

地熱発電の現状と今後の課題

Present Status and Future Problems of Geothermal Power Generation

森 康 夫*



1. まえがき

地球内の熱エネルギー源は元素の崩壊熱によるもので、主としてウラニウム、トリウムおよびカリウムの放射線同位体の崩壊について、陸地の表面での熱流速を計算すると約63 mW/㎡となり、測定値とはほぼ一致するといわれている。これより1 kmの地下で約30℃の温度上昇が平均として期待される。かつて火山活動が激しかったり、あるいは現在でも火山活動が行われている地域では1 kmで200℃を超えることがある。このような地域には10 km以下のところに1000℃前後の溶融状態の岩石が存在し、これをマグマといい、地下のマグマのかたまりをマグマだまりと呼ぶ。このマグマだまりから岩石の割目を通して地表へ熱エネルギーが放出されたものが火山活動の原因となっている。

地熱発電の熱エネルギー源としては、このマグマの冷却固化によって放出される蒸気あるいは熱水と、雨など降水が地下の岩石の割目を通して深部にしみ込み、固化したマグマあるいはマグマからの伝熱によって高温になっている岩石にふれて加熱され蒸気あるいは熱水になったものである。しかし地熱エネルギーといわれる地下の蒸気あるいは熱水のほとんどは、後者の原因により生成されたものといわれている。

このように地熱発電に用いる地熱流体は、いつも同一の温度あるいは気水比（蒸気と熱水の重量比）を持つとは限らず、地熱流体を地下から取り出す生産井を掘削する場所、深さによりその温度、圧力、気水比が異なる。すなわち火力あるいは原水力発電においては予め定められた温度、圧力の過熱蒸気が用いられるが、地熱発電では最も好条件の場合は過熱蒸気あるいは飽

和蒸気を得られるが、これらの蒸気の温度、圧力および流量は必ずしも計画の通りのものが得られるとはかぎらない。その最大の理由は生産井を掘削する地域の地下構造、地熱発電に利用しうる地熱流体の存在状態、規模などが、現在の技術の探査によっては完全には明確にできないことと、生産井から得られる流量、圧力・温度などが多くの場合時間とともに次第に減衰して行くことである。したがって地熱発電では発電所を建設する場所の設定には予め所期の条件を充す地熱流体が得られるかを明確にするために精密かつ正確で組織的な探査を行う必要がある。わが国全体が世界でも有数の地熱地帯にあり、地熱発電は新エネルギーのうち最も我が国で将来を期待されているものであり、昭和60年までに約100万kw、70年までには700万kwと計画されている。この計画を実現するにはまず我が国全体についての地熱資源分布を正確に推定し、ついで地熱発電に適する地域の選定を行い、さらに詳細な近代的各種探査技術を用いて、発電に利用しうる地熱流体の熱的性状、規模などを求める必要がある。

地熱資源の成因から考えて、降水が地下に浸入するとき、マグマ等で加熱された岩石に到達するまでは低温であり、試掘して温度が高くない地下水が得られたとしても、その付近全域からはこのような低温の地下水のみしか得られないとは結論できない。この意味でも探査の精度、その場所での固有の地下構造モデルを正確に組立てうる理論と技術の開発などが今後の地熱発電を促進する上で重要な課題である。

2. 地熱流体

地熱発電に用いる流体は地下に溜っている蒸気とか熱水などの高温流体を地上に引出したものである。地下にある場合の流体は飽和水か、あるいは過冷却の状

* 東京工業大学工学部機械物理学科 教授

態にある。これを生産井を通じて地上に引出すとき、摩擦抵抗と静水圧減少により圧力が低下し、熱水の一部は蒸気となる。地下にあるとき蒸気を含んだり、生産井中で過熱されるような場合は蒸気が主成分のものが得られる。しかし地熱資源の状態から判断して、平均的には地熱流体は地上では気水比が1:4と考えられており、今後開発される地熱流体は熱水が主成分のものが多く考えられる。

地熱流体の生成過程から考えて、高温の岩石の割目などを流れて熱水となるときに、岩石中の化学成分が熱水中に溶け込むことが知られており、熱水中の化学成分は岩石の成分と地下における熱水の温度により著しく異なる。熱水中の溶解物は1%以上の重量で含まれることはまれであり、物理的には水との差は重要でなく、たゞ蒸気と熱水の重量比であるいわゆる気水比を考慮に入れる必要がある。また凝縮器などの性能に重要な影響をもつ不凝縮ガスを含むことがあり、そのほとんどの成分はCO₂であるが、その他NH₃とH₂Sなどの腐蝕性ガスを含むことがある。これらガスの量は高い場合で数モル%、少ない場合は1%以下である。

