# 微粉炭焚きボイラ ウォールデスラガ廻り火炉壁管への 耐摩耗肉盛溶接の適用

(Application of Erosion-resistant Overlay Welding to Furnace Wall Tubes around Wall Deslagger of Pulverized Coal-fired Boiler)

	難 波	$- $ 夫 $^{*1}$	平田	憲 治*1	後平	翼* <sup>2</sup>
	(K. Namba)		(K. Hirata)		(T. Gohira)	
			白石	陽 <i>一*</i> 2	青田	利一*2
			(Y. Shiraishi)		(T. Aota)	
•						-

微粉炭焚きボイラ火炉壁管の耐摩耗性を改善するため,現地での高品質施工が可能な自動溶接シ ステムを開発し,実機火炉壁管傾斜パネルにニッケル基溶接材料を使用した肉盛溶接(超合金肉盛) を施した。実機フィールド試験の結果,鋼管のまま(無被覆管)と比較して平均減肉速度が1/10 以下に低減するなど,顕著な摩耗低減効果を確認できた。超合金肉盛皮膜は,溶射皮膜と比較して 厚膜にできる分,摩耗寿命(=膜厚/摩耗減肉速度)の観点から恒久対策レベルの摩耗対策として 期待できる。また,超合金肉盛皮膜は超音波が伝搬するため,超音波厚さ計を使用することにより, 従前から実施してきた火炉壁管の肉厚測定と同様にTsr管理が可能である。

In order to improve erosion resistance of pulverized coal-fired boiler furnace wall panel, we developed the automatic overlay welding system capable of high quality weld overlay coatings and overlay welding with nickel base superalloy was applied to the actual helical type furnace wall panel. As a result of the actual field test, overlay weld metal with superalloy showed the excellent erosion resistance as compared with a steel tube as it was, and were confirmed promising as a permanent protective measure.

### 1. はじめに

微粉炭焚きボイラは、ガス焚きボイラ、油焚きボイラ と比較して大型の火炉が採用されるうえ、火炉壁管表面 には、石炭灰が付着することから、定期点検における点 検・補修などのメンテナンスに多大な時間と費用を要す る。また、ひとたび運転中に火炉壁管で損傷トラブルが 発生すると、規模の大小にかかわらず炉内外作業が不可 避であり、足場の架設・撤去などの付帯作業や各種試験・ 検査を伴う補修工事は、プラントの不稼働期間を長期化 させるなど、経済的損失は甚大となる。そのため、適切 な予防保全対策を講じ、火炉壁管の長寿命化による保安 の確保とメンテナンスコスト低減の両立を図ることが肝 要である<sup>(1)</sup>。

微粉炭焚きボイラの火炉壁管で生ずる主要な損傷とし

\*1電源開発株式会社

(Electric Power Development Co., Ltd.)

て、①二段燃焼により空気比の低い還元性ガス雰囲気領 域で生ずる硫化腐食<sup>(2)</sup>と②ウォール・デスラガ(以下、 「WD」と略す)廻りで発生する噴霧蒸気と石炭灰の混 合流による局部摩耗<sup>(3)</sup>があげられる。ここで、火炉壁管 には、炭素鋼および低合金鋼(クロム・モリブデン鋼) が採用される。上記の腐食・摩耗損傷を考慮して火炉壁 管の管仕様を設計する際、設計強度上要求される肉厚 (Thickness shell requirement、以下、「Tsr」という) に使用環境に応じた余肉を付与すると、比較的耐食性・ 耐摩耗性の乏しい鋼管のまま(以下、「無被覆管」という) では、余肉を大きくとらざるを得ず、不経済な設備とな るおそれがある。そのため、厚い余肉が必要となる場合、 火炉壁管の表面には、現地または工場で溶射<sup>(4)</sup>や肉盛溶 接<sup>(5)</sup>により耐食性や耐摩耗性の優れた皮膜を施工する対 策が採用される。しかしながら、溶射皮膜は、下地とな

原稿受付 平成29年1月18日

<sup>\*&</sup>lt;sup>2</sup>株式会社ウェルディングアロイズ・ジャパン (Welding Alloys Japan Ltd.)

