

老朽化したコークス炉の診断・補修技術

Diagnostic and Repair Technology in Aged Coke Oven

亀崎 俊一 KAMEZAKI Shunichi JFE スチール コークス技術部 主任部員(副部長)

要旨

JFE スチールの各コークス炉の稼働が40年を超え、老朽化が進行し、押詰りの増加による稼働率の低下が顕著となった。炭化室の炉壁張出しは押詰りの発生原因の一つである。レーザースキャナにより炉壁形状を測定する技術を開発することにより張り出し量を定量的に評価できるようにし、さらに燃焼室の観察と併用することで補修必要範囲を特定する技術を開発した。また、積替えに関する様々な工法の開発により、中央まで劣化が進行した燃焼室の補修を可能にした。燃焼室を診断・劣化分類し計画的な補修を進めることで、急激な生産性の低下を抑止し、計画的な大規模補修につなげた。

Abstract:

Coke ovens in JFE Steel have been continuously operated over 40 years, and show reduced productivity due to damage over time. Bulging deformation of oven wall is one of the causes of stickers which reduced productivity. JFE Steel has developed diagnostic technology, including a new measuring method of the bulge shape with Laser-Scanner and use of flue observation device which enables determination of the range of partial repairing area for coke oven wall. In addition, partial repair methods, half oven replacement, oven roof replacement, and other techniques were improved, along with a new through repair method. Coke ovens in Kurashiki and Chiba district were repaired with these technologies according to the strategic plan and kept operation before pad-up renewal.

1. はじめに

鉄鉱石から銑鉄を取り出す主な方法として「高炉法」が使用されている。コークスは、高炉で還元ガスの原料となり、またガスや溶けた鉄分の通り道となる層を作る重要な材料である¹⁾。

コークス炉は、レンガを積み上げ、周囲から炉締め構造物で締め付けて安定化させた大型構造物である。建造後内部温度が1200°C程度になるまで注意深く昇温し、全体構造が安定したところで稼働を開始させる。稼働開始後は、基本的に炉温を下げることはできず、炉体の主要部分は高温を保ったままのメンテナンスが必要となる。

JFE スチールの各コークス炉の稼働が40年を超え、老朽化が進行した。このため、炉体の診断・補修技術を開発・適用し、急激な生産性の低下を抑止、コークス炉更新につなげた。

2. コークス炉の概要

2.1 コークス炉の機能

コークス炉では、炭化室に石炭を投入し、両側の燃焼室で発生させた熱で乾留状態にすることによるコークス化反

応でコークスを製造する²⁾。反応が完了すると炭化室の両側の炉蓋を開け、高温状態のままの赤熱コークスを一方の側から押出機のラムで押出し、反対側のガイドを介してバケットに受けて排出する。再び炉蓋を装着するとすぐに次の石炭を炭化室に投入、この繰り返しによりコークスを製造する。

2.2 コークス炉の構造

コークス炉は、レンガを積み上げた炉体、炉体を安定に保つ役割の炉締め機構、ガス・空気の吸排気設備、原料・コークスを供給・運搬する移動機などで構成される³⁾。本報は炉体を対象とし、その他については省略する。

2.2.1 炉体

炉体は、レンガをモルタルで接着し組積した壁体を基本構造とした建造物である(図1)。炉底、コーベル、天井は

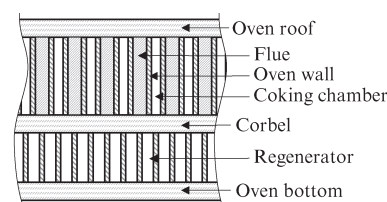


図1 コークス炉体構造

Fig. 1 Coke oven structure

2021年11月22日受付

レンガを数段積み重ねた中実の水平スラブである。その間に炉長方向に一直列に積み上げたレンガ壁で蓄熱室（炉底—コーベル間）、炭化室および燃焼室（コーベル—天井間）を作り、コーベルおよび天井を支える構造となっている。

