

地熱タービン

加藤 佳史(かとう よしふみ)

1 まえがき

1995年から5年間、世界中の地熱発電設備(バイナリーも含む)は容量ベースで16.6%増加し、総容量は7,974 MWに達した。⁽¹⁾一方、富士電機が製作した地熱タービンは、1995年には総容量1,253 MWであったが、2000年9月時点で1,566 MWになったので、容量ベースで25%増加したことになる。このことは、世界的規模で環境意識が高まるなかにあつて、富士電機の地熱タービンの信頼性と運転性能の高さが広くユーザーに評価された結果であると考えられる。

⁽²⁾前報では、富士電機の地熱タービンの最新技術について紹介したが、この5年の間にも、幾つかの新技术が取り入れられてきている。そこで、本稿では、まずこの5年間で採用されてきた、地熱タービンの最新技術について述べる。次に、最近運転開始した特徴ある地熱タービンについて紹介する。最後に、地熱発電の宿命として生産井の減衰の問題があるが、この問題への対応例について紹介する。

2 地熱タービンの最新技術

地熱タービンは火力用蒸気タービンから発達してきたものなので、地熱タービンの技術には火力用の新技术と共通のものも、また地熱特有の技術もある。

2.1 高性能新反動翼

新反動翼(図1)は、高い翼列効率を維持しながら、段落あたりの熱落差を大きくして、通常火力タービンの翼段数を少なくするために開発された。これを地熱タービンに採用すると、同じ段数の場合、タービン効率が約0.7%改善する。

2.2 新世代低圧翼

復水タービンの最終段落に近くなると、蒸気が排気の真空まで膨張するため、蒸気通路の急激な拡大が必要となる。このため翼長の大きい低圧翼が使われる。

新世代低圧翼は、CFD(Computational Fluid Dynamics)の進歩により開発が可能となったものである。

1980年代後半に、3,000 r/min用978 mm(38.5インチ)翼を開発して以来、現在では、あらゆる出力範囲をカバーする新世代低圧翼シリーズの開発を完了している。

最終段には、ルート近傍の反動度を改善して二次損失を減少させるように、半径方向に湾曲した静翼が採用されている(図2)。また、動翼の先端近傍のプロファイルは、いわゆる、コンバージェントダイバージェント(先細末広がり)通路を形成しており、大きな損失をもたらす垂直衝撃波の発生を抑制している(図3)。

図1 新反動翼(N1)と反動翼(T4)との効率比較

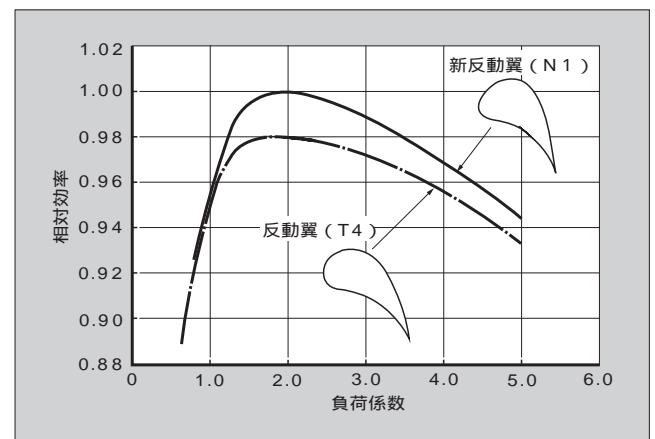


図2 最終段静翼リング



加藤 佳史

蒸気タービンの設計・開発に従事。
現在、エネルギー製作所火力設計部担当課長。

新世代低圧翼により、地熱タービンの効率は約 1.5 % 向上する。

2.3 大口径三重偏心バタフライ形止め弁

熱水卓越型地熱発電プラントでは、発電端出力の増大を図って、セパレータで高圧蒸気を分離してタービンへ導入した後の熱水を、フラッシュに入れて低圧蒸気をつくり、これをタービンの段落へ入れる方式が採用される場合がある。これをダブルフラッシュという。これに対して、低圧蒸気を使わないシステムはシングルフラッシュと呼ばれる。ダブルフラッシュの低圧蒸気は比容積が大きいので、止め弁（非常遮断弁）と蒸気加減弁は大口径であることが要求される。

従来、低圧蒸気用の止め弁としては、二重偏心バタフライ形止め弁が使われていた。しかし、二重偏心バタフライ形止め弁は、弁が全閉した際、弁体（ディスク）とシート部のくさび効果が大きくなり過ぎて、ディスクとシートとが固く密着することがあり、弁を開くときに高いアクチュエータトルクを必要としていた。

