

解説

受賞技術-12

# 高炉長寿命化技術の開発

Advanced Technologies for Blast Furnace Life Extension

中野 薫\*1、宇治澤優\*2、稲田隆信\*3、高谷幸司\*4、  
小細温弘\*5、片山賢治\*6、山崎比呂志\*6、片岸敬朋\*7

## 1 研究開発の背景

高炉は製鉄所の事業規模を定める重要な設備であり、高炉改修は、吹き止め（高炉を止める事）による長期にわた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。

そこで、高炉寿命を延長するために、ブラックボックス視されていた高炉の内部の状態把握と操業操作に対する炉内の状態変化を予測すべく、1970年代より高炉数学モデルの開発を進め、ステーブ（炉体冷却金物）取替のための操業、炉底煉瓦保護操業等を実現した。また、設備診断・補修技術の開発も並行して進め、ステーブ取替、熱風炉補修、制御装置更新等の延命補修技術も完成させた。

1982年に火入れた和歌山4高炉は当初稼働期間を7年間で計画されたが、これらの技術適用により、図1に示すように2009年7月に吹き止めるまで27年4カ月という連続稼働日数世界一の記録を達成した。和歌山5高炉も現役の国内稼働高炉中、最長寿命であり、鹿島新1高炉、和歌山新1高炉などの次期高炉の設計に対しても、その技術適用により、25年以上の寿命を計画している。

## 2 研究開発の経過

本研究開発の経過を図2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業の計画・立案に対して、1次元非定常モデルが活用された。その後も高炉の操業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”として集大成した。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“高炉充填層内応力場推定モデル”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、ステーブ取替に代表される設備補修

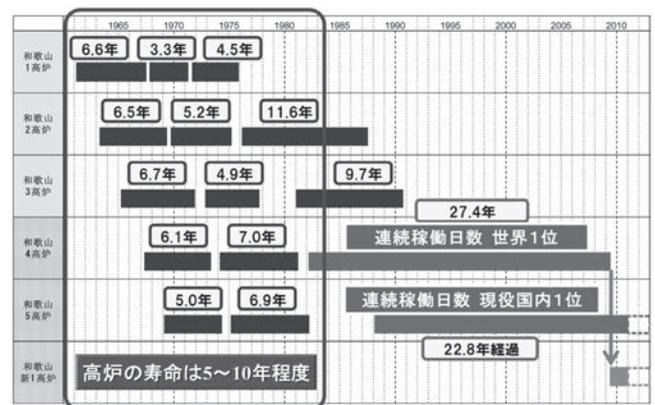


図1 和歌山製鉄所 高炉稼働実績

\* 第57回大河内記念生産賞受賞技術  
\*1 住友金属工業(株)総合技術研究所 主任研究員  
\*2 住友金属工業(株)総合技術研究所 部長  
\*3 住友金属工業(株)総合技術研究所 部長研究員  
\*4 住友金属工業(株)総合技術研究所 技監  
\*5 (株)住金鋼鉄和歌山 参事  
\*6 (株)住金鋼鉄和歌山 室長  
\*7 住友金属工業(株)本社 参事

\*2 住友金属工業(株)総合技術研究所 部長  
\*4 住友金属工業(株)総合技術研究所 技監  
\*6 (株)住金鋼鉄和歌山 室長

に伴う非定常操業や炉底煉瓦の損耗を抑制する操業条件の設定を定量的に評価することが可能となった。

さらに、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等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、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できるまでに進化し、住友金属新設高炉設計に活用している。

### 3 高炉数学モデルの開発

図3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高炉における計測データとの比較・検証により、長期間にわたって開発・改良が継続して行われ、世界にも例を見ない数学モデル群が構築された。以下に主なモデルを概説する。

#### 3.1 高炉3次元非定常モデル (高炉トータルモデル)

図4に示すように、高炉3次元非定常モデル<sup>1)</sup>は、気・液・

固3相に対する運動量・物質・エネルギーの各収支式からなる連立偏微分方程式を解くことにより、3相の温度分布、流動状態、組成分布を3次元にかつ同時に把握可能な世界初のモデルである。このモデルは実高炉データによる精度検証を踏まえ、実高炉の操業状態を高精度かつ忠実に再現するこ