レンガ壁はその上部構造の自重を支えるとともに、自重で締め付けられて静的に安定した構造となっている。炭化室と燃焼室は交互に並び、数十セット並んだ集合を炉団と呼ぶ。

2.2.2 炭化室

石炭を装入する炭化室は幅が0.4 m程度、奥行きは16 m程度、高さは6~7 mの、炉壁に囲まれた薄く平らな空間である。ここに装入された石炭は、燃焼室で加熱され乾留が進み、不定形の数 cm~数十 cmの塊コークスとなる。塊コークスはコークスケーキと呼ぶ集合体となり、炉壁との間に数 mm~十数 mm程度の間隙がある状態で自立する。乾留が終わると両端の炉蓋を取り、一方から押出機で他方に向けてコークスケーキを押し出す。炉壁面はコークスケーキの形状を決める型枠であり、また、押出時には、コークスケーキを崩さず整然と移動させるガイドとなる。そのため、炉壁面は、凹凸のない平滑な面であることが必要である。

2.2.3 燃焼室

燃焼室は、炉団方向両側に厚み100 mm程度の炉壁で仕切られた空間内に、両壁を接続する仕切り壁（ピンダーレンガ）で燃焼回路（フリュー）を形成している。ピンダーレンガは炉壁を接続し、構造強度を強化する役割を持つ。

2.2.4 ガス燃焼回路

均質なコークスを製造するためには、炭化室温度を炉長方向に決められた温度分布にする必要がある。炉長方向に多段に作られたフリューは、それぞれ個別に燃焼調節を行うことで最適な温度分布を作る。当社のコークス炉は回路構成の違いにより大きく以下の2形式に分けられる。

(1) 水平始道式炉（カールスチル炉, Carl Still）（図2 (a)）

垂直方向多段のフリューを炉長方向に2ブロックに分

け、片側半分で燃焼を行う。上部に連通した水平始道に燃焼後のガスを合流させ、他方のブロックを通して蓄熱室を通し炉体から排気する。

(2) ヘアピン式炉（オットー炉, Wilputte-Otto）（図2 (b)）
垂直方向の隣り合う2フリューの上部を連通させ1セットとし、片側でガスを燃焼させ他方で排気する。1セットごとにピンダーレンガが炉壁を上から下までつなげている。

いずれの形式も燃焼・排気を一定時間ごとに交互に切り替えることで、温度を一定に保っている。

2.2.5 炉締め機構

組積したレンガ壁は、静的な状態では重力により安定的に自立しているが、水平方向の力（次項）に対しては弱いことから耐力を確保する必要がある。このため、レンガを水平方向に締め付ける炉締め機構を備えている。炉締め機構は、炉団方向にはピニオンウォールとロングタイロッドで、炉長方向には各燃焼室の外側のバックステーとクロスタイロッドでつなぎ締め付ける（図3）。炉壁の面外耐力は、上部荷重とバックステーによる締め付け力で決まる⁴⁾。

2.2.6 燃焼室にかかる力

燃焼室部分には重力以外に以下のような水平方向の力がかかる。これらの力は燃焼室炉壁にかかり、後述する炉壁変形を引き起こす原因となる。

- (1) 石炭の膨張圧：乾留中の石炭が軟化溶融し、膨張する際に炉壁に面外方向に加わる圧力である。石炭の種類により大きく異なり、数 kPa から数十 kPa になる。
- (2) 押し出し圧力：ラムがコークスケーキを押し始めるとコークスが炉壁と接触し始め、炉壁を面外に押す力がかかる。
- (3) 押出力：炉壁に押し出し圧力がかかった状態でコークスケーキが移動する際に、押出方向の摩擦力が炉壁にかかる。

以上の力はコークス製造の1サイクルの特定の段階で発生し、稼働とともに繰り返し回数が増加する。

(4) 装炭車荷重：装炭車とは、炉頂を走行し、石炭を石炭

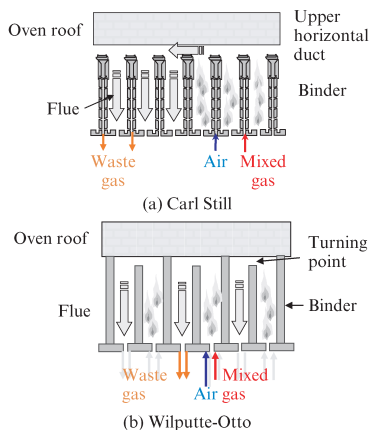


図2 炉形式による燃焼回路の違い
Fig. 2 Type of combustion system

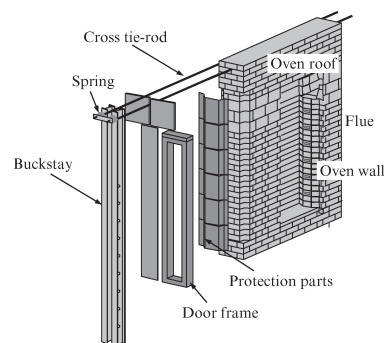


図3 炉締め機構
Fig. 3 Bracing system of oven chamber

塔から燃焼室に運搬・装入する移動機で、1装入ごとに1往復を繰り返す。石炭も含め百数十tの重量が、燃焼室に交番荷重となってかかる。石炭塔に近い燃焼室ほどその回数が多くなる。

