

## 高炉長寿命化技術の開発

## Advanced Technologies for Blast Furnace Life Extension

中野 薫*	宇治澤 優	稲田 隆信
Kaoru NAKANO	Yutaka UJISAWA	Takanobu INADA
小細 温弘	片山 賢治	
Atsuhiko OBOSO	Kenji KATAYAMA	

## 抄 録

高炉は製鉄所の中核となるプロセスであるため、高炉改修は吹き止め後の長期に亘る修理期間と多額の費用を要し、経営に大きな影響を及ぼす。高炉寿命を延長することは、経営判断に自由度を与えるための大きな課題であった。一方、日本製鉄(株)においては、1970年代より開発が進められてきた高炉数学モデルは、高炉内現象の予測や操業設計と操業解析を繰り返す中でその予測精度を向上させるとともに、炉内充填層応力の解析、炉底煉瓦の浸食解析まで機能強化がなされてきた。高炉数学モデルについて概説し、高炉数学モデルを用いた高炉長寿命化技術の開発と次期高炉設計への適用について述べた。

## Abstract

Since blast furnace is a core process of steel mills, blast furnace repair requires a long repair period after blow-out and a large amount of money, which has a great impact on management. Extending blast furnace lives has been a major issue in order to give business decision freedom. On the other hand, mathematical blast furnace models, which have been developed since the 1970s, have improved prediction accuracy by repeating operation designs and analyses with data obtained in many years and extended these functions including analyses of stress field in a blast furnace and erosion of hearth refractories. This paper outlines the mathematical blast furnace models and describes the technologies for blast furnace life extension and these applications to next blast furnace designs.

## 1. 緒 言

高炉は製鉄所の中核となるプロセスであり、製鉄所の事業規模を定める重要な設備である。そのため、高炉改修は、吹き止め後の長期に亘る修理期間と多額の費用を要し、経営に大きな負担を強いる課題である。1970年代前半、5～10年程度であった高炉寿命を延長することは、経営判断に自由度を与えるための大きな課題であった。

高炉の内部を把握するための計測情報は非常に限定的であり、日本製鉄(株)においては高炉内現象の予測、解析、操業設計のために1970年代より高炉数学モデルの開発が進められてきた。それ以降、高炉の高微粉炭比化、酸素富化送風等の操業環境の変化に対応して、高炉数学モデルを用いて高炉内現象の予測や操業設計と操業解析を繰り返す中でその予測精度を向上させてきた。また、数値計算機能力の向上とともに、高炉数学モデルは1次元から3次元へ、

計算対象も流動、伝熱、反応だけでなく、炉内充填層応力の解析、炉底煉瓦の浸食解析まで機能強化がなされてきた。

このような高炉数学モデルの高精度化と高機能化により、従来の高炉諸元設計のみならず、ステーブ取替時の減尺操業設計、炉底煉瓦保護操業設計への適用拡大がなされてきた。その結果、1982年に火入れした和歌山4号高炉は当初稼働期間を7年と計画されていたが、2009年7月に吹き止めるまで27年4か月という連続稼働日数で当時の世界一の記録を達成した。また、1988年2月に火入れした和歌山5号高炉は2019年1月に吹き止めるまで、30年11か月の連続稼働日数世界一の記録を達成した。

他方、次期高炉の炉体形状設計、炉底構造設計は、これまで経験論的な知見に基づいてなされてきたが、高炉長寿命化技術の開発において実態の高炉データと向き合うことで機能強化された高炉数学モデルを適用し、現在稼働中の炉容積2150m<sup>3</sup>の小倉2号高炉、炉容積5370m<sup>3</sup>の鹿島1

\* プロセス研究所 製鉄研究部 上席主幹研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

号高炉, 3号高炉と炉容積3700m<sup>3</sup>の和歌山1号高炉, 2号高炉を理論的な視点で設計した。これらの高炉は, 火入れから25年以上の寿命を計画している。

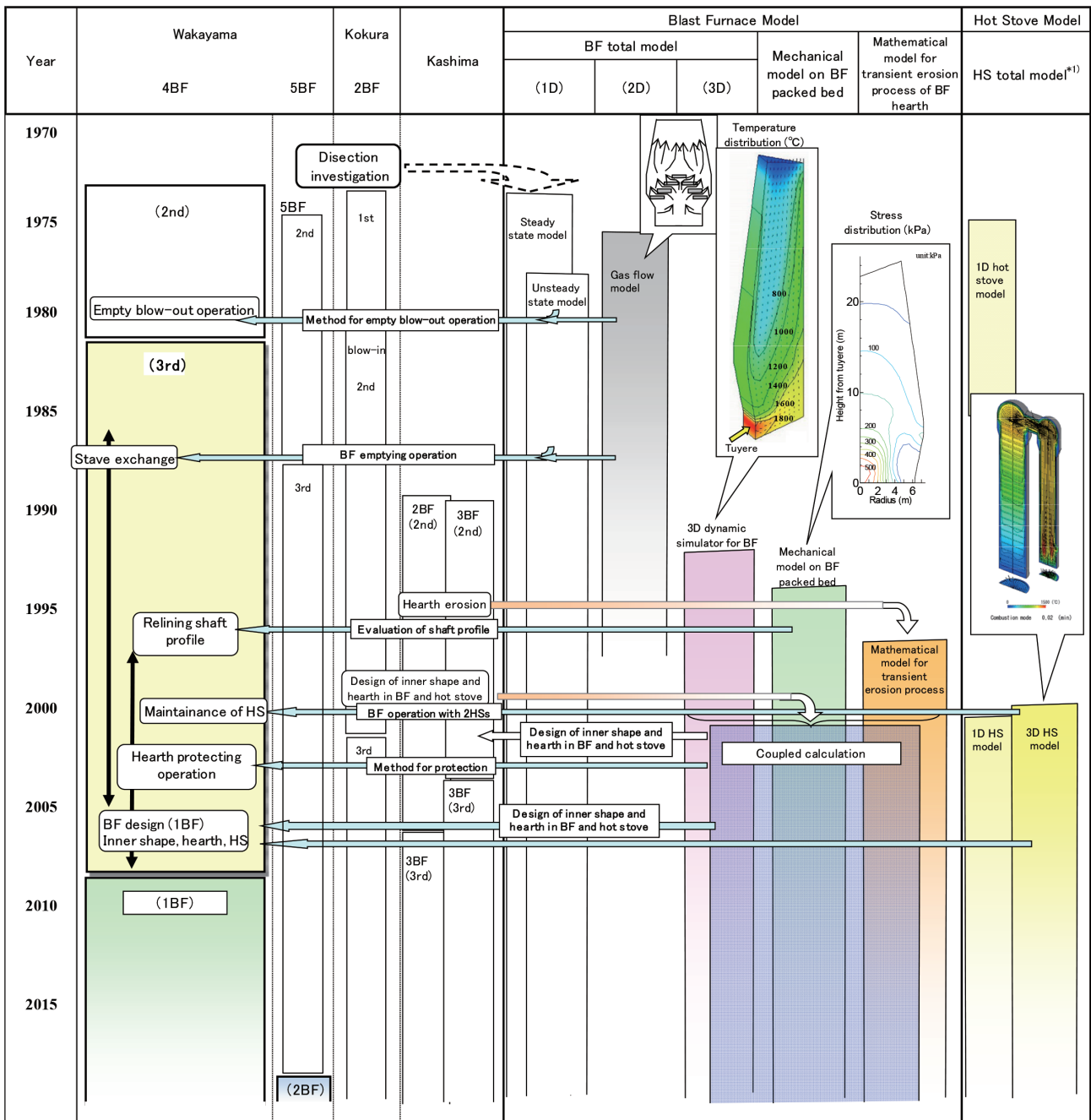
本稿では, 高炉数学モデルについて概説し, 高炉数学モデルを用いた高炉長寿命化技術の開発と高炉の炉体形状設計, 炉底構造設計について述べる。