る火炉壁管とは異種材料であり、両材は機械的に結合<sup>(6)</sup> しているに過ぎないため、熱膨張差に起因して1~2年 程度の比較的短時間の使用により、割れやはく離等の損 傷が発生するケースが認められるなど恒久対策となりに くいことが報告されている<sup>(5)</sup>。一方、肉盛溶接は、皮膜 が下地鋼管と冶金的に結合するため、はく離のリスクが 小さいうえ、硫化腐食対策では、恒久対策として欧米の プラントにおいて多数の施工実績がある<sup>(7)</sup>ものの、耐摩 耗用途への適用は進んでいない。

そこで、本稿では肉盛溶接の耐摩耗用途への適用を図 るため、現地施工が可能な自動溶接システムを開発し、 肉盛皮膜の品質確保および工期短縮を図るとともに、当 該システムにより実機微粉炭焚きボイラWD廻りの火 炉壁管に各種ニッケル基溶接材料を使用した肉盛溶接 (以下、「超合金肉盛」という)を施し、実機環境におけ る耐摩耗性改善効果を確認したので、その結果について 報告する。

#### 2. WD 廻り火炉壁管の摩耗減肉事例

WDは、 火炉壁に設置される短抜差形スートブロワで あり、 蒸気噴射により火炉壁管表面に付着した石炭灰等 を除去し、 火炉収熱を回復・維持するための装置である。

WDは、噴射ノズルを回転させ、火炉壁管の表面に沿 う方向に高温・高圧の蒸気を噴射するため、図1に示す ように噴霧蒸気と石炭灰の混合流が衝突する火炉壁管表 面で広範囲に摩耗減肉が生じ、わずか一定検期間(約2 年)で火炉壁管のTsrを下回る場合がある。そのため、 減肉状況に応じて定期点検ごと次章に示す補修が必要に なるなど、当該損傷は火炉壁管のメンテナンスコストを 増嵩させる要因となっている。



図1 火炉壁管の摩耗減肉状況

## 3. 現状のWD 廻り火炉壁管に対する摩耗対策

#### 3.1 ボイラ管共金系溶接材料による肉盛溶接

下地となる火炉壁管成分に近似する共金系溶接材料を 使用して、減肉部分に対してタッチアップ的に肉盛溶接 するものである。火炉ホッパのクリンカ落下による衝突 損傷部(打痕傷)の補修にも適用される。比較的線径の 細いTIG(Tungsten Inert Gas)溶接による手動施工 であることから、大面積の施工は不利であるうえ、溶接 材料も耐摩耗性の乏しいポイラ鋼管と同材質のため、形 状復元を目的とした応急対策と位置付けられる。

#### 3.2 既設管に対する耐摩耗溶射

50Cr-50Niやクロムカーバイドなど耐摩耗性の優れ た皮膜を火炉壁管表面にコーティングする溶射は、多数 の施工実績(4)があるものの,割れ,はく離などのリスク(5) を有することは導入部で述べたとおりである。また、施 工面に着目すると、比較的施工面積が小さいWD 廻り火 炉壁管への現地施工は、手動での溶射施工(以下、「手 動溶射」という)が主となるが、高速ガスを噴出する溶 射ガンの反動は大きく、これを保持する作業者の身体的 負担は大きい。さらに、 火炉壁管パネル (フィンで接続 された複数の火炉壁管で構成される管群。以下、「パネル」 と略す)の表面は凸型の半円形状を呈していることから. 手動溶射では溶射ガンと火炉壁管の間隔を一定に保ちな がら当該形状に合わせて溶射ガンを適切に動かすことは 難しい。すなわち、火炉内部での手動溶射では、溶射ガ ンを多軸ロボットが保持して施工する工場溶射と同等の 品質を確保することは困難と予想される。

#### 3.3 火炉壁管の取替

摩耗減肉した火炉壁管を新管に取替える対策である。 火炉壁管自身の耐摩耗性を改善する対策ではないため、 所定の摩耗減肉が生ずるたびに取替えが必要となる。耐 圧部位である火炉壁管の取替えは、炉内と炉外の両側で 既設管との溶接作業が必要なだけでなく、大規模な付帯 工事や各種検査(放射線透過試験、水圧試験など)が必 須な高コスト補修であるため、可能な限り回避すること が望ましい。

