

高炉長寿命化技術の開発

Advanced Technologies for Blast Furnace Life Extension

住友金属工業株式会社

1. 研究開発の背景と目標

(1) 製鉄業における高炉の位置付け

高炉は文字通り、天に高くそびえる炉（高炉本体で約 50m、炉頂の装入設備やガス配管を含めると約 100m の高さがある）であり、製鉄所のシンボルといわれている。高炉本体は中間が若干膨らんではいるもののほぼ円筒状の筒であり非常に単純な形をしている。しかしそれを構成している煉瓦や冷却装置あるいは原料装入設備を含めた付帯設備をみれば現代技術の粋を結集したといっても過言ではなく、巨大でありながら精緻を極めたものである。

製鉄所の生産のかなめである高炉の使命は重大で、その外観のみならず生産量への影響・経営にあたるインパクトの面からみても、シンボルといえる存在である。

高炉はいったん操業を開始（火入れ）すると炉内の火は操業停止（吹き止め）まで消えることはない。通常高炉の補修は、30 日～90 日の間隔で、定期的に 1～2 日程度送風を停止して行われる（これを休風という）。しかし炉内には原料および熔融物が詰まったままであるため、その範囲及び工事時間は限定される。上記休風では補修できない場合、高炉を吹き止め、炉内の原料および熔融部を排出・掻き出して行ういわゆる改修工事が必要となる。工事期間は 2～4 ヶ月程度と長期にわたり、大規模な設備投資を要するとともに、長期停止による生産量の大幅減を伴う。また高炉の生産能力の大幅な変更は、この改修タイミングでしか行うことは出来ず、製鉄事業において経営的な判断も含めて、最も大きなプロジェクトの一つとなっている。

(2) 高炉生産システムのメカニズム

図 1 に高炉生産システム概要を示す。焼結鉱等の鉄鉱石（鉄源）とコークス（還元材及び熱源）は炉頂から装入される。羽口では熱風炉にて加熱された約 1200℃の熱風を吹き込み（送風という）、コークスを燃焼することにより、約 2000℃の高温還元ガス（COやH₂）が発生する。この高温還元ガスは炉内を上昇しながら鉄鉱石を昇温・還元・溶解し、約 1500℃の溶けた銑鉄（溶銑）やスラグを生成する。炉内における昇温・還元効率を高め、また、圧力損失を低減するために、炉頂部の圧力（炉頂圧）を上げ、ガス流速を下げるが行われている。このように昇温・還元・溶解を 1 つの容器で行うため、効率が良い反面、高炉内部で起こる反応が多岐にわたるにもかかわらず、原料の装入操作と送風操作のみで制御しなければならないところに高炉操業の難しさがある。また、高炉下部は 2000℃を超える環境にあり依然として未知の部分が存在し、ブラックボックスといわれる所以である。

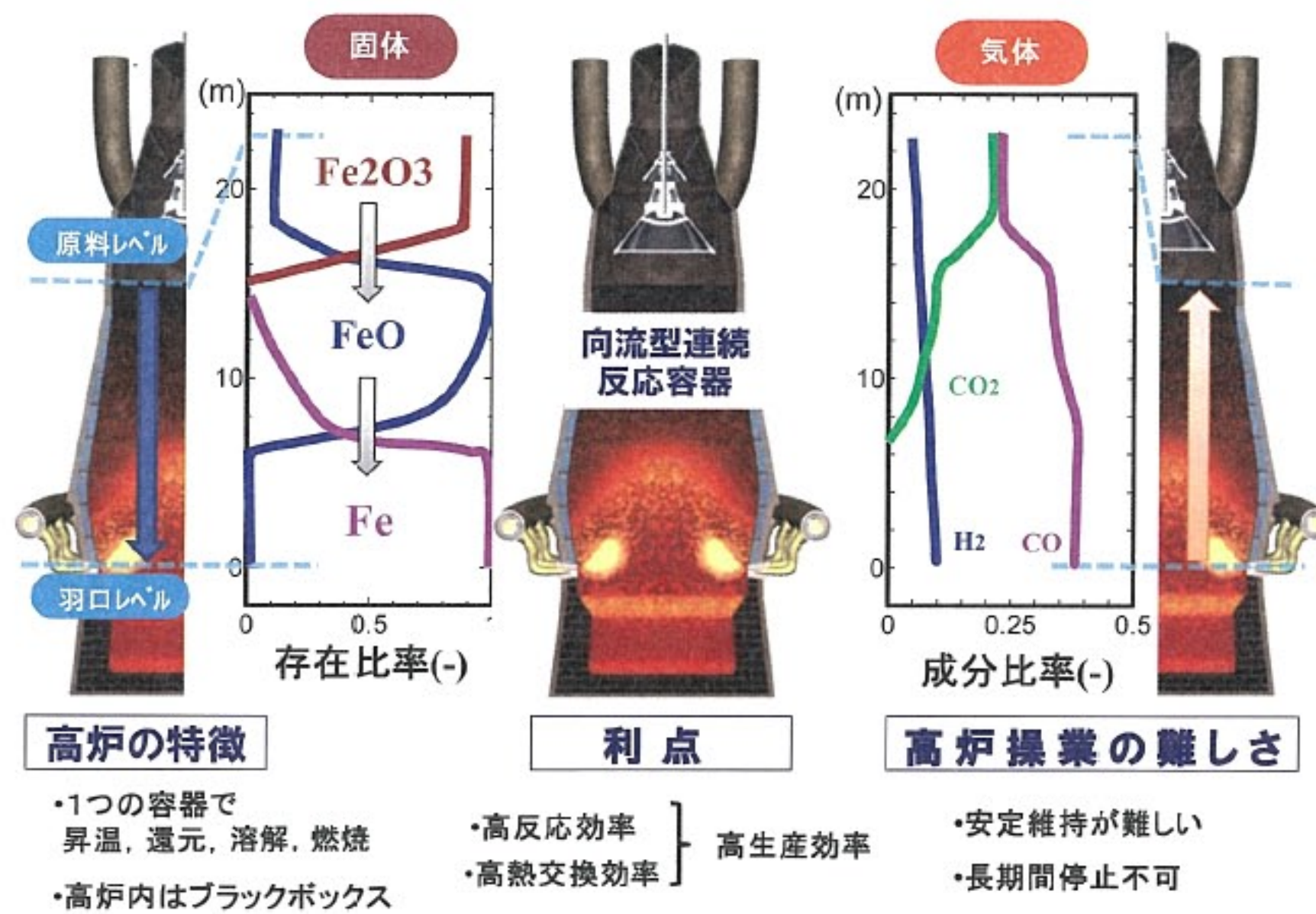


図1 高炉生産システム概要

(3) 開発の目標

高炉は製鉄所の事業規模を定める根幹の設備であり、設備寿命に達した高炉を再稼働するための設備の改修は長期の修理期間（2～4ヶ月）と多額（約300億円）の費用を要するため、経営に多大な負担を強いる重要課題である。1970年代～1980年代の高炉の寿命は5～10年程度であったが、この寿命を延長することは鉄鋼業界共通の重要課題であった。

本開発では、当初7年間稼働する予定で改修、1982年に再稼働した和歌山4号高炉をターゲットに、大きな投資を要することなく、20年以上に及ぶ徹底延命の実現を目指した（図2）。

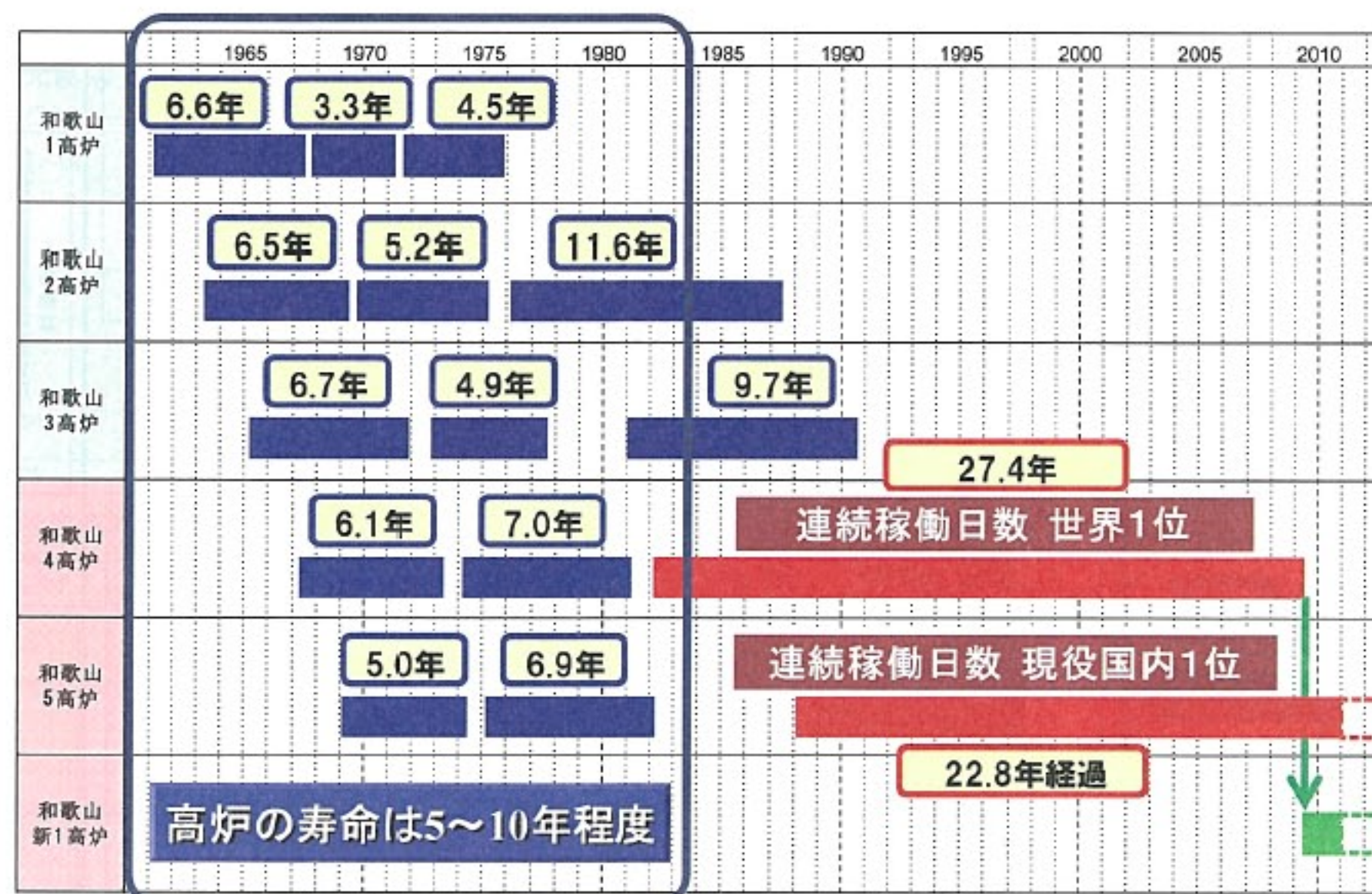


図2 和歌山製鉄所 高炉稼働実績

2. 研究開発の経過

本研究開発の経過を図3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プ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。その後も高炉トータルシミュレーションは、装入制御による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”の形として集大成した。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、ステープ（炉体冷却金物）取替に代表される設備補修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、さらに炉底損耗に強い高炉の炉体形状・炉底構造の設計指針を提供できるまでに進化し、当社新設高炉設計に活用している。

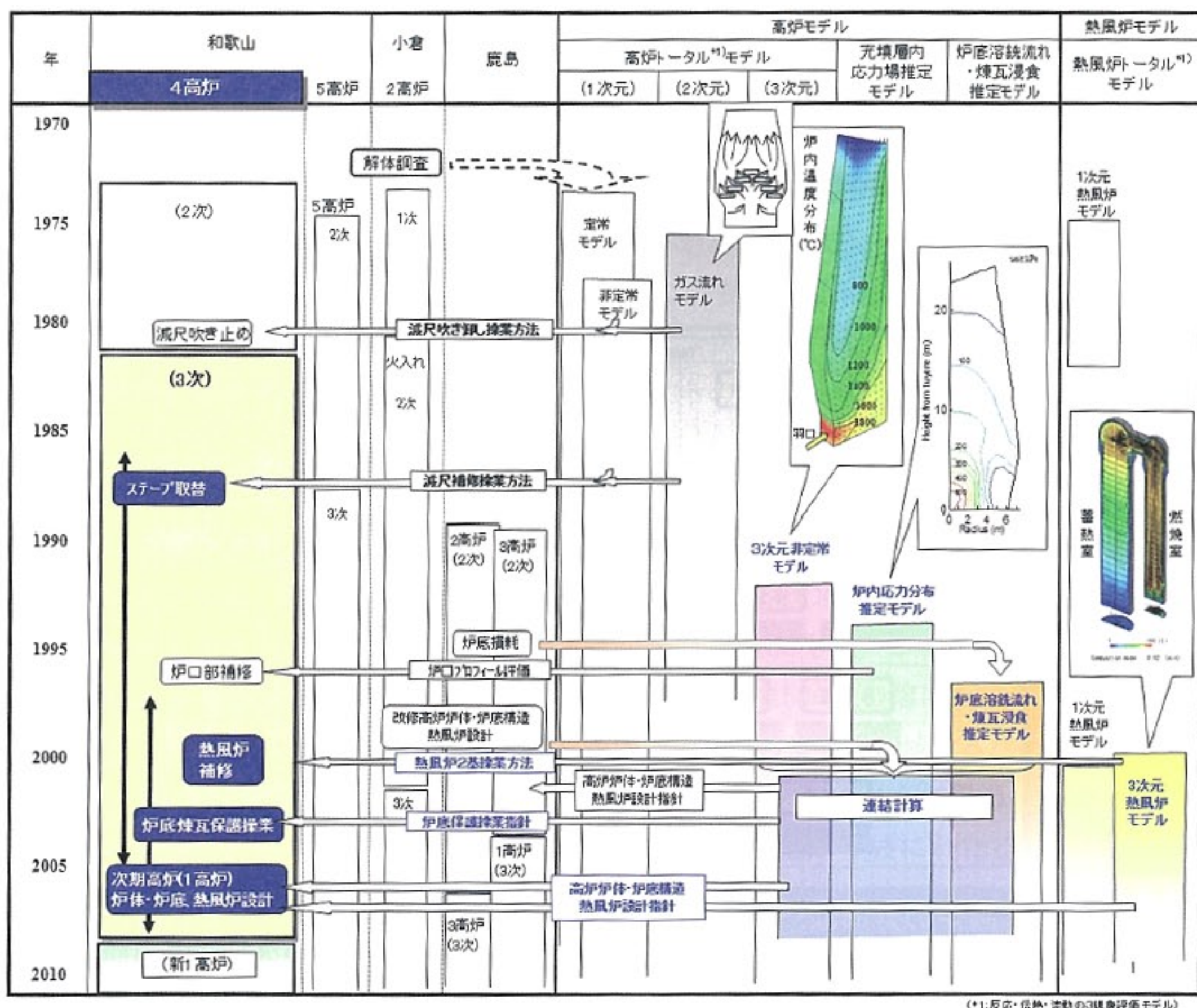


図3 高炉長寿命化技術と高炉数学モデル開発の経緯

3. 研究開発の内容と特徴

(1) 高炉数学モデルの開発

図4に高炉内現象と高炉の各種モデルを示す。また図5に、高炉内に生起する物流・反応・熱移動など個々の現象を数学的に表現し、これを統合して高炉操業状態を包括的に解析する高炉数学モデル（高炉トータルモデル）を構成する基礎式群を示す。

