

松川地熱坑井の電気検層 (第1報)

高木 慎一郎* 田中 信一*

Electrical Logging and Temperature Surveys
at Matsukawa Geothermal Wells

By

Sin-ichirō TAKAKI & Sin-ichi TANAKA

Abstract

To get geothermal steam, four production wells (no. 1~no. 4 well) have been drilled in Matsukawa geothermal area, Iwate prefecture, since 1963.

For the purpose of formation correlation, identification of productive zone and getting temperature distribution in these wells, the writers carried out electrical logging and temperature surveys.

In the electric log, spontaneous potential (s.p.) curve and resistivity curves including two normal spacings are recorded.

The tools using for these bore holes with high temperature are as follows.

◦ Cable (Table 4)

Survey cable contains four conductors insulated by teflon and protected by stainless steel wire braid and polychloroprene sheath.

◦ Logging sonde

In the case of resistivity sonde with five electrodes, teflon and silicon rubber were used as insulator. Temperatures were measured in each well with "Thermister" thermometer. (Fig 10)

From these survey, the following informations were obtained.

1. In general the resistivity logs show low resistivity, namely the existence of conductive formation in shallow part until 500 meters depth, but deeper part shows higher resistivity, resistive formation. This conductive formation corresponds to the altered zone while the resistive formation, to the weak altered zone such as dacite lava, welded tuff and green tuff formations.

2. It seems in these logs that there are several conductive parts among the resistive bed at deeper formations. In these places, the lost circulation of drilling mud and also the variation of temperature curve were obtained, so these conductive parts may be estimated to be as some productive zones existing some fissures.

要 旨

岩手県松川地熱地帯に掘削された松川1号井~4号井(深度945~1416m)について、電気検層および坑内温度の測定を実施した。

使用する電線、電極類は特にテフロン等を使用した耐

熱性のものとし260°Cまでの連続測定を行なった。電気検層図より岩質の判定、坑井対比を行なうとともに、逸泥記録、温度変化等を考え合わせて熱水、蒸気の通路となる割目の存在箇所の判定を行なった。また数回の温度測定より坑井内の温度分布を明らかにし、経過時間に併う温度回復の状況より地温の推定を行なった。

* 物理探査部

1. 緒言

昭和35, 36年に岩手県松川地区において本格的な地熱試掘井 AR-1, BR-1, BR-2号井が掘削されてから筆者らは、地熱探査の一方法としてこれらの坑井を利用した電気検層を実施してきた。これは本地域の地質構造の解明と地温分布を適確に把握することにより、蒸気産出井として最も有効に仕上げるための直接的な資料と地表からの電気探査の解析のための参考資料を得ること等を目的としたものである。しかし当初はこのような高温井で使用できる測定器が不十分で特に電線、電極等の絶縁不良に起因する困難が多く十分な結果は得られなかった。其後テフロン其他の耐熱性絶縁材料を使用した電線、電極を使用し、昭和38~40年にわたって掘削された1号井~4号井については一応の成果をうる事が出来た。すなわち電気検層では、地層比抵抗と自然電位(S.P.)とを測定し各坑井の岩質の変化とその層厚を明確にするとともに、熱水、蒸気の通路と考えられる割目の発達した部分の判別を坑内温度の変化、掘進中の逸泥記録とを考え合わせて行なった。

温度測定は地熱坑井においては、最も重要な方法であるが、後記の高温坑井用測定装置により各坑井とも数回の測定を行ない、坑内の温度分布、およびその時間的な変化を明細に観測することができた。ここに第一報として、No.1~No.4坑井における測定に要した装置とその方法を主とし、あわせて各坑井における測定結果と考察

について略述する。

なお本調査は東化工(株)の受託調査として行なったもので現地作業および本文発表について協力をたまわった東化工(株)の諸氏および帝國鑿井工業(株)の諸氏に感謝します。

第1図および第1表に測定した各坑井の位置および坑井と測定に関する概要を示す。

2. 電気検層

石油鉱業においては、電気検層により地層対比、岩質の判定のみならず油層評価(孔隙率、水分飽和率等の算定)の面においても広く活用されているのは周知の通りである。しかし地熱を対象とする坑井では、高温のために現状では測定出来る計測器に限度があり、最も基礎的なS.P.比抵抗、温度の測定とその定性的な解析にとどまっている。松川においても上記の三つの方法による電気検層を実施し、その結果より坑内地質の判定、地層対比、坑内温度の変化状況を検討した。

