

製鋼用耐火物の診断技術

Methods of Evaluating the Damage of Steelmaking Refractories

澤井 重人*
Shigeto SAWAI

橋本 一 菜
Kazuma HASHIMOTO

塩川 将人
Masato SHIOKAWA

山田 泰宏
Yasuhiro YAMADA

抄 録

製鉄プロセスの窯炉で使用される耐火物は使用中に様々な要因で損傷する。窯炉を維持、管理するためには耐火物を点検し、損傷状況を把握し、診断結果に基づいて補修や交換を行う必要がある。従って、耐火物の診断技術は、湯漏れ等の大規模トラブルの未然防止、生産性向上、耐火物コスト削減を両立するために重要な技術である。日本製鉄(株)で導入している耐火物の診断技術として、転炉へのレーザープロファイルメータ、RHへの熱間観察カメラ、取鍋へのサーモグラフィの事例について述べた。

Abstract

The refractory used at iron manufacturing process is damaged by various factors during campaign. In order to maintain and manage the furnace, refractory is necessary to be checked and it is necessary to repair and exchange refractory based on evaluating results. Therefore, evaluating methods are important to the prevention of trouble before happens, the productivity improvement, and the reduction of refractory costs. This report introduce laser profile meter at BOF, observation camera at RH degasser, and thermography at ladle as evaluating methods installed to Nippon Steel Corporation.

1. 緒 言

耐火物の診断技術は、湯漏れ、火漏れ等の大規模トラブルの未然防止、高生産性、耐火物コスト削減を高レベルで両立するためのコア技術である。近年、製鉄・熱間圧延用炉の老朽化、品種高度化に伴う製鋼耐火物の使用条件過酷化により、その役割はより重要性を増しており、日本製鉄(株)では熱間観察技術の開発や高精度高効率測定装置を導入し活用してきた。本報告では、製鋼工程における耐火物の診断技術の活用事例について述べる。

2. 診断技術の概要

製鉄プロセスの窯炉では、高温の溶銑、溶鋼、鋼片を扱うために炉内には耐火物を使用される。耐火物はスラグとの接触による溶損、溶鋼による摩耗、熱衝撃等によるスポーリング等、様々な要因で損傷する。窯炉を維持、管理するためには、耐火物を点検し損傷状況を把握し、診断結果に基づいて補修、交換を行う必要がある。

耐火物の点検には、窯炉の休止中に点検する方法(オフライン点検)と、稼働中に点検する方法(オンライン点検)

がある。窯炉の管理フローの一例を図1に示す。オフライン点検では、窯炉を冷やして近接した診断が可能であるため、耐火物を解体しながらの損傷調査や残厚測定、プロフィールメータによる残厚測定といった方法でより詳細に

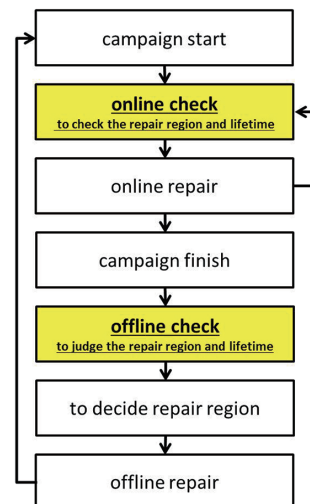


図1 窯炉の管理フロー
Campaign flow of furnace

* 名古屋製鉄所 製鋼部 炉材室 主査 愛知県東海市東海町 5-3 〒476-8686

耐火物の損耗状況を把握することができる。一方でオンライン点検では、オフライン点検ほど詳細な診断は困難であるものの、稼働中における急な耐火物の脱落や異常溶損を捕らえることが可能であり、耐火物の損耗による事故を防ぐには必要不可欠である。オンライン点検は目視による診断が一般的であるが、稼働中の炉は高温であるため、人間が接近するには限界がある。そのため、プロフィールメータや熱間観察カメラ、赤外線サーモグラフィといった様々な診断装置が適用されてきた。

