



高炉耐火物とその診断技術の進歩

田 村 節 夫*

Development of Blast Furnace Refractories and Measuring Methods for Their Erosion

Setso TAMURA

1. はじめに

近年、高炉耐火物に対する関心はとみに高まっております。吹き止め後の解体調査や、稼動中の高炉における測定データなどから、耐火物の損傷機構や、操業に与える影響が明らかにされつつある。

本報では、これらの調査・研究結果をもとに、炉体寿命延長の観点から国内における高炉耐火物技術の動向を紹介する。

なお、すでに高炉の寿命延長¹⁾あるいは高炉耐火物^{2)~4)}に関するすぐれた解説があるが、ここではそれ以降得られたデータをまじえて、主として耐火物の損傷機構、材質・構造選定の考え方および最近の耐火物侵食診断技術について概説する。

2. 高炉における耐火物の損傷形態および対策

高炉耐火物損傷プロファイルの一例として、ステープ高炉の解体調査結果を図1に示した。

シャフト上・中部のれんがはステープに支えられて残存しているが、シャフト下部から朝顔にかけてのれんがは完全に消失しており、露出したステープは高熱負荷部で損耗し、場所によつては炉内物が直接鉄皮と接するなど、きわめて苛酷な条件にあつたことがわかる。

一方、羽ロレベルより下部の湯溜り・炉底においては、上部カーボンブロックから炉底シャモットれんがにかけて脆化層[†]が形成され、炉底コーナー部では鉄皮側に深く食い込んだ異常侵食が認められるが、これらは最近の大型高炉における炉底侵食の一般的特徴である。

以下に、高炉の各部位ごとの耐火物の損傷形態およびそれに対する耐火物材質の選定、構造の考え方について述べる。

2.1 炉壁耐火物の損傷機構

炉壁耐火物の損傷機構については従来より多くの報告があり、通常、化学的要因と物理的要因とに分けて議論されることが多い。

化学的侵食の主原因と考えられているアルカリ、亜鉛

の蒸気は CO 存在下で、 K_2O あるいは ZnO として、炉壁れんが内に沈積する。シャモットれんがなどアルミナ・シリカ系れんがの場合、 K_2O との反応により $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ (Sanidine)、 $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ (Leucite)、 $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (Kalsilite) などのアルカリ珪酸化合物を生成し、膨潤により組織劣化をひきおこすと考えられる⁵⁾⁶⁾。

ナトリウムは量的には少ないが、カリウムと同様な挙動をとると考えられている。亜鉛は主として付着物とれんがの界面、れんがの気孔あるいはき裂に侵入し $ZnO \cdot Al_2O_3$ (Gahnite)、 $2ZnO \cdot SiO_2$ (Willemite) を形成する。

これらとは別に、鉄存在下での CO の分解によるカーボンの沈積⁷⁾ や炉壁下部での溶銹・滓との反応も化学

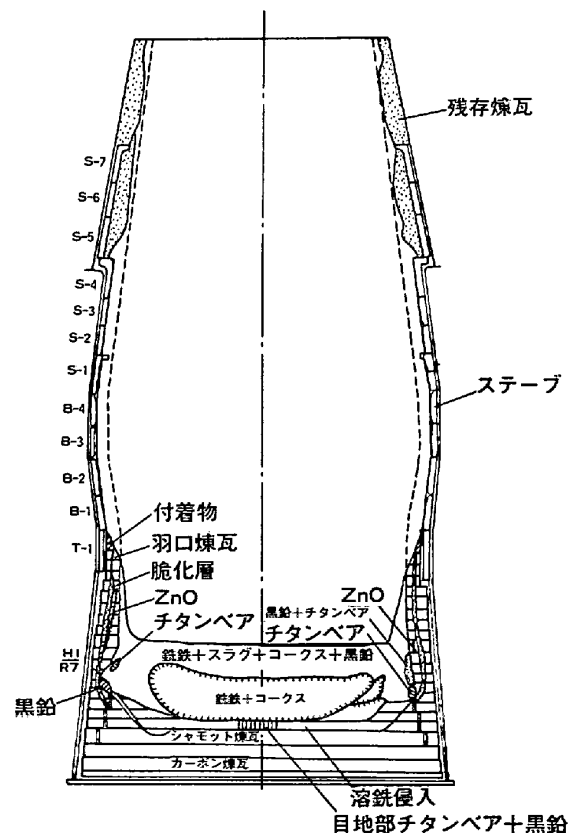


図1 高炉耐火物損傷プロファイル
(加古川2高炉1次)

[†] 一種の変質あるいは組織劣化層であり、稼動面に平行に層状に生成する場合が多い。これについては炉底耐火物の項で詳述する。

昭和 57 年 3 月 31 日受付 (Received Mar. 31, 1982) (依頼解説)

* (株)神戸製鋼所 (Kobe Steel, Ltd., 1-3-8 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

的侵食の原因とされている。

一方、れんが内に生ずる熱応力や、拘束による構造的応力もれんが破壊・脱落の原因となっており、炉壁れんがの損傷規模としては、むしろ化学的侵食よりも重要である。

このような内部応力に対してはれんが材質のほかに、目地厚、膨脹吸収代の設定、冷却条件あるいはれんが支持機構などの構造的要因と、火入れ後の立ち上がり条件、ガス流れ、付着物の脱落、スリップなどの操業に絡む熱的要因の影響が考えられ、実炉や試験室において確認試験が実施されている^{8)~12)}。

また、炉壁れんがの支持形態によつてもれんがの損耗状況は異なる。たとえば、ステープ高炉の場合、図2(a)に示したようにステープ鋳物突起部でその上部のれんがを支持するが、突起部が溶損したり、その直上のれんがが損耗した場合には、それより上部のれんがは周方向のせりで保持されるだけで、きわめて不安定となり、何らかの衝撃を受けてブロック単位で脱落するおそれがある。

