

地 熱 発 電

Geothermal Power Generation

森 康 夫*

Yasuo Mori

1. 序 論

一次、二次のエネルギーショック以来、自然エネルギーに対する研究開発は熱心に進められてきたが、この数年来のエネルギー問題の沈静化は米国などのようにエネルギーの研究開発費の削減などとなってあらわれてきている国もあるが、わが国のようにエネルギー資源が非常に乏しい国においては、長期的視野に立って自然エネルギーの研究開発を進めていかなければならないことは言うまでもない。

サンシャイン計画を中心として、検討すべき殆どの自然エネルギーがこの10年来、基礎研究あるいはパイロットプラントなどにより、その技術的、あるいは経済的将来性についての研究開発が行われてきた。自然エネルギーは一般にエネルギー密度が薄く利用率（プラントとしては稼働率）が低く、あるいはエネルギー資源量が小さいなどの問題点が次第に明らかになった。地熱発電はエネルギーショック以前の1966年に岩手県の松川発電所が22MW、1967年に大分県の大岳発電所が11MWの発電を行っており、これらの実績とともに、わが国全体が地熱利用可能地帯であると推定されていることもあり¹⁾、地熱発電は自然エネルギーの中では最も期待されるものと考えられていた。たとえば1975年頃の政府によるエネルギー需給見通によると1985年には約500MWから800MW、さらに1990年ごろには1,500MWないし2,500MWが地熱発電から期待されていた。しかし現実には今年度の総出力は約250MWにすぎない。この予想と現実の差は決して地熱発電の将来性の無さを意味しているものではなく、これから述べるような地熱特有の、またあるものはわが国の地熱資源特有の種々の原因によっている。わが国の地熱資源は将来的には後述する各種の地熱資源探査・評価、新発電技術の研究、開発を進めると総出力

3,000万ないし5,000万kWの期待を実現できる可能性が充分にあると考えられる。

わが国の地熱発電は、初期の頃は松川、大沼発電所などにみられるように民間主導型であり、ついで九州電力（大岳・八丁原発電所）、電源開発（鬼頭発電所）、東北電力（葛根田発電所）、北海道電力（濁川発電所）などの電力会社による業務用発電が行われてきた。約10年前のエネルギーの将来見通しでは、その頃の開発テンポの延長で将来を予測したものであった。しかしながら上述の殆どの発電所は、地熱発電に利用する蒸気あるいは蒸気-熱水の二相流熱水資源の存在が比較的容易に予測できるところを中心とした地区に建設されたものと言える。しかしその後電力会社が地熱発電を新しく建設する地区の調査・地熱資源の評価などを行ううちに、種々の新しい問題点が明らかになって、開発テンポが著しく遅くなってきた。

わが国の上述の状況に対して、米国のカリフォルニア州、サンフランシスコの北部にあるGeysers地熱発電所はPacific Gas & Electric Co. が開発、建設、運転している。この発電所は図-1の米国の出力のほとんどをしめており戦前は総出力約50kWしかなかったが、現在は大きな谷の両側に散在する無人の20以上の発電所を中央管理センターで集中管理・制御しており、その総出力は最近100万kWをこえ、世界最大の地熱発電所となった。ここでは過熱蒸気が得られ、非常に大きな地熱資源の貯溜層があり、地熱発電所として理想的な条件が揃っている。

地熱エネルギーはわが国に豊富な賦存量がある純国産のエネルギーである。わが国が多額の研究開発費を使って多くの利用技術を開発すべきか否かを定める最も重要な因子は、そのエネルギーのわが国における総賦存量である。ある狭い地域には賦存量があっても、国全体としての賦存量が少ないと思われる自然エネルギーがかなり多い。ある自然エネルギーを国費を使って開発するに値いすると評価しうるのは、たとえば2000年

