

松川地熱地域開発上の問題点*

森 芳 太 郎**

Issues concerning Development of Matsukawa Geothermal Area

by

Yoshitaro MORI

Azuma Kako Co. Ltd.

Abstract On the eighth of October, 1966, a geothermal generating station, the very first one of this type in Japan, started in a business operation at Matsukawa after the elapse of just 10 years that followed the commencement of the initial stage of work of investigating feasibility of development of geothermal power potential in Japan. During this 10-year period, intensive efforts were directed toward the technological investigation in the engineering field never explored previously for drawing up the plan for the initial stage of development and for the design of various installations at the steam well. It was due to sheer luck that almost all of the aims of such efforts were achieved without hitch, not to mention the intensive co-operation on the parts of outside bodies.

At the completion of the general survey of the initial stage of work mentioned above, there was felt necessity of drawing up a development plan to pave the way for future industrialization of the enterprise of geothermal power generation. To do so, a series of test drillings to progressive depths was called for before starting in drilling the steam-producing well, for there was observed on the ground surface none of the conspicuous indication pinpointing where to drill in search of such underground steam. Accordingly, physical prospectings, geological surveys, chemical explorations, test borings and other general investigations of meteorological and riparian phenomena were conducted at respective phases of the work periods of basic survey and applied survey. On completion of these tests and surveys, the policy for the next stage of proceedings was adopted in accordance with the synthetic conclusion on the resulting findings, and drilling of a steam well more than 1000-meter deep was finally decided to be commenced. This adoption of said policy is thought to constitute the principal cause of enabling completion of the large steam well in the scale of the world level in its productive capacity.

As to the test of the characteristics of a steam well, there are several points calling for intensive studies. The full shut-in pressure of the well is considered as one of such factors that affect the economic evaluation of the steam well and the design of the steam-electric generating equipment, and the advisability of carrying out such pressure test has been hotly discussed on several occasions. In consideration of the possible breakdown of the casing pipe and of the changes in the well characteristics due to the result of depositing the sediments in and around the steam bore hole, all the changes being attributable to the excessive steam pressure rise, such pressure test has never been put into practice so far. Various types of calorimeters and dryness meters have been employed for measuring the wetness of the natural steam, but each has been found to have its own merits as well as demerits if to be employed as on-site devices for the purpose. Because

* 昭和42年2月16日, 松川地熱地域講演会にて講演

** 東化工(株)八幡平地熱開発工事事務所長(取締役)

地熱 No. 10 (5月特集号), 1967

of it, difficulties have been felt in obtaining reliable data so far. Besides, there are still other issues calling for immediate attention such as the noise of emitting steam and its silencer and the pulsation of steam jets accompanying water at high temperature.

According to the experience obtained during the period of five months since the commencement of operation of the generating station, none of phenomenon of corrosion has been observed. However, the deposition of scale and the muddy sand grains accompanying the water emitted from the steam well are observed to be demanding more attention than expected before for the maintenance and operation of the generating plant in a good order.

Lastly, there is the issue of public nuisance, as one common among the geothermal power projects, that demands for preventive measures. At this Matsukawa generating station, its silencer equipped for suppressing excessive steam jet noise has been found insufficient for the purpose. Various measures have also been employed to protect the vegetation from being damaged by what has been emitted by the steam well immediately after the emission of the steam. The disposal of the hot water released from the generating plant constitutes another issue, but such water is now being discharged into a river, as the prolonged experience has proved that the hot water when disposed of in this manner is harmless to any of agricultural products. As to the contents of exhaust gas in the atmosphere around the generating station, no difference has been detected between those before and after the commencement of operation of the station, although detection of the gas contents has been put into a routine practice.

Varieties of actual results of operation have so far been achieved to our satisfaction, yet there are a number of issues awaiting our immediate resolution, and for which resolution we shall have to concentrate all our efforts from now on.

1. 緒 言

松川において、昨年10月8日、わが国最初の地熱発電所が、営業運転を開始したが、松川地域の調査に着手してから、丁度10年を要したことになる。現在までの経過を振り返って見ると、工業技術院、ことに地質調査所を初め、関係者の御指導もあって、方向としては間違っていないと信じている。また設備についても、たとえば、毎時数10 tの蒸気を噴出させている井戸は、その構造仕様、仕上げ方、使用諸材料、地表に取出す坑口装置等は、過去に実験的に決定していったものが、大部分である。その間に、危険なこともしばしばあったが、幸いに事故らしい事故も起さず、1名の犠牲者も出さなかったことは、誠に幸運であったと考えている。

松川地域の地熱に関し、既に数回、各講演会・報文等に発表されており、また探査および地質については、地質調査所早川部長・中村課長より報告されるので、ここでは、「松川地熱地域開発上の問題点」として、主として実施上のものについて、幾例かを引用し

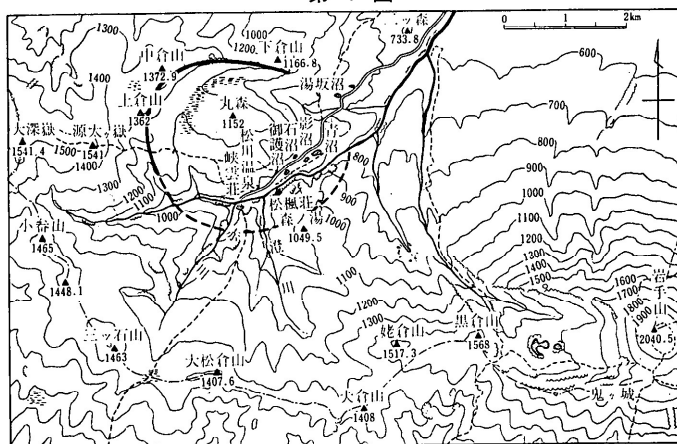
て、それらが、どのように処置されたかについて述べる。

2. 松川地熱地域開発上の問題点

1. 初期の問題点

地熱を開発しようとするときに、まず開発の方式の決定と、一応企業化を目指す場合には、総経費の推定とともに何年後に企業化が可能となるかを、推定することが必要であることはいうまでもない。松川においても、昭和31年11月より調査が開始されたが、翌32年

第 1 図

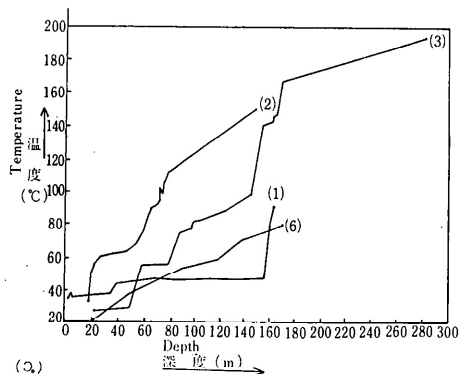


末、つまり一般概査が終了した時に、これらのことが問題となった。

(1) 開発方式の決定

松川地熱地域は、丸森山を中央火口丘とするカルデラ内にある(第1図参照)。当時まで得られた、ボーリングによる地温分布より推定して(第2図参照)、深部

第2図 松川温泉試錐孔底温度図



は相当に高温であり、地表から200mまたはそれ以上の帽岩があるであろうと考えられた。湧出している温泉は、地表より30ないし50mの深度に、松川安山岩の上面、表土層の下底を流れているものであることも判明した。湧出温泉は75°C程度のものが1カ所、40ないし50°Cのものが1カ所、30°C前後のものが数カ所、冷泉が数カ所あり、変質帯は主として松川・赤川・澄川を中心に分布しているのみで、噴気露頭または高温の温泉群等の、いわゆる顕著な地熱徴候は存在しない。したがって、地温分布測定、熱流量の測定、噴気や温泉の観測および地化学的調査等により、熱の中心部を見出し、また地熱地域の評価、構造の推定を行なうことは、不可能またはきわめて困難である。事実、昭和37年に、約100カ所以上の地温分布を測定し、河川の各処の温度を測定したが、地温分布からは何の手懸りも得られず、かろうじて、河川の水温変化により、川底部の熱流量が観測されたにすぎなかった。

そこで、変質帯を中心とした地質調査・物理探査、周辺の地熱地帯、ことに松川地域の下方に存在する地層の露頭部、ことに滝ノ上地熱地帯の調査による、これらの相関性の調査等を行なうとともに、これ等を基として、最も