- (5) 熱負荷：レンガは温度変化により膨張収縮が発生する。厳密には内力であるが、大きな負荷変動となりうる。

3. 炉体の劣化

炉体の劣化は概ね図4のとおり進行し、押し詰りが発生し、生産性が低下していく。

3.1 炉締め機構の劣化による構造の劣化

燃焼室の炉締め機構の劣化により構造変形が起こる。

バックステー、クロスタイロッド、炉締め金物の劣化と燃焼室の変形パターンを表1に示す。この変形は窯口（炭化室両端部）の1フレュー程度の範囲で発生する。

3.2 水平焰道式炉特有の構造劣化

水平焰道式炉の焰道部分には、全長に渡り両側の炉壁をつなぐピンダーレンガがなく、耐力が低下する。これに対し、ヘアピン式炉は1セットごとに仕切り壁が炉壁をつなぐため、耐力の低下が限定的である。この構造上の違いにより、炉壁の損傷の形態、程度に違いがある。当社で最初に顕著な構造劣化が発生したのは水平焰道式炉であった。ヘアピン式炉では以下に述べる変形は比較的少なかった。

3.2.1 窯口上部を起点とする張り出し変形

水平焰道付近では、ピンダーレンガがないことから図5に示した変形が発生しやすく、張り出し量が大きくなる。その

張り出し変形がピンダーレンガ上端に引っ張り力を発生させ、ひび割れが発生・進展する(図6)。これにより張り出し範囲が下方・奥方向に拡大し、変形量が増大する。図7に典型的な例を示す。

ピンダーレンガが切れると外力に抗する耐力が下がるため、小さな負荷でも炉壁が崩れる現象が発生した。

3.2.2 装炭車軌条下を起点とする張り出し変形

ピンダーレンガのない水平焰道の炉壁部分では、垂直荷重がモーメント荷重となる。2.2.6項で述べた装炭車荷重が繰り返しかかると、応力集中で亀裂が発生する(図8)。

モーメントは、炉壁が外側（炭化室側）に膨らむ方向で、

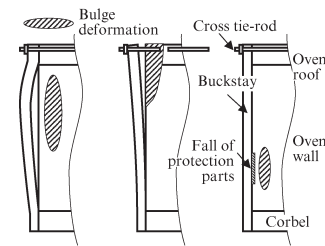


図5 炉締め機構の劣化による変形形状例

Fig. 5 Bulge deformation types of bracing system

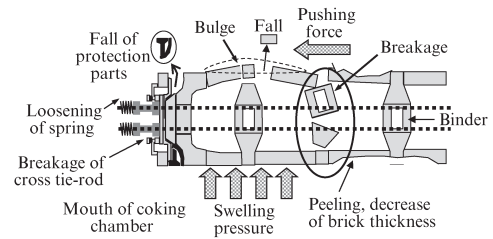


図6 窯口張り出し時のレンガの状態

Fig. 6 Condition of brick structure under bulge deformation

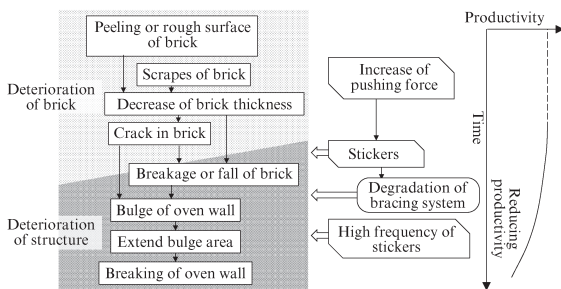


図4 炉体の劣化と押し詰り

Fig. 4 Damaged oven wall and stickers

表1 炉締め機構の劣化

Table 1 Damage of bracing system

Component	Damage	Figure
Buckstay	Bending by overheating	Fig 5 (a)
Cross tie-rod	Expansion or breakage	Fig 5 (b)
Protection parts	Breakage or fall	Fig 5 (c)