* 電気通信大学電気通信学部教授

〒182 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

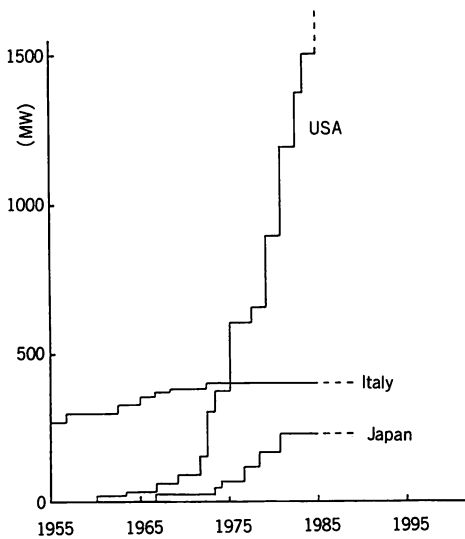


図-1 主要国の地熱総発電量

以降におけるエネルギー需給予測で10兆位か、それ以後にその位の構成比になりうると、かなりの精度で予測されるものでなければならない。したがって1974年度にスタートした地熱のサンシャイン計画でも、地熱資源評価技術、全国地熱資源総合調査が大きな研究開発項目となっている。しかしわが国の地質構成は複雑な地質分布、地下の熱源分布をしており、最先端の手法を結集して調査し、全国規模の地熱有望地域の評価を行い、最終的に全国規模での賦存量をできるだけ正確に推定することは、地熱エネルギーの開発のためだけでなく、将来わが国のエネルギーの需給計画確立のためにも非常に重要である。

これからのわが国の地熱発電の出力の増大は電力会社による業務用が中心となるものと考えられるが、この10年来予想に反した遅いテンポの開発となっており、この地熱開発の障害となっている問題点は次のものが主要なものと考えられる。1.地熱資源賦存量とその資源量推定の不確実性。2.自然公園法、温泉法の規制による立地の困難性と環境問題。これらの詳細は以下の章で詳述する。

2. 地熱資源と地熱発電

2.1 地熱資源と地熱発電

地熱資源の概念と内容は、科学・技術の進歩と、自然エネルギーの開発の必要性などから、この20年来大きく進歩してきたといえる。すなわち地熱エネルギーの主な利用は地熱発電と地域暖房・農業利用などの多

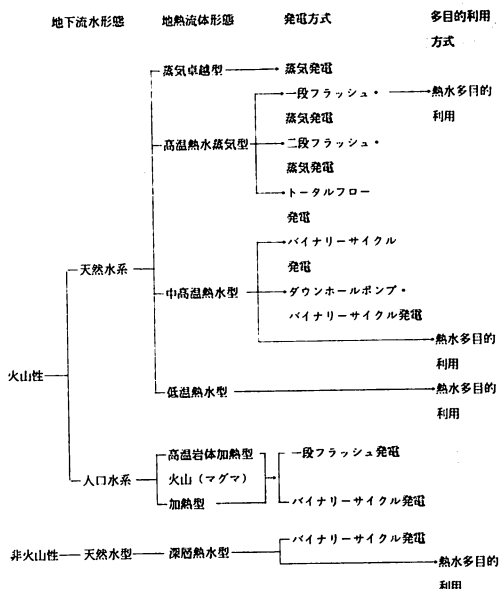


図-2 地熱資源と地熱発電と熱水多目的利用

目的の両方を対象として、地熱資源は図-2のように分類することができる。またこの図には現在使用されているものおよび将来最も適当と思われる地熱発電の方式も示してある。

地熱発電に利用できる地熱資源は過熱蒸気・飽和蒸気、蒸気と熱水の二相流、熱水の3種に大別でき、これらの資源が得られるには次の条件を満す必要がある。

- (1) 地中にマグマ溜などの高温の箇所存在。
- (2) 地下水あるいは浸透した降水などの存在。
- (3) 帽岩などを上部に持ち、かつ空隙率が大きく熱水などを貯えうる貯溜層の存在。