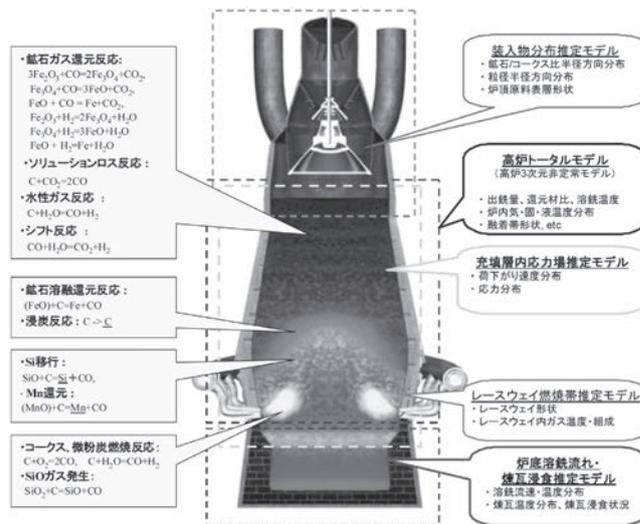


図3 高炉内現象と高炉の各種モデル

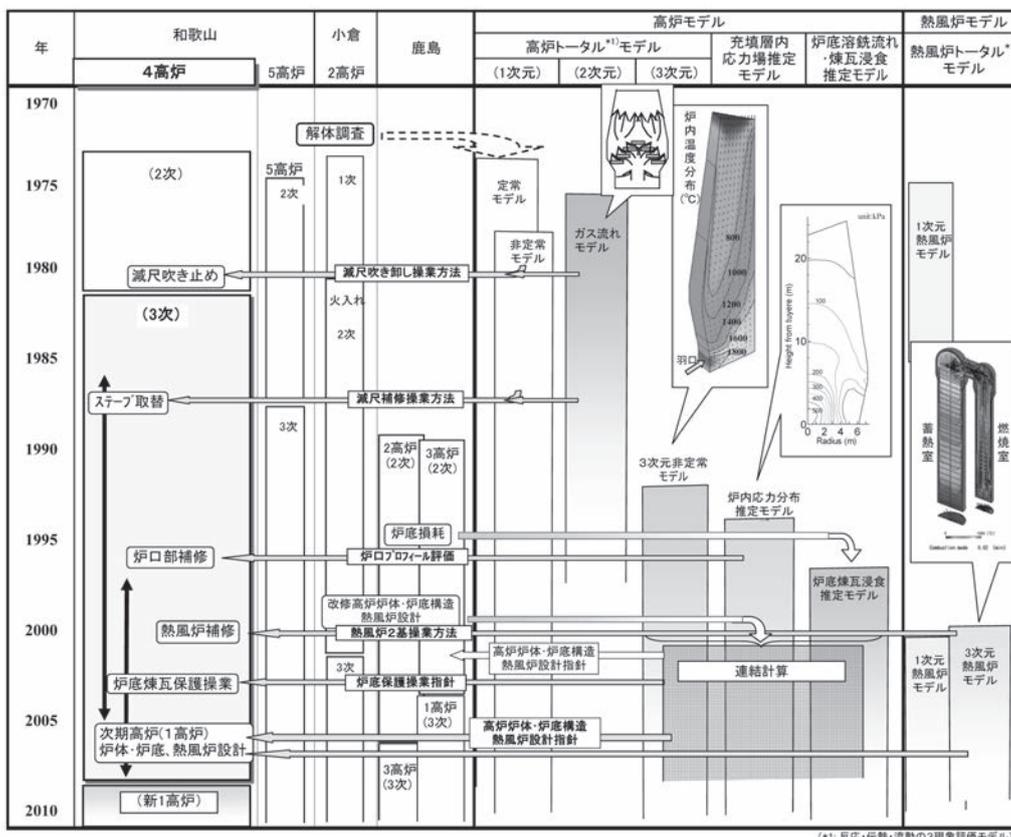


図2 高炉長寿命化技術と高炉数学モデル開発の経緯

とが可能である。図5には、計算例として、高炉火入れ立ち上げ後の炉内昇温推移を示す。

### 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、高炉充填層を流体ではなく弾塑性という力学的特性を持つ連続体と見なせることを基礎実験、および、実炉計測（火入れ時に高炉内に応力計を設置し計測）により実証した。図6に示す充填層内応力場推定モデル<sup>2,3)</sup>は、高炉充填層内の荷下がりと応力分布の推定・評価を可能とした世界初の画期的な数学モデルである。図7には火入れ後の炉内動的応力分布変化のシミュレーション結果を示す。

