

# 外国の地熱

発電ができるような地熱とは どのていどの規模のものであろうか この概念を得るために 外国ですでに発電に利用されている地熱の諸数値のあらましを 第1表に示しておく 発電機のタービンに送り込む蒸気の圧力は 数気圧である 1,000 kWh の発電には 熱量にして  $6.5 \times 10^7$  kcal/h 蒸気量にして通常 10t弱/h が必要のようである 1つの地熱地でもボーリングごとに蒸気産出量ははなはだしく変化があり 中には1孔井当り200~300t/hに達するものもあるが 数気圧のもの流量が10t/h以上のものならば 産出井に使えるのである このような蒸気出力を得るためには 孔内温度はなるべく200°Cを越し また孔頭にあるバルブを完全に密閉したとき上昇する孔内圧力が  $10\text{kg/cm}^2$  (大体10気圧)以上に達することが望ましい

以上は覚えやすい数字をことさら用いたものであり 厳密な数値ではないが 実用化できる地熱の強さを知る目安になる また地熱産出物のいかなる諸元を最小限測定する必要があるかも示すものである

以下諸外国の地熱地を順に述べることにする



## イタリア

イタリアー地熱地分布

ナポリ付近やシシリー島などでも地熱調査が試みられているが 発電を実施しているのはローマの北西方トスカナ州の Larderello を中心とした地方である。

Larderello 地方の地熱発電は1913年にまず小規模な成功をみ 現在は出力30万 kWh 年間発電量20億 kWh に到達している世界最古かつ最大のものである。

開発は会社組織になっているが 電力の大部分はイタリアー国鉄に供給し 国策会社の傾向が強い。ここの地熱については地質ニュース(特集 No.3 1954)でもすでに紹介されたことがある。

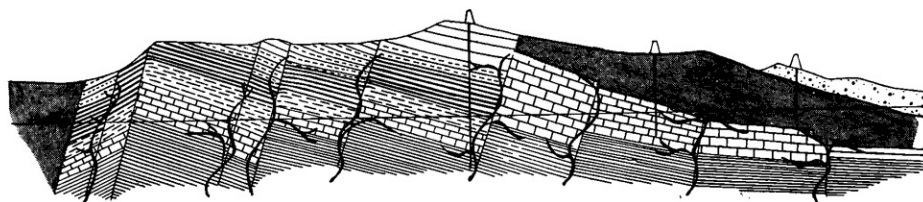
この地方の地熱資源は海拔200~800mの丘陵性山地に

あり 面積 200km<sup>2</sup> の地域内の数カ所に散在している。

第1図の断面図で示すように 古生代から中生代 さらに第三紀初期におよぶ水成岩の厚層が この地方の基盤をなして広く分布する。そして イタリアー半島の背梁山脈であるアペニン山脈に平行な北西断層と これとほぼ直交する北東断層が この水成岩層の中をたくさん走ってい

第1表 外国地熱地数値表

地名	ボーリング				産出物			
	本数	深さ m	温度 °C	密閉圧力 kg/cm <sup>2</sup>	温度 °C	圧力 kg/cm <sup>2</sup>	1孔当産出量 t/h (孔経mm)	
Larderello イタリアー	246 内常時噴出井 153 (1953)	200~1,600 おもに 200~700	200~280	4~32	130~230 最高 242	2~5	過熱蒸気 3 最小 3 最大 303 平均 50 (230)	
Wairakei ニュージーランド	57 内産出可能井 31 (1957)	160~970 おもに 300~800	200~266	10~30	—	5~14	蒸気 3-34 熱水 13-246 (100~150)	
The Geysers カリフォルニア	19 内産出井 4 (1961)	250~300 産出深度 150~210	最高 315	11~13	185	8	過熱蒸気 12-50 (320)	



- 新第三紀 礫、砂、粘土
- 漸新期 頁岩
- 白堊紀 チョーク
- ジュラ紀 チョーク
- ジュラ紀-漸新紀 成層粘土
- リアス期 チョーク
- 三疊紀 石灰岩、硬石膏
- 二疊 石炭紀 珪岩、結晶片岩