これらの条件を同時に満足する地熱資源を高い成功率で探し出すことが地熱発電に最も重要なことであり、かつ地熱発電に対する関心を高めるためにも必要なことである。すなわち発電用の蒸気、熱水をうる生産井を掘削する場所を正確に決定するために、最近は主に物理的探査が行われる。それには地下の貯溜層の空隙率が大きく、地表の熱流束が大きい場所を求める方法が研究開発されている。すなわち1,000m-2,000mの深度までに用いる電気探査法、それより深い深度に用いられる地磁気電流法(MT法)が最近の電子機器の進歩を基に得られた電磁気的情報から雑音を取除き、信頼できる信号より二次元あるいは三次元的地下構造を数値計算する方法の研究開発が進められている。また岩石は一般に磁性鉱物を含んでおり、そのキューリー温度575℃以上では磁化は消えるので、地表の磁気分

布の測定より、575°Cになっている深度を推定することができ、地下の温度分布推定の物理的方法として用いられるが、浅部の岩石の磁性などの影響があり今後その精度を上げる研究が必要である。また人工地震、微小地震の観測、および電気抵抗およびMT法への情報理論の適用および地下構造解析プログラムの開発が行われ、最近物理探査法の信頼性が高まっている。しかし現在では幾つかの探査技術の組合せによっても、上記の地熱発電に用いる地熱資源に必要な3条件を完全に明確にできる技術は確立されていない。すなわち現在の技術では地下のある深度に存在する可能性のある資源量の大約の値を求めることができるが、その地下の貯溜層にある流体の温度、圧力などの予測は難しい。したがって現在は地熱発電に利用できる局所の地域の地熱資源量を確かめるために、探査の結果をもとに、さらに何本かの深さと場所の異なる試掘井が掘られる。これらの探査・試掘などの結果より生産される流体の状態、流量のかなり正確な値が判明し、はじめて地熱発電の方式、出力が決められる。

地下の高温の岩石などの存在は確認されても、熱水が存在しない場合は図-2に示されている人工水系の方法が用いられる可能性があり、この高温岩体方式の基礎的研究開発が行われている。この研究開発にわが国は国際協力費を支出して、米国での研究に参加している。しかし地震の多いわが国では、地下に多くの割れ目、断層があり、送入した水が漏洩し加熱されて地上にでてくる割合が少なく、この高温岩体方式を利用できる場所を見出すのは容易でないように思われる。

上述のことから分るように、地熱流体のうち地熱発電に利用できるものは図-2を参照して、(a)過熱または飽和蒸気、(b)中高温蒸気—熱水二層流、(c)中高温熱水、(d)高温岩体または火山人工熱水、(e)深層熱水、である。これまでわが国で地熱発電が行われている場所は、温泉などの地熱徴候のある所を中心として開発され、蒸気が生産されているのは松川発電所ぐらいであり、他のほとんどの発電所では高温二相流が生産されている。現在までに設立・運転された発電所は温泉およびその兆候のあった場所の付近を選び、生産井を掘削しており、探査をあまり行わなくてもよいのでその発電単価も火力発電のものよりかなり廉価である。したがってエネルギー危機以来既存の地熱発電所の近傍に第二の発電所を設立するための詳細な地質・地層の探査などが行われた。しかしその結果、多くの場所で地下の構造には断層、割れ目が数多く存在して非常に複雑で

