

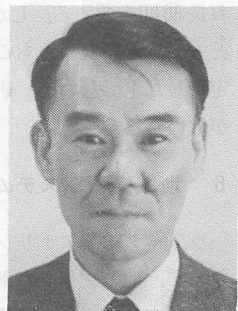
■ 展 望 ■

地熱開発の現状と展望

Present Status and Future Prospects for Geothermal Resources Development

菅 原 晟 介*

Seisuke Sugawara



1 はじめに

地熱エネルギーはその資源が非枯かつ性であること、比較的クリーンなエネルギーであること、さらに熱媒体が水であるためその取扱いも容易であること等から、その開発・利用は早くから注目されていた。わが国では古くから温泉利用されていた地熱エネルギーが商業規模の発電に利用され始めたのは1966年であり、地熱発電は火力等の他の発電方式と較べても経済的に充分競争力のあるものであることが判ったのである。

二度にわたる石油危機は全世界的にエネルギー情勢を一変させ、その結果、わが国でも国産エネルギーの有効活用、エネルギー源の多様化の観点からも、従来は研究開発の域を出なかった石油代替エネルギーの開発に一段と拍車をかけることとなった。サンシャイン計画のもとに1973年来、太陽熱、地熱、石炭のガス化・液化等、新エネルギーの開発・利用技術の研究が政府レベルで進められて来たが、これに加えて、1980年5月「石油代替エネルギーの開発及び導入の促進に関する法律」が施行され、各種代替エネルギー開発の施策の強行が図られ、さらにその推進母体として、新エネルギー総合開発機構等が発足するに及んで、官民挙げての開発推進が本格化した。

地熱エネルギーは他の新エネルギーよりも早期実用化の期待が大きく、その意味でわが国のみならず諸外国でも開発の努力が重ねられている。

本稿は地熱開発・利用の現状と今後の展望を概説するとともに、開発・利用の技術に触れてみた。

2 地熱エネルギーと地熱資源

わが国は火山と地震の国と云われるが、このような特徴をもった地域は、太平洋を環状に取り囲み、また、アフリカ東部から紅海、トルコ、ギリシャ、イタリー

に至る地域も同様である。さらに、太西洋の海溝や海嶺に沿っても連続して分布している。地熱活動は火山活動と密接な関連をもち、従って世界の有力な地熱地帯は火山分布とほぼ一致して分布している。

海溝、海嶺や断層で境された少数のブロックが夫々相対運動をし、その境界でのみ活発な地質現象を生じると考えるプレート・テクトニクス説が現在では広く受け入れられている。このブロックは平均的な厚さ100 kmのリソスフェア（プレート）と呼ばれる層からなっていて、大陸地殻や火山島をその上に乗せたまゝ、年間、数～10 cmの速さで相対運動をしており、火山地域はこのようなプレートの境界に沿って分布している。このプレートの境界付近では、伝導による平均的な熱エネルギーの地球表面への放出よりも大きな放出が、火山の噴出物や、地熱々水や蒸気の放出の形で行なわれている。活火山の近傍においては、地殻内のマグマ溜りを熱源として、様々な高熱流量域が出来ると考えられている。このマグマ溜りは地下水を加熱して熱水を形成し、その反応によって地殻の岩石を変質させ、不透水性の帽岩層を形成し、それより上部の地層とは明確な区分がされると考えられる。地熱は、この帽岩層より下部の熱水、または蒸気を云う。一方、温泉に代表されるもう一つのタイプの地熱は、帽岩層とは関係なく、地下水の通路が熱源近くを通ることにより地下水が加熱されることにより生じているもので、地熱地域は、いわゆる温泉よりも地下水や降水の通路が、もっと深部まで達して、より高温の流体となっているものである。

これらの地熱エネルギーを資源としての概念で捉える場合、他の天然資源と同様に、その時々々の経済情勢と、それに刺戟されて起る技術革新の程度によって変化する。ニュージーランドで初めて熱水型資源を利用した地熱発電技術が完成し、それ迄天然蒸気のみに依存していた地熱発電の可能性が一躍拡大されたのがそ

