

衝撃弾性波共振法による高炉炉底側壁レンガ残厚計測の高確度化

Accuracy Improvement of Sidewall Refractory Thickness Measurement for Blast Furnaces Using Elastic Wave Method

市川 拓人 ICHIKAWA Takuto JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主査研究員
若井 造 WAKAI Hajime JFE スチール カーボンリサイクル高炉開発部長
西村 望 NISHIMURA Nozomu JFE スチール 製鉄技術部長 【現 日本鑄造 取締役 企画部長】

要旨

本稿では、高炉の寿命判断に不可欠な炉底側壁レンガ残厚を正確に把握するため、衝撃弾性波共振法を高度化した計測技術を紹介する。高炉は社会基盤を支える鉄鋼製品を安定供給する設備であり、残厚の誤判定は漏鉄事故などの重大トラブルや、不要な早期改修を招く。開発した 3 次元超音波伝搬シミュレーションを用いる換算法は、炉底側壁の立体形状と弾性波の球面伝搬を考慮し、従来法に比べ計測誤差率を約 7 割低減した。これにより、高炉の健全性をより確実に評価でき、改修時期の最適化と操業安定性の向上を実現し、脱炭素化移行期における鉄鋼の安定供給に貢献する。

Abstract:

This paper presents an improved measurement technique for evaluating the refractory brick thickness at blast furnace sidewalls, a critical factor for determining furnace lifetime. Accurate thickness assessment is essential, as overestimation can lead to severe incidents such as molten iron leakage, while underestimation may trigger unnecessary early relining. To enhance measurement reliability, we introduced a conversion method based on three-dimensional ultrasonic wave propagation simulations that incorporated the actual furnace geometry and spherical wave behavior. Field validation demonstrated that the proposed method reduces measurement error by approximately 70% compared with the conventional one-dimensional approach. By enabling more accurate diagnosis of furnace wear, this technology supports optimal maintenance timing, prevents operational disruptions, and contributes to the stable supply of steel products during the ongoing transition toward low-carbon ironmaking.

1. はじめに

高炉プロセスは、高炉炉内に装入した鉄鉱石とコークス、および高炉炉内に吹き込んだ熱風により鉄鉱石を還元させて銑鉄を製造するプロセスである。高炉は操業を開始（火入れ）すると停止するまで原則として 24 時間 365 日稼働を続け、長期にわたって銑鉄を生産する。2026 年現在、JFE スチールはカーボンニュートラル実現に向けた移行期（トランジション期）にあり、低炭素鉄鋼プロセスへのトランジションを目指している。トランジション期においても高炉プロセスでの生産は続くため、高炉操業の安定性に寄与する技術開発は重要である。

高炉の内部は 2 000℃を超える内部温度と 0.5 MPa 程度の圧力に曝される過酷な環境である。高炉の炉体はこれらの環境に耐える頑健な構造として、最も内側に定型耐火物

（レンガ）、最も外側に鉄皮を有する複層の構造物によって構築されている。これまでの各層の構成素材や冷却機能の技術革新等により、高炉の寿命は 20 年レベルとなっている¹⁾。

高炉の寿命を判断する指標の 1 つとして高炉の炉底部に残存するレンガの厚さ（以下、レンガ残厚）がある。炉底部のレンガは操業の過程で損耗していく。しかし、高炉の内部温度は最高で 2 000℃を超えた状態で連続的に操業しており、内部に立ち入ることができないため、約 20 年間の操業中はレンガ残厚を直接測定または目視確認できない。一方で一定のレンガ残厚で高炉の寿命となるため、何らかの形でレンガ残厚を計測し、値の推移を監視する必要がある。レンガ残厚計測値が真値より大きい場合、残厚を実際より厚く見積もってしまい高炉の側壁から銑鉄が漏れだすトラブルを引き起こしかねない。一方、レンガ残厚計測値が真値より小さい場合、残厚を余剰に見積もり高炉の停止や改修を早めることとなる。このため、正確なレンガ残厚の計測

