

廃棄物発電ボイラの高温耐食表面処理技術

High Temperature Hot Corrosion-resistant Cladding Technology for Boilers at Municipal Waste-fired Power Plants



特定テーマ技術開発室

坂田 太志

Futoshi Sakata

特定テーマ技術開発室長

永吉 英昭

Hideaki Nagayoshi

要旨

廃棄物燃焼プラントにおいて、人体に有害なダイオキシン類は、低温度での燃焼時に発生する事が確認され、近年各プラントとも燃焼温度の高温化に踏み切った。また、熱エネルギーの有効な回収を目的とし、廃棄物発電プラントでは、高温高圧蒸気にまで蒸気条件を上げている。このような状況下で、プラント内の金属部では、高温域の著しい腐食摩耗が大きな問題となっている。この問題点に対し、金属部に耐食性の高い材料を溶接法により肉盛る表面処理方法を開発し、高品質で低希釈率な溶着金属を得る事に成功したのでここに報告する。

Synopsis:

The discovery of harmful dioxins, which waste incineration plants generate while burning waste materials at low temperatures below 800 °C, has been prompting the plants to switch to higher temperature incineration process. Also, municipal waste-fired power plants have raised the temperature and pressure of steam to higher levels aiming at the efficient recovery of thermal energy. These initiatives however have been accompanying a serious problem that metallic parts of their facilities are easily corroded and worn out under high-temperature environment.

As this report presents, we have successfully developed a method of cladding those metallic parts with highly corrosion-resistant materials by welding as well as high-quality weld cladding metals with low dilution rate.

1 緒言

国内の一般廃棄物の総排出量は約5,000万トン/年(1991年～)で、この内約78%は焼却処理が行われている。近年、人体にも有害なダイオキシン類は、800℃以下の低温度で燃焼時に発生する事が確認され、ダイオキシン類全発生量の約90%が廃棄物焼却プラントから発生すると言われている。

そのため1997年には国内のごみや廃棄物焼却施設の構造基準として、燃焼温度800℃以上で2秒間の炉内滞留時間が法律で義務づけられた。(新ガイドラインでは850℃以上)

国内のごみ焼却プラントは約1800施設となっているが、この内ほとんどは既存設備での燃焼を行う必要があり、高

温域での焼却プラント金属部は特に、ごみを焼却した燃焼ガス中には多くのダストとともに金属を腐食させる原因となる塩素(Cl)や亜鉛(Zn)、鉛(Pb)等が含まれている事から、腐食や摩耗が大きな問題となっている。

また、産業廃棄物である自動車や家電製品は粉碎(シュレッダーダスト)化して埋め立て処理を行っていたが、土壤汚染の問題から今後は埋め立て処分が出来なくなり、焼却処理をせざるを得ない状況になってきている。シュレッダーダストは一般ごみと異なり、塩素や低融点金属が非常に多く含まれており、特に高温域での水冷壁などの金属部の腐食摩耗は激しく、設備の維持管理に多大なコストをかけざるを得ない状況となっている。

一方、廃棄物燃焼熱を発電に利用するために、燃焼熱でボイラ管内の水を気化し、その蒸気圧によってタービンを回転させ発電する方法が急速に進められている。現在は、廃棄物焼却プラントの内約160基が一般でいわれているごみ発電設備を有している。この熱エネルギー回収設備であるボイラの水冷壁や過熱器管も腐食や摩耗で大きな問題点となっている。

これを回避するためには低圧力・低温度を必要とし、熱エネルギーの有効な回収と言うにはほど遠い状況となる。しかしながら近年は省エネルギー及び環境問題から熱エネルギーとして回収し有効に利用する方向に変化しており、最新のプラントでは高圧・高温蒸気(約4 Mpa-400℃)にまで蒸気条件を改める事によって効率の向上を図っている。

