

# 最近の高炉における計測・制御

## Measurement and Control Techniques for Recent Blast Furnace

近年の鉄鋼技術の進歩は各分野で著しいものがあるが、製鉄工程においては高炉の大形化が設備面などの技術開発により進められ、現在5,000m<sup>3</sup>級の大形高炉が稼動に入り、操業が続けられている。このように高炉が大形化し、操業技術も高度化してくると、従来の単なる管理用計装では不十分であり、各種の計測制御技術は重要な要素となってきた。更に、制御用計算機の導入と相まって炉内反応の解析や事故の早期発見、設備の予防保全などの新しい技術へと変わりつつある。本稿は、最近の高炉の計測制御について紹介する。

嶋田裕之\* Hiroshi Shimada  
 斉藤勝夫\*\* Katsuo Saito  
 今井 溥\*\*\* Hiroshi Imai  
 佐藤晃一\*\*\* Kōichi Satō

### 1 緒 言

高炉は耐火レンガで作られた縦形炉で、炉頂から原料工場より供給される鉄鉱石、焼結鉱、ペレット、石灰石などの原料と、石炭より得られるコークスを装入し、炉の下部にある羽口より1,000~1,300℃の熱風を吹き込みコークスを燃焼させ、生じたCOの高温ガスにより鉄鉱石を加熱、還元して炉底にたまった銑鉄及び銑滓を適時外部へ流出させる反応塔である。炉体レンガは炉内の熱を直接受けるため、長期間の使用に対しては冷却が不可欠であり、外周からの散水、冷却板、又は純水の蒸発熱を利用して炉体を冷却する方式がとられている。

高炉プロセスの制御対象は複雑で、特に炉内現象など十分には解決されていないのが現状である。本稿では高炉操業上欠かせない計測制御について述べる。

### 2 高炉炉体関係

炉体関係の計測は、主として炉体の管理であり、炉頂関係、シャフト関係及び炉底関係に分類することができる。図1に炉体関係の計装フローシートを示す。

#### 2.1 炉頂関係

##### (1) 炉頂温度

炉頂温度は炉周方向、原料装入面上部、ガス上昇管部など複数点で测温し、装入物分布、炉頂ガス流分布の測定、銑石受金物の管理などを行なうもので、クロメル アルメル熱電対や温度パターン観測用として特殊なテレビカメラが用いられる。

##### (2) 装入深度

装入深度計は、装入物の降下速度及び分布を検出するもので、スリップ、棚つり現象の予知計として活用され、サウンディング式が多く用いられる。この装入深度計も高炉の大形化に伴い複数点を測定することが多く、2点以上測定の場合は装入物分布状態を見やすくするため、記録計は2段目盛とする。

最近では、炉内状況の解明のため原料装入面のプロフィール測定装置が開発され設置される傾向もある。

##### (3) ガス分析

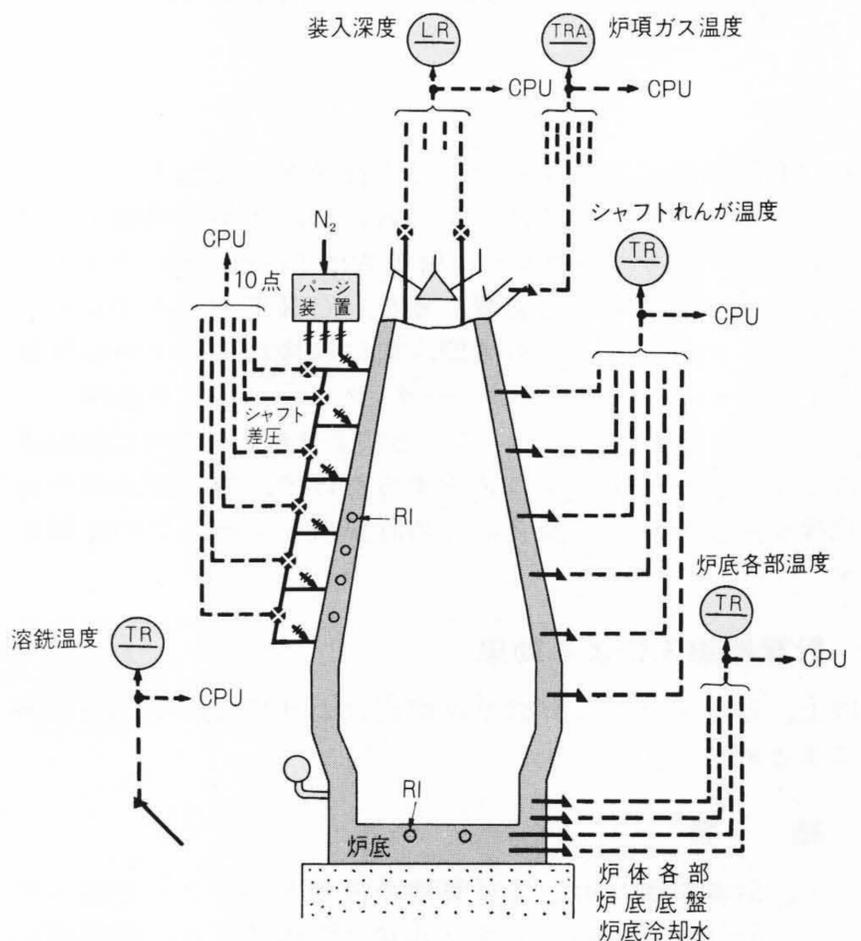
高炉の発生ガス(以下、BFGと略す)は、燃料の炉内還元への寄与率を測定するため分析され、一般的には次のような場所で検出される。

(a) ダスト キャッチャー(以下、DCと略す)後

(b) 原料装入面上部

(c) 装入原料内部

DC後のガス分析については、発生ガス中のCO/CO<sub>2</sub>が全発生ガスの平均値として測定され、通常、ガスクロマトグラフ方式や赤外線方式及び熱伝導方式が用いられる。このガス中にはダスト、ドレンの含有率が高く、分析計のトラブルが多い。この対策としてサンプラー配管を10時間に1回程度N<sub>2</sub>による強制パージを行なう。また予備サンプラーを設け、常にN<sub>2</sub>による微圧パージを行なう場合もある。H<sub>2</sub>については主として炉内異常、すなわち羽口破損、冷却板破損などの炉



