

特集

自然エネルギーの現状を探る

# 地熱エネルギー

## Present Status of Geothermal Energy Development

本多 朔郎\*・高島 勲\*\*  
Sakuro Honda Isao Takashima

### 1. はじめに

地熱は新エネルギーと称されるものの中では実用化度が最も高く、火山国日本に大量に存在し、環境汚染要素も少ないエネルギー源として期待されてきた。しかし、代表的な利用法である発電における世界的な増加にもかかわらず、日本における地熱発電は昭和57年の北海道森発電所の運開により220MWの設備容量となってから今日まで実質的な発電量の増加はない。この停滞の大きな要因は、その間の電力需要の伸び悩みと石油価格の低下による地熱のコスト面での競争力低下である。しかし、地球規模でのCO<sub>2</sub>増加に対する規制の強化、石油の先行き不安等から、国産の無公害エネルギーとしての地熱の重要性は増大するものと考えられる。

本稿では、地熱エネルギーの一般的特徴と利用、研究開発の現状について紹介するとともに、近い将来の利用の拡大を図るための方向について述べる。

### 2. 地熱資源の種類と特性

地熱資源は、系内に利用できる水が存在するかどうかで熱水循環系と高温岩体に大別され、前者は蒸気のみを産出する蒸気卓越型と熱水型に分れる。現在、商業発電としては蒸気卓越型と180℃以上の高温熱水型のみが使われており、それ以下の温度の熱水型は、立地条件のよいアメリカでは商業ベースのバイナリー発電として利用されているが、一般的には発電利用は困難である。以上のような蒸気卓越型あるいは高温の熱水型は通常の金属鉱床などの対応でいえば優良鉱で、火山地域だけに分布し、量的には少ない。しかし、地熱資源の場合、貧鉱と位置付けられる中低温（180℃以下）でも熱エネルギーとして有効に利用できその賦

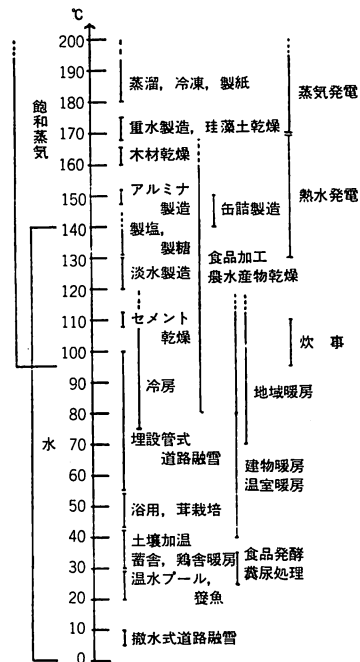


図-1 地熱の温度別利用

存量も多い（図-1は温度別の地熱利用例である）。このような熱としての利用に適した熱水型の中でも、大消費地である都市が位置する平野部の地下に存在する非火山性資源を深層熱水という名称で区別し、その有効利用が期待されている。地熱エネルギーを利用可能な形で取り出す媒体としての水が存在しない高温岩体は、その資源量が莫大であることから、人工的な熱水系形成により利用するための技術開発が強力に推し進められており、近い将来、エネルギー源の仲間入りすることが期待されている。このほか、マグマそのものもエネルギーとして莫大なものを持っているが、その利用はかなり先になるものと思われる。

図-2は、以上のような地熱資源の種類毎に経済性と量の関係を示した概念図である。地熱の経済性の評価はその存在する場所に対する依存性が著しく、特に

\* 秋田大学鉱山学部附属資源地学研究施設教授  
\*\* 助教授  
〒010 秋田市手形学園町1-1

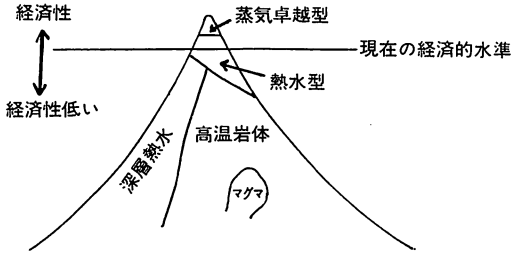


図-2 地熱エネルギーの種類と経済性を示す概念図

熱利用では全く同じ品位の資源でも消費地に近いか遠いかで決定的な差がでることになる。このような資源としての定義づけの困難さや、化石資源でなく相当部分が循環利用できる再生可能資源であること、そして、現実に開発された地域が少ないことなどから、わが国の地熱資源量の見積りとして信頼できる数字は出されていない。図-3に日本の地熱発電所と代表的地熱資源分布を示すが、相当粗い見積りとして、発電用（バイナリーを含む）が数千万kW、深層熱水が $10^{17}$ kcal（40℃以上）といったオーダーの推定がなされているのみである。