## 2. 研究開発の経過

本研究開発の経過を図1に示す。1970年前半より高炉数学モデルの開発に着手し, 1974年に自社製の高炉数学モデル(1次元定常)を完成させた。さらに実炉での非定常な炉内状態変化に対応すべく非定常化された高炉数学モデル

の独自開発へと進んだ。1987年国内初となるステーブ取替のための非定常操作の計画, 立案に対して, 1次元非定常高炉数学モデルが活用された。その後も高炉の操作シミュレーションは, 操業効率改善や炉底煉瓦保護などの課題解決に対応するとともに, 様々な実操業データと向き合うことで知見を吸収して精度, 実用性を高め, 高さ方向, 半径方向さらに円周方向も加えた炉内状態分布を推定できる“3次元非定常高炉数学モデル”(図1中では, “3D dynamic simulator for BF”と記載)として発展した。

また, 従来技術では評価することが困難であった炉内物流安定性に対して, 高炉内充填層を弾塑性体として扱い, 充填層内の荷下がりと応力分布を推定できる世界初の“高



(\*1: Models including flow, heat transfer, reaction)

図1 高炉長寿命化技術を支える高炉数学モデル開発の経過  
Progress of technologies for blast furnace life extension and mathematical blast furnace model

炉充填層内応力場推定モデル” (図1中では, “Mechanical model on BF packed bed” と記載) を 1995 年に完成させた。これら様々な数学モデル開発により, 把握が困難でブラックボックス視されていた巨大反応容器である高炉の内部状況を定量化することができ, ステープ取替に代表される設備補修に伴う非常操業や炉底煉瓦の浸食を抑制する操業条件を定量的に評価することが可能となった。

さらに, 3次元非定常高炉数学モデル, 充填層内応力場推定モデルと炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデル (図1中では, “Mathematical model for transient erosion process of BF hearth” と記載) を組み合わせることで, 高操業効率, 安定性の高い高炉の炉体形状と炉底煉瓦の耐浸食性の高い炉底構造の設計指針を提供できるまでに進化してきた。

### 3. 高炉数学モデルの開発

図2に高炉内現象と開発した高炉の各種モデルを示す。これらの各種モデルにおいては, 反応速度の評価方法や熱・物質移動の特性値など数学モデルによる理論推定の精度を支配する多数のパラメータの数値が適切に設定されることが, モデルの実用上の価値を決定する。このため, これらの各種モデルは実験室での実験のみならず, 実高炉における計測データとの比較, 検証により, 長期間に亘って開発,

改良が継続して行われてきた。以下に, 高炉長寿命化技術の開発において大きな役割を果たした主なモデルを概説する。

#### 3.1 3次元非定常高炉数学モデル

図3に示すように, 3次元非定常高炉数学モデルは, 概して, 高炉内の空間を微小領域に分割し, 各微小領域において気・液・固3相に対する物質, エネルギー, 運動量の各収支式からなる連立偏微分方程式を差分化して数値的に解くことにより, 3相の組成分布, 温度分布, 流動状態を3次元, かつ, 時々刻々に把握可能なモデルである。

本モデルの計算例として, 図4に高炉内の各状態変数の空間分布 (左から, ガス流速とガス温度, 固体流速と温度, 液体流速と温度, CO濃度, コークス粒径, および, コークスのガス化反応速度), 図5に高炉の火入れ立ち上げ後の炉内昇温推移の計算例を示す。いずれも, 3次元非定常高炉数学モデルに高炉操業の初期条件 (炉内原料充填状態, 温度分布等) と境界条件 (装入物分布, 送風条件) を与えることで, 高炉内の状態を推定できることを示している。

