

金属溶射の水力機械への応用

Application of Thermal Spraying to Hydraulic Machines

多くの金属溶射法の中で、近年技術面で著しい進展の見られる再溶融溶射、プラズマ溶射及びアーク溶射を水力機械に適用し、保守費用の低減及び機能の長期維持を図るために、関西電力株式会社総合技術研究所と日立製作所は共同研究を行ってきた。

基礎研究、実機への適用を通じて、各種溶射法の比較、溶射材料の耐久性、適用限界などの検討を行なった。

Ni系自溶性合金の再溶融溶射は、キャビテーション壊食に対して有効であり、プラズマ溶射、アーク溶射は土砂摩耗の低減、腐食防止に対して優れていることが判明した。運転条件、環境に応じて、適切な溶射方法、溶射材料を選定して適用することにより、有効な手段であることが実証された。

山田光洋* *Kōyō Yamada*
 堀田悌二* *Teiji Hotta*
 井上久男** *Hisao Inoue*
 山川敏夫** *Toshio Yamakawa*
 朝日直達*** *Naotatsu Asahi*

1 緒 言

水力機械は経済的な見地から、ますます大容量・大形化、高落差・高速化する傾向にある。大容量・大形水力機械の分解組立には多大の費用と長期停止を要し、大形部品の輸送も困難になりつつある。オーバーホール周期を延長するため、組立状態のまま、現地補修のできる補修法の開発が要望されている。一方、高落差・高速化に伴って、キャビテーション壊食の発生、土砂摩耗、腐食などの問題に対して、ますます厳しい運転条件となり、材料は優れた耐キャビテーション性、耐摩耗・耐腐食性が要求され、高級化する傾向にある。経済

化の手段として金属溶射の適用がクローズアップされてきている。

金属溶射には、(1) 基材の変質が少ないこと、(2) 変形が少ないこと、(3) 作業性が良いこと、(4) 低価格であることなどの特長がある。適切な溶射方法を採用することにより、組立状態のまま、損傷部の現地補修が可能である。キャビテーション、摩耗、腐食の発生が予想される部分は、工場であらかじめ適切な材料を溶射することにより、製品の長期耐用化を図ることができる。

表1 各種溶射法の特徴 再溶融溶射は密着力が高いが、能率が悪い。プラズマ溶射は高融点材料の溶射が容易であるが、現地施工が困難である。

方式	ト ー チ 構 造	特 徴	溶 射 材 料
再溶融溶射		密着力：3,000~5,000kg/cm ² 気孔率：極小 基材への熱影響：あり	自溶性合金 { Ni-B-Si Ni-Cr系 Co-Cr-W系 } Cu-P合金
プラズマ溶射		密着力：700~1,400kg/cm ² 気孔率：小(2~5%) 基材への熱影響：小 (<100°C)	自溶性合金 金属、合金 セラミックス 超硬
アーク溶射		密着力：300~700kg/cm ² 気孔率：中 基材への熱影響：小 (<100°C)	18Cr-8Ni鋼 15Cr鋼、 13Cr鋼 Al・ブロンズ Al

* 関西電力株式会社総合技術研究所 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所

溶射と同時に溶射被膜の溶融ができる再溶融溶射^{1),2)}, 溶射被膜の再溶融を行わないプラズマ溶射, アーク溶射など近年技術進歩の著しい3種類の金属溶射法の基礎研究と実機への適用につき, 昭和52年から約3年間にわたり, 関西電力株式会社総合技術研究所と日立製作所とで共同研究を行ってきた。以下にこの研究の概要について述べる。

2 各種溶射法の特徴及び溶射材料

溶射技術には各種の方式があるが, 現地作業性, 被膜の安定性の上から表1に示す方式を選定し基礎研究を進めた。

2.1 再溶融溶射

再溶融溶射は, 酸素-アセチレントーチに粉末ホッパを付けた最も簡素な設備で, 溶射距離を10~15mmにして炎の当たり面を赤熱させ, 被膜を溶融(再溶融処理)させながら施工する。溶射材料はフラックス作用のある自溶性合金とCu-P合金とがある。

2.2 高出力・高速プラズマ溶射

最近, プラズマ溶射は出力80kW級のプラズマジェットと5~44 μ mの微細粉末により高出力・高速化を指向している。これに伴い, 信頼性の高い被膜が得られるようになった。材料はプラズマ中で分解蒸発しない物質はすべて用いられる。再溶

融しない溶射法(冷間溶射法)では最も高い密着力となる。

2.3 アーク溶射

アーク溶射は外径1.6mmの2本の溶射用線材の間でアークを発生させて溶解し, 圧縮空気で吹き付ける方式で, プラズマ溶射に近い緻密な被膜が得られる。特に不活性雰囲気中で溶射ができること, 一方の線材の成分を変え, 擬似合金被膜ができることなどの特徴がある。

2.4 溶射材料

各溶射法について予備実験を行ない, 密着力, 耐土砂摩耗性, 割れ感受性などから表2に示す溶射材料を選定し, 基礎研究を行なった。

3 溶射被膜の特性

3.1 顕微鏡組織及び硬さ

図1は再溶融溶射の被膜の顕微鏡組織を示す。Ni-B-Si層は同図(a)に示すように, Niの α 相と網状のNi₃Bから成り, 硬さは α 相がHv160~200, Ni₃Bが900~1,200である。Ni₃Bは硬くて脆いので, 被膜の靱性はNi₃Bの分散状態で決まる。き裂は脆いNi₃Bに沿って伝搬するのでこれを連続して晶出させないことが望ましい。同図(b)は新しく開発したNi-Mo系溶射被膜の組織を示す。MoはNi₃Bを分断して分散させ靱性を大幅

表2 溶射材料の化学成分(%) 実験に用いた材料の化学成分を, 重量パーセントで表示した。

方式	溶射材料	C	Si	B	Cr	Mo	Ni	WC-12Co	Fe
再溶融溶射	Ni-B-Si	0.04	2.41	1.70	—	—	Bal	—	—
	Ni-Cr系	0.18	1.88	2.06	11.32	—	Bal	—	—
	Ni-Mo系	0.03	1.69	1.19	—	30	Bal	—	—
プラズマ溶射	Ni-Cr系	1.02	3.87	2.36	13.37	—	Bal	—	4.0
	Ni-Cr+30%(WC-12Co)	0.46	3.70	3.10	15.81	2.5	Bal	30	3.1
アーク溶射	18Cr-8Ni鋼	0.07	0.75	—	18.5	—	8.4	—	Bal
	15Cr鋼	0.05	0.50	—	14.5	—	0.15	—	Bal