れんが支持機能を強化するために突起部長さを増したり突起部ピッチを細かくすることも考えられるが、突起部前面のれんがが積みが不安定であるため脱落しやすく、露出した突起部の損傷が早まるなど二律背反的側面を有する。これに対して、冷却盤高炉の場合には、細かいピッチでの設置が可能であり、破損時には取り替えができるためブロックごとのれんがの脱落は少ない。

れんが厚が冷却盤長さ以下になると、それ以降の損耗は緩和され、比較的長期にわたつてれんがが残存するといわれている¹⁾。しかしながら、ステープと冷却盤の選択は単にれんがの支持機構だけでなく、れんがの冷却効果、れんが脱落後の鉄皮保護機能、付着物の形成などによる操業への影響あるいは保守の容易さなどの面から検討され、各高炉の条件に適合した方式が採用されている。

高炉装入物は層状構造を維持しながら順次降下してゆが、このとき装入物降下によるれんがとの相互作用も

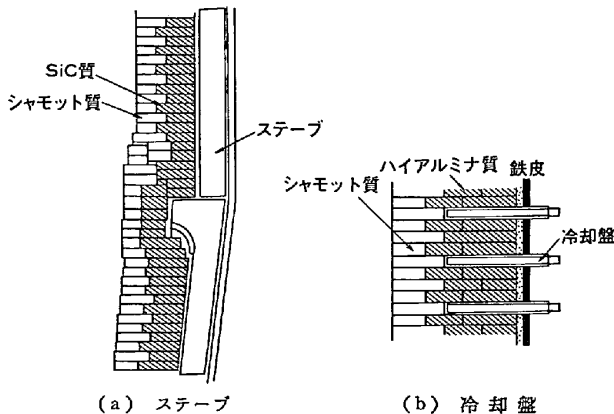


図2 炉壁れんが支持構造

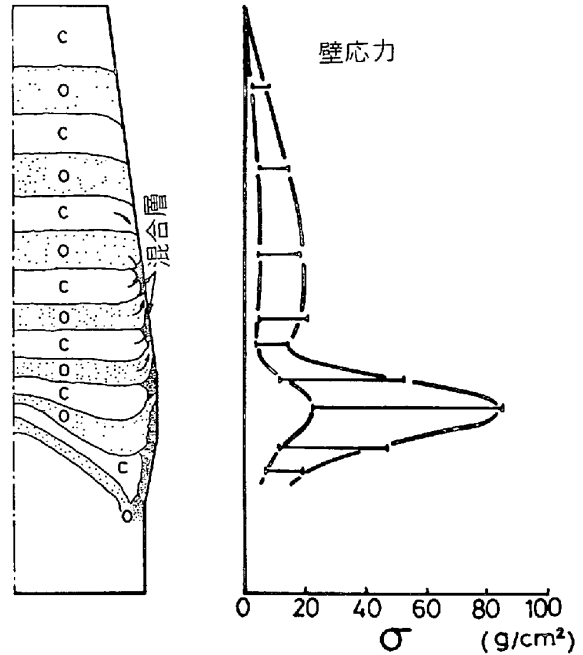


図3 装入物降下時の壁応力, σ_w

無視できない。図3は大型高炉の1/20模型の炉壁に埋設した土圧計を用いて装入物降下時の壁応力を測定した結果を示すが¹³⁾、この値はシャフト下部から急速に大きくなり、炉腹部で著しいピークが現れる。

これは、炉腹部での壁面抵抗の上昇を意味しており、装入物降下による磨耗、軟化溶融物と炉壁れんがとの反応促進さらには付着力増大によるれんがの炉内側への引き込みなど、れんが損傷への影響の大きさがうかがわれる。

一方炉壁上部においては壁応力はさほど大きくないが、塊状装入物との摩擦力は大きく、特に炉況悪化時にスリップが多発する場合には、機械的、熱的衝撃も加わり、摩耗、割れ、脱落の原因ともなる。

2.2 炉壁耐火物の考え方

炉壁れんがの不連続な損耗は装入物の層状降下に乱れを生じさせ、混合層や停滞層の形成により炉況悪化の原因となっており¹⁴⁾¹⁵⁾、さらには炉命を決定する要因ともなりかねない。これに対し最近では、実炉での使用条件を反映させた品質評価方法や特性試験方法の開発、これに応じたれんが材質・築炉法の改善あるいは設備、操業面からの検討により、炉壁れんがの寿命延長がはかられている。化学的侵食の面から従来よりもつとも重視されてきた耐アルカリ性については、炭珪質れんががもつともすぐれており、また $Al_2O_3-SiO_2$ 系では Al_2O_3 含有率が高いほど膨潤あるいは強度低下が小さく、純アルミナ質の場合には、 β -アルミナの生成による体積膨脹が著しい¹⁶⁾。

れんがの熱応力による破壊現象究明のために、モデル炉による試験が行われ、その機構については有限要素法を用いた解析がなされているが、解析上必要な高温荷重

下での物性データが少なく、あるいは信頼性に乏しいため、必ずしも現象を完全に説明できるまでには至っていない。しかしながら最近、改良された試験装置や AE (Acoustic Emission) 装置を用いて、高温荷重下でのれんがの変形挙動、破壊特性が研究され、興味深い知見が得られている^{17)~19)}。耐アルカリ性にすぐれた炭珪質れんがは、弾性率の高いものの、高熱伝導・低膨脹性であることから、適切な冷却条件下においては熱応力に対しても有利と考えられる。

