

製鉄プロセスを支える耐火物

高温プロセスを活用する製鉄業を支えるのが耐火物である。あらゆる炉で使用され、一つの製鉄所で採用されている耐火物の種類は数千種類にも及ぶ。熱から設備を守り、設備の長寿命化や安定操業に貢献するだけでなく、省エネルギーにも寄与する。今号は大量の耐火物を使用するコークス炉、加熱炉を中心に紹介する。

コークス炉は複雑形状の珪石れんがを多数積み上げて築造している。

出典：2006年『品川技報』

いっそう高まる耐火物への要求

近年、自動車に多く採用されている高張力鋼板、船舶等で活躍している耐腐食鋼板や耐孔食鋼板、橋梁等に使用されている耐候性鋼など、日本の鉄鋼材料の高機能化は著しく進展している。このような高機能鋼の製造を実現するために、製鉄プロセスにおける温度条件や操業条件は複雑化している。また難製造鋼種の生産比率も増加しているうえに、劣質原燃料の使用が拡大し、耐火物の使用条件はいっそう過酷になっている。これに対応した耐火物の開発や品質の安定化、補修技術の開発が求められている。

また環境問題の高まりから、製鉄プロセスにおける省エネルギーやCO₂排出量削減は大きな課題となっており、断熱保温機能や蓄熱・熱回収機能等を発揮する耐火物に対する期待が大きくなっている。

資源に乏しい我が国においては、耐火物の原料資源不足が深刻となっており、耐火物の輸入量は近年、増加し、中国からの輸入に依存している。汎用性の高い一般的な焼成れんがや中級グレード以下の耐火物、またコークス炉や熱風炉の建設に使用される珪石質れんが等は輸入されているが、鉄鋼材料の品質に大きな影響を与える連続 casting ノズル等の耐火物や輸入品に対して競争力のある不定形耐火物、一部の高級グレードの耐火物などは現在も国内で生産されている。

限られた資源の有効活用を図るため、使用済み耐火物のリサイクルが重要となっており、リサイクルできればライフサイクルアセスメント(LCA)としての省エネルギーにも

貢献する。そのためこれまで廃棄されていた耐火物の再利用が進展している。

コークス炉の良否を左右する珪石れんが

製鉄プロセスにおける高炉操業に深く関係しているのがコークスである。コークスはほとんどが鉄鉱石の還元剤として使用されるため、高炉操業の要求を満たすようにつくられている。

コークスは石炭を1000~1200℃で乾留(蒸し焼きにして、揮発成分を追い出す)することで製造される。コークス炉の構造を図1に示す。原料となる石炭を装入する炭化室とガスバーナーで加熱される燃焼室が交互に並んでいる。原料となる石炭は上部の装入孔から投入され、加熱されている燃焼室から炉壁を介した熱伝導で炭化室に熱が伝わり、石炭が乾留される。乾留されると、石炭は軟化溶融して一体化しコークスケーキとなる。コークスの乾留が完了し炭化室の両側のドアが開放されると、一方から押出装置が装入され、もう一方にコークスが押し出される。

コークス炉で最も重要となる炭化室と燃焼室の耐火物には、珪石れんがが使用されている(図2)。コークス炉全体でかなりの量の珪石れんがが使用されるため、珪石れんがの品質がコークス炉の良否を左右するといっても過言ではない。珪石れんがは700℃以上でほとんど熱膨張がなくなり変形しにくい。加えて熱間強度が高く、荷重軟化点が高い等の特性もある。熱間強度が高いとコークス押し出し時や石炭装入時のれんがの摩耗量が少なくなる。荷重軟化点

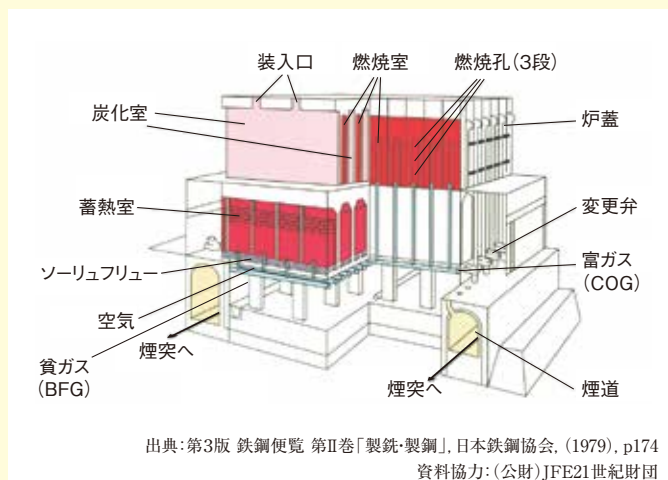


図1 コークス炉の構造



製造には高度な焼成管理が必要となる。

資料提供: 品川リファクトリーズ(株)

