地熱発電について

Geothermal Power Generation

池上 正俊

Masatoshi Ikegami

This paper is concerned with the principle and the mechanism of geothermal power generation, as well as the brief history and the present situation of geothermal energy utilization. The history of geothermal power generation dates from 1904 when a 0.5 kW unit was operated on geothermal steam in Larderello, Italy. Some 90 years have passed since then, and it can be said that the technology for generating electric power using geothermal energy stably and economically over a long period of time has been established during the past decade. At the present time, geothermal power generation accounts for only less than 1 % of the total electric power consumption in the world but it is conducted in 18 countries of the world including Japan. Geothermal power generation is expected to develop more and more in future as clean, purely domestic energy source acceptable to the environments of the earth.

1. まえがき

地熱発電の歴史は、1904年にイタリアのラルデレロ地方で地熱蒸気により0.5 kWの発電機を運転したことに始まる。

以来、その歴史も90年近くなるが、地熱発電を長期に渡り安定かつ経済的に行うための技術は、ここ10数年の間に確立されたと言える。

現在、地熱発電は、石油代替エネルギーとして世界の全消費電力の1%を満たすにも至っていないが、日本を始め世界の18ヶ国で行われており、今後増々の発展が期待されている。

2. 地熱エネルギー開発の意義

地熱エネルギー開発の意義として、Fig.1に示す3点が挙げられる。

第1に、環境問題への対応である。

昨今、地球環境の保全・保護問題が各方面で話題となっている。

特に化石燃料の大量消費に起因する地球温暖化問題や、酸性雨の問題が全世界的な環境問題としてとりざたされており、有害物質の排出が極めて少ない、クリーンな新エネルギー（地熱、太陽、風力等）の開発・利用が急務となっている。

その中でも地熱エネルギーは既に発電技術が確立しており、かつ潜在的エネルギー資源量の膨大さを考慮すれば、極めて有望なエネルギーである。

地熱発電により放出されるCO₂量の火力発電との比較を、Fig.2に示す。

第2に、一次エネルギーの供給安定化である。

特に我国では、Table 1に示すように全エネルギーの輸入依存度が極めて高く、その供給構造が脆弱であるため、一次エネルギーの多様化・安定化、即ちセキュリティの確保は重要な問題である。

我国における地熱エネルギーの一次エネルギーに占める比率は約0.1%と非常に小さいが、世界有数の火山国として、豊富に保有する純国産の地熱エネルギーへの期待は大きなものがある。

Fig.1. Merits of geothermal power generation.

第3に、地域産業の振興への助成である。
地熱開発は発電のみに限らず、浴用、暖房、ハウス園芸など、熱水の多目的利用により地域産業の振興にも大いに役立つことから、全国各地から地熱開発・地熱調査を要望する声も多い。

3. 地熱発電の現状

地熱発電所は、世界で253プラントが建設され、総発電容量も6500 MWを越えるまでになっている。Fig.3に世界の地熱発電量の伸びを、Table 2に国別地熱発電設備容量を示す。

我国では、現在10地域13発電所(試験プラントを含めると15発電所)で地熱発電が行われており、その発電容量は283.8 MWで世界第7位の地熱大国となっている。

Fig.2. Comparison of CO₂ emission between geothermal power generation and fossil power generation.

	全エネルギーの 輸入依存度	石油の 輸入依存度
	(1986年)	(1986年)
日本	80.1%	99.6%
西独	52.3%	95.2%
英	△19.4%	△69.4%
仏	55.6%	95.9%
伊	79.3%	96.9%
加	△19.1%	△22.7%
米国	12.3%	34.6%

△は輸出を示す。

Table 1. Dependence on the primary energy to be imported in major countries.

の位置を、Fig.4に示す。
発電システムを見てみると、我国初の実用地熱発電プラントである松川地熱発電所のみが天然過熱蒸気を利用した発電プラントである他は、熱水を利用したシングルフラッシュまたはダブルフラッシュ方式の発電

Fig.3. Increase of geothermal power generation in the world.

(1991. 12)		
国名	ユニット数	発電容量 MW
米国	71	2,905.4
フィリピン	32	1,146.3
メキシコ	32	820.6
イタリア	39	459.2
ニュージーランド	16	300.6
インドネシア	7	289.3
日本	15	285.3
エルサルバドル	4	96.1
アイスランド	7	71.3
ケニア	3	45.0
トルコ	3	23.3
ニカラガ	1	20.0
ソマリア	4	15.6
中国	14	14.7
台湾	2	4.5
フランス	1	4.2
ポルトガル	1	3.0
ギリシャ	1	2.0
合計	253	6,506.4

Table 2. Geothermal power generation capacities in each country.

