

# ペルトンランナバケットの耐土砂摩耗性向上の研究

稲田 敬三\*

## 1. はじめに

水車を改修するにあたり、機器の信頼度向上と発電コストの低減を図るため「設備の簡素化」「長寿命化」「保守の省力化」「発電効率向上」等、様々な取組みを行っている。

当社では、河川中の土砂流入による水車摩耗が、修理周期を決定する一番の要因となっていることから、耐土砂摩耗性を向上させ水車の延命化を図ることを目指している。

特に、ペルトン水車は他の水車に比べてバケットに加わる繰返し応力が大きく、溶接補修をした場合には、溶接による残留応力が寿命を縮める要因となる。また、ランナの更新は、土砂摩耗の進行状況（ランナ摩耗量）を把握しランナ平均摩耗量が肉厚の30%以上となる時期（年度）としている。

近年、耐摩耗性改善の有効な手段として溶射による表面処理技術（超高速フレイム溶射：HP/HVOF）が注目され、その溶射材料についても耐摩耗性に優れたものが開発されるとともに、複雑な形状における適用が可能となってきた。

このような背景のもと、ペルトンランナバケットの耐土砂摩耗性向上策として、平成14年度より当社と富士電機システムズ（株）（現 富士・フォイトハイドロ（株））で基礎研究を行い、平成15年度に溶射材の選定、及び実機への溶射施工方法を確立し、平成15年10月～平成19年9月にかけて馬場島発電所でフィールド試験を実施したので、その成果について報告する。

## 2. 耐土砂摩耗材料の選定

ペルトンランナバケットの耐土砂摩耗性向上にとって最適な溶射材を選定するために、関連する文献を調査し、市販の溶射材の特徴を調査検討した。その調査検討結果より、水車部品に一般的に用いられているタングステン・カーバイト（WC）系の溶射材①、ペルトンランナバケットの溶射材に求められる耐摩耗性及び耐衝撃性がバランス良

く優れる溶射材②、耐衝撃性に非常に優れる溶射材③を候補材に選定した。なお、各溶射材の配合成分は第1表のとおりである。

第1表 溶射材料の配合成分

溶射材	配合成分	溶射材料
①	コバルト＋クロム	WC/10Co-4Cr
②	クロム＋ニッケル	WC/16Cr-19Ni
③	クロム＋高ニッケル	WC/14Cr-28Ni

## 3. 基礎試験

### (1) 試験概要

選定した溶射材の優劣を定量的に評価するために、いくつかの基礎試験を実施した。

#### a. 耐土砂摩耗性と密着力の検証

第1表に示す材料を用いて、実使用状態に近い条件で試験を行い、各材料の耐摩耗性の優劣を比較する。また、各材料の異物衝突（粒径0.5～1.0mm）に対する耐久性についても検証する。

さらに、実機のペルトンランナバケットへの溶射に向け、施工を行う際に課題となる不適切な溶射角度（45°）での溶射皮膜の密着力の差異を検証する。

#### b. 溶射施工条件の確立

各候補材料のマルテンサイト系ステンレス鋼に対する溶射皮膜の形成効率を相対的に比較し、施工上の経済性を検証する。

また、ペルトンランナバケット水切り先端部を模した形状の試験片を用い、溶射前後の水切り先端部の形状変化の検証及び0.3mmの溶射皮膜を均等に形成するための適切な溶射条件を見出す。

### (2) 試験結果

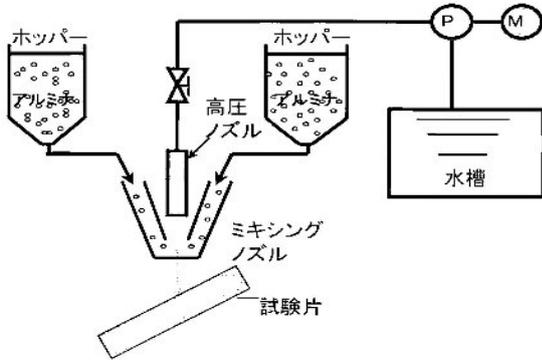
#### a. 土砂噴流摩耗試験、溶射皮膜硬度測定及び密着力試験

##### (a) 土砂噴流摩耗試験

第1図の通り、試験槽に土砂摩耗試験片を取付後、ホッパーから供給される平均粒径φ0.1mmあるいはφ1.0mmのアルミナ研磨材と高圧ポンプより供給される高圧水とをミキシングノズルにて混合し、摩耗試験片の皮膜表面に衝突させた。この

\* 土木部 水力室 水力電気チーム

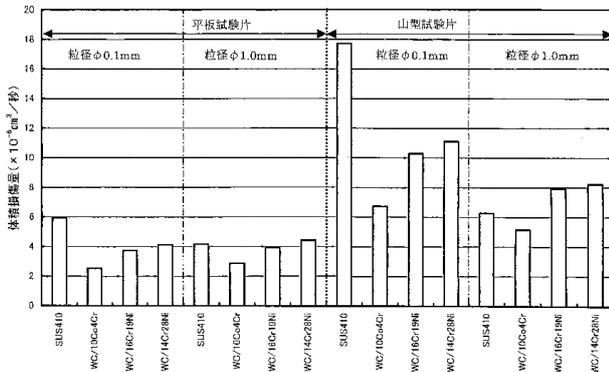
とき、土砂噴流と試験片との衝突角度を平板試験片では 45° にて、山型試験片では 90° の条件に設定し、土砂噴流を 600 秒噴射した。その後、試験片の重量から減量分を測定した。得られた減量分を各々の試験片の重量にて除し、単位時間あたりの体積損傷量を算出した。