← 第1図  
イタリアーの Larderello  
地熱模式断面図



る。これらの断層に沿って地熱蒸気が深所から上昇してきて断層そのものや付近の岩石の割れ目などの中に貯溜されている。ことに中生層の最下部の硬石膏層と名付けられている地層（元来は石灰岩であるが地熱物質の作用によって硬石膏ではげしく交代されたもの）が優勢な貯溜カ所になっている。この基盤岩層の上には別系統の地層がのっている。この地層はアペニン山脈を形成した第三紀初めころの地殻変動につれて海底に生じた大規模な崩落作用によって累積されたものと考えられている。この地層はジュラ紀以後のいろいろの岩塊を包含しているが多くは第三紀初期に堆積した成層泥岩からなる。この成層泥岩は不透水性でありその下にある基盤岩層の中に溜っている地熱蒸気が上方へ逸失するのを防いでいる。この覆蔽層が薄かったり欠けたりしている場所では蒸気が地表に漏れて露頭を作っていることがある。

蒸気採取のためのボーリングはこの成層泥岩層を貫通し下に潜在する基盤岩層中の断層ことにそれが硬石膏層を切る所を目指して掘さくされる。深さはいろいろであるが700mくらいのことが多い。蒸気は過熱されておりしたがって液相の熱水を伴わない。

世界の地熱蒸気は日本のものも含めて一般に化学成分上99%以上が水分であるがLarderello地方の蒸気はややガス分が多く重量にして5~7%に達する。分析値の1例は次のようである。

H<sub>2</sub>O 94.50 CO<sub>2</sub> 4.20 H<sub>2</sub>S 0.90 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.25

NH<sub>3</sub> 0.30 CH<sub>4</sub> 0.20 N<sub>2</sub> 0.16 He, Ar, Ne 少量

硼素などを少し含み発電のほかに硼酸その他の硼酸化合物重炭酸アンモニア硫黄なども生産している。蒸気にガス分の多いことはかような副産物がある点ではよいが発電のためにはコンデンサーの減圧にやっかひでありまた装置を腐蝕する問題も強く生じかえっ

て不利とってよい。

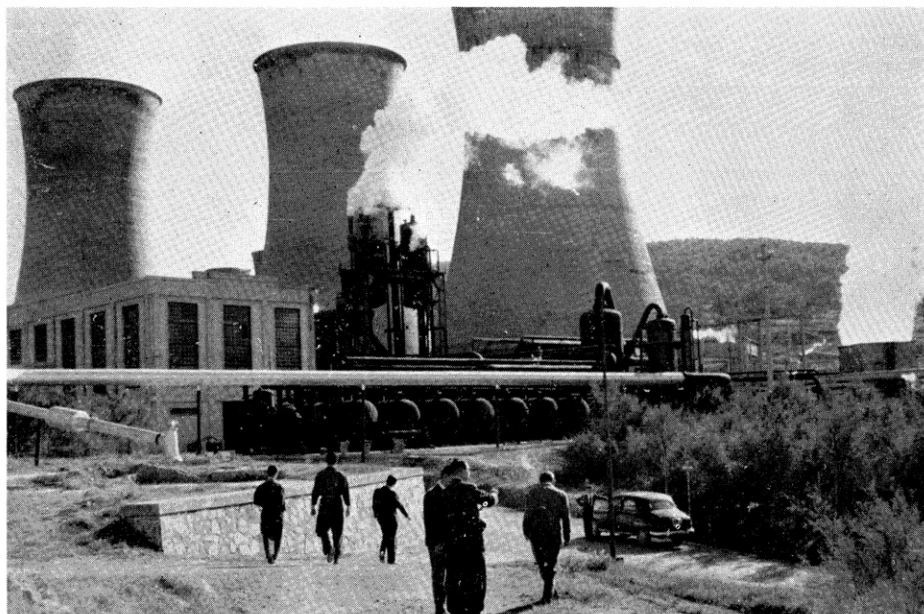
200年前まず硼酸採取がはじめられたがそれ以前には高爽冷涼な気候と温泉の存在とによってこの地方は避暑地として知られていた。ことにLarderelloには煮えたぎった大きな泥沼がありそこから硫気が立ち込めその回りでは草木も育たないほどの特異な景観を呈していた。硼酸の採取に次いで大規模な発電が行なわれ蒸気を地下深所から直接採り出すようになった結果今日では地表の温泉・噴気現象はおおかた消滅してしまっている。

