

溶射装置と溶射皮膜特性の研究

Study on Thermal Spraying Guns and Characteristics of Films Formed by Thermal Spraying



溶接溶射技術開発室

古田 博昭

Hiroaki Furuta

溶接拡販プロジェクト係長

木下 利哉

Toshiya Kinoshita

要旨

溶射法は近年急速に製鉄プロセスロールや発電ボイラ等に幅広く適用されており、特にボイラ関連の溶射については高速フレイム溶射法が主流である。またボイラの溶射では現地施工が多いため、安定した皮膜を安全に低コストで施工する技術が求められている。

そこで当社は高品質で低コストの施工が可能とされる空気使用の高速フレイム溶射について、他の酸素使用の高速フレイム溶射機との皮膜強度および歩留りを比較調査し、合理的な結果を確認した。

Synopsis:

Thermal spraying has been finding its rapidly increasing use as a process to strengthen processing rolls at steel plants and boilers at power plants and in other applications. While the high-speed flame spraying has been proving the mainstream in boiler-related thermal spraying, the development of a technology to form stable clad films at lower costs is sought for.

We conducted a comparative study of high-velocity air fuel spraying gun, which promises a high-quality and low-cost film formation, and high-velocity oxy-fuel spraying gun in terms of film strength and yield, and have reached convincing conclusions.

1 緒言

近年では地球温暖化やダイオキシンの発生など特に身近な問題として感じられている。

地球温暖化はCO₂発生などの抑制が要求されており、ダイオキシン類の抑制としては、1997年に国内でもゴミ焼却等の燃焼温度を800℃以上で行うことが義務付けられた。また製鋼メーカーでは国際競争力激化のためロール、ローラ等の寿命延長による大幅なコストダウンの必要性が増大している。これらの項目はいずれもプロセスの中で使用される設備関連で高温耐摩耗、耐食性、耐熱性が必要となる部分があり、これらを満足させるために設備や高級な材料を使用すると大幅なコストアップとなるため一般には汎用鋼材の表面処理が行われている。

この表面処理方法として溶接、溶射が挙げられるが本報告では溶射法の中でも、現状でのプラント設備への展開状

況において純酸素を使用する高速フレイム溶射 (HVOF) と空気を使用する高速フレイム溶射 (HVOF) の違いについて述べる。

2 高速フレイム溶射機について

高速フレイム溶射法¹⁾は燃焼室の燃焼圧力を高める事により連続燃焼炎を高速にし、溶射材料を基材に衝突させ皮膜を形成する溶射法である。燃料と酸素を組み合わせた方法はHVOF(High Velocity Oxygen Fuel spraying)、また燃料と空気を組み合わせた方法はHVOF(High Velocity Air Fuel spraying)と呼ばれている。どちらの装置でも燃焼はガンの内部で起こり、発生した燃焼ガスは細いノズルで絞られ、さらにバレル(銃筒)を通るうちに高速のジェット噴流となる。粉末はこの高速ガス流に乗り、加熱されると同時に高速でガンから噴出され皮膜が形成される。これらの方法で

形成された皮膜は緻密で且つ基材との密着性がありサーメットや炭化物等の溶射皮膜を形成する場合に主に使用される。この結果、現在広く使用されている。

溶射装置の物性値を比較してまとめたものをTable 1に示す。

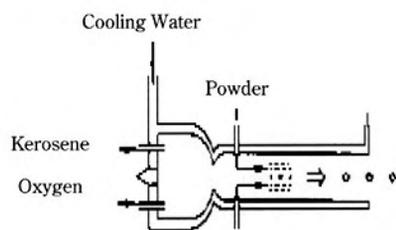
Table 1 Characteristics of spraying gun

Thermal spraying gun	HVAF(SB)	HVOF(JP-5000)
Fuel and Gas	Propane + Air	Kerosene + Oxygen
Combustion temperature (°C)	1750	3090
Combustion pressure (kgf/mm ²)	5	5.6~10.5
Gas velocity (m/s)	2700~3500	2000~2200
Particle temperature (°C)	1400	1700
Particle velocity (m/s)	600~800	550~650

