

最新の地熱タービンにおける耐食性・性能向上技術

Recent Technology for Improving Corrosion-Resistance and Performance of Geothermal Turbines

森田 耕平 MORITA Kohei

佐藤 雅浩 SATO Masahiro

地熱エネルギーは、CO₂をほとんど排出しないクリーンなエネルギーであり、富士電機は、国内外に約60台の地熱タービンを納入している。地熱タービンにおける耐食性向上技術では、翼脚や翼溝へのショットピーニング、2%Cr鋼のロータや浴射によるコーティング技術を開発した。性能向上技術では、地熱用新世代低圧翼や高負荷高効率反動翼を開発するとともに、最適化設計により高性能コンパクト型の排気ケーシングを実現した。さらに、トリプルフラッシュ発電の採用により、地熱単機容量では世界最大出力となる地熱タービンを実現した。

Geothermal energy is a clean form of energy that produces almost no CO₂ emissions. Fuji Electric has supplied approximately 60 geothermal turbines to power plants in Japan and other countries. We have developed several technologies for improving corrosion-resistance of geothermal turbines, including shot-peening of turbine blade legs and grooves, rotors made from 2% chromium steel and spray-coating technology. In the area of performance-enhancing technology, together with new-generation, low-pressure turbine blades for geothermal energy production and high-load, high-efficiency reaction turbines development, we have also achieved the creation of a high-performance, compact exhaust casing through optimized design. Furthermore, through use of triple-flash power generation, we have achieved the creation of a geothermal turbine with the greatest output for single-unit capacity in the world.

1 まえがき

地熱発電は、地熱により熱せられた蒸気と熱水の混合流体（地熱流体）を地中に深く掘った井戸（地熱井）から噴出させ、その熱エネルギーを利用して発電する。地球が持つ熱エネルギーは人類にとってはほとんど無尽蔵といってもいいほど膨大なものであるが、利用できるのは地表近くの地殻にあるごく一部のものに限られており、これを特に地熱エネルギーと呼んでいる。地熱エネルギーは、化石燃料を燃焼させて発電する火力発電と異なり、地球温暖化の原因となるCO₂をほとんど排出しないクリーンエネルギーである。再生可能エネルギーの中でも風力や太陽光などと比べてエネルギー密度が高く、また天候などに左右されない安定した発電ができることが特徴である。

富士電機は、1960年にわが国で初めての实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、国内外に約60台の地熱タービンを納入しており、世界的なトップメーカーの一つに挙げられている。本稿では、富士電機の最新の地熱タービンに採用している耐食性・性能向上技術について述べる。

2 耐食性向上技術^{(1),(2)}

2.1 耐食性評価技術

地熱流体中には腐食性のある不純物が多量に含まれている。したがって、地熱タービンの設計においては、材料の耐食性と使用可能な応力レベルを評価することが不可欠である。そこで、実験室の模擬地熱環境で材料試験を行うと同時に、世界各地の地熱サイトに試験装置を設置して地熱蒸気および復水中での材料試験を行い、耐食性に関わるデータを蓄積した。

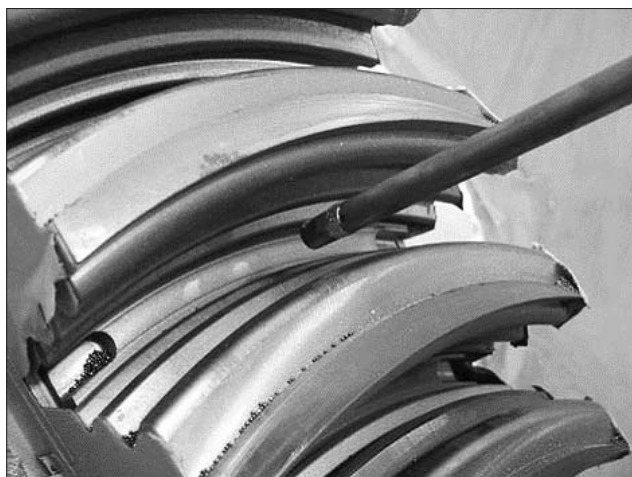


図1 ロータ翼溝へのショットピーニング

2.2 応力腐食割れおよび腐食疲労への対策

地熱タービンを設計する上で特に問題になるのは、運転中に高い遠心力や蒸気の圧力を受ける動翼の翼脚やロータの翼溝である。翼脚や翼溝の応力集中部に対してショットピーニングを実施して耐食性を高める技術を開発し、実機に適用した（図1）。模擬地熱環境で比較試験を行った結果、ショットピーニングにより部材の応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）および腐食疲労（CF：Corrosion Fatigue）強度が大幅に向上することを確認した。図2にSCC試験結果を示す。