地熱徴候の明らかと考えられていた、現在の1号井・2号井の付近を局所的に、つまり垂直探査を行なうこととした。この結果として、1号井の周辺に4坑井、2号井の周辺には2坑井の試験井がくさくさされたわけである(第3図参照)。

松川地域の如き地熱地帯では、このような開発探査の方式を採用すれば、企業化の目途をたてるのに、時間的にも、経済的にも有利であるが、しかし、企業化に有効な地域、つまり地熱地域の拡がりを調査するには、生産用の坑井の精密な資料を基とし、必要に応じて、ある深度(松川地域では400~500m)のパイロットボーリングを施工することが必要となる。

(2) 計画樹立

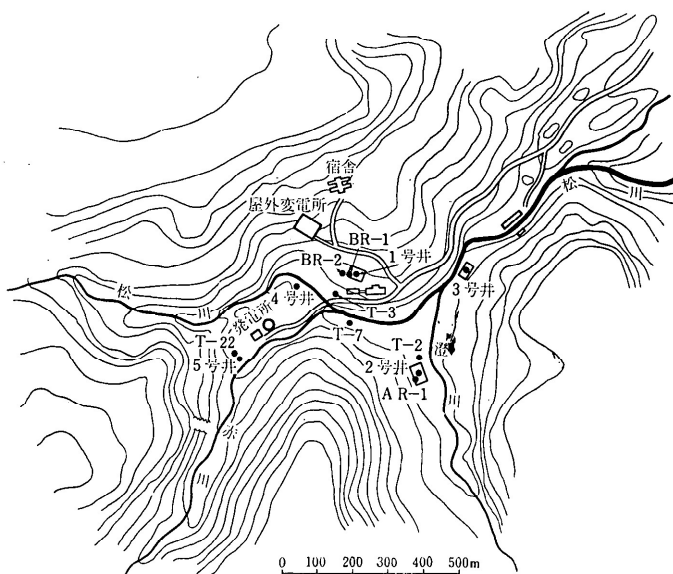
開発探査の方式が決定された初期に、地熱発電が可能であるとして、成功までにどの位の期間がかかるかということが問題となった。企業として地熱発電を計画する以上、一応の計画が立てられたが、開発が可能であるとの結論が出されるまでの調査・試験の期間は、多額な研究費を要し、いわゆるリスクを負っているわけで、この間の所要資金の調達も、合理的で無駄のないことはもちろん、企業本体に無理のないものでなければならない。

当初に作製された計画表は、下記の通りである。

○基礎調査

- (1) 一般調査……………昭和31年
- (2) 試錐による調査…昭和32~34年

第3図 松川地熱発電所付近図



第1表 松川温泉試錐状況

名 称	工 期				深 掘進開始掘進終了	掘進長 メタル クラウン 外径	掘 進 長	ケ ー シ ン グ			噴気状況	噴気継続期間	湧 水 状 況	工事中 止せる 場合の 原因
	起 工	竣 工	掘進開始	掘進終了				外径	挿 入	回 収				
第1試錐	27. 7.15	27.11. 5	27. 8.18	27.10. 9	165.50	88% 75 65	0~38.70迄38.70 38.70~76.20迄37.50 76.20~163.50迄87.30	83% 73	0~38.70	0m 75.90~75.90	161.20mの 深度で自噴	27.10. 1~ 27.10. 9	当初より38℃の17ℓ/ min位の湧水あり55m で47℃120ℓ	
第2試錐	27.10. 2	28. 3.16	27.11.15	28. 2.13	159.35	100 85 ショット85	0~38.70迄38.70 64.35~74.50迄10.15 76.45~159.35迄82.90 74.50~76.45迄1.95 61.20~64.35迄3.15	97	0~58.50		159.35mの 深度で自噴	28. 2.15~ 28. 6.17	掘進中湧水なし 28.00 355℃ 地熱 61.00 800℃ 81.00 1,110℃ 145.00 1,450℃	
第3試錐	28. 6.23	28. 9.14	28. 7.27	28. 9. 5	327.00	100 75 65 55	0~4.15迄4.15 4.15~50.20迄46.05 50.20~276.00迄225.80 276.00~327.00迄51.00	73	0~50.20		327.00mの 深度で自噴 98℃max 7kg/cm ²	28.9.15~ 6ヵ月 位でボアホ ール崩壊の為 自噴停止	掘進中湧水なし 20.50m 27℃ 78.00 58℃ 地熱 130.00 83℃ 226.00 180℃ 300.00 143℃	
第4試錐	28. 9.15	29. 1. 4	28.10. 7	28.12.28	80.70	85 75 65	0~3.50迄3.50 3.50~60.00迄56.50 60.00~80.70迄20.70	—	—	—	—	—	第1試錐と同じ	
第5試錐	29. 1. 5	29. 1.31	29. 1. 9	29. 1.17	57.00 斜掘	65	0~50.70迄50.70	63	0~5.50	0	—	—	掘進中湧水なし	役場の 都合上
第6試錐	29.11.22	30. 4.20	29.12. 4	30. 3.15	205.60	65 55 45 100 100	0~24.10迄24.10 24.10~78.25迄54.15 78.25~205.60迄127.35 0~25.30迄25.30 25.30~28.30迄3.00	63 53	0~22.92	0~22.92 0~64.61	— —	— —	185.00mで10~15ℓ位 51℃の湧水あり	
(第1次) 第7試錐	30. 9.10	30.12.30	30. 9.25	30.11.24	164.00	130 100 85 45	0~41.30迄41.30 41.30~89.10迄47.80 89.10~161.00迄71.90 161.00~164.00迄3.00	鑄鉄管 (内径) 4吋 3吋 2吋	0~41.50 0 0~89.00 0 0~161.00 0	161.00m で自噴	?	第1試錐に同じ 但し湧水を総て遮断し ている		
(第2次) 第7試錐	31. 4. 1	31. 6.17	31. 5. 9	31. 5.21	19.30	45	164.00~183.30迄19.30	—	—	—	183.00m で自噴	現在噴出		
(第3次) 第7試錐	31.11.10	31.11.30												

- (3) 地質調査……………昭和32～34年
- (4) 物理探査(地震・電気探査)……………昭和33～34年
- 応用試験・調査

- (1) 試錐による調査……………昭和35～36年
- (2) 地質調査……………昭和35～36年
- 工業化試験

- (1) 試錐による調査……………昭和35～37年
- (2) 地質調査……………昭和35～37年
- (3) その他調査(化学調査・材料試験)……………昭和35～38年

○企業化(出力10,000kW)

- (1) 蒸気生産井……………昭和38～39年
- (2) 設備計画……………昭和37年
- (3) 建設工事……………昭和38～39年
- (ただし、予備としてさらに2カ年を見込む)
- 〔完成予定〕……………昭和41年

実際には、次の通りに施行された。

○基礎調査

- (1) 一般調査……………昭和31～34年
- (2) 試錐による調査(深度223m、60m×2)……………昭和32年
- (3) 地質調査*……………昭和32～34年
- (4) 物理探査*……………昭和33～34年
- (協同研究の下に地質調査所にて施行。以下、地質調査は同じ)

○応用試験・調査

- (1) 試錐による調査(深度350m、425m)……………昭和35年
- (2) 地質調査……………昭和35年
- 工業化(開発)試験
- (1) 試錐による調査(571m、100～200m×4)……………昭和36～37年
- (2) 地質調査……………昭和36年

○企業化(出力20,000kW)

- (1) 蒸気生産井(945m、1,071m、1,051m、1,501m)……………昭和38～41年
- (2) 設備計画……………昭和39～41年
- (3) 建設工事……………昭和40～41年

以上の通りであるが、基礎調査における試錐は、昭和27年来、松尾村当局が施工した、温泉井ボーリングの資料がよく整備されていたので、省略することができた(第1表、第2図参照)。しかし、何よりも地質調査所で行なった物理探査および地質調査の卓越した優秀な技術と正確な解釈により、応用試験・工業化試験に至るまでの一連の成果を生む要因となった。

また実施中、先進国の技術導入が考えられたが、地熱の諸条件、在り方自体が異なっているので、参考にはなるが、そのまま利用できるものではないとの結論に達し、独自の開発を行なうこととした。結果的には、調査を開始してから、予想された通り10年を要したが、新たに開発を行なうとき、たとえば現在調査中の滝ノ上地域では、松川地域で取得された技術により、同じ条件として3年ないし4年は短縮されることとなるはずである。