注: 単位(w%)

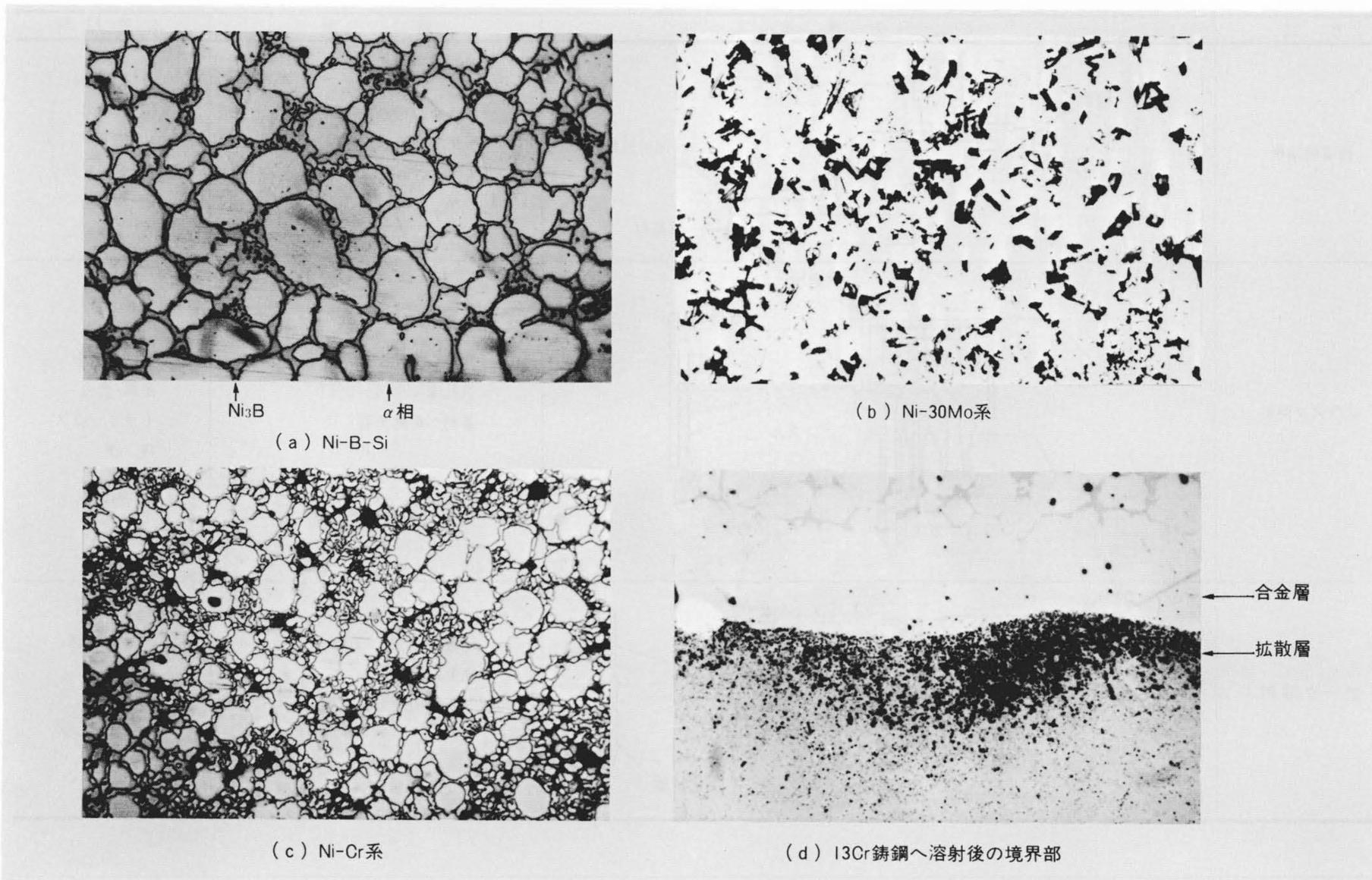


図1 再溶融溶射層の顕微鏡組織(×400) 各種溶射材料粉末を, 再溶融溶射により母材に溶射後の顕微鏡組織を示す。

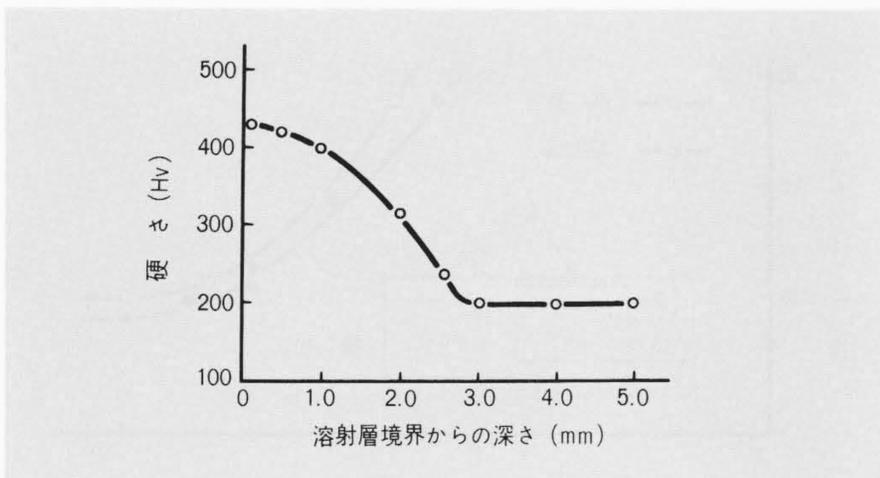


図2 Ni-B-Si溶射後の基材の硬さ分布 13Cr 鋳鋼にNi-B-Siの再溶融溶射を行なった場合、基材表面に合金層、拡散層及び焼入硬化が現われる。

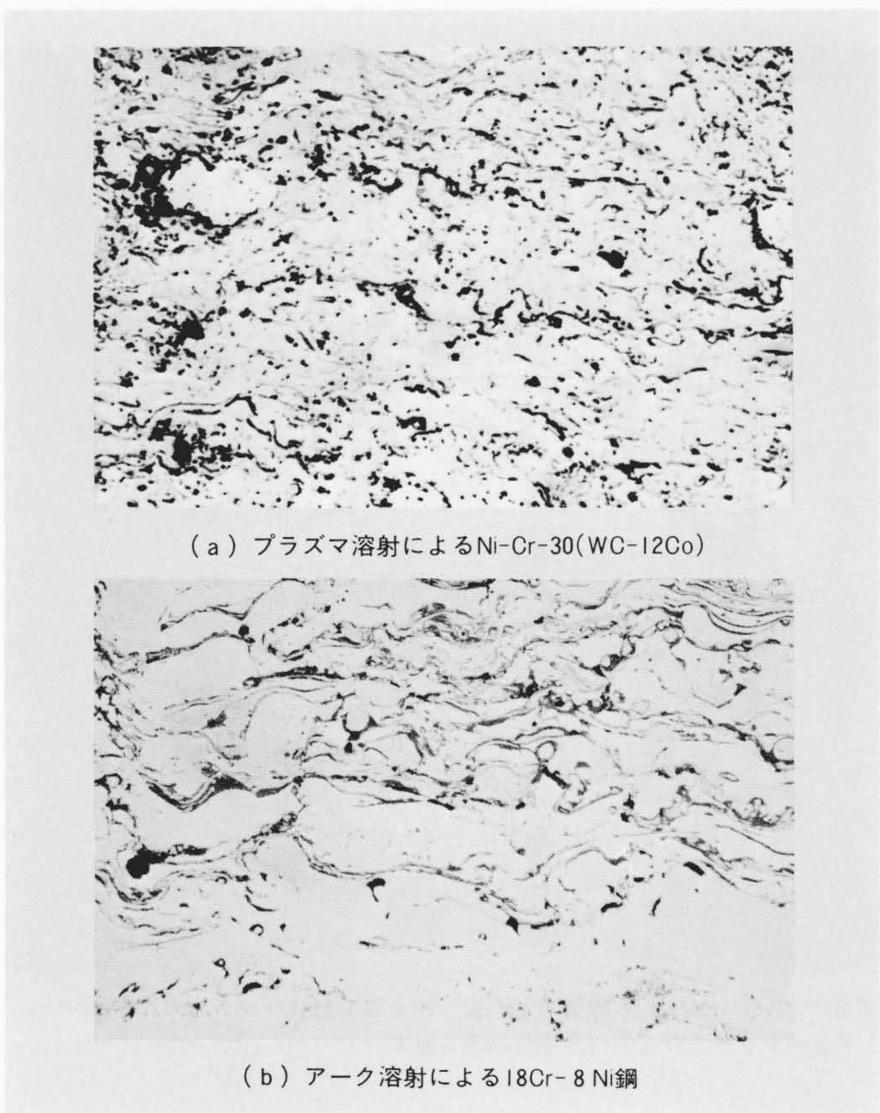


図3 冷間溶射被膜の顕微鏡組織(×400) プラズマ溶射及びアーク溶射によって形成された溶射被膜の組織の違いを示したもので、粒子の粗密、酸化物の介入の差が明瞭である。

に改善させる。同図(c)はNi-Cr系溶射被膜の組織である。Crの添加によりCr系の炭化物とホウ化物が晶出し、硬さもHv 500~600になる。次に、Ni-B-Siを13Cr 鋳鋼に溶射した基材との境界部の組織を同図(d)に示す。基材側に合金層と拡散層が見られる。硬さ分布は図2に示すようになり、表面から約3mm深さまで熱影響範囲になる。

冷間溶射法(プラズマ溶射、アーク溶射)の被膜組織を図3に示す。溶着粒子は密着の際、溶融状態から $10^2 \sim 10^5 \text{C/s}$ で急冷されるので非晶質状の組織である。プラズマ溶射の被膜は同図(a)に示すように、非晶質状のNi-Cr系相中にWCが分散した状態で酸化物、気孔などの欠陥も少なく、溶製材に近い組織になっている。硬さはWCの分散状態で異なり、Hv 550~1,150である。次に、アーク溶射被膜の組織は同図(b)に示すようである。プラズマ溶射の被膜よりも酸化物、気孔が