図3 最終段動翼先端プロファイルのマッハ数分布

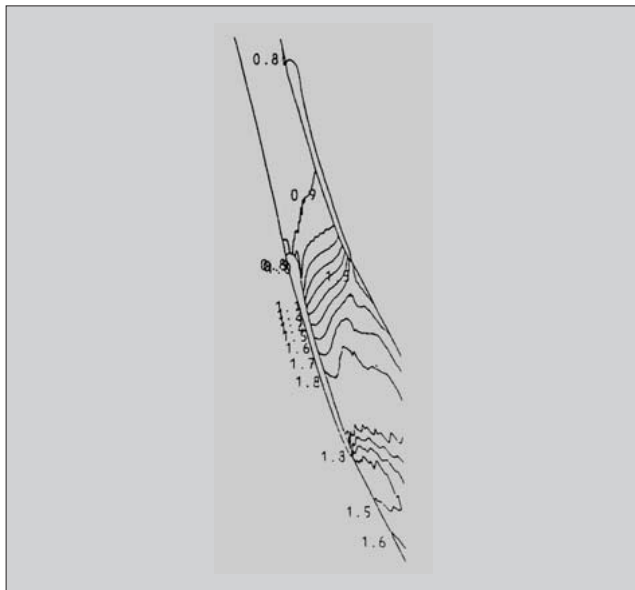
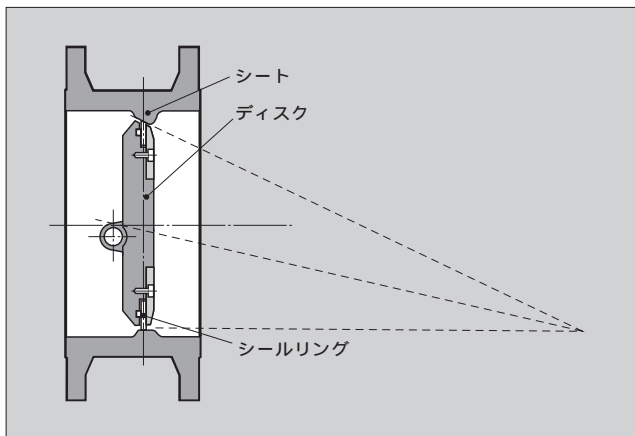


図4 三重偏心バタフライ形止め弁



三重偏心形止め弁は、シートとディスクのシール面の形状を球体ではなく、円すいを斜めに切断した形状となるようにしたところに特徴がある（図4）。弁が全閉する際、ディスクに取り付けられているシールリングは、ディスクの中に押し込まれるので、常に面接触でシールされることになる。このためくさび効果が発生しないので、比較的低いアクチュエータトルクでスムーズに開けることができる。

③ 最近の地熱タービン

最近の地熱発電市場をみると、復水タービンに限って言えば、発電容量で 20 ~ 30 MW クラスと 55 MW クラス以上のプラントが多い。出力 30 MW クラス以下の地熱タービンは、いわゆるパッケージ形（スキッドマウント形）であり、ケーシングと軸受台がスキッド（台床）上に配置され、工場で最終状態に組み立てられて、完成した状態で出荷される。パッケージ形を採用することによって、サイトでの工期が大幅に短縮される。

55 MW クラス以上は、ダブルフロー（複流）となる。通常、ロータ、ケーシング上半・下半はそれぞれ別に梱包（こんぼう）出荷されるが、パッケージ化も可能である。

ここでは、最近運転開始した、55 MW クラス以上の地熱タービンを紹介する。

3.1 ワヤンウィンド向け 110 MW 地熱タービン⁽⁴⁾

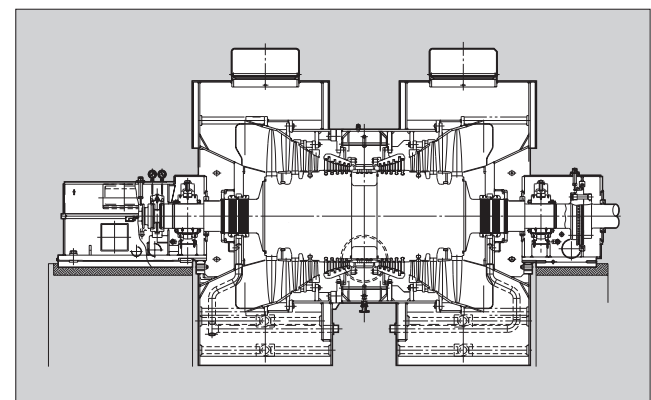
図5は、今年（2000年）の6月に運転開始した、インドネシアのワヤンウィンド地熱発電所1号タービンの断面図である。蒸気タービンは、シングルフラッシュ用、ダブルフロー、シングルケーシングタイプである。

