



## 高炉の寿命について

加 瀬 正 司\*

### Technical Progress in Long Life of Blast Furnace Campaign

Masashi KASE

#### 1. はじめに

鉄鋼業は昭和 30 年代以後、日本経済の高度成長の中心的役割を果たしつつ成長してきた。

その中でも、製鉄とりわけ高炉技術の進歩は、規模の拡大・製造コストの低減などの面で著しいものがあった。

しかしながら高炉の寿命（稼動年数）の点では、高度成長期においてあまり注目されなかつた。

これは、高度成長期では生産量の確保と拡大が最優先され、少しでも生産能力が落ちると予想されるものについては、計画的に炉容拡大・改修することを行つた結果、高炉の設備寿命を全うできなかつたのが理由である。

最近では、エネルギーコストなどの高騰かつ炉寿命をのばすことにメリットがあることから、積極的に炉寿命の延長に取り組んできている。この解説では、高炉の寿命延長についてその考え方と寄与した技術を含めて述べてみたい。

#### 2. 高炉の寿命とは

高炉設備は、超高温・高圧反応装置であり、かつ炉内で起こる反応の複雑さから、いつたん火を入ると長時間休止することは通常しない<sup>†</sup>。これは、①耐火用または断熱用のレンガの目地の開きやき裂・崩壊が発生し再使用不可能となる。②長時間の休止は生成した溶鉄や溶滓が炉内で固化し、このため炉内固化物の溶解除去に困難をきたしその際に炉内レンガの損傷などの設備事故が発生しやすく、その後の連続的な安定生産がのぞめない。などの理由から高炉は火入れから吹き卸しまで高温状態を維持する必要がある。このような連続操業の高炉を吹き止めるのは、次のような事態になつたときで

ある。

(1) 設備が稼動不能またはメンテナンス不能になる場合

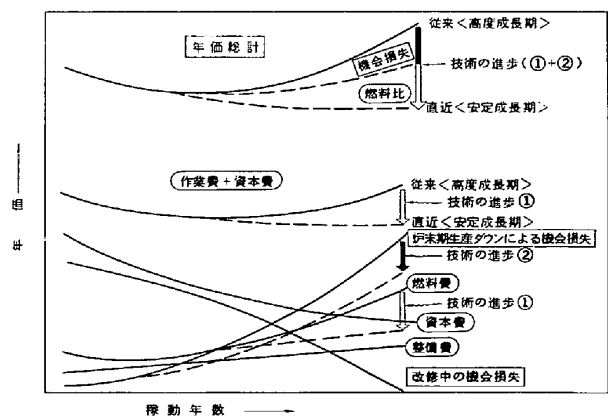
(2) 生産が極端な燃料比の増加とかメンテナンス費用の増大（メンテナンス中の生産機会損失も含む）などで経済的に成り立ちにくくなる場合

(3) 環境上・安全基準を遵守できなくなる場合

(4) 上記(1)(2)(3)を予想し生産量の要請に応え、更に新しい技術の取り入れによりコストの低い溶鉄をつくるために計画的に改修する場合

である。

図 1 に一般的な稼動年数と年価<sup>†2</sup>の関係を示す。通常の設定においては、設備の新設稼動後は、整備費用も低く、設備の能力も良い。その後、設備の劣化が始まるにつれ整備費が増大すると同時に能力が落ちる。



従来は長期稼動すると、燃料比の上昇及び炉末期での生産ダウンがあり、年価に極小値が存在した。

最近では操業技術等の進歩により年価の上昇幅が小さくなつた。それ故長期稼動した方が有利となる。

図 1 稼動年後と年価

<sup>†</sup> 需要が少なく、かつ生産設備過剰のときは、バンキングを行うことはあるがその例はほとんどない

<sup>†2</sup> 吹き卸し時の一炉代の総平均溶鉄コストを吹き卸し（稼動年数）の年価(円/T)と定義する。

昭和 56 年 10 月 14 日受付 (Received Oct. 14, 1981) (依頼解説)

\* 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 46-59 Oaza-Nakabaru Tobata-ku Kitakyushu 804)

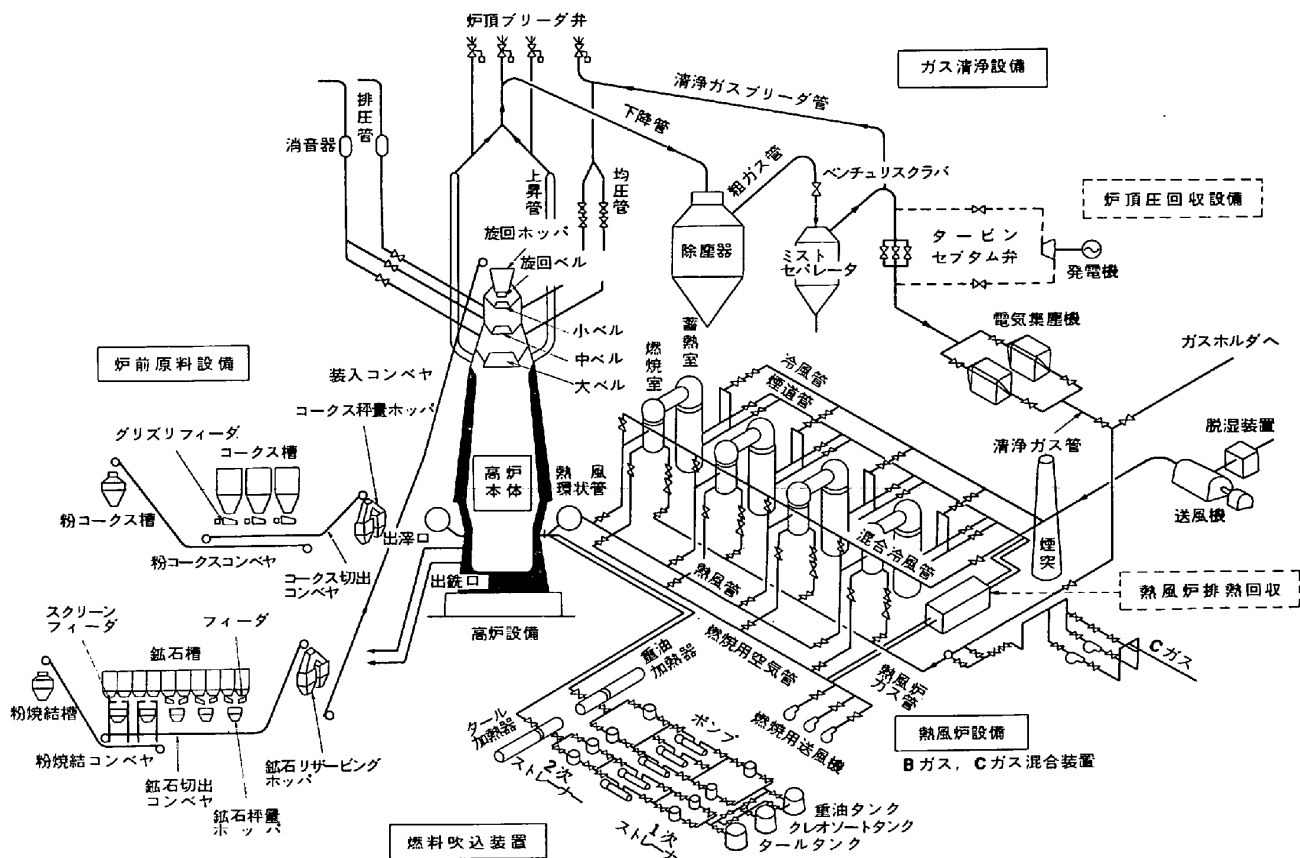


図2 高炉設備の構成

高炉の場合、炉内が耐火物でライニングされているので、稼働年数が多くなり、この耐火物が摩耗してくると、炉内面のプロフィールが変わるため高炉の能率（生産性や燃料比）に大きな影響を与え、結果として溶銹コストが高くなる。

