

## 耐高温腐食・耐摩耗溶射材のボイラへの適用

難 波 一 夫 エネルギー事業本部電力事業部基本設計部  
溝 豊 技術本部生産技術開発センター生産技術開発部  
梶 谷 一 郎 エネルギー事業本部電力事業部基本設計部 課長

### Boiler Application of Thermal Spray Coatings for High-Temperature Corrosion and Erosion Protection

NAMBA Kazuo  
MIZO Yutaka  
KAJIGAYA Ichiro

Thermal spray coatings applied to the surface of boiler components such as heat exchanger tubes are effective for high-temperature corrosion and erosion protection. Thermal spray coatings use reliable spray materials and spray processes tested in the laboratory and actual boilers, and are selected by considering the actual boiler environment and substrate materials. Various spray coatings for high-temperature corrosion and/or erosion protection have been put into practical use. This paper describes typical thermal coatings for boiler components, test results in the laboratory, and actual plants and introduces various boiler application examples of spray coatings at IHI.

キーワード：溶射，ボイラ，高温腐食，摩耗，高温

## 1. 緒 言

蒸発器管、過熱器管などの伝熱管は、ボイラ主要耐圧部のうち最も重要な部位であるが、その表面は燃料中に含まれる硫黄分やアルカリ金属化合物の溶融塩による高温腐食および石炭灰の衝突によるエロージョンの雰囲気下におかれるなど、最も過酷な条件下で使用されている。最近では、石油コークス、オリマルジョン®、RDF (Refuse Derived Fuel) および低品位石炭など従来よりも硫黄、バナジウム、ナトリウム、カリウム、塩素などの腐食性成分の含有量の多い劣質燃料の使用が計画されている。特に石油コークスやオリマルジョン®焚ボイラでは低NO<sub>x</sub>対策による火炉壁管部での高温硫化腐食、燃焼灰中のNa<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>やV<sub>2</sub>O<sub>5</sub>による過熱器、再熱器管の溶融塩腐食やバナジウムアタックなどが問題となる場合がある<sup>(1)~(3)</sup>。

また、化石燃料の有効利用、プラントの高効率化、低公害化といった観点から、流動層ボイラ<sup>(4)</sup>、石炭ガス化複合発電プラント<sup>(5)</sup>などの新しい機種のボイラが開発、実用化されている。流動層ボイラの伝熱管は流動層内に設置されるため、石炭、石灰石および石炭灰から構成される流動媒体(ベッド材)の連続的な衝突によるエロージョンが問題となる<sup>(6)</sup>。一方、石炭ガス化複合発電プラントの粗ガスクーラ伝熱管は運転時の高温硫化腐食とダウンタイムコロージ

ョンと呼ばれる停止時の湿食の繰返しによる著しい減肉が懸念される。このような燃料の多様化、ボイラ新機種開発・実用化の背景から伝熱管の使用雰囲気における腐食、摩耗環境はいっそう厳しくなるものと予想される。しかしながら、鋼管自身で設計上要求される強度と使用環境における耐食性、耐摩耗を具備させることは経済的に不利な場合が多い。この場合、鋼管の表面に使用雰囲気に対して有効な皮膜を形成し、鋼管を保護する対策が有効となる。鋼管表面への被覆方法としては、溶射、電気めっき、溶融めっき、拡散浸透<sup>(7)</sup>、肉盛溶接、レーザクラッディング<sup>(8)</sup>、PVD (Physical Vapor Deposition)、CVD (Chemical Vapor Deposition)、二重管<sup>(9)</sup>など種々の技術が開発されており、各種の分野において部材の表面保護や新機能を付与する手段として広く実用化されている。これらの表面被覆法のうち、溶射は下記のように多くの利点をもっており、伝熱管の耐食性、耐摩耗性を付与する最も有力な表面被覆技術として今後もその適用が期待されている。

- (1) 材料選択の自由度が大きい。
- (2) 対象物の形状、寸法の制約が少ない。
- (3) 対象物の熱による変形が少ない。
- (4) 成膜速度が高い。
- (5) ボイラ内での現地施工が可能。

当社ではボイラ伝熱管の腐食、摩耗対策の一つとして溶

射による表面被覆技術の有効性に着目し、皮膜特性試験、実機実証試験を長年にわたって実施しており、用途に応じた材料選定、溶射施工技術を確立している。本稿では代表的な溶射材と溶射プロセスの概要および実機適用例について述べる。

## 2. 溶射の種類と特長

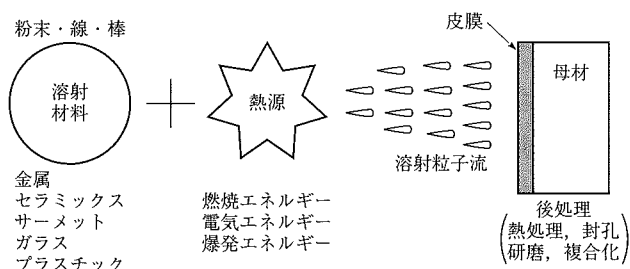
### 2.1 溶射の原理と種類

溶射の原理については第1図に示す模式図<sup>(10)</sup>で説明される。まず、粉末(パウダ)、線(ワイヤ)、棒(ロッド)の形状で供給される溶射材料(金属、非金属あるいはサーメット)が、ガスの燃焼エネルギーまたはアークなどの電気エネルギーにより熔融(またはそれに近い状態)する。熔融した材料は燃焼ガス流またはキャリアガスにより液状微粒子(溶射粒子)として、あらかじめ粗面化した素材表面に高速度で連続的に衝突し積層する。その後、場合により熱処理、封孔処理、研磨などの後処理を行い皮膜を調整することで溶射が終了する。このとき、溶射粒子は熔融状態で素材表面の凹凸に沿って付着、凝固するため、溶射のままの状態では積層粒子/素材間および積層粒子間とは主として付着後の粒子の冷却に伴う収縮力によって機械的に結合している<sup>(11)</sup>。