2.3 エロージョン・コロージョン対策

近年、地熱井の探査技術や掘削技術などが発達したことによって、比較的深部にある地熱資源が開発されている。これに伴って、地熱タービン入口の蒸気圧力が従来の

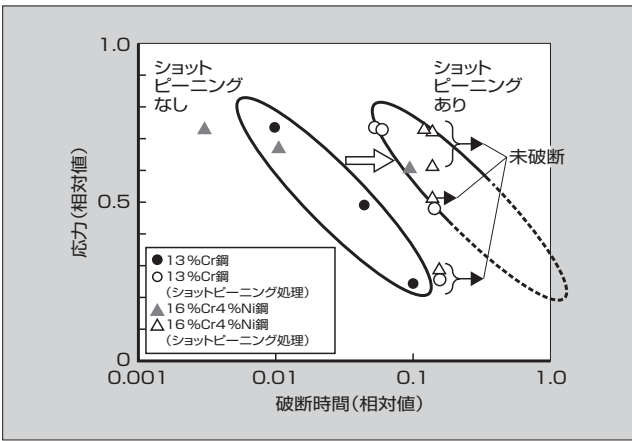


図2 ショットピーニングによる耐力向上
(応力腐食割れ試験結果)



図3 高速フレイム溶射によるコーティング

1 MPa 前後から 2 MPa 前後へと上昇する傾向がある。湿り蒸気タービンの場合^(注)、入口蒸気圧力が上昇するとエロージョン・コロージョンが発生しやすくなる。エロージョン・コロージョンとは、蒸気流の機械的作用と化学的作用の相乗効果により部材表面が減肉する現象であり、炭素鋼や低合金鋼を使用している静翼ホルダやロータの表面に生じやすい。エロージョン・コロージョン対策として、従来のロータ材料である 1%Cr 鋼よりエロージョン・コロージョン耐性が高い 2%Cr 鋼を使用したロータを開発した。また、ロータの表面に WC-CoCr 系の材料を高速フレイム (HVOF: High Velocity Oxy-Fuel) 溶射によりコーティングする技術を開発した (図 3)。

2.4 エロージョン対策

水滴の衝突 (ドレンアタック) によるエロージョンは、火力タービンの場合と同じ現象である。蒸気よりも熱水が多い地熱発電プラントは全段が湿り蒸気中で運転されるため、ドレンアタック・エロージョンに対する設計的な配慮

〈注〉湿り蒸気タービン：主蒸気が、飽和または飽和に近い蒸気であるタービンをいい、飽和蒸気タービンともいう。

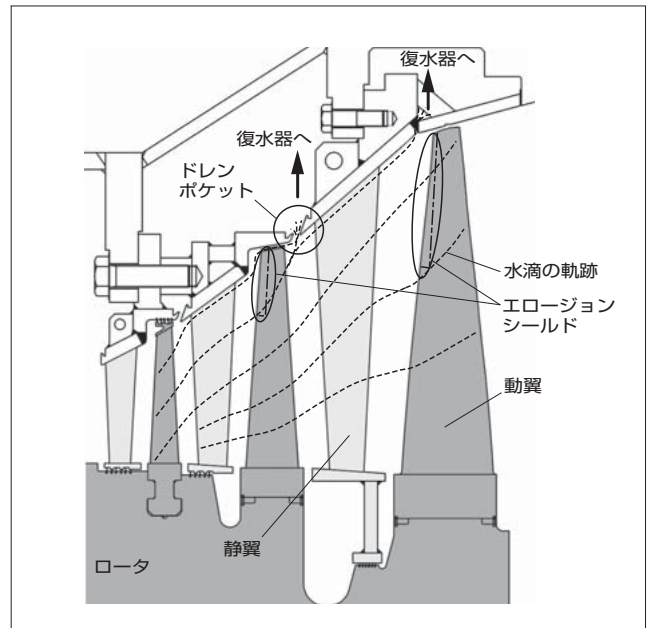


図4 ドレン除去構造

が必要である。ドレンポケットを設けてエロージョンの原因となる水滴を除去するとともに、動翼前縁部にエロージョンシールドをろう付けして保護する対策を行っている (図 4)。

