

HVOF溶射機を使用した発電 ボイラー現地溶射

1 緒言

1960年代我が国の発電エネルギー源は、水力発電から化石燃料である石炭火力に移行し、さらに石炭から石油及び天然ガスに移行したが、1970年代に入りオイルショックの影響を受け埋蔵量の多い石炭が主流となった。近年ではエネルギーの安定を図るため、石炭、石油及び天然ガスをバランス良く併用する措置が取られている。¹⁾

一方、欧米では発電エネルギー源として都市ごみを利用する「ごみ発電」が盛んに行われており、我が国でも近年都市ごみの増加に伴いごみ発電が脚光を浴びている。

この様な燃料を熱源とするボイラーでは図-1¹⁾に示す如く燃焼ガスや燃焼灰による腐食やエロージョンによる各部の損傷がボイラー事故の原因となることが全体の40%以上にも達しており、この対策として溶接肉盛、溶射等の表面コーティングが行われている。

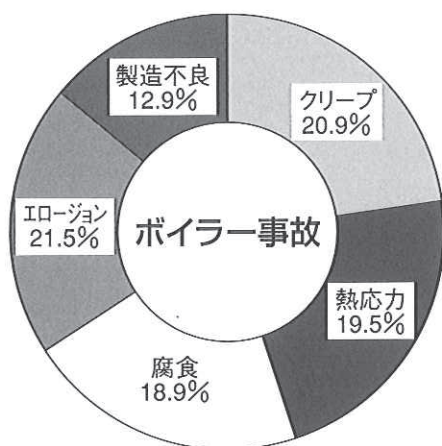


図-1 ボイラー事故原因

当社でも、ボイラーチューブの腐食、エロージョン対策としてHVOF溶射（High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spraying）を適用しており、この技術的取り組みや実績を概説する。

2 ボイラーチューブの損傷形態

石炭炊きボイラーでは主に燃焼灰によるエロージョンが問題となる。特に節炭器チューブでは電熱効率を向上させるためガス流速が高くなる傾向にありエロージョンが問題

となる。また、火炉壁管や過熱器管に付着した燃焼灰を除去するため蒸気ブローを行う場合もスリーブブロー廻りに激しいエロージョンを受けることが多い。

エロージョン現象における基材材質と粒子衝突角、エロージョン速度の関係は図-2¹⁾の様な関係となり、脆性材料（高硬度材料）では衝突角度が鋭角である場合エロージョンに良く耐え、直角に近いほどその靱性が災いしエロージョン速度は速くなる。延性材料では、反対に直角に近い場合塑性変形を起こしエロージョン摩耗速度は鈍化していく。

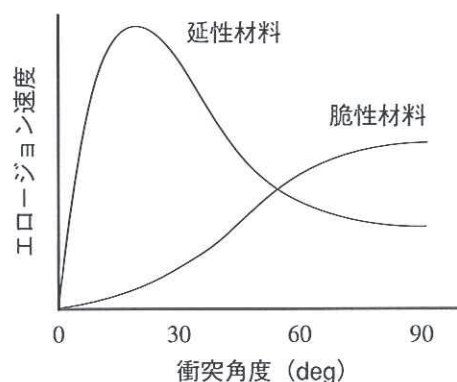


図-2 エロージョン速度に及ぼす粒子衝突角度の影響

また、実験式では

$$W = KV^{\alpha} \sin^{\beta} \theta$$

W：減肉速度

K：定数（粒子の直径、密度、硬度に依存）

V：粒子衝突速度

θ ：粒子衝突角度

α 及び β ：実験決定値

が知られており、粒子の衝突角度に対して指数関数的にエロージョン速度は増大する。¹⁾

低純度重油や都市ごみを燃料とするボイラーでは主に燃焼高温ガスに含まれるS、V、Cl等の腐食性元素による高温腐食が問題となる。重油炊きボイラーの場合、特に最も高温となる過熱器管やバーナー周りに付着した燃焼灰が熔融状態となりV₂O₅、Na₂SO₄等の低融点酸化物を生成、熔融塩腐食反応を起こしボイラーチューブに損傷を与える。