図2 コークス炉に使用される珪石れんが

とは荷重(多くの場合0.2 MPa程度)をかけながら温度を上げていった場合にれんがが変形する温度を指し、これが高いと、高温まで優れた耐クリープ性を示すと類推され、より高い温度の操業でも炉の健全性を保つことが予想される。

珪石れんがの主原料は石英(SiO_2 , シリカ)で、石英に石灰などの転移促進剤を加えて混練し、成形した後に1450℃程度で焼成して作られている。石英は他成分と比

較し熱伝導率が低いため、より緻密化し、炭化室のれんが厚を薄くするなどして、熱伝導率を向上させることが重要となっている。また、炭化室炉壁のれんがは高い石炭膨張圧を受けていることに加え、石炭装入やコークス押し出しに伴う摩耗や剥離を生じる。そのため、珪石れんがの低気孔率化が図られている。低気孔率化することで熱伝導率が高くなり、これによって燃焼室の熱をより効果的に乾留

◆新しいコークス炉用耐火物の開発

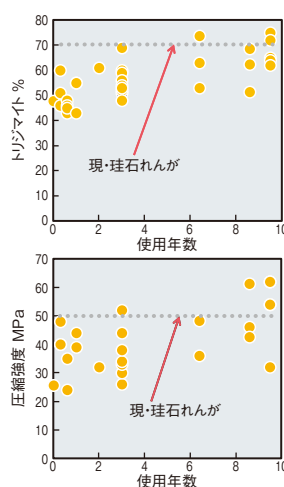


図3 熱間補修用れんが



図6 熱間補修用プレキャスト
ブロック用シリカ質キャストابل

出典: 2016年『品川技報』



使用年数が経過するとともに組成と特性が珪石れんがに近づいていく。

図4 熱間補修用れんがの
使用年数とトリジマイト量・圧縮強度



図5 新しい窯口吹付け材

出典: 2016年『品川技報』

資料提供: 品川リファクトリーズ(株)

に使用できる。また低気孔率化により強度が高くなり、これにより摩耗抵抗性が上がり薄くすることができる。石炭の膨張圧による亀裂の発生・進展に対する抵抗性も高まる。強度を向上することで、石炭の押し出し時に生じる摩耗や剝離に対する抵抗性も高まる。

これからのコークス炉のために

かつては30年と言われたコークス炉は、現在では40年以上に長寿化している。長年の使用でれんがは少しずつ損傷し、特に炭化室炉壁の損傷は激しい。損傷したれんがの補修はコークス炉の生産性を維持するため短期間で作業が求められる。高い信頼性が求められる補修部には熱間補修用れんがが開発されている(図3)。熱間補修用れんがは熱間でれんがの積替えを行っても亀裂が入らず急速昇温が可能で、さらに特筆すべきは使用年数が経過するとともに、組成と特性が珪石れんがに近づいていく性質があり、高い信頼性を得ている(図4)。焼成により石英は相転移で結晶構造が変化し、クリストバライトになった後にトリジマイトになる。熱間補修用れんがはトリジマイト量を調整しており、施工後、炉の熱によりトリジマイトの生成が進むことで珪石れんがに近づいていく。

一方、大気に触れるコークス炉の外側は、温度勾配に伴う熱応力が発生するため一定頻度で耐火物の更新が行われている。例えばコークス炉炭化室枠部分の窯口れんがはドアブロックの開閉、コークスの排出による熱衝撃と摩耗損傷が繰り返される。特にコークス排出側ではれんがの割れや目地部の損傷が激しい。補修はドアブロックを開閉して吹付け補修が行われるため、作業者の負荷が高く、短時間での作業が求められる。そのため幅広い温度範囲で優れた接着性を有した吹付け補修材が開発されている(図5)。

