地熱タービンの最新技術

酒井 吉弘(さかい よしひろ) 中村 憲司(なかむら けんじ)

塩川 国夫(しおかわ くにお)

1 まえがき

地熱エネルギーは,石油,石炭,天然ガスなどの化石燃料と違って,二酸化炭素(CO₂)や窒素酸化物(NOx), 硫黄酸化物(SOx)などをほとんど排出せず環境への影響 が少ないクリーンエネルギーである。富士電機は国内初の 実用地熱発電設備を藤田観光株式会社箱根小涌園に納入し て以来,国内外に50台を超える地熱発電設備を納入して おり,世界的なトップメーカーの一つに数えられている。

地熱蒸気は腐食性が高いため,地熱発電用蒸気タービン の設計においては,材料の腐食に関する知見と配慮が非常 に重要である。そのため富士電機では,地熱発電サイトに おける腐食試験や実験室における材料試験を継続して実施 してきており,蓄積された貴重なデータを設計に反映する ことにより高い信頼性を実現してきた。また,最新の翼列 技術を適用することにより,地熱タービンの効率向上にも 積極的に取り組んできた。

本稿では,富士電機の地熱タービンの最新技術について 紹介する。

2 最新の地熱タービン材料技術

2.1 地熱環境模擬腐食試験

地熱タービンの信頼性を向上させるため,地熱環境下で の材料寿命を把握することは大変重要である。富士電機で は地熱タービン材料に対する腐食試験を実施し,より厳し い環境下での適用性を検討している。

腐食試験の環境は,実機がさらされる環境に対し,十分 過酷な条件を採用し,短時間で実機の長時間使用時の状態 を模擬できるように濃縮腐食環境を設定した。標準腐食試 験環境を表1に示す。試験ではさまざまな応力状態に対応 するため,表2に示す各腐食試験を実施している。腐食試 験装置の外観を図1に示す。

2.2 新材料の実機適用

現用の地熱タービンでは,ブレード材には13%Cr鋼,



酒井 吉弘

蒸気タービンの設計,開発に従事。 現在,富士電機システムズ株式会 社発電ブラント本部川崎工場技師 長。工学博士。日本機械学会会員。



中村 憲司

蒸気タービンの設計,開発に従事。 現在,富士電機システムズ株式会 社発電プラント本部川崎工場火力 タービン部担当課長。日本機械学 会会員。

表 1 標準腐食試験環境

CI	H_2S	SO4 -	pН	温度
10,000 ppm	300 ppm	50 ppm	3.5 ~ 4.0	60
(NaClとして 1.8 %)	(H₂Sガスを 0.2 L/min封入)	(Na₂SO₄ として混入)		

表2 腐食試験の内容

試験	内容			
腐食試験	腐食液中に浸漬,減量を測定し耐食性を評価			
応力腐食割れ(SCC) 試験	静的な応力をかけながら,腐食液中に浸漬, 破断時間を評価			
腐食疲労試験				
腐食疲労試験 (平均応力負荷)	静的な平均応力と動的な繰返し負荷を同時に 発生させ,疲労限度を得る			
プラントノッチ コンパクトテンション (BNCT)試験	静的な応力を負荷し,発生するSCCの亀裂 進展量を評価			
ダブルカンチレバービーム (DCB)試験 および 応力腐食亀裂進展 (K1SCC)試験	予亀裂を作製し,亀裂先端に生じる応力集中 に対する進展感受性を評価(試験片形状の異 なる2種類の試験を実施)			

ロータ材には1% Cr 鋼を使用している。これらの材料は 広く使われており,実績も多くある。これに対し,より高 い耐食性・信頼性を得るため,それぞれについて新材料の 開発・選定を行った。開発・選定材料の組成を表3に示す。 新材料は現用材に比べ,耐食性に寄与するクロム量を増加 し,適正な熱処理により応力腐食割れ感受性を抑えた材料 である。

2.1節で述べた腐食試験を,ブレード材の現用材および 新材料に対して行い,得られた疲労限度線図を図2に示す。 結果から,実機での使用応力状態において,より高い振幅 応力を許容することができ,耐食信頼性が向上しているこ とが確認できた。これは,クロム添加量の増加により,耐 食信頼性を大きく左右する腐食ピットの形成を抑制した効 果によるものと考えられる。

