

技術報告

高炉休止中の珪石れんが熱風炉の冷却方法 および保熱方法

© 1984 ISIJ

石川 泰*・山本 崇夫*²・阿部 幸弘*³
阿由葉善作*⁴・堀尾 竹弘*⁵

Cooling Down and Hot Idling of Silica Brick Hot Stove during Blast Furnace Relining

Yasushi ISHIKAWA, Takao YAMAMOTO, Yukihiro ABE,
Zensaku AYUHA and Takehiro HORIO

Synopsis:

Hot stoves using silica brick should either be cooled or hot-idled when the blast furnace is blown-out for relining or shut down for a long time. Noticing the thermal stress of the brick in a steady or a non-steady state of temperature distribution and based on experimental and actual-furnace-operation data, the authors introduced the cooling rate suited for reducing the temperature difference between the inner side and the outer side of the silica brick in order to decrease the circumferential stress in the case of cooling. The authors also found the temperature range suited for reducing the radial stress and set the lower limit temperature of the brick at 450°C in the case of hot idling. Both these measures were applied to the hot stoves of the Kimitsu BF No. 3 achieving a large economic effect.

1. 緒 言

1965 年代は鉄鋼の拡大生産期で高炉の大型化とともに、送風温度が上昇して初期の 1100°C 台から、1972 年には 1300°C に達した¹⁾。このために熱風炉の高温部は高温耐クリープ性に優れ、かつ安価な珪石れんがが多く使用された²⁾。一方約 10 年後にこれらの高炉が改修に入る頃に、石油価格の上昇ともなうエネルギーコストの上昇と鉄鋼生産の伸びの停滞が起こった。そこで高炉の改修や休止期間の長期化が必要になり、休止期間中の熱風炉の従来の措置の仕方に 2 つの問題が生じた。

1) 冷却の場合、珪石れんがは収縮が大きいためにれんが積に大きな目地開きや段ずれ、き裂などの損傷が起こりやすい。

2) 保熱の場合、珪石れんが熱風炉は温度が高く、期間が長引くとエネルギー消費量が増大する。

1971 年 9 月火入れの君津第 3 高炉は、3212 万 t の出銑量を記録し、1982 年 5 月に改修にもなう長期間休

止に入った。従来、珪石れんが熱風炉の冷却に関する報告^{3)~5)}はあるが、大方は徐冷却が採用され、冷却速度の設定は経験的で、理論的な設定が少なく汎用性に劣る。また、保熱についての理論的な考察も見当たらない。本報告は珪石れんが熱風炉の冷却や保熱時のれんがの熱応力を解析し、熱風炉れんが積の損傷を最小限にとどめる冷却方法、ならびに蓄熱炉珪石部下限温度を引き下げて燃料消費量を大幅に下げうる保熱方法を見つけ、第 3 高炉付属熱風炉に適用した結果について述べる。

冷却では厚肉円筒の円周方向引張熱応力を基準にれんが積の均一収縮性を高める冷却基準を、保熱では非定常温度分布下の半径方向引張熱応力を基準にれんがのき裂を防止する保熱基準を、それぞれ作成した。

2. 君津第 3 高炉付属熱風炉の概要

第 3 高炉は内容積 4063 m³、炉頂圧力 2.3 kg/cm² である。付属熱風炉は加熱面積 78000 m²/基×4 基、ドーム温度 1450°C、送風温度 1300°C、送風量 8600 Nm³/

昭和 58 年 6 月 30 日受付 (Received June 30, 1983)

* 新日本製鉄(株)製銑技術部 (Ironmaking Technical Division, Nippon Steel Corp.)

*² 新日本製鉄(株)製銑プラントエンジニアリング部 (Ironmaking Plant Engineering Division, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株)製銑プラントエンジニアリング部 (Ironmaking Plant Engineering Division, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

*⁵ 新日本製鉄(株)熱技術部 (Heat Technology Division, Nippon Steel Corp.)

min が可能な珪石れんが外燃式設計であり、珪石れんがは蓄熱炉の上部 25% と燃焼炉および両ドームに使用した。実際操業では、ドーム温度、送風温度および送風量の各設計値を達成した。

3. 珪石れんが熱風炉の措置方法と検討課題

冷却か保熱かの選択は高炉の休止期間と、それぞれの場合の措置に要する費用との比較によつて行われる。

3.1 冷却の課題

冷却の場合にもつとも問題となる部位は珪石れんがで構築されている円筒壁やドームで、温度低下により半径が縮まりにくいために壁に垂直な方向に大きなき裂が生ずる。そこで厚肉円筒モデルで円周方向引張応力に着目してれんが積損傷の低減策を検討した。

