

大河内記念生産賞を受賞

コークス炉炭化室診断・補修技術

DOC

Doctor of Coke Oven



新日鉄は「コークス炉炭化室診断・補修技術(DOC : Doctor of Coke Oven)」の開発で、第55回(2008年度)大河内記念生産賞を受賞した。1,000℃を超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高く評価された。DOC実機展開によってコークス炉寿命の大幅な延長を実現し、操業安定化を図るとともにCO₂排出増加を抑制する成果をあげている。

コークスとコークス炉とは？



幅45cmの炭化室が並ぶコークス炉



石炭を蒸し焼きにした「コークス」は石炭よりも燃焼効率が良く、高炉で鉄鉱石を溶かすための熱源として使われている。また、燃焼する際に、酸化鉄である鉄鉱石から酸素を取り除き、純度の高い銑鉄をつくる還元剤としての役割も持つ。

コークス炉は炭化室と燃焼室が交互に約100個配置された、高さ13m・奥行き16m・全長200mに達する巨大煉瓦構造体で、一つの炭化室の大きさは、幅45cm・高さ6m・奥行き16m。水分調整など事前に適正処理された石炭を炭化室に入れ、無酸素状態で20時間約1,200℃の高温で蒸し焼き(乾留)し、コークスを生産する。炭化室上部から石炭を装入し、乾留が終わると、炭化室前後端の炉蓋を開け、水平方向にコークスを押し出して取り出す仕組みとなっている。



技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター
プラントエンジニアリング部 コークスグループ
マネジャー 阿波 靖彦
(1974年入社 機械工学専攻)

世界でも類を見ない 新たな挑戦に高い評価

大河内賞は、東京帝国大学教授で物理学者の故 大河内正敏博士の功績を記念し、日本の生産工学、生産技術の研究開発および高度生産方式の実施などの顕著な功績に対し、(財)大河内記念会が贈呈する荣誉ある賞である。今回の受賞について、環境・プロセス研究開発センタープラントエンジニアリング部コークスグループマネジャーの阿波靖彦は、次のように喜びを語る。

「コークスの生産性を維持しつつ極めて過酷な環境の炭化室の中で、内部の損傷状況を計測・解析するとともに、高精度に溶射補修する装置技術開発は、世界でも類を見ない挑戦でした。鉄をつくるだけではなく、製鉄設備のメンテナンス技術をも自分たちの手で開発し、それが評価されたことは、今後のものづくりの大きな糧になります」

コークス炉延命は緊急の課題

日本のコークス炉の大半は1970年

ごろの高度経済成長期に建設されたもので、全国の平均炉齢は37年、新日鉄では38年となっている。コークス炉の寿命は40年程度と考えられており、更新時期を一齐に迎えようとしている。生産能力100万トン/年のコークス炉更新には、1基数百億円という莫大な費用がかかるため、設備投資の削減および平準化に向け、コークス炉の寿命延長が緊急の課題になっている。

コークス炉は、稼働中に炉温を下げると煉瓦構造体の強度が下がるため、稼働期間中は常に高温を維持しなければならない。その中、日々20時間サイクルで石炭を装入しでき上がったコークスを押し出す過程で、炉体は繰り返し熱負荷や機械的負荷を受け、徐々に損傷が拡大する(図1、2)。

「炉体の損傷が進むと、熱効率が悪化し生産性が低下するとともに、使用エネルギーが増えることでCO₂排出量を増加させる原因となります」(阿波)。

コークス炉の寿命を延長させるには、炉壁強度低下と炉壁負荷上昇を抑え、炉壁の破孔限界点を先延ばしすることがポイントになる(図3)。

従来はオペレータが炭化室の扉付近

から損傷状況を目視で観察し、損傷部を補修してきた。しかし、目視診断はオペレータの「勘」に頼るため損傷度評価の精度が低く、また、人手による補修では壁の平滑仕上げの精度や溶射品質が低く、補修後の炉壁耐久性に問題があった。また、高温の炉前で作業するオペレータの肉体的負荷も非常に大きい。新日鉄は1995年、従来方法による炉体保守では将来限界が来ることを予測し、炭化室診断・補修技術の開発に乗り出した。

「コークス炉延命は緊急の課題であり、スピードが求められました。そこで、組織の枠組みを越え『プロセス技術』『計測技術』『溶射技術』『ロボティクス』からなる専門部門によるタスクフォースを編成して取り組みました」(阿波)。



炭化室内

図1 コークス押し出し時の炭化室炉壁への負荷(上から見たところ)