2.1 電気検層の方法と装置

比抵抗は電極間隔50cm, 1mの2種をノルマル法で測定しS.P.と合わせた3成分をオツシログラフに同時に記録した。その回路および電極配置の概略を第2図に示す。

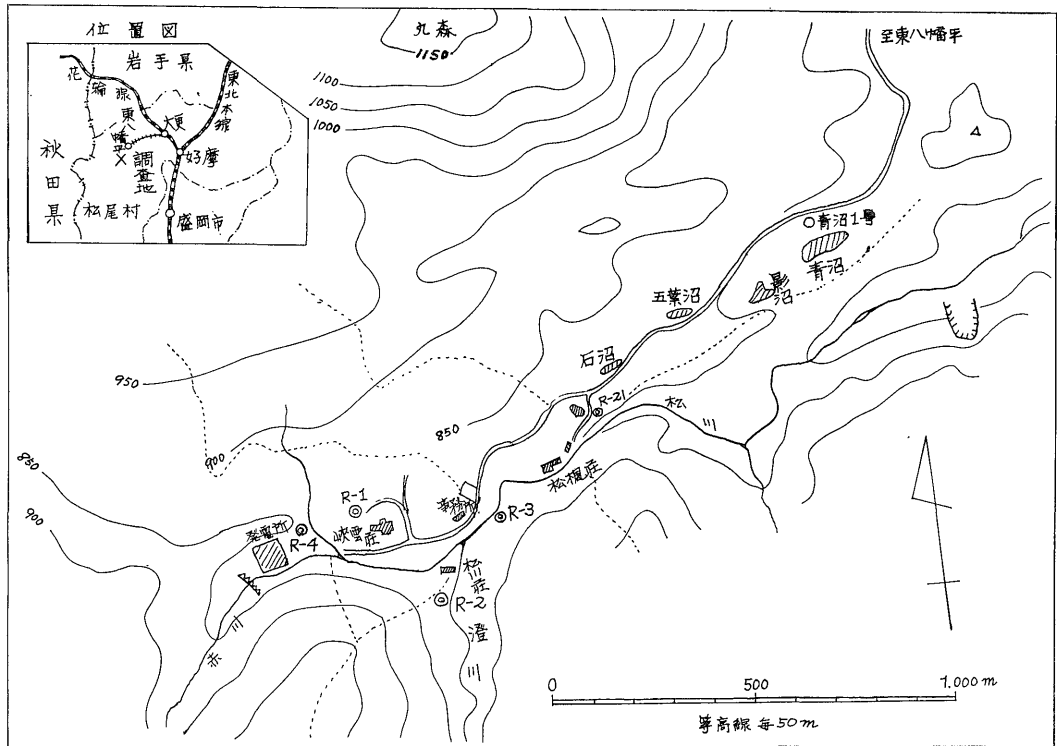
耐熱用として特に設計したものは次の通りである。

(電線)

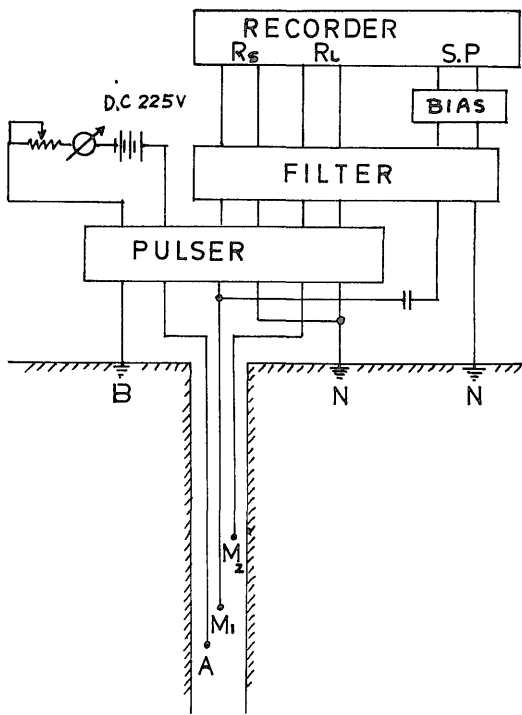
地熱坑井で電気的な測定を行なう場合、まづ問題となるのは使用電線の選定である。これは(1)耐熱耐圧性を

第1表

WELL No.		# 1	# 2	# 3	# 4
Depth (m)		945	1080	1207.2	1416.44
Bit Size (inch)		7 ⁵ / ₈ "	7 ⁵ / ₈ "	7 ⁵ / ₈ "	7 ⁵ / ₈ "
Casing (m)		473.7	497	500.74	488.2
Mud	Nature	Chrome mud	Chrome mud	Chrome mud	Chrome mud
	Density	1.10	1.1	1.1	1.15
	Viscosity	42	45	45	45
	Resistivity	2.2/11°C	0.68/22°C	1.5/14°C	0.7/52°C
Interval Measured (m)	I	197~612	251.4~634	31.5~478	256~483
	II	490~837.5	500~970	500~1044	488~1141
	III		500~1074		
Date	I	1963, 11, 24	1964, 5, 24	1964, 10, 2	1965, 5, 17
	II	" 12, 25	" 6, 28	" 12, 7	" 8, 3
	III		" 7, 8		
Bottom Hole Temp.		S. P. R. T. 182°C (5 H)	S. P. R. T. 195°C (8H30)	S. P. R. T. 171°C (6 H)	R. T. 179°C (1135m) 7 H

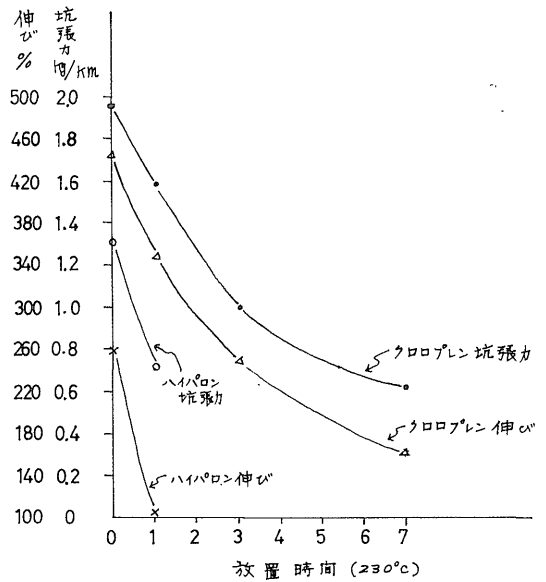


第1図 松川地区坑井位置図



第2図 電気検層略図

有すること。(2) 耐摩耗等の機械的強度を有すること。
 (3) 坑内水による変質を生じないこと。等の条件を満足しなければならぬ。参考として第2表に電線材料の許容温度を示す(60°C以上)この問題について、数種の電線