### 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の開発を行った。図8に炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデル<sup>4,5)</sup>の概要を示す。上述した高炉3次元非定常モデルで評価された湯溜まり部への滴下溶銑滓の量と温度の半径方向分布、および、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深さを境界条件として与え、炉底湯溜まり

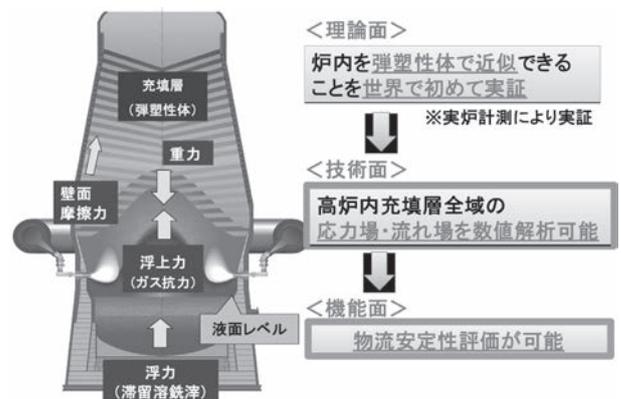


図6 高炉充填層内応力場推定モデル概要

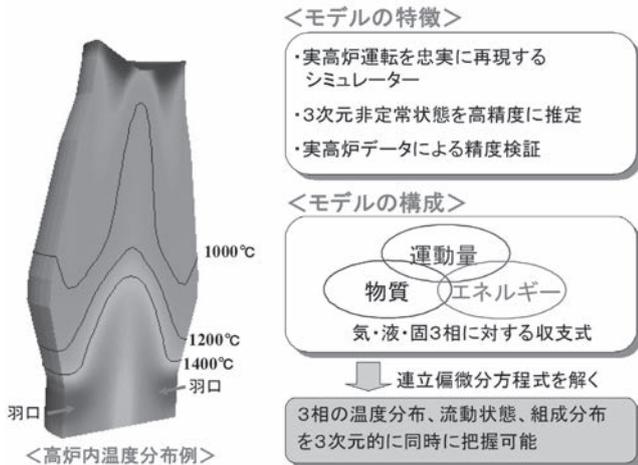


図4 高炉3次元非定常モデル概要

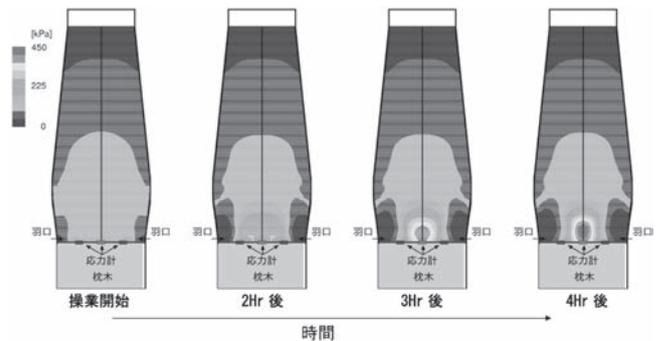


図7 充填層内応力場推定モデル計算例 (高炉火入れ後の炉内動的応力分布変化)

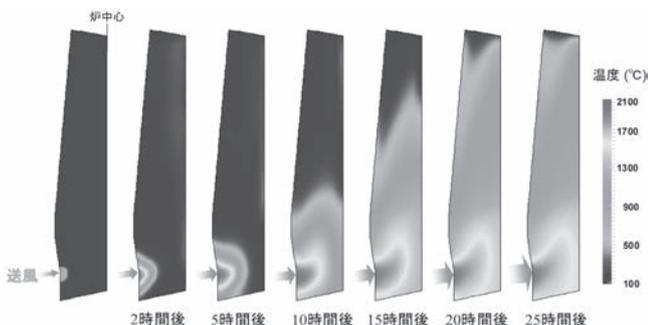


図5 高炉3次元非定常モデル計算例 (高炉火入れ後の炉内昇温推移)