第 1 図 土砂噴流試験 模式図

試験結果を第 2 図に示す。平板形状試験片及び山型形状試験片の試験結果より、溶射材①が最も優れているとの結果を得た。

山型形状試験片 (粒径  $\phi$  1.0mm) の試験後の非破壊検査(浸透探傷検査 P T)結果より、いずれの溶射皮膜においても割れ・剥離は発生していなかった。



第 2 図 平板及び山型形状試験片の体積損傷量

(b) 溶射皮膜硬度測定

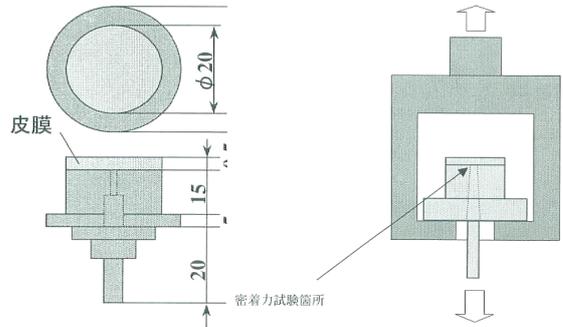
各候補材料 3 種類を材質 SUS410 の平板形状試験片に溶射皮膜 0.3mm 以上の溶射を行い、形成した溶射皮膜の硬度を測定した結果を第 2 表に示す。各溶射材料ともに十分にカタログ値以上の皮膜硬度を有していることを確認した。

第 2 表 溶射皮膜硬度測定結果

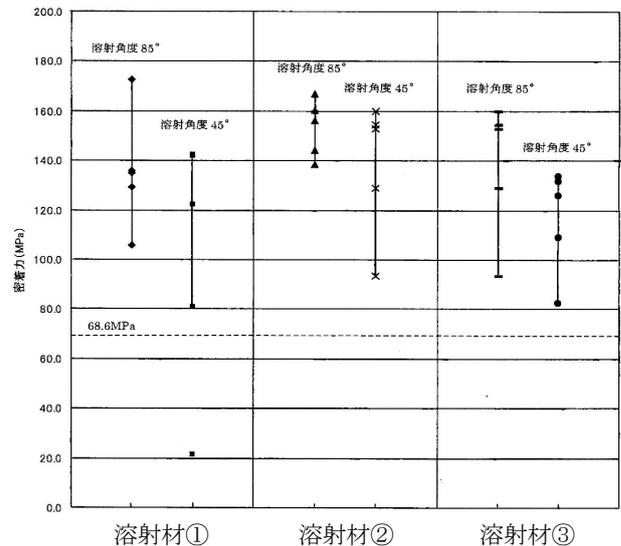
溶射材	ビッカース硬さ[単位]	カタログ値[単位]
①	1,376	1,270
②	1,217	950
③	1,118	800

(c) 密着力試験

第 3 図に示すようにピンテスト型試験片に、溶射角度 85°、45° の 2 条件にて 0.5mm 以上の皮膜となるよう溶射を行った。その試験片を引張治具に取付し、引張速度 1mm/min の変位速度で引張り、ピン先端と皮膜界面で剥離する最大荷重を求めた。いずれの試験片においても溶射皮膜のせん断破壊は起きておらず、ピン先端と溶射皮膜との境界面で剥離が起きていた。また、得られた最大荷重をピン先端の表面積で除して密着力を算出した結果を第 4 図に示す。



第 3 図 ピンテスト型試験片による密着力試験



第 4 図 溶射材と密着力との関係

溶射角度 85° における各溶射材料の密着力は溶射材①が 106~173MPa、溶射材②が 138~167MPa、溶射材③が 93~160MPa であり、いずれの試験片においても測定値のバラツキはあるもの

の各溶射材料の密着力に大きな差異は無かった。

溶射角度 45° における各溶射材料の密着力は溶射材①が 81~142MPa, 溶射材②が 82.5~134MPa, 溶射材③が 80.5~144MPa であり, 溶射角度 85° の試験片の密着力に対して平均で 20~25%程度下回っているが, タングステン・カーバイト(WC)系溶射材の標準的な密着力である 68.6MPa を上回っていた。

#### b. 溶射施工条件の検討

基礎試験の試験片に溶射材を最適条件で施工するために, 溶射施工条件を検討した。

##### (a) 各溶射材料の皮膜形成効率比較

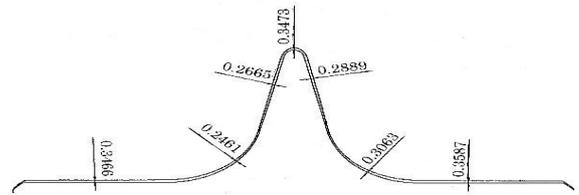
溶射膜の皮膜形成効率に影響を及ぼす因子としては, 溶射距離・角度・溶射ガンの送り速度等がある。それらの因子を考慮して溶射ロボットのプログラムを作成し, 3 種類の候補材料を材質 SUS410 の平板形状試験片に溶射し, 溶射前後の板厚を測定した結果を第 3 表に示す。溶射材②, ③はほぼ同等であり, 溶射材①に対して 2 割程度皮膜形成効率に優れている結果を得た。

第 3 表 皮膜形成効率試験結果

溶射材	平均溶射膜厚	1 回当りの溶射膜厚
①	0.310 mm	0.0258 mm
②	0.365 mm	0.0305 mm
③	0.355 mm	0.0295 mm