第3図 ケーブルシース材料試験

第2表 電線材料の許容温度

許容温度	絶縁材料	保護被覆材料
250°C以上	無機材料	
250°C	テフロン(押出法)短時間 テフロン() 225°C連続 シリコンゴム(短時間)	シリコンゴム(短時間)
200°C	アスベスト ガラス, テフロンエナメル シリコンエナメル, シリコンゴム	シリコンゴム(連続)
180°C	ケルF(三弗化エチレン) 190°C ガラス(シリコンワニス引) ガラステープ(シリコンゴム引)	鉛(150°C) ガラス+シリコンワニス
130°C	アスベスト, マイラー, ガラス, 綿糸, 絹糸 アスベストワニス, キャンブリック ポリエステル, エナメル	ガラス+ナイロンラッカー ガラス+アルキッド樹脂
105°C	耐熱ビニール, 硬質ビニール, ハイパロン ナイロン, 油性エナメル, ポリウレタン 人絹糸, 綿糸, 紙, アクリル樹脂, イルセン (照射ポリエチレン)	ナイロン, ハイパロン, 塗料(ペイント) ナイロン糸+塗料, イルセン
85°C	ブチルゴム(10kV以下) ワニス, キャンブロック ポリエチレン(低圧用)	ポリエチレン(低圧用) ビニール(耐熱)
75°C	天然ゴム(耐熱配合) アスベスト+ビニール クロロプレン, ポリエチレン, ニトリルゴム	クロロプレン ニトリルゴム 塗料
60°C	ポリエチレン(高圧用) 天然ゴム ビニール	天然ゴム(C. T. シース) ビニール 塗料

(昭和電線電纜K.K.技術資料)

の試験片を作製し坑内で予備実験を行なった(第3図, 第3表 a, b)。その結果, 第4表に示す電線を作製して使用した。

すなわち導体素線は熱による変質を考え, 銀メッキ軟

第3表

(a) 電線テスト試料

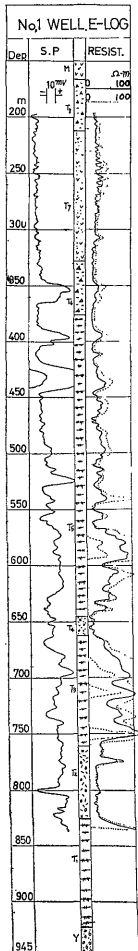
No.	導体構成	絶縁材料	被覆材料
1	7/0.25(cu) 11/0.29(st)	テフロン(1)	ハイパロン
2	"	テフロン(2)	クロロプレン
3	"	テフロン(3)	クロロプレン
4	"	テフロン(1)	テフロン(1)
5	"	ブチルゴム	ブチルゴム
6	"	天然ゴム	クロロプレン
7	"	天然ゴム	天然ゴム

テフロン(1)……テープ巻加熱隔着処理
テフロン(2)……テープ巻シリコンワニス処理ガラス糸下巻
テフロン(3)……テープ巻テフロンワニス処理ガラス糸下巻

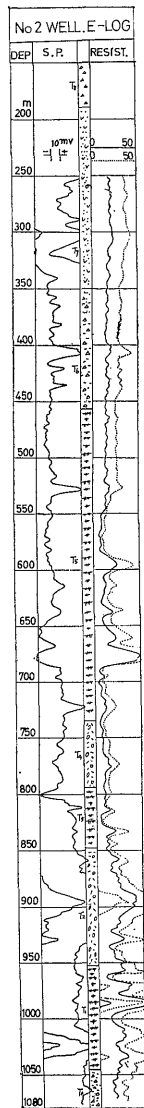
(b) テストの結果(絶縁試験 7時間後)

No.	絶縁抵抗 MΩ/km			
	1芯	2芯	3芯	4芯
1	45600	45600	45600	45600
2	0.17	107	0	0
3	0	0	0	0.02
4	亀裂 0	0	0	0
5	(破壊)			
6	(")			
7	(")			

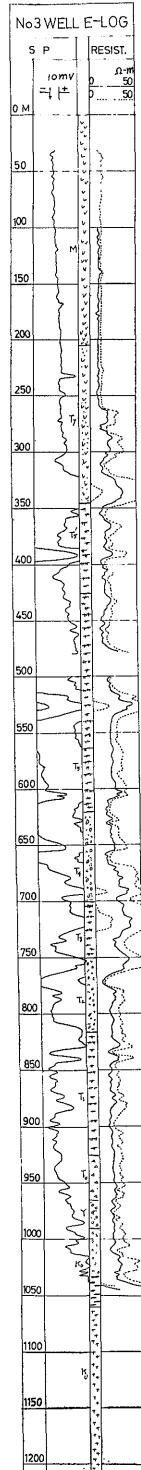
銅線とステンレス鋼線の撚合せとし坑張力を 450kg以上とした。シース材料には試験の結果と経済性を考慮に入れクロロプレンゴムを使用し, 劣化の状況に応じてシースのみ取替を行なうようにした。使用の結果では2本を交互に使用し, 5坑井約70回の測定中シース劣化による取替1回, 事故其他による接続修理2回を行なった。