2.5 スケール対策

地熱蒸気に含まれるシリカや炭酸カルシウムなどは、翼やケーシング、ロータなどの部材の表面に析出・堆積してスケールとなる。翼表面に堆積したスケールは、蒸気の通路を狭めて出力低下の原因となる。また、回転部と静止部の隙間に堆積したスケールは、部材の摩耗の原因となる。スケール対策として、蒸気タービンの入口に水滴を噴霧するブレード・ウォッシング技術を開発した。

③ 地熱タービンの性能向上技術⁽¹⁾

3.1 地熱用新世代低圧翼

低圧翼 (最終 2~3 段) は翼長が長く、また湿り蒸気中で用いられるため、過大な応力やエロージョンに耐える必要があり、開発に多大な時間と労力を必要とする。このため、低圧翼シリーズとしてラインアップし、プラントに最適な低圧翼を選定している。

地熱用新世代低圧翼は、地熱タービンの豊富な運転実績に基づいており、信頼性が高い。地熱タービンは腐食のある雰囲気中で用いられるため、応力腐食割れや腐食疲労などに対する特別な配慮が必要である。このため、新シリーズの開発では、確立された従来開発手法をベースに、三次元粘性流れ解析や FEM 解析によってプロファイル形状の高度な最適化を行うことで信頼性を確保しつつ、従来型よりも大幅な高効率化を実現した。

地熱用低圧翼列部の流れ解析例 (マッハ数分布) を図 5 に示す。翼後縁を起点とする斜め衝撃波と隣接翼背側境界

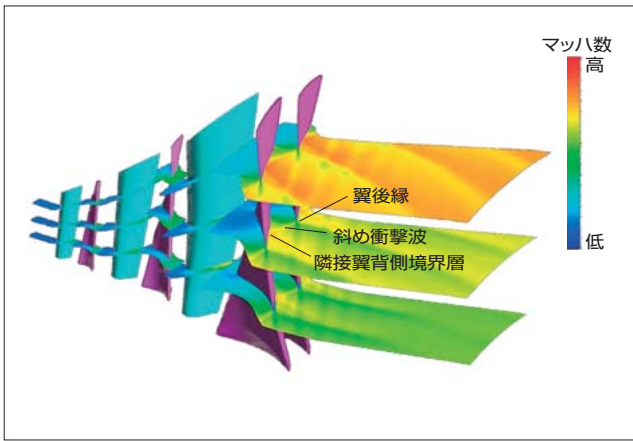


図5 地熱用低圧翼列部の流動解析例（マッハ数分布）

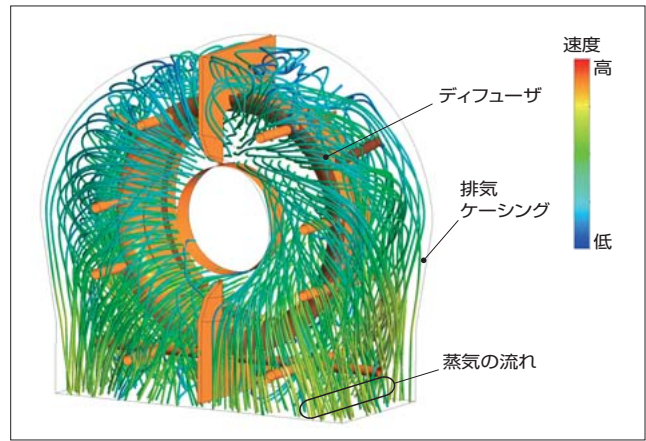


図7 地熱用排気ケーシングの三次元粘性流れ解析結果

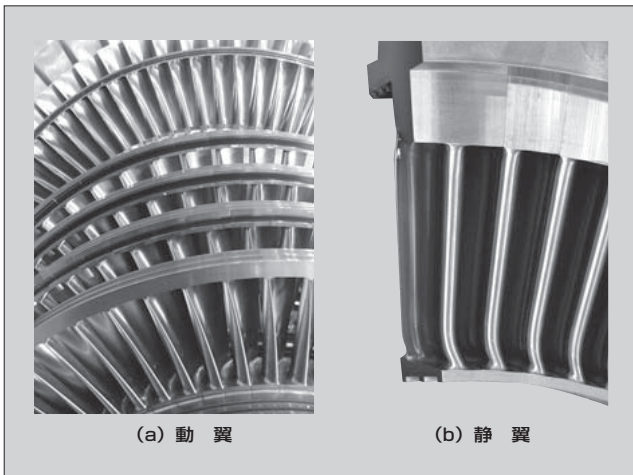


図6 高負荷高効率反动翼

層との干渉による、干渉域後流での境界層の発達が最小限に抑えられている。

3.2 高負荷高効率反动翼

低圧翼以外の翼列には、最新のねじれ翼列の設計技術を用いて、段落当たりの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动翼を適用することで、翼列効率を1～2%向上させた。高負荷高効率反动翼は1本のパー材から翼とシュラウドを一体に削り出したインテグラルシュラウド翼としており、腐食性の高い地熱蒸気に対し、高い信頼性を実現している（図6）。