- (1) 入口圧力：1.02 MPa
- (2) 入口温度：181
- (3) 真空：12 kPa
- (4) 回転速度：3,000 r/min
- (5) 出力：110 MW（最大 115.5 MW）

110 MW の発電端出力は、シングルケーシングの地熱タービンとしては、世界最大容量である。

シングルケーシングで 110 MW の出力を可能にさせた

図5 ワヤンウィンド（インドネシア）向け 110 MW 地熱タービンの断面図



のが、最終段翼長 697 mm (27.4 インチ) の新世代低圧翼である。最終段とその前の段の低圧動翼は、翼にレーシングワイヤのないフリースタANDINGタイプである。翼面にレーシングワイヤ用のボスや穴がないので、応力集中や蒸気中の腐食成分のたい積もない。さらに、翼面に余計なものがないので、翼の振動特性がシンプルで、その固有振動数が正確に計算できる。この特徴により、定格周波数 50 Hz の $\pm 5\%$ の変動に対しても、時間制限なしでの運転が可能である。

段落構成は複流 8 段である。第 1 ~ 5 段には反動式のインテグラルシュラウド翼が植えられる。リベッティングがないので、残留応力が発生しない。また、インテグラルシュラウド翼は振動減衰効果に優れている。

第 1 ~ 5 段の静翼は一つの静翼ホルダに植えられる。静翼ホルダは、水平二つ割で、上半下半ともそれぞれ垂直フランジでケーシングにボルト締めで固定される。上半と下半の静翼ホルダは、互いにタイトにボルト締めされる。したがって、水平フランジ合せ面での蒸気漏れ、およびこれによるフランジ面のエロージョンは生じない。

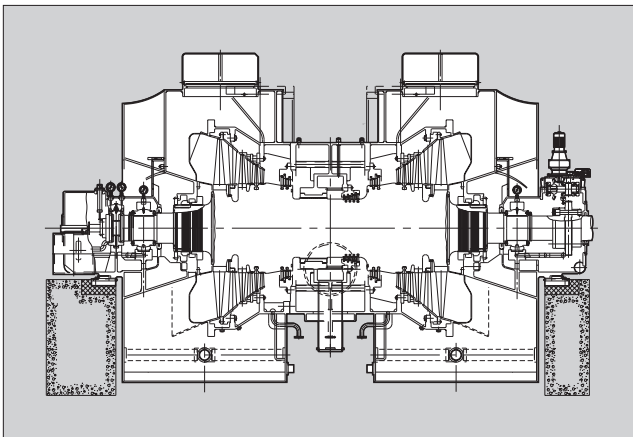
ロータは一体鍛造のドラムタイプであるため、表面に応力集中を生じさせる部分がない。材料には、通常火力に比べて Ni 含有量が少ない、CrMoNiV 鋼を使用することにより、SCC (Stress Corrosion Cracking) の発生を防止している。また、慣性重量が大きいので、運転中に何らかのアンバランスが生じてても、安定した運転を確保することができる。

ケーシングは鋼板溶接構造で、水平フランジの二つ割りタイプである。

3.2 ソルトンシー向け 58.32 MW 地熱タービン

図 6 に、2000年 8月に運転開始した、米国のソルトンシー 5号機用地熱タービン断面図を示す。このプラントでは、標準圧力蒸気 SP (Standard Pressure)、低圧蒸気 LP (Low Pressure) のほかに、さらに圧力の低い蒸気 VLP (Very Low Pressure) をタービンの段落に導入している。このような方式を、トリプルフラッシュ (TF) 方式とい

