

コークス炉リフレッシュの実現を可能とした 極限環境下での診断・補修技術の開発

Diagnose and Repair Technologies Used in Enormously Harsh Space
for the Realization of Coke-Oven Restoring

新日本製鐵株式會社

1. 技術開発の背景と目的

(1) 鉄鋼業におけるコークス炉の現況と課題

2007年の世界の粗鋼生産量は13.4億トン、わが国の生産量は1億2,000万トンであり、このうち世界では65%、わが国では74%が高炉一転炉法によって生産される^(*)1)。高炉一転炉法は、天然資源である鉄鉱石（酸化鉄）を炭素によって還元し、熔融銑鉄として得ることから始まり、それに続く精錬や圧延等の工程を経て、多様な機能を発揮して基礎資材として産業・社会に供されている。この熔融銑鉄を得るための還元材・熱源として今日一般的に使用されるのがコークスである^(*)2)。

わが国の高炉用コークスの生産量は年間約5,000万トンであり、原料炭の殆どを輸入しており、石炭輸入総量1億5,000万トンの概ね1/3が製鉄で使用される。この石炭消費量は国内1次エネルギー総供給の8%に達する。また高炉コークス用として使われる原料炭の産地・埋蔵量には限りがあり、近年のBRICsを中心とした需要過多を背景に原料炭価格の高騰と、安価な非微粘結炭の使用拡大への努力が重要となっている。また新日鐵では廃プラスチックをコークス原料として資源回収する設備を主要5製鉄所（処理能力計25万トン/年）に有している。これらのようにわが国の石炭・エネルギー政策、環境・循環型社会構築等の点で、コークスは社会的に高い影響度を持つ。

京都議定書の発効により、わが国の温室効果ガス排出量全体の約14%を占める鉄鋼業界として、自主行動計画を策定してその排出量の削減に努めている。新日鐵ではエネルギーの有効利用と排熱回収の各種手段を進めることにより、2007年時点では、生産量の増にも係らず1990年比で7%のCO₂削減を達成している。

コークス製造工程に関しても、投入された石炭の7割がコークスとなり、3割が高カロリーガス（COG）やタールなどの油分であり、加熱炉や発電のエネルギー源、および化学原料として100%回収利用されている。またコークスの顕熱はCDQ（コークス乾式消化設備）によって蒸気として回収され、電力に転換されている。しかしながらコークス製造工程から排出されるCO₂は、高炉法による製鉄工程のその10%に相当する。このようにコークス製造プロセスは、地球環境問題の点からも重要な位置を占めるものであると言える。

*1；他は主としてスクラップを原料とする電炉法。*2；小規模ながら他に木炭などがある。

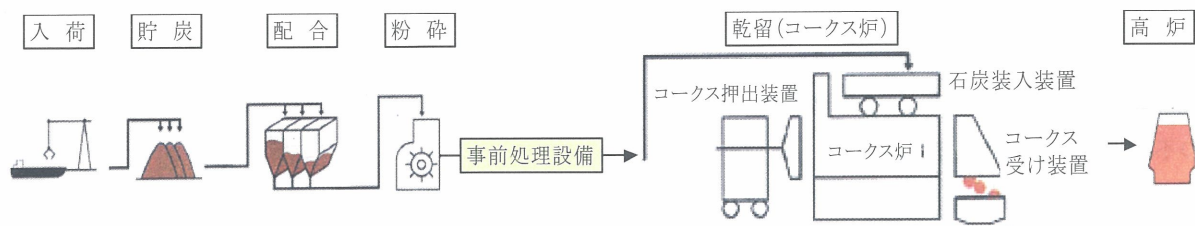


図 1.1 製鉄のプロセス

コークスは、適正に事前処理された石炭を 1,000℃以上の高温に維持されたコークス炉に入れて、無酸素状態で 20 時間程度乾留（蒸し焼き）することによって得られる。事前処理設備では石炭の水分調整や廃プラスチックの混合などが行われる。（図 1.1）

コークスを製造する設備（コークス炉）の大半は室炉式コークス炉と呼ばれ、炭化室と燃焼室が交互に約 100 個配される構造（炉団）である。炭化室は高さ約 6m×奥行き約 16m×幅約 0.45m という間口が狭く、奥行き・高さが大きな空間であり（燃焼室の幅は約 0.7m）、全長 200m にも達する珪石煉瓦から成る巨大な設備であり、設備寿命も約 40 年間という長期に及ぶものである。（図 1.2、1.3）

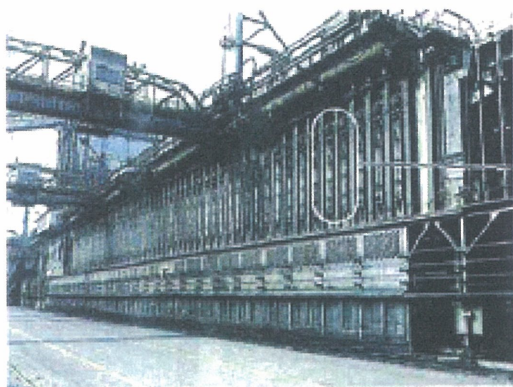


図 1.2 コークス炉外観

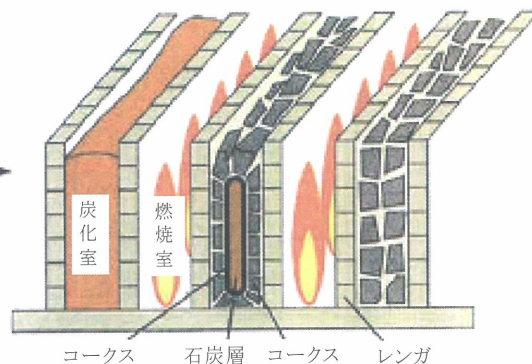


図 1.3 コークス炉の構造と乾溜状況

コークス炉は国内 15 箇所、炭化室合計は約 4,300 で、全てが室炉式である。新日鐵グループでは室蘭、君津、名古屋、八幡、大分の 5 箇所に計約 1,500 の炭化室を有し、年間約 1200 万トンのコークスを生産している。海外では米、豪、印、伯他で発生ガスを回収しないノンリカバリー炉が一部あるものの、基本的にはわが国同様の室炉式が主流である。

本発明は、上述したようなコークス炉の特徴を背景に、既存の室炉式コークス炉の寿命延長と操業改善による省エネルギーの達成等に顕著な効果をもたらす技術である。

（2）コークス炉の劣化

わが国のコークス炉の大半は 1970 年頃、経済成長期に建設されたもので、平均炉齢は 36 年に達している。新日鐵のコークス炉齢は平均 37 年、最高 43 年となっている（2007 年時点）。（図 1.4）

コークス炉の操業は、炭化室上部の装入蓋から石炭を装入し、乾留が終了すると、炭化室前後端の扉である炉蓋を開け、長手（水平）方向にコークスを押出して取り出す。コークス炉は、操業を中断すると炉温が低下して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高温に維持されるという特徴がある。この中で、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、機械的負荷や加熱・冷却の繰り返し負荷を受ける。

これによって生じるコークス炉の不具合は、炭化室における炉壁^(*)の煉瓦欠損・脱落と燃焼室における燃焼孔への異物堆積に大別される。

燃焼室に発生する損傷に対しては蓄熱室下部からのエアブローや炉頂からの異物除去である程度まで対応可能である。一方、炭化室炉壁については、日々の作業の中で機械的負荷および加熱と冷却の繰り返しという熱負荷を受けており経年的に確実に損傷が拡大する。(図 1.5)

このような劣化が進行する結果、燃焼効率の低下、稼働率の低下、ひいてはエネルギー効率の低下が顕在化することになり、コークス炉の炉齢が高まる中で、炉寿命を延長する技術の開発が不可欠であった。

