による分類

		成分系(例)	材質名称(例)
酸化物系	酸性	SiO ₂ Al ₂ O ₃ -SiO ₂ ZrO ₂ ・SiO ₂	珪石 高アルミナ、粘土 ジルコン
	中性	Al ₂ O ₃ MgO・Al ₂ O ₃ (Mg・Fe)O・(Al, Cr, Fe) ₂ O ₃	アルミナ スピネル クロム
	塩基性	MgO MgO-CaO MgO-クロム	マグネシア ドロマイト クロムマグネシア
非酸化物系		C SiC BN	カーボン(黒鉛) 炭化珪素 ボロンナイトライド
複合系		Al ₂ O ₃ -SiC-C MgO-C	アルミナ・炭珪・カーボン マグネシア・カーボン

杉田清「鉄鋼技術の流れ ― 製鉄・製鋼用耐火物」より

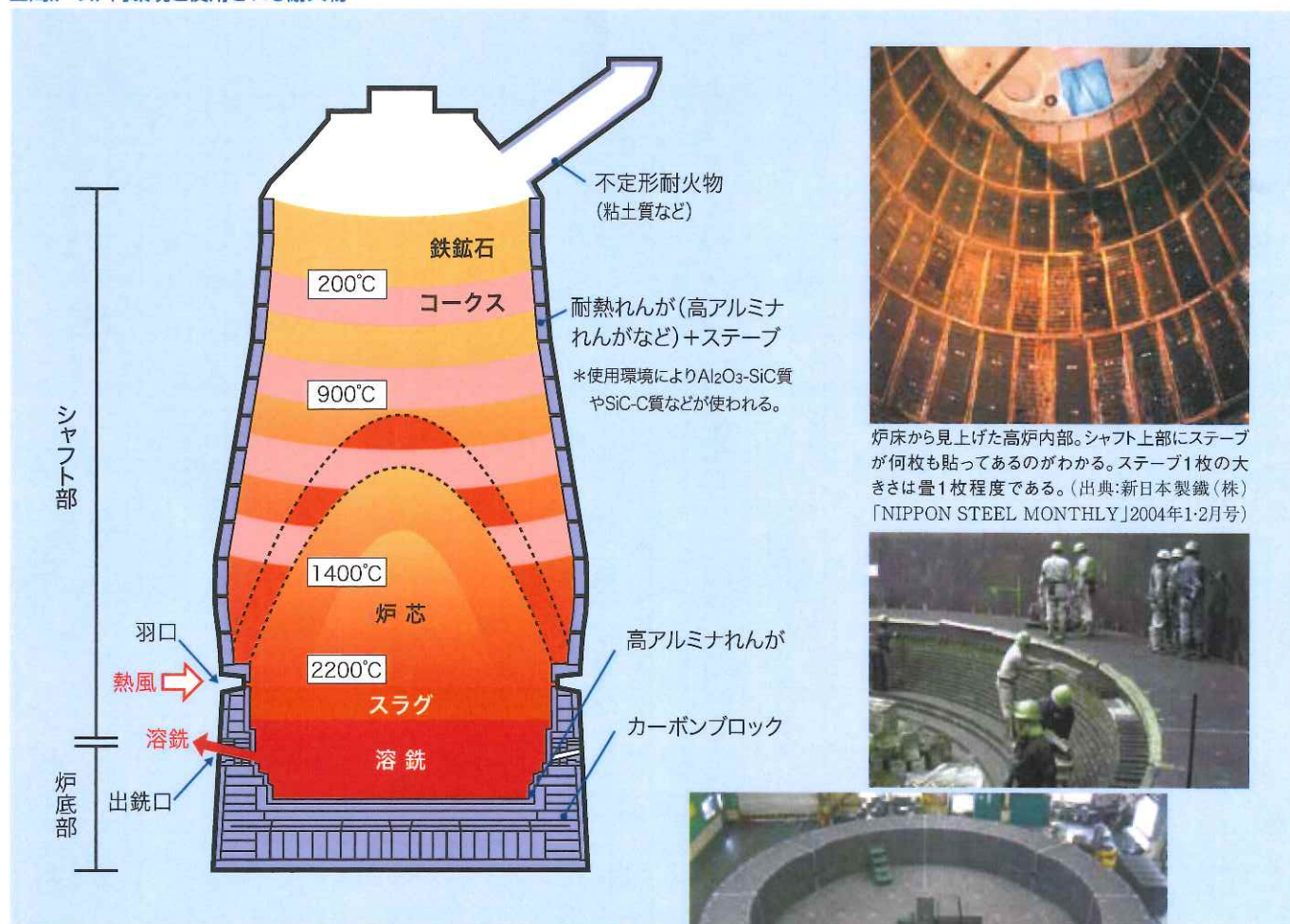
さらに下の炉底部には、出銑口と湯溜まりがある。出銑口付近では、溶銑が流れており1550℃以上に達することもある。また、出銑口より下にある湯溜まり付近は、比重の大きい溶銑が溜まり、渦巻くように流れている箇所であり、高炉全体の中でも耐火物にとって最も過酷な環境となる。この湯溜まり付近では、カーボンブロックや高アルミナレンガが配置されている。

