

Short Relief Operation of Blast Furnace



山本 哲也
Testuya Yamamoto
水島製鉄所 製鉄部製
鉄課 主任部員(掛長)



木口 満
Mitsuru Kiguchi
C.S.T. 主査(課長)



山口 安幸
Yasuyuki Yamaguchi
鉄鋼技術部 高炉改修
計画室 主査(課長補)

要旨

水島製鉄所第1高炉は、1990年1月11日から7月17日の3次操業と、同年11月30日から1991年2月28日の4次操業の2回の短期稼働を行った。3次は、第3高炉改修時の鉄源不足を補う目的で稼働し、1週間で出鉄比 $2.3 \text{ t/d} \cdot \text{m}^3$ の急速立ち上げ技術を確立した。4次は将来の数次にわたるショートリリーフ稼働を想定し、炉底に残鉄を有し、シャフト耐火物補修を最小限とした状態からの急速立ち上げを試み、3箇月間の安定操業を達成した。川崎製鉄では、水島1高炉の3次・4次の改修火入れを通じて、将来の高炉のショートリリーフ稼働のために開発が必要な、急速立ち上げ技術、シャフト no lining からの立ち上げ技術、炉底残鉄有りの状態からの立ち上げ技術および迅速吹き出し技術を確立した。

Synopsis:

The 3rd and 4th short-period campaigns were successfully performed at Mizushima No.1 blast furnace. The 3rd campaign was executed during the period from Jan. 11th to July 17th, 1990 with the purpose of supplementing hot metal during the revamping of Mizushima No.3 blast furnace, and the techniques of rapid blow-in operation was established. The 4th campaign was executed during the period from Nov. 30th, 1990 to Feb. 28th, 1991, and the authors established the techniques of rapid blow-in operation with a pig iron residual in the hearth and without sufficient repairs of the stack refractories. It can be said that the techniques of short-period operation have been mastered by Kawasaki Steel by these 3rd and 4th campaigns at Mizushima No.1 blast furnace.

1 緒 言

1988年以降の内需振興による鉄鋼需要の増大に伴い、一転して高炉は高出鉄比を要求されるようになった。しかし、水島製鉄所の第3高炉は、1988年6月で炉命10年を超え、炉体鉄皮の亀裂補修のための臨時休風頻度が増加し、高出鉄比の維持が困難となった。このため、高生産が要求される時期での3高炉の改修にあたって、鉄源不足を補うため第1高炉の3次稼働を実施した。またその後、将来の数次にわたる1高炉のショートリリーフ稼働を想定すると、炉底残鉄を有し、かつシャフト耐火物補修を最小限とした状態での立ち上げが課題として残されており、その技術を確立する目的で、1990年11月30日～1991年2月28日の3箇月間、4次操業を実施した。

本報告では、3次と4次の2度にわたる水島1高炉のショートリリーフ稼働によって得られた技術的知見について述べる。

2 ショートリリーフ稼働の背景と技術課題

2.1 ショートリリーフ稼働の背景

(1) 3次改修・稼働 (1990年1/11～7/17)

水島3高炉(3次)改修を1990年3～6月に予定し、その間の鉄源不足対策として水島1高炉のショートリリーフ稼働を計画した¹⁾。将来、千葉も加えた高炉改修時の鉄源不足対策として、水島1高炉の稼働を想定しており、ショートリリーフ高炉としては、急速立ち上げが不可欠であった。

(2) 4次改修・稼働 (1990年11/30～1991年2/28)

将来の数次にわたるショートリリーフ稼働を想定すると、シャフト no lining、炉底残鉄有りの状態からの立ち上げが必要である。そこでこの技術を確立する目的で、3箇月間のショートリリーフ稼働テストを実施した²⁾。

2.2 ショートリリーフ稼働に要求される技術課題

ショートリリーフ稼働のために、水島1高炉(3次・4次)の改修と操業で開発の必要な技術課題は、下記のようにまとめられる。

(1) 短期レーティングアップ(3次・4次)