そもそもコークス炉を新設または補修する際は、複雑形状のれんがを多数組み合わせで築造される。コークス炉のれんが積みは高い精度が要求されるが、熟練した築炉技能者は不足しており、また複雑形状のれんがの製造には形状にあった成形技術や工程管理が必要となる。そのため工程の簡略化を目的に、熱間補修用プレキャストブロック用シリカ質キャストブルが開発されている(図6)。キャストブル(cast+able=castable)とは、コンクリートのように水で混練して所定の鑄型に鑄込んで成形した耐火物で、時間が経過すると硬化し、鑄型から取り出すことができる。通常のれんがの場合、多くの成形枠が必要となり、また形状によって最適な成形方法が異なるが、キャストブルはコンクリート状にしたものを鑄型に流し込むだけなので、工程数が軽減できる。また複雑な大型形状が成形できるため、現場ではクレーン等で設置するだけで短時間施工が可能となる。キャストブルは複雑形状でも亀裂発生が認められず、寸法精度が高い。緻密質で良好な強度特性を持ち、熱膨張が小さく、熱間積替え等の補修に適している。

近年、求められている環境への取り組みとしては、コークス炉にエネルギーの有効利用を図るCDQ(Coke Dry Quenching system)が導入されており、CDQ炉の内張り耐火物はコークスによる摩耗で損傷されるため、耐摩耗性に優れた高アルミナ質れんがが使用されている。

加熱炉の省エネルギーを図る耐火物の断熱性向上

近年、鉄鋼材料の高機能・高品質化に伴い、操業負荷が大きくなっている設備の一つが熱間圧延の加熱炉である。加熱炉はスラブ等の半製品を加熱して圧延工程に供給する役割を担っているが、圧延製品の板厚、板幅寸法精度に

【スキッドパイプ】

- ・稼働面側：耐火キャストブル、高温用断熱キャストブル等
- ・水冷側：断熱キャストブル、シート用断熱材等

【側壁】

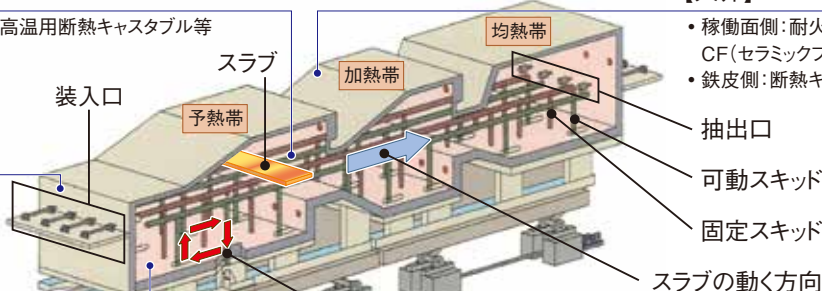
- ・稼働面側：耐火プラスチック、耐火キャストブル、CF(セラミックファイバー)等
- ・鉄皮側：断熱キャストブル等

【炉床】

- ・耐火れんが、耐火キャストブル等

【天井】

- ・稼働面側：耐火プラスチック、耐火キャストブル、CF(セラミックファイバー)等
- ・鉄皮側：断熱キャストブル等



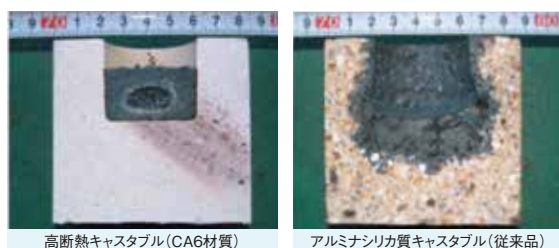
可動スキッド(図中の緑のスキッド)の動く流れ

- ①可動スキッドが固定スキッドより高く上ることにより、スラブを持ち上げる
- ②可動スキッドが進行方向に移動することで、スラブも移動する
- ③可動スキッドが固定スキッドより下に沈むことで、スラブが固定スラブに支えられる。
- ④可動スキッドが初期位置まで戻る

図7 加熱炉の構造と各所に使用される耐火物

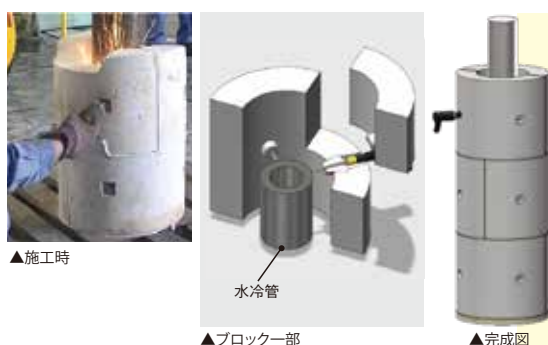
資料提供：黒崎播磨(株)

