

## 解 説

UDC 621.311.25 : 21.039

## 地熱発電とその材料の動向\*

吉 田 宏\*\*

## Materials Trends in Geothermal Power Plants

Hiroshi YUSHIDA

## 1. ま え が き

わが国は図1に示すよう、北は北海道の千島火山帯から南は九州の霧島火山帯と7つの火山帯より構成され、全世界の活火山総数800の中1割の約80活火山が存在している。地熱資源の有望開発地域のほとんどが火山地帯に分布していることは周知のとおりで、いわばわが国は世界有数の火山国であり、極めて豊かな地熱資源に恵まれているといえる。それにもかかわらずこれまで地熱発電が省りみられなかつた大きな理由は

(1) 安価な石油が容易に入手でき、かつ火力発電の大型化が技術的に安定となつたため、大型火力の採算性が良かつたこと。

(2) 地熱発電の出力当りの設備費が割り高である上、とりわけその開発地点が国立公園地域に存在することが多く、その発電設備の設置の許可手続きが環境庁、通産省、農林省など複数の省庁にまたがり極めて厄介で、その意欲が持てなかつたこと。

(3) 地熱発電には自然蒸気以外の利用は困難との、技術的固定観があつたこと。

などの理由によるものである。しかしながら1973年のオイルショックによる石油価格の異常な高騰や、1971年米国では石油を海外に依存せざるを得なくなるであろうことを極めて重大視したニクソン大統領が、そのエネルギー教書で米国内での、地熱発電促進計画などを提案したことが契機となり、にわかに脚光を浴びるようになってきたのである。

地熱発電は将来わが国の発電方式の主流とはならないが、産業技術審議会エネルギー技術特別部会地熱分科会の昭和49年1月の報告によれば、西暦2000年には電力の総需要の約15% (約3460億kWh) を地熱発電でまかない、それを石油の消費に換算すると年間約8300万kl、昭和49年末の輸入価格で試算すると年間約55億ドル (約1兆6000億円) の貴重な外貨の節約になると

して地熱をそのエネルギー政策上は位置づけしている。

図2はサンシャイン計画による地熱発電量の開発計画を示したもので、西暦2000年には約5000万kWの発電設備を開発設置する計画である。この約5000万kWの発電量の根拠としては、昭和44年10月の経済企画庁エネルギー研究会の報告で、わが国が地熱より取り出し得る電力は1億4500万kWで、その時点での技術レベルで経済的に開発可能な量は2000万kWとしている。この熱水量推定にあつては、対象地域の面積26000km<sup>2</sup>、熱水を含んだ地層の厚さ1.5km、その地層の気孔率を10%として、2000年間連続使用という仮定で試算したものである。しかし今後後述のバイナリーシステム技術、火山高温岩体発電などその開発技術が確立することを見込めば、約5000万kWの発電が可能としているが、それでもなお総地熱資源の約1/3の値にすぎず、

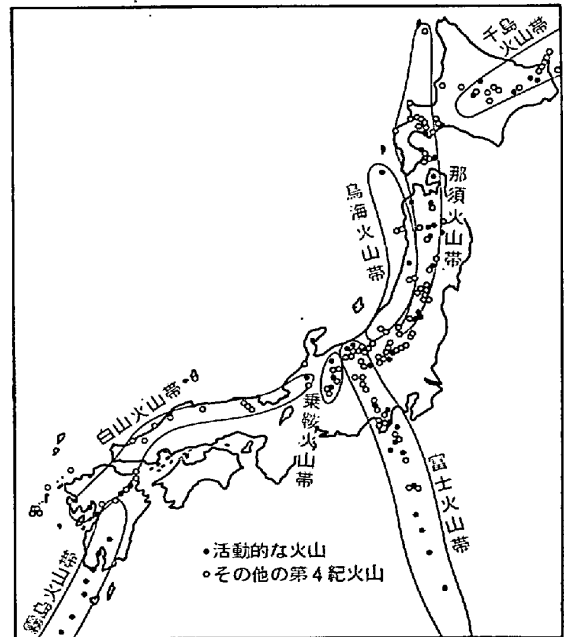


図1 日本の火山帯の分布図

\* 昭和51年8月31日受付 (Received Aug. 31, 1976)

\*\* 東京芝浦電気(株)総合研究所 (Research and Development Center, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd., 1 Komukai-Toshiba-cho Saiwai-ku Kawasaki 210)

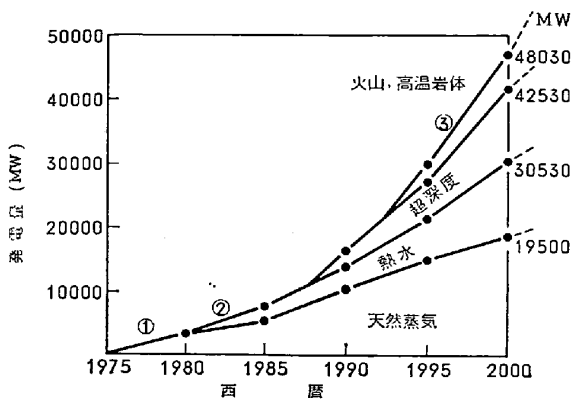


図2 日本の地熱発電の開発計画

- (1) 天然蒸気発電 (フラッシュ方式)  
地下水の加熱蒸気による現在の地熱発電方式
- (2) 熱水発電 (バイナリーシステム方式)  
フロン・ブタン等を作動流体とした発電方式
- (3) 火山・高温岩体および超深度発電  
熱水のない高温岩体に人工的に注水して蒸気を得ようという方式 (アメリカでテスト中)

図2 日本の地熱発電の開発計画

その開発余力は十分あるといえることができる。

地熱はわが国の貴重な国産エネルギー源として、また桜島や浅間山にみられる火山噴火の災害を、可能な限り予防すべく、発電と組合される火山高温岩体発電、地域社会福祉還元としての地熱の多目的利用の開発など、今後地熱発電の果たす役割は極めて大きい。以下地熱発電のしくみ、その問題点、地熱開発の世界の現状をふまえてその材料上の問題点と開発指向、将来の地熱開発の方向などについて述べることにする。

## 2. 地殻構造と地熱発電の方式

### 2.1 地殻構造<sup>1)2)</sup>

地球構成物質中には U, Th, K などの放射性元素が含まれ、それらが崩壊するとき出す熱が地球の主な熱源である。いわば地球は一大原子炉ともいえるべきで、その熱機関の生成する熱が姿を変え、地球の中でさまざまな営みをしているといえることができる。地球の構造はよく半熟卵にたとえられ、黄味に相当するのが溶融している核であり、自身が高温固体のマントル、卵の殻にあたる部分が地殻で、核は Ni, Mn などが主成分で、その温度は 5 000~6 000°C と推定されている。このマントルの中に本源マグマといわれる溶融溜りが生じ、この本源マグマの一部が地殻表面から 5~10km 程度の深さの所にマグマ溜りを形成し、これが地熱発電用の熱源としての主役を演じるのである。このようにしてできたマグマ溜りは、通常その直径は数 km から 10km 程度で、その温度は 1 000°C 前後、寿命は数万年から数 10 万年オーダーといわれている。

