

コークス炉炭化室炉壁補修装置の開発

Development of Repair Apparatus for Coking Chamber Wall of Coke Oven

小林 信太郎* 中嶋 淳
Shintaro KOBAYASHI Jun NAKASHIMA

抄 録

現在稼働中のコークス炉の多くは、老朽化に伴い炉壁煉瓦の損傷が進行している。新日鐵住金(株)はコークス炉炭化室診断補修装置(DOC)を開発し、全社のコークス炉に導入してきた。この補修装置の高機能化を目指して近年取り組んでいる、炉壁下部の補修や破孔の補修など、従来は補修が困難であった損傷形態に対する補修装置の開発について述べた。

Abstract

Coke oven batteries in operation for many decades face serious problems resulting from chamber wall damages. Previously we have developed an apparatus named “DOC” to diagnose and repair walls. This paper reports recently developed advanced technologies of the DOC for repairing more serious damages: defects of bricks close to the bottom and broken holes of the walls.

1. 緒 言

国内のコークス炉の大半は、1960～1970年代の高度経済成長期に集中的に建設されたものであり、稼働年数が40年を超えるコークス炉が多数ある。このような長期間稼働しているコークス炉では、炉体の劣化が進行し、生産能力の低下やエネルギー効率の悪化が顕在化している。しかし、コークス炉の改修には多額の投資が必要になる。また高度な煉瓦積み技術を有する築炉工ら職人の高齢化、要員不足の問題もある。このため、既設のコークス炉の設備寿命を延命させることは、鉄鋼メーカー、およびコークス業界に共通した課題である。

この課題に対し、これまで新日鐵住金(株)はコークス炉炭化室診断補修装置(Doctor of Coke oven, 以下DOC)を開発し、全社コークス炉に展開してきた。これにより、炉壁の損傷状況を定量的に診断することが可能になり、また人手では困難であった炉中央の炉壁損傷部の正確な溶射補修が実現された。

本稿では、DOCの高機能化を目指して近年取り組んでいる、従来は補修が困難であった炉壁の下部や、破孔の補修を行う装置の開発について述べる。

2. 老朽化したコークス炉の状況

コークス炉は、炉を形成する珪石煉瓦が600℃以下に冷却されると、急激な体積変化によって損傷し煉瓦構造体の強度が低下してしまうため、40年以上にも亘って常時1000℃を超える高温に維持されるという特徴がある。炭化室の炉壁は、日々の操業における石炭の装入やコークスの押し出し過程で、繰り返しの熱的な負荷や機械的な負荷を受け、煉瓦表面のスポーリングや割れ、損耗が発生する。またその煉瓦表面にカーボンが付着し突起となるため、炉壁表面は経年的に凹凸が増大する傾向にあり、それがコークス押し出し時の抵抗となって押し詰りなどのトラブルの主な原因となる。さらに、押し出し力が大きくなると、それにつれてコークスを介して炉壁へ加わる圧力も増加することになり、煉瓦脱落の危険性が高まる。図1に典型的な炉壁の損傷形態を示す。炉壁の減肉は、複数の煉瓦におよぶ煉瓦表面の損耗であり、壁厚100mmのうち、10mm程度の減肉から、部分的に50mm以上の深いものまである。縦貫通亀裂は、千鳥配置の煉瓦の縦目地と縦割れが炉高方向につながってできた亀裂であり、亀裂の拡大に伴って煉瓦構造の強度を低下させる。煉瓦の角欠けは、煉瓦の縦貫通亀裂や水平目地に沿って煉瓦角が欠けたものである。近年一部の炉において、特に炉底に近い炉壁の下部の水平目地

* 設備・保全技術センター 機械技術部 機械技術開発室 主査 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