注: CPU=制御用電子計算機 LR=深度記録計  
 TR=温度記録計 RI=放射性同位元素  
 TRA=温度記録警報計

図1 高炉炉体関係フローシート 炉体管理が主な目的で炉底、シャフト部に300~400本のシース熱電対を取り付け監視する。

\* 新日本製鐵株式会社設備技術センター \*\* 日立製作所那珂工場 \*\*\* 日立製作所計測器事業部

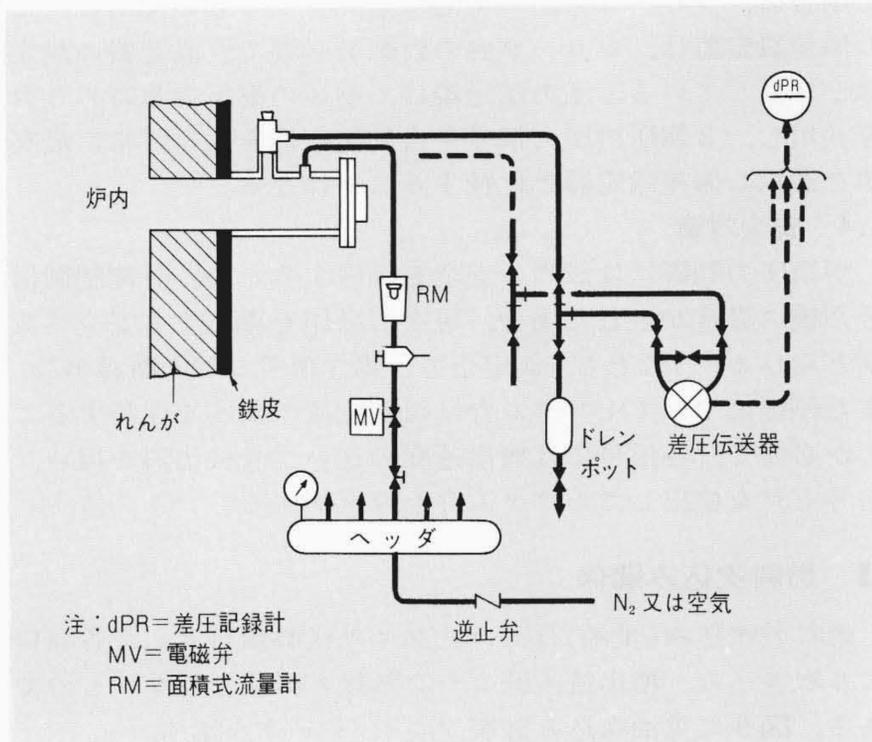


図2 シャフト差圧計 圧力取出し口は、ダストによる詰まり防止のためN<sub>2</sub>パージをする。

内浸水によるH<sub>2</sub>発生状況を監視する目的で測定される。

原料装入面上部、装入原料内部のガス分析については、炉中心から円周方向へのCO/CO<sub>2</sub>及び温度分布が間欠的に測定され、通常赤外線方式が用いられる。サンプリングシステムには、前述と同様の対策が必要であるが、特に装入原料内部のガス成分及び温度分布については、電子計算機による炉況制御モデルの重要な情報になりつつある。

高炉ガス成分は一般的には次のような状態にある。

温度：100～250℃、100～1,200℃(装入原料内部)

圧力：3 kg/cm<sup>2</sup>G(高压操業時)

0.2kg/cm<sup>2</sup>G(普通圧操業時)

ダスト：0～10 g/Nm<sup>3</sup>

ガス成分(計器目盛)

CO：0～30%

CO<sub>2</sub>：0～30%

H<sub>2</sub>：0～12%

N<sub>2</sub>：0～60%

## 2.2 シャフト関係

### (1) シャフト圧力

シャフト圧力測定は炉の高さ方向の圧力分布を測定し、棚つりの予知や炉況制御モデルの情報として用いられる。測定方法は、圧力よりも直接差圧を測定したほうが精度が良く測定できる。差圧の取出し部はダストによる詰まりを生ずることがあるため、常にN<sub>2</sub>によるパージを行なうが特に下段になるとN<sub>2</sub>パージを行なっても詰まりを生ずる場合があるため、定期的に外部よりボーリングできる構造の取出し口とすることである。図2にシャフト差圧計を示す。

### (2) シャフトレンガ温度

シャフトレンガ温度はレンガの温度分布からレンガの損傷状態、炉の高さ方向、円周方向の熱負荷の推定を行なうものである。

このため、大形高炉では炉周、高さ方向にシャフト部、炉底部を合わせると200～300本の熱電対が埋め込まれるもので、炉体鉄皮とレンガの膨張の差を逃げるくふうが必要である。熱電対保護管としては、インコネルやステンレス鋼が使われ、レンガ積み工程に合わせて取り付けられるもので、シール性の良い取付方法が要求される。

## 2.3 炉底関係

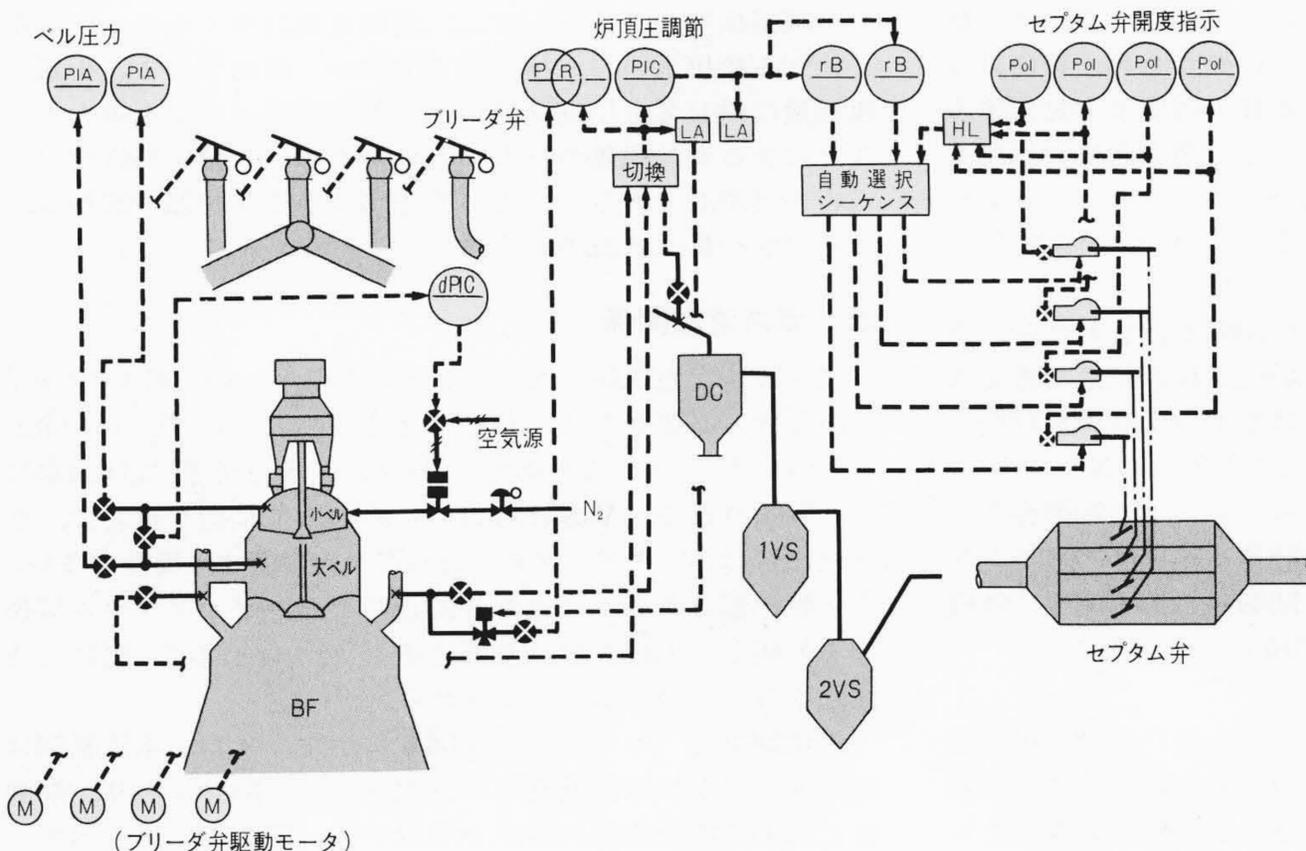
炉底レンガの損傷は炉の寿命を左右するものである。そのため、シャフト部と同様に複数本の熱電対が埋め込まれ、炉底部の冷却能力のチェック、レンガの侵食状況を把握する目的に用いられる。またシャフト部、炉底部には放射性同位元素を埋め込み定期的にシンチレーションカウンタで測定し、レンガの侵食状態を調査する方法もある。