地熱は、国産のエネルギー源で、発電の場合のCO<sub>2</sub>の排出量が石油、石炭火力の1/100程度と著しく少な

いこと、廃水は地下に還元することで環境汚染がないこと、燃料が不要で将来の発電単価上昇要素が少ないことなど多くの利点を持っている。しかし、発電単価としては、石油、石炭火力と同等あるいはそれ以下であるとしても、初期投資が莫大なこと、地下資源特有の不確実さがあり、計画の容量を一定期間確保できるかどうか不安なこと、温泉との競合や公園内調査開発の規制など、多くの問題点を抱えており、それらの解決のための地道な努力が続けられている。

### 3. 地熱利用の現状

#### 3.1 発電

地熱エネルギーによる発電は、世界的には順調に増加しており、1960年以降年率約10%の増加により1988年12月現在、5604MWの設備容量を持つに至った（表1）<sup>1)</sup>。第1位のアメリカは、全体の発電量が巨大なこともあり、地熱発電の割合はわずかであるが、エルサルバドル、フィリピンなどは国の電力の1-2割が地熱であり、燃料費が不要でベースロードとして運転されるという形態から、総発電量に占める地熱の割合はさらに大きなものとなっている。

日本における地熱発電の設備容量は、昭和63年12月

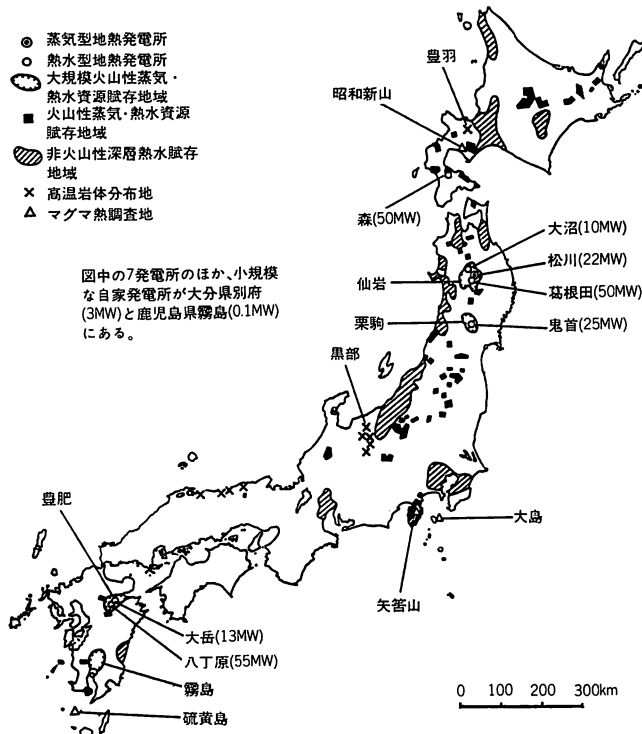


図-3 日本の地熱発電所と地熱資源分布

表1 各国の地熱発電設備容量と総発電設備容量に対する割合

国名	総発電設備容量(A) (MW)	地熱発電設備容量(B) (MW)	地熱発電の割合(B)/(A) (%)
アメリカ	733,005	2609.4	0.4
フィリピン	6,462	894.0	13.8
メキシコ	24,085	650.0	2.7
イタリア	56,205	537.0	1.0
日本	173,808	214.6	0.1
ニュージーランド	7,388	238.2	3.0
エルサルバドル	500	95.0	19.0
ケニア	559	45.0	8.1
アイスランド	948	41.2	4.7
ニカラグア	395	35.0	8.9
インドネシア	8,472	142.3	1.7
トルコ	10,112	20.0	0.2
中国	93,819	14.0	0.0
台湾	16,595	3.3	0.0
ソ連	322,000	11.0	0.0
フランス	101,208	4.2	0.0
ポルトガル(アゾレス)	6,457	3.0	0.0
ギリシャ	7,525	2.0	0.0
合計	1,569,543	5,604.1	0.4