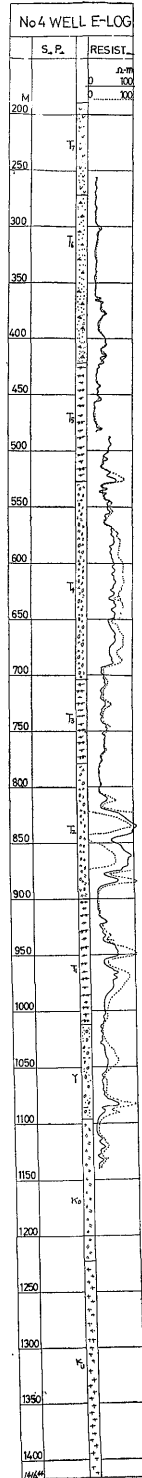
第 4 図



第 5 図



第 6 図



第 7 図

第4表 耐熱電線構成表

線 心 数		4
導 体	公 称 断 面 積 (mm ²)	1.0
	構 成 (本/mm)	銀鍍軟銅 7/0.26 ステンレス 12/0.26
	外 径 (mm)	1.3
テフロン絶縁体厚さ (約mm)		0.4
線 心 外 径 (")		2.1
4 心 撚 合 せ (")		5.1
テフロンテープ巻厚さ (")		0.15
編組がい装厚さ (")		0.5
クロロプレンシース厚さ (")		1.5
標準仕上外径 (")		9.4
最大仕上外径 (mm)		10.0
電 気 試 験	導体抵抗 20°C (Ω/km)	50.8
	試験電圧 (V/1分)	1,500
	絶縁抵抗 20°C (MΩ/km)	1,000
概 算 重 量 (kg/km)		200
坑 張 力 (約 kg)		450以上

(電 極)

比抵抗電極には通常の電気検層用 45m/m 径、5 極の電極を特に耐熱性に改造したものを使用した。本体のゴムライニング部はマイカレックス(合成雲母成型材)またはテフロンとし、ケーブルとの接続部の防水には、テフロン、シリコン系ゴムテープ等のテーピングとOリングを併用した。

2.2 電気検層の結果と考察

電気検層は前記の方法により、各坑井の地層の判定および対比を目的として行なった。第4図~第7図に1号井~4号井の電気検層図を示す。各坑井とも500m付近において遮水ケーシングを施工しているがこの深度までは、検層図によればいずれも全般に15~30Ω-mの比較的比抵抗を示している。コア、スライム等による判定では原岩は上位より、安山岩熔岩(松川安山岩)・石英安山岩・安山岩質凝灰岩・石英安山岩質熔結凝灰岩(玉川熔結凝灰岩)でいずれも強度の熱変質作用を受け粘土化している部分である。特に3号井の260mまでは、最も低い値を示しこの部分は特に強い変質を受けていることが推定される。このような粘土化による比抵抗帯では、強力な熱水または蒸気の産出源となりうる割目の存在は期待できないし、また仮に下部の一部の高抵抗部に割目が存在するとしても、この深度では、試験井

(AR-1, 325M, BR-1号井 450m)において実証されたように地下水流入による温度低下の可能性があり、地熱産出井としては、むしろ十分な遮水を施す必要があると思われる。

次に500m以下においては、各坑井とも全般に50Ω-m~200Ω-mの高抵抗を示す。しかし細かくみれば各坑井ともかなりの相異を示している。すなわち1号井については567~760m, 825m以下, 2号井では850m以下, 3号井では600~770m, 4号井では810~890m, 940~990mにおいていずれも数枚の低抵抗層を含んだ高抵抗層がみられる。このような高抵抗を示す堅硬な岩層に含まれている低比抵抗部が粘土化した岩層が夾在するものであるか、あるいは、割目等の集中した透水性地層であるかの判定は後述の理由により検層図のみよりは困難である。しかし掘進中の逸泥記録、温度曲線の部分的な変化等を考え合わせるとある程度の判別が可能である。たとえば1号井の643~665m, 760~825mの2つの低比抵抗層については、前者は一部のコアは角礫を含む石英安山岩質凝灰岩に相当し、かなりの逸泥(1700l/h)を伴い、また温度分布は泥水による冷却効果と思われる温度低下を示している。これらの事よりこの層は割目の多い透水性地層と判断される。一方後者については、泥岩・硬質頁岩等が交じった凝灰岩層で逸泥、温度低下の現象もあまり認められない。すなわち粘土成分の増加による低比抵抗層で比較的透水性は少ないものと推定される。

検層により得られた見掛比抵抗値(2極法)と岩質との対応を第5表に示す。

第 5 表

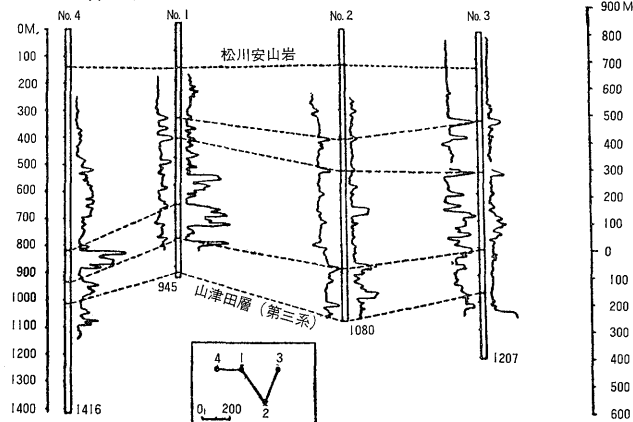
見掛比抵抗	岩 質注1)
Ω-m 10~20	1) 安山岩, 石英安山岩質凝灰岩で粘土化をともなう。 2) 泥岩, 頁岩を含む堆積岩層
20~50	石英安山岩(変質) 熔結凝灰岩(変質)
50~100	石英安山岩質熔岩, 熔結凝灰岩
100以上	熔結凝灰岩熔岩・硬質頁岩・閃緑岩