溶射プロセスは熱源によって第1表に示すように大きく二つに分類される。ガス式では酸素-アセチレンガスによるガスフレーム溶射や高速ガスフレーム溶射(以下HVOFと称する: High Velocity Oxygen Fuel)、電気式ではアーク溶射、プラズマ溶射が技術的な完成度も高く、工業的に多用されているプロセスである。溶射プロセスは形成皮膜の気孔率、母材と皮膜間の密着性、経済性に大きな影響を及ぼすため<sup>(12)</sup>、溶射材料(形態、溶融点)、使用環境および対象物の形状や材質を考慮して決定される。

### 2.2 溶射材の実用化評価と選定

伝熱管への溶射選定については実験室レベルの確性試験および実機ボイラへの試験挿入を行い、要求性能、長期安定性、信頼性を満たすことを確認したうえで採用してきた。



第1図 溶射プロセスの模式図

Fig. 1 Schematic of thermal spraying process

以下に実用化評価結果の概要を報告する。

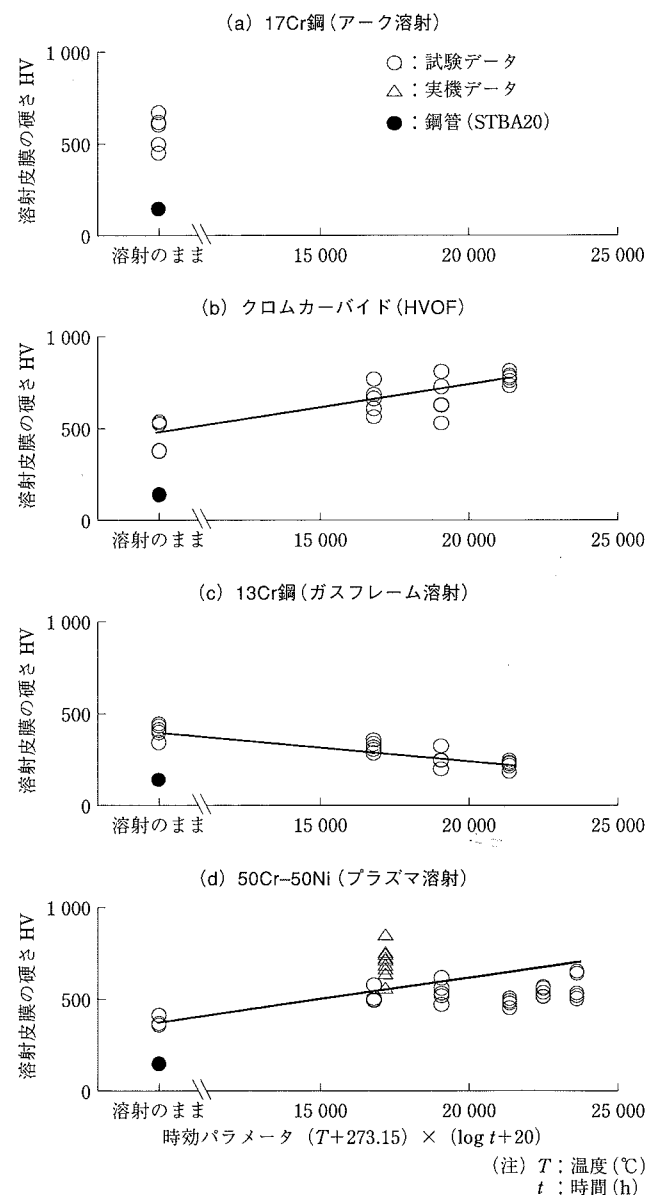
### 2.2.1 実験室における確性試験

実験室試験では実機使用条件、使用温度以上における長時間挙動および皮膜の機械的特性を把握する目的で実施している。第2図は長時間使用に対する溶射皮膜の硬さ変化

第1表 溶射方法の分類

Table 1 Classification of spray coating process

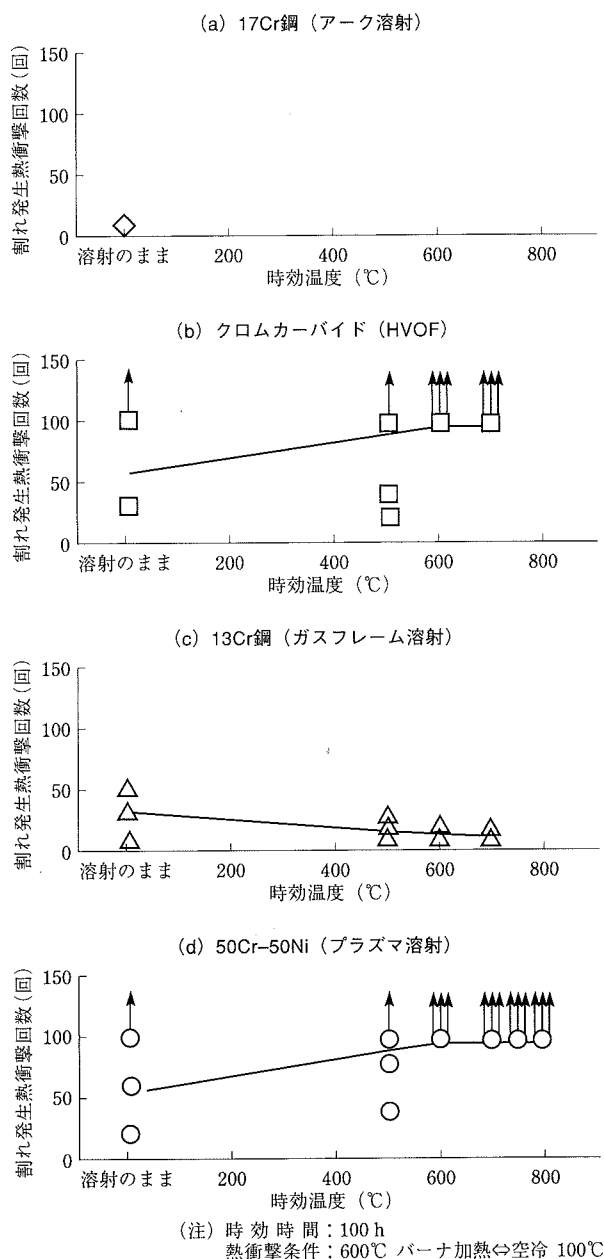
| 方式  | 溶射方法               |