(A)：海外事業統計1986抜粋  
(B)：1988年12月現在

現在9箇所228.1MW(図3参照)で、前述の事情により昭和59年0.1MWという小規模の自家発電所の建設を最後に増加していないが、多くの地点で調査が進められており、数年後には350~400MW程度と大幅な増加が見込まれている。

発電システムは、日本の場合天然蒸気あるいは熱水フラッシュ蒸気によりタービンを回すタイプのみであるが、アメリカではいくつかの地点で、バイナリー方式による発電が行われており、これまで発電に利用できなかった180℃以下の熱水も経済的に成立つ資源へ入りつつあることを示している。

3.2 熱利用

地熱水の熱としての利用は発電ほど明確に把握されているわけではないが、世界の利用量として表2のようなものが示されている<sup>2)</sup>。一見して明らかなように、エネルギー量としては日本が4764MWと地熱発電量の20倍を越える量で世界一となっているが、その大部分は温泉としての利用である。温泉は明らかに熱エネルギー利用の一環ではあるが、日本の場合、観光資源としての側面が強すぎ、地域暖房、温室など熱を主体とした利用と同一に見るには問題がある。温泉を除いた日本の温・熱水利用は地域暖房・給湯、農業利用(グリーンハウス、養魚など)、産業利用(木材乾燥など)がほぼ同じ割合となっているが絶対量としては少ない。

表2 1985年現在の15℃以上の世界の地熱の熱利用状況

年利用率	0.39	0.33	0.59	0.36	0.37	0.37	総計
	冷房・暖房給湯	農利	業利	産利	業利	浴用(温泉)多目的利用	
日本	49	50	38	4475	152	4764	
ハンガリー	75	565	30	581	289	1540	
アイスランド	945	77	75	209	—	1306	
ソ連	429	395	20	360	—	1204	
フランス	600	15	—	—	—	615	
イタリア	111	57	27	376	—	571	
中国	70	60	14	17	232	393	
アメリカ	70	190	50	5	24	339	
ルーマニア	30	85	—	136	—	251	
ニュージーランド	50	10	166	—	—	226	
トルコ	36	—	—	97	67	200	
チェコ	25	10	—	8	5	48	
スペイン	7	40	—	—	—	47	
スウェーデン	13	—	—	—	—	13	
その他	76	56	30	136	31	329	
合計	2600	1750	450	6400	800	11,846	

(MWt)

よく知られているように、アイスランドでは全人口の80%、19万人以上が地熱水による暖房・給湯を受けており、発電を含めて同国の総エネルギー需要の30%を地熱でまかなうなど原油の輸入量削減に大きく寄与している。日本でも、温泉地の泉源の共同利用から始まって地域的な給湯に発展した地点がかなりあり、図4に示すような利用統計が報告されている<sup>3)</sup>。最大の群馬県草津地域では、8.2MW、年間約3500kl相当の灯油節約を実現しており、同様な形態は長野県諏訪市、北海道弟子屈町など多数認められる。なお、岩手県葛

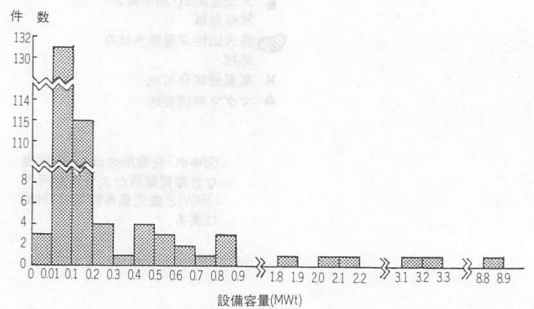


図-4 地熱による暖房・給湯の設備容量別件数

根田地熱発電所の蒸気分離熱水を利用した大規模な熱水供給システム(22MW)がほぼ完成し、数年以内に運用開始となる。現在のところ、供給に見合った需要者の確保に苦慮しているようであるが、新しいエネルギー供給システムとして定着し、地熱の利用拡大に結びつくことが期待される。

表3 最近10年間の地熱予算の推移

(単位：百万円)