* 新日本製鉄株式会社開発企画本部地熱開発室長

〒100 東京都千代田区大手町2-6-3

の好例である。

また、オイル・ショック以降、これらの他、高温岩体や、さらに非火山性の中低温熱水まで地熱資源と考えられるようになって来た。時を追って、資源の概念はこのように変わり、地熱資源分布図をかくとすれば、次第にそのかき換えが必要になるのであるが、現時点地熱資源は表1のように分類するのが一般的である。¹⁾このうち、商業的に発電用として開発・利用されているのは、現時点では蒸気卓越型（わが国では岩手県松川地熱発電所のみ）と、高温熱水型であり、その他のタイプの開発・利用は未だ試行段階にあるといえる。

3 地熱資源の開発・利用の現状と展望

世界各地域での地熱開発の現状をその歴史をふり返りつつ概説してみると以下の通りである。

地熱開発、とくに発電への利用を述べる際、イタリアのそれに触れざるを得ない。イタリアは地熱発電所を他に先駆けて建設し、近時、米国のガイザース地域(The Geysers)で急速な開発が始まるまでは、発電容量

も長い期間、世界最大であった。イタリアの地熱発電所は、斜塔で有名なピサの南々西約70 kmのトスカーナ地方に集中しており、ラルデレロ(Larderello)地域と総称されている。1904年、プリンス・ピエロ・ジノリ・コンティが初めてこゝで天然蒸気を使って発電を行なったことが記録されており、1913年には、250 kWの発電所を建設して商業用電力供給事業が本格的に開始された。

この端緒となったのは、附近一帯の温泉中に硼酸が含有されており、古くはエナメルの色に利用されていたが、1818年フランス人のフランセスコ・ラルデルによって硼酸の工業的抽出が始められた。原料となる硼酸含有の温泉や蒸気、さらには溶液濃縮用熱源としての蒸気の採取用に地熱井が掘削されたのである。ラルデレロ地域は彼の名にちなむものである。

第二次世界大戦後、連合軍の一員としてイタリアに駐留していたニュージーランドの一将校は、実地に見聞したラルデレロ地域の地熱発電の状況をもとに、帰国後、同国での地熱開発を唱え、それが今日のワイラケ

表1 地熱資源の分類

		温度 (°C)	圧力 (kb)	
新規マグマ貫入に関係(火山性) Related to Young Igneous Intrusion	マグマ Magma	650~1,200	0.2~1	
	高温岩体 Hot Dry Rock	300~650	0.1~1	
	熱水対流系 Hydrothermal Convection System	蒸気卓越型 Vapor-dominated	> 240	0.05~0.2
		高温熱水型 High Temperature Hot Water	> 150	0.05~0.4
		中温熱水型 Intermediate Temperature Hot Water	90~150	0.01~0.1
		低温熱水型 Low Temperature Hot Water	50~90	0.001~0.005
新規マグマ貫入に無関係 (非火山性) Not Related to Young Igneous Intrusion	深層熱水 Hot Water in deep Sedimentary Basin	広域熱伝導系 Regional Conductive	15~450	0.001~2.2
		静水圧型 Hydrostatic Pressured	50~300	0.05~0.5
		岩圧水型 Geopressured	> 200	0.9~2.2
	深部天水循環系 Deep Meteoric Circulation	50~250	0.001~0.4	

(Wairakei) 地域を中心とする大規模な地熱発電の端緒となったと云われている。

前述のイタリアーでは、噴出する流体は過熱蒸気であるのに対し、ニュージーランドのそれは、噴出流体の70～80%は熱水であって、その点わが国の実状によく似た状態である。同国での発電の成功はわが国への強い刺激となっており、その開発計画を促進したのである。

わが国では、大正年間からすでに地熱発電の試みが行なわれた例もあるが、本格的には1951年、工業技術院が別府で30kWの試験発電を行ない、1953年には、九州電力(株)が大分県大岳地域の調査、1963年には東化工(株):(現、日本重化学工業(株))が岩手県松川地域で研究を始める等、次第に電力供給用としての地熱開発が実用化段階となって来た。

1966年、松川地熱発電所が、1967年には大岳地熱発電所が運転開始され、ついで秋田県の大沼、宮城県の大首、さらに1977年来、大分県の八丁原、岩手県の葛根田の各地熱発電所が完成し、現在では総発電容量16.5万kWとなったのである。