##### (b) 水切り先端部の溶射条件の検討

ペルトンランナへの溶射時, 水切り先端部の溶射膜厚を測定することは不可能であるため, 水切り先端部を模した形状の山型形状試験片の溶射前後の形状測定を行い, 先端部の溶射膜厚 0.3mm を確保するための溶射回数を検証した。溶射後の形状を測定した結果を第 5 図に示す。山型形状試験片先端部の溶射膜厚は約 0.35mm, 先端部側面の溶射膜厚は 0.27~0.29mm, 先端丸め半径は基材形状 R1.1 に対して溶射後形状 R1.1~1.3 の範囲となり, 水切り先端付近は極端に先端丸め半径が変化することなく 0.3mm の溶射膜をほぼ均等に形成できる結果を得た。実機の溶射施工は本試験における溶射条件と同一の施工法で行うこととした。



第 5 図 山型形状溶射膜厚分布図

#### c. 基礎試験結果の評価

文献調査と各基礎試験結果より, 溶射材の評価を行った結果を第 4 表に示す。評価の結果, 溶射材②と③が優れており, 実機に適用してフィールド試験を実施することとした。

第 4 表 溶射材の評価

評価項目	溶射材の候補		
	溶射材①	溶射材②	溶射材③
成分	基準材	耐摩耗性・耐衝撃性のバランスが良い	耐衝撃性に非常に優れる
特徴	基準材	耐摩耗性・耐衝撃性のバランスが良い	耐衝撃性に非常に優れる
耐土砂摩耗性	◎ 母材の 38%	○ 母材の 58%	△ 母材の 63%
異物衝突耐久性	○ 母材より多少良	△ 母材と同等	△ 母材と同等
耐衝撃性	×	○	◎
密着力	○ 136MPa	◎ 153MPa	○ 138MPa
皮膜硬度	Hv1376	Hv1217	Hv1118
溶射施工コスト	△ 0.0258mm/回	○ 0.0305mm/回	○ 0.0295mm/回
総合評価	△	◎	○

#### 4. バケットモデル溶射試験と実機への適用

##### (1) バケットモデル溶射施工試験の概要

基礎試験の結果に基づき実機ランナと同等形状モデルへの溶射施工を行い検証した。

##### a. 溶射範囲の検討

実機向けペルトンランナバケットと同等な形状のモデルによるティーチングを実施し, 最適な溶射条件及び実機溶射範囲の検討を行う。

##### b. 溶射条件の検証

基礎試験において選定した 2 種類のうち, 溶射材に最も適していると評価した溶射材②と, 基準材である溶射材①について, バケットモデルに溶射し, 溶射直後の温度測定, 溶射膜厚検査, 溶射皮膜の外観目視検査を行い設定した溶射条件の妥当性を検証する。

c. 溶射皮膜の健全性

バケットモデル内部3箇所にて平板形状のテストピースを溶接により取り付け、溶射を行い、テストピースの密着力試験、硬度測定、断面マイクロ組織検査を行い溶射皮膜の異常の有無を確認する。

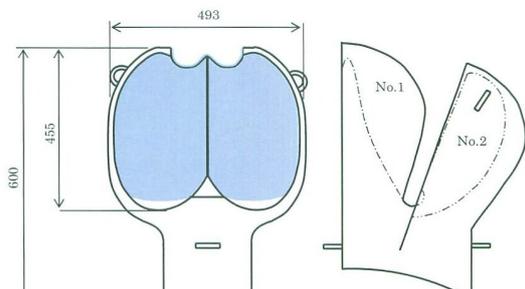
d. 耐衝撃性の検証

溶射後、溶射皮膜に欠陥が無いことを確認するため皮膜表面の浸透探傷検査(PT)を実施する。また実機運転状態では溶射皮膜は土砂・異物等により衝撃を受けることから、ハンマーリングにより溶射皮膜に衝撃を与え、線状欠陥が発生しないことを確認する。

(2) バケットモデル溶射施工試験結果

a. モデル形状, 材質, 施工条件は次のとおり。

- ・モデル形状：第6図
- ・モデル材質：SCS6
- ・バケット数：2
- ・バケット内面溶射前仕上：グラインダー仕上 Ra1.6+ブラスト処理 Ra10~12.5
- ・溶射膜厚：0.3mm以上
- ・溶射範囲：第6図  指示部
- ・ワーク温度管理：150℃以下（目標 110℃）

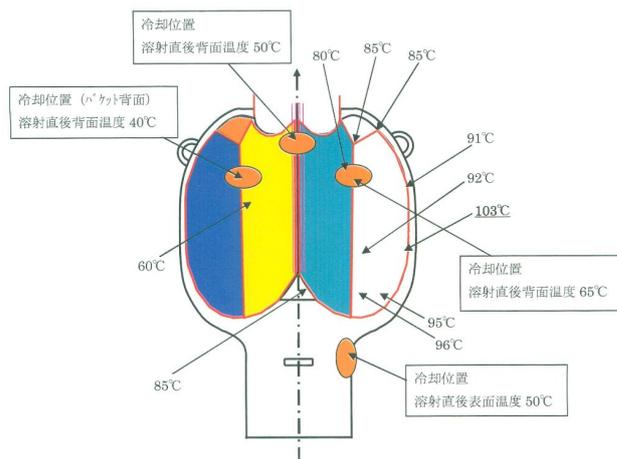


第6図 モデル形状

b. 溶射直後の温度測定結果

溶射材料・母材との線膨張係数の違いにより加熱時・冷却時において母材の伸びに溶射皮膜が追従しきれず、その結果溶射皮膜に微細なクラックが発生するため、温度管理を行う必要がある。

