
熱風炉の並列送風操業

Staggered Parallel Operation of Hot-blast Stoves

山田 孝雄(Takao Yamada) 土田 剛(Tsuyoshi Tsuchida) 一宮 正俊(Masatoshi Ichinomiya)

要旨：

高炉が4基の熱風炉を持つときには、2基の熱風炉に同時に送風するいわゆるスタッガードパラレル送風操業によって、標準的な操業法よりもすぐれた熱効率と、より高い送風温度を得ることができる。水島製鉄所の第1高炉にわが国で最初の本操業方式による設備が建設され、1968年2月以降順調な運転を続けている。この操業によって平均して4～5%の熱効率の向上がもたらされた。本報は、筆者らの開発した制御システムについて述べ、あわせて計算機によるシミュレーションを行なって本送風方式の効果を考察した。

Synopsis：

When four hot blast stoves are available, the staggered parallel operation, in which two stoves are always "on blast" together, provides greater efficiency and higher blast temperatures than in the case of the conventional operation. Employed in February 1968 for the first time in Japan at No.1 blast furnace in Mizushima Works, the system has been showing successful operation ever since. With this operation, heat efficiency of hot stoves was raised by about an average of 4-5% against the conventional operation. This paper describes the control system of our own development for the staggered parallel operation, and also the expected effect from this operation on the basis of computer simulation.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

熱風炉の並列送風操業

Staggered Parallel Operation of Hot-blast Stoves

山 田 孝 雄*

Takao Yamada

土 田 剛**

Tsuyoshi Tsuchida

一 宮 正 俊***

Masatoshi Ichinomiya

Synopsis :

When four hot blast stoves are available, the staggered parallel operation, in which two stoves are always "on blast" together, provides greater efficiency and higher blast temperatures than in the case of the conventional operation. Employed in February 1968 for the first time in Japan at No. 1 blast furnace in Mizushima Works, the system has been showing successful operation ever since. With this operation, heat efficiency of hot stoves was raised by about an average of 4—5% against the conventional operation.

This paper describes the control system of our own development for the staggered parallel operation, and also the expected effect from this operation on the basis of computer simulation.

1. 緒 言

高炉の熱風炉の熱機能の改善は、今日もお製鉄技術の分野における重要な課題の一つである。

近年、主として電子計算機を利用して、理論面から熱風炉の操業方法の解析を行ない熱効率の向上、あるいは高い送風温度を得ようとする一連の研究がある。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ これらの中に、1つの高炉が4基の熱風炉を持つ場合には、従来の常時1基の熱風炉に送風する標準的な送風方式（以下1基送風方式）よりも、2基の熱風炉に同時に送風するいわゆる「スタaggerドパラレル方式」（以下並列送風方式）の方が、こうした目的のために有効であることが指摘されている。

筆者らは当社水島製鉄所の第1高炉の建設に際

し、この並列送風方式の導入をはかり、設備の主体をなす制御装置の開発を行ない、わが国で初めてその実操業化に成功した。本報では、制御装置の詳細と操業結果について述べ、あわせて並列送風方式のメリットに関する考察を行なう。

2. 並列送風方式の概要

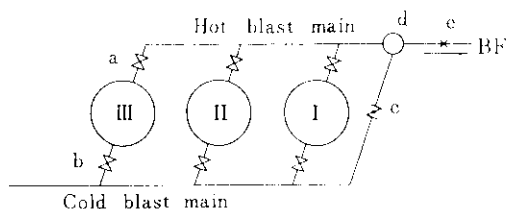
高炉に供給される熱風温度は一定していることが望ましいが、熱風炉を通過した直後の熱風の温度（以下熱風出口温度）は、熱風炉の原理上時間の経過とともに低下する。そこで通常は、炉をバイパスさせた冷風を熱風に混入し、その配合比率を調節することによって所定の熱風温度を得ている。すなわち、高炉の環状管入口部分の熱風温度を測定し、バイパス管路に装着されたバタフライ

* 水島製鉄所製鉄部製鉄課課長

*** 水島製鉄所動力部燃料課

** 水島製鉄所管理部計測課掛長

弁の開度を自動的に調節して熱風温度を一定値に制御している。**Fig. 1** はこのような1基送風方式による場合の設備の構成を示す。当然のことながら、この方式によれば送風期間中、熱風出口温度



- a: Hot blast valve
b: Cold blast valve
c: Cold blast by-pass control valve
d: Mixing chamber
e: Measuring point of hot blast temperature