3.2 保熱の課題

経験によれば保熱の場合、炉内温度の変動により珪石れんが壁でもつとも温度が低い蓄熱炉の珪石れんが下端部でれんが厚み方向にき裂が生ずる。そこで非定常状態での半径方向（れんが厚さ方向）引張応力を対象としてエネルギー消費量を低減する下限温度の最低値を検討した。なお、チェッカーれんが内で発生する熱応力は、肉厚がうすいために問題とはならない。以下に冷却と保熱に分けて述べる。

4. 冷却

外燃式熱風炉はドーム連絡管部の大きな開口を有し、冷却や再加熱時に複雑な力学的挙動を示すことが予想され、れんが積の損傷の不安がある。しかし目地で接合したれんが積はある程度の復元性があり、冷却過程で均一な収縮がはかられればそれを高めることが可能になり、損傷を少なくできる。均一な収縮は炉壁れんがの熱応力分布の低減により可能である。

4.1 冷却速度の検討

4.1.1 円周方向引張熱応力低減の冷却速度

冷却時に問題となる部分は前述のように珪石れんが円筒壁であり、特にドーム直胴部は大きな開口を有した複雑なれんが積である。円筒形れんが積の冷却では低温側で引張応力が働き、れんが積の引張強度を上回つたときき裂や目地開きを生じる。その応力は円周、高さおよび半径方向の3種類である。高さ方向は自重で沈下し、半径方向は冷却の場合温度変化の速度が小さいので問題ではない。円周方向の応力を小さくすることに注目する必要がある。できるだけ低温度域まで応力が強度を上回らないように冷却速度を設定し、半径方向への収縮を促すことが必要である。ここでは Fig. 1 に示す①～④の部

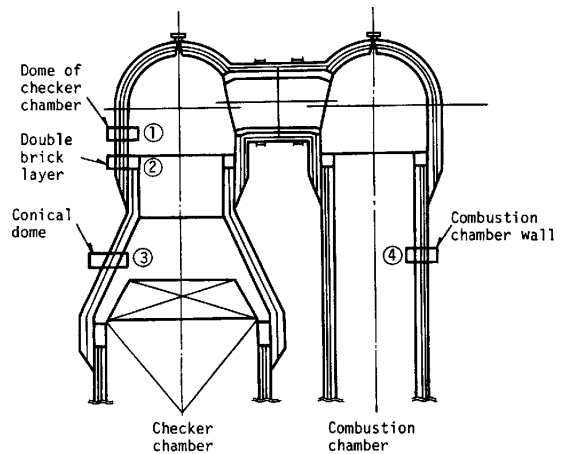


Fig. 1. Parts where calculation performed.

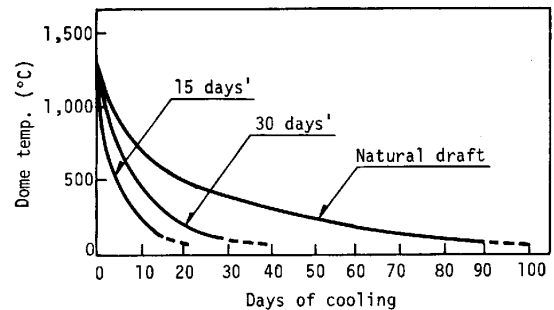


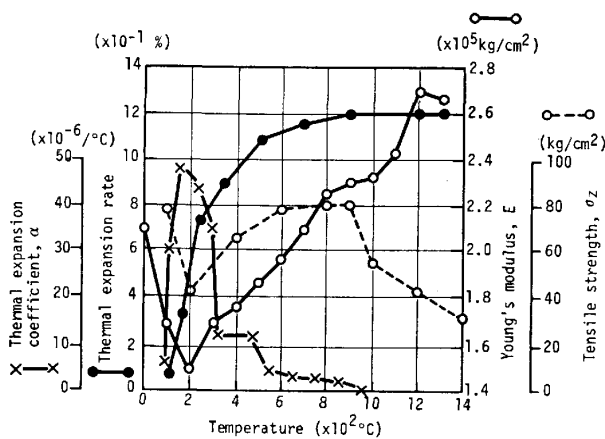
Fig. 2. Cooling rate.

