

鑄造銅製クーリングステーブの開発と高炉への適用

村井 亮太*・有山 達郎*・木村 康一*²・午腸 誠*²
酒井 敦*³・櫻井 雅昭*³・松浦 正博*⁴・牧 章*⁵

Development of Cast Copper Cooling Staves and Its Application to Commercial Blast Furnace

Ryota MURAI, Tatsuro ARIYAMA, Kouichi KIMURA, Makoto GOCHO,
Atsushi SAKAI, Masaaki SAKURAI, Masahiro MATSUURA and Akira MAKI

Synopsis : Cast copper cooling staves have been newly developed to prolong blast furnace campaign life. Mathematical analysis by using the finite element method was carried out to investigate the thermal and mechanical characteristics of both the conventional cast iron and cast copper cooling staves. These calculation results showed that temperature of cast copper cooling staves was lower than that of cast iron cooling staves due to the higher thermal conductivity and the temperature distribution of cast copper cooling staves became uniform. As a result, thermal stress of cast copper cooling staves, caused by temperature difference, was much lower than that of the cast iron type.

According to approval examination of test staves at actual blast furnace, heat flux through the copper staves was estimated the same level as the cast iron staves by the help of formation of slag accretion layer on the surface of the staves. It became clear that there was no difference between rolled and cast copper staves in practical use although thermal conductivity of cast copper was slightly lower than that of rolled copper. Therefore, it was favorable to use cast copper staves from the viewpoints of the easiness of manufacturing and economical reason.

In the case of high rate injection of pulverized coal, peripheral gas flow tends to be intensified at the lower part of blast furnace. It was considered that cast copper staves were particularly effective for long life campaign in such a high heat load condition.

Key words: ironmaking; blast furnace; campaign life; cast copper staves; slag accretion; pulverized coal injection.

1. 緒言

製鉄分野においては高炉改修に伴う多大な設備投資を回避するため、高炉炉体の延命技術は重要課題の一つとなっている。高炉の寿命は、多くの場合、補修の困難な炉底レンガの損耗や朝顔の冷却板 (Cooling Stave: 以下CSと略記) の破損により決定される。近年、製鉄工程ではコスト低減、コークス炉の寿命延長などの背景から微粉炭吹込み操業が急速に普及しているが、その条件下では炉芯の通気性変化から炉下部ガス流れの周辺流化傾向が強まり¹⁾、炉下部朝顔への熱負荷が増大することが指摘されている²⁾。今後の微粉炭吹込み量の増大を考慮すると、その炉内状況変化を踏まえた朝顔CSの管理、新たなCSの開発は高炉の延命を図る上で非常に重要となる。

朝顔CSの長寿命化のため、従来、多用されてきた鑄鉄にかわり冷却能の高い銅を材料として使用した例が報告されている^{3,4)}。基本的に、その報告の多くは個々の高炉における操業への一般的な影響評価にとどまり⁵⁻⁸⁾、上記の微粉炭多量吹込み時のような炉内状況を考慮した銅CSの熱的、機械的性質および損耗機構について検討したものは

少ない。

筆者らは従来の圧延銅に比べ加工性、冷却水路設計の自由度や製造コストの点で優位であり、また羽口、冷却箱で実績のある鑄銅製CSを新たに開発し、実炉適用を図った。本論文では、有限要素法を用いて高炉内状況を反映させた伝熱・応力解析を行い、鑄鉄製CS、銅製CSの特性を評価した結果、さらに、開発した鑄銅製CSの実機適用結果について報告する。

2. 高炉の操業条件と朝顔部熱負荷

緒言で述べたように微粉炭多量吹込み時には炉芯の通気性、通液性が大きく変化する。筆者らはFig. 1のように微粉炭多量吹込み時の炉下部状況をまとめている⁹⁾。すなわち、微粉炭吹込みによってレースウェイ奥には通気性不良層が形成されると同時に炉芯内部の粉蓄積が顕著となり、炉芯へのガス流入、熱供給が妨げられる。さらにレースウェイ内部では微粉炭燃焼によって最高温度部位が羽口側に接近する¹⁰⁾。以上の結果として、炉下部においては高温のガス流が周辺を通過し、朝顔部に対する熱負荷は上昇す

平成14年4月15日受付 平成14年6月7日受理 (Received on Apr. 15, 2002; Accepted on June 7, 2002)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials and Processing Research Center, NKK Corp., 1 Kokan-cho Fukuyama 721-8510)

* 2 NKK京浜製鉄所 (Keihin Works, NKK Corp.)