従来、高炉火入れレーティングアップは炉内耐火物の損傷防止および炉内ガス流分布の適正化を図るため、1～2箇月を要していた。今回は、1週間で出鉄比 $2.1 \text{ t/d} \cdot \text{m}^3$ の立ち上げが要求された。

(2) シャフト no lining 立ち上げ(4次)

通常の改修では、炉体保護の観点から、炉底～炉口までのレンガ積を行っていた。しかし、4次では炉内耐火物無補修が要求された。このため、鑄込管露出部のみキャストブル吹付補修を行い、ステープ熱負荷を監視しながら火入れ立ち上げを行う

* 平成5年7月19日原稿受付

必要があった。

(3) 炉底残鉄有りでの立ち上げ(4次)

高炉吹き卸し後、低コストで改修・火入れを実施するためには、炉底残鉄有りの状態からの立ち上げが必要である。そこで残鉄溶解の熱補償と残鉄熱膨張による炉底鉄皮応力の解析を実施し、炉底残鉄有りでの立ち上げ技術を確立した。

(4) 炉内残鉄物の迅速掻き出し(4次)

従来の改修では、発破により炉内残留物を解体しているが、炉底カーボンレンガの目地ずれが生じる恐れがあった。このため、4次では羽口鉄皮を開口し、重機を炉内に導入する迅速掻き出し法の開発が必要であった。

3 水島1高炉(3次)改修と操業

3.1 改修工事

3.1.1 改修方針

水島1高炉の改修は、水島3高炉改修期間中の短期(6箇月)稼働を前提とし、改修工事内容は必要最小限にとどめることとした。

3.1.2 改修工事内容

(1) 炉体

鉄皮は全面再使用とし、ステープも羽口レベル以上は、1系統ずつの洗浄、リークテスト、冷却水流量確認の実施後、再使用とした。炉底側壁部は、冷却能力を上げるため、ステープを撤去し散水冷却を採用した。

(2) 炉体レンガ積み

炉底カーボンレンガ2段を再使用した。このため炉内解体工事中は、炉内での散水を禁止し、炉底カーボンレンガ上での重機使用等を制限した。シャフト部では、ステープ前にはレンガ積みを行わず、ステープ表面にキャストブルを施工厚70mmで吹き付け施工した。

(3) 鑄床

従来の鑄構造は、非貯鉄式であったが、鑄材の寿命延長を目的に貯鉄式に変更した。鑄床脱珪設備は、稼働期間が短いため設置しなかった。また、スラグ全量ドライピット処理とした。

(4) 熱風炉

1, 2, 4号の3基操業とした。調査のためレンガを解体した3号熱風炉は復旧せず本管との縁切り工事のみとした。

3.2 高炉操業

1高炉の稼働目的が、他高炉改修中の鉄源確保であるため、今回の立ち上げ操業においては、急速立ち上げを最大の課題とした。

3.2.1 急速立ち上げ

(1) 増風・荷増しパターン

非定常Si予測モデルおよび炉床での非定常1次元伝熱モデルを用いて、出鉄温度、鉄中[Si]の推移を予測した。計算は従来の増風・荷増しパターン(Base)と、火入れ初期に低ore/cokeで増風を優先するパターン(Case 1)について比較した。計算結果をFig. 1に示す。水島1高炉に採用したCase 1の場合は従来のパターンに比較し、鉄中[Si]は4日目までは高いが、火入れ4日目から出鉄量が増加し、その後急速に低下する³⁾。

(2) 装入物分布と融着帯形状の制御

炉頂での装入物の堆積形状は装入物分布モデルを用いて検討した。またFig. 2は、高出鉄比時のMA(movable armor)