このように廃棄物燃焼プラントやごみ発電用ボイラ設備関連での金属部の高温化に対応した表面処理技術は非常に重要であり、弊社でも溶接や溶射による施工を行っている。

本報告では、現状の溶射・溶接処理の概要を述べ、特に高温耐食性・耐摩耗性の表面処理として取り組んでいる溶接肉盛りについて述べる。

2 溶射・溶接の適用状況

Table 1に文献等により公表されている国内の廃棄物発電ボイラへの各種溶射法の試験、適用例を示す。溶射については1990年代に入り、まず腐食条件が比較的穏やかな低温低圧蒸気条件の蒸気管からフレーム溶射を中心に実用が始まり、高耐久性の超音速フレイム溶射(HVOF)へ発展してきた。現在、国内における溶射の適用は一般ごみ、産業廃棄物処理プラントを合わせて50プラント以上にも及んでいる。腐食環境の厳しさ、要求寿命、コストなどプラントの諸事情に応じて最適な溶射法・材料が選択されるが、現在はNiベース合金の中でもNiCrSiB合金のHVOFによる溶射が主流となっている。¹⁾

Table 1 Cases of thermal spraying and welding methods tested or in use to protect boiler surfaces at power plants in Japan

Yr. / Mon	Method	Cladding material	Position	Metal Temp. (°C)	Durability (year)
'91/3	Flame	Al/80Ni20Cr	WW	503	>3
'94	HVOF (DJ-1000)	NiCrSiB Alloy	WW,SH	503-603	>3
'98/2	D-Gun DJ-1000	50%TiO ₂ -50%625	SH	703-733	>2
—	Plasma	fused (15CrSiBFe-75Ni)	WW	503	4
	D-Gun	Cr+(50Cr50Ni)			>2
'99/12	HP/HVOF (JP-5000)	NiCrSiB Alloy			>1

溶接については、近年になって各プラントメーカーが独自でテスト・実機で使用した例はあるが、溶接施工メーカーが実機品を施工した例はほとんど報告されておらず、今回当社が熊本県のシュレッダダスト焼却プラントの蒸気

管としてインコネル625溶接肉盛り品を納めたのが国内では第一号とも言える。

近年の発電効率向上を図る動きにともない、特にボイラ後方の過熱器管では、蒸気温度に応じて300~510℃の高いメタル温度となる。そのためNaCl、KCl、Na₂O₄などの低融点共晶塩を含む灰が付着し、部分的に溶融して厳しい腐食環境となるため減肉速度は数mm/年におよぶことがある。また、焼却する廃棄物の種類によっては、水冷壁においても、減肉速度が数mm/年と言う事例もある。このような減肉速度が早い環境下においては、溶射では一般に肉厚が最大約1mmに制限されるため、耐用寿命が短くなる事が予想される。そこで、このような厳しい腐食環境にも対応すべく、肉厚に制限が無い溶接による高温耐食表面処理の開発を進めた。

3 廃棄物発電ボイラ内の腐食

廃棄物焼却プラント環境における炭素鋼管の腐食速度と管壁温度の関係は一般にFig.1のように表せる。²⁾ 管壁温度が約350℃以上になると管壁への飛灰成分の付着堆積に起因した溶融塩腐食が温度上昇に伴って急激に深刻化する。廃棄物焼却プラントにおける溶融塩腐食は、ガスタービン環境におけるhot corrosion³⁾と同様、釣り鐘型の温度依存性を示すが、腐食が激化するしきい温度は廃棄物プラントの方が300℃程度低い。これは、廃棄物プラント環境では低融点の塩化物共晶系化合物が当該温度域から腐食に強く関与するためである。一方、飛来する燃焼ガス成分自体も500~1000ppm程度の高濃度HClを含むために腐食性が相当強く、それゆえ高温化ボイラ過熱器管では溶融塩と流動燃焼ガスとの競合による複合腐食が深刻な問題となり、これに耐え得る高耐食性材料の導入が不可欠な状況にある。