図3に示すようにマグマ溜り(C)の一部が地殻の割れ目にそって上昇し、ち密な岩石すなわち岩帽を暖めると同時に、透水層(B)中の地下水にも浸透し蒸気又は熱

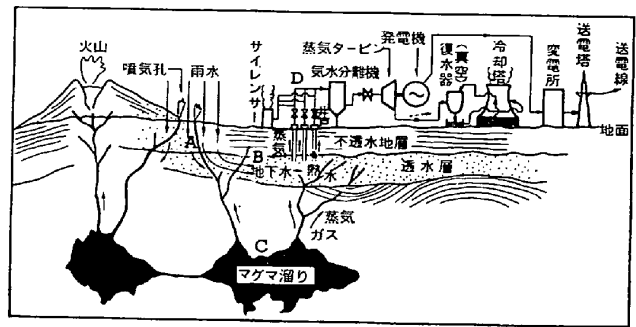


図3 地熱開発の概念図

水帯を形成する。この蒸気、熱水帯の深さは地殻表面より数 100m から 1 km 程度のもので、そこに井戸を掘ると、温度 100~200°C、圧力 5~10 kg/cm<sup>2</sup> の蒸気又は熱水が噴出する。この透水層の水はほとんど雨水が長年にわたって貯留されたもので、例えば松川地区では 2 万 kW の発電に必要な 200 t/h の蒸気を連続使用しても、数万年代の寿命と地質学者は試算している。

また上述のマグマ溜りにより加熱される活火山の岩帽(高温岩体)では、その上層には地下水を含まないので、人工的に井戸を削井しこの高温岩体付近に注水加熱し、そこで生じた蒸気を抽出すると、その条件にもよるが、300~500°C の極めて良質な蒸気が得られる。また火山の噴火とマグマ溜りよりの上昇溶岩との間には密接な関係があるといわれ、これら高温岩体を冷却することにより、火山噴火活動を抑止し得ることも可能といわれている。

### 2.2 地熱発電の方式<sup>1)3)</sup>

上述のようにして得られた蒸気又は熱水を利用して発電するわけであるが、その発電の原理はこれまでの火力発電原子力発電のそれと全く変わるところはない。すなわち火力のボイラー、原子力の原子炉で発生した蒸気かわりに、地殻中で発生した蒸気又は熱水を用いたタービンを回し発電するのであるが、蒸気条件が火力や原子力のそれに比べ低温、低圧であるので、方式的に次の3つの方式に分類されている。

#### (1) フラッシュ方式

井戸より噴出する蒸気をそのままタービンに導き発電する方式で、従来の火力発電システムと全く同じである。ただ温度が低いと水分が多いのでドレンセパレーターを併置する。図4は、このタイプと次に述べるバイナリーシステム方式の系統図を示し、図5は本方式の概念図を示したものである。

#### (2) バイナリーシステム方式

主として熱水を利用する方式で、得られた熱水を熱交換器を通し、二次媒体として低沸点のフロン、ブタンなどを加熱し、フロン、ブタンの蒸気でタービンを回し発電する。わが国のように熱水の多いところでは魅力ある方式といえる。図6は米国 TRW 社がカリフォルニア、

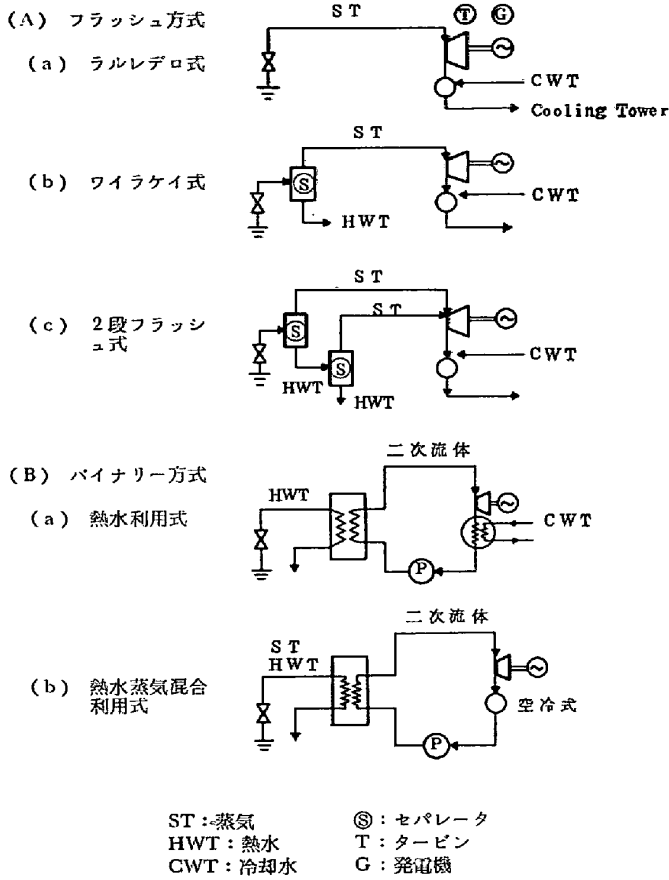


図4 フラッシュ方式およびバイナリーシステム方式の系統図

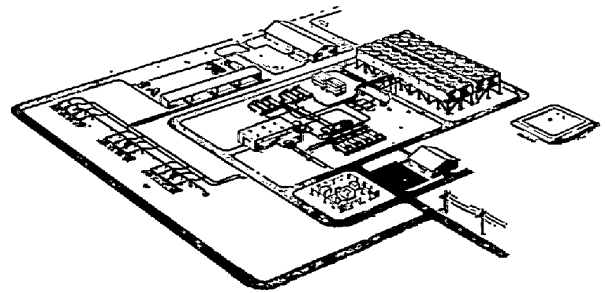


図6 地熱発電プラント(カリフォルニア・イースト・メサ)概念図

イースト・メサに計画中の発電容量1万kW用の、イソブタンを二次媒体として使用するバイナリーシステム方式の略図で、石油価格が1 Barrel(0.159m<sup>3</sup>) 当り8ドル以上なら十分採算がとれ、機器寿命は100年としている。

(3) 火山高温岩体発電方式

発電方式としてはフラッシュ方式と全く変わることはないが、人工的に注水加熱した蒸気を利用する点異なる。図7は火山高温岩体発電方式の概念図である。

以上のような3方式があるが、現在商業発電を行なっているものは全てフラッシュ方式で、バイナリーシステム方式はわが国のサンシャイン計画の中で開発実用化するのが一つの大きなテーマとなっている。火山高温岩体発電は現在まだフィージビリティの段階で、近い将来鹿児島県の硫黄島などを有望地点として選定し、高温岩体掘削などの関連の研究を進める計画である。

3. 地熱発電の利点<sup>3)</sup>

地熱発電はその地点を探索するため、試削などの費用を含めれば建設費が割り高となるが、燃料費が不要のため総合発電コストは表1に示すように火力発電の7円~9円/kWより安く6円/kW程度で、原子力発電の3円