一方、イタリアー、ニュージーランドについて地熱発電を実用化したのは米国である。米国の中西部には広大な地熱地帯が広がっているが、殊にカリフォルニア州はその北部のザ・ガイザースと南端のインペリアル・バレーが著名で、前者では大規模な商業発電が行なわれている。試験的発電が行なわれたのは1922年であるが、本格的開発はマグマ・パワー社とサーマル・パワー社が共同して1956年に電力会社であるパシフィック・ガス・アンド・エレクトリック社(PG & E)と蒸気供給契約を締結して開始された。爾後、1967年にはユニオン・オイル・オブ・カリフォルニア社も共同開発に加わり、PG & Eの発電所建設も加速され、現在のザ・ガイザースにおける総発電設備容量は90万kWを越えている。

一方、太平洋中央海嶺上にある島国、アイスランドは面積約10万km²、人口約22万人の水産国で、電力消費量も少なく、1000万kW以上あるといわれる水力発電適地も未だその数%が利用されているに過ぎない。このため、同国の豊富な地熱資源の利用も、電力としてのそれよりも、地熱々水による暖房にその主力が置かれ、現在、国民の60%以上が地熱々水による暖房を利用していると云われている。人口約8万人の首都レイキャビクは、市営公社による地域暖房網によってほぼ全域がおぼわれており、スモークレス・シティが市の観光のキャッチ・フレーズとなっている。

これらの開発事例の他、1970年代に入って、メキシコがセロプリエート地域で、フィリピンがティウイ、およびロスパニョス地域で相次いで地熱発電に成功し、その後の開発も急速に進められている。

これら各国の運転中の地熱発電所の設備容量の合計を図示したのが図-1である。また、表2には、わが国の地熱発電所を示した。(2)

わが国では、毎年3ヶ月にわたって、開発途上国のために、地熱エネルギーに関する研修会を九州大学で開催して来ているが、これに参加して来た国々が地熱開発に意欲ある国とするならば、上記の国の一部も加え、それは20数ヶ国に及ぶ。今後、地熱開発の歴史の第2段階が華かに展開されることを願ってやまないが、最近のエネルギー事情を考えると、必らずこれらの国々に於ても、本格的開発段階が遠からず期待される。現時点判明している全世界の建設中、および計画中の地熱発電所の設備容量の総計は約500万kWに及ぶと云われている。(2)

わが国では先に地熱発電の開発目標を閣議決定したが、その出力合計は、1985年で100万kW、1990年で

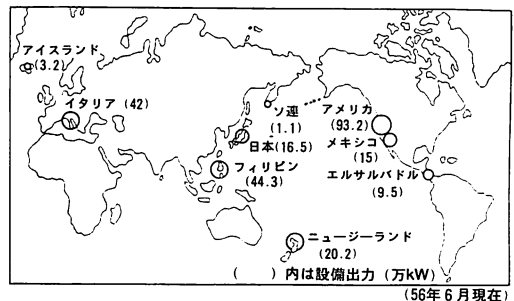


図-1 世界の地熱発電所

表2 わが国の地熱発電所 (56年8月現在)

	会社名	発電所名	所在地	出力(kW)	運転および 運転予定
運転中	日本重化学工業(株)	松川	岩手県 松尾村	22,000	54年10月
	九州電力(株)	大岳	大分県 九重町	12,500	42年10月
	三菱金属(株)	大沼	秋田県 鹿角市	10,000	49年6月
	電源開発(株)	鬼首	宮城県 鳴子町	12,500	50年3月
	九州電力(株)	八丁原	大分県 九重町	55,000	52年6月
	日本重化学工業(株)	葛根田	岩手県 紫石町	50,000	53年5月
	東北電力(株)	杉乃井	大分県 別府市	3,000	56年8月
	(株)杉乃井ホテル 小計			165,000	
建設中	道南地熱エネルギー(株)	森	北海道 森町	50,000	57年11月 予定
	北海道電力(株)				
	合計			215,000	

350万 kW としており、1995 年の見通しとして700万 kW を挙げている。現時点の出力 16.5 万 kW からは飛躍的な値ではあるが、開発促進のため、政府施策も整備強化されつつあること、また、それに対応して民間の開発意欲も向上して来ており、その目標達成が期待されることである。