|-----|--------------------|
| ガス式 | フレーム溶射             |
|     | 高速ガスフレーム溶射(HVOFなど) |
|     | 爆発溶射               |
| 電気式 | アーク溶射              |
|     | プラズマ溶射             |
|     | レーザ溶射              |



第2図 溶射皮膜硬さの経時変化特性

Fig. 2 Age hardening behavior of thermal spray coatings

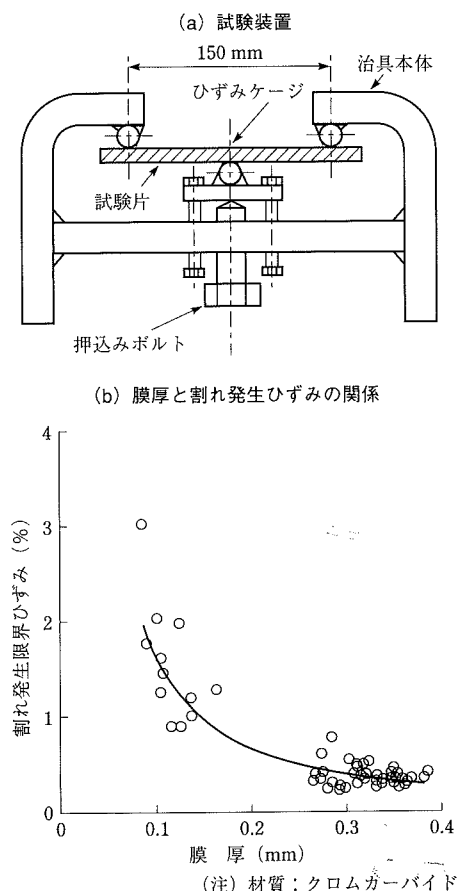
を示している。13Cr鋼は長時間使用により硬さが低下する傾向を示すのに対し、50Cr-50Ni およびクロムカーバイドは増加傾向を示す。第3図にバーナリグ試験<sup>(13)</sup>による熱衝撃試験結果を示す。50Cr-50Ni およびクロムカーバイドは比較的耐熱衝撃性が良好であることから、ウォールデスラガ廻りなどスチームやドレンによる耐熱衝撃性が要求される部位への適用が有利であると判断される。また、溶射皮膜は一般に膜厚が厚くなるほど密着度が低下する傾向があるので、第4図に示すように割れが発生するひずみと膜厚の関係性を調査したうえで施工膜厚を決定している。



第3図 バーナリグ試験装置による熱衝撃試験結果  
Fig. 3 Thermal shock test result tested using burner rig test facility