2026 年 3 月 17 日受付

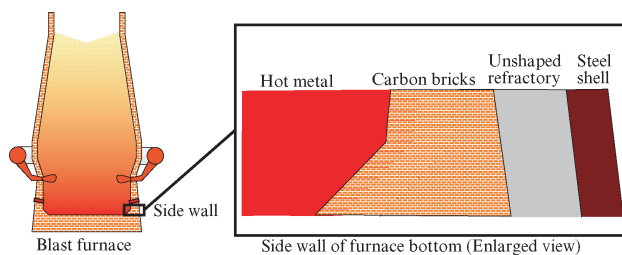


図 1 高炉炉底側壁の構造の例

Fig. 1 Example structure of a blast furnace sidewall

は、高炉の余寿命判断において極めて重要である。

現在、レンガ残厚は主に炉底部に設置した温度計の測定値から推定されている²⁾。他のレンガ残厚計測手法として宇宙線を用いた計測方法³⁾や超音波を用いた計測方法⁴⁾、打撃試験による計測方法⁵⁻¹⁰⁾が報告されており、複数の計測方法によりレンガ残厚の計測性能を向上させることも試みられている。JFE スチールも、炉底部のレンガのうち、炉底側壁のレンガ残厚を打撃試験により計測する「衝撃弾性波共振法」を開発してきたが¹⁰⁾、従来の衝撃弾性波共振法によるレンガ残厚計測は、真値に対する誤差率が約 20% 程度であった。本稿では、新たに開発した技術による衝撃弾性波共振法の計測誤差低減の取り組みについて説明する。

2. 計測対象となる高炉炉底側壁の構造

衝撃弾性波共振法による高炉炉底側壁レンガ残厚計測技術の説明に先がけ、高炉炉底側壁の構造について説明する。

図 1 は高炉炉底側壁の構造の一例を示す概念図である。

高炉炉底側壁はそれぞれ異なる材質の複数の層で構成されている。高炉炉底側壁の最外殻は鋼製構造物の鉄皮であり、高炉内部の圧力への耐性をもたせている。鉄皮の内側の不定形耐火物等の層を経て、高炉炉底側壁の最奥部にレンガを配置しており、熱風および溶銑からの熱への耐性をもたせている。このレンガの残厚が計測対象である。

3. 衝撃弾性波共振法による高炉炉底側壁レンガ残厚計測

衝撃弾性波共振法による高炉炉底側壁レンガ残厚計測技術は、弾性波の反射を用いて残厚を取得する手法である⁵⁻¹⁰⁾。本章では、従来の計測手法と開発技術について記す。

3.1 従来技術：衝撃弾性波共振法の概要

図 2 は衝撃弾性波共振法による高炉炉底側壁レンガ残厚計測手法の概要である。衝撃弾性波共振法では、(1) ハンマーにより鉄皮を打撃し弾性波を入力、(2) 鉄皮表面に設置した加速度計により高炉内側のレンガでの反射波を観測、(3) 観測した反射波を時間領域または周波数領域で解析し

