

# わが国の地熱エネルギー利用の現状・課題と将来展開

江原 幸雄

九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門  
〒819-0395 福岡市西区元岡 744

## Development of Geothermal Energy in Japan and Future Prospects

Sachio Ehara

Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering,  
Kyushu University  
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

We have a large amount of geothermal resources (23470MWe) in Japan but only a few percent (535MWe) of the resources have been developed. It is very important to utilize geothermal energy with other renewable energies in order to realize energy security and low carbon society. The first problem to be solved in increasing geothermal energy utilization is cost performance. FIT (Feed In Tariff) system will improve the situation dramatically. The second problem is environmentally adaptable development in the national parks where more than 80% of promising geothermal resources are stored and the third one is to develop geothermal energy in cooperating with utilization of hot springs. Geothermal energy will contribute much more to energy demand in Japan by solving the above problems.

Keywords: geothermal energy, geothermal power generation, renewable energy, direct use

### 1. はじめに

地熱エネルギーとは地球内部に貯えられた熱エネルギーである。地表から約 6370 km の深さにある地球の中心の温度は約 6000°C と推定されており、10°C 程度の地表に向かって常に伝導的な熱が流出している。この熱の流れを地殻熱流量と呼ぶが、その地球上における平均値は約 60mW/m<sup>2</sup> である。この割合で地球から大気中に熱が流出し続けても、数 10 億年かかり、地球内部には膨大な熱が存在していることがわかる[1]。

地熱エネルギーの利用とは、このような膨大な熱エネルギーのうち、地表近く（数 km 以浅）のごく一部の、かつ地域的には、火山周辺地域のように限定された地域にある熱エネルギーを利用するものである。本小論では、人類が利用可能なこの地球浅部の地熱エネルギーに関して、その特性、資源量の大きさ、多様な利用法、利用の

現状と課題、そして、水素生成を含めた将来展開の方向について、わが国を中心に述べる。

### 2. 多様な地熱エネルギーとその多様な利用法

地熱エネルギーはその態様が多様であるとともに、その利用法も多様であるのが大きな特徴である。再生可能エネルギーのうち、太陽の場合は、太陽光発電あるいは太陽熱利用が行われるが、エネルギー源は同一である。風力あるいは水力では利用は発電のみである。バイオマスの場合は、木質やガス等エネルギー源は多様であり、また、利用においても発電と熱利用が可能である。

このような他の再生エネルギーに比べて、地熱はエネルギー源・利用においても極めて多様である。エネルギー源から見た場合、特に温度から見ると、1000°C を超える火山下の溶融マグマから、数 100°C の高温岩体、200°C

～350℃程度の蒸気・熱水、数 10℃程度の温水、さらに、10℃～20℃程度の地層あるいは地下水さえ、エネルギー源として利用可能である。このような地熱エネルギーは多様な分類が可能であるが、ここでは温度によって4つに分類したものを紹介する。

### 1) 超高温地熱エネルギー

超高温（地下において、おおよそ 400℃から 1200℃程度まで）のエネルギーである。活火山下数 km 深に存在すると考えられる、溶融岩石であるマグマ、さらには、マグマによって温められたマグマ周辺の高温岩石（高温岩体とも呼ばれる）の持つ熱エネルギーである。現在これらの熱エネルギーのうち、マグマに関するものは基礎的研究段階にあり、一方、高温岩体に関しては、フィージビリティスタディはすでに 10 年以上前に終了し、近年、ごく小規模な試験的な発電が欧州で開始され、また、オーストラリアでは近い将来の大規模な商業的利用を目指した活発な開発研究が行われている。

なお、火山地域でない普通の地域でも地下 5～10km の深部は、150℃から 300℃程度に達する高温岩体となっており、経済的にこの深部の熱エネルギーが開発利用されるようになれば、地球上のどの地域でも利用可能になり、われわれは莫大な地熱エネルギーを獲得できることになる。ごく最近、いわゆる高温岩体だけではなく、上述のようなやや深部のそれほど高くない温度までの熱エネルギーを含んだものまでを想定する EGS (Enhanced Geothermal System, あるいは Engineered Geothermal System) と呼ばれる、人工的に透水性を強化した地熱システムから地熱エネルギーを抽出する手法が、米国あるいは欧州で積極的に取組まれている[2]。