また、都市ごみ焼却ボイラーでは都市ごみ中に含まれる

食塩、塩化ビニール系樹脂の燃焼により腐食成分であるHClが1000ppm以上発生した例がある。

発生したHClは次式の反応を起こし融点677℃のFeCl₂及び融点300℃のFeCl₃を生成しボイラーチューブに損傷を与える。



3 溶射の種類

溶射には溶射熱源および溶射材料形状による分類方法がよく使用され、何れの溶射方法もボイラーチューブ溶射に適用されている。図-3に溶射分類を、表-1にそれぞれのボイラーに適用されている溶射方法、溶射材料、特徴を示す。

また、代表マイクロ組織例を図-4に示す。

図-4のマイクロ写真から溶射方法、溶射材質によって溶射皮膜に大きな差があることが解る。即ち、溶射時の粉末スピードが遅いガス及びアークワイヤー溶射では皮膜内に気孔が多く観察され、溶射皮膜の特徴であるラメラ構造が明確に観察できる。

プラズマ溶射とHVOF溶射では、プラズマ出力が200kWと高出力であるためか、目視では顕著な差は無いが、気孔率を画像解析し測定すればプラズマ溶射がHVOF溶射に比べ気孔率が多い。また、同じHVOF溶射機でも機種により差異が認められる。

皮膜内硬度やプラストエロージョンテストにおいてもそれぞれに差異が計測できる。気孔率と皮膜断面硬度、荒田式プラストエロージョンテスト結果を表-2に示す。

表-1 ボイラーに適用されている溶射

	主な摩耗形態	溶射方法	溶射材料
重油	S、V腐食	プラズマ、ワイヤー、HVOF	50Ni-Cr 自溶合金
微粉炭	S腐食、エロージョン	プラズマ、ワイヤー、HVOF	Cr ₃ C ₂ 系 自溶合金
流動床石炭	エロージョン	ワイヤー、プラズマ、HVOF	Cr ₃ C ₂ 系 自溶合金
産廃・都市ごみ	cl腐食	ガス粉末、ワイヤー、HVOF	50Ni-Cr 自溶合金
CDQ・OG	エロージョン	ガス粉末、ワイヤー、プラズマ	SUS420系・自溶合金 50Ni-Cr

表-2 荒田式プラストエロージョンテスト結果

(Cr₃C₂系サーメット皮膜)

	気孔率	HV ₃₀₀ 硬度	減摩摩耗量 (mg)
高出力プラズマ	5%	511～ 934	160
HVOF A	1.20%	815～1028	126
HVOF B	2.80%	707～ 886	145
HVOF C	2.20%	772～ 970	144

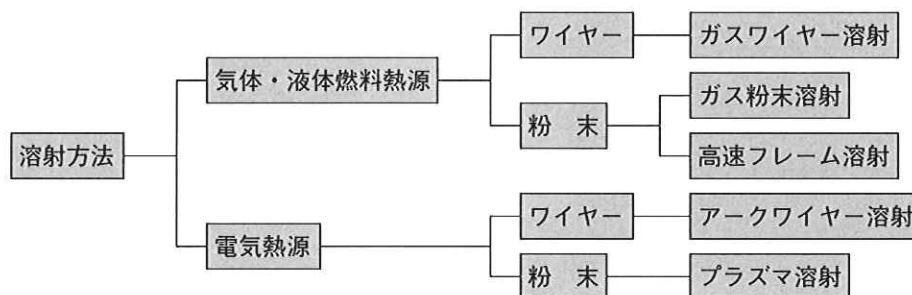
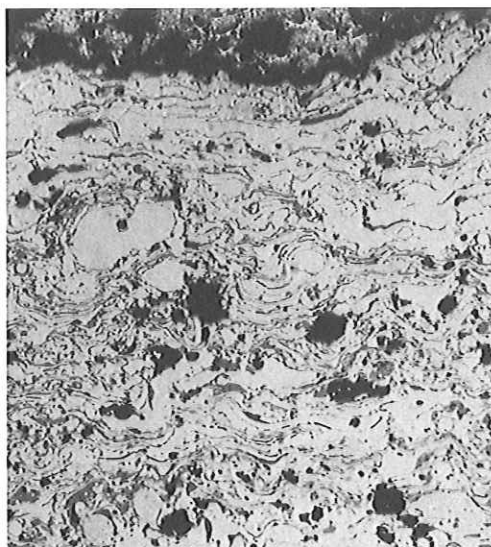