## 3 高压操業関係

高压操業の制御は、炉頂圧力、均圧制御、ブリーダ制御などであり、図3に計装フローシートを示す。

### 3.1 炉頂圧力制御

高炉の安定した操業を行なうには、炉頂圧力を一定に制御することが必要である。炉頂でのガス圧力を測定し、複数台



注：BF=高炉  
DC=ダストキャッチャー  
VS=ベンチュリースクラバー  
HL=上下限  
LA=下限警報  
PIA=圧力指示警報計  
PR=圧力記録計  
PIC=圧力指示調節計  
dPIC=差圧指示調節計  
Pol=開度指示計  
rB=比率設定器

図3 高压操業フローシート  
セプタム弁は制御幅を大きくとるため、2台の自動弁にスプリットレンジ動作させる。

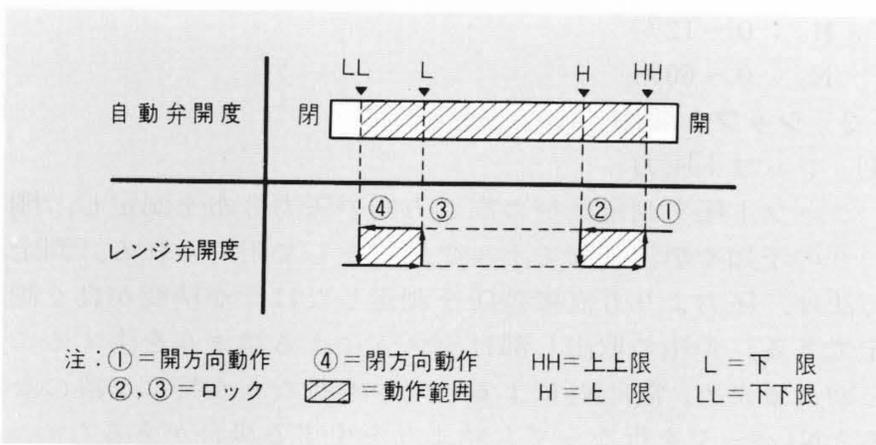


図4 レンジ弁動作説明 自動弁の開度は、H、Lの範囲内で制御するようにレンジ弁を開閉する。

の制御弁(セプタム弁という)を清浄機の後設置して、炉頂が所定の圧力に保たれるよう制御するものである。圧力の取出し部はシャフト圧力と同様な方式で、更にダストの詰まりがあった場合を考慮し、炉頂に2箇所、DC入口に1箇所より取り出し、1点を選択して制御用信号とする。この選択には手動選択のほかに3点の最高値を自動選択する方法もある。しかし、自動選択器の故障を考えると3点を連続指示しておき任意の点を手動選択するほうが安全といえる。

高炉の操業には、セプタム弁を全開にして行なう操業(普通圧操業)があり、伝送器の切換えが必要である。すなわち、炉頂圧力を高圧、普通圧の伝送器に導いて電磁弁で切換え操作する。この切換えは、運転者により手動で切り換える場合と、高圧/普通圧操業の選択スイッチと同期して切り換える場合とがある。

炉頂圧力調節計は、セプタム弁を開閉して炉頂圧力を制御するが、管径及び差圧が大きいことから生ずる駆動装置のトルク問題、制御弁のレンジアビリティの問題から弁は3~5台並列設置している。更に制御性の良い開度で運転するように、自動弁、レンジ弁及び手動弁に分け、これらの動作頻度を考慮し自由に組合せの選択ができるようにしておく。

レンジ弁の動作は図4に示すように、自動弁が制御性の悪い開度にある場合、開度計の接点によりレンジ弁を開、又は閉方向に動作させ、その結果として自動弁を制御性の良い開度に戻す制御を行なうものである。同図で自動弁が上上限HHの開度まで開くと、レンジ弁を開方向に動作させる。その結果、炉頂圧力が下がり炉頂圧力を一定に保つため、調節計は自動弁を閉方向に修正動作をし、上限Hの開度まで動作するとレンジ弁をその位置にロックしておく。閉方向についても同様である。自動弁が2台以上の場合、スプリットレンジ方式をとり、2台の開度の和によってレンジ弁を動作させる。

### 3.2 均圧制御

原料の装入時は、小ベル、大ベルの開閉が行なわれる。そのときは、均圧制御によりベル間が均圧された状態であることが必要であり、この制御は連続ではなく均圧時の数秒間の制御である。均圧を開始する場合、まず均圧用のN<sub>2</sub>しゃ断弁が開かれる。この弁の寸開信号によって応答よく制御弁を制御する必要がある。そのため、調節計はリセットワインドアップ防止形とし、均圧制御時以外は制御弁をある開度に待機させ、N<sub>2</sub>しゃ断弁寸開と同時に比例積分動作にする。

