小型地熱バイナリー発電システム

特集

山田　茂登（やまだ　しげと）　　小山　　弘（おやま　ひろし）

1　まえがき

日本は有数の火山国であり，多くの地熱資源を有している。現在までに建設された地熱発電設備は 20 台，550 MW に及ぶ[1]。その多くは電力会社による大型の地熱発電所であるが，諸般の事情により今後の大型の地熱発電所の建設計画は当面ない。一方で，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による地熱開発促進調査は継続されており，2003 年度からは中小規模の開発を目標とした動きとなっている。また，温泉としては高温であったり，蒸気が噴出するという理由により使われていない井戸，単純に温度を下げて使われている温泉井が日本には多く存在するといわれている。この未利用エネルギーを地域固有のエネルギーとして利用拡大を進めるべきであるとする研究が行われ，地熱エネルギーを含む総合自然エネルギーシステムの概念として EIMY（Energy in My Yard）をキーワードとして全国で講演などによる普及活動も行われている[2]。

一方では，世界的に再生可能エネルギー（139 ページの「解説」参照）の利用を義務づける RPS（Renewable Portfolio Standard）法が施行されており，日本でも 2003 年 4 月に「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」が施行され，再生可能エネルギーによる電力比率を高めていくことになった。日本を含む RPS 法が義務づける再生可能エネルギーの対象エネルギーには地熱エネルギーも含まれる。したがって，従来の地熱発電では利用されていなかった低温の地熱資源も発電利用の対象とした計画が現れ始めた。

中小規模や低温の地熱資源では，従来型の地熱蒸気を直接タービンに導入する方式よりも，低沸点媒体を蒸発させてタービンを駆動する方式のほうが経済的であることがある。

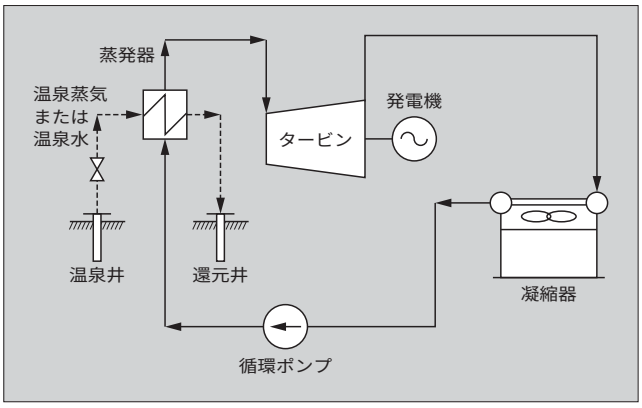
以上の背景から，小型の地熱バイナリー発電システムを商品化するべく開発を行っている。

2　バイナリー発電システム

地熱バイナリー発電システムは，地熱流体（蒸気または熱水）を熱交換器へ通し，低沸点媒体を蒸発させてタービンを駆動するものである。2 種類の異なる媒体を用いた発電方式であることから 2 媒体（バイナリー）発電方式と呼ばれている。**図 1** に地熱バイナリー発電システムの概念図を示す。日本でも 1993 年から 5 年間，バイナリー発電の実証試験が NEDO により実施された。この時は低沸点媒体としてフロンが使用されたが，フロンは 2020 年までには全廃となるため他の媒体を使用しなければならない。海外では炭化水素（ブタン，ペンタンなど）を使用するバイナリー発電システムを商品化しているメーカーがあり，また，水－アンモニアを媒体とし最適効率を実現するシステムといわれるカリーナサイクルと呼ばれるバイナリー発電方式も考案されている。

すでに海外では，アメリカ，フィリピン，ニュージーランド，アイスランドなどで広くバイナリー発電が地熱エネルギーに適用されており，その発電所規模も数百 kW から数万 kW 程度まで多く建設されている。特に，オーマット社がペンタンを用いたバイナリー発電システムメーカーとして有名であり，世界中の地熱資源を持つ国々に納入している。日本にも九州電力株式会社の八丁原地熱発電