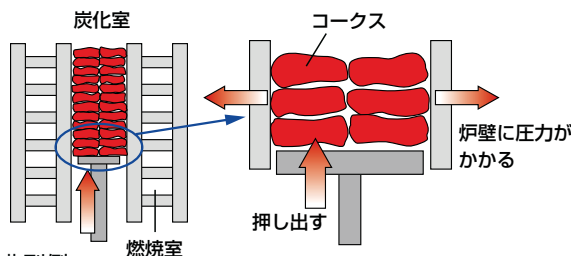


図2 炉体損傷の典型例

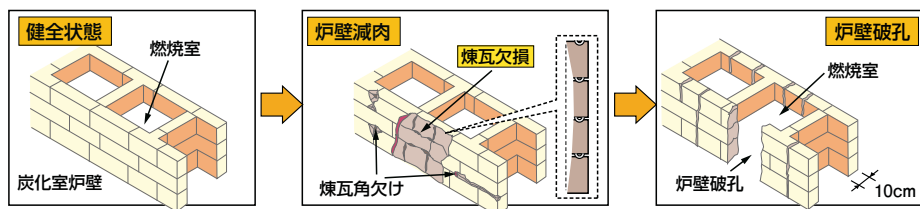
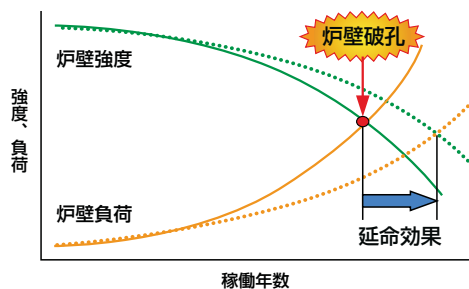


図3 コークス炉延命の考え方



長期の操業期間に炉壁凹凸が増大し、コークスを押し出す際に壁に引っかかり、炉壁にかかる圧力も増える(黄線)。一方、炉壁の構造体強度は徐々に低下(緑線)し、煉瓦が脱落して、「炉壁破孔」が起こる。多数並んだ炭化室で炉壁の破孔が多発すればコークス炉全体の生産性が低下し、コークス炉の維持・存続が不可能となる。

従来にない鮮明度で撮像し 損傷箇所を把握

スキャナーのように 炉壁全体を読み取る

炭化室扉付近からの目視による炉壁診断では、煉瓦面の荒れや陥没を定性的に認識しているに過ぎなかった。また、炉内を撮像できる装置は開発されていたものの、入口付近から撮影するため、手前は高さ方向の視野が足らず、奥行きは損傷を見るのに十分な分解能が得られなかった。環境・プロセス研究開発センター プラントエンジニアリング部コークスグループマネジャーの境田道隆は次のように語る。

「1,000℃を超え、なおかつ45cmという幅狭の炭化室内部で奥行き16m・高さ6mの大面積の炉壁を観察する技術は、その特殊な極限環境ゆえに、どの工業分野においても流用可能な先行技術は見当たりませんでした。そこで、高性能な診断装置を自社開発することを決断しました」

計測部門と作り上げた診断技術の一つが炉壁を高精細に撮像する技術

である。ラインCCDカメラという光検出素子を一行に1,000素子以上配置した特殊な撮像装置を適用することで、炉壁を高精細に撮像することができるようになった。ラインCCDカメラを炉の輻射熱から守るため、水冷断熱装置を搭載して炉内に送り込み、1mmピッチで撮影したライン映像信号をメモリ上に並べて蓄積することによって2次元画像化している。いわば巨大なスキャナーである。さらに水冷により金属鏡面が高温酸化しない耐熱ミラーを考案し、撮像方向をミラーで折り曲げて炉壁を垂直に観察できるようになったことで、装置が炉幅方向に蛇行しても観察位置が変化せず、縦方向の亀裂を明瞭に観察できる優れた特徴が備わった。ラインCCDカメラは高さ方向に4台搭載し、約4分という短時間で炉壁全体を1mmの分解能で観察することが可能になった(図4、写真1)。

また、炉壁凹凸形状を計測する独自の方式を考案し、診断で確認された損傷部位の炉内位置と損傷深さを



技術開発本部
環境・プロセス研究開発センター
プラントエンジニアリング部 コークスグループ
マネジャー 境田 道隆
(1992年入社 機械工学専攻)