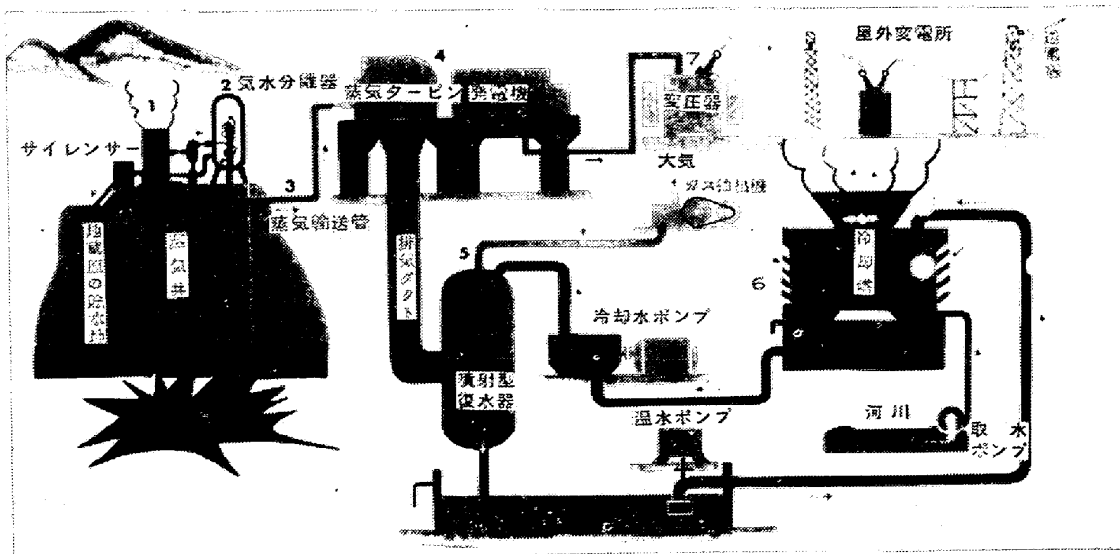


図5 フラッシュ方式の概念図

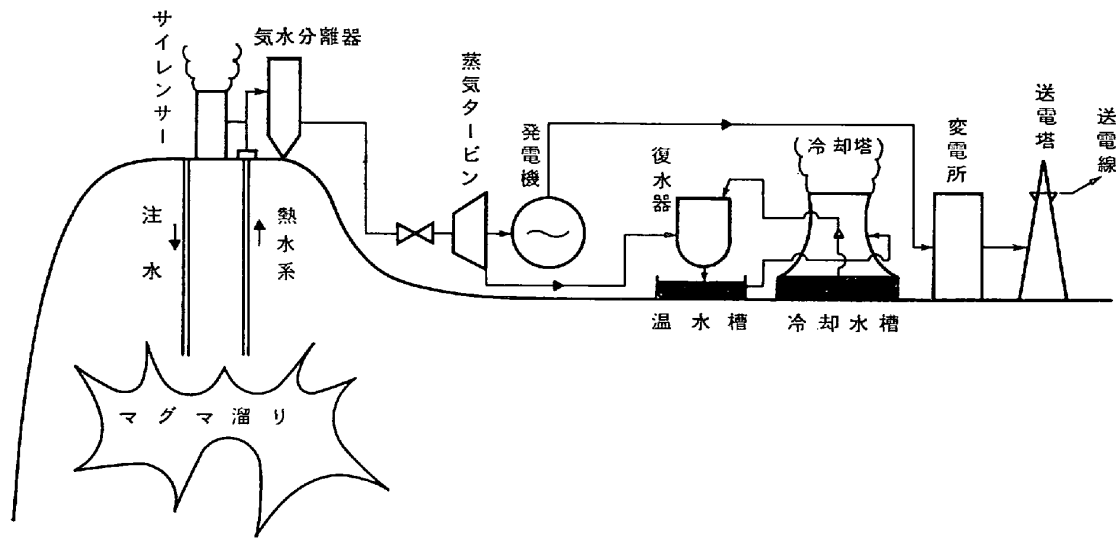


図 7 火山発電方式の概念図

表 1 発電方式別の総合発電単価の比較

方 式	発電単価 (円/kW)	建設単価 (円/kW)
地 熱	6.46	119,000
火 力	石 油	34,000
	石 炭	
原 子 力	4.90	71,000~120,000
水 力	4.10	

～6円/kW に比べ若干高い。しかしながら松川などのように、500m 程度の深さの掘井で温泉のかわりに蒸気が噴出したような場合は、1円～2円/kW と極めて安価となる。

加えてそれらは国内資源であることから、資源原料購入のための外貨の節約となると同時に、国際紛争、国際相場の影響を受けることはない。さらに現在の火力、原子力発電所の規模が単機当り 50 万 kW から 100 万 kW と大規模であるに比べ、地熱のそれは 2 万 kW から 10 万 kW と小さく、地震とか火災などの災害で、集中した大規模施設が打撃を受けた場合を想定すれば、小規模施設を日本列島に分散していた方が危険回避に役立つ、また化石燃料などのような枯渇型のエネルギーではなく、自然再生的なエネルギー源として、その供給については時間的には半永久的であるなどの長所がある。

このような多くの利点があるにもかかわらず、その開発に反対する人も少なくない。その反対の理由は

- (1) 自然環境を破壊する。
- (2) 砒素、硫化水素などの有害元素成分を放出する。
- (3) 地熱開発は既設温泉を枯渇せしめる。

以上の 3 点が反対の理由として要約される。

日本の地熱開発地点は外国と異なり、国立、又は国定公園内に存在することが多い、そのため自然景観をそこなうことなくそれを調和させつつ開発すべきは当然で、この事は技術的に可能である。この自然景観をそこなうものとして、例えば熱交換器の大型化などがある。地熱蒸気又は熱水の温度は低温であるため、熱交換器を効率よく作動させるためには大型になるが、現在開発が進められればその開発のめどがついている高熱伝導蒸発管、凝縮管が近く実用化されれば、現在の形状の 1/10 程度に小型化し得るし、また冷却塔も自然通風でなく、ファンを使用し、強制通風すれば簡単に小型化することが可能になる。さらに発電所を山の谷間に建設し目立たぬ配慮を講じ自然との調和を計っている。むしろ現在では国立公園地域の維持管理が悪く、自然放置に近い管理の方が、発電所建設と比較にならぬほど、自然破壊のモデルと指摘する専門家が多い。

砒素や硫化水素などは、使用した蒸気熱水を還元井を通し、再び地下に戻すクローズドサイクル方式を採用しているので、反対の理由には全くなり得ない。むしろ温泉の廃液を河川に放流することによる砒素量の増加、自然湧水する温泉源地域での硫化水素発生量が多いのが実情といえる。また一般にいう温泉は深さ 50m から 100m の比較的浅いところから涌出する温水を、浴用などに利用しているが、地熱資源はそれよりはるかに深い 1 km 前後の所より採取するので、既設温泉に影響は全くなく、むしろ逆に地熱地域より涌出する温泉の熱量が増加することが知られている。地熱発電開発以前と開発後の、付近の温泉の水量と温度をカロリーで比較調査することは世界各国で実施しており、ワイラケ (ニュージーランド)、レイキャビック (アイスランド) では 4 ないし 5 倍、ガイザ (アメリカ) では 170 倍という数字となり松川もガイザに近い値となつている。この温泉水のカロリ

一増加は一般的には深度 1 km クラスの地熱開発をやれば、温泉水は 100 倍近い熱量の増加が期待されるということで、むしろ好ましい影響を与えると地質学者は結論している。

したがって地熱発電は化石燃料使用の発電方式などに較べ、大気汚染のないクリーンなもので、また自然を破壊することが少なく、既設温泉にも好影響を与えるものということができる。

#### 4. 地熱発電の現状<sup>1)2)3)</sup>

世界でいちばんはじめに地熱発電を行なったのはイタリアで、ピサの斜塔で有名なトスカナ地方のラルデレロという所に昔から天然蒸気が噴出し、それより硼酸を採取していた会社が 1904 年に 2/4P の発電機を運転し、5 個の電灯をともしたのが地熱発電の始まりといわれている。その後 1914 年に 250 kW の発電を行ない工場照明に利用し、次第にその規模を拡大し現在 39 万 kW の発電設備容量をもつに至った。第 2 次大戦中イタリアに駐留したニュージーランド軍は、イタリアの地熱の情報を本国にもち帰り、ニュージーランド政府の大がかりな地質調査で、ワイラケ地域にその開発地点を設定し、1948 年に 7 万 kW の発電所を建設し、現在 20 万 kW の設備をもつに至った。

また米国では 1960 年カリフォルニアのガイザに、12 500 kW の発電所を設置し発電を開始したが、前述のニクソン教書以来最も急速にその規模を拡大し、現在すでに約 50 万 kW が商業運転に入っている。

