

連携記事

地熱発電の特徴と適用技術及び最近の開発動向

Technology of Geothermal Plant and Trend of Development

三菱重工業(株)
ETP事業本部 GTCC事業部
蒸気タービン技術部タービン技術G
主席T統括

浜田章裕
Akihiro Hamada

三菱重工業(株)
ETP事業本部 GTCC事業部
蒸気タービン技術部タービン技術G
G長

近岡隆英
Takahide Chikaoka

1 はじめに

地球温暖化対策や原子力発電を取り巻く情勢の変化を背景として世界的に主電源として火力発電から再生可能エネルギーへの移行が今後予想されている。

太陽光や風力といった再生可能エネルギーについては環境負荷が低いというメリットはあるものの、季節や天候などに左右されることから供給の不安定さという問題がある。一方で、地熱エネルギーは、季節・昼夜を問わず安定的に供給されるという利点があり、又、地中からの蒸気と熱水の供給源である生産井は、適切に維持・管理し継続的・計画的に開発すれば長期にわたって有効利用が可能である。

地熱エネルギーは、その蒸気と熱水を利用した蒸気タービンと発電機を中心とした発電設備で利用されることが多い。地熱資源はプレート境界に偏在しており、主に、米国、中南米、東南アジア、アフリカなどで大・中規模の地熱発電プラントが継続して活発に開発されている。日本国内においても国立公園における発電設備設置の規制緩和や電力買取制度の整備により、今後、中・小規模の地熱発電設備の導入が促進

される見込みである。

地熱発電では、火力発電と比較して使用する蒸気のエンタルピーが低く、蒸気タービン入口でほぼ飽和蒸気であり、下流での湿度も高くエロージョンが発生しやすい。又、蒸気・熱水に含まれる不純物が各種機器においてスケールの堆積や金属材料の腐食の原因となる。従って、地熱発電設備においては地熱タービンをはじめとする性能と地熱蒸気に対する信頼性の確保・向上が不可欠である。

当社は、1951年に国内において試験用の地熱発電用蒸気タービンを納入して以降、100台、3GWを超える蒸気タービンを含めた地熱発電設備を供給してきた。その歴史において蓄積した地熱発電設備に関する経験と技術から、地域により異なる地熱蒸気性状に対応するために各種腐食対策技術を開発し、プラント全体の仕様を含めて性能向上を図ってきた。

本稿では、主に中・大型の地熱タービンプラントを対象に当社がこれまで蓄積してきた知見・技術だけでなく2015年に納入したメキシコのロスアズプレス発電所 (Fig.1, 2参照)



Fig.1 The overall view of geothermal power plant (Mexico). (Online version in color.)

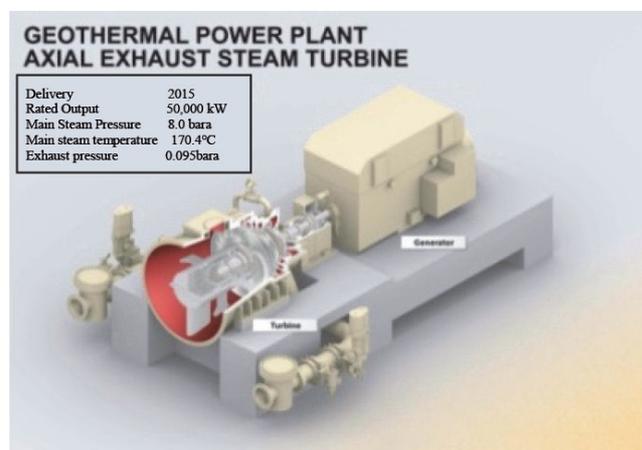


Fig.2 The bird's-eye view of steam turbine and generator for geothermal power plant. (Online version in color.)