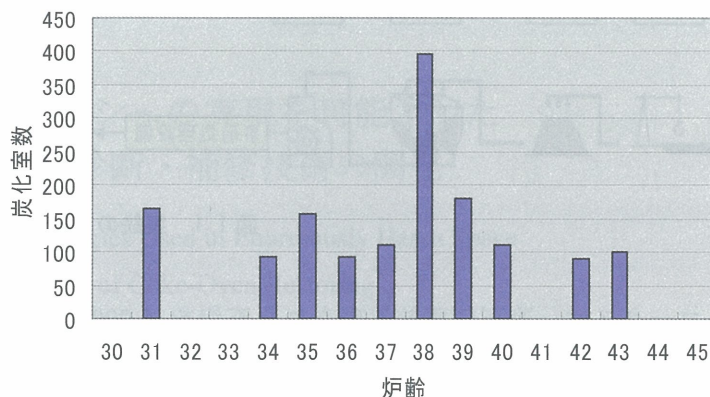


図 1.4 新日鐵のコークス炉齢分布

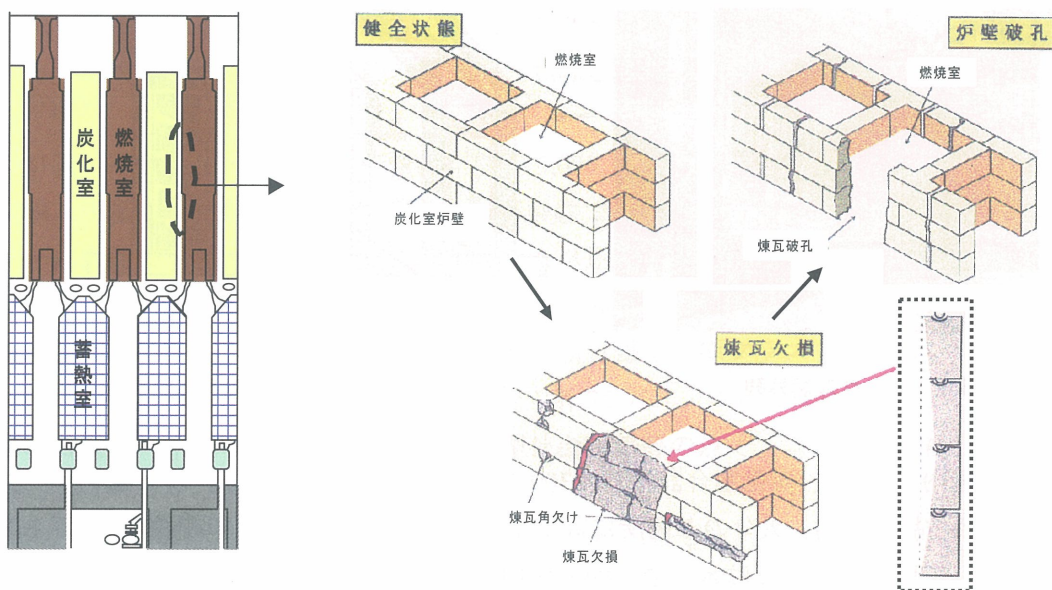


図 1.5 炉体損傷の典型例

(3) 老朽化したコークス炉の状況

コークス炉は長さ 40cm、高さ 12cm、厚み 10cm ほどの珪石煉瓦を積んだ構造体である。コークス製造過程において、1000℃超に加熱された炭化室に、常温に近い石炭を装入し、さらには蒸し焼きにされたコークスを押し出装置で押し出す際に約 20 時間ごとに炭化室の両側にある炉蓋を開放することから、珪石煉瓦には厳しいサイクル的熱応力が加わり、煉瓦表面のスポーリングまたは割れが発生し煉瓦が損傷する。

^(*)3；炭化室と燃焼室間の壁 図 1.5 参照。

長期間の操業サイクルにおいて煉瓦損傷は進行し、その煉瓦表面にカーボンが付着し、そのカーボンが押出時に脱落した場合に煉瓦母材を同伴することで煉瓦減肉は更に進行する。このように炉壁表面は経年的に炉壁凹凸が増大し、この凹凸部にコークス押出時に局所的な荷重がかかった場合には煉瓦が脱落し、炭化室と燃焼室が貫通した状態となる「炉壁破孔」が発生する。

コークス炉は通常 40 年以上連続使用する設備であるが、稼動を中断すると炉温が下がって煉瓦構造体の強度が低下してしまうので、常時高温に維持されていて、破孔の補修は容易ではない。

多数並んだ炭化室の各所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、経済的、或いは環境問題上、存続不可能と判断せざるを得なくなる。

（４）コークス炉寿命延長の考え方

炭化室の炉壁が破孔する要因は２つある。炭化室の炉壁強度の低下と、押出時に生じる壁への負荷（側圧）である。炭化室内のコークスを押出装置を用いて炭化室から押し出す際、炉壁が健全であれば通常の出力でコークスが動くが、炉壁に大きな凹凸があるとコークスが壁に引っかかり、より大きな押出力を必要とする。そして押出力は壁と垂直方向にも転化される（図 1.6）。炉壁への側圧は凸凹量が大きいほど大きくなり、炉壁凹凸は経年的に悪化するため側圧も図 1.7 中のオレンジ色実線のように年々上昇する。一方、炉壁の持つ構造体強度（側圧に対する耐力）は図中の緑色実線のように徐々に低下する。これらの交点が炉壁破孔の限界点となる。ここで、「コークス炉寿命延長」とは炉壁強度低下の抑制と炉壁負荷の上昇抑制により破孔限界点を右に移動（先延ばし）させることであると言える。

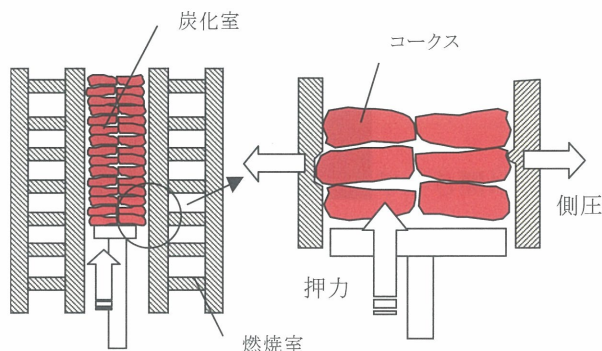


図 1.6 コークス押出しによる側圧

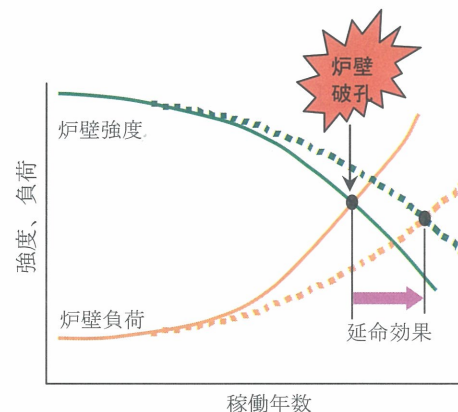


図 1.7 コークス炉延命の考え方

（５）従来技術の課題と開発の動機

従来、炭化室内のコークス押出時に内部抵抗に起因する押詰等の操業異常が発生した場合、オペレータが目視観察を行い、その情報に基づいてその原因となる損傷部の補修を実施してきた。

最近、炉壁煉瓦減肉、肌荒れ・欠損の範囲拡大に伴い、押詰等の生産阻害の発生頻度が上昇してきた。このような状況に対し、従来の方法では効率的な補修が困難になってきており、炉壁損傷部の早期発見および定量的診断による計画的な補修が求められている。従来の損傷度管理および補修実行は、作業者による目視観察や多人数による溶射補修というものであり、損傷度評価の定量性が不正確、炭化室中の平滑仕上げ精度が低くなるとともに溶射品質が低くなり耐久性が低い、および高熱重筋作業である等の問題点があった。（図 1.8、1.9）