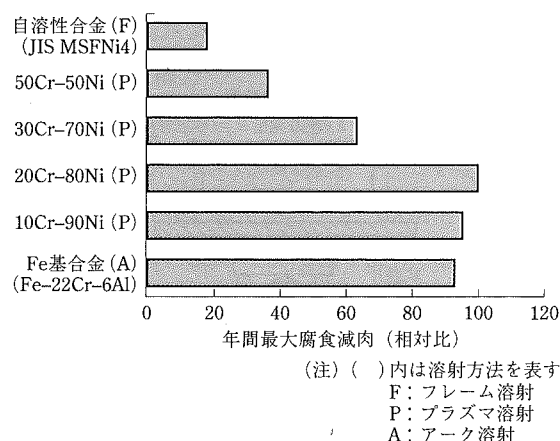
## 2.2.2 実機ボイラにおける実用化試験

第5図は既設微粉炭焚自然循環ボイラ(最大蒸発量185 t/h)の火炉壁還元燃焼領域に、3~5年挿入した溶射の年間最大減肉量の相対比を示す。クロム・ニッケル系ではいずれもプラズマ溶射で施工しているが、クロム含有量の増加とともに減肉量は小さくなる傾向を示し、50Cr-50Ni が最も優れた耐食性を示した。ガスフレーム溶射によるニッケル基自溶性合金(以下自溶性合金と略す)は全試験材中で最も減肉が小さく、アーク溶射によるFe基合金(Fe-22Cr-6Al)溶射は減肉が比較的大きかった。これは材質の違いはあるものの、再溶融処理により緻密な組織をもつ自溶性合金が、腐食性ガスの侵入に対して有効な障壁として作用したのに対し、アーク溶射によるFe基合金溶射は皮膜中に空孔や酸化物を比較的多く内在するため、それらを通じて腐食が進行したためと予想される。したがって、還元性ガス腐食対策としては50Cr-50Ni(プラズマ)溶射のような、高いクロム濃度と緻密な組織をもつ溶射が有効であることがわかる。この溶射は過熱器、再熱器管の高温腐食対策としても有効と考えられる。

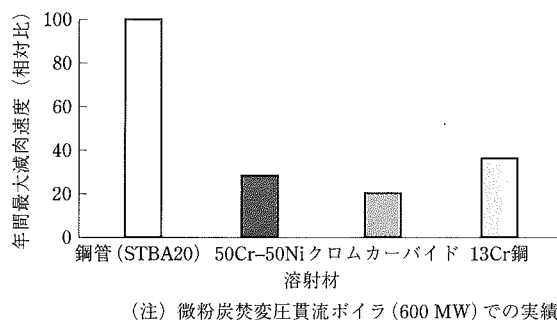


第4図 限界割れ測定装置とその評価結果の一例  
Fig. 4 Crack initiation strain tester and test results

耐摩耗性の評価は粒子の衝突角度、衝突速度、温度などの条件が異なると材料間の耐摩耗性順位が変化する場合があるので、実機環境またはそれに近い条件で行う必要がある。ここでは摩耗による減肉が問題となる微粉炭焚ボイラの火炉壁ウォールデスラガ(以下W/Dと略す)廻りおよび加圧流動層ボイラの層内伝熱管に関する評価結果を紹介する。第6図は、微粉炭焚変圧貫流ボイラ(600 MW)火炉壁W/D廻りに2年間溶射パネルを挿入して摩耗量を測定した結果である。溶射により摩耗は鋼管のままと比較して約1/3以下に低減することがわかる。また、クロムカーバイド(HVOF)溶射が最も摩耗減肉が小さく、有効な摩耗対策と判断される。ただし、施工にあたっては皮膜の割れ発生防止上の点から、限界溶射皮膜厚さの管理が重要となる。また、50Cr-50Ni(プラズマ)溶射は第2図に示すとおり火炉運転温度で経時的に硬化する傾向があり、この特性を生かせること、クロムカーバイドと比較して膜厚を厚く設計できることから施工膜厚を考慮した摩耗寿命(=溶射膜厚/最大摩耗速度)が大きく、耐摩耗材として有効であると判断



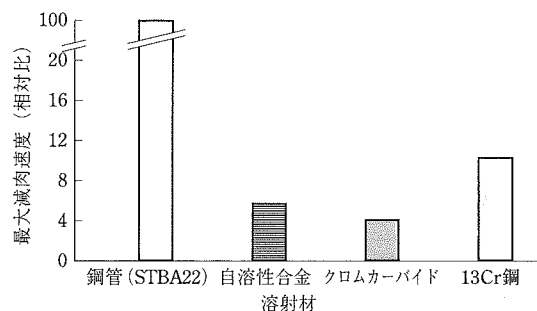
第5図 微粉炭焚ボイラ火炉壁管における高温腐食減肉測定結果  
Fig. 5 Result of sulfidation attack in water wall of pulverized coal fired boiler



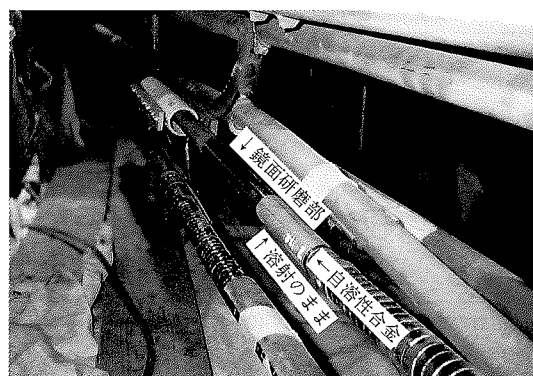
第6図 微粉炭焚ボイラ火炉壁管ウォールデスラガ廻りにおける減肉測定結果  
Fig. 6 Recession measurement of water wall around deslagger in actual pulverized coal fired boiler

される。また、13Cr鋼も十分な摩耗寿命をもっていること、施工性が良いことから実用化されている。しかしながら、第3図に示すとおり熱衝撃による割れが発生しやすい傾向があり、W/D廻りのようにスチームやドレンによる急激な温度差が発生する恐れがある部位には適用が困難と思われる。第7図に流動層ボイラ(3 MWt)層内蒸発器管における各種溶射材の摩耗試験結果を示す。鋼管のままと比較して溶射を適用することにより顕著な耐摩耗性の向上が確認された。特に、クロムカーバイド、自溶性合金の耐摩耗性が優れていることがわかる。摩耗寿命の点から、厚膜化が可能な自溶性合金は層内管摩耗対策として最も適していると考えられる。実機 PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion) の層内管に挿入した自溶性合金溶射材の耐摩耗性検証状況を第8図に示す。

