

地熱バイナリ発電システム

Geothermal Binary Generating System



福田 憲弘^{*1}
Norihiro Fukuda

香月 紀人^{*2}
Norito Katsuki

緒方 寛^{*3}
Kan Ogata

齊藤 象二郎^{*4}
Shojiro Saito

星 信行^{*5}
Nobuyuki Hoshi

岩井 弘二^{*6}
Koji Iwai

当社の地熱発電事業はあらゆる市場・お客様のニーズに対応すべく、従来型の大規模フラッシュ発電方式に加えて小規模バイナリ発電システムをラインアップに揃えている。このバイナリ発電システムは、バイオマスや排熱回収にも適用可能である。本報では、地熱発電におけるバイナリ発電システムのメリットや熱システム特性、当社グループ会社である Turboden 社(イタリアのバイナリ発電システムメーカ、バイオマスを中心に約 250 基のバイナリ発電システム納入実績あり)の技術について紹介する。

1. はじめに

地熱エネルギーを発電として利用し始めた起源は 1904 年、イタリアのラルデレロにおいて自噴する過熱蒸気を利用して 3/4 馬力の発電を行ったこととされている。それ以降、化石燃料に頼らない自然にやさしいエネルギー源として世界各地で地熱発電の導入が進み、2010 年時点で世界で約 11GW の発電容量を有するにいたっている⁽¹⁾。一方日本国内では 1990 年代までに 500MW 程度まで導入が進んだものの、1999 年に八丈島地熱発電所が運用開始されて以降導入が進んでいないのが現状である。理由は様々であるが、発電に適した地熱源の多くが国立公園内であり、大規模地熱発電設備による環境負荷(土地の造成、地熱蒸気排出による環境・景観変化)が一因とされている。昨今この側面にも活発な議論がなされ、2012 年3月には“地熱開発の行為が小規模で風致景観等への影響が小さいものや既存の温泉水を用いるバイナリ発電システム”について、条件付ではあるが国立公園内(第二種、第三種、普通地域)での開発を認める通知が発表されている⁽²⁾。また、2012 年より始まった国の“再生可能エネルギー固定価格買取制度”では、15MW 未満の地熱発電からの買取価格は 42 円/kWh と設定されており、今後国内でも小規模バイナリ発電設備に対するニーズは高まっていくものと期待される。以下ではバイナリ発電システムについて概説するとともに当社の取組みについて紹介する。

2. 地熱発電の特徴

2.1 地熱熱源

地熱とは文字通り地球の発する熱であり、その源は地球内部での放射性物質の崩壊熱であるとされる。その膨大なエネルギーは、地球上のごく一部の場所、例えば火山の噴火という形でそ

*1 技術統括本部長崎研究所 主席研究員

*2 技術統括本部長崎研究所

*3 技術統括本部長崎研究所 主幹研究員

*4 エネ環ドメイン火力発電システム事業部エンジニアリング本部電力 PJ 総括部 主幹技師

*5 エネ環ドメイン火力発電システム事業部エンジニアリング本部電力 PJ 総括部電力プラント技術部 主席技師

*6 エネ環ドメイン火力発電システム事業部エンジニアリング本部電力 PJ 総括部地熱プロジェクトグループ グループ長

の威力を観察することができる。しかしながら、通常我々はそのエネルギーを直接的に利用することができず、水(地下水)を介して間接的に利用している。地表から染み込んだ地下水は地下で地熱により加熱され、比較的浅い部分のものは地表に噴出し、時には温泉として直接利用される。一方で、より深部(おおむね 1000m 以上)にまで到達した地下水はキャップロックと呼ばれる固い地層に蓋をされるような形で高温・高圧となって地下に滞留する場合がある。これが地熱貯留層と呼ばれるもので、その大きさ、地表からのアクセスのしやすさによって、地熱発電の適地が選定される。このように一般的な地熱発電は、地熱熱源と水循環サイクルが揃うことにより可能となるものであり、その探索・開発に時間を要し事業リスクが伴う。近年では地表より水を注入することにより地熱貯留層を人工的に構築する高温岩体発電についての研究開発も進められている。