このように、高炉に使用される材質は主にアルミナ質やカーボン質の耐火物であり、炉内の反応や環境に応じて適材適所で使い分けられていることがわかる。

■高炉の炉底環境と使用されるカーボンブロック

高炉の寿命を長くするためには、耐火物の長寿命化が不可欠である。1970年頃吹き止めた高炉では、炉寿命は5~7年程度だったが、現在では高出銑比を維持しつつ約15年という

■高炉の炉内環境と使用される耐火物



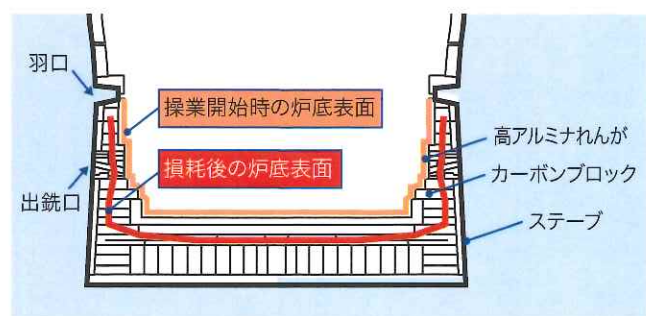
炉床から見上げた高炉内部。シャフト上部にステーブが何枚も貼ってあるのがわかる。ステーブ1枚の大きさは畳1枚程度である。(出典:新日本製鐵(株)「NIPPON STEEL MONTHLY」2004年1・2月号)



炉底部での耐熱れんがの工事のようす(上)、仮組みされたカーボンブロック(1段分)(下)

■高炉炉底損耗プロフィール

操業開始後、耐火物は炉底の表面から徐々に損耗していく。とくに出銑口下は最も損耗しやすい。



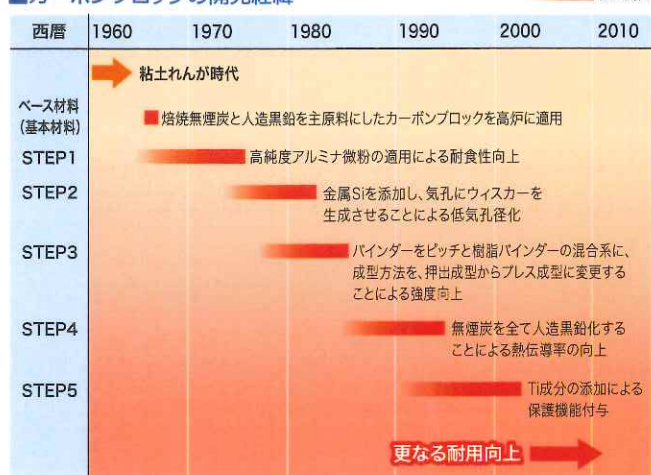
長寿命化を果している。これは、耐火物の長寿命化によるものであり、なかでも炉底部の耐火物が重要な役割を果たしている。

高炉炉底部の湯溜まりは、液体の溶銑とスラグが溜まり、出銑口に向かって流れを作っている場所である。ここに使われる耐火物はカーボンブロックであり、その表面には、立ち上げ時の温度変化からカーボンブロックを保護するため、薄い高アルミナれんがを貼り付けて使用する。耐火物を設置し、操業を開始した後、最初に、溶銑に直接接している高アルミナれんがが損耗

する。その後、その外側にあるカーボンブロックが顔を出し、溶銑と接するようになる。カーボンブロックの元々の厚さは約2mあるが、改修までの約15年間の間には厚さは50cmにまで減ってしまう。それは溶銑が湯溜まりの中を流れるうち、炉底部の側壁を削ってしまうからだ。とくに出銑口下部の側壁では、操業期間の間にカーボンブロック表面が溶銑によって脆化し、さらに重い溶銑の流れによる大きな力がかかるため、カーボンブロックは少しずつ損傷し、徐々に薄くなっていく。