図 1　発電システムの概念図



山田　茂登

地熱発電プラントのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部火力統括部地熱技術部担当部長。日本地熱学会会員。

小山　　弘

地熱発電プラントのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部火力統括部地熱技術部。

所に実証試験機として納入されている。ヨーロッパでは他のメーカーによる小型の地熱バイナリー発電システムが幾つかの地点で運転されているという記事も見受けられる。一方，日本では実証試験などが実施されてきているが，地熱バイナリー発電システムを製品として市場に投入しているメーカーはない。日本で発電設備を設置するに際しては電気事業法に従う届出や検査など，日本固有の対応が必要であり，小型の地熱発電を導入しようとする需要家が海外製品を導入するには，その対応をサポートする日本企業の協力が必要となる。また，海外製品のアフターサービスに不安を感じる可能性も考えられる。この意味でも，小型の地熱バイナリー発電システムを普及させるためには日本メーカーによる製品の提供が重要なポイントになると考えている。

なお，1904年にイタリアで，世界で初めて地熱蒸気による発電実験が成功したと伝えられているが[(3)]，この時は地熱蒸気と清水とを熱交換して得られた蒸気でエンジンを駆動したといわれており，これもバイナリー発電方式の一つであったといえる。

バイナリー発電は熱交換により熱源とは異なる作動媒体を蒸発させてタービンを駆動するものであり，その熱源は地熱エネルギーには限られない。群馬県水上ではRDF（Refuse Derived Fuel）を燃料としたボイラで発生させた蒸気を熱源としたバイナリー発電設備が建設されている。この例のように，バイナリー発電システムは地熱エネルギーに限らずさまざまな熱源（産業廃熱など）へ適用し得る発電システムである。

3　実証機による商品化開発

富士電機では，日本国内の未利用温泉エネルギーの発電利用を目的とした小型の地熱バイナリー発電システムを足がかりに，世界中のバイナリー式が適する地熱資源をターゲットとして商品化することを目標に開発を進めている。

バイナリー発電システムは，基本的には火力発電設備の技術を応用したものであり，最も重要な課題は，適用しようとする高温熱源（地熱エネルギー）と低温熱源（大気条件）の間で効率的に蒸発し，また凝縮する，入手が容易で安定した安価な媒体を選定することである。媒体が決定されれば火力発電のヒートバランスよりも簡単な計算により熱サイクルを計画することができる。

構成機器を計画するうえでの重要な課題の一つは，効率と経済性の両面から最適な設計条件を設定することである。もう一つの課題は，サイクルからの媒体の漏れがないようなシール技術を適用することである。

商品化に際しては，小型のシステムの商品化であることから安価になるよう計画することも重要な課題である。

以上の課題を解決し，概念設計，基本設計の正しさを検証して製品シリーズとして確立させることを目的に試作機を製作して実証運転を行うことを計画した。

4　実証機

4.1　システムの概要

地熱資源としては比較的低温である未利用温泉水などを高温熱源として適用すること，大気温度を低温熱源として適用することを前提として，この温度範囲で適切に蒸発し凝縮する熱サイクルを実現するに適した媒体としてイソペンタンを採用することを決定した。イソペンタンは可燃性ガスであるが，適切な設計を行えば安全に使用することができる。また，同じく炭化水素であるイソブタンが近年では家庭用冷蔵庫の冷媒として採用され始めたことから，作動流体として使用することに一般にも認知されやすいと判断した。