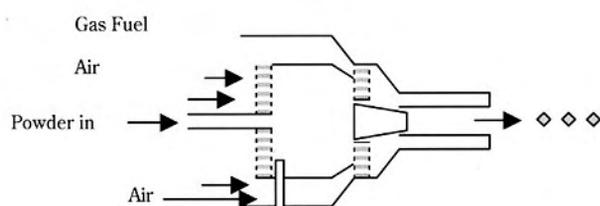
HVAF(SB)は、熱源にプロパン+空気を使用しており他の溶射機と比較して燃焼温度、粒子温度共に低く、燃焼室の冷却機構は空冷方式となっている。HVOF(JP-5000)は灯油+酸素を使用しており燃焼温度、粒子温度が高いため冷却機構は水冷方式である。また空気を使用した場合と酸素を使用した場合とでは、燃焼室内のガスの絶対量が空気を使用した方が大きくなるため流速が速くなる。しかし、空気を燃焼させた場合は空气中に窒素が79%含有しているのでこの窒素が冷却効果の役割をすることから燃焼温度は低下する。

2.1 溶射GUNの内部構造

Fig.1に本報告で使用比較したHVOF(JP-5000)とHVAF(SB)溶射ガンの内部構造の概略図を示す。



(a) HVOF (JP-5000)



(b) HVAF (SB)

Fig.1 Comparison between HVOF(JP-5000) and HVAF(SB) gun

HVOF(JP-5000)²⁾は先に述べた様に燃料と酸素が加圧状態でガン本体の燃焼室に供給され、点火プラグにて着火し燃焼される。ここで燃焼したガスは細いバレルを通り超音速のジェット流となって外部へ放出される。一方、溶射材料は粉末状態でガン本体の先端部から不活性ガスによって導入され燃焼ガスの流れに乗って高温・高速の飛行粒子となって噴射される。

HVAF(SB)³⁾では燃焼工程は他のHVAFと同様であるが燃焼室とは別に加熱装置が備わっており2段階で燃焼することにより粉末に高い熱量を与えることが可能である。

このSB装置は、燃焼内圧がHVOF(JP-5000)と比較し低く、またクロッキングの発生が少ないのでガン後方から溶射粉末を大量に投入することが可能であるのも特徴の一つであると言われている。

また、このHVAF(SB)溶射機は、溶射材料によってガスを変えておりメタル系は空気+プロピレンで燃焼し、またサーメット材料では空気+MAPP(メチルアセチレン・プロパジエン)混合ガスを使用している。

2.2 溶射能力について

HVAF(SB)は前項に述べた様に溶射ガン後方から溶射粉末を大量に投入することが可能であるが、バレル(銃筒)内に噴射時に粉末が凝集し、付着するスピitting現象の懸念がある。粉体供給能力をTable 2に示す通り、HVOF(JP-5000)と比較すると約3~4倍である。

Table 2 Spraying capacities

	Spray rate (kg/hr)
HVOF (JP-5000)	3~7
HVAF (SB)	20~30

溶射歩留りを比較するために実際にNi基自溶性合金およびCr₃C₂-NiCr材料で溶射したデータをTable 3に示す。これらの溶射歩留り結果からHVAF(SB)は他の高速フレーム溶射機よりも高い数値を示しており、コストメリットがでるものと思われる。

Table 3 Deposite efficiency

	Self-fluxing alloy (%)	Cr ₃ C ₂ -NiCr (%)
HVOF (JP-5000)	45	35
HVAF (SB)	60	40

3 溶射皮膜特性の調査

HVAF(SB)の溶射ガンは、燃焼室が2重構造であり燃焼室後部から粉末を投入することから、粉末の加熱が早く、スピitting現象が起きやすい。そこで、融点の低いNi基自溶性合金材料を実際に溶射して、HVOF(JP-5000)の溶

射皮膜特性との比較を行った。

3.1 溶射条件

Table 4に溶射施工条件を示す。この条件の中で最も異なるのは、バレル先端からの溶射面距離である。これは、HVOF(SB)が、バレル付け根部(チョーク部)がストレート形状をしており、HVOF(JP-5000)の方がチョーク部での絞りによる差と考えられる。

Table 4 Thermal spray condition

	HVOF(SB)	HVOF(JP-5000)
Spray speed (m/min)	36	30
Spray Pitch (mm)	4	5
Spray pattern (mm)	φ6	φ10
Spray distance (mm)	140	380
Shock diamond	5~6	7~8