一方日本では 1966 年岩手県松川で、2 万 kW の商業運転を開発したのが始まりで、その後九州の大岳、岩手県の大沼、宮城県の大沼、宮城県の大沼、岩手県の大沼、宮城県の大沼で発電所を建設し現在稼動中であるが、わずか 6 万 8 000 kW の発電容量にすぎない。

その他アイスランド、メキシコ、ソ連で発電稼動、フィリピンで工事着工、エルサルバドル、チリ、フランス、台湾などが計画中で、その現状をまとめて表示したものが表 2 である。これらの発電方式はすべてフラッシュ方式で、バイナリーシステム方式、高温岩体発電方式が開発されれば、日本はもちろん世界的にその発電地点が急速に開発されることになる。ただ地殻構造上からみて、将来発電可能地域は図 8 に示すいわゆる太平洋環状地帯と、イタリアとアイスランドを結ぶ地帯に限定されるとみてよい。とりわけ太平洋環状地帯は米国、ソ連を除き低開発国が多く、オイルショックで多大の打撃を受けたので、国連の協力を得て地熱開発に積極的に取り組もうという姿勢が強い。フィリピンのティウイ発電所はその典型的事例として注目され、将来のわが国の輸出産業として期待されている。また米国では石炭などのエネルギー資源が多いため、地熱発電は総発電量の 1% 程度を見込んでおにすぎず、その電力設備は日本からの輸出がほとんどである。わが国の電気機器メーカー 1 社が

表 2 世界の地熱発電一覧表

昭和 50 年 4 月現在			
国 名	地 区	既設発電所出力 (千 kW)	建設中又は計画中 (千 kW)
イタリヤ		390.6	25.0
日 本	松川	22.0	高根田 50.0
	大岳	11.0	八丁原 50.0
	大沼	10.0	
	鬼首	25.0	森 50.0
	合 計	68.0	150.0
ニュージーランド		202.6	764.0
メキシコ	パラセロプリエート	82.0	メキシカリ 295.0
	合 計	157.0	
アメリカ		502.0	481.0
アイスランド		20.0	63.0
フランス			30.0
ケニア			15.0
ソ連		5.0	131.0
台湾			10.0
インド			50.0
インドネシア			35.0
フィリピン			ティウイ 220.0
ニカラグア			175.0
エルサルバドル		30.0	30.0
チリ			20.0
合 計		1380.2	2494.0

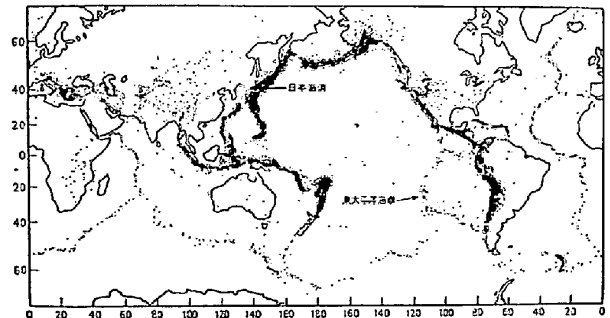


図 8 世界の火山分布図

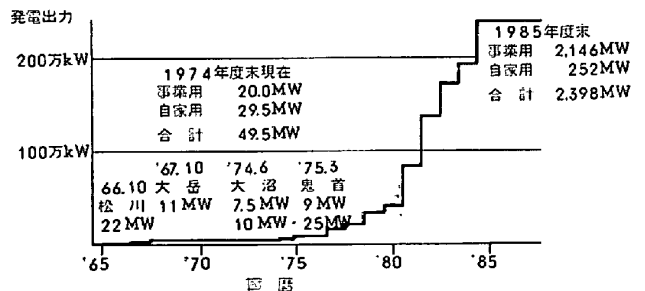


図 9 地熱発電長期計画

全世界の現稼動地熱発電容量の約 4 割を占め、その技術的評価も極めて高く、わが国が全世界の地熱発電へ果たす役割は極めて大きい。

図 9 はわが国の 1985 年までの地熱発電計画で、約 200 万 kW の設備を計画している。この図で明らかなように年率約 80% 増という急速な開発を見込んでいる。

表 3 主要地点の蒸気、復水組成

地 点	松 川	ワイラケ	ガイザー	ラルデレロ	鬼 首
蒸気組成 (wt%)					
H <sub>2</sub> O	99.4/99.8	99.76	98.05/99.51	95.6/98.9	99.84/99.14
ガス	0.2/0.6	0.24	0.49/1.95	1.1/1.4	0.86/0.16
ガス組成 (wt%)					
H <sub>2</sub> S	12.9/17.7	3.23	1.69/2.99	2.4/2.5	56.3/23.3
CO <sub>2</sub>	79.3/85.2	96.1	63.5/69.3	92.2/94.2	71.3/40.4
H <sub>2</sub>	0.28	—	12.7/14.7	1.7/1.8	残
CH <sub>4</sub>	1.15	—	11.8/15.3	0.940	4.5/3.3
NH <sub>3</sub>	—	0.69	1.3/1.6	—	—
復水組成					
PH (ppm)	4.35/4.85	6.0	6.65/7.25	—	5.10/3.50
K	180	60/230	—	—	13.1/0.57
Na	280	900/1300	—	—	86.4/1.43
NH <sub>3</sub>	—	3	134/567	—	86.4/1.43
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	79.5	360/600	—	—	—
HCO <sub>3</sub>	—	20/160	483/3388	—	0.05/67
SO <sub>4</sub>	1708	40	—	—	43-痕跡
Cl	9.2	1500/2200	—	—	11/43
H <sub>2</sub> S	10/52	0.3	30/205	—	1225/4.3

表 4 地熱発電開発の材料上の技術課題

<b>A フラッシュ方式</b>
(a) 使用材料の腐食定量とその機構解明
(b) 耐エロージョン材料の開発
(c) 遷移温度の低い耐食ロータ材料の開発
<b>B バイナリーサイクル方式</b>
(a) 高性能熱伝導管の開発
(b) シリカ付着機構の解明とその防止対策
(c) 使用材料の腐食定量、エロージョン対策
<b>C 高温岩体発電</b>
(a) 耐熱耐食管材料の開発
(b) 高温岩体破碎ビット材料の開発

5. 地熱発電設備の材料とその動向

地熱発電開発の3大重要技術は、探索技術、掘削技術、使用材料の腐食防食技術で、発電機器そのものは従来技術のマイナな改良改善でよいといわれている。

地熱水蒸気は、掘削の地点でその組成性状が千差万別で、例えば pH 3~4 のものから 9 近いものもあり、材料の腐食ピittingに大きな影響を与える Cl<sup>-</sup>は、数 ppm オーダのものから 10<sup>4</sup> ppm のものもある。また同一の井戸でも地殻の変動、季節の変動などでその組成が変わるので、その地点に適切な材料を先ず選定し、機器設計者が選定材料に合せてデザインするという、基本的には材料技術者主導型のもので、他の産業機器、発電機器の設計とは全く異なる。表 3 は世界の代表的地点の蒸気ならびにその復水組成を示したもので、上述の理由が理解されよう。このため解決しなければならない材料上の技術的課題を発電方式別に取りまとめたものが表 4 である。