高炉内には、気相（還元ガス）、固相（鉄鉱石・コークス）、液相（溶銑・スラグ）の3相が共存するため、各相ごとに基礎式が立てられている。反応や溶解はこれら3相間の物質の移動によって計算されるが、高炉数学モデルで考慮される化学反応は還元反応をはじめ多岐に亘る。従って、安定解を得る為の複雑な数値処理技術はもとより、これら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（太字）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。

本研究により開発されたモデルは、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。

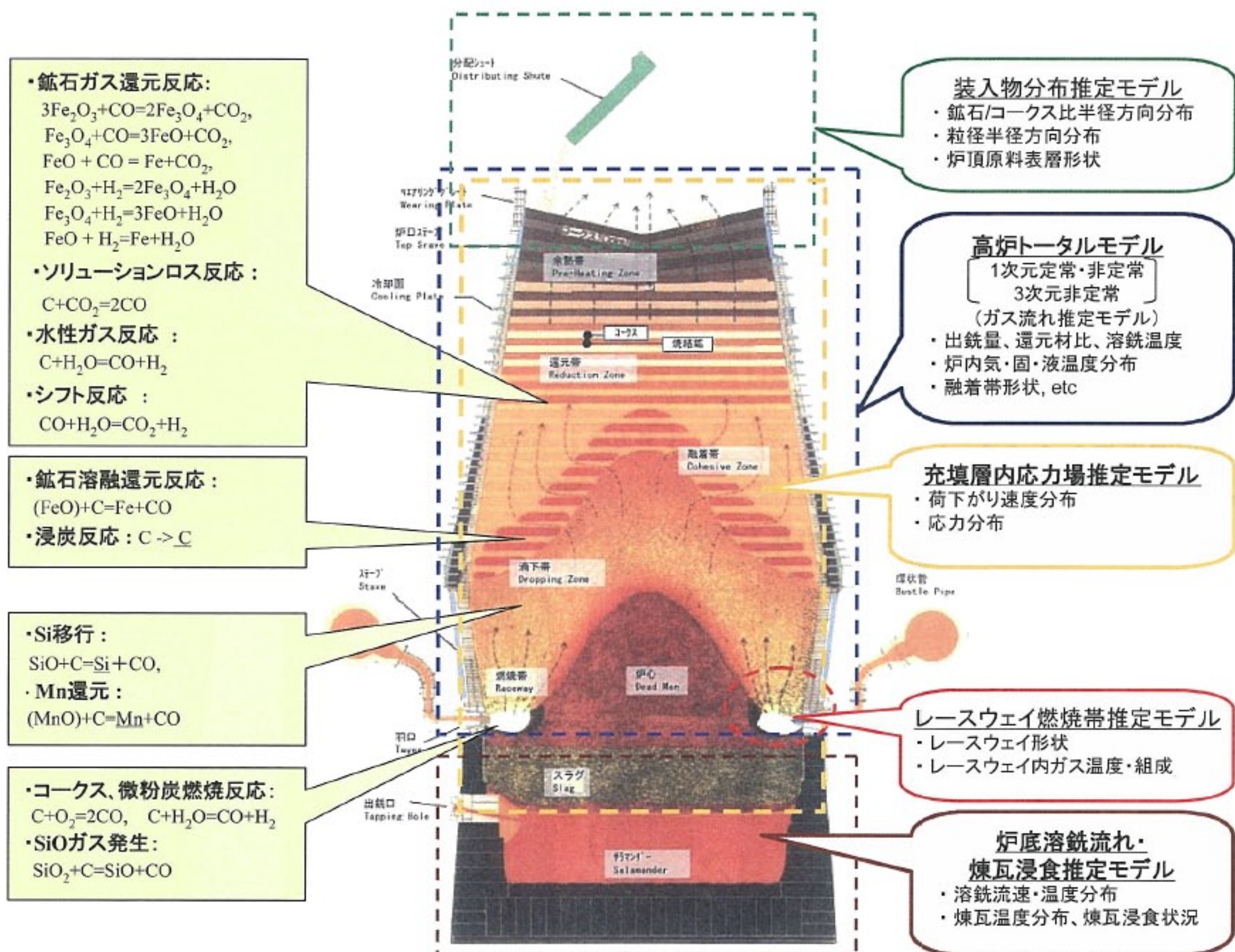


図4 高炉内現象と高炉の各種モデル

物質収支式

$$\frac{\partial(\varepsilon_k \rho_k \omega_{kn})}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_k \rho_k \omega_{kn} U_k) = \text{div}(\varepsilon_k \rho_k D_k \text{grad} \omega_{kn}) + RW_{kn} \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_k \rho_k)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_k \rho_k U_k) = \sum_n RW_{kn} \quad \dots (2)$$

$$RW_{kn} = M_N \sum_N \text{Rate}_N \cdot a_{knN} \quad \text{where } k = g, s, l \quad N : \text{reaction No.}$$

熱収支式

$$\frac{\partial(\varepsilon_k \rho_k C_{pk} T_k)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_k \rho_k C_{pk} T_k U_k) = \varepsilon_k \text{div}(k_k \text{grad} T_k) - \sum_m (a_{k-m} U_{k-m} (T_m - T_k)) + RH \quad \dots (3)$$

$$RH \equiv \sum_N \text{Rate}_N (-\Delta H_N) \cdot \eta_{kN} \quad \dots (4)$$

ガス運動量収支式

$$\frac{\partial \vec{G}}{\partial t} = -\text{grad} P - 150 \mu_g \left(\frac{1-\varepsilon}{\phi d_p \varepsilon} \right)^2 \frac{\vec{G}}{\rho_g \varepsilon} - 1.75 \rho_g \left(\frac{1-\varepsilon}{\phi d_p \varepsilon} \right) \frac{1}{(\rho_g \varepsilon)^2} |\vec{G}| \vec{G} \quad \dots (5)$$

固相運動量収支式

$$\rho \frac{dv_i}{dt} + v_i R_w = f_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad \dots (6)$$

降伏条件式 $\alpha \cdot \sigma_{ii} + \sqrt{\frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}} = Y \quad \dots (7)$

応力-歪速度関係式 $s_{ij} = \frac{\sqrt{(s_{mn} s_{mn})}}{\sqrt{(\dot{\varepsilon}'_{kl} \dot{\varepsilon}'_{kl})}} \dot{\varepsilon}'_{ij} \quad \dots (8)$

歪速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots (9)$

偏差応力 $s_{ij} \equiv \sigma_{ij} - \frac{1}{3} (\sigma_{kk}) \delta_{ij} \quad \dots (10)$

偏差歪速度 $\dot{\varepsilon}'_{ij} \equiv \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} (\dot{\varepsilon}_{kk}) \delta_{ij} \quad \dots (11)$

図5 高炉内現象を記述する基礎式群

1) 高炉3次元非定常モデル

高炉炉内反応のシミュレーションを行う数学モデルは、1次元定常からスタートし、1次元非定常へと、更には装入制御による操業効率改善や送風制御による炉底保護などのニーズに対応すべく、3次元非定常モデル¹⁾の開発へと進化した。図6に示すように、高炉3次元非定常モデルは、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、還元状態を3次元的同时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できるシミュレーターである。

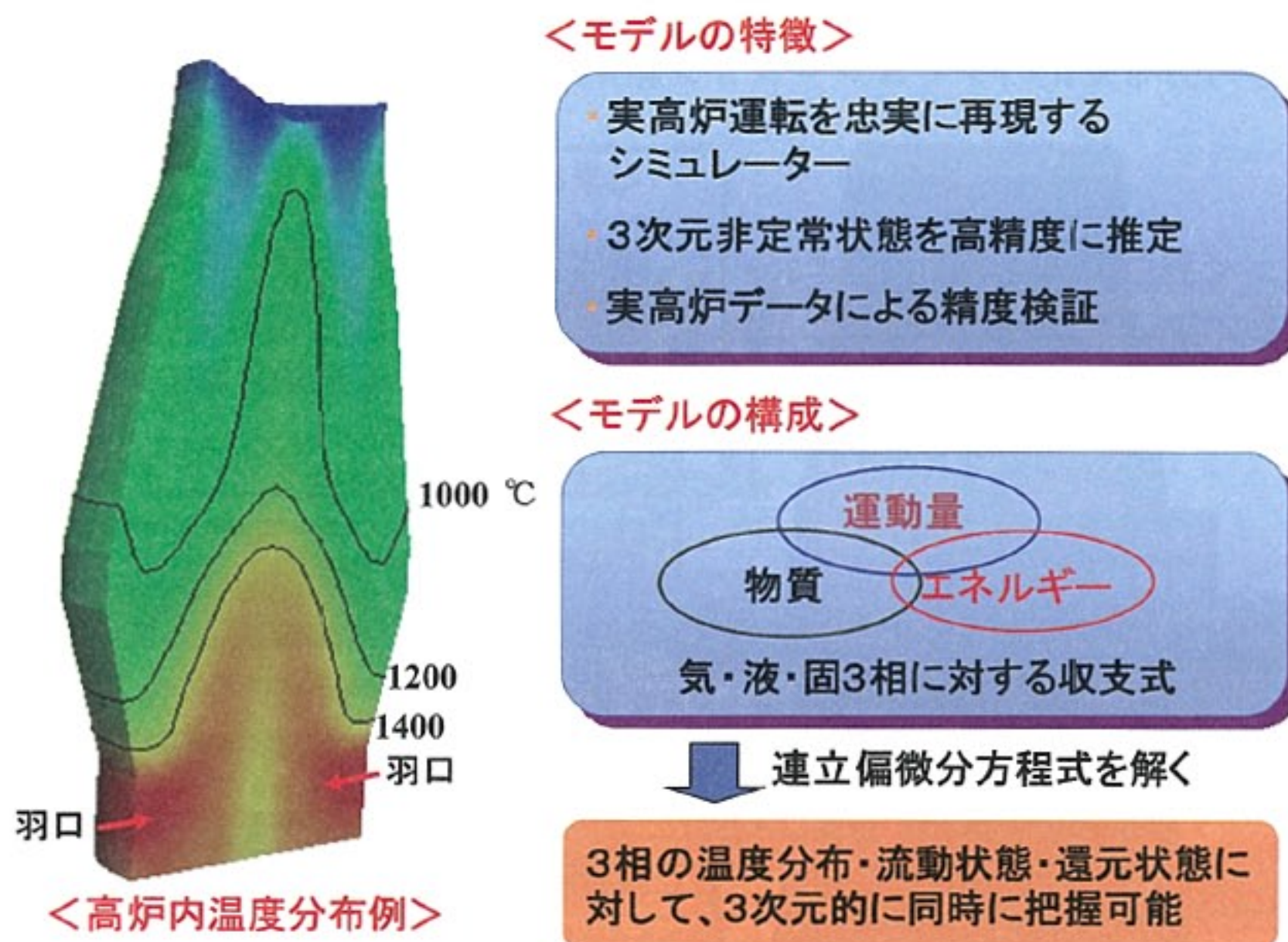


図6 高炉3次元非定常モデル概要

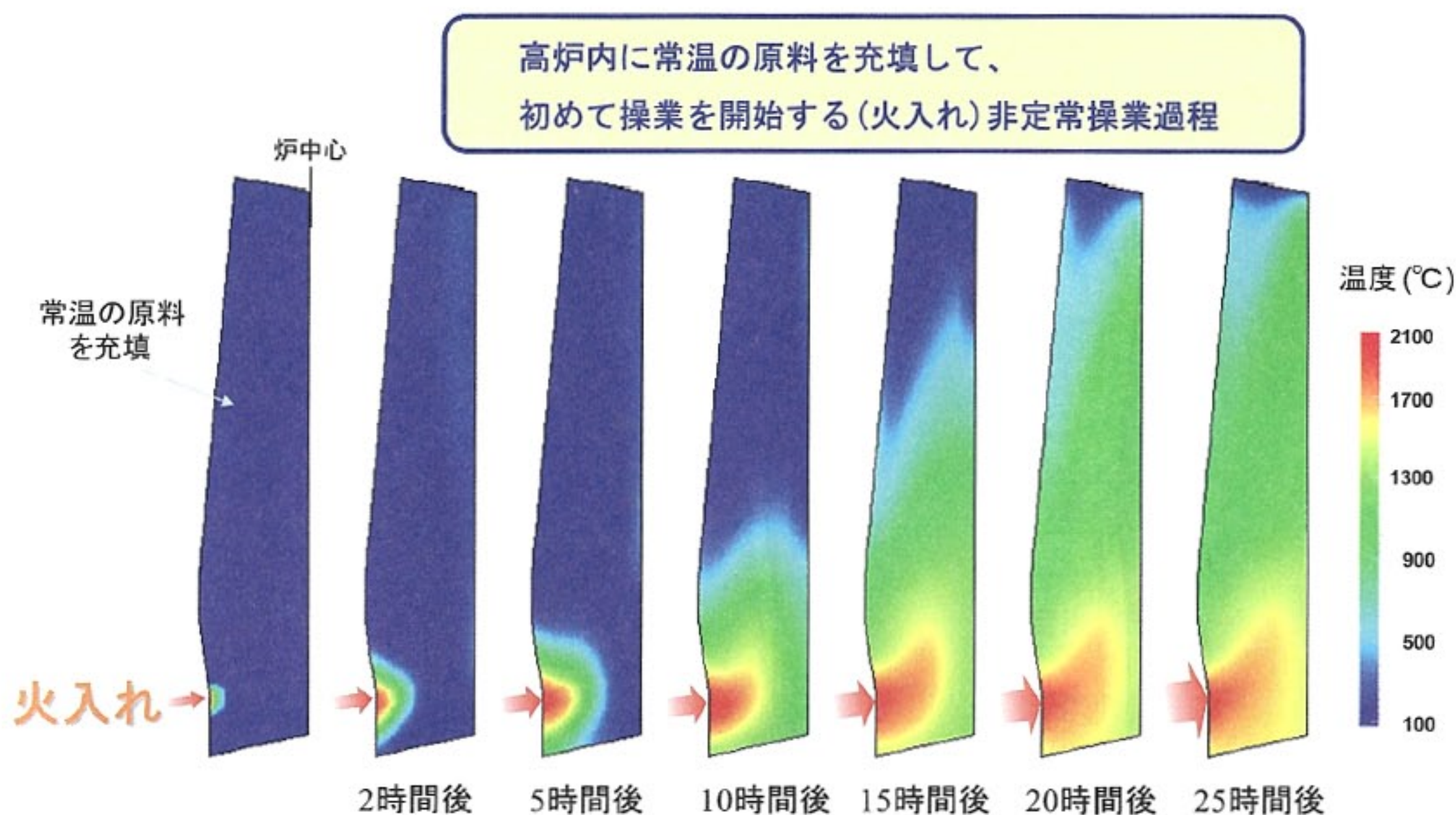


図7 高炉3次元非定常モデル計算例(炉内の昇温推移)