診断には炉内の耐火物の状態を直接的に診断する方法と、鉄皮温度等から間接的に診断する方法がある。直接診断の代表例は熱間観察カメラやレーザープロフィールメータである。熱間観察カメラはTVカメラを用いて炉内の耐火物状態を観察するため、撮影画像から定性的にしか診断ができない。一方で、レーザープロフィールメータはレンガが残厚を定量的に測定できるため、結果から損耗速度や余寿命を算出できる。これらの直接診断は転炉や取鍋等、開放系の窯炉で適用することは容易であるが、混銑車や真空脱ガス(RH)等、開口部が小さい窯炉の場合、測定装置を開口部から挿入する必要がある、適用する難易度は格段に上昇する。このような窯炉では、放射温度計やサーモグラフィ等を用いて鉄皮温度を測定し、炉内の耐火物の残厚を間接的に測定する手法が用いられる。

日本製鉄における各工程への診断技術適用状況は以下の通りである(表1)。これらの装置は稼働後数10年経過しているものもあり、計画的に更新していく必要がある。

- 製鉄
 - ・ 熱風炉, コークス乾式消火設備(CDQ): 熱間観察装置
- 製鋼
 - ・ 混銑車(TPC): レーザープロフィールメータ(PFM), サーマグラフィ
 - ・ 転炉: 固定式 PFM
 - ・ RH: 炉内観察装置, サーマグラフィ
 - ・ 取鍋: PFM, サーマグラフィ
- 圧延
 - ・ 加熱炉: 熱間観察装置, PFM

表1 日本製鉄の各工程への診断装置の導入例
Installation example of diagnostic equipment in Nippon Steel

Process	Furnace	Equipment
Ironmaking process	Hot-blast stove, CDQ	Observation camera
Steelmaking process	TPC	Profile meter, Thermography
	BOF	Profile meter
	RH	Observation camera, Thermography
	Ladle	Profile meter, Thermography
Rolling process	Reheating furnace	Observation camera, Profile meter

本報告では、製鋼工程での診断技術活用事例として転炉、RH、取鍋の3設備を紹介する。

3. 製鋼工程における診断技術活用事例

3.1 転炉

転炉は高炉から出た溶銑にスクラップや副原料を加え、純酸素を吹き込むことでC、Si、P等の成分を調整する製鋼工程の基幹設備であり、高炉法で製造されるすべての鋼種の製造において処理されるプロセスである。そのため、転炉のトラブルやメンテナンスによる休止は製鉄所の生産性の低下に直結する。転炉の耐火物寿命は、長いもので4000chを超え、稼働期間としては6か月を超えるため、損傷状態に応じて補修を行い耐火物の健全性を保つ必要がある。従って、耐火物の残厚を定量的に診断し、その損傷状態に対して適切な補修を行うことが、稼働率の向上、耐火物コストの削減を両立する上で重要な役割を担っている。

従来、耐火物の残厚の管理は作業者の目視による判断によるように、熟練者の技能に頼った管理を行っていた。近年では、定量的に耐火物の残厚を測定するためにレーザープロフィールメータが使用されている。日本製鉄でも1986年に転炉に導入されたことを皮切りに、混銑車、取鍋等の各種窯炉で導入されている。

レーザープロフィールメータの測定は、距離測定と位置認識測定を組み合わせている。距離測定は、回転するレーザーヘッドから非常に短い波長のレーザーを測定対象物に照射し、対象物の表面で反射した波形を受光部で検出することで測定している。この照射から受光までの時間差を測定することにより対象物までの距離を算出する。一方、位置認識測定は対象物の鉄皮や、周囲の建屋等、変化しない対象物を基準点として、座標変換を行い、プロフィールメータの位置を認識させている。これらの組み合わせにより、窯炉の残厚測定が可能となる²⁾。