過去50年の間に発電規模は相次いで拡張されてきたが地熱に寿命がきて減退するようなキザシはない。しかしこの地方から出力を一層増大することはあまり重点としないで過採取に落入って能率に影響することをむしろ警戒している。ただ個々の孔井には衰耗するものもあるので新たに補給して出力を維持する必要がある。

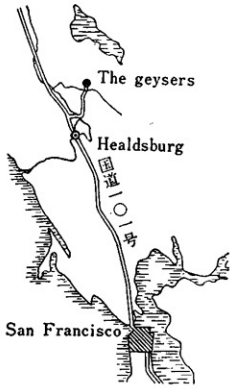
これには長年行なった多くのボーリングによるデータを整理するほか新たに地質調査や物理探査によって地下の地質構造を調べ次のボーリング位置を選定している。物理探査には重力探査やとくに電気探査が盛んに用いられているようであるがその方法や成果の詳細は公表されていない。

イタリアは火山国であるがLarderelloの近傍には火山は存在しない。しかし地熱の根源は「地下火山」あるいは火山活動に関係ある地下の岩漿溜と一般には考えられている。またやや離れた所に電気石（硼素を含む鉱物）に富む第三紀の花崗岩が露出しておりこの火成活動の余力が熱源であろうと考えている人もある。

いずれにしてもLarderelloでは今までにわかっているのは深さ1,600mまでである。それより深い所がどうなっているかを研究する目的で地熱地の中心に深さ3,000mを目標にしてボーリングを掘進中である。



Larderello 地熱発電所(イタリア) 冷却水が得がたいので蒸気の凝縮水を巨大な冷却塔で冷やして冷却に使っている



カリフォルニアの地熱地

## アメリカ 合衆国

合衆国西部のカリフォルニア・ネバダ・オレゴンなどの諸州に地熱地が知られているが、さしあたり開発されているのはサンフランシスコの北方の The Geysers という場所だけである。

The Geysers の地熱発電は完全に民営で、昨年5月操業開始、出力 1.25万kWh の小じんまりしたもので、電力は一般の送電網に送り込まれている。

この地方はカリフォルニア海岸に平行な、海拔数100mの褶曲山脈で、地熱地はそのうちの一つの谷底にある。日本の東海・近畿・四国・九州などの太平洋岸に分布するいわゆる、時代末・中生層と同様な岩相・褶曲構造を示す地層によって構成されている。一部には蛇紋岩や輝緑岩がみられる。

地層の褶曲軸と平行に北西に走る大きな断層帯があり、これに沿って地熱の露頭が点在する。これらは普通は弱勢なものであるが、ただ1カ所蛇紋岩が貫入している近くで、前述の断層帯のほかに北東方向の断層群があるところがあり、その交叉部に強烈な地熱現象がみられる。交叉部に生じた複雑な割れ目が深所からの地熱蒸気の上昇通路になったわけである。

イタリアの地熱地にみられる覆蔽層に相当するものがあるか否かについては、蛇紋岩がその役目をしているとの考えもあるが、まだ定説になっていない。

以前、この地には、強烈な噴気や温泉が地表にみられ、地ごくの門とまでいわれるほどの、物すごい様相を呈し、これを見物にきた人も少なくなかった。その後、ボーリングが行われた結果、現在では、自然噴気はおおた消失し、ただひどく温泉変質を受けた岩石の露頭が、往時をしのばせている。