あり、貯溜層の規模も大きくなく、十分な発電出力を得る確証が未だ得えられていない場合が多く、この数年新発電所の建設運転開始がなく、これが図-1に示したように地熱発電の総出力の増加のテンポが10年前位に予想したほどには上昇しない理由の一つと考えられる。一方米国のGeysers発電所は永年にわたる多くの生産井・還元井の掘削、探査の結果、地下構造、地熱資源がかなり明らかとなっており、幾つかの10万kW、また最近では15万kW級の発電所が新設される予定で、総出力が100万kWを越している。図-1を表面的に見ると、将来のわが国のエネルギー需給にたいして地熱発電の寄与は余り期待できないように見え、一方米国は非常な速度でその開発が行われているようにとれる。しかし自然エネルギーのうち近い将来にわが国で最も大きくエネルギー需給に寄与すべきものは地熱であると判断される。サンシャイン計画でも度々の検討過程を経て、図-2に示した地熱発電に必要な各種の資源調査、掘削技術、新発電方式の開発のために取上げられている主な項目には次のものがある。(1)全国地熱資源総合調査、(2)地熱資源探査技術、(3)地熱エネルギー採取技術、(4)熱水利用発電プラント、(5)高温岩体発電システム、(6)地熱用材料の開発、(7)環境保全、(8)多目的利用技術。

本稿で論ずる主要題目は地熱発電である。しかしながら地上の発電装置としての地熱発電のみを論じても余り意味がなく、そのエネルギー源を供給する地熱資源との密接な関係において、地熱発電の問題点、研究開発計画などを議論しなければならないことはこれまでの説明で理解されたと思う。サンシャイン計画で取上げている研究開発の上述の主要な柱は、いずれも将来的に地熱発電がわが国のエネルギー需給計画に占める割合を増加させるためのものである。これまで地熱発電に利用されているものは、蒸気および蒸気成分の多い二相流であり、二相流はフラッシュさせて蒸気を作り、従来の蒸気タービンを改良したもので発電している。この方面のわが国の技術は高い水準にあり、強い国際競争力をもっている。その高い技術が広く認められ、Geysers発電所をはじめ海外よりの注文により多くの地熱発電装置が輸出され、世界的には大きなシェアをもっている。

2.2 熱水資源と地熱発電

地熱の総資源量についての精度はわが国においても米国においても余りよいものではないが、総資源量に対する蒸気および蒸気—熱水二相流の割合はこれまで

の予測によると20%前後と考えられている。すなわち蒸気・蒸気一熱水以外の地熱資源は非常に大きく、具体的に中高温熱水、低温熱水、深層熱水などの熱水か、蒸気をわずかに含む熱水の状態の資源の適切な利用が今後の課題である。熱水を用いて、しかも既存の発電方法と競合できるような経済性のある地熱発電を行うには、200℃から150℃ぐらいまでの中高温熱水を利用し、フロンR114などの低沸点媒体を用いるバイナリーサイクル発電が適していると考えられる。しかしながらこの中高温熱水は時には自噴力（抗底での圧力）が弱く、従来は掘削しても利用できないものがあつた。バイナリーサイクル発電の建設費に占める生産・還元井の掘削費は試算によると40%前後である。掘削費に探査、試掘などの経費をはじめ、掘削したが所期の地熱流体の噴出がなく、使用できなかった地熱井の経費も含まれている。この掘削しても所期の目的の性能が得られなく不成功というべき地熱井の割合が、地熱発電の電力単価に影響を持つばかりでなく、地熱発電が所期の開発予定計画の通りに行われぬ可能性があることを意味している。将来の電力の需要の伸びに対応するため、確実な開発予定計画に従って総発電出力を増加させて行く必要がある電力会社にとっては、上述のような不確定さを内蔵する地熱発電は、たとえ発電単価が低廉であるとしても、現状では余り望ましい内容の発電方式とは言えないと考えられる。今後地熱発電に対する関心、評価を高めるための重要な方法は

