

# 地熱用タービンロータの肉盛溶接補修による再生技術

## Welding Repair Technology for Geothermal Turbine Rotor



藤田 明次\*<sup>1</sup>  
Akitsugu Fujita

松井 正数\*<sup>2</sup>  
Masakazu Matsui

宮崎 俊彦\*<sup>3</sup>  
Toshihiko Miyazaki

曽我 隆志\*<sup>4</sup>  
Takashi Soga

山口 亮\*<sup>5</sup>  
Makoto Yamaguchi

### 1. はじめに

地熱タービンロータはほとんど低合金鋼（CrMoV鋼）を使用しており、腐食性ガス成分が高い環境において、長時間の運転によりタービン翼植込み部に応力腐食割れ（SCC）などの損傷を生じる場合がある。

これらの損傷部に補修溶接を行う場合、一般的に使用する溶接材料はその施工性の観点より低炭素系の材料であるため、あまり高強度は期待できない。さらに溶接熱影響部（HAZ）はSCCに対する感受性を低くするために、焼鈍（SR）温度を高くすべきであり、この点においても溶接金属の強度は低くなる要因である。

これに対して、当社では高耐食性および高強度を有する肉盛溶接部の施工法を確立し、地熱ロータの再生工事へ適用している。

本報では損傷した地熱ロータに対して、高耐食性及び高強度化を可能にした補修溶接技術について紹介する。

### 2. 高耐食性及び高強度を有する溶接肉盛技術

図1にロータ補修溶接のプロセスを示す。まず、

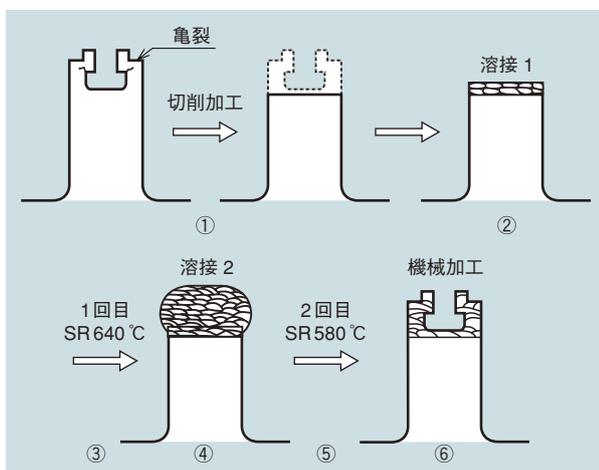


図1 補修溶接のプロセス

損傷している翼植込み部を研削によりすべて除去し（①）、その除去した部分を肉盛溶接により再生した後（②～⑤）、翼植込み部を機械加工し復旧させる（⑥）。

使用する溶接金属は耐食性に優れた12%Cr・5%Ni材で、当社が地熱タービンロータ素材として開発、実用化している12Crロータ材<sup>(1)(2)</sup>と同じ成分系である。

補修溶接を行った場合、母材に生じるHAZの耐SCC性が重要なポイントとなる。HAZの耐SCC性は硬さに大きく影響をうけるため、適正な硬さに管理すべきであり、溶接後のSR（Stress Relieve：応力除去焼鈍）温度はある程度高い温度を必要とする。一方、使用した溶接金属は高い温度でSRをすると、目標としている強度を満足できなくなる。溶接金属部の十分な強度を得るためには低い温度でのSRが必須となる。このようにHAZの硬さを低く抑えた上で、溶接金属の強度も確保するために、溶接とSRを2段階で行う2段SR法（図1中②～⑤）を適用した。第一段階として数ミリ程度の薄い肉盛層を溶接し（②）、640℃でSRを行うが（③）、ここで重要なポイントは第一段階の肉盛厚みであり、第二段階の溶接熱影響が母材まで届かないような最小の厚みにすることである。次に第二段階として目標の高さまで肉盛溶接を行った後（④）、580℃で2回目のSRを行う（⑤）。

以上の2段SR法の適用により、溶接金属の強度を確保しつつ、SCC感受性を満足するようにHAZの硬さを低く抑えることが可能になった。

### 3. 開発した溶接肉盛技術の有効性

表1に通常実施しているような溶接後にSRを1回だけ実施する方法と2段SR法を用いて製作した肉盛溶接材の材料特性の比較を示す。

通常の溶接施工法である溶接後に1回だけSRを行う方法ではSR温度が高い場合（640℃）はHAZの硬さは目標以下となるが、溶接金属の耐力が目標より低くなり強度的に満足することができない。また、