過去19本のボーリングは、谷に沿って延長300m、幅100mのせまい範囲内に掘られており、そのうち4本だけを産出井に使い、前述の発電出力を支えている。範囲はせまくとも強力ならば発電ができることを示している。産出井は平均50m間隔であるが、相互干渉は軽微であり、産出蒸気の性質も互いに似ている。おそらく地下で互いに直通した比較的に広い割れ目が、蒸気をたくわえているのであろう。以上でわかるように、この地熱地は、はなはだ強烈な地表徴候を基礎にして、ただその近くにしか、あまり深くないボーリングを行なうことによって、発電するに足る強さの蒸気を採取できた恵まれた場所と言える。地質構造の調査については、普通の地質地質調査だけ行ない、物理探査はやっていないなど、あまり苦労していないようである。

ここの蒸気も、少しく過熱された状態にある。水分以外のガス分を0.75%しか含まず、その89%までは炭酸ガスで、酸素は含まない。

The Geysers にも近傍に火山はないが、カリフォルニアは、第三紀から第四紀にかけての火山地帯を占め、この火山作用に関連して、地熱が存在すると一般に考えられている。



The Geysers 地熱地 (カリフォルニア)



## ニュージーランド

### ニュージーランドの地熱地

ニュージーランドは南北2つの島からなるがその北島には日本の九州中部に似た地質の火山地帯があり温泉・間けつ泉・噴気孔などが多い。これらの地熱エネルギーの開発計画が正式にたてられたのは1949年である。たくさんの地熱地のうちどれを開発すべきかをきめる目的で温泉や噴気また地熱地一般の地表面から放散されている総熱量を測定して次の数値を得た。

Waiotapu	780×10 <sup>9</sup> kcal/h
Wairakei	510
Orakeikorako	470
Rotokawa	190
Tikitere	140
Tekopia	110
Kawerau (Te Teko)	70
Waikiti	70
計	2,340

前にも述べたように6.5×10<sup>6</sup> kcal/hは1,000 kWhの発電力に相当する。これらの地表放熱量はその地熱地が支出しうる最少限のエネルギーであり地下深所の開発によってどれだけ出力が増加するかはわからないが地熱地の規模を予見する目安になる。これらの測定値やその他の条件を勘案してまずWairakeiを開発し

次いでWaiotapuを調査中である。別に北島のRotoruaにも優勢な地熱地があるがRotoruaは地熱開発には不適な観光温泉都市である理由で調査から除外されている。

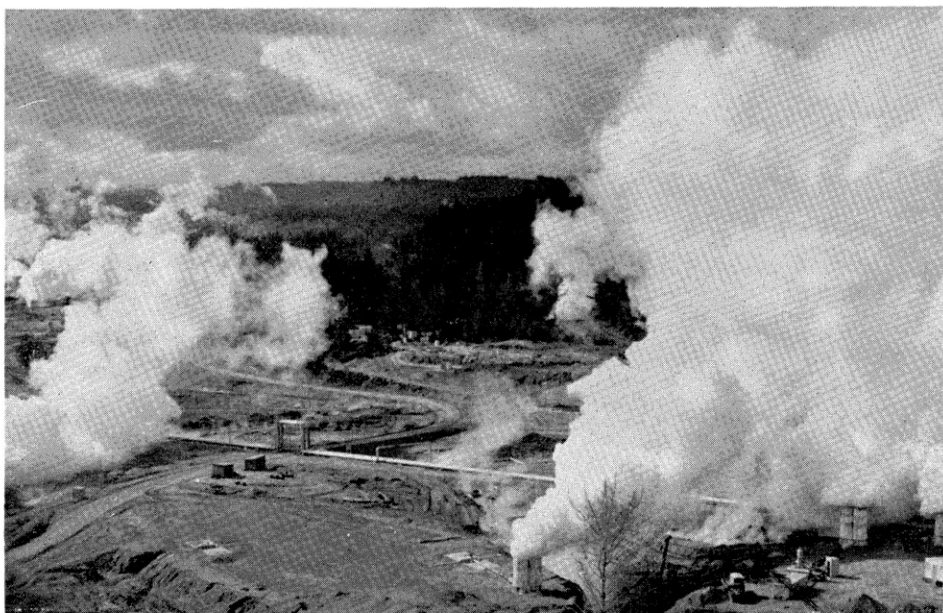
Wairakeiの調査開発は1950年から本格的に開始され順調に進んで1958年11月には発電に成功している。15万kWhの発電を支え得る蒸気量を獲得したが第一期発電所の容量は6.9万kWhである。ただし発電機を逐次増設する関係上当初の出力は2万kWh余りであった。