カーボンブロックは、耐火物として断熱する効果だけでなく、外側に設置したステーブ(冷却装置)の冷熱をカーボンブロックを介して炉内部に伝え、冷却する役目を持っている。言い換えれば、カーボンブロックは、たんに「熱に耐える」だけでなく「ステー

■カーボンブロックの開発経緯



ブの冷熱を内側の耐火物に伝え背面冷却する」ことを目的として使われているのであり、カーボンブロックの優れた熱伝導性が生かされた使われ方をしている。

また、このほかにもカーボンブロックには、溶銑に対する高い耐食性（耐溶銑性）が求められる。高温の溶銑がカーボンブロックに接すると、溶銑に接する面（稼働面）から溶銑がカーボンブロックの気孔内に浸入し、ここから組織の脆化が進み、損耗の度合いが早くなる。これを防ぐことにより、カーボンブロックの長寿命化が図れるのである。

さて、カーボンブロックが直接、溶銑に接するようになると、稼働面にはステープからの冷却熱が伝わる。すると稼働面は冷えやすくなり、溶銑とスラグの混合物が析出物として付着して層を作る。この層は粘糊層と呼ばれ、削られたアルミナれんが層の代わりに耐火物を守る保護の役目をする。

しかし炉底部に溜まっているのは、比重が重い溶銑と、軽いスラグの混合物であり、保護層としての粘糊層が、炉底部の表面に均一に生成されることは難しい。なかでも出銑口のすぐ下の側壁部は、つねに溶銑が流動していることから、カーボンブロックから冷却されても粘糊層ができにくい。そのため出銑口下は、炉底の中でも最も損耗しやすい箇所となっている。巨大な高炉の中でも、この部分の耐火物をどうするかが、長寿命化のポイントとなる。

耐食性と熱伝導性の向上を図る

カーボンブロックの耐久性を上げるために、これまでさまざまなアプローチから、材料開発が行われてきた。

昭和40年代に開発されたカーボンブロックは、溶銑に対して優れた耐食性を示す天然の焙焼無煙炭と、熱伝導性のよい黒

鉛を使用したカーボン材料だった。この後1970年代には、耐摩耗性を高めるためアルミナを添加し、さらに耐食性を向上させた材料が開発された。

1980年代になると、微細気孔径化を狙った材料が開発された。これは、カーボンブロック内部に数十ミクロン程度の気孔があるとここに溶銑が浸入してれんがが脆化することを見出し、気孔内部にSi-O-Nウイスカーを形成させることにより、気孔の空隙を小さくしたものである。この材料は、さらに成形プロセスや材料に改良が加えられ、気孔のいっそうの緻密化が図られた。

1990年代に開発されたのが、高熱伝導性カーボンブロックである。これは材料を、以前から使用していた、耐溶銑性に優れた焙焼無煙炭から、人造黒鉛とアルミナ微粉に変更し、すぐれた熱伝導性を実現したものである。

最近開発された材料に、高耐食性カーボンブロックがある。これは、カーボンブロックの耐食性向上の手段としてTiを活用している。高炉内にTiO₂を吹き込むことにより溶銑の粘糊層が形成され、炉壁耐火物の損耗を防ぐことができることは、これまでに知られていた。そこで、カーボンブロック内部にあらかじめTi成分を含有させておけば、カーボンブロックの損耗時に溶銑内に混じったTi成分により、粘糊層の形成を促進することができると考えられた。この材料は、現在実用化に向けた評価が進められており、いっそうの長寿命化につながるものと期待されている。

今後、カーボンブロックをより安定的に使用していくために、稼働中のき裂発生を抑制する施策も求められている。

シャフト部で衝撃と熱影響に見舞われるステープ

さて高炉上部のシャフト部も、耐火物にとっては過酷な環境である。投入された鉄鉱石などの材料は内壁と接するうえ、大きな温度変化による熱衝撃を受けるからだ。

シャフト部の内壁にはステープが設置され、ステープの炉内側に耐熱れんが（高アルミナれんがなど）が配置される。このステープは鋳鉄製で、内部に冷却管を備え、その中に冷却水を通すことによって本体を冷却する。操業後何年か経つと、炉内側の耐火れんがは損耗し落下する。その後、残ったステープ本体も削られて徐々に薄くなる。

シャフト部のステープは1970年前後に日本で使われ始めたが、当時はステープの材質や冷却能力が十分でなく、鋳物及び冷却配管の破損などがあったため、高炉の寿命も5年程度と短かった。その後、本体材料に球状黒鉛鋳鉄を採用したり、冷却方式やパイプ形状の改良などを経て、冷却能力を強化してきた経緯がある。