2.2 フラッシュ地熱発電システム

掘削により一旦地表まで導き出した地熱水は、蒸気と熱水の比率により大きく“蒸気卓越型”と“熱水卓越型”に分類することができる。蒸気卓越型の場合、地表へ上昇するまでの過程で蒸発を完了してしまうため、取り出した蒸気でほぼそのまま蒸気タービンを駆動することができる。そのため設備が簡単であり、初期の地熱発電システムはこのタイプのものであった。しかしながら、このような都合の良い地熱源はまれであり、世界で実際に稼動している地熱発電設備のほとんどは熱水卓越型である。

典型的な熱水卓越型地熱利用発電システムとして、フラッシュ地熱発電システムの概略系統図を図1(a)に示す。熱水卓越型の生産井を利用した地熱発電技術はニュージーランドで初めて開発され、1958年にワイラケイ地熱発電所に実適用された。この成功を受けて、当社は九州電力(株)と共同で、熱水卓越型生産井を利用する地熱発電設備の開発に着手した。地熱流体の化学分析を行い、地熱蒸気雰囲気下でタービンなどの主要機器の材料試験を実施して、材料選定の基礎とした。また、セパレータ、直接接触式復水器、二相流輸送配管、ガス抽出器などの地熱発電所に必要な主要機器の特性に関する解析、並びに検証試験を行い、機器設計の基礎データを蓄積した。これらのデータを基に出力 11MW の九州電力(株)大岳発電所が設計、建設され、1967年に、日本初の熱水卓越型地熱発電所として運転を開始した。その後、性能、経済性、並びに信頼性を向上させる様々な技術を開発、適用しながら、日本を含む世界 13 カ国に計 103 台、出力にして 3108MW の地熱発電システムを供給してきた。

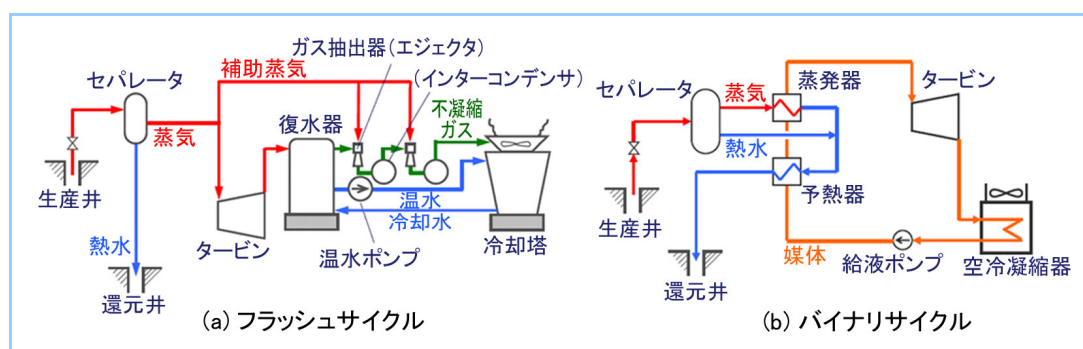


図1 典型的な地熱発電システムの系統図

2.3 バイナリ地熱発電システム

典型的なサイクル系統図を図1(b)に示す。バイナリ発電システムは地熱流体を熱交換器に導入、二次サイクルの作動媒体を蒸発させてタービンを駆動する間接発電方式である。主な特徴は表1に示すとおりであるが、以下に少し解説を加える。

- (1) 地熱流体の全量還元: 地下から出たものを地下へ還す、という地域内のマスバランスの保持の観点のみならず、地熱発電所のシンボルともいえる立ち上る白煙(水蒸気)も発しないため、周辺環境(森林等)への影響、また風致景観上の影響が少ない。
- (2) 作動流体の取扱い: 一般的な性質として作動流体は対環境上のリスクを含むものが多い。

よく使われるものとして代替フロンはオゾン層破壊係数，地球温暖化係数に対する考慮が，また炭化水素系媒体の場合には適切な消火設備の配備が必要となる。この場合システムには特別なリーク対策を施す必要がある。