5.1 フラッシュ方式<sup>(4)(8)</sup>

この方式では硫化水素、Cl<sup>-</sup>、SO<sup>-</sup> などを含む腐食

性蒸気や熱水が、直接タービンの蒸気通路部を通り、バロメトリック復水器中で河川水により復水される。タービンの蒸気通路部での蒸気流速は、第 1 段の羽根部で 300m/sec、最終段では 20m/sec と異なり、かつ蒸気中の含有水分も通常の火力に較べて平均 15% と著しく高い。わが国のように河川水が豊富でこれを冷却水として使用し得る国はまれで、冷却水の乏しい例えばメキシコなどでは、復水した蒸気を冷却水として繰返し使用する場が多い。このようにタービンの蒸気又は熱水通路部は、温度、圧力、流速などの物理条件に加え、その地点特有の蒸気、熱水の腐食性、ピitting、すき間腐食、応力腐食割れ、エロージョンなどの極めて多様な要因がからみ合うので、30 種を越えるタービン構成材料について詳細な腐食挙動を調査し材料を選定しなければならない。このため設計に先だち地熱発電設置点の井戸を利用して、蒸気中、熱水中での腐食試験を実施解析するのが常である。

表 5、表 6 は筆者が松川で実施した蒸気中、復水中での腐食試験の結果を示したものである。蒸気中では銅が最も腐食されやすく、軟鋼、鋳鉄もかなりの腐食を受けるが、モネルやステンレスなどは腐食量は少なく、チタンが秀れた耐食性を示す。ピittingは 12Cr やステンレス鋼などに数多く発生するが、その深さはアルミニウムに較べ小さく、12Cr とアルミニウムとのそれでは、ピittingの透浸速度は 0.09 : 1.1 程度の割合になっている。

腐食生成物の X線回折では鉄基合金では FeS や FeS<sub>2</sub> が見られ、銅については CuS が検出される。このことは蒸気中の H<sub>2</sub>S がこれらの材料の腐食に大きく関与していることを示している。金属の腐食量は硫化生成熱と密接に関係するから、NiS(生成熱 -22.2 kcal/mol・°C)、FeS (-21.35 kcal/mol・°C)、CuS (-11.6 kcal/mol・°C) の順にその腐食物の量が多くなるとみてよい。さらに硫化物の生成熱は酸化物のよりはるかに大きいことから推して、松川における蒸気中での腐食の主役は、蒸気中に含まれる 0.059 vol% の硫化水素によるものである。

一方復水中での腐食は蒸気中のそれより低く、例えば炭素鋼の腐食速度は蒸気中のその 1/4 程度、銅では 1/10 程度である。ただ例外としてアルミニウムは蒸気中のそれとほとんど変わらない。ピittingについてはそれに含有されるハロゲン量に支配され、アルミニウムや 12Cr などのステンレス鋼にもその発生が観察された。

図 10 は高速蒸気流中での腐食エロージョン量を示したものである。セパレータを設置しない水分含有量 30% の蒸気流中では全ての試料にエロージョンが観察され、りん青銅、モネルの腐食エロージョン量が 7.8 mm/y と最も大きく、ついで 18-8 ステンレスの 5.2 mm/y、最も小さいものではステライトの 0.1 mm/y の順とな

表 5 各種材料の低速地熱蒸気中における腐食試験結果

材 料	孔食	すきま腐食	応力腐食割れ		孔 食			腐食速度 $\times 10^{-3}$ (mm/y)						
			マイクロクラック	マクロクラック	直径 (mm)	深さ (mm)	数/cm <sup>2</sup>	0	200	400	600	800	1,000	
銅	○	X	○	○						..			..	..
1) の 青 銅	△	X	○	○				..	..					
ネーバル黄銅	○	○	○	○				..	..	..				
モネル	○	X	○	○				..	..	..				
アルミニウム	X	○	○	○	1.2	0.40	7	..	..					
アルミニウム合金 5052	X	○	○	○	0.35	0.11	8	..	..					
アルミニウム合金 6063	X	○	○	○	1.1	0.16	20	..	..					
チタン	○	○	○	○				..	..					
軟 鋼	○	X	○	○						..	..	..	..	
鑄 鉄	○	X	○	○						..	..	..	..	
Cr—Mo—V鋼	○	X	○	○						..	..	..	..	
SUS410鋼	X	X	○	○	0.80	0.11	20	..	..					
SUS420鋼	X	X	○	○	0.68	0.049	50	..	..					
SUS405鋼	X	X	○	○	0.55	0.05	70	..	..					
SUS304鋼	○	○	○	○				..	..					
SUS316鋼	○	○	○	○				..	..					

○：良  
△：可  
X：劣

試験条件：温度 139°C，流速 10m/sec，水滴分 3.2%，圧力 4kg/cm<sup>2</sup>

り、その浸食率は材料の硬さにほぼ逆比例する。セパレーターを設置した水分含有量 3.2% の蒸気中ではその腐食率は著しく改善されることよりみて、高速流中ではエロージョンによりその浸食率が支配されることが判る。このようにして得られた試験結果を解析し、タービン構成部品の応力条件、蒸気熱水の温度、速度条件を検討し使用材料を選定するが<sup>9)11)</sup>、その部品材料を示したものが表 7 である。

筆者らは、また上述のような腐食定量とその機構解明を、メキシコのメヒカリ、米国のガイザなどで実施し、その後腐食考慮した材料選定指示の下で設計製造された実機タービンの、経年稼働による腐食試験結果とほぼ一致し、トラブルなく運転に供せられている。しかしながら耐エロージョン材料として最高と考えられていたステライトは 2 ないし 3 年でほとんど浸食され、その都度それを使用するケーシング内張り、パルプシートなどの部品交換を余儀なくされている。このためステライトに替

る秀れた耐エロージョン材料の開発が、今後地熱発電設備の安定運転の必須の条件といえよう。

次にタービンの心臓部ともいえるロータには耐食性とロータ特性を考慮し 1Cr-1Mo-1/4V 鋼が使用されているが、この材料の遷移温度（材料の靱性を示す尺度で、Vノッチシャルピー試験でその破面が延性破面と脆性破面がそれぞれ 50% 示す温度で、通常 FATT-Fracture Appearance Transition Temperature と呼ばれている）が高く 120°C 前後のところにある。換言すれば地熱蒸気のタービン入口温度は 100°C から 120°C で、ロータの最終段位置では 50°C 近い温度となるので、ロータは脆性域で使用していることになる。ロータには羽根植込部など切り欠き形状が多く、応力レベルが高くなり脆性域で使用する場合は破壊の原因となる。幸にして現在までロータ破壊の事故はないが、5 万 kW 以上の大型タービンとなれば、その切欠部の使用応力はさらに高くなるので、常に破壊の危険性にさらされることになる。遷移温





表 7 地熱発電用タービン構成部品の材料

雰 囲 気	機 器 部 品	材 料	腐 食 速 度 ×10 <sup>-3</sup> mm/y
蒸 気	ロ ー タ ー	1Cr-125Mo-0.25V鋼	623
	ブ レ ー ド	12Cr鋼(SUS410鋼)	21
	ケーシングおよび蒸気パイプ	軟鋼( ASTM46 )	636
	ノズルダイヤフラム	鑄 鉄	500
	ノズル仕切板	13Cr-Al鋼 (SUS405鋼)	50
凝 縮 水	油冷却器の水槽および凝縮器外壁	エポキシ被覆軟鋼	3
	凝水器の分水棚	18Cr-8Ni鋼 (SUS304鋼)	1
	油冷却器の管仕切板	ネーバル黄銅	98
	油冷却器の冷却管	無 酸 素 銅	50