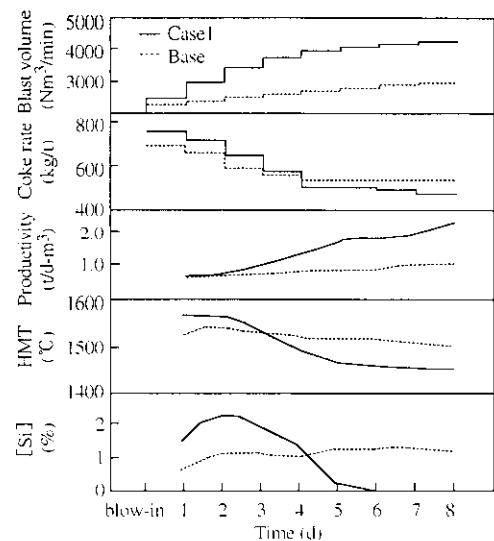


Fig. 1 Simulation of a rating-up operation

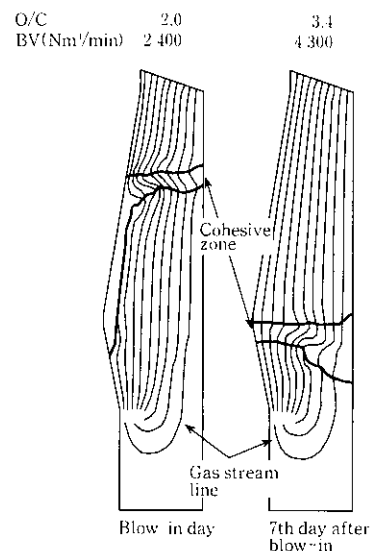


Fig. 2 Change of cohesive zone

アクションを考慮した高炉数式モデルで火入れ時の融着帯形状を予測したものであるが、火入れ初期は送風量が少なく、炉壁からの抜熱量が大きいため、炉壁側の融着帯が肥大化し、荷下がりにも悪影響を及ぼす可能性がある。しかし、送風量の増加に伴いヒートロス原単位が低減することで、炉壁側の融着帯下端位置の上昇、融着帯厚みの縮小が達成でき、この現象は解消される。このため、荷増しより増風を優先させることが荷下がり安定の面でも良いと考えた。

3.2.2 火入れ立ち上げ操業

火入れ立ち上げ操業では前述の検討に基づき、荷増しより増風を優先させ、7日後に出鉄比2.3 t/d・m³を達成した。ガス分布に対しては、火入れ当初よりMAによる分布調整を行い、低ore/cokeおよび高風量時の過中心流を防止し、順調に増風・増荷を行った。また出鉄[Si]は6日目に0.5%まで低下させることができた(Fig. 3)。

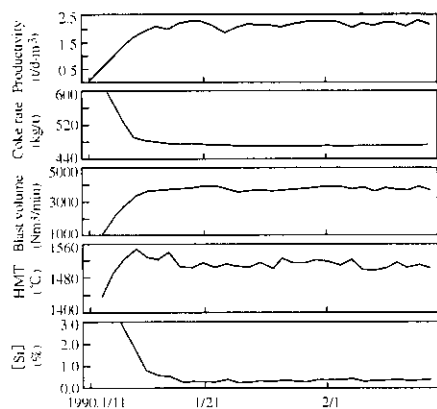


Fig. 3 Rating-up operation (3rd campaign)

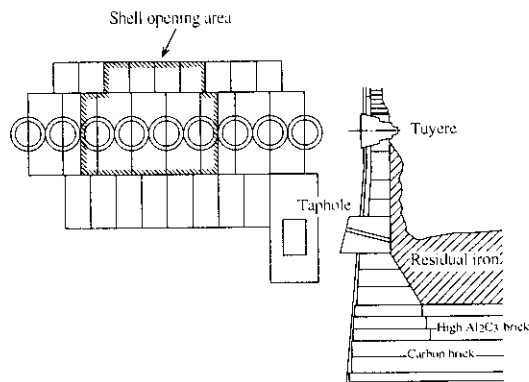


Fig. 4 Shell opening area

4 水島1高炉の4次改修と操業

4.1 改修工程

水島1高炉は、第3次の操業を1990年7月17日に空炉状態で吹き出し、135日間の自然放冷の後、同年11月30日に第4次の火入れを実施した。

4.1.1 改修工事方針

3次吹き出しでは、サラマングー出鉄は行っておらず、炉底には鉄鉄が残留し、出鉄孔と羽口の間には、コークス（＋スラグ）が残った状態である。今回の改修工事では、炉底の鉄鉄は残したままで、羽口から出鉄孔レベルの間のコークス（＋スラグ）を掻き出し、新たに枕木積み、填充を行い、火入れ立ち上げを実施することにした。改修工程は、珪石レンガ保護のためレンガ昇温速度条件から熱風炉乾燥50日間が律速となり、この間で掻き出し工事を実施した。

