

コークス炉を支える新技術



高炉製鉄に不可欠なコークス炉は、石炭からコークスを作るための巨大な構造物である。現在日本で稼動しているコークス炉のほとんどは、建設から約40年が経過しており、今後一斉に更新時期を迎えることになる。そこで次世代のコークス炉開発や、現在のコークス炉寿命を延ばすための技術開発が進められている。

「SCOPE21」実用化第1号の新日本製鐵(株)大分製鐵所第5コークス炉 (資料提供:新日本製鐵(株))

更新時期近な日本のコークス炉

コークスは、高炉で鉄を生産するための熱源であり、また鉄鉱石の還元材として不可欠である。

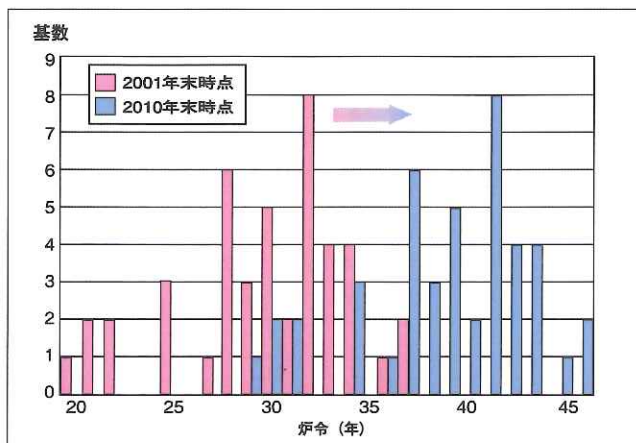
日本古来の製鉄法である「たたら製鉄」では、砂鉄を原料に、木炭を還元材として使用し、和鉄の生産が行われてきた。しかし、鉄を工業生産するには大量の木材が必要となったことから、17世紀英国では木材より高強度で熱量の大きい石炭が使われ始めた。その後1735年には、英国でコークスを用いた製鉄が初めて行われた。

日本では、1894年に釜石で、初めてコークスによる高炉操業に成功した。このコークスは、北海道夕張炭から製造したものであった。しかし当時、国産の石炭から製造したコークスの品質は悪く、黎明期にあった国内製鉄業では、高炉操業が不調に陥ることもあったという。

それほど、高炉操業とコークスは密接な関係にある。そして、

コークスを生産するコークス炉は、製鉄工程の最も上流にあるため、コークス炉の耐久性や生産効率の低下は、その後の工程すべてに影響する重要な問題であり、長年にわたり研究が続けられてきた。

■日本のコークス炉の炉令

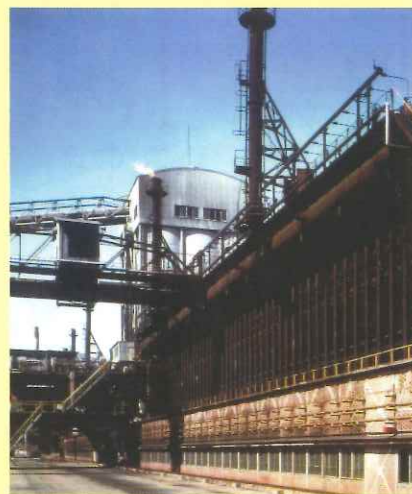
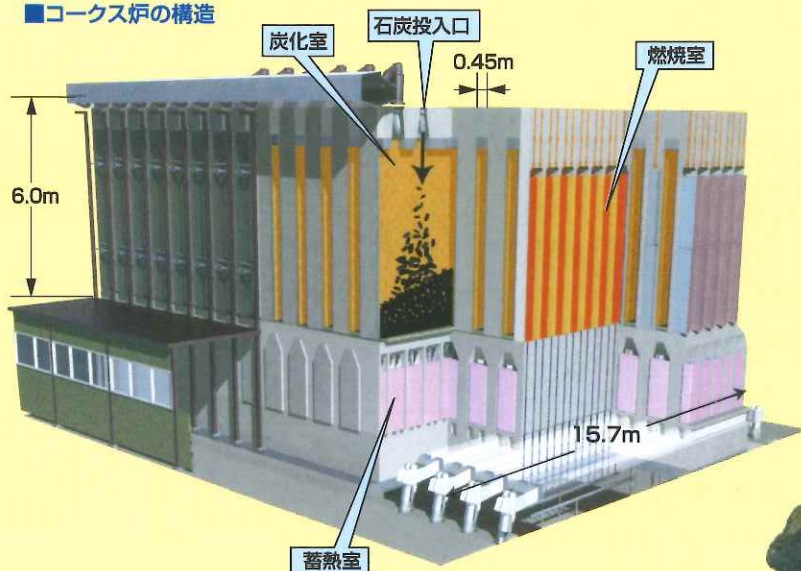