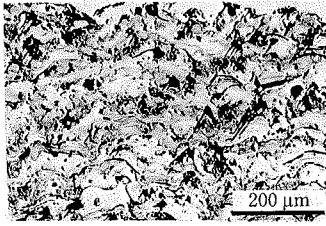
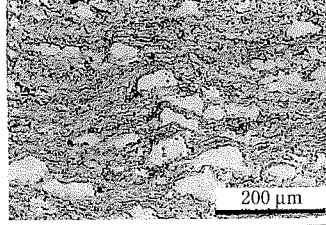
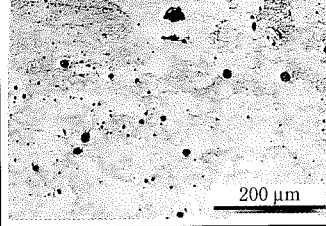
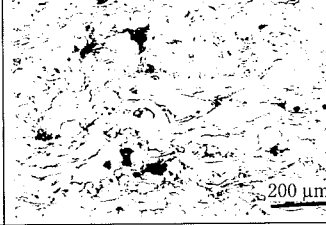
ボイラ伝熱管の腐食、摩耗対策として適用している代表的な溶射技術を第9図にまとめた。50Cr-50Niは耐食性と耐摩耗性を両立する優れた材料であり、プラズマ溶射により施工される。クロムカーバイドは材料に炭化クロムとニッケルクロム合金の混合物(サーメット)を用いており、



第7図 流動層パイロットプラントにおける層内蒸発器管の摩耗試験結果  
Fig. 7 Erosion test result for in-bed evaporator tubing performed in PFBC pilot plant



第8図 自溶性合金溶射材の実機検証状況  
Fig. 8 Appearance of nickel base self-fusing alloy spray coated tube inserted into in-bed tube of actual PFBC

| 用途      | 溶射材                                                                                           | 溶射法                                                               | 皮膜組織                                                                                 |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 耐食・耐摩耗性 | 50Cr-50Ni<br>成分<br>0.1Si-0.3Al-45Cr-<br>残Ni<br>硬さ: HV400~500                                  | プラズマ溶射<br>直流通電流<br>プラズマジェット<br>作動ガス<br>陰極<br>アーク<br>溶射材料粉末        |    |
|         | クロムカーバイド<br>成分<br>75% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub><br>+ 25% (80Ni-20Cr)<br>硬さ: HV700~800    | 高速ガスフレイム溶射<br>圧縮空気<br>ショックダイヤモンド<br>酸素-プロピレンガス<br>粉末と送給ガス         |    |
| 耐摩耗性    | 自溶性合金<br>(JIS MSFNi4 相当)<br>成分<br>16Cr-4B-4Si-0.5C-<br>2.5Fe-3Mo-3Cu-<br>残Ni<br>硬さ: HV700~800 | 粉末式ガスフレイム溶射<br>溶射材料粉末<br>酸素-燃料ガス<br>粉末送給ガス                        |    |
|         | 13Cr鋼<br>(JIS SUS420J2 相当)<br>成分<br>0.35C-13Cr-残Fe<br>硬さ: HV300~450                           | 溶線式ガスフレイム溶射<br>またはアーク溶射<br>溶射材料<br>酸素-燃料ガス<br>圧縮空気<br>アーク<br>フレイム |   |
|         | 17Cr鋼<br>成分<br>5C-3Ti-17Cr-残Fe<br>硬さ: HV600~750                                               | アーク溶射<br>溶射材料線材<br>直流電源<br>空気<br>アーク                              |  |

第9図 代表的なボイラ伝熱管用耐食・耐摩耗溶射材

Fig. 9 Typical erosion and high temperature corrosion resistant spray coatings for heat exchanger tubing

HVOFにより溶射する。材質的に非常に高い硬さを示し良好な耐摩耗性を示す。自溶性合金はプロセス的にガスフレイム溶射後、ガス炎や高周波誘導加熱により溶融処理を行うことが特長である。ニッケルマトリックス中に微細なけい素、ほう素化合物が形成されるため優れた耐摩耗性を示す。溶融処理により母材と冶金的に結合するため皮膜の密着力が高い。一般に火炉壁管などパネル片面への施工は、溶融処理による熱変形が生じるため施工が困難である。13Cr鋼はマルテンサイト系鋼であるため良好な耐摩耗性を示す。比較的安価な溶射である。17Cr鋼はマルテンサイトマトリックス中にクロムカーバイド粒子が分散した組織をもち、優れた耐摩耗性を示す。

### 3. ボイラへの適用

#### 3.1 オリマルジョン® 焚ボイラ火炉壁

オリマルジョン®は南米オリノコ川流域で産出される天然アスファルト(オリノコタールと呼ぶ)を、水と界面活性剤によりエマルジョン化した燃料である。オリノコタールの埋蔵量は、中東原油可採埋蔵量の約7割に相当する。また、価格的に原油より安価であり、安定供給が見込まれていることから新燃料として注目されている。しかしながら、オリマルジョン®は重油と比較して水分、硫黄、バナジウム、マグネシウムの含有量が多いという特徴があり、ボイラで燃焼する場合、炉底部からバーナ上部の空気孔(オーバ