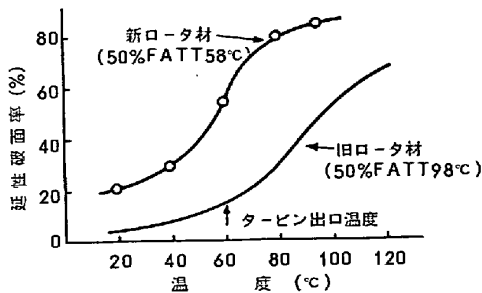
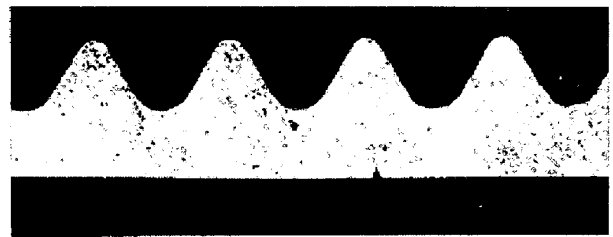


図11 新旧ロータ材中心部の延性脆性遷移温度の比較



フルーテッド管の表面溝形状 (ヒッチ1mm, 深さ0.5mm)

0.5mm

写真 2 フルーテッド管の溝形状

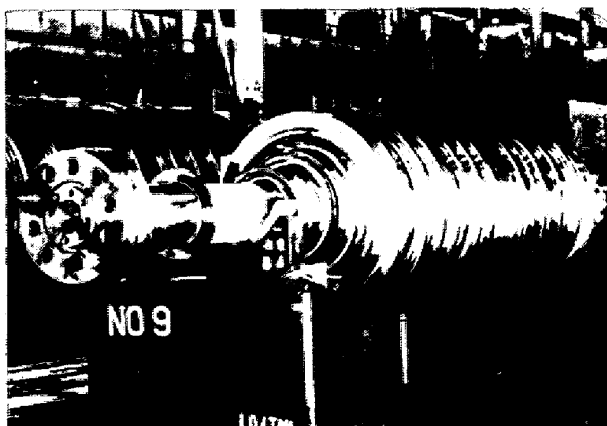


写真 1 フィリピンティウィ向低 FATT 1Cr-1Mo-1/4V鋼タービン・ロータ

備の設計に入る以前で、工学的実証試験の1000kW用熱交換器のモデル試験装置の管には、SUS304、チタン管の2種類を選定し、昭和52年よりそれまで実施測定した腐食耐エロージョン性の実証確認を行なう予定となつてゐる。

この方式でのもう一つの問題は熱交換器が前述のように大型化することで、その特性は加温流体の温度が高いほど効率はよいが、地熱水は100°C前後のものがある。したがつてその効率をよくし小型化するためには、流体の接触面積を増加するか、管の伝熱特性の向上を計る方法が採られる。前者の場合例えば5万kW発電容量で、熱交換器入口の地熱温度が98°Cと仮定し、火力発電なみの効率を得るには丸ビル程度の大きさの熱交換器となる。これを分割し設置しようとしても狭谷の中では大きな面積は望めず、自然景観を損う結果となる。

管の伝熱特性を向上させるためには、管にフィンを付して伝熱面積の増加を計る方法などがあるが、この場合でも最大3倍程度の伝熱特性向上にすぎない。理論的にはZennerの方法を用いれば、その特性は10倍程度になるといわれている。この方法はフロン、ブタン蒸気を凝縮する管では、写真2に示すよう管の長手方向に山、谷を付し凝縮した二次媒体の液層皮膜をできるだけ速やかに排除する、高熱伝導度のフルーテッド(Fluted)方

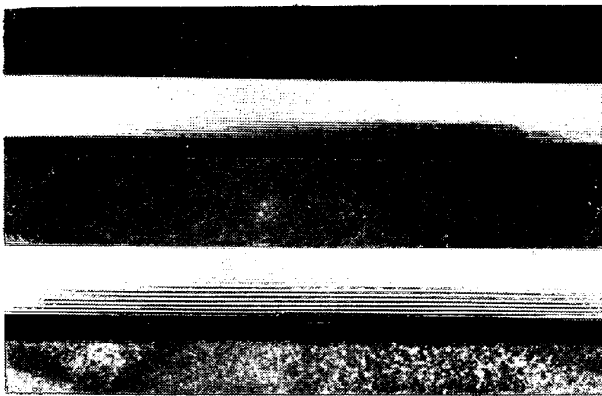


写真3 チタン製フルーテッド（溝付き）管

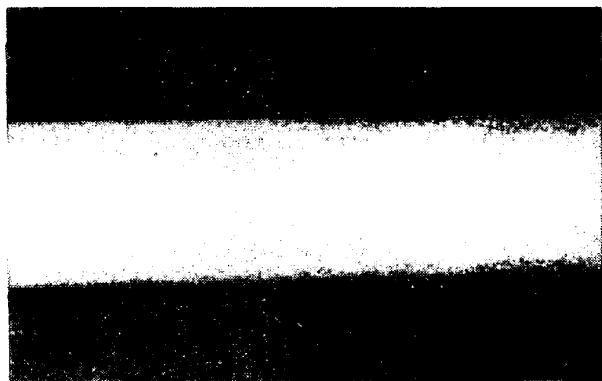


写真4 多孔質蒸発管

式である。山谷のピッチ、深さ形状の最適寸法はZENNERにより試算されているが、このような山谷の溝を付した管をどのように量産するかが問題といえよう。筆者らはチタンフープを先ずロールで上記の山谷を精度よく加工し、その圧延加工したフープをアルゴンガス溶接で成形する方法を採用し、長さ20mのフルーテッド凝縮管の加工成形に成功した。この方法では管の内面、外面いずれにもこのフルーテッド溝を付した面でアルゴンガス溶接することができる大きな特徴をもつが、アルゴンガス溶接の際ロール形状、張力などが適切でないと、溶接面に狂いを生じ溶接ができなくなる。

写真3は上述のようにして得られたZENNER型チタン製フルーテッド凝縮管の外観を示したもので、図12はこれらフルーテッド管の伝熱特性の比較を行なったものである。現在山谷のピッチ1mm、谷の深さ0.5mmのものが最も秀れた特性を示し、地熱水温度にもよるが、理論計算通り平滑管の約10倍程度に伝熱特性が向上する。次に二次流体を加温蒸発せしめる蒸発管は図13に示すように、管の外表面に適切な気孔をもつ層を成形し、二次媒体の核沸騰を容易ならしめる必要がある。このため球状の粉末金属銅をニッケルをバインダーとして管表面に焼結被覆し、蒸発管を成形している。気孔の大きさは15~25 $\mu$ 程度が最適とされており、写真4は蒸発管の外観を示す。

次に一般に地熱水が地上に出ると、その中の過飽和の

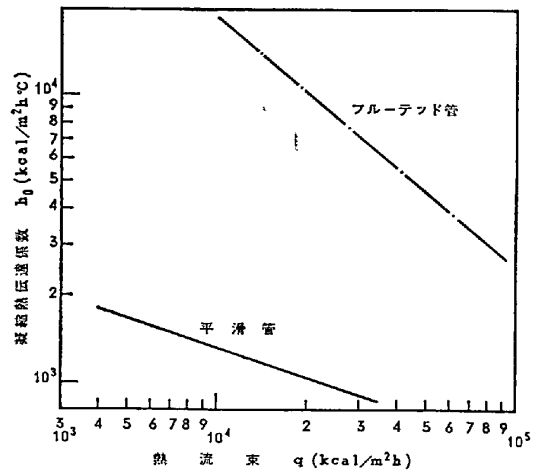


図12 フルーテッド管の凝縮熱伝達係数

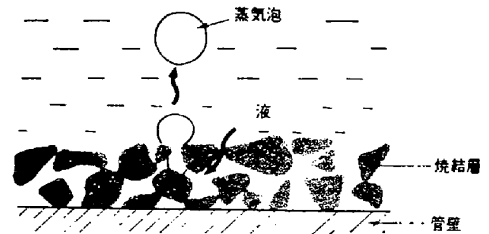


図13 多孔質焼結金属層と蒸気泡の発生機構

シリカはシリカコロイドとなり、時間とともにその濃度を増し濁度が増加する。この濃度が増加すると輸送管などに付着し、最悪の場合は熱交換器用管がシリカで閉そくする。このシリカの付着を防止するには現在2つの方法が採られている<sup>14)15)</sup>。すなわち