- (3) 腐食・スケール対策:フラッシュ発電システムの場合，タービンも含めほぼすべての系統を地熱流体(蒸気，熱水，不凝縮ガス)が通過するため地熱流体の性状に応じた腐食対策，不凝縮ガス対策を講じる必要があるが，バイナリ発電システムの場合地熱水は熱交換器で作動媒体に熱を渡すため，基本的に熱交換器までの系統においてのみ地熱流体を考慮した対策を行えばよい。ただし熱交換器伝熱管におけるスケールは直接性能に影響を与えるため注意が必要である。
- (4) 冷却方式:一般的に地熱発電所が建設される地域はタービン復水のための冷却水の入手が困難な地域であることが多い。フラッシュ発電システムの場合，地熱蒸気の凝縮水を冷却水の補給水として使用することができるが，一方でバイナリ発電システムの場合はそれが利用できない。そのためバイナリ発電システムでは空冷凝縮器が用いられるが一般的に水冷に比べて大きな構造物となり，その結果バイナリ発電システムの構成機器の中でも最も大きな構造物となってしまうことがある。そのため初期導入費用のほか，補機動力(空冷凝縮器のファン動力)を考慮して適切に設計する必要がある。
- (5) 体積流量が小さい:二次サイクルとして低沸点媒体を使用する場合，凝縮圧力は水蒸気より高く設定できるため体積流量は小さく，タービンはコンパクトに設計できる。

以上のように，バイナリ発電システムは利点，欠点もあわせ持つため，一概にフラッシュ発電システム，バイナリ発電システムのどちらが優れているか，ということを断定することはできない。重要なのは，それぞれの地点において，経済性，環境性を考慮し個別にケーススタディを行った上で，最終的に導入システムを決定することである。

表1 地熱発電サイクルの特徴

項目	フラッシュサイクル	バイナリサイクル
特徴	・大出力 ・高効率(ダブルフラッシュ)	・100%還元可能
作動流体	・地熱蒸気 ・可燃性などなし	・フロン，炭化水素等 ・温暖化やオゾン破壊(フロン系)，可燃性(炭化水素)に留意
単機容量	～数百 MW (大容量発電所)	～数十 MW (小容量)
タービン 腐食	・腐食対策要	・対策不要 ・低グレード材料適用可能
スケール (対策)	・タービン一段ノズル(タービン洗浄装置) ・還元ライン(pH 調整等)	・予熱器伝熱面、還元ライン(pH 調整等)
冷却方式	・湿式冷却塔 ・白煙あり	・空気冷却凝縮器 ・白煙なし

3. バイナリ発電システムの仕組み

“バイナリ”の語源をひも解くと“2つの”という意味合いがあり，フラッシュ発電システムのように熱源を直接利用する方式に対して二次流体を使用したシステムを指す。二次流体としては一般的に低沸点媒体を使用することが多いが，代替フロンも含めて有機化合物がほとんどであるので，この二次サイクルは一般的な呼称として ORC (Organic Rankin Cycle)と総称される。以下では，ORC サイクルの仕組みと特徴について概説する。

3.1 ORC サイクル作動媒体

ORC サイクルの作動媒体としては，作動温度域(熱源温度～大気温度)において常識的に取り扱える範囲の蒸気圧を持つ物質であれば原理上は何を持ってきても良い。ただし実際には様々な観点からの制約があり，実質的に使用可能な作動媒体は限られたものとなる。作動媒体選定に当たっての主なポイントとしては以下のような点がある。

- ①サイクル特性(発電効率)
- ②取り扱いやすさ(安全性, 安定性, 環境性を含む)
- ③経済性

以下ではサイクル特性の観点から作動媒体の選定方針について議論するが, たとえサイクル特性が優れた物質があるからといっても取り扱いやすさや経済性を無視したものであると長期運用という観点からは採用が難しい。最終的にはサイクル特性に加えて上記に述べたようなポイントをバランスよく考慮した上で媒体の選定を行う必要がある。