レーザープロフィールメータは可搬式と固定式の2種類に分類される。可搬式、固定式の比較を表2にまとめた。可搬式は保管場所から測定位置まで装置を人が移動させる必要がある、安全性から炉に近接するには限界がある。そのため一度のスキャンング範囲が限られるため、複数回のスキャンングを行う必要がある、測定時間が必要である。メンテナンスは窯炉の稼働に関係なく実施できるため優れている。また、1つのプロフィールメータで複数の炉体に対応できるため、設備導入コストが比較的安価である。一方、固定式は自動で測定位置に移動するため、位置認識が不要で測定が迅速に行える。測定位置も固定されるため精度も優れている。メンテナンスは、窯炉休止中にしかできないケースが多く、また、炉体1つにつき1つのプロフィールメータが必要であり、支持構造も耐熱性が求められるため、設備導入コストが高額になる。

日本製鉄での導入事例として、転炉への可搬式プロ

表2 可搬式、固定式プロフィールメータの比較
Comparison mobile and fixed profile meter

Mobile	Point	Fixed
○ Measure position move slightly each time.	Accuracy	◎ Measure position is fixed.
× 1. Scanning for position recognition is necessary. 2. Number of wear scan is more than fixed profile meter because profile meter cannot come closer to furnace.	Measurement time	◎ 1. Scanning for position recognition is unnecessary. 2. Number of wear scan is less than mobile profile meter because profile meter can come closer to furnace.
◎ Maintenance during operation time is possible.	Ease of maintenance	× Maintenance during operation time is impossible.
◎ One equipment can measure several furnace.	Cost	× 1. One equipment is needed for each furnace. 2. Heat resistance is needed.



図2 可搬式プロフィールメータの外観
Appearance of mobile profile meter

フィールメータの改善事例を紹介する³⁾。図2に可搬式プロフィールメータの外観を示す。可搬式のプロフィールメータの課題は測定時間の短縮である。可搬式プロフィールメータの測定時間短縮のために、①形状測定(スキヤニング)回数の削減、②位置認識測定の短縮、を重視した。プロフィールメータの測定では、炉の傾動、移動防熱板の開閉を繰り返し複数回スキヤニングする必要がある。従来は転炉の炉内全体を測定するためには炉の真正面と左右の3箇所から異なる傾動角でスキヤニングするため、測定1回につき46分を要していた(図3)。

そこで、位置認識を工場建屋とする“ボックスキャン方式(図4)”と、炉口の形状から位置を調整する“インスタントポジションシステム(IPS)”を導入した。さらに耐熱性強化と無線操作化により炉のごく近傍で測定できるようにし、スキヤニング1回の測定可能領域を拡大することで、スキヤニング回数を大幅に削減し、測定時間を25分に短縮できた。なお、無線操作化は炉頂、炉体からの地金落下