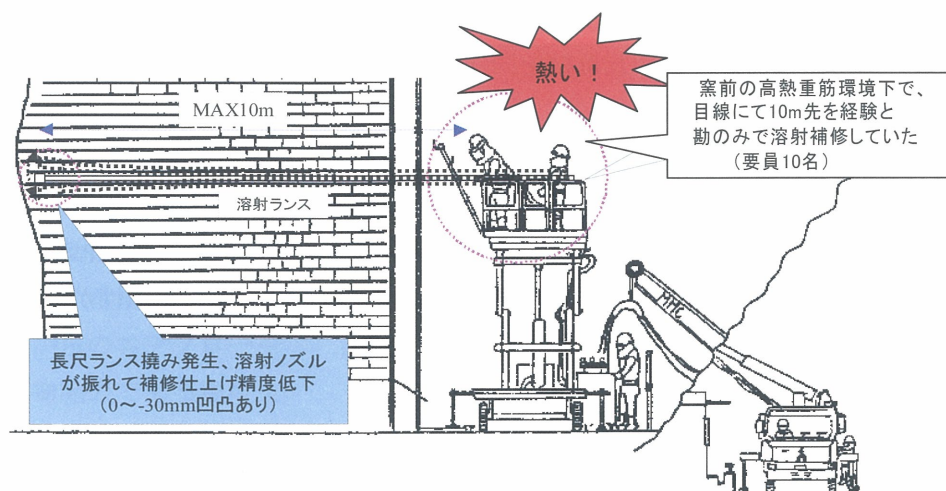


図 1.8 従来の診断補修方法

窯口から炉内の損傷を観察している状況



人手による長尺ランスを使った溶射補修の状況



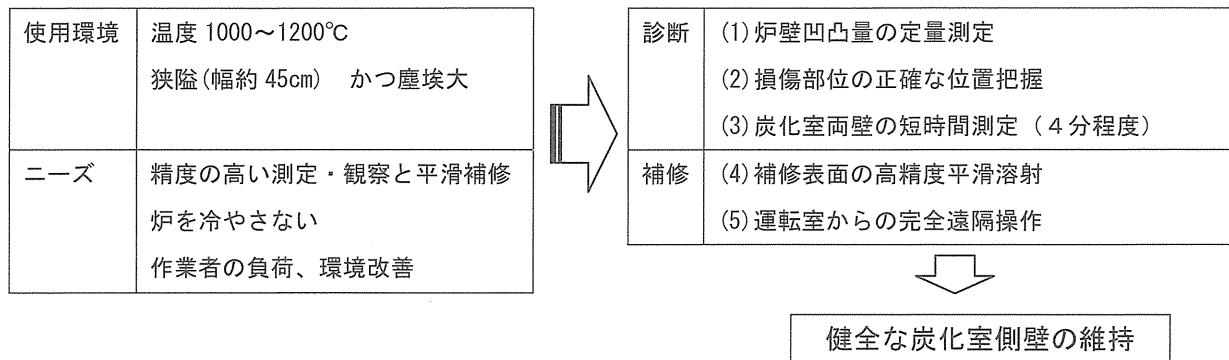
図 1.9 従来の診断補修方法

(6) 開発課題と目標

H7年当時、人手補修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・補修技術の開発を決定した。

本開発で目指したものは、コークス生産性を維持しつつ迅速に炉壁を計測・解析してその状態を把握するとともに、炉壁にダメージを与えることなく溶射補修を行う、今までに無い装置技術である。1000℃を超える過酷な炉内環境で高速、高精度な計測と補修を行う装置は当時の常識を外れた構想であったが、表 1.1 に記す具体的な技術目標を設定し開発に挑戦した。

表 1.1. 診断、補修技術開発目標



なお、今回装置には DOC (Doctor of Coke oven) と命名をした。

2. 技術開発の経過

(1) 診断技術の開発

この技術はレンガ壁面の撮像機能と凹凸測定機能から成る。H7 年に炉壁を観察する手法を検討することから開発に着手した。炉壁を高精細に撮像する技術が考案されたことを受けて、H8 年には、実際のコークス炉で開発テストを行うプロトタイプ機を名古屋製鉄所のコークス炉に建設した。撮像技術の見通しが得られると、引き続いて凹凸状態を測定する技術の開発が進められた。プロトタイプ機では高温下での光学計測に関する様々な技術とノウハウが生み出された。H11 年から取り組んだ実証機開発の段階では、凹凸測定に付随するソフトウェア技術の高性能化を中心とした機能改善に取り組んだ。以上を経て H16 年に診断技術の全体が完成した。

(2) 補修技術の開発

補修技術は、技術検索を H7 年から開始した。補修技術の高精度化の主たる内容は、損傷部を溶射補修する上で、理想的な溶射施工条件を維持した安定施工と溶射施工面の高い平坦度の確保である。H10 年より、ラボにて小型炉を使用した要素技術開発試験に着手し、同年後半から、これらの機能を実コークス炉窯口で検証するための簡易試験装置を製作し、試験を行った。さらに H11 年からは、必要機能を全て搭載し実際のコークス炉の炭化室全域で試験が可能な実証機を計画、H12 年中盤よりこれを稼動し、補修要素技術の適用確認と精度向上、および炉内環境で稼動する装置全体としての作り込みを行い、H15 年に補修技術の完成に至った。

(3) 実証機の開発

診断と補修の要素技術開発を完了した後、大分製鉄所 1・2 コークス炉に実証機を H12 年に設置した後、実機上の各種課題を解決するとともに実炉での診断と補修の効果を確認して、H15 年に開発を完了した。装置は共通台車上に搭載され、診断装置は補修装置の先端で着脱するようになっている。(図 2.1)

表 2.1 実証機機能

項目	仕様
対象範囲	16m 長、6m 高さ
診断装置	・補修装置先端へのつけかえ ・水冷2重管構造 ・炉壁全面撮像と凹凸計測 ・診断時間 約4分
補修装置	・水冷ジェット構造 ・3軸サーボ駆動+全体前後進 ・溶射能力 20kg/時

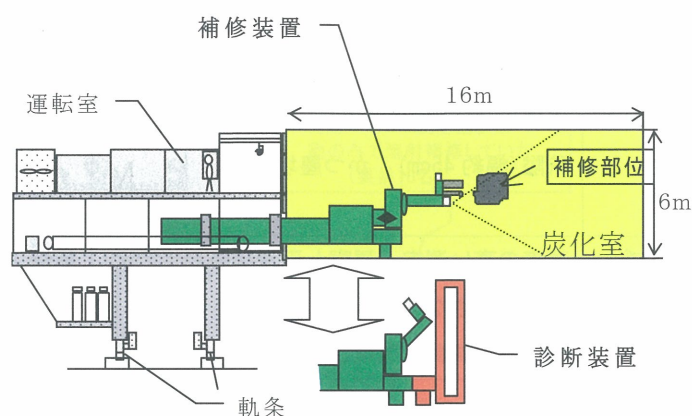


図 2.1 実証機の設備構成

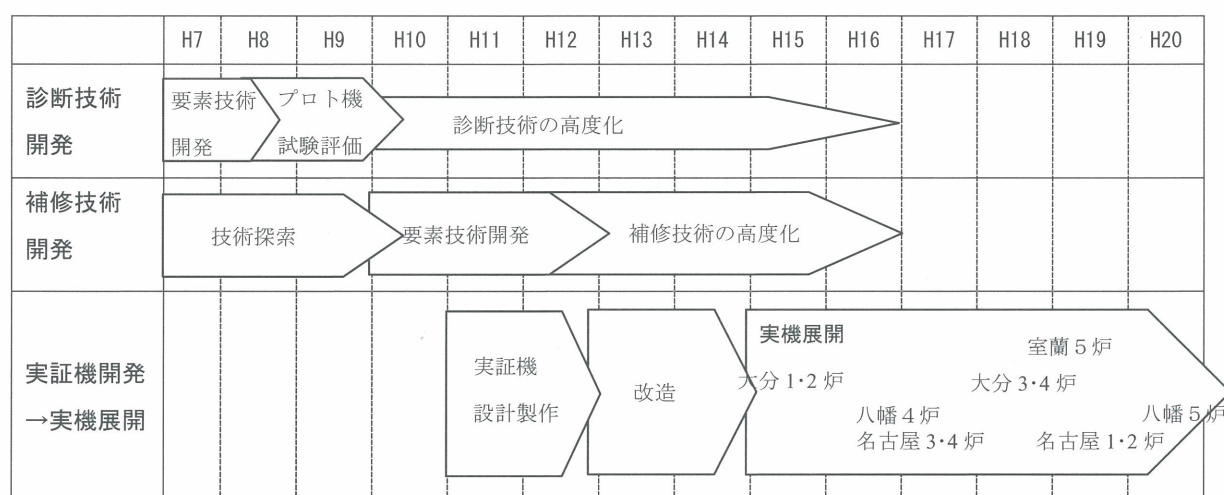


図 2.2 開発経緯

3. 技術開発の内容と特徴

(1) 診断技術の開発

1章で述べた通り、老朽化したコークス炉では炭化室炉壁の平滑度が悪化して押出負荷が上昇するので、炉壁の状態を把握することは保守管理における重要項目である。本診断技術が開発される以前に当社で一般的に行われていた炉壁診断は、窯口から炉内を目視観察する方法であり、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。一方、当時他の鉄鋼メーカーでは炉内撮像装置や特定高さの炉幅を測定する装置が開発されていたが、炉壁全体の損傷状態とりわけ凹凸形状を定量的に知りたい我々の開発目標に対しては不十分であった。そこで新たな診断装置を自社開発する方針を決め、開発に着手した。

診断装置には、炉壁全面を高精細に撮像する機能と凹凸形状を測定する機能を持たせることにした。1000℃を超えかつ狭小幅の炭化室内部で大面積の炉壁を観察する技術は、その特殊な環境ゆえに鉄鋼業のみならず他の工業分野においても流用可能な先行技術が見当たらなかった。以下に開発した診断技術の特徴を説明する。

1) 炉壁撮像技術

CCD カメラで赤熱している煉瓦壁を撮像することができるが、2 次元カメラを使用する一般的な方法では、図 3.1 に示すように、カメラが炉壁に近接せざるを得ない。この状況で得られる斜視画像では、手前は高さ方向の視野範囲が足りず、奥は損傷を見るのに十分な分解能が得られない。

我々はライン CCD カメラを適用することでこの課題を解決した。ライン CCD カメラとは、光検出素子を一行に 1000 素子以上配置した特殊な撮像装置である。線状の視野を炉壁縦方向にしたライン CCD カメラを水冷断熱装置に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して 2 次元画像を生成する

(図 3.2)。高温雰囲気中で光学鏡面を維持することができるミラーを考案したことも新しい発想である。このミラーは、鏡面加工した金属管の内部に冷却水を流して表面の高温酸化を防止することで実現した。ライン CCD カメラとミラーは一体構造で炉内に挿入される。撮像方向をミ

