

(討 3)

川崎製鉄技術本部
千葉製鉄所

○ 平谷 達雄
西山哲司、市原 勲

1. 緒 言

近代高炉の特徴である集約化すなわち強化操業による単位炉内容積当りの出鉄比の増加に伴い炉内の耐火物の使用条件もますます過酷になつてきている。そのため過去築炉材質上、構造設計上、種々な改善がなされてきているが、一代で巻かえをすることを前提とすれば改修期間の律速は炉床部より、熱負荷の大きいボツシュ部やシャフト下部にあると思われる。したがつて炉底の耐久性、侵蝕機構を検討する場合、全体のサラマンダー侵蝕は当然として、特に潜在的に Breakout の可能性をもつ炉底周辺、隅部の損耗のメカニズムの解明が重要である。

2. 煉瓦積の形式と侵蝕プロフィール

K. W. Cowling¹⁾が理論的に炭素煉瓦のサラマンダー曲線は鉄鉄の凝固線に一致すると実証して以来、炉底構造は理論上、あるいは冷却方法について飛躍的進歩がなされている。しかし個々のケースについては耐火物の材質、煉瓦の組合方法などにより一致しない例がでてくるのはやむをえない。また築炉法について考え方が統一されたとはいえず必ずしも先行する炉の経験にもとずいて、改修、新設炉の炉床形式を決めるようになっていない。

千葉 164, 165, 161, 163, 162 高炉の吹却し時の炉底侵蝕線を示した。溶損線はほぼ各炉共同様な傾向を示している。とくに3高炉、4高炉の炉底周辺部における侵蝕が著しく、くさび形を示しており冷却効果から考えて鉄鉄凝固線はかなり内側に存在するにも拘わらず、炉壁寄りに侵蝕が進行している。伝熱の効果上シャモット層を下層に設けていることは検討を要するが、当時炉底の冷却を効果的にして1150°C溶損線を上方に移動させるより、むしろ炉底基礎部の温度を上げないよう配慮したものと思われる。表1に千葉、水島高炉のカーボンブロックの使用状況を示した。千葉4高炉(2次)を境として炉底カーボンブロックはC/SからS/Cに変化し冷却効果の向上が図られ また、ボツシュ部へのカーボンの使用は千葉2高炉(2次)以降になつている。