* 3 NKK福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corp.)

* 4 NKKエンジニアリング研究所 (Engineering Research Center, NKK Corp.)

* 5 NKK鉄鋼技術センター (Steel Technical Center, NKK Corp.)

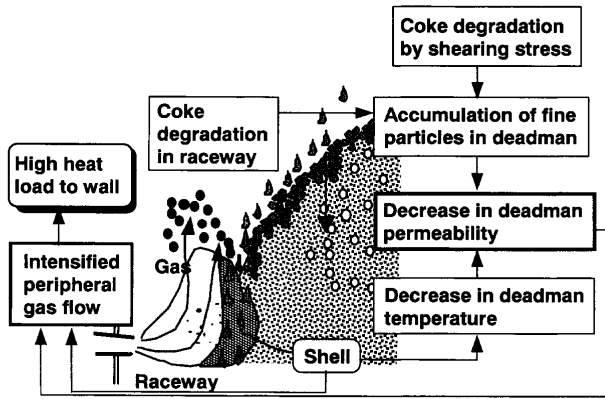


Fig. 1. Schematic drawing of lower part of blast furnace at high rate injection of pulverized coal.

Table 1. Calculation conditions of 2-dimensional model for lower part of blast furnace.

	Case - 1	Case - 2	Case - 3
Productivity (t/d·m ³)	1.80	2.20	1.80
Fuel rate (kg/t)	500	550	500
PCI rate (kg/t)	100	100	200

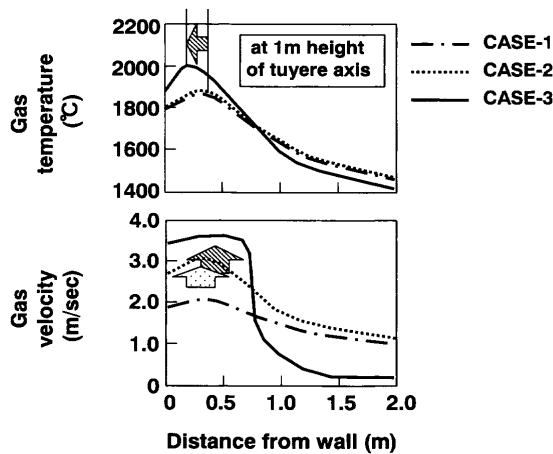


Fig. 2. Gas temperature and gas velocity at 1m height from tuyere axis calculated by 2-dimensional model.

る。近年の朝顔CSの破損には、これらの高炉下部における熱負荷の影響が大きく影響すると考えられる。具体的に高炉の操業条件が朝顔部の熱負荷に及ぼす影響を明らかにするため、2次元ガス流れ・伝熱シミュレーションモデルによる炉下部ガス流れの検討を行った¹¹⁾。

Table 1にモデル計算の計算条件を示す。Case-1はベース条件である。Case-1に比較してCase-2は高燃料比、高生産条件を、Case-3は、微粉炭多量吹込み高炉を示す。Fig. 2は朝顔部（羽口レベルの上方1m）におけるガス流速と温度の計算結果を示す。Case-2ではボッシュガス量が増大することから朝顔レベルでのガス流速が増大している。Case-3では径方向でのガス流速の増大と共に最高温度の位

Table 2. Physical and mechanical properties of material for cooling staves.