地熱流体の化学的因子としては腐蝕性、環境汚染性、配管及び熱交換器などの機器における沈着物(スケール)といい高温部分ではCaCO₃、低温ではSiO₂が主成分)を考慮する必要がある。環境汚成分としては主としてH₂Sであるが、NH₃、Asなどが含まれることもあり、これらは主として蒸気中に含まれる。熱水にはアルカリ塩化物形、硫酸酸性形、重炭酸塩形およびこれらの混合のものがある。アルカリ塩化物熱水はCl/SO₄の比が大きくpHは5~9の中性ないしアルカリ性である。硫酸酸性形熱水はCl/SO₄は小さく酸性を示し、pH値が小さいものもある。

地熱流体はマグマを高温熱源とする火山性と、放射線鉱物の崩壊熱などを熱源とする非火山性とがある。また地下の岩石の温度は高いが、岩石中に十分な割目および降水が存在しないときは、高温乾燥岩体(hot dry rock)方式と呼び、人工的に割目(fractureという)を作り、水を注入して岩中の熱エネルギーをとり出す方法がある。

将来浅部・深部の地熱資源あるいは高温岩体から得られる地熱発電用の地熱流体は次のように分類できる。

- (1) pH 値の大きな乾き蒸気の場合
- (2) pH 値が大きく熱水を僅かに含む2相流の場合
- (3) pH 値が大きく熱水がほとんどの2相流の場合
- (4) pH 値が小さく蒸気が多い場合

- (5) pH 値が小さく、熱水が多い場合

これらの場合のうち現在まで利用され発電が行われているのは(1)、と(2)の場合であり、(3)の場合に対してサンシャイン計画によって研究開発が行われ、昭和53年度に1000kw級の発電実験が行なわれた。この技術は配管、熱交換器などに耐蝕性材を用いると(4)、(5)の場合にも利用することができる。

3. 発電サイクル

地熱発電に用いられるサイクルは地熱流体の温度、気水比によって幾つかに分けられるが、主に次の3種が考えられる。

(1) 地熱流体そのものを作動流体とする。いわば開サイクル発電。

(2) 地熱流体の熱エネルギーを他の媒体に伝え、閉ループ中を媒体を流し、媒体にサイクルを行わせてタービンを駆動し、発電する閉サイクル発電。

(3) 高温の地熱流体と大気温の冷却水を用い、その温度差を利用して熱電気発電などによる直接発電。

これらのうち現在までに実用になっているものは(1)の方式によるものであり、(2)のいわゆるバイナリーサイクル発電は現在パイロットプラントなどにより研究開発が行われており、実用域に達するものも遠くはない。(3)の直接発電については現在までほとんど開発が行われていない。ここでは開サイクルおよび閉サイクル発電についてのべる。

開サイクル発電では地熱流体そのものが作動流体であり、流体の気水比、発電容量、発電以外の多目的利用などにより幾つかの方式に分けられる。

大容量の場合には火力・原子力発電の蒸気タービンの技術が用いられる。然しながら火力・原子力のタービンの入口状態は過熱状態にあるが、地熱発電のタービンの入口ではよくて飽和状態の蒸気が用いられる。飽和蒸気はノズル中で膨張すると湿り状態となり、動翼入口では微小液滴として液相を含む2相流となり、動翼中で湿り損失と、動翼の摩擦を引き起す。すなわち蒸気中に液滴があると液滴はその慣性力のため蒸気ほど加速されず、動翼への相対速度が蒸気と全く異なるため翼を駆動する力を減じさせ、出力が減少する。したがって地熱タービンでは火力・原子力のタービンと構造を変え、ノズルと動翼の間隙を広くして、ノズルから出た液滴は動翼に入る前に円周方向速度による遠心力で外周へ飛ばされ、動翼にできるだけ入らないようにしたい。動翼の前縁などに硬度の高い材料を取付