や2019年に納入したケニアのオルカリアV発電所向けの蒸気タービンへ適用した最新の技術も踏まえ、今後の開発動向についても紹介する。

2 地熱タービンの特徴

当社が1967年に日本初の熱水卓越型地熱発電所を九州電力(株)大岳発電所に納めて以降、数多くの地熱発電所を設計してきた。その中でも地熱蒸気で直接タービンを回し発電するフラッシュサイクル型の発電プラントについてはシングルフラッシュサイクル、ダブルフラッシュサイクルの2種類の発電所がある。

シングルフラッシュサイクル (Fig.3参照) とは、熱水卓越型の生産井より噴出する気液二相流を汽水分離器に導き、ここで蒸気と熱水に分離し、分離した蒸気をタービンへ導入し、発電するサイクルのことである。なお、分離した熱水については還元井を介して地下に戻す。ダブルフラッシュサイクル (Fig.4参照) は、生産井から噴出する気液二相流を汽水分離器に導き、蒸気と熱水に分離するまではシングルフラッシュと同様の仕組みであるが、分離された蒸気は高压蒸気としてタービンへ導入し、分離された熱水についてはフラッシュャーへ導入し低圧蒸気を発生させ、その低圧蒸気をタービン

ンの中間段へ導入し発電するサイクルである。

火力タービンと地熱タービンでの大きな違いは地熱蒸気には腐食性のガスやシリカのような不純物、塩分鏽なども含まれており、この為材料の選定ばかりでなく、地熱タービンの場合においてはスケールの堆積や回転部分など細かな構造部にも注意を払わなくてはならない事である。又、これらの腐食性に加えて、前述の通り、蒸気タービン入口でほぼ飽和蒸気であることから、下流段になるにつれて湿度も高くなるため、ドレン除去技術が不可欠となってくる。

又、地熱タービンにおいては第1段落から第2段落のノズルとブレードに不純物が堆積しやすい傾向にある。不純物の堆積は、蒸気が膨張すると乾燥飽和蒸気中の溶解度が減少し、更に、蒸気の膨張が湿り域に移行する飽和ラインを越える際に起こるので、不純物は主に第1段落のノズルに析出し付着する。

加えて、地熱タービンにおいては貯蔵できない天然のエネルギー (地熱蒸気) を用いる為に、基本的にベースロード運転が望まれるが、主蒸気止め弁前の主蒸気圧力が火力と比べて低く、且つエンタルピーも低いことから、主要弁における圧力損失によるタービン全体性能への影響の割合が大きく、主要弁には圧力損失を低減する構造が求められる。

この様に、地熱タービンを設計する上では性能面に加えて

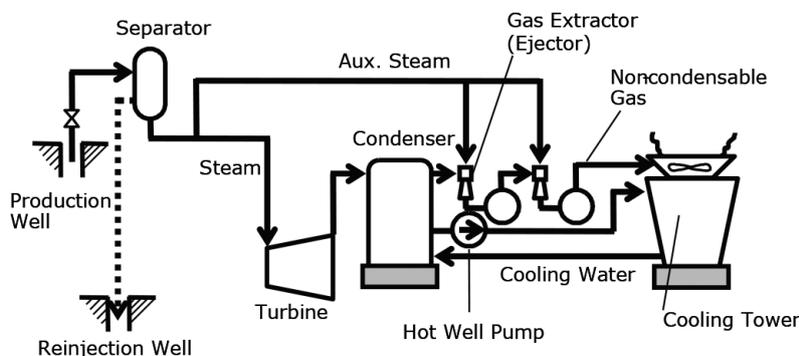


Fig.3 Outline of single flash cycle.

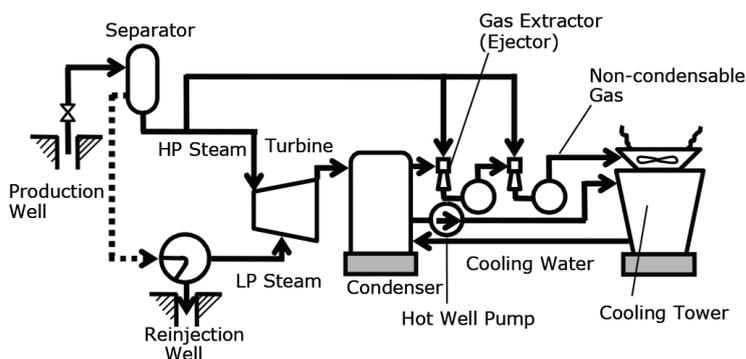


Fig.4 Outline of double flash cycle.

