

Fig. 2.37. Flow sheet of typical blast furnace slag treatment process.

スクラップ配合率が低下したこと、湿式分級技術が発展したことなどからその後順次休・停止され、現在では乾燥と還元揮発の2段のキルンからなる。SPM法が住友金属工業(株)鹿島で1基稼働しているのみである。この方法は高炉スラグ、転炉スラグ、および表面処理系スラグを混合し、造粒しないで装入するのが特徴である。さらに、高炉ダスト中の炭素分でバランスする配合を見いだし、特別の燃料の添加なしに操業している。そのほか、溶銑鍋にダストを直接投入して脱Znと鉄分の回収を同時に行う技術、循環流動層技術を適用してロータリーキルン法より低い温度で脱Znを行う技術、炭剤を内装したペレットを回転床炉で還元と脱Znを同時に行う技術などの試みが内外で報告されているが、実機化には至っていない。

2.9.3 高炉スラグの資源化技術

高炉スラグは銑鉄1tから約320kg発生し、年間2,200～2,500万t副産する。高炉スラグはセメントと同様な水硬性を持つことで注目され、その資源化技術は、日本鉄鋼連盟に設置された昭和47年の高炉滓JIS化推進委員会、昭和51年のスラグ資源化委員会の活動による高炉セメント、道路用スラグなどのJIS化、製造技術の開発と管理体制の確立、ま

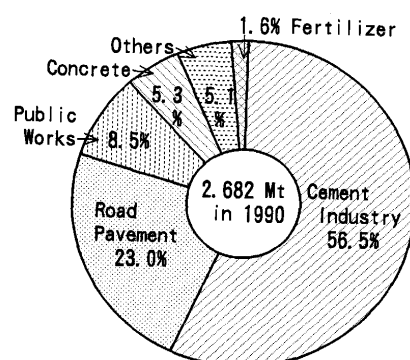


Fig. 2.38. Utilization of blast furnace slag. (Tekkou-kaihou, Oct. 21, 1992)

た日本鉄鋼協会の基礎研究部会のバックアップ研究を得て、昭和50年代に基本技術と体制はほぼ完成した。

(1) 製造と品質

高炉スラグは冷却方法により、急冷(水砕)スラグと徐冷スラグがあり、水砕スラグは主にセメント原料に、また徐冷スラグは土木用材料に利用される。その製造工程の一例をFig. 2.37に示す。水砕スラグはガラス化率の高い硬質の水砕スラグ製造が必要で、吹製装置の水量、水圧、噴射口の条件による制御と品質管理技術の確立が図られ、ガラス化率90%以上、 $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$ 1.75以上が保たれている。また、路盤材用などの徐冷スラグはエージングによる黄水防止、水硬性粒度調整スラグの強度などの品質管理がなされている。

(2) 資源化利用

水硬性を持つ材料としての評価が定まり、その資源化率は高く、Fig. 2.38に示すように1990年には100%に達している。特に、付加価値率の高いセメント原料への利用が50%を越えるに至っている。強い潜在水硬性を持つため非焼成でセメントに混和でき、有害成分が少なく、アルカリ骨材反応にも強いなど省エネルギーで地球に優しい、いわゆる「エコマテリアル」の性質を有する。