コークス炉の構造

コークス炉は、大量の耐熱れんがでできた、長さ約150mに及び巨大な構造物である。炭化室と燃焼室は交互に配置され、コークス炉1基あたり約100室の炭化室がある。また下部炉体には、排熱回収のための「蓄熱室」がある。操業時には、燃焼室の温度は1200～1350℃、蓄熱室は900～1200℃となる。

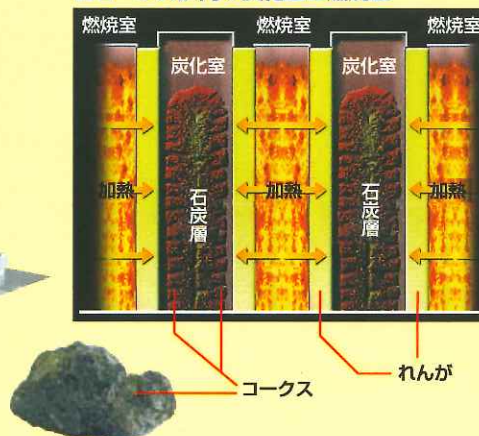
炭化室や燃焼室に使われるれんがはケイ石(SiO_2)れんがであり、高温下でも優れた耐圧強度や熱伝導性を発揮する。またケイ石れんがは、高温になると容積が安定するが、低温になると急激に収縮する性質があり、れんがに亀裂が入るおそれが生じる。そのため、コークス炉は一度火入れした後は何十年も高温を保ちながら、運転を続けるのである。

■コークス炉の構造



長さ約150mに及びコークス炉の外観

■コークス炉内の炭化室と燃焼室



(資料提供:新日本製鐵(株))