表 2 に示した企業の他、同和鉱業 (株)、三井金属鉱業 (株) や、最近では石油資源開発 (株)、出光地熱開発 (株)、さらに新日本製鐵 (株)、日鉄鉱業 (株) 等が全国各地の有望立地で開発をめざして、地熱の探査活動や、調査井の試掘調査を積極的に行なっており、それらの開発成功が待たれる。

4 地熱開発技術

地熱資源の開発技術を大別すると、探査、掘削と利用技術である。こゝではそれらの概要を述べるが、利用技術は発電のそれに限定する。

4.1 探査技術

地熱資源の開発に先だって、地熱流体の貯留層の確認と評価が行なわれなければならない。それは調査井の掘削とそれに付随する各種特性値の計測によって完成される。しかし掘削には多大の経費を要するので、調査井の数は必要最低限にとどめることが要求される。こゝに各種の地表探査技術が駆使される理由がある。以下に、まずその現状を述べてみる。⁽³⁾

現在、掘削点の選定、ひいては貯留層の確認、評価をするための探査方法が体系化されている訳ではないが、内外で採られている方法は大きな差はないものである。地下資源の探査方法には多くのものがあり、それぞれ一長一短であるが、その実際の適用に当っては、数種の方法が併用される。地熱の探査も例外ではないが、それ以外の地下資源の探査に較べ特徴的なのは、地温や放熱量の測定により、直接、資源の存在が推定出来る点である。

探査法は、方法論的に地質学、地球化学、および地球物理学の三つの応用として分類出来る。

地質学的探査法として、まず、地表地質の露頭調査による地下地質構造の推定が挙げられる。地質構造と地熱流体の存在との関係は現在までのところ必ずしも明確にされている訳ではないが、幾つかの合理的予想は可能である。露頭調査の一手法として空中写真を利用した写真地質調査法の近年の進歩は著しく、地熱探査にも利用されている。また、人工衛星や航空機からの広域赤外線映像で、未発見の熱徴候を発見すること

も行なわれている。

変質帯調査も特徴的な地熱探査方法の一つである。地熱地域では過去から現在にわたって、地表における地熱活動の結果、岩石が熱水によって変質を受けている部分があり、それらの分布状況と性状を調査することによって有力な情報がえられる。過去において高温の熱水環境下にあった所は、たとえ現在、地表に高温部がなくとも、地下深部には高温部が存在する可能性があるからである。

地球化学的探査方法には、目的別にみると地下構造の調査と地熱流体そのものの探査、およびその性状調査とがある。

地下構造調査は、主として潜在する断層の検出に用いるもので、土壤中のラドン、水銀、炭酸ガス等の濃度分布を調べるのがその一方法である。一般にそれら成分は地下深部から断層部を伝って地表へ運ばれるので、分布状況から断層の存在を推定しうる。断層部は地下の地熱流体の通路となる可能性が考えられるので、これの検出は有用である。

また、地表でみられる温泉や噴気の化学的性状を調査することは、地熱流体の存在部の中心の推定や、その性状そのものを解明する手掛りを与える。

地球物理探査法は、石油、天然ガスの開発とともに近年その発達が著しく、地熱探査にもその幾つか適用されている。その原理は、地表での物理測定によって、地下構造物の各種物理特性値の分布を調べるものであるが、地熱流体の存在とそれら特性値との関係が明確にされていない以上、地熱の探査法として絶体的なものではない。地熱探査法として広く用いられている電気探査法や、地磁気地電流法は、地中に電流を流したり、磁場を与えることによって誘起される地表上の電位分布等を測定することによって、地下深部の見掛比低抗を知り、地下構造を推定するものである。地層中の熱水は溶解イオンに富み、高温であることから、そのいずれも電気比低抗を小さくするものであるため、低比低抗部は、熱水の存在を推定させる。

この他、地震探査、重力探査、磁気探査等各種の地球物理探査法がしばしば用いられるが、これらは地熱流体の存在や熱構造を直接把握するものではなく、それらを規制すると考えられる地質構造を調査する目的で適用されるのが殆んどである。