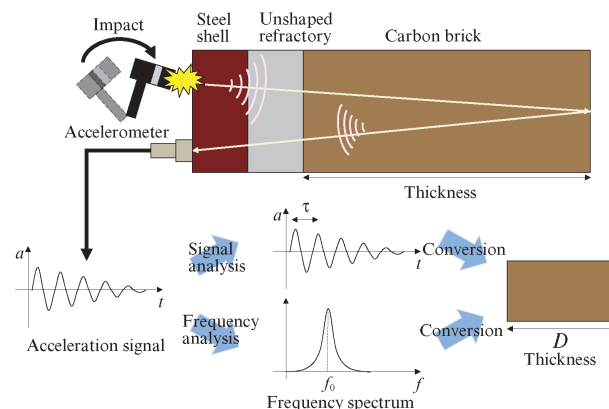


図 2 衝撃弾性波共振法による計測手法の概要

Fig. 2 Overview of the measurement using the impact elastic wave method

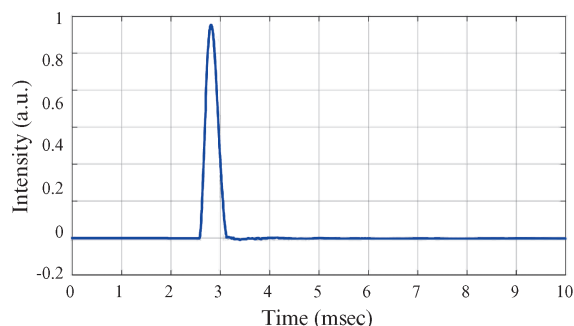


図 3 入力するインパルス信号の例

Fig. 3 Example of input impact signal

解析結果をレンガ残厚に換算、の手順で計測する。

3.1.1 弾性波の入力

計測の入力信号となる弾性波は自然発生するものではなく、鉄皮の上から高炉を打撃することで生じる。打撃はインパクトハンマーに代表されるハンマーで一度のみ行う。打撃により図 3 に示すようなインパルス信号が弾性波として炉底側壁に入力される。

打撃に用いるハンマーは、インパルス信号の周波数特性が観測したい加速度信号の周波数帯を含むよう最適設計している。インパルス信号の周波数特性はインパルス信号の持続時間によって決まる。

3.1.2 反射波の観測

打撃により生じた弾性波は高炉の外側（炉外側）から高炉の内側（炉内側）に向かって炉底側壁内部を伝搬し、炉内側のレンガ端面で反射する。反射した弾性波は炉内側から炉外側に向かって炉底側壁内部を伝搬し、鉄皮表面に到達する。鉄皮表面に到達した弾性波は鉄皮表面で反射し、炉底側壁内で伝搬と反射を繰り返す。この弾性波の伝搬と反射は鉄皮表面の振動として現れる。図 4 は鉄皮表面に設置した加速度計で観測した信号の一例である。徐々に減衰