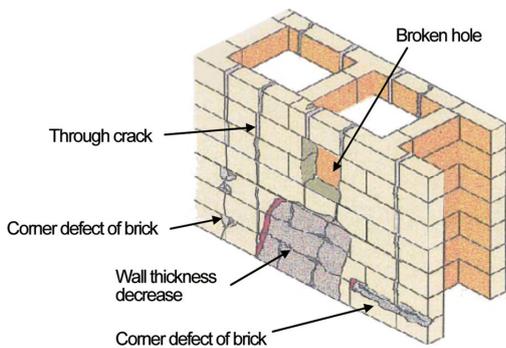


図1 炉壁の損傷形態
Typical damage patterns of the chamber wall

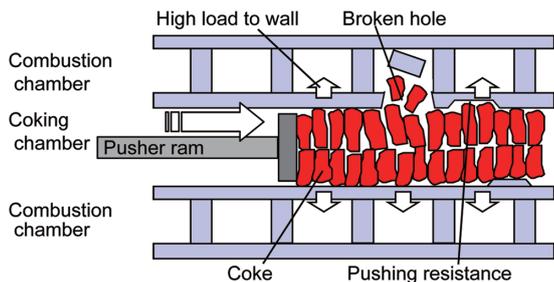


図2 破孔の発生メカニズム
Formation mechanism of broken hole

付近に、顕著な角欠けが進行していることが明らかになった。破孔は、炉壁減肉や縦貫通亀裂によって炉壁強度が低下した部分に、その炉壁強度を上回るコークス押し出し時の過大な圧力が加わった場合に、偶発的に煉瓦数枚にわたって脱落するものである。図2に破孔の発生メカニズムの模式図を示す。破孔は補修を行わないと当該窯の生産ができなくなる致命的な損傷であり、老朽炉では多発する傾向がある。

3. コークス炉炭化室診断補修装置 (DOC) の概要

コークス押し出し時の抵抗を低減するため、コークス炉の補修においては、炉壁の減肉や角欠けの位置と深さを定量的に把握し、凹部を平坦に補修することが重要である。しかし、炭化室は1000℃以上の高温であるうえ、炉幅が約0.4mであるのに対して、炉高は約6m、炉長(奥行き)は約16mと狭隘かつ巨大である。そのため、窯口から炉壁が損傷した部位を肉眼で覗いて把握し、人手作業で炉外から長尺の溶射装置を操作して平坦に仕上げることは困難であった。

そこで新日鐵住金は、コークス炉の診断と補修を機械化する装置としてDOCを開発し、社内のコークス炉に展開している。このため、DOCは熱間で炉壁全面の凹凸状態を高精度に計測し、炉壁の減肉部を溶射によって平坦化する。図3に装置の模式図を示す。