昭和47年までの高度成長期では技術の進歩が著しく、特に①設備の大型化・省力化、②燃料比の低下技術、などの採用によつて出銹量増大の社会的期待に応えながら溶銹コストが増大する前に計画的に改修を進めることが多少多くの改修費をかけても溶銹コストの低下や資本の早期回収の面でも有利であつた。しかし、エネルギーショック以後、高度成長期から一転して低成長期に移行するにつれて出銹量の増大が期待されず、改修を契機にした新技術の採用による燃料比の低下の可能性が少なくなつてきた。これに加えて、操業技術・設備技術（補修技術）の進歩によつて炉末期の燃料比の上昇が少なくなつてくるにつれ、新しく高炉を改修・新設した際の溶銹コストの低減代が少なく、従来の高炉を補修使用の方が望ましくなつて来た。このような事情になると高炉の寿命は補修が困難な設備によつて決定されることになる。

図2に概略高炉設備<sup>1)</sup>を示すが、高炉本体以外の設備については現状の補修技術により前述のような高炉寿命にはなりにくいので以下高炉本体について述べていく。

吹き止めた理由を高炉の寿命を決定する部位についてあてはめると、通常次のような場合になる。

- (1) 炉底破損、鉄皮座屈；補修が非常に困難で、中途半端な補修を行い、稼働を続けると大事故につながる。
- (2) シャフト鉄皮き裂；生産を続けていくための必要最小限の補修が、設備の破損に追いつかない。
- (3) 炉口部金物損傷；燃料比の増大により溶銹コストの増加につながる。
- (4) 炉体ガス洩れ；COなどの有毒ガスの漏洩が抑制できないと種々な作業に支障をきたす。

以後、これらの部位についてもう少し詳しく述べていきたい。

図3に高炉本体の損傷と炉内状態の例として解体高炉の例を示した<sup>2)3)</sup>。

高炉には通常130~160回/日の珪石・コークスが炉内に層状装入される。この装入は通常は珪石受金物に衝突させながら装入物分布を最適にもつていくようにする。最近では、新しい装入物分布装置（ムーバブル・アーマー、またはベル・レス装入装置）が各高炉に取り付けられ、これによつて装入物分布制御をするようになり、珪石受金物への衝突回数は減少しているがその役割は依然として重要である。

層状に装入された珪石・コークスは降下するにつれて

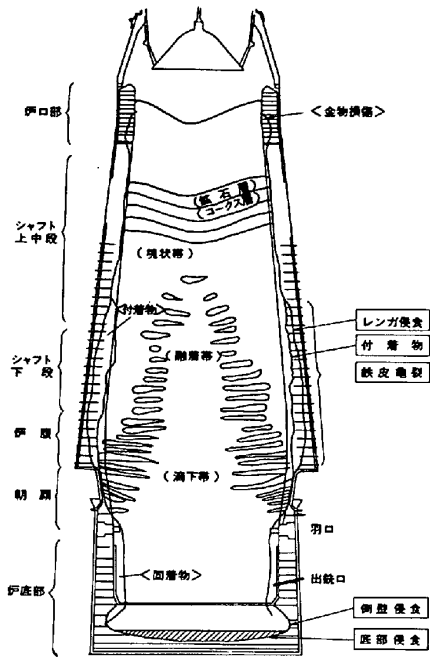


図 3 広畑 1 高炉解体図

加熱還元され、更に融着溶解する。装入物を加熱還元するガスは、羽口から供給された高温空気 (1100~1300°C) とコークスの燃焼により生じ、通常羽口先で 2300~2500°C、圧力は 2.5~4.5 kg/cm<sup>2</sup>G である。出鉄口

からは 1450~1550°C の溶鉄とスラグが排出される。このような操業条件下で高炉を長期間稼動すると、いろいろな所に設備的なトラブルが生じる。

炉内において最も高温にさらされている羽口部や炉底上部は、溶解したスラグに覆われるため比較的損傷が少なく、常に炉体が炉内容物にさらされる部分に問題が多い。

図 3 に見られるように炉体の損傷の特に著しい部分は ①炉口部金物、②シャフト下部~朝顔部、③炉底部 (側壁、炉底中心) が問題になる。

### 3. 炉体損傷と長寿命化技術

#### 3.1 長寿命化対策の経緯と考え方

設計企画時点の長寿命化対策の推移を表 1 に示す。

鉍石受金物については、この部位が損傷すると炉壁部にコークスと鉍石の混合層が形成され、ここに高温ガスが集中して流れることから他の設備トラブルに結びついたり、燃料比の上昇の原因となる。このため、使用条件における損傷原因を調査し、それぞれの原因に応じた対策を材料の開発と構造に加えてきた。図 4 に鉍石受金物の損傷原因と対応策を示す。

鉍石受金物の損傷の原因は、原料の衝突による摩耗と熱スポーリングである。炉口部が受ける負荷は金物の上

表 1 高炉長寿命化対策推移

|        |     | ~43       | 44                   | 45                   | 46                   | 47             | 48             | 49             | 50             | 51             | 52~            |
|--------|-----|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 鉍石受金物  | 材 質 | 耐熱鋼鉄      | 耐熱鋼鉄 (高耐摩耗性向上)       | 耐熱鋼鉄 (高耐摩耗性向上)       | 耐熱鋼鉄 (高耐摩耗性向上)       | 耐熱耐摩耗材         | 耐熱耐摩耗材         | 耐熱耐摩耗材         | 耐熱耐摩耗材         | 耐熱耐摩耗材         | 耐熱耐摩耗材         |
|        | 構 造 |           |                      |                      |                      |                |                |                |                |                |                |
| 鉄 皮    | 材 質 | 一般構造用圧延鋼材 | 一般構造用圧延鋼材 (耐熱耐摩耗性向上) | 一般構造用圧延鋼材 (耐熱耐摩耗性向上) | 一般構造用圧延鋼材 (耐熱耐摩耗性向上) | 溶接構造用圧延鋼材      | 溶接構造用圧延鋼材      | 溶接構造用圧延鋼材      | 溶接構造用圧延鋼材      | 溶接構造用圧延鋼材      | 溶接構造用圧延鋼材      |
|        | 構 造 |           |                      |                      |                      |                |                |                |                |                |                |
| 冷却壁    | 材 質 | フランジ方式    | フランジ方式 (煉瓦部保護)       | フランジ方式 (煉瓦部保護)       | フランジ方式 (煉瓦部保護)       | ベローズ方式         | ベローズ方式         | ベローズ方式         | ベローズ方式         | ベローズ方式         | ベローズ方式         |
|        | 構 造 |           |                      |                      |                      |                |                |                |                |                |                |
| シャフト下部 | 材 質 | シヤモットレンガ  | シヤモットレンガ (耐スラグ)      | シヤモット上               | シヤモット上               | シヤモット上         | シヤモット上         | シヤモット上         | シヤモット上         | シヤモット上         | シヤモット上         |
|        | 構 造 |           |                      |                      |                      |                |                |                |                |                |                |
| 炉 壁    | 材 質 | 蒸発冷却      | 蒸発冷却                 | 蒸発冷却                 | 蒸発冷却                 | 強制冷却           | 強制冷却           | 強制冷却           | 強制冷却           | 強制冷却           | 強制冷却           |
|        | 構 造 |           |                      |                      |                      |                |                |                |                |                |                |
| 煉瓦材質   | 材 質 | 切削加工性     | 切削加工性 (耐溶蝕性UP)       | 切削加工性 (耐溶蝕性UP)       | 切削加工性 (耐溶蝕性UP)       | 切削加工性 (耐溶蝕性UP) | 切削加工性 (耐溶蝕性UP) | 切削加工性 (耐溶蝕性UP) | 切削加工性 (耐溶蝕性UP) | 切削加工性 (耐溶蝕性UP) | 切削加工性 (耐溶蝕性UP) |
|        | 構 造 |           |                      |                      |                      |                |                |                |                |                |                |
| 炉 底    | 材 質 | 平カーボン     | 平カーボン (伊壁侵食防止)       | 平カーボン (伊壁侵食防止)       | 平カーボン (伊壁侵食防止)       | 平カーボン (伊壁侵食防止) | 平カーボン (伊壁侵食防止) | 平カーボン (伊壁侵食防止) | 平カーボン (伊壁侵食防止) | 平カーボン (伊壁侵食防止) | 平カーボン (伊壁侵食防止) |
|        | 構 造 |           |                      |                      |                      |                |                |                |                |                |                |