	Cast iron	Cast copper	Rolled copper
λ (W/m·K)	30-40	190-230	325-350
Melting point (°C)	1180	1080	1080
Density (kg/m ³)	7200	8900	8900
Linear expansion (1/K)	1.1×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.7×10^{-5}

(λ : Thermal conductivity)

置が炉壁側に移動し、その炉壁部のガス温度も上昇する。シミュレーション結果から高燃料比、高生産（高ボッシュガス量）条件では、ガス流速の上昇に起因する朝顔部熱負荷の増大が示唆される。また微粉炭多量吹込みを行う高炉では、ガス流速の増大に加えガス温度の上昇の影響もあり従来操業に比較して朝顔部への熱負荷が増大することが推察される。これらの熱負荷の上昇はCSの早期破損を生じやすいと考えられる。特に微粉炭吹込み操業は、そのメリットを考慮すると今後も拡大することが予想され、これに耐えるCSの役割は大きい。

3. 鋳銅製CSの開発

3.1 CSの耐久性向上の考え方

CSの耐久性を向上させ炉体寿命延長を図るためには、CS本体の温度を低位に安定させることで、熱変形による破損を防止し、同時にCS前面にスラグ層を安定して形成させ損耗を防止することが有効である。この考えに基づきCS材質として従来の鋳鉄に代わり熱伝導率の高い銅に着目し検討を行った。Table 2に鋳鉄、鋳銅および圧延銅の基礎物性値を示す。銅は鋳鉄に比較して熱伝導率が高く冷却能に優れている。緒言で述べたように、鋳銅は羽口、冷却箱で実績があり加工性にも優れる。ただし、鋳銅では鋳造時の欠陥発生防止等の目的で添加剤を使用するため、圧延銅に比べ純度が低下し熱伝導率はやや低くなる¹²⁾。

3.2 CSの伝熱・応力解析

有限要素法による伝熱、応力解析を行い、鋳鉄CS、銅CSの特性を評価した。銅については鋳銅を選択して計算を行った。鋳銅と圧延銅の熱伝導率の差異はわずかであり、鋳銅CSの計算結果から圧延銅CSの計算結果を推測可能と考えた。計算条件と計算対象としたCSのモデルをFig. 3に示す。材質の影響のみを検討するため、鋳鉄製と鋳銅製のCSで形状と境界条件は同一とした。実炉適用時には、CS表面に滴下した熔融スラグが付着し保護層が形成されると考えられるが、本計算ではこの影響は除外した。

Fig. 4に鋳銅製および鋳鉄製CSの温度分布計算結果を、Fig. 5に熱応力分布計算結果を示す。熱応力はミーゼスの相当応力値で評価した¹³⁾。炉内温度は1500°Cと設定した

Boundary conditions	
■ Materials	
- Stave : Cast Iron, Cast Copper	
■ Heat transfer coefficient (W/m ² ·K)	
- On shell outside	: 4.44
- On stave hot face	: 97.6
- On cooling pipe inside	: 9630
■ Boundary temperature(°C)	
- Atmosphere	: 25
- Process gas	: 1,500
- Cooling water	: 30

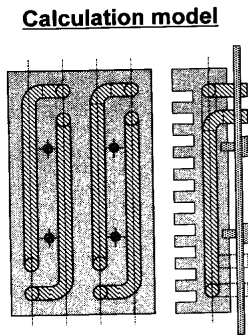


Fig. 3. Calculation conditions of the FEM analysis.

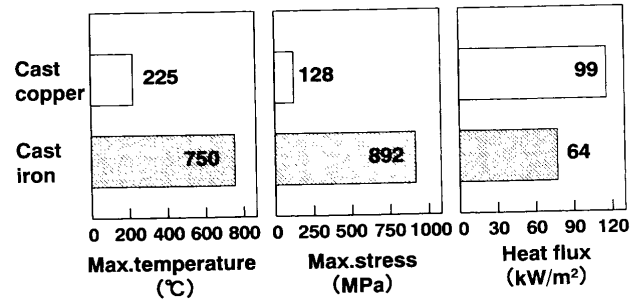


Fig. 6. Comparison of calculated results. (No accretion layer.)