また、高アルミナ質れんがも冷却盤と組み合わせて炉壁に使用され、好成績をおさめている¹⁾。

このほか、操業面からは壁面での温度変動、高温化を抑制するために、中心流指向の炉況安定化に努力が払われている。また炉体寿命延長および炉壁における適正プロフィール維持を目的として、炉壁損傷部位への鉄皮からのモルタル圧入²⁰⁾、あるいは炉口から挿入した吹き付け機によるキャストブル吹き付け補修²¹⁾²²⁾などが試みられている。従来から、炉底耐火物とともに、炉壁耐火物の損傷が高炉寿命を規制する大きな要因の一つであったが最近の損傷機構の解明とその部位に適した耐火物材質の選択ならびに、炉体冷却技術、炉内ガス流制御技術、中間補修技術などの進歩により、その問題は解決されつつある。

2.3 炉底耐火物の損傷機構

湯溜り・炉底における耐火物損傷の特徴は、前述のように炉底コーナー部での異常侵食と、側壁から炉底にかけての脆化層の生成である。これらの詳細を図4に示した。湯溜り上部カーボンブロックの侵食は小さく、残存厚はほぼ原寸かむしろ若干膨脹気味であるが、出銃ロレベルより下方では、鉄皮側に大きく湾曲した侵食プロフィールを示す。この侵食線にほぼ並行して脆化層の生成が認められ、最大侵食部付近では場所によつてはカーボンブロック背面に達する場合もある。また脆化層は、カーボン、シャモットれんがあるいはスタンプ部を問わず、連続して発生している。脆化層は外観的には、層状き裂部、多孔質部、粉化部、隣接ブロックと全く一体化した固着部あるいは空洞部などに区分できるほか、脆化の前段階と考えられる単なるき裂のみの場合もあり、その内容はさまざまである。また脆化層への侵入成分としては、アルカリ、亜鉛、鉄が主であるが、侵入量は場所によつて大きく異なり、全く存在しない場合もある。

亜鉛は湯溜り部以上で、酸化亜鉛の形で存在し、数mm厚の結晶層として観察される場合もある。

鉄は主として、出銃ロレベル以下の脆化層より炉内側の部分に侵入している。

このほか、カーボンブロックの膨潤や、脆化層あるいはき裂を境界とするブロックのずれが認められることもある²³⁾。他の解体調査においてもほぼ同様の現象が報告されている。

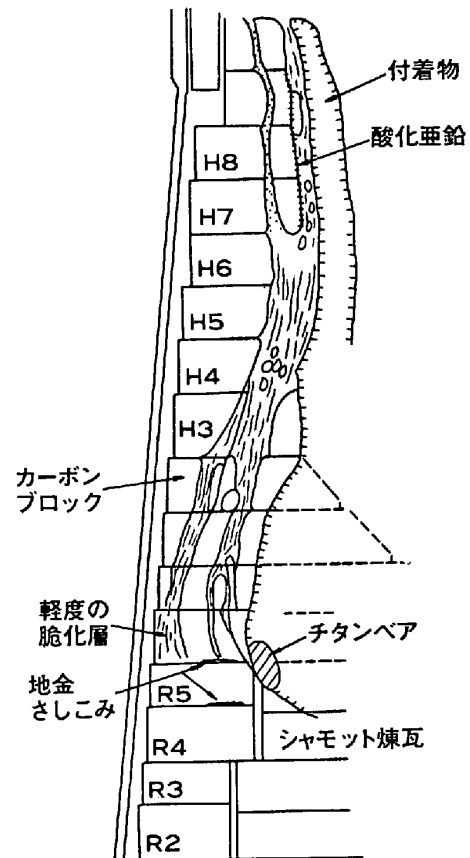


図4 炉底損傷プロフィール (加古川2高炉1次)

以上述べたように、高炉炉底部においてはいくつかの特徴的な損傷形態が存在するが、その機構については十分解明されているとはいえ、れんが材質や炉底構造を検討するうえで大きな障害となっている。

ここで、損耗形態を、(1)脆化層の生成、(2)耐火物の損耗および(3)炉底コーナー部での異常侵食にわけ、それぞれについて、これまで提出されている損傷機構^{24)~30)}についての考え方をまとめてみた。

まず脆化層の生成に対しては、アルカリ・亜鉛との反応による膨潤、水蒸気による酸化、あるいは熱応力、機械的応力によるき裂の発生、組織の破壊などが基本的要因とされており、これらが単独にあるいは相互に関連しながら、長期にわたつて図5に示した径路を繰り返したる過程で、段階的に脆化が進行するものと考えられる。

脆化層には種々の形態があり、外来成分の侵入状況にも差異があることはすでに述べたが、これは、それぞれに段階の異なつた脆化状況が露呈されたものと考えべきであろう。脆化過程の繰り返しに対して、ほとんどの場合、温度変動が関係していることは注目に値する。

最近、高炉炉底の1/4規模のモデル炉における加熱・冷却試験³¹⁾や温度勾配下でのカーボンれんがとアルカリ、亜鉛との反応試験³⁰⁾などにみられるように、脆化層再現の試みがなされており、熱応力によるき裂の発生機

構あるいはアルカリ、亜鉛の沈積・逸脱によるカーボレンが組織の劣化機構がしだいに明らかにされつつある。

次に、炉底中央部における軸方向への侵食は、火入れ後の比較的早い時期に急速に進行する場合が多く¹⁾³²⁾、溶銑差し込みによるれんが浮上が主原因と考えられる。

しかしながら、底板側からの冷却により、ある平衡深さで侵食は停止するため、特に問題視されていない。

一方、炉底側壁方向への損耗は、コーナー部での異常侵食にみられるようにきわめて重大であり、特に側壁カーボンブロックの損耗機構については、従来より多くの

研究結果が報告されている。

損耗の形態としては、図6に示したように、主として溶銑による溶損、摩耗およびき裂部などからの剝離、浮上に大別することができる。炉底に滴下する溶銑はカーボン未飽和と考えられており²⁾³³⁾、これが炉底部にまで流動してくると、カーボンブロックは溶解により、ブロック表面あるいは内部マトリックス部から侵食される。