(a) 資源量の多い中高温熱水を用いて発電する効率・経済性の高いバイナリーサイクルの開発、

(b) 自噴力の弱い生産井中にダウンホールポンプ(DHP)を設置し、熱水を地上迄汲上げるポンプの開発である。前者については、さきに述べた全国総合調査およびMT法などの先端技術を用いる高精度、高信頼性の探査技術と発電方法の開発研究の進展が待たれる。後者については、わが国だけでなく最近米国においても研究開発が行われている。従来の統計によると生産井掘削の成功率は平均60%といわれており、この40%の不成功率のなかには自噴力不足で利用できなかったものも含まれている。DHPには多段遠心ポンプが用いられているが、その駆動方法には種々の案が試みられている。たとえばモーター直結駆動の場合には直径20cm、長さ10m位になり、しかも200℃の高温で作動しなければならないので、研究開発の問題点が多い。これらのバイナリーサイクル、DHPなどは、今後の地熱発電の重要な研究開発課題であり、サンシャイン計

画で研究開発が進められている。

3. 地熱発電の現状

地熱発電を論ずるには、地上の発電装置のみを論ずるのは適当ではなく、地熱発電の熱源である種々の地熱資源との関連で地熱発電の現状と将来を考える必要があることをこれまで述べた。すなわち地熱資源は蒸気および蒸気と熱水の二相流より得られる蒸気を用いる蒸気タービン発電、中高温熱水を用いるバイナリーサイクル発電、とトータルフロー発電に分けられる。

3.1 蒸気タービン発電

蒸気タービン発電では、在来の火力発電用のタービンを地熱発電に適するように改良されたものが用いられているが、最も大きな違いは火力発電では低圧段でも最大7%位の湿度なのに対して、地熱発電で用いる蒸気はノズル入口でも飽和蒸気あるいは湿り蒸気であるため湿度は15%以上にもなることがあり、在来のタービンの構造をそのまま用いると湿り損失が著しく大きくなり、また硫化水素および微小な固形物が蒸気中に含まれているため、ノズルと動翼には腐食・摩擦に強い材料、構造を用いる必要がある。タービンの設計的には、ノズルと動翼の間隔を大きくしてその間で、湿り成分の構成要素である微小液滴を遠心力で外側に飛ばして取除くためのドレーン溝を設けるとともに、最近ではさらに微小液滴を含む蒸気の高速流について、ノズルおよび動翼中の三次元解析を行い、適正なノズルと動翼の翼型の三次元的分布を求めて湿り損失を小さくするような設計も行われている。タービンは翼の厚い衝動式のものを用いられてきたが、最近ではスケールの可能性の少ない低圧段に反動翼を用いるなどの新しい構造をとり効率を高めている²⁾。これら研究開発の結果、蒸気消費率も6kg/kWhと従来のものに対して約20%性能の向上がはかられている。地熱蒸気発電では、たとえばGeysers発電所の場合でもタービンの入口圧力7kg/cm²g、温度170℃、排気圧力0.06ataであり、6段のタービンが多く用いられる。これを一軸として最終段の翼高が25インチで約55MWの出力がえられ、2軸4流で15万kWの発電機が製造されているが、運転されれば大出力、高効率の発電機となると考えられる²⁾。蒸気タービン発電のプラントの性能向上のため、生産井から二相流をそのままプラントまで輸送し、プラントの分離器で得られた蒸気をタービンの高圧段に、残りの熱水をフラッシュさせて得られる蒸気を中間段に送り、出力の増大を計っている。