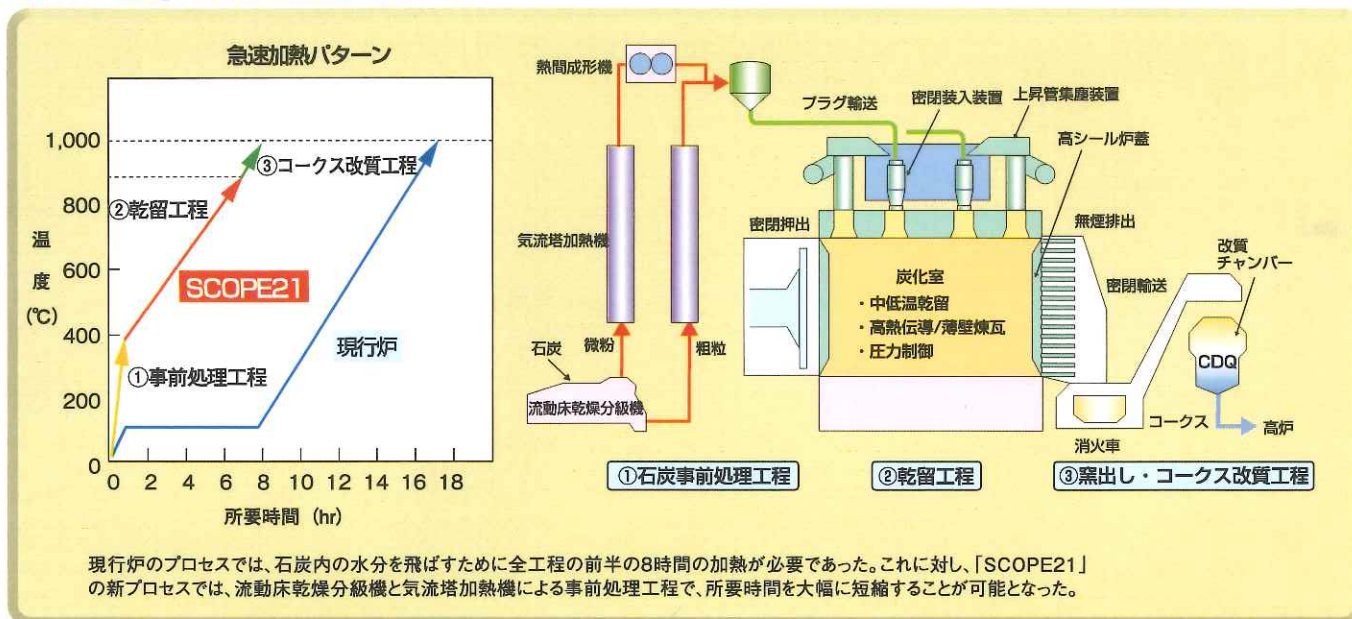
コークス炉には、石炭を入れる「炭化室」と、ガスをたいて熱を供給する「燃焼室」がある。石炭からコークスを作るには、石炭を炭化室の中に密閉し、燃焼室からの熱(約1200℃)で間接加熱し、約20時間蒸し焼きにする。この工程を「乾留」と呼ぶ。この間、石炭は、400℃以下では石炭の状態を保っているが、350℃付近で熱分解を開始し揮発分を発生し始める。400℃以上で熱分解は盛んとなり多量の揮発分を放出し、石炭は軟化溶融して分子の再配列が起こり、500℃付近になると重縮合により溶融物は固化し、セミコークス組織が形成される。さらに温度が上がると熱分解ガスとして水素を放出しつつ重縮合が促進され、900℃付近でコークス化が完了する。この間、コークス炉ガス(水素、メタンなど)やタールなども生成する。タールを蒸留することで軽油やピッチが得られる。乾留されてできた赤熱コークスは、炭化室両側の炉蓋を開放して外へ押し出される。押し出されたコークスは

CDQ(詳細は後述)で乾式消火され、排熱が利用される。

コークス炉の寿命は約40年といわれている。現在日本で使われているコークス炉のほとんどは高度経済成長期に建設されたものです。すでに40年近く稼働されており、長いものでは建設後46年に達しているものもある。そのため、今後一斉に更新時期を迎えることになる。

コークス炉が老朽化すると、炉体の損傷が進み、熱原単位が悪化して熱効率が低下する。その結果、多くのエネルギーが必要となり、CO₂排出量も増加してしまう。それならばコークス炉を新設したいところだが、コークス炉を1基建設するためには数百億円の費用がかかり、非常に高価である。鉄鋼各社では、目前のコークス炉建設への負担を軽減するために、さまざまな検討を重ねてきた。代表的なアプローチは2つあり、それは、①次世代のコークス炉の研究と②コークス炉の寿命を延ばす技術の開発である。

「SCOPE21」のプロセスと急速加熱パターン



(資料提供:新日本製鉄(株))

次世代コークス炉技術で生産性を大幅に向上

まず、次世代コークス炉開発の取り組みについて紹介する。

鉄鋼メーカー各社が協力して、次世代コークス炉「SCOPE21」*開発プロジェクトを推進した。経済産業省が支援したこのプロジェクトは、(社)日本鉄鋼連盟と(財)石炭利用総合技術センターを開発母体として、鉄鋼各社やコークス専門メーカーの11社が協力して行った。研究期間は1994年から2003年度までの10年間で、調査研究や要素技術研究の段階を経て、パイロットプラントを建設し試験操作を行なった。プロジェクト終了後の実機第1号は、新日本製鉄(株)大分製鉄所内に建設され現在稼動中である。今後は、この研究成果を基に、各社が実用化への検討を進めていくことになる。

