

インコネル系合金肉盛によるボイラー寿命延長

Extended Life of Boiler by Inconel Cladding

古川 航平 FURUKAWA Kohei JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 設備部 設備技術室
細川 晃 HOSOKAWA Akira JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 設備部 製鋼設備室長 (課長)

要旨

転炉ボイラーは、転炉の上部に設置される、発生ガスから排熱を回収する設備である。転炉は取鍋ごとのバッチ単位で処理を行うため、排ガスの通過、温度昇降もバッチ単位で繰り返される。このことから、従来ボイラーの劣化はダストによる摩耗と熱応力による亀裂が主であったが、溶銑配合率低減のため転炉へ低品位スクラップを装入した2006年頃から、腐食による減肉も顕著になってきた。このような背景の中、耐腐食対策としてボイラーチューブの表面にNi基合金であるインコネルの肉盛溶接を行った。その結果、ボイラーの寿命を5年から10年に延長できた。

Abstract:

The boiler is a facility that recovers waste heat of CO gas generated in the converter furnace and is installed in the upper part of the converter furnace. The converter furnace processes molten iron in batches per ladle. Therefore, the passage of exhaust gas and temperature rise/fall are also repeated in batches. For this reason, the deterioration of the boiler was mainly by wear due to dust and cracks due to thermal stress. However, since low-grade scrap was charged in the converter to reduce the mixing ratio of hot metal after 2006, wall thinning of tube due to corrosion became noticeable. Under this situation, as a countermeasure against corrosion, Inconel, which is a Ni-based alloy, is welded on the surface of boiler tubes. As a result, the life span of the boiler was extended from 5 to 10 years.

1. はじめに

転炉ボイラーは、吹錬中と非吹錬中の熱負荷変動による温度振幅により発生する熱亀裂や、吹錬で発生するダストによる摩耗減肉で劣化する。熱亀裂や減肉により水漏れが生じると、溶銑との接触による水蒸気爆発のリスクが高まるため、設備を停止し補修を行う。水漏れの程度や部位にもよるが、補修には48時間程度かかる場合もあり、長期の設備停止が必要になる。また、補修による復旧が困難になるまで劣化が進行すると設備更新が必要となるが、その場合ボイラーによっては20日以上工期を要し、更に長期の設備停止が必要となることから、ボイラーの管理や長寿命化は重要な課題である。従来、福山地区3製鋼工場のボイラーでは、ダストカットによる摩耗減肉が寿命律速であったため、摩耗対策としてNi基の自溶製合金の溶射を部分的に行っていた。その結果、ボイラーの中で最も負荷の高い下部フードボイラーでは従来の母管のみに比べて更新寿命は3年から5年へと長寿命化されていた。下部フードボイラーの主仕様を表1に示す。しかし、同ボイラーにおいて、2006年下期から溶射部分以外の水管減肉速度が0.04 mm/月から0.22 mm/月へ急増し、水漏れが多発した。図1に減肉トレ

ンドを示す。このような水管の異常減肉の原因を調査し、対策としてインコネル系合金の肉盛を行った。

表1 下部フードボイラー主仕様
Table 1 Specification of lower hood boiler

Size	Cooling method	Specification of tube	Evaporation
φ5.8 m × H2.3 m	Membrane water tube panel	STB410S φ38.1 mm × t4.0 mm	15.6 t/h

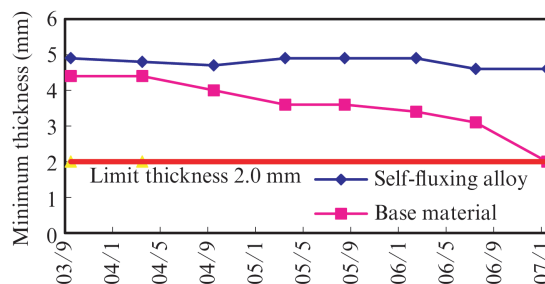


図1 厚み減肉トレンド

Fig. 1 Trend of thickness reduction

2019年3月15日受付

2. ボイラー減肉原因

2.1 水管減肉状況

2.1.1 水管マイクロ写真

減肉が激しかった下部フードボイラーの水管のマイクロ観察を行った。観察結果を図2に示す。結晶粒単位の凹凸状の浸食が見られたことから、ダストカット等による摩耗ではなく、高温酸化、腐食等の可能性が高いことが分かった。