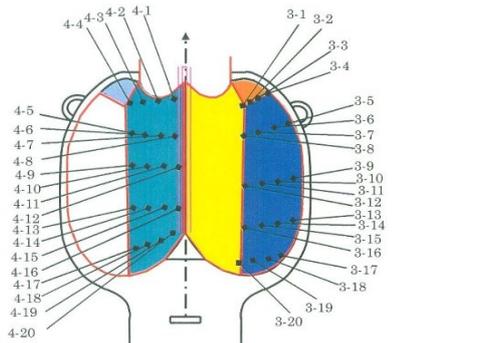
溶射直後における溶射皮膜表面の温度を非接触式温度計により測定した結果及び溶射時の冷却位置を第7図に示す。冷却はバケット背面に圧縮空気(5kgf/cm<sup>2</sup>)を吹き付け実施した。ワーク温度目標の110℃以内で施工することができた。



第7図 モデルバケット温度測定結果

c. 溶射膜厚測定結果

溶射膜厚測定部位を第8図、溶射膜厚測定結果を第5表に示す。第5表のとおり、ほとんどの箇所で溶射膜厚 0.3mm 以上を確保することができた。



第8図 溶射膜厚測定部位

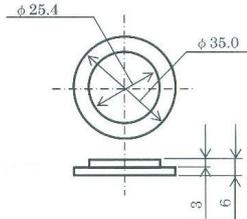
第5表 膜厚測定結果

測定部位	溶射膜厚(mm)	測定部位	溶射膜厚(mm)
3-1	0.225	4-1	0.307
3-2	0.250	4-2	0.340
3-3	0.248	4-3	0.306
3-4	0.252	4-4	0.310
3-5	0.324	4-5	0.390
3-6	0.307	4-6	0.364
3-7	0.324	4-7	0.379
3-8	0.347	4-8	0.306
3-9	0.329	4-9	0.415
3-10	0.306	4-10	0.405
3-11	0.360	4-11	0.402
3-12	0.355	4-12	0.408
3-13	0.354	4-13	0.305
3-14	0.342	4-14	0.407
3-15	0.385	4-15	0.407
3-16	0.319	4-16	0.317
3-17	0.360	4-17	0.305
3-18	0.385	4-18	0.308
3-19	0.384	4-19	0.390
3-20	0.367	4-20	0.410
平均	0.326	平均	0.359

d. 試験片検査結果

(a) 試験片形状及び材質と取付位置は次のとおり。

- ・試験片形状：第9図
- ・試験片材質：SUS410
- ・溶射材料：TP#1-1～1-3：溶射材①  
TP#2-1～2-3：溶射材②
- ・取付位置：第10図  
TP#1-1～1-3：No.1 バケツト  
TP#2-1～2-3：No.2 バケツト



第9図 試験片形状



第10図 試験片取付位置

(b) 膜厚検査

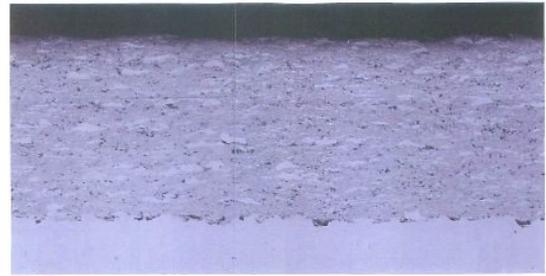
溶射後の各試験片はいずれも膜厚 0.3mm 以上を確保していた。

(c) 密着力試験

密着力試験を実施した結果、いずれの試験片も接着剤の破断であり、極端な皮膜密着力の低下は認められなかった。

(d) 断面マイクロ組織検査

第11図に断面マイクロ組織写真を示す。いずれの試験片ともにそれぞれ層間剥離・界面剥離及び線状欠陥は認められなかった。



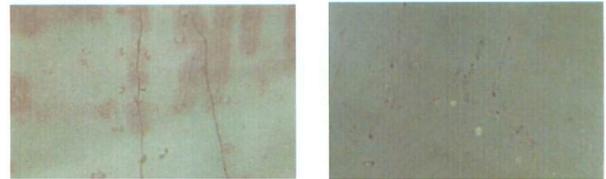
第11図 断面マイクロ組織(溶射材①)

(e) 硬度測定

硬度測定の結果、極端な硬度低下は認められなかった。

e. 皮膜表面浸透探傷結果

ランナバケツトモデルに溶射し、ハンマーリングで溶射面に打撃を与えた後の溶射材①と溶射材②の浸透探傷検査結果を第12図に示す。溶射材①に関しては皮膜表面に線状欠陥が発生したが、溶射材②に関しては線状欠陥の発生は認められなかった。



溶射材①

溶射材②

第12図 浸透探傷検査結果

f. モデル溶射試験結果のまとめ

(a) 溶射範囲

実機のペルトンランナにおいてはバケツト内面を全面溶射が可能であるため、溶射範囲はバケツト内面の全面とする。ただし、水切り付根部は高応力部であり、土砂水がほとんど当たらないため、溶射を行わない。