エアポート (OAP) 以下の還元燃焼領域における火炉壁管で著しい硫化腐食が生じることが懸念される。このようなボイラの火炉壁管に対してはプラズマ溶射による 50Cr-50Ni 溶射を行っている。

硫化腐食対策として 50Cr-50Ni 溶射したボイラの全体組立図と溶射適用範囲を第10図に示す。溶射は炉底部から OAP までの範囲に対して実施しており、総施工面積は 920 m<sup>2</sup> に達する。溶射皮膜へのき裂発生を防止するうえで大型の火炉壁管パネルの工場での溶射施工は、現地への搬送時、据付け時のたわみ防止、現地でのパネルの溶接による過大入熱防止などの多くの対策を要するため、完成水圧試験後に現地で溶射施工を行った。このため、皮膜の高品質化と工事日程の短縮を目的として、自動溶射機を開発して施工を行った。自動溶射機は、ボイラ炉内での作業性を考慮して、分解・組立が容易で、溶射ヒュームに対する可動部分の耐久性が高く、かつ交換しやすい構造とした。また、ガンのトラバース (移動) について、第11図に示すように従来のヘリカル水冷壁管に沿った溶射方式に代わり、水平方向に溶射する方式を開発し<sup>(14)</sup>、皮膜品質の安定化と同時に自動溶射施工範囲の拡大と高効率化を図っている。第12図に自動溶射機による現地溶射状況を示す。また、第13図は自動溶射機で施工した 50Cr-50Ni 溶射皮膜の断面組織

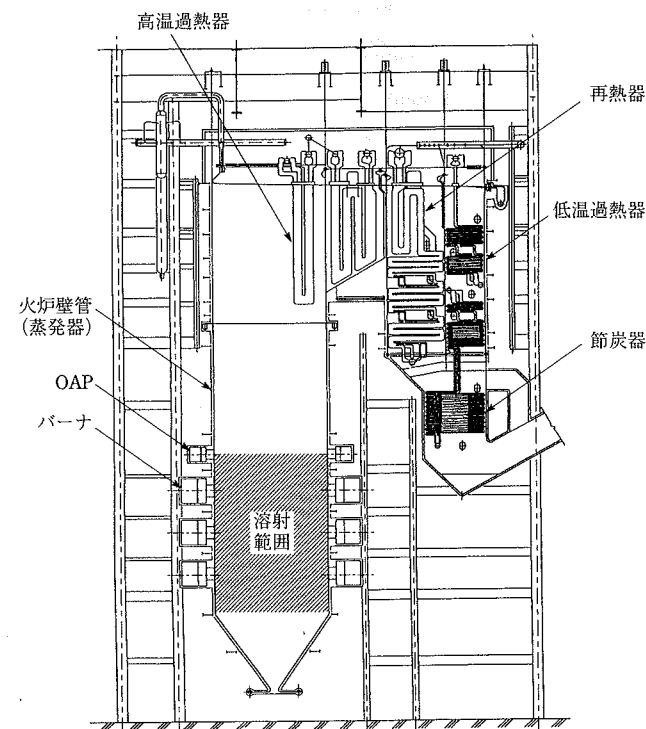
写真を示す。管頂部、管/フィン境界部およびフィン部の全面にわたって均一な皮膜が得られていることがわかる。

### 3.2 微粉炭焚ボイラ火炉壁

微粉炭焚ボイラでは W/D のスチームに石炭灰が巻き込まれ、周辺の火炉壁に顕著な摩耗減肉を生じる場合がある。摩耗対策として、HVOF によるクロムカーバイド溶射が適用されている。なお、第2章で述べたが摩耗寿命の点では 50Cr-50Ni (プラズマ) 溶射も有利なため、特に熱衝撃の面で厳しい伝熱面に対し、クロムカーバイドに代わり適用している。

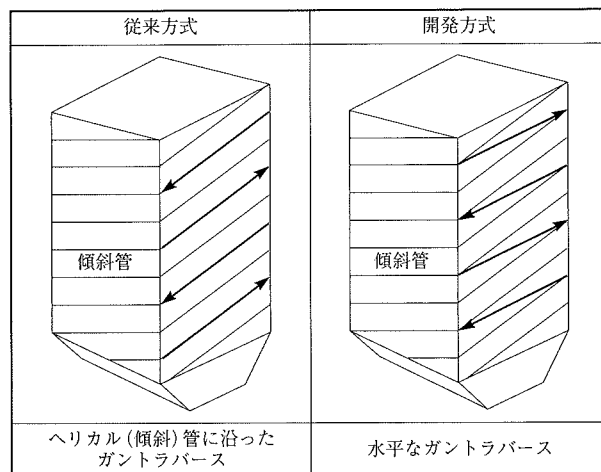
### 3.3 加圧流動層ボイラ層内管、火炉壁

加圧流動層 (PFBC) ボイラの伝熱管は流動層内に設置されるため、ベッド材の連続的な衝突をうけるが、比較的空塔速度 (ベッド材の流動速度) が小さいことから、他の流動層ボイラの伝熱面と比較して摩耗環境は穏やかといえる。伝熱管のうち、過熱器管などの比較的メタル温度が高い部位では鋼管自身の表面に酸化皮膜が形成され、摩耗に対し、