の基礎的な解析結果を基に、朝顔部鑄銅製CSの設計・製作を実施し、実機試験を行った。

4. 実炉における耐損耗長期試験

数値解析の結果、銅製CSの最大応力値は鑄鉄製CSに比べ小さいため、熱変形量が少なく長寿命化が期待できるが、一方、対磨耗性が懸念される。本節では、銅製CSの耐久性を検証するために実施した長期試験について記す。

福山2高炉において1983年12月にシャフト最下段に試験用の鑄銅製CSを設置し、10年10ヶ月経過後に取り外した。鑄銅製CSは鑄鉄製CSの前面に設置した。Fig. 7に鑄銅製CSの設置位置および取り外し後の外観写真を示す。鑄鉄製CSでは表面に多数の亀裂が入り変形しているのに対し、鑄銅製CSの場合、変形はほとんど生じていない。損耗量はわずかに2mm、0.17mm/年であった。鑄鉄の機械的強度は高温場では急激に低下し、特に磨耗量は500°C以上で急激に増加するが、銅の機械的強度の減少は300°C程度までは緩やかであることを考慮すると¹⁴⁻¹⁶⁾、シャフト下部のような熱負荷が高く、降下する装入物との接触によって絶えず摩擦が生じる条件下において、本体が高温になり熱応力も大きい鑄鉄製CSで変形、磨耗が進行し、冷却能が高く本体温度が低く維持される鑄銅製のCSでは、機械的強度の低下が抑制され良好な耐磨耗性を示したと推定できる。

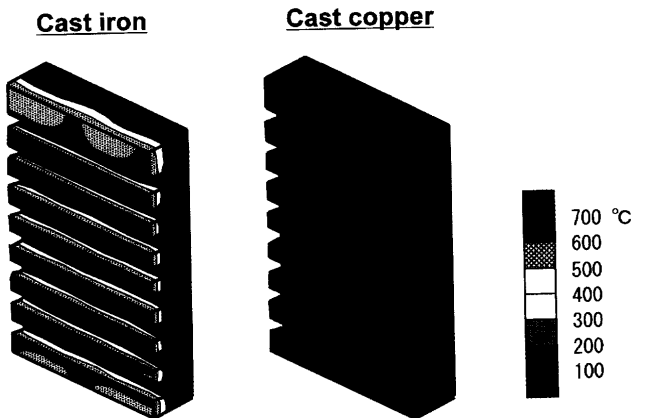


Fig. 4. Calculated temperature distribution by FEM analysis.

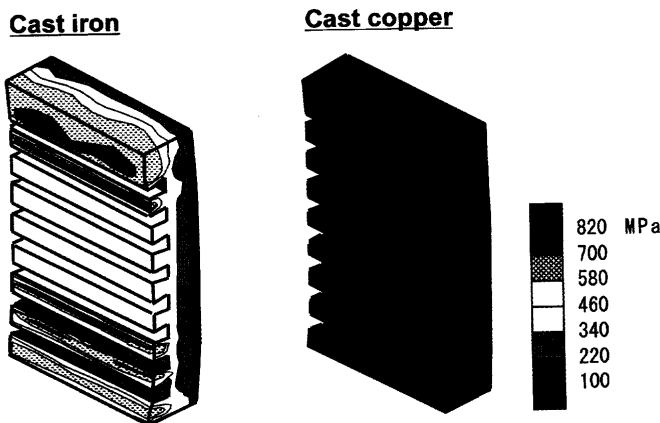


Fig. 5. Calculated stress distribution by FEM analysis.

が、Fig. 4より鑄鉄の場合には表面と背面に約500~600°Cの大きな温度分布が生じていることがわかる。鑄銅製の場合には温度分布が生じているものの、その温度差は小さい。結果的にFig. 5のように鑄銅製では全体に熱応力は小さくなる。またFig. 6は各CSについて最高温度、最高熱応力値、熱流束の比較を示したものである。銅CSは鑄鉄に比べて冷却能に優れているため、その最高温度は225°Cと低く、鑄鉄製CSの1/3程度である。温度勾配に起因する熱応力も鑄鉄製CSに比べて1/6程度に大きく低下している。これら

5. 実炉における銅製および鑄鉄製CSの比較試験

5.1 試験方法

京浜1高炉にて抜熱量変化、熱変形に関する銅製および鑄鉄製CSの比較試験を行った。Fig. 8に京浜1高炉への試験CSの設置方法を示す。材質による性能の違いを評価するために鑄銅製CSに隣接させて鑄鉄製CSと圧延銅製CSを設置した。各CSの形状については同一である。