### 3.3 ブリーダ制御

ブリーダ制御はセプタム弁で制御しきれない急激な炉頂圧力の変動を吸収するための制御で、炉頂圧力調節計の設定値と測定値の偏差を取り出し、設定値より測定値が大きくなっ

た場合に、ブリーダ弁を一時的に全開させるものである。この偏差設定器は、ブリーダ弁の台数分必要で、設定器の設定値が独立している。圧力伝送器は、前述の高圧操業時の3台を共用し、3箇所の圧力信号を自動選択器を通して常に最高値を選択し偏差設定器と比較することになる。

### 3.4 安全対策

炉頂圧力制御には設備の安全を確保するため、計測制御信号系統に異常が生じた場合、現在の動作を維持する安全処置がとられる。すなわち、測定信号、操作信号などの断線事故、また停電についてセプタム弁は現在位置の開度を保持することが必要で、各信号には検出速度の速い信号検出器を用い、信号ゼロを検出してセプタム弁をロックする。

## 4 燃料吹込み関係

燃料の吹込み(重油)は、コークスの代替燃料として各羽口より吹き込み、増出銑、低コークス比の操業を行なうものである。図5に重油吹込み計装フローシートを示す。

重油流量は本管で測定され、各支管に均一に配分する方法、また羽口前の理論燃焼温度を管理するため制御用計算機により羽口の送風流量と比率制御をとる方法とがある。各支管には安全シーケンスを設け、異常時には重油の吹込みからページに移る。ページには蒸気によるページ及び蒸気、空気の組合せによるページ方式がある。吹込みからページに移る場合、またページから吹込みに移る場合、前動作の弁が全閉になってから次の弁が開くインターロックを必要とする。吹込み、ページの操作は手動操作が可能であるが、異常時に吹込みからページに移る条件の一例として次がある。

- |              |              |
|--------------|--------------|
| (1) 羽口一斉の場合  | (2) 羽口ごとの場合  |
| (a) 送風圧力低下   | (a) 重油支管流量低下 |
| (b) 計装空気圧力低下 | (b) 支管風量低下   |
| (c) 重油本管圧力低下 | (c) 手動操作     |
| (d) 停電       |              |
| (e) 手動操作     |              |

## 5 羽口冷却水流量

大形高炉の羽口は30~40箇所設けられており、高圧水による冷却を行なう。冷却水量は500 l/min程度で、羽口破損時に炉内へ浸水する量を考えると破損の早期発見は重要である。羽口破損検知の方法としては、電磁流量計やカルマン渦流量計による給排水の差を検出する方式が一般的である。少量の洩れ量に対しても早期発見すべく差流量のレンジを拡大することになるが、誤差の拡大にもなるため給水量の1/3程度にするのが実用的である。また、低圧水による冷却部の破損は、排水温度や排水状況の目視によって行なわれている。

## 6 ガス清浄関係

高炉ガスは熱風炉、加熱炉などの燃料として使用するため、清浄化する必要がある。DCでは比較的大きなダストを除去し、ベンチュリースクラバー(以下、VSと略す)では散水により除去される。VSは水封のための水位制御が重要で、水位検出器はバックアップをも含めて2台設置する場合が多い。水位検出器はダストの詰まり防止のため、ダイヤフラム置換形を使用し、取出し口は外部にチャンバーを設け、更に常時注水するなどのくふうがなされる。

水位制御のフローシートを図6に示す。また、水位制御は制御弁のほかに水位異常時の排水弁やしゃ断弁があり、制御弁では不可能な水位の変動を吸収する。図7に動作を示す。

注：P/I=パルス電流変換器  
 P=ポンプ  
 F=フィルタ  
 PA=圧力警報計  
 LI=液面指示計  
 LIA=液面指示警報計  
 TI=温度指示計  
 ○L=下限警報