第10図 重油焚変圧貫流ボイラの全体図と 50Cr-50Ni 溶射した範囲

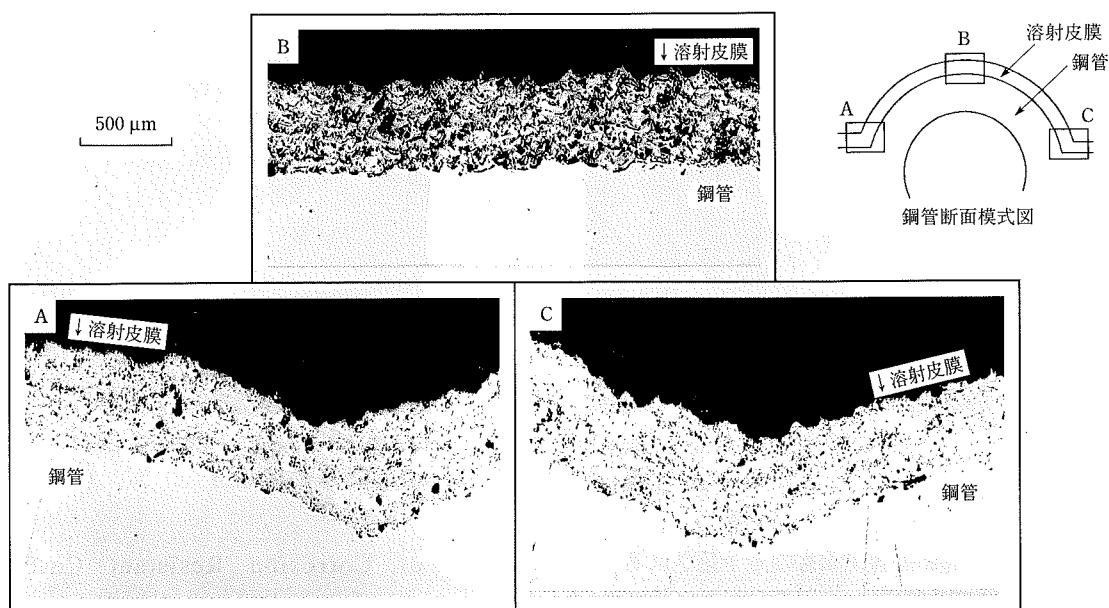
Fig. 10 Arrangement of oil fired boiler and 50Cr-50Ni spray coated area



第11図 ガントラバースの方式  
Fig. 11 Spray gun traverse process



第12図 自動溶射機による現地溶射施工状況  
Fig. 12 Use of automatic spray coating apparatus in the field



第 13 図 自動溶射機で施工した50Cr-50Ni溶射皮膜の断面組織

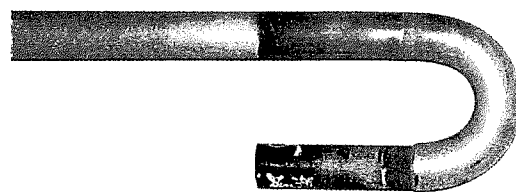
Fig. 13 Microstructures of 50Cr-50Ni coatings sprayed by automatic spray apparatus

て保護効果を発揮する。しかしながら、メタル温度の低い蒸発器管では摩耗に対して有効な酸化皮膜の形成が期待できないため表面被覆による摩耗対策が必要となる。この摩耗対策として大容量PFBC (360 MW)では、特に優れた耐摩耗性と同時に母材と高い密着度が得られる自溶性合金溶射を選定している。自溶性合金はフレーム溶射後溶融処理を行うが、その熱源として高周波誘導加熱方式を採用している。高周波誘導加熱はガス炎加熱などの他の熱源と比較して、温度管理が容易であり、溶射皮膜のある管のごく表面部を短時間に加熱することが可能なため、鋼管(母材)に及ぼす熱影響を小さくできる。また、溶射は蒸発器管ループの直管部だけでなくバンド部に対しても実施しているが、高周波加熱温度が管の曲げ温度に近い場合、溶射皮膜の溶融と同時に管の曲げ加工もできる特長がある。第14図に自溶性合金溶射した層内管の外観を示す。

また、火炉壁管は層内管ほど摩耗が激しくないと予想されることから、アーク溶射による13Cr鋼により耐摩耗性を確保している。

### 3.4 循環流動層ボイラ火炉壁

循環流動層ボイラ(CFB: Circulating Fluidized-bed Boiler)<sup>(15)</sup>では火炉壁底部の火炉壁と耐火材の境界部において、石炭灰の衝突による激しい摩耗が生じ、摩耗対策が重要な課題となっている。この対策として、火炉壁管炉底部にクロムカーバイド(HVOF)溶射を採用したが、1年後に管の頂部を除いて皮膜の摩耗が認められた(第15図)。そ



第 14 図 PFBC向け自溶性合金溶射管の外観

Fig. 14 Appearance of self-fusing alloy coated in-bed tube for PFBC

こで耐摩耗性に優れる<sup>(16)</sup>と同時に皮膜厚さ拡大の点で有利な17Cr鋼(アーク)溶射を適用した。その結果、1年間の使用後において若干の減肉は認められるものの、CFB火炉壁環境の摩耗対策として有効であることを確認した。