3次元座標データで立体的に把握することができるようになった。

絶え間ない技術革新で 高性能化

診断技術の開発経過を追うと、1996年にプロトタイプ機を名古屋製鉄所に建設し、高温下での光学測定に関するさまざまな要素技術とノウハウを生み出した。さらに、1999年から実証機開発の段階で凹凸計測に付随する機能改善に取り組み、従来にない鮮明度で大面積の炉壁全体を一度に撮影し、凹凸データを得る診断技術を開発したことで、2004年には1炉団約100室ある炭化室の詳細な損傷状況を把握できる診断技術が完成した。環境・プロセス研究開発センター計測・制御研究開発部主任

図4 ライン CCD カメラ装置

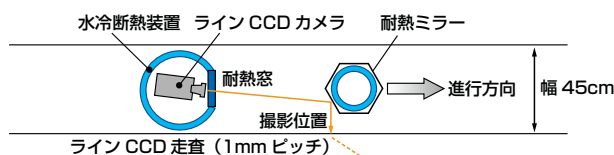


写真1 新たに考案した撮像方法での
鮮明な炉壁画像

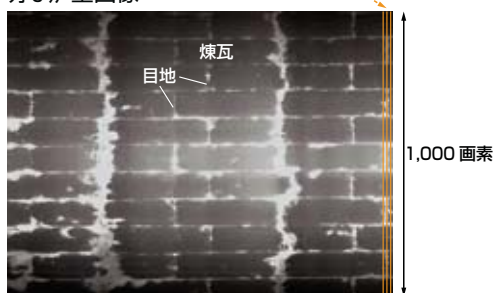


写真2 診断装置の炭化室への挿入





技術開発本部
環境・プロセス研究開発センター
計測・制御研究開発部
主任研究員 杉浦 雅人
(1992年入社 計測工学専攻)

研究員の杉浦雅人は開発の苦勞を次のように語る。

「赤熱した対象物の計測については、高温環境下での鉄鋼プロセス技術開発で積み上げてきた知見を大いに活かすことができました。それでも数多くの開発課題に直面しました。プロトタイプ機の時点では、撮像装置のハード面はほぼ完成していたのですが、ソフト面が不十分でした。凹凸情報を得るために画像上に映るレーザを自動追跡する画像処理や、装置を炉内に送り込む時に装置が揺れることによって凹凸情報に混入するノイズを除去する信号処理といったソフトウェア技術を自社開発し、性能を高度化しました。こうしてハードとソフトが両方完成して初めて炉体診断に使える装置になりました」(写真2)。

補修

仕上がり平坦度 $\pm 5\text{mm}$ を確保

極限環境に耐える マニピュレータ

「私たちは溶射補修で $\pm 5\text{mm}$ の高精度な平坦仕上げの実現を目標にしました。既存の補修装置はコークス炉外から補修用溶射ランスを人手で動かしたり、その延長線上の技術として長尺アームを炉外から駆動する方式がありました。しかし、アームのたわみや振動から高精度な補修は困難でした(図5)。理想的な補修を実現するためには、損耗した炉壁の直前に近づき、溶射向きが壁に垂直で揺れない安定した溶射を行う必要があります。そこで、複雑かつ精密な動作ができるマニピュレータ(図6)を開発し、極限環境の炉内に入れる方法を考案しました。この新たな発想が本技術開発のポイントとなりました」と、補修技術の開発に携わった環境・プロセス研究開発センター機械技術部マネジャーの中嶋淳は語る。

マニピュレータは、長さ2~3mの

短いリンクアームと多関節構造の組み合わせで剛性を確保し、補修部近辺の炉底に脚で自立させる方式を構想した。しかし、 $1,200^{\circ}\text{C}$ の高温環境で多関節構造のマニピュレータを駆動させた事例はなく、機械内部をいかに安定かつ均一に冷却できるかが課題となった。

コンカレントエンジニアリング で要素技術を最適化

補修技術の開発では、まず1998年からラボで小型炉を使用した要素技術開発に着手した。2000年には必要機能をすべて搭載して実際のコークス炉炭化室全域で実証機を稼働させ、要素技術適用の最適化と精度向上、装置全体の信頼性向上に取り組んだ結果、2003年に補修技術が完成した。