| 損傷原因  |                      | 対応策                     |                                         |
|-------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| 割れ・変形 | 1. 空温温度以上で鋼物の組織変化、成長 | 材                       | 1. 耐熱衝撃性向上<br>鋼鉄系 (FCD) - 鋳鋼系 (SCH)     |
|       | 2. 加熱、冷却の繰り返し        |                         | 2. 高温耐摩耗性向上                             |
|       | 3. 耐熱性不足             | 積                       | 1. 応力集中の防止<br>1-1) 金物小型化<br>1-2) 炉内面曲面化 |
| 摩     | 1. 原料衝突摩耗……上部        |                         | 2. 脱落防止<br>2-1) 鉄皮と連結<br>2-2) 金物相互固定    |
|       | 2. 高温すべり摩耗……下部       |                         | 3. 膨張代の確保                               |
|       | 3. 昇温による膨張低下         | 4. 肉厚増加                 |                                         |
| 耗     |                      | 5. 取替可能化<br>5-1) 炉内面取替式 |                                         |

図 4 鉍石受金物の損傷原因と対応策

部と下部でやや異なる。上部は主として原料の衝突摩耗であるが、下部は高温条件下における装入物とのすべり摩耗である。この基本的な条件に装入物の間歇的装入による加熱冷却の繰り返しが加わる。このため金物の固定部へ応力が集中し固定部の破損、金物の脱落・迫出しが起る。

この対策として、材質面については耐熱耐摩耗材料への転換があり、構造上からは金物を迫出しがないように金物固定化、小型化（金物の下部を耐すべり摩耗、耐スポーリングに強いれんがへの置換え）などの対策を行う一方、最近では金物の前面に簡易取り替えプレートを置き、比較的損傷の軽いうちに取り替えを行うことや、従来の金物構造でも全面取り替えを行えるようになったことによつてプロフィールの悪化を未然に防げるようになった（図 5）。

このため、燃料比の上昇が抑えられ、炉寿命にまで直接的な影響を及ぼすことはほとんどなくなっている。

一般的に炉体構造は、内圧に耐えるために厚肉の鉄皮構造とし鉄皮を溶融物や高温ガスから保護するためにれんがを張り、更に鉄皮とれんがの強度維持のため冷却設備をつける。

シャフト上部については、温度条件が比較的低温で炉体れんがの損傷が少ないので鉄皮の損傷は少ない。シャフト下段から炉腹・朝顔にかけては、高温ガス及び溶融物からの熱負荷を最も受けやすい部位である。そのため、耐火物の損耗、冷却設備の破損などによる熱負荷の増加から鉄皮に赤熱が生じると、冷却時に部分的に引張応力が生じ場合によつてはき裂や変形が発生する<sup>4)5)</sup>（図 6）。鉄皮き裂が頻発すると補修が追いつかなくなつて、ついには高炉の稼動可能時間が著しく低下したり、ガス洩れによる安全上・環境上の問題が発生してくる。き裂が著しく進行するとき裂の拡大や鉄皮の座屈を起こし、ついには内容物の噴出が起きるので、早期のパチ当てなどの補修が必要となる。

鉄皮の保護のために炉内にれんがを使用しているが、炉体れんがの損傷は冷却設備の破損につながり、更に鉄皮の温度の上昇から鉄皮き裂の原因になるなど、高炉の寿命に大きく左右する。

現在、高炉の炉体の冷却方式は大別して二通りある。一つは冷却盤冷却方式であり、一つはステーブ冷却方式である（図 7）。

(1) 冷却盤冷却方式

冷却盤の役割は、①れんがを冷却すること、②れんがを支えること、である。

冷却盤の問題点は、冷却盤自身が炉内へ露出するようになることと冷却盤の破損が増えてくることである。冷却盤が破損すると操業上の都合からすぐに休止できない場合もあり、その時は炉内への浸水を避けるため一連（通常 3～7 本の冷却盤）の冷却水を絞る。そのため、冷却盤の機能が一時的に失われ、鉄皮やれんが温度を上げる。しかし破損したときは、取り替えられることや構造上れんがの冷却を強化できることから冷却盤はれんがの損傷防止には有利である。

(2) ステーブ冷却方式

ステーブクーリング方式は昭和 40 年代にソ連から技

大型鉍石受金物損傷例

小型鉍石受金物の例

取替式炉口金物の例

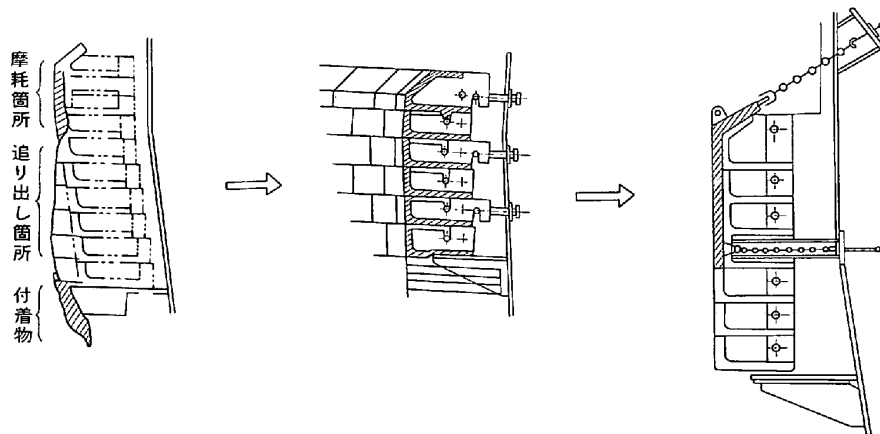


図 5 鉍石受金物の構造

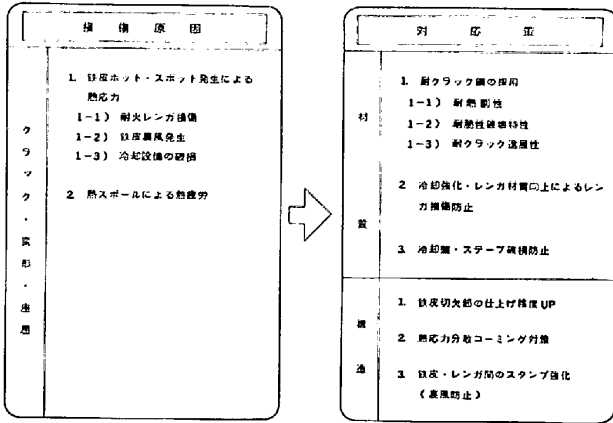


図 6 鉄皮の損傷原因と対応策

術導入されたものが日本では主として用いられている。その特徴として、①ガスシール性が良い、②自然蒸発冷却ができる、などがあげられる<sup>6)</sup>が、欠点としては一度破損すれば取り替えがきかないことである。このため冷却強化や熱負荷などの管理をする必要がある。

このような冷却方式の違いはあるがれんが損傷が著しくない場合でも、高温ガスが鉄皮内面を流れるようになると炉内ガスの影響で鉄皮は急激な温度の変動をうける。このため、耐火物損傷を防止すると同時に鉄皮に直接ガスが触れないように鉄皮内面にキャストブルを吹き付けるなど、き裂の発生が少ないようにすることを心掛けてきた。