5.2 CS本体の温度推移

Fig. 9にCSの炉内側表面から10mmの位置に埋め込んだ

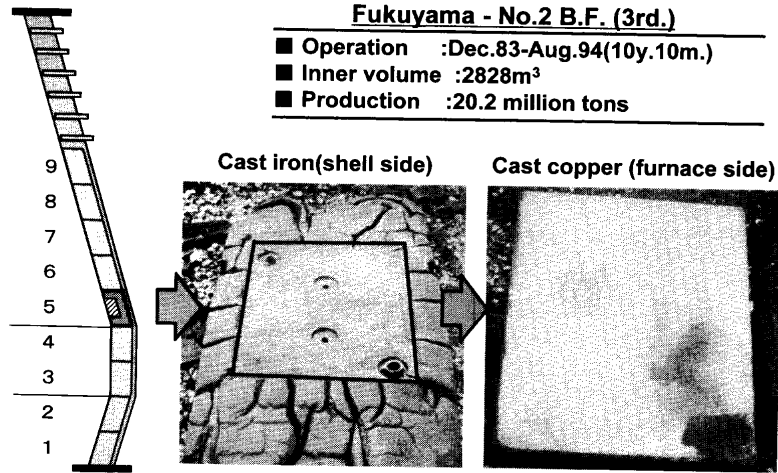


Fig. 7. Test result of cast copper in 3rd campaign of Fukuyama No. 2 blast furnace and photographs of the removed CS.

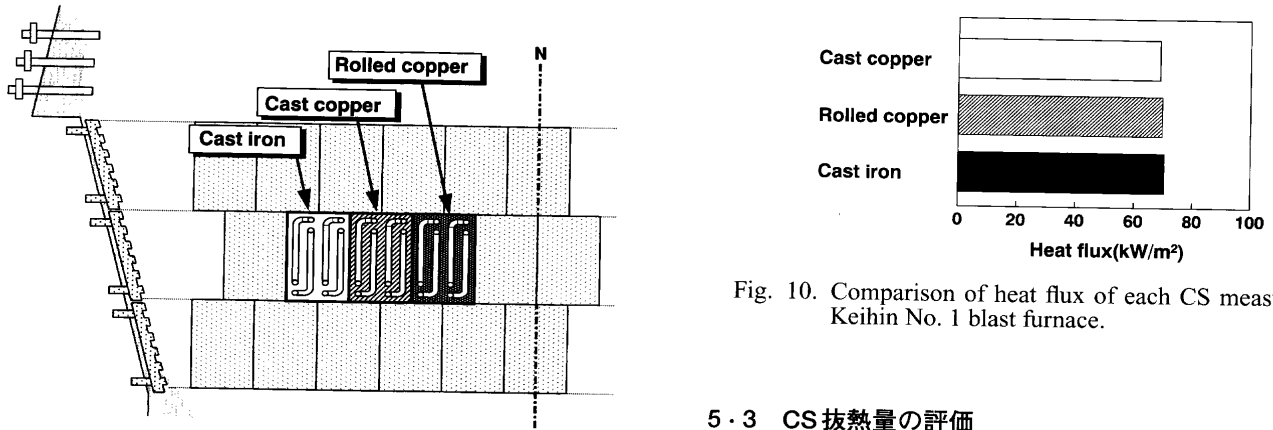


Fig. 10. Comparison of heat flux of each CS measured in Keihin No. 1 blast furnace.

Fig. 8. Location of CS at Keihin No. 1 blast furnace.

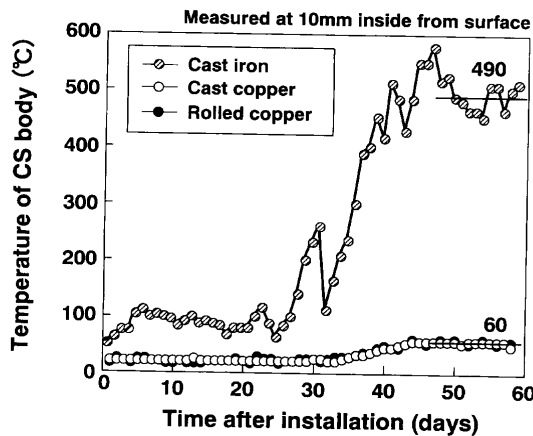


Fig. 9. Trends of CS body temperature.