プラントである。

設備容量を見てみると、100 kW～3000 kWのポータブル型から55000 kWの大容量機まで運転されており、その用途も、事業用、ホテル自家発電用とさまざまである。

Fig.5に、日本最大の九州電力㈱八丁原地熱発電所(55000 kW×2)の全景を示す。

本発電所は、世界で初めて、蒸気輸送方式に代わり二相流体輸送方式を採用した、ダブルフラッシュ方式の地熱発電所として昭和52年6月に運転を開始し、平成2年6月には第2号機も運転を開始した。ダブル

Fig.4. Locations of geothermal power plants in Japan.

フラッシュ方式の採用により、同一地熱熱水量に対し約20%の出力増加を図っている。

一方、地熱発電所からの排熱水を近接の地域に供給しているところが多く、Table 4に示すように浴用、ハウス園芸施設の暖房用として多目的に利用されている。

4. 地熱発電の方式

一般に、地球は地中深くなるに従って温度が上昇し、深さ30～50 kmでは約1000℃前後に達していると考えられており、一つの大きな熱の貯蔵庫であるといえ

Fig.5. Hatchobaru power plant, Kyushu Electric Power Co., the largest geothermal power plant in Japan.

DS：過熱蒸気
SF：シングルフラッシュ
DF：ダブルフラッシュ

発電所名	所在地	発電部門	蒸気供給部門	ユニット数 (台)	設備容量 (kW)	認可出力 (kW)	発電 方式	重電機メーカ		運転開始 年月
								(タービン)	(発電機)	
松 川	岩手県松尾村	日本重化学工業株	日本重化学工業株	1	22,000	22,000	DS	株東芝	株東芝	S41.10
大 岳	大分県九重町	九州電力株	九州電力株	1	13,000	12,500	SF	三菱重工業株	株東芝	S42. 8
大 沼	秋田県鹿角市	三菱金属株	三菱金属株	1	10,000	8,600	SF	三菱重工業株	三菱電機株	S49. 6
鬼 首	宮城県鳴子市	電源開発株	電源開発株	1	25,000	12,500	SF	川崎重工業株	富士電機株	S50. 3
八丁原1号	大分県九重町	九州電力株	九州電力株	1	55,000	55,000	DF	三菱重工業株	三菱電機株	S52. 6
葛根田1号	岩手県雫石町	東北電力株	日本重化学工業(株)	1	50,000	50,000	SF	株東芝	株東芝	S53. 5
杉 乃 井	大分県別府市	株杉乃井ホテル	株杉乃井ホテル	1	3,000	3,000	SF	三菱重工業株	三菱電機株	S56. 8
森	北海道森町	北海道電力株	道南地熱エネルギー(株)	1	50,000	50,000	DF	株東芝	株東芝	S57.11
霧島国際ホテル1号	鹿児島県牧園町	大和紡観光株	大和紡観光株	1	100	100	SF	富士電機株	富士電機株	S59. 2
八丁原2号	大分県九重町	九州電力株	九州電力株	1	55,000	55,000	DF	三菱重工業株	三菱電機株	H 2. 6
霧島国際ホテル2号	鹿児島県牧園町	大和紡観光株	大和紡観光株	1	200	200	SF	三菱重工業株	株安川電機	S63. 9
霧島国際ホテル3号	鹿児島県牧園町	大和紡観光株	大和紡観光株	1	300	300	SF	富士電機株	富士電機株	S63. 9
岳ノ湯	熊本県小国町	広瀬商事株	広瀬商事株	1	200	105	SF	三菱重工業株	株安川電機	H 3.10

Table 3. Geothermal power plants in Japan.

る。

特に火山や天然の噴気孔がある地熱地帯では、深さ数 km の比較的浅いところに 1000℃ 前後のマグマ溜りがあり、この熱が、地中に浸透した雨水などを加熱して高温の熱水や蒸気を発生させ、地熱貯留層を形成する。

地熱発電は、このように地下で生成した天然の蒸気や熱水を人工的に取り出し、そのエネルギーでタービンを回して発電しようとするものである。

すなわち地熱発電では、火力発電におけるボイラの役目を地球が果たしているといえる。

4.1 地熱資源の種類

地熱発電を行うための地下エネルギーが得られる地熱資源として Fig.6 に示すものがある。

4.1.1 熱水卓越型地熱貯留層

日本の温泉地のように、地上で熱水のみが得られる地熱地帯は、世界に多く分布している。坑底(貯留層)熱水温度が高く(300℃前後)、熱水が自噴する際に坑井途中でフラッシュして、地上で 2～10 の熱水比(熱

水量/蒸気量)の流体が噴出してくる坑井を含めて、世界の地熱地帯のほとんどがこの範囲に入る。蒸気が付帯して噴出する坑井はもちろんであるが、高温熱水のみしか噴出しない熱水坑井でも、経済的な発電が可能なのは既に立証されている。