DOCは診断装置と補修装置から構成されている。診断装置はCCDカメラにより炭化室全高において高分解能で

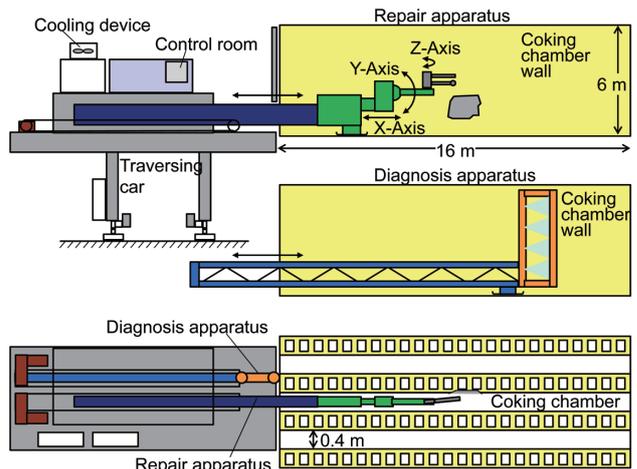


図3 DOCの概要¹⁾
Schematic diagram of DOC

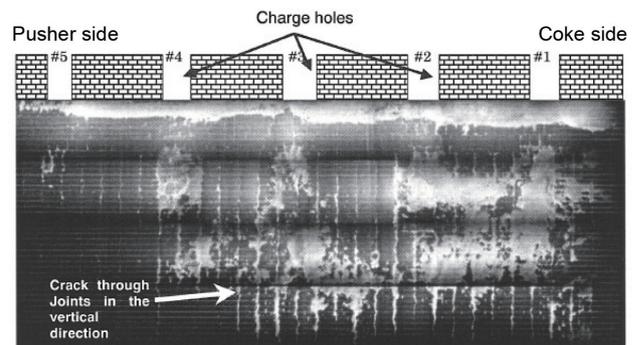


図4 DOCによる炉壁測定例¹⁾
Example of the diagnosis of the wall by DOC

の観察が可能である。またレーザ距離計により炉高方向の炉幅の測定を行い、壁の湾曲や大きな亀裂などのプロフィール測定を行うことができる。診断で損傷と判定された部位はその炉内位置および損傷深さを三次元の座標データで把握することが可能である。図4に診断装置による測定例を示す。炉壁には、斑状に減肉部やカーボンの付着部分が点在し、垂直方向の縦貫通亀裂が無数に存在することがわかる。

補修装置は、診断結果から得られた損傷部の情報に基づき、溶射で補修を行う。炉内に挿入する装置全体は断熱材と水冷ジャケットによって保護され、炉内に2h以上滞在することが可能である。この間に、損傷部の詳細な位置計測、炉壁に付着しているカーボンの焼却、溶射ノズルを動かす経路の作成を行ったうえで自動で溶射を実行する。搭載している溶射装置は、新日鐵住金で開発した火炎溶射装置である²⁾。施工能力は約20kg/hであり、高純度の珪石質溶射材を火炎中に吐出し、炉壁に到達するまでの間で熔融し火点中央に集束させて施工する。炉内における駆動機構は3軸のシリアルリンクマニピュレータであり、先端に搭載したレーザプロフィール計と溶射ノズルを任意の座標(X, Y, Z)に高精度に位置決めが可能である。炉長方向(X軸)

は2m程度のストロークで可動する直動機構であり、炉高方向（Y軸）および炉幅方向（Z軸）は旋回機構である。溶射の肉盛り量は溶射ノズルの走査速度で制御する。こうして場所によって深さが異なる減肉部を平坦にする。炭化室は炉長方向が長く炉幅方向が狭い空間であるため、DOCの機体の剛性は低くなるが、一定のストロークで高精度かつ高速な動作が可能なマニピュレータを炉底に着地する脚を設けて炉内で支持することによって、炉壁のどの位置に対しても高精度な補修を可能にしている。またZ軸は、炉幅が狭小であるため微小な角度の可動範囲であるが、これにより溶射ノズルと炉壁との距離を一定に保ち、高品質な溶射を施工することが可能である。このような高精度な位置決めが可能であることが、従来数mの長尺の溶射装置を炉外から片持ちで操作していた、人手による補修との大きな違いである。また運転室から自動で操作するため、作業環境や安全性も飛躍的に改善された。

4. 炉壁下部補修装置の開発

4.1 炉壁下部の損傷形態

これまでのDOCは、炉壁の大部分の損傷を補修することが可能であるが、炉底付近の炉壁下部の角欠けに対しては、装置先端の溶射ノズルや計測装置の一部が炉底に衝突し、機体の損傷や断熱材の剥離の可能性があるため、補修することが困難であった。しかし近年、一部の炉において図5に示すような炉底付近の壁に局部的な煉瓦の角欠けが発生していることが明らかになった。この部位には炉壁煉瓦の荷重がかかるうえ、コークス押し出し時の側圧も大きいことから損傷が生じやすいと考えられる。この損傷を放置するとコークス押し出し抵抗の増大のみならず炉壁の倒壊を招く可能性があるため、補修が必要である。

炉壁下部の損傷の形態は、図5の(a)に示すように炉底から約150mm高さの目地の直下（炉底から2段目の煉瓦）の煉瓦角部が欠けているもの、または同じく2段目の煉瓦全体が大きく減肉しているもの(b)であり、3段目の煉瓦以上は比較的健全である。これらは上部の減肉部のように比較的大きな範囲がなだらかに減肉した形状とは異なり、2段目と3段目の煉瓦面に急峻な段差があり、局所的な損