多く存在している。硬さはHv300~380で、溶製材のHv160~180に比べ高い。

3.2 密着力

再溶融溶射は基材を合金化して密着するので、溶射材料の強度に近い $3,000 \sim 5,000 \text{kgf/cm}^2$ の密着力が得られる。一般の溶射法は機械的結合が支配因子となるので再溶融溶射よりも低く、高出力・高速プラズマ溶射で 700kgf/cm^2 以上、アーク溶射で $300 \sim 700 \text{kgf/cm}^2$ である。

3.3 耐キャビテーション性

磁歪振動法により耐キャビテーション性を比較した。図4に再溶融溶射の試験結果を示す。壊食量はCr及びC量が多くなるほど少なくなる。しかし、それとともに靱性が低下し割れ感受性が高まり、溶射作業で高い予熱が必要となる。一方、合金層の壊食量は約8mgで極めて少ない。したがって、再溶融溶射では被膜と合金層の耐久性が期待できる。Ni-B-SiにMoを添加した場合のMo量と壊食量の関係は図5に示すようである。Moを30%以上添加すると、18Cr-8Ni 鋳鋼以上の耐久性になる¹⁾。次に、プラズマ溶射及びアーク溶射の被膜試験結果を図6に示す。振幅の小さい範囲でSC-46と同等であるが、振幅が大きくなると壊食量が多くなる。

3.4 土砂摩耗性

図7は3~5%土砂を含む水中での摩耗試験結果である。評価は18Cr-8Ni 鋳鋼(溶製材)に対する比率で表示した。再溶融溶射のNi-Cr系及びプラズマ溶射の30%WC系が18Cr-8Ni 鋳鋼の2~3倍の耐久性を示す。アーク溶射による18Cr-8Ni 鋼は18Cr-8Ni 鋳鋼と同等になっている。