ラーで折り曲げて炉壁を垂直に観察するようにしたことで、装置が炉幅方向に蛇行しても観察位置が変化しない、縦方向の亀裂を明瞭に観察できるといった優れた特徴が備わった。観察窓には強烈な熱線が入射する。カメラを保護するために、赤外線吸収する耐熱ガラスや赤外線反射皮膜を加工したガラスを複数枚組み合わせた熱線遮蔽構造を設計した。

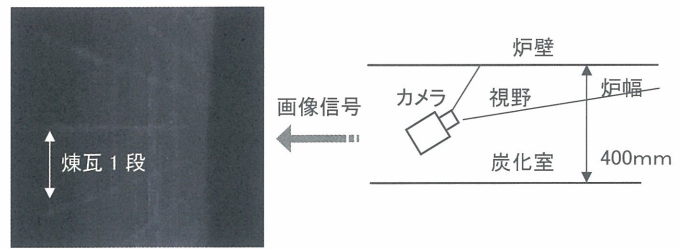


図 3.1 通常の CCD カメラで得られる炉壁画像

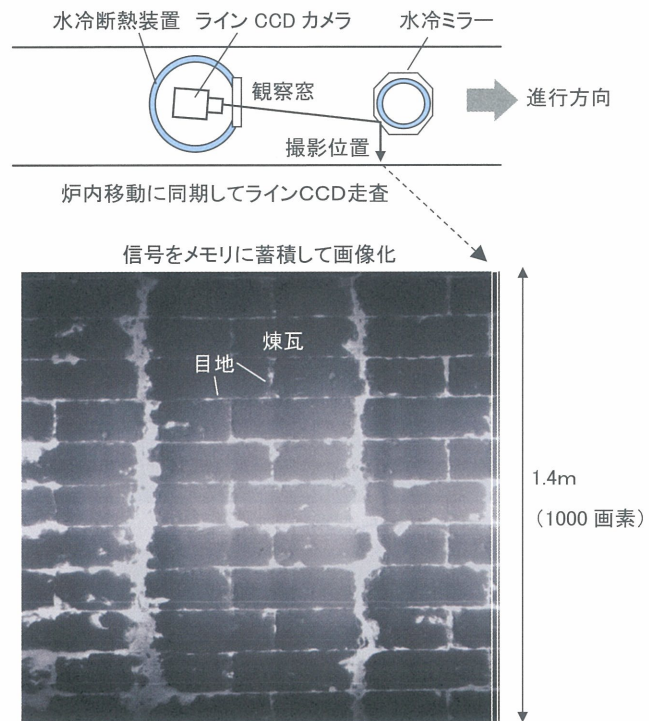


図 3.2 新たに考案した炉壁撮像方法

2) 炉壁凹凸計測技術

炉壁の凹凸を計測する機能は水冷断熱装置内部の極めて厳しい空間的制約を前提として検討する必要があった。ここでは、図 3.3 に示すように、ライン CCD カメラの線状視野に上下斜め方向からレーザ光を照射して、炉壁画像にレーザ像を重畳させて凹凸計測を行う独自の方式を考案した。炉壁の凹凸は画像上でレーザ線の変位として観測され、レーザ出射角度やカメラ視野角・視野サイズといった幾何学的条件から三角測量の原理で凹凸量が求まる。レーザは煉瓦一段間隔で複数照射して炉壁の面的な凹凸情報が得られるようにした。画像と

合わせて凹凸を捉えるこの方式は、陥没などの損傷部位の煉瓦状態が一目瞭然分かるという実用上優れた特徴を有する。

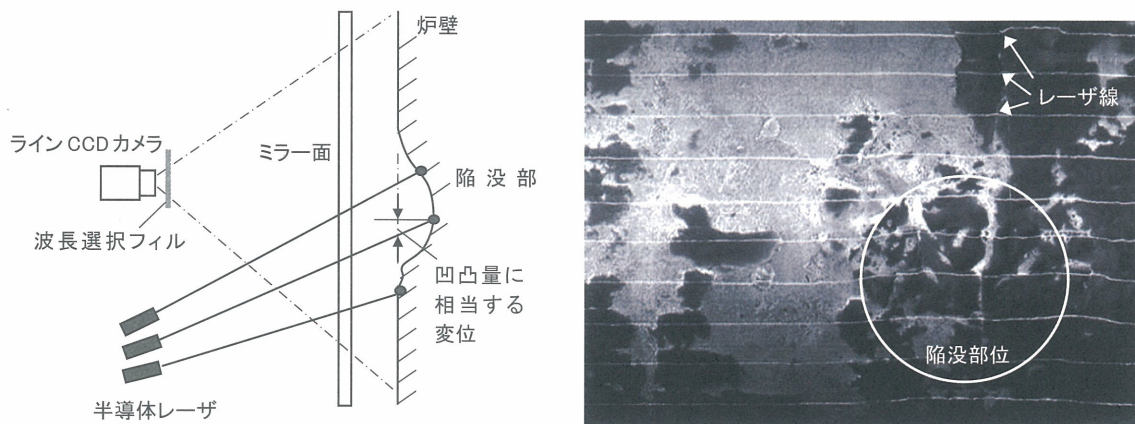


図 3.3 炉壁凹凸形状測定原理とレーザ重畳画像の例

凹凸測定技術の開発項目にはソフトウェア要素も含まれた。画像上のレーザ線を追跡して変位量を算出する画像処理などである。中でも水冷断熱装置の揺れ・蛇行を補正する信号処理は凹凸計測精度の向上に大きく貢献した。水冷断熱装置は片持ち構造で炉内に入るため、機械的対策で揺れ・蛇行を抑制することが困難であった。そこで、揺れ・蛇行による外乱が含まれる凹凸計測データに対して、凹凸がない炉壁健全部を自動で探索し、そこを基準として真の凹凸を高精度に推定する信号処理アルゴリズムを構築した。

3) 診断装置試験機

試験機の外観と設備主仕様をそれぞれ図 3.4、表 3.1 に示す。炉壁の温度低下を極力避けるため、全長 16m の炭化室を約 4 分で迅速に往復して炉壁を撮像する。ライン CCD カメラ 4 台で約 6m の炉壁全高をカバーする。凹凸測定用レーザ光は煉瓦ピッチよりやや密に 44 本投射される。カメラとレーザは左右に回転する機構に取り付けられていて、往路と復路で左壁、右壁を切り換える。画像解像度としては炉長方向 1mm、炉高方向 1.4mm を確保した。凹凸深さの測定精度は補修判断の情報として十分な $\pm 2 \sim 3\text{mm}$ であることを確認している。

(4) 診断技術開発の結果

図 3.5 は炭化室診断データの一例である。

画像上の健全炉壁領域を見ると、多数の亀裂が縦方向に入っている。縦亀裂はいずれの炭化室においても観察された。後の調査で、常温石炭を装入して加熱する際の煉瓦膨張・収縮が原因で長年の稼動で徐々に拡大することが明らかになった。このデータでは中央に顕著な陥没が捉えられている。煉瓦が顕著に薄肉化しているこのような陥没箇所は、押出負荷を上昇させて押詰りの原因になるばかりか、炉壁が破孔したり倒壊する重大トラブルの恐れがあり、早急に補修すべきである。付着カーボンの状態も良好に観察できる。

このように、従来にない鮮明度で大面積の炉壁全面を一度に撮影し、かつ凹凸データを得る技術を開発した。1 炉団に約 100 ある炭化室個別にどのような損傷が発生しているかを詳細に把握することが可能になった。

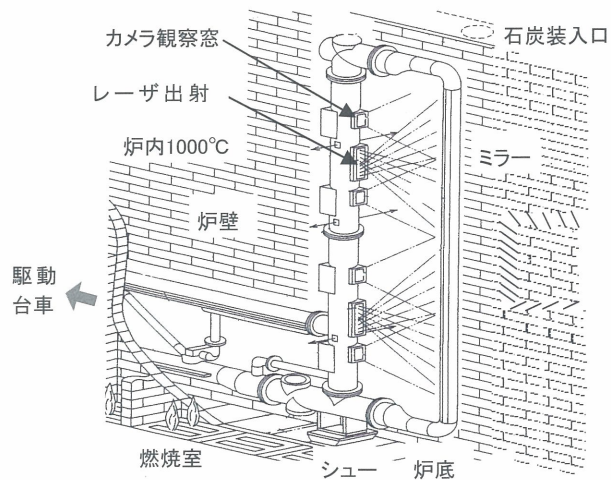


図 3.4 水冷断熱装置の外観

表 3.1 診断装置の設備主仕様

項目	仕様
炉内温度範囲	1000～1200℃
診断時間	約 4 分
診断範囲	炉壁ほぼ全面 炉長 16m、炉高 6m
ライン CCD カメラ	1024 画素×4 台
画像解像度	炉長方向：1.0mm 炉高方向：1.4mm
凹凸測定レーザ	煉瓦 39 段に 44 本照射
凹凸測定精度	±2～3mm
冷却性能	装置内部 40℃以下 最大炉内滞在時間 12 分 冷却水流量：350 リットル/min