3.2 ORC サイクル特性

サイクル特性を評価するためにはT-h線図で考えるのが分かりやすい。例として, 図2に示すような単純化した熱源側の熱交換器モデルを考える。ここでは議論を簡単化するため, 熱源として潜熱を持たず顕熱のみを有する熱源を想定している。地熱発電の場合, 蒸気を含まない熱水のみが熱源がこれに相当するが, 地熱源以外(例えば工場排熱回収)では, 排ガスを熱源とする排熱回収もこれに相当する。

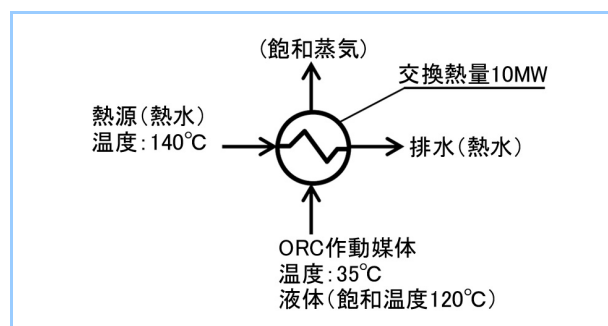


図2 ORC サイクルの熱交換器モデル

例としてブタンと水について T-h 線図を比較した結果を図3に示す。横軸は各流体の比エンタルピー(J/kg)に流量(kg/s)をかけた熱量(単位はW)である。ただし流量は交換熱量をあわせるためにヒートバランスから求めるため, 各ケースでそれぞれ熱源の流量は異なる。熱交換過程において, 熱源流体は放熱とともに温度を下げていくが, サイクル流体側の蒸発開始点が制約(ピンチポイント)となりサイクル出口温度が決まってしまう。幾何学的考察からも分かるように, 水のように全交換熱量に占める潜熱の比率が大きいと熱源出口温度は高くなり, 熱交換が不十分なまま排出されてしまう。一般的に潜熱の比率は動作温度(圧力)がその媒体の臨界温度(圧力)から離れるほど大きくなる。

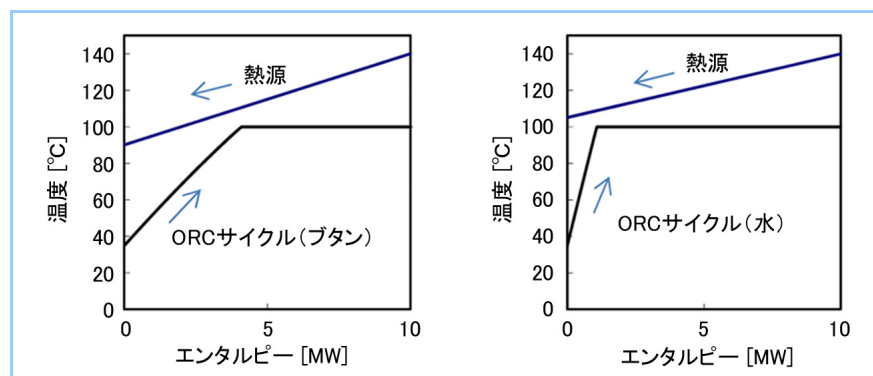


図3 ブタンと水の T-h 線図の例

具体的に ORC サイクルの凝縮温度を 35℃と仮定した場合の潜熱の比率の試算結果を図4に示す。同図には ORC サイクル媒体として一般的に使われるイソブタン(i-butane), ノルマルペンタン(pentane), R245fa のほか, 比較のために水(water)を記載した。各媒体ともそれぞれの臨界温度付近で潜熱の比率が急激に0に落ち込む特性が確認できる。