発電所は大きな川の近くであり冷却水にはこと欠かないのでイタリーやカリフォルニアの地熱地にみるような冷却塔はない。ニュージーランドでは発送電は火力も水力も全部国営であり地熱発電も同様でその電力は一般の送電網に送り込まれている。

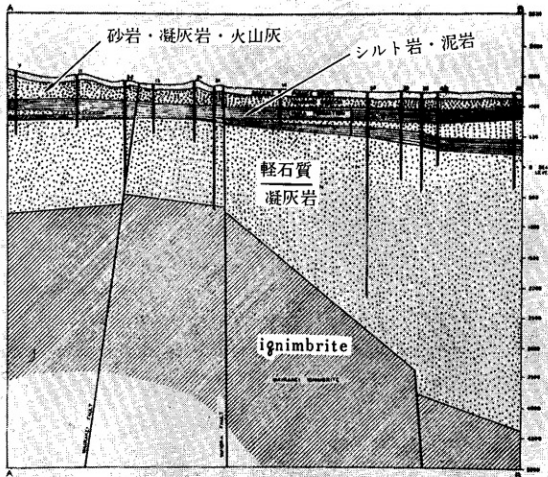
調査・研究もすべて国立研究機関で実施しその結果は多数の報告書として公表されている。

ニュージーランドの火山地帯は中生層を基盤とする大きな地溝の中にある。広くこの地溝をうずめて新しい火山噴出物が厚さ1,000m~2,000mあるいはそれ以上に累積しておりその上に錐状やドーム状の火山体がまばらに点在する。地溝を生じた地塊運動は現在でも続いておりしたがって火山噴出物は多くの断層で切られている。地熱現象はこれらの断層と本質的に関係がある。このような地質環境にあってWairakeiの地熱開発地は5km×1kmの範囲を占めている。付近一帯はなだらかに起伏する丘陵であり突出した火山体は遠方に望みされるだけである。

第2図はWairakeiの模式断面図の1つである。地表から500~1,000mあるいはそれ以上の厚層をなして軽石片をたくさん含む多孔質の凝灰岩がほぼ水平に累積



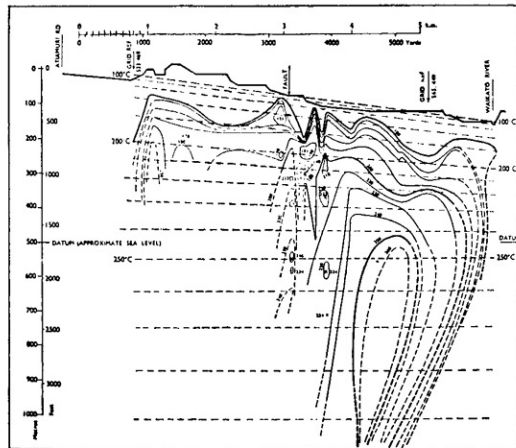
Wairakei 地熱地 (ニュージーランド)