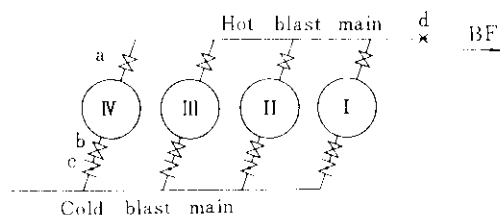
Fig. 1 Schema of the conventional installation with three hot stoves (I~III)

が高炉の要求する熱風温度（以下送風温度）を下回することは許されない。

これに対して並列送風方式では2基の炉に同時に送風し、その混合風をもって所定の送風温度を得ることができる。すなわち、2基の炉の送風期間をずらせることによって熱風出口温度を相違させ、それぞれの炉を通過する風量の比を調節して一定の送風温度を得ようとするものである。

Fig. 2 にこの送風方式による設備の構成を示す。

炉を通過する風量の調節は各炉の冷風管路に付けられたバタフライ弁による。1基送風方式に比べると蓄熱期が送風期に対して相対的に短くなるので、実際上は4基の炉をもつ時のみ採用できる。

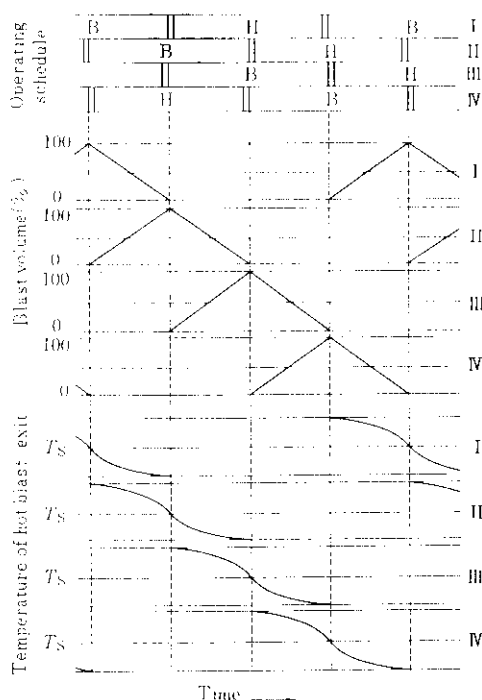


- a: Hot blast valve
b: Cold blast valve
c: Cold blast control valve
d: Measuring point of hot blast temperature

Fig. 2 Schema of the new installation with four stoves (I~IV) for staggered parallel operation

Fig. 3 は並列送風方式による操業を行なった場合の4基の炉の切替スケジュール、送風期間中の風量および熱風出口温度の変動を概念的に示している。

このように、並列送風方式は送風期の後半に熱風出口温度を送風温度以下に低下させ得る点の特徴である。その結果、同一送風負荷に対する炉の熱レベルを低下させることができ、蓄熱期の廃ガス温度低下による熱効率の向上、あるいは同一の炉でありながら1基送風方式よりも高温送風が可能とされている。



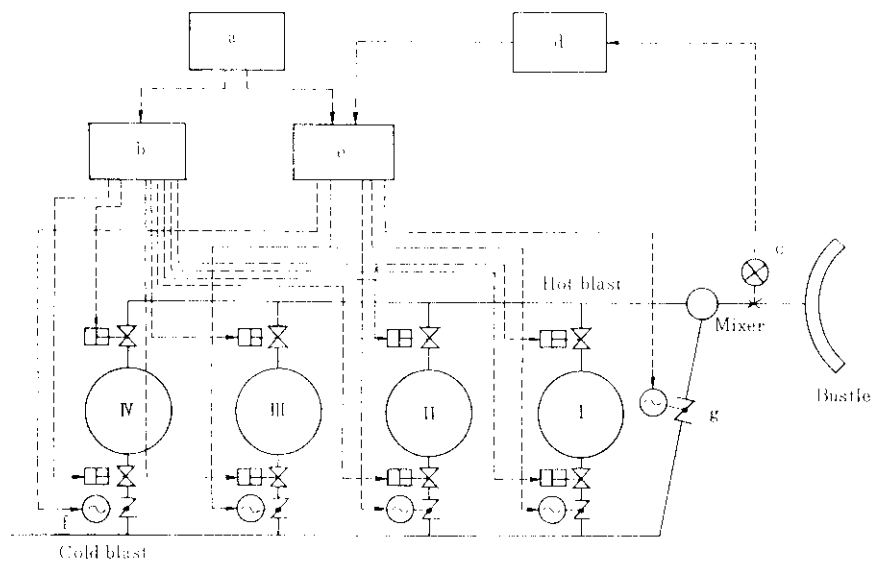
- H: Heating period
B: Blast period
 T_s : Required blast temperature