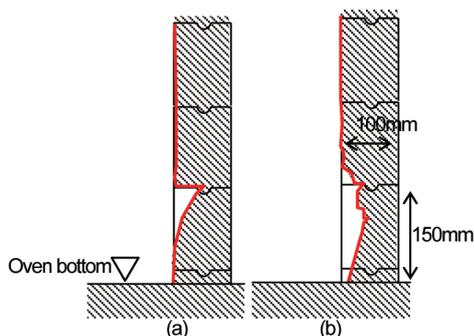


図5 炉壁下部の損傷形態

Typical damage patterns of the wall close to the oven bottom

傷が炉長方向に続く形状が特徴である³⁾。

4.2 炉壁下部補修装置の機能

4.2.1 炉底との衝突回避機構

急峻な段差付近では、正確に損傷部を狙って溶射を行わないと周囲の健全な壁面に溶射を盛り上げ突起を作ってしまう危険性があるため、溶射材料を吹き付ける位置を正確に制御する必要がある。そこで水平目地と平行に溶射ノズルを動かし、2段目煉瓦のみを狙って溶射を行うことが有効であると考えた。また、装置が炉底に接近した際に機体が炉底に衝突するのを防ぐ対策が必要である。炉底と衝突する主な要因として以下があげられる。

(1) 炉底に残存するコークス塊との衝突

炉底に残存するコークス塊は、補修前に実施する炉底の掃除によってある程度回避できるが、装置と炉底との隙間にコークス塊が噛み込む可能性がある。そのため、観察カメラ、および後述する炉底形状計測センサーを新たに設置し、予め炉底に存在する突起物を検出し、装置の可動範囲の下限高さを、突起物と接触することのない高さに設定できるようにした。

(2) 機体の傾斜による炉底との衝突

押し出し機側の軌条のレベルや、炉底の高さは、経年的に窯ごとのばらつきが大きくなっており、それによってDOC台車上の機体の支持点の高さが変わり、炉内挿入時の機体に若干の傾きが生じている。この角度は高々1°程度であるが、X軸が2mストロークで直線運動する際に、炉底と機体の隙間が30mm以上変化することになり、炉底に接近して補修するうえで無視できない問題である。これらを回避するため、以下の機能を新たに追加した。

(i) 炉底形状計測センサー

補修装置先端の下側に炉底との距離を計測する変位センサーを搭載し、炉底に接近する前に2mのストローク全長において炉底との相対距離を計測することにより、X軸の動作する方向と炉底との相対的な角度を求めるものである。

(ii) 台車上支持ロールの昇降機構

上記のX軸と炉底との相対角度を0°、すなわち炉底と平行に可動可能なように台車上の支持点高さを補正するものである。これにより炉壁下部の補修では、装置先端の下端と炉底との隙間を一定（最小10mm）に保ちながらX軸を全ストロークで高速に動作させることが可能である。また水平目地と平行にノズルを走査させることも容易になる。図6に台車上支持ロールの昇降機構の模式図を示す。

4.2.2 溶射ノズルの回転機構

従来のDOCでの補修対象は、大面積で断面形状が比較的なだらかな損傷であったため、炉壁へ垂直に溶射することを基本としており、直径φ100mmの溶射ノズルで、炉底から50mm程度の高さまでは直接溶射を施工することが