2. 地熱調査上の問題

地熱調査は利用できる地熱蒸気が有るかどうかが、またこれを取り出すにはどうすればよいかを調査することである。したがって、各種の物理探査・地質調査・化学調査、ボーリングによる調査、気象・河川等の一般調査等の結果より、これらを総合したものから結論を抽出し、次の段階に移行して行ったことが、成功の大きな原因となった。したがって松川では、調査の段階で何回となく技術会議が開催され、結果についての討議と、今後の方針が決定、確認された。しかも松川地域では、局所的に開発が進行したので、拡がりの探査は生産井の精細な資料を含めて、さらにパイロットボーリング等により施工されている。

本項では、具体的な例として、松川1号井くっさくまでに討議された諸事項を経過的に述べる。

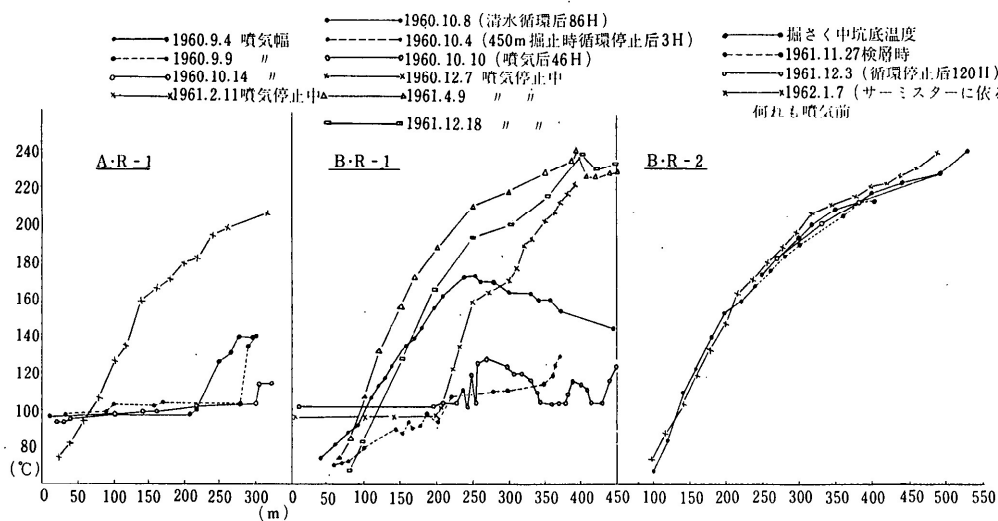
基礎調査および応用試験・調査における、物理探査・地質調査・試錐により得られたコアの調査、松川1号井の近辺にくっさくされた7号試錐・3号試錐・BR-1井、BR-2井(第2図、第3図参照)の各試錐の4坑井による測定・観測が行なわれた。

7号試錐・3号試錐は、温泉井としてくっさくされたものが蒸気の噴出を見たのであるが、7号試錐は昭和32年に160mより223mまで増掘されて、安定噴気とした。3号試錐は埋没した。7号試錐は4カ年に亘り観測されたが、この噴気を利用して、各種金属材料の予備的腐蝕実験を行なった。

基礎調査の資料と、これらの測定から、松川安山岩下底(深度150m)に続く凝灰岩および石英安山岩中にも、透水層が何層もあり、これらは利用価値があるのではないかと考えられた。そこで昭和35年に、AR-1井(深度350m、遮水深度150m)につづいて、BR-1井(深度425m、遮水深度200m)がくっさくされた。BR-1井の坑内温度は第4図に示す。

これらの井戸は、いずれも噴気に成功したが、噴気量が少なく企業的には使用できないことがわかった。ことに、季節的に噴気量が増減し、減衰期には閉止す

第4図 坑内温度測定

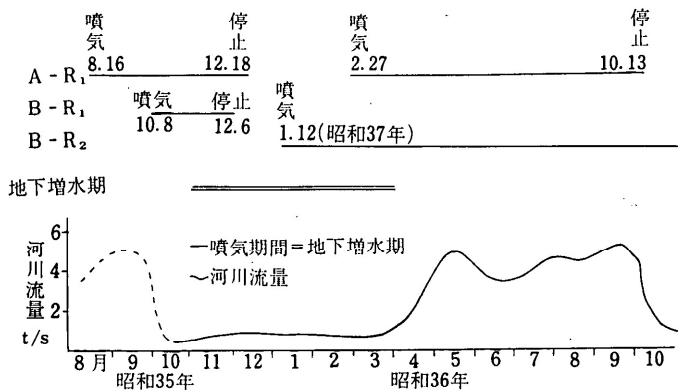


ることもあったので、これを長期観測の結果、地表に近い地下水の増水期に（第5図）孔内温度が低下することが判明した。また、この地下水の影響深度は、400mであることも突止めることができた。しかし、坑内温度は坑底に向かってさらに上昇の傾向を示し、またコアは下方に向かって熱変質の度合を強めていることから、もっと深掘りし、高温層より層圧の高い深部より蒸気を取り出すべきであるとの結論に達した。そこで、深度571mのB-R-2試錐がくさくさされた。地下水の影響を調査するために、遮水深度は330mとした。この結果、坑内温度（第4図）は、さらに孔底に向かって上昇し、岩石はさらに強度の熱変質をうけており、

さらにわれ日は約80度の傾斜のものと、水平のものが明らかになった。噴出蒸気は季節によってほとんど影響はなかった。これらの一連の試錐により、基礎調査の段階に実施された物理探査・地質調査の資料およびこれに基づく推定は、実際に適確に符合し、充分な裏付けとなった。またこれらの噴気による材料の試験により、坑井用の鉄管は普通の油井用鋼管でも十分に耐えることがわかった。事実、B-R-1井内の鉄管は、設置後3カ年を経過した昭和38年に抜去したが、腐蝕の痕跡は全く見られず、外見は新管と同様であった。もちろん、抗張力にも変化は見られなかった。

噴気の化学性状は第2表に示す通り、充分に使用できることを示している。

第5図 噴気状況と河川水量の関係による地下増水期



B-R-2井の噴気試験で、湿り蒸気つまり蒸気中に含まれる水滴による侵蝕が、大きく問題となった。ことに坑口装置等で、流路に不連続な断面を与えた場合や、T字管、経違い接手等は著しく損傷をうけたので、その形状につき、種々な条件下に実験を行なったが、湿度10%以上、流速70m/minで、侵蝕の問題が発生することがわかった。この実験の結果から、生産井用の坑口装置・曲管・分岐管の設計が決定された。

以上の諸資料を総合し、生産井は、山津田層を貫通する深度約1,200mまでくさくさすべきであるとの結論が出

第2表 試錐よりの噴気化学性状

1. 水とガス		(mg/l)			
		7号試錐	A R-1	B R-1	B R-2
ガ	水	99.4	99.0	99.0	99.1
	ス	0.6	1.0	1.0	0.9
ガス組成	CO ₂	81.8	65.1~64.5	93.6~93.5	86.9
	H ₂ S	15.9	34.1~34.8	5.8~5.6	10.3
	R	2.3	0.7~0.6	0.6~0.7	2.8
凝縮水	P H	4.0	4.2~4.3	5.1	3.5
	Na ⁺	12.5	10.9	0.4	3.0
	K ⁺	4.6	3.3	0.2	2.0
	Mg ⁺²	—	—	n. d	<0.1
	Ca ⁺²	—	—	n. d	n. d
	Ee ⁺²	—	—	<0.1	<0.1
	Al ⁺³	—	—	n. d	<1.0
	SiO ₂	—	—	n. d	4.0
	SO ₄ ⁻²	230.0	135.0	n. d	13.0
	CO ₂ ⁻²	1,100.0	790.0	1,220.0	991.6
	Cl ⁻	6.0	17.0	<0.1	<0.1
	H ₂ S	36.0	108.0	10.9	108.6
	S	120.0	290.0	n. d	85.2
	SO ₂ ⁻² , SO ₃ ⁻²	—	—	—	15.6
熱水(セバレータードレン)	P H		3.7~3.8	5.1	3.7
	Na ⁺		66.8	109.4	11.0
	K ⁺		19.1	19.9	2.0
	Mg ⁺²		12.3	6.6	<0.1
	Ca ⁺²		13.0	30.0	3.0
	Fe ⁺²		45.2	8.5	1.5
	Al ⁺³		33.1	28.0	<1.0
	SiO ₂		65.1	110.0	8.5
	SO ₄ ⁻²		379.0	275.8	31.8
	CO ₂ ⁻²		650.0	820.0	416.8
	Cl ⁻		1.7	2.8	3.5
	H ₂ S		n. d	n. d	0
	S		n. d	n. d	0
	SO ₂ ⁻² , SO ₃ ⁻³		n. d	n. d	0.5