熱電対により測定したCS本体の温度推移を示す。鑄銅、圧延銅製のCS本体温度はいずれも低く安定し、設置後1ヶ月ほどでやや上昇したものの、その温度は約60°Cであった。鑄銅、圧延銅間での差異は認められていない。鑄鉄製のCS本体温度は初期には安定していたが、設置後1ヶ月程度で上昇傾向を示し最高温度は500°C以上に達し、その変動も大きい。

5.3 CS抜熱量の評価

Fig.10にCS本体内部の深度が異なる2点で測定された温度をもとに1次元伝熱計算により求めた熱流束の比較を示す。熱流束 q_i は、CSの熱伝導率を λ_i 、温度計の深度差を d_i 、温度差を ΔT_i (i =鑄鉄、鑄銅、圧延銅) とすると

$$q_i = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot \Delta T_i \dots\dots\dots (1)$$

により算出した。

本実測結果ではCSの材質による抜熱量の差異は小さく、同等とみなしうる。Fig. 6の有限要素法による数値解析結果では、鑄銅製CSの抜熱量は鑄鉄製CSの1.5倍と推算されたにもかかわらず、上記の実測ではその差異はほとんどない。これは数値解析ではCS表面へのスラグ層の付着を考慮していないことに起因すると考えられる。鑄銅製CSでは表面温度が低下し、スラグ層の安定付着による断熱効果によって抜熱量が減少できるものと推定される。

次に上述のスラグ付着層の評価が重要であることから、上記の結果よりスラグ付着層厚の推定を行った。Fig.11に示した平面多層壁の1次元熱伝導モデルにより、第1層にスラグ付着層、第2層にCS本体、第3層に鑄鉄CSの場合には配管および配管内面の汚れ層を、また直冷式の銅製CSの場合には冷却水路の汚れ層のみを考慮した。汚れ層

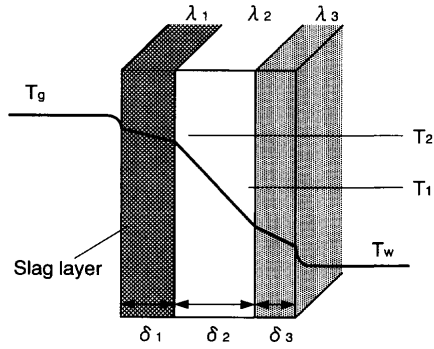


Fig. 11. One dimensional heat transfer model for estimation of slag accretion layer thickness.

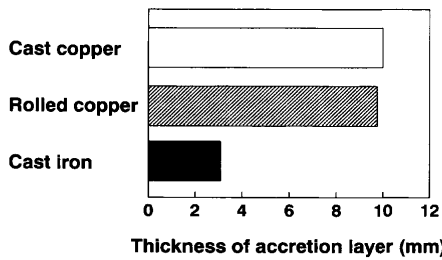


Fig. 12. Estimated thickness of accretion layer.

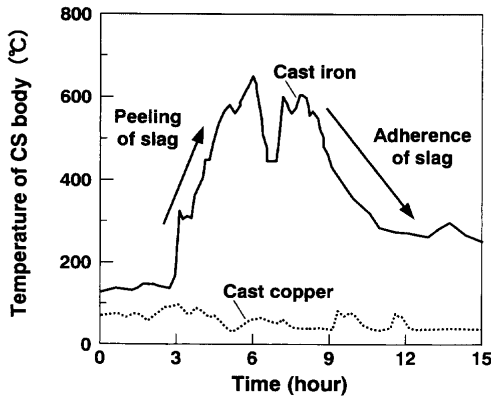


Fig. 13. Trends of CS body temperature in a short period.