この方法は主にわが国ではじめられ、最近では世界的に用いられている。

3.2 バイナリーサイクル発電

バイナリーサイクルは地熱熱水を高温源とし、その熱を他の低沸点流体に伝え、ランキンサイクルを行わせて出力を得るもので、熱水と作動流体の二種の流体の状態、特性がサイクルの特性を支配するためこの名称でよばれている。わが国のエネルギー供給の安定性に対する将来の貢献度が大きいと考えられている中高温熱水および高温岩体の地熱資源を有効に用いるのに最も適当なサイクルと考えられている。このサイクルの研究開発はわが国では1974年から出力1,000kW級の熱水専用と蒸気併用型の2つの地熱流体により、パイロットプラントの基礎研究が行われ、その結果をもとのプラントの製作が行われ、技術的可能性の実証研究が行われた。その頃の規模としては世界で最大のもので、その成果は高く評価された。この技術的成果はその後の製鉄業での排熱回収発電、海洋温度差発電などで利用され、大きな波及効果をもたらした。しかしながらパイロットプラントの運転結果より、バイナリーサイクルで利用される温度差が100°C位では、サイクル内の媒体の駆動、冷水塔の循環用のポンプ等が消費するいわゆる所内動力は40%位となり、火力発電所の所内動力の小さな値と大きく異なることが明らかとなった。したがってサンシャイン計画のバイナリーサイクルの第二期計画においては170°Cから200°Cの熱水を用いるバイナリーサイクルの経済性向上を研究開発の課題とし、1979年以降大型化に伴う技術的問題点の解決、所内動力の低減の方法、R114を中心として最高効率を与える混合媒体の研究、ダウンホールポンプ研究開発などが選ばれた。米国においては1970年後半からインプタンを用いるバイナリーサイクルの研究が始められ、最近建設されたカリフォルニア州のEast Mesa発電所は、バイナリーサイクルの効率を向上させるため、インプタン90%、イソペンタン10%の混合媒体を用い、高・中圧の蒸気を用い12.5MWの出力を目標としている。またこの発電所はダウンホールポンプを用いており、地上からのラインシャフト駆動方式であるが、ダウンホールポンプをはじめ未だ信頼して運転するには問題点が多いようである。サンシャイン計画の第一期では米国より早期に研究開発がスタートし、よい成果が得られたが、その後わが国の研究開発の進捗はかならずしも速くなく、米国にややおくれてきた感があり、将来のわが国のエネルギー需給

を考えると憂慮すべきことであろう。

3.3 トータルフロータービン、膨張機

蒸気成分が少ない地熱流体を用いて発電する場合は現状ではバイナリーサイクル発電が有望であることは前章で述べた。しかしバイナリーサイクル発電の経済性を高めるには予熱・蒸発器、凝縮器などの熱交換器が非常に高価であり、その性能、経済性の向上の研究開発を要し、競合性のあるバイナリーサイクルの完成までにはかなりの年月が必要である。そこで資源量の多い二相流地熱流体をそのまま特殊タービン、または容積式膨張機で膨張させ電力などを取出せる効率の高いタービンまたは膨張機が開発されると、二相流を分離、フラッシュされる必要がなく、設備費も非常に廉価となる。二相流の熱エネルギーを運動エネルギーにして高速流で動翼などを回転されるタービン式と、二相流の圧力でピストンなどで仕事をとりだす容積式の膨張機とがある。

トータルフロータービンは米国のローレンスリバモア研究所で、液滴を十分に加速するために加速時間を長くした特殊なノズルを用いるタービンが試作されたが、タービン効率は40%前後にとどまった。その後幾つかのアイデアによるタービンが試作されたがいずれも効率は50%を越えるには至っていない。タービン式に対して容積式ではヘリカルスクリュウ型と、ロータリーエンジン型の二種につき試作、運転がなされている。前者はリシュルム式圧縮機を転用したもので、乾き度15%—20%で効率約50%が得られたと報告されている。ロータリーエンジンを改良し、上流に回転式吸気弁を設けたトータルフロー膨張機が湿り蒸気で性能実験された³⁾。蒸気が全体の40%のとき線図効率は1,800rpmで63%に達した。サンシャイン計画ではその大形化への改良と、実用化のための吸入回転弁をローターとケーシングの間に入れた新しい構造をもつトータルフロー回転膨張機が開発が1976年から始められた。基礎研究に続き300kW級の研究開発、試作と性能実験が行われた。最終的には出力効率54%が得られ、3,000kW級にすると60%以上の値が得られると考えられる。しかしこの形式の膨張機は5,000kW以上に大形化することは難かしいが、従来のフラッシュさせて蒸気を得る代りに、膨張機で二相流を膨張させて出力を得、さらにその下流に蒸気タービンを用いるなどの方法で総出力を増加させるシステムの研究は今後の課題である。