製鉄所の耐火物リサイクル技術

製鉄所の高炉や転炉などの稼働設備で、耐火物の損傷が進行して操業の安定性が確保できなくなると、使用されている耐火物は解体後廃棄される。近年では、環境対策として使用済み耐火物の発生量の低減、およびリサイクルの重要性が指摘されてきた。

しかし製鉄所の使用済み耐火物には不純物の混入が多く、新規耐火物に添加し再利用する際の添加率は約10～20%に留まり、リサイクル率を高めるのに限界があった。

そこでリサイクル率向上のため、使用済み耐火物に含まれるスラグや地金の選別、付着物除去を行い、不純物を含みやすい中粒や微粉までリサイクルできるようなシステムが開発された。こ



使用済み耐火物の破碎・粉砕プロセス(新日本製鉄(株)大分製鉄所)

れにより、新たに購入した耐火物への添加率を最大約80%まで大幅に向上し、埋め立て廃棄量を削減することが可能となった。

資料提供:新日本製鉄(株)

しかし従来の構造では、操業開始後2～3年で操業不安定となり、7～8年でれんがやステープを貼り替える大規模改修工事が必要となっていた。そのため、高炉の安定操業と長寿命化が図れる耐熱構造の開発が求められていたが、耐熱れんがの損耗や高炉内壁の形状変化が、操業中にどのように進行するかはわしくはわからなかった。最近では、模型実験と数値シミュレーション解析を用いることにより、変化のようすが細かくわかるようになった。

このような背景の中で開発されたのは、耐火物一体型ステープである。このステープでは、鑄鉄製の本体に鋼製の冷却パイプを鑄ぐるみしてあり、炉内側に耐熱れんがを一体化している。これまでのステープでは、耐熱れんがが落下した後は、ステープの突起部分が炉内側に張り出して内壁の形状が変化し、高炉の操業が不安定になってしまう問題があった。一体型ステープ

は、耐熱れんがをすべてステープと鑄込み、れんがを脱着しにくくすると同時に突起部をなくしているのが特徴である。耐摩耗性の高い鑄物部分を厚くして、ステープの長寿命化も図られている。また施工工事でも現場でれんがを積む必要がなく、工事工程の短縮にも寄与する技術である。なお最近では、鑄鉄ステープだけでなく、熱伝導性に優れた銅ステープも使用されている。

総合技術として進化する耐火物技術

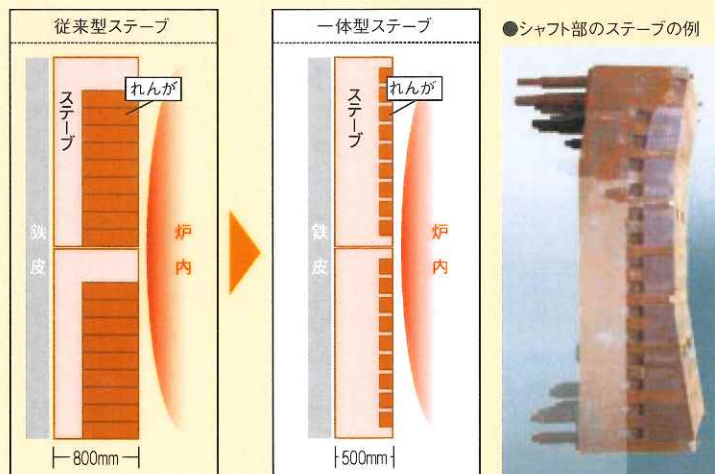
オイルショック以降、耐火物技術には、省資源、省エネルギー、環境保護といった時代の要請に応えることが求められるようになってきた。そして、耐火物の技術は、材料開発が中心だった時代から変化し、施工技術、炉構造設計、計測、操業技術などを含めた総合技術となっている。

今後の課題の1つが環境問題である。高炉に限らず鉄鋼業で使用する耐火物では、リサイクルへの取り組みが求められる。これまでも使用後の耐火物は路盤材などにリサイクルされてきたが、今後はさらにリサイクル率を高め、廃棄物を減らすための技術が必要となるだろう。

耐火物技術は、設備の生産性や操業安定性の向上、長寿命化のための重要な技術として、進歩してきた。日本の鉄鋼業が進んできたゆめ技術発展に支えられて、現在の優れた耐火物技術が築かれたと言っても過言ではない。

■シャフト部に使われる耐熱れんが一体型ステープ

従来構造よりれんがを冷却する能力が大きいため、耐熱れんがの損耗が小さい。



●取材協力 新日本製鉄(株) ●文 杉山 香里