#### 3.2 充填層内応力場推定モデル

高炉内は鉄鉱石とコークスの充填移動層である。炉内容

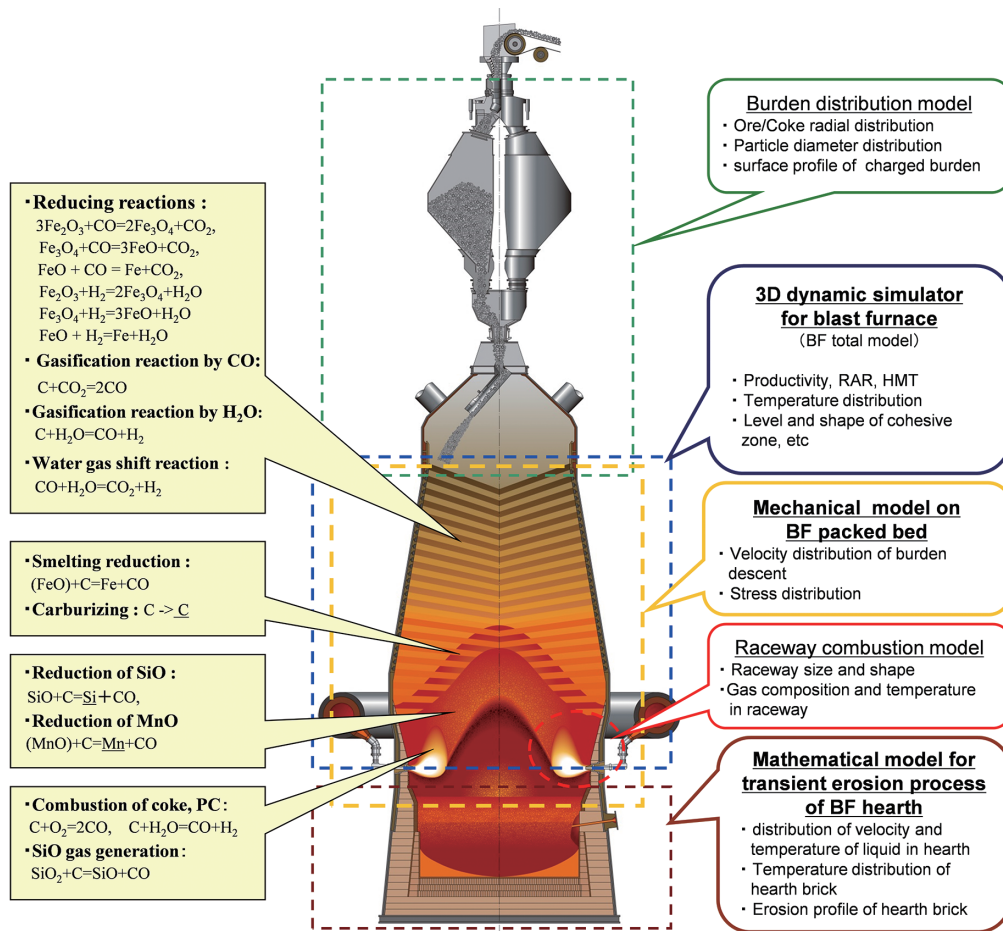


図2 高炉内現象と各種高炉数学モデル  
Phenomena in blast furnace and mathematical models



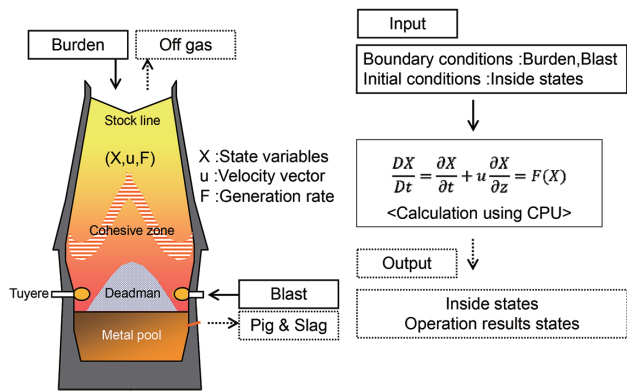


図3 3次元非定常高炉数学モデルの概要  
Outline of 3D dynamic simulator for blast furnace

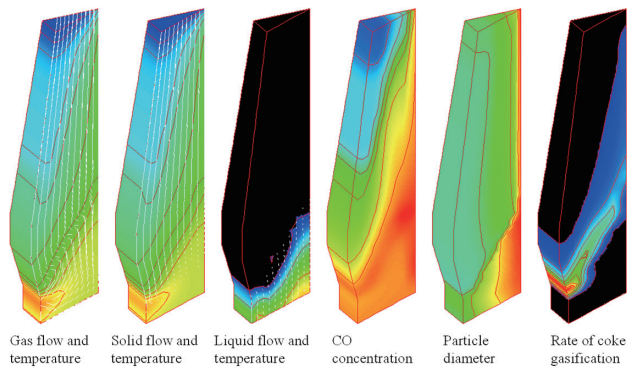


図4 3次元非定常高炉数学モデルによる炉内状態計算結果  
In-furnace states calculated with the 3D dynamic simulator for blast furnace

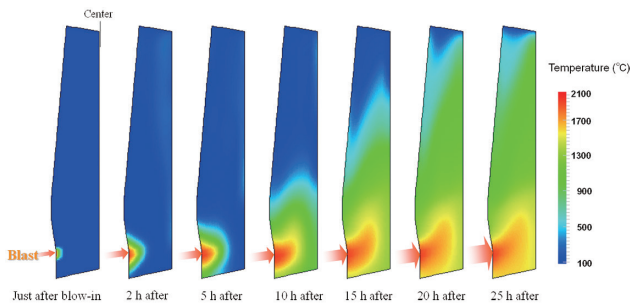


図5 3次元非定常高炉数学モデルによる高炉火入れ立ち上げ後の炉内昇温推移計算結果  
Transition of solid temperature in a blast furnace after blow-in calculated with the 3D dynamic simulator for blast furnace

物の降下異常やガス流れ異常現象は、高炉充填層における力のバランスが崩れることで起こっていると推定されるものの、従来技術においては炉内物流を流体近似で扱っていたため、これを正確に評価することができず、高炉内理論推定の一つの壁であった。

この課題に対して、高炉内充填層を弾塑性体と見なすことにより、基礎実験、および、実炉計測の結果を説明できることを示した<sup>24)</sup>。ここで、降伏条件は高炉内充填層がコークス、焼結鉱などの粒子で構成されていることから、一般の土質力学で用いられている Drucker-Prager の式を採用している。