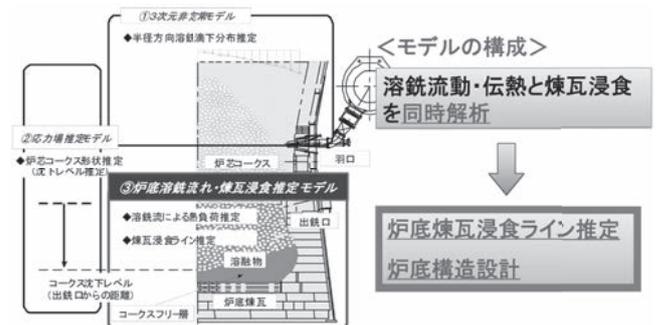


図8 炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデル概要

内の流動・伝熱現象を定量的評価するとともに炉底煉瓦温度に基づき煉瓦の浸食部位を推定するものである。

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9には和歌山4号高炉および小倉2号高炉炉底解体調査による実測の浸食ラインと浸食推定計算結果との比較を示すが、精度良くシミュレートできていることがわかる<sup>6)</sup>。

## 4 高炉長寿命化技術の開発

### 4.1 稼働中高炉におけるステーブ取替技術の開発

高炉本体内面には、図10に示すステーブと呼ばれる高炉鉄皮を炉内の高熱から保護する冷却金物500枚程度が設置されている。ステーブは数百度～千度の炉内熱に曝され続けるため、いずれ冷却水のパイプが破損し炉内への漏水が発生し、通常レベルの操業の継続が困難となる。このため、従来はステーブの破損進行が高炉の寿命を決める主要因であり、高炉の改修により新たなステーブに取り替え、再び操業を開始するのが一般的であった。

1982年火入れされた和歌山4号高炉において、国内では実施例のない稼働中高炉での休風時ステーブ取替技術の開発に取り組んだ。

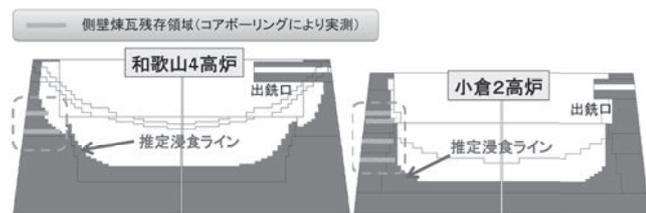


図9 炉底溶銹流れ・煉瓦浸食推定モデル計算例（炉底解体調査によるモデル精度検証）

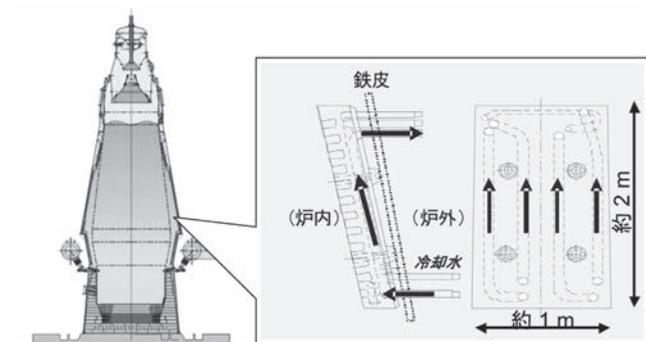


図10 ステーブ構造

### (1) ステーブ取替操業技術

通常ステーブ前面には炉内原料があり、ステーブを取り替えるためには原料を所定のレベルまで下げる、いわゆる減尺という操作が必要となる。またステーブ取替工事完了後には、原料レベルを通常レベルまで埋め戻しつつ送風量を上げていく必要がある。いずれも経験則だけでは操業設計できない典型的な非正常操業であり、操業設計を誤るとガスの吹き抜けや設備損傷等のトラブルを引き起こす可能性がある。図11にステーブ取替時の操業上の技術開発ポイントを示す。

操業設計・計画立案にあたっては、開発した数学モデルを用いて、様々なシミュレーションによる事前検討を行った。検討結果の一例として図12に減尺操業時のシミュレーション結果を示す。