4.1.2 炉内冷却（炉内作業環境改善）

炉内ではコークスが燃焼を続け、またCOガスも発生していたため散水によりコークスの消火、冷却を実施し、炉内作業環境の改善を図った。

ただし、炉底カーボンレンガに水が達すると、水性ガス化反応によりカーボンレンガが損傷する可能性があるため、炉内残留物表層温度を150～300℃に管理しつつ断続的に散水を実施した。

4.1.3 炉内残留物掻き出し

炉底に残留した約400 m³のコークス、スラグの掻き出しには重機を導入した。Fig. 4に示すように羽口鉄皮を切欠き、バックホーを炉内に入れ残留物を掻き出した。この間の作業の安全性を確保するため、羽口開孔部より安全ネットを取り込み、アーマー取替え口より吊り下げた。

4.2 炉内状況

Fig. 5に示すように、3次では炉底、羽口、ボッシュ、炉口部のレンガを積み替え、シャフト部にはキャストブルを施工したが、4次ではボッシュ部のステープ配管露出部に、一部キャストブル吹付施工を行った以外は、炉内耐火物の補修は行わなかった。

シャフト部はステープ本体が露出し、炉底には鉄鉄（約1200 t）が残留した状態で火入れを行った。

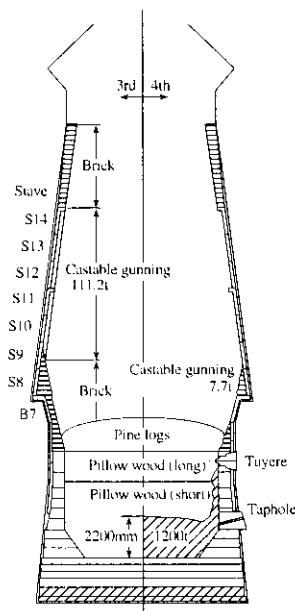


Fig. 5 Inside of Mizushima No.1 BF (3rd and 4th campaign)

4.3 火入れ準備

4.3.1 事前検討内容

4次改修の特徴は、「シャフト no lining」, 「ハース鉄鉄および羽口下約1 mのスラグを残した状態」からの立ち上げであり、火入れを順調に行うポイントとして、

- ①ハース残鉄滓の溶解に要する熱量補償
- ②ハース残鉄滓溶解時の炉底レンガ・鉄皮への応力
- ③炉壁への熱負荷

を充分考慮する必要がある。そこで、これらについて以下の検討を実施した。

(1) 炉内残鉄の溶解挙動

上記①, ②を満足するためには、炉内残鉄の溶解挙動を予測する必要がある。そこで残留層の上へ適下・滞留した溶鉄が熱源となると仮定してモデル化し、炉底の温度分布を1次元非定常で伝熱計算した (Fig. 6)。この結果、約1箇月で炉底温度は3次操業レベルとなり、炉内残鉄は溶解すると考えられる。