### 2) 高温地熱エネルギー

地熱発電に利用できる高温 (200℃～350℃) の地熱エネルギーであり、地下 1～3 km 深の地熱貯留層に蒸気や熱水の形で貯えられている。この地熱貯留層を地上から各種の探査法を駆使することによって発見し、これにボーリング坑を掘削して、地上に地熱流体を取り出す。多くの場合、水蒸気と熱水を分離し、蒸気はタービンに送り、発電し、熱水は地下に還元する。還元は、熱水を地下に戻すことによって、地熱貯留層の圧力を維持し、長期間安定した発電に寄与するとともに、熱水中に含まれることがあるヒ素などの有害物質を環境中に排出しないことを目的としている。

この天然蒸気を利用した発電方式が従来行われてきた主要な地熱発電の方式である。火力発電の場合に比べ、使われる水蒸気の温度・圧力が低いこと、及びガス中に H<sub>2</sub>S などの非凝縮ガスが含まれること以外は、原理的に火力発電と同じ発電システムである。

### 3) 中・低温地熱エネルギー

数 10℃～百数 10℃の熱水資源を指す。これは、上述の高温資源の周辺や、普通の地域でも地下深部に存在するものである。このエネルギーの場合、取り出された地熱流体は、地上では液体の状態にあり、従来方式では発電に用いることはできず、通常は熱そのものを、加熱等種々の目的に使う。高温の場合は、木材乾燥、少し温度が下がれば浴用、さらには道路融雪等、温度に応じて多様な利用が可能である。近年の新しい傾向として、高温の熱水あるいは圧力の弱い蒸気により、炭化水素系あるいはアンモニア水等の低沸点媒体を加熱し、発生した蒸気を使って発電を行うバイナリー発電が活発に行われるようになった。同じ方式で 100℃以下の高温温泉水を使う「温泉発電」も注目されている。従来、浴用のためわざわざ人工的あるいは自然に冷却し、地熱エネルギーを捨てていたものが、高温では温泉発電に利用し、利用後温度の下がった温泉水をそのまま浴用に使うという優れた発想が提案され、そのための小規模バイナリー発電システムが開発されつつある[3]。近い将来、どの温泉地へ行っても、温泉発電が見られることになるかもしれない。

### 4) 常温地熱エネルギー（地中熱とも呼ばれる）

地下浅部がほぼ一定の常温状態にあることに着目し、エネルギーとして利用するものである。常温のものがエネルギーとして利用されると言うことや不思議と思われるかも知れないがこういうことである。地下浅層たとえば数 10m 深程度では地中温度は一定で、東京や福岡では 18℃程度である。一方、冬の平均気温は 8℃程度、夏の平均気温は 28℃程度である。従って、冬では地下の方が 10℃程度高く、夏は地下の方が 10℃程度低くなっている。これらの温度差を利用して、地下から熱を取り出したり、地下に捨てたりすることで、室内の冷暖房、温室利用、道路融雪等に利用できる。多くの場合、地下から取り出した温度のままでは、不十分であり、ヒートポンプを介して、温度を上げたり下げたりして、必要な温度を得ている。そのため、大地熱源利用のヒートポンプシステムと呼ばれることもある。この地中熱の冷暖房利

用は欧米では近年大きく展開中で、ヒートポンプ 12kW（一般家庭での冷暖房規模）に換算して、世界中で 100 万台程度の普及状況である。スイスでは、新築住宅の 80%に地中熱利用冷暖房システムが設置されている。これは住民の地球環境問題への高い意識と、政策的支援の賜物と考えられる。わが国においては、従来、設置時における高コストから普及は遅々としていたが、環境省等の支援もあり、2004 年頃から急激に増加しており、2007 年時点で 12kW に換算して 1400 例以上の導入例がある。現在、新東京タワー（東京スカイツリー）が建築中であるが、その地上の建物の冷暖房には地中熱利用システムが導入されることになっている。この地中熱利用システムの、従来型システムに比べた大きな利点は、電力消費量（従って CO<sub>2</sub> 排出量）を数 10%も低下することができるとともに、夏季の冷房後、通常のエアコンシステムのように排熱を大気中に放出せず、地下に戻し、冬にそれを使用するため、都市で問題となっているヒートアイランド現象の緩和にも大いに貢献できることである。