2.1.2 ダスト分析

次に、腐食原因となる物質が排ガス中のダストに含まれているか調査を行った。表2に調査結果を示す。ダストにはCl元素が多く含まれていることが判明した。このことから、腐食と相関があるCl元素について原因の調査を行った。

2.2 水管腐食メカニズム

2.2.1 水管腐食メカニズム

転炉では、溶銑量削減のため、炉内に鉄スクラップを装入している。減肉速度が増加した06年下期からさらなる溶銑配合比率低減のため、低品位スクラップの使用を増加させていた。低品位スクラップにはClを含む不純物が多く含まれ、ここからCl元素が侵入したと推定される。

スクラップ装入後の溶銑装入時、スクラップに含有するClを含む不純物や塗料が燃焼し、HClガスが発生する。この時、空気も煙道へ侵入し、HClガスと空気中のO₂が、水管の酸化皮膜中のFe₂O₃を触媒として、次の反応が生じる。

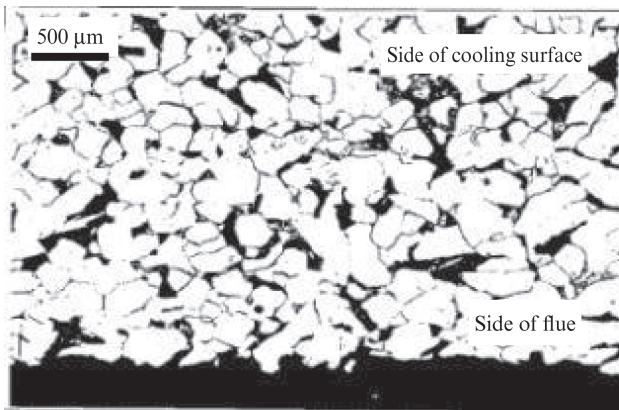
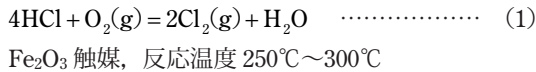


図2 水管拡大写真

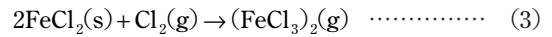
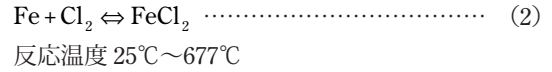
Fig. 2 Enlarged microstructure of tube

表2 ダスト成分

Table 2 Dust component

Component	C	Si	Fe	Zn	K	Cl
Content (%)	0.37	0.46	29.4	24.0	13.1	8.91

(1)の反応により、酸化被膜であるFe₂O₃が破壊され、母材が露出される。さらに、O₂とCl₂の酸化力を比較するとCl₂の方が大きいので、母材表面に酸化被膜を形成する前に次の反応が発生する。



上記のメカニズムにより、母材が(FeCl₃)₂となり蒸発し、腐食が発生したと考えられる。また、FeCl₃の沸点は300℃程度であり、ボイラーフィン部分の温度測定を実施したところ250℃~350℃程度であったことから、腐食が発生したことが裏付けられる。図3に腐食発生の様式図を示す。