以上のべた地表探査の結果から地熱の存在が推定されると、その確認のため調査井が掘削される。掘削の途中では岩芯標本が採取されて地下の地質が把握され

るとともに、掘削された孔内の温度の測定や、流体の噴出試験を含む各種試験法によって、流体そのものの性状の他、その通路となりうる地層の特性値が把握される。

地熱貯留層の評価にも近年、石油開発分野で発達した貯留層工学が応用され始めた。すなわち、調査井等から得られた地層内各点の温度、圧力や、地層の孔隙率、浸透係数等を与え、各点での物質バランスと熱バランスの基礎方程式を解くことによって、開発時想定される生産井の配置、本数に従った貯留層内の圧力、温度の経時変化等を求めることが出来る訳で、これにより、生産井の配置条件や、噴出条件の最も合理的な答を求めることが出来る。これらは、電算機を利用したシミュレーション手法で行なわれる。

4.2 掘削技術

地熱発電を目的に開発される深度は、500 m～2500 m が一般的となっている。しかし今後、高温岩体等の利用技術が進むにつれ、地熱井の深度も一段と深くなる事が考えられる。

つぎに坑井の径は、それが大きい程、産出流体量も当然大きくなっていく。しかし、現在の掘削設備・機器および技術を前提にすれば、むやみと大きい坑径とする訳にも行かない。

各開発立地によって、これら坑井の仕様は多少の違いはあるが、口元坑径が20～26"、最終坑径が7～8 5/8" のところが多い。

地熱の坑井掘削上の特異性を、たとえば石油の場合と較べてのべるとつぎの通りである。

- ① 地表から坑底まで火成岩のところが多く、一般に硬質岩で、掘進率が低い。
- ② 孔内温度が高く、ビットや泥水に耐熱性が求められる。
- ③ 逸泥層が多く、逸泥防止の材料や方法の選定に注意を要す。

それぞれの問題に対応して、逐次、技術が開発されつつあるが、基本的には石油、天然ガスの分野で発達した掘削技術がベースとなっていることは否めない。

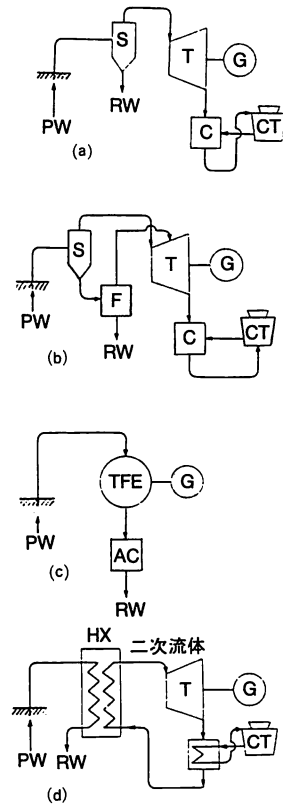
また、実際の掘削工事に当っては、傾斜掘りが利用されることが多い。これは、地熱地域の自然、社会環境と開発行為の調和を図る意味から、掘削工事用地や地上のパイプライン敷地の面積を節約出来るからである。

米国の Los Alamos 科学研究所では、米・日・西独の共同研究プロジェクトとして、高温岩体の熱を人工

熱水系で抽出することが試みられている。この場合は、在来の地層よりも、より高温高压下での掘削工事となり、機器、資材や工法にも革新的なものが要求される。さらに、人工熱水系を高温地層内に形成するため、水圧によるフラクチャリング技術が用いられているが、この技術は、蒸気卓越型や熱水型の従来から開発対象となっている地層でも、その浸透率を増加させて、流体の流れをよくするのに用いられている。

4.3 地熱発電技術

地熱資源は本来、低品位のエネルギーであるため、これの経済性を保ちながら有効に発電利用するためには、その熱サイクルの選定、およびプラント全体の基本計画の適否が非常に重要である。熱サイクルは地熱流体の主として気水比によって選定され、さらに出力



PW: 生産井 RW: 還元井 S: 気水分離器
F: フラッシュャー T: タービン
TFE: トータルフロー膨張機 G: 発電機
C: 凝縮器 CT: 冷水塔 HX: 熱交換器