分の珪石れんがについて Fig. 2 の冷却速度で熱応力を計算した。計算には(1)式の厚肉円筒の熱応力計算式⁶⁾を用いた。

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{r^2} \int_a^r \theta \cdot r \cdot dr + \frac{r^2 + a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \cdot \int_a^b \theta \cdot r \cdot dr - \theta \right\} \dots \dots \dots (1)$$

α は熱膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)、 E は弾性係数 (kg/cm^2)、 ν はポアソン比 ($=0.15$)、 r は半径 (cm)、 θ は温度 ($^\circ\text{C}$)、 a は内半径 (cm)、 b は外半径 (cm) を示す。

珪石れんがの物性値を Fig. 3 に示す。第3高炉付属熱風炉のドーム温度 $500 \sim 200^\circ\text{C}$ (珪石れんが部の損傷がもつとも生じやすい温度) での計算結果を Fig. 4 に示す。自然冷却した場合は炉内の熱が鉄皮からの放散熱のみで冷却されるので、れんが内の温度分布は内面から外面に向かつて低くなり、れんが内外面の温度差が大きく熱応力は大きい。一方、炉内に空気を送り込んで 15~30 日間で強制冷却した場合は、れんがの外側への放熱とともに内面も冷却されるので、れんが両面間の温度差が減少する。その結果、熱応力が減少し均一な収縮に近くなり、復元率が高く確保されると考えられる。したがって冷却速度を制御することの意義が認められる。



Young's modulus: Measured with ultrasonic velocity method
 Tensile strength: Measured with diametral compression test
 Mineralogical composition: Cristobalite 45%
 Tridymite 40%, Quartz 0.3%

Fig. 3. Properties of silica brick. (Measured by Nippon Steel Corp.)

4.1.2 実験炉での冷却速度と復元率の確認

4.1.1 の検討結果の確認のため内径 380 mmφ の直胴炉で模型実験した。珪石れんがの内面と外面の温度差は 60°C (自然冷却) と 0°C (制御冷却) の 2 ケースで、1400°C から 100°C へ 30 時間の速度で冷却した。炉の熱容量が小さいので冷却速度は速いが、ここでは内面と外面の温度差が重要な指標になる。結果を Table 1 に示す。制御冷却の場合は実験前後のすきまの数、幅の合計および内径の増加量が少ない。これは内面と外面の温度差が小さく保持されてれんがの内周と外周がほぼ同じ割合で収縮して、全体の復元率が高められたためであり 4.1.1 の考え方の妥当性を示すものである。

4.1.3 冷却速度

4.1.1 および 4.1.2 の検討により付属熱風炉の熱応力を低減する温度分布は Fig. 4 のパターン C がもつとも望ましく、ついで B, D そして A の順である。パターン C は 15 日冷却の場合に ①, ③, ④ の部分と 30 日冷却の ② の部分に生じ、適正な冷却速度の範囲は 15~30 日冷却である。実炉では不測の部分的な過冷却を防止す

Distribution patterns of temp.

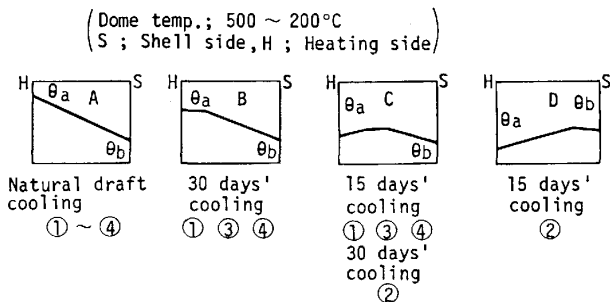


Fig. 4. Distribution patterns of temperature and thermal stress in silica brickworks.

Table 1. Results of experiment.

Items	Unit	Natural draft cooling	Controlled cooling
Opened joints	Number	5	3
	Total width (mm)	2.45	0.40
Change of inner diameter after experiment	mm	+0.88	+0.38

Table 2. States of brickworks after cooling of No. 1 hot stove.

Parts of the stove *1	Items, unit	Numbers and Values	
Dome ①	Openings Kc*2 (%)	Checker chamber 29.4	Combustion chamber 24.9
	Maximum width (mm)	12	14
	Interval (av.) (m)	1.5	1.5
Double brick layer ②	Level difference at the top of inner brick layer (mm)	Heating side 80	Heating side 30
		Shell side 19	Shell side 4
Conical dome ③	Openings Numbers	Upper part 8	Lower part 46
		Upper part 6	Lower part 35
Combustion chamber ④	Openings Kc*2 (%)	31.1	
	Maximum width (mm)	23	
	Interval (av.) (m)	2.0	

*1 Circled numbers show the numbers of Fig. 1.
 *2 Kc; Provisional Name; Opening appearance rate
 $Kc = [(\text{Total width of openings}) / (\text{Calculated shrinkage of circumference})] \times 100\%$
 Calculated shrinkage = $2\pi r \times 0.012$
 0.012: Thermal expansion rate