された。B R-2井の資料より、山津田層内の温度は290℃に達し、1孔井当り30~60t/hrの噴気量が得られることが推定、計算された。計画生産井の標準仕上図を第6図に示す。遮水深度は500mとし、500mの地層温度は約250℃である。

かくして、実際にくさくされた生産井は1号井945m、2号井1,071m、3号井1,051m、4号井1,501mであるが、安定状態に入らぬ4号井を除き、噴気量

は坑口圧5気圧で50~60t/hrであり、計画値と大差はない。

しかし、くさく中の生産井の評価は、孔内温度・層圧、地層の割れ目、坑内水頭のほか、岩石ことに変質帯の強度別累帯配列(第7図)等によって、決定されるものと考えているが、これらの要素が実際の噴出エネルギーの大小の判定に、いかなる意味と役割を占めるかが問題となる。

3. 孔井試験上の問題

(1) 密閉圧力の問題

松川では生産井の噴気後、井戸の評価、発電所設計の条件決定等のために、井戸の主弁を全閉して、いわゆる密閉圧の測定を実施すべきか否かがしばしば問題となった。

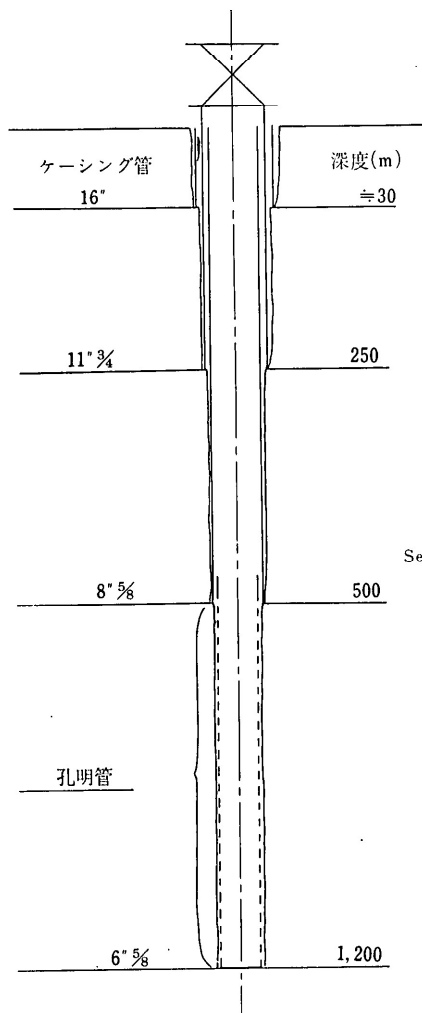
生産井を仕上げて噴気に至らしめると、8³/₁₆in ケーシング管(第6図参照)は、膨脹により約20cm上方に伸びることが、X線透視によりみとめられている。温度上昇による伸びは、計算によれば約80cmとなるが、実際には周囲がセメンチングされているために、鉄管は伸びを制限され、圧縮応力を受けている。松川地域の生産井は、密閉圧が30気圧以上になることは十分に予期できる。すなわち、井戸を密閉すれば管内圧の上昇と相俟って、温度上昇により鉄管はさらに圧縮圧力を受け、内圧上昇による半径方向の膨脹も加

わり、鉄管の破損、鉄管外側のセメンチング部の破壊が予想される。また、密閉が長時間に亘ると、孔井内に熱水面が上昇し、熱水柱に局部的に泥砂の棚ができ、最悪の場合には閉塞する恐れがある。これらの理由で、未だ全閉試験を行っていない。他日、小口径試験井で実験を行う予定である。

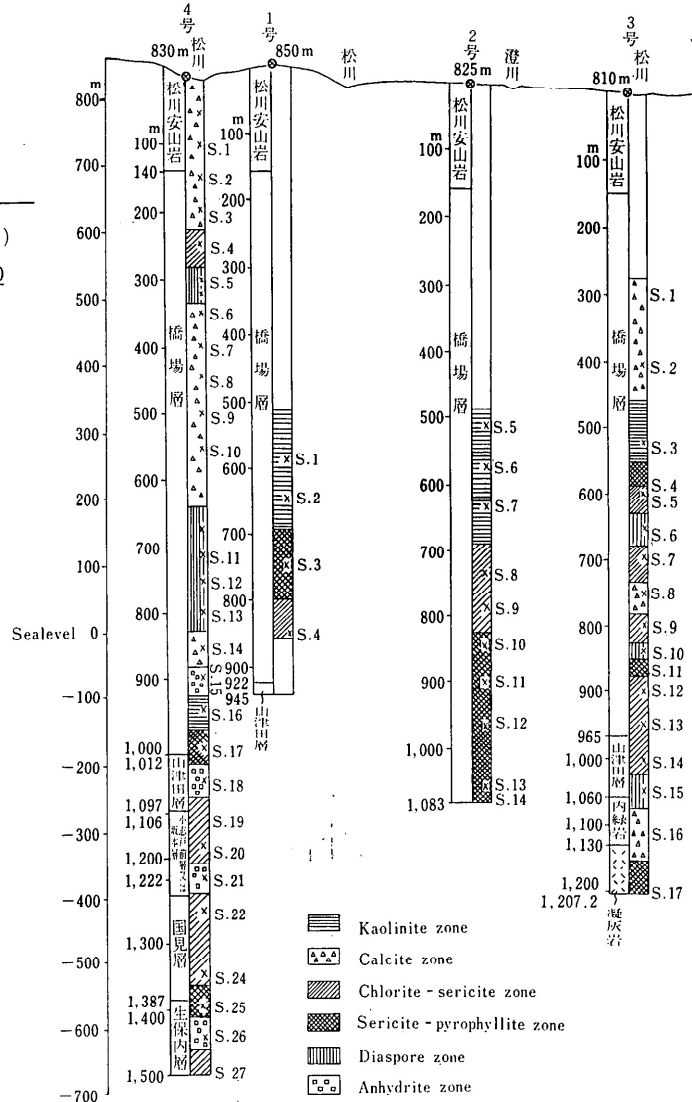
(2) 蒸気測定の問題

生産井の蒸気流量・性状の測定装置は、第8図に示

第6図 生産井標準仕上図



第7図 変質鉱物果帯柱状図



す。ここで今後とも解決を要求されている「湿り度の測定」、「サイレンサー」、「湿り蒸気の脈動」について述べる。

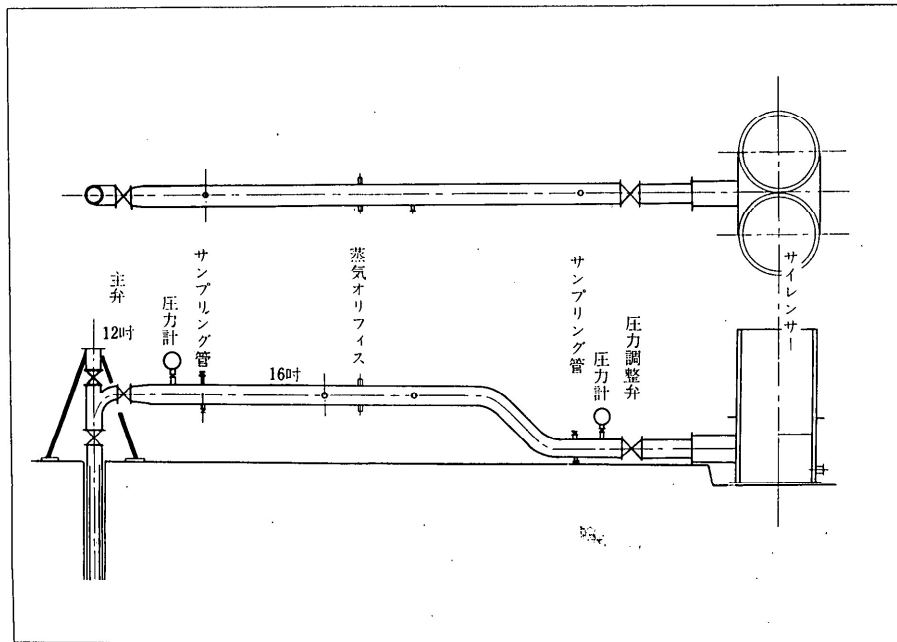
(i) 湿り度の測定

湿り度の測定は、実験室的には相当精密に測定ができるが、蒸気が天然蒸気であり、かつ現場の屋外で測定、観測を行なうには、限られた測定器を使用せざるを得ない。松川では、湿り度3%以下では絞り熱量計、それ以上では分離乾き度計、水槽に定量の蒸気を吹込む熱量計を使用している。分離乾き度計(第9図参照)は、最も手軽な測定器であるが、操作に習熟を要し、