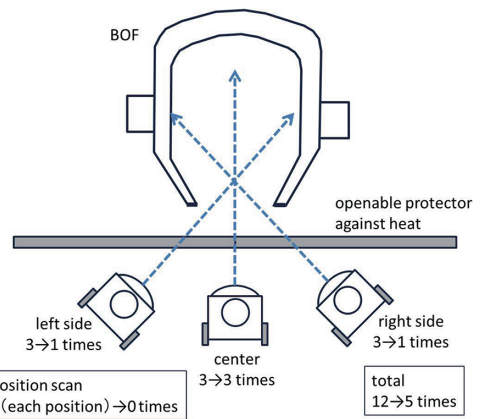


図3 可搬式プロフィールメータの測定回数
Number of scanning about mobile profile meter measurement

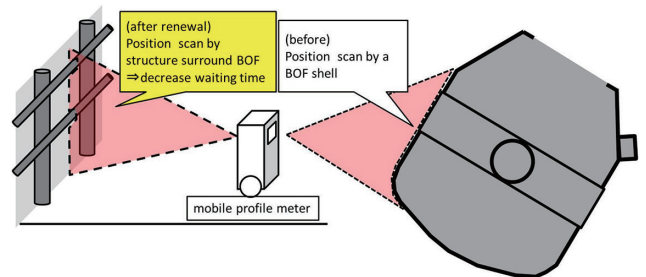


図4 バックスキャン方式の概略
Schematic view of buck scanning method

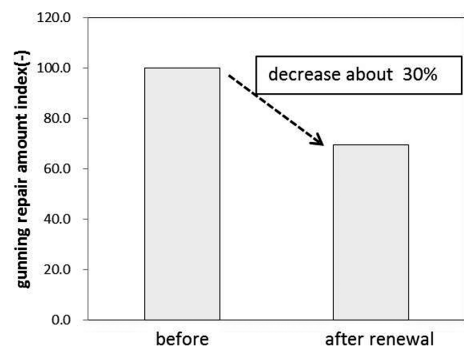


図5 更新前後の吹付け原単位指数の実績
Gunning repair amount index before and after renewal

に対する安全対策としても非常に有効である。これらの測定時間の短縮により、測定頻度が増加し、過剰な補修を抑制することで、補修量削減を達成した(図5)。

一方で、九州製鉄所大分地区の転炉等で固定式プロフィールメータを導入している⁴⁾。固定式プロフィールメータでは位置認識が不要なため、残厚測定に要する測定時間は可搬式に比べ短縮でき、測定頻度が大幅に向上した(表3)。そのため、耐火物の残厚を逐一把握でき、鉄皮開孔トラブルの防止、過剰な補修による生産障害、コストの上昇を防いでいる(図6)。

これらのレーザープロフィールメータの改善により、転炉の炉体管理の精度が格段に向上し、寿命延長や稼働率の向上、補修量の削減に貢献している。ただし、レーザープ

ロフィールメータはれんが残厚を測定するための非常に有用なツールであるが、地金の影に隠れた部分の測定はできないため注意が必要である。この課題を解決するためには、炉内挿入型のレーザープロフィールメータの開発、実機適用が期待される。

3.2 RH

RHは転炉で一次精錬された溶鋼をさらに脱ガス、脱炭、合金添加といった成分調整を行う、高級鋼製造には欠かせない二次精錬設備の1つである。RHの設備は上部槽、下部槽、浸漬管等から構成され、必要に応じて下部槽交換や

浸漬管交換を行う。これらの交換を判断するために、下部槽の側壁や浸漬管、環流管内部の損傷状態を診断する必要がある。精度よく損傷状態を診断し、適切なタイミングで交換することが稼働率の向上に繋がる。

RHは真空処理をするため、密閉性が高く、先に述べたようなレーザープロフィールメータを活用することが困難である。そこで、下部槽側壁では後述するサーモグラフィによる温度監視を活用している。一方、浸漬管、環流管内部では、従来から目視での観察が行われてきた。しかしながら、高温のRHの下部から観察する必要があるため、炉内や炉体の付着物の直撃等、安全面でも課題があった。そのため、工業用TV(ITV)などの遠隔監視装置が適用されてきた。

日本製鉄での適用事例として、RH浸漬管への熱間観察カメラがある⁹⁾。RHの浸漬管を目視点検するためにはRHの下部から槽内を観察する必要があり、安全が確保できる場所では十分に槽内を観察できないという課題があった。そこで、①観察装置動作の遠隔自動化、②観察可能温度範囲拡大、③浸漬管全周観察、の3点を重視し、RHオンライン熱間観察装置を開発した。この装置は、旋回アーム上に設置された内部観察カメラと浸漬管外壁観察用カメラにより浸漬管が撮像され、画像は操作室PCにて処理を行い、操作室モニターに出力される(図7(a))。撮像カメラは浸漬管内面全体を観察するため浸漬管1本に対し3台で撮像を行い、浸漬管外面も全周観察できるよう4箇所カメラを設置している(図7(b))。カメラには落下物、熱および粉塵からの保護機能として、保護蓋、耐熱ガラスを採用した。RHオンライン熱間観察動作の所要時間は全体で70s程度とした。