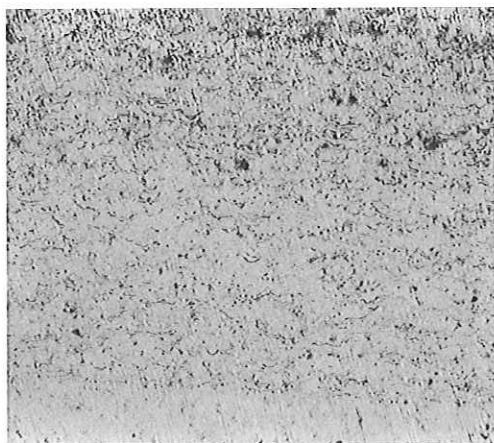
図-3 溶射の種類



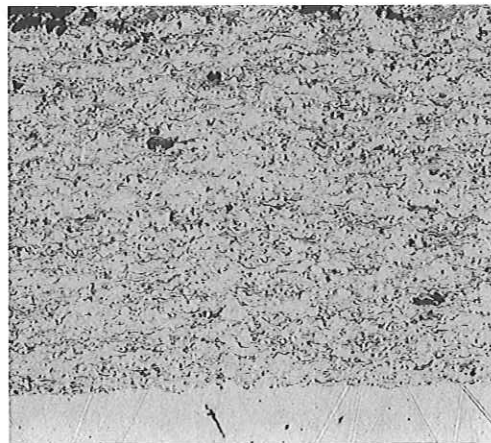
(1) アークワイヤー溶射
SUS420J2 100 μ m



(2) ガスワイヤー溶射
SUS420J2 100 μ m



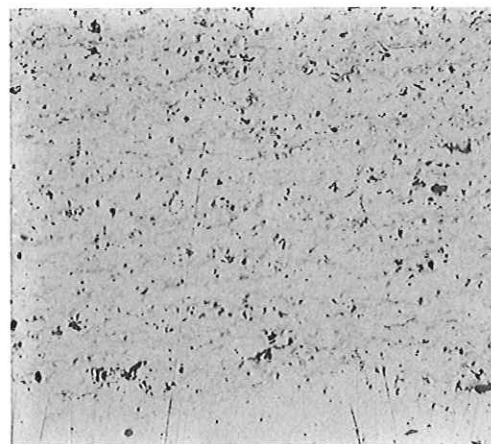
(3) HVOF溶射A
Cr₃C₂-NiCr 50 μ m



(4) HVOF溶射C
Cr₃C₂-NiCr 50 μ m



(5) HVOF溶射B
Cr₃C₂-NiCr 50 μ m



(6) 高出力プラズマ溶射
Cr₃C₂-NiCr 50 μ m

図-4 各種溶射方法の代表マイクロ組織

4 HVOF溶射の分類と性能

HVOF溶射ガンは爆発溶射の代替え溶射方法として考案、開発され爆発溶射皮膜の性能と同水準の皮膜特性を実現すると同時に大幅な溶射処理速度の向上をも可能とする長所が明らかになり、現在では、炭化物系サーメット溶射に最適な優れた溶射方法として広く認められている。

この溶射機は一般的に、燃焼室とそれに連なるバレルノズルから構成され、多量の燃料及び助燃材を燃焼室に供給して混合、燃焼させその燃焼排ガスをバレルノズルより超高速フラームとして噴出させる構造となっている。溶射材料は粉末を使用し、キャリアーガスにより溶射ガンに供給され燃焼排ガスフラームに乗ってバレルノズル内を加速、飛行する。この間、溶射材料粒子は加速、加熱、溶融あるいは軟化、酸化、分解等の物理現象を起こしつつ、基材へ到達し、衝突、扁平、凝固、堆積、積層を繰り返し溶射皮膜となって行く。