溶銑のカーボン未飽和は温度変化による溶解度の変化や装入物の生下りなどによっても起こりうる。

また解体れんが試料の調査からも明らかなように溶銑はれんがの微小気孔(1~2 μ)にまで侵入しており²⁵⁾³⁴⁾、凝固・溶解にともなう体積変化はマトリックス部の組織破壊につながるといわれている。

溶銑流動原因としては、出銑によるもののほかに、生下りによる攪拌、温度勾配あるいは濃度勾配に起因する溶銑の対流³⁵⁾などが考えられている。

脆化層あるいはき裂の生成は、特に残存厚が小さい場合に、これより炉内側の部分の剝離の原因となり、また断熱層として作用する場合には、外部からの冷却効果が失われ、炉内側ブロックの溶損を促進することも考えられる²⁷⁾²⁹⁾。

最後に、炉底コーナー部での異常侵食の原因については、炉底側壁に沿った溶銑周辺流の発達によるものと考えられている。周辺流の存在は、解体後の観察³⁶⁾、吹き止め前に装入したトレーサーの分布調査³⁷⁾、稼動高炉において羽口より投入したトレーサーの排出速度の測定³⁸⁾あるいは炉底れんが温度の変化、から推定されたものであり、その大きさは、炉底構造、生産速度あるいは炉況に依存するとされている。すなわち、炉底部での溶銑深さが十分でない場合には、いわゆる炉芯コークスに働く浮力は小さいため、コークスは最下部まで密に充填され、炉芯部を通過する溶銑流が抑制される。また、炉況

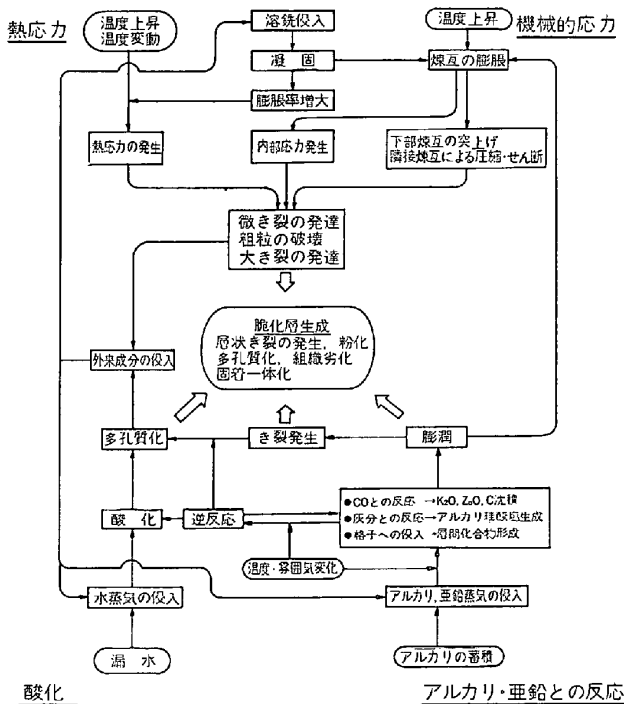
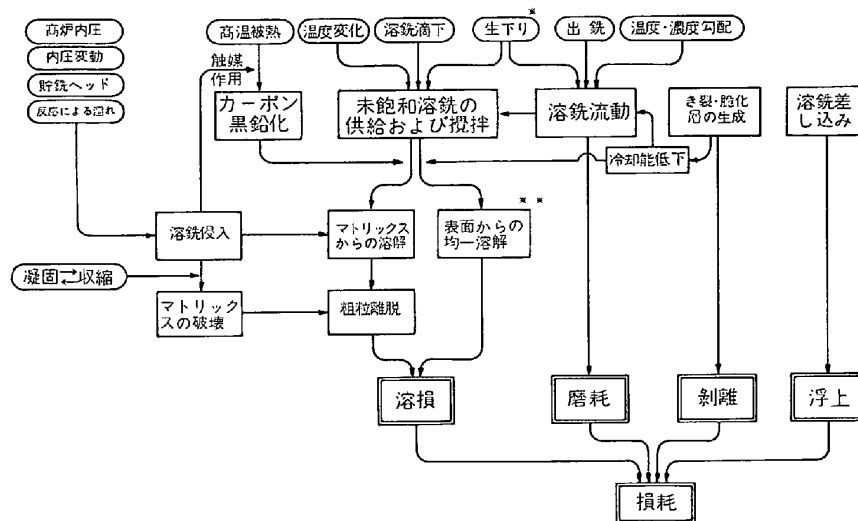


図5 炉底カーボンブロックの脆化機構



* 生下り=装入原料が未還元のまま湯溜り部へ降下する現象で、溶銑中カーボンと激しく反応すると考えられている。
 ** カーボン銘柄によっては骨材が選択的に溶解することもある。

図6 炉底カーボンブロックの損耗機構

悪化や減産などにより炉底への熱の供給が低下した場合には、下部からの冷却により凝固層が形成され、いわゆる炉底隆起の状態となり、やはり中心流はおさえられて周辺流が優勢となる。いつたん周辺流が形成されると、周辺部では熱負荷が増大するとともにカーボンブロックの侵食が進み、一方炉芯部ではさらに冷却されて凝固範囲が拡大するため、ますます周辺流が発達し、カーボンブロックの溶損は加速度的に進行するものと考えられる。