4.1.2 蒸気卓越型地熱貯留層

地熱発電は、地下から噴出する過熱地熱蒸気を使うことから始まったが、このような蒸気卓越型地熱地帯では、蒸気を得るのが容易な上に蒸気供給設備が簡単で済むことから、極めて経済的な地熱発電ができる。

しかし、世界でもこのような条件の良い地熱地帯は少なく、イタリアの他に米国のガイザー地区などごく一部である。

4.1.3 高温岩体 (Hot Dry Rock: HDR)

地下深部の高温のマグマから加熱された地層が水の侵入のない花崗岩などの場合、高温の地層は乾いた岩体として存在することとなり、一般にこれを高温岩体と呼ぶ。

この高温の岩体を 500～600 kg/cm² の水圧によって破碎して人工のき裂を作り、そこに注水して熱エネルギーを取り出す技術は、開発の緒についたばかりである。

研究開発はアメリカ、イギリスおよび日本でも行われており、いずれも熱水の抽出に成功している。このようにして抽出された熱水を利用した発電方式を高温岩体発電と呼び、一般的な試算によれば、我国で 7000 万 kW 程度の資源として評価できると言われている。

4.1.4 深層熱水系

従来の地熱貯留層は火山帯上の山間部に位置しているが、これに対し平野を形成する堆積盆地には、比較的温度の低い非火山性の深層熱水の存在が予想される。堆積盆地の全層厚は数 1000 m におよぶ地域が多く、この地温勾配は 3～6℃/100 m に達している。

従って、地下 2000 m 付近に閉じ込められた深層熱水の温度は 60～120℃ となり、地熱エネルギーとしての利用が可能である。

4.2 地熱発電方式の種類

地熱井から噴出してくる流体の違いにより、適用可能な地熱発電方式は次のように大別される。

① 過熱蒸気型

② 熱水型

— シングルフラッシュ
— ダブルフラッシュ
— バイナリー

各地熱発電方式のシステム図を、Fig.7 に示す。

過熱蒸気型の発電方式としては、地下から噴出する地熱蒸気を直接タービンへ送り発電を行うため、蒸気

	地 域	利用内容
実 施 中	森町(北海道) 〈森地熱発電所〉	発電所の熱水と熱交換した、85℃の熱水を温室暖房に利用。
	松川(岩手県) 〈松川地熱発電所〉	発電所の地熱水と熱交換した、70℃の熱水を旅館、別荘などの暖房、浴用の他、60℃の熱水を施設園芸に利用。
	大沼(秋田県) 〈大沼地熱発電所〉	発電所の蒸気と熱交換した、60℃の熱水を旅館の浴用として利用。
	大岳(大分県) 〈大岳発電所〉	発電所の地熱水と熱交換した、80℃の熱水を住宅の暖房、浴用及び施設園芸に利用。
	八丁原(大分県) 〈八丁原発電所〉	発電所の地熱水と熱交換した、80℃の熱水を旅館、住宅の暖房、浴用に利用。
	別府市(大分県) 〈杉乃井ホテル 杉乃井地熱発電所〉	温泉及び自家発電所からの地熱水を冷房、暖房、浴用その他廃棄物処理に利用。
試 験 中	牧園町(鹿児島県) 〈霧島国際ホテル 地熱発電所〉	温泉及び自家発電所からの熱水を冷房、暖房、浴用に利用。
	雫石町(岩手県) 〈葛根田地熱発電所〉	発電所の地熱水と熱交換した熱水を住宅、公共施設等の暖房、浴用をはじめ、工業団地、施設園芸、保冷库、道路融雪等に利用。
	鹿角市(秋田県) 〈大沼地熱発電所〉	

Table 4. Utilization of geothermal energy.

を分離するためのセパレータがないのが特徴である。

タービンの種類により、背圧式、復水式に分けられる。

熱水型の発電方式としては、地下から噴出する地熱流体から発電に利用する蒸気を分離するためのセパレータが設置され、蒸気を一回分離する方式をシングルフラッシュ方式、熱効率向上のため分離された熱水を更に低圧でフラッシュさせて発電に利用する方式をダブルフラッシュ方式と呼ぶ。

また、地熱流体の温度が比較的低い場合には、低沸点媒体との熱交換により熱回収を高めたバイナリ方式が採用される。

地熱井の特性は各地域で異なっており、最も適した経済的な発電方式が採用される。

過去に建設された地熱発電プラントは、イタリアのラルデレロ地区や米国のガイザー地区のように過熱蒸気型から始まったが、最近では熱水型の伸びが大きくシングルフラッシュ方式およびダブルフラッシュ方式を合わせて全体の1/2を超えている。