### 3. 地熱発電—現状と課題—

さて、上述のように、地熱エネルギーは多様な利用法があるが、以下では、その代表として、地熱発電に焦点を絞って紹介する。地熱発電とは、地下の地熱貯留層から蒸気・熱水を取り出し、このうち、蒸気を使って発電するシステムである。この地熱発電が初めて行われたのはイタリアで 1904 年であり、すでに 100 年以上の歴史を持っているが、近年でも新エネルギーと分類されるように、古くて新しいものと言える。わが国では、1925 年別府で行われた 1.12kW の試験発電が最初である。その後、1966 年に岩手県松川地熱発電所（現在 23,500kW）が商業用として初めて建設され、翌 1967 年には大分県大岳地熱発電所（現在、12,500kW）が運転開始された。松川地熱発電所は、地熱貯留層からは蒸気のみ生産され、その蒸気を直接タービンに導いて発電する、蒸気卓越型地熱発電所である。一方、大岳地熱発電所は、地熱貯留層からは蒸気と熱水の混合流体が生産され、分離後の蒸気を発電に使う熱水卓越型地熱発電所である。一般に、蒸気卓越型地熱発電所では、蒸気・熱水の分離が不要で、従って、還元井を掘削する必要がなく、システムは簡単で、より経済的である。しかし、蒸気卓越型地熱発電所の存在はより希で、近年、世界中で建設されている地熱

発電所のほとんどは熱水卓越型である。

1970 年代のオイルショックを契機に、わが国でも石油代替エネルギーとして、地熱発電に力が入られ、2000 年には 18 ヶ所、設備出力約 53 万 kW（当時世界第 5 位）を擁するまでになった。しかし、その後、実用化が一定レベルに達したこともあり、国の支援が急激に減少するとともに、「新エネルギー」を対象とする法律の枠からはずれ、さらに、電力自由化の中で、化石燃料発電に比べ、コストがやや高いことから、電源としての利用が計画されなくなり、最近に至るまでの 10 年間、新しい地熱発電所の建設は行なわれてこなかった。その結果、わが国の地熱発電はインドネシア、ニュージーランド、アイスランドにも抜かれ、世界第 8 位に甘んじるようになってしまった。

さて、ここで、改めて、地熱発電の意義を再確認してみる。地熱発電の優位性は何と言っても、国産であること、そして、発電に伴って排出される CO<sub>2</sub> が化石燃料燃焼に比べて圧倒的に少ない（数 10 分の 1）ことである。すなわち、地熱発電は、わが国のエネルギーセキュリティあるいは地球温暖化問題への大きな貢献ができる。そして、再生可能エネルギーの中でも、天候に左右されず、1 日 24 時間の安定発電が可能で、いわゆる kW 価値がある。現在、地熱発電は設備容量では風力発電や太陽光発電より少ないが、実際の年間発電量は風力発電と同程度であり、また、太陽光発電を上回っている[4]。すなわち、地熱発電は、すでに一定の貢献をしている。

このように、電源として有利な特徴を持っている地熱発電のポテンシャルはどうであろうか。良いものでも資源量が少なければ重要性は低くなってしまふ。しかし、わが国はアメリカ（電力換算約 3000 万 kW）、インドネシア（同 2779 万 kW）に続く、世界第 3 位の地熱資源保有大国（同 2347 万 kW）である。このうち、約 53 万 kW、割合にして 2.3%が開発利用されているに過ぎない。そして、上記の資源量は従来型地熱発電によって開発可能な資源量であり、活火山下のマグマ、あるいはその周辺の高温岩体の持つ熱エネルギーは含まれておらず、技術開発が進めば利用可能な地熱資源量はさらに増加することが期待される。

上述のように、資源量も多く、また、多くの利点を有する地熱発電の利用がなぜ伸びないのであろうか。いくつかの問題点を以下に指摘したい。

まず始めに、発電コストの問題が挙げられる。電力自

由化の中で、電力会社としては、より安いコストのものを選択するのは必然と言える。たとえば、資源エネルギー庁によれば、1kWh あたりの発電コストは（1999－2003年の平均値）、石油火力＝10.2円、石炭火力＝6.5円、原子力＝5.9円、水力＝13.6円、太陽光＝66－73円、風力＝10－23円、地熱＝13－16円となっており、地熱を含めた再生可能エネルギーは原子力・化石燃料に比べて高い。このようなコスト評価は、電源ごとに算出基準が異なっており、見かけ上のものであり、公平な比較とは言えない面があるが、現実にはこのような数値が背景となって、選択がなされているのが現状である。