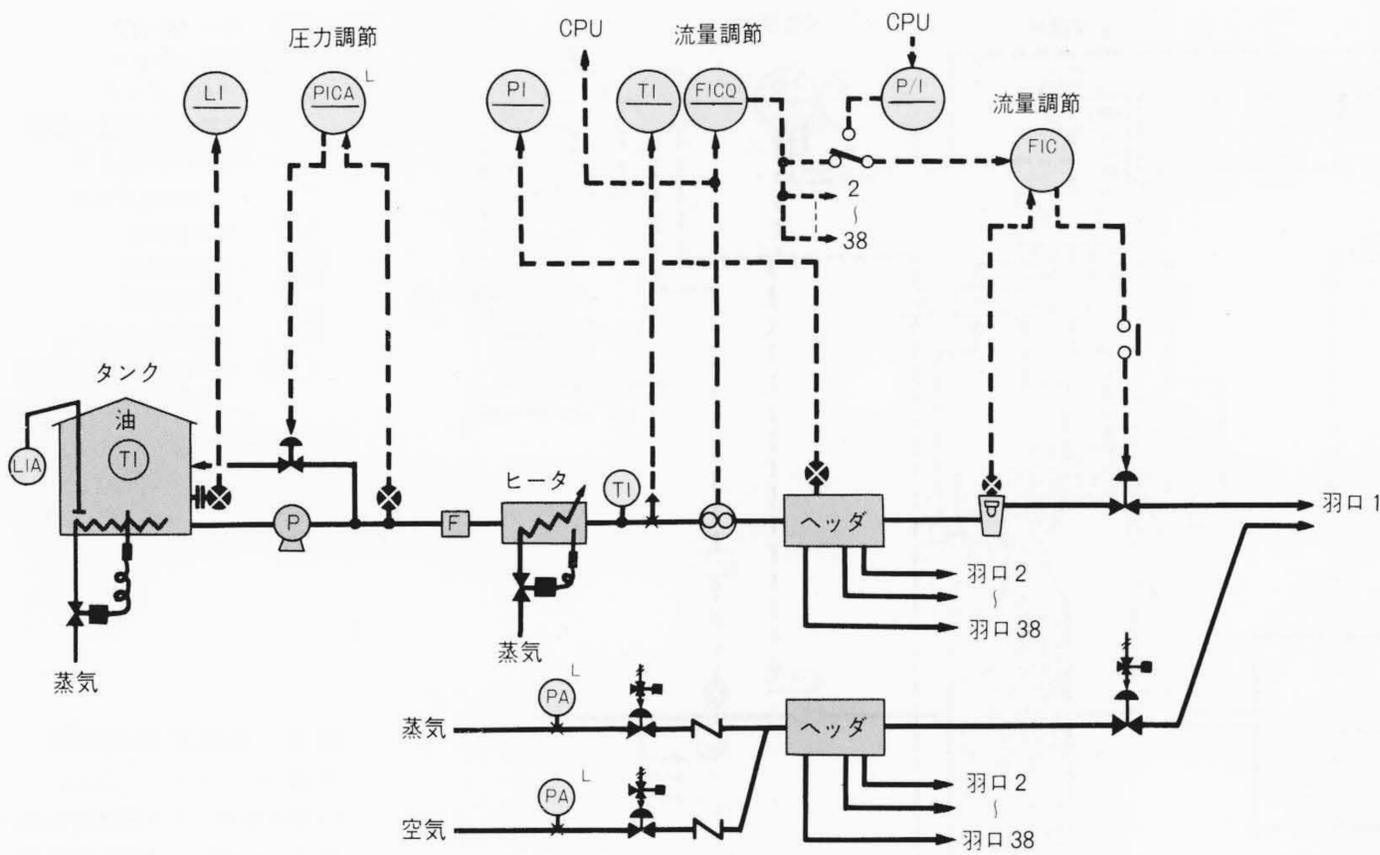
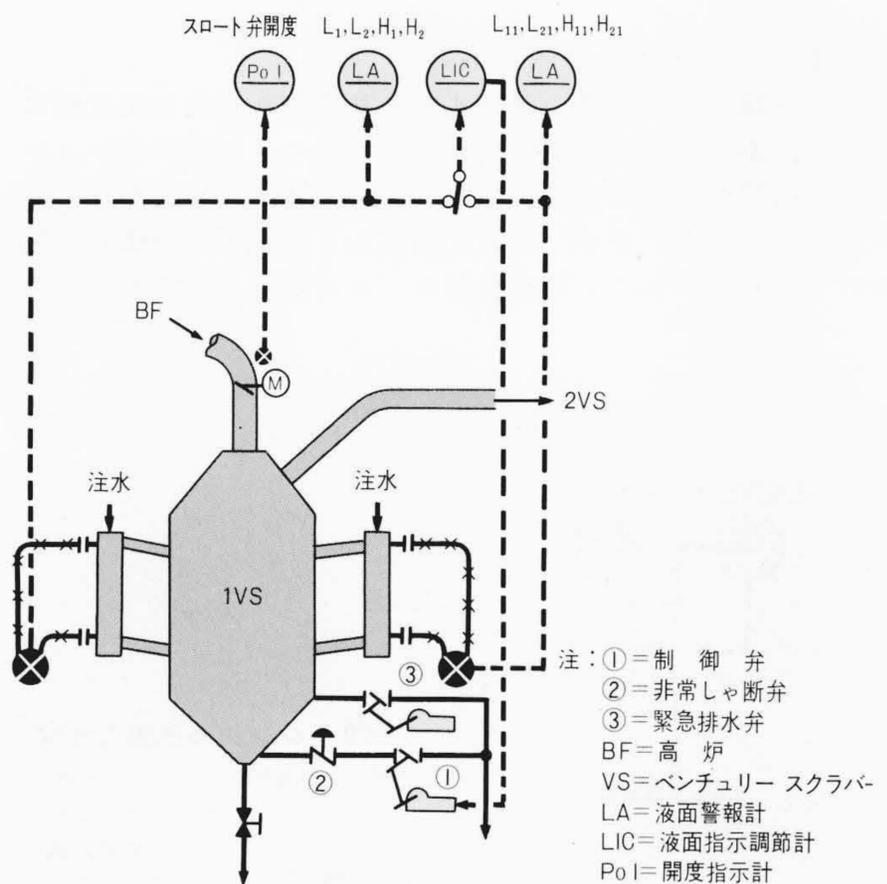


図5 重油吹込み計装フローシート 炉内反応促進のため重油が吹き込まれる。大形高炉では30～40の羽口を有する。



注：①=制御弁  
 ②=非常しゃ断弁  
 ③=緊急排水弁  
 BF=高炉  
 VS=ベンチュリースクラバ  
 LA=液面警報計  
 LIC=液面指示調節計  
 PoI=開度指示計

図6 VS水位制御フローシート 差圧伝送器はバックアップを含め2台設置し、ダイヤフラム形とする。

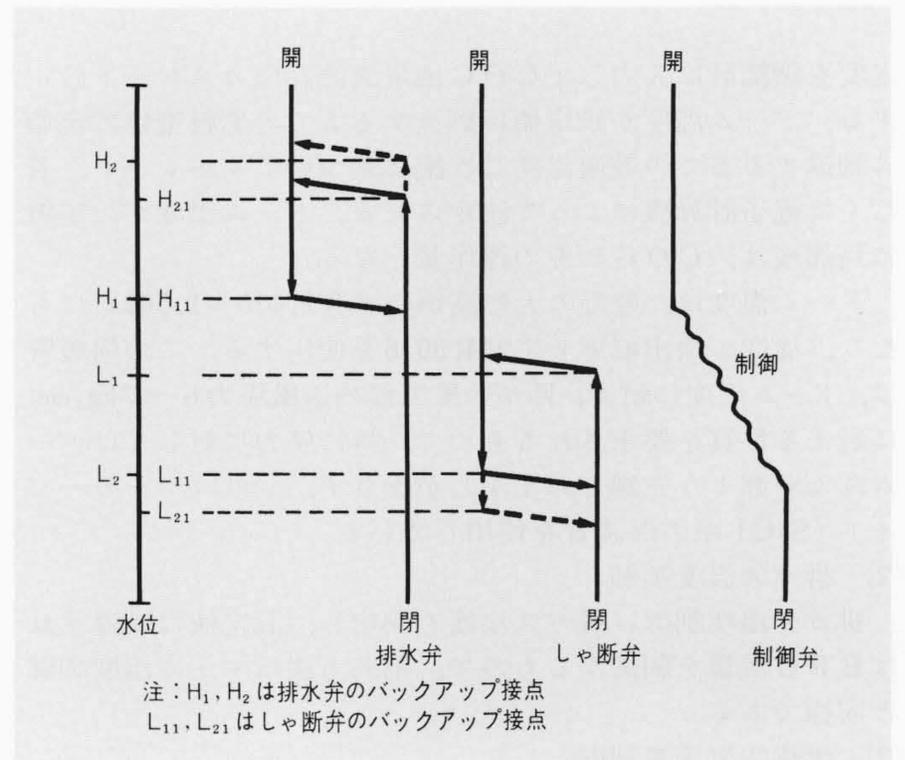


図7 VS水位弁の動作説明 制御弁では制御不可能な水位の変動を排水弁、しゃ断弁で吸収する。

## 7 熱風炉関係

熱風炉設備は高炉羽口より送風する空気を加熱する一つの熱交換器であり、3～4基の炉を用い加熱蓄熱と通風（送風空気との熱交換）とを交互に繰り返すバッチ形の炉群である。