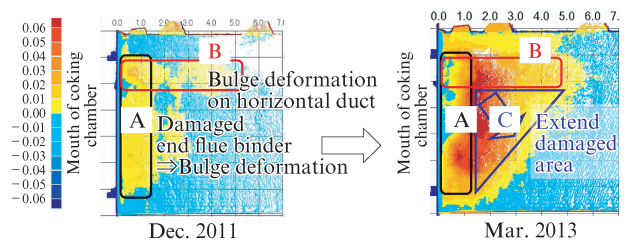


図7 水平焰道形式における窯口上部の張り出し変形

Fig. 7 Bulge deformation near mouth of coking chamber

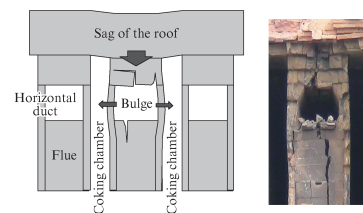


図8 水平焰道部に発生した亀裂

Fig. 8 Crack in brick around horizontal duct

天井とピンダーレンガに引っ張り力を発生させる。引っ張り力により亀裂が発生し、亀裂が進行すると張り出し変形となる。張り出し変形は水平焔道方向、下方向に概ね円形形状で拡大していく (図 9)。

3.2.3 地区により異なる劣化の発生状況

表 2 に示すように水平焔道式炉は当社の 3 地区にあり、劣化はいずれの地区でも発生しているが、その度合いは千葉・倉敷と京浜で大きく異なっている。その理由は、

- (1) 千葉・倉敷の各炉はバックステーの断面二次モーメントがほぼ同等であるが、京浜の炉は約 1.5 倍と曲げ変形を起こしにくい構造となっている。
- (2) 千葉・倉敷の炉は、炉締め金物が分割構造でピン締結のため、変形・脱落を起こしやすかった。これに対し、

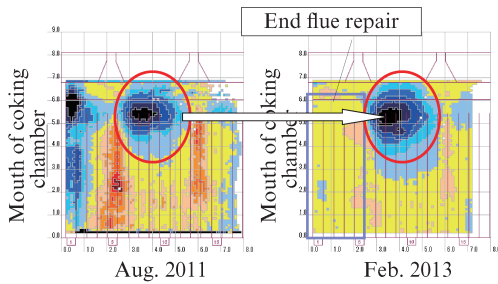


図 9 装炭車軌条下の円形張り出し
Fig. 9 Bulge under charging car rail

表 2 JFE スチールのコークス炉の炉形式
Table 2 Coke oven type in JFE Steel

Region	No	Number of batteries	Number of ovens	Operation started	Oven type	
Chiba	5	4	92	1964	Carl-Still	
	6	2	102	1973		
	7	2	66	1980		
Keihin	1	4	124	1976		
	2	2	74	1979		
Kurashiki	1	2	78	1967		Uhde
	2	2	84	1968		
	3	2	86	1969		
	4	2	86	1971		
	5	2	86	1973		
	6	2	43	A1980		
Fukuyama			43	B2011		Wilputte Otto
	3	2	104	1969		
	4	3	175	1971		
	5	4	165	1973		
			55	D2006		

(Batteries in operation in 2010)

京浜の炉はドアフレームで押さえられ変形しにくかった (図 10)。

ためである。

主にこの 2 点の違いにより、京浜の炉体は炉締め劣化が起こりにくく、炉壁変形が少なかったと考えられる。

3.3 燃焼室変形と押詰り

構造劣化が進むとコークスケーキと炉壁の摩擦が増え、必要となる押出力が増大する。押出力が押出用モーターの設定電流値を超えると押出は停止し、「押詰り」となる。押詰りとなった場合には、負荷を下げるために、コークスを掻き出す作業と再押出を繰り返し、押詰りを解除する。その間は生産できなくなり、生産を再開しても押出順序が元に戻るまでは生産性が落ちる。また、押詰りの発生数が増えると他の窯の操業にも支障が発生し、さらに生産性が落ちる (稼働率が下がる)。

3.4 稼働率低下

稼働年数が長くなるとともに、各コークス炉は押詰りが増え、稼働率が徐々に低下するようになり、リーマンショック時の低稼働率操業以降、さらに低下速度が速くなった。倉敷地区コークス炉の稼働率、押詰り数の推移を図 11 に示す。