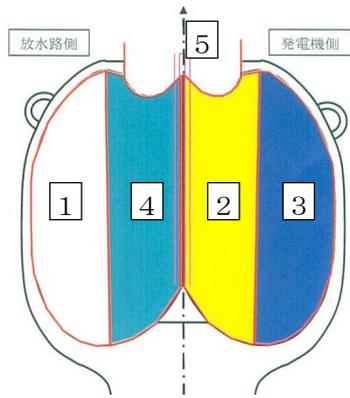
(b) 各種検査

溶射材①、②ともに対策実施後の各部温度測定結果、溶射膜厚測定結果、外観目視検査において異常は認められなかった。

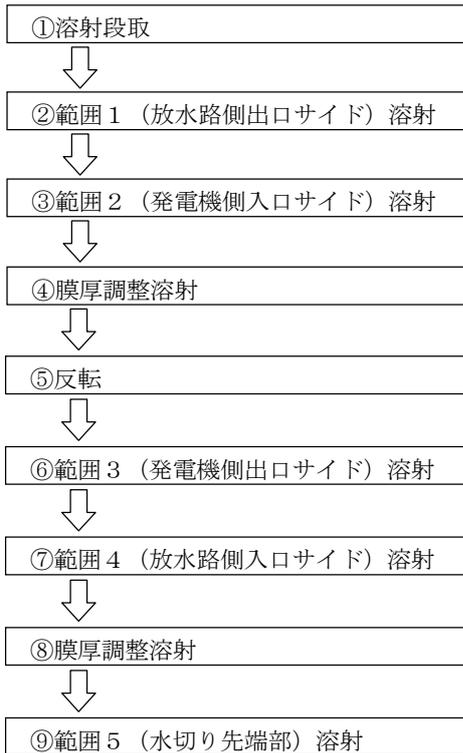
(c) 試験片検査

溶射材①、②ともにバケツトモデル内面3箇所に取り付けたテストピースの密着力試験、断面マイクロ組織検査、硬度測定において異常は認められなかった。





第16図 溶射範囲図



第17図 溶射順序

(4) 実機への適用と施工結果

a. 馬場島発電所への適用

実機への適用にあたり、ランナ更新周期が6年と短い馬場島発電所に試験採用することとした。馬場島発電所の諸元及び溶射を施工するバケットは第6表のとおりである。

第6表 馬場島発電所 諸元

最大出力	21,700kW
使用水量	7.9m <sup>3</sup> /s
有効落差	319.0m
水車型式	VP-1R5N
水車出力	22,200kW
回転数	450min <sup>-1</sup>
ランナバケット数	19枚
No.1,10バケット 溶射材料	溶射材②
No.2,11バケット 溶射材料	溶射材③

b. 施工状況

溶射段取、ティーチング、溶射、溶射バケットの写真を第18図～第21図に示す。



第18図 溶射段取



第19図 ティーチング



第20図 溶射



第21図 溶射バケット

c. 施工結果

溶射後の温度測定、膜厚測定、溶射皮膜表面の浸透探傷検査を実施した結果、実機に採用しても問題のないことが確認できた。なお実機ペルトン

ランナへの施工を行った際に、以下の知見を得た。

(a) 溶射施工性

溶射施工性に最も影響を及ぼす各材料の線状欠陥の発生し難さに関しては、溶射材②と溶射材③はほぼ同等である。

(b) ペルトンランナの溶射施工範囲

馬場島発電所と同等寸法・形状のランナバケットであればティーチングの互換性により内面の土砂摩耗を受ける部位全面を施工することが可能である。

(c) 溶射施工方法

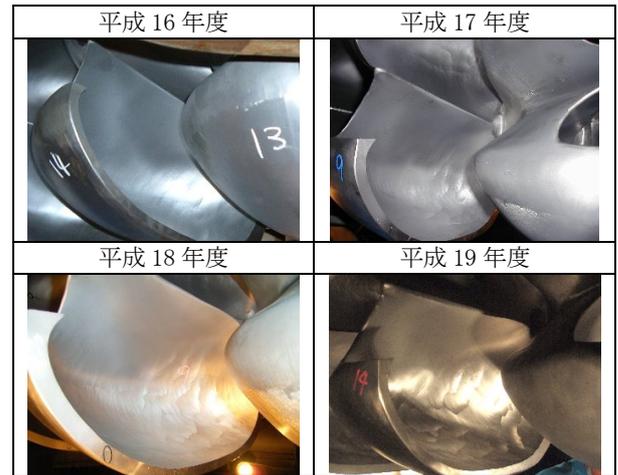
今回の施工では溶射皮膜線状欠陥の防止のために線状欠陥が最も発生しやすい1層目に靱性の高いアンダーコート材料Ni合金を使用した。これにより溶射材②に関してはハンマーリング程度の衝撃には耐える皮膜を形成することが可能となった。溶射材③についても溶射材②よりも高い靱性と残留応力が低い性質を持つことから溶射材②同等の耐衝撃性を持つと考えられる。アンダーコートを使用した場合の密着力はアンダーコート無しの密着力に比して約50%程度低下するが、タングステン・カーバイト系溶射材の目安となる68.6MPa程度の密着力が得られる。またロボットのプログラムに関してはティーチング治具の開発等により十分な膜厚管理が可能となった。

5. フィールド試験

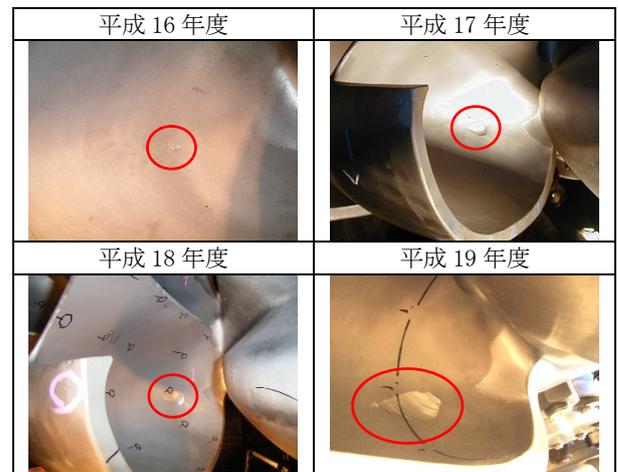
平成15年10月～平成19年9月までの4年間、馬場島発電所での実フィールド試験を実施した。