図8にRHオンライン熱間観察装置による浸漬管内面画像の一例を示す。実際には、浸漬管1本に対し3枚撮像す

表3 測定時間の比較
Comparison of measurement time

	Mobile	Fixed
Total measurement time	36 min	4 min
Position scan	20 min	0 min
Wear scan	16 min	4 min
Measurement frequency	Per 150 heats	Per 30 heats

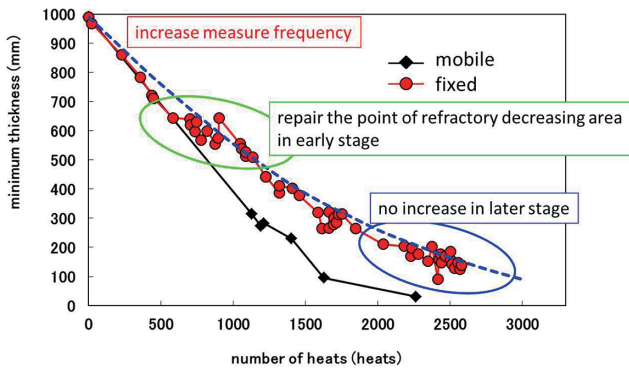


図6 転炉のれんが残厚の推移
Change of BOF brick thickness

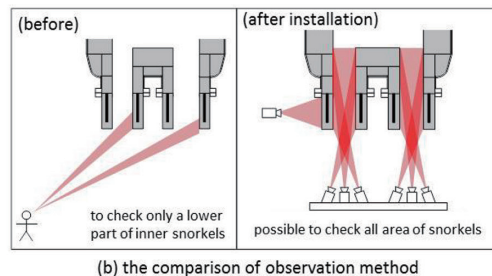
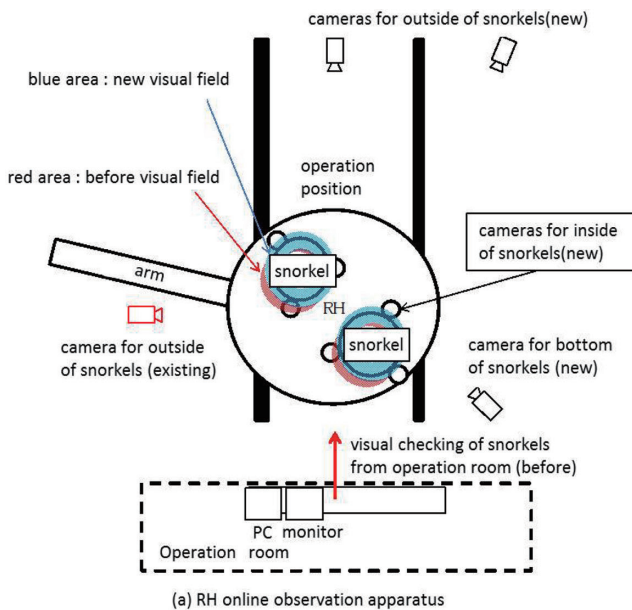


図7 熱間観察カメラの概略
Layout of online observation camera

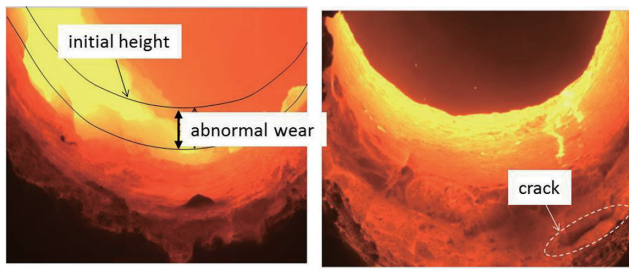


図8 熱間観察カメラによるRH環流管、浸漬管の画像
Pictures of in RH snorkel by online observation camera

ることで敷耐火物、環流管、浸漬管の内面を全周確認できる。図8(a)は鉄皮赤熱、孔空きの原因となる敷耐火物の異常溶損画像、図8(b)は耐火物脱落の原因となる耐火物亀裂画像である。従来、オンラインの目視確認ではこれらの異常発見は非常に困難であったが、RHオンライン熱間観察装置を導入することで的確に判断できるようになった。このように熱間観察カメラは亀裂発生や異常なれんが欠落といった定性的な診断をすることが可能であるが、一方で、れんがの損耗量を定量的に把握することはできず、残厚管理や終点寿命判定はできないという課題がある。