計画と実証運転結果の比較を容易にすることを目的として，実証機は実際の温泉井から得られる地熱蒸気の温度を設計温度として計画した。使用予定の温泉井からは蒸気と熱水の混合流体が得られることが予想されているため，気水分離器により蒸気と熱水に分離し熱水により媒体を予熱し，蒸気により蒸発させる熱サイクルとした。また，地熱資源が得られる地域では大量の冷却水を取水することが一般的に困難であることが予想されるため，凝縮器には空冷式を採用することとした。また，簡易なサイクル構成による製品の提供を目標としているので，実証機も予熱器，蒸発器で蒸発させた媒体蒸気によりタービンを駆動し，タービンの排気は空冷式凝縮器で凝縮させ，循環ポンプで予熱器に送るという，単純な熱サイクルを計画した。**図2**に実証機の主管系統図を，**図3**に実証機の完成予想図を示す。

熱サイクルを構成する機器は，安価に製品を提供することを目標として，実証機においても特別に機器を開発することなく汎用の機器および技術の組合せを基本に計画している。

4.2　予熱器・蒸発器

予熱器・蒸発器とも地熱流体を熱源とする。地熱流体にはスケール成分となる炭酸カルシウムやシリカなどが含まれることが多く，定期的に内部を清掃できることが構造上必要である。したがって，予熱器，蒸発器とも熱源側を管側とするシェルアンドチューブ式を採用している。**表1**に予熱器と蒸発器の主要仕様を示す。

4.3　タービン・発電機

使用するイソペンタンには金属腐食性がないため，汎用の単段衝動式蒸気タービンを採用した。ただし，車軸からの媒体の漏えいは完全に遮断しなければならないため，車軸の両端にメカニカルシールを二重に設置する構造とした。

発電機には誘導式を採用し設備を簡易なものとしている。誘導発電機を採用することから，タービンには調速機を設置しない。したがって，汎用の蒸気タービンに採用されている一般の主蒸気止弁，蒸気加減弁を使用する必要がなくなり，流体の漏えいのないプロセス用の制御弁と遮断弁を