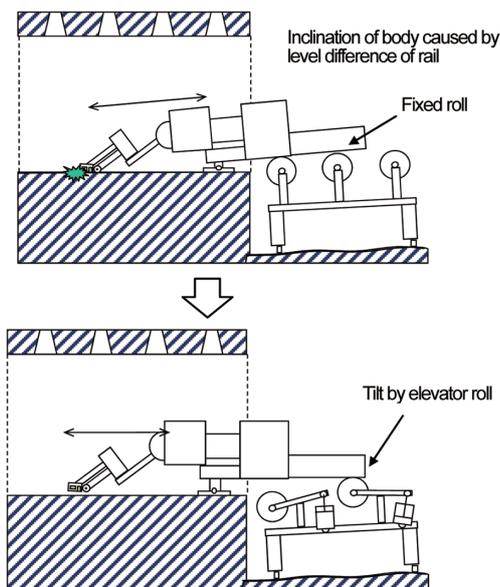


図6 炉底との衝突回避機構
Collision avoidance mechanism with the oven bottom

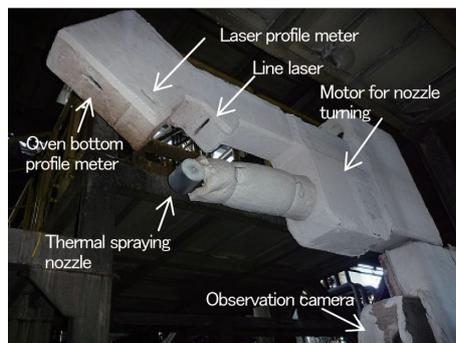


図7 炉壁下部補修装置の外観
Overview of the apparatus for repairing defects of bricks close to the oven bottom

できなかった。これに対して、溶射ノズルを下向きに10～20°程度傾けることで、炉壁の最下部まで施工できるようにした。ノズル角度は、損傷形状に合わせて自由に設定できる。図7に補修装置の外観を示す。

図8は補修装置に搭載したカメラから損傷部および補修装置先端を見た写真である。緑色の線は、損傷形状の視認性を高めるため、レーザ光源を搭載し、炉壁に垂直方向にラインレーザ光を照射したものである。

4.3 補修事例

図9は実際の補修結果である。(a)(b)はそれぞれ補修前後の炉壁形状計測結果のコンター図であり、炉底から150mmの高さに位置する煉瓦目地直下の青い部分が欠損していることを示す。また(c)は(a)および(b)におけるAB断面のプロファイルであり、溶射によって40～50mmの深さの欠損部をほぼ平坦に補修できていることがわかる。本装置を導入した炉団においては、このように炉長方向に断続的に発生した炉壁下部の損傷に対して、導入後2年間で大