3.5 疲れ強さ及び耐食性

Ni-B-Siを13Cr 鋳鋼に溶射した水中疲れ強さを図8に示す。先の図2に示したように、表面から3mm深さに熱影響を受けるので疲れ強さはわずかに低下する傾向がある。一方、プラズマ溶射及びアーク溶射はグリットブラッシングで前処理をするので、表面に圧縮の残留応力が発生し、疲れ強さも向上する。水中及び大気中での耐食性は、約1年の試験ではいずれも異常は見られず、優れた耐食性を示している。

4 水車部品への適用

図9にフランス形水車の断面図を示す。今回の金属溶射

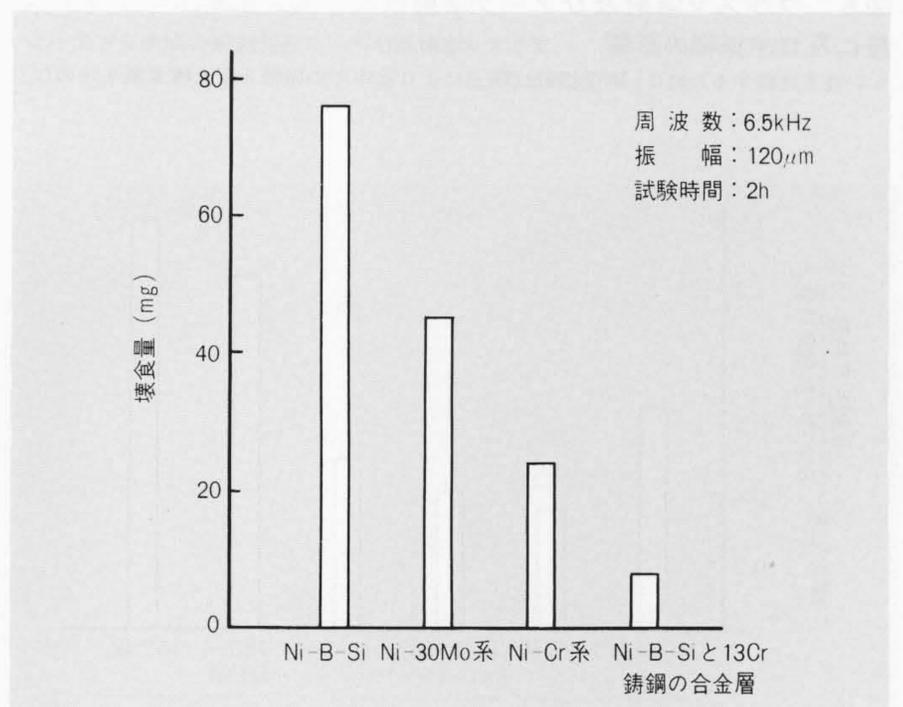


図4 再溶融溶射による溶射被膜の磁歪振動法による壊食量 再溶融溶射による自溶性合金の溶射被膜の耐キャビテーション性を、磁歪振動試験法と比較して示す。

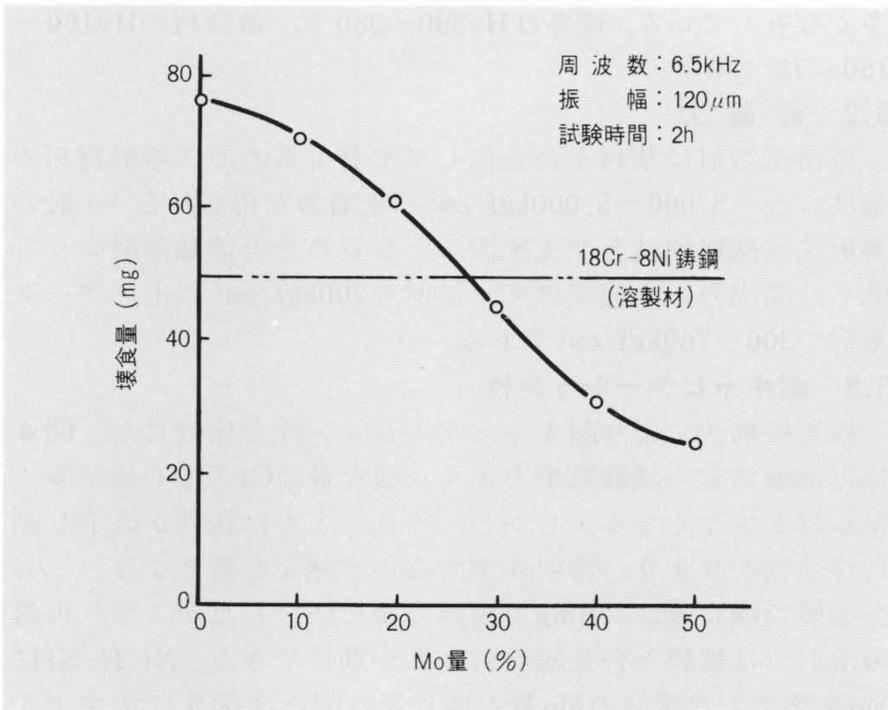


図5 Ni-B-Siの磁歪振動法による壊食量に及ぼすMo添加量の影響
Ni-B-Si自溶性合金にMoを0~50%混合した溶射被膜の耐キャビテーション性を磁歪振動法で比較して示す。