初期投資の高い地熱発電は発電を続けるほどコストは下がり、30年以上にわたって発電を続けているものには1kWhあたり数円のものがある。一方、化石燃料発電のコストは今後上昇していくのは確実である。さらに、公平なコスト評価と言う観点からは、CO<sub>2</sub>を排出しないという環境価値にも正当な評価が与えられるべきであろう。すなわち、コスト問題には、技術的な観点だけでなく、環境価値も考慮した政策判断、政策支援が重要なことを示している。

さて、これに関して、現在、重要な政策変更が議論されている。再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）である。わが国は、再生可能エネルギー利用を促進する観点から、従来、RPS制度を導入してきた。しかし、割当義務量が極めて少なかったこともあり、再生可能エネルギー促進政策としては功を奏したとは言えない。むしろ、再生可能エネルギー導入を抑える結果になったと言える。ヨーロッパ諸国での、FIT導入による再生可能エネルギー利用の爆発的な進展を背景に、温室効果ガス1990年比25%削減を目指す民主党政権の誕生によって、わが国では現在、RPS制度からFIT制度への転換が議論されている。2009年後半から、FIT制度導入に関するパブリックコメント、関係団体に対するヒアリング、さらに2010年に入って、関係団体と行政官庁及びその下のプロジェクトチームで買取価格等の具体的な検討が進行しており、2010年3月には、複数の案が提案される見込みである。適切なFIT制度が導入されれば、地熱発電のみならず、対象となる再生可能エネルギーの導入は大いに促進されるであろう。もちろん、コスト問題には、各エネルギーにおける技術開発などの自助努力の問題も重要であるが、政策的な効果は一層大きいと言える。

上述のように、発電コストの問題は大きいですが、地熱発電における次の問題は、国立公園問題と温泉問題である。国立公園問題は有望な地熱資源の80%以上が国立公園の特別地域内にあることに起因している。国土特に国立公園においては、適切に景観等の環境を保持することの重要性は論を待たない。また、同時に、われわれは、地球温暖化に代表される地球環境問題にも注意を払わなくてはならない。すぐれた地熱発電をより低いコストで実施していくためには、まず、良質な資源を利用することが必要である。この良質な地熱資源の多くは火山の近くに存在しており、わが国の火山地域の主要部分はいずれも国立公園に属している。そして、昭和47年（1972年）、旧通産省と旧環境庁は当分の間、国立公園特別地域内では新たに地熱発電所を建設しないという覚書を取り交わした。実は、それ以前に建設された地熱発電所はほとんどが特別地域内に建設されたものである。この覚書が、その後の地熱発電所建設の大きな足枷となった。実際、その後建設された発電所は特別地域の境界線に沿って建設されたものが多く、高温資源の中心にある地熱エネルギーが開発利用されたものではない。

現実には建設される地熱発電所はその周辺自然環境に配慮して建設が行われている。そして、昭和47年の覚書以前に特別地域内に建設された地熱発電所が景観等自然環境を大きく破壊した等の指摘はなく、各地熱発電所に設置されているPR館を訪れる観光客も地熱エネルギー利用の素晴らしさを実感する一方、このような発電施設の建設を望まないとの意見を聞いたことはないのが現実である。周辺の自然環境と調和しながら、発電所を建設・運転し、同時に、地球温暖化問題にも役立つ地熱発電所を、国土・地球の環境維持のための1つの解決策として積極的に、国民の前に提示していくことが重要である。

景観問題では政策担当者の誤解があるのも確かである。わが国で地熱開発が開始された今から40年も前の頃の環境への配慮不足がいまだに、環境問題を議論するとき初めに持ち出されるのである。地熱流体の生産を目指してボーリング坑を掘削後、その生産量を実際に確認するために、熱水・蒸気を噴出させてその量を実測する必要がある。地熱開発の初期の頃、冬季、上昇してくる熱水・蒸気をそのまま大気中高く噴出させた結果、その流体が周辺の樹木に付着・凍結し、樹木が枯れたことがあったと言われる。当時は地熱流体をそのまま大気中に噴出するのが普通であり、また、地熱流体の樹木への付着・凍

結・枯死に大きな注意が向けられなかったのは確かであろう。しかし現在では、全くそのようなことはなく、生産された蒸気・熱水はセパレータで分離され、蒸気は、サイレンサーを通じて、大気中に放出、熱水はピットに貯められた後、還元井によって地下に戻される。大気中に放出された蒸気は噴出口近傍では白色に見えるがやがて見えなくなってしまう。これは一例であるが、誤解があるのも確かである。