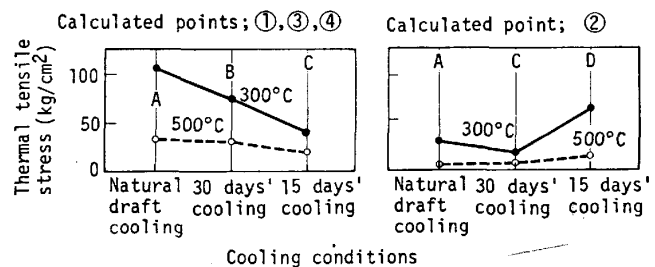
るために遅い方の 30 日冷却を採用した。

4.2 冷却実績

4.2.1 温度変化の測定結果

冷却は蓄熱炉下部から冷風を導入し、熱風出口から排出して行つた。Fig. 5 に主な部分の珪石れんがの冷却速度を示す。ドームは計画どおり 30 日冷却の曲線にそつて推移した。蓄熱炉は先に冷却されるためドームに比べて急速冷却になり 12 日で 100°C に降温した。Fig. 6 はれんが内の温度分布の実績を示す。左側はドームマンホールである。ドーム壁の測温が望ましいが、ドーム壁への温度計のそう入はれんが積を壊す恐れがあるのでや

Calculated thermal tensile stress of circumferential direction (Letters; Distribution patterns of temp.)



むを得ずドームマンホールで测温した。ドーム壁はマンホールより外面の断熱性が高いので、ドーム壁の温度分布はさらに低勾配になったと推定される。右側は蓄熱炉下部の珪石れんが壁で急速冷却になり、ドームの15日冷却の計算値に近いれんが内温度分布 (Fig. 4 のパターンC) であつた。

4.2.2 れんがの状態

Table 2 に冷却後の観測結果を示す。①についてみるとすきまの幅は 14 mm 以下であり、これまでの実績^{3)~5)}と比べて小さい。すきま発生率 (Kc) は 24.9~29.4% であり、これまで報告されている結果が 50~60% であつたのに比べて大幅に改善され、また部分的にもれんがの積み替えを要するような損傷はまつたくなかつた。以上のことはれんがの内外両面間の温度差を極力少なくする冷却方法が、大きなれんが積構造体である熱

風炉においても有効であつたことを示す。すきま発生率 (Kc) は収縮ともなうれんがの置き去り率を示すもので、[100%-Kc] は冷却時の復元率を示す。この復元率は 70~75% である。すきまは目地開きが主体である。これらの状態とこれまでの実績を総合的にみて、この熱風炉は再稼動に対してなんら問題はないと判断した。なお再昇温にあつてはすきまへの異物混入を防止するためにセラミックウールを軽く詰める計画である。

4.3 評価

Fig. 6 によると、ドーム壁は 30 日より早い速度で冷却すれば、内面と外面の温度差をさらに小さくできたことを意味している。蓄熱炉では 30 日冷却により、6月2日 (れんが温度 350°C 以下) 以降の温度差をほぼ最小の値に保持できた。実炉では各部が同一の温度差になるように制御することは困難であり、局部的に異常に

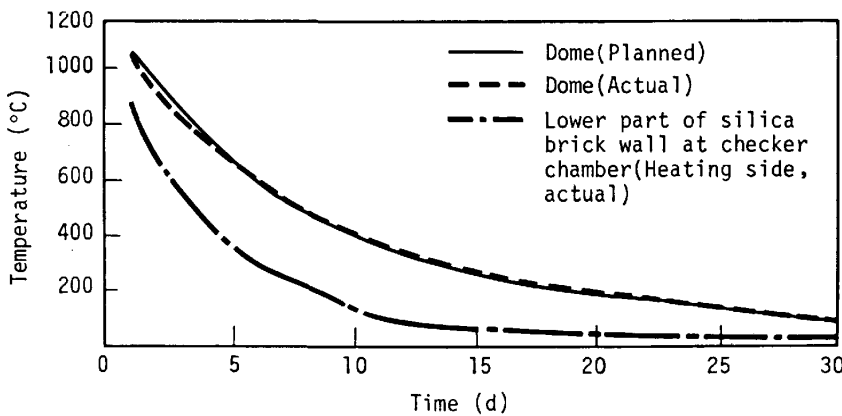


Fig. 5. Cooling curve of No. 1 hot stove.