2.4 炉底耐火物損傷防止対策

炉底耐火物の最大の問題はコーナー部での異常侵食である。これを防止するためには、設備・操業両面からの検討および対策が不可欠である。

設備面では、まず最適のれんが材質を選択する必要があるが、これには次のような問題がある。

特にカーボンブロックの材質選定において、(1)脆化層生成機構の解明が不十分であるため、これに対して必要なれんが物性が確定されないこと、(2)これまで部分的に知られている脆化機構に対して要求される物性と耐溶銑性から要求される物性を同時に具備したれんがが現段階では開発されておらず、銘柄によつて一長一短があること、さらにこの場合、(3)コーナー部異常侵食に対する溶損と脆化の寄与の程度あるいは両者の相互関係が明らかでないため、どちらに対してすぐれた性質を備えた銘柄を選定すべきか、判断がむずかしいこと、あるいは(4)品質評価のための試験方法が確立されていないこと、などである。たとえば、現在高炉で使用されているカーボンブロックは、原料によつて無煙炭質と人造黒鉛質とに分けられるが、無煙炭質は耐溶銑性にすぐれている反面、耐アルカリ性、熱伝導性に関しては黒鉛質に劣っており、コーナー部での異常侵食機構をいかに仮定するかによつて選定すべき材質が違ってくる。

また各銘柄間の品質比較のために通常、加速試験が実施されているが、試験法としての妥当性や試験結果の解釈については議論が分かれることが多い。

このように、材質選定には多くの困難がともない、その基準の確立が現在模索されている。脆化層の生成に比較して溶銑に対する侵食機構の解明はかなり進んでおり、最近のカーボンブロック品質の改善も耐溶銑性の向

上に主眼が置かれている。たとえばマトリックス部の先行溶損防止を目的として、溶銑に対して難溶性の微粉原料の添加³⁹⁾、焼成反応生成物の形成³⁹⁾あるいはタールなどの含滲⁴⁰⁾による気孔の細孔径化などの改善がはかられ、一部は製品化されている。

製造されたれんがは品質、外観性状とも安定したものでなければならぬが、このためには製造過程あるいは製品の受入過程における品質管理体制を確立するとともに、適当な欠陥検査方法の開発が望まれる⁴¹⁾。

一方、炉底構造については、側壁から炉芯部に向かう滑らかな侵食線を形成させるために、温度分布、応力分布あるいは溶銑流動の面からさまざまな検討がなされているが、統一的な考え方はなく、各社でさまざまな試みがなされている。

たとえば炉底中央部におけるれんが構成は、オールカーボンの冷却型とシャモット+カーボンの組みあわせによる保温型とに大別される。一般に保温型構造における最終侵食深さは冷却型に比較して大きい。貯銑深さ確保のため、初めからある程度の侵食を期待して設計される場合もあり、一概に優劣は論じられない。

有限要素法による応力計算は、れんが物性や炉内境界条件に関するデータの不足もさることながら、れんが目地の取り扱いなど、手法上の問題もあり、完全に実用化されるまでに至っていない。

操業面からは、炉底温度管理を木目細かく行いながら、必要に応じて、(1)底板下冷却水の調節、(2)側壁鉄皮スケール清掃による散水冷却能の確保、(3)側壁からの定期的なモルタル圧入、(4)出銑口深度の延長あるいは(5)出銑口からのガス漏れ防止対策などが実施されている。

炉底侵食が進んだ操業末期には、(6)装入 TiO_2 の増加、(7)高温部への散水強化、(8)低溶銑温度操業、(9)盲羽口の採用、(10)減風・休風などが、そのときの炉底れんがの温度状態によつて段階的に実施されている⁴²⁾⁻⁴⁴⁾。

しかしながら、これらの対策とその効果の程度については必ずしも定量的な関係は把握されておらず、今後の課題として残されている。

表 1 高炉耐火物侵食診断技術

計測の目的	計測方法	備 考	
耐火物の侵食診断	熱電対法	測定法は確立しているが、測定点が限られ、炉内温度に依存する。	
	赤外線サーモグラフィ法	温度をパターンとしてとらえる方法。炉内温度に依存する。	
	熱流計法	測定点が限られ炉内温度に依存する。	
	トリガーレスポンス法	壁厚の測定が行える	壁厚の増加はとえられない 1点計測である 通常操業時の測定は困難
	電位パルス法		
	R I埋め込み法		
	ポーリング		

3. 高炉耐火物の侵食診断技術

稼動中の高炉において、耐化物の侵食量を継続的に計測することができるならば、炉体管理および操業管理を行ううえできわめて有用であり、また、そこから得られる情報は、次期改修時における炉構造や耐火物の選定に反映できるなど、炉体寿命向上の有力な手段となる。

このため高炉耐火物の侵食量を計測解析する診断技術の開発が行われ、実用化されてきた(表1)。

従来は、高炉各部位の所定位置に放射性同位元素(RI)を埋めこみ、溶銑中のRI上昇などから脱落を検知し、耐火物の侵食を確認する方法もとられていたが、RIの管理あるいは分析、解析の困難さから、現在ではほとんど用いられていない。

最近では炉体の各所に温度計を設置し、測温結果をもとに伝熱計算によつて侵食量を推定する方法が、もつとも一般的である。このため、高炉1基あたり数十点から数百点もの温度計が設置されている¹⁾。しかし、伝熱解析による方法では耐火物の物性値や炉内温度などの境界条件が必要であるが、一般的にはこれらを仮定して解析がなされており、耐火物物性の経時変化や炉内温度の変動、さらには温度計の出力劣化などのために長期にわたつて信頼性の高い侵食量の推定を行うことは困難な場合が多い。

これらの問題点を解決するために、新しい計測センサや計測解析法、さらには総合的な炉体管理システムの開発が進められている。ここでは、高炉の炉壁、炉底の各部について、これらの技術のいくつかを紹介する。