また、以下のようなことがあるのも事実である。地熱発電所で最も目立つのは冷却塔から立ち上がる白煙（水蒸気のように見えるが、実際には微小な水滴である）である（写真1）。これを見て、多くの見学者は大地の息吹を感じると言って肯定的な見方をする。しかし、その白煙が森の中に似合わないと感じる人もいる。景観上の善し悪しは個人的な判断要素が大きいところに難しさがある。しかし、そのような意見があることにも配慮しながら、総合的に判断していくことが重要である。技術的に白煙を見えなくすることも可能である。しかし、それはコストへも反映される。

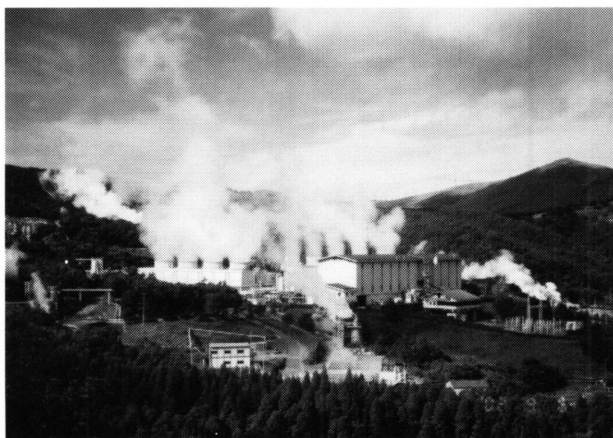


写真1. 地熱発電所の景観（白煙を上げるのが冷却塔）

冷却塔とともに、地熱発電所で目立つものとして地熱流体輸送用のパイプがある。多くの地域では、その表面は銀白色である。これが気になるという人もいる。地下に埋設すればという意見もある。それも可能であるが、やはりコストに反映される。いずれにしても、この国立公園の景観は総合的に判断する必要がある。

すでに述べたように、森林の中に、このような地熱発電所は自然景観上望ましくないから撤去すべきと言う議論は聞いたことはない。この景観問題の解決のためには、国立公園特別地域内に建設されている地熱発電所を実際

に見ていただき、具体的な議論をすることが必要と考える。地熱資源は国民のものであり、国民が議論し、結論を出すものである。その結果、大部分の国民が反対であれば、国立公園内の地熱利用は止めればよい。筆者自身は、事実の十分な理解に基づく予断のない正しい判断は、決してそのような結論に至らないと考える。

次に大きな問題は温泉問題である。有望な地熱資源が見出される地域近傍に既存の温泉地がある場合がある。そして、地熱発電が行われると温泉が枯れてしまうのではないかという意見が温泉関係者から聞かれる。上記のような心配があることは、一般論としてもっともなことである。地熱発電に限らず、何らかの影響によって温泉が出なくなれば営業ができなくなってしまうからである。

地熱発電に使う地熱流体は、一般に地下深部（1～3km）の地熱貯留層から採取され、温泉水は地下浅部（数10m～数100m程度。100m以内の場合も多い）の温泉帯水層から採取される。地熱流体も温泉水もその熱のもともとの起源はマグマにあるから、共通である。降水が地下に浸透し、マグマの熱で温められ、最終的に、地熱貯留層や温泉帯水層に貯えられることになる。温泉の場合は自然に湧出している場合があるが、多くの場合、両方ともボーリング坑を掘削して、地上に流体を取り出している。

一般に深部にある地熱貯留層と、浅部にある温泉帯水層との間にはいろいろの関係が考えられる。親子のように非常に密接な場合、あるいは遠い親戚のような場合もある。親子のように密接な関係がある場合には、地熱発電が温泉に影響を与えることも考えられる。このような場合、両者の関係を科学的に調査し、温泉の営業に影響の出ない範囲で地熱発電を実施すべきである。場合によっては、発電出力を大幅に減ずる必要がある場合もあるかも知れない。また、場合によっては、新たな温泉井を掘削することで解決できるかも知れない。すなわち、影響が出た場合、あるいは予想されるときには、両者がよく話し合う必要がある。このとき、相対的に利用量の少ない温泉関係者の意見をよく聞く必要がある。また、地熱貯留層と温泉帯水層とがほとんど関係ない場合もある。すなわち、地熱発電と温泉との関係は、科学的に十分検討して、その結果に基づいて両者が納得することが大事である。地球の恵みを温泉にも地熱発電にも生かせる共生的利用は十分可能である。地熱エネルギーは国民全体のものなのである。温泉関係者だけのものでもなく、