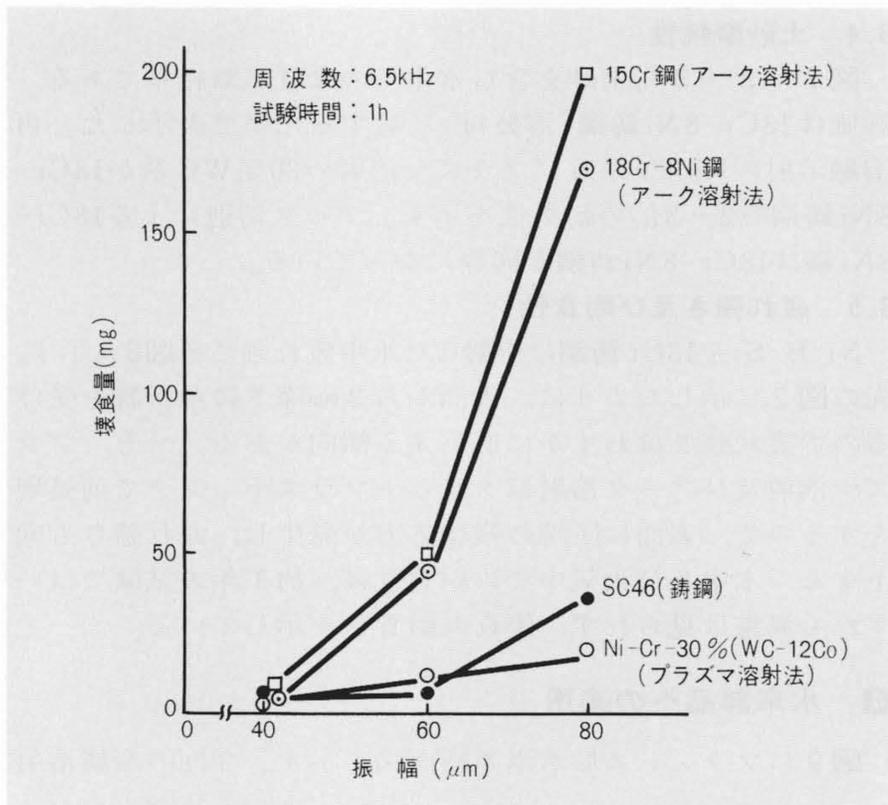


図6 プラズマ溶射及びアーク溶射被膜の磁歪振動法による壊食量に及ぼす振幅の影響
プラズマ溶射及びアーク溶射被膜の耐キャビテーション性を比較するために、磁歪振動試験法により水中での振幅を変え壊食量を求めた。

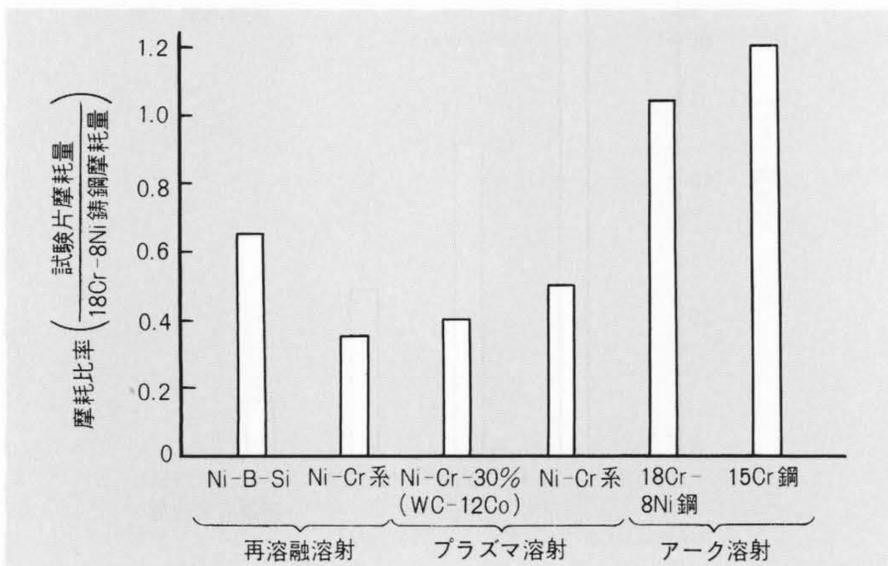


図7 溶射層の摩耗比率 Ni-Cr系, (Ni-Cr)+30%(WC+12%Co)が耐摩耗性に優れた値を示し, 18Cr-8Ni鑄鋼の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ と低い値である。