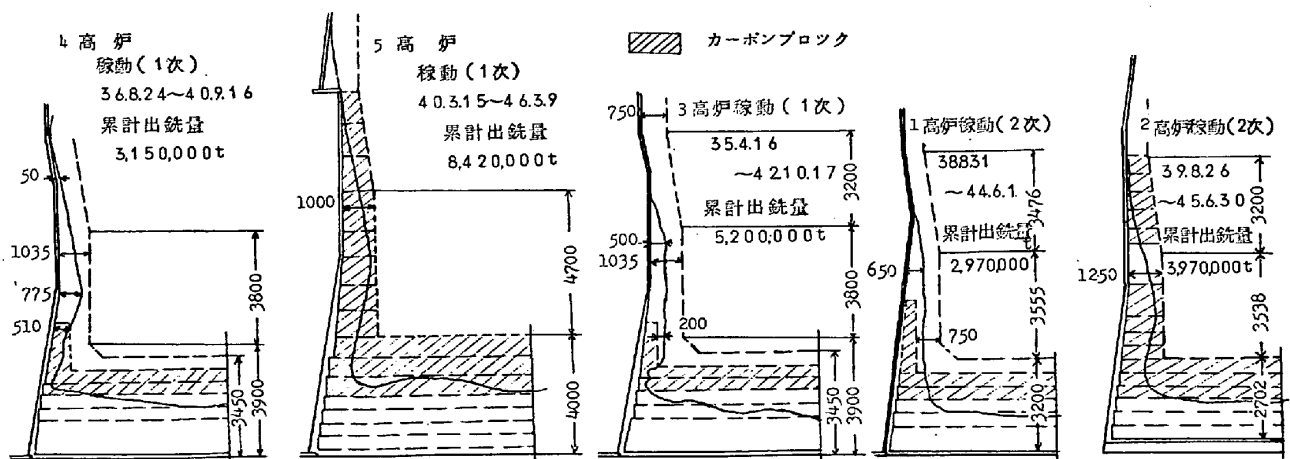


図1 高炉炉底の侵蝕プロフィール

3. 炉底の伝熱解析

手法として有限要素法を用い、計算モデルは炉床径14.5m、S/C型式、上段シャモット2.5m、下段カーボン2.35mを選んだ。計算条件を表2に示す。等温線は三角形要素の節点において求めた温度

表 1. カーボンブロックの使用状況

高炉(次)	出鉄量	稼働期間	湯溜径	炉底煉瓦厚	カーボンブロック厚	使用範囲	カーボン使用量
(千葉)	$\times 10^4$ t		mm	mm	mm		t
№2BF(1次)	275	33.3.19 39.6.5	7,500	3,040	(0)	炉底(上部)湯溜 (下部)外周部 2段	59.5
№3BF(1次)	520	35.4.16 42.10.17	8,800	3,450	(800)	炉底上部より2.3 段目湯溜(下部) 外周部2段	175
№4BF(1次)	315	36.8.24 40.9.16	8,800	3,450	(800)	"	175
№1BF(2次)	297	38.8.31 44.6.1	7,200	3,200	(918)	炉底上部より3 段目湯溜(下部) 外周部2段	151.0
№2BF(2次)	397	39.8.26 45.6.30	7,500	2,702	(1,305)	炉底上部3段 湯溜、朝顔部	430.5
№5BF(1次)	842	40.3.15 46.3.9	10,000	4,000	(2,048)	"	787
№4BF(2次)		41.1.7	8,800	2,900	(1,522)	炉底下部2段 炉底外周、湯溜、 朝顔	671.5
№3BF(2次) (水島)		43.1.17	8,800	2,734	(900)	炉底下部、炉底 外周、湯溜、 朝顔	630.4
№1BF		42.4.18	10,000	4,000	(1,612)	炉底下部3段 湯溜、朝顔	959
№2BF		44.1.8	11,500	4,500	(1,612)	炉底下部3段 湯溜	1,036
№3BF		45.10.14	12,400	4,700	(2,278)	炉底下部4段 湯溜	1,616
№4BF			14,400	4,800	(2,385)	"	約2,152

を内挿して X-Y プロッターにより自動作図した。炉体放散熱は炉壁、炉床の境界において温度勾配を求めフーリエ熱流束を計算し、境界長について積分して求めた。結果を表3および図2に示す。

炉底の水冷却(40°C)と空気冷却(30°C)を比較すると炉底、炉壁面の放散熱は等しく火入直後は水冷却しても効果は表われない。図2は上層シヤモット5段が溶損し炉底周返部が1,800mm(残り煉瓦厚700mm)くさび形に侵蝕された状態を示す。放散熱は火入直後と比べて2.5倍になり、炉壁面の熱放散は炉底面の約6.5倍に上昇している。

炉底の侵蝕を考る場合実際は羽口部を頂点とする溶銑、溶滓層内における温度勾配を無視することは出来ない。一般にわが国の高炉の出鉄口深は欧米のものに比較して小さくなっている。その理由の1つは操業上毎タップ出鉄、排滓をできるだけ完全に炉況の安定を図るためであるが炉床の熱負荷の点から考えるとそれだけ過酷にならざるをえない。Wilm²⁾らは種々の比較計算をおこない、熱負荷の点から