地熱蒸気に対する信頼性向上も合わせた両面からの設計アプローチが必須となってくる。

3 地熱発電プラントの性能・信頼性向上技術

3.1 材料の選定と要素技術

当社の地熱発電向け蒸気タービンにおける材料選定及び材料に関する研究について以下に述べる。腐食環境への耐性を念頭に地熱発電用として標準的に材料を選定している他、地熱蒸気は地域により不純物の成分やpHが異なることから、蒸気条件に合わせて適宜材料を変更する例もある。又、これらの材料は実際の地熱蒸気的环境下で各種試験を行い、その知見は強度設計における適切な安全率の設定などに活用されている。

3.1.1 地熱雰囲気下での材料試験

地熱発電向け蒸気タービンに使用する材料は、国内外のお客様のご協力の下、地熱発電所内の試験設備において実際の地熱蒸気を使用して腐食環境を再現し、試験が行われている (Fig.5 参照)。

様々な性状の地熱蒸気雰囲気下で蓄積された各材料の腐食速度や応力腐食割れ感受性、腐食疲労強度などのデータが、実際の蒸気タービンの強度設計に生かされている。

3.1.2 ロータ材

地熱タービンロータ材には次のような条件が満たされていなければならない。

- i) 耐腐食性に優れている。
- ii) 応力腐食割れ感受性が低い。
- iii) 腐食疲労強度の低下が少ない。

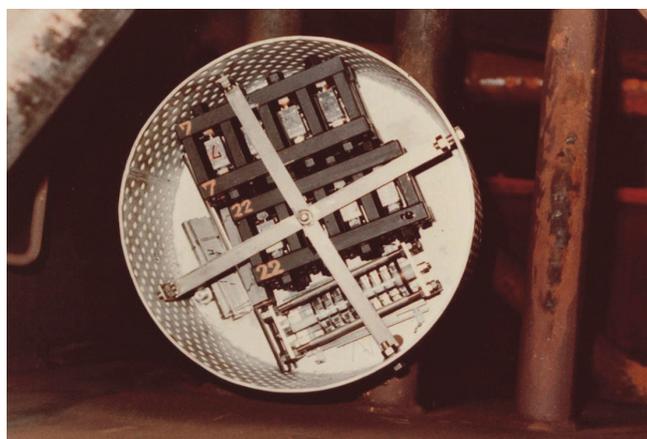


Fig.5 Examples for material testing in the actual geothermal steam environment at geothermal power plant. (Online version in color.)

これらの特性を有するロータ材として、上述する様な地熱蒸気中での各種材料試験と、実機内での応力腐食割れ試験を実施して開発された応力腐食割れに対する感受性が低い低硫CrMoV鋼を使用している。

3.1.3 翼材

動翼には17-4PH鋼及び12% Cr鋼、ノズル (静翼) には12% Cr鋼を使用している。なお、地熱蒸気に塩分が含まれる場合などは、初段動翼にチタン合金を使用することもある。

3.2 翼列設計

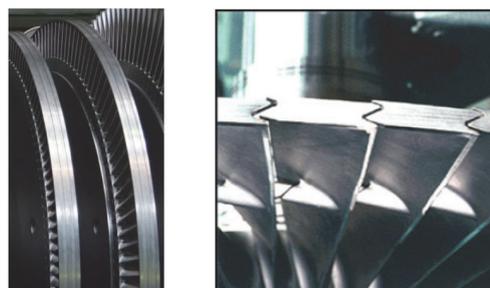
当社の地熱発電向け蒸気タービンの翼列設計における性能及び信頼性向上技術を以下に述べる。

3.2.1 翼列の組み合わせ及び翼形状の最適化

体積流量が比較的小さい上流に衝動段、体積流量が比較的大きい下流に反動段を配置した最適化により性能向上を図っている。又、スケールが堆積しやすい初段については、ノズルのピッチを比較的大きく取ることで、スケール堆積によるスロートの閉塞の影響を低減している。

上流の衝動段においては、完全3次元設計により2次流れ損失を低減した高性能ノズルを採用している。火力タービンにおいて、衝動段は概ね亜音速域で用いられることが多いが、地熱タービンにおいては主蒸気圧力が小さい一方で、翼列段数やロータ基本直径など構造上の制約により、遷音速域での設計条件となることが多い。この為、上述するオルカリアV発電所向けのタービンにおいては、この遷音速域での性能特性に着目し、性能最適化を図った衝動翼を採用し、既存の上流段翼列からの性能向上を図っている。

衝動段・反動段ともに動翼シュラウドはISB (Fig.6参照)を採用しており、シュラウドと静止部の間隙は静止部側に複数のフィンを備えたマルチシールフィンとして、動翼先端からの蒸気の漏洩による損失を低減している。又、ISBは旧式のテノンかしめでシュラウドと動翼を組み立てる方式と異な



(a) ISB of impulse blade (b) ISB of last blade

Fig.6 Outline of ISB (Integral Shroud Blade) dimension. (Online version in color.)