2) 炉内応力分布推定モデル

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出来ず、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実炉計測により実証（火入れ時に高炉内に応力計を設置し計測）し、数学的にモデル化した図8に示す高炉充填層内応力場推定モデル²⁾³⁾は、高炉充填層内の荷下がりや応力分布の推定・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9には火入れ時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。

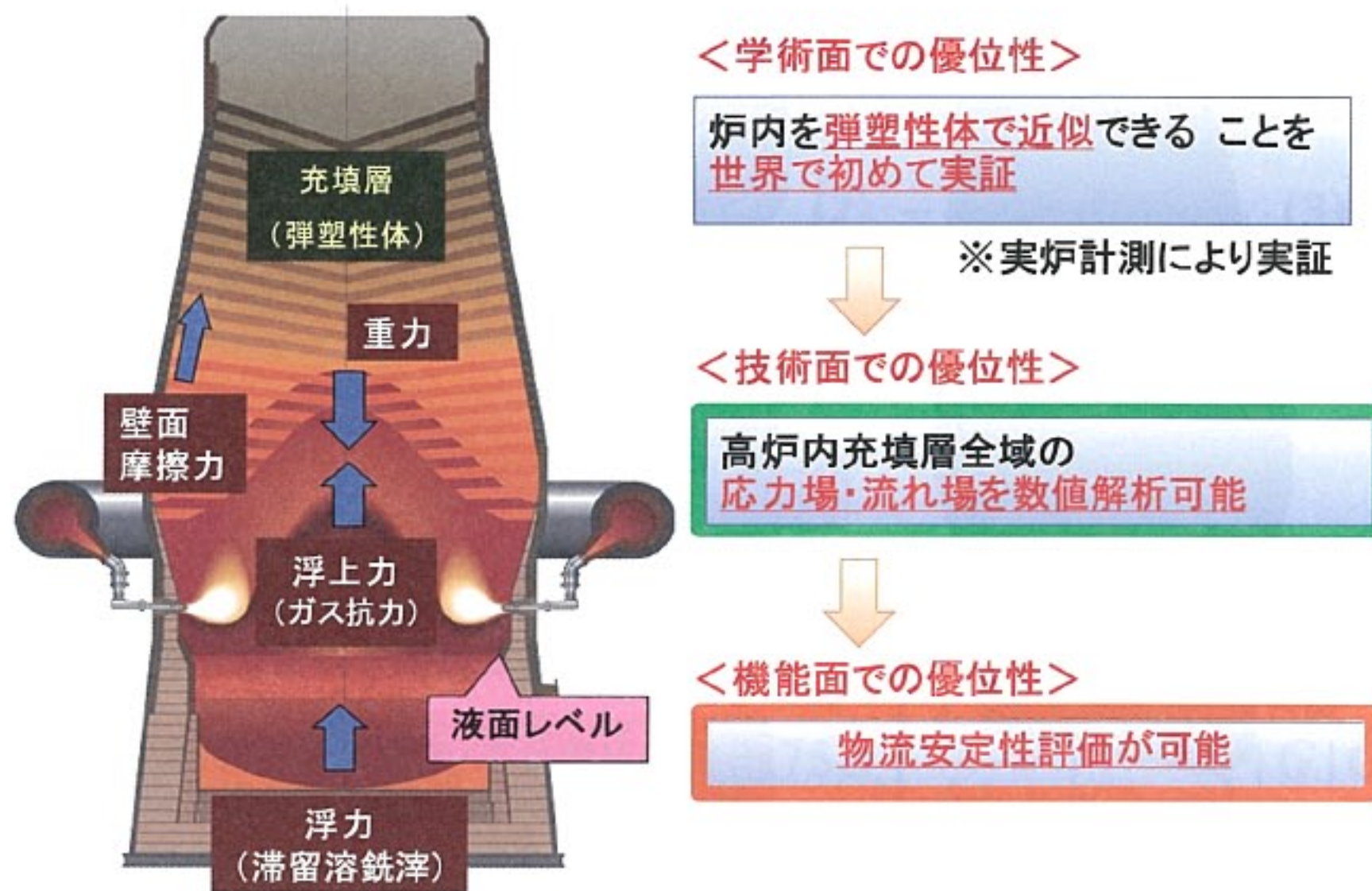


図8 高炉充填層内応力場推定モデル概要

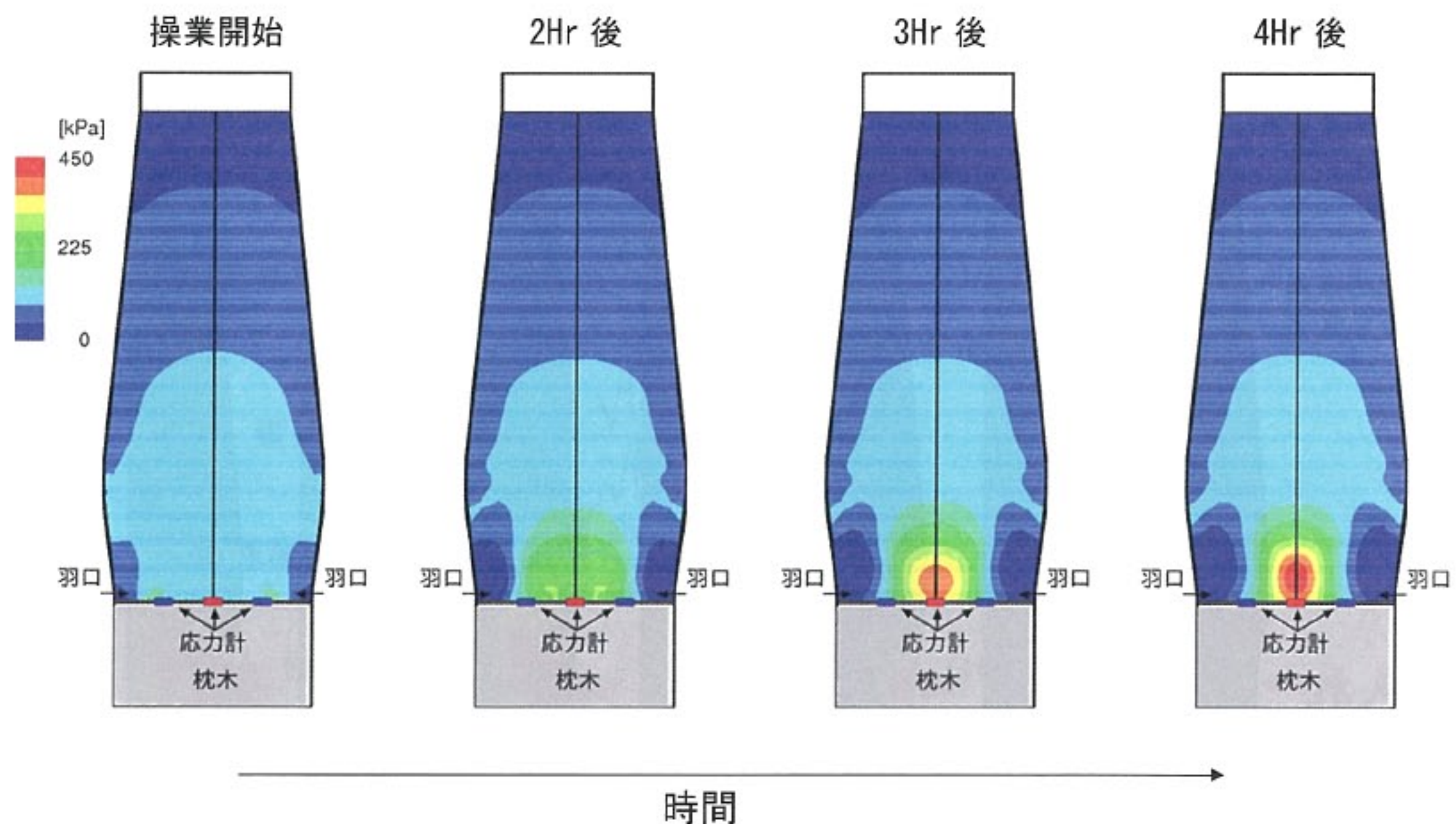


図9 火入れ時の炉内動的応力分布変化

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唯一の武器である。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溶損過程を推定する数学モデルの開発を行った。

図10に炉底推定モデル⁴⁾⁵⁾の構成およびその核となる炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデルの概要を示す。高炉3次元非定常モデルで評価された結果を引き継ぎ、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入力条件にして、炉底湯溜まり内の流動・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を推定するものである。

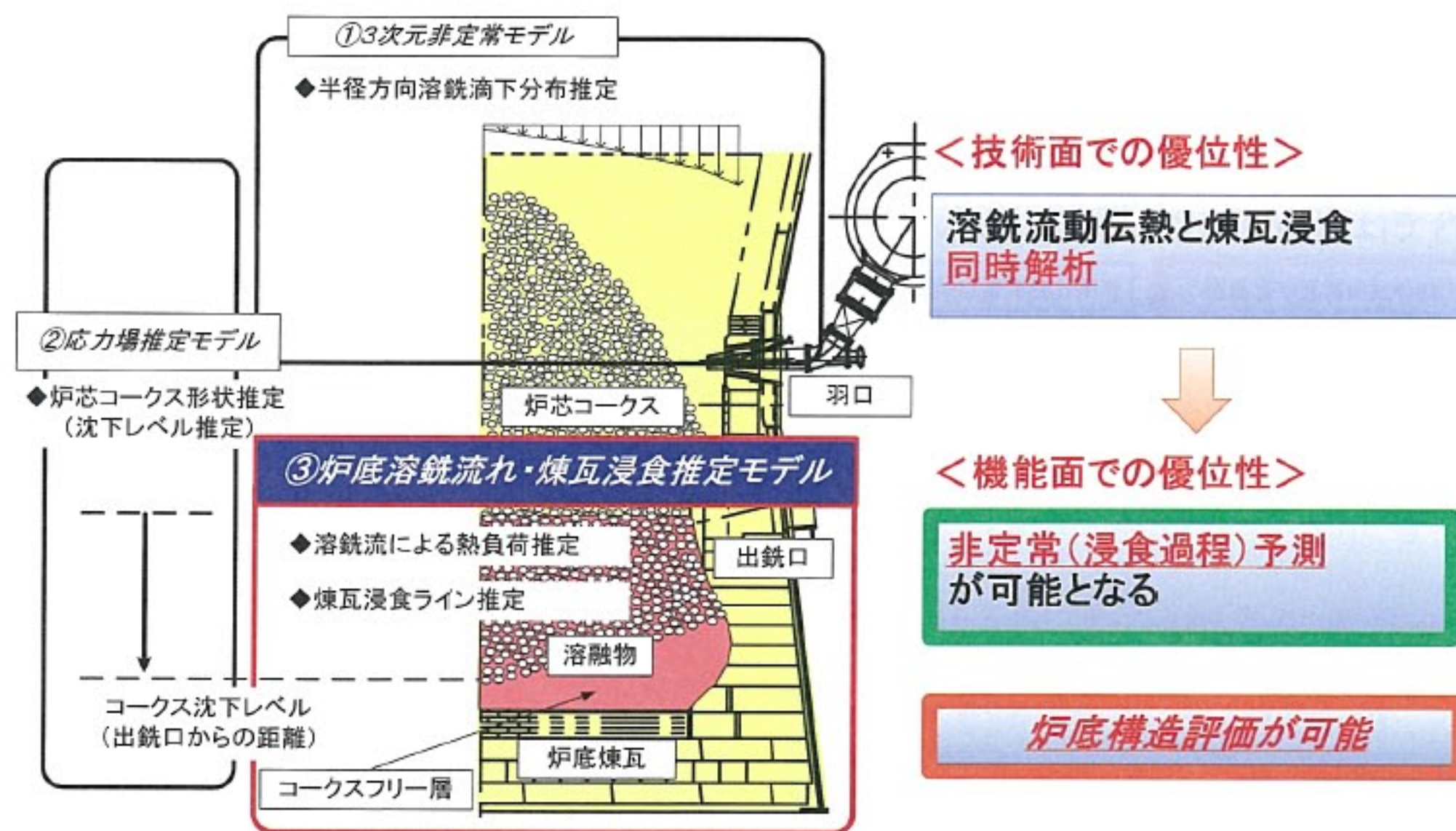


図10 高炉炉底推定モデル概要

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11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⁶⁾。