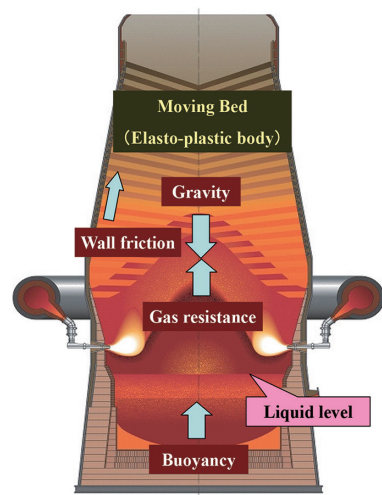


図6 高炉内充填層における力学的バランス  
Forces acting on moving bed in a blast furnace

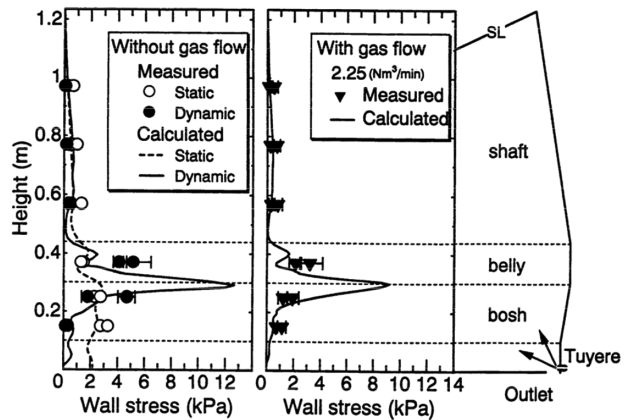


図7 充填層内応力場推定モデルによる壁面垂直応力計算結果の実験結果との比較 (1/20 冷間模型実験)  
Comparison of normal stresses on the wall between calculated results by the mechanical model on BF packed bed and measured results (1/20 cold model experiment)

高炉内充填層は重力の作用下で羽口前のコークスの燃焼消滅、融着帯での鉱石消滅による降下運動が生ずる。図6に示すように、高炉内充填層は降下運動しながら、壁面摩擦力、炉内を流通するガスの抵抗力の影響を受ける<sup>25)</sup>。さらに、高炉内充填層の下部では湯溜まり部に存在する溶銹滓による浮力の作用も受ける。これらの力の作用の下で降下運動する高炉内充填層が弾塑性体の構成方程式にしたがうとした充填層内応力場推定モデルは、高炉充填層内の荷下がりと応力分布を精度よく推定・評価することを可能とした。

図7は実機の1/20サイズの全周模型実験で得られた壁面垂直応力、図8は同実験で得られた底部垂直応力の計算結果との比較である。荷下がりの有無、ガス流れの有無による変化を定量的に精度よく評価できている。図9は小倉2号高炉火入れ前の鉱石充填進行過程における原料装入レベルと垂直応力分布の関係、図10はその時の底部の垂直応力の計測結果と計算結果との比較である。充填層内



応力場推定モデルは、実機サイズにおいても精度よく評価できることがわかる。

### 3.3 炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデル

高炉炉底の内部状態は煉瓦温度以外、直接計測することが不可能であるため、理論に基づく推定が重要であり、唯一の手段である。そこで、炉底湯溜まり内の溶銑流れと炉底煉瓦を含む炉底温度分布、さらに、これに伴う炉底煉瓦の浸食過程を推定する炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデルが開発された<sup>6,7)</sup>。

図 11 に炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデルの計算の流れを示す。上述した 3 次元非定常高炉数学モデルによって計算された湯溜まり部への滴下溶銑滓の量と温度の半径方

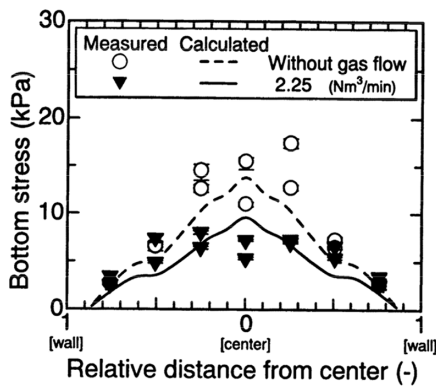


図 8 充填層内応力場推定モデルによる底部垂直応力計算結果の実験結果との比較 (1/20 冷間模型実験)  
Comparison of normal stresses on the bottom between calculated results by the mechanical model on BF packed bed and measured results (1/20 cold model experiment)

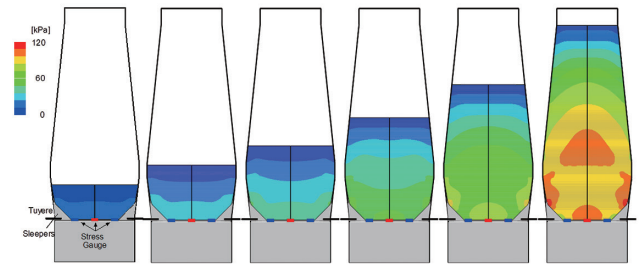


図 9 充填層内応力場推定モデルによる小倉 2 号高炉鉾石充填過程における垂直応力計算結果  
Vertical stress distribution calculated by the mechanical model on BF packed bed during filling raw materials in Kokura 2BF

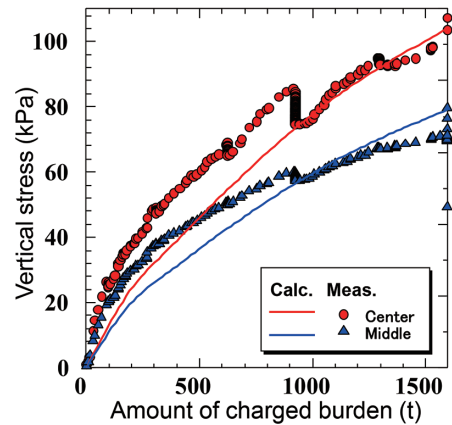


図 10 充填層内応力場推定モデルによる小倉 2 号高炉鉾石充填過程における垂直応力計算結果と実測結果との比較  
Comparison of calculated vertical stress by the mechanical model on BF packed bed with measured one during filling raw materials in Kokura 2BF