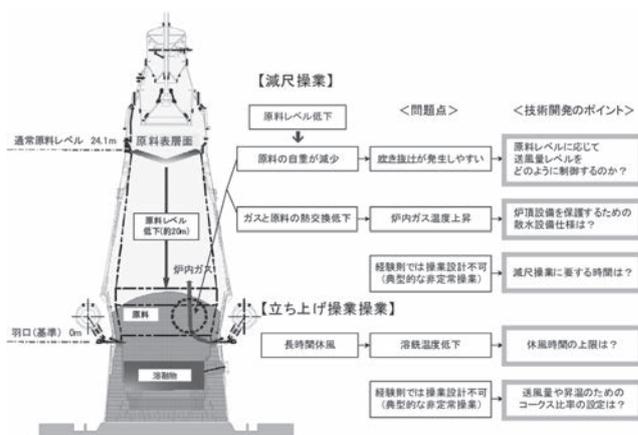


図11 ステーブ取替時の操業上の技術開発ポイント

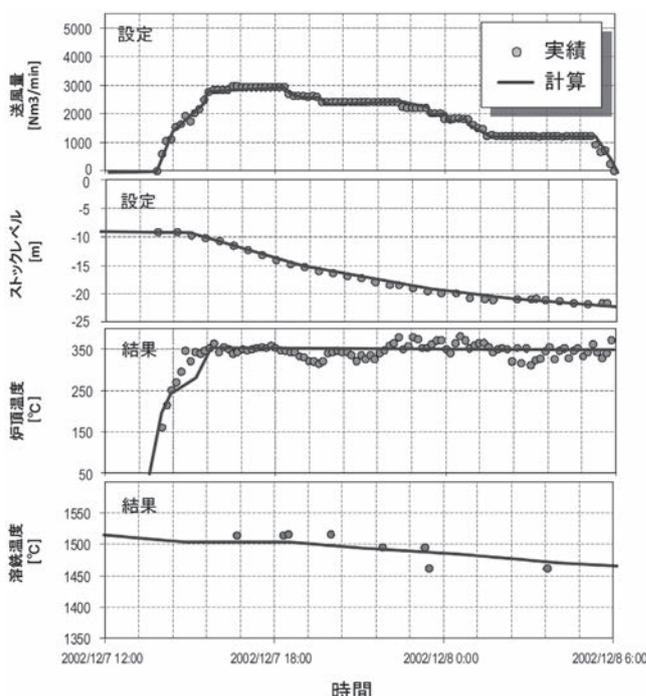


図12 高炉3次元非正常モデルによる減尺操業シミュレーション

(2) ステープ取替工事技術

減尺操業後の炉内は、炉底部に加熱された鉱石とコークスがあり、休風中といえども炉内は数百ppmの一酸化炭素を含んだガスとともに、200℃～300℃の高温雰囲気となっており、炉内部に人が入ることができない。また取替工程が大幅に遅延した場合、炉内溶融物が凝固し始め操業立上げ時に大きなトラブルに発展することも予想される。従ってステープ取替技術は、重さ3トンもあるステープを炉外部から施工し、しかも確実かつ円滑な施工方法が必要とされた。そこで、高炉延命対策にとって将来的には短時間で多数のステープ取替の技術が不可欠と判断し、確実性は未知数であったが、図13に示す施工方法を考案し、開発を進めた。

図14に和歌山製鉄所におけるステープ取替実績を示す。1987年3月国内初の稼動中高炉におけるステープ取替<sup>7)</sup>を実施して以来、直近では2002年に102枚を111時間で、また

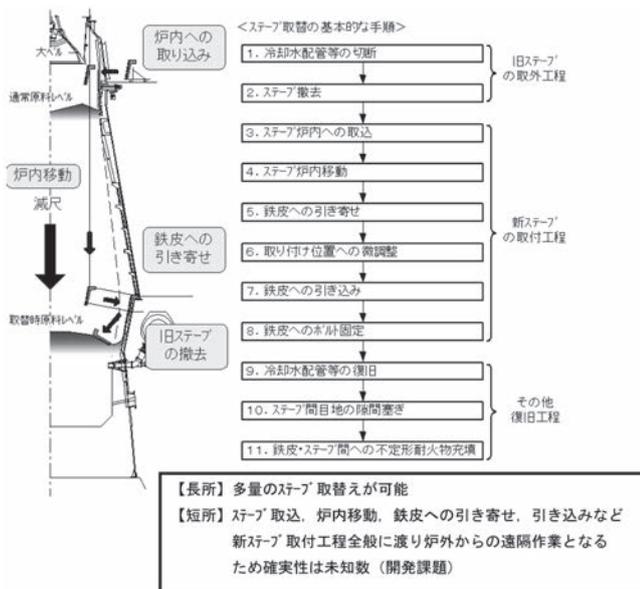


図13 ステープ取替工法アウトライン検討

2006年には78枚を93時間にて取替を行い、国内において最高の技術レベルを有するまでになった。

稼動中高炉のステープを高炉改修ではなく長時間休風の補修工事として取り替える技術は国内鉄鋼他社も追従する状況となり、国内外鉄鋼他社にも技術供与・支援を行い他社高炉の寿命延長にも大きく寄与している。