の熱伝導率は別途炉外試験により見積もった。熱流束は

$$q_i = \frac{T_g - T_w}{\frac{1}{h_g} + \frac{\delta_{1,i}}{\lambda_1} + \frac{\delta_{2,i}}{\lambda_{2,i}} + \frac{\delta_{3,i}}{\lambda_{3,i}} + \frac{1}{h_w}} \dots\dots\dots(2)$$

で表される。炉内ガス温度、スラグ付着層の熱伝導率等を仮定し、熱流束の実測値とからスラグ付着層厚を未知数として求めた。スラグ付着層厚の推定結果を Fig.12 に示す。鑄鉄製CSでは前面の付着スラグ層厚は約3mmである。これに対し銅CSでは高熱伝導率によりCSの表面温度が低下するため、CS前面の付着スラグ層厚は約10mmと推定される。鑄銅製CSと圧延銅製のCSの差異は実質上ない。

Fig.13に鑄銅製CSと鑄鉄製CSの本体温度の短期変動を示す。鑄銅製CSの本体温度は低くかつ安定しているが、

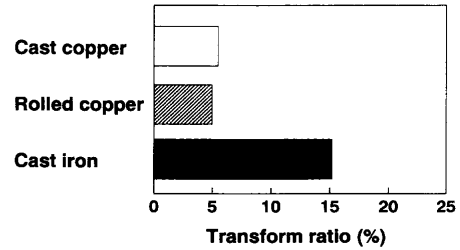


Fig. 14. Comparison of ratio of transform of cooling pipe.

鑄鉄製CSの本体温度は急激に変化する場合がある。鑄鉄製CSに顕著に認められる急激な温度上昇はCS前面の付着スラグ層の脱落に起因し、その後の緩やかな温度低下は付着スラグ層が再形成される過程と考えられる。鑄銅製CSは冷却能が大きく本体温度が低く維持されることから、CS前面に比較的厚いスラグ層が安定的に付着し、さらに本体温度はいっそう低く安定する結果、抜熱量は鑄鉄製CSと同等に抑えられるものと考えられる。鑄銅製CSの熱伝導率は圧延銅製CSより小さいが、実用的には差異はなく、同等の冷却能を有するものと考えられる。

5.4 CS変形挙動の推定と比較

Fig.14に設置3年後に測定した冷却配管の変位率を比較して示す。配管に設置した伸縮式継手の変位量を取り付け時全長で除した指数である。鑄鉄製CSでは約15%の変形量に対し、圧延銅、鑄銅製CSともに配管の変形量は約5%とわずかである。このことは、CS本体自体の変形が少なく炉内への引き込まれ現象が抑制されていると推察される。これは銅製CSの冷却能が格段に鑄鉄CSに比較して優れ、機械的な強度を長期間維持できている結果と言える。

6. 銅製CSの高炉操業への影響

前節のように銅製CSを部分的に適用し、良好な結果を得たことから、京浜1高炉にて朝顔CSの2段全周(56枚)を鑄銅製CSに交換した。

Fig.15にCS取替え前後の操業推移を示す。生産動向から操業度は徐々に上昇したが、鑄銅製CS取り付け後、安定して高微粉炭比および低Si操業を継続できた。これは、朝顔CSの破損トラブルが無くなったことに加え、鑄銅製CSの前面にスラグ付着層が安定して形成されたことにより、炉下部での原燃料の降下がスムーズとなり、炉熱変動が少なくなったことが関係しているものと思われる。

鑄銅製CSは鑄鉄製CSに比較して損耗速度が格段に小さく、本体の熱応力値も小さいことから変形量も少ない。したがって鑄銅製CSは鑄鉄製CSに認められるような経年劣化をほとんど受けることなく長期に渡り初期の性能維持が期待でき、安定した高炉操業実現に役立つものと推測される。

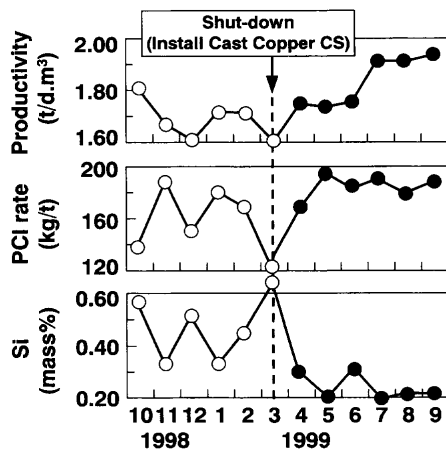


Fig. 15. Operational trends of Fukuyama No. 4 blast furnace.