Ni基自溶性合金をHVOF(SB)で溶射する場合のガス圧力、燃焼温度を三種類に変動させた。HVOF(JP-5000)は、既に

種々試験が行われていることから通常条件とした。

Table 5に主な溶射条件を示す。

Table 5 Spraying condition of self-fluxing alloy(Ni-base)

Test piece No	HVOF(SB)			HVOF(JP-5000)
	High Temp	Average Temp	Low Temp	Normal
Powder size (μm)	16-45			20-45
Base gas pressure 1 (psi)	83	82	74	—
Final gas pressure 2 (psi)	57	53	53	—
Support gas pressure (psi)	85	83	83	
Film thickness per 1 pass	60	50	50	42
Total film thickness (μm)	230	230	230	170

Fig.2に溶射粉末の粒子温度と粒子速度の関係を示す。HVOF(SB)の高温・高速条件は、HVOF(JP-5000)の通常条件の領域に近いと推察できる。

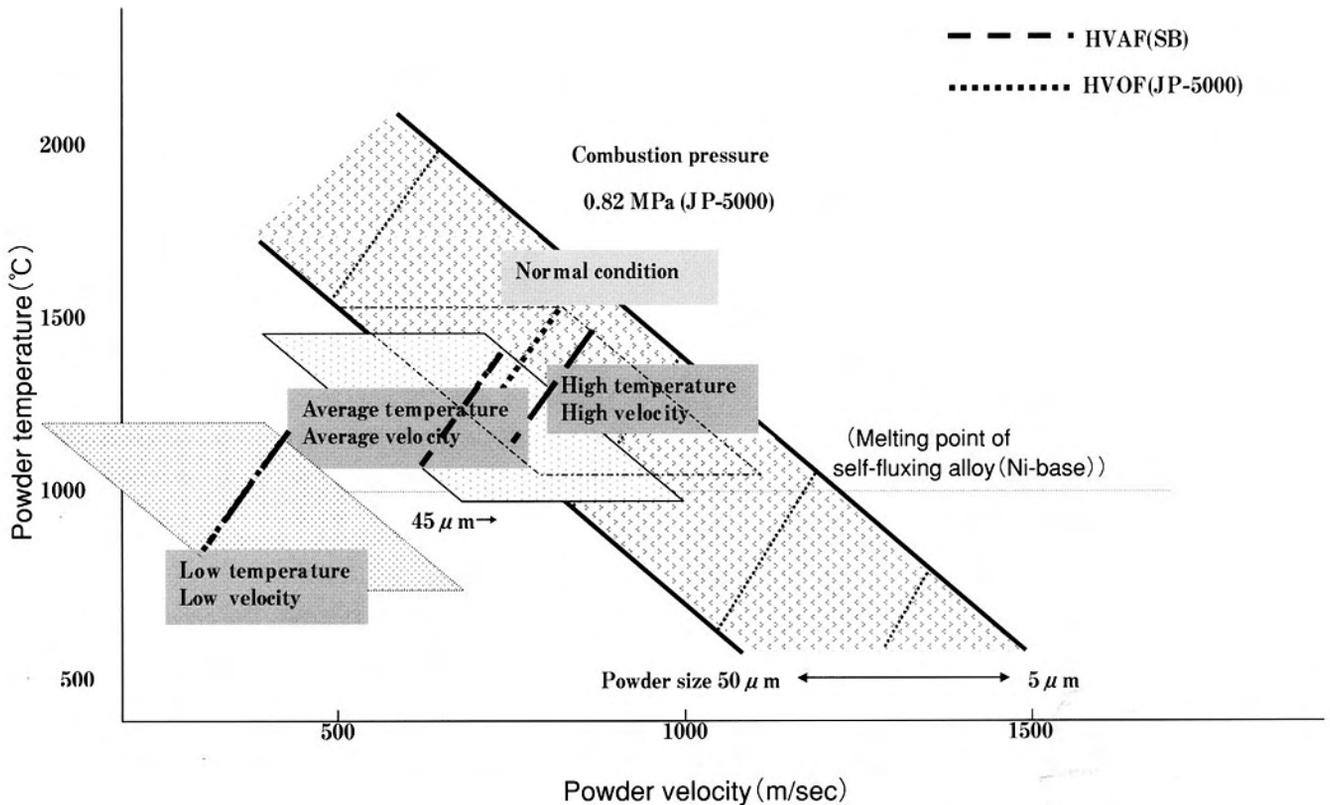


Fig.2 Relationship between powder temperature and powder velocity of self-fluxing alloy(Ni-base)