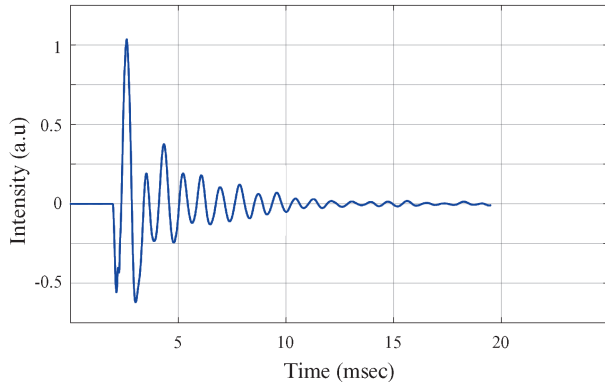


図4 観測された加速度信号の事例

Fig. 4 Example of observed acceleration signal

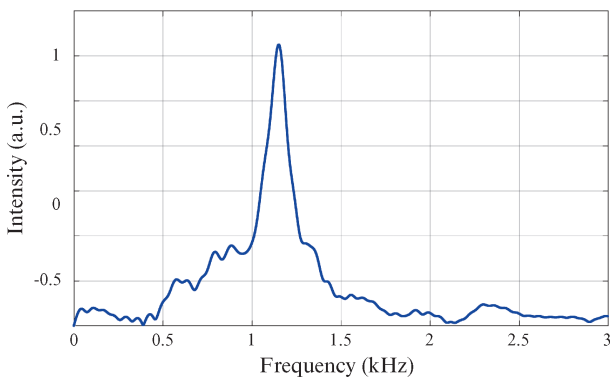


図5 加速度信号のパワースペクトルの例

Fig. 5 Example of observed power spectrum

しながら炉底側壁内部での往復を繰り返す弾性波の様子が図4に現れている。

3.1.3 反射波の解析と残厚への換算

衝撃弾性波共振法では加速度計で取得した加速度信号からレンガ残厚を算出する。具体的には、加速度信号の共振周波数を求めレンガ残厚へと換算する。レンガ残厚と共振周波数の間には、レンガが薄くなるほど共振周波数が高くなるという関係がある。図5は図4に示した加速度信号を周波数解析して取得したパワースペクトルである。図5に示すように加速度信号のパワースペクトルは特定の周波数にピークを持つ。このピーク周波数が共振周波数である。共振周波数をレンガ残厚に換算する手法としてさまざまな提案があり⁵⁻⁹⁾、例えば共振周波数と炉底側壁の各素材の音速および厚さによりレンガ残厚を算出する方法がある^{8,9)}。図6に示す模式図のように、弾性波の伝搬を1次元とみなしたとき、炉底側壁の層を n 層、炉底側壁 i 層目の厚さを D_i 、炉底側壁 i 層目の素材の音速を $(V_p)_i$ 、炉底側壁 i 層目を弾性波が通過する時間 T_i とすると、式1の関係が成立する。

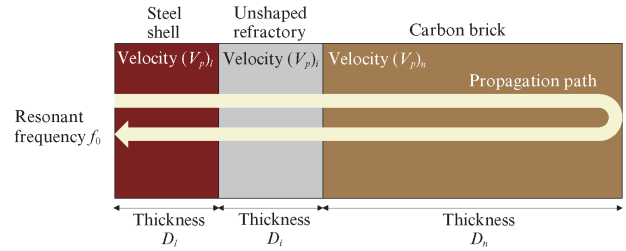


図6 弾性波伝搬経路の模式図

Fig. 6 Schematic diagram of elastic wave propagation path

$$T_i = \frac{D_i}{(V_p)_i} \dots \dots \dots (1)$$

また、弾性波が炉底側壁を往復する時間 T_{all} には式2の関係が成立する。

$$T_{all} = \sum_{i=1}^n 2T_i = \frac{2D_1}{(V_p)_1} + \frac{2D_2}{(V_p)_2} + \dots \frac{2D_n}{(V_p)_n} \dots \dots (2)$$

加速度信号から導出した共振周波数 f_0 は T_{all} の逆数である。すなわち、炉外側から数えて n 層目にあるレンガ残厚 D_n は式3により算出できる。

$$D_n = \frac{(V_p)_n}{2f_0} - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(V_p)_i}{(V_p)_i} D_i \dots \dots \dots (3)$$

従来、式3を改良することにより、共振周波数からレンガ残厚への換算性能を向上させることが試みられている^{8,9)}。

3.2 開発技術：3次元超音波伝搬シミュレーションを用いた周波数-残厚換算曲線の導出

JFE スチールでは、衝撃弾性波共振法による高炉炉底側壁レンガ残厚計測の実用化に向けて、共振周波数からレンガ残厚への換算時の誤差低減をめざした。本来、3次元構造物において弾性波は球面状に内部を伝搬する。従来の換算を改善するためには、弾性波が3次元構造物の内部を球面状に伝搬する影響を考慮する必要があると考えた。この課題を達成するため、3次元超音波伝搬シミュレーションを活用し、共振周波数とレンガ残厚の換算曲線を高炉の構造ごとに導出する手法を構築した¹⁰⁾。図7に3次元伝搬シミュレーションにより共振周波数からレンガ残厚への換算曲線を導出する方法を示す。

まず、計測対象の高炉の図面に基づき炉底側壁の3次元形状モデル作成する(A)。レンガが徐々に損耗することを考慮し、あらかじめ複数のレンガ残厚に対する形状モデルを作成しておく。続いて、それぞれのレンガ残厚の形状モデルに対し有限要素法(Finite Element Method; FEM)により高炉の炉底側壁を3次元状に伝搬する弾性波をシミュ