(2) 炉内耐火物無補修でのステープ熱負荷

(a) ステープへの熱負荷の検討

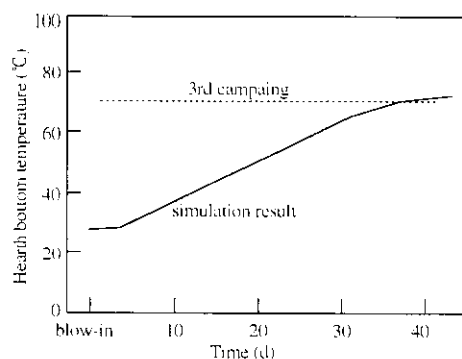


Fig. 6 Simulation result of hearth bottom temperature

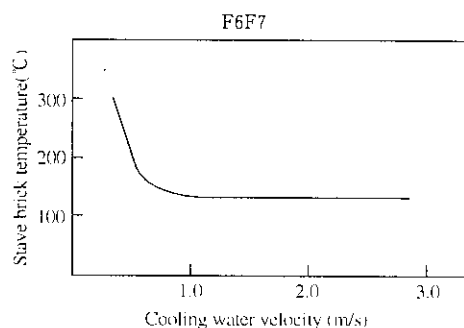


Fig. 7 Relation between stove brick temperature and cooling water velocity

ステープ熱負荷を炉内ガス温度 1200°C と仮定してシミュレート計算を行った。その結果、本体が健全な場合の熱流束は $1.782 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ で、これに対し鑄込管露出の場合は $1.327 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ であった。これは、鑄物本体が健全な時には冷却配管周囲の鑄物からの伝熱が集積され、冷却配管が露出した状態に比べて、冷却配管への熱負荷が増加するためと考えられる。したがって、冷却配管露出時に溶損しないと結論した。

(b) ステープ管内流速の検討 (炉内ガス温度 1200°C)

Fig. 7 に示すように管内流速が 1 m/s 以上であれば、冷却能力は確保される。

4.3.2 枕木積み、鉍石填充

枕木積みは、3 次火入れ同様バラ積みを採用した。鉍石填充は、炉底の残鉄の急激な溶解に対する炉床の熱補償を考慮して、トップチャージの ore/coke を 1.3 とし、また平均 ore/coke は 0.23 とした。枕木積み 2 日、鉍石填充 2 日で計画どおり作業を完了した。

4.4 火入れ立ち上げ操業

1990 年 11 月 30 日、午前 9 時 55 分に火入れを行った。1 高炉 3

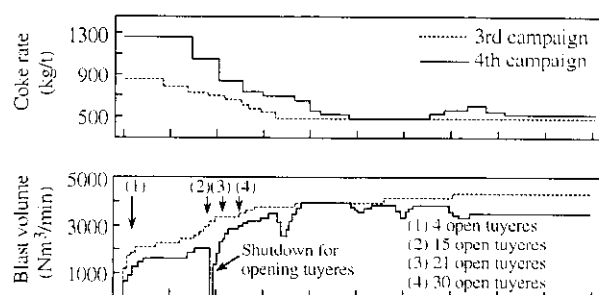


Fig. 8 Rapid rating-up operation

次の急速立ち上げ実績をベースとして、荷増しより増風を優先した立ち上げ計画を立てた。さらに、羽口と出鉄孔との連絡を確実にするため、また炉底残鉄の急激な膨張を防ぐため、出鉄孔上部の羽口から徐々に開孔を実施した。

3 次の火入れに比べ、火入れ後 30 時間は荷下がり不良、風圧変動のため、増風ピッチを遅らせたが、その後は順調に立ち上がり、火入れ後 6 日間で計画どおり出鉄比 $1.83 \text{ t/d} \cdot \text{m}^3$ 、コース比 510 kg/t に達した。Fig. 8 に火入れレーティングアップの操業状況を示す。

4.5 ショートリリーフのための技術課題

火入れ後 6 日目に $1.83 \text{ t/d} \cdot \text{m}^3$ に達した後、生産量の調整で出鉄量を低下したが、大きな設備トラブルはなく、順調な操業を継続した。前述した技術課題の実績について述べる。