3.2 溶射皮膜特性調査結果

3.2.1 表面粗さ

溶射皮膜表面の粗さ測定結果をFig.3に示す。HVAF(SB)の溶射皮膜粗さは、粉体の高温・高速および低温・低速の場合Ra 4.5~5.0 μm 、平均温度・平均速度の場合3.2 μm であった。HVOF(JP-5000)は、使用粉末が粗めであることからHVAF(SB)による溶射皮膜粗さよりも粗いRa 約5.7 μm を示した。

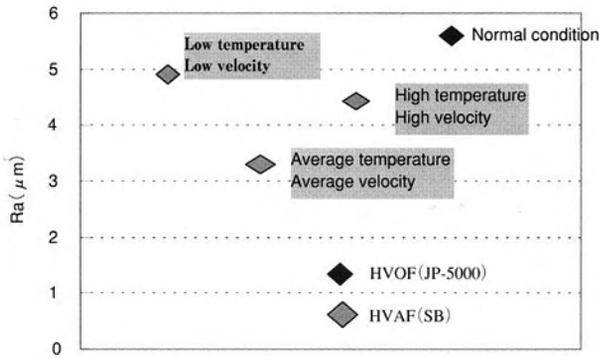


Fig.3 Surface roughness of film

3.2.2 断面ミクロ観察

Fig.4に溶射皮膜断面のSEM・EDS結果を示す。低温・低速では粉末が円形から楕円状に加熱変形した状態で積み重なった形態を表している。高温・高速では粉末の積み重ね部の粒界が見えない状態で粉末が溶融していることが確認できた。この結果から、高温・高速結果が、HVOF(JP-5000)の通常条件での溶射皮膜に近いことが分かった。

Fig.5にEPMA観察結果を示す。上段がNi元素の濃度分布、下段がMo元素の濃度分布である。低温・低速条件では、Ni元素が全体に均一に分布しており、粉末自体の溶融は見られない。Mo元素分布は、濃度がNiに比べても小さいことから全体に分布しているが偏析傾向は見られなかった。平均温度・平均速度条件では、Ni元素とMo元素いずれも濃度の高い部分が明確に分かり、溶融部と未溶融部が混在している。高温・高速では、Ni元素およびMo元素いずれも均一分布の傾向を示しており、粉末が溶融状態で混ざり合っていることを示している。

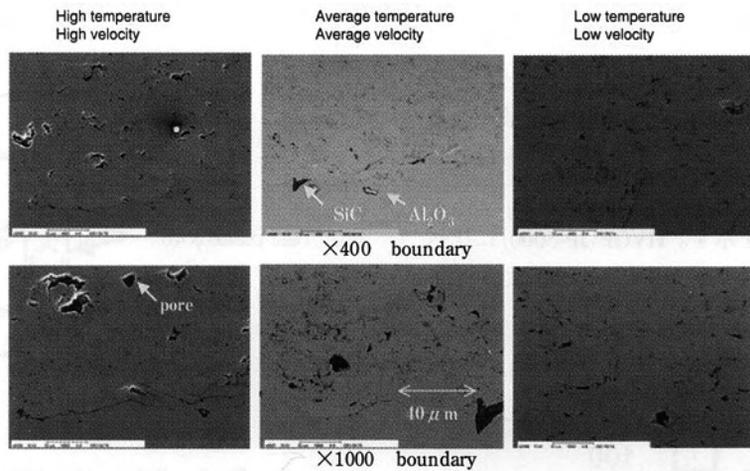


Fig.4 SEM・EDS analysis of film (HVAF(SB))