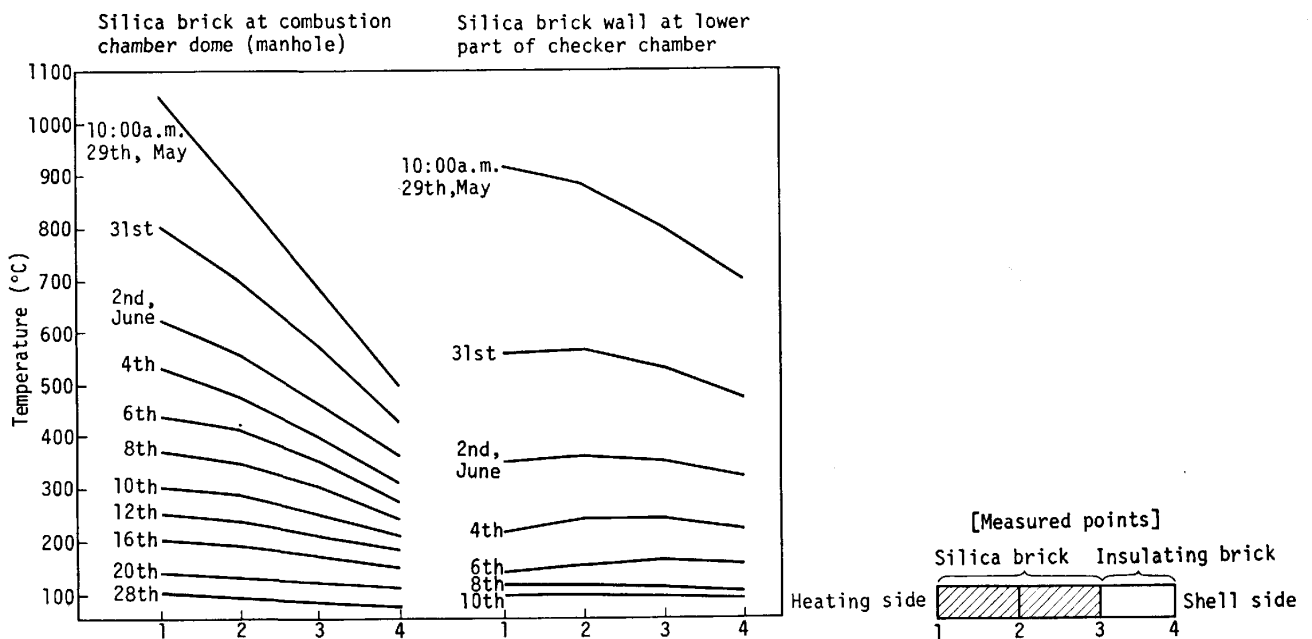


Fig. 6. Temperature gradients in silica brick at cooling of No. 1 hot stove.

ならないように各部を総合的に管理し冷却することが重要である。今回採用したドーム温度基準での 30 日の冷却速度は、珪石れんがが大きな熱膨張係数を示す 350~100°C の温度範囲における内面と外面の温度差をできるだけ小さくする上で適正な範囲にあつたといえる。熱応力を小さくし、結果として 4・2・2 に示したような再稼動可能な状態に冷却することができた。

5. 保 熱

操業中の非定常の昇温と降温のくり返しにより円周方向と半径方向の引張熱応力がくり返される。円周方向の応力は膨張吸収用目地により緩和されて、れんが積の破壊にはいたらない。一方、半径方向の応力は半径方向に直角な面の破壊を起こす可能性が高炉炉壁の熱応力の検討⁷⁾⁸⁾ などからも推測される。従来、下限温度は石英の変態点 (573°C) 以上の温度域に規定し、珪石れんが壁に適用してきた。今回は半径方向の熱応力の面から通常

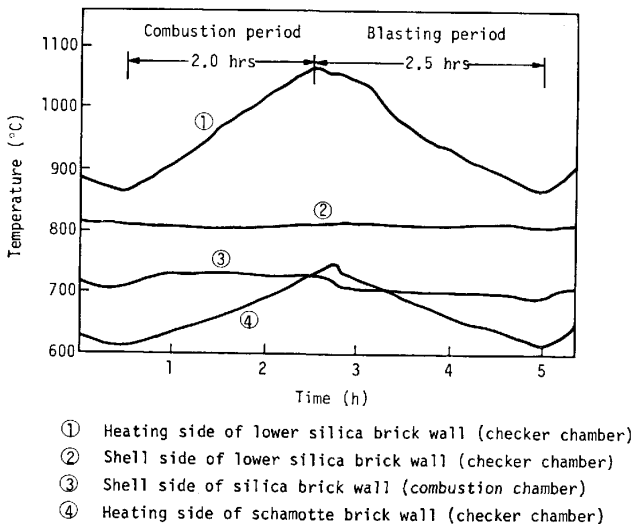


Fig. 7. Temperature change at various parts in the hot stove.