(1) 炉底残鉄の溶解

炉底温度の動きはほぼ計画どおりであり、残鉄はシミュレーションに近い挙動で溶解したと考えられる (Fig. 9)。

(2) 炉底レンガの熱膨張

炉底鉄皮への応力は、最高 1200 kg/cm^2 まで上がったが、それ以降は低下傾向となった。Fig. 10 中に示した第 4 高炉 (2

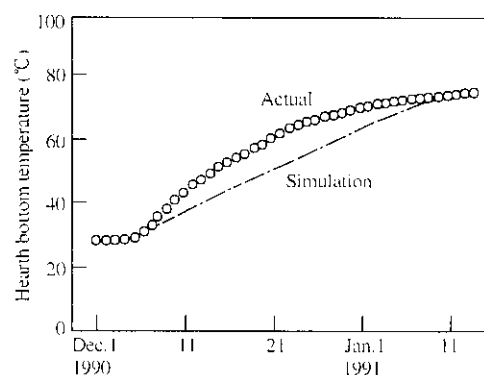
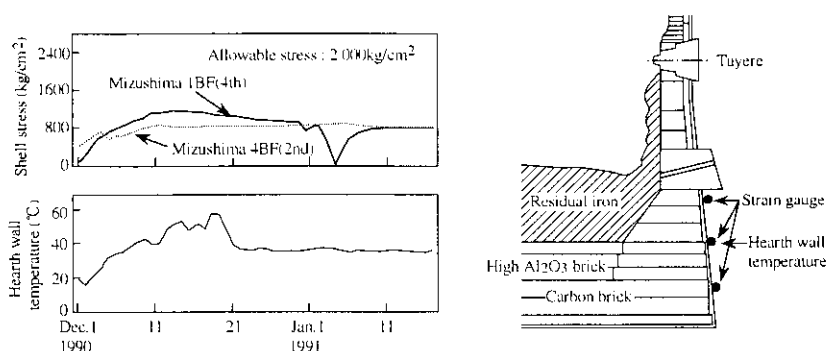


Fig. 9 Transition of hearth bottom temperature

Fig. 10 Transition of hearth shell stress and hearth wall brick temperature



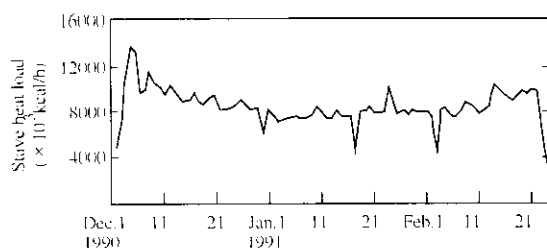


Fig. 11 Transition of stove heat load (Dec. '90~Feb. '91)

次) 火入れ時の応力値との比較から、1高炉(4次)における応力は炉底カーボンレンガの熱膨張応力と考えられ、残鉄の応力は、直接にはかからなかったと推定される。

(3) ステープ熱負荷

ステープの熱負荷は、Fig. 11に示すように火入れ当初1400万kcal/hまで上昇したが、ムーバブルアーマーによる装入物分布制御により、その後は800万kcal/hレベルにコントロールでき、操業上の問題点はなかった。

しかし、ステープは2系統破損した(3次では6系統破損、全系統2546本)。いずれも、鉋込み管露出部であり、摩耗による破損と推定される。

4.6 迅速吹き出し操業

次回立ち上げに備え、炉床残留コークスの粒径確保を目的に、迅速吹き出しを実施した(Fig. 12)。従来の吹き出しでは、吹抜けを恐れ、減尺レベルに応じて送風量を低下させていたが、吹き出し時間を短縮するために、3高炉(2次)および1高炉(3次)の吹き出し操業解析より得た「吹き出しガス指数」を用いた。この結果3次では13時間13分、4次では10時間55分と時間短縮を達成できた。