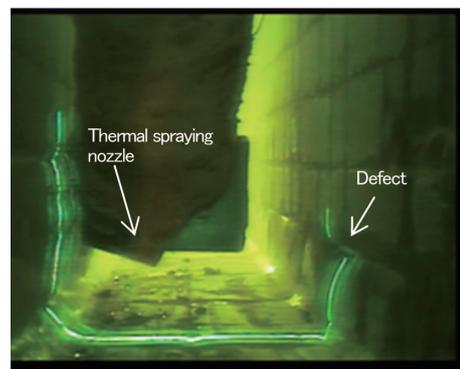


図8 炉壁下部の損傷例
Defect close to the oven bottom

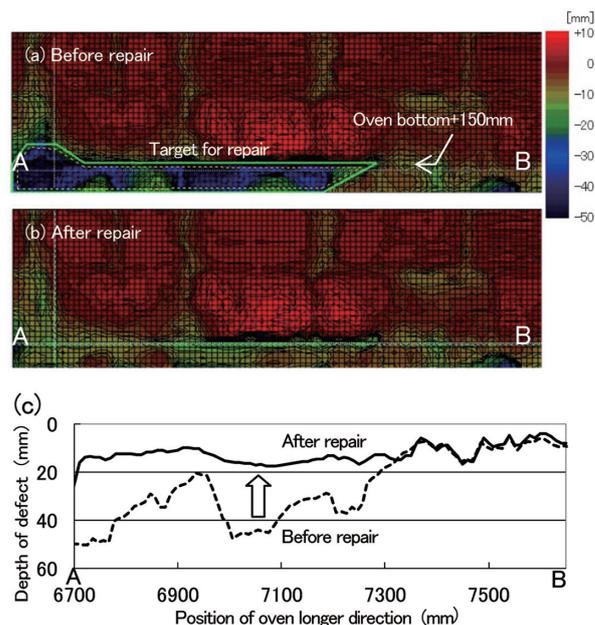


図9 炉壁下部の補修例
Surface profile of the repaired part

部分の補修が完了した。この装置による高精度かつ効率的な補修は、炉壁の健全化に大きく寄与した。

5. 破孔補修装置の開発

5.1 破孔の補修方法

5.1.1 これまでの補修方法の問題点

破孔が発生すると、当該窯の生産を阻害するだけでなく、装入した石炭が燃焼室に漏れるため、燃焼室や蓄熱室の閉塞による乾留不良を招く。現状では、炉中央部で破孔が発生すると炉内に人が入って煉瓦の積み替えを行うために、対象窯の両隣の燃焼室の燃焼を止め常温まで冷却する。そして脆弱化した破孔周囲の煉瓦を取り除き、煉瓦とモルタルを用いて積み直した後、昇温する。しかし、この方法では炉の冷却・昇温時に珪石煉瓦の変態、すなわち急激な体積変化が生じて煉瓦の割れなどが生じるため、炉壁が健全な部分も含めて損傷することが問題である。つまり破孔を補修するために炉全体の寿命を短縮してしまう恐れがあ

る。また炉の冷却・昇温に時間を要することや、隣接する窯の操業に影響があることなど、生産に及ぼす影響も大きい。そこで、炉を冷却することなく破孔の補修ができるDOCの熱間破孔補修装置の開発に取り組んだ。

5.1.2 DOCを用いた破孔補修の課題

DOCは火炎溶射を用いて炉壁に垂直方向から溶射するため、破孔に対して溶射すると溶射材料がそのまま燃焼室へ吹き抜けてしまう。また破孔の縁から徐々に盛るよう施工する方法は、炭化室側に溶射体が成長して突起を作ってしまう危険があり、現実的には難しい。このように溶射の吹き抜けを防止することが課題となるが、開口幅が20mm程度までであれば吹き抜けが発生しないことが実験的にわかっている。

そこで、溶射を行う前に破孔の内側へ破孔形状よりやや小さめに加工した煉瓦片を挿入し、炉壁と煉瓦片の隙間(約10mm幅)に溶射する方法を考案した。図10に本補修方法の模式図を示す。