図3に現用材,新ブレード材に対し,応力集中部の亀裂



塩川 国夫

電子・構造材料の開発・評価研究 に従事。現在,富士電機アドバン ストテクノロジー株式会社生産技 術研究所。日本材料学会会員。

表3 開発・選定ブレード材およびロータ材組成

	++ *1	化学成分(%)												
	1/1 科	с	Si	Mn	Р	s	Cr	Ni	Cu	Nb	Мо	V	W	AI
ブレード林	現用材 (13%Cr鋼)	0.17~ 0.22	0.10~ 0.50	0.30~ 0.80	0.030	0.020	13.0~ 14.0	0.30~ 0.80	_	_	_	_	_	_
フレ ー 1-4刻	開発材 (16%Cr4%Ni鋼)	0.05	0.10~ 0.35	0.30~ 0.60	0.025	0.005	15.0~ 16.0	4.2 ~ 5.0	3.0 ~ 3.7	0.20~ 0.35	_		—	—
	現用材 (1%Cr鋼)	0.24~ 0.34	0.10	0.30~ 1.00	0.007	0.007	1.10~ 1.40	0.50~ 1.00	_	_	1.00~ 1.50	0.20~ 0.35	—	0.008
ロータ材	選定材 (2%Cr鋼)	0.21~ 0.23	0.10	0.65~ 0.75	0.007	0.007	2.05~ 2.15	0.70~ 0.80		_	0.80~ 0.90	0.25~ 0.35	0.60~ 0.70	_
	選定材 (3.5%Ni鋼)	0.26~ 0.32	0.07	0.04	0.007	0.007	1.40~ 1.70	3.40~ 3.60			0.30~ 0.45	0.15	_	0.010

図1 応力腐食割れ試験・腐食疲労試験装置



図2 現用材と新材料の疲労限度線図



進展特性を評価した応力腐食亀裂進展試験(K1SCC 試験) の結果を示す。亀裂進展下限応力拡大係数(単位:MPa \sqrt{m})は,現用ブレード材が10 MPa \sqrt{m} (相対値0.17) であるのに対し,新材料では60 MPa \sqrt{m} (相対値1.0)と 格段に優れていることが分かる。一方,ロータ材に対して 行った腐食疲労試験結果を図4に示す。ブレード材の場合 と同様に,新材料(2%Cr鋼)の適用により高い耐食性

図 3 K1SCC 試験結果



図4 ロータ腐食試験結果



が得られることが分かった。

2.3 ショットピーニング技術

上記のように,開発した新材料の適用により高い耐食性 が得られることが確認されたが,より厳しい腐食環境や高 い応力にまで対応するための技術として,ショットピーニ ング技術を検討・採用している。この技術はブレードや ロータの発生応力が厳しい部位に鋼球をあるエネルギーで 投射することにより,圧縮の残留応力を発生させるもので ある。

ショットピーニング処理を施したブレード材およびロー タ材に対し,応力腐食割れ試験を行い,長寿命化に対する 効果を検証した結果を図5に示す。ショットピーニング処 理を施さないものに対し,施したものは2倍以上の破断寿 命が得られていることが分かる。これらの結果から,実機 に対しても腐食寿命向上に対する有効な施策として適用を 開始している。

2.4 コーティング技術

ブレード材料には耐食性とともに耐エロージョン性が要 求される。しかし,一般的に耐エロージョン性を向上させ るためには材料の硬度を高くする必要があるが,硬度を高 くした場合,応力腐食割れ特性は劣化する。両特性を両立 させる手法として,溶射コーティングが考えられる。溶射 コーティングの候補材料を7種類選定し,それぞれに対し, 2.1節に述べた腐食試験および硬度測定,プラストエロー

図5 SCC 試験結果(ショットピーニング処理有無)



表4 コーティング材試験結果

コーティング 材	応力腐食 割れ (SCC)	疲労	腐食減量	プラスト エロージョン 平均摩耗量	硬度 Hv	
$\begin{array}{c} CoNiCrAlY + \\ Al_2O_3 \cdot TiO_2 \end{array}$	×	×			790	
WC-10Co4Cr					1,100	
CoCrMo	×				650	
AI-Zn	×	—	—	—	—	
ステライト No.6B溶射	_	_	×		540	
50%Cr ₃ C ₂ - 50%NiCr					770	
75%Cr ₃ C ₂ - 25%NiCr	_	_			810	
	— :実施せ	ず	評価記号 ▲ :優 :良 :可			

ジョン試験を実施した。結果の一覧を表4に示す。これら から,溶射コーティング材料としてWC-CoCr系の材料 が耐食・耐エロージョン性に優れていることが分かった。 この材料について溶射条件の最適化を図り,実機適用可能 なレベルの溶射材料,施工法を確立した。