表2 伝熱計算データ

煉瓦厚	熱伝導率	境界条件	
mm	Kcal / Vm hr °C		
上層		炉壁鉄皮	30°C(一定)
シヤモット5段	2,500	炉底鉄皮	100°C(0 ≤ 半径 ≤ 8,000)
下層			100°C → 30°C(8,000 ≤ 半径 ≤ 10,300)
カーボンブロック4段	2,350	炉底冷却	管内乱流熱伝達係数
カーボンスタンプ	150		空気 40°C(Wilmの式)
炉床鉄皮	50		冷却水 30°C 4,000 kcal/m ² hr °C
アルミナセメント	650		

表3 計算結果

計算% 炉底面放散熱 ×10 Kcal/h	炉壁面放散熱 ×10 Kcal/h	全放散熱 ×10 Kcal/h
Case 2 112.79 (370.95)	1670.40 (2959.71)	1783.19 (2053.33)
Case 5 101.74 (334.61)	1681.95 (2980.17)	1783.69 (2053.90)
Case11 630.10 (207229)	4127.35 (7313.07)	4757.45 (5478.16)
Case12 92.47 (304.1)	1369.5 (2426.6)	1462.0 (1683.5)

備考 ただし()内は熱流束(平均) Kcal/m²h
 カーボン面炉底表面積 304.06 m²
 側壁 564.38 m²
 Case 2は水冷(30°C), Case5は空冷(40°C)
 Case11はシヤモットの侵蝕時, Case 12は炉
 底温度を1300°C水冷(30°C)とした場合である。