特殊な用途としては、スラグウール、軽量発泡コンクリート(ALC)の原料などがある。また、水砕スラグ微粉末の新たな用途開発の検討も推進されている。

2.10 炉体長寿命化

2.10.1 高炉本体設備の長寿命化

近年高炉長寿命化技術の進歩は著しい。1960年代後半に火入れした高炉の寿命が5～6年であったものが1970年代火入れの大型高炉では11年に達している。

1994年2月現在稼働中の川崎製鉄(株)千葉6号高炉(4,500m²)は16年7カ月を経過して、内容積当たり累計出

銑量が11,000tを超えているが、まだ数年の稼働を予定している。

高炉長寿命化技術の進歩は設備・操業・保全各技術の総合力によって成し得たものであって、以下に列記する技術の総合効果によって長寿命化が達成された。

- ① シャフト・ボッシュ部へのSiCレンガ、炉底部への高密度カーボンレンガ適用などの耐火物技術の進歩

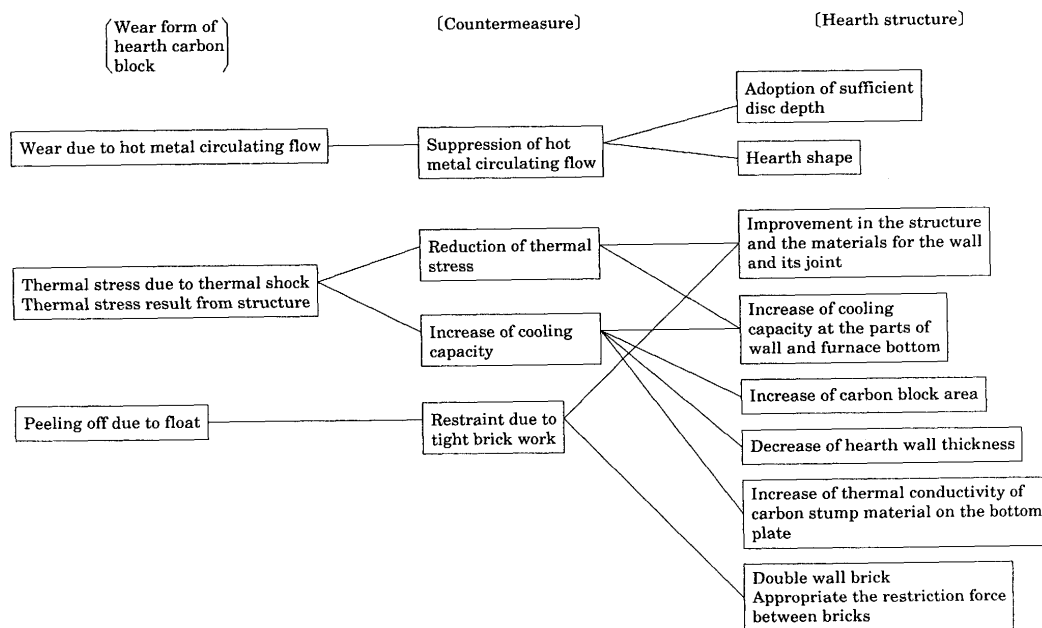


Fig. 2.39. Countermeasures for prolonging hearth life.

- ② ステープなど炉体冷却設備技術の進歩
- ③ 鉄皮材質向上，応力集中緩和設計などによる鉄皮性能の向上
- ④ 高炉操業管理技術の向上，装入物品質管理技術による高炉操業の安定化
- ⑤ 装入物分布制御などによる炉体熱負荷制御技術の向上
- ⑥ 炉底浸食ライン推定・管理技術の向上
- ⑦ シャフト補修技術に代表される炉命延長技術の進歩

(1) 炉体耐火物

1) 炉床部

1970年代後半に実施した炉底部解体調査により炉底浸食機構の解明が進んだ。最大の技術課題は炉底の異常浸食（ノラクロ浸食）で材料・構造面からの諸研究・検討が加えられた。最近改修された高炉には，これらの成果が取り入れられており以下に記す特徴を有している。

- ① 環状流抑制のためのディスク深さ（出鉄口から炉底レンガ最上部までの距離）が深い。また，スリバチ型形状である。
- ② 冷却効果向上のため薄炉底厚でオールカーボン指向である。
- ③ 溶銑，アルカリなどの侵入防止のため低気孔径のカーボンを使用している。

炉底部の損傷で寿命を律速する部位は炉底中心部よりもむしろ炉底側壁部であり，主要な損耗要因は以下のとおりである。

- i アルカリ，Znの侵入による材料劣化とアルカリ，Znが侵入したレンガの異常膨張による内部圧縮応力による破壊
- ii 溶銑侵入による浸食摩耗
- iii 環状流による浸食摩耗

iv 熱応力による応力破壊

Fig. 2.39 に炉底レンガ損耗対策として要求される炉底構造の要件を示す。溶銑・アルカリなどの浸透を防ぐための低気孔率ならびに対溶銑浸透性を重視した Al_2O_3 添加のカーボンレンガが開発され始めている。