3.1 炉壁の耐火物侵食診断

シャフト部から朝顔部にかけての炉壁耐火物の損傷は、冷却盤やステーブなどの冷却設備の破損、ひいては鉄皮き裂の原因ともなるため、通常、壁面を上昇するガス温度(スキンフロー温度)、冷却盤排水温度、ステーブ温度、鉄皮温度あるいは耐火物温度などによる温度管理が行われている。

これに対し、耐火物物性の経時変化、センサの劣化あるいは伝熱条件の変動に左右されずに直接的に耐火物の侵食状況を計測する技術の開発が進められ、たとえば、ED(Electrical Diagnosis)センサによる電位パルス法⁴⁵⁾、FMT(Sheathed Fine Multiple Thermocouple)センサを用いたトリガーレスポンス法⁴⁶⁾として報告されている。

電位パルス法は、図7に示したように、耐火物内に同軸ケーブル状のEDセンサを埋設し、ステップパルスの反射時間と伝送速度からケーブル長さを測定し耐化物厚を求める方法である。この方法は、小倉2高炉シャフト部および炉底部に採用され、RIの脱落状況とよく一致したと報告されている⁴⁵⁾。

一方、トリガーレスポンス法による耐火物の侵食診断

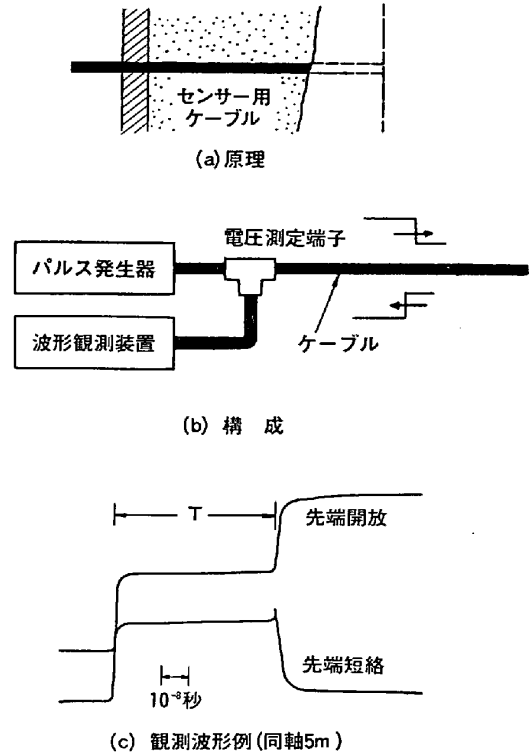


図7 電位パルス応答法

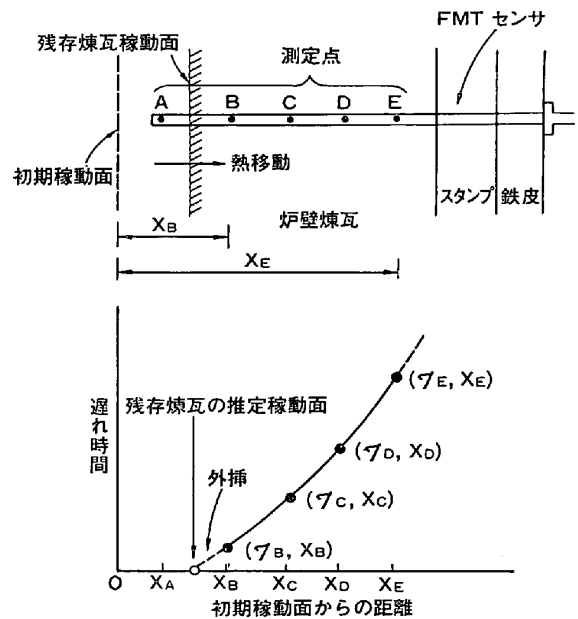


図8 トリガーレスポンス法

法は、図8に示したように、長さの異なる複数本の熱電対を内包するシース(FMTセンサ)を耐火物内に埋設し、炉内に生じた熱的変動(トリガー信号)に対して、壁厚方向の各点で見られる温度変動(レスポンス信号)の伝播遅れから耐火物厚さを解析する技術である。

この方法では、耐火物内の温度の相対変化が用いられているので、高温下で長時間使用してFMTセンサの出力が劣化したとしても、解析結果に影響を与えないという特徴を有する。

3.2 炉底の耐火物侵食診断

炉底耐火物が侵食された場合、現在のところ適切な補修方法がなく、さらには炉底破損の大事故にもつながることから、炉底耐火物の侵食プロファイルの推定は炉壁以上に重要である。

このためには、直接的でかつ信頼性の高い侵食診断技術が必要であるが、センサを炉内側に深く設置することは、センサを通じての溶銑流出の危険性があり、現在では一部で電位パルス法の適用が報告されているにすぎない⁴⁷⁾。

その他の高炉では、炉底外周部での温度分布や熱流分布の測定から伝熱工学的解析により、内部の温度分布を推定する間接的手法が依然として主流である。通常、溶銑の凝固温度の等温線を求めて侵食プロファイルとしている。

炉底中央部では、炉底側壁からの冷却の影響は少ないと考えられるので1次元の定常熱伝導のモデルを仮定することが可能であり、深さの異なる位置に温度計を設置してその指示値の外挿から侵食ラインを求める方法が用いられている。この他にも電導紙による相似実験⁴⁸⁾や炉底冷却パイプの熱負荷から平均的プロファイルを求める方法⁴⁹⁾も、炉底中心部では有効であると報告されている。