本節のはじめにも述べたように、二相流を有効に用いる速度式のトータルフロータービンは、地熱資源の

多くが熱水を含むことを考えると、地熱発電のためには是非とも開発すべきもので、高速二相流の現象などの基礎研究を行い、その結果と新しいアイデアに基づくトータルフロータービンの開発が待たれる。

4. 地熱発電の未来像とむすび

現在サンシャイン計画では将来のわが国のエネルギー需給における地熱エネルギー特に地熱発電の寄与を増すため、全国資源量と資源量が特に豊富な地域の調査、深部をはじめ各種深度の貯溜層の正確な探査法とその調査、高温地層の掘削法、天然および人工熱水による地熱発電の技術、環境保全技術などについての研究開発が行われている。しかしながら未だこれらの研究開発の結果が出そろわず、また成果の相互連絡・利用も完全ではないので、これらの成果が地熱発電の総出力に寄与するようになるには5年から10年以上かかると考えられる。

現在電力会社が優先的に取上げている地熱発電方式は、一段または二段フラッシュ蒸気タービン発電であるが、現状では地熱流体中に含まれる硫化水素、炭酸ガス等を大気中に放出するなど環境上の問題がある。このためGeysers発電所ではタービンをはじめプラントの機器の腐食を防止し、より信頼性を高める事も考慮して、タービン上流で硫化水素を除去する方法の研究開発をしている。サンシャイン計画では硫化水素をタービン下流で、冷却水・凝縮液から除く研究開発が行われているが、蒸気発電のシステムとしてはGeysersの方法の方が優れていると考えられる。

しかしこれらの環境問題を全く起さず、かつ蒸気タービン発電で運転上問題となる生産井、還元井のスケール付着による閉塞などが起らないと考えられるのは、DHPにより生産井中の熱水と与圧し、地熱流体の熱エネルギーのみをバイナリーサイクル発電で利用し、

熱水は再び地下に還元する方法であろう。すなわち地熱熱水は完全に閉回路を上昇・下降し、熱水から熱を取出す過程でも硫化水素、炭酸ガスの析出がないようにDHPで与圧すれば、スケール付着の問題も起らないと考えられる。自然エネルギーは一般に環境問題は無いと言われるが、地熱発電は硫化水素の問題があり、これを解決すれば、自然エネルギーの中で最も密度も大きく、資源量も多く、特に上に述べたバイナリーサイクル発電は、資源量の多い中高温熱水、深部熱水、高温岩体人工熱水などを利用できるなど、これから開発される多くの地熱資源を用いて発電することができる点で地熱発電の未来像と考えられる。DHPを持つバイナリーサイクル発電の発電単価は、200℃の熱水が得られると、既存の発電方法による単価と充分競合できると試算されているが、その建設費の40%強を予熱・蒸発器と凝縮器などの熱交換器に使われる。中高温熱水資源の信頼できる探査を行うとともに、経済性があり、電力会社にも魅力的はDHP付バイナリーサイクル発電を実現するため、信頼性の高いDHPの開発、それにより熱水中のスケール、硫化水素・炭酸ガスの析出を制御できる可能性の研究、熱交換器の性能向上による経済性の向上、などを内容とする将来像へ指向する長期的研究開発が望まれる。環境的に改良された蒸気タービン発電と、このようなバイナリーサイクルによる発電が実現すれば、地熱発電は将来わが国のエネルギー需給に大きな寄与ができるものと信ずる。

参 考 文 献

- 1) 森, 陶山; 地熱エネルギー読本, オーム社, 昭和55年
- 2) 福田, 檜原, 藤川, 池上; 三菱大容量地熱タービン, 三菱重工技報 Vol22, No.8, 昭和60年5月
- 3) 土方, 森, 回転式二相膨張機の試作, 日本機械学会論文集, 48巻, 425号, 昭和57年1月