図２　実証機の主管系統図

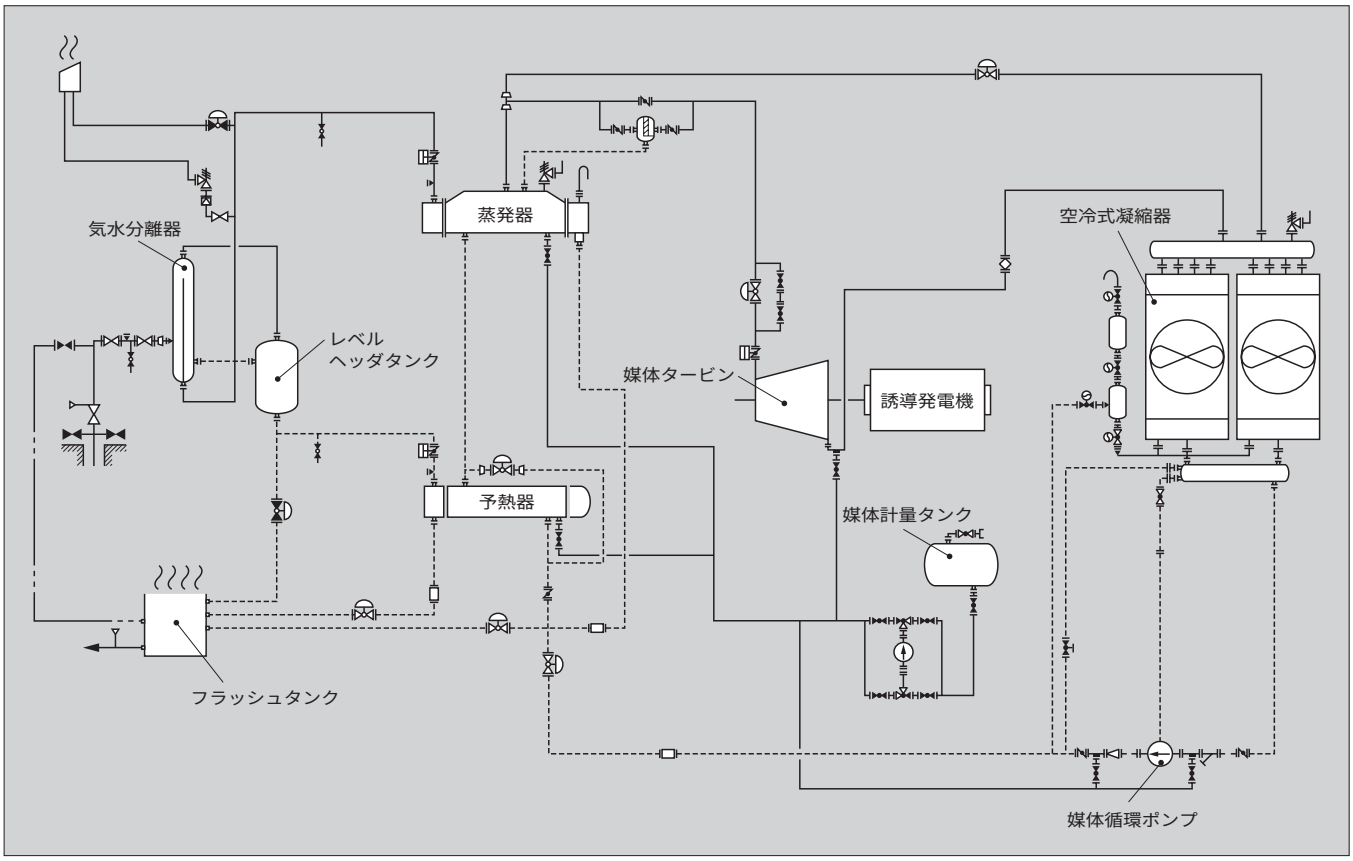
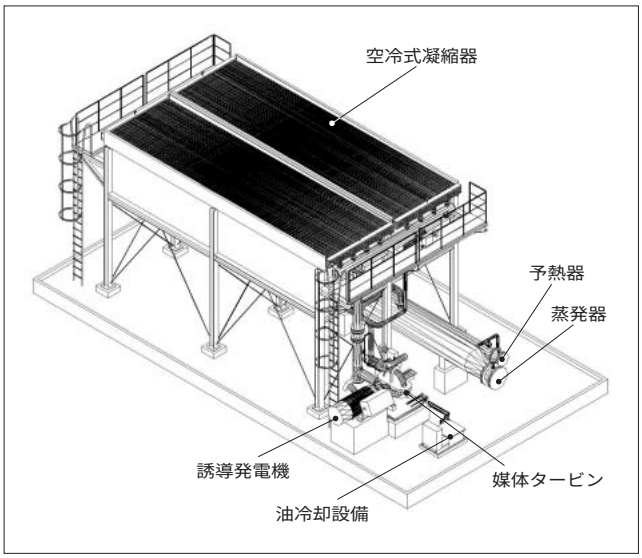


図３　実証機の完成予想図



採用することとしている。制御弁は前圧制御モードで動作させ，蒸発器出口圧力を安定させる目的で使用する。遮断弁は緊急時の信号により緊急遮断し，タービンと発電機を安全に停止させる。

表２にタービン，発電機の主要な仕様を，**図４**にタービンの断面図を示す。

4.4　凝縮器

前述のとおり，空冷式凝縮器を基本に考えており，実証機でもフィンチューブを使用した空冷式としている。空冷式凝縮器は設備の中で最も大きいものであり，システム全体の大きさを左右するものである。河川水などが大量に取