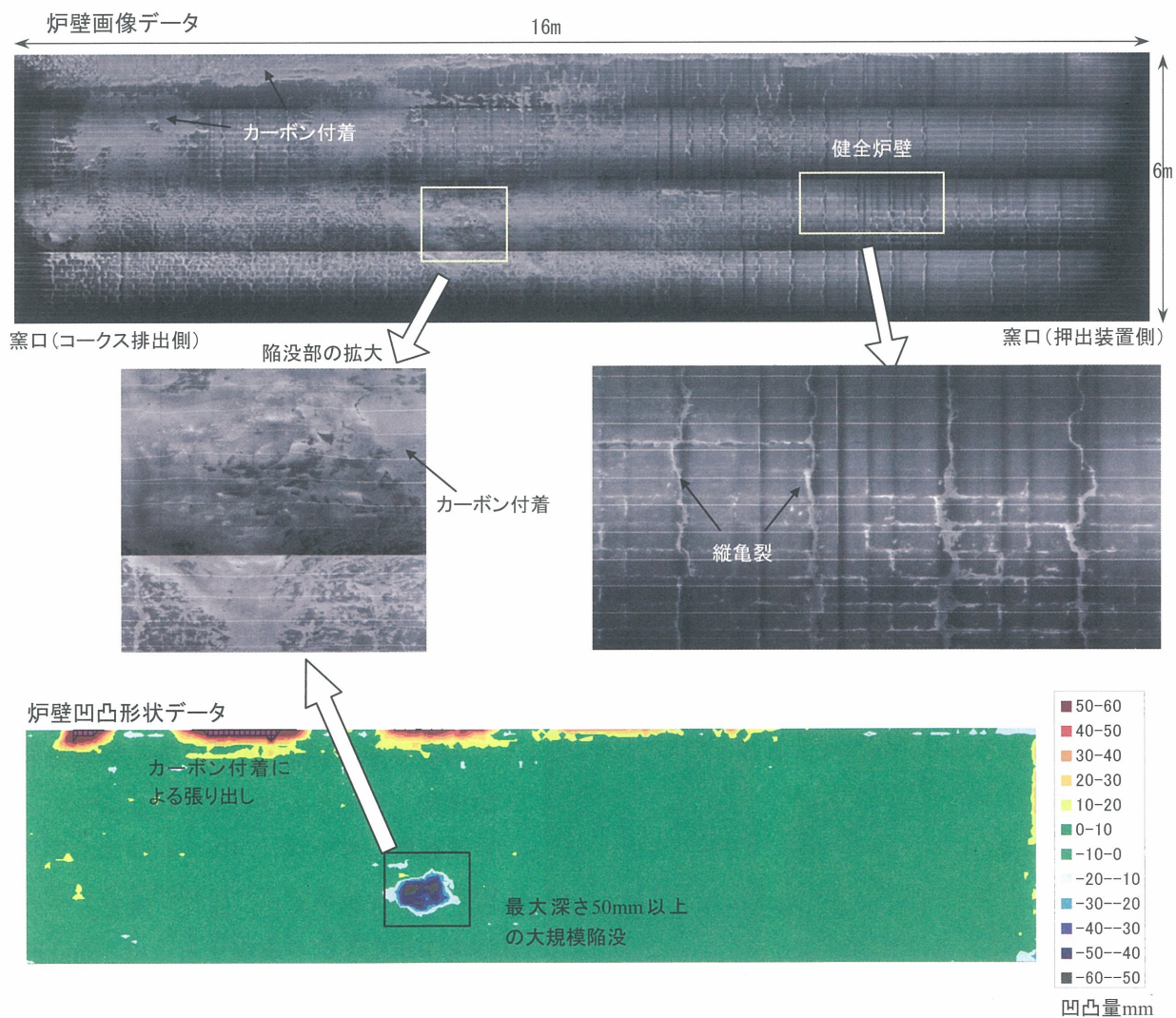


図 3.5 診断データとそこから得られる損傷情報

（２）補修技術の開発

診断データから炉壁に側圧が生じる陥没箇所が特定される。補修とは、損耗した煉瓦面を局所的に肉盛りして平滑面を回復させることを指す。炉壁を高温に維持したまま補修する方法としては、従来から溶射補修が最も有効である。これは、煉瓦壁面に珪石粉体を融着施工するものである。しかし、１．（５）で述べたような人手作業の方法では、精度良い溶射を安定して行うことは困難であった。

このことから、補修技術としては、良好な溶射体と接着状態を形成するための理想的施工条件、即ち溶射バーナと対象面との適正溶射距離と噴射角度 90° を維持した安定施工、および補修面仕上がり平坦度 $\pm 5\text{mm}$ の確保、といった高精度補修技術が開発目標となった。

１）高精度補修装置

溶射施工条件を維持しつつ、高い仕上がり平坦度を実現するための補修装置には、以下が必要である。

- ・ 炉壁損傷形状の定量的かつ精緻な計測
- ・ 損傷形状に応じた溶射補修が可能な集束型溶射バーナ
- ・ 形状計測に基づいて平坦に溶射施工を行うアルゴリズム
- ・ 上記を実現するための高精度補修マニピュレータ

①補修装置の構成と特徴

長尺アームを炉外から駆動する（人力作業の延長線上の）方式は過去にも取り組まれているが、アームの撓みや振動から高精度な手先制御は困難である。そこで、長さ $2\sim 3\text{m}$ の短いリンクアームと関節構造の組み合わせで剛性を確保した多関節マニピュレータを炉内に挿入し、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、 1200°C の高温環境で多関節構造を駆動させた例は無く、複雑な構造を安定かつ均一に冷却できるかが課題であった。

実現した熱間・高精度 補修マニピュレータの模式図を図 3.6 に示す。炭化室の間口幅（約 450mm ）を寸法制約に、機幅は両炉壁と十分なクリアランスを確保するように設定した。機体は断熱材で被覆した水冷パネルによる高剛性外骨格構造とし、機体内部に電気計装配線や給排水ホース、溶射用粉体やガスのホースを通していている。先端に炉壁形状計測装置と溶射バーナを装備し、サーボモータで駆動する 3 関節によって繰り返し位置決め精度 $\pm 1\text{mm}$ を実現、溶射バーナの高精度な位置・速度制御を可能とした。水冷パネル外面に貼付した断熱材は、機体の熱的保護だけでなく、拔熱による炉壁の過冷却を防止しており、炉内 3 時間滞在後の炉壁温度 700°C 以上を維持可能である。

②炉壁損傷形状の計測

診断装置の凹凸測定機能は炉壁全体を高速に測定することが目的であり、煉瓦一段ピッチの凹凸データを得る。溶射補修で目標とする $\pm 5\text{mm}$ の高精度平坦仕上げを実現するには、陥没部位の立体形状をより詳細に求めなければならない。そこで我々は、高精度マニピュレータを詳細形状測定にも活用することを考えた。マニピュレータ先端に炉壁との距離を測定する計測器を装備して平面的に走査することで、補修部周辺について深さ方向精度 $\pm 0.5\text{mm}$ の等高線図を得ることができる。計測器には非接触式のレーザ距離計を使用しており、 1200°C の高温環境下で常に安定して陥没形状を計測することが可能である。