Fig. 3 Schema of staggered parallel operation

3. 制御装置

3.1 制御方法

Fig. 4 に、第1高炉の並列送風方式のための制御装置の構成を示す。



- a: Controller of operating schedule
 b: Controller of stove-changing
 c: Thermocouple
 d: Controller of hot blast temperature

- e: Switching equipment of control signal
 f: Cold blast control valve
 g: Cold blast by-pass control valve

Fig. 4 Control system for staggered parallel operation

図中aは、あらかじめ設定された炉の切換スケジュールに基づいて切換指令その他を発する装置である。bは切換指令に従って遮断弁類をシーケンシャルに作動させる、いわゆる自動切換装置である。cは送風温度の検出端、dは温度調節計、fはバタフライ弁、またeは、炉の切換に同期して調節計の出力をバタフライ弁への接続を切替えるリレー回路である。

Photo. 1 にバタフライ弁の装置状況を示す。駆動は電動モータによっている。

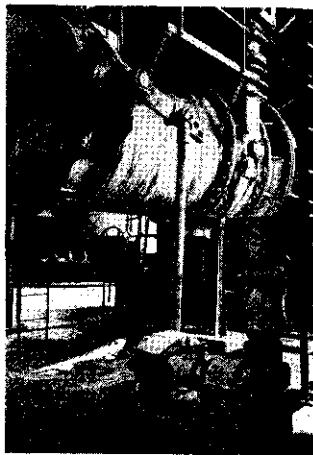
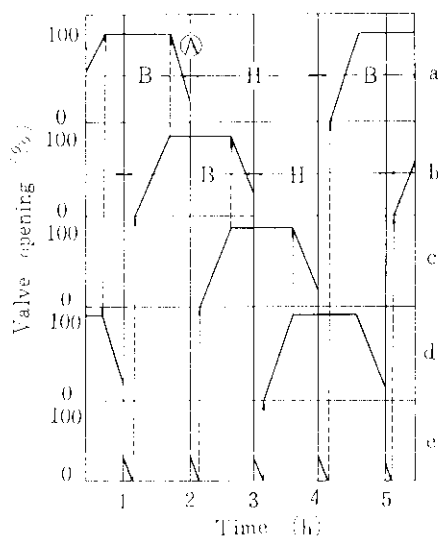


Photo. 1 Control valve for staggered parallel operation in the cold blast main

Fig. 5 にバタフライ弁の動作を概念的に示す。



- a~d: Opening of cold blast control valve of four stoves
 e: Opening of cold blast by-pass control valve
 B: Blast period
 H: Heating period

Fig. 5 Change of control valve opening in staggered parallel operation

今、図中④点で1, 2号炉の送風状態から2, 3号炉の送風状態に切換わったとする。この時に1, 2号炉はさらにしばらくの間送風を続け得るだけの熱を残している。つまり2号炉のみに全量を送風しても、その熱風出口温度は指定送風温度を上廻っているから3号炉のバタフライ弁を全閉のままにして、一時的にバイパス冷風による温度制御を行なうことができる。さらに2号炉の熱風出口温度が低下し、バイパス冷風管路のバタフライ弁が全閉すると、3号炉のバタフライ弁が開きはじめる。以後このバタフライ弁による制御が続き、やがてこの弁が全開し終ると制御は2号炉のバタフライ弁に引継がれ、この弁が全閉となる直前に3-4号炉による送風に切換わる。

このように炉の切換が時間によって規制されていること、したがって切換の際に一時的にバイパス冷風による温度制御を行なうこと、制御がつねに一つのバタフライ弁によってなされ、一方のバタフライ弁が全開していることなどが、この制御法の特徴である。

3.2 制御装置設計上の配慮

3.2.1 自動運転

並列送風方式では送風の主管路に制御用バタフライ弁が取付けられている。したがって誤操作などによる送風の閉塞事故の発生をなくするためには運転をできるだけ自動化することが必要である。