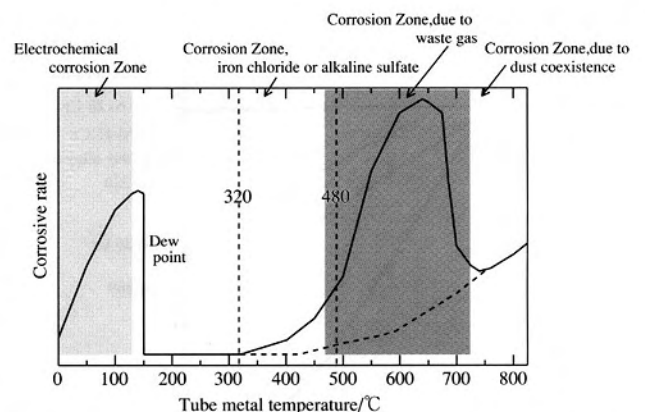


Fig.1 Relationship between tube metal temperature and corrosive rate

4 溶接肉盛りにおける開発主旨

廃棄物発電ボイラ内炭素鋼管の耐食性向上を溶接による表面改質で進めるにあたり、以下のような事項を念頭に置き、それぞれの方法を選定した。

- ①溶接部の満足すべき条件 →
溶接材料・希釈率（溶け込み）
- ②溶接方法として満足すべき条件 →
品質・生産性
- ③溶接施工に当たって念頭に置くべき条件 →
無欠陥・溶接応力による変形

4.1 溶接材料の選定

高温・苛酷な腐食環境下での水冷壁・過熱器管の耐食性は合金中の[Cr+Ni]量の増加にともない向上する事が確認されている⁴⁾⁵⁾。さらにNi基合金のAlloy625, AlloyC22の場合のようにMoの適量添加も有効であり、Fig.2に示すように[Cr+Ni+Mo]総量の増加に伴い耐食性が大幅に向上する事が見出されている⁴⁾⁶⁾。

以上から、高温での耐食性に優れ、塩素による腐食にも強く、さらに市場性が高い(比較的安価)インコネル625を溶接材料に選定した。Fig.3に、Ni-Cr-Fe合金のスケールの

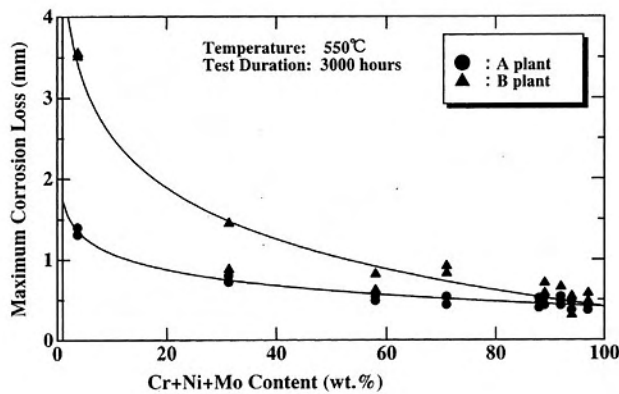


Fig.2 Relationship between [Cr+Ni+Mo]content and corrosion loss

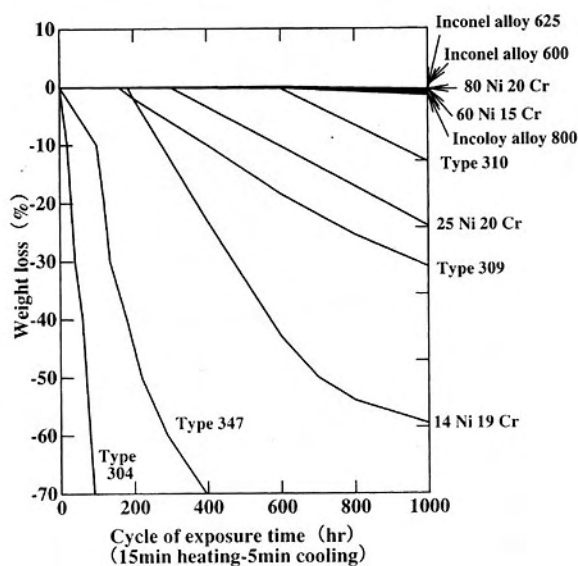


Fig.3 Oxidation resistance of Ni-Cr-Fe alloy (982°C)