操業結果を解析し、珪石れんがの安定性を定量化して低温保熱のための下限温度を設定し実炉に適用した。

5・1 通常操業の解析と下限温度

第 3 高炉と同じ設計で、測温点を多く有する君津第 4 高炉付属熱風炉壁の測温実績を Fig. 7 に示す。これをもとに蓄熱炉壁の内面と外面の温度を Table 3 のようにパターン化して半径方向の引張熱応力を検討した。

5・1・1 半径方向の熱応力推定

引張熱応力は次の (2) 式⁹⁾ により計算した。

$$\sigma_{(z)} = \alpha \cdot E \frac{\partial^2 \theta(Z, t)}{\partial Z^2} \cdot \left\{ \frac{\zeta_1 \cdot a^2}{16 + 3(a/Z)^3} + \frac{\zeta_2 \cdot b^2}{16 + 3(b/Z)^3} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

Table 3. Distribution patterns of temperature in silica brick and calculation bases.

Items	Case 1	Case 2	Case 3
Maximum temp. of heating surface (°C)	1 050	850	650
Minimum temp. of heating surface (°C)	850	650	450
Shell side temp. (°C)	800	600	400
Combustion time (h)		2.0	
Blasting time (h)		2.5	
Heating rate (°C/h)		100	
Cooling rate (°C/h)		-80	

α は熱膨張係数 (/°C), E は弾性係数 (kg/cm²), θ は温度 (°C), t は時間 (h), Z は内面からの半径方向距離 (cm), a はれんがの幅 (cm), b はれんがの高さ (cm), c はれんがの長さ (cm) ($0 \leq Z \leq c$), ζ_1 と ζ_2 は拘束度 ($\zeta=0$ は完全拘束, $\zeta=1$ は無拘束) を示す。

$$\frac{\partial^2 \theta(Z, t)}{\partial Z^2}$$

は一次元熱伝導方式により決定した。なお、(2)式では完全拘束のとき $\sigma_{(z)}=0$ となる。無拘束の場合は $\sigma_{(z)}$ が最大になり実用上安全側の解が得られるので $\zeta=1$ と仮定した。

5・1・2 熱応力と下限温度

Table 3 の 3 つのケースの最大熱応力時の温度と熱応力分布を Fig. 8 に示す。ケース 3 では 18.5 kg/cm² の最大引張熱応力が生じる。Fig. 9 に珪石れんがの外面温度との関係をまとめた。ここで計算式の誤差、れんがの応力疲労による強度劣化などを考慮して安全率を設定した。安全率は式の誤差 2, 強度劣化 2, その他 1 の合計 5 と定めた。実炉の高アルミナれんが部の実操業条件下で (2) 式を適用すると 5 前後の安全率になり、工業的には妥当な値と考えられる。ケース 1, 2 は十分安全といえるが、ケース 3 の最大熱応力はこの温度の引張強さ 65 kg/cm² の 1/3.5 に当たり安全とはいえない。そこで安全率 5 を確保できる点は 500°C で、この温度を下限温度に設定した。なお、通常時の操業では温度管理誤差を考慮して管理下限温度を 550°C とした。

5・2 保熱操業の下限温度

保熱操業では積極的な熱の授受がなく、各部の温度変化の量と速度は小さくなる。熱応力は減少し、珪石れんが下限温度は通常操業時に比べてさらに下げられる。

5・2・1 半径方向の熱応力と下限温度

1982 年 3 月に改修を始めた堺第 2 高炉の珪石れんが内燃式熱風炉 (加熱面積 64 500 m²/基) で珪石れんが下限温度 550°C の保熱操業を行い、壁の内外両面の温度を測定した。壁の構造は外燃式と内燃式はほぼ同じであるから、この測定値を君津第 3 高炉付属熱風炉に適用で