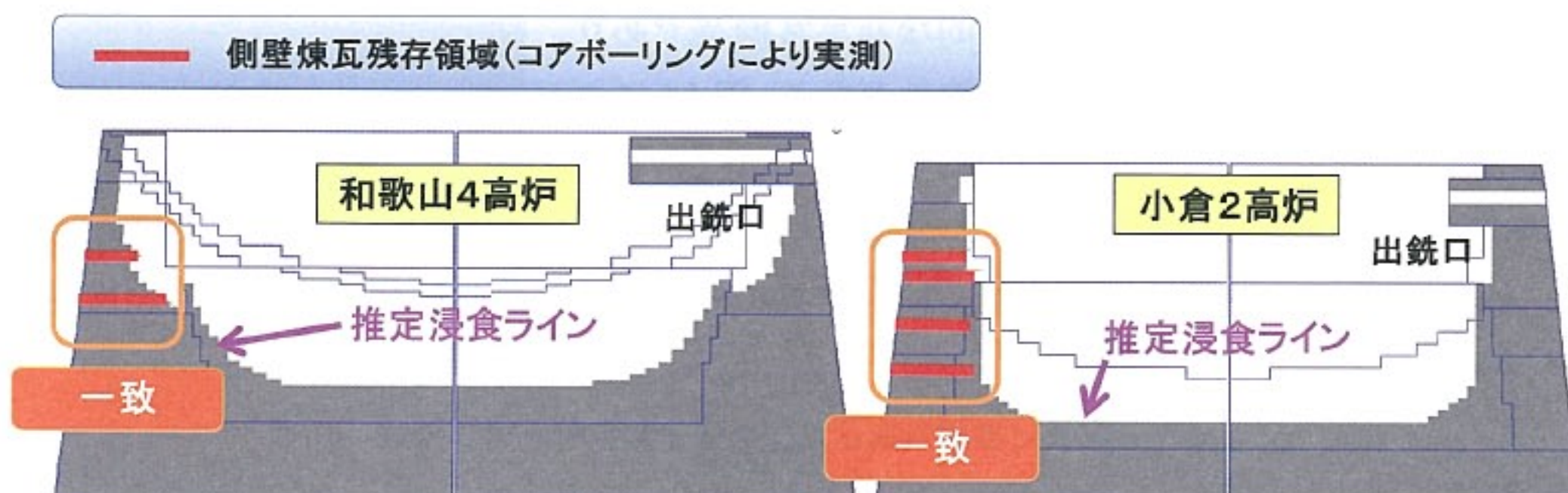


図11 炉底解体調査によるモデル精度検証

(2) 高炉長寿命化技術の開発

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 12 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、炉内漏水を防止するため、破損したステーブは止水せざる得ない状況となる。止水されたステーブは炉内の過酷な熱負荷に耐えられず徐々に損耗し、いずれ鉄皮が炉内にむき出しの状態となり、鉄皮に亀裂を生じさせる。鉄皮の亀裂箇所からは一酸化炭素を含む高温のガスが噴出し人的被害を引き起こす可能性がある。また鉄皮の亀裂は、強度低下を招くため炉内ガス及び原料の圧力に耐え切れず噴破し、高温で大量のガスと原料を周囲に飛散させ大規模なトラブルに至る可能性がある。このため、従来においてはステーブの破損進行が高炉の寿命を決める主要因となっており、高炉の改修により新たなステーブに取替え、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1986年頃よりステーブ破損が開始したため、国内では実施例のない稼働中高炉での休風におけるステーブ取替技術の開発に取り組んだ。

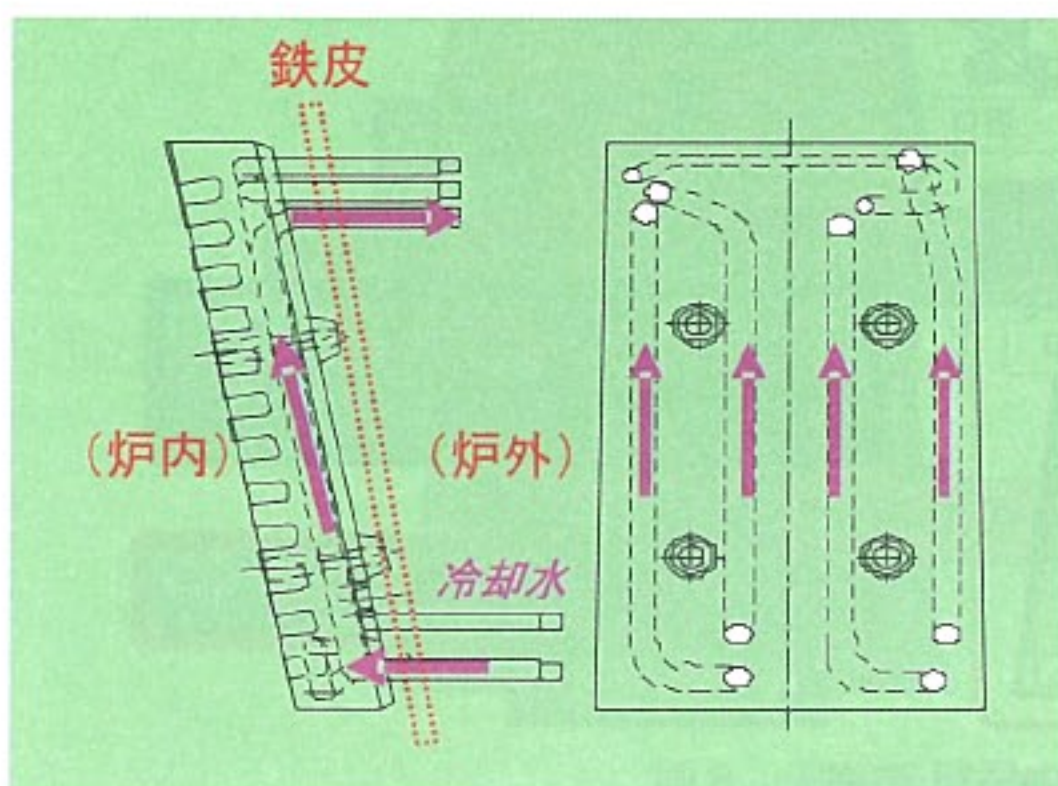


図 12 ステーブ概要



図 13 ステーブ取替時炉内状況

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、原料レベルを通常原料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定常操業であり、操業設計を誤ると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 14 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、本研究にて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 15 に減尺操業時の操業シミュレーションを示す。

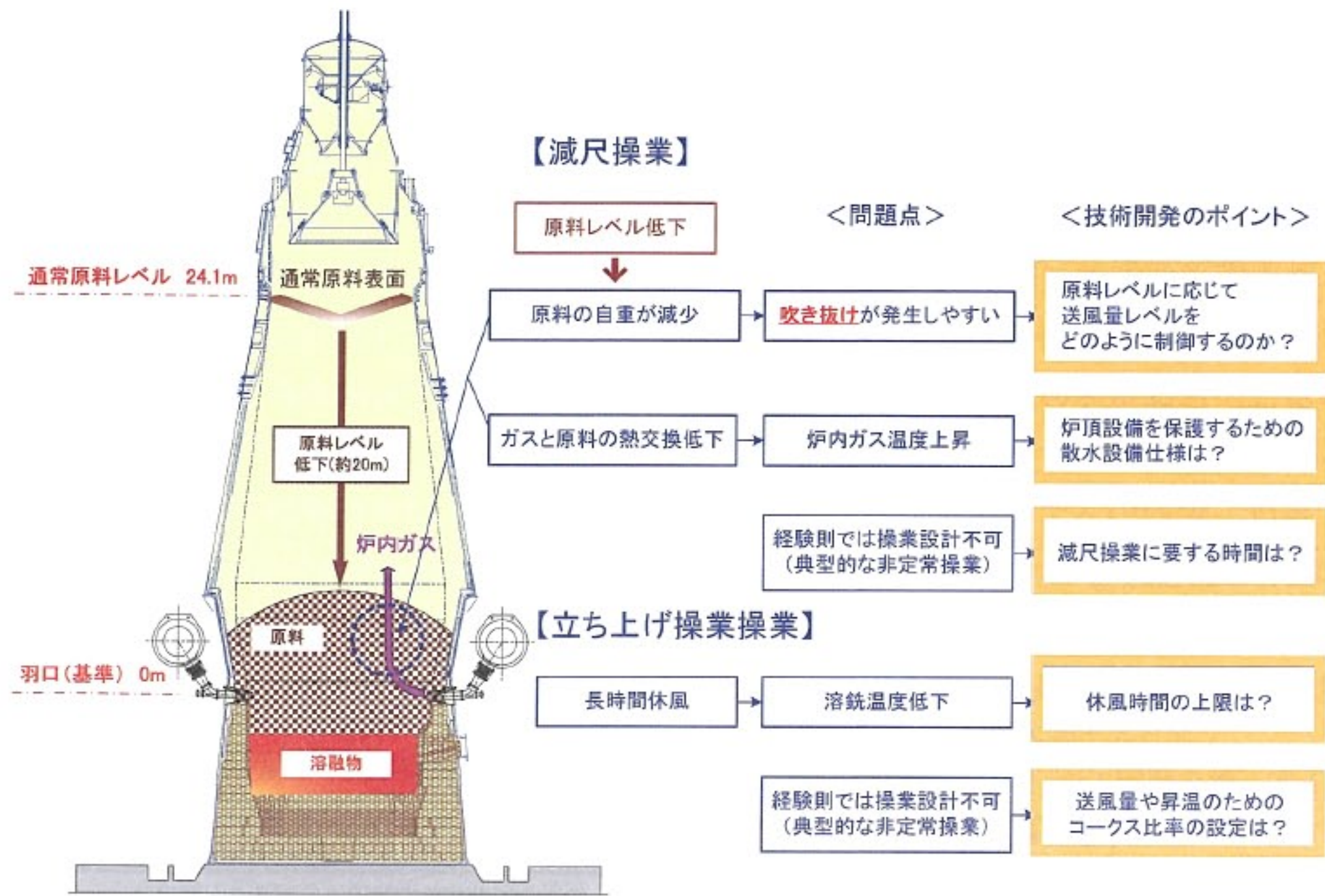


図 14 ステープ取替時の操業上の技術開発ポイント

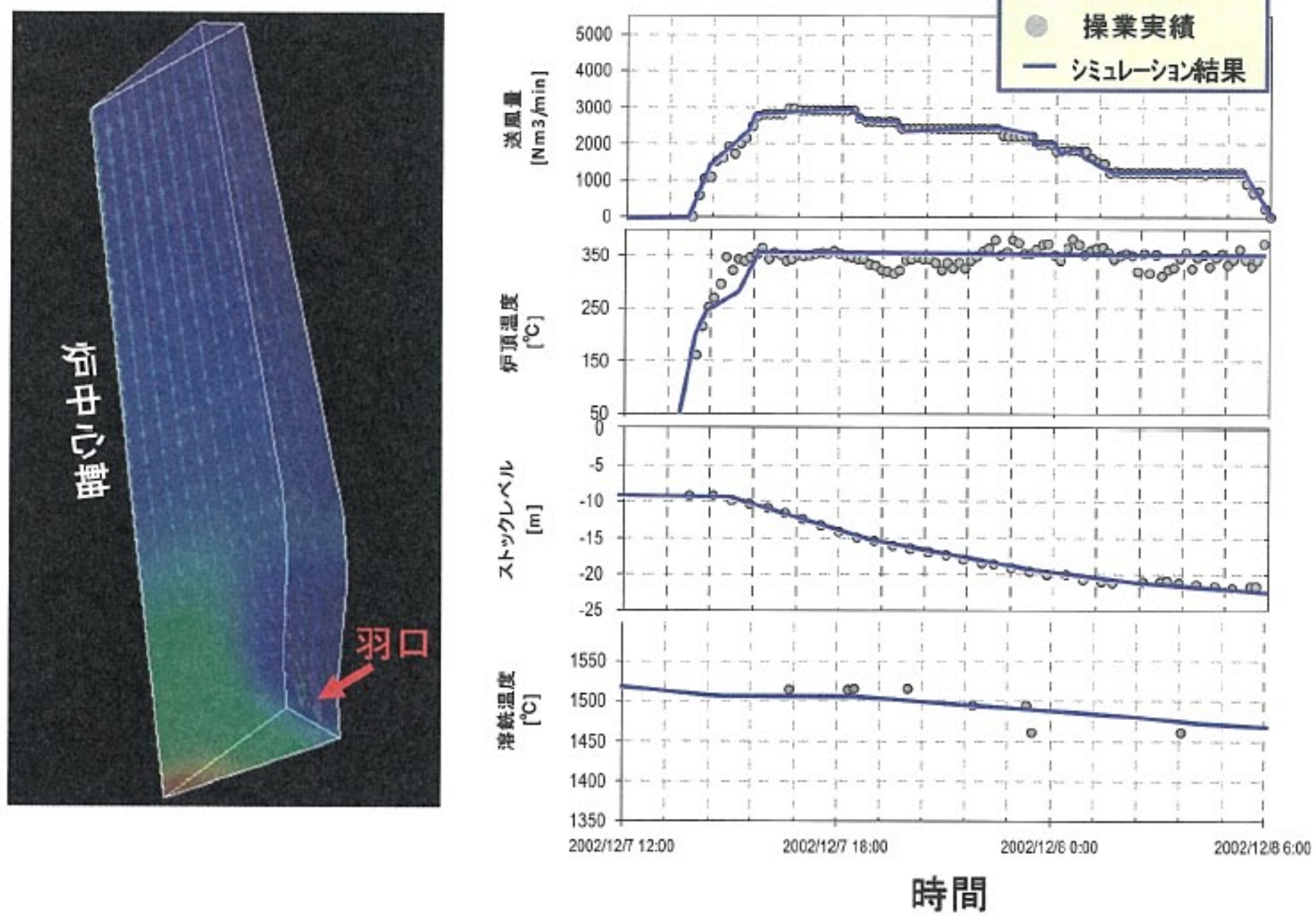


図 15 高炉 3次元非常モデルによる減尺操作シミュレーション

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燻ったコークスがあり、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出来ない。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。ステープ取替技術を開発するにあたり、図16に示すように比較検討を実施した。

I案は、ほぼ全ての作業を間近で行なうことが出来、最も確実性のある工法として考えられたものの、多量のステープ取替工法としては適さない。

II案は、炉内のステープを炉外からワイヤーロープで吊りながら移動させるなど、確実性は未知の領域にあった。しかしながら、当時徐々にステープ破損が進行、将来的には多量のステープ取替が高炉の延命対策には不可欠な技術となると確信し、II案を基本的な工事方法として選定、未知の領域を課題と捉え開発していくこととした。