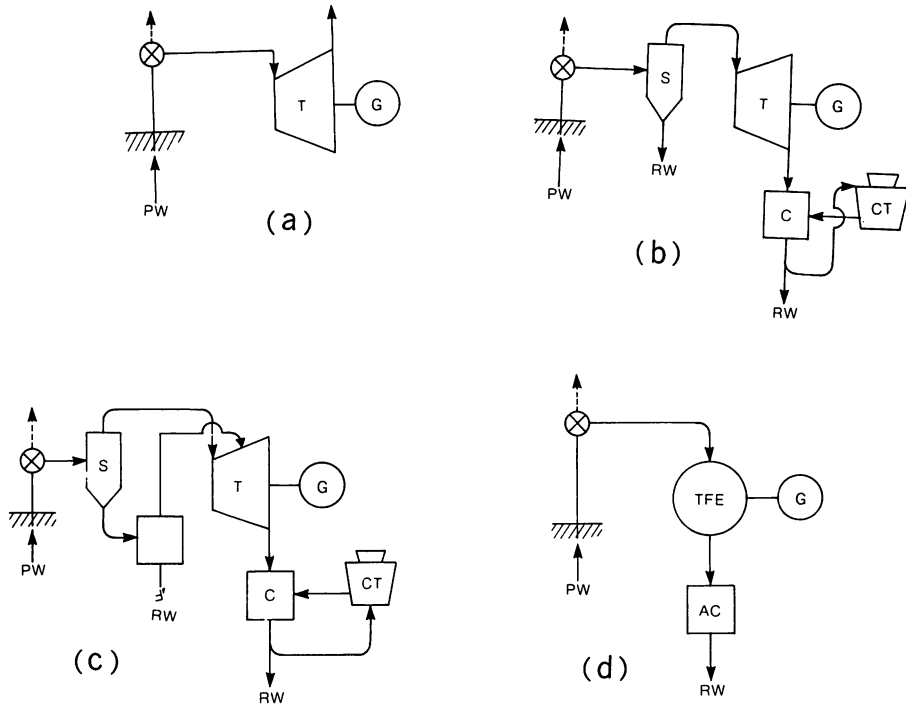


図 - 1 開サイクル

PW:生産井, RW:還元井, S:気水分離器, F:フラッシャー, T:タービン,
TFE:トータルフロー膨張器, G:発電機, C:凝縮器, CT:冷水塔, AC:空冷凝縮器

けて対摩耗性を向上させるなどの改良が加えられて来た。しかし湿り損失などのため火力発電のタービンより5～7%ぐらい効率は低い。

地熱流体は一般に2相流であり、しかもタービンには湿り蒸気は好ましくなく、タービンに湿分を送らないようにするため地熱流体の気水比により幾つかのサイクルが用いられている。タービン出口に大気温の冷却水を用いる凝縮器を設けて低い背圧とする復水式が広く用いられているが、出口を大気圧として排気を大気に放出する背圧式も用いられている。今後は環境保護の立場から、タービンより排出される流体は凝縮させて液相とし、還元井により地下に戻すことが必要である。地熱流体の気水比が小さいときは2相流を先ず気液分離器で蒸気と熱水に分離し、蒸気のみをタービンに送る場合と、熱水が比較的多量の場合は、さらに分離した熱水を減圧（フラッシュ）させて得られた蒸気をタービンの中段に送って出力をふやす。

図 - 1 には開サイクルの基本的種類を示してある。(a), (b)は地熱流体がほとんどで蒸気のみときであり、(a)は背圧式、(b)は復水式である。(c)は分離・一段フラッシュ式である。(d)は往復式蒸気機関のように2相流

を直接膨張できるいわゆるトータルフロー膨張機が開発された場合に用いられるサイクルである。図2には横軸に地熱流体の気水比を、縦軸にタービン効率を100%とし、直接トータルフロー膨張機で2相流を膨張させたときの出力に対する3つの場合の出力の比を示してある。図1の(b)は分離のみ、(c)は分離・一段フラッシュに相当する。気水比が小さくなるとフラッシュ段