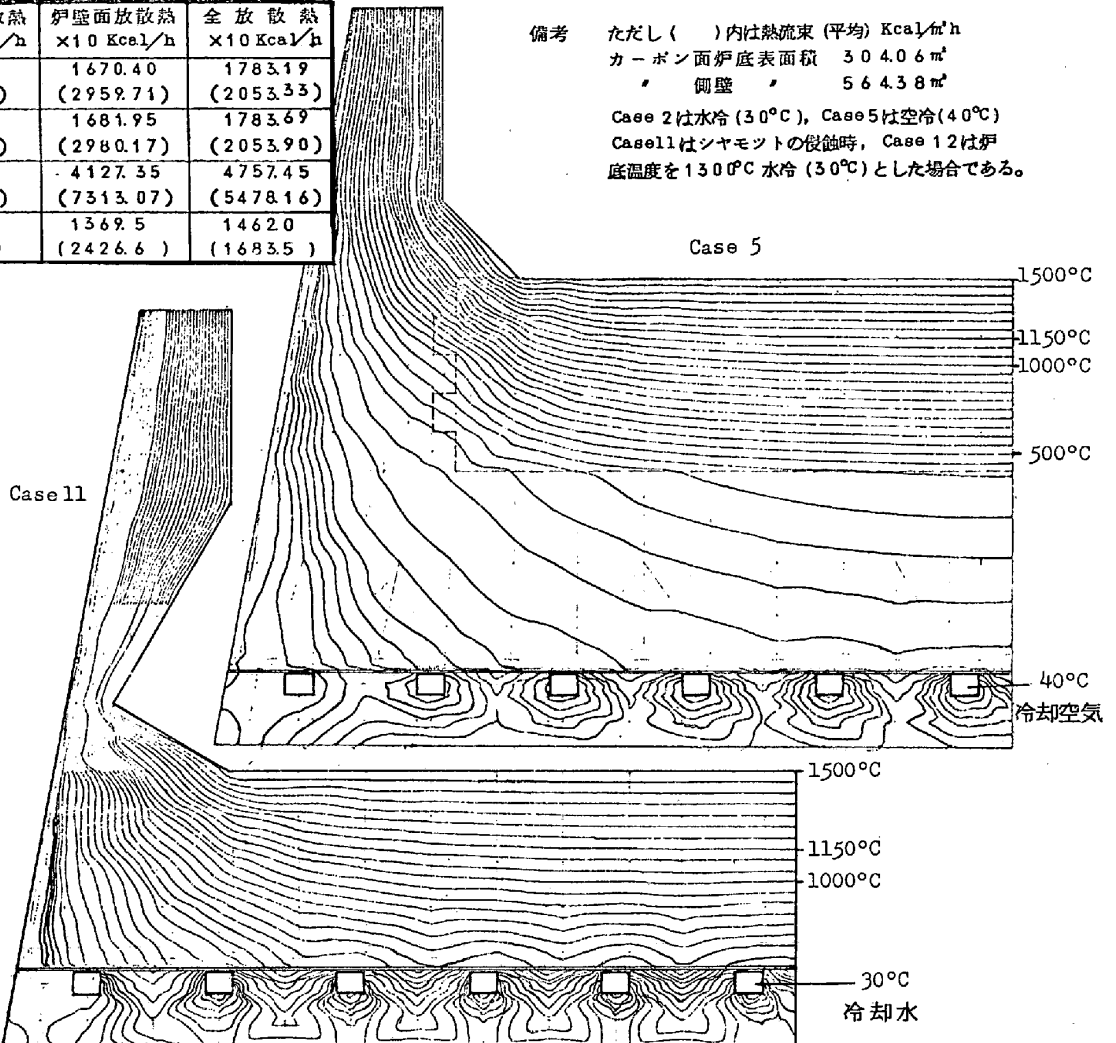


図2 炉底の温度分布

炉床の残存カーボン煉瓦厚は常に出鉄口-炉底冷却面間の距離の約4割になるとしている。したがって溶銑層の温度勾配を考えると出鉄口深の増加に比例して炉底煉瓦厚は減少させることができる。因みにATH社(独)のSchwelgen 161高炉では炉床径14mに対してカーボンブロックはパイプ埋込グラファイト層を含めて2.5m, Hambornの169高炉では1.2mになつてゐる。いずれにしても炉底の煉瓦厚については自から必要にして十分な値が存在すると思われるが、表3に境界条件として炉床内面の温度を1,300°Cにした場合の計算結果も示す。

4. 煉瓦内応力解析

炉底のシヤモット、カーボンブロック内に作用する力を計算するには、連続体の領域内任意の点で設定される前節で求めた温度の場と領域外から加わる外力に対して、応力-歪の関係式、変位の連続性を満たす適合条件式、力の均合いを満足する平衡条件式を解く必要がある。外力は分布荷重で、フェロスタティック圧力は羽口直下と出鉄口間距離を $\frac{1}{2}$ ずつスラグ層とメタル層が存在しているとして求め、またガス圧力は前者に対して小さいが約4 Kg/cm²とした。シミュレーションモデルは温度計算の場合と同じ寸法形状である。煉瓦特性のうち、弾性率 E はElliottらの値もあるが音波法で実測して得た。ただしこの値は応力-歪の関係式中求められ応力 σ と正比例関係にあるので σ/E で読み替へることによつて、煉瓦内で