り、シュラウド外周の凹凸部への不純物の堆積が抑えられるので、地熱蒸気対策としても有効である。

3.2.2 湿分分離構造

前述の通り地熱発電では蒸気タービン入口でほぼ飽和蒸気であり、湿分除去による性能向上及びエロージョン低減による信頼性確保の為に湿分対策が不可欠である。

オルカリアV発電所向け蒸気タービンでは最終翼列の静翼にドレン除去を目的として、最終段2段のノズル（静翼）表面に半径方向の溝を設けている。これは、溝で捕捉した湿分を蒸気の流れ及びフローパスと排気室の圧力差で翼列外周側に排出し、最終的には車室底部から系外に排出している（Fig.7 (a) 参照）。なお、この様に表面の溝ではなく穴を半径方向に設け、そこで捕捉した湿分を翼列外周側に排出するための流路をノズル内部に設けた中空ノズルを採用している例もある（Fig.7 (b) 参照）。

動翼に付着した湿分はロータの回転による遠心力で外周に

向かって飛ばされ、仕切板の上流側及び下流側に設けられたドレンキャッチャーに捕捉され、やはり車室底部から排出される（Fig.8参照）。

加えて、上流段の各段で発生したドレンは後流段へカスケードさせ、低压段で合流させた後に排気室へ排出される（Fig.9参照）。

3.3 コーティング技術

地熱発電向け蒸気タービンにおいて、特に腐食に関する条件が厳しい箇所には部分的にコーティング等を施工し、信頼性向上を図っている。特に、3.1で述べた地熱蒸気対策として耐食性の高い材料が選定される箇所以外においては、地熱蒸気が比較的低温（蒸気タービン入口において150~200℃）であることから全体としては一般鋼材（炭素鋼など）が使用され、腐食に関する条件が厳しい箇所のみ耐食性の高い材料を適用し地熱蒸気による腐食対策が取られている。

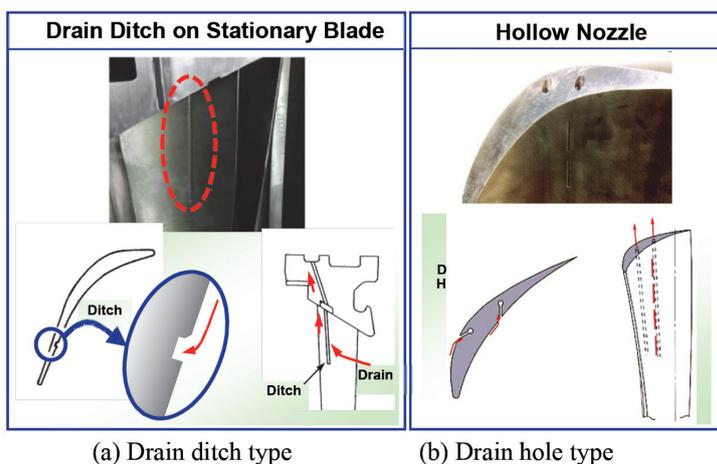


Fig.7 Schematic drawings of countermeasure of nozzle drain. (Online version in color.)

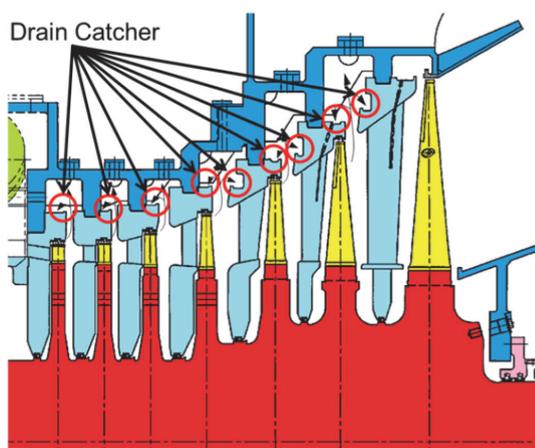


Fig.8 Schematic drawings of drain catcher mechanism. (Online version in color.)