図 6 ソルトンシー (米国) 向け 58.32 MW 地熱タービンの断面図



うが、TF 方式を採用している地熱タービンは、世界でもほとんど例がない。

また、このプラントでは複圧式復水器が採用されており、タービンの二つ排気圧力はそれぞれ異なる。

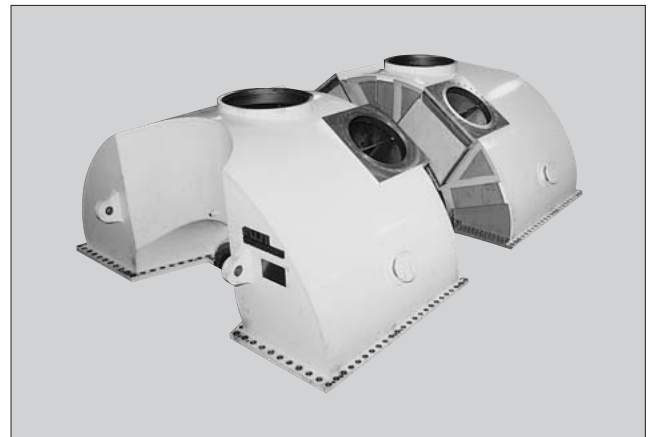
- (1) SP 圧力 : 0.86 MPa
- (2) SP 温度 : 174
- (3) LP 圧力 : 0.367 MPa
- (4) LP 温度 : 141
- (5) VLP 圧力 : 0.137 MPa
- (6) VLP 温度 : 110
- (7) 高真空 : 9.6 kPa
- (8) 低真空 : 13 kPa
- (9) 回転速度 : 3,600 r/min
- (10) 出力 : 58.32 MW (最大 64.15 MW)

SP 蒸気は一つの止め弁および加減弁を通じて、ケーシング下半のほぼ真下からタービンに入る。一方、LP 蒸気は一つの止め弁を通過後二つに分岐し、それぞれ一つの加減弁を通じて、ケーシング下半の両サイドから、タービン段落に導入される。そして、VLP 蒸気は、二つの止め弁を通過後それぞれ二つに分岐して加減弁を通過後、前後の排気ケーシング上部にそれぞれ二つずつある流入口 (図 7。なお、真上の穴は大気放出板用) を通って、タービン段落に流入する。したがって、このタービンには都合四つの止め弁と七つの加減弁が使われている。

SP 止め弁には口径 350 mm のスイングチェック弁形弁、LP および VLP 止め弁には、合計三つの口径 1,100 mm の三重偏心パタフライ形止め弁が採用されている。口径 1,100 mm のパタフライ形止め弁は、地熱タービン用としては、世界最大である。SP 加減弁は一つで口径は 350 mm、LP 加減弁は二つ、VLP 加減弁には四つの口径 750 mm のパタフライ形弁が使われている。ウッドワードガバナの信号により、SP 加減弁と VLP 加減弁は蒸気圧力を制御し、LP 加減弁は負荷制御を分担する。

段落構成は、単流 4 段と複流 5 段であり、単流 4 段と複流 2 段はインテグラルシュラウド反動翼である。最終の複流 3 段には最終段翼長 665 mm (26.2 インチ) の新世代低圧翼が使われている。

図 7 ソルトンシー向け地熱タービンのケーシング上半部



4 生産井の減衰への対応

地熱発電は地下 1,000 ~ 2,000 m にある、貯留層の高圧高温の蒸気、または熱水を蒸気源としている。通常、貯留層の周りには豊富な水源があるが、長期間にわたって一つの井戸を使用していると、蒸気源の特性が変化して圧力が低下したり、蒸気または熱水量が減少する枯渇現象が生じる。

最近の地熱発電プラントの多くは、使用後の熱水または温水を地下に還元する方法が採られている。しかし、それでも生産井の減衰が避けられないプラントもある。

そこで、この問題に対して、富士電機の地熱タービンはどのように対応できるかについて、二つの事例を紹介する。

4.1 北カリフォルニア (NCPA) 2 号機

このプラントは1983年に運転開始したが、運転開始後十数年で生産井の圧力が低下した。運転開始当初の仕様は次のとおりである。

- (1) 入口圧力：0.779 MPa
- (2) 入口温度：169
- (3) 蒸気流量：107.65 kg/s (ガス分 0.4%)
- (4) 真空：10.2 kPa
- (5) 段落構成：2 × 8 段
- (6) 回転速度：3,600 r/min
- (7) 出力：55 MW (最大 63.95 MW)

生産井の圧力低下により、発電端出力が低下したため、タービンの改造を行った。改造後の仕様は次のとおりとなった。

Phase

- (1) 入口圧力：0.572 MPa
- (2) 入口温度：157
- (3) 蒸気流量：124 kg/s (ガス分 0.4%)
- (4) 真空：10.2 kPa
- (5) 段落構成：2 × 8 段