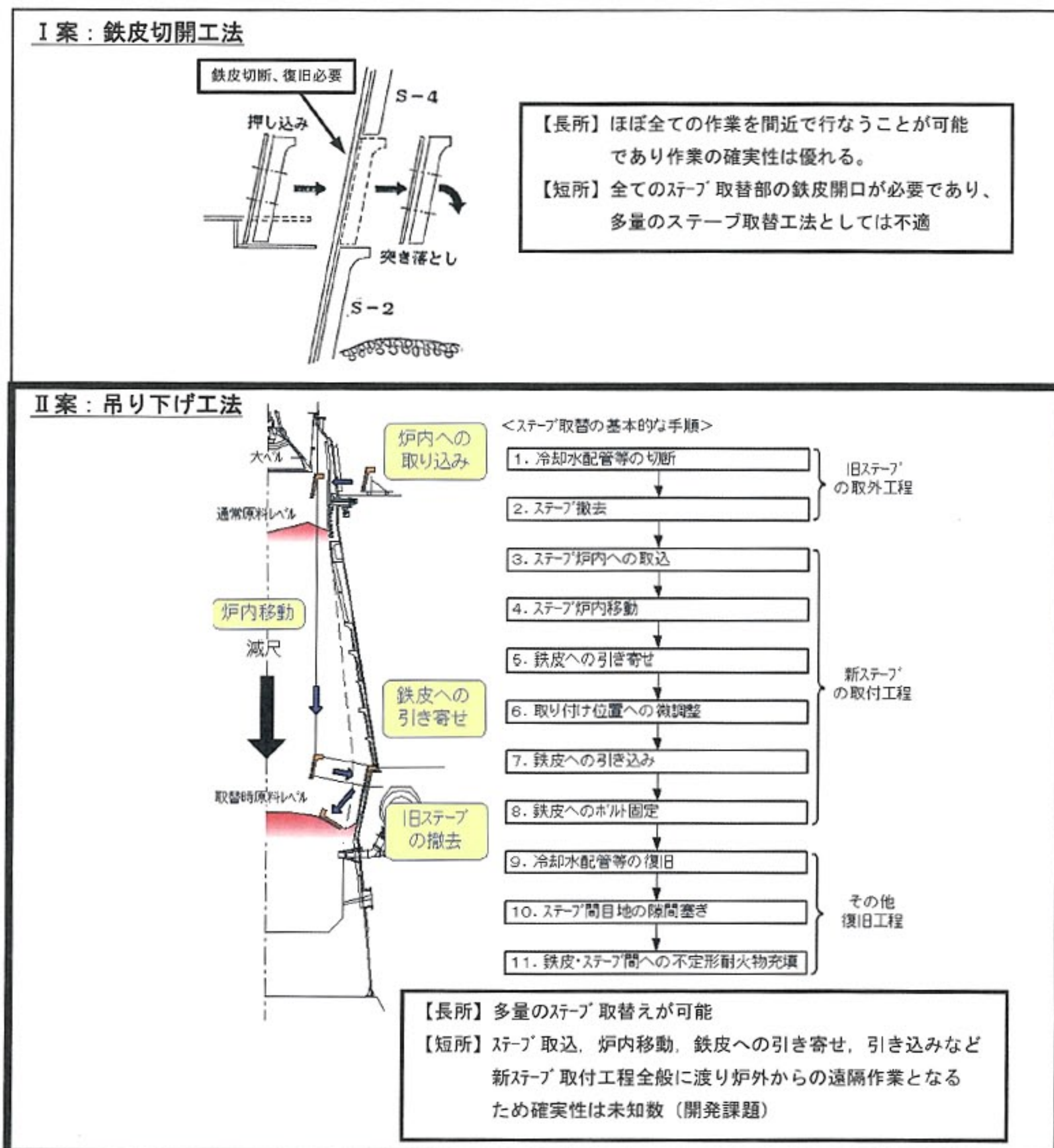


図16 ステープ取替工法アウトライン検討

ステーブ取替アウトライン決定後、個々の工程をより具体化するプロセスに移る。工程毎に技術開発のポイントを検討するとともに、重要な箇所については実物大の作業シミュレーションを実施し、作業性の確認と作業者の技能習得を図った。特に新ステーブ取付工程においては、高温の炉内でステーブをワイヤーロープで吊下げ移動することや、多人数での連携作業となることより、作業に手間取るトラブルが発生し長時間となった場合、運搬用のワイヤーが昇熱され強度が低下し破断する、あるいは所要時間を大幅に超過し、立ち上げ時操業不調を招くなどの問題点が想定された。ステーブ取替技術を開発するにあたっては、全般を通じて如何に確実かつ円滑に施工出来るかが、大きな課題であった。図 17 に重要工程におけるステーブ取替工法具体化とその開発ポイントを示す。

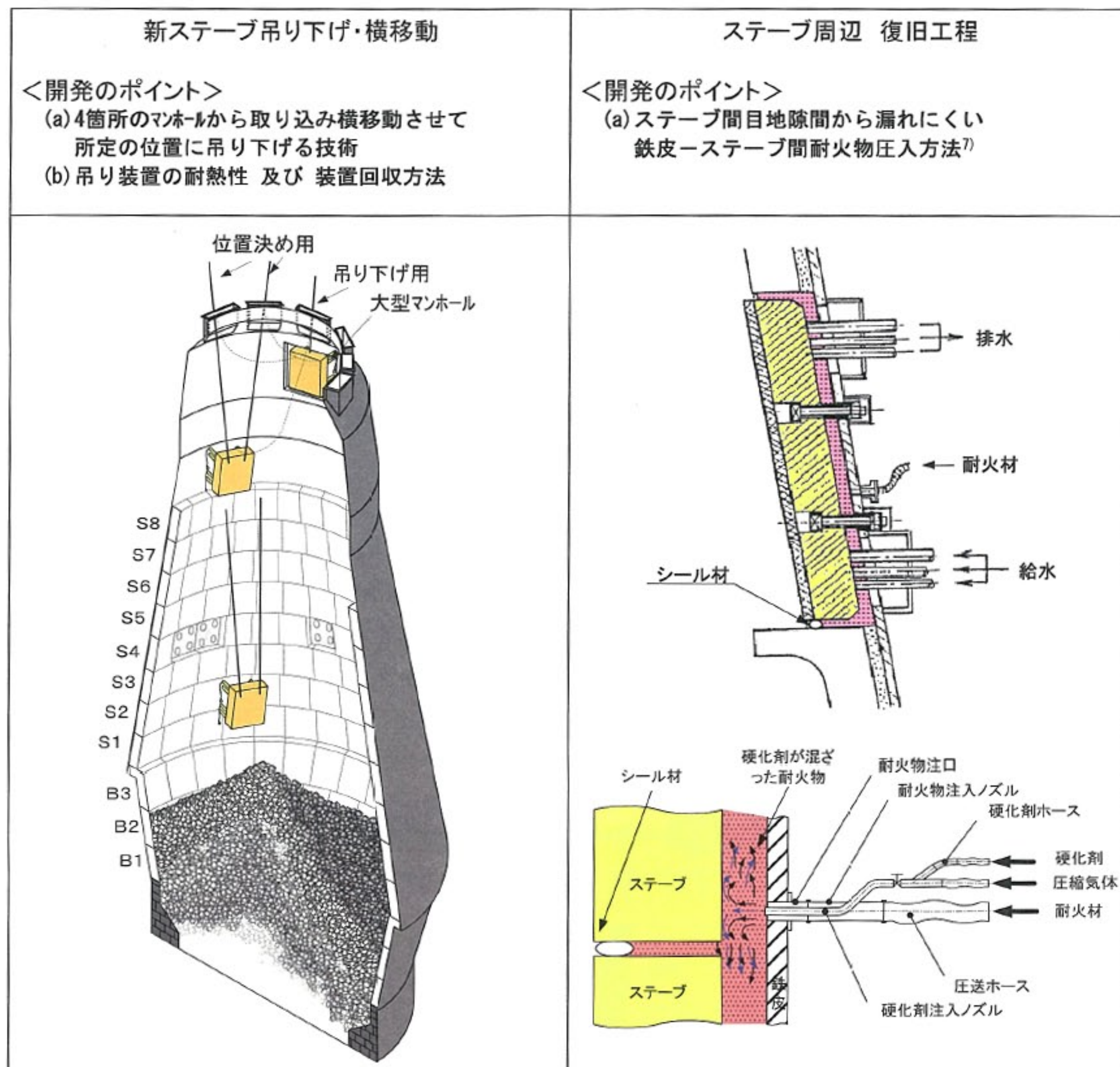


図 17 ステーブ取替工法具体化と開発ポイントの一例

図 18 に和歌山製鉄所におけるステーブ取替実績を示す。1987 年 3 月 国内初の稼動中高炉¹⁾におけるステーブ取替⁸⁾を実施して以来、直近では 2002 年に 102 枚を 111 時間で、また 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ブ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。

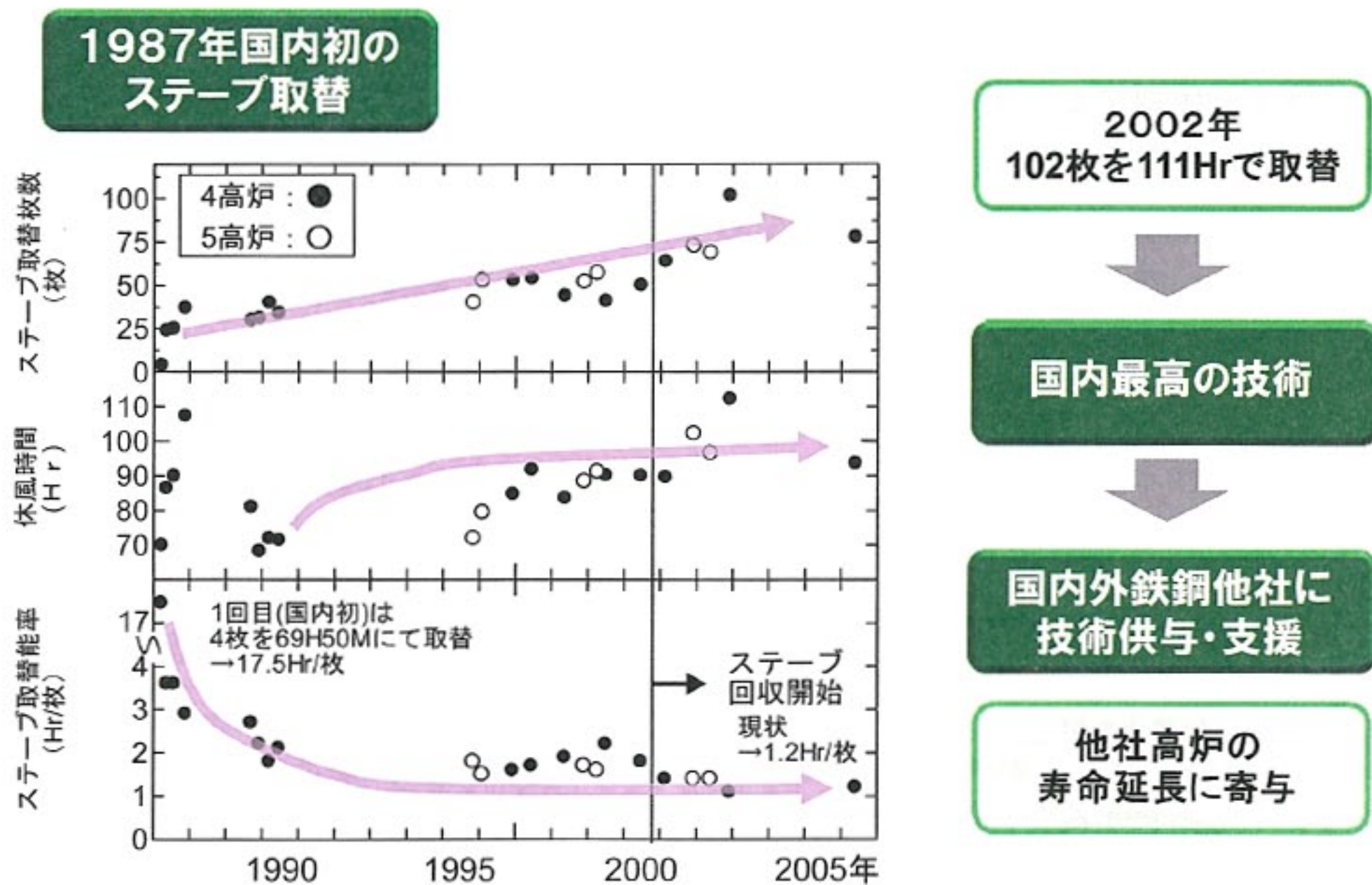


図 18 和歌山製鉄所 ステーブ取替実績

2) 炉底煉瓦浸食抑制技術の開発

和歌山 4 号高炉の炉底構造を用いて様々な高炉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 19 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。

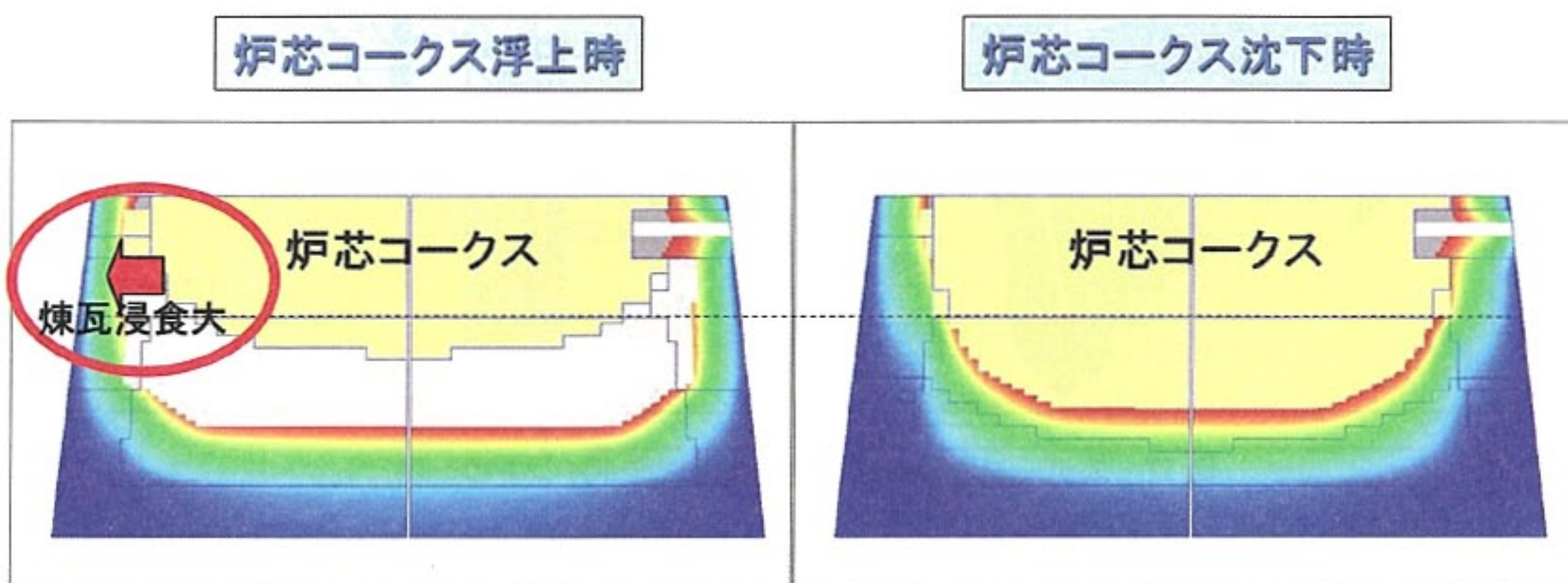


図 19 炉芯コークスレベルによる炉底煉瓦浸食に及ぼす影響

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ブ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延び、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¹⁰⁾が必要とされた。