抵抗性を示すが、この図からもインコネル625の耐食性の高さが確認出来る。

4.2 希釈率の目標

廃棄物発電ボイラ内の水冷壁・過熱器管の材料としては一般的にSTB管(ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管)が用いられている。溶接材料として、高温での耐食性に優れた材料を用いたとしても、溶接時の母材への溶け込みが多くなれば、もともとの溶接材料の成分が薄まり、その特質を十分に発揮する事が出来ない。そこで、如何に母材への希釈を少なく抑えることが、実際の溶接施工における重要な項目となる。

国内での水冷壁・過熱器管へのインコネル625溶接において、今までに最も希釈を少なくおさまられた例では、その希釈率は5~6%と知られている⁷⁾

インコネル625の特質を失わず、その特徴を十分に発揮させるため、希釈率の目標を10%に設定し、開発を進めた。

4.3 溶接法の選定

インコネル625の施工方法としては、TIG溶接、MIG溶接、PTA等が考えられる。それぞれの特徴をTable 2に示す。Table 2より、これら3方法の特徴を簡単に述べると以下のように言える。

- ①TIG溶接・PTAはビード外観が美しく高品質であるが、その生産性が問題となる場合がある
- ②MIG溶接はスパッタ発生など、施工時に品質面で注意を要するが、その生産性が大であるため、コストダウンが期待できる

Table 2 Comparison of welding process

Factor		TIG welding	MIG welding	Plasma welding
Welding process	① Automatic & continuous	○	△:many spatter	◎
	② Weld metal	○	○	○
	③ Bead	○	△:unevenness	○
	④ Productivity	2~3kg/hr	4~6kg/hr	1~2kg/hr
	⑤ Control of condition	○	○	○
	⑥ Spatter & noise	○	△	○
Welding equipment	① control of instrument	○	○	○
	② torch	○	◎:simple	△:complicated
	③ durability	△:overheating around the torch	○	○
	④ supply of parts	○	○	△
	⑤ Frequency of part replacement	○	◎	○

一方、弊社には今までに、MIG溶接により多種にわたる材料、製品に肉盛溶接を施してきた実績がある。そこで、弊社の施工実績を念頭に置き、このMIG溶接の長所を生かし、短所を改善した施工方法の開発を行うとともに、あわせて溶接部の特性について確認した。

5 供試材料

溶接を実施した被溶接物の形状をFig.4に示す。以下に示すように被溶接物は、パイプと鉄板から構成されたボイラ水冷壁パネルである。

材質 : STB340S (管)、炭素鋼 (フィン)
 寸法 : $\phi 60.3 \times 5.0\text{mm}$ (管)、 $6.0\text{mm} \times \text{約} W28$ (フィン)