2.2.2 水管 EPMA 分析

次に腐食原因調査のためEPMA分析を行った結果を図4に示す。これより、母材とスケールの境界面にCl元素が多

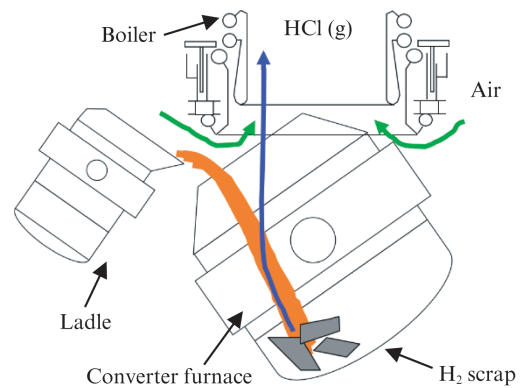


図3 腐食発生様式図

Fig. 3 Schematic diagram of corrosion reaction

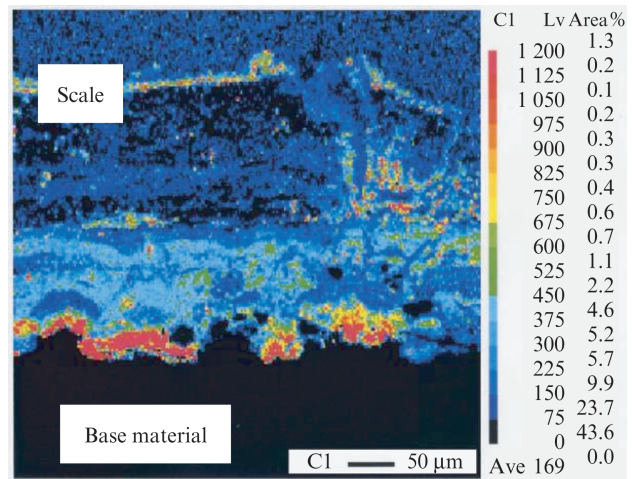


図4 水管Cl元素濃度分析

Fig. 4 Cl concentration analysis of tube

く含まれていることが分かった。この結果からも腐食の発生を裏付けられる。

3. ボイラー減肉対策

3.1 ボイラー煙道内ライニング材オフライン試験

3.1.1 耐食試験

上記の高温腐食を防止するために、ボイラー煙道内へのライニングを検討した。ライニング材としては、耐腐食性のある自溶製合金（SFNi2）の溶射とNi基であるインコネル系合金の肉盛を検討した。母材（STB410）と自溶製合金、インコネル系合金の成分を表3に示す。どちらのライニング材もNi基であり、Crを多く含有し耐食性に優れている。

また、株式会社フジコー様の協力を得て、オフライン腐食試験を行った。試験片は母材（φ38.1, t4.0）、自溶製合金、インコネル系合金である。自溶製合金とインコネル系合金は母材に溶射と肉盛により接合した。その試験片を表4に

表3 ライニング材成分
Table 3 Component of lining

	Ni	Cr	Si	C	Fe
Base material	—	—	—	0.32	99
Self-fluxing alloy	69~83	9~11	2~3.5	<0.5	<4
Inconel alloy	57~63	20~23	<0.5	0.1	<5

表4 腐食試験条件
Table 4 Condition of corrosion test

Surrounding condition			Corrosion condition		
Gas	Gas temperature	Specimen temperature	O ₂ concentration	Surface coating	Heating time
CO	300℃	1 000℃	4%	50% HCl + NaCl	96 hr

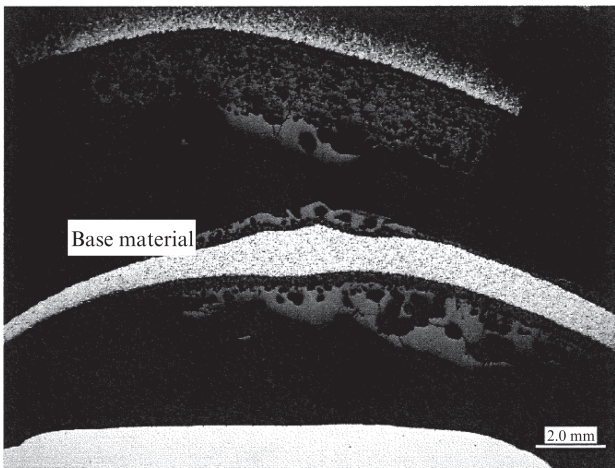


図5 腐食試験結果（母材）
Fig. 5 Result of corrosion test (base material)

示す条件で電気窯に設置し、試験を行った。図5、図6、図7に各試験片の試験後の写真を示す。試験の結果、自溶製合金とインコネル系合金に腐食は見られず、母材には最大2.0 mmの腐食減肉が生じた。これより、自溶製合金とインコネル系合金の耐食性は母材より高く、同等であると言える。

3.1.2 耐摩耗性評価

インコネル系合金と自溶製合金の耐摩耗性は、インコネル系合金の方が1.5倍程度優れているという報告がある¹⁾。表5に同報告における摩耗試験の結果を示す。

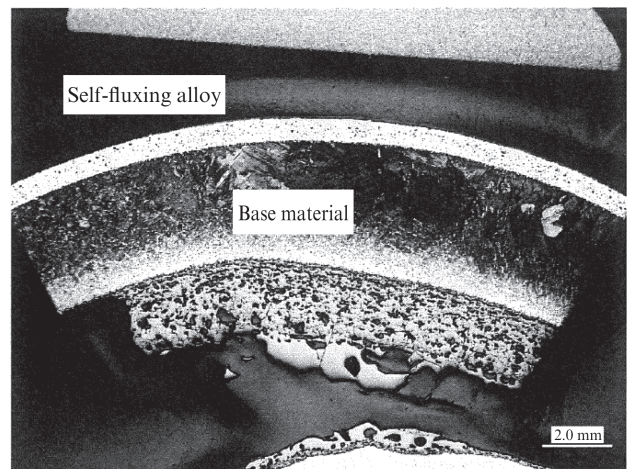


図6 腐食試験結果（自溶製合金）
Fig. 6 Result of corrosion test (Self-fluxing alloy)