図22に和歌山4号高炉熱風炉設備概要を、図23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¹¹⁾を示す。

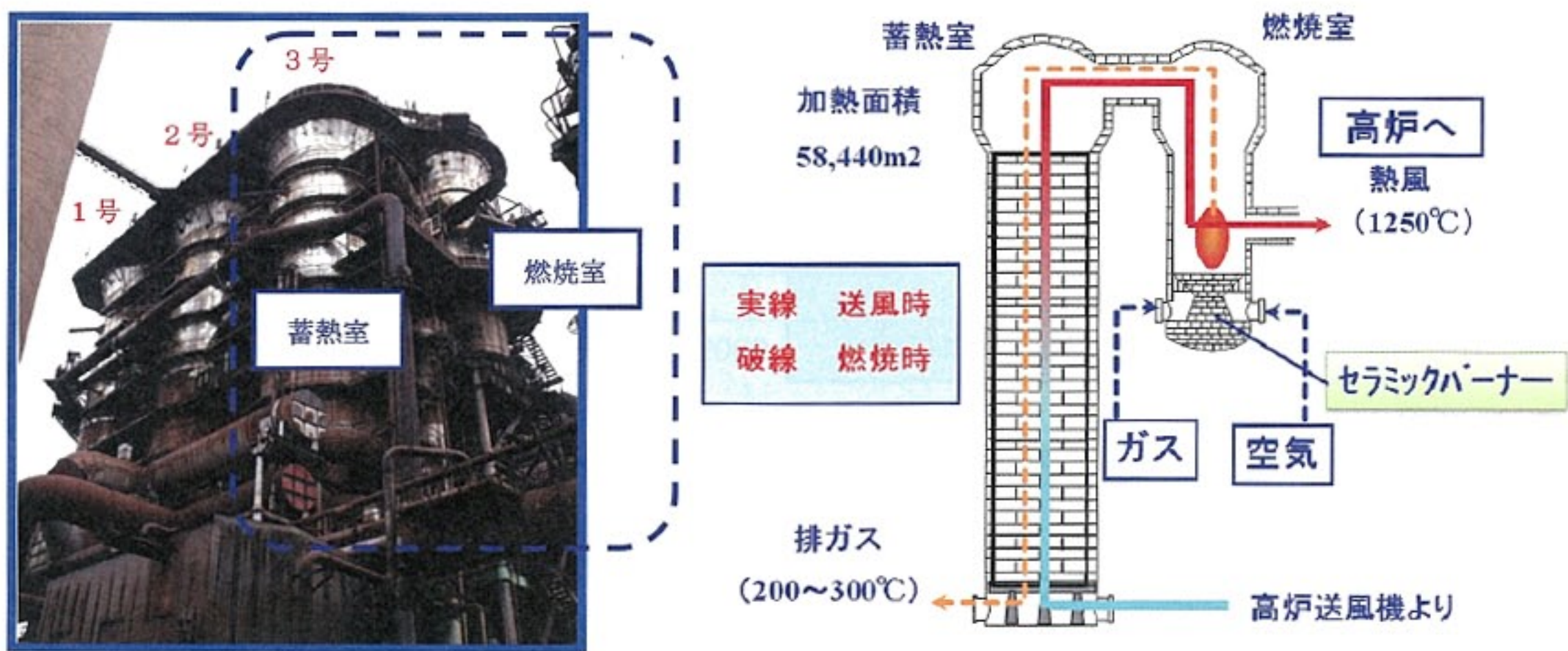


図22 和歌山4号高炉 熱風炉設備概要

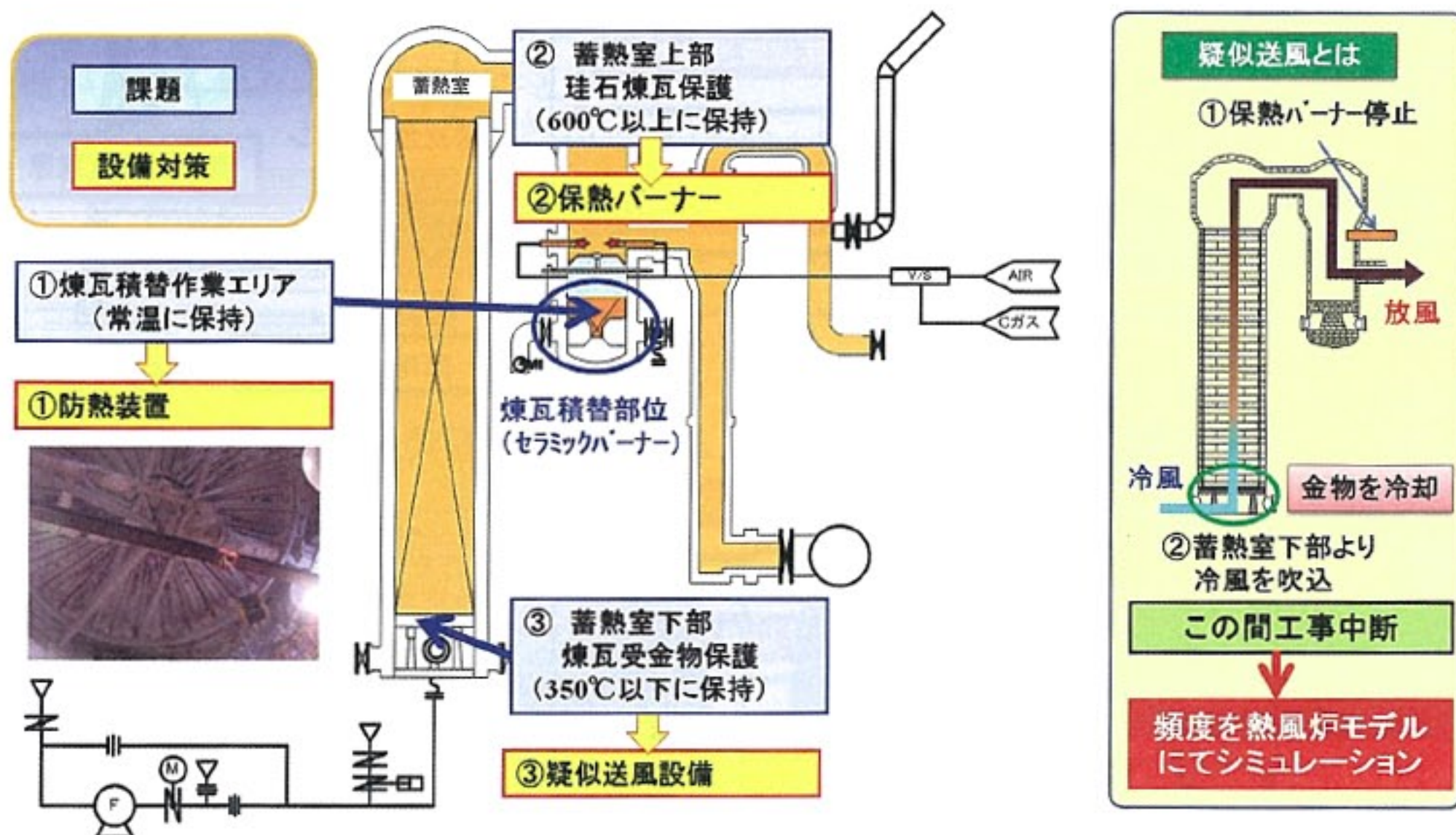


図23 熱風炉煉瓦積替工事の具備すべき必須条件と対策

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(蓄熱室煉瓦を受けている煉瓦受金物)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¹²⁾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 24 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。

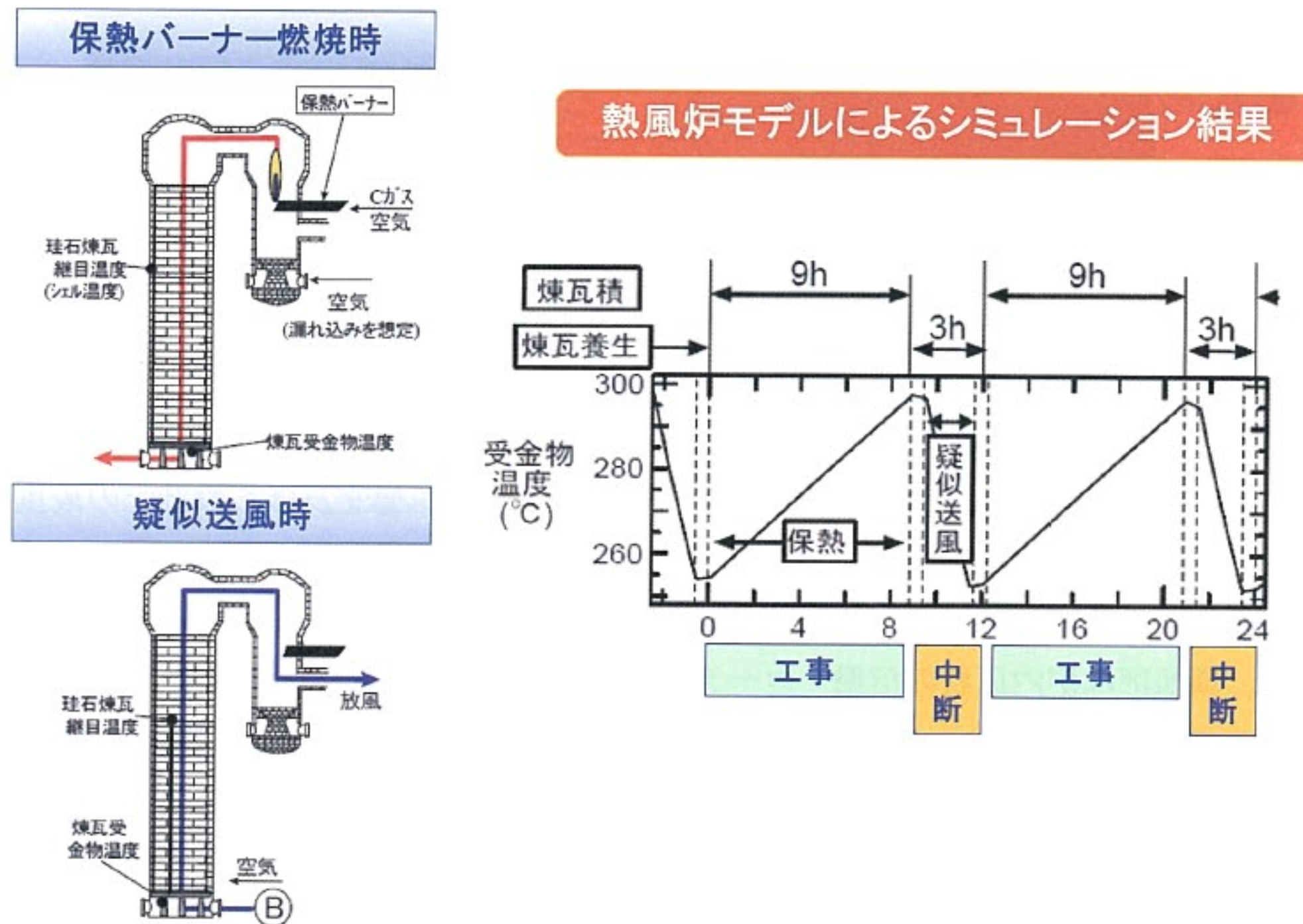


図 24 熱風炉数学モデルによる工事工程試算結果

(3) 次期高炉への展開

和歌山製鉄所上工程は、住友金属工業、中國鋼鐵等出資による持株会社東アジア連合鋼鐵 100% 出資会社として住金鋼鐵和歌山として分社化され、和歌山製鉄所は高級シームレスミルおよびスラブ供給拠点として生まれ変わった。

これに伴い、高炉生産能力増強が求められ、新設 1 号高炉が 2009 年 7 月稼働を開始し、和歌山 4 号高炉は 27 年 4 カ月 (10,001 日) という連続稼働日数世界一記録を残し、2009 年 7 月 11 日にその稼働を停止した。しかしながら、そこで培ってきた技術は、和歌山 1 号高炉はもとより小倉・鹿島の高炉設計及び和歌山 5 号高炉延命 (現在稼働炉中最も稼働年数が長い) に受け継がれている。

その中核として数学モデルによる高炉設計がある。図 25 に示すように、充填層内応力場推定モデル、炉底溶銃流れ・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、さらに炉底損耗に強い高炉の炉体形状・炉底構造の設計指針を提供できるまでに発展させることができた。