耐摩耗性を改善するため、減肉部位をあらかじめ工場 で溶射したパネルに取替えるケースもある。この場合、 ①現地で既設管との合わせ作業時に作用する過度な外力 や、②溶接入熱によるパネルの熱膨張により、溶射皮膜 に割れ、はく離などの損傷を及ぼすことがあるので、工 場溶射パネルの現地取り付け作業は細心の注意を要す る。

#### 3.4 WD 噴射圧の低減

火炉壁管の摩耗を抑制するためには、火炉の収熱低下 を回復しうる最低レベルにWD噴射蒸気圧力を低減す ることが有効と考えられる。そこで、当社の微粉炭焚き 超々臨界圧変圧貫流ボイラである磯子火力発電所新1号 ボイラ(以下,「IG-1ボイラ」という)により, WD 噴 射圧低下による実機摩耗低減効果を確認することとし た。図2は、WD噴射圧1.2MPaおよび0.6MPaにおけ るWD 廻りの火炉壁管パネル(管什様 036.0×t6.8mm [ASME SA213-T12])の最大減肉速度を比較したも のである。ここで、WD噴射圧1.2MPaは初期設定圧で あり、一定検期間(12,011h)の計測値をもとに減肉速 度を評価した。また、WD噴射圧0.6MPaのデータは、 初期設定圧から減圧後、一定検期間(13,256h)運転後 の計測値から減肉速度を求めた。各パネルの最大減肉速 度の平均値は、1.34mm/10<sup>4</sup>hから0.26mm/10<sup>4</sup>hに低 減され、WD噴射蒸気圧力を半減することにより、減肉 を1/5程度に低減できるなど、その有効性を確認できた。 しかしながら、既設の火炉壁管に十分な余肉が残存しな い場合,前3.1~3.3節の摩耗対策では既述の問題がある ことから、さらなる摩耗対策が求められる。



図2 WD噴射圧の摩耗低減効果(パネル位置は図6参照)

## 4. 現地自動溶接システムの開発

現状のWD摩耗対策を踏まえ,超合金肉盛溶接の実機 適用を試み,現地における肉盛施工性および実使用環境 における耐摩耗性,健全性を確認することとした。現在, 事業用微粉炭焚きボイラの多数が変圧貫流ボイラであ り、施工対象である火炉下部パス(周壁)には、垂直管 だけでなく傾斜管(ヘリカル管)も採用されることから、 これらに対応した現地自動溶接システム(Smart Panel Welder:以下「SPW」という)を開発し、作業環境が 劣悪な火炉内部環境であっても工場施工と同等の皮膜品 質の確保を図ることとした。SPWの模式図を図3に示 す。



(a) 模式図



(b) ウィーバーおよびトーチ外観図3 SPWの模式図およびトーチ外観

SPWは、固定治具、溶接トーチ移動機構、制御装置 および電源装置で構成される。トーチはウィーバーによ り保持され、管周方向にウィービング(首振り)しなが ら、台車により管の長手方向に移動し、肉盛溶接を施す。 SPWの特長を以下に示す。

①SPWの各構成機器は小型化,堅牢化を図り,狭隘

な火炉マンホールを介した火炉搬出入に支障がない よう分解可能なシステムとした。

- ②溶接方式には比較的溶着量の大きいパルスMIG (Metal Inert Gas)溶接(シールドガスはアルゴン) を採用したため、スパッタ(溶接中に飛散するスラ グや金属粒)の発生が少なく、溶接ビードが美麗な 均質皮膜を効率よく施工できる。
- ③ステンレス系材料,ニッケル基合金などワイヤ化が 可能な各種溶接材料を選択可能である。
- ④トーチ先端と火炉壁管との間隙は15mmと小さく、 石炭灰など粉じん濃度の高い火炉内部環境における 現地施工でも肉盛皮膜に及ぼす悪影響(コンタミ ネーション等)を局限できるうえ、変形したパネル にもトーチを自動追従させる機能を有する。
- ⑤メモリー機能により下向き溶接、上向き溶接など 種々の溶接姿勢に応じた最適な施工パラメータを設 定でき、曲面形状の管表面に均一な皮膜を施工でき る。