3.3 取鍋

取鍋は高温溶融物である溶銑、溶鋼を搬送するための容器である。近年では、インペラ攪拌による溶銑予備処理やバブリング羽口を用いた二次精錬等を行い、反応容器としても扱われ、使用環境は過酷化している。高温溶融物を搬送するため、取鍋の耐火物に異常が現れると、湯漏れに直結する。耐火物の損傷を精度よく診断し、診断結果から適切な補修をすることで、湯漏れ防止と耐火物コスト削減を両立することができる。取鍋の診断には先に述べたプロフィールメータによる残厚測定や、サーモグラフィによる鉄皮温度監視が行われている。ここでは、溶銑鍋におけるサーモグラフィの利用事例を紹介する⁹⁾。

赤外線熱画像装置(赤外線サーモグラフィ装置)は、物体から放射される赤外線強度をもとに、物体表面の温度分布を画像計測する装置である⁷⁾。この手法では、測定対象物の温度分布を遠隔から非接触で計測可能である。現在、赤外線サーモグラフィはインフラやプラントの設備診断、工業製品の品質検査、人工衛星による地球探査、医療における臨床診断に至るまで多くの分野で使用されている⁸⁾。

日本製鉄における初めての本格的な赤外線サーモグラフィによる窯炉の監視は、1974年に室蘭製鉄所第2製鋼工場の1300t混銑炉で行われた⁹⁾。近年は赤外線サーモグラフィの分解能、精度が著しく向上し、非冷却赤外線センサの登場による装置の小型化(ポータブル化)、低価格化が実現した。これにより、現在では製鋼工程のほぼすべての種類の窯炉に固定式の赤外線サーモグラフィが設置されてお

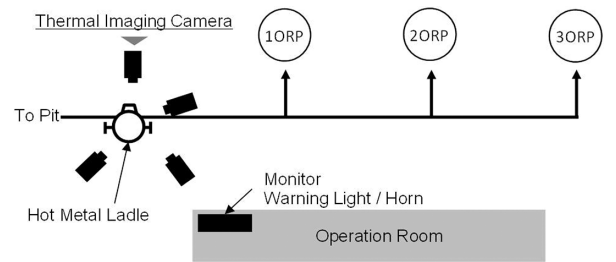


図9 赤外線サーモグラフィ監視設備の概略
Layout of observation equipment by infrared thermography

り、窯炉の開孔事故は大きく減少している。

赤外線は電磁放射であって、これは温度が絶対零度(0Kまたは -273°C)以上であればどのような物質でも、原子と分子の振動と回転によって発生される。赤外線の波長帯は $0.72\mu\text{m}$ から約 $1000\mu\text{m}$ の間、すなわち可視光線の長波長端とマイクロ波の間にある¹⁰⁾。

窯炉の鉄皮のような灰色体から放射される全放射エネルギー $W[\text{W}/\text{cm}^2]$ は、ステファン・ボルツマンの法則によって式(1)のように与えられる。

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

ここで ε が灰色体の放射率、 $\sigma[\text{W}/\text{cm}^2\text{K}^4]$ がステファン・ボルツマンの定数、 $T[\text{K}]$ が灰色体の温度である。赤外線サーモグラフィでは被写体の赤外線エネルギーを検出し、式(1)の関係式を用いて被写体の温度を求めている。

実際の溶銑鍋では、赤外線サーモグラフィはクレーンでの輸送経路上に配備されており、輸送中に溶銑鍋の鉄皮全面を測定できるようなレイアウトとなっている(図9)。溶銑鍋からの輻射熱により装置の内部温度が上昇するため、圧縮空気を用いて冷却している。