主な制御ループは燃焼制御と送風温度制御とに分けられる。

### 7.1 燃焼制御

熱風炉は蓄熱期間である「燃焼」工程と放熱期間である「送風」工程の繰返しである。

燃焼工程ではBFG、コークス炉ガス（以下、COGと略す）や転炉排ガス（以下、LDGと略す）の混合で燃焼させ、その排ガスで蓄熱室内れんがに蓄熱する。燃焼工程はタイマを用

いて時間により切り換える方法が一般的であるが、最近では電子計算機を用い通風中の熱風炉では蓄熱温度、送風指定温度、送風流量などから炉切替時期の予測、また蓄熱炉に対しては、最適燃焼ガス量の指定などをオペレータにガイドする方式もとられている。

燃焼制御における制御変数は、ドーム温度（電子計算機で制御する場合、フレーム温度を管理する場合がある）と排ガス温度であり、これに対して操作量はBFG、COG、又はLDG、更に空気/燃料比率などの種々の組合せで選択されるが、ここではドーム温度の操作量としてCOG、排ガス温度の操作量としてBFGをとった場合の燃焼制御システムの一例を示す。図8に燃焼制御フローシートを示す。

#### (1) ドーム温度制御

ドーム温度は燃焼室、蓄熱室のドームに2本の白金-白金ロジウム（PR）熱電対と放射温度計を用い測定し、その最高

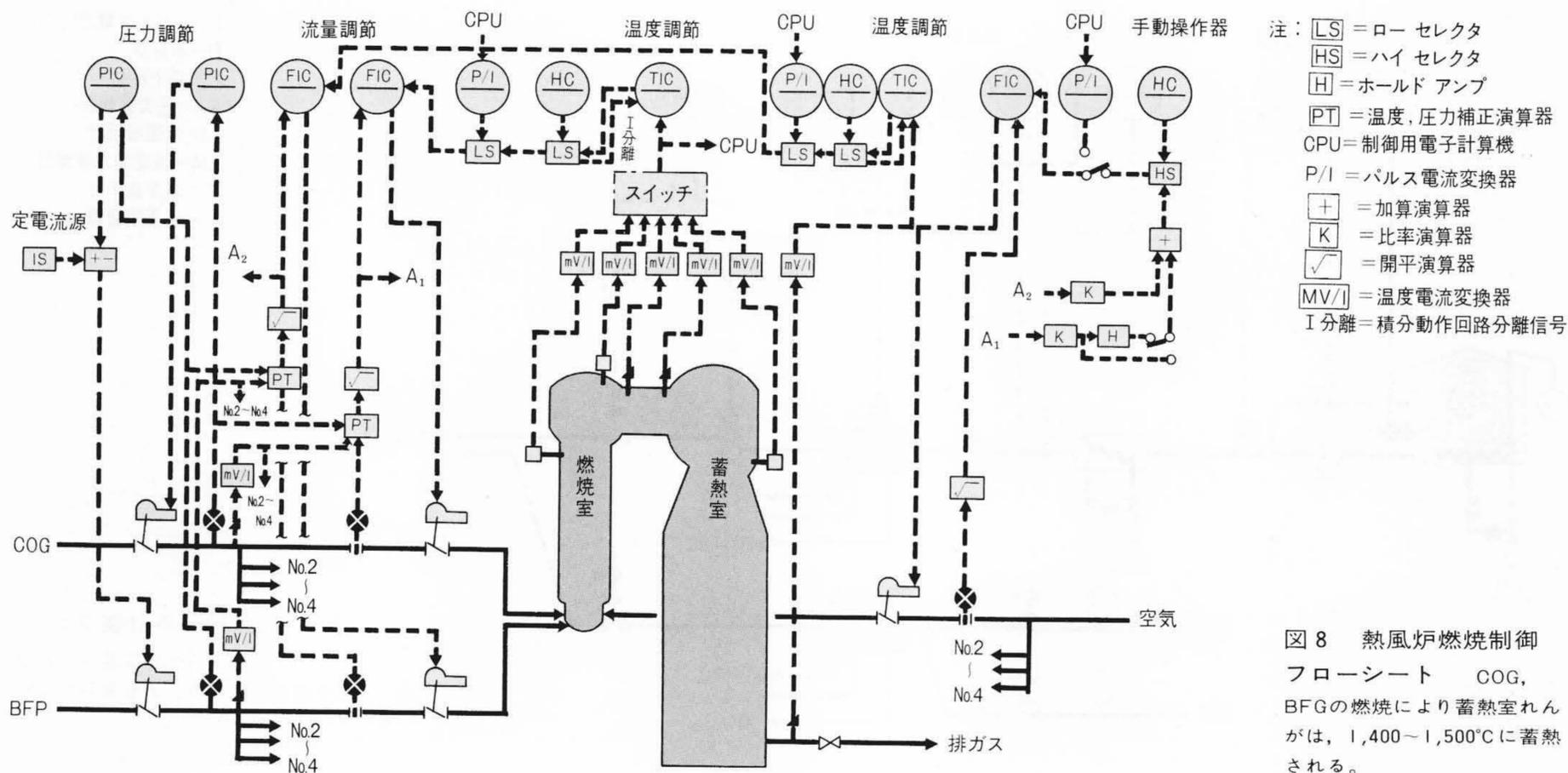


図8 熱風炉燃焼制御  
フローシート COG,  
BFGの燃焼により蓄熱室れん  
がは、1,400~1,500°Cに蓄熱  
される。

温度を調節計に入力してCOG流量調節計にカスケード設定する。ドーム温度が設定値に到達するまでの燃料量は設定値に到達するまでの最適温度こう配に基づいてオペレータ、若しくは電子計算機によって決定される。ドーム温度が設定値に到達後は、COGがその操作量となる。

ドーム温度は、最近の大形高炉の場合1,400~1,500°Cにもなり、温度の検出部としてPR 30/6を使用する。この保護管は、ドーム温度に耐え、且つ送風工程の送風圧力6~7kg/cm<sup>2</sup>に耐える性質を要求されるもので、特に圧力に対してはドームれんが部より先端をわずかししか出さず、シリコンカーバイド(SiC)系の保護管を使用している。