第2図 Wairakei 地熱模式断面図

している。 その下には透水性に乏しい ignimbrite (溶結凝灰岩とほぼ同じとみなしてよい) がこれもきわめて厚く累積している。 断層に沿って 深所から高熱物質が ignimbrite を通過して上昇し 軽石凝灰岩層に達する。 この凝灰岩には地下水が充満しており これが下からの高熱物質の流入によって加熱され 密度が減少するので地層内をゆるやかに上昇し その結果対流系を生じる。 第3図はかくして生じたと思われる Wairakei の地下温度の実測図である。 地下で十分な静水圧を受けていると 地下水はかりに100°C以上の高温になっても 蒸気化することなく液相を保つ。 第3図上のほぼ水平な点線は 各深度の静水圧によって定まる気化温度の推定線であり これと実測等温線との関係からみて 対流圏内の大部分は 熱水状態にあることがわかる。

ボーリングを行なうと孔内では地層中よりも流動摩擦が少なく 対流が促進され 孔内水柱の上部まで高温となり そこでは水圧が低いので ついには沸騰を開始する 一度沸騰し孔内の水柱が放出されると 減圧される



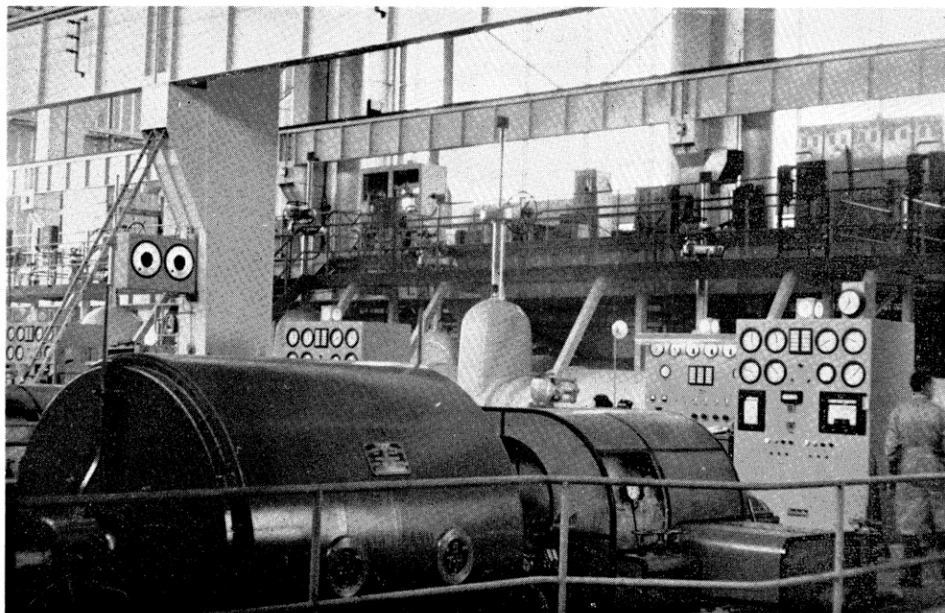
第3図 Wairakei 地下等温線図

結果その後は連続して蒸気が自噴する。

ボーリングを掘さくする場合 浅い所では沸騰させないように押えて なるべく深く行なうと より高温の蒸気が得られる。 深すぎて ignimbrite まで達し たまま断層の割れ目に遭遇すれば きわめて強力な蒸気が得られるが 一般には温度が高くても蒸気が少ないかまたは 断層の中間に当たる場所などでは 温度もかえって降下することがある。 それは ignimbrite 中では熱は一般に伝導だけであり かつ岩石の伝導率は 小さいからである。

孔内において高温の熱水は沸騰によって爆発的に気化する。 十分減圧すればやがては全く気化するが 実際にはせまい孔内では抑圧され また蒸気を発電タービンに導く必要上孔頭でもなお数気圧を保つようにしてある。 したがって 噴出蒸気はその時の温度・圧力に応じた飽和蒸気であり いいかえれば未気化の液相をまじえている。