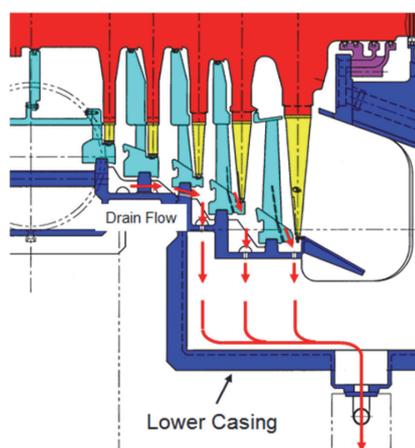


Fig.9 Schematic drawings of drain cascade mechanism. (Online version in color.)

3.3.1 翼へのステライト貼付

湿分離構造を備えていても、最終段は湿度が上がり、高速で回転する動翼は、水滴によるエロージョンを受ける可能性がある。そこで、動翼の外周側前縁にステライト材を貼り付けて動翼を保護している。蒸気や運転の条件次第では最終の2段にステライトを貼り付けることもあり、信頼性の向上を図っている。

3.3.2 ロータグラウンド部のエロージョン対策

ロータグラウンド部は、地熱蒸気だけでなく外気にも曝され、蒸気タービン機内よりもエロージョン・コロージョンが発生しやすい環境下にある。蒸気条件などを考慮しロータグラウンド部のエロージョン・コロージョンが懸念される場合は、グラウンド部にインコネルを溶射することで耐食性を向上している。オルカリアV発電所向けのロータグラウンド部にもインコネル溶射を適用している。

3.3.3 タービン静止部のエロージョン対策

蒸気条件や運転条件、蒸気タービンの内部構造などにより、車室内部や仕切板が局所的にドレンアタックや浸食を受けることが想定される場合には、当該箇所ステンレス合金の肉盛溶接もしくは板の貼り付けが施工される。ドレンアタック及び浸食を受けやすい箇所はある程度限定されており、ステンレス合金による腐食対策を標準的に施工する箇所が決まっている他、蒸気条件や運転条件次第で追加で施工する箇所もオプションで選定しており、各案件の条件や当社がこれまで地熱発電設備事業で培ってきた経験を基に施工箇所が判断される。

3.4 最終翼の長大化

ロスアズプレス発電所においては、蒸気タービンの最終翼には、60Hz地区向け地熱タービンとしては世界最長級の翼が適用されている。長大翼の適用により単流タービンを実現し、性能向上とともに設備のコンパクト化とコストダウンにも貢献している。

3.5 主要弁への適用技術

3.5.1 大口径化

前述した様に、地熱発電では火力と比べて使用する蒸気のエンタルピーが低く、主要弁の圧損によるタービンプラント全体性能への悪影響は無視できない。その為、主蒸気止め弁、蒸気加減弁にはバタフライ弁を採用し、更にはオルカリアV発電所向けの地熱タービンプラントでは、主蒸気管及び主蒸気止め弁、蒸気加減弁の大口径化を実施している。これにより、主蒸気止め弁、蒸気加減弁を通過する蒸気の流速を低減

させ、タービン入口部における圧損低減を図っている。加えて、バタフライ弁を採用するに当たり締切性を確保する必要があるため、弁軸と弁体に偏心を持たせ、全閉時に締切性を確保できる様な弁の構造設計を実施している。

3.5.2 蒸気加減弁固着防止

上述したように地熱プラントでは基本的にベースロード運転が望まれるが、蒸気加減弁の動きが継続的なフルロード運転によって阻害されてしまうと、スケールにより弁の固着を生じる可能性がある。このため、弁棒にグリースを循環する機構を設け、弁の固着を防止する機能を持たせている。

3.6 主蒸気圧力低下への対応策

地熱発電プラントでは長期間運転するうちに噴出エネルギーが減少するという傾向を示すのが一般的であり、これにより主蒸気圧力の低下を招くことがある。主蒸気圧力が低下することでタービンに流入する蒸気の体積流量が大きくなり、定格圧力を基に設計したノズル面積では定格出力を出すための十分な流量を流入させることができなくなる。この様な事象を考慮し、主蒸気圧力が低下した場合でも、出力を確保できるようにお客様要望に応じて、オーバーロード弁を設置する場合もある。オルカリアV発電所向けのタービンプラントでは、蒸気室のエリアを分割し、それぞれをオーバーロード弁で接続する構造を採用している (Fig.10参照)。

Fig.10の構造を採用することで、定格主蒸気圧力での運転に際しても、蒸気加減弁を絞るような運転にはならず弁圧損増加による性能低下を防ぐことができ、且つ、主蒸気圧力が低下しても所定の流量を流入させて出力を確保することができるメリットがある。