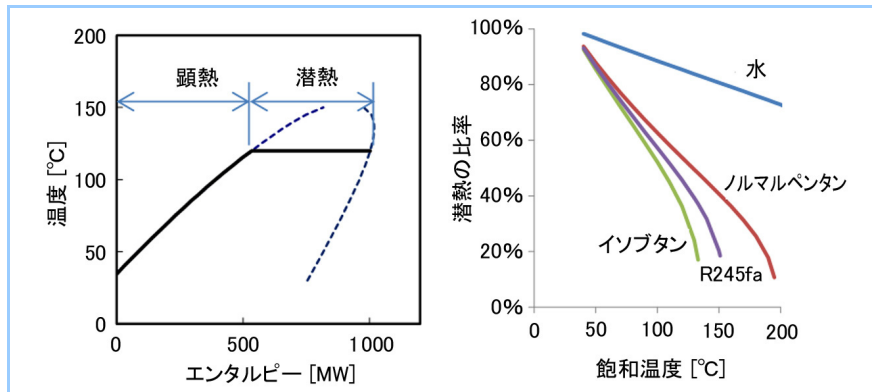


図4 ORC における潜熱の割合

潜熱の比率は(潜熱)/(顕熱+潜熱)で定義される。

以上は顕熱熱源という単純な熱源を想定した議論であり ORC サイクルの潜熱の比率を比較的自由に設定することが可能であったが、一方で実際の地熱熱源には坑底温度が高く蒸気・熱水の二相流で噴出してくるものもあり、この場合は熱源の潜熱の比率にあわせて ORC サイクルの潜熱の比率をマッチングさせる必要が出てくる。また地熱熱源によっては熱水中のシリカ濃度が高く、スケール析出抑制の観点から還元温度に制約があることも少なくない。このように地熱熱源の性状によって制約条件が大きく異なるため、それぞれの熱源にあわせた最適化が重要である。

3.3 熱交換過程でのエクセルギーロス

ORC の経済性を左右するひとつの要因として、ここでは熱交換過程で発生するエクセルギーロスについて再び図2の熱交換器モデルを用いて考察する。熱源側が放出する熱量と受熱側が受け取る熱量はエントロピーを用いて次式により表される(以下便宜的にエントロピーは相対値とし、物質ごとに最も低い温度の状態のエントロピーを0と定義する)。

$$(\text{放熱側}) \quad Q_1 = \int_0^{S_1} T_1 dS \quad (1)$$

$$(\text{受熱側}) \quad Q_2 = \int_0^{S_2} T_2 dS \quad (2)$$

ただし、添え字1を熱源側、添え字2を ORC サイクル側とし、 Q (kW):熱量、 G (kg/s):流量、 T (K):温度、 S (kJ/sK):エントロピー(ただし比エントロピーと流量の積で定義)である。

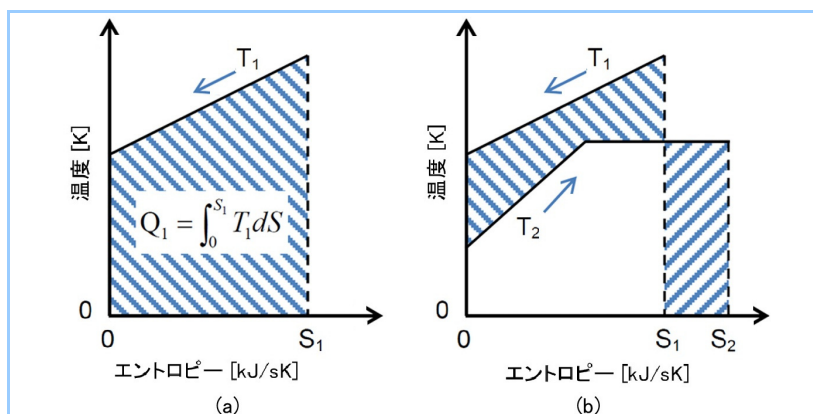


図5 エクセルギー損失の概念図

(b)においてエントロピー増分($S_1 - S_2$)に対応したエクセルギーロスが発生する。

この熱交換過程を模式的に示したものが図5である。(1)式の Q_1 は、幾何学的には区間 $[0, S_1]$ において動作温度曲線と横軸(絶対0度)の間で囲まれた面積と等価である。放熱ロスがないとすると $Q_1 = Q_2$ であり $T_1 > T_2$ を考慮すると $S_1 < S_2$ である。両者を重ねて書くと、図5(b)に示すようにに斜線部の面積が同じになるように S_2 は右に(高エントロピー側)にはみ出す。これが熱交換過程におけるエントロピー増加の直感的な捉え方である。ORC サイクル全体としては、この他、タービンで