パネルサイズ : 管5~6本で構成されたパネル
 (端フィン有り)、約 $W600 \times L2100$

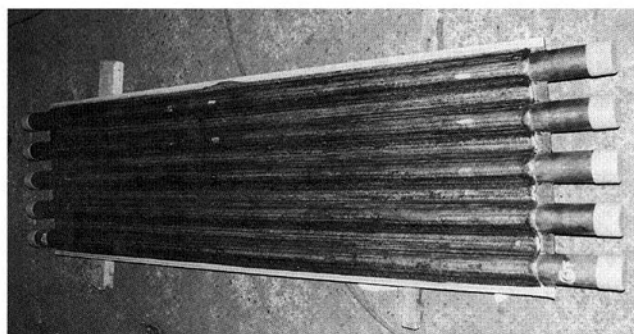


Fig.5 Appearance of weld water panel

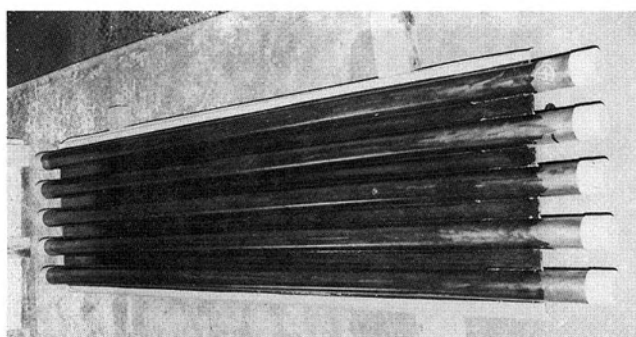


Fig.4 Appearance of water panel



Fig.6 Part of weld water panel

6 溶接条件

上記の供試材料を使用し、スパッタの抑制およびビード外観の改善を念頭に置き、あわせて溶着速度が大となるような条件を選定した。以下に示す溶接条件で供試材料の片面のみに2mm以上の厚さの溶接を施した。

溶接姿勢 : 下向き溶接
 溶接材料 : インコネル625 ($\phi 1.2$)
 電流 : 100~200A
 電圧 : 20~30V
 溶接速度 : 200~300mm/min
 ウィービング幅 : 10~20mm

7 肉盛溶接結果および考察

7.1 溶接状況

6項で選定した溶接条件により、実物大のパネルに長さ方向は約1700mm、幅方向にはほぼ全幅にわたり肉盛溶接を行った。溶接部の外観をFig.5・6に示す。外観から分るように溶接はウィービングをかけながらパイプの長さ方向に平行に重ねて施工した。溶接時にはスパッタの発生は極めて少なく、ビード外観も良好である。

7.2 溶接部の品質

溶接施工後、肉盛部を切断し、以下の項目で調査を行いその品質を確認した。

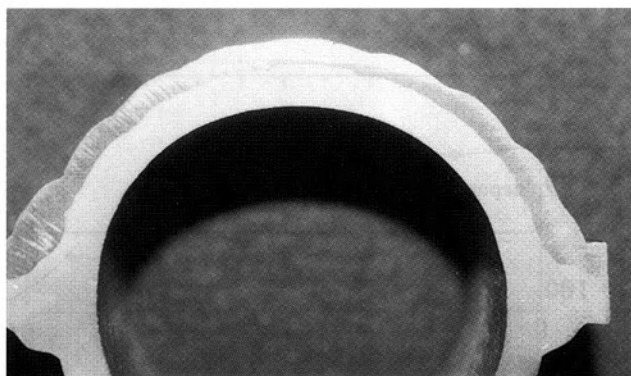


Fig.7 Microstructure of weld section

(1)溶接部断面のマクロ組織

断面のマクロ組織の一例をFig.7に示す。肉厚制御のため、ビードの重ね具合を調節した結果、写真のようにパイプ表面に均一にビード形成ができています。溶接部には融合不良、ポロシティ等の欠陥はなく、また溶け込みについても溶接条件の選定により、MIG溶接特有のフィンガ状の溶け込みが回避できた。肉盛り厚さは2.0~2.5mm程度の範囲である。

(2) 希釈率

溶接部の希釈率の結果を Table 3 に示す。希釈率は、溶接部の成分分析結果と溶接材料のミルシート値をもとに、主要成分の変化値から計算した。

主要成分の希釈率の平均は7.0%となり、目標である10%以下を達成した。またこの値は、母材からのFeの拡散の割合とほぼ一致する。(Table 4参照)

したがって、今回のMIG溶接による肉盛りにおいてはその希釈率は7.0%程度であると言える。

Table 3 Result of dilution rate

Main ingredient	Ni	Cr	Mo	
Deposited metal(%)	60.50	20.07	8.29	
Weld metal(%)	64.58	21.79	8.89	Mean dilution rate
Dilution rate(%)	6.3	7.9	6.8	7.0

Table 4 Diffusion of Fe from base metal

	Fe
Deposited metal	7.46
Weld metal	0.59
Ratio of diffusion(%)	6.9

(3) 溶接部の硬度分布

溶接部の硬度測定結果（ピッカース硬度、荷重：10kg）の一例を Fig.8 に示す。この結果から、溶着金属の硬度は平均HV228程度、母材はHV130程度であり、熱影響部にも著しい硬度の変化は見られないことが確認できた。