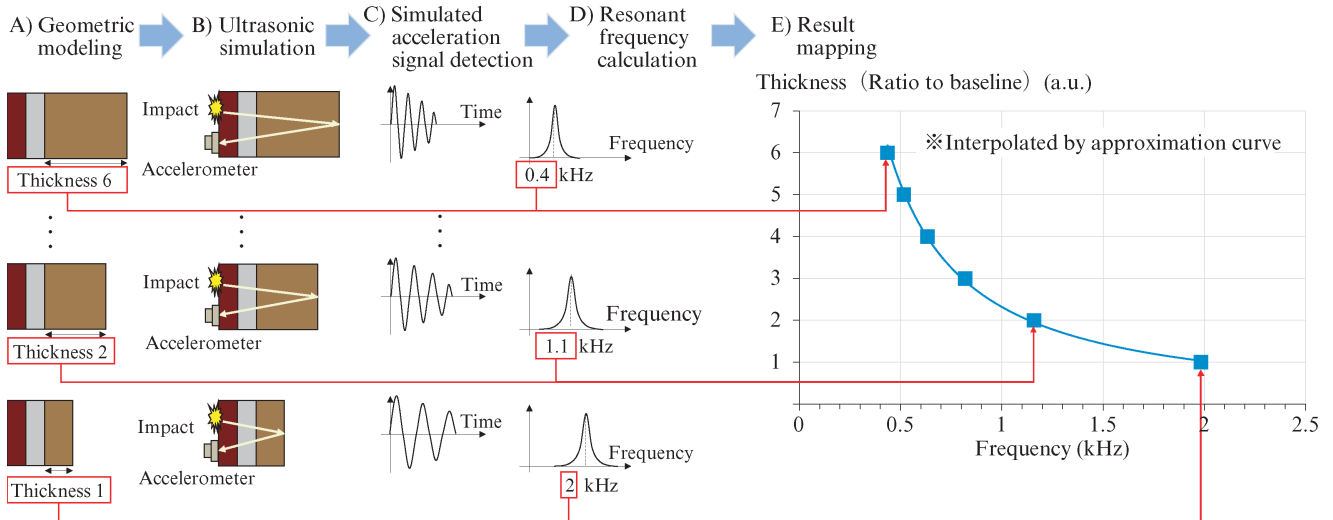


図7 共振周波数—レンガ残厚の換算曲線導出の概要

Fig. 7 Overview of derivation of the conversion curve between resonant frequency and brick thickness

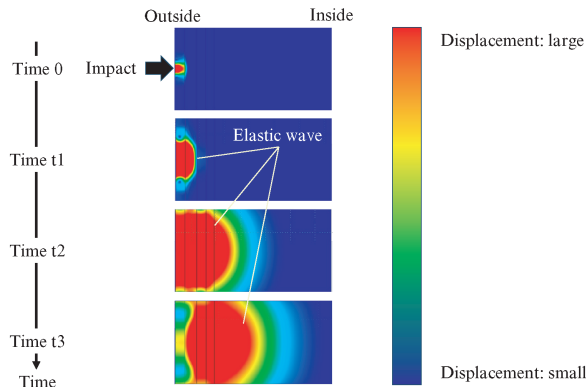


図8 シミュレーションによる弾性波伝搬の再現例

Fig. 8 Example of elastic wave propagation reproduced by simulation

レートする (B)。なお、シミュレーションに必要な音速や密度などのパラメータは事前に設定している。シミュレーションの結果として鉄皮表面の加速度信号を出力する (C)。取得した加速度信号を周波数解析し共振周波数を算出する (D)。最後に、形状モデルのレンガ残厚と共振周波数をマッピングする。さらに、レンガ残厚と共振周波数のグラフに対する多項式近似曲線を求め、共振周波数からレンガ残厚への換算に用いる (E)。

有限要素法を用いることにより、複雑な形状や一様でない材料物性値 (音速、密度) に起因する複雑な境界条件のもとで、高炉を立体状に伝搬する弾性波を再現できる。図8はFEMにより炉底側壁を伝搬する弾性波をシミュレートした結果である。図8では時間経過とともに弾性波が炉底側壁の内部を伝搬する様子が見て取れる。