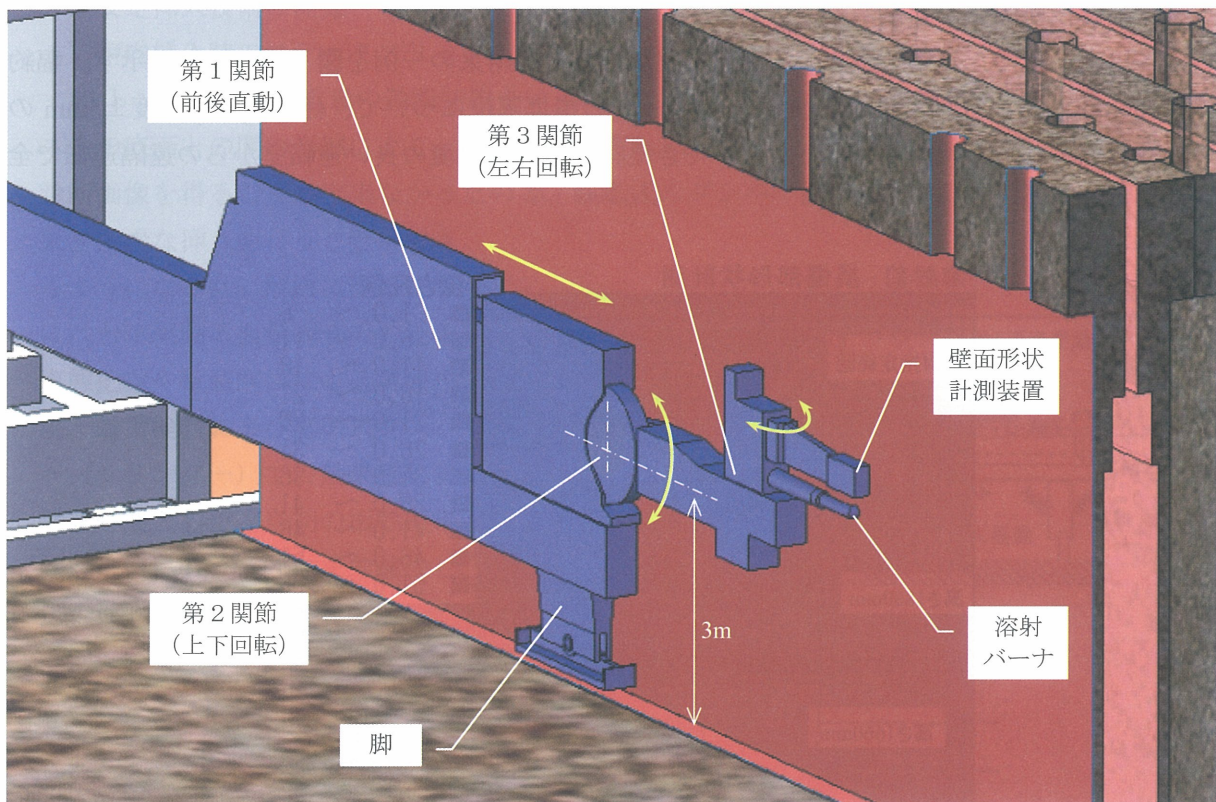


図 3.6 補修マニピュレータ全景模式図

③集束型溶射バーナ

従来の溶射バーナは施工能力を重視した大容量タイプである。これは溶射体の付着面積が大きいので、損傷の細かい凹凸形状が溶射後も残る欠点がある。今回我々は、位置決め精度の高いマニピュレータへの搭載を前提とした、溶射体充填と形状作り込み能力の高い集束型バーナを開発した。

④凹凸部平坦化補修のアルゴリズム

溶射の肉盛り量を制御する方法として、溶射材の吐出量を可変にすることを検討したが、粉体の長距離気送では脈動等により十分な制御精度が得られないことが分かった。そこで、溶射材の吐出量は一定にしておき、損傷深さに応じて溶射バーナの走査速度を制御することで平坦仕上げ実現した。

実際の補修に当たっては、炉壁形状を計測した等高線図を基に、作業者が溶射補修するエリアを多角形で指定する。

その範囲内でまず溶射バーナの平面的な走査軌道を演算して決定し、さらに軌道上の走査速度として、損傷深さに応じた段階的な値を与える。

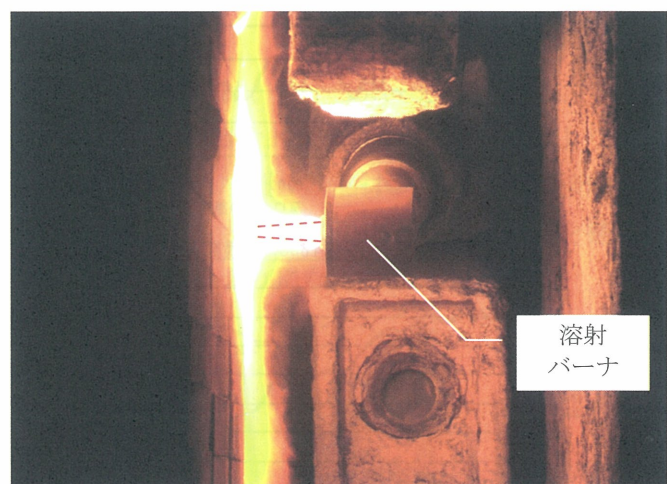


図 3.7 溶射状況

2) 補修技術開発の結果

以上に述べた補修装置にて、実際に実炉補修した結果の一例を図 3.8、3.9 に示す。幅約 700mm、高さ約 900mm、最大深さ約 55mm の損傷部位について、仕上がり平坦度 $\pm 5\text{mm}$ の補修面を約 2.5 時間にて得ることができた。作業は、環境の良い運転室からの遠隔運転で全て可能となった。

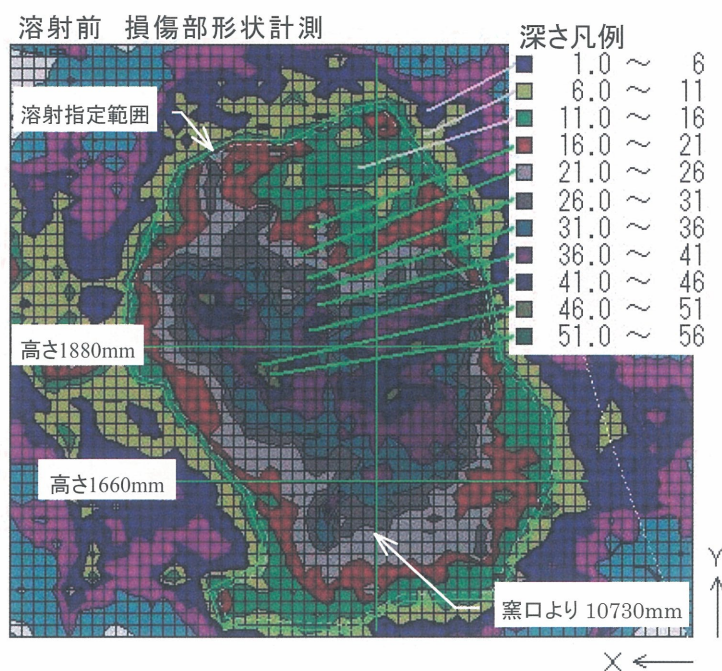


図 3.8 補修結果例（溶射前等高線図）

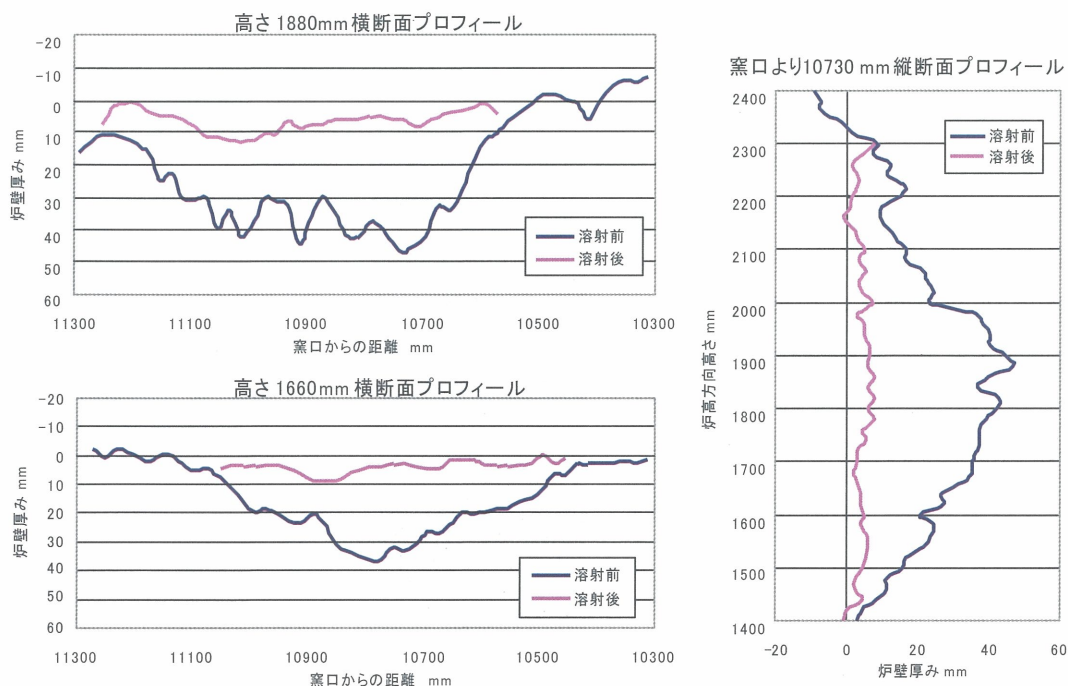


図 3.9 補修結果例（補修前後断面）

(3) 安定挿入技術の開発

1) 炉内挿入時のステックスリップ対策

10 トンを超える大重量の診断装置をコークス炉内に挿入する際、装置底部の摺り部とコークス炉の底面との間の摩擦により、診断装置の摺動息付き現象と高周波数振動が発生し、良好な診断画像を得ることが出来なかった。そこで、回転式のダンパー機構を考案して実機に採用した結果、円滑な挿入を行うことが出来るようになった。解決に至るまでには台車駆動系振動調査での現象実態把握や数値解析による現象再現、対策検討および直線式ダンパー（シリンダー）での効果確認試験を必要とした。当初の振動振幅は対策後に10分の1にまで減少した。（図 3.10）