(2) 排ガス温度制御

排ガス温度制御は排ガス温度を測定し、設定値に到達すればBFG流量を制御するもので、制御方法はドーム温度制御と同様である。

(3) 燃焼空気流量制御

燃焼空気流量は、ドーム温度によるCOG流量と排ガス温度によるBFG流量に各空燃比を掛けた量を加算して設定される。また、電子計算機により最適空気量を設定する場合もある。

(4) BFG本管圧力制御

BFG本管圧力は、熱風炉が燃焼を始めるとき、また高炉での原料投入時に圧力が変動する。この変動は本管圧力のフィードバック制御では制御しきれず、熱風炉の燃焼制御に悪影響を与える場合がある。対策として本管圧力制御系に、変動分に相当する信号を加算、又は減算するフィードフォワードを組み合わせる場合もある。

7.2 送風温度制御

送風温度制御は、高炉羽口へ送風する熱風温度を一定の温度に保つための制御である。従来、多く用いられた送風方式は、各熱風炉が逐次1基ずつ送風工程に移行するシングル送風であったが、高温送風や熱風炉の熱効率向上のため、熱風炉を常に2基送風状態にあるスタックード 平行方式が採用されてきた。スタックード 平行方式は熱風炉4基を必要とするが、1基が故障した場合や高炉の操業レベルによっては、1基送風方式も必要になる。

(1) 1基送風方式(シングル方式)

1基送風方式は3基、又は4基の熱風炉が順次送風工程に移行し、常に1基が送風工程にあるもので、熱風炉をバイパスする冷風の混入量を制御することにより、送風温度を制御するものである。まず、送風工程に入る熱風炉は熱風弁が開かれる。そのタイミングに合わせて、あらかじめ設定されてい

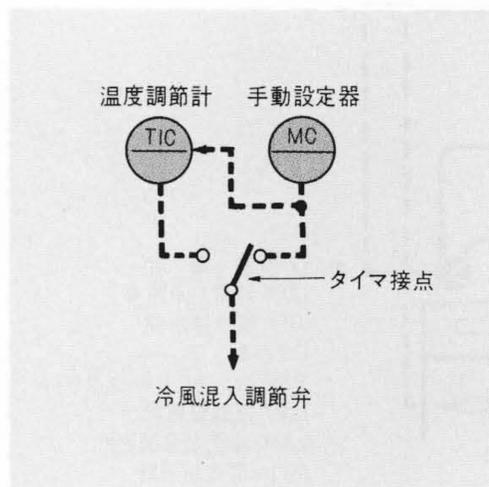


図9 シングル送風温度制  
御 送風開始時より一定時間、  
手動設定器の出力信号で冷風混入  
調節弁を制御する。その間、調節  
計は積分動作回路分離とする。