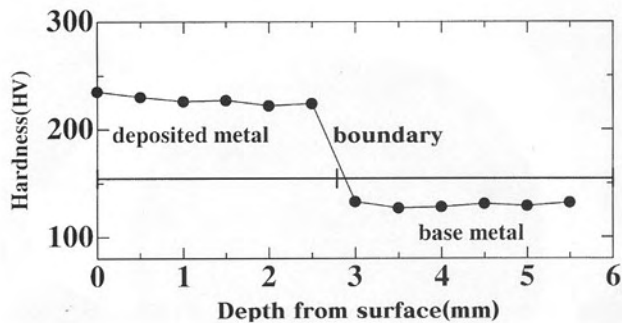


Fig.8 Hardness of weld

(4) 溶接部のマイクロ組織

溶接部のマイクロ組織観察結果の一例を Fig.9、Fig.10 に示す。組織観察より、溶接部はインコネル625の溶着金属として一般的なものである。また、マイクロ割れ、融合不良等の欠陥は存在せず、健全な組織を呈している。

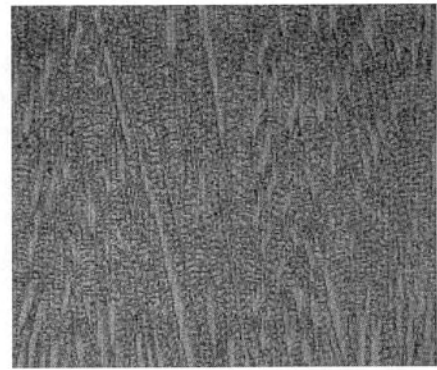


Fig.9 Microstructure of weld 1 (deposited metal ×200)

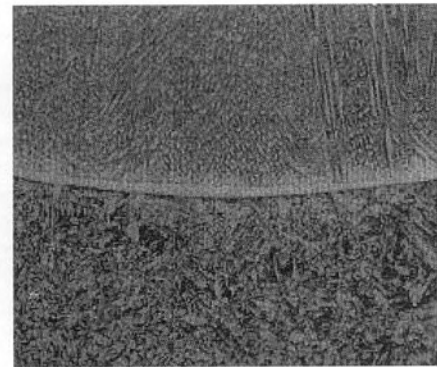


Fig.10 Microstructure of weld 2 (border ×200)

625の溶接肉盛りによる研究を行い、生産性の高いMIG溶接法にて高品質で低希釈率の溶着金属を得る事ができ、実際の使用での耐用向上が期待できる。

今回の施工は、工場内での溶接施工について研究を進めたが、今後は現地での溶接施工の体制確立を図る。溶接材料としては、インコネル625に拘らず、実際に使われる環境に適した材質選定、開発を行っていく。

9 参考文献

- 1) 川原雄三, “廃棄物発電ボイラにおける高温腐食コーティングの適用と耐久性評価の現状”, 日本溶射協会誌 溶射 Vol.38 No.2, 2001年4月
- 2) V.K.Fassler, H.Leib and H.Spahn, Mitteilungen er VGB, 48(1968), 126.
- 3) 吉葉正行, 日本ガスタービン学会誌, 25(1997), No.97, 57.
- 4) NEDO, 高効率廃棄物発電技術開発 平成7年度報告書, (1996), 120, 121.
- 5) G.A.Whitlow, P.J.Gallagher and S.Y.Lee, Corrosion/89, Paper No.204, NACE, (1989).
- 6) Y.Kawahara, M.Nakamra, H.Tuboi and K.Yukawa, Corrosion/97, Paper No.165, NACE, (1997).
- 7) 愛知産業(株) 技術資料 “逆極性プラズマ溶接による耐腐食/耐摩耗ボイラチューブ”, 2001年3月

8 結言

廃棄物燃焼プラントやごみ発電用ボイラ設備関連での金属部の高温化に対応した表面処理技術として、インコネル