(1) 地熱水温を50°C近くに急冷すれば、コロイドの生長付着を防止できる。

(2) シリカを含有する高温熱水中に適当な電極を用い通電するとシリカ成分の沈殿を生じ、電極材料が銅、ステンレス、白金の順に沈殿量は少なくなる。

筆者らはこれらとは別に、シリカの初期付着状態が金属の種類によつて異なり自然電位の影響を受けることに注目し、金属表面処理をして局部電位差を生ぜしめ、シリカの付着剝離性を検討する試みを熊本県岳湯などで実施している<sup>16)</sup>。これまで得られた知見をまとめ整理するとSUS304、チタン管に塩化パラジウムあるいは塩化白金処理をしたものと無処理のものについて、約6か月間地熱水中でのシリカの挙動を調べた。この結果極めて初期には表面処理した試料はシリカの付着量は少ないが、浸漬後10日頃からは処理材と無処理材との間で付着の差異はみられなくなる。しかし6か月を経過した試片について、シリカ剝離試験機でその剝離性を確かめると、10g程度の荷重でパラジウム、白金処理したもののシリカの剝離性は良く、50gの荷重では無処理材料でもシリカは剝離することが判つた。

地熱水からは大量のシリカが析出するので、これを完

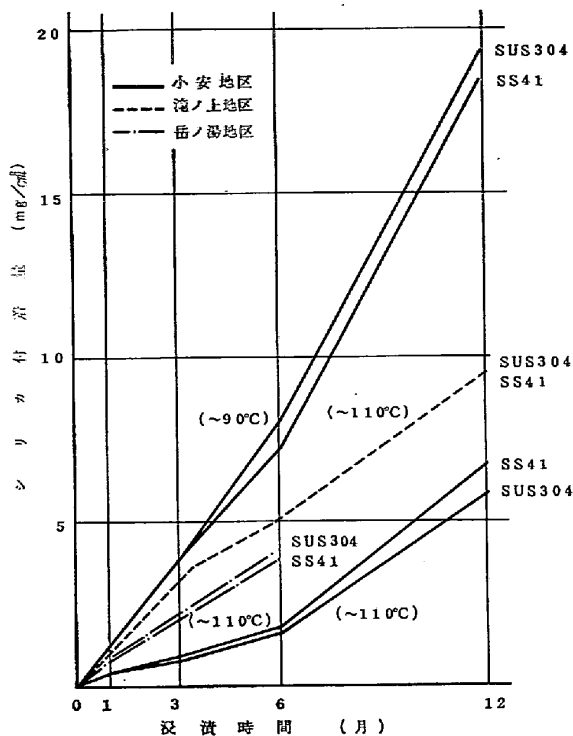


図14 シリカ付着量と浸漬時間との関係

全に除去した熱水を使用するには、多額の費用と除去した大量のシリカの処理の問題があるので、シリカの付着を防止または付着しても、それが容易に除去し得る方法の確立が今日の課題といえよう。また熱水を 50°C 程度まで冷却するのは、エネルギーの無駄な消費となるため意味のないことで、今後熱交部品に電圧を印加するとか表面処理方法で剝離性のよい方法の確立が要望されつづけると考える。図 14 は筆者らが実験した各地熱地点のシリカ付着量と浸漬時間との関係を示したものである。

### 5.3 高温岩体発電方式

この方式は未だフィジビスタディの段階で、技術的詳細をつめるには至っていない。しかしながら高温岩体層までに注水、抽気用パイプを挿入し、なおかつ 500°C 近い蒸気を抽気管で採取するのであるから、火山地帯の土壌による腐食に耐え、かつ高温高压に耐える材料の開発評価が、この方式の実用化のための必須の条件になることは間違いない。

またこれまでの掘削用ビットは、炭素鋼製ビット歯先をフレームハードニングする程度のものでよかつたが、地下数 km の高温岩体を掘削するには、800°C 近い高温岩を破碎することになるので、靱性がすぐれた超硬ビットなどの開発が要求されるものと考えている。

以上地熱発電では、一地点での材料がそのまま他地点のそれに適用されるというわけにはいかず、その都度腐食量の定量などを、事前に実施しなければならない。このように山奥深く測定機器材料を搬入設置するなどの労力に加え、その都度腐食定量することは、地熱発電設備

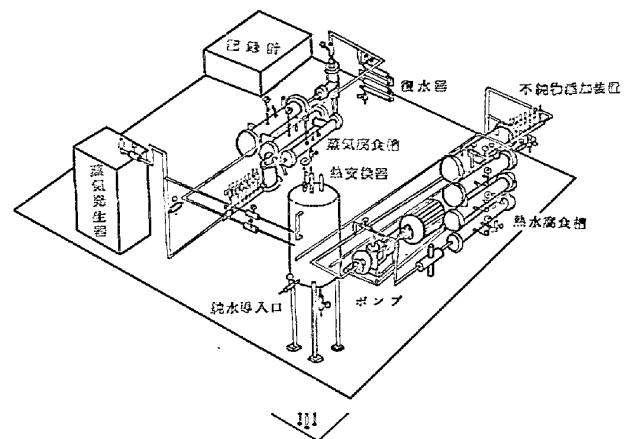


図15 地熱水・地熱蒸気シミュレーション腐食試験装置

の製造の上で極めて煩雑なことといえる。そこで現地の蒸気条件を実験室的に再現製造し、その地点に適合した材料のスクリーニング試験が実施できるような、シミュレーション装置の開発もあわせて行なっている。図 15 はその概念図で地熱組成の  $H_2S$ ,  $NH_4$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{--}$  など 20 数種の組成の薬品を注入し得るようになっており、人工的に世界各地の地熱熱水、蒸気、蒸気復水組成と、その温度圧力条件を容易に再現し得る。この装置の熱水中での諸試験を実施し、これまで実施した現地での腐食試験結果と対比し、その有効性を確かめる実験が進められている。この対比が確立されれば、材料の選定は極めて容易になることは間違いない。また冷却水に使用する河川の水質も地域による差異は大きく、その耐食性も十分考慮しなければならないが、これらもあわせて本装置でテストし得る。

ところで地熱発電の歴史は古いといつても、それが注目されるようになったのはここ数年で、材料選定の確立された試験法もなく、腐食環境因子も複雑で系統だつた研究もなされていないのが現状である。また解決すべき材料上の問題が多いにもかかわらず、これに関与する材料技術者も極めて少ない。今後はシミュレーション試験を含めたスクリーニング試験、腐食、エロージョン、ピッチングなどの評価法の確立と、多くの腐食要因を含む地熱蒸気中の腐食の系統的研究が一層要望されるものとする。

## 6. 地熱発電の将来<sup>3)17)</sup>

これまでわが国ではエネルギー資源といえば、特に電力について強調され、地熱についてもその例外ではなかつた。原子力や火力発電所設置に反対する人は、公害こそ残れ、地元にはなんらの利益還元がないとの意識が常に先行し、反対するケースが多い。地熱発電は地元社会寄与の妙味を持つ発電方式の 1 つで、その利点を活かした多目的利用を併設する開発指向が進められつつある。