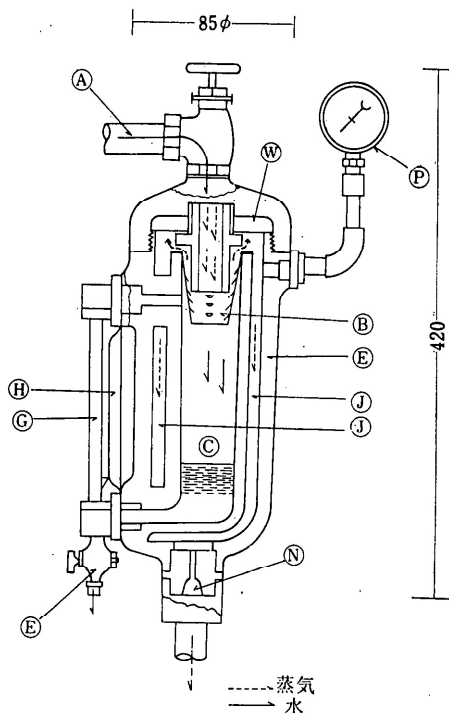
個人差が相当に大きく、湿り度20%の蒸気で±20%前後のパラツキを示すが、測定回数を増やすことにより、実際の値に近いものが得られるという考え方で、測定値を求めている。水槽に蒸気を吹込み、蒸気のエンタルピーを求め、湿り度を出す方法は、松川のように標高850mで、気温の変化が甚だしく、ことに冬期には保温効果が問題となり、信頼できる測定値はあまり得られていない。このほかに、蒸気流路に容量可変の電熱器を挿入し、蒸気温度の変化する電熱容量より、湿り度を求めることを考慮している。

(ii) サイレンサー

第8図 生産井測定用標準配管図



第9図 分離乾き度計 (A型)



サイレンサーは地熱井に不可欠な設備である。井戸よりの噴出音は、付近に民家や旅館がある場合、間違いなく問題となる。松川では、ニュージーランドの地熱井で使用されている双胴式サイレンサーを使用して

いる。1号井の場合、サイレンサー使用前は、耳栓を使用して井戸元付近で3時間の作業の結果、耳が一時的に完全に聞こえなくなり、回復に5～6日を要するほどであったが、サイレンサー使用後は、難聴を訴える程度になった。ホーンメーターによる測定値は第3表に示す。地熱井の測定装置に接続するサイレンサーは、圧力・流量の変動にも十分有効なものでなければならない。このようなサイレンサーの考案が望まれる。このほかに、サイレンサーの代りに背圧タービンを駆動して発電を行なうのも1つの方法である。また、乾き蒸気の場合は文字通り金属音を発し、サイレンサーの効果も低下するので、配管の適当な箇所に水を圧入し、湿り度を30%程度にすれば効果がある。

(iii) 蒸気の脈動

生産井は噴気直後、湿り度は40～50%に達し、このような熱水を同伴する蒸気流は、脈動することがみとめられる。この蒸気をサイレンサーに至る測定用配管を通すと、装置自体はかなりの振動を生ずるので、基礎はすべて入念な工事が必要とする。このような場合には、調圧弁を徐々に閉じて昇圧すれば脈動は弱まり、測定も可能となり、振動による坑井元、測定装置に対する悪影響も避けることができる。湿り度が10%以下になれば、脈動はほとんど問題にならなくなる。乾き蒸気になれば消滅する。

この脈動に対処するために、防振装置をつけなければ

第3表 騒音および周波数分析

1号井 蒸気圧 6kg/cm² S39.7.21 午前 9.00~11.00 微風くもり

伊 藤・畠 山

定 場 所	ホーン	all pass	オ ク タ ー ブ バ ン ド レ ベ ル (d B)								
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10000
峽雲荘新館 玄関前	77 (78) 83	82	80	72	70	70	71	71	68	58	49
" 事務室 (全開)	(60) 64 70	70	60	58	55	54	54	50	51	41	39
" " (全開)	77 (77) 80	81	75	62	70	70	72	74	70	59	50
" 2階7号室(全開)	64 (68) 72	73	68	62	65	60	57	57	52	42	39
" " (全開)	76 (77) 79	79	71	67	69	71	71	71	69	59	48
1号井噴気孔より 3 m	112 114 (116)	115	105	108	109	102	106	105	101	92	84
" 10m	107 108 110	110	100	104	103	100	102	104	99	93	83
" 20m	104 104 (105)	106	93	98	98	98	98	99	97	89	77
" 30m	100 100 (103)	103	90	95	96	93	93	94	93	85	72
測定小屋内 (全開)	93 97 (103)	102	98	95	90	94	89	85	78	72	70
" (全開)	96 98 (102)	101	97	93	92	92	91	89	84	76	70
一号井通用門入口	100 103 (104)	104	96	98	93	95	95	97	92	90	74
30km 発電機室 (全開)	95 87 (90)	90	83	83	85	80	81	80	76	68	61
" (全開)	94 95 (77)	97	83	90	92	85	88	90	85	77	63
旧館二階応間(全開)	60 (66) 70	71	65	68	58	55	54	54	49	40	38
" (全開)	76 (77) 80	80	72	76	62	65	71	72	69	59	49
峽雲荘道路入口	70 (72) 76	76	71	65	62	63	62	65	60	47	38

ばならないが、坑井の噴出部鉄管は75mm位伸びるので、上下方向にも可動のものであればならない。

4. 地上設備 (第10図)

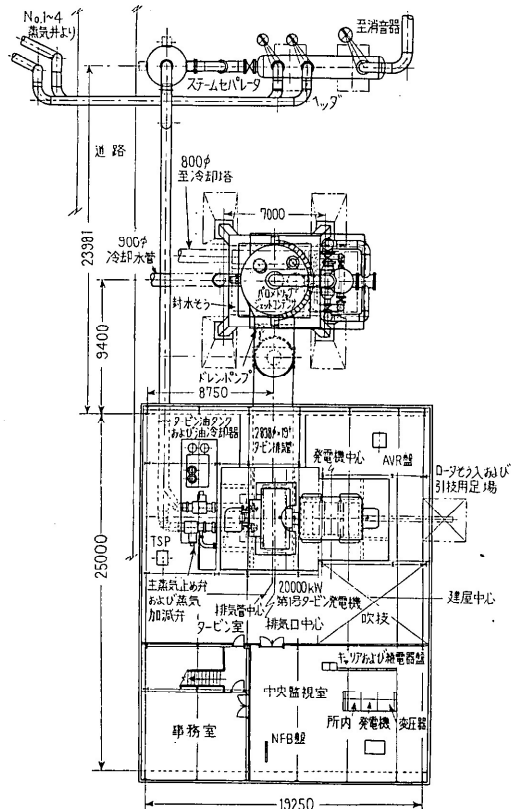
地上設備を5ヵ月運転の結果、腐蝕の問題は全くなかったといってもよい。しかし、スケールの沈積、生

産井より同伴する泥状の細岩については、予想以上の注意と対策が要求されている。また、気象変化の甚だしい所で、冷却塔・復水器の一連の熱サイクル系の高効率維持のための制御も、まだまだ研究の余地がある。