Wairakei の実測によると 産出物中の蒸気の割合は



Wairakei 地熱発電所の内部



Rotorua の公共温泉場（ニュージーランド）

5 kg/cm<sup>2</sup>の圧力のもとでは15~29%ある。液相分は発電タービンに送り込んでまずいので、孔頭に気液分離器を備えて蒸気だけを使用する。タービンに供給する圧力を救気圧とすると、産出物総量の実に75%ほどは液相で、その熱量は全体の25%という。液相分は分離された後、今のところ大気中に放出しており、空中でこれが全部気化し、物すごい白雲をあげ、イタリーの地熱地とは違った印象的な景観を呈している。

将来はこの液相分をも装置内で減圧して再度気化せしめ、この二次蒸気をさらに発電に使う計画がある。その暁には現在の6.9万 kWhは15万 kWhに増加し、また地下開発がさらに進み、かつその噴出物が余すところなく利用されれば、出力は25万~28万 kWhに拡張されるものと予想されている。

熱水の沸騰に際し、そのうちのガス分はおおかた蒸気中に入り、熱水中に残留するのは8%以下である。それにもかかわらず蒸気中のガス分は、わずかに0.3~0.6%である。その95%はCO<sub>2</sub>、3%はH<sub>2</sub>Sである。蒸気中にはこのように不純分が少なく、材料腐蝕の懸念は少ない。一方液相として残るものには、もとの熱水中に溶解していた鉱物成分が濃集する。これにはNaClが圧倒的に多い。

	ppm		PPm
Na	1,300	HBO <sub>2</sub>	100
K	230	SO <sub>4</sub>	35
Cl	2,000	HCO <sub>3</sub>	40
SiO <sub>2</sub>	400	その他	<35

またもとの熱水は大小の岩粉を懸濁している。沸騰に際し、これも孔内とくに沸騰面のところに残留しがちである。したがって、この種の地熱では噴出を続けると、孔井が自然に閉塞することが心配の種になる。

イタリーやカリフォルニアの地熱では、地下において過熱蒸気が存在し、噴出物は気相のみで、いわゆるDry Steamを産する。地熱物質が断層による割れ目の中に胚胎され、比較的広い空間が与えられているため、相当多量に集中しても、液化するまでの圧力に達せず、かつ周囲の岩層が緻密・不透水性であり、地下水圧を割れ目内に伝達しないため、温度の割に低圧だからであろう。ニュージーランドの地熱物質は、多孔質の岩石の粒間に充満しているもので、温度の割に層内圧力が高いから、地下で熱水の型をなし、その結果、孔井からの産出物は液相を混じえたいわゆるWet Steamとなる。

第2図のように、凝灰岩層の上部にはシルト岩や泥岩が薄く介在する。これが不透水層となり、その直下では地熱覆蔽の現象により、過熱蒸気のポケットが存在することがある。しかしながらこれは局所的現象である。Wairakei全体の地熱には覆蔽層は不可欠なものではなく、この地熱を被うものは対流圏の上方や側方の辺縁部で温度がさがりつつある地下水そのものといえる。

ニュージーランドの地熱調査では、地形・地質の特質から、地表の地質調査は深所の地質構造を詳細に知るにはあまり向かない。ただし、断層が地熱の出現に根本的に関係があるので、これの所在は空中写真によってよく検知されている。基盤の中生層の深さを知って、地溝の形を測ったり、ignimbriteの上限を探知したりする。地下の大まかな地質構造の推定に、重力・地震・空中磁気などの物理探査を実施した。この調査で最も特長とするところは、探査用ボーリングをたくさん、かつ深く掘り、地下の地質構造・地下水理・熱構造を組織的に調べ、かつ噴出物の熱力学的・化学的性質や数量をよく観測していることである。