(1) ランナバケット摩耗状況

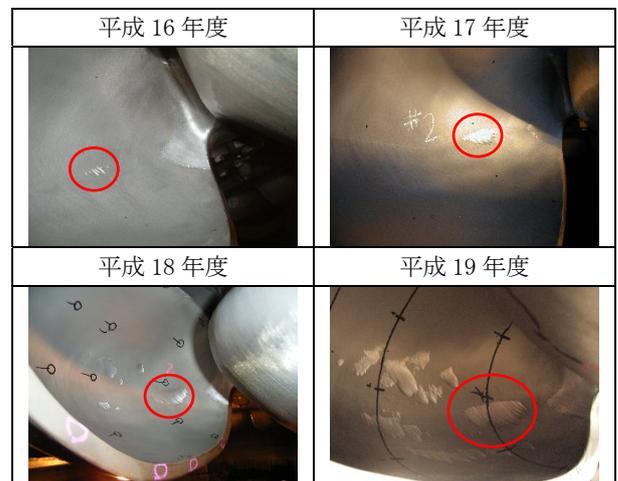
毎年9月頃に定期点検を行い、摩耗状況の確認を行った。第22～24図に摩耗状況写真を示す。非溶射バケットは全体的に摩耗が進行しているのに対し、溶射バケットは全体的な摩耗は少なく、局部摩耗が点在している程度であった。



第22図 非溶射バケット

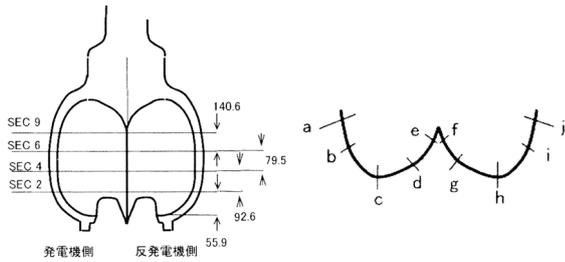


第23図 溶射材② 溶射バケット



第24図 溶射材③ 溶射バケット

摩耗量を測定するにあたり、第25図のように測定点を分割し、プロフィールゲージを使用し測定した。



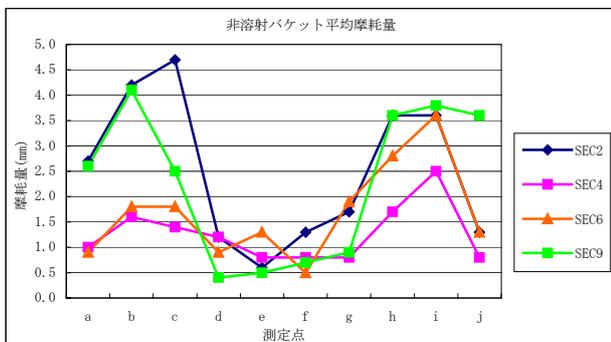
第 25 図 摩耗量測定部位

4 年目（平成 19 年度）における非溶射バケット及び溶射バケットの平均摩耗量を第 26～28 図に示す。非溶射バケットは、バケット碗底部（測定点 b, c, h, i）の摩耗が著しく、従来の摩耗様相と同様であった。溶射バケットはバケット碗底部に、非溶射バケットと同様な摩耗の傾向は見られるが、摩耗量が非常に少なく、摩耗の進展が緩やかである。

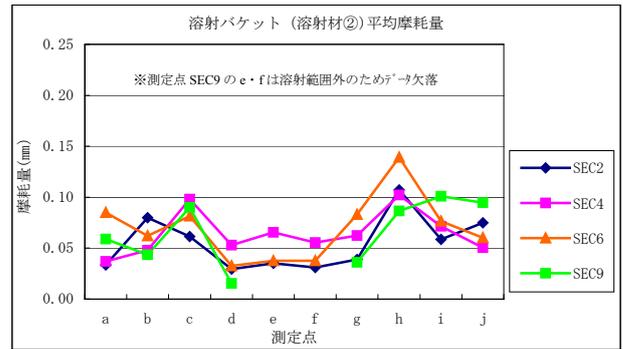
第 29 図に平均摩耗量推移を示す。平成 19 年度の点検結果から、非溶射バケットの平均摩耗量が 1.90mm であるのに対し、溶射材②は 0.06mm、溶射材③は 0.10mm と非常に摩耗が少なく、全体的に溶射皮膜（0.3mm）が残存していた。

第 30 図に局部摩耗量推移を示す。非溶射バケットは全体的に摩耗しており、特にバケット先端部・付根部・碗底部に局部摩耗が見られた。これは従来の最大摩耗箇所と概ね一致している。一方、溶射バケットは全体的な摩耗は少ないが、碗底部（低応力部）の一部（溶射皮膜が剥離した箇所）と先端部（高応力部）の一部に局部的な摩耗が進行しているが、致命的な欠陥には至らない。

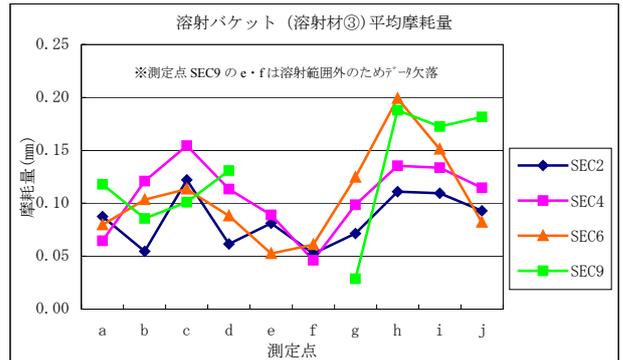
溶射材の比較では、平均摩耗量及び局部摩耗量からも、溶射材②が優れていることが判った。