倉敷地区では、生産量低下によるコークス不足が問題となり、緊急対策が必要となった。この際に変形の定量的判断が大きな課題となったことから、新たに診断技術を開発した。

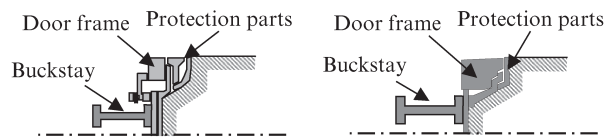


図 10 窯口金物構造の違い
Fig. 10 Difference of protection parts

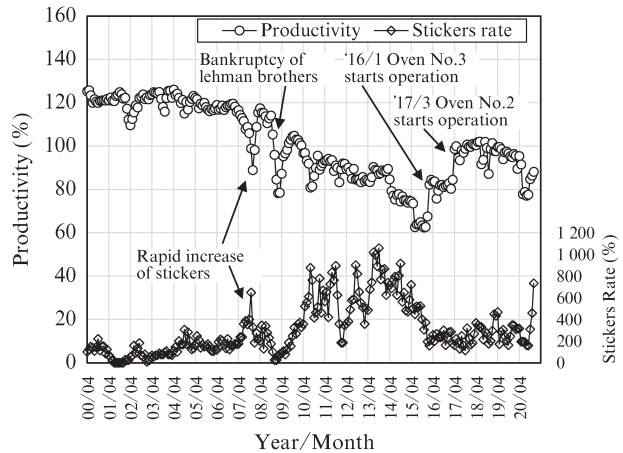


図 11 倉敷地区コークス炉の稼働率、押詰り数の推移
Fig. 11 Trend of productivity and stickers rate in Kurashiki

4. 診断技術

測定対象の炉壁は幅 400 mm 程度の狭隘な空間の内面で、温度が 1 200°C 程度の高温空間内である。以前は、空にした炭化室を外側から目視で観察すること、もしくは T 型の治具を当てて幅を見積もることで変形を確認していた。しかし、目視では定量的に判断しがたく、治具測定でも測定した箇所（点）の評価しかできなかった。また、奥の方は治具が届かず、目視も困難であった。このため炉壁の変形を面で定量的に測定する方法を開発した。

4.1 炉壁変形定量化技術

接触式、超音波式、マイクロ波式などによる距離測定は、プローブを炉内に挿入し、動かしてスキャンする必要があり、8 m 程度の範囲を動かすためには大型で強力な冷却機構を備えた機構が必要となる。これに対し、レーザー式による距離測定は、離れた所からでも十分な精度で測定できる特徴があり、外からでも測定できる可能性があった。

4.1.1 レーザースキャナによる炉壁測定

このことから、炉壁測定にはレーザー式を採用し、具体的な装置として、機動性が高く、定点から広範囲のスキャン測定が可能なレーザースキャナ（以下 LS）を選択した（図 12）。

LS はレーザー光線を対象物に照射し、Time Of Flight 方式で距離を測定する^{5,6)}。レーザー光線を照射し、高速回転する鏡と装置全体の回転により、極座標系で全天周の各方向の対象物との距離を測定する。装置は重量 1 kg 程度（最新の機種）で、三脚に固定して測定できる。測定結果はクラウドデータと呼ばれる、3次元直行座標系に変換された点座標の集合データとなる。点群密度（単位面積当たりの測定点数）は対象物との距離とスキャンの角度分解能で決定され、距離の二乗に反比例する。LS に近い対象は点群密度が高い精細な情報が得られるが、距離が離れるに従い情報量は少なくなる。

4.1.2 炉壁測定方法

炉壁測定は、窯の前の奥行き 1.5~2 m 程度の中間デッキ（プラットフォーム）から行う。この場合、幅 400 mm 程度の窯口から奥行き数 m をのぞき込む形となる。窯の真正面から測定すれば両壁が見えて一度の測定で済むが、壁とレーザー光線のなす角が小さくなり、反射光量の低下（精度の悪化）、点群密度の低下が顕著になる。このため、2 回の測定とし、片方の壁ごとに、所定の奥行きまで見通せるように窯の正面から少し左右にずれた位置から測定した。炭化室測定状況と点群データの例を図 13 に示す。