炉の切換を定時方式としたのは、蓄熱時間を一定にすることによって蓄熱量の管理が容易にでき、しかも制御装置の単純化による自動運転化が容易にできると判断したからである。なお、この切換指令を何に求めるかは並列送風制御装置の機能上の一つの基本的な課題であって、後述するように定時切換方式は運転の容易さの反面、並列送風方式の効果を最大限のものにしようとする時には多少不利である。

切換を定時切換方式にしてもなお、長時間にわたる切換スケジュールの設定をどのような手法を用いて行なうかが問題となるが、シーケンス制御の一方法であるピンボード法³⁾が多面において効果的であることがわかった。すなわち、ここが

の方法は横軸に時間、縦軸に炉別をあらわす平面上に切換スケジュールのパターンを設定する方法である。Photo. 2の中央部分にその設定盤を見る

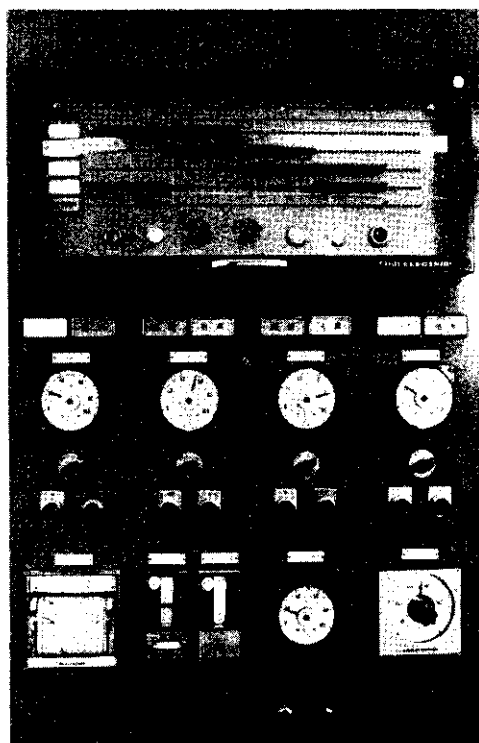


Photo. 2 Operation panel for staggered parallel operation

できる。炉に対応した4行の孔の列に、ピンを用いて炉の切換順、各サイクルの時間などのパターンを設定することができる。

この手法の採用によって

- (1) 設定内容を任意かつ簡単に修正できる
- (2) 装置内部の時間を規制するカウンタのクロックパルスを水晶発振器によって作り、時間の設定精度を高め得る
- (3) カウンタの内容を手動で修正できるようにしてあるので、起動時あるいは休風の際などの操作を容易に行なえる
- (4) 制御装置全体の構成を単純化できる

などの効果が得られた。なおカウンタ部分にのみ無停電電源を用いて一般電源の停電時にもスケジュールの進行を記憶させておく方式とした。

また、この制御装置によって、1基送風操業およびラップパラレル送風操業も可能である。

ラップパラレル送風方式とは、炉が3基のみの場合に時期によって1基送風と並列送風とを繰返して送風する方式で、3基の炉を用いて並列方式の効果を部分的にもたらそうとする操業方式である。

3.2.2 信頼性の向上

並列送風方式は先に述べたように、送風主管路に取付けたバタフライ弁を制御することによって送風を調節しているが、この制御に使われている装置の故障による事故をなくすためには装置の作動の信頼性を高めることが不可欠である。したがって設計にあたっては、装置の機能、機器の安定性の両面から信頼性向上について十分留意した。以下にそのいくつかを述べる。

- (1) 温度制御には、つねに一つのバタフライ弁を用い、他を全開状態においた
- (2) 切替用の遮断弁とバタフライ弁のインターロックを充実させた
- (3) 回路に使用するリレーなどの素子を極力少なくした
- (4) 特に素子の数を多く要するピンボードシーケンス制御装置の部分をトランジスタ化した
- (5) バタフライ弁のリミット信号など、制御の

ために特に重要な機器要素は二重化した

- (6) バタフライ弁の駆動をフローティング方式とし、開度のフィードバック回路を持つことによる信頼性の低下を避けた。したがって調節計にはパルス出力型を採用した。
- (7) バタフライ弁駆動用モータのコンタクタをサイリスタ化した

その他、機器の作動の異常を検出するモニタ機能の充実、制御装置点検の簡略化、パネル面の表示機能の充実などを心掛けた。

4. 操業結果

4.1 装置の運転状況

第1高炉は昭和42年4月に火入された。レイティングアップに同期して約半年後に4号熱風炉を稼働させ、同時に並列送風操業の試験を行なった。2, 3の制御装置の機能上の不備を改めた後、43年2月から正式運転に入り、以後現在まで順調に運転している。