SCOPE21の新プロセスのキーワードは、生産性向上と資源対応力の2つに集約される。

コークス炉の生産性を上げるには、コークスの乾留時間をいかに減らすかが大きな課題であった。従来炉の乾留時間は20時間程度であるが、前半は炭化室中央までのすべての石炭の水分を飛ばすため、100℃で8時間の加熱を要する。その後徐々に温度を上げ、最終的に1000℃にまで達する。石炭は熱伝導性が悪く、燃焼室からの熱を受けても、壁面に接しているところとそれ以外では温度に差がある。そこで乾留工程では20時間という長い時間をかけて、ゆっくり乾留していた。

これに対し新プロセスでは、石炭の乾燥工程を事前処理に置き換えた。事前処理では、流動床乾燥分級機と気流塔加熱

機を使用して石炭の温度をわずか数分で400℃まで加熱し、これを炭化室に装入して、400℃から1000℃まで加熱する。100℃からの加熱と比べ所要時間は大幅に短縮され、事前処理と合わせて約8時間で完了する。

新プロセスでは大幅な時間短縮を実現し、コークス炉を高温に保つために必要な熱量が少なくてすむ。巨大なコークス炉は運転中に外に放散する熱量も莫大であり、新プロセスは大きな省エネルギー効果がある。具体的には、原油換算で年間約10万kl、CO₂換算で約40万tの省エネルギー効果が期待されている。

新プロセスを導入した新日本製鉄大分5号機では、コークス炉の回転率は185%まで向上したという。

新プロセスで低品位炭の利用が広がる

このプロセスのポイントとなる事前処理では、気流塔加熱機を使用する。細長いパイプ状をしたこの装置では、高温ガスにより石炭の温度を5000℃/分の速さで昇温することができる。

この事前処理により、石炭の改質が図れることが明らかになった。コークスには、高炉の中でガスや溶鉄の通路を確保する役割があるため、つぶれにくいような強度が求められる。このようなコークスに適した原料は、粘結性に富む強粘結炭である。強粘結炭は値段が高いので、粘結性が低く低品位だが安価な非微粘結炭も原料として使用する。実際には、これらの原料を混合して使用するが、従来は非微粘結炭の混合比率は多くても20%程度であった。しかし新プロセスでは、急速昇温により石炭

*SCOPE21: Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st Century

*DOC: Doctor of Coke Oven

の改質が図れることが明らかになり、混合比率を50%まで高めることができ、各種の原料に対応できる資源対応力が高まったといえる。なお、この研究のコンセプト構築には、鉄鋼協会「コークス製造のための乾留制御部会」で行われた、石炭を加熱する昇温速度を変化させた場合の粘結性変化に関する研究成果が取り込まれている。

1億tの粗鋼を生産するには0.4億tのコークスが必要であり、その原料の石炭は0.6億tが必要である。日本ではその全量を輸入に依存しているため、原料炭の安定確保はきわめて重要な課題である。一般に石炭は、比較的埋蔵量が豊富と言われているが、コークス用に使用できる原料炭はその1割程度だといわれている。そのため、今後は非微粘結炭などのいわゆる低品位炭から、コークスを製造する技術への期待が高まっており、その意味からも新プロセスは大きな注目を集めている。

炭化室炉壁を精度よく診断する技術

現在のコークス炉の寿命をできるだけ伸ばすための技術も開発されている。その例として、コークス炉炭化室診断・補修技術を紹介する。

コークス炉の炭化室内側の炉壁は、原料炭を装入したり、でき

あがったコークスを押し出したりするときに、炉壁に負荷がかかり、れんががはがれ落ちてしまう。さらに炉壁に凹凸ができるとコークスを滑らかに押出すことが難しくなり、最終的には炉壁に穴が空き、使用できなくなってしまうおそれがある。このような炉壁の損傷の度合いはこれまで、オペレータが目で見えて判断していた。しかし、炭化室の間口は45cm、高さが6mと細長く、オペレータは炭化室の外から内部をのぞき見ることはできない。しかも炭化室内部は1000℃以上の高温であるため、損傷状況を確認するのも補修するのも容易ではなかった。