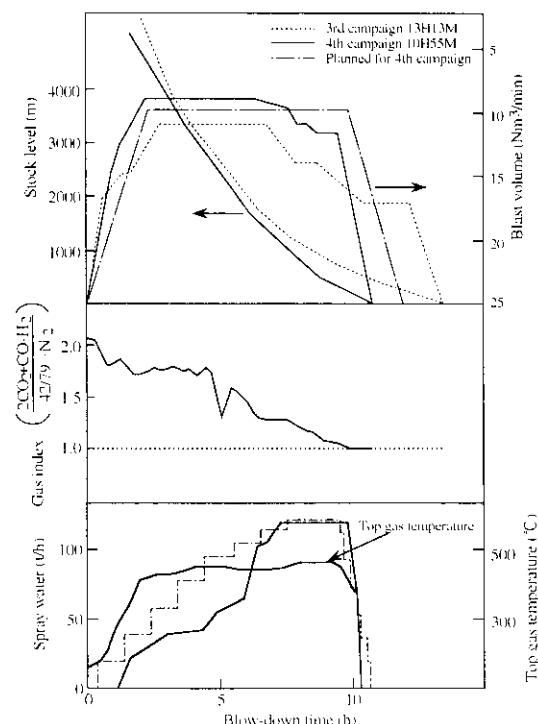


Fig. 12 Rapid blow-down operation

$$\text{吹き出しガス指数} = (2\text{CO}_2 + \text{CO} - \text{H}_2) / (42 \cdot \text{N}_2 / 79)$$

… 1以下で未反応O₂が発生する限界

4.7 設備保管

水島1高炉は1991年2月28日に吹き止め後、以下の要領で保管運転を行っている。

- (1) 炉内内容物は、炉体にN₂封入しコークスの燃焼を抑制。
- (2) ガス清浄系は、N₂封入し内部腐食を防止。
- (3) 重要水配管(ステープ、炉底冷却、熱風弁冷却等)は、水抜き後N₂封入。
- (4) 機器は、保管運転を実施。したがって保管運転に不用な用役(O₂)は安全のため元弁にて遮断。
- (5) 電源は、保管運転のため全て使用可能状態。
- (6) 炉体等は、雨水侵入防止のシール実施。
- (7) ホッパー類は、全て空槽化。

5 結言

水島製鉄所の第1高炉は、1990年1月11日から7月17日の3次操業と、同年11月30日から1991年2月28日の4次操業の2回のショートリリーフ稼働を行った。この結果は以下のとおりである。

- (1) 非定常Si予測モデルおよび炉床での非定常1次元伝熱モデル結果より、従来の増風・荷増しパターンに対し、火入れ初期に低ore/cokeで増風を優先するパターンを採用し、火入れ6日目で鉄中[Si]を0.5%まで低下させることに成功した。
- (2) また高炉数式モデル計算結果から、低ore/cokeで増風を優先するパターンは、火入れ初期における融着帯根部の肥大化抑制に有効であり、これを採用することで火入れ1週間で出鉄比2.3 t/d・m³の急速立ち上げに成功した。
- (3) 炉内耐火物無補修での火入れに関しては、鉋込管露出の場合、冷却配管周囲の鋳物からの伝熱の集積緩和により熱負荷が低減することを、事前にシミュレート計算により確かめ、問題なく操業を実施した。
- (4) また、1次元非定常伝熱モデルによる炉内残鉄の溶解挙動予測結果に基づき、燃料比の低下及び羽口開孔を行い、炉底残鉄溶解時の熱膨張、残鉄の熱膨張による炉底鉄皮への応力ともに問題なく操業を実施した。
- (5) 吹き出しに関しては、3高炉(2次)の操業解析より得た「吹き出しガス指数」を用いることで、限界まで送風流量を確保することを実施し、3次では13時間13分、4次では10時間55分と時間短縮を達成できた。

川崎製鉄では、水島1高炉の3次・4次の改修・火入れ立ち上げを通して、将来の高炉のショートリリーフ稼働についての技術的知見を得ることができた。

参考文献

- 1) 木口 満, 大神正通, 澤 義孝, 加藤龍彦: 第76回製鉄部会資料, 鉄76-20-報
- 2) 木口 満, 大神正通, 澤 義孝, 武田幹治, 菅原英世: 材料とプロセス, 3(1990)4, 1020
- 3) 澤 義孝, 武田幹治, 山口整司, 木口 満, 大神正通, 菅原英世: 材料とプロセス, 3(1990)4, 1021