Fig. 6 に送風温度とバイパス冷風流量の記録例を示す。

この図の例は負荷の比較的安定している場合の

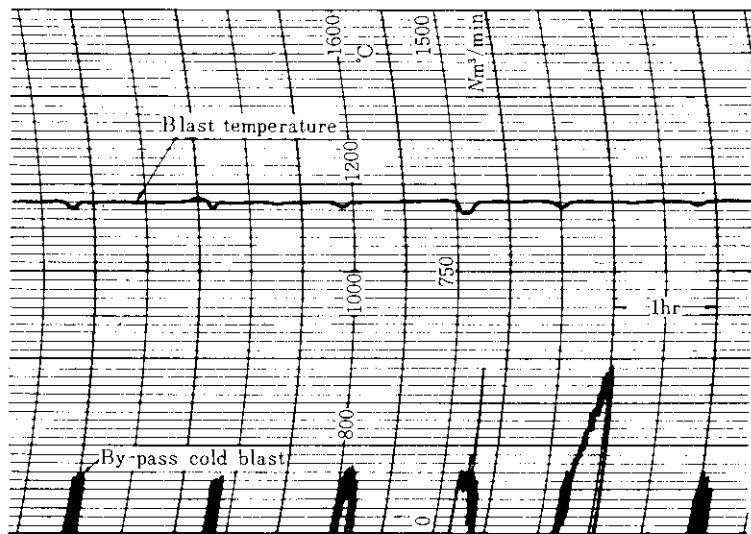


Fig. 6 Recording chart showing the blast temperature and the volume of by-pass cold blast by the staggered parallel operation

ものであり、変動が持続する場合には切換時の熱の不足を避けるため、蓄熱量に余裕を持たせているので、切換時のバイパス冷風の流入が図の例よりも増大する。また、まれに切換直前に熱の不足を来たすことがあるが、この時には止むを得ず手動で切換を早める。

4・2 効 果

負荷が等しい場合の1基送風方式と並列送風方

式との熱効率の比較を行なった一例を **Table 1** に示す。なお、この結果は負荷が等しい約20サイクルのデータの平均値より求めたものである。

表に示すように、送風量 4,100 Nm³/min 送風温度 1,070°C の操業で、熱効率は1基送風方式で 71.5%、並列送風方式で 76.0% であった。

ただしドーム温度 1,400°C、切換サイクルは、前者は1時間送風、3時間蓄熱、後者は2時間送風、2時間蓄熱である。

Table 1 Results of no.4 stove trial (Date of test : Feb. 1969)

Operation	Single	St. parallel
Target Conditions :		
blast volume, Nm ³ /h, dry	4,100	4,100
hot blast temperature, °C	1,070	1,070
maximum stove dome temperature, °C	1,400	1,400
Heating cycle :		
period on gas, min	170	111
average gas volume, 10 ³ Nm ³ /h dry	26.1	35.7
average air volume, 10 ³ Nm ³ /h dry	43.3	57.9
average waste gas out let temperature °C	250	172
Blast cycle :		
period on blast, min	60	116
average blast volume, Nm ³ /min, dry	3,590	1,985
average hot blast out let temperature, °C	1,239	1,136
average mixed cold blast volume Nm ³ /min, dry	510	134
average cold blast temperature, °C	171	163
Gross cycle time, h	4	4
Heat balance, 10 ³ kcal/cycle		
sensible heat in cold blast ①	11,400 10.4 %	11,700 11.1 %
heat supplied by combustion	97,600 88.9	93,000 88.4
sensible heat in gas	440 0.4	400 0.4
sensible heat in combustion air	340 0.3	160 0.1
total ②	109,780 100.0	105,260 100.0
heat in hot blast ③	89,100 81.2	90,400 100.0
heat in waste gas	15,600 14.2	9,500 9.0
losses to cooling water, radiation	3,900 3.5	3,700 3.5
etc. ④	1,180 1.1	1,660 1.6
total	109,780 100.0	105,260 85.9
Efficiency $\frac{③-①}{②-④} \times 100, \left(\frac{②}{③} \times 100 \right) \%$	71.5 (81.2)	76.0 (85.9)
Number of tests, cycle	21	17