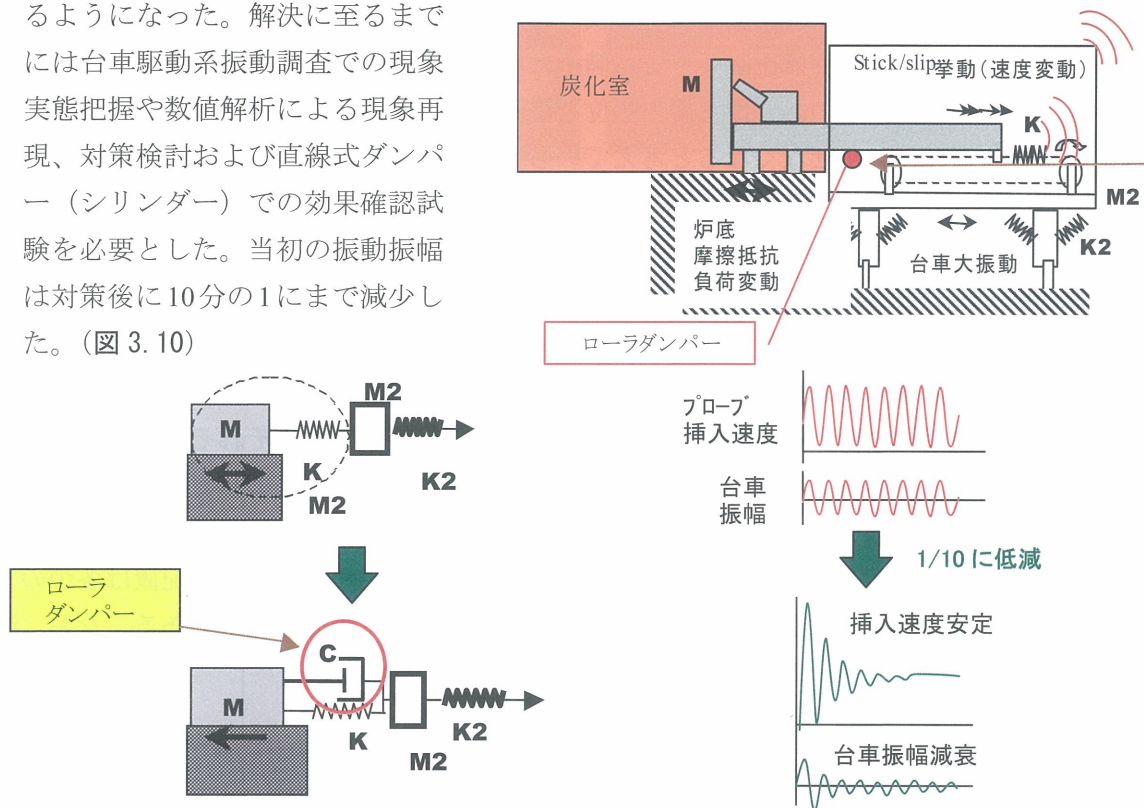


図 3.10 スティックスリップ現象と対策

2) 狭幅炉挿入対策

コークスを押出するための押出装置の入り口である窯口は、最小 35cm と狭い上、さらに診断補修装置と窯口との間は走行軌条や炉の傾きによる相対的な傾斜があることにより狭い窯口に本装置を容易に挿入出来ず、本装置の本体やそれを覆う断熱材が炉の窯口に接触や干渉していたが、薄くて変形しづらい断熱構造を考案するとともに窯口との相対傾斜を補正できる装置を開発することで容易に挿入することが出来るようになった。（図 3.11）

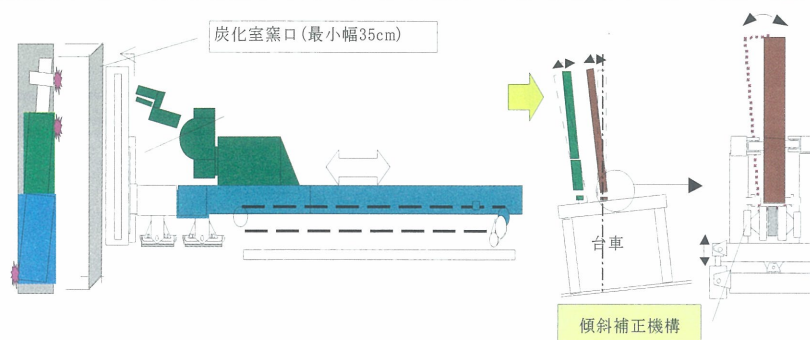


図 3.11 傾斜補正装置

(4) 診断・補修技術の運用

診断装置により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、工場には壁面管理システムを設置している。オペレータは損傷位置、種類、サイズなどの情報を炭化室毎にデータベース化する。このデータベースを基に、損傷度合いや生産計画の調整を考慮して、計画的に補修を実施する。補修後の経過は、その後も診断装置で追跡管理する。

さらに現在、煉瓦局所損耗やカーボン付着で顕著な凹凸がある箇所を平滑化した際のコークス押出負荷低減効果を補修前に精度良く評価する技術確立しつつある。今後全社のコークス炉の老朽化がさらに進行するので補修を必要とする箇所は増加する。補修作業中はコークス生産を中断せざるを得ないので、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技術は、将来炉体管理に欠かせなくなると考えている。

4. 技術開発の成果

(1) 実機展開

1) 実機設備構成

大分製鉄所 1,2 コークス炉における実証機試験を経て最適な実機構成を検討して実現したが、主たる変更点は診断、補修各作業の切り替えを迅速化するためにそれぞれに挿入駆動装置を設けたことと、装置本体と炭化室との相対的傾きを補正するための装置を設けたことである。また、装置の整備、試運転を目的としたテストコースを炉側に設けた。

各装置を搭載した共舞台車は、押出機と同一の軌条上を走行するが、その配置は各炉のレイアウトによって決まる。図 4.1 は名古屋製鉄所 3・4 コークス炉の配置例である。なお、装置形状と外観を図 4.2、4.3、4.4 に示す。

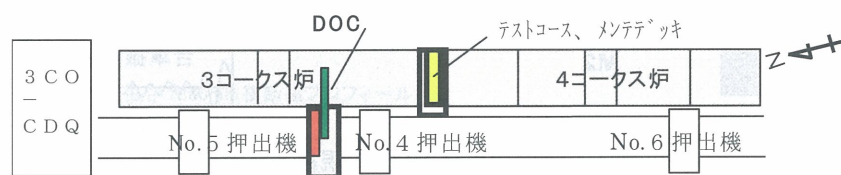


図 4.1 名古屋製鉄所 3・4 コークス炉 DOC 配置

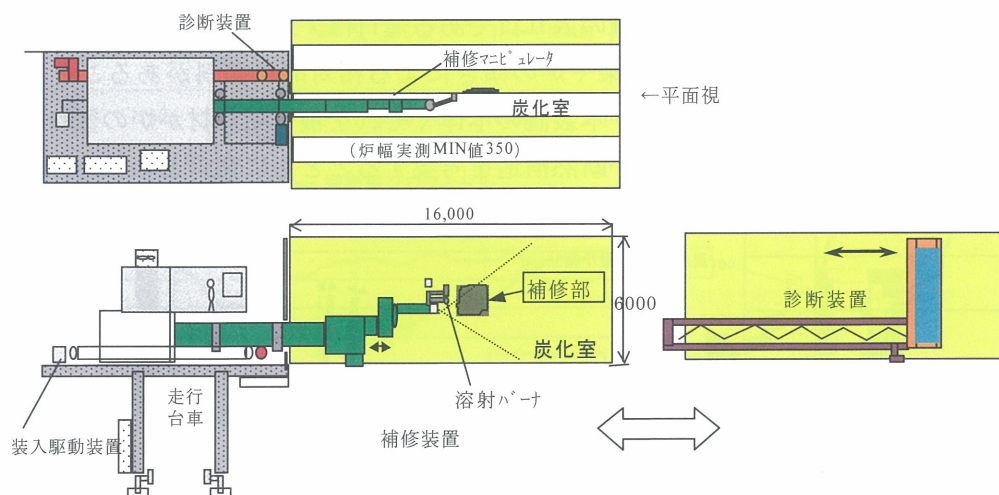


図 4.2 DOC の実機標準設備



図 4.3 名古屋製鉄所 3・4 コークス炉 DOC 設備外観

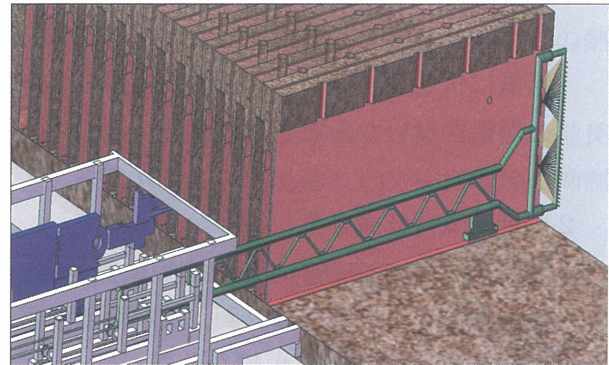


図 4.4 診断装置外観

2) 新日本製鐵(株)における実機展開

大分製鉄所 1・2 コークス炉で実証機評価を完了以降、同機を 1 号機として、現在 7 機が稼働中、2 機が製作中であり、H22 年までに全コークス炉に配備する予定である。(図 4.5)