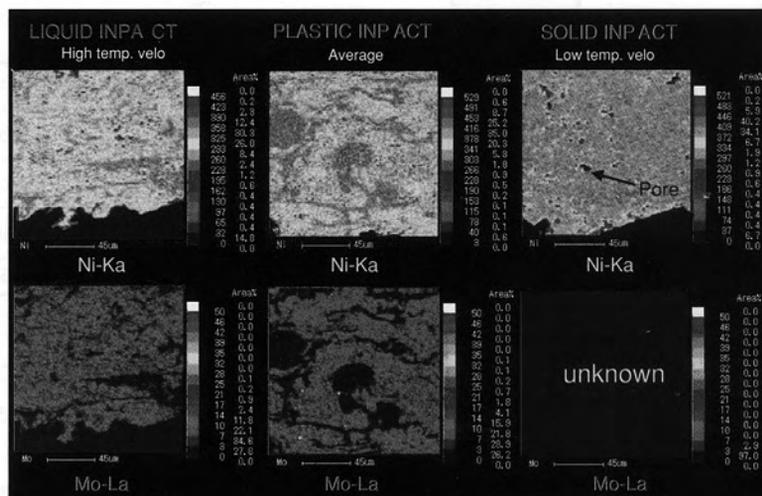


Fig.5 EPMA analysis of film (HVAF(SB))

3.2.3 マイクロビッカース硬さ

Fig.6にマイクロビッカース硬さ結果を示す。HVAF(SB)による高温・高速条件と低温・低速条件がビッカース硬さが平均温度・平均速度に比べて高い結果を示している。これは、高温・高速では溶融による急冷組織と低温・低速では未溶融粉末自体の硬さであることが推定できる。

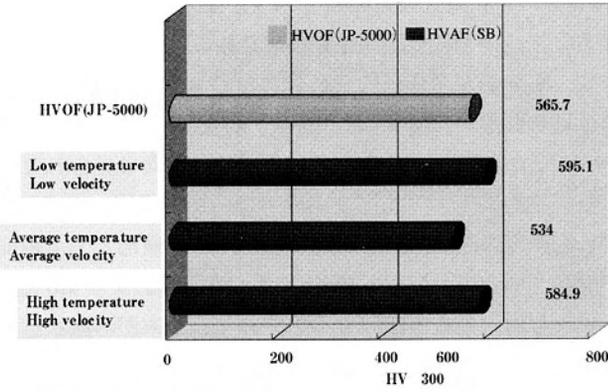


Fig.6 Vickers hardness of self-fluxing alloy(Ni-base)

3.2.4 摩耗試験結果

Fig.7に摩耗試験方法の概略図を示す。30度の角度がついたホルダーに溶射皮膜試験片をセットして、上部からプラスト材を叩きつけることによって、溶射皮膜試験片の減量重量変化を測定した。Table 6に使用したプラスト材料の仕様を示す。

Fig.8にこの摩耗試験結果を示す。HVOF(JP-5000)に比べてHVAF(SB)による溶射皮膜の摩耗は大きい傾向であったが、有意差は殆どないと考えられる。

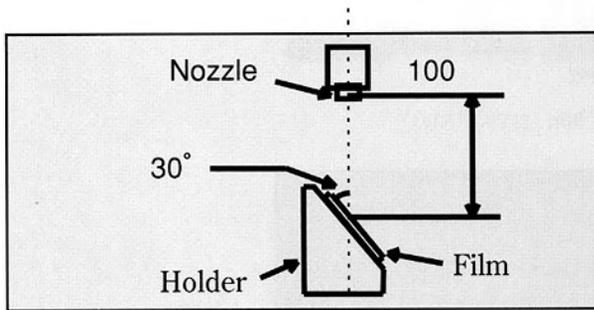


Fig.7 Abrasion test equipment

Table 6 Chemical composition and particle size of blast material

Element	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO
wt%	96.59	0.60	0.11	2.58	0.12

Mesh	35	45	50	60	70
%	0	5-15	58-68	78-97	0

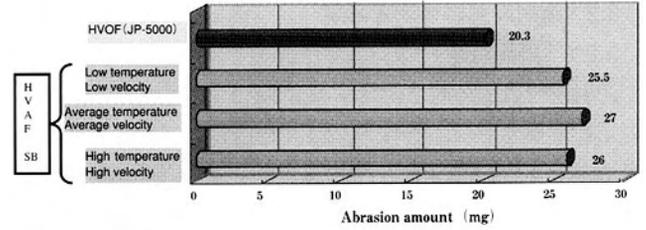


Fig.8 Abrasion test of HVAF(SB) and HVOF(JP-5000)