鉄皮の材質という観点からは熱負荷の最も高い部位に耐クラック性に重点をおいたCF鋼の採用や、応力集中

をなくすような構造を考えたことである<sup>7)</sup>(表1)。

炉体れんがの損耗については、各部位により損傷要因が異なる<sup>7)8)</sup>(図8)。昭和42年頃には主として冷却強化を主体に考えていたが、炉内の認識が深まると同時に耐火物の開発が進み、冷却の強化との組み合わせによってしだいに損耗が少なくなってきた(表1)。

シャフト上部については、装入物の降下による機械的摩耗及び比較的低温域での温度変化によるスポーリングに対する配慮が必要となる。

これに比較して、シャフト中部、下部以下のれんが損耗は著しくかつ種々な要因によつて起こる<sup>9)</sup>。化学的要素の大きいものとして、①アルカリの侵入とその反応<sup>10)</sup>、②スラグとの相互反応、③炭素沈積による崩壊<sup>11)</sup>、更に物理的要素の大きいものとして、④高温域での温度変化によるスポーリング<sup>12)</sup>、⑤炉内物質による摩耗、などがある。

シャフト下部以下のれんがの損耗は高温域にあるため、れんが単独では防止することができず、冷却構造との組み合わせが特に重要となる。

冷却盤高炉を例にとると、炉体の位置及び冷却盤との関係によつて侵食スピードが異なる。図9に侵食推移と炉令の関係を示しているが(君津3高炉の例)、火入れ初期の急激な初期侵食(400mm/年)、1~3年の中期侵食(65mm/年)、4年目以後の緩慢な後期侵食(15mm/年)がある。冷却盤に支えられた範囲のれんが損耗は中期以後であり、冷却の効果が著しいことがわかる。冷却構造が破損した時に炉体れんがへの影響が大きいこ

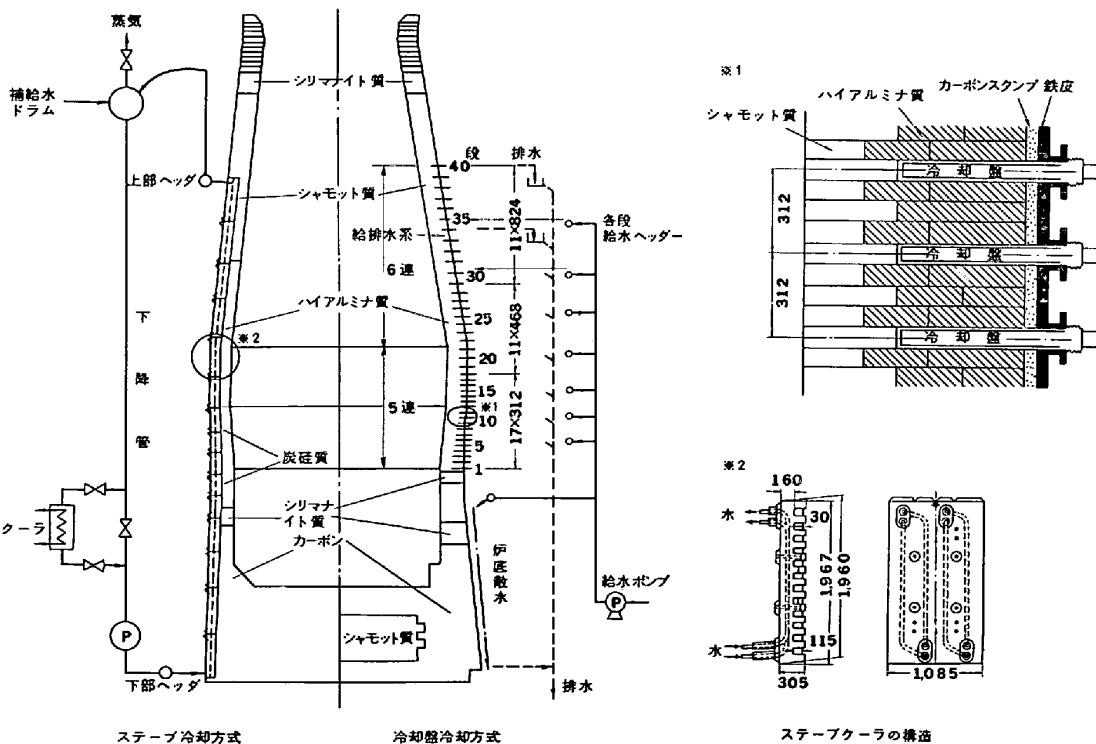


図 7 炉体冷却方式と構造

| 損傷原因                 |                                            | 対応策    |                                                                                   |
|----------------------|--------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 鉱石受金物<br>下<br>シャフト上部 | 1. 装入物の落下による機械的破壊                          | 材      | 1. 密着型シリマナイトレンガの使用<br>1-1) 耐摩耗性<br>1-2) 耐スボールリング性<br>1-3) FeO 低含有化<br>1-4) 耐亜鉛付着性 |
|                      | 2. ガス流れ、休風時の炉頂点火等<br>大きな温度変化によるスボール<br>リング |        | 2. ハイアルミナ質レンガの使用<br>(又は SIC レンガの使用)                                               |
|                      | 3. 亜鉛・カーボン等のデポジション<br>によるハースティング           |        | 2-1) 高熱伝導性<br>2-2) 低気孔率化<br>2-3) 耐スボールリング性<br>2-4) 耐スラグ性<br>2-5) 耐アルカリ性           |
| シャフト中部               | 1. 内径内発生応力による亀裂                            | 焼<br>造 | 1. 冷却強化構造<br>1-1) 冷却盤挿入型アップ<br>(均一冷却化)<br>1-2) 冷却水高温連注                            |
| シャフト下部               | 2. アルカリの侵入によるハース<br>ティング                   |        |                                                                                   |
| 炉<br>壁               | 3. 高熱負荷状態での急激な温度変化<br>によるスボールリング           |        |                                                                                   |
|                      | 4. スラグとの反応による強度劣化                          |        |                                                                                   |
| 5. 装入物による摩擦          |                                            |        |                                                                                   |

図 8 炉体れんがの損傷原因と対応策

| 損傷原因                                                          |                      | 対応策 |                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 溶<br>解<br>溶<br>融<br>脆<br>化<br>用<br>の<br>生<br>成<br>・<br>浮<br>上 | 1. マトリックス部の加度溶解      | 材   | 1. 耐溶融性の向上<br>1-1) 無煙炭の多用<br>1-2) マトリックス強化<br>1-3) 気孔率の最適化                                                                                  |
|                                                               | 2. 溶融連注              |     | 2. 化学的安定性<br>2-1) 低還元率化<br>2-2) 耐アルカリ性(黒鉛の多用)                                                                                               |
| 腐<br>蝕<br>の<br>生<br>成<br>・<br>浮<br>上                          | 2-1) 黒鉛化による強度劣化      | 構   | 3. 熱的安定性<br>3-1) 高熱伝導度化<br>3-2) 熱間曲げ強度 UP                                                                                                   |
|                                                               | 2-2) 凝固時の収縮変化        |     | 1. 構造安定性<br>1-1) リンクカーボンの採用<br>(二重リンクカーボン)<br>1-2) 小型カーボンブロック<br>1-3) レンガの最適組合せ使用<br>2. 浮上防止対策<br>2-1) キーカーボンの採用<br>3. 冷却強度<br>3-1) 炉底冷却アップ |
|                                                               | 3. 溶融液による腐蝕(凍結状態)    |     |                                                                                                                                             |
|                                                               | 4. 温度差での応力発生による機械的割れ |     |                                                                                                                                             |
| 5. アルカリ・Zn などによる化学的侵食                                         |                      |     |                                                                                                                                             |
| 6. 炉底レンガの浮上                                                   |                      |     |                                                                                                                                             |