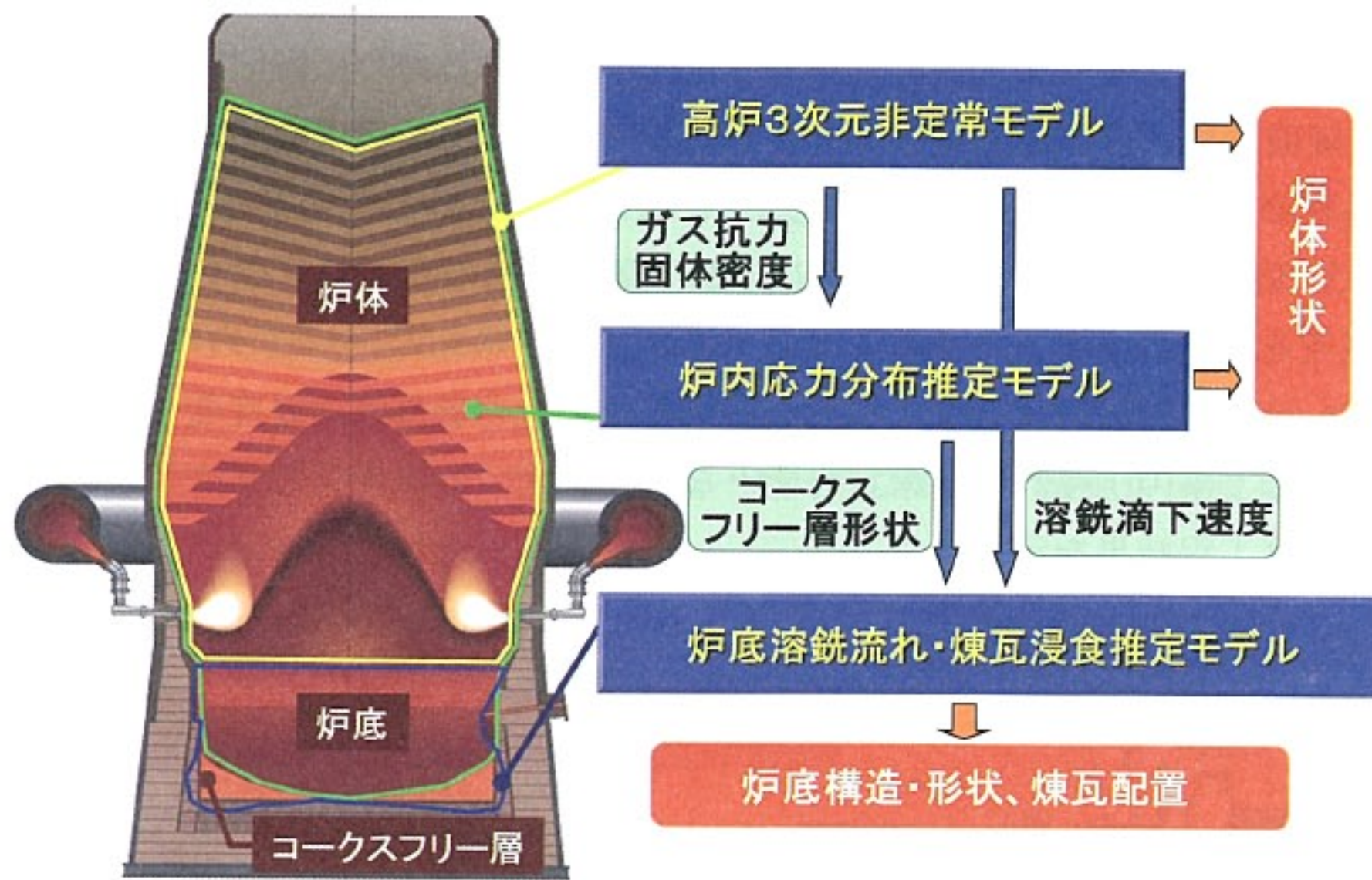


図 25 高炉数学モデルによる高炉設計技術

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。一般的に炉胸部は炉内原料が降下に従って温度上昇し体積を増すだけでなく、炉壁は摩擦抵抗が大きく炉中心部の炉内物降下が早い傾向があるためこの部分を下広がりになっている。朝顔部は炉内原料の溶融・コークスの燃焼等により体積が縮小するため上広がりになっている。このように炉体形状は原料の荷下がりや高炉内の通気性・反応性に大きな影響を及ぼすものである。

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 26 に示す数学モデルによる定量化により、炉内の熱的評価・通気評価・ガス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¹³⁾¹⁴⁾。

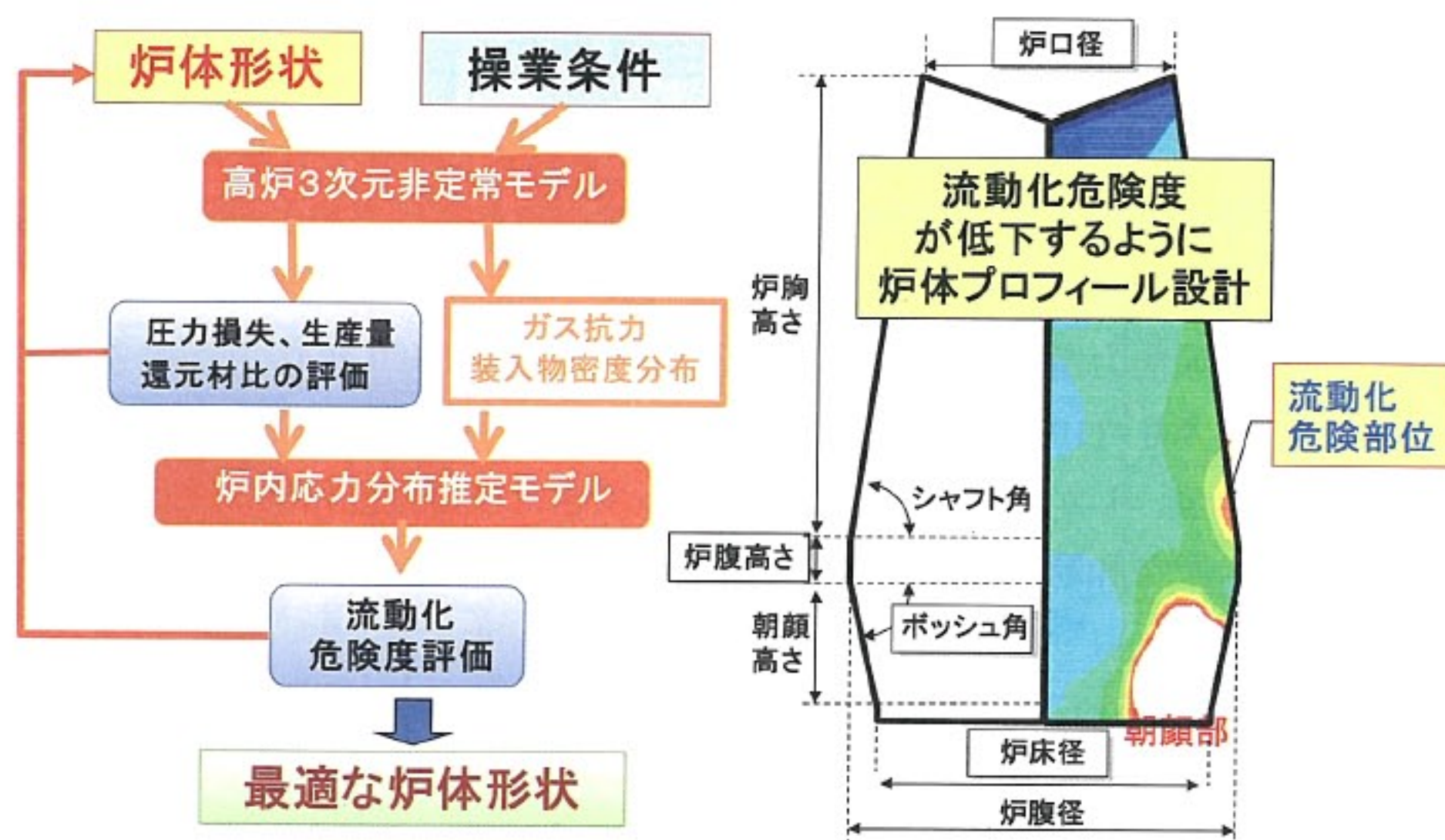


図 26 高炉炉体形状設計のための検討フロー

特に、吹き抜けに対する安定性評価には、充填層内応力場推定モデルが活用され、高炉内の各部位毎の応力推定が可能となり、格段に推定精度を向上させることができた。

図 27 には炉体形状の圧力損失および吹き抜け指数に及ぼす影響を示す。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。

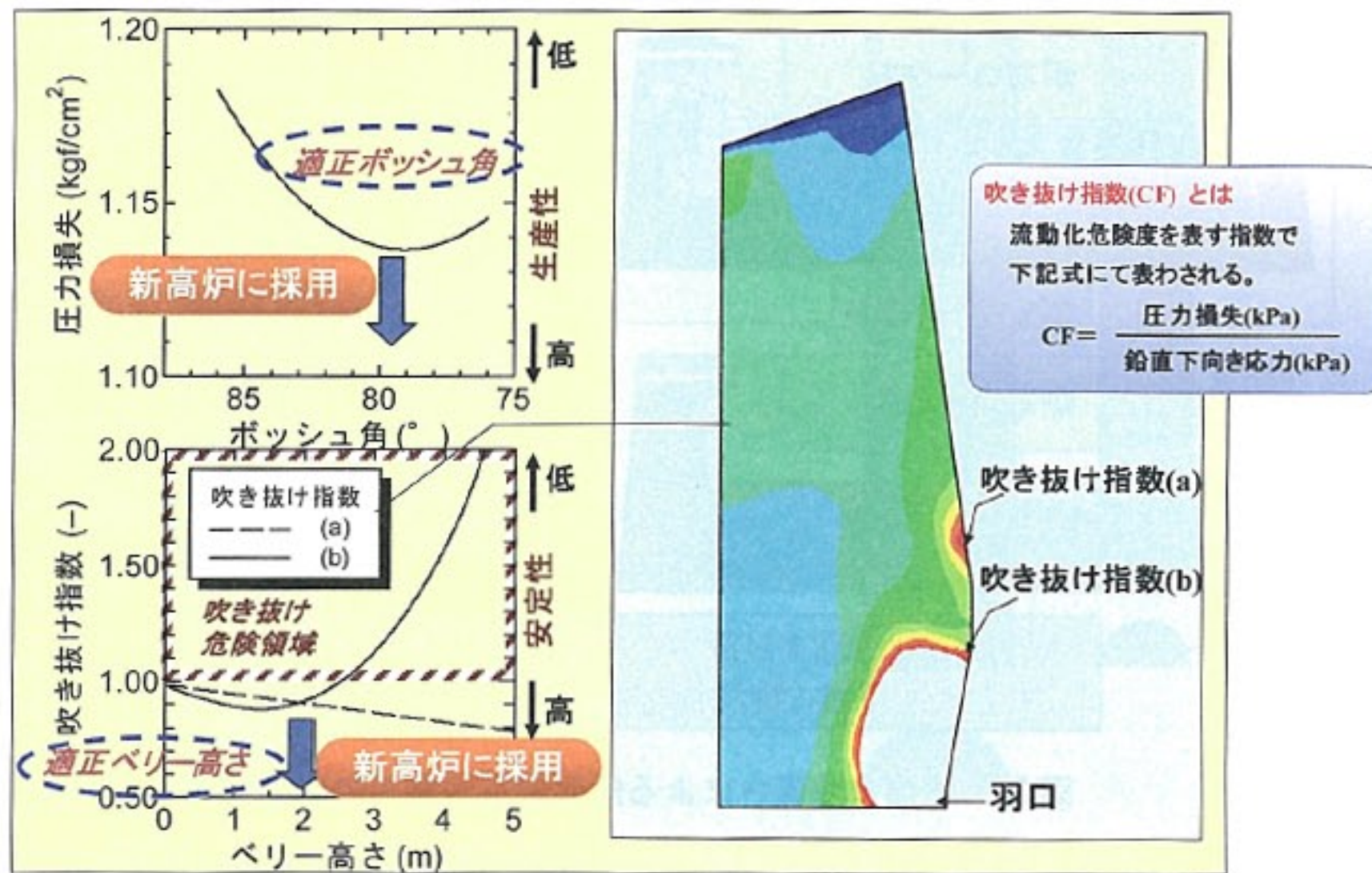


図 27 炉体形状の圧力損失および吹き抜け指数に及ぼす影響

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業において取り替え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、図 28 に示すように、高炉 3 次元非定常モデルにより滴下溶銑量分布と滴下溶銑温度分布を求め、コークスフリー層形状については充填層内応力場推定モデルにより決定した上で、炉底溶銑流れ・煉瓦浸食推定モデルにより炉底部の熱負荷分布、熱平衡から推定される炉底煉瓦浸食ライン推定を行い評価している。

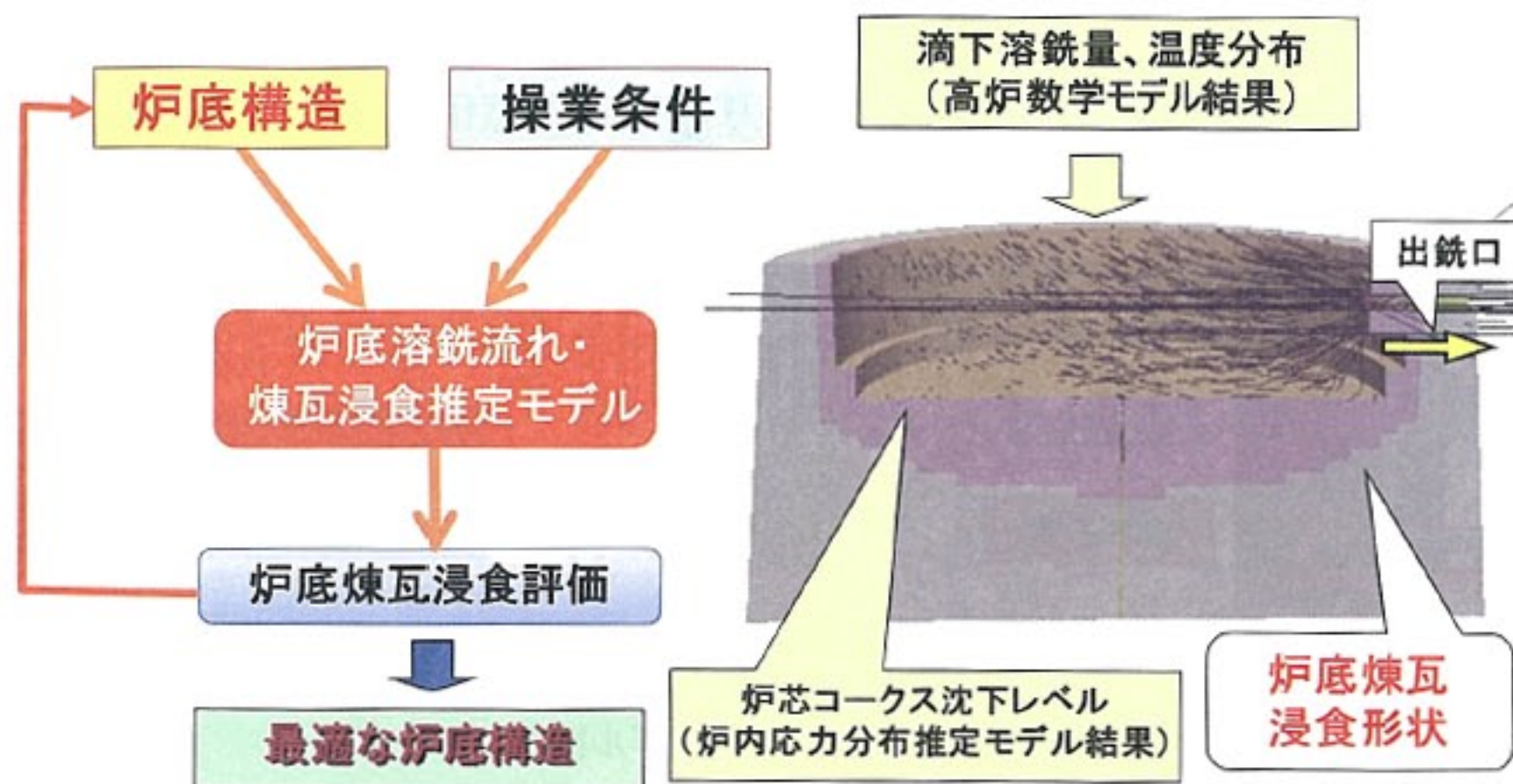


図 28 高炉炉底煉瓦構造設計のための検討フロー

図 29 に、湯溜まり深さによる炉底煉瓦浸食への影響を示す。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、2002 年以降火入れされた高炉の湯溜まりはいずれも従来高炉に対して深くなるよう設計を行っている。