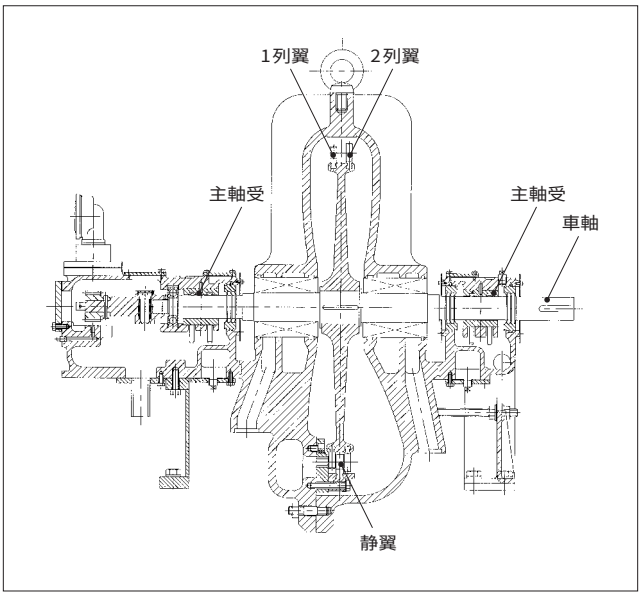
表１　予熱器・蒸発器の主要仕様

機　器	項　目	主要仕様
予熱器	型　　式	横型固定管板式シェルアンドチューブ型
	伝 熱 容 量	720 kW
	入口/出口温度	イソペンタン：36/84 ℃
		地熱熱水：130/100 ℃
蒸発器	型　　式	横型固定管板式シェルアンドチューブ型
	伝 熱 容 量	1,990 kW
	入口/出口温度	イソペンタン：84/105 ℃
		地熱蒸気：130/130 ℃

表２　タービンの主要仕様

機　器	項　目	主要仕様
タービン	型　　式	横軸衝動1段タービン
	出　　力	最大220 kW
	回 転 数	1,800 r/min
	軸封型式	メカニカルシール
発 電 機	型　　式	三相誘導発電機
	出　　力	250 kW
	回 転 数	1,800 r/min

図４　タービンの断面図



水，利用可能な地点であれば，水冷式凝縮器を採用することができ，システム全体の大きさを抑えることも可能である。

5　あとがき

実証機は 2005 年度に建設，試運転を完了させ，実証運転に入れる予定である。本実証試験の結果を踏まえ，低価格で取扱いの容易な地熱バイナリー発電システムを日本各地の地熱資源を持つ地域に普及させることにより再生可能エネルギー，自然エネルギーの有効利用が広く認識され，発展していくことを期待する。そして，エネルギー需要が世界的に高まる中で，地球環境を保ちながら子孫に資源を残すために，再生可能エネルギーでありクリーンエネルギーである地熱エネルギーの利用拡大を推進したいと考える。

参考文献

(1)　火力原子力発電技術協会編．地熱発電の現状と動向（2004 年版）
(2)　新妻弘明ほか．地球環境適応型地熱開発戦略報告書．2002.
(3)　Geothermal Resources Council 編．Stories from a Heated Earth. 1999.

解　説　再生可能エネルギー

再生可能エネルギーとは，ある短い期間で自然現象により資源が再生可能なエネルギーのことをいい，地熱，水力，風力，太陽，波力，バイオマスなどが該当する。ただし，自然環境に影響を与えるダムを使用する水力は除外されることがある。石油や石炭のように将来的に枯渇が予測されている化石エネルギーに対比して使用される言葉である。特に近い将来の石油の枯渇は世界的に深刻な問題であると認識され，再生可能エネルギーの利用拡大が課題となっており，各国で再生可能エネルギーの利用を義務づける RPS（Renewable Portfolio Standard）法が施行されている。日本でも「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」が 2003 年 4 月に施行され，風力，太陽光，地熱，小水力，バイオマスによる発電量を総発電量に対する一定の割合とすることを義務づけた。

一方で，クリーンエネルギーまたはグリーンエネルギーという言葉も聞かれるが，これらは再生可能エネルギーとは定義の異なるものである。クリーンエネルギーまたはグリーンエネルギーと呼ばれるものは環境負荷の低いエネルギーであり，地球温暖化やオゾン層破壊に影響を与えないエネルギーを指す。

地熱エネルギーは再生可能エネルギーであり，二酸化炭素の排出がきわめて少ないクリーンエネルギーでもある。

e-Front runners

＊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。