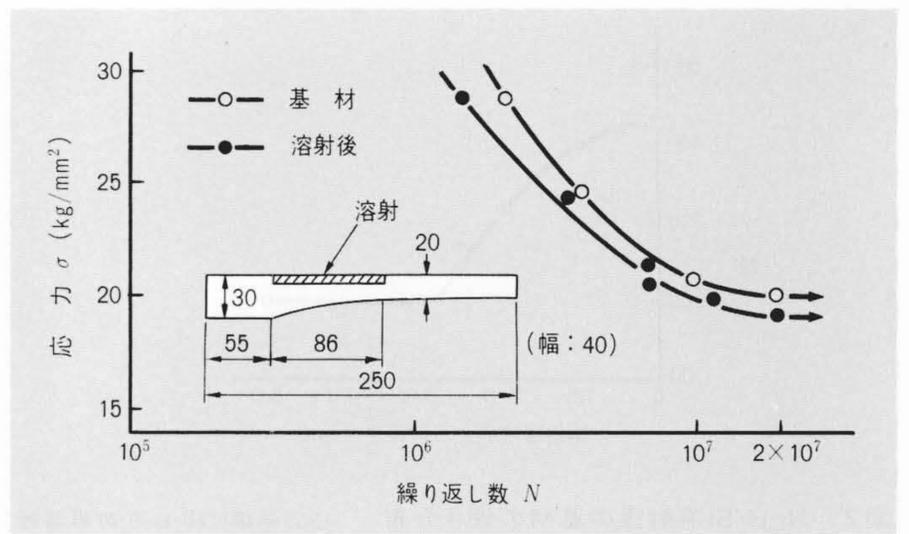


図8 13Cr鑄鋼にNi-B-Siを溶射後の疲れ強さ
1Ni-13Cr鑄鋼上に、0.3mm厚さにNi-B-Si自溶性合金を溶射した後の片振り疲労試験結果を示す。

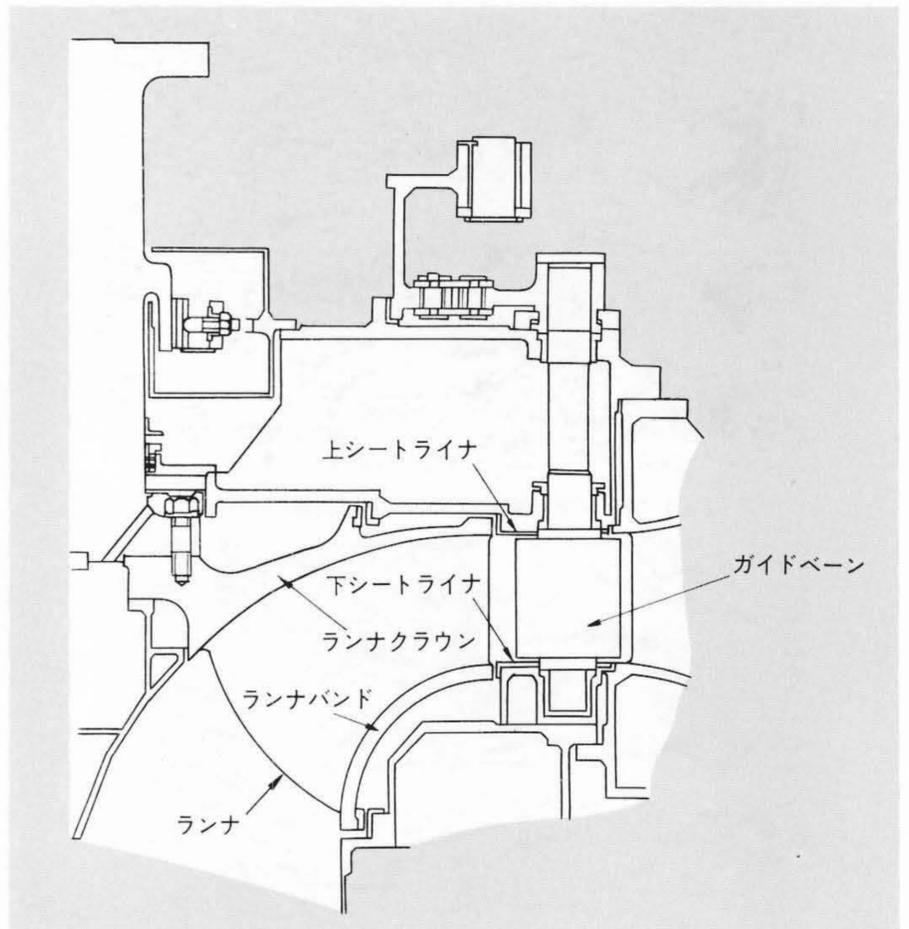


図9 フランシス形水車断面図
金属溶射はランナ, ガイドベーン, 上下シートライナなどの流水面に適用された。

施工対象部は、ガイドベーン、上下シートライナ、ランナ及びドラフトパイプである。これらの部品で高速流水に接し、特に部分的にキャビテーション壊食、土砂摩耗及び腐食を生ずる部位に施工した。溶射法と対象部品であるが、自溶性合金の再熔融溶射はランナ、ガイドベーンに、高融点粉末材料のプラズマ溶射はランナ、上下シートライナ及びガイドベーンに、また18Cr-8Ni鋼線材のアーク溶射はガイドベーン、ステーベーン及びランナにそれぞれ実施した。以下、実機への施工について概要を述べる。

4.1 再熔融溶射—ガイドベーン、ランナ—

図10に、フランシス形ポンプ水車ランナベーン端部の耐キャビテーション用としてのNi-B-Si自溶性合金の現地溶射施工状況を示す。この溶射法は、表面温度が約1,100°Cで再熔融されるため、他の溶射法に比較して熱影響が大きく、特に組立状態で施工するには部品の変形について十分な作業管理が必要である。被溶射面は徹底した清浄化が不可欠であり、再熔融された溶射金属の拡散流動性をよくし、被膜厚さの均一化を目的としてあらさ25S以上に研削することが望ましい。

今回施工したランナの材質は13Cr 鋳鋼であるので、Ni-B-Si 自溶性合金を溶射すると、溶射被膜と基材との境界に50~200 μm の合金層が形成される。この合金層は前述のように、キャビテーション壊食に対して高い耐久性がある。したがって、被膜厚さは一般的なキャビテーションに対しては200~500 μm で十分である。一方、溶射被膜の表面状態であるが、作業管理を十分にすることにより平滑な面が得られ、仕上加工なしでもランナの性能を損ねることはない。次に、ガイドベーンを組み込まれた状態での現地溶射であるが、ガイドベーン軸の変形と潤滑機構シール部の熱による損傷のないように注意を要する。この点について工場実験を重ね、溶射範囲、面積、作業時間との関係を把握した。実機への適用結果は、軸心の変位及びシール部の損傷もなく作業を完了した。

4.2 高出力・高速プラズマ溶射—ランナ、シートライナー—

プラズマ溶射は現地施工が困難であり、工場での作業に頼らざるを得ない。今回、ランナにNi-Cr系、シートライナーに(Ni-Cr)+30%(WC-12Co)の高硬度粉末を溶射した。いずれの場合でもプラズマ溶射の被膜厚さは、密着力の関係で200~300 μm が望ましい。すなわち、溶射のまま適用できる表面が得られる施工条件でなければならない。これらの問題点を粉末の微細化と溶射作業の自動化で解決し、被膜面あらかし25S、被膜厚さのばらつき40 μm 以下に施工できるようにした。ランナは複雑な形状であるので溶射の自動化は困難である。そこで、適正溶射距離範囲の長いNi-Cr系の粉末を用いた。被溶射面の前処理は洗浄後スチールグリットで粗面化を行ない、表3の溶射諸元により施工した。図11にランナへのプラズマ溶射作業状況を示す。

4.3 アーク溶射—ガイドベーン、ドラフトパイプ—

アーク溶射は、溶射法の中で最も高能率である。実機へは、ガイドベーンの耐孔食、耐キャビテーション用として18Cr-8Ni鋼を300~700 μm 、ドラフトパイプの耐孔食用としてAlを約200 μm 厚さで施工した。被溶射面の前処理として清浄化後、ブラッシングによる粗面化が必要である。現地施工ではブラッシング材としてアルミナ系などの軽量なものが得策で、バキューム形ブラスト装置を用い、ブラッシング材を散乱させないようにする必要がある。

アーク溶射の場合、線材がアークで溶融され、圧縮空気で吹き付けるのであるが、この場合に金属ヒュームが発生する。ヒュームが機器内に滞留することのないように十分な換気が