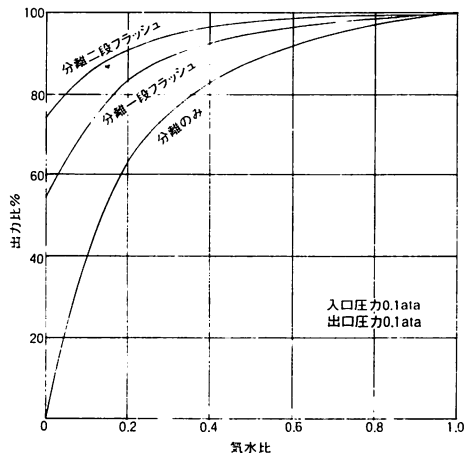


図 - 2 気水比と出力比

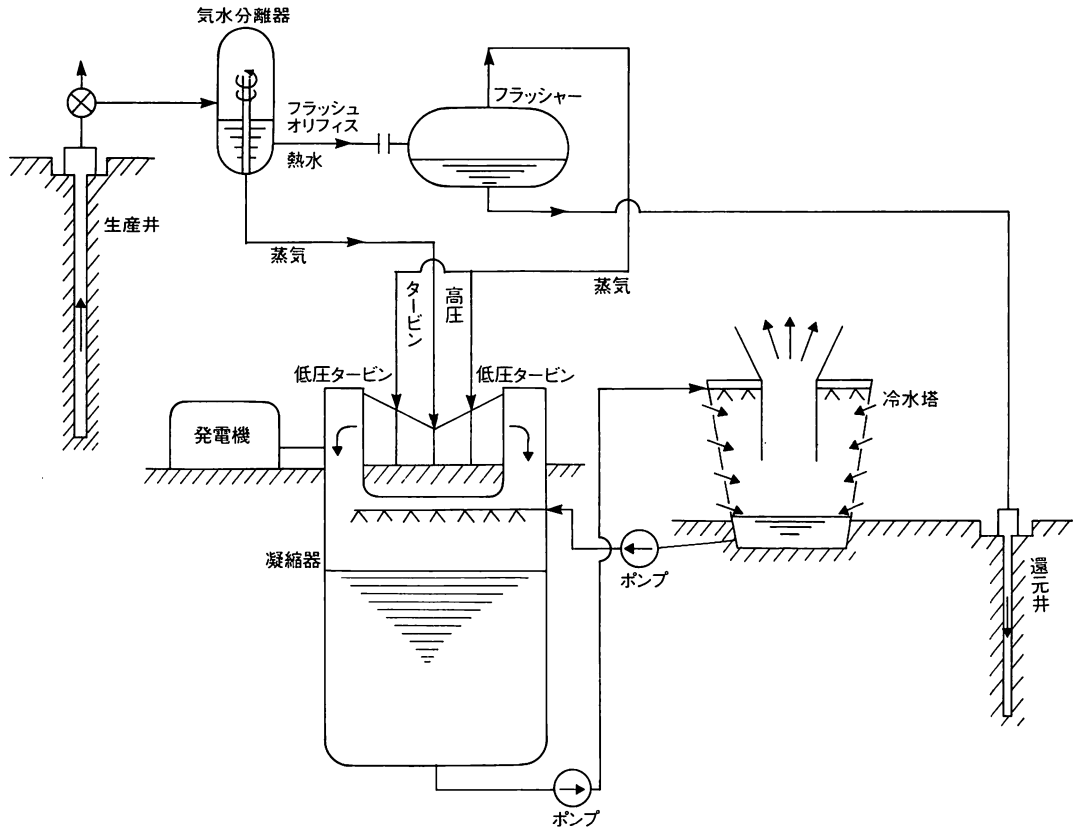


図-3 分離・一段フラッシュ地熱発電系統図

数を増加させる必要がある。

分離あるいは分離フラッシュ発電は現在の地熱発電所で最も広く用いられている。これらの発電所のタービンについては既に述べたが、他の主要機器である凝縮器も火力・原子力発電所に用いられているものとは異った構造をもつ。すなわち地熱発電所は山間部などに建設されることが多く河川水を冷却水として利用できない場合がほとんどである。したがって凝縮器には冷水塔で空気により冷却した水が用いられる。またタービンよりの排気中には不凝縮ガスが含まれるために凝縮器の性能低下をできるだけ防ぐため、復水をタービンで再度利用する必要がないため直接接触凝縮器が用いられ、またタービンの排圧の真空度は凝縮液のヘッドでとる方法が用いられる。

このような冷水システムを含む分離一段フラッシュの地熱発電の原理図を図3に示す。復水された地熱流体は冷水塔で空気と接触して冷却された後、凝縮器上部から液滴として落下しタービンの排気を凝縮させる。復水に用いる冷却水の温度は大気よりやや高く、また