7. 結言

高炉の長寿命化達成を目的に、新たな鑄銅製のCSを開発し有限要素法による熱解析試験ならびに実機適用試験を実施した。得られた結果を以下に示す。

(1) 有限要素法による解析の結果、鑄銅製のCSは従来の鑄鉄製CSに比較して熱伝導率が大きく冷却能が高いため、CSの最高温度は約1/3、最大熱応力値は1/6程度となる。

(2) 実炉適用時には、CS本体温度の測定結果からCS表面には安定したスラグ付着層が生成すると推定され、これにより抜熱量は鑄鉄製CSと同等と評価される。CSの変形ならびに損耗速度は極めて小さい。

(3) 鑄銅製CSの熱伝導率は圧延銅製CSに比べやや劣るが、実炉適用試験の結果、冷却能の差異はほとんどない。鑄銅の持つ加工柔軟性等の特性を考慮すると、鑄銅が圧延銅に比べ優位であると言える。

(4) 鑄銅製CSの全周適用試験の結果、CS破損のトラブルが減少し、高炉操業は安定化した。スラグ付着層の安定した形成に起因する炉熱変動の減少もあり、低Si操業の継続にも寄与すると考えられる。

(5) 微粉炭多量吹込み高炉では炉下部熱負荷が増大する傾向にあるが、このような高炉で長寿命化を達成するために銅製CSは有効であると考えられる。

記号

- q : 熱流束 (W/m^2)
- λ : 熱伝導率 ($W/m \cdot K$)
- d : 温度計の深度差 (m)
- T : 温度 (K)
- ΔT : 温度差 (K)
- δ : 厚さ (m)
- h : 熱伝達係数 ($W/m^2 \cdot K$)
- 添字
- i : 鑄鉄、鑄銅、圧延銅
- 1 : スラグ
- 2 : CS
- 3 : 配管および配管内面の汚れ層 (鑄鉄CSの場合)、または配管内面の汚れ層 (銅CSの場合)

文献

- 1) T.Kamijo, N.Takahashi, K.Hoshino, Y.Yoshida, R.Ito, K.Shibata and Y.Miyakawa: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 848.
- 2) K.Mori, K.Tomioka, A.Shimomura, A.Sakai, K.Kimura and A.Maki: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 960.
- 3) H.Peter, H.Hille, H.J.Bachofen and W.Kowalski: *Iron Steel Eng.*, **69** (1992), 49.
- 4) H.Hille: *Metall. Plant Technol. Int.*, **15** (1992), 38.
- 5) W.R.Hathaway, K.S.Nanavati, D.H.Wakelin and R.C.Schlotman: Proc. of the 58th Ironmaking Conf., ISS, Warrendale, PA, (1999), 35.
- 6) R.G.Helenbrook, W.Kowalski, K.H.Grosspietsch and H.Hille: *Iron Steel Eng.*, **73** (1996), 30.
- 7) C.M.Smithyman: *Iron Steelmaker*, **25** (1998), 87.
- 8) L.Bonte, H.DeLanghe, M.Depamelaere and B.Speleers: *Iron Steel Eng.*, **76** (1999), 43.
- 9) T.Ariyama, M.Sato, R.Murai, K.Goto and A.Murao: The 54th Committee (Ironmaking), the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), Rep. No. 2228, (2001).
- 10) T.Ariyama, M.Sato, R.Murai, K.Miyakawa, K.Nozawa and T.Kamijo: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 1114.
- 11) M.Sato, R.Murai, T.Ariyama, A.Maki, A.Shimomura and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 37.
- 12) H.Ueno: *J. JFS*, **73** (2001), 469.
- 13) 鈴木 博: 塑性加工改訂版, 裳華房, 東京, (1980), 52.
- 14) 改訂4版鑄物便覧, 日本鑄物協会編, 丸善, 東京, (1986), 594.
- 15) 飯高一郎: 理論金属学, 誠文堂新光社, 東京, (1971), 252.
- 16) 講座・現代の金属学材料編第5巻非鉄材料, 日本金属学会編, 丸善, 東京, (1987), 66.