そこで開発されたのが、コークス炉炭化室の炉壁の状態を高い精度で診断し、効率よく補修する技術である（新日本製鐵（株）「DOC」*）。

まず診断にあたっては、ロボットを使用した診断装置を開発した。この装置により炭化室の炉壁を観察し、mmオーダーで凹凸の状態を調べることが可能になった。診断装置には、光検出素子を柱状に一列に1000素子以上配列した特殊なラインCCDカメラを配置し、高温内で作業するため水冷断熱装置を搭載している。この装置は炉壁を1mmピッチでスキャンし、片側の炉壁全体をわずか4分で観察することができる。ちなみに片側の炉壁の面積は畳50畳分とほぼ同じである。また装置には、ラインCCDカメラと並んで柱状の耐熱ミラーが付いている。ミラーの角度を調整することによって、炉壁を垂直方向から観察することが可能に

コークス炉炭化室診断補修技術

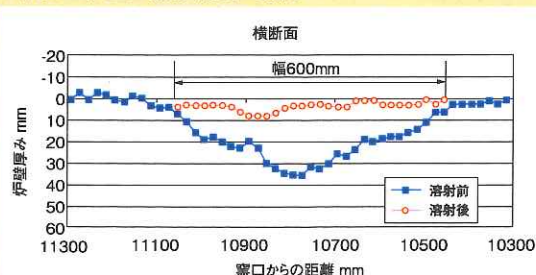
●開発されたラインCCDカメラ装置



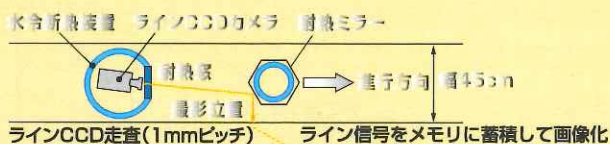
炭化室に診断装置が入るところ

ラインCCDカメラ
耐熱ミラー

●炭化室炉壁の補修前後の状況



●ラインCCDカメラの構造



新たに考案した撮像方法での鮮明な炉壁画像

ラインCCDカメラと並んで柱上の耐熱ミラーが設置されている。ミラーの角度を調整して、炉壁に対して垂直に観察することができる。



補修マニピュレータが炭化室に入るようす(試験運転時)

(資料提供:新日本製鐵(株))

なった。このようにして得られた観察データを画像化する。また、このカメラは壁面の凹凸形状を計測する機能も持っており、損傷の正確な位置や損傷の深さなどを立体的に把握することができる。

開発初期にも撮影装置は実用化されていたが、炉壁を斜めから撮影していたため、診断の精度があまり高くなかった。新しい診断装置では炉壁の真正面から撮影することができるので、鮮明な画像が得られ、診断精度を格段に高めることができた。

人間に替わり補修マニピュレータが作業

炉壁の正確な診断結果に基づき、次に補修が行われる。

従来の補修は、耐火性の粉体を燃焼ガスとともに損傷部に吹き付け、局所的な補修を行う溶射が行われていた。また補修作業は、オペレータがコークス炉の前から、長いアームに取り付けられた溶射ランス（槍のような長い棒）を用いて行っており、人の勘に負うところが大きかった。最大10mの長さがある溶射ランスは、作業時にたわんだり振動してしまい、先端の溶射ノズルの正確な操作が難しく、仕上がりの精度は高くなかった。