2) 炉腹およびシャフト部

この部位の耐火物は火入れから長期間にわたり，炉内プロフィールの維持が強く要求されている。材質的にはシャモット質から対溶銑浸透性，対スラグ性，対アルカリ性，対酸性などに優れ，しかも機械的性質にも優れた SiC 系レンガを全面的に採用するようになった。

耐火物および冷却設備の性能向上，レンガ支持機構の改善などにより薄壁化を指向している。

(2) 炉体冷却設備

シャフト，ベリー，ボッシュ部における炉体冷却設備の具備すべき機能は，レンガを冷却し長期間レンガ機能を維持させることであるが，同時にレンガの支持機能も重要である。この部位の代表的な冷却方式は冷却盤式とステープ式であったが，最近ではステープ式が主流の座を占めている。

1) ステープ冷却設備

サイクル的熱負荷変動にさらされるステープはその表面が溶融損耗し，同時に熱疲労により鑄鉄はセメントタイト化し，機械的強度の低下が認められる。吹卸し時に解体したステープの調査データからステープの受ける最大熱負荷量は $42 \text{ kJ/m}^2\text{h}$ 以上とみられ，表面は溶融している。

我が国におけるステープ本体の設備改善例を以下に示す。

- ① ソ連のオリジナル技術を踏襲し，蒸発冷却を行った。（1969～1972年）
- ② 鋳込みパイプを直角曲げに改善し，強制循環冷却を採用した。（1972～1976年）

③ 高熱負荷世代のステーブにコーナパイプおよび背面蛇管を増設した。(1977～1985年)

④ 壁レンガをステーブと一体鋳造にした。(1985年～現在)

2) ステーブ冷却システム

ステーブの冷却水循環システムは、1969～1972年のステーブ導入期には自然蒸発冷却式であり、1973年頃に一時的に温水強制循環式が採用され、1975年頃からは冷純水強制循環式が多くの高炉で採用されている。

(3) 鉄皮

耐火物、冷却設備とともに重要なのは鉄皮である。鉄皮亀裂には各高炉とも大いに悩まれ、高炉の大型化、高圧化にともなってますます深刻の度を深めていった。

1975年に日本鉄鋼協会内に高炉鉄皮亀裂対策小委員会が設けられ高い成果を上げたが、この活動を起点として各社の鉄皮亀裂対策研究がいっそう進められた。

1) 鉄皮亀裂発生要因

川崎製鉄(株)水島2高炉(2次)の亀裂鉄皮を調査したところ、鉄皮の材料組織および形状の変化について次のような事実が判明した。

- ① 鉄皮内面に浸炭層が見られ、その深さは1～3mmである。浸炭層のビッカース硬さは600～800である。
- ② 浸炭層の内側には熱影響部が存在する。
- ③ 深い亀裂の先端には塑性変形が生じている。
- ④ 亀裂破面はすべて脆性破面である。
- ⑤ ステーブが消失し、鉄皮内面が露出した部位に亀裂が発生している。
- ⑥ 亀裂は鉄皮開孔部間を結ぶ方向に走っている。

これらの事実から鉄皮亀裂の発生は、主に以下の3点が深く関わっていることが確認された。

- i 鉄皮は多数の開孔部を有し、炉内圧によって開口部周辺に高い集中応力が派生する。
- ii 熱影響部には降伏点を超える高い熱応力が発生し、鉄皮に塑性変形を起こさせる。
- iii 浸炭による材質劣化が起こる。特に浸炭は750℃を超えると急速に進行する。高炉ガス温度とガス組成の関係および鉄皮亀裂多発生部位について調べると Fig 2.40 のようになる。同図において亀裂が多発する部位は、浸炭が進み得る条件でかつ炉体冷却設備が損耗する部位であることが分かる。鉄皮内面に浸炭層が形成されると材料の硬度が上り、靱性が著しく低下する。この浸炭層部分に前述した高い応力が加わることで、容易に亀裂が発生する。

2) 鉄皮亀裂防止対策と技術課題

高い熱負荷と浸炭雰囲気の中で鉄皮亀裂を防止することは、現在の技術水準では不可能に近い。本質的には耐火物、冷却設備の機能を向上させ、鉄皮に過大な熱負荷と高温ガスを作用させないことが長寿命化につながる。