地熱発電関係者だけのものでもない。

最後に、わが国の地熱開発で温泉に影響が現れたことが明確にあるかどうかについて触れたい。わが国の場合、現在 18 ヶ所の地熱発電所があるが、地熱発電の結果、温泉に影響が現れて、営業ができなくなった例はない。しかし、外国においては大きな影響があった場合が知られており、科学的な報告がなされている。ニュージーランド・ワイラケイ地熱発電所、フィリピン・ティウイ地熱発電所の例である[5]。これらの場合、既存の温泉や間欠泉がその活動を停止したり、場合によっては、噴気活動が活発化したり、小規模な水蒸気爆発が発生している。このように影響が現れた理由として、地熱貯留層と温泉帯水層との関連性についての地質的・地形的理由が挙げられるとともに、熱水を地下へ還元しなかったことも大きな理由である。地熱開発の初期には、必ずしも、地下のシステムがよく理解されていなかったことや環境問題への配慮が十分でなかったこともあったと言えよう。

しかし、現在、地下のシステムを理解する技術は大きく進歩するとともに、温泉への影響も十分配慮することが地熱開発の基本になっているし、温泉が枯れても地熱発電を続けるとの考えを持っている地熱発電関係者は皆無であると断言できる。温泉に隣接した地域で地熱発電を計画する場合、温泉帯水層も含めて地下システムを理解するのが一般的であり、このような情報は温泉を長く維持したいと考える温泉関係者にとっても利益になると考えられる。

なお、地熱発電開始前に、長期にわたって温泉に影響はないとの予測が得られていても、数 10 年後にも影響が絶対出ないかと問われた場合、絶対影響がないと断言するのは科学的ではないと考えられる。地下システムに理解が深まったとは言え、われわれは予めすべてを理解しているわけではない。それに備えるための人間の知恵として、「モニタリングとモデリング」がある。「モニタリング」とは、地熱貯留層の温度や圧力、あるいは温泉の温度、流量、化学成分等を定期的に測り、その変化を見続け、変化の有無を把握していくことである。一方、「モデリング」とは各種の調査結果に基づいて、地熱地域地下の構造がどのようなものであり、そこで、熱と水の流れがどのようなものであるかを、まず概念的に示し（概念モデルを作るという）、それに基づいて、地下における熱と水の流れ、さらには地熱流体の化学成分についてコンピュータで定量的に示す（数値モデルを作るとい

う）ことである。

新たなデータが得られれば、それを新たに入力し、地下のシステム（熱や水の流れおよび地熱流体の化学成分）をコンピュータによって改めて再現し、それに基づいて将来を予測し、地下の状態の経時変化を定量的に把握していく。すなわち、地熱発電に伴う地下システムの経時的変化をより高精度に把握していくのである。もし、温泉に影響が出た場合は、どのような対応策を取るべきかを科学的に考えることができる。場合によっては、生産あるいは還元を見直す必要が出てくるかもしれない。そのようなことが、「モニタリングとモデリング」によって、科学的・客観的に行うことが可能なのである。

地熱貯留層は深部にあり、温泉帯水層は浅部にあり、その間には不透水性のキャップロックがあるので地熱発電は温泉に影響を与えるはずがないという考えに基づいて地熱発電を計画することや、地下のことはよくわからないが、地熱発電は温泉に与える可能性があるかも知れないということで、地熱発電に反対することも、科学的態度とは言えない。科学的根拠に基づいて、冷静に議論することが重要と考えられる。温泉と地熱発電との共生は可能な道であり、それを追求することが国民全体の利益につながる。

#### 4. 持続可能な地熱エネルギー利用

これまでの議論で、わが国において地熱エネルギーの利用を進めていくことの妥当性ととともに、主に、地熱発電促進における社会的阻害要因を考えてきた。以下では、技術的な観点からの、地熱発電における 1 つの重要な問題を議論したい。それは、地熱発電の持続可能性の問題である。持続可能性とは、長期間（少なくとも数世代）にわたる安定な発電が実現できるかと言うことである。地熱エネルギーは再生可能エネルギーの 1 つであるが、その持続可能性は太陽光や風力のように自明ではない。地熱発電の場合は、過剰な地熱流体の採取を行えば、地熱発電が継続できない場合もあり得る。すなわち、個々の地熱地域には持続可能な発電を継続していくための「適切な発電量」というものが存在する。この「適切な発電量」よりも過大な発電を行えば、短期間は生産を実現できても、やがて出力は減少し、持続可能な発電は行なえない。