以上比抵抗曲線についての定性的な解釈を行なった。通常電気検層図からこのような浸透性地層の判定を行う場合には、しばしば S.P. 曲線が有効に使用されている。しかしこれらの地熱坑井では、地質が大きな熱水変質をともなう火山性堆積岩であり、しかも高温による劣化防止のため掘削泥水にクロム泥水を使用し、かつ浸透性とみられる地層においては多量の逸泥を生じている。このような諸条件が S.P. 曲線に与える影響は大きいも

注1) 岩質判定は中村・角による。

のと想定され、解釈に苦しむ点が多々みうけられた。前述のように低比抵抗層を粘土化によるものとするかあるいは割目の発達した透水層とするかの判定は、このS.P. 曲線では困難であった。しかしその偏差値が 100mV を超えるような特徴的な部分もみられ、坑井間の対比にはある程度有効であると思われる。また S. P. については坑井が裸孔仕上げで噴出後の測定が可能であれば、熱水、蒸気の坑井内への流動による電位(Streaming Potential)の変化を利用した割目の探査も一つの方法と考えられる。

電気検層による 4 坑井の対比を第 8 図に示す。



第 8 図 坑井対比図

3. 温度測定

坑井内で測定された地温分布は掘削泥水の影響による一般的な温度低下、逸泥または地層間の地下水循環による部分的なじょう乱などにより真の地温を与えるとは限らない。しかし逆にこれらのじょう乱を細かく測定することによりその原因となる地質構造を求める上に大いに役立つものでありまた数度の測定による回帰曲線より真の地下温度をある程度推定することも可能と思われる。以下松川において施行した測定器および測定結果について述べる。

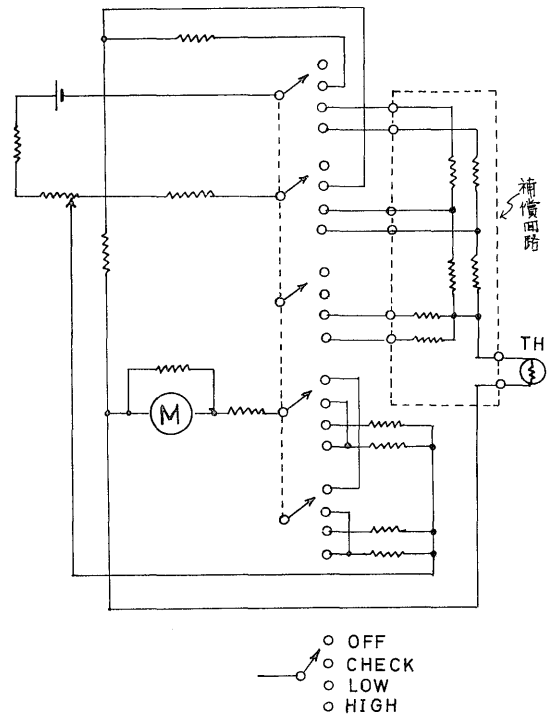
3.1 温度計とその特性

高温の地熱坑井では坑内測定のため長時間泥水の循環を停止することは坑井の保安上困難な場合が多い。したがって測定はなるべく迅速に行なうことが要求される。このため本調査では感熱応答の速いサーミスター温度計を使用した。第 9 図に測定器の構造を示す。

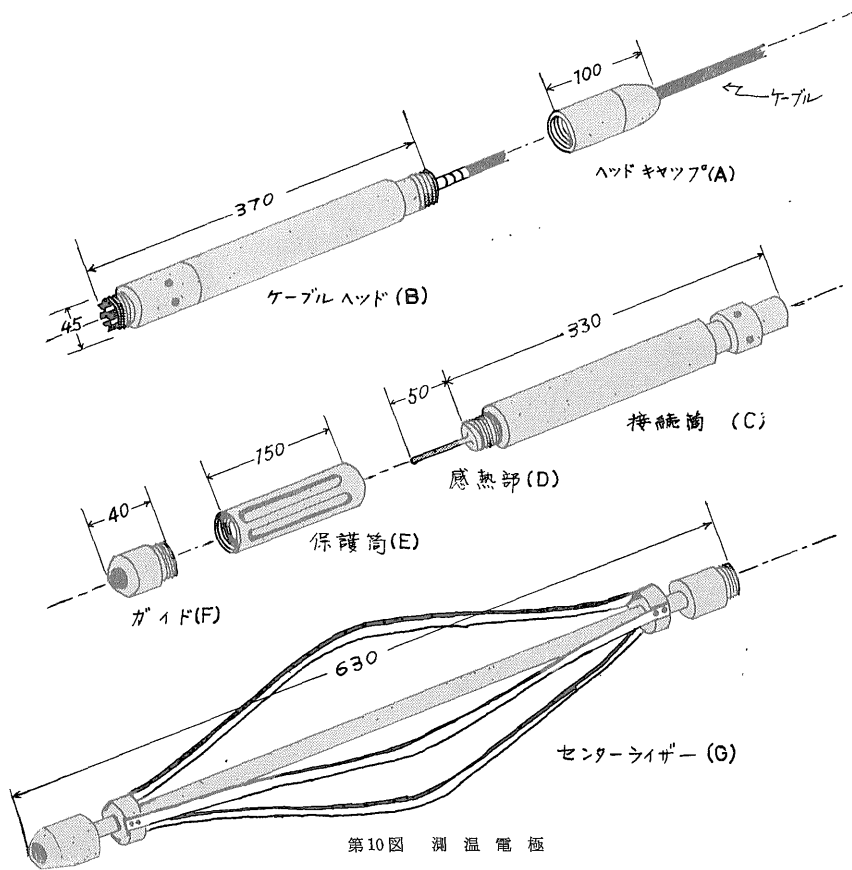
指示計器は図のようなブリッジ回路を用いた温度計で 0~150°C, 150~300°C の 2 レンジとし電線抵抗の補償と素子の互換性用補償回路を取付けた。さらにその出力を検層用オシログラフに接続して連続記録できるようにした。