4.2 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15には炉芯コークスレベルによる炉底煉瓦浸食に及ぼす影響を示している。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がわかる。

この知見をもとに、通常操業設計および日々の操業管理において炉芯コークスレベルを制御(送風量、酸素量、コークス比等)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、また和歌山5号高炉においては、側壁部については2002年以

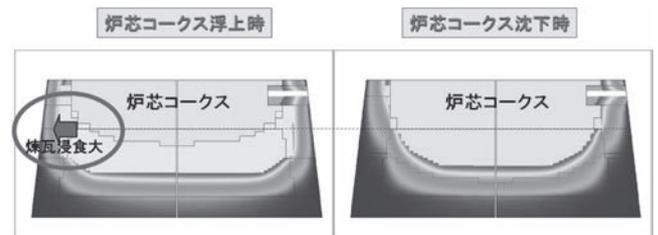


図15 炉芯コークスレベルによる炉底煉瓦浸食に及ぼす影響

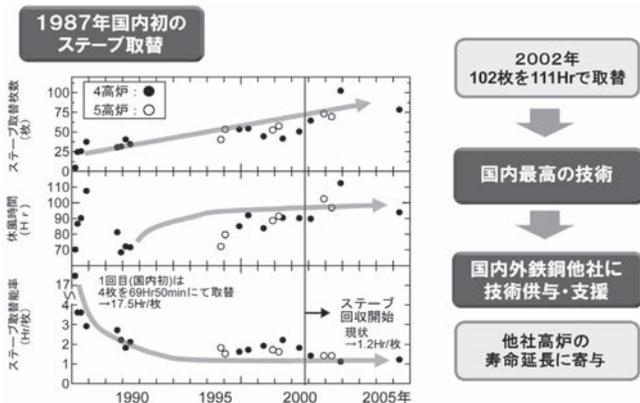


図14 和歌山製鉄所 ステープ取替実績

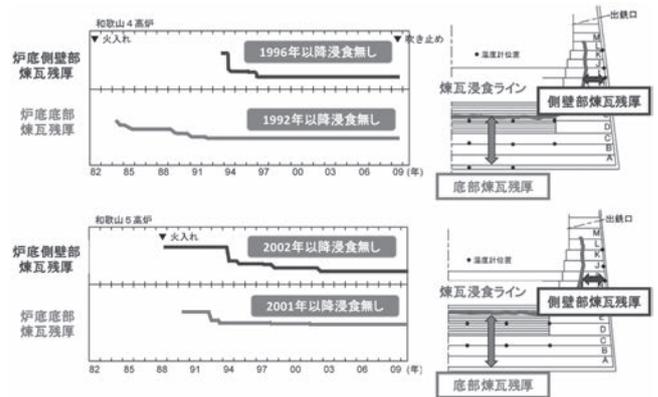


図16 和歌山4、5号高炉 炉底煉瓦浸食状況(最大浸食方位)

降、底部については2001年以降最大浸食方位の損耗進展を防止している。

### 4.3 稼働中高炉における熱風炉煉瓦積替技術の開発

1970年代～1980年代以前は、高炉の寿命は5～10年程度しかなく、熱風炉は高炉の2倍以上の寿命があった。しかしながらステープ取替等の革新的な技術開発により、高炉の寿命は飛躍的に伸び、従来はネックとならなかった熱風炉に対しても新たな寿命延長技術の開発が必要とされた。特に、和歌山4号高炉のように熱風炉が3基しかない場合には必要時に1基増設するか、もしくは高炉改修時に工事が行われてきた。しかしながら、熱風炉の増設には多額の費用を要するためそれを回避しつつ補修を行うことが課題であった。和歌山においては特に損傷の大きい熱風炉セラミックバーナー部に対して熱風炉増設を行うことなく補修する技術開発<sup>8)</sup>が必要とされた。

図17に和歌山4号高炉熱風炉設備概要を、図18には熱風炉煉瓦積替工事において、具備すべき必須条件と対策<sup>9)</sup>を示す。

熱風炉セラミックバーナー補修のためには、防熱装置・保熱バーナー・疑似送風設備といった補修技術そのものに加え、正確な工事工程を計画するために疑似送風頻度の推定が必要となる。疑似送風とは、保熱バーナーを停止し一時的に工事を中断して仮設ブロワにて送風することをいう。これは保熱