2.5 ロータ溶接補修技術

上記のように,高耐食性に対するさまざまな施策を開 発・選定してきた。しかし,既納品に対しては現用材を適 用しており,耐食性に対する考慮も新製品と比較して不十 分である。その中で,長期間運転した地熱タービンの中に は腐食によるピット形成,応力腐食割れによるクラックが 発生しているものも存在する。このような既納品に対して, 補修技術を確立することが必要となる。

ロータの場合,応力腐食割れの発生は最も応力の集中す る翼溝の底部である。この部位にクラックが発生した場合, 発生部を削り,クラックをなくすことで進行を抑制するが, さらにクラックが成長した場合には翼溝全体を削る必要が ある。このときに必要となるのが,肉盛溶接を実施し,翼 溝を再生する技術である。

板材による溶接条件の選定後に実機大の溶接施工を行い, 機械的特性および腐食試験を実施した。肉盛材には13% Cr鋼を用い,多層のTIG(Tangsten Inert Gas)溶接と して行っている。

溶接部から試験片を採取し実施した腐食疲労試験結果を



図6 肉盛溶接補修部の腐食疲労試験結果

図7 肉盛溶接部の組織写真



図6,溶接部の組織写真を図7に示す。無欠陥であり, ロータ母材に対し,機械的特性および耐食性に優れること を確認し,実機への溶接補修技術を確立した。

上記のように地熱タービンの信頼性を左右する大きな要素である腐食に対する評価法を確立し,新材料,ショット ピーニング技術,コーティング技術,補修技術の開発・確 立を行ってきた。これらを,地熱環境や発生応力によって 使い分けることにより,より高い信頼性が得られるものと 考える。

今後もさらに,地熱環境下での腐食に対する評価・研究 を進め,高信頼性化とともに,寿命評価法を検討していく。

3 地熱タービンの効率向上新技術

地熱タービンにおける効率向上対策に対しては,一般の 火力発電用蒸気タービンで培われた技術をベースとした最 新技術を,主に翼列に対して適用し,大幅な効率アップを 実現している。

3.1 高負荷高効率反動翼

地熱タービンの低圧翼以外の翼列に対しては,最新の翼 列設計技術を用いて,段落あたり負荷を増大させながら高 い効率を維持させた高負荷高効率反動翼を適用している。 本反動翼を採用することにより,同一段数の場合,従来の 反動翼より1%以上の効率向上が可能となる(図8)。

3.2 低圧翼の性能向上

地熱タービンは,一般の火力タービンに比べて,低圧翼 のタービン全体に占める負荷割合が大きいので,その性能 向上は,一般の火力タービンに比較して,タービン全体の 性能向上への寄与度が大きい。一般の火力タービン用に開 発された,性能を飛躍的に高めた新世代低圧翼を,腐食性 の高い地熱蒸気での運転に適応させ,タービンの実機に適 用している。

以下では,新世代低圧翼の効率面での特徴,および現在 進めている小型の高効率低圧翼の開発状況について説明す



図8 高負荷高効率反動翼と従来翼の効率比較

る。

〔1〕 遷音速プロフィル

近年の数値流体解析技術の進歩により,翼列内の流れを 精度よくシミュレートすることができるようになったため, 翼列内の速度分布を最適化して,損失の少ないプロフィル を実現することが可能になった(図9)。新プロフィルは 遷音速流れに適したコンバージェント・ダイバージェント 翼形(翼間流路が末広がりになるように設計された翼形) としているのが特徴である。蒸気風洞試験の結果,出口 マッ八数が大きい場合には,新翼形を採用することにより プロフィル損失を従来の2分の1以下に低減できることが 確認された。

[2] リーンラジアル静翼

三次元タイムマーチング法を用いて種々の翼形状につい てフローパターンの変化を比較検討した結果,図10のよう に,ルート側で周方向の傾斜を持ちチップ側でラジアル方 向になるような「バナナ形」の静翼が最適であることが分 かった。このようなリーンラジアル静翼を用いることによ り,はく離を生じやすいルート付近の流れが大幅に改善さ れる。モデルタービン試験の結果,従来型の静翼に比べ段 落効率が2%以上改善されることが確認できた。

注 遷音速プロフィル:流れの場に亜音速流れと超音速流れが共存 する,いわゆる遷音速流れに適応させた翼形



図9 新世代低圧翼の解析例と蒸気風洞試験結果





表5 高効率小型低圧翼シリーズの開発

50Hz用(公称環状面積)	60 Hz用(公称環状面積)			
490 mm翼 (2.5 m ²)	410 mm翼(1.7 m²)			
350 mm翼(1.6 m²)	290mm翼(1.1m²)			
290 mm翼 (1.3 m ²)	240mm翼(0.9m²)			