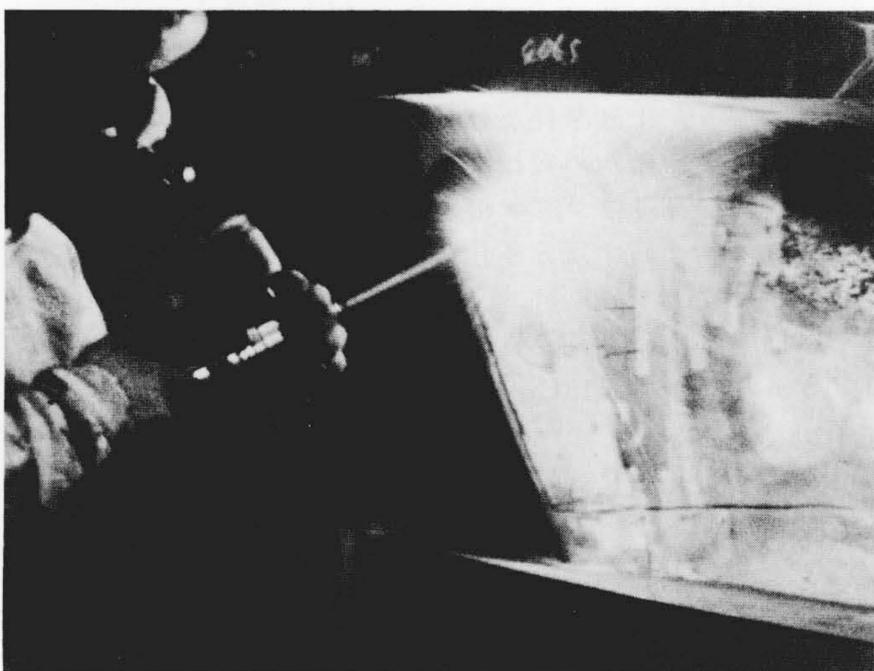


図10 フランス形ポンプ水車ランナへの再溶融溶射の現地作業ランナベーンの入口側端部作用面への現地溶射施工状況を示す。

表3 溶射条件 プラズマ溶射、アーク溶射の現地施工に関する諸元の実績値を示す。

プラズマ溶射		アーク溶射	
項目	施工条件	項目	施工条件
溶射材料	(Ni-Cr)+30%(WC-12%Co)	溶射材料	18Cr-8Ni鋼
材料粉末粒径	5~44 μm	電流	150~170A
溶射距離	80~100mm	溶射距離	130~200mm
ガン送り速度	7~10mm/rev	空気圧	5 kg/cm ²
部品回転速度	30~35m/min	予熱温度	室温(15~20°C)
予熱	40~50°C	溶射角度	60~90°
溶射被膜厚さ	200~300 μm	溶射被膜厚さ	300~700 μm

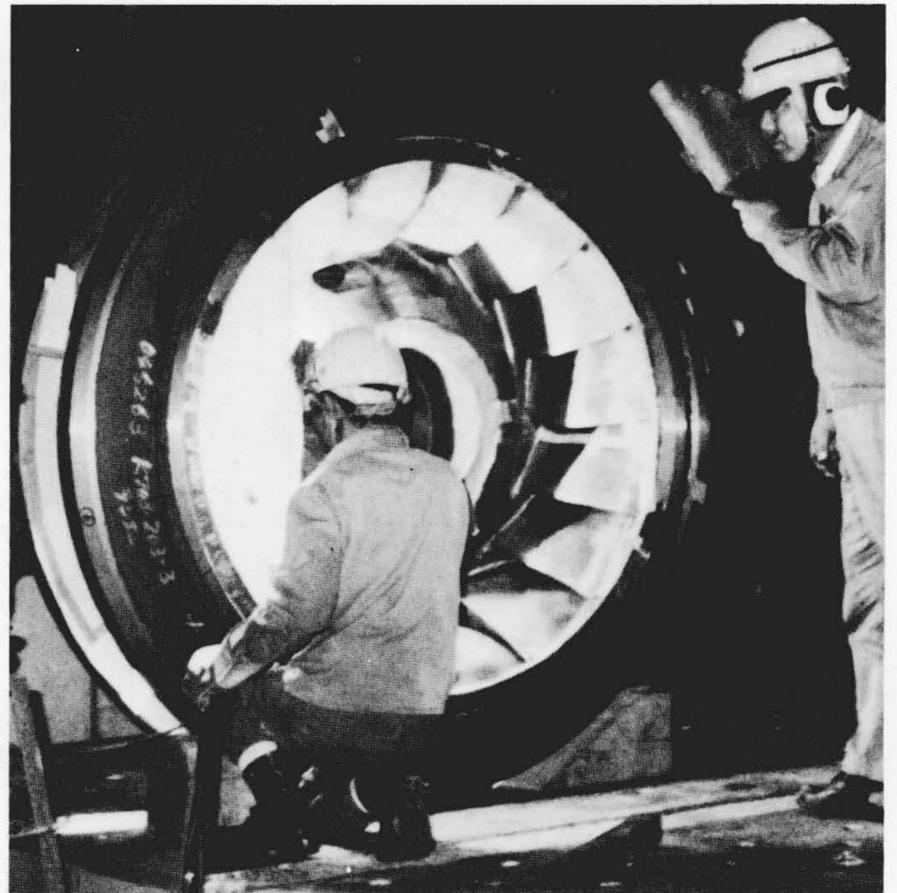


図11 フランス形水車ランナへのプラズマ溶射施工 ランナベーン反作用面に、手動操作でNi-Cr系のプラズマ溶射を施工している状態を示す。

必要である。アーク溶射は溶射距離の適正範囲が広く、単位時間当たりの溶射量が多く、ガンの手動操作の場合、特に被膜厚さの均一化に注意を要する。溶射中の熱影響は製品の温度上昇が15°C前後であり、変形は現われていない。表3にガイドベーンの18Cr-8Ni鋼の現地施工条件を示す。

5 実機運転における耐久性評価

表4は溶射の実機適用を試みた発電所の例である。以下、主要部品への溶射結果について述べる。

(1) 13Cr 鋳鋼ランナへのNi-B-Siの再溶融溶射

溶射層との境界部に合金層が形成されるので、溶射をしないときは、一般的キャビテーションで約1箇年程度で著しく壊食が進展するが、再溶融溶射により約3~5年の耐久性が得られ、更に再溶射を周期的に行なうことで機器の延命が可能である。

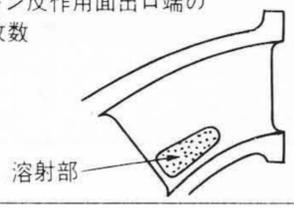
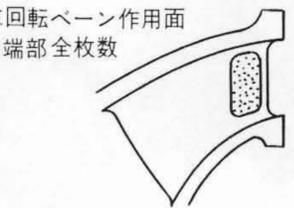
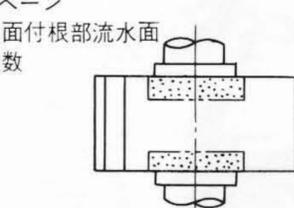
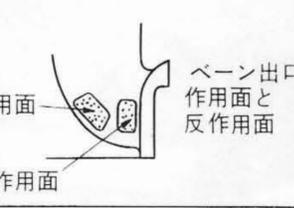
(2) 普通鋳鋼ガイドベーンへのNi-B-Siの再溶融溶射