5.1.3 破孔補修装置による補修工程

本開発により確立した破孔補修の工程を、図11に示した実際の試験の写真を参照しながら説明する。

(1) 破孔形状の測定

まず、DOCを炉内に挿入し、レーザプロフィール計を用いて破孔形状を計測する。

(2) 煉瓦片の加工

測定した破孔形状を基に、煉瓦片の加工を行う。煉瓦片

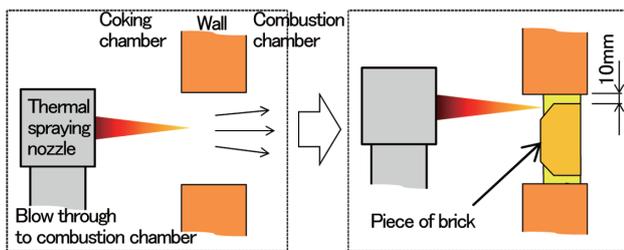


図10 溶射による破孔の補修方法
Method for repairing broken hole by thermal spray

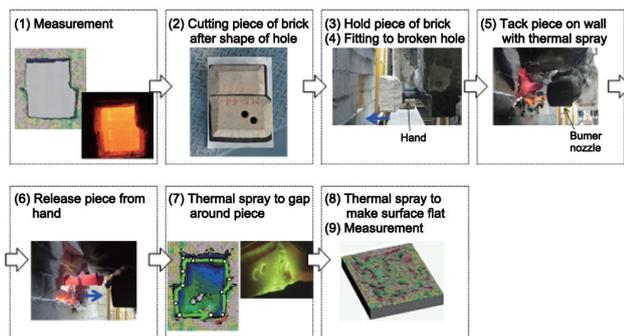


図11 破孔の補修工程
Process of repairing broken hole

の輪郭は、破孔に挿入した際に10mmの隙間が確保されるように、破孔形状より小さく加工する。またロボットハンド(以下、ハンド)で持つため、2つの穴を設ける。

(3) ハンドによる煉瓦片の保持

DOCのハンドで、上記の2つ穴を利用して煉瓦片を持たせる。

(4) 破孔への煉瓦片の差し込み

DOCを炉内に挿入し、破孔へ煉瓦片を差し込む。この際、レーザプロフィール計で再度測定を行い、装置に対する炉壁の相対位置を把握した後、煉瓦片を壁面より所定の深さまで差し込み、煉瓦片を保持する。

(5) 炉壁への煉瓦片の仮付け

煉瓦片の脱落を防止するため、煉瓦片を破孔内部に保持した状態で、煉瓦片の周囲上の1点に対して溶射を行い、煉瓦片と炉壁を仮付けする。

(6) 煉瓦片とハンドの切り離し

ハンドを炉壁から垂直方向に遠ざけることによって、ハンドから煉瓦片を切り離す。

(7) 煉瓦片周囲の隙間への溶射

破孔周辺の測定を再度行い、プロフィールに基づいて煉瓦片の周囲の隙間に沿って溶射ノズルを動かす経路を指定し、自動で溶射を行う。この工程で炭化室と燃焼室に貫通する隙間は全て閉塞されるとともに、炉壁と煉瓦片が接合され、押し出し時の圧力に十分耐える強度が得られる。

(8) 破孔全体への溶射による炉壁の平坦化

煉瓦表面の凹凸を平坦になるように溶射する。これは3章で述べた従来の減肉部の平坦化の作業と同様である。

(9) 補修後のプロフィール計測

最後に再度測定を行い、炉壁が平坦に補修されたことを確認する。

5.2 破孔補修装置の機能

5.2.1 煉瓦片の差し込み機構

コークス炉内は、環境温度が常時1000℃を超え、炉幅が約0.4mと狭隘な空間である。そのため装置全体は分厚い断熱材と水冷ジャケットで覆われるため、極力可動部は少なくし、シンプルな構造設計を目指した。従来のDOCのマニピュレータは、X軸、Y軸、Z軸の3軸であるが、煉瓦片の姿勢を保ちつつ破孔へ差し込む動作を行うためには、一般的には2~3軸の追加が必要と考えられた。しかし、ハンドやレーザプロフィール計の配置を工夫して最適化することによって、Z軸より先端にZ軸と同じ方向の旋回駆動軸(Z'軸)を追加するのみで必要十分な機能を実現した。図12にこの機構による差し込み動作を示す。煉瓦片は破孔の正面に位置決めした後、上記4軸を同調制御して炉壁に垂直方向に移動し、炉壁煉瓦面から所定の深さまで差し込む。この方法によって、煉瓦片の姿勢と周囲の隙間10mmを保ったまま、煉瓦片の差し込みを実現した。