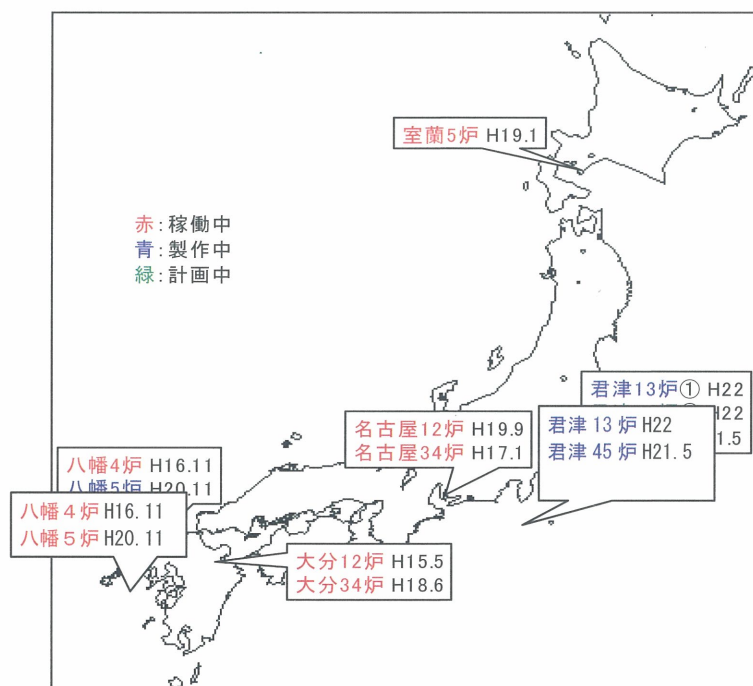


図 4.5 新日本製鐵(株)における DOC の実機展開

(2) 補修効果

1) 補修実績と補修部位寿命

DOC 導入以降、診断装置による診断・解析でコークス炉劣化状況を詳細に把握して、損傷度に応じ優先順位を付けた計画的な補修を実施している。

従来の人手補修の場合、溶射補修部位の寿命は 1～2 年であるが、大分製鉄所での DOC 実機立ち上げの H15 年以降、本装置による補修部位ではほとんど溶射材の脱落もなく健全に維持されている。

補修部位寿命が長い理由としては、酸素により補修部位に付着しているカーボン等異物を焼却除去し、その上に溶射するため残存煉瓦との接着強度が高いことと、補修仕上がり表面の平滑度が高く、周辺煉瓦面高さと同様もしくはよりわずかに低く高さ調整できるため押出装置によるコークス押出し時に補修部位が抵抗になることがないため、溶射体を引き剥がす力が働かないからだと思われる。

2) 押出負荷低減効果

DOC による定期的な炭化室炉壁損傷度の定量診断、その結果に基づいた炉壁損傷度に応じ優先順位を付けた補修計画、及び炉壁損傷部位の平滑補修により、従来の人力補修による炉壁凹凸平滑化に対し大幅な改善が図られ、コークス押出時の押出負荷低減が達成され（図 4.6）、その結果、炭化室炉壁にかかる負荷を軽減することが可能となった。

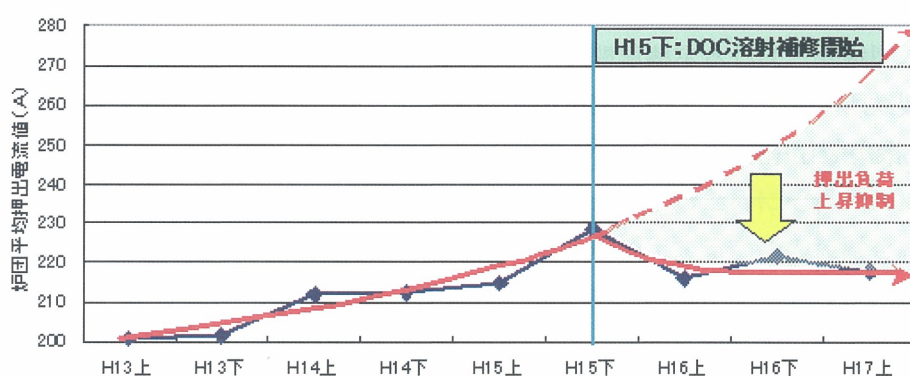


図 4.6 炉団平均押出電流値の推移

(注：縦軸値は押出モータの駆動電流であり、押出力に相当する)

3) コークス炉寿命延長効果

DOC による炉壁凹凸平滑化は前述の押出負荷低減効果に加えて、炭化室炉壁にかかる側圧の軽減による現時点での破孔危険度の低減、つまりコークス炉の延命効果が期待される（図 1.9）。

その効果を当社稼働炉 16 炉団（新炉である大分 5 炉、室蘭 6 炉除く）において試算すると、DOC 補修対策前残寿命に対し DOC 補修対策後残寿命は平均約 5 年の延命効果が期待される。生産量 100 万トン/年のコークス炉をリプレースするためには 1 基、300 億円という多額の費用を要し、炉寿命 5 年の延長は社内全炉団のリプレースコストにおいて金利負担で 400 億円程度の低減効果があると試算される。また、投資タイミングの平準化も可能となり、投資分散のみならずエンジニアリングマンパワーの分散の面においても大きな効果が期待できる。

4) 操業における省エネルギー効果

コークス炉寿命末期では炉壁損傷が進み、押出負荷の上昇その結果として押詰、破孔が発生し、生産性低下（稼働率低下）、熱ロス増（石炭乾留熱量原単位悪化）が進行する。その、抑制のために炉壁補修を実施するが操業上の補修限界を超えると、生産休止窯も発生し始め、生産性低下、熱ロス増は急激に増加する。最終的には生産の経済合理性が喪失し、その時点

がコークス炉寿命となる。またこの様なコークス炉末期においては、著しい環境トラブルや資源対応力低下（安価原料炭の使用制限）なども併発する。本装置の導入により、炉壁平滑性が担保でき、押出負荷上昇の抑制によるコークス炉の安定操業継続、その結果としての熱ロス増回避が可能となる。

DOC による補修の省エネルギー効果を、社内全コークス炉が約 5 年の安定操業期間の延長（寿命延長）が可能となった前提で試算すると、年間 100 万トン規模の CO₂ 排出増加の抑制をもたらすものと言える。

また、合わせて著しい環境トラブル回避、資源対応力低下抑制（安価原料炭の使用拡大）といった効果も期待できる。

5) 作業性改善に関する効果

従来の作業を機械化、遠隔操作化することによって作業者の負荷、環境は改善され、いわゆる 3K（きつい、汚い、危険）作業は皆無となった。また、補修効率、補修仕上り精度も大幅に向上した。

5. 学会発表、特許等

(1) 主な学会発表および論文等

- 1) Sakaida, Yokomizo, Kajiya, Sugiura, Nakashima,: 61st Ironmaking Conference in USA, 2002
- 2) Egawa, Yokomizo, Sakaida, Sugiura, Nakashima, Noguchi: 3rd International Conference on Science and Technology of Ironmaking in Dusseldorf, 2003
- 3) Yokomizo: IISI Raw material Committee in Brussels Seminar Paper, Day2, 2001
- 4) 野口敏彦：第 60 回日本鉄鋼協会共同研究会コークス部会 自由議題資料、2005
- 5) 境田道隆：第 58 回日本鉄鋼協会共同研究会コークス部会 自由議題資料、2003
- 6) 境田, 横溝, 加治屋, 杉浦, 中嶋, 野口：第 143 回日本鉄鋼協会春季講演大会、材料とプロセス Vol.14、No.1 , 2002
- 7) 境田、阿波、杉浦、中嶋、中村、笠井、野口：新日鐵技報第 384 号「製鉄特集」、2006

(2) 特許

本件に関連する特許は現時点で 診断技術 7 件、補修技術、7 件、設備化技術 5 件、合計 19 件出願済である。その内、外国出願は 3 件である。

6. 今後の展望

以上に説明してきたように、1,000℃を超える高温条件且つ、寸法的な制約条件の下で、対象面の表面を迅速かつ詳細に観察・分析し、それに基づいた効率的な補修を可能とする装置を実用化した。新日鐵の各コークス炉へ実機配備を進めてきた結果、合計400億円規模の経済効果を得られること、設備更新に係る投資や要員を計画的に運用することが可能になったこと、年間100万トン規模のCO₂排出の抑制を可能としたこと、作業の機械化によって「3K」作業環境からの解放を実現したこと、などの多大な効果を得ることができた。

世界でも類をみない本技術を、今後、積極的に普及させていくことは、経済的な面のみならず、資源保護・地球環境にとって極めて重要である。