実機施工を模擬して18°傾斜させたパネル(管仕様 ¢38.1×t5.5mm [STBA22])にSPWによりAlloy625 を肉盛溶接した。当該パネルの断面マクロ組織を図4に 示す。傾斜管パネルでは、パネル上側フィン接続部で下 向き溶接、管頂部では横向き溶接、パネル下側フィン接 続部で上向き溶接となる。そのため、垂直管パネルにお ける立向下進溶接と比較して、膜厚コントロールの難易 度は高いが、膜厚は概ね均一であり、ブローホール、融 合不良等の欠陥は認められなかった。図5にAlloy625 肉盛溶接管の断面EPMA線分析および硬さ測定結果を 示す。肉盛皮膜の深さ方向における主要成分の濃度変動 は小さく、硬さもほぼ一定値を示すことがわかる。以上 より、SPWにより傾斜管パネルに健全かつ均質な超合 金肉盛皮膜を施工できることを確認できた。



図4 SPWにより肉盛溶接した火炉壁管パネルの断面



図5 Alloy625肉盛管断面のEPMA線分析および硬さ測定 結果

#### 5. 実機ボイラでの現地施工

SPWにより当社IG-1ボイラ火炉下部パス管(管仕様 ゆ36.0×t6.8mm [ASME SA213-T12])のWD廻り に超合金肉盛(総施工面積12.5m<sup>2</sup>)を施した。図6に 肉盛施工範囲を示す。当該火炉下部パスは傾斜管で構成 されるヘリカル周壁である。溶接材料には表1に示す3 種類のニッケル基超合金を採用した。いずれも良好な耐 食・耐酸化特性と高温強度を兼ね備え、ガスタービンを はじめとする高温機器の主要構造部材として採用される 高性能材料である。Alloy622およびAlloy625はボイラ 火炉壁管の耐硫化腐食用肉盛材として採用実績<sup>(5),(6)</sup>が あるうえ、ボイラ鋼管の異材継手用溶接材料としても使 用されるなど強度部材としても信頼性が高い。また. Alloy671は溶射材の50Cr-50Niに相当する材料であ り、腐食・摩耗環境の顕著な部位における高い耐久性を 期待して選定した。これら超合金肉盛皮膜の硬さは、溶 射皮膜より低いものの、下地となる鋼管の硬さを上回る。 また、超合金肉盛皮膜は、一定の延性を有し、線膨張係 数は下地鋼管に近いうえ,下地鋼管と冶金的に結合する ことから,割れやはく離等の損傷リスク低減に有効と判 断される。なお、全施工範囲について、肉盛厚さを 3.0=18mmとした。これは、既に火炉壁管の耐摩耗対策 として採用される溶射皮膜の厚さ(50Cr-50Niは 450<sup>+</sup>1 線μm, クロムカーバイドは300<sup>+</sup>1ωμm)と比較

▼ 火炉左側壁 ▶	┥	<mark>◀ 火炉右側壁</mark> ▶	◀ 火炉前壁 ▶
WD9L WD10L WD11L WD6L WD7L WD8L WD3L WD4L WD5L WD1L WD2L	WD1B       WD2B       WD3B       WD4B         Image: Constraint of the state	WD9R WD10R WD11R WD6R WD7R WD8R WD3R WD4R WD5R WD1R WD2R	WD1F       WD2F       WD3F       WD4F         O       O       O       O         O       O       O       O         O       O       O       O         O       O       O       O         O       O       O       O         O       O       O       O         O       O       O       O         O       O       O       O         O       O       O       O
	● ウォールデスラガ(WD) ◎ バーナ		<ul> <li>Alloy622肉盛</li> <li>Alloy625肉盛</li> <li>Alloy671肉盛</li> </ul>

図6 超合金肉盛溶接の施工部位(火炉内部からみる)

表1 実機パネルに施工した肉盛材料

肉盛材料		概略成分	硬さ(HV)	線膨張係数(10 <sup>-6</sup> /℃)
Alloy622		22% Cr-14% Mo-3% W-2% Fe-bal.Ni	225	12.4
Alloy625 2		22% Cr-9% Mo-3% Nb-0.2% Ti-bal.Ni	230	12.8
Alloy671 43% Cr-bal.Ni		43% Cr-bal.Ni	250	11.7
参考	ボイラ鋼管 SA213-T12	1 % Cr-0.5Mo-0.1C-bal.Fe	170	12.4
	50Cr-50Ni 溶射 (プラズマ)	50Cr-50Ni	500	14.6
	クロムカーバイド溶射 (HVOF)	75% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> +25% NiCr	800	10.3