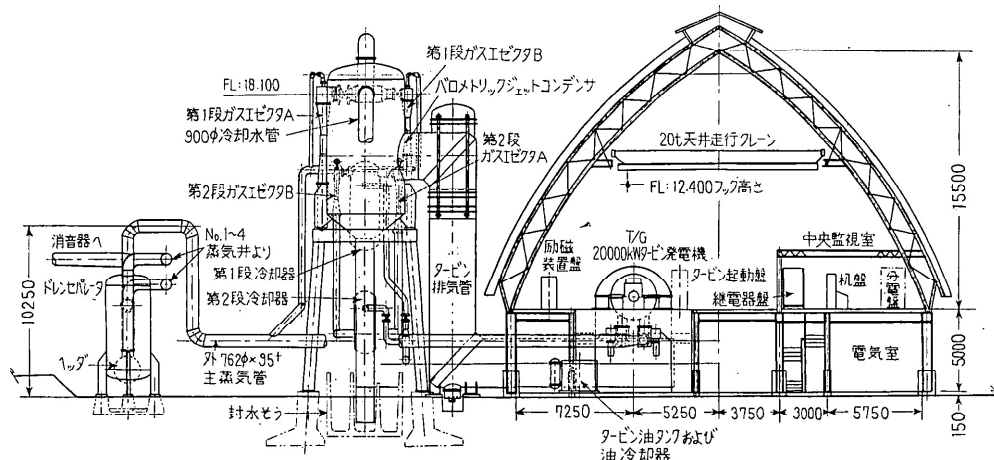
(1) スケールの問題

パイプラインにおける、スケールによる重大な問題は予想もできぬ程度であるが、管内壁に薄く被覆をつ

第 10 図
平 面 図



立 面 図



くっている。これはほとんど脱落することはないが、通気を一時停止して、再通気するとき、一部が剥離してタービン前の蒸気溜またはセパレーターにとどまることがある。このスケール被覆は、むしろ管内壁を保護しているようである。

スケールの化学成分は第4表に示す。スケールは蒸気の圧力温度の条件により、その成分と性質を異にしている。

安全弁の作動は、スケールの沈積により阻害されることが予想される。ラルデロ発電所では、安全弁の下に弁を装着し、作動不良またはスケールにより全閉不能になった安全弁を、運転中に交換できるようにしてあるが、本邦でもこのような措置が望ましいと思う。

松川では、安全弁は各孔井のセパレーターにおおの1個、蒸気溜に1組のほか、電動逃し弁を備え、これらは定期的にハンドブローを行なって作動を確認している。

タービン内部も、羽根・噴孔部にスケールは付着する。スケールが付着すれば、当然効率低下し出力が下るから、定期的に掃除、点検を要することはもちろんである。松川では湿り蒸気を使用すると、硫酸鉄を含む比較的軟らかいスケールが付着するが、乾燥蒸気では、硬質の珪酸分の高いスケールが付着する。

(2) 泥状の細岩

生産井が湿り蒸気を噴出しているときは、噴出蒸気に同伴される細粒岩、泥状の細岩は、セパレーターで同伴熱水とともに排除されるから、タービンに流入することはほとんどない。しかし、乾燥蒸気の場合、細粒岩はセパレーターで分離、排除されるが、泥状のも

第4表 スケール成分表

	U ₁ '	U ₂ '	U ₃ '	U ₄ '	V ₂ '	V ₃ '	A	S
SiO ₂	26.20	60.20	61.26	73.20	58.60	60.00	69.85	69.28
Fe	17.75	9.83	7.59	6.70	1.45	4.80	4.25	10.20
Al	1.30	1.40	3.56	5.10	0.11	5.82	17.34	0.53
CaO	4.20	2.00	5.60	5.54	3.44	9.10	0.40	1.14
MgO	1.44	1.44	1.57	3.07	0.13	0.36	0.32	0.30
SO ₄	43.56	17.92	17.96	6.97	24.05	14.50	n. d	50.26
S	1.55	1.20	0.25	0.25	0.20	tr	3.74	0.38
Na	5.5	2.50	1.1	0.4	7.2	2.1	n. d	9.26
K	3.4	1.5	0.8	0.2	4.7	1.3	n. d	2.80
lg. loss	n. d	n. d	n. d	n. d	n. d	—	5.15	7.85

註 試料は、自然乾燥し、乳鉢にて、粉砕供試料とした。

Sは Total S-SO₄ より算出

符号 U₁'.....U₄' : タービン各段ノズル

A : 坑井元、噴出管バルブ

V₂', V₃' : タービン2, 3段ノズル

S : 加減弁

(V₁'はU₁'と、V₄'はU₄'と同じ)

のは粉体となって、セパレーターでは完全に分離できず、蒸気とともにタービン内に入り、その排気室に近い最終段の噴口・羽根に、泥状になって付着する。泥状のものには石膏を含んでおり、X線による解析の結果、これらはほとんど生産井の800m付近より運ばれたものと推定される。

これらの対策には、ガイサー発電所・ラルデレロ発電所でも、当初腐心したようである。すなわち、スクリーンとセントリフィックスサイクロンを蒸気管に並列につけ、切換えて、掃除または除去する方法をとっているが、水洗式のものもかつて設置されたようである。松川でも、乾き蒸気に対する粉体分離器を実験中である。

5. 公害の問題

地熱の開発上、近年対策の強化を叫ばれている公害についても、慎重に対策を考えなければならない。

松川において、①坑井の噴出音、②坑井よりの噴出物、③発電所の排水、④発電所の排ガス、等の問題について、多年取組んできた。

(1) 坑井の噴出音

前述の如く、ニュージーランド方式の双胴式のサイレンサーをつけたが、これでも充分な消音効果は得られない(第3表参照)。蒸気の測定のために圧力が変動しても、消音効果の優秀なサイレンサーの考案が望まれている。1号井で蒸気の一部を利用して、1,000kWの背圧タービン発電機を運転したが、このような可搬式の背圧タービンを駆動するの良策である。また、乾燥蒸気の場合、管路に水を注入し、湿度を30%位

にすると、乾燥蒸気特有のかん高い金属音はなくなる。

松川では付近に民家がなく、2軒の旅舎のみが補償対象になっただけで済んだ。

(2) 坑井よりの噴出物

坑井よりの噴出物で問題となるのは、噴気開始後の坑内の泥水およびこれに伴う岩屑類である。松川の例では、これらは半径数100mの範囲に撒らばるので、坑井を仕上げた後には清水による坑内洗滌、または全量逸水の場合は、約5,000t程度の水で稀釈して、泥水散布による樹木の損害を防止するよう配慮している。また冬期には、飛散する多量の水滴が樹木に結水するので、噴気はできる限り冬期を避けるようにする方針である。

噴気後、サイレンサーに通気する頃には、これらの心配はほとんどなくなる。松川では、サイレンサーよりの蒸気による付近の樹木の損害は、蒸気中のガスによるものはごく近くの灌木に限られた。

(3) 発電所の排水

松川地熱発電所の復水の一部は赤川に流入し、さらに松川に合流する。松川の水は、下流で約3,000町歩の田畑を灌漑する。従って、この復水の作物、すなわち稲作に対する影響を重視して、4年前より復水と川水の各種混合水(1%, 5%, 10%, 100%, 標準水)を調整し、稲作の実験を岩手大学農学部作物学教室にお願いして行なってきた。現在までの結果、復水100%区では、発芽・生育・稔実等に影響はみとめられているが、10%区ではほとんど影響はなく、他の5%、

1%区では全く影響はない。成分的にも、復水は松川の水と大差はないので、化学的にも安全である。

復水を赤川に放出するとき、硫化水素は10ppm以上あり、放水後これは空気と置換されて放散され、発電所より下流300mでは、川水と同様となり3ppm以下となる。

(4) 排ガス

発電所よりの排ガスは、蒸気中の0.4~0.5容量%のガスで、このうち約15%は硫化水素で、約82%は炭酸ガスその他であるが、20,000kW発電の場合、これらのガスは1,590m³/hr（硫化水素161.4m³/hr）に達する。そこで現在は、冷却塔の頂部より、冷却塔内の数100m³の排出空気に混合し、稀釈して大気に放散している。発電所周辺のガスの検知を行なっているが、運

転前と差異はみとめられない。しかし、この排ガス中の脱硫装置を設置する根本策を考慮中である。

3. 結 語

以上、現在までの松川地域の開発上の問題点のいくつかを報告したが、松川におけるこれまでの過程を回顧すると、すべてが問題点であったといっても過言ではないと思う。今日までに至り得たのは、工業技術院・地質調査所・各研究機関等の関係者の御支援の賜である。