溶射前は十数箇月で発生した孔食現象が、溶射被膜により防止され、約3箇年以上の耐孔食性が得られた。キャビテーションについても同様の効果が現われている。

(3) WC, Ni-Crを含む高硬度材料のランナ、シートライナーへのプラズマ溶射

キャビテーション壊食が数箇月で部分的に発生し、その耐久性は期待できなかった。数パーセントの土砂流に対し、一般的に3~5箇月で著しい損傷が発生したが、溶射被膜の形成により約1年以上の耐久性が得られ、更に延命が期待できる。

表4 被溶射部品とその評価 関西電力株式会社と共同研究で各種溶射を施工した代表的部品と、点検結果の評価取りまとめ表を示す。

適用発電所形式・出力	被溶射部品と位置	被溶射部品の基材材質	溶射材料と溶射法	施工目的	施工年月	効果
喜撰山 フランス形 ポンプ水車 -240MW-	ランナ ベーン反作用面出口端の 全枚数 	13Cr-1Ni 鋳鋼	Ni-Cr系 -再溶融溶射-	耐キャビテーション	昭53/2	溶射層に梨地状キャビテーション 壊食は生ずるが、基材境界の合金 層が健全でキャビテーション壊食 に対して効果が大である。
三尾 フランス形 ポンプ水車 -26MW-	ランナ 水車回転ベーン作用面 入口端部全枚数 	13Cr 鋳鋼	Ni-B-Si Ni-30Mo系 -再溶融溶射-	耐キャビテーション	昭52/4	同上 キャビテーション進展を抑制する 効果が大である。
奥多々良木 フランス形 ポンプ水車 -310MW-	ガイドベーン 作用面付根部流水面 全枚数 	SC46	Ni-B-Si -再溶融溶射-	耐食・ 耐キャビテーション	昭53/1	一部ピンホール、孔食が生ずる部 分もあるが、キャビテーション、 孔食に対して有効である。
	ガイドベーン 作用面全面(シャッタ面は除く。)	SC46	18Cr-8Ni 鋼 -アーク溶射-	耐食	昭55/3	孔食に対しての効果が大である。
	ステーベーン 出口先端部	鋼板				
	ドラフトパイプ 上部長さ2m 幅0.25m	鋼板	Al -アーク溶射-	耐食	昭55/3	同上
愛本 フランス 水車 -16.6MW-	ランナ 作用面 反作用面 ベーン出口側 作用面と 反作用面 	SC46	Ni-Cr系Ni-B-Si -再溶射溶射-	耐土砂摩耗	昭53/1	土砂摩耗に対する摩耗が軽微で有効 である。
	ランナ ランナバンド出口側内面	SC46	18Cr-8Ni 鋼 -アーク溶射-	耐土砂摩耗	昭55/3	同上
	ガイドベーン ベーン付根部とシャッタ面	SC46	Ni-B-Si Ni-Cr系 -再溶融溶射-	耐土砂摩耗	昭52/12	同上
御岳 フランス 水車 -25MW-	ランナ ベーン入口側作用 面端部、出口側 反作用面端部、 クラウンとバンド の入口側流水面 	SC46	Ni-Cr系 -プラズマ溶射-	耐土砂摩耗 耐キャビテーション	昭54/1	キャビテーションの発生する部分 は、溶射被膜のはく離が現われ効 果がない。 土砂摩耗の激しい部分は摩耗する が、基材よりは耐土砂摩耗が大き く効果が大である。
	ガイドベーン 流水面全面(シャッタ面除く。)	13Cr-1Ni 鋳鋼	Ni-Cr系(Ni-Cr)+ 30%(WC-12%Co) -プラズマ溶射-	耐土砂摩耗	昭54/1	同上
	上下シートライナ(ランナシール部除く。) 下プロライナ(ランナシール部除く。)	13Cr 鋼板	(Ni-Cr)+ 30%(WC-12%Co) -プラズマ溶射-	耐土砂摩耗	昭54/1	同上

(4) ガイドベーンへの18Cr-8Ni鋼、ドラフトパイプのアルミニウムのアーク溶射

数箇月で発生するガイドベーンの孔食、土砂摩耗が溶射被膜により1箇年以上経過後も健全であり、優れた特性を示している。キャビテーション壊食は鋳鋼品とほぼ同等で弱い。ドラフトパイプの孔食に対するアルミニウム溶射被膜は、約1年後の点検結果、異常がなく溶射直後の状態が維持され、将来とも高い耐久性が期待できる。

6 結 言

本研究の成果として、金属溶射は、運転条件、環境によって、適切な溶射方法、溶射材料を選定して適用することにより、水力機械の補修費用の低減、オーバーホール周期の延長、部品の延命などに有効な手段であることが実証された。

主な研究の成果は次に述べるとおりである。

(1) 各金属溶射法(再溶融溶射、高出力・高速プラズマ溶射、アーク溶射)の工場及び現地での溶射作業方案並びに適用仕

様が確立された。

(2) Ni-B-Siの再溶融溶射は、被膜が緻密であるため、キャビテーション、土砂摩耗及び腐食に対して、優れた特性をもっていることが確かめられた。

(3) 高出力・高速プラズマ溶射及びアーク溶射は、溶射被膜の再溶融を行わず幾分多孔質であるため、キャビテーションには弱いが、土砂摩耗、腐食に対しては優れた特性をもっていることが実証された。

(4) アルミニウム、18Cr-8Ni鋼のアーク溶射は、孔食に対して有効である。

本研究を進めるに当たり、御指導いただいた関係各位に対し深く感謝する。

参考文献

- 1) 玉村, 外: 新溶射材料の開発と水力機械への適用, 金属表面技術, Vol. 27, No. 6, 270~276 (1976-6)
- 2) 朝日, 外: 水車部品のキャビテーション・エロージョン現象と溶射実例, 金属材料, Vol. 17, No. 8, 31~36 (1977-8)