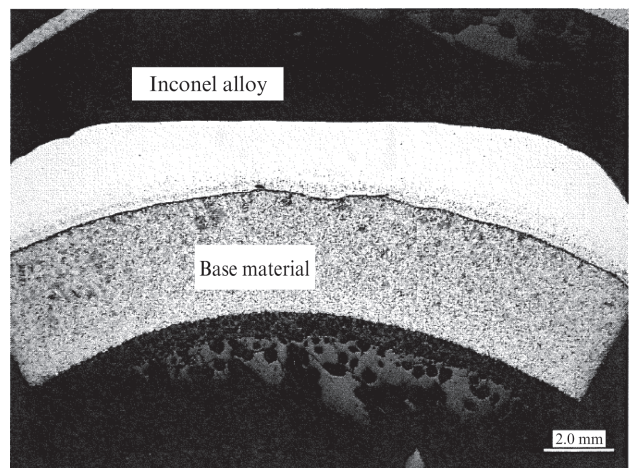


図7 腐食試験結果（インコネル系合金）
Fig. 7 Result of corrosion test (Inconel)

表5 摩耗試験結果¹⁾
Table 5 Result of wear test¹⁾

Material	Volume loss (cm ³)
Inconel	2.58 × 10 ⁻³
Self-fluxing alloy	3.77 × 10 ⁻³

3.1.3 耐熱亀裂試験

耐亀裂性に関しても、インコネル系合金、自溶製合金、母材で試験を行い比較した¹⁾。試験は、それぞれの材料に対して加熱、急冷を繰り返し亀裂発生までの繰り返し数を計測する方法によった。その結果、インコネル系合金が自溶製合金、母材と比べ最も耐亀裂性に優れていた。表6に試験結果を示す。以上の結果より、ボイラーの劣化形態である腐食、摩耗、亀裂に対し、インコネル系合金肉盛が最も有効であるということが分かった。

3.1.4 インコネル系合金試験導入

上記試験結果から、インコネル系合金を実機に試験的に導入した。導入した設備は、転炉ボイラーでなく、インジェクションにより高熱負荷にさらされる鍋脱珪設備のスカート部とした。脱珪設備のスカート部も転炉ボイラーと同様のメンブレンパネル構造であり、同様の劣化が問題になっていた。また、特に熱負荷の高いスカート下部のみに限定してインコネル系合金肉盛を施したが、図8に示すような肉盛部と非肉盛部の段差を起点とした亀裂が多発した。このことから、肉盛後の表面性状や不連続部に応力集中をなくすことが長寿命化に必要であることが分かった。

3.1.5 インコネル系合金表面性状

実機試験で、ビードの重なりに応力が集中し、亀裂発生寿命を縮めることが分かった。そこで表面性状の違う2種類のインコネル系合金肉盛を施した平板を用意し、熱衝撃試験を行った¹⁾。その結果、表面を手入れし平滑にすること

で長寿命化が図れることが分かった。このことから、実機導入時には、肉盛後にグラインダーによる手入れを行った。手入れ前の表面性状を図9に、手入れ後の表面性状を図10に示す。

4. 実機導入後の減肉、亀裂状況

4.1 実機導入後の減肉状況

インコネル系合金の肉盛を施したボイラーを2007年に導入した。導入後のチューブ肉厚の変化を図11に示す。導入後の減肉速度は、0.01 mm/10 000 chであった。母材のみの減肉速度と比較すると1/45に減少した。



図9 肉盛後の表面性状

Fig. 9 Properties of surface after cladding



図10 手入れ後の表面性状

Fig. 10 Properties of surface after smoothing

表6 亀裂試験結果
Table 6 Result of crack test

Materials	Test cycle						
	1	100	200	300	400	1 000	5 000
Inconel alloy	○	○	○	○	○	○	○
Self-fluxing alloy	○	○	○	○	×		
Base material	○	○	○	○	×		