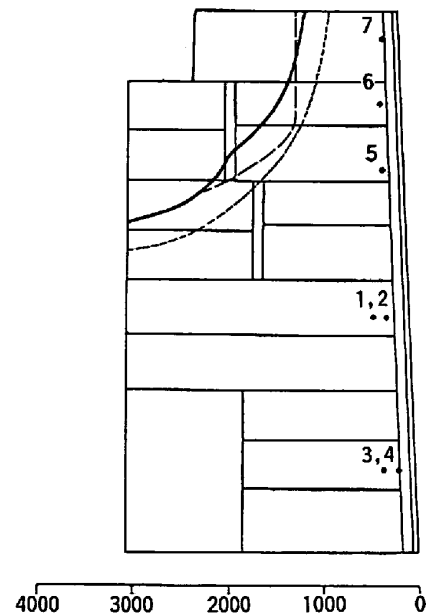
側壁上部においても近似的に1次元伝熱解析の適用が可能であり、カーボンブロック背面に設置された温度計や鉄皮に設置された熱流計による測定値から侵食プロファイルの推定が行われている。

熱流計による方法は、散水冷却されている炉壁を通過する熱流束の測定値とあらかじめ耐火物、鉄皮などの熱伝導率を仮定して鉄皮表面における放散熱流束を残存耐火物厚さの関数として計算した結果との対応により耐火物厚を推定する。熱流測定は炉熱管理上からも有効であるが、熱流計設置による熱擾乱や鉄皮との密着性が問題となり、水浸型熱流計⁵⁰⁾や水だめプレート式⁵¹⁾などが開発されている。

一方、異常侵食が認められ、侵食管理がもつとも切実に要求される炉底コーナー部においては、側壁と底部からの冷却のため1次元伝熱解析の適用は困難であり、これに代わって赤外線カメラによる温度パターン解析、有限要素法による2次元伝熱解析あるいはこれをもとにしたプロファイル係数法などが開発され、侵食プロファイルの推定や侵食機構の解明に活用されている。

赤外線カメラによる方法⁵²⁾は、炉底側壁の散水停止後に鉄皮表面に現れる温度パターンから侵食プロファイルを推定しようとするもので、侵食が激しいほど温度パターンに見出される異常も強調されるという考え方にもとづいている。

この方法は局所的な異常昇温部の監視や炉底埋め込み温度計の適正配置の検討にも有効であるが、実際に適用する場合には、測定用足場の確保、散水停止時間の制



— 1140°Cライン --- 800°Cライン - · - · 解体調査 ● 測温点
図9 プロファイル係数法による炉底侵食プロファイル解析例(加古川1高炉2次)

約、炉底まわりの配管、デッキなどによる撮影不可能な部位への配慮など、現場的な問題も少なくない。

炉底各部の測定データから2次元的に侵食プロファイルを推定する有限要素法においては、求めようとする侵食プロファイル自体が計算の境界条件となることから適用が困難な場合が多い。

一方、プロファイル係数法⁵³⁾は炉底コーナー部の炉内側に定めた原点から一定角度でコーナー部の侵食プロファイル(1140°Cの等温線)を等分割し、各方向における侵食量と炉底耐火物内に設置した温度計の測定値との関係式を仮定し、その係数をあらかじめ有限要素法により求めておく方法である。

この方法による推定結果と解体調査との対応を図9に示す。

炉底耐火物の侵食診断は、現状では伝熱工学的な解析手法が中心であり、耐火物の物性値や伝熱条件が不可欠なパラメータとなる。

しかし、炉底部は散水や冷却パイプによる強制冷却、炉構造や耐火物の組み合わせが複雑であるばかりでなく、多くの解体調査結果が示しているように、炉命末期になると局部侵食、耐火物の変質、耐火物内への溶銑の侵入、脆化層の生成あるいは付着物の形成など、伝熱条件の著しい変化によつて伝熱解析による侵食プロファイル推定の信頼性はきわめて乏しいものになる。

従つて、今後はこれらの変化に影響を受けない計測解析技術、さらには、脆化層などの変質層の発生と成長を把握する診断技術の開発が必要である。

またこれらの計測技術をもとに、炉体全体を監視する総合的な診断システムの開発が望まれる。

4. ま と め

高炉耐火物の損傷機構と対策、および耐火物侵食診断技術の現状について概説した。

耐火物は種々の原因によつて損傷されるが、いずれにおいても、何らかの形で炉内温度変動が関与しており、損傷の直接原因として、遠因として、あるいは加速要因として作用する。従つて、炉況の安定が耐火物損傷防止の基本であり、また逆に損傷防止が炉況の安定につながることから、耐火物の寿命延長と安定操業は不可分の関係にある。

また損傷機構の解明は、耐火物の材質・構造選定の上からも重要であり、このため損傷過程にある耐火物サンプルの解析あるいは試験室的な損傷状況の再現試験が有力な手段とならう。

診断技術については、単に侵食量の推定だけでなく、れんが内で生じる現象、たとえば、き裂の発生、れんがの変質、溶銑の侵入、付着物の形成などの検出、推定まで含めた診断技術の開発が必要である。