表 1 NCPA 2号機の改造部品と改造内容

改造部品	改造内容
翼	第1~5段の動翼、静翼および静翼リングを新製
ロータ	旧品使用。第1~5段翼溝追加加工
主 弁	止め弁、蒸気加減弁のサイズアップ、新製
蒸気ストレーナ、主蒸気配管	サイズアップ
ガバナ	加減弁アクチュエータ改造

表 2 バリンピノン 地区の地熱タービン仕様

項目 プラント	定格出力 (MW)	ユニット数 (台)	主蒸気圧力 (MPa)	主蒸気温度 ()	排気圧力 (MPa)	段落数 (段)	主蒸気流量 (kg/s)
ナスジ	20	1	0.57	162	0.0137	8	43.89
オコイ	20	1	0.77	174	0.0127	9	40.56
ソゴンゴン	20	2	0.57	162	0.0137	8	43.89

- (6) 回転速度：3,600 r/min

- (7) 出力：55.6 MW

このプラントの場合、生産井の圧力は低下したが、発生蒸気量が増えたので、発電端出力は運転開始当初より大きくなった。

改造に際してケーシングと軸受台は旧品をそのまま使用した。また、ロータは旧品を改造して使用した。すなわち、複流 3 段の低圧翼はそのまま残して、複流 5 段の翼列を Phase の仕様に従って、新たに設計した動翼と交換した。主な改造部品と改造内容を表 1 に示す。

なお、この改造では将来さらに生産井が減衰することを想定している。将来予想される仕様は次のとおりである。

Phase

- (1) 入口圧力：0.434 MPa
- (2) 入口温度：143
- (3) 蒸気流量：124 kg/s (ガス分 0.4%)
- (4) 真空：10.2 kPa
- (5) 段落構成：2 × 7 段
- (6) 回転速度：3,600 r/min
- (7) 出力：51.4 MW

Phase では、蒸気流量が一定のまま生産井圧力が低下するので、発電端出力は Phase の 55.6 MW から 51.4 MW へと減少する。

Phase から Phase に対応するための工事は、タービンの第 1 段静翼と動翼を削除するだけなので、わずかな改造費用で出力の回復ができる。

4.2 バリンピノン

新設時から、北カリフォルニア 2 号の Phase から Phase への移行と同様な計画のもとに製作されたのが、フィリピンのバリンピノン 地区で1993年から1994年までの間に相次いで運転開始した、ナスジ 1 台、オコイ 1 台、およびソゴンゴン 2 台の合計 4 台の地熱タービンである。三つの地熱発電プラントのタービン仕様を表 2 に示す。

タービン入口圧力は、オコイが他の 2 プラントより高く、また、翼の段数構成もオコイは他のプラントのタービンより 1 段多い。これは、将来オコイの生産井圧力が低下した場合に、第一段の静翼・動翼を削除することにより、蒸気量を増大して、発電端出力を維持するための対応である。第一段の削除により、これら三つのプラントのタービンロータは共通のものとなり、オーバーホールに際しては、予備ロータを交互に入れ替えて使用することが可能となる。