のエントロピー増加分、凝縮器でのエントロピー増加分等を加えて、最終的に外系へ放出される。この一連のサイクルは熱力学的に解釈すると以下のようなものである。すなわち、高温熱源の熱を低温熱源(温度を $T_L(K)$ とする)へ移行する過程において、理想的(可逆過程)に取り出しうる物理的エネルギーのうち、 $T_L(S_2 - S_1)$ 分だけエントロピー増大分として熱エネルギーへ転換している(捨てている)ことになる。これがいわゆるエクセルギーロスである。図5の熱交換器モデルに立ち返ると、エクセルギーロスを減らすためには放熱側と受熱側の温度差を小さくする必要があるが、一方で、温度差を小さくすることは熱交換器の伝熱面積を大きくする必要がありコスト増大につながる。バイナリサイクル設計に当たっては、各機器でのエクセルギーロスとコストとのバランスをにらみながら適切な温度プロファイルを決定していくことが重要となる。

3.4 タービン出口湿度

水と低沸点媒体ではタービン出口の湿度に対する特性が大きく異なる。図6には例として a)水、b)ペンタンについてのランキンサイクル(T-s 線図)を例示する。同図は動作温度として、高温(120℃)、低温(35℃)とした場合の例である。なおここでは簡単化のためタービン損失を0としているので、実際のサイクルでの断熱膨張線は垂直ではなく少し右にはみ出すような形となる。水のT-s線図は蒸気側の裾野(蒸気側飽和線の低温側)が大きく右に張り出しており断熱膨張後は湿度領域に入るため、効率低下や液滴によるエロージョン等弊害が発生するとはよく知られている。一方でペンタンに代表されるような b)の媒体は乾き領域に入っており好ましいと思えるが、一方でタービン出口での過熱度が高く凝縮器へ捨てる熱量も多くなってしまう。この場合、熱源条件次第ではあるが給液加熱器を付加して過熱分の熱量を回収する場合もある。

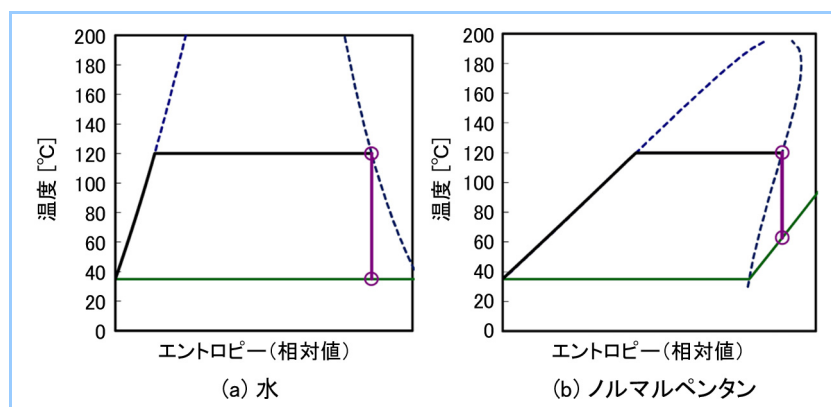


図6 タービン出口の湿度

3.5 バイナリ発電システム設計に際しての留意事項

以上、ORC サイクルについての一般的な特性を述べたが地熱バイナリ発電システムへ適用する際にはいくつか留意すべき点がある。

- (1) 地熱水性状によってシリカ過飽和となっている場合、スケール析出による配管の閉塞及び熱交換器の性能低下に気をつける必要がある。スケール生成速度は、熱水中シリカ濃度、pH、温度によって大きく変化する。そのため必要に応じて pH 管理(薬剤の注入等)、地中還元時の還元温度管理等、スケール析出防止に対する処置を講じることが重要である。なおこの場合先にも示したようにサイクル出口温度が制約されることがあるので、ORC サイクル設計時に考慮しておく必要がある。
- (2) 環境との接点を担う熱交換器、特に熱源側(予熱器、蒸発器)は地熱水と接触する部分であり腐食に関する慎重な注意が必要である。地熱水性状は場所によって千差万別でもあるので、それぞれの熱水性状を十分に調査した上で、コストも考慮して適切な材料を選定していく必要がある。なお熱交換器以外の ORC サイクル構成機器は地熱水と接触する機会はないが、場所によっては硫化水素等腐食性ガス雰囲気の場合もあり、その濃度に応じた腐食対策を施す必要がある。