図-2 地熱発電の熱サイクル

を大きくするため、タービンの出口に凝縮器を設け背圧を低くする復水式と、凝縮器を設けず大気に排気する背圧式に分かれるが、多くの場合、復水式が用いられる。

図-2には各種のサイクルを示す。⁴⁾ 気水比が大きいときは、気水分離器のみを用いる (a) シングル・フラッシュ・サイクルが用いられる。気水比が低いときは、多段フラッシュ・サイクル (b) を用い、熱水からフラッシャーでフラッシュさせて得た蒸気をもタービンの中段に送って用いる。この場合、出力は増加するがフラッシャー等の機器や配管が増加するので二段以上は用いられていない。気水比が非常に低い場合は、地熱流体の全てを用いるトータル・フロー方式 (c) や、地熱流体のエネルギーを熱交換器で他の低沸点媒体を加熱蒸発させ、その蒸気でタービンを駆動させるバイナリー方式 (d) の実用化をめざして、現在、サンシャイン計画で開発が進められている。

多段フラッシュ・サイクルを用いる場合には、坑井から発電所までの、一次蒸気、二次蒸気の輸送方式の選定も問題となり、気水混合方式が採用されることも多いが、それらは地熱流体の性状やプラント全体の基

本計画上の各種要因によって決定される。

5 おわりに

地熱エネルギーの開発・利用を拡大してゆくには、様々な問題があるが、本稿でふれた技術課題の他には、環境行政との調和を初めとして、他の権利との調整問題等、開発に伴う社会的問題がある。

それら諸問題の解決は関係各分野の協力を必要とするものであり、エネルギー資源の開発が効率よく推進されることを願うものである。

参考文献

- 1) 角清愛「日本の地熱資源評価」『地質ニュース』No. 295, 1979.
- 2) 藤富正晴「百五十分の一の責任」『地熱エネルギー』Vol. 6, No. 1, 1981.
- 3) (財)新エネルギー財団「純国産地熱エネルギーを求めて」1981.
- 4) たとえば馬場健三他「地熱探査と掘削技術の動向」『火力原子力発電』Vol. 26, No. 9, 1975.
- 5) たとえば森康夫「地熱発電のシステム」『スチールデザイン』No. 180, 1978.

話の泉

エネルギーとしてのLNG

エネルギーとしての石油は全世界に大きい問題を投げかけている。産油国と消費国とはその利害が相反しているために何等かの妥協点を見出さざるを得ない現状である。

そこで石油に代るべき LNG (液化天然ガス) が真剣に考えられているが、それに付随する多くの問題がある。

我が国の LNG の輸入量は年間 1,500 万 t で昭和 65 年には約 3 倍の 4,500 万 t が目標とされている。

LNG の主成分はメタンガスで、消化過程で S, N₂, CO₂, H₂O その他の不純物は一先づ除去されている。液化によりその容積は約 1/600 に縮小された状態で輸送され、貯蔵されている。

LNG 輸送般は 1 隻約 12 万 m³ 程度で、これまでは日本製のものはなく、最近国産への計画が各社間において激化しつつあるらしい。その型式もモス型、メンブレン型で、さらに日本側としてはテクニガス型、ガストロ型が打出されており、それぞれ優劣、特色があり、技術的、経済的、国際的などの複雑な関係があるらしい。

輸入されたものは 1 時的に貯蔵タンクに貯蔵されるが、これには地上および地下式がある。その

優劣の予測も困難である。取敢えず建設中のものを含めて一基 56,000 m³ 程度のもの 73 基、さらに計画中のもの 100 基程度の数字が報道されている。

貯蔵タンク建設において最大の技術的問題は LNG の高圧とともに -162°C を維持する絶縁材料にある。熱絶縁としては今のところ二重殻の間に発泡ウレタン、ガラス繊維強化エポキシ樹脂、パーライトなど適宜組合わせて使用されるらしい。

地下タンクの建設費は現代の技術の粋を集めたもので、1 基当り 100 億円程度といわれている。

LNG は燃料として輸入され、各種熱源に使用されているが、消化ガスの気化に際しての冷熱が派生的に利用される。すでに空気の液化、冷凍倉庫、冷凍破砕 (廃タイヤなど) がある。一方冷熱発電もできるが、100 万 kW の LNG 火力発電に対して冷熱発電は 1 万 kW 程度が計画されているが、もしその電力を利用して冷凍する場合には直接冷凍の方が効果的ではないだろうか。

因に現在までにわかっていることは、世界の天然ガスの埋蔵量は 73 × 10¹² m³、可採年数は 45 年で、石油の 28 年を上回っているといわれている。

(F)