図8 パリンピノン 地区の地熱タービン翼列・ロータ

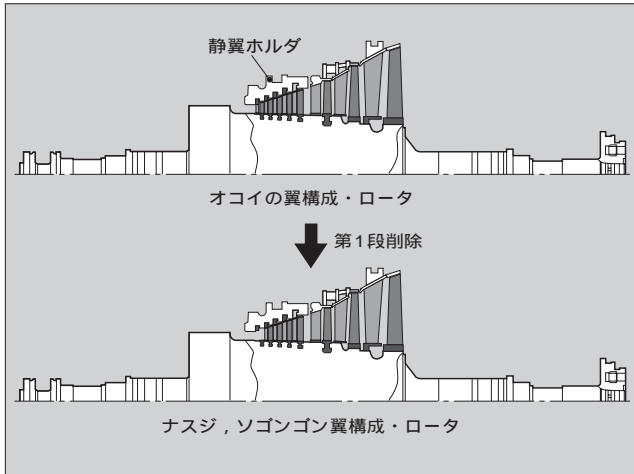
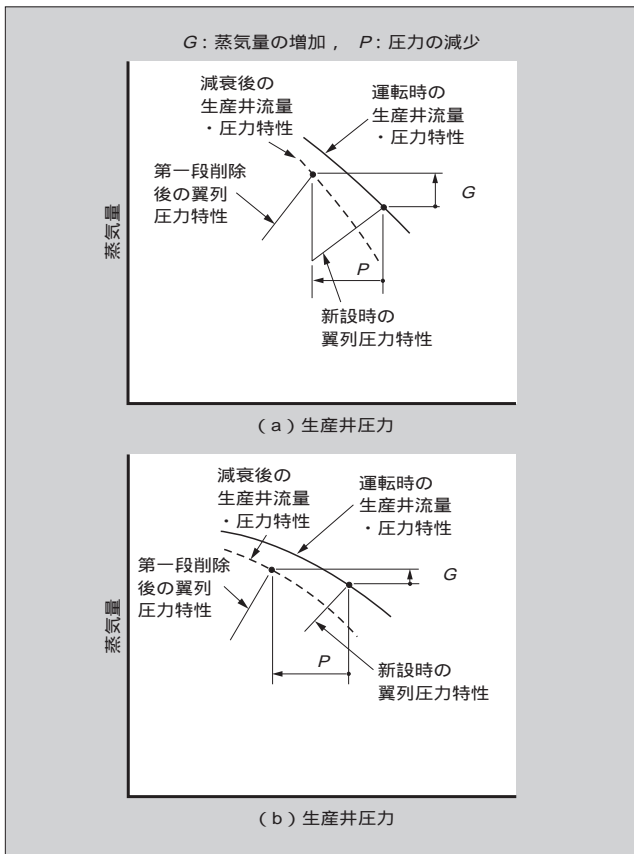


図9 生産井の減衰とタービン翼列圧力特性



4.3 生産井の減衰に対する反動タービンの利点

すでに2例を紹介したように、富士反動式地熱タービンは、生産井が減衰した場合、1段または（圧力低下がさらに進んだ場合）複数段の静翼と動翼を削除することによって対応することができる。これにより、改造にかかわる工期と費用が大幅に削減される。

生産井の減衰に静翼と動翼の削減だけで対応できるのは、反動式タービンの次の特徴によるところが大きい。

- (1) ロータがドラム形状である。
- (2) 段落あたりの熱落差が小さい（衝動式の約半分）。

4.3.1 ドラムタイプのロータ

反動式タービンのロータはドラム形状なので、動翼を根元から削除しても円盤摩擦損失やベンチレーション損失は発生しない。また、低圧翼以外のすべての静翼は、通常、一つの静翼ホルダに植えられるので、根元から削除すれば蒸気の流れを乱すことはない（図8）。

4.3.2 段落あたりの熱落差が小さい

反動タービンは段落あたりの熱落差、したがって圧力差が比較的小さいので、生産井の減衰に対応しやすい。図9に生産井の圧力特性を示す。

生産井の圧力特性が、図9(a)の場合には、圧力の低下に見合う蒸気量の増加が得られるので、段落あたりの圧力差が大きくても、1段削除によるタービン入口蒸気量の増加によって、出力はある程度維持される。

しかし、図9(b)のように圧力が低下しても蒸気量が十分増加しない場合、段落あたりの熱落差が大きいと、第一段を削除してもタービン入口蒸気量が増えてこないのので、発電端出力は低下し、改造工事の経済効果が薄れてしまう。

5 あとがき

地熱発電は化石燃料を消費せず、また二酸化炭素の発生もほとんどないクリーンなエネルギー源である。地球環境の維持がクローズアップされているなかであって、他の代替エネルギーとともに、大きな伸びが予想される。今後とも、不断の技術開発によって、地熱発電の発展に貢献していきたい。また、本稿が地熱発電関係者のご参考になれば幸いである。

参考文献

- (1) Hutterer, G. W. : The Status of World Geothermal Power Generation 1995-2000, Proc. World Geothermal Congress 2000, p.23-37 (2000)
- (2) 加藤佳史・和泉栄：地熱発電用蒸気タービンの最新技術，富士時報，Vol.68，No.10，p.576-583（1995）
- (3) 酒井吉弘ほか：蒸気タービンの新世代低圧翼の開発，富士時報，Vol.65，No.11，p.706-712（1992）
- (4) Murakami, H. et al. : Construction of the Largest Geothermal Power Plant for Wayang Windu Project, Indonesia, Proc. World Geothermal Congress 2000, p.3239-3244 (2000)
- (5) 斉藤象二郎：地熱発電の現状と課題，地熱エネルギー，Vol.25，No.3，p.16-27（2000）



*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。