測定時には、取得した周波数スペクトルのピークを当該換算曲線にマッピングして残厚へ換算する。

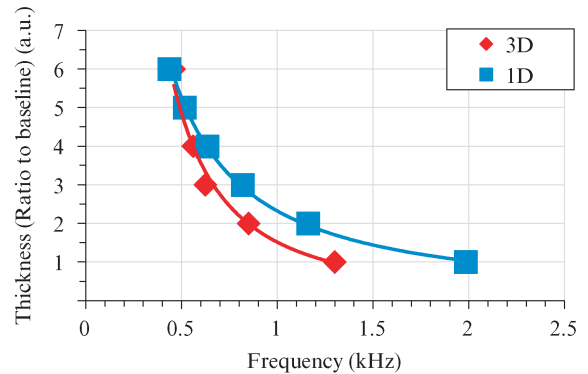

 図9 ピーク周波数-残厚換算曲線の例 (高炉 A)¹⁰⁾

 Fig. 9 Example of resonant frequency-brick thickness conversion curve (blast furnace A)¹⁰⁾

©2025 The Iron and Steel Institute of Japan

4. 開発技術の誤差評価

開発技術の性能評価のため、従来の1次元解析と3次元超音波伝搬シミュレーションによる換算曲線の違いを比較したのち、実際の高炉での計測誤差を評価した。

4.1 換算曲線の差異による評価

開発技術による共振周波数とレンガ残厚の換算曲線を、現有する2種類の高炉の構造で導出した。図9に高炉Aの換算曲線の例、図10に高炉Bの換算曲線の例を示す。

図9および図10には、それぞれ開発技術の3次元シミュレーションにより導出した換算曲線 (赤線) と、従来用いられている1次元の解析式に基づいて算出した換算曲線 (青線) を並べて表示している。図9および図10に示すように、どちらの高炉でも提案手法の3次元超音波伝搬シミュレーションで導出した換算曲線と従来の1次元解析式により算

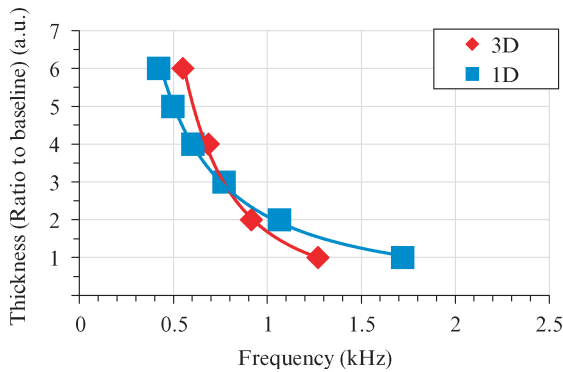


図 10 ピーク周波数-残厚換算曲線の例（高炉 B）

Fig. 10 Example of resonant frequency-brick thickness conversion curve (blast furnace B)

出した換算曲線が異なる結果となっている。これはすなわち、炉底側壁を伝搬する弾性波の共振周波数は高炉の複雑な 3 次元構造の影響を受けることを示している。

4.2 実炉計測試験と結果

前述の高炉 A および高炉 B はレンガ残厚の真値を取得できる状況にあった。そこで、これらの高炉で衝撃弾性波共振法によりレンガ残厚を計測し、従来技術と開発技術それぞれの真値との計測誤差を評価した。評価指標は真値に占める計測誤差の割合である計測誤差率とした。レンガ残厚の真値を T_{true} 、レンガ残厚の計測値を T_{measure} とすると、計測誤差率 E は式 4 により算出できる。

$$E = \frac{|T_{\text{measure}} - T_{\text{true}}|}{T_{\text{true}}} \dots\dots\dots (4)$$

図 11 は高炉 A および高炉 B でのレンガ残厚計測誤差率を示すグラフである。図 11 に示すとおり、高炉 A では従来手法での計測誤差率が 24.6%であったのに対し、開発技術では計測誤差率が 8.3%であり、計測誤差率が 16.3%低減した。また、高炉 B では従来手法での計測誤差率が 28.6%であったのに対し、開発技術では計測誤差率が 8.9%となり、計測誤差率が 19.7%低減した。いずれの高炉でも計測誤差率が改善する結果となり、より正確なレンガ残厚計測が実現した。

5. おわりに

本稿では、高炉炉底側壁レンガ残厚計測の高確度化のための、3 次元超音波伝搬シミュレーションを用いた衝撃弾性波共振法の改良手法を説明した。実際の高炉での検証により、従来の 1 次元換算に比べ計測誤差率が大幅に低減し、より信頼性の高いレンガ残厚の評価手法であることを示した。高炉は鉄鉄を安定的に供給する中心設備であるが、内