参考までに、熱風炉ⁱの主要仕様を **Table 2** に示す。

Table 2 Main specifications of the stoves at no. 1 blast furnace

Type : external combustion type
designed by H. Koppr G.M.B.H.
Number of stoves : 4
Diameter of checker shaft,
Inner dia. : 6,000 mm
Outer dia. : 7,216 mm
Diameter of combustion shaft,
Inner dia. 3,000 mm
Outer dia. 4,350 mm
Total height : GL+49,650 mm
Heating surface : 36,800 m ² /stove
Fuel : mixed gas
Maximum dome temperature : 1,650 °C
Target maximum blast volume :
4,500 Nm ³ /min
Target maximum blast temperature : 1,300 °C

5. 考 察

5.1 制御装置の改善の余地

筆者らの制御方式では、炉の切換を時間によって行なっているため、負荷変動に追従させるためには蓄熱量を常時必要量以上に確保しておく必要がある。一方、負荷に応じた蓄熱を行なうためには、切換時のバイパス冷風流量、冷風バタフライ弁の開度などから次の蓄熱期の燃焼量を調節するが、負荷の変動がやや大きかったりすると、この調節作業はかなり難しく、またオペレータの性向も手伝って蓄熱量が過大になりやすく極端な場合にはほとんど常時バイパス冷風が流れているというような事態、すなわち1基送風方式そのものになりかねない。したがって、並列送風方式を採用し、かつその効果を最大限に発揮させようとするならば、切換のタイミングを別の性質のものとすること、および蓄熱量の設定を自動化することが是非とも望まれる。

なお、蓄熱量設定の自動化については別途設けられている制御用計算機を活用して目下研究中である。

並列送風方式の弱点の一つは送風主管路に制御用のバタフライ弁が存在することである。すなわちその誤動作によって高炉あるいは送風機の重大な故障を誘発される可能性があるからである。筆者らが制御システムの開発にあたって、特に人念を期したことは既述の通りであるが、それでもなお過去に1度、送風機をサージングに入れる事故を経験している。それは自動切換装置の故障のため、手で操作した際の誤操作によるものであった。

今後に建設する装置に関しては、機器の機能、安定性の面からより一層信頼性の向上をはかりたいと考えている。

5.2 並列送風方式採用のメリット

並列送風方式による操業の効果を理論面からも明らかにするために、筆者らは所内の電子計算機 UNIVAC-494 を用いて一連のシミュレーションを行ない、負荷、ドーム温度などの操業条件によって並列送風方式の効果がどのように相違するかをとらえようとした。シミュレーションのための熱風炉ⁱの数式モデルについては、Butterfield³⁾らの研究を参考にした。

同一負荷で、1基送風方式と並列送風方式の場合のギッタ各部の温度、その部分のガス(蓄熱期)・送風(送風期)の温度がどのように変動するかをシミュレートした結果を **Fig. 7, 8** に示す。1基送風に比較して、並列送風方式の場合の方がレンガ温度およびガスの温度が平均して低いことがわかる。

なおこの場合の操業条件は、送風量、4,500Nm³/min 送風温度 1,200°C、冷風温度 200°C、ドーム温度 1,400°C である。

このシミュレーションを通して、同時に蓄熱期のガスの消費量も算出することができ、熱効率の推定が可能である。シミュレーションによって得られた結果によると、両送風方式による熱効率の差は負荷によって著しく相違する。たとえば先に述べたように (**Table 1** 参照)、送風量 4,100Nm³/min、送風温度 1,070°C の負荷のときの熱効率の差は 4.5% であったが、負荷を 4,500Nm³/min 1,200°C に増大させると差は10%程になる。逆に