3.7 軸流排気タービンと直接接式復水器

ロスアズプレス発電所では、当社として初めて軸流排気タービンと直接接式復水器の組み合わせを採用している。これにより蒸気タービンの性能を向上させ地熱蒸気を有効活用するとともに、タービン建屋を最小化している。Table1に排気方向によるタービン性能と建屋高さの比較を、Fig.12に直接接式復水器の外観を示す。

4 今後の地熱発電向け技術の開発動向

当社では、地熱タービンの性能・信頼性の更なる向上の為、翼列性能の向上、地熱蒸気雰囲気適合した材料の開発、IoT・AIによる運転・保守支援など、地熱発電向け蒸気タービン特有の技術を中心に、全般的に推進していく予定である。

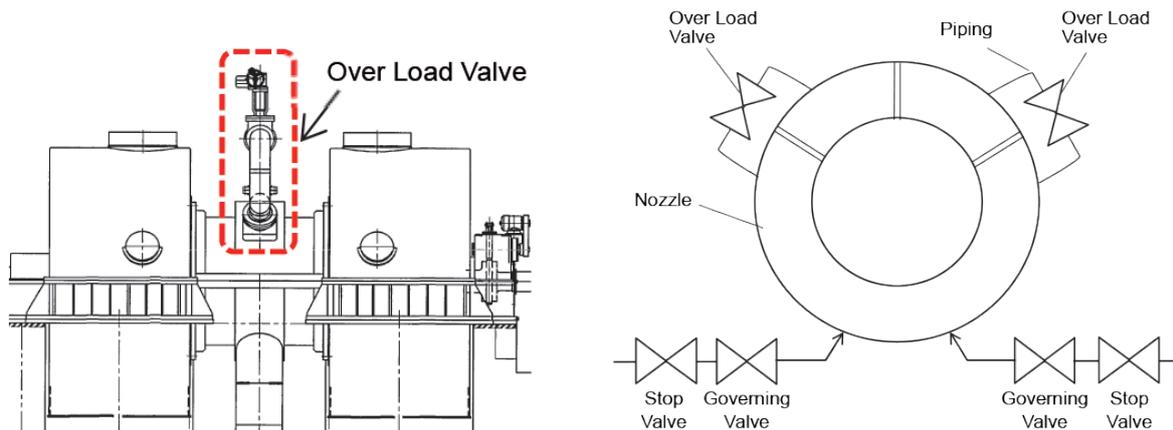


Fig.10 Outline drawing and schematics drawing of over load valve. (Online version in color.)



Fig.11 The overall view of geothermal power plant (Kenya). (Online version in color.)

Table1 Comparison table of performance and building height for each exhaust type of turbine.

Exhaust Direction	height for each exhaust type of turbine		
	Downward	Upward	Axial
Turbine Generator Pedestal	Tall	Middle	Low
Turbine House (Crane Hook Height)	Tall (Approx. FL 17m)	Middle (Approx. FL 14m)	Lowest (Approx. FL 10m)
Pressure Loss in Exhaust	~ Zero	High	Recover
No. of Exhaust Flow	Any	Any	Only 1 Flow
Condenser Installation Level	Ground Level (GL)	GL	≤GL

5 まとめ

当社はこれまで長年に渡り多くの地熱発電設備を世界各国に供給する中で、性能向上のための技術開発を継続し、地熱蒸気性状がそれぞれ異なる各地で地熱発電設備を納入した経験に基づいて信頼性向上技術を発展させてきた。

2015年に納入したメキシコのロスアズプレス発電所においては、60Hz地区向け地熱タービンとしては世界最長の最終翼を有する蒸気タービン及び軸流排気蒸気タービンと直接接触式復水器の組み合わせにより、高性能でコンパクトな地熱発電設備を実現し、これまで培ってきた腐食対策技術で信頼性も確保している。

又、2019年に納入したケニアのオルカリアV発電所においては、これまでの既存の技術に加えて、上流段翼列の最適化や主要弁の圧損低減など、更なる性能向上を図った。

今後も地熱発電向け蒸気タービン固有の技術を中心に、性能及び信頼性とも向上させるよう技術の開発を推進し、地熱



Fig.12 The externals of direct contact condenser. (Online version in color.)

資源の活用を通して世界中のエネルギーの安定供給と地球環境の保護に貢献していく所存である。

(2022年8月30日受付)