文 献

- 1) 加瀬正司: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 200
- 2) 平櫛敬資: 第 48, 49 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1977), p. 29
- 3) 杉田 清: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1462
- 4) 林 武志: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 841
- 5) 林 武志: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 1089
- 6) 成田貴一, 尾上俊雄, 佐藤義智, 宮本 学: 鉄と鋼, 63 (1977), S 41
- 7) 堤 秀寿, 鈴木隆夫: 住友金属, 23 (1971), p. 418
- 8) 飯山真人, 小山保二郎: 鉄と鋼, 65 (1979), S 113
- 9) 加藤一郎, 森田喜保, 樋上文範: 鉄と鋼, 65 (1979), S 605
- 10) 熊谷正人, 内村良治, 吉川文明, 河合隆成: 鉄と鋼, 67 (1981), S 61
- 11) 熊谷正人, 内村良治, 矢部 直, 中田謹司, 楠光裕, 菊込洋一, 金子憲一, 橋爪繁幸: 鉄と鋼, 67 (1981), S 778
- 12) 小山保二郎, 飯山真人: 鉄と鋼, 64 (1978), S 66
- 13) 成田貴一, 清水正賢, 山口荒太, 稲葉晋一: 鉄と鋼, 68 (1982) 8, p. 7
- 14) 稲垣憲利, 徳永正昭, 野宮好堯, 松田正義: 鉄と鋼, 67 (1981), S 25
- 15) 佐藤裕二, 杉山 喬, 中村正和, 原 行明: 鉄と鋼, 66 (1980), S 634
- 16) 平櫛敬資, 樋渡幸夫, 大川 清: 鉄と鋼, 61 (1975), S 362
- 17) 宮本 学, 尾上俊雄, 成田貴一: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 47
- 18) 熊谷正人, 内村良治, 吉川文明, 河内隆成: 鉄と鋼, 67 (1981), S 61
- 19) 加藤一郎, 森田喜保, 樋上文範: 鉄と鋼, 67 (1981), S 63
- 20) 佐々木寛太郎, 山本 強, 鈴木隆夫, 大原昭三, 猫田哲弘: 鉄と鋼, 61 (1975), S 361
- 21) 服部 健, 野城研吾, 後藤莞爾, 内山雄二, 駒木根六郎, 江刺敏郎: 鉄と鋼, 67 (1981), S 761
- 22) 太田 奨, 塩谷 靖, 高橋幸敏, 駒木俊一, 松本満, 三上頼儀: 鉄と鋼, 67 (1981), S 76
- 23) 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
- 24) 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
- 25) 島田信郎, 小山保二郎, 小林基伸, 伊沢哲夫, 池田晴一, 竹本完寛: 鉄と鋼, 63 (1977), S 50
- 26) 斎藤三男, 新谷宏隆, 江見俊彦, 大石 泉, 宮川三郎, 中井則一, 藤森寛敏: 鉄と鋼, 67 (1981), S 76
- 27) 鈴木隆夫, 大原昭三, 樋上文範, 原田幸一, 森憲治: 鉄と鋼, 67 (1981), S 765
- 28) 平櫛敬資, 樋渡幸夫, 青山和輝: 鉄と鋼, 62 (1976), S 30
- 29) 斎藤三男, 新谷宏隆, 岸高 寿, 大石 泉, 吉本正明: 鉄と鋼, 65 (1979), S 539
- 30) 斎藤三男, 新谷宏隆: 鉄と鋼, 67 (1981), S 58
- 31) 広中邦汎, 藤原昭文, 藤野真之, 太田芳男, 下村興治: 鉄と鋼, 68 (1982), S 70, 71
- 32) 山下法政, 西 紀昭, 遠藤幸平, 大庭 淳: 鉄と鋼, 61 (1975), S 360
- 33) 佐藤義智, 谷口一彦, 江上 明, 尾上俊雄, 成田貴一: 鉄と鋼, 67 (1981), S 767
- 34) 落合常巳, 池田順一, 藤原 茂, 田村信一: 鉄と鋼, 67 (1981), S 59
- 35) F. YOSHIKAWA and J. SZEKELY: Ironmaking and Steelmaking (1981) 4, p. 159
- 36) 中村 隆, 重見彰利, 斧 勝也, 鈴木 明, 仲摩博至, 茨城大学, 児玉惟孝: 鉄と鋼, 61 (1975), S 29
- 37) 西村 治, 松本敏行, 藤森寛敏, 山田孝雄, 安藤博文, 荒谷復夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S 725
- 38) 下村泰人, 九島行正, 有野俊介: 鉄と鋼, 64 (1978), S 52
- 39) 落合常巳, 池田順一, 藤原 茂, 田村信一: 鉄と鋼, 65 (1979), S 542
- 40) 鈴木隆夫, 大原昭三, 水口篤盛: 鉄と鋼, 61 (1975), S 540
- 41) 山口久雄, 鈴木隆夫, 藤原和夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S 60
- 42) 神田良雄, 小野 豊, 河内 晟, 山口良一: 鉄と鋼, 62 (1976), S 31
- 43) 山口恭嗣, 樽本四郎, 布村征司郎, 福田富也: 鉄と鋼, 66 (1980), S 123
- 44) 山田孝雄, 才野光男, 藤森寛敏, 末森 昱, 佐藤政明, 井上俊司: 鉄と鋼, 67 (1981), S 726
- 45) 白岩俊男, 阪本善保, 小林純夫, 片山 裕, 松原紀之: 鉄と鋼, 61 (1975), S 44
- 46) 小西正躬, 川手剛雄, 永井信幸, 堀内健文, 横江寛治: 鉄と鋼, 66 (1980), S 615
- 47) 元重正洋, 石川純生, 前田幸穂, 若林正人, 小山朝良, 酒井俊彦: 鉄と鋼, 67 (1981), S 779
- 48) 松永正吾, 川崎守夫: 鉄と鋼, 59 (1973), S 1605
- 49) 阪本善保, 酒井俊彦, 播木道春, 射場 毅, 森憲治, 松原紀之: 鉄と鋼, 63 (1977), S 40
- 50) 阪本善保, 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
- 51) 久保秀穂, 西山哲司, 池野 健, 田中和精, 安野元造, 中村 潔: 鉄と鋼, 65 (1979), S 538
- 52) 大野二郎: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1705
- 53) 川手剛雄, 園井英一, 横江寛治, 高野 成, 下村興治: 鉄と鋼, 67 (1981), A 29