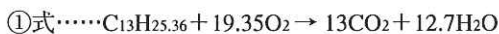
従って、燃焼排ガス高速フラームの流れと溶射材料粒子の間わりは溶射皮膜性能に大きく影響する極めて重要な因子であることは明白である。²⁾

HVOF溶射も機種により、その構造には違いがある。高速フラーム溶射にて総称されるHVOF及びHVAF溶射機(High Velocity Arc Fuel Thermal Spraying)を燃料、助燃剤、バレルノズルの有無にて分類すれば図-5のようになる。

現状市販されているHVOF、HVAF溶射機は図-5に示す何れかに属しており、それぞれに工夫され特徴があるものの、その燃焼フラーム速度はバレルノズル、燃焼室が同形状・同構造であれば燃焼排ガス量に依存すると考えられフラームの高速化は、皮膜の緻密化、密着性の向上を図る上でも重要な因子となる。

表-2にて示したHVOF Aは燃料に液体燃料である灯油を使用している。また、HVOF B及びCは気体燃料であるプロピレンを使用する場合が多い。

灯油を完全燃焼すれば以下の式が得られる。



また、プロピレンを理論完全燃焼すれば以下の式が得られる。



ここで、発生したCO₂ガス及びH₂Oは排ガスとなって高

速な燃焼フラームを作る。①式と②式の燃焼排ガス量は灯油燃料がプロピレン燃料の2倍強の排ガス量と断定できる。このため、HVOF Aの溶射粉末飛行速度が最も速いものと推測出来、成膜された溶射皮膜はHVOF溶射の中でも気孔が少なく、緻密な最も優れたものとなる。

また、HVOF BとHVOF Cの差はバレルノズルの有無にある。HVOF Cの溶射機は、A溶射機と同型の構造であり燃料が気体であるの対し、このHVOF Bタイプの溶射機は、高圧にてプロピレンを溶射ガン内部に導入しガン先端外部にて燃焼させる構造であり、燃焼室やバレルノズルを保有していないため溶射粉末の加速域が短い、粉末の軟化、溶融に寄与する熱量が少ない、等の欠点はある。しかし、溶射粉末粒径を小さくする等の対策を取り欠点を補うと共に、バレルノズル、燃焼チャンバーが無い、空冷構造となっている等、溶射ガンの軽量化がなされており現地でのHVOF溶射施工が要求されるボイラーチューブ溶射では最も作業性に富んだ溶射機である。しかしながら、被膜性能については前記の如くHVOF Aには及ばない。

HVOF Aの優れた溶射皮膜特性の1つの指標として被膜残留応力が圧縮となることが挙げられる。一般的に溶射は図-6に示すように溶融した溶射粉末が基材に衝突し凝固するため被膜には引っ張りの残留応力の発生は避けられない、しかし、HVOF AやHVAF溶射では溶射粉末は殆ど溶融されず軟化の状態で飛行し基材に衝突するため基材が塑性変形する。このプラスト効果のため被膜内部や基材は圧縮の応力が発生することになる。これは、燃焼エネルギーの殆どが溶射粉末粒子に運動エネルギーとして作用したためと考えられる。このため、溶射皮膜特性として密着力の優れた気孔の少ない溶射皮膜となっている。

HVAF溶射機はHVOF A溶射に比べ助燃剤に空気を使用するため空気中の主成分であるN₂がO₂のみを助燃剤として使用するHVOF Aよりも過剰となるため、より排ガスの量が多くなる。このため、溶射粉末に寄与する運動エネルギーは更に増大し、密着力や気孔率等溶射皮膜特性はよりいっそう優れたものとなる。しかしながら、燃焼排ガスが余りにも多く、バレルノズルより超音速にて噴射される排ガスの反動は人力では制御できず現地溶射には不向きな溶射機である。