3.2.5 引張試験結果

Fig.9に引張試験機概略図を示す。溶射皮膜面を有するφ40mmの試験片を樹脂で接着して溶射皮膜面の引張強度を確認した。Table 7に引張試験結果を示す。

HVAF(SB)の溶射皮膜が溶融状態での高温・高速条件では、HVOF(JP-5000)の通常使用条件とほぼ同じ強度を示した。これらの強度は、樹脂材料強度を表している。HVAF(SB)の平均温度・平均速度と低温・低速条件での引張強度は低めであるが、いずれも引張強度面での剥離であることから、強度としては高温・高速条件との有意差は無いと考えられる。しかし、引張強度値はばらつきが大きい。

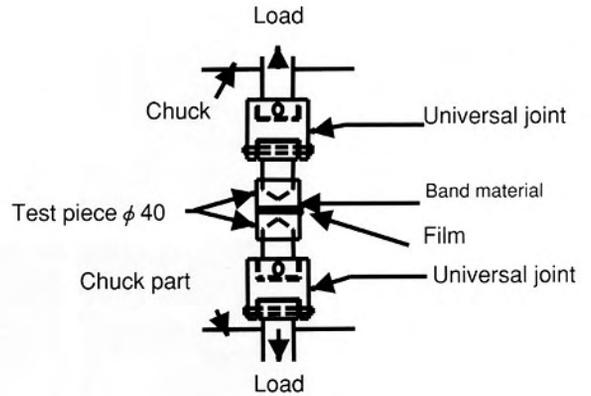


Fig.9 Schematic drawing of tensile test

Table 7 Results of tensile test

	Test number	1	2	3	Average
HVAF(SB)	High temperature / High velocity	8700N	8950N	8750N	8800N
	Average temperature / Average velocity	6100N	8957N	3790N	6282N
	Low temperature / Low velocity	7100N	7325N	8005N	7476N
HVOF(JP-5000)	Normal condition	8552N	9350N	8355N	8752N

4 HVAF(SB)溶射機の現地施工適用について

HVAF(SB)溶射機はHVOF(JP-5000)と比較してガン重量は3kgと軽く水冷ケーブルも無く現地運用性は優位であると言われているが溶射時の反力は他のこれまでに使用されているHVAFと同等であり、HVOF(JP-5000)よりも大きい。

この事から現地での手動溶射は不可能であるため自動化が必要である。

また、連続操業での使用では、バレル部の冷却が空冷であるためバレル部内温度の上昇に比例してスピitting傾向が大きくなることが確認できた。

5 総合評価

Table 8にHVAF(SB)とHVOF(JP-5000)の弊社から見た評価をまとめてみた。これらの結果は、今後改善され、ますますコストパフォーマンスの高い、省エネルギー型への溶射方法として発展していくことは間違いないと考える。

Table 8 Total evaluation of HVAF(SB) and HVOF(JP-5000)

		HVAF (SB)	HVOF (JP-5000)
SEM EPMA analysis	Melting point 1050°C	○	○
	Melting point 1550°C	○	○
Hardness (Hv300)		○	◎
Abrasion test		○	◎
Tensile test		○	○
Surface roughness		◎	○
Cost		◎	△
Handling		×	△
Spitting		×	○
Safety		△	△
Total evaluation		Normal	Good

6 結言

現状で、主流になりつつあるHVOF(JP-5000)溶射装置は、本報告でもあるように溶射皮膜特性がいずれも優れていることが確認できた。しかし、純酸素に替わり空気を使用できるHVAF(SB)は省エネルギーやコストパフォーマンスとしても効果が大きいことから、HVAF(SB)のマイナス面である

(1) 溶射時の反発が大きい。

(2) スピitting傾向が大きい。

等の点を改善しながら、より安定した溶射方法を開発していく。

参考文献

- 1) 日刊工業新聞社：金属材料技術用語辞典、P154
- 2) 山田、黒田、福島、湯元：日本溶射協会、第73回全国講演大会、P67
- 3) 溶射技研(株)：TECHNICAL DATA SHEET、HVAF 物理的性質の調査