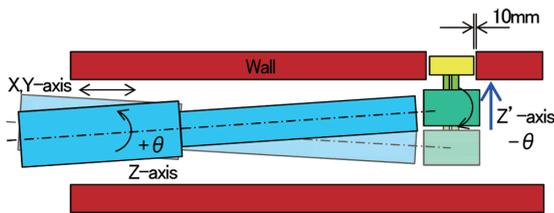


図 12 破孔への煉瓦差し込み動作
Motion for fitting brick to broken hole

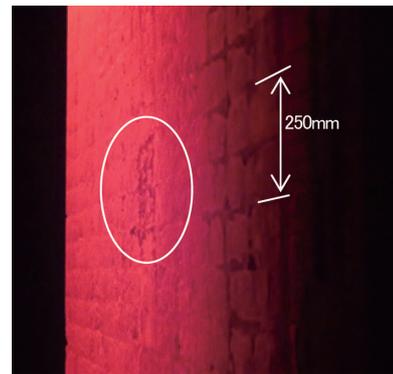


図 14 実炉の破孔補修例
Repaired broken hole

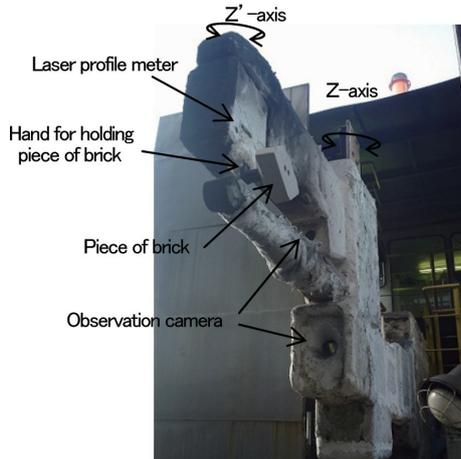


図 13 破孔補修装置外観
Overview of the apparatus for repairing broken hole

5.2.2 熱間における煉瓦片のハンドリング

煉瓦片を持つ方法は、煉瓦片に設けた2個の穴に2本の棒状のハンドを差し込む仕組みのシンプルな構造である。当初はハンドの部材は耐熱合金などを試したが、煉瓦片を仮付けする際に溶射の火炎に晒されて変形し、保持している煉瓦片の姿勢が傾くなどの不具合があった。そのため、現在は炭素系材料を用いて補修ごとにハンドを使い捨てることにしている。ハンドは煉瓦の仮付け溶射が完了するまで煉瓦の姿勢を保持した後、上述の差し込み機構を用いて、煉瓦片の穴から棒状ハンドを垂直方向に引き抜き、煉瓦片とハンドを切り離す。

図13に破孔補修装置の外観を示す。これは装置先端のZ軸に取り付けたハンドで煉瓦片を持った状態である。

5.2.3 煉瓦片周囲への溶射機能

従来のDOCは減肉部に対する溶射を行うため、溶射の狙い位置が20~30mmずれたとしても大きな問題ではなかった。しかし10mm幅の隙間に対しては、狙いが数mm外れると健全な炉壁に突起を形成してしまう可能性があり、また炭化室から燃焼室への乾留ガスの漏れを完全に遮断するためにも溶射が施工される点の精密な位置決めが求められる。そのため、各駆動軸のキャリブレーションを厳密に行い、煉瓦片の周囲の隙間に沿って溶射可能なソフトウェアを開発した。

5.3 補修事例

図14に実炉で試験した補修箇所の様子を示す。これは図11に示すような煉瓦2段分の破孔形状に対して、補修を行った例であり、概ね±10mm程度に煉瓦表面を仕上げている。この補修箇所は、補修から2年経過した後も再破孔することなく炉壁の強度を保っており、熱間補修の効果が発揮されていると考えられる。

6. 結 言

新日鉄住金では、既にコークス炉炭化室診断補修装置(DOC)を各製鉄所に導入済みであり、炉内の損傷状況の定量的な測定と、熱間での溶射補修を行っている。今回、DOCのさらなる高機能化を目指して、炉壁下部の補修装置と破孔補修装置の開発に取り組んだ。炉壁下部の補修については、炉底との衝突回避機構などの導入により補修を実現した。破孔補修については、煉瓦片を破孔に差し込む機構や耐熱ハンドなどを開発し、破孔の熱間補修を実現した。今後、熱間補修のための装置技術をさらに向上させることで、設備の長寿命化と操業の安定化に貢献していきたい。

参照文献

- 1) 境田 ほか：新日鉄技報. (384), 63 (2006)
- 2) 笠井 ほか：新日鉄技報. (388), 54 (2008)
- 3) 正木 ほか：CAMP-ISIJ. 22, 786 (2009)



小林信太郎 Shintaro KOBAYASHI
設備・保全技術センター 機械技術部
機械技術開発室 主査
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



中嶋 淳 Jun NAKASHIMA
名古屋製鉄所 設備部 製鉄整備室 主幹