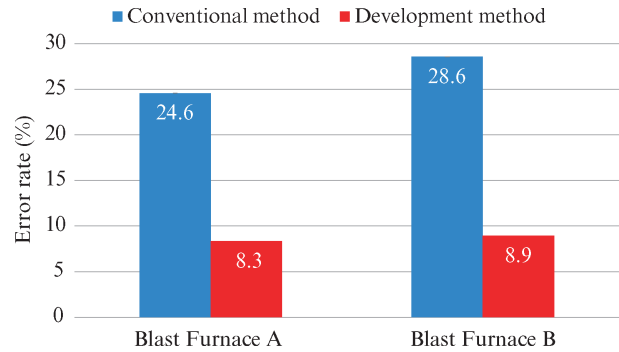


図 11 高炉における計測性能評価結果

Fig. 11 Measurement error evaluation results in blast furnaces

部の状態を直接確認できないという制約がある。レンガ残厚を見誤ると、側壁からの漏洩事故など重大トラブルにつながる恐れがある一方、過度に保守的な判断は不必要な改修や作業計画の変更を招き、製造コストや供給安定性に影響を及ぼす。したがって、正確な残厚計測技術は、安全な操業と社会への安定供給を両立させるうえで不可欠な技術である。カーボンニュートラル実現に向けて製鉄プロセスの転換が進む今後においても、高炉操業の安定性は引き続き求められる。本技術は高炉操業の安全性と効率性を支える計測基盤として今後の活用が期待される。

参考文献

- 1) 内藤誠章, 武田幹治, 松井良行. 製鉄技術の 100 年—技術導入から先進技術への展開, そして次世代技術へ—. 鉄と鋼. 2014, vol. 100, no. 1, p. 2-30.
- 2) 田村節夫. 高炉耐火物とその診断技術の進歩. 鉄と鋼. 1982, vol. 68, no. 15, p. 2108-2115.
- 3) 篠竹昭彦, 松崎眞六, 国友和也, 内藤誠章, 橋本操, 田中朝夫, 長根利弘, 永嶺謙忠, 田中宏幸. 宇宙線ミュオン測定による高炉の炉内検知. 鉄と鋼. 2009, vol. 95, no. 10, p. 665-671.
- 4) 田中正吾, Sukmana, D. D. 音響センサを用いた溶鋳炉の炉壁異常診断に関する研究. 計測自動制御学会論文集. 1997, vol. 33, no. 7, p. 555-562.
- 5) 秋田靖博, 井上衛, 神山久朗. 衝撃弾性波測定法による耐火物残存厚み測定技術の開発. 鉄と鋼. 1987, vol. 73, no. 12, p. S840.
- 6) 藤吉佐敏, 井上衛, 神山久朗. 耐火物ライニングの非破壊検査技術の開発. 耐火物. 1991, vol. 43, no. 10, p. 590-596.
- 7) 手塚浩一. 高炉炉壁温度分布・残厚計測技術. 鉄鋼協会計測システム工学会 大型構造物の診断・計測技術の最新動向シンポジウム資料. 2000, p. 1-8.
- 8) 山野正樹, 柏田昌宏, 亀井康夫. 高炉側壁レンガの残存厚み計測技術の開発. 非破壊検査協会 第 5 回超音波による非破壊評価シンポジウム. 1998, p. 59-64.
- 9) Filatov, S.; Kurunov, I.; Gordon, Y.; Sadri, A.; Ying, W. Careful Control of Refractory Lining Conditions Ensures Intensive Operation and Long Campaign of Blast Furnace. AISTech 2016 — Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference. 2016, p. 695-704.
- 10) 市川拓人, 山平尚史. 衝撃弾性波共振法による高炉炉底側壁レンガ残厚計測技術. 材料とプロセス. 2025, vol. 38, no. 1, p. 212.

本稿は、主執筆者が同じく執筆した参考文献 10) の論文を、許可を得て転載、一部表現を変更して作成しております。