しかしながら、未解決な問題はまだまだ多く、これが解決に努力しなければならないが、今後とも地熱調査会の諸賢とともに勉強して行きたいと存じます。

地熱発電用 20,000kW 蒸気タービン設備*

秋 葉 雅 史**

1. ま え が き

わが国における火力発電の近年の進歩は著しく、超臨界圧の採用によりますます大容量化、高能率化へと発展している。しかしながら発電原価の安いこと、わが国が有数の火山国であることなどより地熱発電が各方面より注目され、本誌のエネルギー開発特集⁽¹⁾にもすでにその展望が述べられている。

わが国初の本格的な地熱発電が新技術開発事業団の援助のもとに東化工会社の手により岩手県八幡平松川地区において昭和31年以来開発が進められていたが昭和41年8月試運転開始、10月営業運転の運びとなり、9月末より9,000kWの連続運転を行なっている。今後の計画のご参考としてここに報告する。

2. 蒸 気 井

松川地区は八幡平国立公園内で岩手山北西約8kmのところで、交通としては松尾鉱山鉄道東八幡平駅よりバス約40分のところである。

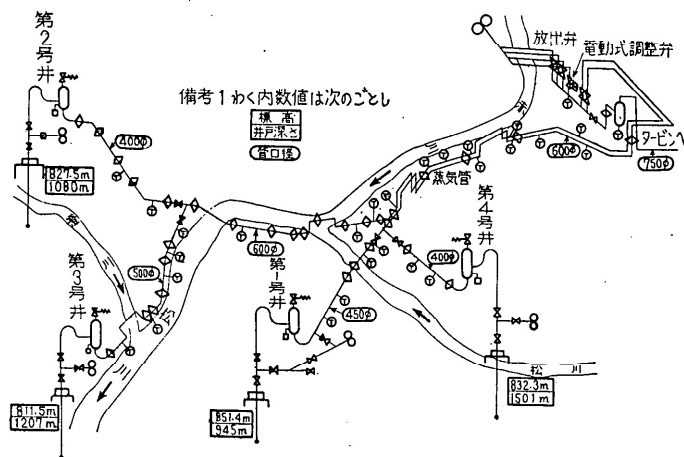
昭和31年に現地調査が行なわれ、昭和33年より地質調査所による地上探査が行なわれた。昭和35年、3本の試験井を掘削した結果、地熱の貯留と構造が明らかになった。蒸気や熱水はおおむね深度1,000m前後の山津田層に存在し、松川安山岩がキャプロックの役目をしている。昭和38年8月より本格的なボーリングを開始し、39年1月深度945mにて毎時70tの噴気を見た。ついで同年7月に2号井、40年1月に3号井、11月に4号井の掘削に成功し、20,000kW発電に必要な蒸気量を獲得したが現在は1、2号井により運転を行なっている。蒸気井の位置および配管系統を図1に示す。また代表的な蒸気の組成は表1のとおりである。

表 1 水とガスの比およびガス組成

(vol%)

水・ガス比	水	99.5~99.6
	ガ ス	0.4~0.5
ガス組成	H ₂ S	14.8~15.3
	CO ₂	81.1~82.4
	残	2.8~3.6
化学成分		(mg/l)
	蒸気の凝結水	吹出し熱水
pH	4.5~4.6	4.9~5.05
Na	3.0~5.0	280~300
K	1.0~3.0	180~190
Mg	trace	7.3~8.7
Ca	trace	20.8~21.2
Fe	2.5~3.2	453~495
Al	trace	6.5~10.8
H ₂ SiO ₃	5.2~11.0	795~990
H ₂ CO ₃	25.0~40.0	trace
Cl	3.8~4.0	9.2~11.0
H ₂ S'	40.0~50.0	trace
SO ₄	15.0~20.0	1708~1800
SO ₂	trace	

第1図 蒸気管系統説明図



*日本機械学会誌、第70巻、第577号、1967より転載

**東芝電機(株)タービン工場

3. 全体計画

地熱発電の一般的問題点としてサイクルの選定と使用材料が上げられるがいずれも蒸気井の特性によって決定されるものである。今回の場合1号井は孔口圧の上昇とともに流量は減少するが2号井はそれほど変化せず50t/hを保つこと、圧力を5kg/cm²gに保った場合1号井は約3℃の過熱であるが、3号井は20%の湿りとなるなどおのおの異なった特性を示した。検討の結果井戸出口圧力5kg/cm²g、タービン入口圧力3.5kg/cm²g1%湿りとした。サイクルは最も電気出力の大きい単純復水形とし、排気圧はタービン出口湿り度の関係から100mmHg absに選んだ。定格出力20,000kWにおけるタービン蒸気消費率は9.66kg/kWhでそ

の熱平衡線図を図2に示す。使用材料は噴出蒸気による腐蝕試験により定まるがこれについては後述する。つぎに松川地区のみの問題点として特に留意した点は建設場所が国立公園地帯なので発電所の外観と周囲の自然との調和を考えたこと、冬期の豪雪と冷却水の氷結に考慮を払ったこと、山中への運搬を考え大物特に復水器などを現地組立としたこと、工事用電源として1,000kW 背圧タービンを設置したことなどである。全体配置を図3に示すがこの近辺が地熱の発展の可能性があるため将来ユニットの増設を考慮して計画された(表2)。

4. 腐蝕試験と使用材料

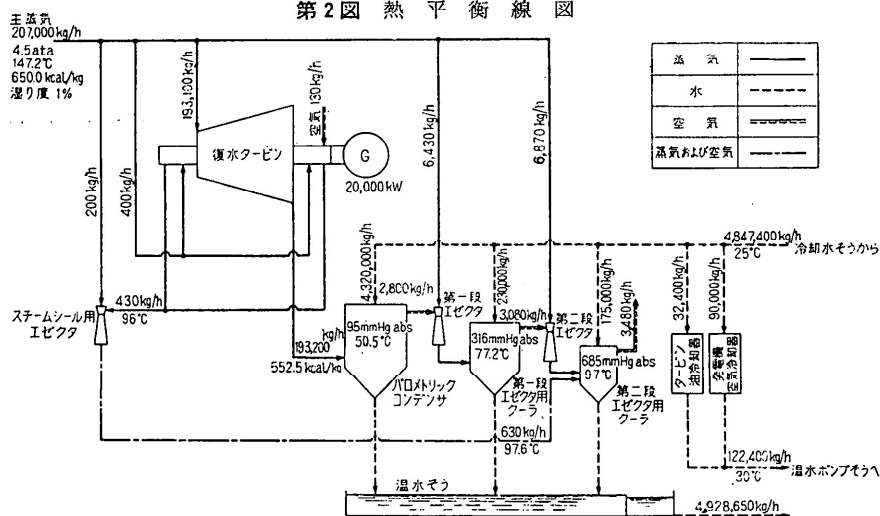
地熱発電にとって腐蝕試験の精度は機器の寿命を定め、場合によっては、発電単価に響いてくる。特にフラッシュタイプと違って今回のごとく直接噴気蒸気を使用する場合は重要である。我々は腐蝕試験を試験井についても試みたが1号井噴気とともに本格的に実施した。

内容としてはタービン本体や蒸気管、排気管を対象とした蒸気中の試験と、復水器、冷却水管を考えた復水中の試験に分かれる。蒸気中の試験は3種類に分類される。まずタービンに使用するのと類似のノズルを置き蒸気速度を実機と同じとしたふん囲気 JIS 4号試験片をばく露した。材料種類は14組で各組4本で1カ月ごとに重量および寸法減少率、引張試験、顕微鏡検査を実施した。これにより使用材料の選定、許容応力やくされしを決定した。試験は装置を蒸気井のそばに置き噴出蒸気をそのまま使用したので固形物やド

表2 要項表

定格出力(発電機端)	20,000kW
プラント全蒸気量	207,000kg/h
プラント全冷却水量	4,847,400kg/h
タービン入口蒸気量	193,100kg/h
回転数(発電機直結)	3,000rpm
入口蒸気圧力(主止め弁前)	4.5kg/cm ² abs
入口蒸気温度(主止め弁前)	1.0% 湿り
排気圧力(タービン排気口)	100mmHg abs
復水器復水量	194,000kg/h
復水器器内圧	95mmHg abs
復水器冷却水量(25℃)	4,320,000kg/h
ガスエゼクタ抽出乾燥ガス量	2,234kg/h(平時)
ガスエゼクタ必要蒸気量	13,300kg/h(平時)
発電機容量	23,500kVA
主変圧器容量	23,500kVA