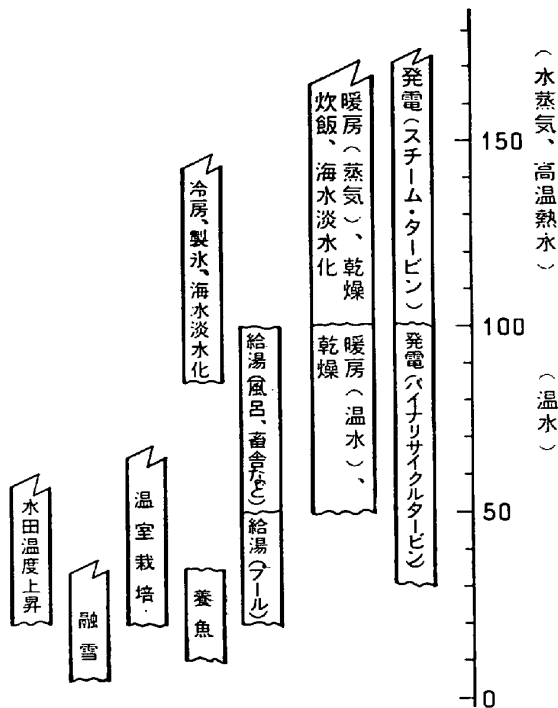


図16 地熱エネルギーの多目的利用

地熱の利用は過去 1000 年以上にわたって温泉として医療、保健、休養に湯治として利用され、近年は大衆レジャー施設、温室栽培などにも利用されつつあるが、その利用の発想には従来の温泉利用の延長としての枠を出ていないのが実情である。この地熱を将来社会工学システムとして捉え、近代的大規模利用開発を昭和 52 年度より推進しようとするのが地熱の多目的利用の計画である。

図 16 は地熱水蒸気の温度域とその利用目的との関係を示したもので、発電に利用したあとの余剰エネルギーを熱交換をして農業、林業、水産業への積極的転換を計り地域住民の生活向上、産業振興に役立たせようとするものである。

その 1 つとして北海道上川町白水沢はきわめて良質の地熱地帯で、現在 170°C の蒸気を噴出しているが、発電については将来に残し、民生福祉と産業育成を主体とした多目的利用のモデルとし実験しようとするもので、その計画の内容は表 8 のとおりである。この表より判るようその利用は一般住宅の暖房・給湯から野菜のパイロットハウス、養魚、きのこ栽培と多岐にわたるものである。

このような計画は欧州ではすでに実施されつつある。例えば氷の国といわれるアイスランドの首都レイキャビク市（人口約10万人）では、その周辺の 33 本の地熱井から 80~130°C の熱水を、同市の中央貯溜タンクに送り、全市の 98% 市民の家庭暖房に利用され、また、市内の各小学校にはそれぞれ温水プールが設備され、その他 95 000m<sup>2</sup> の温室でトマト、きゅうり、花の栽培、珪

表 8 上川地区地熱多目的利用計画

目的	対象・規模	方法
一般住宅 暖房・給湯	戸数 2200 戸 250日/年(10月~5月)	給湯および暖房
農業利用	野菜パイロットハウス 3000m <sup>2</sup> 2カ所	促成栽培用暖房
	牧畜 乳牛 150頭	洗浄用給湯
	稲作 341 ha	温水投入による冷害防止 青枯れ防止
水産利用	鯉の養殖 肥育期間を 2/3 ~3/4 に短縮	温水投入による水温上昇
林業利用	きのこ栽培プラント しいたけ 24 t/y しめじ 23 t/y	暖房
福祉利用	保養センター	暖房・給湯

藻土工場、アルミ工場への電力の供給を行なっている。この場合の暖房価格は、石油暖房を行なっていた場合の 60% と安く、加えてレイキャビク市が地熱利用を行なつて以来、大気が急速に浄化され、家庭、工場を通じ 1970 年には 18 万 t の石油が節約されるとともに、2 000 t の亜硫酸ガス、85 t の NO<sub>x</sub>、そして 210 t の灰の排出が防止し得たと試算している。

その他ハンガリーも同様、地域暖房、温水プール、センターの農業研究所で 3 100ha の野菜の栽培、フランスではムラン地区の 2 000 戸の家庭暖房などの利用が着実に進められている。したがって今後は発電用機器材料に加え、家庭用暖房器の配管材料、銅管にかわるチタン、18-8 系ステンレス熱交換器用管材、大型熱交換器用高熱伝達フルーテッドチタン管、18-8 系ステンレス鋼管とその配管用材料の開発要求が強く望まれると考えている。

## 7. む す び

わが国は全ての資源は乏しいといわれているが、世界の 1 割近い地熱資源をもち、この豊かな資源を利用しやすい立場にある。この天与の恩恵に積極的に取り組むことこそ、わが国の将来の発展策の特徴ともいえよう。

これまで述べてきたように、地熱利用の工業設計には金属技術者がその主導的役割を演じなければならず、極めて意義のある分野といえる。また地熱発電は今後エネルギー政策上わが国のみならず、世界的にも著しく進展することは自明のことで、地熱源をもたぬ西独では将来の輸出産業と注目し、その研究を開始したと聞いている。本論文が上述の意味においていささかなりとも金属材料技術者のお役に立ち、より秀れた腐食量評価法、その機構解明、材料開発の一助となれば筆者の望外の喜びである。

## 文 献

- 1) 早川正己: 地熱第四のエネルギー, (1970),  
[日本放送出版協会]
- 2) 床次徳二: 地熱資源開発の急務, (1972),  
[地熱資源開発議員懇談会]
- 3) 床次徳二, 稲葉秀三, 楠田 実, 吉田 宏: 地熱  
利用と環境問題研究会資料, (1976)
- 4) 吉田 宏, 金沢 暎, 宮崎松生: 鉄と鋼,  
52 (1966), p. 660
- 5) 吉田 宏, 帆足 純, 宮崎松生: 鉄と鋼,  
53 (1967), p. 462
- 6) H. YOSHIDA, J. HOASHI, and M. MIYAZAKI:  
American Power Conference, 39(1968), p. 965
- 7) 吉田 宏, 帆足 純, 宮崎松生: 東芝レビュー,  
22 (1967), p. 713
- 8) Ing. Enrique Tolivia Melendez, Jun Hoashi  
and Mastuo Miyazaki: 2nd U. N. Symp. on  
the Dev. & Use of Geothermal Resources,  
(1975)
- 9) T. N. G. HALDANE and H. C. H. ARMSTEAD:  
Proc. Inst. Mech. Eng, 176 (1962), p. 603
- 10) J. R. McNIFF: Calif. Div. Mines Geol. Spec.  
Rept. 75 (1963)
- 11) N. GASPAROVIC: Brennstoff-Warme-Kraft,  
14 (1962), p. 313
- 12) 伊藤昌行, 中橋昌子, 小松周一, 森田幹郎: 日本  
金属学会 1976 年春期大会講演概要, p. 122
- 13) 小松周一, 中橋昌子, 伊藤昌行, 森田幹郎: 日本  
金属学会 1976 年春期大会講演概要, p. 122
- 14) 柳ヶ瀬健次郎, 山口 潔, 柳ヶ瀬勉, 杉之原幸夫,  
小沢七兵衛, 山崎久勝, 須田耕文, 高畑重弘: 島  
津評論, 28 (1971), p. 107, 171
- 15) 柳ヶ瀬健次郎, 山口 潔, 柳ヶ瀬勉, 杉之原幸夫,  
小沢七兵衛: 島津評論, 28 (1971), p. 121, 185
- 16) 中橋昌子, 森田幹郎, 武田博光, 小松周一, 伊藤  
昌行: 日本金属学会 1976 年秋期大会講演概要,  
p. 305