溶銑鍋はパーマライニング2層とウエアライニング1層で構成されている。ウエアれんがが損耗して薄くなることでライニング全体の総括熱抵抗が低下し、鉄皮温度が上昇する。ウエアライニングの使用限界厚50mmの時の鉄皮温度は 400°C であるため、この温度を閾値として鉄皮温度を監視している(図10)。鉄皮温度が閾値を超えると、炉前操作室にある警報が作動するシステムとなっている。この赤外線サーモグラフィの導入により、溶銑鍋の寿命延長に踏み切ることが可能となり、大幅な炉材コストの削減が実現されている。

このように赤外線サーモグラフィにより、広範囲の鉄皮温度を一度に測定することができるが、鉄皮温度は補修明けの窯炉では低温になるなど、蓄熱状態や炉内の付着物の状況等により大きく変動し、絶対値での管理には課題が残る。そのため、周囲の温度差からホットスポットを認識するロジックや、連続処理での温度変化から残厚を推定するロジック等を適用したソフトウェア開発を推進している。

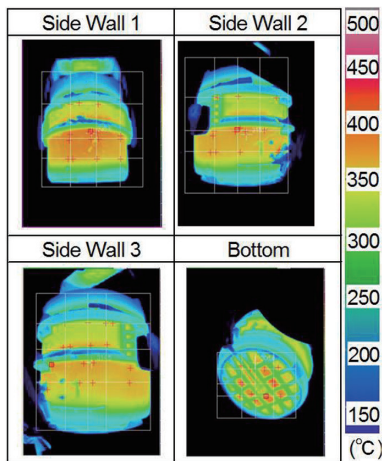


図 10 溶銑鍋の赤外線サーモグラフィ画像
Picture of infrared thermography on hot metal ladle

4. 結 言

製鉄プロセスにおいて、耐火物の診断技術は湯漏れなどのトラブル防止、生産設備安定化、耐火物コスト削減を両立するために重要な技術である。本報告では高温溶融物を扱う製鋼工程の耐火物診断技術として、転炉、RH、取鍋の活用事例を述べた。これらの診断技術は窯炉を管理する上で有用なツールであるが、それぞれ課題もある。今後も

ハードウェア、ソフトウェアの両面の技術開発、実機適用を推進し、窯炉の管理精度を向上させていくことが重要である。

参照文献

- 1) 桐生幸雄 ほか：耐火物. 38 (2), 118 (1986)
- 2) 鈴木義之：耐火物. 60 (9), 483 (2008)
- 3) 澤井重人：日本鉄鋼協会生産技術部門第 94 回耐火物部会, 鹿島, 2016-6, 日本鉄鋼協会
- 4) 佐藤幸太郎 ほか：日本鉄鋼協会第 160 回秋季講演大会, 札幌, 2010-9, 日本鉄鋼協会
- 5) 工藤進：日本鉄鋼協会生産技術部門第 141 回特殊鋼部会, 倉敷, 2016-12, 日本鉄鋼協会
- 6) 橋本一菜 ほか：第 7 回鉄鋼用耐火物専門委員会, 高山, 2019-12, 耐火物技術協会
- 7) 阪上隆英：耐火物. 60 (9), 452 (2008)
- 8) 寺田博之 ほか：赤外線サーモグラフィによる設備診断・非破壊評価ハンドブック. 初版. 東京, 日本非破壊検査協会, 2004, p.45-137
- 9) 大久保静夫 ほか：耐火物. 27 (11), 492 (1975)
- 10) Hackforth, H.L., 和田正信 ほか訳：赤外線工学. 初版. 東京, 近代科学社, 1963, p.3-4



澤井重人 Shigeto SAWAI
名古屋製鉄所 製鋼部 炉材室 主査
愛知県東海市東海町5-3 〒476-8686



塩川将人 Masato SHIOKAWA
瀬戸内製鉄所(広畑地区) 製鋼部 炉材室
主査



橋本一菜 Kazuma HASHIMOTO
名古屋製鉄所 製鋼部 炉材室



山田泰宏 Yasuhiro YAMADA
名古屋製鉄所 製鋼部 炉材室長