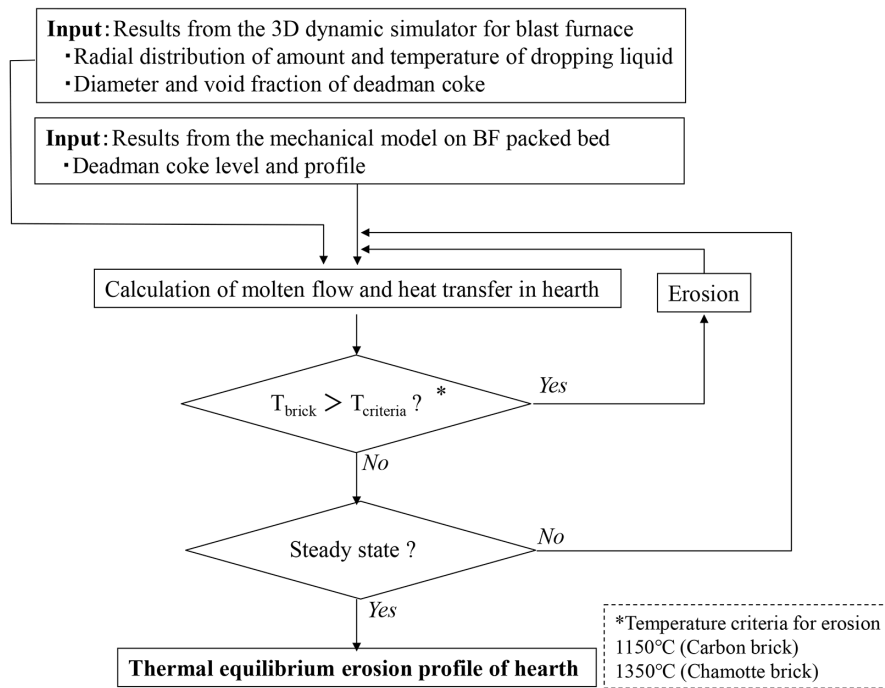


図 11 炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデルの計算の流れ  
Flowchart of the mathematical model for transient erosion process of blast furnace hearth

向分布, および, 炉芯コークス粒径と空隙率, さらに, 図 12 に示すような充填層内応力場推定モデルから算出される炉芯コークスの湯溜まり内への沈下レベルとその下端形状

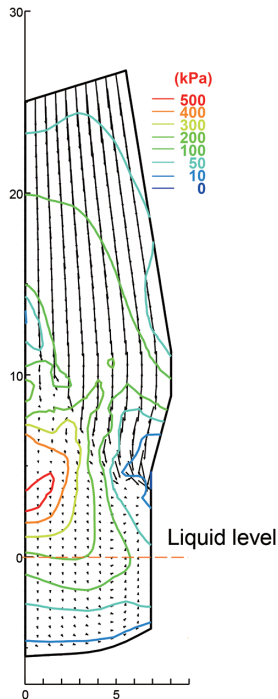


図 12 充填層内応力場推定モデルによる炉芯コークス沈下レベルとその下端形状計算結果  
Sinking level and its shape calculated by the mechanical model on BF packed bed

状を入力条件として与え, 炉底湯溜まり内の流動・伝熱現象を解析し, 煉瓦の浸食条件を満たす部位の煉瓦を浸食させ, 再度, 流動・伝熱現象と煉瓦の浸食判定を繰り返し解析することで, 最終的な煉瓦の浸食状態が得られる。

高炉を吹き止めたのち残存煉瓦や炉内物をコアサンプリングする(解体調査)ことにより, 実際の浸食状態と比較, 検証し, より精度の高いモデルを構築することができた。図 13 に和歌山 4 号高炉および小倉 2 号高炉炉底解体時のボーリング調査による実測の煉瓦残存厚とモデル計算結果との比較を示すように, 精度よくシミュレートできていることがわかる<sup>5,8)</sup>。

#### 4. 高炉長寿命化技術の開発

##### 4.1 炉底煉瓦浸食抑制技術の開発

和歌山 4 号高炉の炉底構造において, 開発したモデルを用いて様々な操業条件に対して感度解析を行った結果, 特に炉芯コークスの沈下レベルが炉底煉瓦浸食に大きな影響を及ぼすことが示唆された。図 14 には炉芯コークス沈下レベルによる炉底煉瓦浸食に及ぼす影響を示している<sup>9)</sup>。炉芯が浮上した場合, 側壁部にコークスフリー層(コークスのない領域)が出現し溶銑流が集中した結果, 熱負荷が上昇し煉瓦浸食が進むことと推定された。

そこで, 充填層内の力学バランスを 1 次元的に簡易計算した炉芯コークスの沈下レベル(出銑口から炉芯コークス下端までの距離)を指標とし, 実炉の炉底煉瓦温度実積と

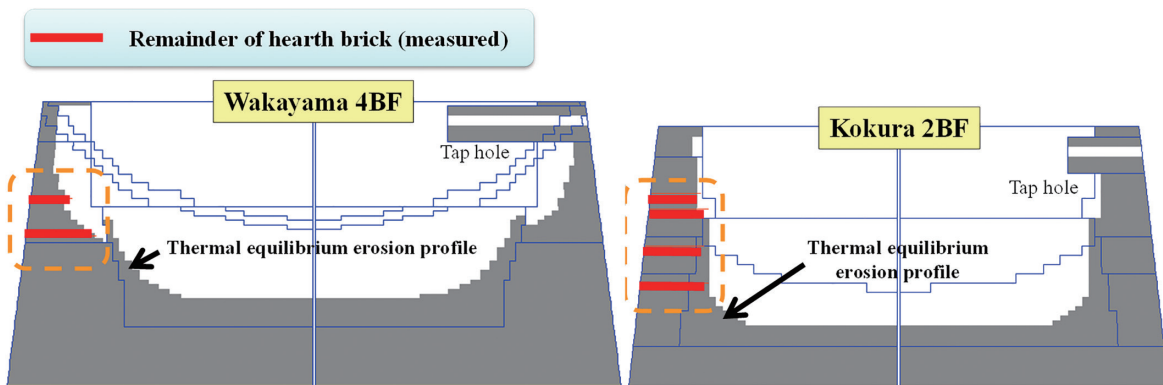


図 13 炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデルによる煉瓦浸食計算結果と吹き止め後の実測結果の比較  
Comparison of erosion profile of hearth between calculated results by the mathematical model for transient erosion process of BF and measured ones

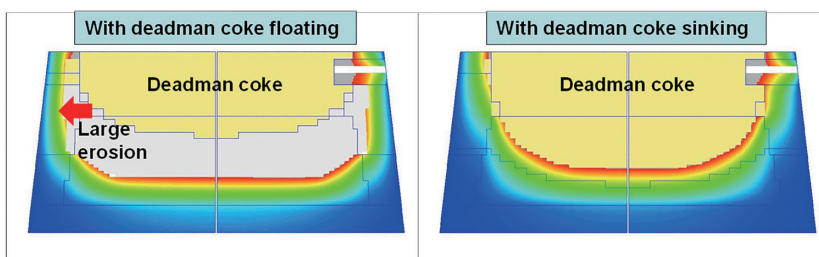


図 14 炉芯コークス沈下レベルが炉底煉瓦浸食に及ぼす影響  
Influence of deadman coke level in hearth on erosion of hearth refractories