#### して、はるかに厚膜である。

SPWによる現地施工の状況を図7,施工後の火炉壁 管の外観を図8に示す。変圧貫流ボイラの火炉壁管は、 自然循環ボイラ等の火炉壁管と比較して小口径のボイラ 鋼管が採用されるため、パネル自体の剛性は低い。その ため、火炉内面側への片面肉盛溶接による既設パネルの 反り変形が懸念されたが、いずれの施工個所についても 目視レベルでパネルの変形は認められなかった。肉盛溶 接後は浸透探傷試験により肉盛皮膜に割れ、はく離等の 欠陥がなく、健全であることを確認した後、実機使用に 供した。



図7 SPWによる傾斜管パネルへの現地肉盛施工



図8 肉盛施工後のパネル外観(WD4B, Alloy625肉盛)

## 実機ボイラ環境下で使用した超合金肉盛 溶接管の評価

WD噴射圧を1.2MPaから0.6MPaに低減した実機 IG-1ボイラ環境下で一定検期間(16,838h)使用した 超合金肉盛皮膜の健全性および減肉評価を実施した。目 視検査した結果、すべての肉盛パネルで溶接施工時と同 様のリップルライン(溶接ビードの凹凸)が明瞭に確認 され、触手では摩耗による減肉を認識することはできな かった。また**図9**に浸透探傷試験したWD1B肉盛パネ ル(Alloy625肉盛)の外観を示す。すべての肉盛パネ ルについて割れ、はく離等の欠陥は認められず健全であ ることが確認できた。

図10に無被覆管と超合金肉盛管の摩耗減肉速度を示 す。無被覆管と比較すると超合金肉盛皮膜の摩耗減肉速 度は最大減肉速度ベースで1/3以下,平均減肉速度ベー スでは1/10以下であり,顕著な摩耗低減効果を確認で きた。比較的硬い溶射皮膜と比較して超合金肉盛皮膜の 摩耗減肉速度(単位時間当たりの減肉量)は大きいと予 想される。しかしながら,摩耗寿命(=膜厚/摩耗減肉 速度)を指標とすると,超合金肉盛はミリオーダーの厚 膜化が可能であり,一回の肉盛施工でプラント寿命に相 当する摩耗寿命が期待できることから,恒久対策として 有望と考えられる。なお,超合金肉盛管の摩耗減肉量は 今後も継続して測定し,長期間使用による減肉傾向を調 査する予定である。

図11に実機ボイラ環境下で一定検期間(16.838h) 使用前後における各肉盛管の硬さ測定結果を無被覆管と 比較して示す。無被覆管ではほとんど変化が認められな いのに対し、超合金肉盛はいずれも施工時と比較して硬 化する傾向が認められる。当該硬化傾向は,超合金皮膜 の耐摩耗性向上に寄与するものと予想される。



図9 一定検使用後に浸透探傷試験した肉盛パネルの外観 (WD1B, Alloy625肉盛)



図11 無被覆管と超合金肉盛管の硬さ変化

## 7. 超合金肉盛溶接管の保守管理

超合金肉盛皮膜はち密でブローホールなどの内部欠陥 が極めて少ないため、ボイラ鋼管と同様に超音波が伝搬 する。また表2に示すように今回施工した超合金肉盛皮 膜の超音波伝搬速度は、下地となるボイラ鋼管 (SA213-T12) との差が極めて小さい。そのため、超 音波厚さ計により、下地鋼管肉厚と肉盛皮膜厚さの和と した超合金肉盛溶接管の全肉厚を精度よく測定すること ができる。すなわち、肉盛溶接前に下地鋼管の肉厚を計 測( $t_0$ )し、これがTsrを満たしていること( $t_0 \ge Tsr$ ) を確認したうえで肉盛溶接すれば、定期点検ごとに超合 金肉盛溶接管の全肉厚(Tx)を測定することにより. いわゆるTsr管理が可能であり、従前から実施している ボイラ管の肉厚測定手法と整合する。また、測定した全 肉厚(Tx)から肉盛溶接時の下地鋼管の肉厚(ta)を差 し引くことにより超合金肉盛皮膜の厚さ(Tx-ta)を求 めることも可能である。図12に超音波厚さ計による肉 盛パネルの全肉厚測定状況を示す。