\*<sup>1</sup> 技術本部長崎研究所材料・溶接研究室長 工博

\*<sup>2</sup> 技術本部長崎研究所材料・溶接研究室

\*<sup>3</sup> 長崎造船所第二工作部生産技術課

\*<sup>4</sup> 長崎造船所火力プラント設計部陸用タービン設計課

\*<sup>5</sup> 三菱エンジニアリング(株)材料実験グループ

SR 温度が低い場合 (580℃), 溶接金属部の強度は満足できるが, HAZ の硬さは目標より高くなり, SCC 感受性が上昇する. 一方, 2段 SR 法では溶接金属の強度及び HAZ の硬さともに目標を十分満足している.

表2に2段SR法で施工した溶接材について地熱蒸気環境下でのSCC試験結果を示す. 本試験は短時間で耐SCC特性を把握するため, 耐力相当の応力を試験片に負荷している. タービンロータの母材であるCrMoV鋼の場合, 試験開始後6ヶ月で割れが発生している. 一方, 溶接金属は12ヶ月(1年)が経過した時点でも割れ発生はなく, 母材に比べ地熱蒸気環境中での耐SCC特性が優れていることを示している. また, 母材に生じたHAZは6ヶ月で割れが発生しており, 硬さを制御したことで母材と同等のSCC感受性になっていると考える.

表1 各種肉盛方法の比較 (母材: CrMoV 鋼)

施工方法	SR 温度 (℃)	溶接金属部耐力の許容下限値との差 (MPa)	HAZ 部硬さの目標上限値との差 (HV)
一般的なSR (1回のみ)	640	-107 ×	-6 ○
	580	+157 ○	+65 ×
2段SR法	640+580	+154 ○	-8 ○

○:可, ×:不可

表2 SCC 試験結果 (負荷応力:  $\sigma_y$  相当)

位置	試験期間		
	3ヶ月	6ヶ月	12ヶ月
溶接金属 12%Cr・5%Ni材	○	○	○
母材 (CrMoV鋼)	○	×	×
母材 HAZ部 (CrMoV鋼)	○	×	×

○:亀裂発生なし, ×:亀裂発生

#### 4. 実機地熱タービンロータへの施工

図2に長時間の使用により翼植込み部に損傷を生じたタービンロータの補修溶接の状況を示す.

施工終了後に超音波検査法 (UT) により, 溶接欠陥等の検査を実施した結果, 問題となるような欠陥を含まない良好な肉盛溶接部であることが明らかとなった. その後, 翼植込み部を機械加工し, 翼の植え込みを行い, ロータ再生工事は完了した.

#### 5. ま と め

地熱タービンロータは過酷な腐食性蒸気環境中での長時間使用により, 翼植込み部に応力腐食割れなどが生じる. この損傷した部位を補修溶接により, 再生す



図2 実機地熱ロータの補修溶接作業状況

る技術を確認した. これまで腐食環境下で使用するタービンロータの補修溶接には高強度の溶接材料を適用することはできなかったが, 耐食性に優れた溶接材料 (12%Cr・5%Ni材) を使用し, 2段SR法を適用することにより, 高強度で高耐食性を要求されるタービンロータの補修溶接が可能となった.

また, 溶接熱影響部の硬さを低く抑えることにより, 熱影響部のSCC感受性を母材並にすることも可能となった.

本補修溶接法は実機へ適用し, 施工性を確認済みである.

今後は, 本溶接技術の火力発電用低圧タービンロータへの展開, 施工コスト低減のためのサブマージアーク溶接の適用などを進めていく予定である.

#### 参 考 文 献

- (1) M.Kamada et. al., Development of a 12%Cr steel rotor forging for geothermal power plants, Proceeding of the 23rd NZ geothermal Workshop 2001. p.137
- (2) M.Kamada et. al., Development of a 12%Cr steel for geothermal turbine rotor ( I )-Fundamental studies and verification test. Proceeding of the 15th International Forgemasters Meeting 2003 Japan. p.187



藤田明次



松井正数



宮崎俊彦



曾我隆志



山口亮