排気中の不凝縮ガスのため、タービンの排気は火力・原子力タービンの排気より約0.05 ata から0.1 ata 高くなる。

図2よりわかるように気水比が0.3以上では従来の分離フラッシュでも十分な出力が得られるが、0に近く小さいときはトータルフロー膨張機あるいはバイナリーサイクルの方が有利といえる。わが国の地熱資源の気水比は平均として0.25位といわれており、図2よりわかるように分離フラッシュサイクルとともに、ト

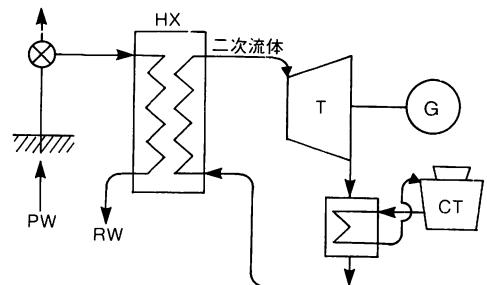


図-4 バイナリーサイクル
(記号は図-1と同じ)

ータルフロー膨張機サイクル，バイナリーサイクルも今後実用化に近づける必要がある。

図4にはバイナリーサイクルの代表的系統図を示してある。バイナリーサイクルは地熱流体が次のような条件にあるときにフラッシュサイクルより有利となる。(i) 地熱流体の温度が150℃以下と低温であり，フラッシュさせても余力出力が得られないとき，(ii) 腐蝕性であったり，(iii) 熱水がほとんどであったり，(iv) 地熱

流体から H_2S など環境汚染成分を分離させず熱エネルギーのみ取り出して，流体は加圧したまゝ大気とも触れさせずに地下に還元したいとき，(v) 降水などの地下浸透が十分でなく，一方地熱源は十分に存在するため地熱流体を循環させたいとき，高温岩体発電はこの場合に相当する。