「かつては現場オペレータの経験や勘に頼り、そもそも炉壁補修のあるべき姿や方法そのものがわかっていませんでした。要素技術の開発はゼロから始まり、しかも開発と実機化

図5 従来の補修方法

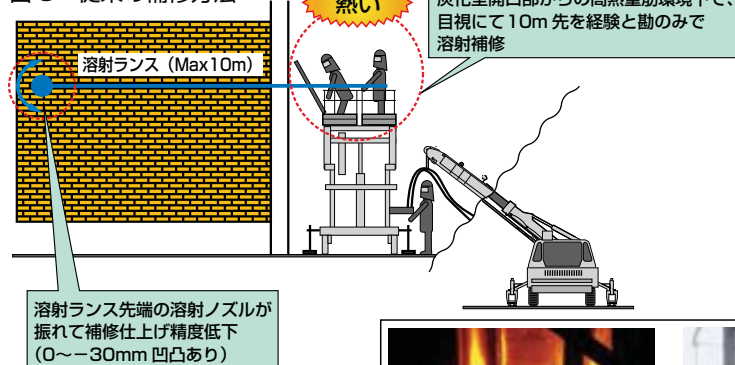


図6 補修マニピュレータ全景模式図と補修溶射状況





技術開発本部
環境・プロセス研究開発センター
機械技術部
マネジャー 中嶋 淳
(1992年入社 機械工学専攻)

エンジニアリングを並行して行うコンカレントエンジニアリングであったため、とにかく必要と思われるあらゆる機能を詰め込み、最適化していきました。高温で狭隘という極限環境の中で要求機能を搭載するため、あらゆる点で限界設計への挑戦の繰り返しでした」(中嶋)。

開発に成功した高精度補修マニピュレータは、45cmの炭化室の間口幅でも両炉壁に対して十分なクリアランスを確保した。機体は断熱材で覆った水冷パネルによる高剛性外骨格構造とし、炉内に3時間滞在しても炉壁煉瓦を傷めない温度を維持できるようにした。幅狭の機体内部に電気計装配線や給排水ホース、溶射用の粉体やガスのホースを通し、先端に非接触式の炉壁形状計測装置と、損傷形状に合わせて精度良く充填できるように新たに開発した集束度の高い溶射バーナを装備。サーボモータで駆動する3関節によって±1mmの位置決め精度を実現し、バーナと補修部位との適正溶射距離と90度の噴射角度を安定維持するとともに、損傷深さに応じてバーナの走査速度を制御することで、仕上がり平坦度±5mmの高精度補修を可能にした。また、先端付近には監視カメラを設置し、溶射状況をリアルタイムでモニタリングすることもできる。

関連技術

高度な技術を結集して 診断・補修の中核設備へ

安定挿入技術や 壁面管理システムを開発

実機化の過程で大きな課題となったのが、10トンを超える大重量の診断装置を炉内に挿入する際、装置底部の摺り部と炉の底面との摩擦による振動(ステックスリップ現象)が発生することだ。この現象により、良好な診断画像を得ることができなかった。対策として、ローラダンパーを考案(図7)することで、振動振幅は10分の1まで低減し、円滑に装置を挿入できるようになった。

また、装置と入口の間は走行軌条や炭化室の傾きによる相対的な傾斜があり、炭化室の幅ギリギリにつくられている装置が接触して挿入でき

ないことがあった。そこで傾斜に合わせて装置の傾きを調整する機構を開発した。

運用面では、診断装置で採取した情報を素早く処理して補修計画につなげるため、各コークス工場に管理システムを設置した。オペレータは工場で損傷位置、種類、サイズなどの情報を炭化室ごとにデータベース化し、それを基に、損傷度合いや生産計画を考慮して補修箇所に優先順位をつけることで、計画的な補修の実施と炉壁損壊の予防保全ができる。また、補修後の経過は、診断装置で追跡管理する。

補修の必要性和優先順位を事前に客観的に評価して効率的な補修を行うことは、今後の製造基盤強化に不可欠な取り組みだ。

図7 ステックスリップ現象と対策

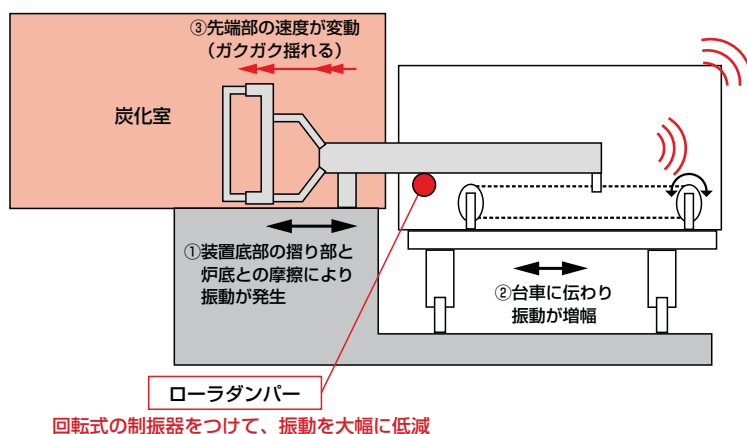


写真3 DOC導入後の診断・補修作業



炭化室前の操作室からモニターを見ながら遠隔操作で診断・補修作業を行う。

実機に展開 炉寿命延長とCO₂排出の増加抑制を実現

新日鉄は室蘭、君津、名古屋、八幡、大分の5製鉄所にコークス炉18炉団合計約1,600の炭化室を持つ。大分製鉄所第1・2コークス炉に導入したDOCを1号機として現在7機が稼働中、2機が製作中で、2009年に全コークス炉への配備完了を予定している(図8)。