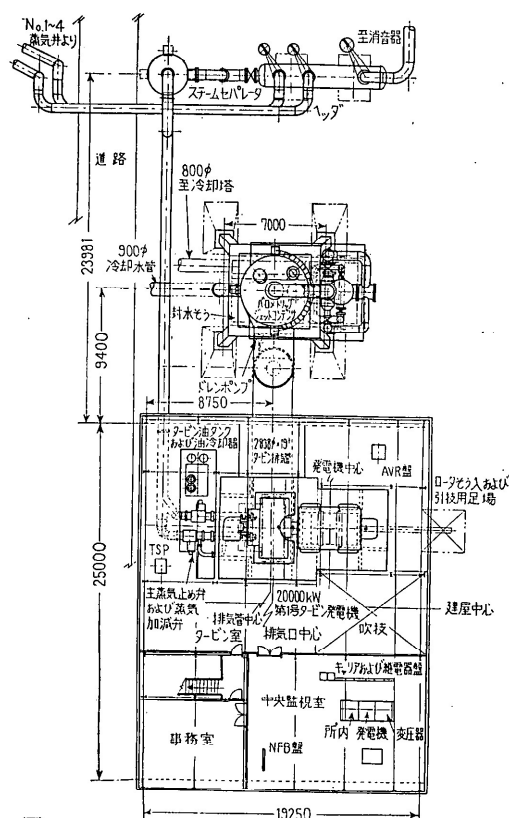
第2図 熱平衡線図



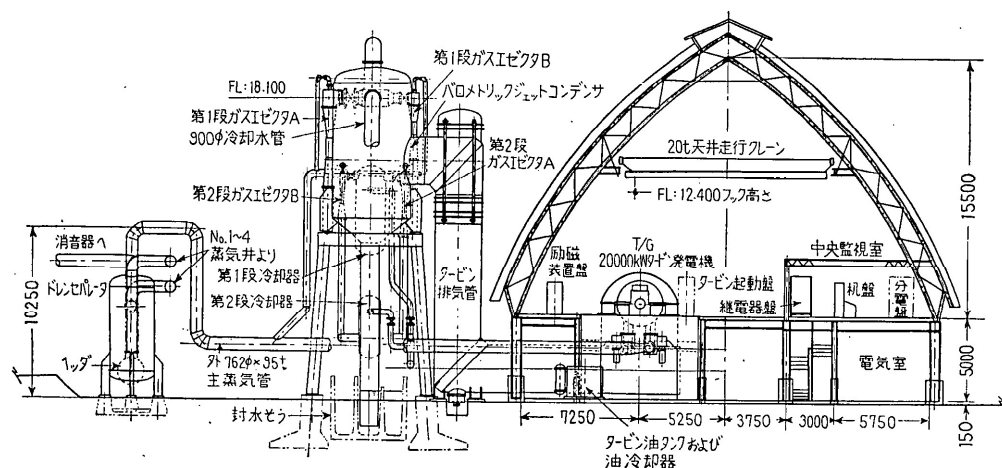
樹脂被覆が耐蝕性にすぐれていることがわかった。つぎに使用材料と腐蝕試験の結果を表3に示す。

湿り蒸気を使用することは地熱用も原子力用も同じである。今回の設計製作にあたっては、さきに製作し

平面图



立面图



第4図 タービン組立図

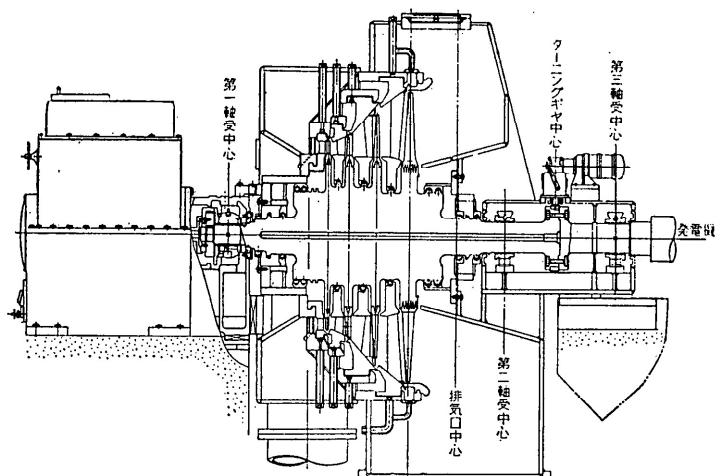


表 4

	175,000kW 再熱タービン (低圧段落、単流分)	20,000kW 地熱タービン
入口蒸気条件	3.31 ata, 250°C	4.5ata, 1.0%濕り
排 圧	38mmHg abs	100mmHg abs
段 落 数	6	4
設 計 流 量	126,000kg/h	193,000kg/h
最終段出口軸流速度	142,4m/s	158m/s
最終段出口濕り度	8.6%	13%
最終段出口排気損失	3.53kcal/kg	2.66kcal/kg

た日本原子力研究所納入 JPDR 12,000kW タービンの経験を有効に活用発展させることに努めた。また基本的な形式を決めるにあたっては、入口蒸気条件、最終段出口の軸流速度から考えて、175,000kW 再熱タービンの低圧段落群（最終段羽根長さ 584mm 23in）を用いた。第4図は断面図で比較要項は表4のとおりである。

ドレンによる浸蝕、ガスによる腐蝕やスケール付着に対して構造的につぎの対策を施した。

ドレンによる羽根の浸蝕を防止するため、周速の大きい最終段およびその前段の入口側にステライトを張付けた。第2段には原子力タービンに使用されている Moisture Extracting Bucket を採用した。ノズルダイアフラムには、羽根から飛出したドレンを捕獲するためのポケットを設けるとともに、蒸気通路部の外壁に付着するドレンを羽根に送り込まないようにノズル板出口部外輪にみぞを設けた。ケーシングには蒸気入口側のステーに特殊なみぞを切り、これに衝突したドレンを抜き出す構造を採用した。

腐蝕の作用は一般に H_2S の状態では起こらず酸素

が加わった後に発生すると考えられるので運転中はあまり問題ないと思われるが、使用材料は全面的に腐蝕試験の結果によった。ロータ材に使用した Ni を含まない Cr-Mo-V 鋼は高温用なので低温ぜい性を考慮してヒートンクポケットを設けて対処した。つぎに停止した際、たまった蒸気が凝縮し腐蝕をおこすことや、ドレンの排水、水溶性スケールの除去などの意味を兼ねて原子力タービンで用いられている水洗装置を設備した。さらに熱風を送り込んで各部を乾燥させ、いわゆる赤さびの防止にも注意を払った。

6. 復水器

タービン排気を凝縮させる復水器として直接接触式のバロメトリック式を採用した。すなわち地熱発電では復水を回収する必要がないこと、冷却水倍率が表面式に比べ少なくてすむこと、冷却管が不用なので構造が簡単となり腐蝕に対処しやすいくことなどである。また設置高さを10mとし復水ポンプを省略した。

復水量 194t/h、交換熱量 $9.75 \times 10^7 \text{kcal/h}$ 、抽気ガス量 2,234kg/h という容量のバロメトリックコンデンサは世界的にもあまり例がなく、その形式、寸法の決定にはつぎのような試験を実施した。

実機の 1/10 のモデルを使用して単位面積当たりの負荷および真空を実機と同じとして内部構造を種々変更させた。一般に用いられている数段のトレイを持つものは冷却水の吹上げと器内の圧力損失が大きく不適であった。つぎに第5図に示すように1枚の散水たなに数多くのスリットを切って冷却水を落とし、蒸気はその間を通過して凝縮し、冷却水を横切らないようにした。この結果圧力損失が計画の 5mmHg 以内で、かつ処理水量も満足するなどの成績を得たのでこれをもとに設計した。また蒸気入口側に冷却水をスプレすることも実験したが、これはある限度以上は圧力損失となることが判明したので設置していない。

7. ガスエゼクタ

火力発電用の空気エゼクタは普通抽出空気量 25kg/h を目標として製作されるが、地熱発電の特性としてガス量は多く今回の場合約 100 倍でありまたその量も井戸の状況により変化する。作動蒸気圧も 4.5