5. 地熱発電のしくみ

地熱発電は、地下1～2 kmにある地熱貯留層から蒸気・熱水を取り出し、その蒸気により直接タービンを回し発電する。

Fig.8に、地熱発電のしくみを示す。

蒸気井により地下貯留層から噴出した流体(蒸気熱水混合流)は、坑口に設置されたセパレータにより蒸気と熱水に分離される。

Fig.9に、サイクロン式セパレータの構造図を示す。分離された蒸気はタービンへ送られて発電に利用され、セパレータより排出される廃熱水は、資源の確保および環境対策上、還元井により地下還元される。

セパレータからの低圧(通常4～5 kg/cm²g)の蒸気は、蒸気輸送管により坑口から発電所内に輸送され、タービンへ導かれる。

Fig.10に、複流復水式タービンの断面図を示す。タービンの中央部に導かれた蒸気は、左右に分かれて低圧(真空)まで膨張し、翼の植えられたタービンロータを回転させる。この回転力が連結された発電機ロータを回転させて発電する。

タービンで低圧まで膨張した蒸気は復水器内で冷却水と直接接触し、熱交換により凝縮する。

Fig.6. Geothermal resources.

Fig.11に、復水器の構造図を示す。

復水器は、スプレージェット式主復水部とその両側に配置されたトレイ式ガス冷却部から構成される。

復水器への冷却水は、冷却塔より大気圧と復水器器内圧力(真空)との差圧を利用して吸い込まれる。

地熱蒸気中にはCO₂やH₂Sなどの不凝結性ガスが

含まれており、これ等は復水器ガス冷却部より、蒸気エゼクタあるいは電動ブロワーなどのガス抽出器により抽出される。

復水器に溜った温水(蒸気凝縮水および冷却水)は、温水ポンプにより冷却塔へ送られる。

Fig.12に、対向流式機械通風冷却塔の構造図を示

		プラント型式	特 徴
過熱蒸気型	背圧式		1. 小容量発電に適する。 2. ガスが多い場合に適する。 3. 復水装置が不要。 4. 建設費が安い。
	復水式		1. 大容量発電所向き。
熱水型	シンブルフラッシュ		1. 小容量発電に適する。 2. ガスが多い場合に適する。 3. 汽水分離を行う。 4. 復水装置が不要。 5. 建設費が安い。
	シンブルフラッシュ		1. 大容量発電に適する。 2. 汽水分離を行う。
	ダブルフラッシュ		1. 大容量発電に適する。 2. 一次蒸気はセパレータ、二次蒸気はフラッシャにて分離される。 3. シングルフラッシュより、熱効率が15~20%改善される。
	二流体サイクル方式 (バイナリ)		1. 低沸点媒体(フロン、炭化水素等)を使用する。 2. 低温度熱水が利用可能となる。

Fig.7. Type of geothermal power plant cycle.

す。

冷却塔へ送られた温水は、吸い込まれた空気との熱交換により冷やされ、再び冷却水となり復水器へ流入する。通常、地熱発電所は山間部に立地され大量の冷却水が入手できないため、冷却塔を介した再循環系統を作り冷却水を得る。

このように、地熱発電のしくみは、構成機器数も少なくシンプルなものとなっている。

6. あとがき

地熱発電は、我国の総発電量の0.1%にしか過ぎないが、環境問題やエネルギーの安定供給の観点から今後増々そのニーズが高まるものと予想される。近年は、人工的に高温岩体中に高圧破碎によりき裂を作り、抽熱するための研究開発も行われており、次世代の地熱発電方法として期待されている。

今後とも、世の中のニーズに合った、経済的で信頼性の高い地熱発電プラントの実現が重要である。

Fig.8. Geothermal power generation system.

Fig.9. Separator.

Fig.11. Jet condenser.

Fig.10. Turbine (double flow condensing type).

Fig.12. Cooling tower.

圧力計の精度検定の試み

高圧力を取扱う者にとって圧力計の精度や確度は最も気になるところである。本学会でも『圧力計の精度に関する研究・作業グループ』が昨年発足したことは時宜を得た企画である。

国際度量衡委員会の下部組織である質量関連量諮問委員会の中圧力WGでは、Air-Piston Gaugeを移動標準器として、英・米・仏・日で国際比較を行った。比較圧力の範囲は11～131 kPaの大気圧近傍であるが、本邦の計量研究所の標準器は上記の先進国の標準器と3 ppm以内で一致していたことが

報告されている。

また、計量研を中核として、日本計量士会の発案で『圧力トレーサビリティ委員会』が昨年6月に発足し、参加委員（長野計器、双葉測器、横河電気、計量士会）の間で持回り検定を実施した。20, 40, 60, 80, 100 kPaの圧力で相互比較試験の結果は、すべての参加団体の標準器が、50 ppm以内で計量研の値と一致した。今後は圧力範囲を順次広げて持回り比較を継続するとのことである。

(TM)