図 10 炉底れんがの損傷原因と対応策

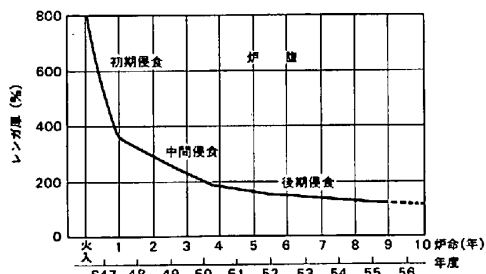


図 9 炉体侵食推移

とから、冷却構造体自体の損傷を少なくすることも重要である。火入れ1~2年後より冷却盤先端は炉内に露出して以下のような損傷をうける。

(1) 溶銹アタックによる溶損

①溶銹が吹き上げ、または滴下して外表面が虫喰い(凹)化する。

②れんが目地から溶銹が流れ込み冷却盤と接触する。

(2) 高温ガスによる冷却水蒸気化による冷却機能の低下<sup>13)</sup>

冷却盤の破損を長期間放置すると破損直上れんがは支持を失って脱落する。一方れんがの脱落は鉄皮への熱負荷を著しく増大させ赤熱、更にはき裂へと進行することは前述したとおりである。

熱負荷の高い炉下部のれんが材質としては、低気孔率のハイアルミナ質れんがを冷却盤と組み合わせ冷却を強化することによって損耗を防止してきた。

ステープ高炉の場合は一般に冷却盤に比べてれんがへの冷却力が弱い、冷却水の流速を増加させ冷却の効果を大にすると同時に冷却が良くきくように高熱伝導性の炭珪質のれんがを採用するようになってきている<sup>8)</sup>。

炉底部については、炉内で生成された溶銹滓を一時的に貯溜し排出するところである。

炉底はいつたん侵食された場合、補修する方法はほとんどない。炉底が破損した場合、溶銹が冷却水と触れ水蒸気爆発を起こし人災事故、冷却設備・鑄床設備の破

壊、ケーブル類の焼損などの大事故となるため、操業上の管理を最もきびしくする所である。

炉底のれんがの損耗パターンは、図3にもあるように大別して炉底侵食型と側壁侵食型とに分けられる。最近の炉底構造からいって、前者はそれ程心配はないが、後者の場合は経験的にみてれんが侵食が局部的に進行する場合があります<sup>14)</sup>、非常に注意を払っている。

れんがの損耗メカニズム<sup>9)16)17)</sup>は以下のように推定している(図10)。

(1) 高炉内の温度変化に伴うれんが内部応力(熱応力及び構造的応力による引張破壊)

(2) カーボンブロック気孔内に浸透したアルカリ(K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O)、亜鉛がある温度域に沈析する。温度の変動があるとアルカリ、亜鉛がカーボンと反応し組織を脆化させ応力破壊する。

(3) カーボンブロックに銹鉄が浸透し、①カーボンブロックのマトリックス組織を脆弱化する、②カーボンブロックに銹鉄が侵入すると熱膨張係数が高くなり、熱応力破壊する。

(4) 溶銹との密度差による浮上。

炉底れんがについては、以前はシャモットれんがだけを用いていたがしだいにカーボンれんがを使用し、かつ冷却を強化することによって、炉底れんがの侵食を一定の所で止めるという考えが一般化していった。炉底れんがについては上述のメカニズムから気孔率の小さい良熱伝導性のカーボンブロックを開発採用してきている<sup>18)</sup>。

しかしカーボンれんがについては、溶銹との密度差が大きく浮上防止が問題になることや、材質的には焼締つたときにシャモット質れんがの方が溶銹との反応がないことから、カーボンブロックの良さとシャモットれんがの良さを組み合わせた上カーボン、下シャモットの炉底構造も採用されている(表1)。

また、炉底については側壁侵食について特に問題にしているが、これは出銹口下の深さが浅いときに溶銹が炉壁近傍を環状となつて流れ侵食を促進することから出銹口下の深さを深くする構造をとる。

炉底れんがの侵食状態を見ると必ずしも一様に進行するのではなく、ある期間付着物がついて安定したり、損耗したりしてしだいに侵食が進んでいく。

炉底の問題については、耐火物の開発と同時に炉底れんがの侵食メカニズムからの構造の対応が重要で炉底の長寿命化対策は今後もその重要性を失っていない。

### 3.2 操業が設備寿命に与える影響

高炉の設備寿命を長くするためには、日常の操業も大きな影響を与える。高炉操業に当たっては、通気・熱交換・還元の各機能を最大限に生かしながら、炉体への熱負荷を極力与えないように十分に注意している。

その操業の一つに中心流操業がある。これは、高温ガスをできるだけ中心側に流し炉壁への熱負荷を押える操業で主として装入物の分布制御によつて行っている。このためには、炉周辺部にコークスに比べて粒度の小さな鉄石を積極的に装入することによつて周辺ガス流を押さえ、炉壁近傍の温度を低下させる。この時の炉内状況の例として、図3に示されるような逆V型の融着帯を形成させることが望ましい。

次に原料中の Zn-アルカリ成分も設備寿命に影響する。これらの装入物中の微量成分は炉内で循環濃縮されてくる<sup>19)</sup>とれんがの目地部に侵入しれんがの融点を低下させたり、パースティングを引き起こしたり、耐スポール性を著しく低下させたりする。更には装入物とれんがとの間でバインダーとして働き、炉内に付着物を形成する<sup>20)</sup>。このような付着物が形成されると装入物の層状がくずれて混合層ができ、炉内のガスが混合層を通りやす

いため高炉の円周バランスがくずれ局所的な高温ガス流により<sup>21)</sup>設備の損傷に結びつく。これに対しては炉体の壁厚管理を行い、付着物が成長する前に炉外に排出させたり、付着物が成長しすぎた場合には、強制的に発破をかけて除去する。通常は、アルカリ、Zn 成分の装入量を管理して付着物が成長しないようにする。

炉底部については、耐火物損傷の補修が容易にできず、かつ侵食の程度を知るためのボーリングもできないので、れんが背面に取り付けた温度計を増設して管理を強化する。そして侵食が進んだ場合には、鉄皮・れんが間へのペーストの圧入、散水強化などの冷却強化処置を行う。

またれんがの損耗が更に進んで危険な場合①装入  $TiO_2$  を増やし溶銑の流動性を下げ炉底に  $Ti_3N_4$  や  $TiC$  などの付着物の生成<sup>22)</sup>、②その部位の散水量の増加、③直上羽口の閉塞、④出銑比の低下(極端な場合は臨時休風)などの手段で炉底部に積極的に付着物を生成させる操業を行う。しかしながら、炉底に対する最も重要な延命対策は炉底の湯流れを炉中心側に保ち、環状流を起こさせないように炉底中心の温度を上昇させるように常に管理をすることである。

## 4. 長寿命化高炉の実例

図11は、最近の高炉の炉令と炉内容積当たりの累計出銑量( $t/m^3$ )を示したものである。君津3高炉は、他の高炉と比較してずば抜けた長寿命化を達成している。