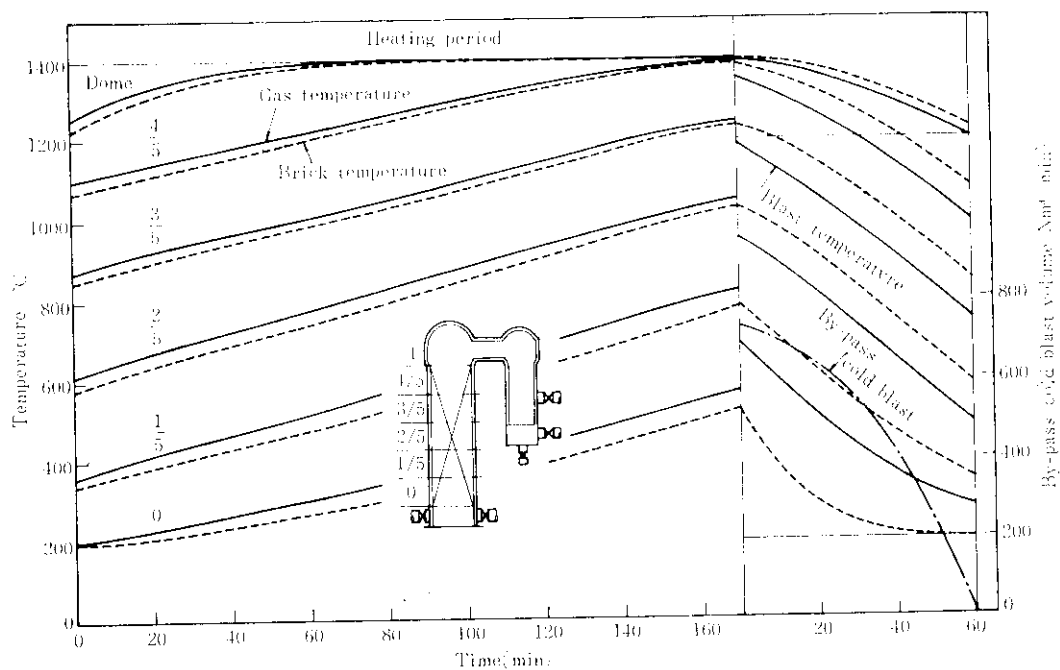


Fig. 7 Computer simulation of the standard operation (required hot blast temperature 1,200°C)

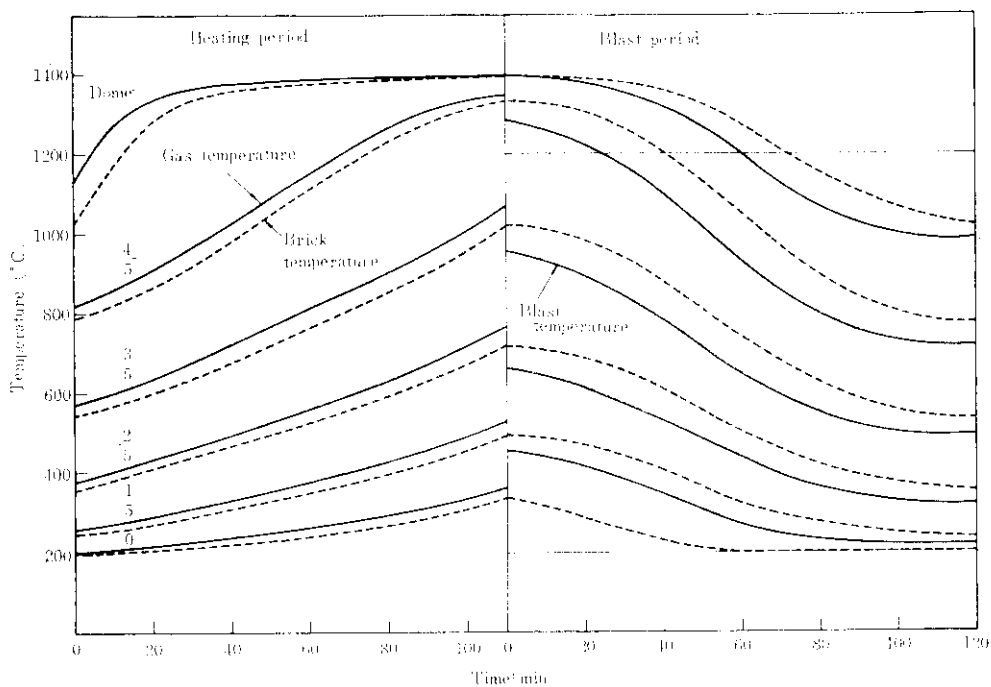


Fig. 8 Computer simulation of the staggered parallel operation (required hot blast temperature : 1,200°C)

3,500Nm³/min, 1,000°C とするとほとんど差がなくなる。

また負荷が等しくてもドーム温度によって熱効率の差は異なり、たとえば **Table 1** に示した操業条件の中、ドーム温度 1,400°C を 1,300°C に低下させると熱効率の差は 9% 程度となる。