○ No crack × Crack

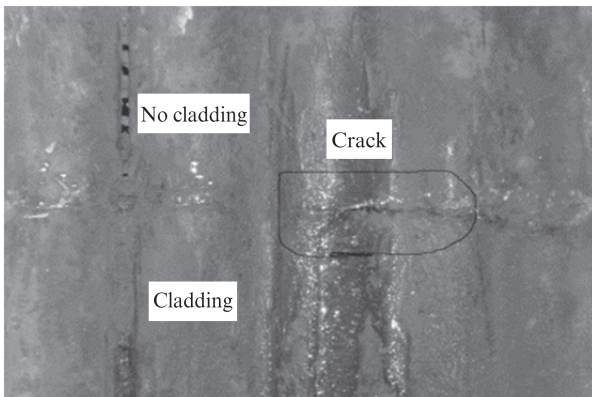


図8 インコネル系合金試験導入（脱珪設備）

Fig. 8 Trial of inconel (De-Si system)

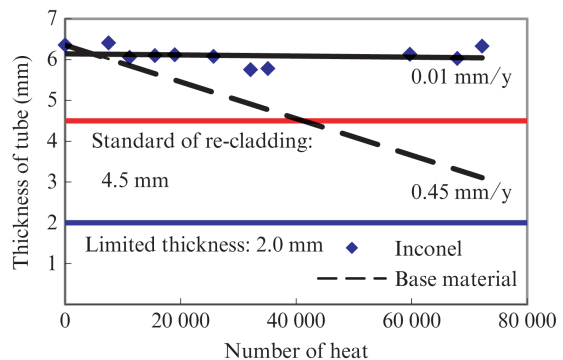


図11 インコネル系合金減肉トレンド

Fig. 11 Trend of inconel reduction

4.2 実機導入後の亀裂状況

4.2.1 亀裂発生状況

インコネル系合金導入後の転炉ボイラーの累計水漏れ回数を図 12 に示す。2013 年に亀裂を起点とする水漏れが初めて発生した。2016 年から同様の水漏れが頻発し、2017 年に更新に至った。インコネル系合金の肉盛により、従来の 5 年から 10 年へ、転炉ボイラーの長寿命化が達成できた。

4.2.2 インコネル系合金厚みによる発生応力の変化

今後の更なる長寿命化のためには、亀裂寿命の延長が必要になる。亀裂寿命はインコネル系合金肉厚によって変化するため、厚みを変化させ発生熱応力を計算した。まず図 13 に示す 1 次元定常伝熱を想定し、温度分布を算出した。算出には下記の式を用いた。

$$h_g(T_g - T_i) = \frac{k_i}{L_i}(T_i - T_b) = \frac{k_s}{L_s}(T_b - T_s) = h_w(T_s - T_w) \quad (4)$$

ただし、 h_g : 排ガス熱伝達率(W/m²K)、 T_g : 排ガス温度(°C)、 T_i : インコネル系合金温度(°C)、 k_i : インコネル系合金熱伝導率(W/mK)

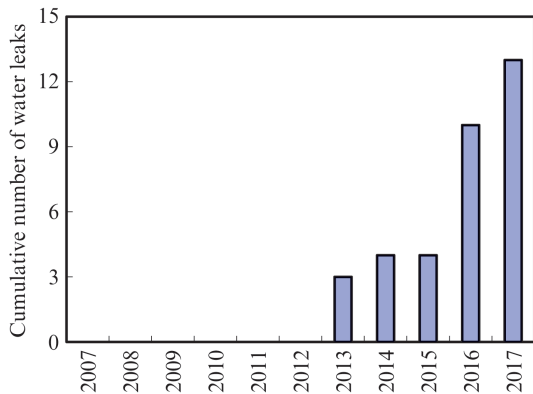


図 12 累計水漏れ回数

Fig. 12 Cumulative number of water leaks

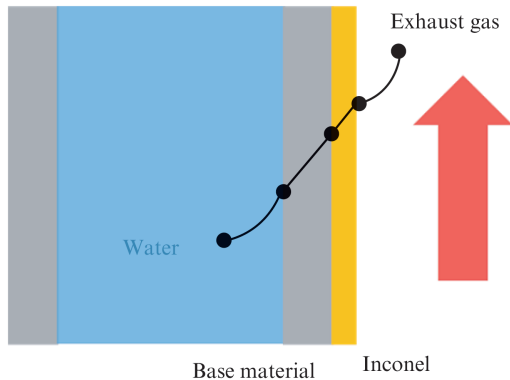


図 13 熱伝導模式図

Fig. 13 Schematic diagram of heat conduction

L_i : インコネル系合金厚さ (mm), T_b : 境界面温度 (°C)

k_s : 母材熱伝導率 (W/mK), L_s : 母材厚さ (mm)