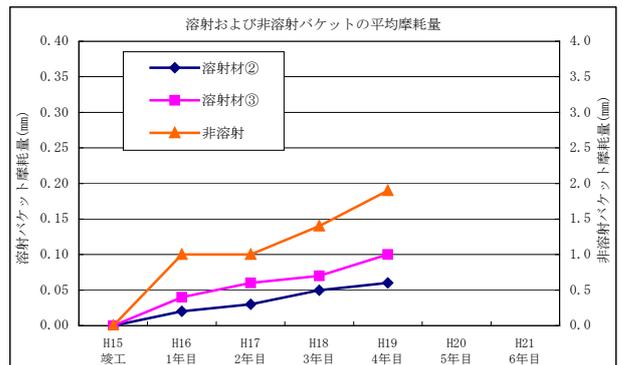
第 26 図 非溶射バケット平均摩耗量



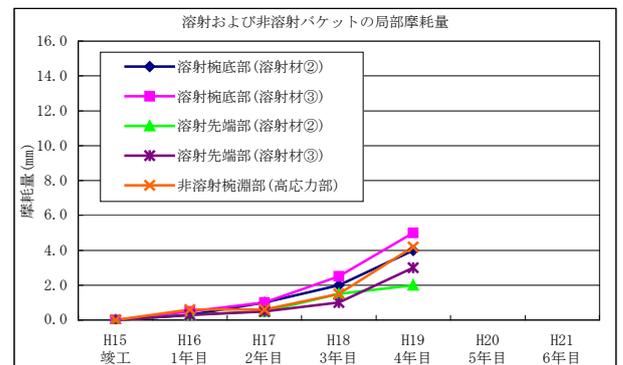
第 27 図 溶射バケット(溶射材②)平均摩耗量



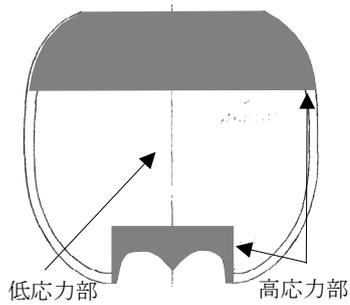
第 28 図 溶射バケット(溶射材③)平均摩耗量



第 29 図 溶射及び非溶射バケット 平均摩耗量



第 30 図 溶射及び非溶射バケット 局部摩耗量



第 31 図 ランナバケット応力分布図

## (2) 取替周期の評価

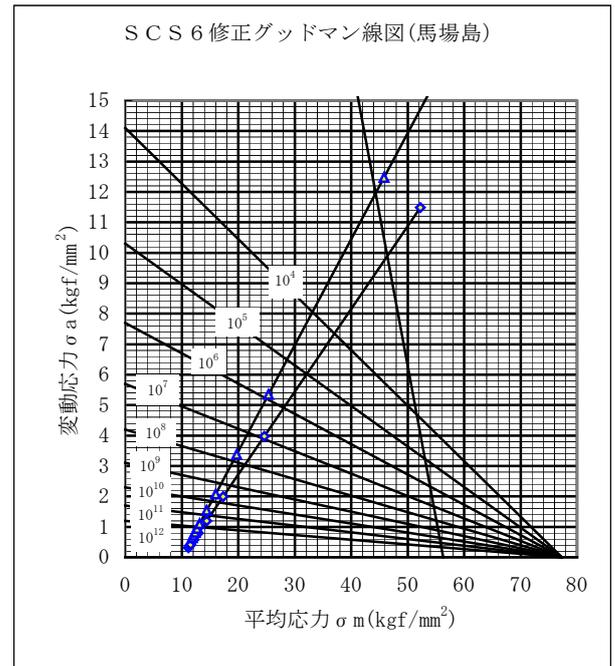
従来のランナ取替目安はバケットの平均摩耗量が肉厚の 30%以上としていた。今回の研究により、溶射を施したバケットの平均摩耗量は非常に少ないが、局部摩耗している箇所については再評価する必要がある。そこで、非溶射バケットは全面的に摩耗しているため高応力部位において、また溶射バケットは局部摩耗が進んでいる低応力部位において、寿命を推定することにした。

### a. 累積被害を用いた寿命評価

疲労寿命に対して有効な成分を分析（経年摩耗量による変動応力・平均応力を算出）した後、基礎的な実験データ（材質 SUS6 修正グッドマン線図）をもとに疲労寿命（限界摩耗量）を算出した。