図 11 490 mm 低圧翼組立図



3 高効率小型低圧翼の開発

一般の大型蒸気タービンのために開発された新世代低圧 翼の設計手法を, 翼長 500 mm以下の低圧翼の設計に適用 し, 大幅な性能向上を図った高効率小型低圧翼シリーズの 開発を進行中である(表5)。

本シリーズは,計画段階において地熱タービンへの適用 が考慮されており,高効率新世代低圧翼として効率向上の ため採用された項目はもとより,さらに以下の特徴を兼ね 備えている。

- 1) 腐食雰囲気を考慮した高信頼性強度設計
- 2 全段の脚部にシンプルな形状の逆 T 字脚を採用し, 製作・組立を簡素化
- 3 全段に囲い輪を付け翼端の漏れ損失を低減

図11に,シリーズで最も大きい490mm 翼の組立図を示 す。

4 最新技術の適用例

前述の最新の技術を実機に適用した地熱タービンの例を 紹介する。

4.1 デキシーバレー地熱発電所向け 64.7 MW 地熱 タービン

図12 に 2003 年 10 月に効率向上改造工事を実施した,ア メリカのデキシーバレー地熱発電所の蒸気タービン組立断 面図を示す。本タービンは,1988 年に運転を開始してか ら 15 年経過した時点で,効率向上のため,タービン内部 コンポーネント(ロータ,ブレード,静翼ホルダ,静翼リ ングなど)に最新の技術を適用し,改造したものである。 図 12 デキシーバレー地熱発電所向け 64.7 MW 地熱タービン の断面図



図 13 レイキャネス地熱発電所向け 55 MW 地熱タービンの 断面図



本タービンに適用された主な最新技術は,次のとおりで ある。

- 1) 最終2段以外の動翼に,新ブレード材を適用
- 2) 低圧翼(最終3段)に665mm高効率新世代低圧翼を 採用
- (3) 低圧翼(最終3段)の翼脚および翼溝の応力集中部に 信頼性向上のためショットピーニングを施工

本プラントの最大出力は,効率向上改造によって,従来の 60.5 MW から 64.7 MW へと大幅に増加させることができた。また,改造後も従来と同様,安定した運転を継続中である。

4.2 レイキャネス地熱発電所向け 55 MW 地熱タービン

図13に現在製作中の,アイスランドのレイキャネス地熱 発電所の蒸気タービン組立断面図を示す。本タービンの特 徴は,入口蒸気圧力が19bar abs.と高いことであり,プ レードの段数も2×14段と,通常の地熱タービンに比べ て多くなっている。

本タービンに適用された主な最新技術は,次のとおりで ある。

 低圧翼(最終3段)以外の翼列に,高効率高負荷反動 翼を適用

2 低圧翼(最終3段)に490mm 高効率小型低圧翼を採

- 用
- 3 ロータに耐食性に優れた2%Crロータ材を適用
- [4] 蒸気流入部(主蒸気, 混圧蒸気)の動翼に新ブレード 材を採用
- 5 低圧翼(最終3段)の翼脚および翼溝の応力集中部に 信頼性向上のためショットピーニングを施工 本プラントは,2006年の初めに運転開始の予定である。
- 5 あとがき

火山国であるわが国には地熱エネルギーが豊富にあるが, 現在実用化されている地熱発電は全発電設備容量の0.2% に過ぎない。一方,フィリピンやアイスランドのように地 熱発電が全発電設備容量の15%内外を占めている国もあ る。クリーンな国産エネルギーである地熱エネルギーを用 いた地熱発電の今後の一層の発展が望まれる。地熱発電設 備のトップメーカーとして,今後とも地熱タービンの信頼 性と性能の向上に努めていく所存である。

参考文献

- 1. 酒井吉弘.地熱発電タービンの腐食とエロージョン.火力 原子力発電.vol.50, no.7, 1999, p.14-19.
- [2] 森田益夫.地熱発電プラント用材料の腐食試験.富士時報. vol.55, no.8, 1982, p.523-529.
- 3 Sakai, Y. et al. Corrosion Resistance of Materials for Geothermal Steam Turbines. Proc. of International Conference on Power Engineering-03, Kobe, Japan. 2003.
- 4 中村憲司,加藤秀雄.蒸気タービン設計への流れ解析技術 の適用.富士時報.vol.69, no.9, 1996, p.457-460.
- 5 加藤佳史.地熱タービン.富士時報.vol.73, no.12, 2000, p.655-659.





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する 商標または登録商標である場合があります。