区分	項目	昭和55	56	57	58	59	60	61	62	63	平成元年	
一般会計	○地熱エネルギー探査技術	841	824	775	745	617	573	404	321	263	189	
	○地熱エネルギー採取技術	339	375	185	182	123	114	65	81	50	41	
	○地熱用材料の開発に関する研究	116	117	104	95	73	69	64	53	44	40	
	○高温岩体発電システムの研究	828	794	824	815	154	76	79	48	37	20	
	○環境保全・多目的利用技術	470	242	222	50	48	20	19	16	13	12	
	□地熱開発推進調査	38	24	22								
	計	2,632	2,376	2,132	1,887	1,015	852	631	519	407	303	
電源開発促進対策特別会計	電源立地勘定	□地熱発電所熱水有効利用調査委託費	932	1,662	1,639	1,515	1,562	1,698	2,359	2,901	2,700	1,336
		□環境審査等調査委託費(地熱のみ)	144	120	111	111	111	111	111	111	111	120
		計	1,076	1,782	1,750	1,626	1,673	1,809	2,470	3,012	2,811	1,456
	電源多様化勘定	□地熱開発促進調査補助金	2,597	2,750	3,100	3,240	4,890	5,194	6,078	5,944	5,783	5,825
		□地熱発電所調査井掘削費等補助金	2,398	2,725	3,052	2,398	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703	2,119
		□地熱発電所環境保全技術調査委託費		56	55	76	101	128	139	101	101	101
		□地熱発電開発費補助金							704	1,056	1,197	1,282
		○地熱探査技術等検証調査費補助金	539	1,012	1,049	1,223	1,337	1,309	1,465	957	904	1,005
		○全国地熱資源総合調査費補助金	1,846	2,518	2,505	1,934	1,956	1,941	1,135	810	1,403	1,278
		○熱水利用発電プラント等開発補助金	357	653	685	954	1,623	2,022	2,605	2,666	2,406	2,406
○電源多様化技術開発評価費								135	134	265	389	
□大規模深部地熱発電所環境保全実証調査委託費	3,000	2,600	3,060	2,615	770	1,120						
□新エネルギー総合開発機構出資金(債務保証)	500											
	計	11,237	12,314	13,506	12,440	13,380	14,417	14,964	14,371	14,762	14,404	
石炭・石油代替エネルギー特会	○深層熱水供給システム開発	262	678	692	271	179	87					
	合計	15,207	17,150	18,080	16,224	16,247	17,165	18,065	17,902	17,980	16,163	

□ 資源エネルギー庁対応      ○ 工業技術院対応

4. 研究及び開発促進のための施策

地熱は、コスト的に既存のエネルギーと対抗できるギリギリの線あるいはそれよりわずかに下回る部分が多く、研究開発による技術の進歩や財政的な配慮により実用化が大幅に促進される。また、地下資源特有の不確実さが、電力会社の大規模な地熱開発の意志決定に大きな障害となっている。このようなことから、国策として通産省のサンシャイン計画などの研究開発プロジェクト、調査井掘削費補助など(表3)が実施されている<sup>1)</sup>。これらは、地質調査所、公害資源研究所などの国立研究機関、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)等により実施され、着々と成果を挙げつつある。

基礎研究を担当すべき大学における活動としては、東北大学で実施された特別推進研究による高温岩体開発研究(Iプロジェクト)やエネルギー特別研究があり、平成2年度からは、3年計画で「能動的な地熱抽出システムの開発」という高温岩体を主体とする重点領域研究が発足することになっている。

以上のほか、電力会社等においても抗井内のスケール付着防止などの研究が進められている。

5. 将来の展望

地熱エネルギー開発に関連する事項は多岐にわたっており、各々の項目について簡単に紹介してきた。ここでは、5~10年程度の近い将来、地熱を現実のエネルギーとして商業ベースにのせるために重要と思われる次の3点について筆者らの個人的な意見を述べる。

まず第1に、現在すでに実用化されている高温熱水系による発電の一層の推進が挙げられる。これに関しては、各企業の自主開発が主体であり、それなりに成果を挙げている。しかし、貯溜層評価に手間取り、実際の発電まで持ち込むのには、10年あるいはそれ以上の年月を費やす場合が少なくない。これは、経済性の面から50MW程度の資源量を確保しなければ発電所建設に入らないという開発スケジュールの固定化に問題があるように思われる。フィリピンなどでは、ある程度の生産井が掘削された段階で小規模な発電を始め、運転を続けながら探査と貯溜層評価を行い、適正な開発規模を決定している。地熱貯溜層の評価という点で、そのような手順は合理的であり、現在では、モジュール化された5~10MW程度の発電ユニットも簡単に手に入ることから、技術的にも容易に実現可能である。