の相関を確認<sup>9,10)</sup>した結果を図15に示す。実炉の実績に対して良好な相関が認められ、炉芯コークスの沈下レベルは、炉底温度変化の大きな要因であることがわかった。

この知見をもとに、上記指標を管理指標とし、通常操業設計及び日々の操業管理において本管理指標を制御（送風量、酸素量、コークス比等の変更による）することにより炉底熱負荷制御を行う技術が確立された。

この結果、図16に示すように、和歌山4号高炉において、側壁部については1996年以降、底部については、1992年以降2009年の吹き止めまで最大浸食方位の浸食進展を防止することができた。また、和歌山5号高炉においても同様に、側壁部、底部ともに2019年の吹き止めまで大きな浸食進展を防止することができた。

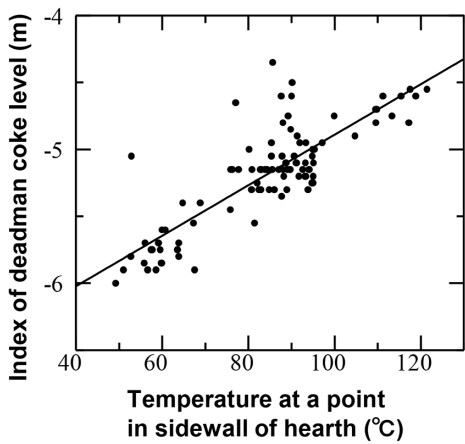


図15 炉芯コークス沈下レベルと炉底煉瓦温度の関係  
Relation between index of deadman coke level and temperature of sidewall of hearth

## 5. 高炉設計への展開

高炉長寿命化技術の開発に用いられてきた上述の3次元非定常高炉数学モデル、充填層内応力場推定モデル、炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデルは図17に示すように組み合わせる<sup>9)</sup>ことで、高操業効率、安定性の高い高炉の炉体形状、さらに炉底煉瓦の耐浸食性の高い炉底構造の設計指針を提供するまでに至った。次に、これらの高炉数学モデルを用いた、高炉の炉体形状設計、炉底構造設計について述べる。

### 5.1 高炉本体設計

高炉本体の内面形状（炉体形状）は、高炉操業に大きな影響を及ぼし設計上の最重要課題である。図18に示すように、小倉、鹿島、和歌山の高炉の炉体形状設計では生産量等の経営上の条件と空間的な制約条件下において、2つの独立変数（ポッシュ角、ベリー高さ）を決定する必要があっ

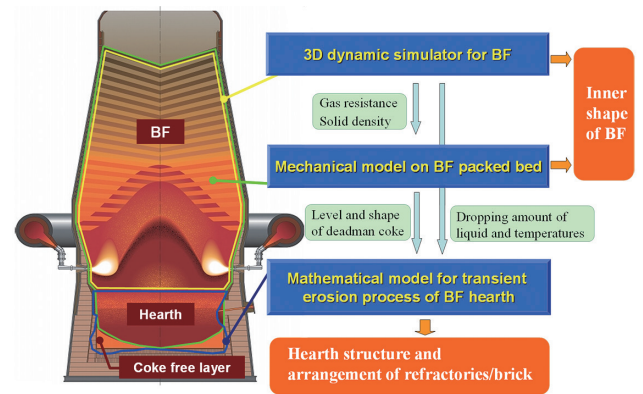


図17 高炉数学モデルの組み合わせによる高炉設計技術  
Technologies of design for blast furnace with combining mathematical blast furnace models

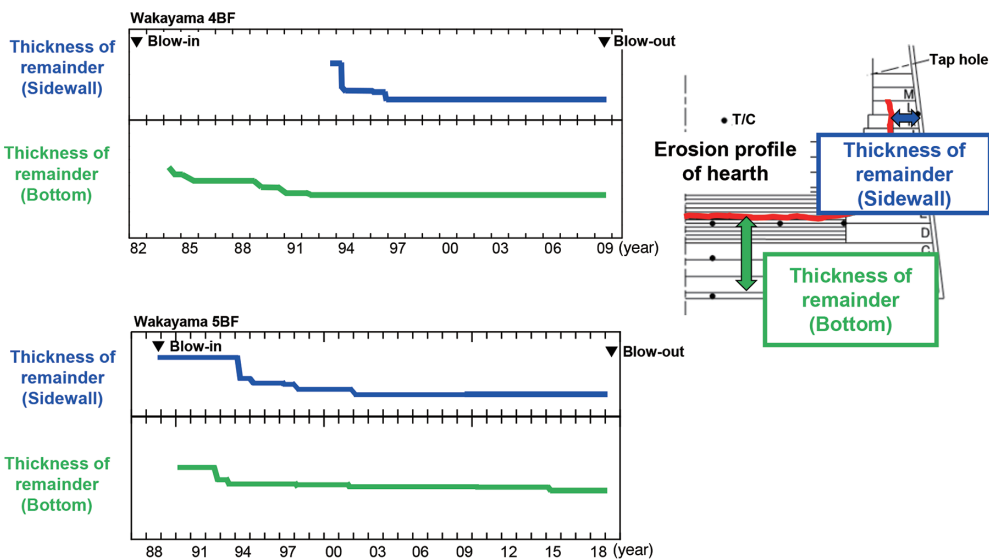


図16 和歌山4号高炉、5号高炉における炉底煉瓦浸食推移（最大浸食方位）  
Transition of maximum erosion of hearth refractories estimated by measured temperature of hearth in Wakayama 4BF and 5BF



た。従来は、経験則により決定していた炉体形状設計に対して、図19に示す<sup>9)</sup>ように高炉数学モデルにより、還元材比、炉内通気性、流動化(吹き抜け)に対する安定性の評価等を行い、高炉炉体形状設計の指針とした<sup>11,12)</sup>。