測温用電極部は第 10 図のように電極接続筒(C)の先端にビード型サーミスター素子(径約 1 m/m)および銀粉入シリコンパテを封入した外径 4.5m/m, 厚さ 0.75m/m 長さ 50m/m のステンレス管の感熱部(D)を取付けた。この感熱部はスリット入り保護管(E)をとおして外部の坑内泥水に接している。またこの感熱部に熱伝導のわるい泥壁が付着しないよう電極の上下に図のようなセントライザー(G)あるいはガードを取付け坑壁に密着して移動するのを防いだ。

またサーミスターの素子抵抗は常温より 250~300°C



第 9 図 温度計配線図



第10図 測温電極

においては通常数 10kΩ より数 100Ω 程度に変化する。したがって一本のサーミスター素子により 0 ~ 300°C の広範囲にわたって均一な精度を得ることは困難である。この場合同一電極内にそれぞれ抵抗温度特性の異なる 2 本のサーミスターを封入し低温部、高温部で切替使用の方がより高精度となる。

次に測定誤差の大きな原因として感熱部の時間遅れがある。すなわち時間遅れ(時定数)が大きくなれば測定速度(電極の移動速度)もおそくなり、かつ測定誤差も大きくなる。感熱部時間遅れの一般式は通常次の式で表わされる。すなわち

$$t = t_1 - (t_1 - t_0)e^{-(hA/wc)\tau}$$

- t_0 : 測温体の初期温度
- t_1 : 被測温体の温度
- h : 感熱部熱伝導率
- A : " 外表面積
- w : " 重量
- c : " 比熱
- τ : " 経過時間

実際にはある温度変化の一定の%に達するに必要な時間で感熱部応答を示すことが行なわれ通常(1)式の $e^{-(hA/wc)\tau}$ の指数が 0.368 の時、あるいは $hA/wc = 1$ の時に達せられる 63.2% の値が用いられ、このときの τ の値

$$\tau = \frac{1}{hA/wc}$$

を時定数 (Time Constant) と呼んでいる。

第 6 表は通常使用されている温度計感熱部と地熱用に設計したサーミスターの時間遅れ、(変化量の 99% に達する時間) と時定数の比較を示したものでサーミスターを使用して 1 秒程度の時定数とすることができる。

3.2 測定方法

測定は前記の測温電極を検層用ケーブルの先端に接続し降下時の温度変化をオツシログラフにより記録した。降下速度は平均 10m/min で特に顕著な変化を示す箇所においては 5 m/min とした。また同時に溜点温度計 (360°C) 数本を付して参考とした。

坑井内の温度は掘削泥水其他の影響により時間的に変

第6表 各種温度計感熱部の時定数

温度計種類	保護管			感熱体種類	温度変化(水中)°C	時間遅れ(sec)	時定数(sec)
	材質	寸法(mm)	充填物				
熱電対	石英	外径 17.8 内径 14.2		3.25mm 熱電対	0-100	687	213.1
"	"	" "		1.02mm "	"	381.0	83.3
"	磁器	外径 19.6 内径 14.9		3.25 "	"	717.0	181.3
"	"	" "		1.02 "	"	369.0	80.76
"	鋼管	外径 22.2 内径 16.0		3.25 "	"	708.0	164.8
"	"	" "		1.02 "	"	405.0	93.18
抵抗温度計	鋼管	外径 5 内径 3		白金	"	13.5	2.7
"	ステンレス	外径 13 内径 8.8		"	"	63	27
"	銅板	45mφ厚さ0.5mm		ニッケル, マンガン	16-60	50	3.3
サーミスター温度計	ステンレス	内径 3 外径 4.5	なし	ビード状サーミスター	13-71	48.7	6.7
"	"	" "	アルミ箔	"	14-65	20.0	4.0
"	"	" "	銅粉-シリコンパテ	"	16-68	8.3	1.5
"	"	" "	銀粉-シリコンパテ	"	13-68	5.7	1.0
"	"	内径 8 外径 10	なし	"	15-69	89.3	14
"	"	" "	銀粉-シリコンパテ	"	16-65.5	20.0	3.2
"	なし	(サーミスター露出)		"	15-100	1.0	0.3