問題は経済性と法律論になるが、NEDOあるいは電源開発(株)など適当な機関が発電ユニットのリース・運転を行い、適切な法改正を行うことにより、実現可能であろう。

第2に、アメリカなどではすでに実用化されているバイナリー発電の日本での商業化である。この方式は、抗井内ポンプ、オゾン層破壊のない二次媒体の選定など、主として工学的な分野での開発が求められているが、不確定要素の少ない中低温の地熱資源を利用できることから、早急な開発が望まれる。

第3に、深層熱水による地域暖房・給湯の普及がある。深層熱水によるシステムは、ハンガリー、フランスなどで大規模に行われており、1985年のフランスの実績としては、10万戸への供給により、45万kl/年相当の石油の節約がなされた。日本では、昭和55年～60年に秋田県雄和町で本格的実験が行われ、1300～1400mの抗井4本による生産-還元システム(温水の温度は約70℃)の運転がなされた。このシステムは実験終了後、地元の秋田県に移管されたが、消費地に遠く石油暖房より高くなること、還元井に硫化鉄による目詰りが生じ、廃水処理が不可能なことから利用計画がなまなまになっている。

やや古いデータであるが、図-5は北海道札幌市で

集合住宅3,000戸、業務地域34,000㎡に供給した場合のコストの試算である<sup>1)</sup>。この結果から、長期的にみれば、深層地熱利用が有利であるとの結論が得られている。また、これによるCO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>などの大気汚染物質の劇的減少をも考慮すれば、得られる利益はさらに大きくなるであろう。残念ながら、日本では欧米先進国のような全館暖房で、蛇口をひねればお湯が出るといった生活水準ではなく、その面でも深層地熱の利用が今ひとつ盛り上がりを欠いているが、世界でも1、2の高所得国家となった今、社会資本の充実という立場からも積極的に開発を進めるべきであろう。

### 6. おわりに

地熱はすでに一部実用化され、現実に産業として動いているだけに研究開発、政策等、紹介しなければならぬ項目は非常に多い。筆者らの専門の関係もあり、本稿ではそれらのうち、地下の資源に係わる項目を主体に解説してきたが、そのことが現実の開発促進の最大の課題でもある。地下のことが分らなければ、事業計画のたてようがないとはよく聞く話である。残念ながら、そのような問いかけに十分満足する解答を与えられないのが資源探査の現状であり、学問的な性格でもある。日本の予算制度では、1度実施した研究は必ず成果を挙げて終了し、2度と行われることがないのが原則であるが、地下に関する研究は、年次計画で予定どおり進むものばかりではない。慎重な評価と予測のもとで、同一の研究テーマを再検討し、新たな視点で見直す機会を持つことは、地熱に限らず地下資源探査全体の将来にとって重要であろう。

### 参 考 文 献

- 1) 日本地熱調査会；わが国の地熱発電の動向(1989)、67p.
- 2) Cataldi, R. and Sommaruga, C. ; Geothermics, Vol.15 (1986), 359-383.
- 3) 関岡 満；地熱, 24巻(1988)、569-576.
- 4) 俣野恭寛；地熱エネルギー, 20号(1982)、26-53.

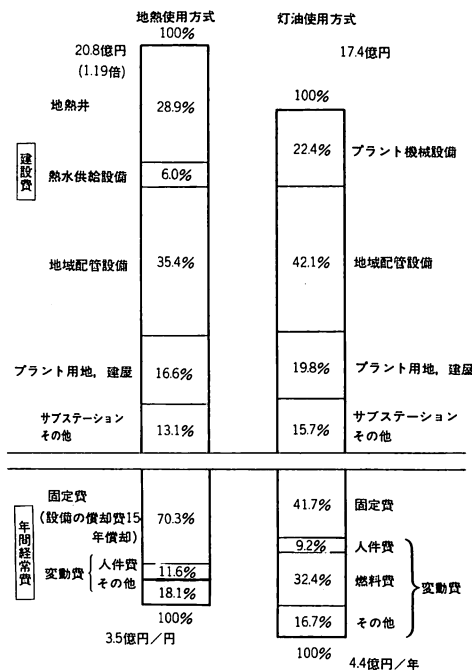


図-5 札幌市の地域暖房の地熱と灯油使用の費用の比較