そこで、今回高炉の長寿命化についての実例として、

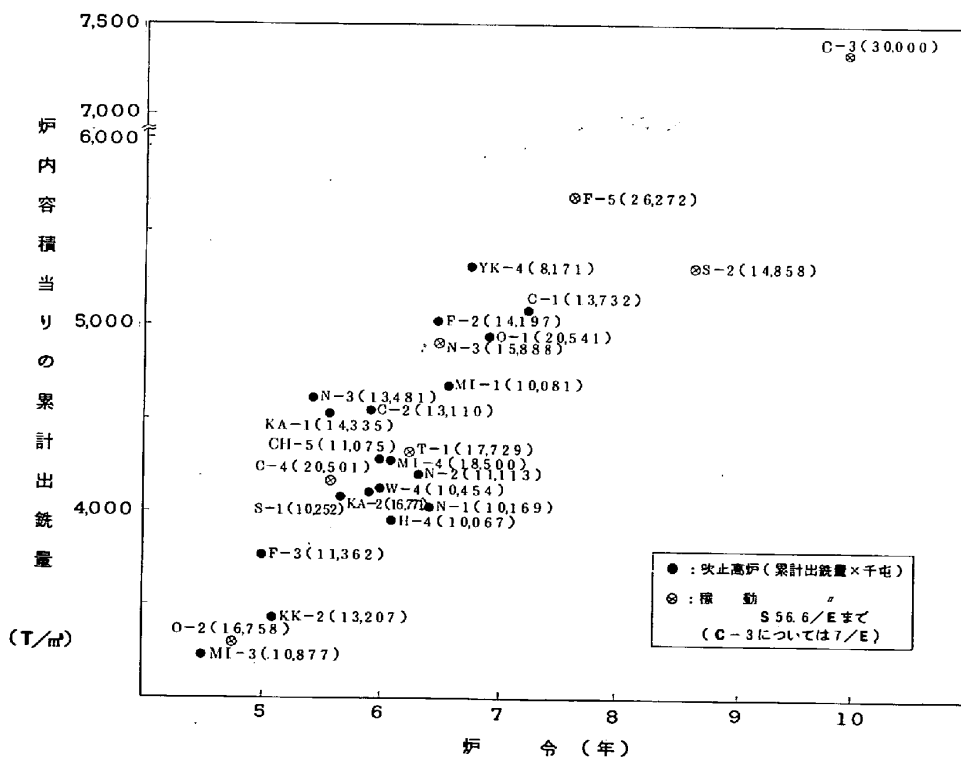


図11 最近の高炉の累計出銑量

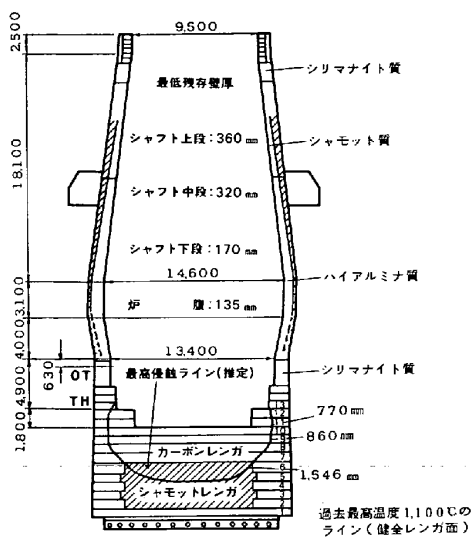


図12 炉体れんが（最低）残存厚（S 56年 7月）

君津3高炉の建設当初の設備企画設計の考え方とその寿命延長対策について述べる。

4.1 プロフィール

昭和44企画時点において、初めての大型高炉の設計という意味から

- (1) 安定、低燃料比操業を可能にするプロフィール設計
- (2) 長寿命化のためのプロフィール設計に重点を置き、企画検討された。

安定、低燃料比操業という点については、東田第5高炉解体の解析と実験室での軟化融着挙動の研究を参考に検討を行った。一方長寿命化の対策として炉下部での炉体れんが損傷を少なくすることを検討した結果、図12に示すごとく熱負荷の高い従来のシャフト下部を炉腹とするスマート型のプロフィールとした。

4.2 炉口部構造

鉱石受金物の損傷は、落下原料の衝突による摩耗と高温にさらされた時の熱歪みが原因と考えられた。従って金物本体には耐熱耐摩耗を考慮してCr 鋳鋼を採用した。また構造的には、鉱石受金物の荷重が直下のれんがにかからないようにするため鉱石受金物の受プレートを設置した。また、局所的な脱落防止のため鉄皮よりリブを設けて鉱石受金物を背面より固定化した。

この鉱石受金物は火入れ後6年目までは特に問題はなかったが、6年目を過ぎる頃から鉱石受上部2段から4段の前面摩耗と下部（10段・11段）の迫出しが目立ち始め（図5）炉令10年目近くなると全周の1/4にあたる部分の迫出しが激しく、これが原因で同一レベルにおける炉壁上昇ガス温度およびシャフト下段・炉腹のれんが内埋め込み温度のばらつきが大きくなり装入物の指尺降下も不安定になった。そこでこの範囲の全面取替工事を70hの休風をもつて行つた結果、ほぼ満足のゆく結果が得られ、通気抵抗指数も下がり操業の安定化が図ら

れた。従来は炉口部金物の全面取り替え補修の実例はほとんどなかったが、今回のこの補修の成功からみて新しい取り替え式炉口金物構造でなく従来の構造であつても（図5）比較的容易に取り替えられることが実証されたことは意義深いと思われる。

4.3 冷却盤構造

過去の冷却盤における問題点は、大きく分類して、①冷却盤破損と②冷却盤フランジ部のガス洩れであつた。まず冷却盤の破損については炉内高熱負荷による溶損以外に④鋳造時において発生する欠陥と①冷却用海水によるキャビテーション・エロージョンが原因であつた。鋳造については、溶解から鋳込みそして溶接に至る製造工程のチェックをメーカーと共同して行い従来の検査方法に加えて、耐圧空化でのピンホールの洩れ検査と、X線検査を全数実施した。冷却水については、キャビテーション・エロージョン対策として全面淡水化に踏み切つた。冷却盤ガス洩れについては、火入れ後ガス洩れの要因となる炉内れんがの膨張とそれによつて押し上げられる冷却盤の挙動を炉体各レベルで推定し、その偏位を冷却盤とマンテルフランジとの間にベローズを設けて吸収する構造（ベローズ型）とした。

4.4 れんが選定

高熱負荷部へのれんがの採用は、当時から電鋳れんが、ムライト質れんが、あるいはカーボンSiCがあつたが冷却盤構造の採用から、冷却盤破損時の冷却水との反応を考慮して耐水蒸気酸化性に強いかつアルカリ・バースティングの少ない白物、その内でも耐スポール性、そして冷却効果が発揮しやすい熱伝導性の良いものとして90%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（コランダム質）れんがの選定を行つた。この90%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の性状を表2に示すがこのれんがの特徴は高熱伝導率（特に低温部にあり常温で14(kcal/mh°C) シャモットの約7倍、1000°Cで4.2(kcal/mh°C)の値をもつていることである。このため冷却を強化することで高熱負荷部におけるれんが材質とアルカリとの反応を抑制することができ、耐スポール、耐アルカリ性を強化

表2 90%アルミナれんが性状

| 種 類                  |                               | 90%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> レンガ |
|----------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| メ ー カ ー              |                               | 国 内 製                                 |
| 物 理 的 性 質            | 嵩 比 重                         | 3.24                                  |
|                      | 見 掛 比 重                       | 3.70                                  |
|                      | 気 孔 率 (%)                     | 13.5                                  |
|                      | 圧 縮 強 さ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 1,244                                 |
|                      | 残 存 膨 脹 収 縮 率 (%)             | +0.01                                 |
| 熱 膨 脹 率 (%)          | 1,000°C                       | 0.69                                  |
|                      | 1,500°C                       | (1,650°C) 1.28                        |
| 荷 重 軟 化 点 °C         | T <sub>1</sub>                | >1,700                                |
| 熱 伝 導 率 (kcal/mhr°C) | 15°C                          | 14.0                                  |
|                      | 1,000°C                       | 4.2                                   |