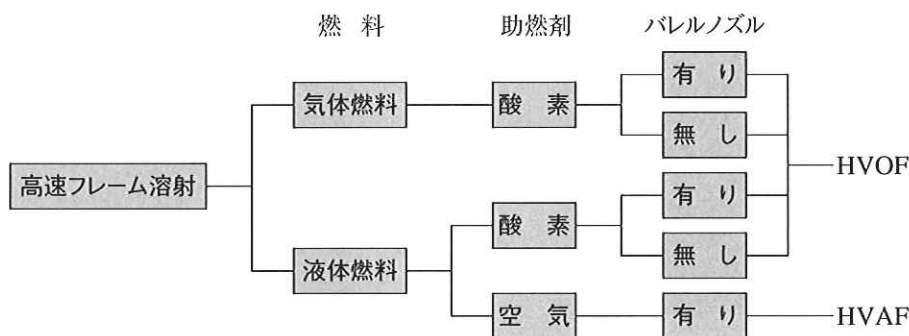


図-5 高速フラーム溶射の分類

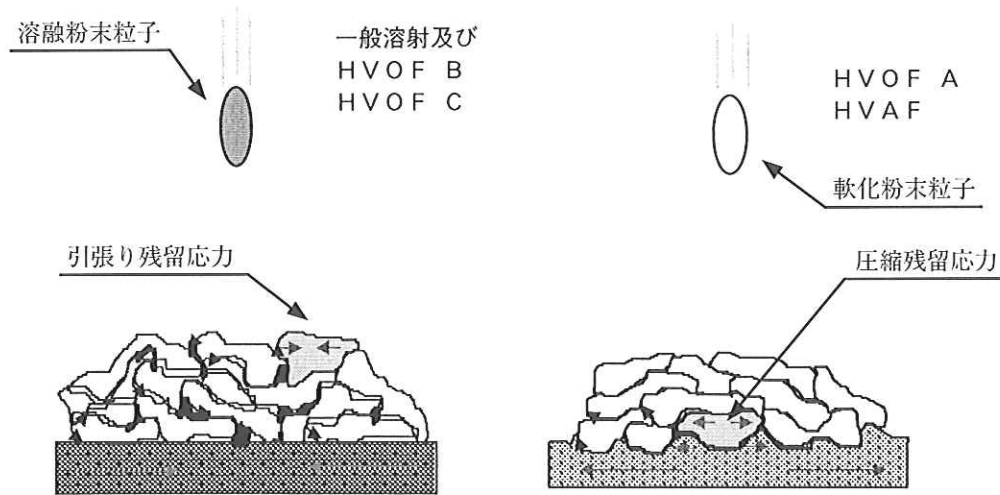


図-6 溶射皮膜の形成模式図

5 フジコーのボイラーチューブ現地溶射

当社ではボイラーチューブの溶射方法として図-3に示した溶射方法全ての実績を有しており、ボイラーの使用環境、希望耐用年数、コストに合わせた溶射機・溶射材料を選定し施工を行っている。

図-3に示した溶射材料の内、自溶合金はガス粉末溶射機にて溶射された後フュージングを行い使用する場合と、プラズマ溶射やHVOF溶射にて溶射ままの状態にて使用する場合があり、フュージングを行う場合、皮膜は実質的に無気孔でありボイラーチューブ基材と拡散するため密着力も20kg/mm²以上と最も優れたものになる。反面、既設ボイラーの現地溶射や補修溶射は困難であり、近年当社では既設

ボイラーの損傷防止や繰り返し補修が要求される場合、気孔率が小さく密着力に優れた表-2に示すHVOF溶射Aタイプを使用することが多くなっている。また、Cr₃C₂系、Ni-Cr合金等の溶射材料についてもプラズマ溶射法やワイヤー溶射法に比べ低気孔、高密着力であるためHVOFでの施工が増えている。

図-7にHVOF Aの使用例を示す。また、図-8に微粉炭炊きボイラー、スーツプロアー廻り火炉壁に適用され5年を経過しても健全な皮膜が確認できるHVOF AタイプのCr₃C₂系溶射皮膜外観を示す。