特に、流動化(吹き抜け)については、充填層内応力場推定モデルを用いて、(1)式に示す Channeling Factor (CF) を定義して、安定性評価を行った。

$$\text{Channeling factor (CF)} = \frac{\Delta P}{\sigma_{yy}} \quad (1)$$

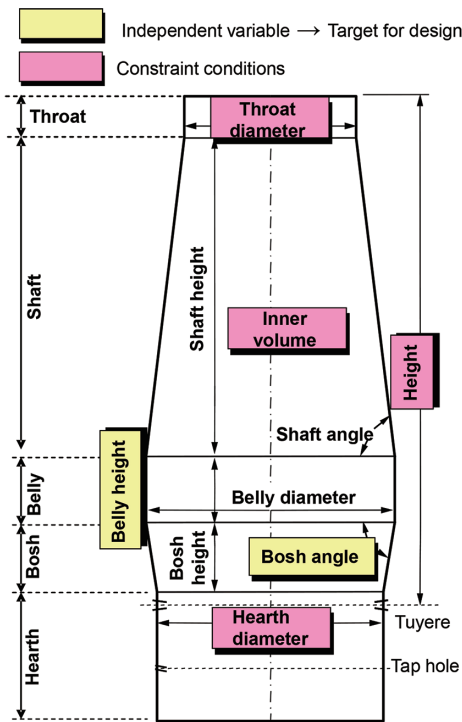


図18 高炉の炉体形状設計における対象変数  
Target valuables for design of inner shape of blast furnace

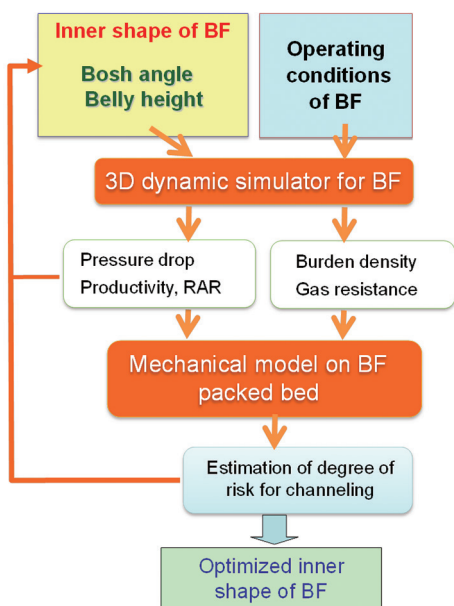


図19 高炉数学モデルを用いた高炉の炉体形状設計の流れ  
Flowchart of design for inner shape of blast furnace with mathematical blast furnace models

ここで、 $\Delta P$ : 炉頂と高炉充填層内各部位の圧力差、 $\sigma_{yy}$ : 高炉充填層内各部位の垂直応力である。CFが1.0を超えると理論的にガスが吹き抜けることを意味し、レースウェイを除く領域でCFを1.0未満にする必要がある。

図20には炉体形状の炉内垂直応力に及ぼす影響を示す。炉体形状によって炉内垂直応力が変化することがわかる。図21に炉体形状の炉内CFに及ぼす影響を示す。炉体形状によって、特に、シャフト部壁側付近(a)とベリー部壁側付近(b)のCFが変化することがわかった。図22にベリー高さや炉壁側CF極大値の関係を示す<sup>9)</sup>。ベリー高さが増加するにしたがい、シャフト部壁側付近のCF(a)は低下するが、ベリー部壁側付近のCF(b)はベリー高さが1.5mを超えると増加に転じることがわかった。

図23にボッシュ角と圧力損失の関係を示す<sup>9)</sup>。ボッシュ

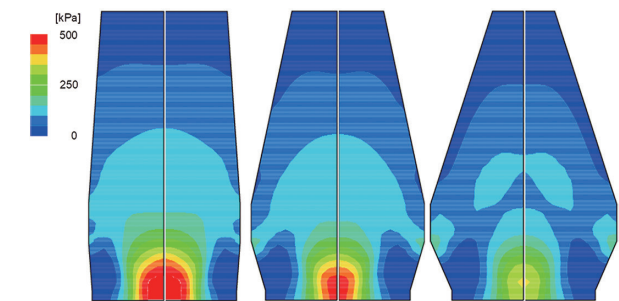


図20 炉体形状の炉内垂直応力に及ぼす影響  
Influence of inner shape of blast furnace on vertical stress

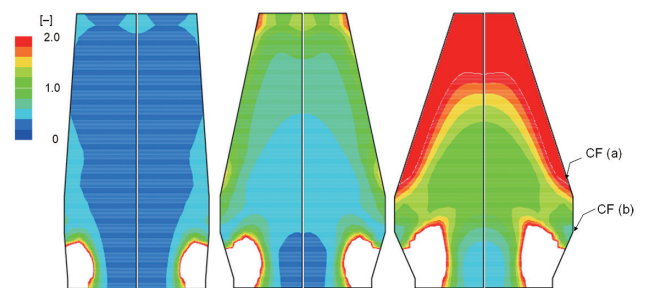


図21 炉体形状のCFに及ぼす影響  
Influence of inner shape of blast furnace on CF

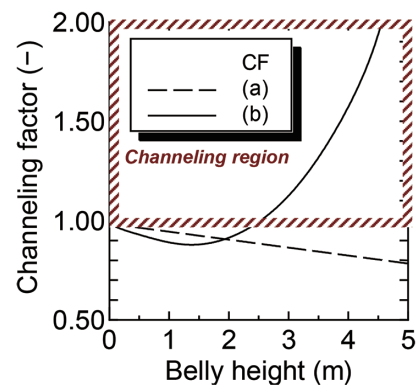


図22 ベリー高さや炉壁側CF極大値の関係  
Relation between belly height and peak values of channeling factor at wall

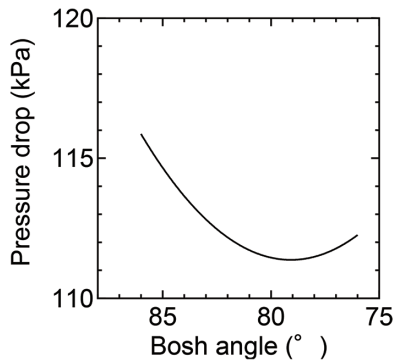


図 23 ボッシュ角と圧力損失の関係  
Relation between bosh angle and pressure drop

角が 79° 付近で極小値を示すことがわかる。このように、様々な炉体形状に対しシミュレーションを行うことにより、炉内圧力損失が低くかつ吹き抜け危険度が低い（原料流動化が起こりにくく炉内物流安定性に優れた）炉体形状を採用している。