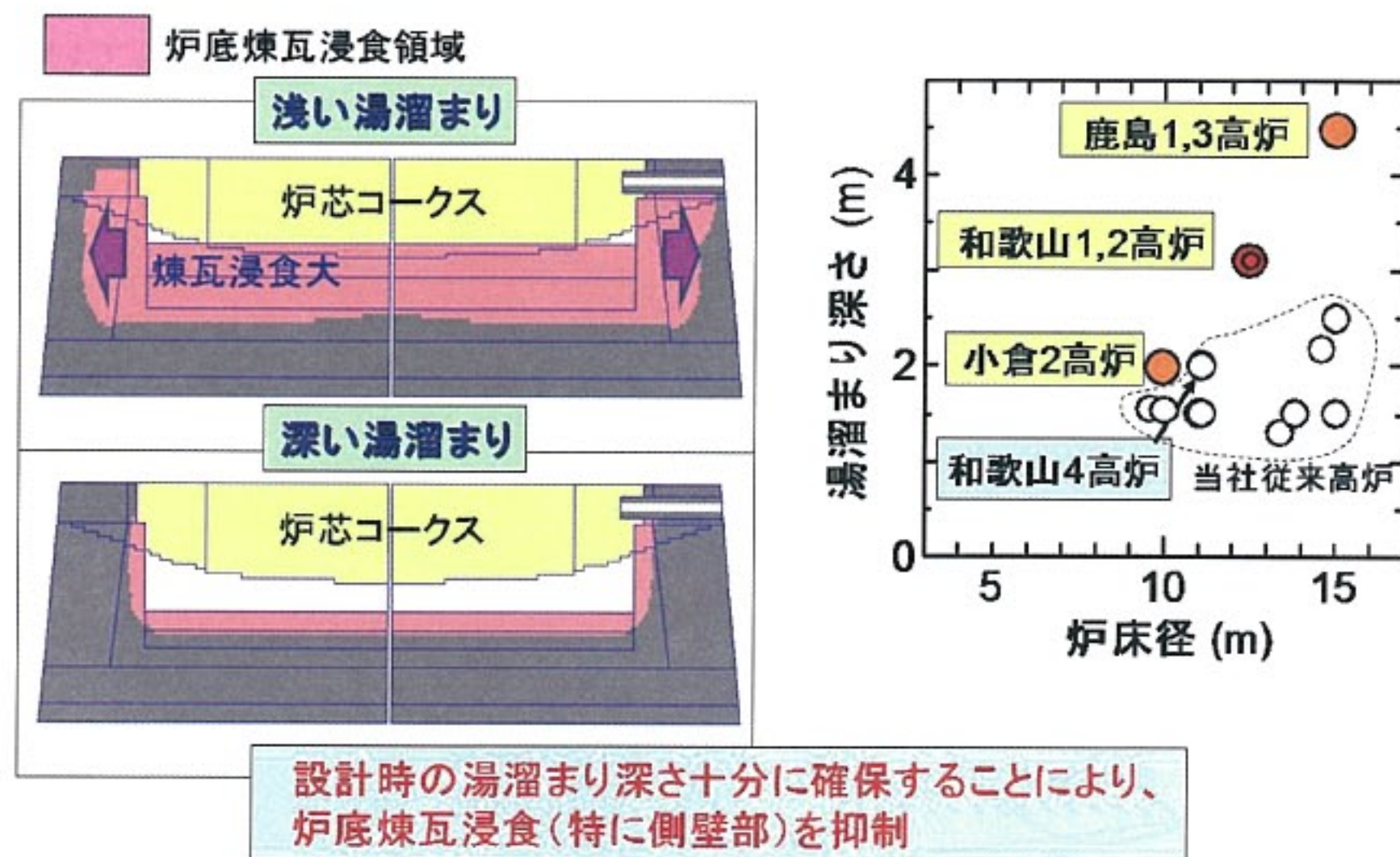


図 29 湯溜まり深さによる炉底煉瓦浸食への影響

3) 熱風炉設計

新炉の熱風炉蓄熱室検討に当たっては、図 30 に示す熱風炉 3 次元モデルを用いて、燃焼時や送風時の温度分布を求め、設備能力の確認および配材の設計を行っている。図 31 には、燃焼時および送風時の温度分布計算結果例を示す。

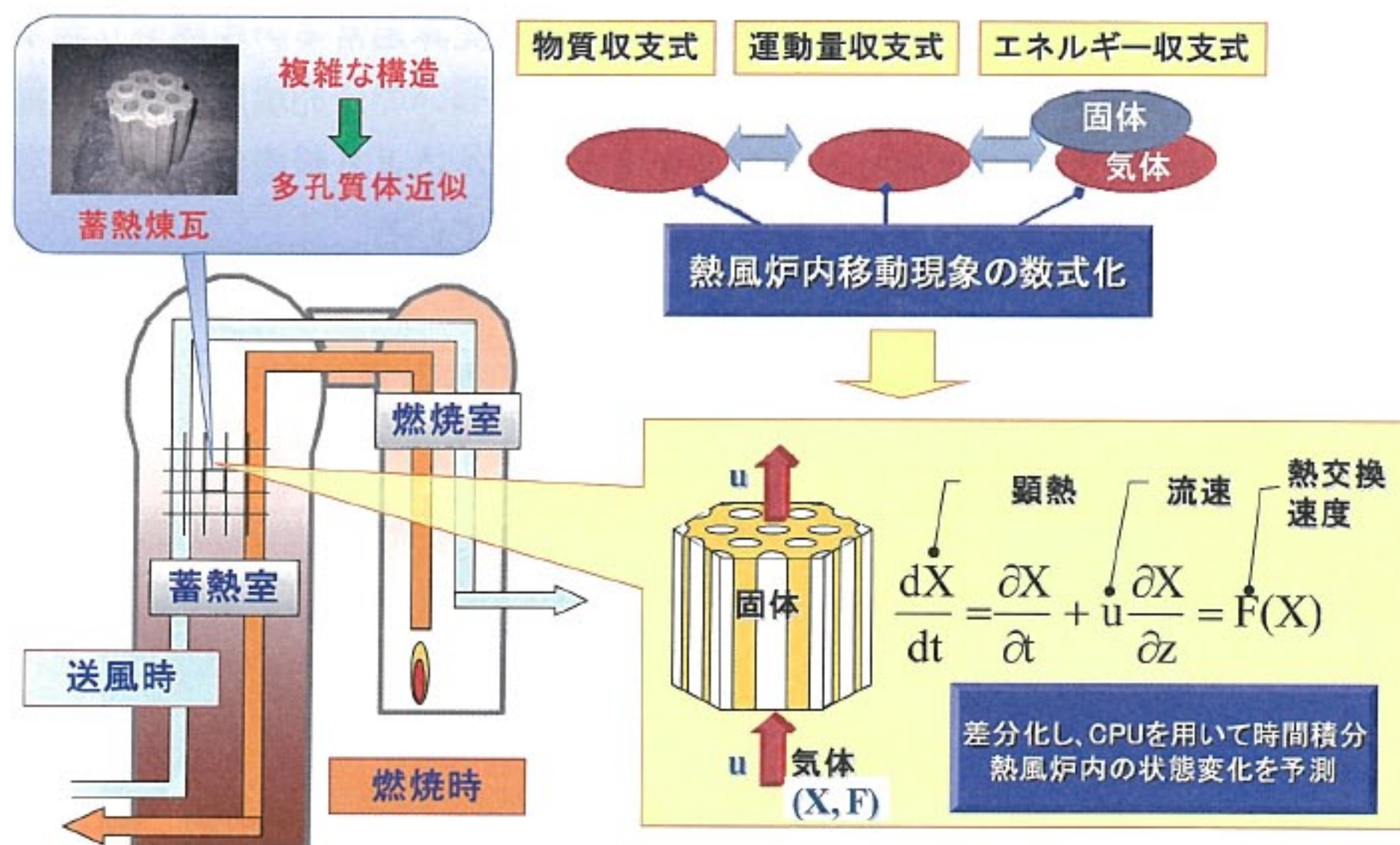


図 30 熱風炉 3 次元モデル概要

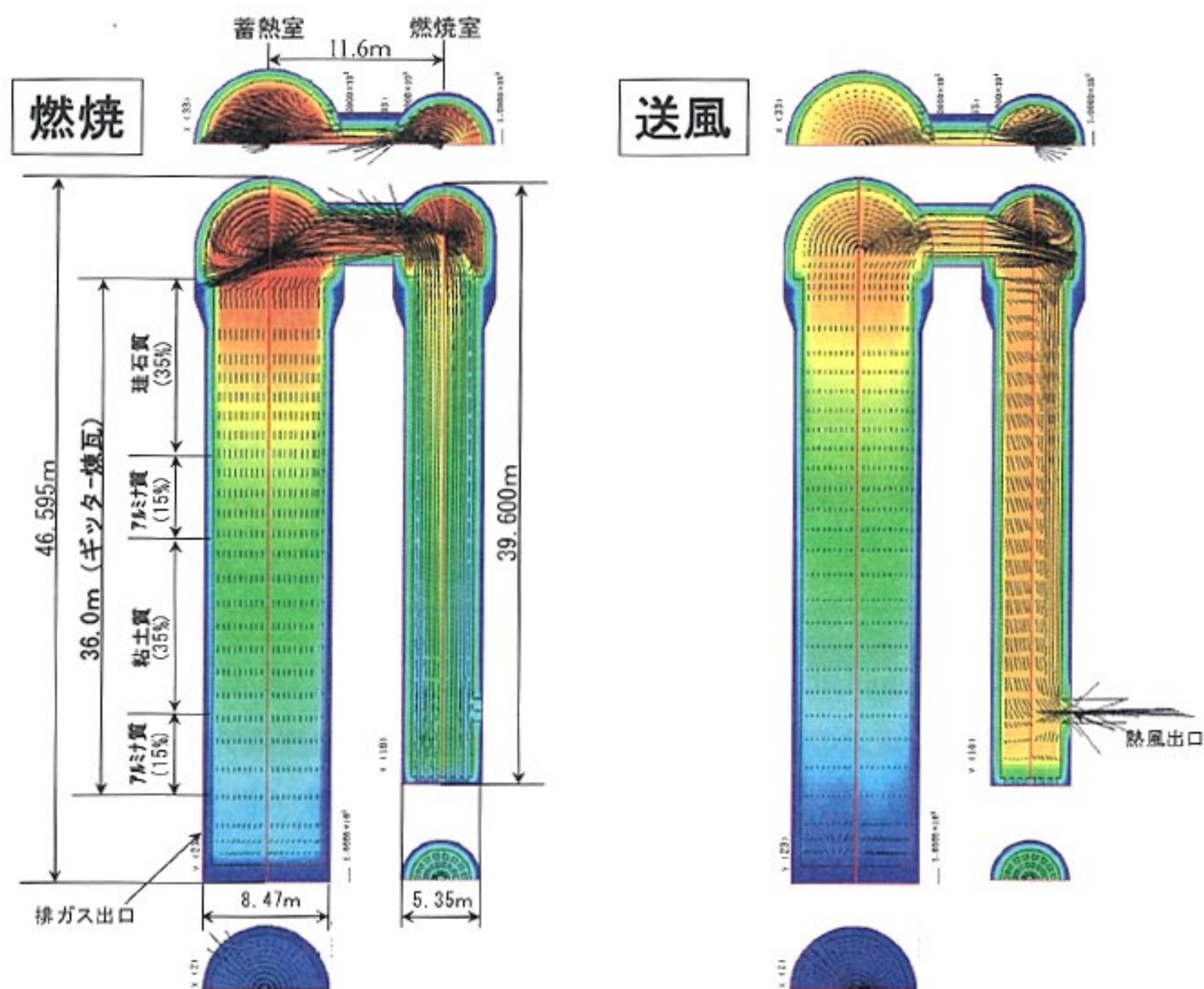


図 31 熱風炉 3 次元モデルによる流動および温度分布計算結果

4. 研究開発の成果

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 号高炉を、操業度を保ちながら 27 年以上稼働し、10,001 日で吹き止め、稼働日数としては世界新記録を達成した。

和歌山 4 号高炉稼働当時は、高炉の寿命は 5～10 年程度であり、改修のたび多額の改修費用を経営環境に拘わらず支出せざるを得なかった。また高炉の生産能力の大幅な変更は改修のタイミングでしかできないため、経営判断の大きな足枷となっていた。今回の研究開発により、高炉改修時期の選択が可能となり、経営への大きな自由度を与えることができた。

また、和歌山 4 号高炉長寿命化で培われた各要素技術は、鉄鋼他社にも技術供与・支援を行ない、他社高炉の稼働年数延長にも大きく寄与しているとともに、和歌山 5 号高炉延命（現在 22 年稼働中、国内稼働高炉では稼働年数 1 位）はもとより、当社の新設高炉（鹿島 1 号高炉、和歌山 1, 2 号高炉）への適用が可能であり、鹿島 1, 3 号高炉 和歌山 1, 2 号高炉の設計に活用されている（図 32）。

特に高炉シミュレーション技術に関しては、今回の研究開発の中で様々な高炉操業ニーズに応えるべく多様な機能を備えた高炉数学モデルが誕生、更に実操業と向き合うことでその精度を高めるとともに進化を遂げ、国内においてもトップレベルの技術を有するまでに至った。