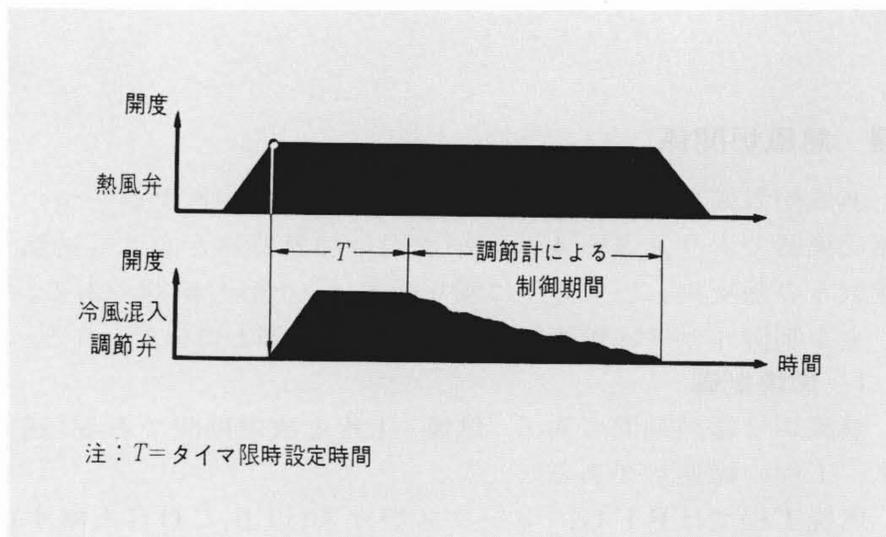


図10 タイム スケジュール 熱風弁全開リミット信号により送風開始  
となる。

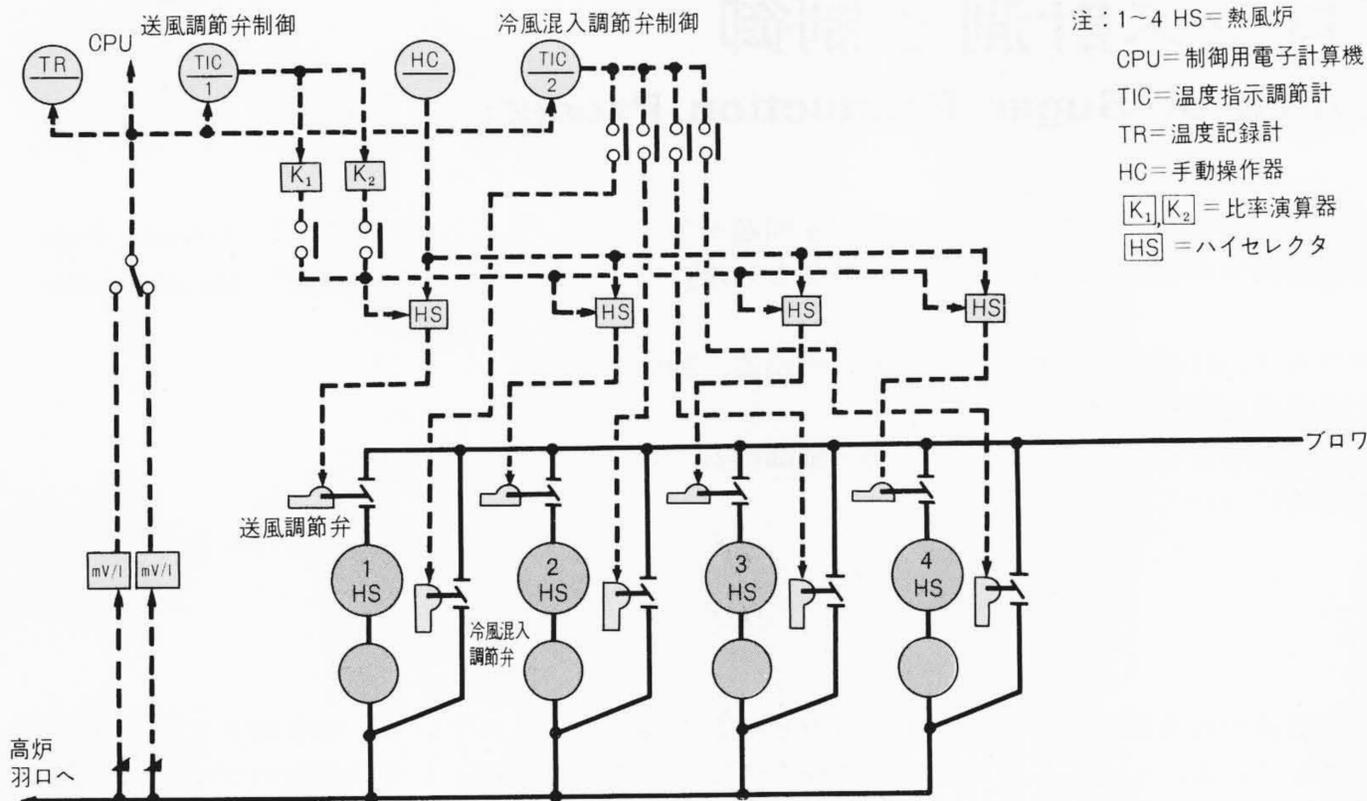


図11 送風温度制御フローシート  
温度調節計の出力は、各熱風炉の送風工程に合わせて順次切り換えられる。

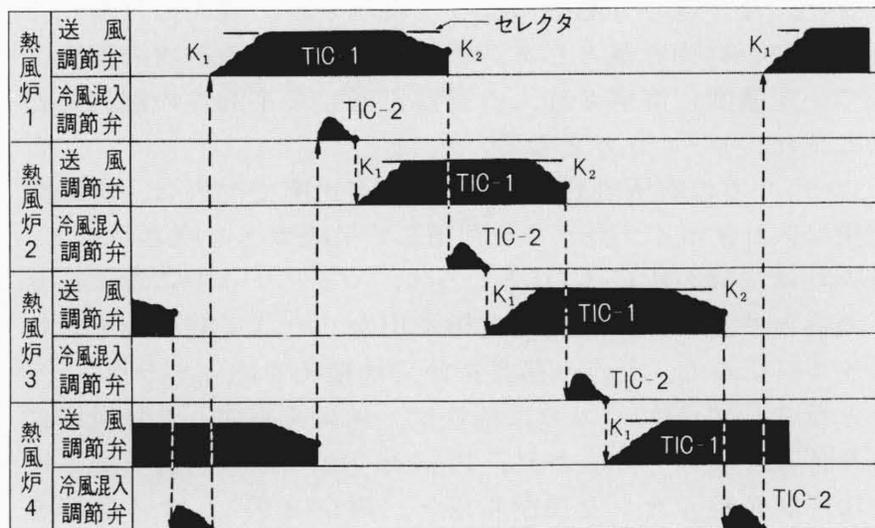


図12 パラレル送風タイムスケジュール 送風初期はK<sub>1</sub>のこう配で送風量を増加し、末期ではK<sub>2</sub>で減少させ、全体の温度を制御する。

る手動設定器の出力値にまで冷風混入調節弁が開かれ、その後、タイマ若しくは自動信号選択器によって送風温度調節計に切り換えられる。これは単に温度制御によるフィードバックでは、炉換え時に次の熱風炉の高い熱風に変わるため熱電対の応答遅れによる温度キックを極力小さくするためのものである。図9、10にこの切換タイムスケジュールを示す。

(2) 2基送風方式(スタックード 平行方式)

2基送風方式は、熱風炉を2基オーバーラップして送風工程に移行させる方式で、例えば、先に送風を行なっている炉(先行炉)が放熱が進み、炉出口温度は指定送風温度より低く、後から送風を行なった炉(後行炉)は高い。この2基の熱風炉を通過する風量との比を加減することにより、送風温度を一定に制御するものである。この方式で、冷風を混入するのは炉換えの過渡期だけで熱効率が最も良く、高温送風に適しており近年の大形高炉にはこの2基送風方式が採用されている。温度制御フローシート、タイムスケジュールを図11、12に示す。

図11において説明する。送風本管に取り付けた2本の熱電対により送風温度を検出し、どちらか一方を調節計TIC-1、TIC-2に入力する。TIC-1は送風調節弁、TIC-2は冷風混入調節弁の調節計である。TIC-1の出力信号は比率演算器K<sub>1</sub>、

K<sub>2</sub>に入力し、送風調節弁の開信号、閉信号のこう配を作る。  
2基送風方式で炉換え時、一時的に1基通風状態となる。この場合、必ずこの1基の炉出口温度は指定送風温度より高いため、冷風を混入して温度制御をしなければならない。この場合の冷風混入法については幾つかの方法がとられている。残った1基の「炉出口温度-送風指定温度」及び「送風流量」と相関のある情報から冷風混入調節弁の初期開度を定める方法、更に温度検出端の時間遅れを十分カバーできる速度で先行炉を締め込み、フィードバック制御だけで制御する方法などである。以上のような方法で、炉換え時の送風温度キックを最小に抑えている。

7.3 安全装置

送風ラインに調節弁を設置し自動制御を行なう場合、注意しなければならないことは弁が閉塞した場合である。この場合には高炉への送風が止まり、高炉送風機のサージングや、鉍滓の羽口への逆流などを誘発する可能性がある。そのため、送風中の送風調節弁の開度とを監視し、設定値以下では送風調節弁をそのときの開度に保つよう自動的にロックする必要がある。その他、熱電対の断線時の保安シーケンスやオペレータへの操炉上の参考情報として、蓄熱量の過不足における警報などを設ける必要がある。

8 結 言

近年、高炉はますます大形化されると同時に、操業面での安定化、省力化が要求されている。今後、電子計算機による炉況解析や設備の予防安全、更にマイクロコンピュータを用いた危険分散形直接デジタル制御(DDC)の活発な導入が予測される。一方では、高炉ガスエネルギー回収のガスタービン発電設備など、省エネルギーや環境対策設備の導入に伴って、計装設備の制御性、信頼性への要求はいっそう厳しいものになってきている。

その他、原料秤量システムなどについては、割愛する。

参考文献

- (1) 野坂康雄編：「最近の高炉工程における計測制御技術」製鉄研究、第279号、p. 14 (1973)
- (2) 桂 寛一郎、磯部 孝編：「熱風炉の自動制御と自動切換」鉄と鋼、第50巻、第5号 (1964)