表 3 君津 3 高炉シャフト下部における 90%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> れんが性状

|      |                                | 標動面(炉内面)よりの距離 → |       |       |       |        |         |         |
|------|--------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|
|      |                                | 0~20%           | 20~40 | 40~60 | 60~80 | 80~100 | 100~200 | 200~230 |
| 見掛比重 | 見掛比重                           | 3.76            | 3.74  | 3.74  | 3.75  | 3.74   | 3.74    | 3.74    |
|      | かさ比重                           | 3.21            | 3.20  | 3.20  | 3.19  | 3.17   | 3.17    | 3.22    |
| 吸水率  | 吸水率                            | 4.40            | 4.50  | 4.5   | 4.6   | 4.9    | 4.8     | 4.4     |
|      | 見掛貫孔率                          | 14.2            | 14.5  | 14.5  | 14.7  | 15.4   | 15.0    | 14.0    |
| 化学分析 | Ig loss                        | +0.3            | +0.2  | +0.3  | +0.2  | +0.2   | +0.3    | +0.1    |
|      | SiO <sub>2</sub>               | 3.5             | 3.2   | 3.3   | 3.3   | 3.3    | 3.3     | 3.9     |
|      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 91.0            | 96.1  | 95.7  | 95.4  | 95.3   | 95.7    | 93.1    |
|      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.7             | 1.2   | 1.6   | 1.4   | 1.4    | 1.5     | 1.7     |
|      | Na <sub>2</sub> O              | 0.2             | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2    | 0.2     | 0.3     |
|      | K <sub>2</sub> O               | 3.2             | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1    | 0.1     | 0.3     |
|      | ZnO                            | 0.1             | 0.03  | 0.02  | 0.02  | 0.03   | 0.1     | 0.1     |

(冷却盤23段: S50年10月 火入れ後5年目)

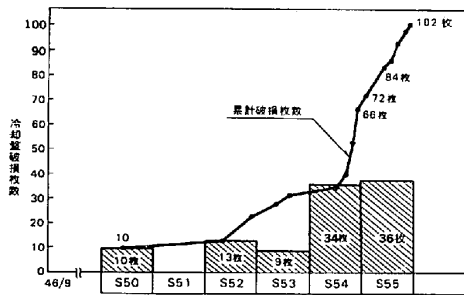


図13 冷却盤破損実績

できることである。このことから高熱負荷部の冷却盤の装入間隔を 312 mm ピッチに縮めれんがが損耗に対処した(図7)

このように冷却盤とハイアルミナ質れんがの組み合わせによつて、高熱負荷部のれんがの侵食は図9にもあるように冷却盤が炉内に突き出た付近から、その損耗速度が遅くなり現在でも炉腹部における最低れんが残存厚は 135 mm を保っている(図12)。火入れ後6年目にれんがの変質状態を調査した結果も炉内稼動面には 3% 程度の K<sub>2</sub>O がみられるが、少し鉄皮側になるとほとんど変質し

ていない(表3)。一方れんがの損耗が進んだ炉令6年目位から冷却盤の破損が多くなつて来ている(図13)。このため1枚の冷却盤破損に伴つて連鎖的に冷却盤が破損することを防ぐことと、冷却盤自身の損傷を防ぐ意味から給水量の増加や短連化(5連→2~3連化)を行つた。

4.5 炉底構造

炉底構造は前述したように大きく分類して、オール・カーボン構造とシャモット+カーボン構造とがある。

オール・カーボン構造については、小型炉には実績はあつたものの炉容 4000 m<sup>3</sup> に大型炉に対してはカーボンれんがの浮上などに不安があり、シャモット+カーボン構造を採用した。シャモット+カーボン構造については、火入れ後の炉内の温度、高圧下におけるシャモットれんがの構造体としての焼締りの効果を図るべく、上部にカーボンれんがを置き下部にシャモットれんがを積む構造とした。

しかし、シャモット構造の炉周囲壁は、側壁散水の冷却効果を十分に発揮する意図からカーボンれんが積みとし、全体的な炉底構造は図12に示すごとくカーボンれんがでシャモットれんがをつつみ込んだいわゆるシャモット内蔵型構造とした。この炉底構造の侵食の経緯を調べると炉令9年を経過した時点での炉底侵食プロフィールは、炉底れんが内に埋め込まれた温度計から図12のようなおわん型の侵食形状になつてしていると推定される。

火入れ以来炉中心部温度から推定した炉底中心部侵食速度(深さ)を図14に示す。炉底下部のシャモットれんがによつて、冷却が弱くなつている上部カーボンれんがは、1年以内でほとんど損耗したと考えられる。この間下部のシャモットれんがは高温高圧下において、構造体として焼締められ耐溶銑性を向上しその結果、その後

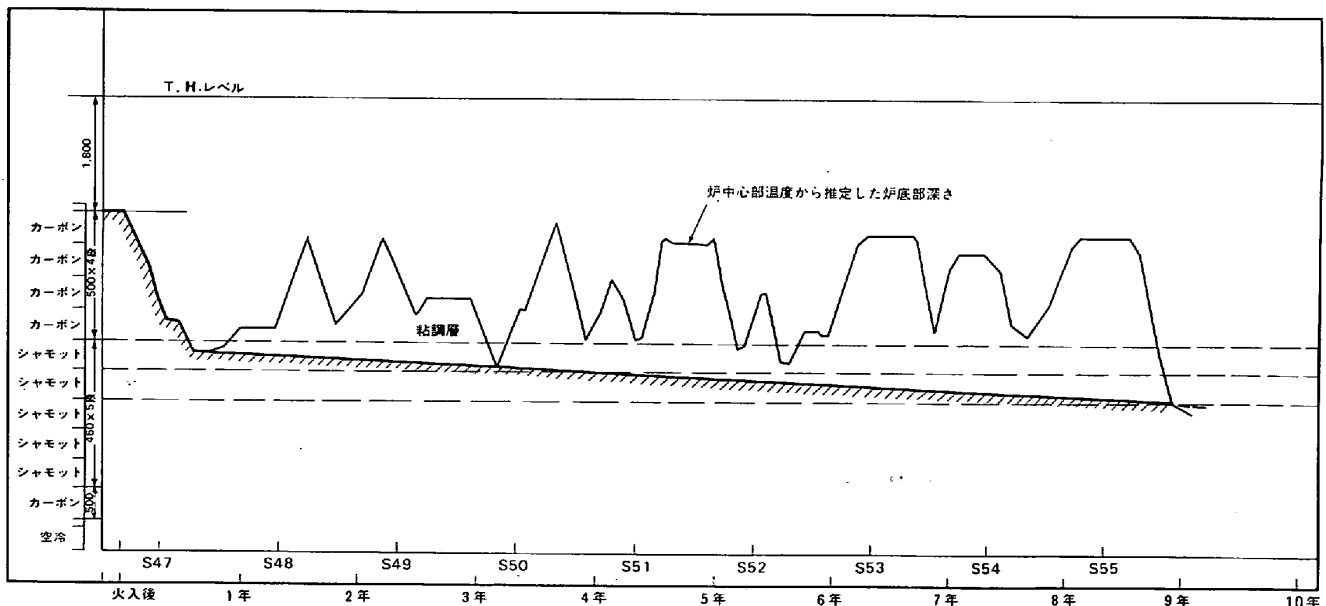


図14 君津第3高炉炉底炉芯部侵食推移

の侵食は非常に遅く炉底長寿命化の大きな要素となつていと推定される。一方炉壁部のカーボン侵食を側壁埋め込み温度から推定すると、健全なカーボンれんが(1100°Cライン)は750~900mmの残存厚になつている。図12に炉令10年目の炉体れんが残存厚を総括的に示しているが最低のれんが厚みは炉腹部の部分であるが、前述したように135mmあり鉄皮の赤熱やき裂は全くなく、従つて鉄皮散水もしていない。また炉底部に関して最も心配した側壁侵食もほとんどなく、炉底中心部もシャモットれんがが残つておりこのため当初設計時点に意図したことが十分立証されたといつてもよいであろう。