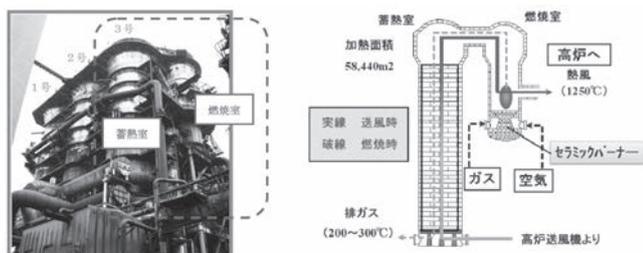


図17 和歌山4号高炉 熱風炉設備概要

バーナー燃焼により温度上昇した蓄熱室下部(蓄熱室煉瓦を支持している煉瓦受金物)を冷却する作業である。疑似送風の頻度試算にあたっては、熱風炉数学モデル<sup>10)</sup>を用いシミュレーションを行った。このモデルは、熱風炉内のガス流れや温度分布を算出するように開発されたものであるが、補修作業時の各部位の温度変化を予測することによって、補修工事の工程計画が策定可能となった。図19には、熱風炉数学モデルによって試算した工事工程結果を示す。

## 5 次期高炉への展開

これまで開発してきた高炉長寿命化技術は、和歌山5号高炉延命(現在稼働炉中最も稼働年数が長い)はもとより、2002年以降に火入れした小倉、鹿島、和歌山の高炉設計に受け継がれている。その中核が数学モデルによる高炉設計である。図20に示すように、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等を組み合わせることで、高操業効率、安定性高い高炉の炉体形状、さらに炉底煉瓦の耐浸食性