なお割れ,はく離など肉盛皮膜の健全性は,前章で述 べたように,目視検査,触手検査,浸透探傷試験により 確認することができる。

材質	音速(m/s)		
Alloy625皮膜	5840		
Alloy622皮膜	5770		
Alloy671皮膜	5940		
SA213-T12(参考)	5840		

表2 超音波肉厚計による肉盛皮膜の音速測定結果



図12 超音波厚さ計による超合金肉盛パネルの全肉厚測定

## 8. まとめ

傾斜管パネルへ高品質な現場施工が可能なSPWの開 発と当該システムにより実機微粉炭焚きボイラ火炉壁管 に施工した超合金肉盛溶接管の実機フィールド試験結果 を報告した。SPWによる超合金肉盛(膜厚3.0±18mm) の施工能力は、1~2m<sup>2</sup>/(日·台)であり、クロムカー バイドの高速ガスフレーム溶射(膜厚300±100 μm)の施 工能力と同等で実用レベルにある。今後、工期短縮に貢 献できるようSPWのさらなる施工能力の向上を図ると ともに、WD環境より厳しい摩耗環境に耐えうる耐摩耗 溶接材料の新規開発にも注力する所存である。本稿が微 粉炭焚きボイラ火炉壁管の長寿命化およびメンテナンス コスト低減方策のひとつとしてご参考となればこの上な い喜びである。

- (1)WD噴射圧設定を1.2MPaから0.6MPaに半減 したところ、各パネルの最大減肉速度は、約1/5 に低減され、WD噴射蒸気圧力低減による火炉壁 管の減肉抑制効果を確認した。
- (2) 垂直管および傾斜管に対応したSPWを開発し. これを用いて実機微粉炭焚きボイラ火炉壁管(傾 斜管)に超合金肉盛溶接を実施した。
- (3)一定検期間にわたるフィールド試験の結果,無 被覆管と比較して最大減肉速度ベースで1/3以下, 平均減肉速度ベースで1/10以下に低減するなど, 超合金肉盛溶接による摩耗低減効果を確認できた。
- (4)超合金肉盛皮膜は、溶射皮膜と比較して摩耗減 肉速度(単位時間当たりの減肉量)は劣るものと 予想されるが、厚膜化できる分、摩耗寿命(=膜 厚/摩耗減肉速度)の観点から恒久対策レベルの 摩耗対策として期待できる。
- (5)超合金肉盛皮膜は超音波が伝搬するため、超音 波厚さ計により、下地鋼管肉厚と肉盛皮膜厚さの 和として超合金肉盛溶接管の全肉厚を測定するこ とができ、従前から実施してきた火炉壁管の肉厚 測定と同様にTsr管理が可能である。

#### 参考文献

- (1) 難波一夫, 畠中宏明:ボイラの予防保全に関する 最近の取組み, 火力原子力発電, Vol.51, No.7,pp.826-833 (2000)
- (2) 岡塚敬明, 梶ヶ谷一郎: ボイラにおける最近の損

傷事例,新検査技術,火力原子力発電, Vol.54,No.8,pp.876-882 (2003)

- (3)京将司,中森正治,石橋修,黒川一哉:微粉炭燃 焼ボイラに適した高耐久性溶射材料の開発と実機適用, 火力原子力発電,Vol.64,No.11,pp.967-973
   (2013)
- (4)難波一夫, 溝豊, 梶ヶ谷一郎: 耐高温腐食・耐摩
   耗用溶射材のボイラへの適用, 石川島播磨技
   報, Vol.38, No.3, pp.181-188 (1998)
- (5) 榊原紀幸,松井正数,宮澤敬之,松本真太郎:
   石炭焚きボイラ火炉壁管防食対策としてのインコネル肉盛溶接の適用,火力原子力発電,Vol.61,No.8, pp.666-670 (2010)
- (6) 蓮井淳:溶射工学 産報出版(1996)
- (7) 例 え ば, G.Y.Lai,: Fireside Corrosion and Erosion/Corrosion Protection in Coalfired Boilers, Corrosion 2004 (2004),Paper No.4522