◆加熱炉用耐火物の開発



写真右の従来アルミナシリカ質キャストابلに比べ、写真左のCA6キャストابلは耐スケール性に優れる。

図8 高断熱キャストابل(CA6材質)と従来品の侵食試験結果



分割構造(膨張代を設置)のため構造体が安定し、亀裂が入り難く、耐用向上および工期短縮・工費削減が可能

図9 高断熱キャストابل(CA6材質)を適用したスキッドパイプのプレキャストブロック化

出典:2021年「Krosaki Harima Technical Report」

悪影響を及ぼす低温部をできるだけ低減し、スラブをより均一に加熱することが求められている。

現在、主流となっている加熱炉の仕組みは、可動スキッドを矩形状に動かし、スラブを固定スキッドと可動スキッドに交互に乗せながら移動させつつ加熱する。加熱炉内はすべて耐火物に覆われており、各部に使用されている耐火物を図7に示す。加熱炉は900℃程度から1300℃超まで、また修繕時には常温まで冷却され、温度変動が大きい。使用される耐火物は過酷な環境に曝されるため、耐熱性、耐熱衝撃性が求められる。

特に1300℃に達するスラブを支えるスキッドは、耐熱のため内部に水冷管を備えており、この水冷抜熱損失の割合は炉体放熱の約4倍となっている。省エネルギーのため断熱性向上が求められており、特にスキッドの断熱向上が課題となっている。

そこで高耐熱性な微細多孔質骨材 $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ (以降、CA6と記す)を使用した断熱キャストابلが開発された。加熱炉はスラブから発生するスケールがスキッド上部に堆積す

耐火物	加熱炉適用時期	熱伝導率at1,000℃ (W/m·K)
耐火レンガ	1940年代～	1.2
プラスチック耐火物	1970年代～	1
アルミナ-シリカ系 キャスタブル	1970年代～	1
アルミナ-シリカ系 断熱キャストابل	1980年代～	0.3～0.5
耐火セラミックファイバー	1980年代～	0.3
高断熱キャストابل(CA6材質)	2000年代～	0.3～0.4
高断熱キャストابل(CA6材質)プレキャストブロック	2010年代～	0.3～0.4

図10 加熱炉用耐火物開発の変遷

資料提供:黒崎播磨(株)

るため、スキッドは耐スケール性が求められるが、CA6は石英をほとんど含有しないため、スケールとの化学的反応が少ない(図8)。断熱性に優れ、耐スケール性が高いため、CA6キャストابلは近年、多くの加熱炉で採用されている。

断熱性の高いCA6キャストابلだが、高温での熱膨張が大きく、流し込みによる一体構造では膨張割れによる剥離、脱落が起こり、耐用性が低い。そこでCA6のプレキャストブロック化が図られている(図9)。これは隣り合うブロックの間に膨張代を設け、分割構造とすることで構造体が安定し、亀裂が入りにくくなる。この新しい工法と従来の工法を比較すると損失熱量削減率が約80%にも及ぶことが試算されている。また従来の工法に比べ工期短縮を図ることができ工費の削減が可能である。

今後、省エネルギーやCO₂等の排出削減はますます重要な課題となり、耐火物の断熱性や耐用性向上はより強く要求されると予想される。加熱炉に使用される耐火物は断熱性向上を目指し、これまで低い熱伝導率が追求されてきた。図10の加熱炉用耐火物開発の変遷をみると、1960年頃は熱伝導率の比較的高い耐火レンガが使用されていたが、その後、熱伝導率の低いアルミナ-シリカ系のキャストابلが開発され、2000年代初頭にはさらに熱伝導率の低いCA6キャストابلが登場し、広く普及している。今後もこの傾向は続き、さらなる省エネルギー性、高耐用性を目指した開発が進むと考えられる。

日本の鉄鋼業を長きにわたり支え、操業条件の変化に対応してきた耐火物。鉄鋼材料の高機能化は、耐火物の進歩なしには達成できない。環境意識の高まりから、省エネルギーやCO₂排出量削減など、従来にも増して耐火物に対する要求は高まっており、今後の展開が期待されている。

●取材協力 品川リフラクトリーズ(株)、黒崎播磨(株)