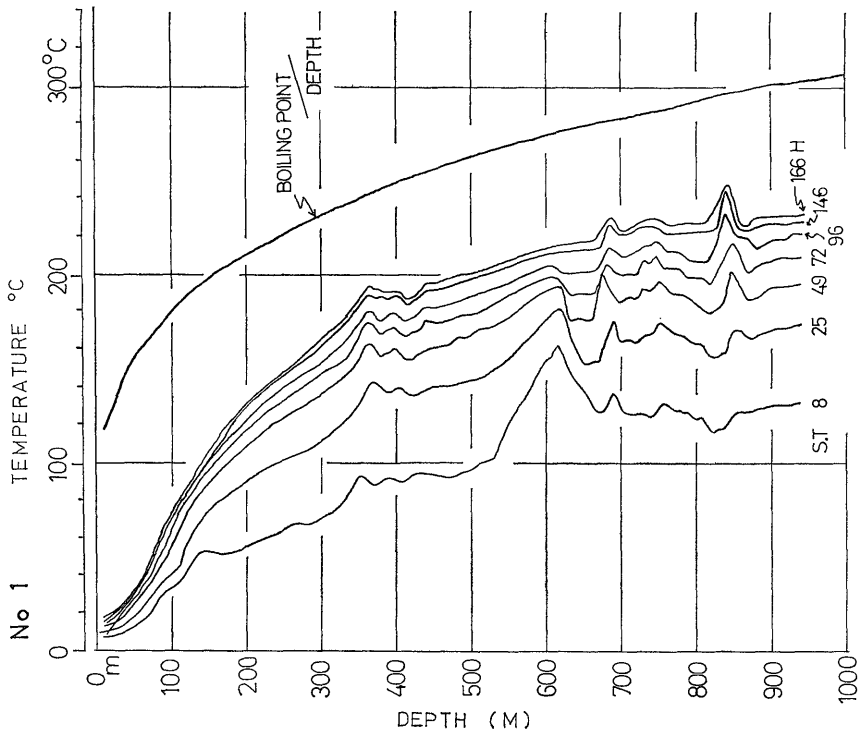
第7表 松川1号井温度測定記録

No.	日時	掘削深度(m)	放置時間(時間・分)	最高温度(°C)	水位(m)	測温時の坑井状況
1	昭38.11.21	596	3. 45	124		197m まで11 ³ / ₈ "ケーシング
2	"	"	8. 30	152		"
3	"	"	11. 30	192		"
4	11.24	612	10. 40	170		"
5	"	"	13. 00	177		"
6	11.27	650	10. 30	182.5		"
7	"	"	14. 00	196.0		"
8	12.21	754	4. 30	171.0		474m まで8 ³ / ₈ "ケーシング
9	12.25	839.0	5. 50	181.0		"
10	"	"	12. 30	209.5		"
11	昭39. 1. 1	945.0	4. 10	161	145	945m ケーシング後清水注入
12	1. 2	"	2. 10	146.0	169	
13	"	"	5. 35	172.5	"	
14	1. 5		8. 00	164.0	147	ポンプ停止以後放置
15	1. 6		26. 30	182.0	110	"
16	1. 7		39. 10	203	95	"
17	1. 8		73. 09	219	91	"
18	1. 9		107. 17	234	84.5	"
19	1.11		147. 05	246	76.5	"
20	1.12		167. 35	250	74.5	"
21	1.14		214. 05			噴気開始

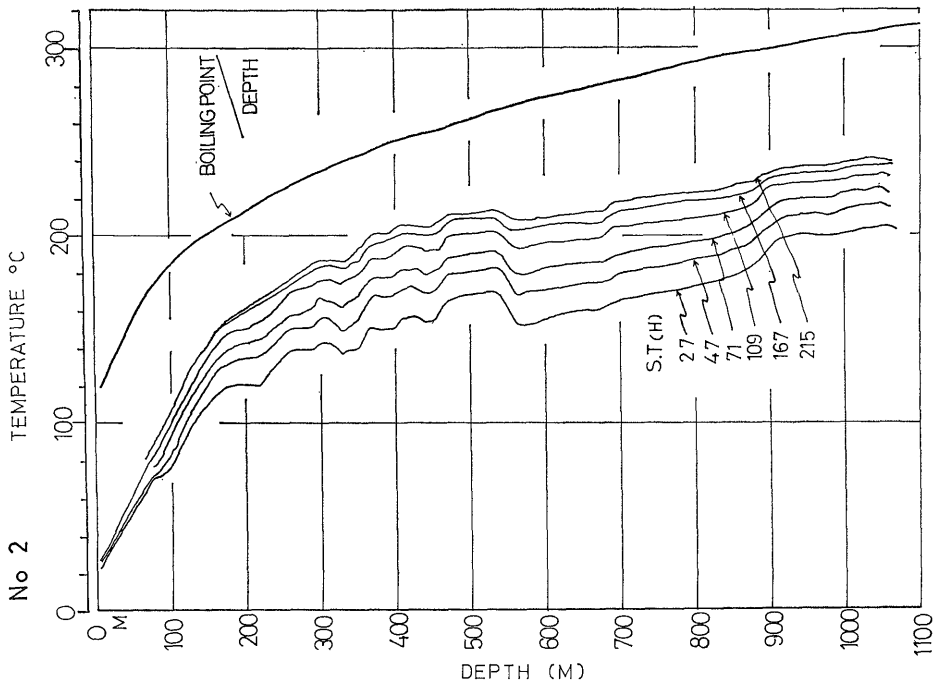
化する。したがって各坑井の温度の比較は同一 Standing Time(泥水循環停止後の経過時間)の値で検討されねばならない。このため各坑井とも S. T. をかえて数回の測