一方、「適切な発電量」より過小な発電であれば持続可

能な発電は実現できるが、存在する資源の一部だけを利用するだけであり、有効な利用と言えないし、また、このような場合は一般に経済性が成り立ちにくいであろう。

地熱地域ごとに「適切な発電量」を、開発前の調査に基づいて正確に評価することができればよいが、なかなか困難である。実際、わが国の地熱発電所の中には、設備出力を実現していないものがある。約半数は適切な出力を長期間維持しているが、残りの半数の地熱発電所は設備出力より、10%ないし25%程度低いところがある。中には、50%程度低いところもある。このように設備出力よりも実際の発電量が少ない場合は、経済的にも不利になり、一定の発電量を維持するのが精一杯で、新たな発電所建設の方向に向うには大きな困難があり、2000年以降新たな地熱発電所建設に取り組む企業が現れなかった理由の1つになったとも言える。

従って、「適切な発電量」を開発の早い段階で見出ししていくかという課題がある。地下システムの理解が進んだとはいえ、現在でも、発電所建設前に「適切な発電量」を正確に予測することには困難がある。そこで、現在では、それを克服する方法として、「段階的開発」という考え方が提案されている。これは、過大な設備を建設するリスクを低減する手法であり、発電所運転開始時には、予測される資源量より少ない「控えめな開発」に相当する設備（たとえば50%程度）でスタートし、発電開始後、「モニタリングとモデリング」を繰り返し行うことで、「適切な発電量」を開発のより早い段階で見出し、それ以降、その出力で長期間安定な発電を行うことである。これによって、長期間の発電を行うことになるので、結果的にも最も経済的に優れている発電と言えよう。

わが国においても、このような「段階的開発」の結果、持続可能な発電が継続されている発電所として、わが国最大の地熱発電所大分県八丁原地熱発電所（11万kW）がある。この発電所では、1977年に1号機（5万5000kW）が設置され、1990年に2号機（5万5000kW）が設置された。1977年に認可出力2万3000kWで発電を開始し、1980年に認可出力5万5000kWとなった。そして、1990年に新たに5万5000kWの出力が認可され、合計11万kWとなり、現在、発電所建設後、30年以上となるが安定した発電を継続している。この持続可能な発電の実現は、すでに述べた「モニタリングとモデリング」に基づく適切な貯留層管理、地下システム把握のための技術の展開あるいは発電システムの改良等の技術的努力の結果

である[6]。すなわち、われわれは現在、地下あるいは地上のシステム理解の技術的向上により、持続可能な地熱発電を行う十分な技術的基盤を持っている。

## 5. 世界の地熱発電—将来展開に向けて—

さて、以上で、わが国の地熱発電の現状と課題についての議論を行ってきたが、近年の世界の地熱発電の現状と将来展開について、最後に紹介したい。

現在、わが国の地熱発電開発は残念ながら停滞しているが、地熱発電に対する理解も少しずつ広がり、近い将来、大きく展開する土壌ができつつある。現在、発電所建設に向けて、具体的な調査が続いている地域が複数あるというのがわが国の率直な現状と言える。

世界の地熱発電の現状はどうであろうか。実は、わが国以外の火山国はいずれも地球温暖化問題を契機として、国の明確な方針と適切な支援策のもとで確実に進展している。2000年時点ではわが国の地熱発電設備出力は世界第5位であったが、その後、インドネシア、ニュージーランド、アイスランドに抜かれ、現在世界第8位で後塵を拝することになってしまった。また、火山国でないドイツでは、深さ3500mを超える深層熱水を汲み上げ、バイナリー発電によって地熱発電を開始し、現在2ヶ所の地熱発電所を持っているがさらに増強する状況にある。