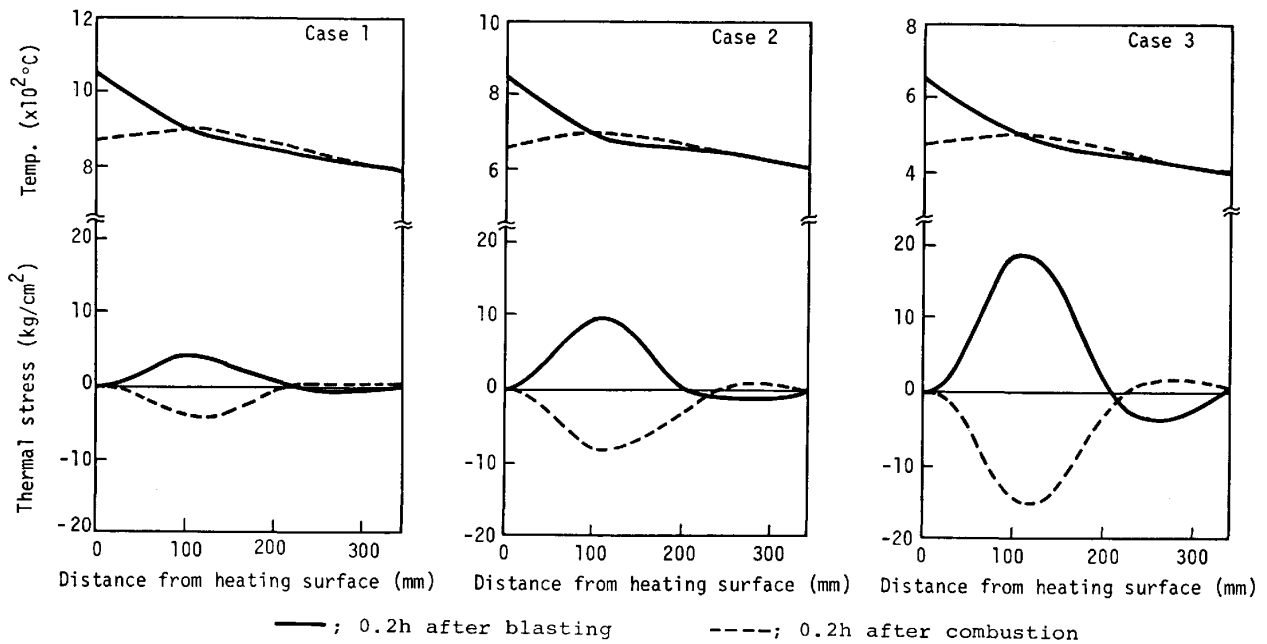


Fig. 8. Temperature and thermal stress distribution at the point of maximum stress in radial direction.

Table 4. Calculation bases and calculated stress during hot idling.

		1	2	3	4	5	6	7
Calculation bases	Maximum temp. of heating side (°C)	380	430	480	530	580	630	690
	Shell side temp. (°C)	300	350	400	450	500	550	600
	Thermal expansion coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	20	12	12	12	10	7	4
	Tensile strength (kg/cm ²)	52	60	65	70	73	76	78
	Young's modulus ($\times 10^8$ kg/cm ²)	1.70	1.74	1.76	1.80	1.85	1.90	1.95
Maximum tensile stress (Radial direction) (kg/cm ²)	Temp. fluctuation of heating side (25°C/h)	6.3	3.9	3.9	4.0	3.4	2.5	1.4
	" (50°C/h)	12.8	7.9	7.9	8.1	6.9	5.1	2.8

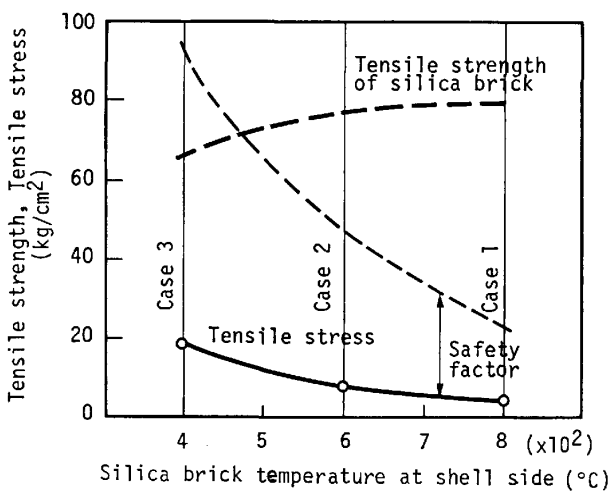


Fig. 9. Influence of temperature on the tensile stress in silica brick.

きる。界第2高炉付属熱風炉では燃焼-放熱のサイクルで昇温 50°C/h×1h, 降温 10°C/h×5h の内面温度変化を示した。この場合の半径方向の引張熱応力の計算条

件と結果を Table 4 に示すが、熱応力は昇温速度の減少により非常に低下する。珪石れんがの引張熱応力と安全率は下限温度 300°C でそれぞれ 12.8 kg/cm² と 4, 350°C で 7.9 kg/cm² と 7.6 であり、下限温度は 350°C が可能である。なおチェッカーれんがについては下限温度 300~500°C での熱サイクルで約 15% の強度低下を示すとの報告¹⁰⁾がある。しかし、それに比べて今回は昇温速度が 1/4, 降温速度が 1/20, 温度幅が 1/4 の温度条件であるのでチェッカーれんが強度への影響は問題にはならないと考えられる。

現実には高炉が休止しているので電気、ガスの供給安定度が劣り、事故時の追従性の遅れや测温誤差などに配慮した管理上の余裕をもつた下限温度の設定が望ましい。界第2高炉付属熱風炉の保熱操業の解析結果では下限温度を 350°C とすることが可能であるが、君津第3高炉用4号熱風炉の保熱操業では余裕を 100°C とし、下限温度を 450°C に設定した。れんがの収縮量は冷却