図5にバイナリーサイクルの構成図を示す。このバイナリー発電では H_2S ， CO_2 が地熱流体からの分離

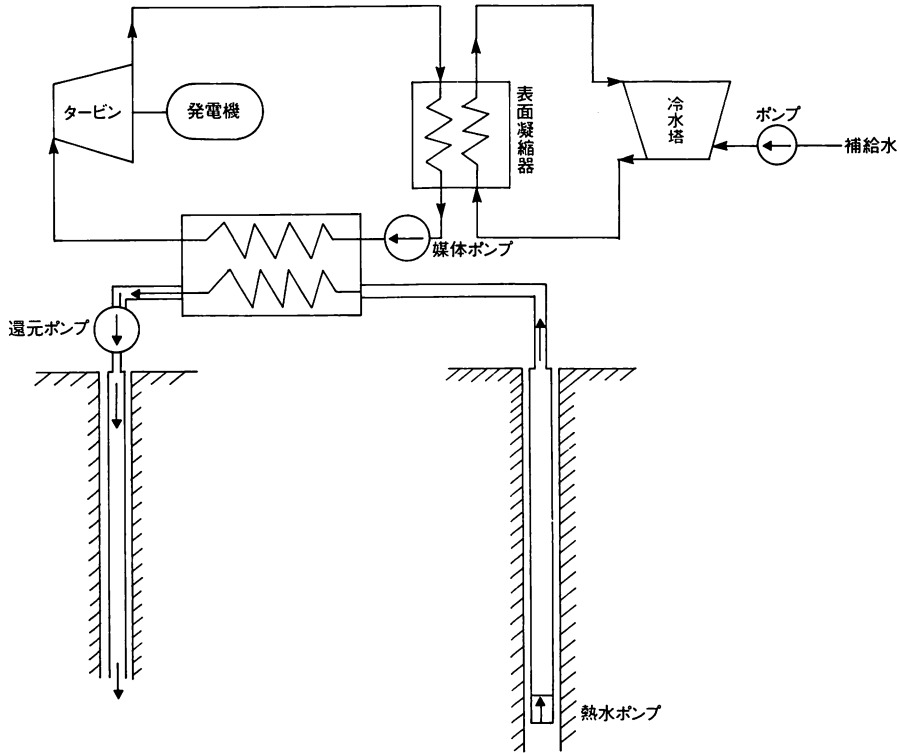


図-5 バイナリーサイクル発電系統図

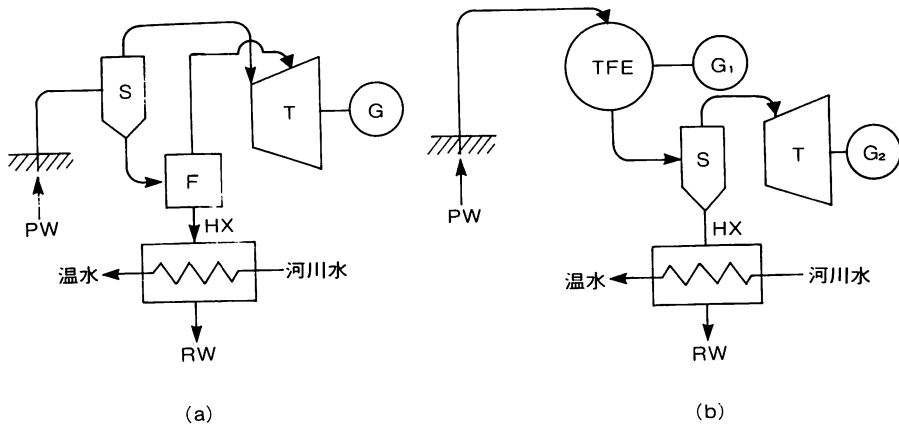


図-6 多目的利用発電サイクル
(記号は図-1と同じ)

されずに地下に還元する方法がとられ、そのために生産井の底に熱水ポンプを取付けてある。

地熱発電に関連して今後重視されるサイクルに発電・多目的利用のサイクルがありその一例を図6に示してある。(a)はフラッシュよりの60～100℃の熱水を利用して暖房、温室用等の温水造成をする場合に利用できるサイクルであり、(b)はフラッシュでは圧力降下による外部仕事は得られないため、将来効率のよいトータルフロー膨張機が開発された場合の発電・多目的のサイクルを示してある。

4. 地熱発電の現状

戦前及び戦後小容量の温泉蒸気を用いた発電が別府で行われたが、我が国で本格的な地熱資源の探査、試験という過程を経て実用規模の発電が行われたのは1966年岩手県松川における2万kwの地熱発電からである。その後地熱2相流体に対して気液分離器を設けた大岳、鬼首、葛根田の各発電、分離・一段フラッシュ発電の八丁原発電所が建設・運転されている。現在稼動している我が国の地熱発電所の出力と地熱流体条件を表1に示してある。

一方バイナリーサイクル発電は通産省サンシャイン計画により北海道南部にある濁川と、九州別府西方に位置する大岳において、前者は地熱熱水のみを熱源としR-114を媒体に用い、後者は蒸気をわずか含む地熱熱水を用いイソブタンを媒体として出力1000kw級のパイロットプラントが昭和52年までに建設され、53年に運転されれば計画に近い性能が得られている。

一方米国、イタリア、ニュージーランド、メキシコ、エルサルバドル、アイスランド、フィリピン、ソ連などでも地熱発電の建設、運転が急速に進められている。イタリアの地熱発電の開始は明治38年と歴史は古

く、ラルデレロの礫炭採集の工場で試験発電が行われ、第2次大戦時を除いて順調に出力が増加し、総出力42万kwとなっている。米国のサンフランシスコの東北部に位置するガイゼー地区では良質な蒸気が得られるため、発電出力は急激に増加し、その様子を我が国及び上述のイタリアの発電出力の増加の様子とともに図7に示す。昭和53年末までに60万kwの総出力を持ち56年までには100万kwを越す計画に従って建設が進められている。しかもこのガイゼー地区の地熱発電は5万および10万kw級を単位とし、生産井・還元井との関連で分散して発電所が建設されているが、各発電所は無入運転され、すべて中央制御室で制御されている。火力・原子力発電所とことなり、蒸気圧も高くなく、かつ多くの経験から発電所の安全性、保守性はほとんど完