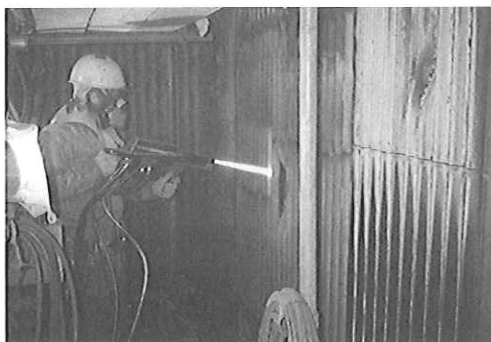
また、プラズマ溶射、ワイヤー溶射及び、HVOF B溶射の実績例を図-9に示す。



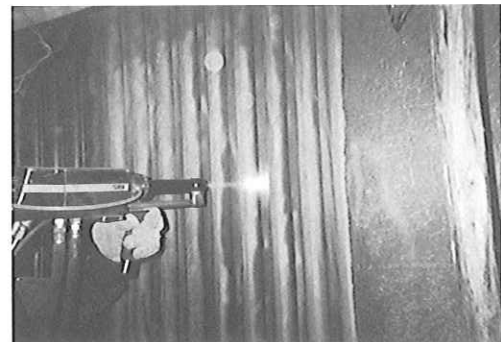
(1) 新設微粉炭炊きボイラー火炉壁へのHVOF A溶射



(3) 既設微粉炭炊きボイラー過熱器へのHVOF A溶射



(2) 既設微粉炭炊きボイラー火炉壁へのHVOF A溶射

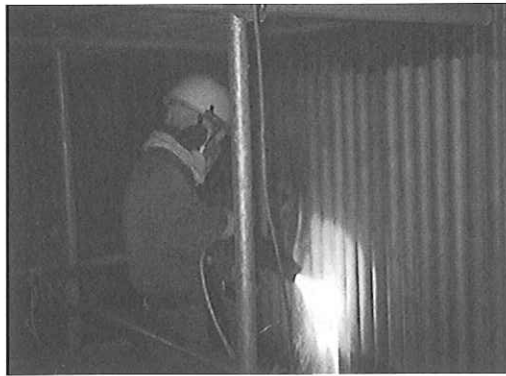


(4) 既設流動床ボイラー火炉壁へのHVOF A溶射

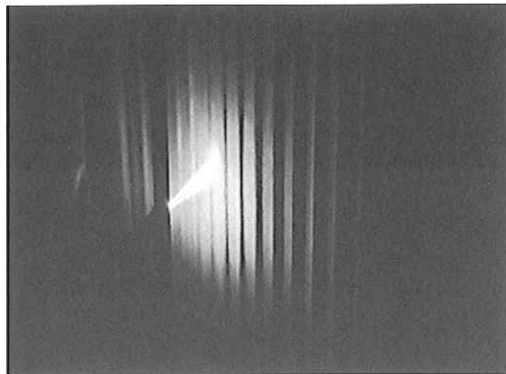
図-7 HVOF A溶射実施例



図-8 5年経過後のHVOF A溶射皮膜



(1) 既設微粉炭炊きボイラーへのアークワイヤー溶射



(2) 既設CDQボイラー火炉壁へのプラズマ溶射



(3) 既設重油炊きボイラー火炉壁へのHVOF B溶射

図-9 各種溶射機での実績例

6 結言

環境とエネルギーの問題は、全世界における最も重要な課題と位置付けられている。特にエネルギー資源に乏しく産業の発展が著しい我が国においてはクリーンなエネルギーである電力を効率良く安定的に供給できることが不可欠であり、各種ボイラーの事故原因の40%以上を占める、腐食やエロージョンをいかに防止できるかが問題となる。また、我が国のごみ発電も1990年代に入りボイラーの高温、高圧化による高能率発電やダイオキシン対策にて高温燃焼化が進んでおり、益々過酷な環境に耐える溶射皮膜が要求されている。

フジコーは、我が国で唯一HVOF Aタイプの溶射機を発電ボイラーチューブ現地溶射に適用した実績を有しているばかりでなく、各種溶射機を駆使し、環境、摩耗形態、コストに合わせた溶射皮膜を提供している。

参考文献

- 1) 納富：溶射技術13 (1993) No 3, 36
- 2) 原田：溶射技術17 (1998) No 4, 35