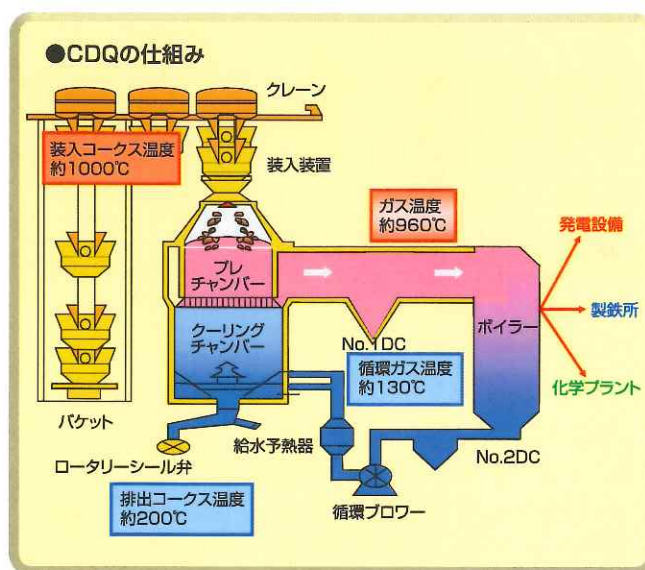
これを解決したのが新開発の補修マニピュレータであり、これにより複雑で正確な作業が可能になった。この装置は、1000℃を超える高温環境の中で作業するため、断熱材に覆われた水冷パネルによる高剛性外骨格構造となっており、先端部に非接触式の炉壁形状計測装置と溶射バーナーが取り付けられている。溶射バーナーは、狭い炭化室内でも炉壁との間隔を十分確保するうえ、サーボモーター駆動の関節を動かして±1mmの位置決め精度で補修箇所の位置に正しく到達し、この位置を維持することができる。また損傷の深さに応じてバーナーの操作速度を制御することにより、仕上がりの平坦度が±5mmという高い精度を可能とした。

新しい炭化室診断・補修技術の導入により、炉体を受ける機械的負荷は減少し、コークス炉全体の熱効率の悪化を防ぐことができ、さらにCO₂排出量抑制に大きな効果をもたらすことが期待されている。

この技術は、1000℃を越す高温かつ非常に狭いコークス炉の内部の損傷診断と補修を、自動で、高精度かつ効果的に短時間で行うことのできる技術をシステムとして確立したことが評価され、2008年度大河内記念生産賞を受賞している。

コークス炉に導入される省エネ技術

コークス炉は、稼働中は1200℃という高温を維持する必要があり、エネルギー多消費型の設備である。そのため、コークス炉の



省エネルギー技術の研究も数多く行われている。その代表的な技術の1つがコークス乾式消火設備CDQである。

CDQ (Coke Dry Quenchingの略) は、もともと旧ソ連で開発されたものである。日本では1973年の石油危機の後、鉄鋼業が省エネルギー対策に取り組んだときにCDQを技術導入し、1976年に国内第1号機が稼働開始した。

CDQは、赤熱したコークスを不活性ガスで冷却し、高温になった不活性ガスをボイラーにより熱交換することによって蒸気を得る設備である。得られた蒸気は、製鉄所内プロセス蒸気として活用したり、発電を行い電力を回収したりする。

日本の第1号機の規模は56t/hであったが、その後大規模CDQの技術が開発され、現在では最大処理量180～200t/h規模となり、処理能力の向上が図られている。海外において、最近建設されるコークス炉ではCDQが標準的な設備になっており、中国などで建設されている多くのコークス炉にCDQが装備されている。

また、廃プラスチックリサイクルもコークス炉の環境技術の1つである。

事前処理された廃プラスチックは、コークス炉の炭化室に充てんされる。充てん物は加熱、乾留されるが、ほとんどのプラスチックは250～480℃でガス化し、得られた高温ガスは、常温で高カロリーガスと油分に分離され、製鉄所内で再利用される。

このように、コークス炉の省エネルギーや環境対策のための技術開発は、これまで継続的に行われてきた。しかしながら、日本では最近コークス炉の新設は行われておらず、現場技術者の高齢化が進み、技能伝承などの課題も指摘されている。このような問題を解決し、さらに新しい時代にふさわしい環境性能を持つコークス炉が、今後建設されていくことを期待したい。