### 5.2 炉底煉瓦構造設計

高炉炉底煉瓦は、現状技術を持ってしても通常操作において取替のきかない部位である。新炉の煉瓦配置を含めた設計は、炉体形状設計と同様に重要な課題である。新炉の炉底構造検討に当たっては、既に述べてきたように3次元非定常高炉数学モデルにより求めた滴下溶銹量分布と滴下溶銹温度分布、および、充填層内応力場推定モデルにより求めた炉芯コークス沈下レベルとその下端形状に加えて、評価対象とする炉底煉瓦の配材と炉底構造を炉底溶銹流れ・煉瓦浸食推定モデルに与えて、炉底煉瓦浸食ラインの推定を行うことにより評価する。

図 24 に、湯溜まり深さによる炉底煉瓦浸食への影響を示す<sup>9)</sup>。炉底煉瓦浸食に対しては、初期湯溜まり深さが重要であることが示唆され、図 25 に示すように 2002 年以降火入れされた、和歌山、小倉、鹿島の高炉の湯溜まり部はいずれも従来高炉に対して深くなるよう設計がなされている。

## 6. 結 言

当初稼働期間を 7 年間と計画して火入れされた和歌山 4 号高炉は 27 年以上稼働（10001 日で吹き止め）し、稼働日数で当時の世界新記録を達成した。また、1988 年 2 月に火入れした和歌山 5 号高炉は 2019 年 1 月に吹き止めるまで、30 年 11 か月（11289 日）の連続稼働日数世界一の記録を達成した。和歌山 4 号、5 号高炉の長寿命化で培われた各要素技術は他の自社高炉はもとより、鉄鋼他社にも技術供与・支援を行い、他社高炉の長寿命化にも大きく寄与している。

実操業の知見を吸収して精度、実用性を高め進化した高炉数学モデルは、高炉の長寿命化はもとより、新設高炉の設計に適用され、鹿島 1 号、3 号、および和歌山 1 号、2

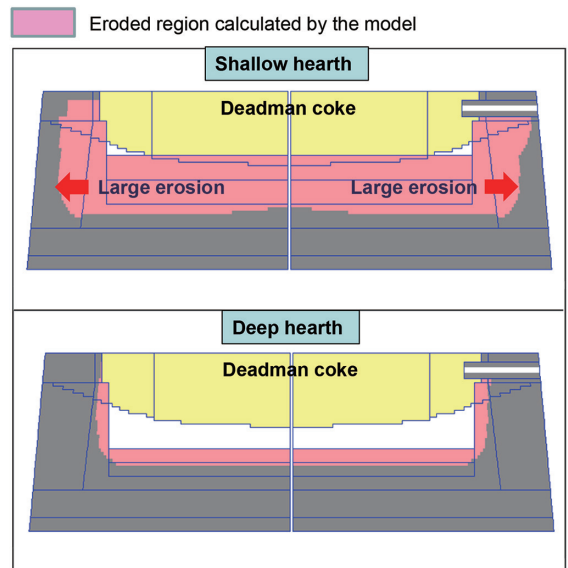


図 24 炉底煉瓦浸食に対する湯溜まり深さの効果  
Effect of hearth depth on erosion of hearth refractories

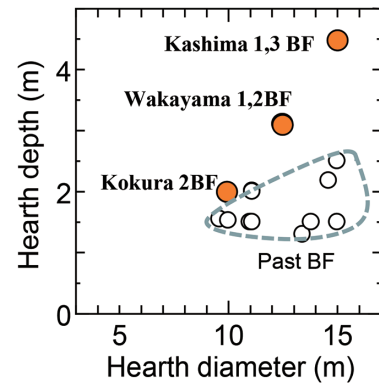


図 25 和歌山、小倉、鹿島の高炉における炉床径と湯溜まり深さの関係  
Relation between hearth diameter and hearth depth of blast furnace in Wakayama, Kokura and Kashima

号高炉は設備寿命 25 年以上として設計、建設されている。今後も高炉数学モデルを活用して、高炉操業の安定化、効率向上、炭酸ガス排出抑制において実炉データと向き合い精度向上に努めるとともに、高炉の長寿命化技術、新高炉設計技術の深化を図る。

### 参考文献

- 1) Takatani, K., Inada, T., Ujisawa, Y.: ISIJ Int. 39 (1), 15 (1999)
- 2) 片山賢治, 若林悟, 稲田隆信, 高谷幸司, 山岡秀行: 鉄と鋼. 83 (2), 91 (1997)
- 3) 片山賢治, 若林悟, 稲田隆信, 高谷幸司, 山岡秀行: 住友金属工業技術誌. 50 (2), 51 (1998)
- 4) Inada, T. et al.: ISIJ Int. 43 (9), 1376 (2003)
- 5) 中野薫, 宇治澤優, 稲田隆信, 高谷幸司, 小細温弘, 片山賢治, 山崎比呂志, 片岸敬朋: ふえらむ. 17 (3), 146 (2012)
- 6) Takatani, K., Inada, T., Takata, K.: ISIJ Int. 41 (10), 1139 (2001)

- 7) 稲田隆信, 山本高郁, 砂原公平, 山岡秀行, 高谷幸司, 宮原光雄, 波多野康彦, 高田耕三, 佐藤康: 住友金属工業技術誌. 50 (2), 42 (1998)
- 8) Inada, T., Kasai, A., Nakano, K., Komatsu, S., Ogawa, A.: ISIJ Int. 49 (4), 470 (2009)
- 9) 中野薫 ほか: 特許第 3788114 号

- 10) 小細温弘: 特許第 4124011 号
- 11) Inada, T., Takata, K., Takatani, K., Yamamoto, T.: ISIJ Int. 43 (7), 1003 (2003)
- 12) Inada, T., Takatani, K., Takata, K., Yamamoto, T.: ISIJ Int. 43 (8), 1143 (2003)



中野 薫 Kaoru NAKANO  
プロセス研究所 製鉄研究部  
上席主幹研究員  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



小細温弘 Atsuhiko OBOSO  
和歌山製鉄所 製鉄部 製鉄技術室長



宇治澤優 Yutaka UJISAWA  
技術開発企画部 上席主幹 博士(環境科学)



片山賢治 Kenji KATAYAMA  
大分製鉄所 製鉄部長



稲田隆信 Takanobu INADA  
技術開発企画部 博士(工学)