4.6 炉体管理の強化

当初の管理は、大型炉を順調に稼働させるという操業技術的な意味あいの炉体管理であつたが、炉令6年に近づくにつれ鉄鋼界をとりまく情勢変化も加わつて、長寿命化のための設備管理強化へと移行した。炉体シャフト部に対しては、炉体熱負荷の監視を強化するため、シャフト上部に炉内壁を上昇するガス温度測定用熱電対(スキン・フロー温度計)を円周8箇所を2段に、また炉下部の冷却盤熱負荷の高い箇所での鉄皮や、排水の温度を適宜測定できるように可搬式温度計を新設した。一方炉底に対しては側壁侵食の管理を強化するため、約70点(合計113点)の温度計増設を実施し、それからの端末を計算機につなぎ、常時侵食状況を監視できる体制にした。その他に、高炉休風時には鉍石受金物の経時的变化を監視するため、定期的な写真撮影、あるいは炉体れんがの侵食をチェックするため、壁厚測定なども行つている。更に炉体の熱負荷が異常に高い場合は装入物分布制御によつて中心流操業を指向しかつ炉体冷却を強化する。また炉底の温度上昇があつた時にはスタンプ圧入、更には原燃料性状の管理を行うなどの操業へのFeedbackを行い極力長寿命化への努力を行つている。現在、君津3高炉は平均燃料比461kg/t-pig、生産量7500t/m<sup>3</sup>と優れた成績をもつだけでなく、稼働年月、累計出銹量も従来の記録を大幅に更新しており(図11)現在計画中の吹き出し時期には、炉命11年、おおよそ3200万tの累計出銹量に達する見込みである。

5. 長寿命化に対する将来の展望

従来4000m<sup>3</sup>級の大型高炉の建設段階で計画されていた寿命は5~7年であり、その寿命ネックは炉底れんがであるとされていた。ところがれんが材質の改善、れんが構造の改善、冷却の強化、炉底保護操業技術の進歩、低出銹比操業などで炉底については、ほぼ健全のまま改修されたケースが多い。一方シャフト部については、一般的にはれんがの損傷、冷却装置の破損、鉄皮のき裂があり、これが寿命を決定している。図15は君津3高炉の稼働の知見をもとに、高炉損傷部位と今後の延命対策

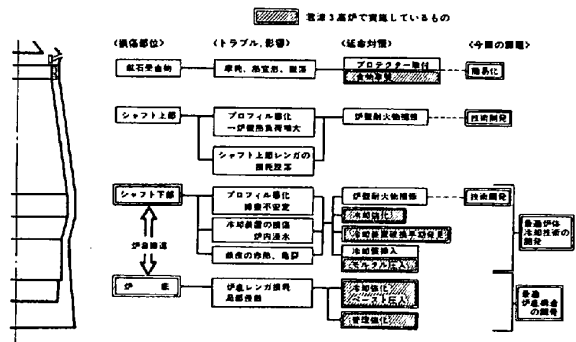


図15 高炉損傷部位と延命対策

について整理したものである。

君津3高炉の実績から判断できることは、今後の開発の方向はシャフト鉄皮にき裂を起こさせないことと最適炉底構造を設計する技術を確認することである。鉄皮にき裂を起こさせないためには、長期間原形状を維持できるように強固な材質のれんがを開発することおよびれんが損傷があつても容易に補修できる補修技術を開発することである。前者については、過酷な高炉内の使用条件で数十年も耐える材質のものはまだ開発されていないというべきだろう。後者については、外部からの圧入による造壁方法があるが、最近では炉内部から造壁する熱間吹き付け法が開発されている。この方法はシャフト上部の損傷したれんがの部分に、炉内面からキャストブルを吹き付けて補修する方法である。

この技術の課題は、吹き付け機を炉内のどの位置まで下げられるかという設備技術と装入物のレベルをどの位置まで下げられるかという操業技術と更には、キャストブルのれんがへの密着性がどのくらい維持できるかという炉材技術が一体となつて解決される必要がある。このようなシャフト補修技術が確立されれば更に炉命を延ばすことが可能になる。このような状態になると再び炉底部が寿命律速となる。特に炉底れんがの急激な浮上による炉底れんがの侵食に対しては、その浮上メカニズムなどの解明と炉内状況の不明の所、特に炉芯コークスの挙動、炉底の湯流れなどの解明によつて適切な対策をとる必要がある。高炉の寿命は、補修技術の進歩によつて当面10000t/m<sup>3</sup>、炉代15年の炉令が目標となるが、近い将来においては、設備技術の進歩と相まつて、高炉の設備は炉体保護操業によつてではなく、最も能率の良い操業を受けつける設備になるであろう。

6. 終わりに

高炉の寿命について、高度成長期からの開発経緯を含めて解説した。高炉本体の設備寿命は炉底で決まるか、さもなければ鉄皮で決まり、それぞれ設計・施工・操業・補修各技術力により差が出てくる。

最近の炉底管理は年々目ざましいものがあり、侵食ラインの推定法<sup>24)</sup><sup>25)</sup>はほぼ確立されれんが侵食ラインも一

定付近で安定化させる技術も可能となりつつある。このように炉底の寿命が延びてくると、寿命律速はシャフト下部の高熱負荷部となりれんがの損傷の補修技術が最重要となってくる。さらに君津3高炉の場合やシャフトの補修技術の進歩があれば、寿命は再び炉底が律速になつてくるといふ繰り返しになる。そしてやがて改修は、炉の寿命に影響する炉内の解明とそれに対する技術の開発を積極的に行うことによつて、設備の寿命によつて決定されるのではなく、新しい技術の導入によつて能率・コスト低減に大きく影響するとき行うか、さもなければ、前後工程との関係で最もタイミングの良い時期に計画的に実施されるようになると確信する。

#### 文 献

- 1) 第3版鉄鋼便覧, 第II巻, 製鉄・製鋼 (日本鉄鋼協会編) (1980), p. 281 [丸善]
- 2) 落合常巳, 藤原茂, 平櫛敬資, 谷山光哉: 製鉄研究, (1975) 283, p. 11202
- 3) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 535
- 4) 石原徹, 森本照明, 花田義幸, 細野明, 山川悠, 岡部龍二: 鉄と鋼, 65 (1979), S 528
- 5) 太田定雄, 豊田裕至, 横幕俊典, 網代哲也: 鉄と鋼, 66 (1980), S 108
- 6) W, E, PYNE: Iron Steel Eng., (1973) Dec., P. 54
- 7) 高炉鉄皮亀裂防止対策 (日本鉄鋼協会編) (1975)
- 8) 杉田清: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1462
- 9) 大庭宏, 平櫛敬資: 製鉄研究, (1973) 283, p. 10507
- 10) 成田貴一, 尾上俊雄, 佐藤義智, 宮本学: 鉄と鋼, 63 (1977), S 41
- 11) 堤秀寿, 鈴木隆夫: 住友金属, 23 (1971) 4, p. 418
- 12) 熊谷正人, 内村良治, 吉川文明, 河合隆成: 鉄と鋼, 67 (1981), S 61
- 13) 中島龍一, 吉田弘, 井上英明, 中村幸夫, 末竹義則, 森山茂: 鉄と鋼, 67 (1981), S 27
- 14) 西田功, 太田芳男, 下村興治, 植村健一郎, 河村康之: 鉄と鋼, 66 (1980), S 124
- 15) 島田信郎, 小山保二郎, 小林基伸, 伊沢哲夫, 池田晴一, 竹元克寛: 鉄と鋼, 63 (1977), S 500
- 16) 落合常巳, 池田順一, 藤原茂, 田村信一, 今若寛: 鉄と鋼, 65 (1979), S 541
- 17) 斉藤三男, 新谷宏隆: 鉄と鋼, 67 (1981), S 58
- 18) 落合常巳, 池田順一, 藤原茂, 田村信一: 鉄と鋼, 65 (1979), S 542
- 19) 板谷宏, 福武剛, 岡部俠児, 長井保: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 472
- 20) 佐々木稔, 中沢孝夫: 製鉄研究, (1971) 272, p. 9729
- 21) 羽田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, 62 (1976) p. 953
- 22) 成田寛一, 前川昌大, 尾上俊雄, 佐藤義智, 宮本学: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 525
- 23) 山岡弘, 鈴木隆夫, 大原昭三, 猫田哲弘, 田鍋一樹: 住友金属, 30 (1978) 1, p. 1
- 24) 大野二郎: 鉄と鋼, 58 (1972) p. 1705
- 25) 阪本喜保, 田村洋一, 酒井俊彦, 山本俊行, 播木道春, 真忠達明: 鉄と鋼, 63 (1977), S 499