T_s : 母材冷却水側温度 (°C),

h_w : ボイラー水熱伝達率(W/m²K), T_w : ボイラー水温度(°C)

式 (4) で温度分布を算出後、ボイラーチューブの周方向の熱応力を式 (5) を用いて算出した。式 (5) 中の A, B は式 (6), (7) に示す関数である。母材とインコネル系合金の線膨張率は温度依存性を考慮し、式 (8), (9) を使用した。また、母材とインコネル系合金のヤング率は式 (10), (11) に示すように温度依存性を考慮した。

$$\sigma_\theta = \frac{1}{1-\nu} \frac{E}{r^2} \left\{ \frac{r^2+a^2}{c^2-a^2}(A+B) + A+B - \alpha T(r) r^2 \right\} \quad (5)$$

$$A = \alpha_s \int_a^b T_s r dr \quad \dots (6) \quad B = \alpha_i \int_b^c T_i r dr \quad \dots (7)$$

$$\alpha_s = (4.5 \times 10^{-3} \times T(r) + 11.9) \times 10^{-6} \quad \dots (8)$$

$$\alpha_i = (4.1 \times 10^{-3} \times T(r) + 12.7) \times 10^{-6} \quad \dots (9)$$

$$E_s = \left[203 - \left(2 \times \{T(r)\}^2 + 7.9 \times T(r) \right) \times 10^{-4} \right] \quad \dots (10)$$

$$E_i = \left[213 - \left(0.1 \times \{T(r)\}^2 - 610 \times T(r) \right) \times 10^{-4} \right] \quad \dots (11)$$

ただし、 ν : ポアソン比, E_s : 母材ヤング率 (GPa), E_i : インコネル系合金ヤング率 (GPa), $T(r)$: 温度分布 (°C)
 r : チューブ中心からの距離 (mm), a : チューブ内半径 (mm)
 b : 母材外半径 (mm), c : チューブ外半径 (mm)
 α_s : 母材線膨張率(1/°C), α_i : インコネル系合金線膨張率(1/°C)

計算結果を図 14 に示す。インコネル系合金厚みの増加と

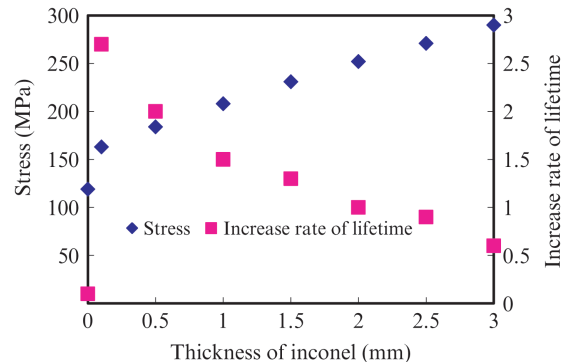


図 14 インコネル系合金厚みと応力, 寿命の関係

Fig. 14 Relationship between thickness of inconel and stress, and lifetime

ともに発生応力も増加する。この計算結果から、亀裂発生までの繰返し数をインコネル系合金のSN線図より算出し、その値をインコネル系合金厚み2.0mm（現状仕様）の時の亀裂発生までの繰返し数で除し、寿命の増加率を算出した。結果を図14にあわせて示す。

薄肉化させていくと、発生応力も減少する。厚さ0.1mmまで薄肉化すると現状仕様2.0mmの2.7倍まで長寿命化できることが分かった。また、肉盛なしの場合（厚み0mm）は母材の強度が低く、現状仕様の約1/10の寿命となる。このことから、厚みは薄い方が優位であるが、肉盛施工の薄肉化には限界があることから、現在は肉盛厚さを1.75±0.25mmとしている。今後はより薄肉化可能な施工方法の検討が必要である。

5. おわりに

転炉下部フードボイラーにインコネル系合金肉盛を導入し以下の結果を得た。

- (1) 転炉ボイラーの設備寿命は5年から10年へと延長し、長寿命化が達成できた。
- (2) 水管の減肉は、導入前と比べて1/45に減少した。
- (3) 更なる長寿命化にはインコネル系合金の薄肉化が有効であることを確認した。

参考文献

- 1) 園田晃大, 姜孝京, 永吉英昭, 河村太一郎. 環境負荷を低減するための表面処理材料の特性評価. フジコー技報-tsukuru. 2007, no. 15, p. 61-67.



古川 航平



細川 晃