4. 地熱バイナリ発電システム開発への取り組み

日本国内の市場ニーズに早急にこたえるため、イタリアを拠点としている ORC 専業メーカーである Turboden 社と共同で製品化に取り組んでいる。1980 年に創業した Turboden 社は、これまでにバイオマスを中心として 250 基近い ORC システムを納入した実績がある。また近年では欧州内で表2に示すような地熱バイナリ発電システム(最大 5.6MW)を納入している。このうちオーストリアの 1000kW システムは納入以来 10 年を越えて安定して稼動を続けており、システムの信頼性の高さを物語っている。地熱バイナリ発電システムの構成概念図を図7に示す。熱源の一部は熱供給として地域供給も可能であり、また凝縮システムは空冷、水冷から選択、組合せ設計が可能である。例としてドイツでの既設バイナリ発電システムの概観を図8に示す。本プラントは熱水熱源を用いた出力 5.6MW の発電設備である。

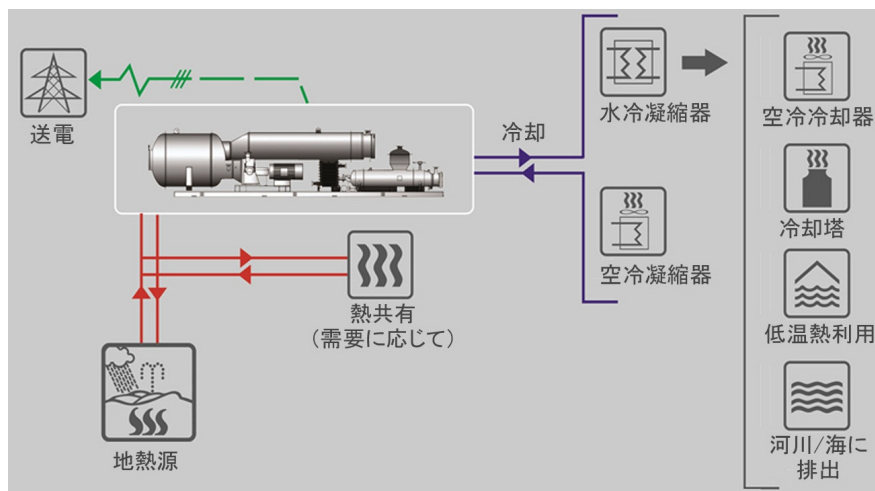


図7 地熱バイナリ発電システムの構成概念図

表2 Turboden の地熱発電システムの納入実績

国名	発電容量	備考
オーストリア	1000kW	2001 年運用開始;熱併給
フランス	1500kW	2008 年運用開始;発電専用
ドイツ	200kW	2009 年運用開始;熱併給
イタリア	500kW	2012 年運用開始; 超臨界(プロトタイプ)
ドイツ	5600kW	2013 年運用開始;発電専用
ドイツ	5600kW	2013 年運用開始;発電専用
ドイツ	5000kW	2013 年運用開始;熱併給



図8 ドイツの既設バイナリ発電システム

5. まとめ

当社の地熱発電システムへの取り組みはフラッシュ地熱発電システムを主体として製品化を推し進めてきたが、バイナリ地熱発電システムに関しては基礎技術の蓄積とプロトタイプの開発に留まっていた。今後は、従来まで発電に利用されていなかった低温熱源を有効活用し、地域に密着した地熱発電システムが具現化されるような製品開発や既存地熱発電所の出力増強など多くのアプリケーションを Turboden 社と共同で準備し、再生エネルギーの有効活用と同時に地域活性化の一助となるように務める所存である。

参考文献

- (1) Bertani, R., "Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report", eothermics vol 41 (2012) p.1-29
- (2) 環境省, 環自国発第 120327001 号“国立・国定公園内における地熱開発の取り扱いについて”(2012)