変化する応力の相対的比較は可能である。境界条件として炉芯軸、炉底を固定端とした。

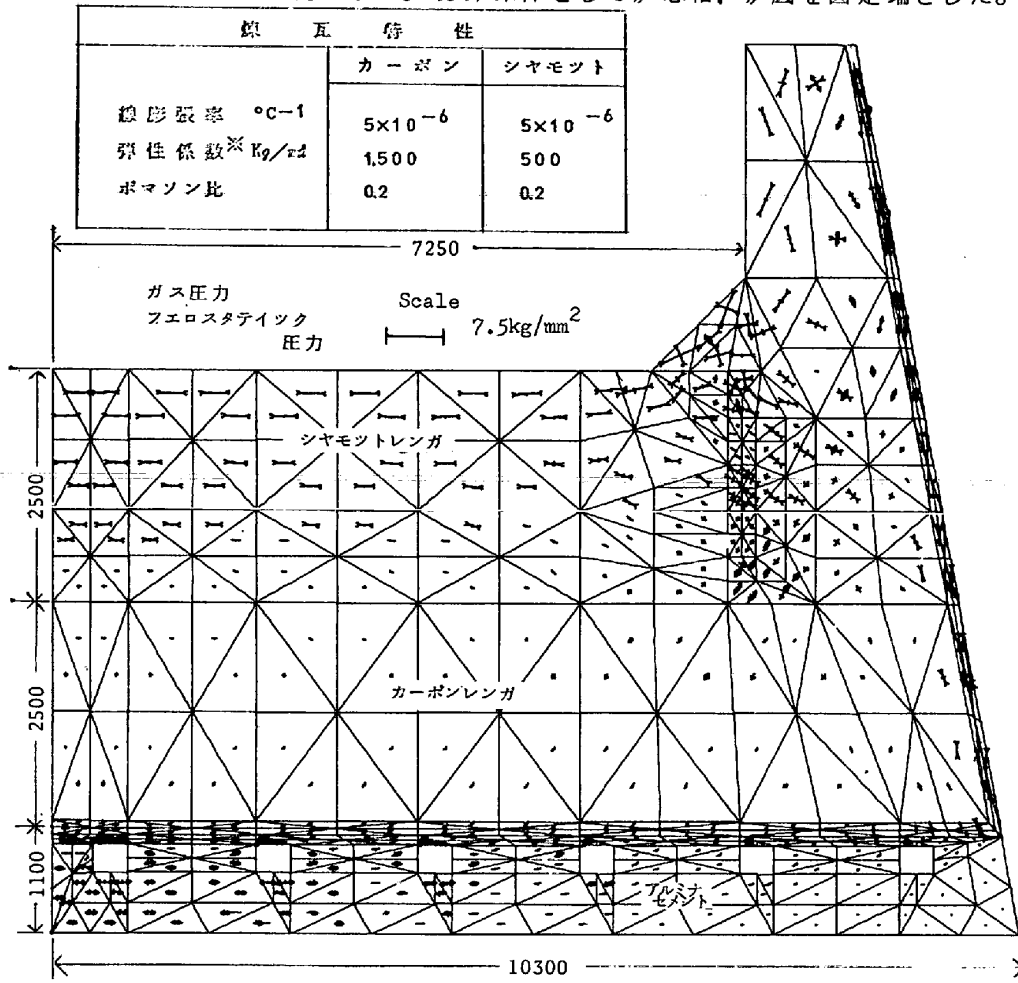


図3 炉底煉瓦に作用する応力流れ図（温度分布はCase 5で計算）

図3に主応力の分布図を示した。この図から操業初期のプロファイルで、炉底内面に沿って強い圧縮力が作用しており、とくに周辺隅部において応力集中を招いていることがわかる。切欠効果による応力集中はさらに溶損侵蝕が進行し隅部が鋭角になるにつれ、増大すると思われる。隅部において応力の流れは不連続であり、内表面法線方向に主応力が発達している。鉄皮側では引張力が作用しており、紙面と直角な炉周方向にも働いている。

このような作用力と侵蝕、とくに隅部などの崩壊現象は今後も解析されなければならないが、ОВЦАРЕНКО⁴⁾らはさらに煉瓦損耗の原因として Graphite-Fe平衡線に沿ってFe₃Cより形成されたγ鉄サランダーが操業の熱サイクルを経て浸炭されるにつれて、体積変化し炉底側壁煉瓦に対して作用力を及ぼすとし作用力を及ぼすとしている。この体積変化は実測により5.4%に達し、サランダー体積V、高さh、炉床径Dとすれば半径方向の変化ΔDは次式で与えられる。

$$\Delta D = 1.15(V/h)^{0.5} - D$$

- 1) K. W. Cowling, Refractories J. Vol. 40 (1964) No.2
- 2) E. Wilms et al, Stahl Eisen Vol. 88 (1968) No.11
- 3) J. F. Elliott et al, J. of Iron and Steel Inst. Vol. 167
- 4) Н.Л. ОВЦАРЕНКО, НЕПОЛАЗКИ ХОДА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕ № (1972) МЕТАЛЛУРГИЯ