### b. シミュレーション結果（限界摩耗量の算出）

低応力部及び高応力部のそれぞれについて、局部摩耗が最も進行している部位のグッドマン線図による応力軌跡を第 32 図に示す。



第 32 図 グッドマン線図

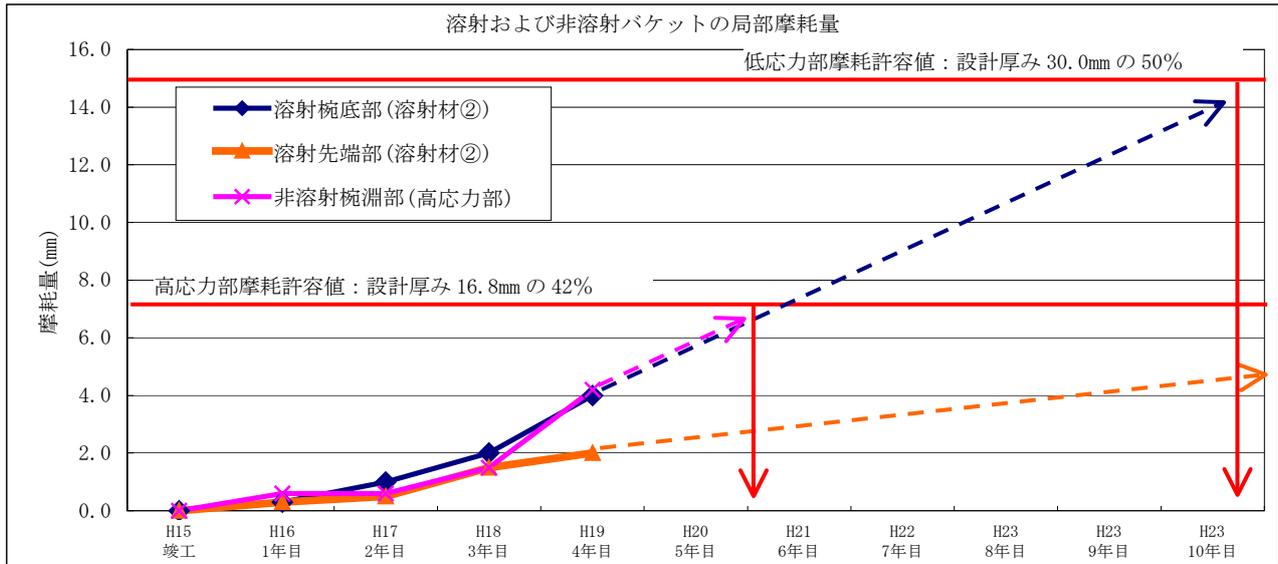
この分布図から許容繰返数  $N_{fi}$  を読み取り、年間にランナバケットに作用する「繰返数  $N_i$  との比率( $N_i/N_{fi}$ )」を求め、この累積被害  $\Sigma(N_i/N_{fi})$  が 0.5 を超える年数及び限界摩耗量を算出した。

- ・高応力部設計厚み 16.8mm の限界摩耗量:約 7mm
- ・低応力部設計厚み 30mm の限界摩耗量:約 15mm

第 33 図に示すようにこの限界摩耗量から最も摩耗進展性の少ない溶射材②のバケットと非溶射バケットとの推定寿命を比較した。

非溶射バケットは全体的に摩耗しており、取替周期を決定する高応力部で推定した場合、取替時期となる摩耗管理値に達するのは 5 年目前後と想定される。一方、溶射材②の溶射バケットは、低応力部（腕底部）の局部摩耗が進行しており、摩耗管理値に達するのは 10 年目前後と想定される。高応力部（付根部・先端部）でも局部摩耗が発生しているが、摩耗速度は遅いため、取替周期を決定付けるには及ばない。

以上のことから、従来の非溶射バケットに比べ、溶射材②の溶射を施すことによって、取替周期を 2 倍程度延伸できることが検証できた。



第 33 図 非溶射及び溶射バケット(溶射材②) 取替周期想定図

## 6. まとめ

6 年間にわたりペルトンランナバケットの耐土砂摩耗性向上の研究を行い、基礎研究とモデル試験により、実機ペルトンランナへの溶射技術の確立を、またフィールド試験により、溶射材料の選定及び取替周期延伸等について多くの技術を得ることができた。

今後、平成 22 年度に馬場島発電所、平成 26 年度に奥山発電所での採用を計画し、修理周期の延伸による発電コストの低減を図っていく。

最後に、本研究で協力頂いた富士電機システムズ(株)(現 富士・フォイトハイドロ(株))に対し、この場をかりてお礼を申しあげる。

## 参考文献

- 1) 五日市：「セラミック・サーメット溶射材料の選び方・使い方」, 溶射技術, Vol.22, No.1, pp.57~73, (2002)
- 2) 大澤, 五日市：「WC サーメット皮膜の耐衝撃性と基材材質の関係」, 高温学会溶射部会主催 第 11 回溶射総合討論会, (2002)
- 3) 大澤, 太和田, 伊部, 五日市：「サーメット皮膜の耐剥離材に及ぼす基材材質の影響」, 日本溶射協会主催 第 76 回全国講演大会, (2002)
- 4) 大澤, 太和田, 五日市, 牧, 原田：「加工硬化した基材に刑形成されたサーメット皮膜の耐衝撃性」, 日本溶射協会主催 第 76 回全国講演大会, (2002)
- 5) 大澤, 太和田, 五日市, 戸部：「高い耐衝撃性をもつ WC/CrC/Ni 溶射皮膜の開発」, 日本溶射協会主催 第 75 回全国講演大会, (2002)
- 6) 水野, 伊部, 大澤, 五日市：「塩水腐食環境下における WC 系サーメット皮膜の適用検討」, 日本溶射協会主催 第 76 回全国講演大会, (2002)
- 7) 加藤, 渡辺, 大澤, 五日市：「HVOF における溶射角度と皮膜特性の関係」, 日本溶射協会主催 第 73 回全国講演大会, (2001)
- 8) 渡辺, 太和田, 大澤, 五日市：「WC 系サーメット溶射皮膜の特性に及ぼす HVOF 溶射条件の影響」, 日本溶射協会主催 第 73 回全国講演大会, (2001)

(本論文の一部は、電気評論 2007 年 1 月号「ペルトン水車ランナバケットの耐土砂摩耗性向上」、ターボ機械 2007 年 9 月号「近年の水車改修における新技術の導入例(特集:わが国の水力の一部)」およびターボ機械協会水力機械委員会水力分科会、2007 年 12 月、「ペルトン水車ランナバケットの耐土砂摩耗性向上について」より、許諾の上転載しております。)