一方、これまた火山のないオーストラリアでは深さ4km深程度に存在する熱水も含む高温岩体からの発電を目指した熱抽出を多くの地点で競っている。この開発はまさに国を挙げて熱狂的に行われており、近い将来、実現するであろう。さらに、米国ではオバマ政権となり、再生可能エネルギーへの取り組みが劇的に変わった。地熱エネルギーにとっても例外ではなく、2010年には設備出力は300万kWを超え、依然世界1位の位置を保っているだけでなく、エネルギー省の積極的な支援のもとに、2020年には、1500万kW、2030年には5000万kWという極めて野心的な目標を立て、現在、全米各地で地熱発電所の建設を目指した調査が進行している。これらの地熱発電所の多くは、火山の存在する西部地域に限られているが、今アメリカでは、深部の、それほど高温でない地域でも存在する地熱資源に対して、EGSの考え方のもとに、火山のない東部地域も含めた全米地域を対象とした野心的な地熱開発プログラムが進行している。

近年、世界的には、EGSのような新しい概念に基づい

た地熱開発が想定されるとともに、1990年代に注目されたマグマエネルギー開発あるいは高圧深層熱水の開発も今後改めて注目されることになるだろう。さらに、地熱電力が利用地近くではなく、火山のある山岳地域で生産されるところから、現地で、地熱エネルギーを利用して、水素を生産しようという考え方も提案されている。この考え方は、アイスランドで提案されたが、経済性から、これまで十分な進展を見ていない。しかし、技術の進展あるいは国の支援策の充実により、地熱発電の低コスト化が進めば、送電線問題に悩まされることがない、地熱発電地での水素生産が検討されることにもなるだろう。

2010年4月末にはインドネシア・バリ島で地熱に関する世界最大の会議「世界地熱会議2010」が開催される。そこで開催されるセッションの多くは、在来型の地熱エネルギー利用の成果についてではあるが、将来的技術として、マグマ、高圧深層熱水資源、EGSとともに、「水素エネルギー」というセッションが初めて開催されることになっている。発表論文数は多くはないが、今後の展開を予想させるものである。このセッションで発表される予定の講演は、地熱発電を使って、電気分解で水素を生産すると言うものではなく、熱水に含まれる硫化水素を利用して有効に水素を生産することを提案している。わが国の研究者からもこれに関した発表が予定されている。地熱と水素の新しいコラボレーションと言えよう。今後の進展を期待したい。

## 6. おわりに

わが国の地熱エネルギー、特に地熱発電の現状と課題について紹介した。わが国には世界第3位の地熱資源量がある。しかし、残念ながら、不十分な国の支援は、その資源量を生かすきっていない。この豊富な地熱資源を生かすためには、固定価格買い取り制度など国の積極的な支援策、国立公園問題あるいは温泉問題の科学的観点からの解決が要請される。これらの課題が適切に解決されれば、わが国の地熱エネルギー特に地熱発電は地球温暖化問題あるいはわが国のエネルギーセキュリティへの大きな貢献が可能である。2050年にはわが国の発電量の10%程度を地熱発電がまかなうことは不可能ではない[7]。

現在、世界各国は競って地熱エネルギー開発に力を入れている。そこでは、従来型の地熱発電方式だけでなく

EGS という新しい考えに基づいた開発手法も積極的に取り上げられている。このような中で、地熱地域で水素を生産するという未来技術の検討も具体的に始まっている。

## 謝辞

本稿をまとめるにあたって、産業技術総合研究所顧問野田徹郎博士には原稿に目を通していただき、多くの適切なご指摘を頂きました。ここに記して深謝いたします。

## 参考文献

1. L. Rybach and M. Mongillo; GRC Transactions, 30, 1083-1090 (2006)
2. J. W. Tester et al.; The Future of Geothermal Energy, 1-372 (2006)
3. H. Muraoka ; Jour. Japan Institute of Energy, 86, 153-160 (2007)
4. 地熱開発研究会 ; 地熱開発研究会報告書, 1-50 (2008)
5. R. G. Allis ; New Zealand Jour. Geology and Geophysics, 24, 1-19(1981)
6. D. Gambil and D. B. Beraquit ; Geothermics, 22, 403-416(1993)
7. 江原幸雄・西島 潤 ; 日本地熱学会誌, 26, 181-193 (2004)
7. 江原幸雄ほか ; 日本地熱学会誌, 30, 165-179 (2008)

## 追記

小論は地熱を専門としない方を想定して執筆したが、やや説明不足の点があるかも知れない。さらに、興味のある方には、拙著であるが、「日本列島は地熱エネルギーの宝庫」(樺歌書房、2010)を紹介したい。