3.3 高性能コンパクト型排気ケーシング

排気ケーシングは、低圧翼から排出された蒸気を減速し、復水器へ導く流路になる。低圧翼から排出された蒸気は、ロータの回転エネルギーに変換できず、もはや発電には寄与しない。さらに、排気ケーシングでの全圧損失はタービン翼列の有効熱落差を減らすため、結果としてタービンの性能を低下させる。

一般に、排気ケーシングをコンパクト化すると、流路断面積の減少によって蒸気流速が増加するため、性能上不利となる。そこで、三次元粘性流れ解析によるディフューザ

および排気ケーシングの形状の最適化を行った。これにより、従来よりも減速効果の高いディフューザ形状が可能となり、翼列の有効熱落差を増加してディフューザ流出後の全圧損失を低減することで、排気ケーシングの高性能化とコンパクト化を達成した（図7）。

4 最新の地熱タービンの特徴

2008年に運転を開始したニュージーランド・ナアワプ



図8 ナアワプ地熱発電所の全景

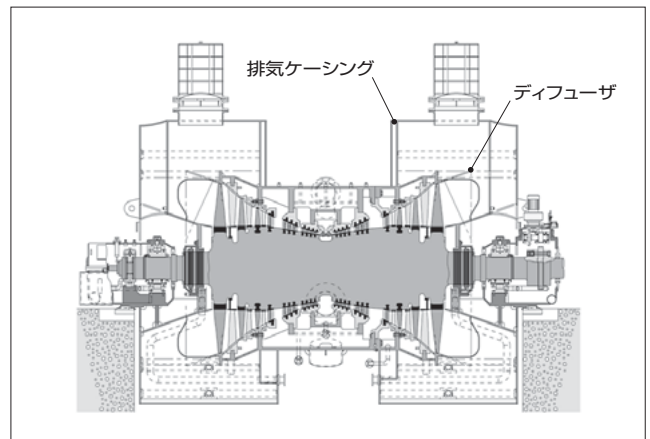


図9 NAP地熱発電所向け地熱タービンの断面図

ルア (Nga Awa Purua : NAP) 地熱発電所 (図 8) 向け地熱タービンは、最終段には地熱発電用としては世界最大クラスの 798 mm 翼を採用している。図 9 に NAP 地熱発電所向け地熱タービン断面図を、図 10 に据付け中の地熱タービンロータを、図 11 に NAP 地熱発電所向け地熱タービンの外観を示す。



図 10 据付け中の地熱タービンロータ



図 11 NAP 地熱発電所向け地熱タービンの外観

ほとんどの地熱発電プラントはシングルフラッシュ発電またはダブルフラッシュ発電であるが、NAP 地熱発電所はトリプルフラッシュ発電を採用した。蒸気を分離した後の熱水を、さらに 2 段階で減圧沸騰させてタービンの中圧・低圧部に導入する。これにより、地熱エネルギーを最大限に利用でき、最大出力 140 MW という単機容量世界最大の地熱発電設備を実現させた。本設備の開発により、第 59 回電気科学技術奨励賞、低 CO₂ 川崎ブランド 2012 の大賞など、数多くの賞を受賞した。

⑤ あとがき

地熱発電は化石燃料を消費せず、また CO₂ の発生もほとんどないクリーンな発電である。地熱発電のいっそうの発展が期待されており、地熱発電設備のトップメーカーとして、地熱タービンの信頼性と性能の向上に努めていく。

今後とも、高性能で使いやすい地熱タービンを供給できるよう、着実に開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 酒井吉弘ほか. 最新の地熱タービン. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.314-319.
- (2) 中村憲司ほか. 蒸気タービンの最新技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.3, p.201-206.



森田 耕平

蒸気タービンの基本設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場火力タービン部課長。ターボ機械協会会員。



佐藤 雅浩

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場火力タービン部。ターボ機械協会会員。



*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。