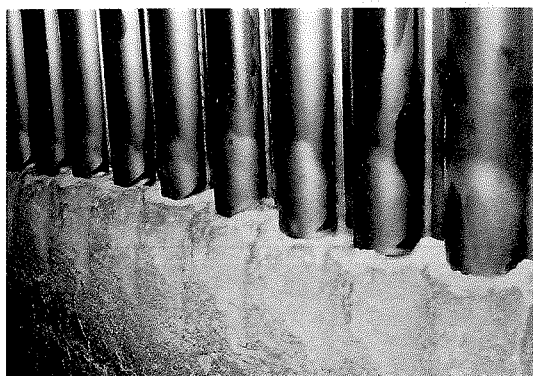
## 4. 結 言

当社におけるボイラへの溶射適用に関する検討結果、実機適用例について紹介した。以下にその結果をまとめる。

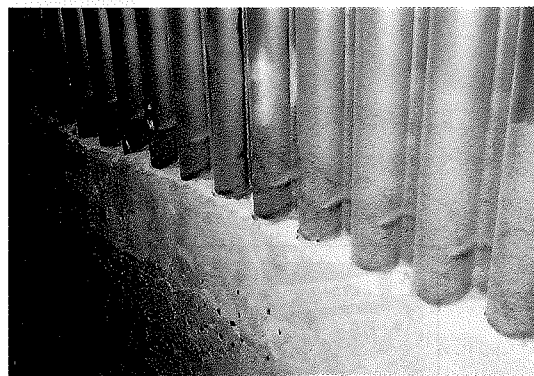
- (1) 耐食用途にはプラズマによる50Cr-50Ni溶射が有効である。
- (2) 耐摩耗用途では適用部位に応じて溶射材を選定する必要がある。例えば、微粉炭焚ボイラ火炉壁W/D廻りにはクロムカーバイド(HVOF)溶射および50Cr-50Ni(プラズマ)溶射、流動層ボイラ層内管には自溶性合金(ガスフレーム)溶射、CFB火炉壁には17Cr鋼(アーク)溶射が挙げられる。

以上、溶射は施工場所や対象物の制約が少ないうえ、短時間に処理が可能という特長から、今後もボイラ伝熱管の

(a) クロムカーバイド (HVOF)



(b) 17Cr鋼 (アーク溶射)



第15図 溶射施工したCFBボイラ火炉壁パネル外観

Fig. 15 Appearance of thermal spray coated water wall panel

摩耗・腐食対策に用途が拡大するものと予想される。さらに溶射の経年劣化評価技術の開発、安価で高性能な溶射材料の開発およびより高性能な皮膜形成が期待されるHVOF (High Velocity Air Fuel)<sup>(17)</sup>、高圧HVOF<sup>(18)</sup>など新溶射プロセスの実用化へ向け注力する所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) 腐食防食協会編：金属材料の高温酸化と高温腐食 丸善株式会社 1982年
- (2) 深堀ら：最近の油焚きボイラにおける高温腐食の動向と対策 火力原子力発電 Vol. 28 No. 7 1977年 pp. 639-649
- (3) 石原義巳：バナジウムアタックとその対策 化学装置 1973年9月 pp. 36-73
- (4) 石本礼二ら：IHI 加圧流動層ボイラの実用化 石川島播磨技報 第31巻第5号 1991年9月 pp. 301-308
- (5) 天池瑛ら：石炭ガス化複合発電技術の実用化研究成果 石川島播磨技報 第34巻第2号 1994年3月 pp. 78-82
- (6) たとえばP.L.F.Rademakers et al. : Erosion/Corrosion under AFBC Conditions Workshop on FBC Materials Issues Nova Scotia Canada (1985.7) pp. 1-22
- (7) 上田重朋：ドライプレーティング 槇書店 1989年6月
- (8) 森重徳男ら：レーザークラッディングによるボイラチューブの高温腐食防止 石川島播磨技報 第37巻第2号 1997年3月 pp. 89-94
- (9) たとえばT.Flatley and T. Thursfield : Review

of Corrosion Resistant Co-Extruded Tube Development for Power Boilers J. Materials for Energy Systems Vol. 8 No. 1 (1986. 6) pp. 92-105

- (10) 大森 明：溶射皮膜の各種試験法による評価 溶接技術 第40巻第6号 1992年6月 pp. 79-86
- (11) 岡根 功：溶射技術の最近における進歩 まてりあ 第33巻第3号 1994年 pp. 268-275
- (12) 蓮井 淳：溶射工学 産報出版 1996年
- (13) 吉川和夫, 溝 豊：表面被覆層の熱衝撃試験 IIC REVIEW No. 18 1997年10月 pp. 10-15
- (14) 石川島播磨重工業(株) 梶谷一郎, 戸塚文博：傾斜型炉壁管への溶射装置とその方法 特許出願中 P09-120452号
- (15) 渡辺修三ら：IHI-FW 循環流動層ボイラ 石川島播磨技報 第33巻第1号 1994年 1月 pp. 49-53
- (16) S. Gustafsson et al. : Thermally Sprayed Coatings for Boiler Protection Proceedings of 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion (1997) pp. 225-239
- (17) 秋本浩一, 秋本和夫：HVOF (高速フレイム溶射) システムによるWC サーメット溶射皮膜の考察 溶射 Vol. 33 No. 3 1996年 pp. 28-35
- (18) H. Kreye et al. : High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying-Process and Coating Characteristics Thermal Spray Practical Solutions for Engineering Problems C. C. Berndt (ed.) Published by ASM International Materials Park, Ohio USA (1996) pp. 451-456