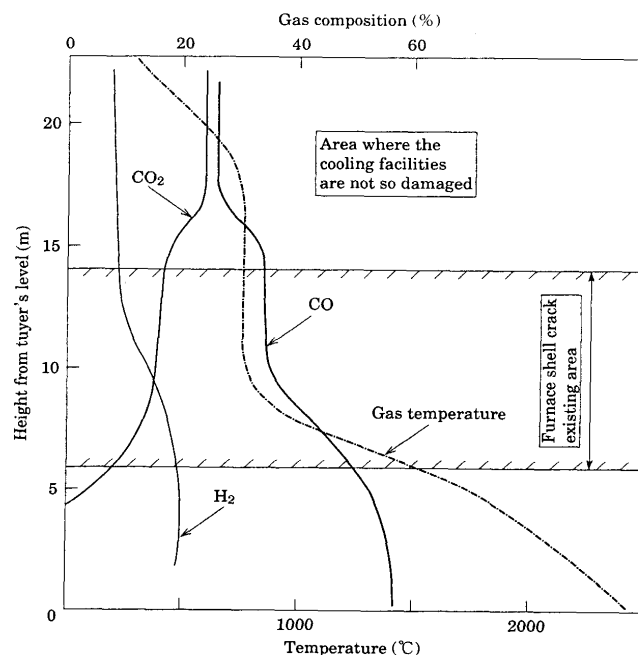


Fig. 2.40. Relation between furnace shell cracks and distribution of furnace gas temperature and its composition.

(4) 炉体補修技術

炉命延長のための炉体補修技術は近年著しく進歩した。炉命7～8年を越える高炉に、従来炉命律速とはならなかった炉口およびシャフト上部に損傷が見られるようになった。高度経済成長期の重油吹込みを伴う高出鉄比指向の高炉には、過冷却防止の観点からシャフト上部に冷却設備を設けていなかった。それらの高炉は、長年の操業でシャフト上部の耐火物が損耗あるいは脱落し、炉壁プロフィールが乱れ、操業に悪影響を及ぼすようになり、しかも、鉄皮が炉内に露出するようになった。この対策として操業中の高炉のシャフト上部炉壁に耐火キャストブルを吹付ける技術、耐火物パネルあるいはステーブを取り付ける技術が確立され、炉体の長寿命化に寄与している。最近改修した高炉は、シャフト上部(炉口金物下)までステーブあるいは冷却盤が取り付けられている。

2.10.2 コークス炉の長寿命化

鉄鋼各社のコークス炉は、平均炉命においてすでに25年に達している。現行のコークス炉の寿命を仮に35年と想定すると、21世紀初頭には約半数のコークス炉が、順次設備寿命を迎えることになる。

コークス炉の更新には膨大な投資を伴うことから、その延命ニーズは極めて高い。鉄鋼各社は、定期的な炉体診断と診断結果に基づくきめ細かな日常炉体補修を実施することにより、コークス炉の長寿命化を図ってきた。以下に長寿命対策の概要を述べる。

(1) 長寿命化の考え方

老令炉をさらに延命するには、熱的・機械的外乱を今まで

以上に抑止することが重要であり、そのために以下の3点を長寿命化の基本的な考え方としている。

1) 炉令に応じた操業設計

最大の外乱は押詰まりであり、老令化すればするほど押詰まり回避が必要である。そのためには、装入炭の嵩密度、収縮量などの性状管理および炉壁カーボン管理の強化が重要である。

2) 定期的な炉体診断

炉体の劣化・変形は緩慢であるが、確実に進行する。定期的に定量診断し、長期的な視点からその傾向を見極めるとともに、操業設計などに反映させることが重要である。

3) きめ細かな操業管理と炉体保全

炉の機密性保持と炉体金物の締め付け維持が必要で、そのためには炉温管理、炭化室の壁面管理などの日常管理をより強化するとともに、劣化部位の補修周期を見直し、より計画的な炉体修理の実施が重要である。