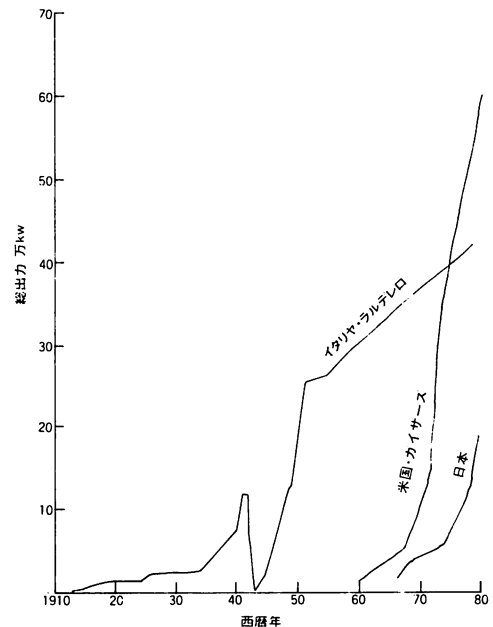


図 - 7 世界の地熱発電総出力の推維

表 1 我が国の地熱発電所

発電所名	施設者名	所在地	定格出力 (kw)	蒸気条件 圧力(atg) /温度(°C)	運転開始年月
松川	日本重化学工業	岩手県松屋村	22,000	3.5 / 147	1966年10月
大岳	九州電力	大分県九重町	11,000	1.5 / 127	1967年10月
大沼	三菱金属	秋田県八幡平村	10,000	1.5 / 127	1974年6月
鬼首	電源開発	宮城県鳴子町	25,000	3.5 / 147	1975年3月
八丁原	九州電力	大分県九重町	50,000	6.5 / 164	1977年6月
葛根田	日本重化学工業 東北電力	岩手県雫石町	50,000	3.5 / 147	1979年3月
森	道南地熱エネルギー 北海道電力	北海道森町	50,000		建設中

成され、信頼度の高い運転が行われており、現在環境性向上の努力が払われている。

我が国の発電技術は世界的水準にあり、世界中の地熱発電設備における我が国のメーカーによるシェアは過半数を越え、米国ガイザー地区のかんりの発電所は我が国から輸出されたものである。この蒸気発電技術とともに最近稼動しだした八丁原発電所で利用されている熱水の多い地熱流体を用い、分離・一段フラッシュ発電を行う技術は、世界各地でもこのような2相地熱流体を生産する資源が今後多く開発されると予想されるので、海外の関心を引いている。蒸気または蒸気の多い2相流の場合、定格通りの流量が得られ、かつスケールなどによる還元井の能力低下が起らないときは、地熱発電所は稼動率も非常に高く10円～12円/kwhの単価の発電が行われている。したがって原油価格の昂騰ともなう昭和55年度時点で石油火力の発電単価が20円/kwhを越えると云われるエネルギー事情下においては、地熱発電への関心とエネルギー需給計画における重要性は今後ますます増大するものと思われる。

5. 地熱発電の今後の課題

現在まで我が国の地熱発電は殆んど浅部地熱資源を用い、出力も5万kw級が最大である。将来大規模な地熱資源が発見された場合、火力・原子力発電のように単機百万kw級の発電所がスケールメリットから考えて開発されるかという内容はかなり異っている。昭和53年時点における残流コストの容量に対する変化の試算結果を図8に示す。タービン発電機などのような火力・原子力発電所のものと同様の機器は容量とともにkw当りの価格は低下する。しかし生産井、還元井、集合

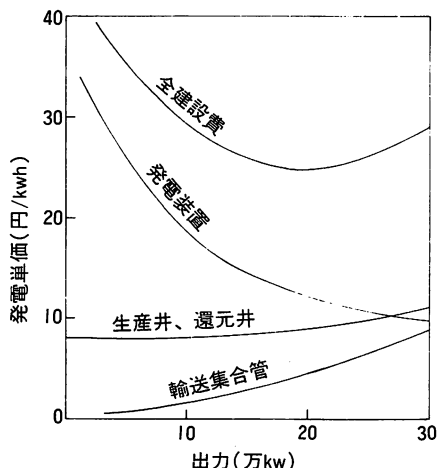


図 - 8 出力と発電単価

管など地熱発電特有の機器の価格は、発電所の容量増加とともに井数が多くかつ互の干渉を防ぐように十分間隔をとり、かつ深く掘る必要があるため、規模の増加とともに容量当りの生産井掘削費は僅かに増加する。さらにまた生産井から発電所までの地熱流体輸送系の機器のコストは著しく増加すると考えられる。これらのことから容量当りの建設コストが最小となる発電規模は20万kw前後にあることとなる。