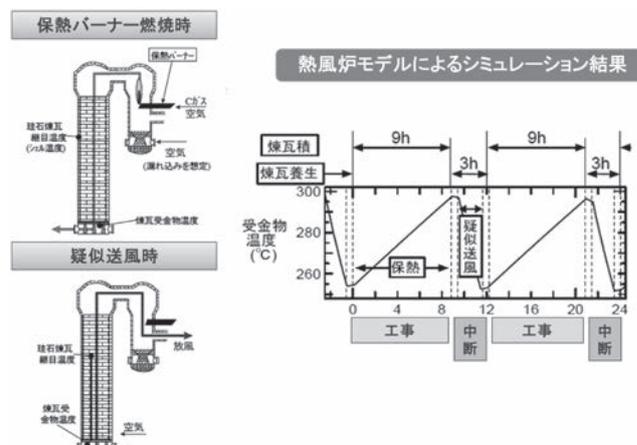


図19 熱風炉数学モデルによる工事工程試算結果

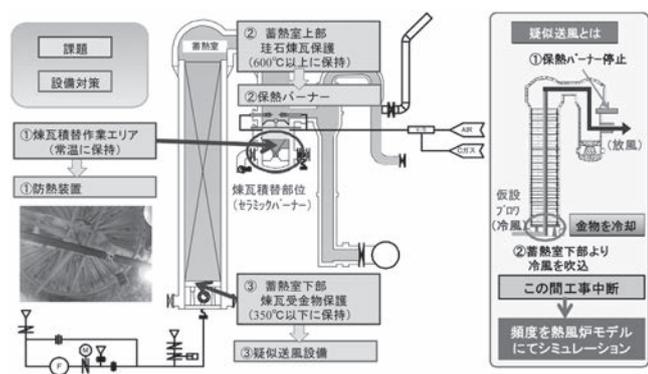


図18 熱風炉煉瓦積替工事の具備すべき必須条件と対策

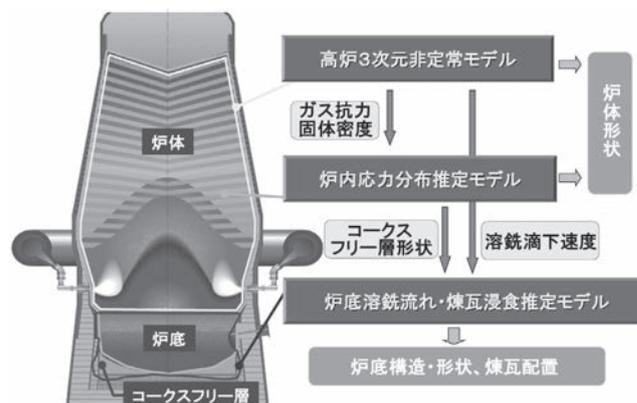


図20 高炉数学モデルの組み合わせによる高炉設計技術



## 6 研究開発の成果と今後の展望

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(10,001日で吹き止め)し、稼働日数で世界新記録を達成した。和歌山4号高炉長寿命化で培われた各要素技術は他の自社高炉(図26)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群は、高炉の長寿命化はもとより、高炉操業の効率向上と安定化の両方に寄与してきた。更に、本高炉数学モデル群は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号高炉は設備寿命25年以上として設計・建設されている。また、鹿島1、3号高炉では2009年度国内トップの高効率操業(低還元材比操業)を実現しており、今後、他の住友金属稼働高炉への展開により、炭酸ガス排出抑制を図る。

### 参考文献

- 1) K.Takatani, T.Inada and Y.Ujisawa : ISIJ Int, 39 (1999) 1, 15.
- 2) 片山賢治, 若林悟, 稲田隆信, 高谷幸司, 山岡秀行 : 鉄と鋼, 83 (1997) 2, 91.
- 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 (1998) 2, 51.
- 4) K.Takatani, T.Inada and K.Takata : ISIJ Int, 41 (2001) 10, 1139.
- 5) 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 (1998) 2, 42.
- 6) T.Inada, A.Kasai, K.Nakano, S.Komatsu and A.Ogawa : ISIJ Int, 49 (2009) 4, 470.
- 7) Y.Senga, T.Kosaka, S.Nishizawa and H.Yoshioka : IRONMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 50 (1991), 281.
- 8) 中村博史, 堂裏晃司, 山崎比呂志, 近藤淳, 大島一馬 : 住友金属誌, 49 (1997) 3, 67.
- 9) 小細温弘 : 特許第4124011号
- 10) Y.Kimura, K.Takatani and N.Otsu : ISIJ Int, 50 (2010) 7, 1040.
- 11) T.Inada, K.Takata, K.Takatani and T.Yamamoto : ISIJ Int, 43 (2003) 7, 1003.
- 12) T.Inada, K.Takatani, K.Takata and T.Yamamoto : ISIJ Int, 43 (2003) 8, 1143.

(2011年12月6日受付)

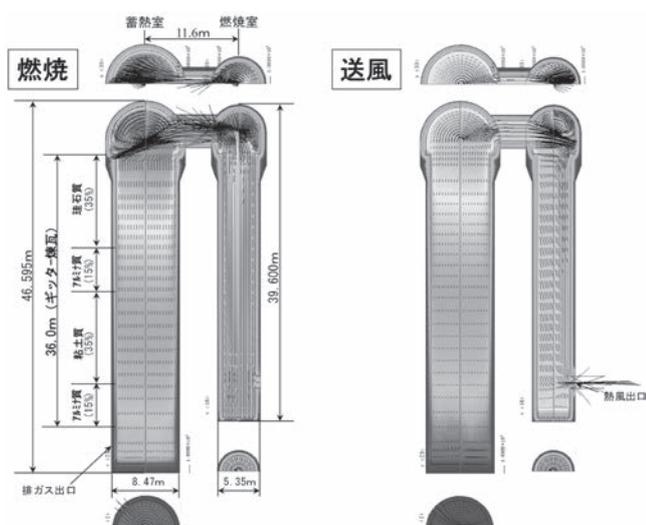


図25 熱風炉3次元モデル計算例(流動および温度分布計算結果)

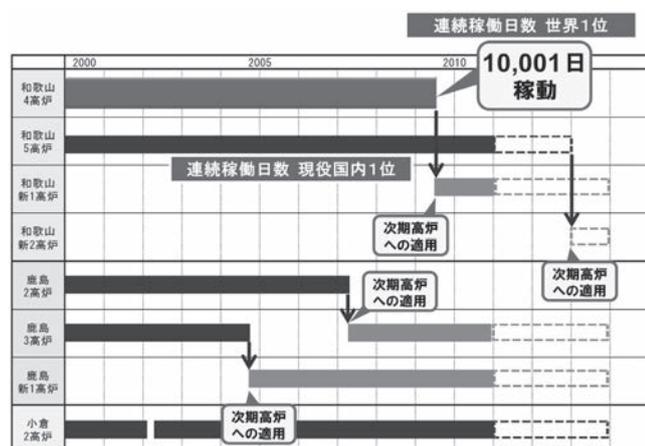


図26 直近の住友金属工業(株)における高炉稼働実績