(2) 炉体診断技術

コークス炉の劣化は、炉令で20年前後から炭化室の欠損や燃焼系統の不具合による生産阻害、環境悪化、メンテナンスコストの増大が見られてくる。特にコークス炉の炭化壁は

最も過酷な条件下にあることから、炉令の律速要因と考え、レンガの薄肉化と貫通した縦亀裂長を炉壁劣化の重要な指標としている。

従来の炭化壁診断では、炉外からの目視による外観観察で実施していたが、例えば川崎製鉄(株)水島製鉄所の1,2コークス炉で開発された炭化室ITVにより、全壁面を自動的にモニタリングすることが可能となり、劣化の指標として経時変化の把握に活用している。

炭化室プロフィールの変形も、押出し性や目地切れによる環境悪化に大きな影響を与えられ、定期的なプロフィール測定や煙道煤塵濃度の計測を実施し傾向管理している。

(3) 炉体補修技術

前述した診断技術と一体となった炉体修理により、劣化の加速は抑止できる。炉体修理は溶射補修法が主流となっている。従来の溶射補修は、熟練した炉修作業員による補修技術が必要としたが、現在は、自動化や長尺ランス化などの改良が実施され、溶射補修のスキルレス化が図られつつある。また、熱間積替補修の大規模修理も各社で実施されており、さらなる延命が期待される。

2.11 新製鉄法への始動

2.11.1 まえがき

溶融還元法とは溶融状態の鉄鉱石の還元を取り入れた銑鉄または鋼の製造法である。

高炉でも溶融還元が起こるがその割合は少なく、溶融還元というよりは融着帯を形成する半溶融還元なので、高炉は溶融還元法の仲間には入らない。つまり溶融還元法は高炉によらない鉄鉱石還元法の一つである。

2.11.2 背景

高炉は溶銑を製造する優れた炉であり、世界各地で大規模なものから小規模なものまで稼働している。しかし、高炉はコークスを使用しないと操業できないので、粘結炭の入手はむずかしいが非粘結炭や天然ガスなどが豊富に得られる地域では、これらを使用して高炉によらない方法で鉄鋼を製造している。シャフト炉やロータリーキルンによる還元鉄の製造はその代表的な例である。還元シャフト炉にガス化・溶解炉を組み合わせたCOREX法もこれらの一つであり、非粘結炭を使用して溶銑を製造している。いずれも小～中規模(年産60万t程度まで)のものである。

溶融還元法は、小規模で実用化されたものもあるが、開発中の方法である。今後のエネルギー情勢を考えると、いくつかのアイデアのなかで非粘結炭を直接使用(電力に変換して電気炉を用いる方法ではなく)する方法が世界の大方の地域

で有力視されるようになった。この方法には、溶融還元鉄浴を使用する方法や石炭の流動層を使用する方法などいくつかの方法がある。いずれも非粘結炭の直接使用に加えて、溶融状態の鉄鉱石の還元速度が固体の鉄鉱石のガス還元速度に比べて数倍速いことから溶融還元炉そのものの設備を小さくできる、全体としても高炉法や還元鉄製造法のような現存する高炉によらない鉄鋼製造法に比べて設備が小さくなることを期待できそうである。さらに、工程省略によるエネルギーの節減・炭酸ガス発生量の低減、工程が短く稼働休止が容易になり生産や品種に応じた臨機応変な運転が可能になりそうなので、この溶融還元法に注目が集まっている。ここでは日産数百tの規模で最近実験が行われている鉄浴を使用する方法を中心に説明することにした。

2.11.3 理論とその応用上の課題

溶融還元法の反応や相変化は、溶融している酸化鉄の還元、固体の酸化鉄の還元、スラグによるメタルの精錬、アルカリや硫黄の循環など、個々には高炉の中で起こるものと変わらない。しかし、高炉とは原燃料の辿る温度、時間、酸素のポテンシャルなど異なるところがある。また、ミクロにもマクロにも物理的な状態が異なるところがある。例えば、鉄浴の溶融還元はFig. 2.41のように流動性の良い浴の中で溶融状態の酸化鉄が溶鉄中の炭素とチャー中の炭素によって還元されるが、この反応に関しては不明な点が多く残されている。