4.1.3 課題と対策

炉壁測定の課題は温度・粉塵対策、安全対策、データ処理であった。

(1) 温度・粉塵対策

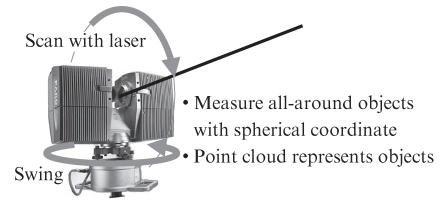


図 12 レーザースキャナ
Fig. 12 Laser scanner

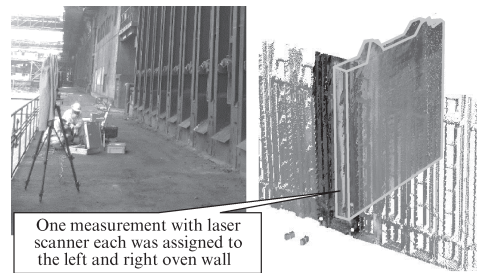


図 13 炭化室測定状況と測定した点群データの例
Fig. 13 Measurement scene of oven wall

強い上昇気流により、プラットフォーム上では高温空気に直接接触することはないものの、炭化室内部からの輻射熱が課題となった。LS をカバーで覆うなどの対策を検討したが、レーザーの通り道は露出する必要があること、カバー重量増のため機動性が損なわれることから断念し、動作保証温度範囲を超えないように測定時間を最小化した。

(2) 安全対策

LS には、スキャン動作速度に基づく危険距離があることから、次の方法で安全を確保した。

- 危険距離内のエリアは、測定者以外立ち入り禁止とする。
- 測定者は指定保護眼鏡を着用する。
- レーザー発振中は、LS に背を向け LS を見ない。

(3) データ処理

LS のデータは容量が膨大であり、データをそのまま処理しようとするならば、計算処理能力の高い PC と、点群処理専用のソフトウェアが必要である。このため、測定した点群データの炉壁設計形状からのずれ量（炉壁変形量）を算出し、格子状に分割した各ブロックに含まれる点群のずれ量の平均値を各ブロックの平均変形量として定義することで、データを大幅に圧縮、表計算アプリケーションで処理できるようにした。

4.1.4 炉壁データの活用

実測データによる定量評価が可能となったことから、これを活用した診断システムを開発した。

(1) コークスと炉壁の接触判定

凹凸が発生した炉壁ではコークスケーキに凹凸が転写され、押出時にはほぼそのまま移動するため、コークスケーキが、炉幅が狭い（炉壁が張り出した）部分を通過する際に強く接触する可能性がある。まず操業情報から各位置の収縮

量を計算しコークスケーキ形状を推定し、固定した炉壁形状データに対し、コークスケーキ形状データを移動させて干渉量をチェックする。同じ張り出し量でも干渉の大小が違うことを見える化し、補修優先度を決定するシステムを開発した。

(2) 変形の進行予測

炉壁の変形は、時間をかけて範囲が広がり、張り出し量が増加することがデータで確認された。測定データのある全窯を評価したところ、変形速度は概ね炉団ごとに一定値になることが統計的に分かった。このことから、形状データを定期的に測定し、特定の部位について変形の時間変化を算出することにより、その部位が補修を必要とする状態になるまでの時間を予測するシステムを開発した。このシステムにより各窯の補修必要時期を予測できるようになり、積替え補修計画の立案が可能となった。

5. 積替え補修

5.1 コークス炉の炉体補修

炉体に関連する補修は図14のように多岐にわたる。この中で、炉壁の平滑化のための重要な技術である積替え補修についての取り組みを概説する。

5.2 燃焼室積替え補修

5.2.1 積替え補修に関わる個別技術の確立

3.4節で述べたとおり、倉敷地区では2010年に非稼働窯が多くなり正常な操業が難しくなったため、早期復旧が課題となった。

当初は定量的な診断ができず、経験で範囲を決め燃焼室の積替え補修を行ったが、積替えのやり直し、短期間で変形が再発する、操業度が上がらないなどの課題があった。また、積替え後に変形が奥に進む・奥で発生するケースも出始め、経験のない範囲（奥行方向）の補修が必要となってきた。

このため劣化診断と積替え補修について表3に示す各種の技術開発を進め実用化した。

5.2.2 積替え範囲拡大時の課題と対策

燃焼室劣化の奥部への進行が多数発生し、補修が大規模になるにつれて、同時に劣化が進んだ天井の積替えと装炭車軌条の補強が近隣燃焼室に与える影響が課題となった。

天井の積替えにあたっては、天井を取り外すことにより、その両側の非積替え天井部の炉団方向の炉締め力を喪失しないように補強支持する必要がある。天井断面の押さえ方、支持部材の強度・力調整機構を実工事で試験施工し、取り外さない両側の天井のゆるみを防止する技術を開発した。