将来の開発地と目されているWaiotapu地熱地の変質帯（ニュージーランド）



## アイスランド

### アイスランドの地熱地

ヨーロッパの北海の孤島アイスランドも世界で著名な火山・温泉国で、ここの地熱資源は古くから注目されてきた。現に首都 Reykjavik などで住宅の暖房・温水供給・水泳プール、また田圃の温室・乾草製造などに活用されている。ただ、この国は総人口20万足らずで、その割合には氷河から供給される水力が豊富であるので、地熱発電は今まで実現しなかった。しかし、最近では電力需要の拡充に必ずべき一つの方法として、地熱電力を基礎負荷の一部とし、水力をピーク時に備えることが考えられるに至った。島内には数10カ所の地熱地があるが、さしあたり島の南西部の地熱地において、1.5万 kWh の地熱発電を1964年に開始する目標で、開発準備が進められている。この地熱地に深さ 300~1,200m、平均 700 m ほどの8本のボーリングが設けられ、孔内温度 190~225°C を検出した。全孔井からの産出物を合計すると孔頭圧力を 5 kg/cm<sup>2</sup> にした際、蒸気 250t/h、熱水 1,300 t/h である。

ニュージーランドと同様に孔頭に分離器を設け、蒸気を発電に使う。残った液相の二次酸化はさしあたり行なわない予定である。かくて放流されるはずの熱水は、付近に人家が少ないなどの関係で利用の方法がない。そのまま川に放流すると、川水の温度を上げたり、鉱物成分を増したりして、下流の農場や魚獲に支障をきたすので、処置に困り、わざわざ冷却用の装置や貯水池を作ることが考えられている。温泉を貴重な存在とする日本から見ると、もったいないようなことである。

## ソ連邦

ソ連で地熱が科学アカデミーの研究課題の1つとして正式に採用されたのは、1956年頃からであり、現在ではまだ調査研究の段階にある。

千島・カムチャッカは北海道東部と一連の火山帯があり、温泉や噴気が所々にみられ、これが地熱の調査地になっている。1例をあげると、カムチャッカのパウジエツト付近では、試掘井によって凝灰岩層の深さ 100~

300mのところから 200°C内外、孔頭で3~4気圧の気水混合物が得られている。ここを開発し、1.2万 kWh の発電を行ない、かつ保温用熱源に利用する計画がある。

コーカサス・トルクメン・シベリアの各地にも地熱資源が知られている。これらは今まで世界の他の国で取扱ってきた地熱とは、性質がちがいで、火山性のものでない。地球上どこでも、深所に進むと少しづつながら地温が上昇し、その割合は 100m 進むごとに 3°C くらいといわれるが、このような一般的な地下増温によって暖かくなっている岩石からの熱伝導によって生じた地熱資源である。したがって、深さ 1,000m で 60°C、3,000m 近くで 100~150°C、さらに 5,000m で 160°C というような深い、温度の比較的低いものである。これらのうちには、石油や天然ガスの探査に伴って発見されたものも少なくない。

ただしこのような深い所に、いかにも大陸的に広範囲にわたり滞水層が実在しており、かつ温水が被圧面地下水の型式にあり、孔頭で 10~15気圧にも達し、自噴するものもあるのが特異性である。そのうち温度の高いものについては、発電も考えているが、多くは住居の暖房・温水供給に大規模に利用しようとしている。

以上のようにソ連では、地熱利用を発電だけに限らず、その寒冷な国土の特質からでもあろうが、低温なものでも大量に採れるならば保温用とし、これによって暖房用燃料の長距離な輸送を節減しようとする大らかな着想もっている。

## その他の国

アフリカ中東部のケニアには、有名な Rift Valley という地溝の中に、火山に伴った噴気や温泉が多い。この国は水力も少なく、燃料資源も乏しいので、地熱発電が注目された。噴気・温泉の分布状態からみて、地下にはかなりの蒸気源が潜在すると予想されている。地溝内には、粗粒かつ軟弱な凝灰岩からなる更新世の地層が、数 100 フィート以下の厚さで存在する。不透性の地層はないので、イタリー型の地熱は期待されそうもないが、地質状況はニュージーランドに似ているようである。種々の孔井が 170本ほどあり、中には深さ 200m のものもあるが、まだ調査の段階にある。

中米のメキシコ・エルサルバドルでも、発電目的の地熱調査が行なわれている。