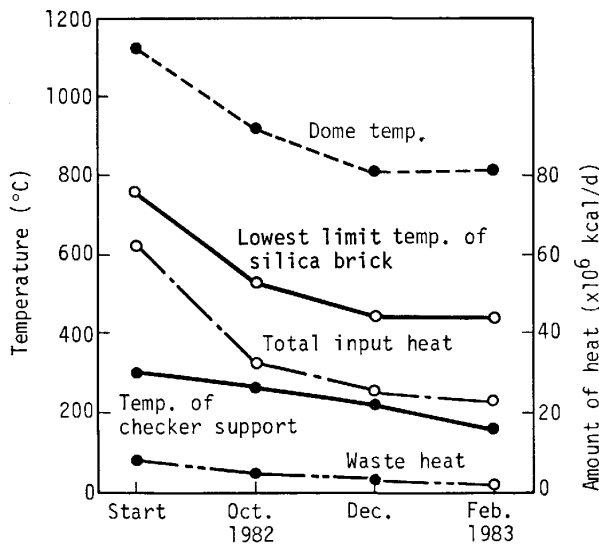


Fig. 10. Changes of control temperature of silica brick and total input heat for No. 4 hot stove during hot idling.

後に 1.2% (稼動中の 1000~1450°C から常温までの収縮率) であるが、保熱時、たとえば下限温度 450°C では 0.2% であり構造体変位は収縮量に比例するとみられるので、450°C では冷却後に比べて 1/6 程度の変位であり安全と考える。

5.3 低温保熱操業結果

4号熱風炉の珪石れんが下限温度 450°C の保熱操業結果を Fig. 10 に示す。下限温度の低下により保熱熱量は 24×10^6 kcal/d/基になり、従来の 573°C 以上の下限温度での $70 \sim 100 \times 10^6$ kcal/d/基の熱量に比べて大幅に低減した。温度の変動速度は $\pm 5^\circ\text{C}/\text{h}$ 、幅は 10°C 以内と小さくこれが熱応力のいつそうの低減に寄与したと考えられる。

6. 結 言

高炉休止中の珪石れんが熱風炉の措置の仕方は冷却と保熱の 2 とおりがある。今回、君津第 3 高炉の改修にと

もなう長期間の休止にあたり熱風炉の珪石れんが壁の熱応力に着目し、れんが積の損傷を少なくする冷却方法および保熱方法を確立した。すなわち

1) 冷却については珪石れんがの内面と外面の間の温度差を小さくして、円周方向の引張熱応力を低減する冷却方法を確立し 1 号熱風炉に適用した。目地開きの幅の少ない、かつ、き裂や段ずれのほとんどない冷却状態を得て、最小限の補修で再加熱使用の可能な目途を得た。

2) 保熱については非定常温度分布下の半径方向の引張熱応力を解析し、温度の変化速度とそれによつて生ずる引張熱応力との関係を定量化して珪石れんが下限温度を設定した。そして通常操業時の下限温度は 550°C が、また保熱時のそれは 450°C が妥当であるという結論を得た。この 450°C を 4 号熱風炉の低温保熱操業に適用した結果、保熱熱量下限を大幅に低減でき 24×10^6 kcal/d/基を達成した。

以上の結果により、高炉の長期間休止中の熱風炉の措置に要する費用を大幅に低減することができた。

文 献

- 1) 飯塚元彦: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2077
- 2) 大庭 宏, 平橋敬資, 小川朝康: 製鉄研究 (1971) 272, p. 76
- 3) 矢部茂慶, 倉重一郎, 石川克己, 寿原康紘: 鉄と鋼, 64 (1978), S67
- 4) 飯塚元彦, 梶川脩二, 金井一男, 中村博己: 鉄と鋼, 65 (1979), S546
- 5) 西田 功, 上仲俊行, 太田芳男, 大島隆三, 大平英毅: 鉄と鋼, 67 (1981), S28
- 6) 竹内洋一郎: 熱応力 (1975), p. 78 [日新出版]
- 7) 加藤一郎, 森田喜保, 樋上文範: 鉄と鋼, 66 (1980), S620
- 8) 小山保二郎, 飯山真人, 内山昭一, 今別府政好: 日本鋼管技報 (1982) 92, p. 1
- 9) 加藤一郎, 森田喜保, 樋上文範: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 105
- 10) 鈴木隆夫, 荒堀忠久, 山口久雄, 藤沢和夫: 鉄と鋼, 69 (1983), S97