以上のことは並列送風方式の採用の効果が実質的には対象とする熱風炉の加熱面積を増大させたことと等価であることを示している。こうした観点からすると、並列送風方式採用によるメリットは、新規に建設される高炉設備におけるより、既設の高炉設備を対象とする時に、より大きいものを期待できるであろう。すなわち、既設の高炉設備で、高炉そのものには余力がありながら熱風炉の能力に限界がある時に、その救済の手段としてきわめて有効であろう。この場合の、メリットは高炉の生産性向上という形で得られるので、熱風炉の能力に余力がある場合のように熱風炉自体の効率の改善によるメリットにとどまる場合に比し、より大きいものとなる。

欧米における並列送風方式についての理論的な追求、あるいは実操業への試行も主として既設の熱風炉の能力の向上を意図してなされている。また多くの場合に送風温度の向上を直接のねらいとしている。米国のある高炉では、この方式の採用によって、従来の方式に比べて 200°C の送風温度の向上をもたらしたという報告⁶⁾がある。一方、並列送風による熱効率の改善は 6% 程度であるという報告⁷⁾もある。

高炉を新設する際に本方式を採用すべきか否かは、単に熱効率の向上によるメリットにのみ着目するのでなく将来の高炉操業技術の進歩に対する見通しを明確にし、多くの観点から総合して判断されるべきであろう。

なお筆者らは以下のような点から新設の高炉にあっても並列送風方式の採用はメリットありと判断している。

- (1) 送風温度が向上した時に、並列送風方式は 1 基送風操業に比較して、低発熱量の燃料を用いることができるので製鉄所内のガス配給上有利である。
- (2) 高炉の大型化、高温、高圧送風化に伴い高

炉設備全体の稼働率を高めるために、熱風炉を 4 基もつことは有利である。その時に並列送風方式による効率面の改善は、投資負担の軽減に役立つ。

- (3) 並列送風による熱風出口温度の低下は、送風の高温化の割に、熱風弁の熱負荷を軽くする。

6. 総 括

高炉が 4 基の熱風炉を保有する場合に、従来の 1 基送風方式にかわって 2 基に同時に送風するスタaggerドパラレル送風方式の採用が、その熱機能の改善のために有効であることが理論上指摘されている。

筆者らは水島製鉄所の第 1 高炉に並列送風方式を採用し、設備の主体をなす制御装置の開発を行ないわが国で初めて実操業化に成功した。昭和 43 年 2 月に本方式による操業を開始し、以来今日まで順調に経過している。

制御装置の設計にあたっては、送風温度制御用のバタフライ弁が送風主管路に装着されるので、自動化による誤操作の排除、および機能両面の信頼性の向上に努めた。

1 基送風方式と並列送風方式との熱効率を比較した結果によると 1 基送風方式で 71.5% の時、並列送風方式では 76.0% であった。

理論的に並列送風方式の効果をj知るために、電子計算機によるシミュレーションを行なった。負荷の増大あるいはドーム温度によっては、並列送風方式の熱効率は 1 基送風方式に比し 10% 以上もよくなることがわかった。

並列送風方式の採用による効果は、既設の高炉設備において熱風炉の能力が高炉の生産性を阻害しているような場合に特に大きいであろう。新設高炉においても、将来、現在以上の送風温度の上昇など、高炉操業技術の進歩が予知される時には、本方式の採用は多面に効果があると判断できる。

7. 結 言

本報は主として並列送風操業について制御装置と操業の結果について述べたが、シミュレーション方法の具体的な内容、その精度、広範囲なシミュレーションによる解析の結果、操業への応用などについては次の機会に報告したい。

なお本送風方式は昭和44年1月に稼働した第2高炉および昭和45年末に稼働予定の第3高炉にも採用されている。第3高炉の設備では、蓄熱量の自動設定などの機能が折り込まれている。

終りに、この制御装置の開発にあたって御協力下さった富士電機製造(株)、久保田鉄工(株)の関係各位に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) T. R. Schverger, J. C. Agarwal : Iron and Steel Eng., **38** (1961) 10, 143
- 2) J. C. Buker, N. F. Simcik : Instrument Society of America Journal, **18** (1962)
- 3) P. Butterfield, J. S. Schofield, P. A. Young : J. Iron Steel Inst., **20** (1963) 7, 497
- 4) T. E. Dancy, H. W. Meyer, H. F. Ramstad : Iron and Steel Eng., **40** (1963), 67
- 5) S. H. Brooks, F. Fitzgerald : J. Iron Steel Inst., **202** (1964), 818
- 6) S. Vajda : Iron and steel Eng., **39** (1962), 73
- 7) N. K. Leonidov, G. S. Klyagin : Stal in Eng., (1967) **3**, 194