物価の上昇などによって建設単価は上昇しても、最適容量は余り変わらないと考えられ、これからの地熱発電は必ずしも大容量に指向するのではなく、容量は設置を予定されている地点の地熱資源の容量、定常時に取りせる熱エネルギーの量、地理的条件などによって決められると考えられ、最大容量である20～25万kwのものを含めて、5万kw及至10万kw級の発電所を主体とするものが数多建設されて行くと考えられる。

国産エネルギーの中でも最も大きな期待がかけられている地熱発電の開発において、今後検討すべき課題としては次のものが考えられる。

(1) 我が国全域についての地熱発電に適した地熱資源の正確な探求、資料の蓄積、解析と地点の選択。

(2) 発電所立地点により、物理・化学的に種々の性状をもつ地熱流体に対して、最適の発電方法の選択と発電技術の確立。

(3) 環境保全対策の確立

(4) 発電所建設地の周辺地域に多目的利用の熱エネルギーを供給しうる地域福祉型発電技術の確立。

(5) 出力の安定性、信頼性の確立

(1)の項目については蒸気、熱水発電、高温岩体発電に用いる資源の探査技術の向上と、資源量の正確な評価方法、試掘井の短時間掘削技術などが内容となる。工業技術院は昭和55年度より3ヶ年計画で地熱資源の我が国全体のマップを製作する作業をはじめた。すなわち従来地質調査所あるいは民間企業の保有していたデータを収集するとともに、地上又は空中からの遠隔探査を行うとともに、米国の打上げた地球資源探査衛星の撮映した写真を分析することが計画されている。このような地熱資源の確度の高い調査は地熱発電を進める上で最も望まれることで、従来4000万kwの資源量があるといわれて来た地熱総発電容量について、更に正確な規模と地域を明確にし、地熱発電の今後の開発計画に大きく寄与するものと思われる。

(2)の項目については20万kw級への大型化技術の開発は現在技術の延長として大きな問題はないが、低温・

腐蝕性流体に利用するバイナリーサイクル発電の経済性向上、最適な熱媒体、耐蝕性材料の開発が必要である。バイナリーサイクルは地熱流体より熱エネルギーのみをとり出して閉じた回路で地下に還元し、 H_2S などの環境問題を全く起さない。地下ポンプを含め、最適サイクル、温度とその媒体、経済的な機器と運転方法などが開発されれば大きな将来性が期待される。このような内容をもつバイナリーサイクルの開発は今後の大きな課題の一つである。

(3)の項目の主要な問題点は H_2S 対策である。 H_2S の排出は人間はもとより動植物に対しても有害なものであり、発電所の排気ガスからの有害成分の除去は、蒸気・2相流発電において今後検討すべき重要な課題である。現在までのところ我が国の発電所で用いている地熱流体には余り多量の H_2S が含まれていないが、今後発電所の建設がすすむ場所によってはかなりの H_2S 等を含む流体が得られ、経済的な除去法の確立が急がれる。

(4)の項目については出力5～10万kwの発電所と、1万kw以下の中小規模の発電所より得られる100℃前後の熱水を、発電所周辺の地域、都市の暖冷房、温室暖房などの多目的の熱源として利用する多目的利用発電システムの技術開発が今後の重要な課題である。地熱発電は火力・原子の発電の温排水利用とは異り、100

℃以下の温水又は温風を造成することができる。これを発電所から数km及至10km位の地域に供給し、大規模な各種の多目的に役立てることができよう。また最近注目されだしたローカルエネルギーシステムにおいては、中小規模の地域福祉型多目的利用地熱発電は大きな役割をはたすと考えられる。特に1万kw以下の出力が必要で、地熱流体が熱水の多い2相流の場合のような小容量の発電には蒸気タービンは設備費も割高でかつ発電効率も全くない。したがってこの目的には2相流をそのまま膨張させて、かつ構造も余り複雑でないトータルフロー膨張機の重要な課題である。

(5)の項目については、従来還元井におけるスケールの閉塞により、発電出力が低下することがある。このようなスケール問題の解決は、今後の地熱発電所の信頼性を高める上で重要なことである。

地熱発電を、地熱兆候が著しい地域において、しかも発電条件的に比較的良好な地熱流体を使用したこれまでの段階から、代替エネルギーでかつ国産エネルギーの一つとして将来の我が国のエネルギー需給計画における期待に答えうる段階に成長させるには、地熱資源の探査技術の近代化、環境汚染のない発電方式と地域多目的利用発電などを含む地熱発電の新しい段階へ向っての技術開発が要望される。