装炭車軌条補強では、補強部材の支持点を両側の燃焼室に取り、荷重を預ける。この際に非積替え燃焼室の負荷が

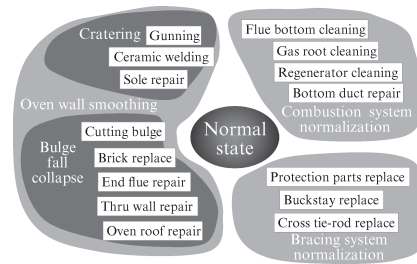


図14 炉体補修技術

Fig. 14 Oven repair technology

表3 開発（導入）した診断・補修技術

Table 3 Developed (Introduced) diagnosis and repair technologies

Type	Technique	Overview
Diagnosis	Measurement of oven wall with laser scanner	Measure oven wall with laser scanner and calculate characteristic amount of deformation, compare and decide priority
	Flue observation	Observe crack in binder brick with flue observation device
	Decision of repair area	Decide the region to repair with measured information of oven wall
	Deformation prediction	Estimate the period to repair with change rate of characteristic amount of deformation
Repair	End flue repair	Replace the brick from mouth of chamber to halfway in hot condition
	Through wall repair	Replace the brick of a whole chamber
	Oven roof repair	Replace the oven roof not to loosen the bracing of non-repairing roof
	Reinforcement of charging car rail	Disperse the charging car load with reinforcement beam to the chamber adjacent to the repairing

課題とならないよう、最善な支持点の取り方をFEM解析により検討し、基準化した。

この二つの技術により補修範囲の大規模化に対応でき、補修の成功率が大きく向上した。

5.2.3 積替え補修ランクの定義

炉壁の変形範囲を事前に把握できるようになったことから、積替え補修ランクを表4のとおり定義し、ランクごとの補修方法をメニュー化した。これにより積替え方法が特定でき、補修時間を正確に見積もれるようになった。

5.2.4 炉体補修の戦略的実行

積替え補修を計画的に行えるようになったことで、図14に示す他の補修についても計画的に行えるようになったこと

表 4 積替え補修のランク分け
Table 4 Classified flue repair

Rank	P	D	I
Depth of damage	In front of charging car rail	Charging car rail to center of oven	Center of oven
Method	<ul style="list-style-type: none"> • End flue repair • Oven roof repair 	<ul style="list-style-type: none"> • End flue repair • Reinforcement of charging car rail • Oven roof repair 	<ul style="list-style-type: none"> • Thru wall repair • Include reinforcement of charging car rail and oven roof repair

から、倉敷地区では押詰りの鎮静化に成功した。LS データによる窯毎の劣化予測から炉団の稼働率を将来予測し、炉団の更新（パドアップ）を計画的に進められるようになった。

6. おわりに

本稿ではコークス炉燃焼室の診断・補修についての JFE スチールの取り組みを報告した。コークス炉の健全化には報告では省略したレンガ劣化、燃焼機能劣化、移動機劣化などを含めた総合的な対策が必要であった。引き続き、

コークス炉の一層の健全化に向けた取り組みを多面的に進めていきたい。

参考文献

- 1) 彼島秀雄. 高炉技術の系統化. 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第15集. 独立行政法人 国立科学博物館, 2010.
- 2) 美浦義明. 高炉用コークス製造法の基礎 (IV). 燃料協会誌. 1984, vol. 63, no. 10, P 882-892. 1984.
- 3) 加藤元永, 岡恒夫, 山本雅章. 西日本製鉄所 (福山地区) 第5コークス炉 D 団の建設と操業. JFE 技報. 2008, no. 22, p. 6-10.
- 4) AhlersWalterVon. Grenzbelastung von Koksofenwänden. Stahl und Eisen 79. 1959, no. 7, p. 397-405.
- 5) 早川裕式, 小口高. 地形学における地上レーザ測量の活用. 地学雑誌. 2016, vol. 125, no. 3, p. 299-324.
- 6) 福森秀晃, 佐田達典, 大久保秀晃, 清水哲也, 村山盛行. 3次元レーザースキャナーの測定精度に関する基礎的実験. 土木情報利用技術論文集. 2009, vol. 18, p. 193-200.



亀崎 俊一