「コークス炉の実態をよく知っている工場、設計・製造力を持つ協力会社、高度な専門技術を持つプロジェクトメンバーが一体となって議論を繰り返し、そのアイデアをラボ試験、実機試験へとつなぎ、トライ & エラーで粘り強く課題を解決していくことで、この技術を確立しました。実機への展開では、トラブルなく極めて順調に立ち上げることができ、さらに、1機ごとに改善を加え技術の進化を図っています」(阿波)。

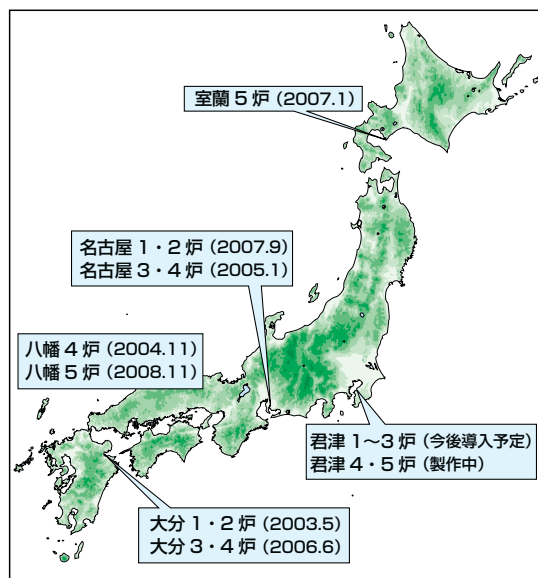
DOC導入によって、炉壁損傷の正確な診断と高精度な補修ができるようになり、コークス炉操業・生産の安定化が図れるとともに、コークス炉寿命

の延長が実現された。この炉寿命延長によって設備更新にかかる費用を後ろ倒しできるため、全社で数百億円規模のコスト削減に結びつく。また、同じような炉齢にあるコークス炉の設備更新タイミングを分散させることにより、炉の設計・建設に携わる多数のエンジニアリング要員の計画的な配置も可能となる。

操業面でも、従来オペレータに高い肉体的負荷のかかっていた補修作業を完全遠隔操作化することにより、オペレータの作業環境改善に多大な効果をあげている(写真3)。

さらに、省エネルギー効果については、DOC導入で高精度な補修が可能となったため、炉体が受ける機械的負荷が減少して熱効率の悪化を防ぐ。この熱ロスの低減によるCO₂排出量の増加抑制の効果は、新日鉄の全コークス

図8 DOCの実機展開状況



炉で年間100万トン規模に相当する。

このように極限環境下で高い信頼性を発揮するDOCは、大河内記念生産賞の受賞など高い評価を受けており、今後世界のコークス生産現場への普及が期待されている。

新日鉄の技術力を結集し、さらなる多機能ロボットへ

技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター プラントエンジニアリング部 部長 中嶋 義明
(1981年入社 機械工学専攻)

コークス炉は煉瓦でできた堅牢な構造物ですが、長年の操業で壁に発生した凹凸にコークスが引っかかり、生産障害を起こすようになってきました。これは新日鉄のみならず、現在、日本の多くのコークス製造部門が直面している深刻な問題です。

これまで壁の凹凸補修は人手で行っていましたが、補修精度は作業の厳しさに比べ非常に低いものでした。そこで、コークス炉老朽化抑制対策として新補修技術の開発に着手し

ました。それから10年、多くの難課題に立ち向かった技術者たちのチャレンジ精神、粘り、チームワーク、新日鉄の技術力の結集、これらが正に本技術を完成できた大きな要因であると考えています。

「コークス炉炭化室診断・補修技術(DOC)」の独特な撮像法、高度なデータ処理技術、集束溶射バーナと連動して凹凸を自動的に補修する大型マニピュレータの繊細な動き、平たく細長い装置内の特殊な冷却構造などは、



大河内賞審査委員から高い評価をいただきました。

DOCは、日本鉄鋼業のコークス炉寿命延長や熱ロス抑制対策に大きく寄与できる技術です。「DOCをさらに多機能ロボットへと進化させたい」私たちはそう考えています。