定を実施した。例えば1号井については噴気直前まで21回の測定がなされている(第7表参照)。

3.3 測定の結果と考察



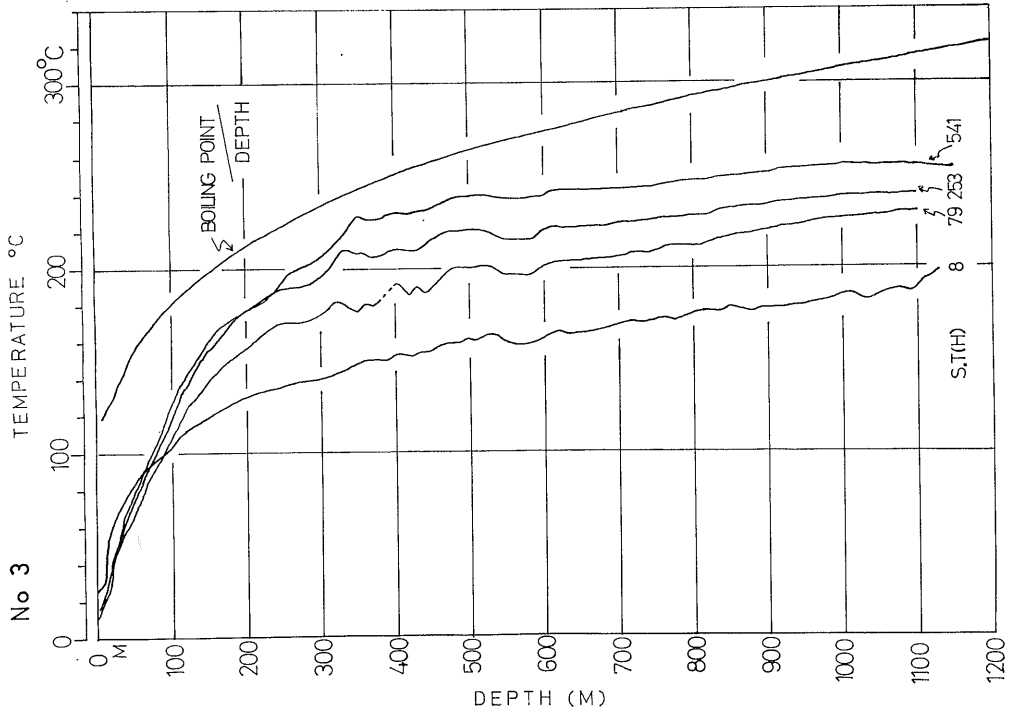
第11図 1号井温度分布図



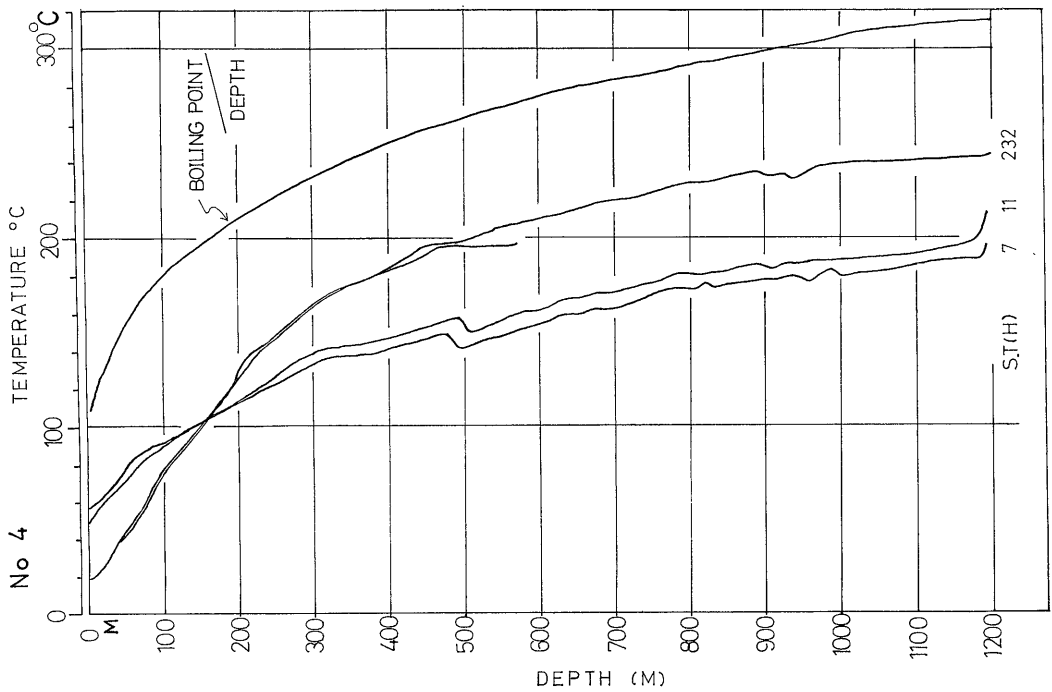
第12図 2号井温度分布図

松川1号井～4号井についての測定結果を第11図～第14図に示す。これらの曲線はいずれも掘削終了後清水におきかえた後、噴出までの間に測定したものである。特

に1号井については変化が大きく、166時間において測定した曲線の3つのピークはいずれも熱源である割目が推定される点である。



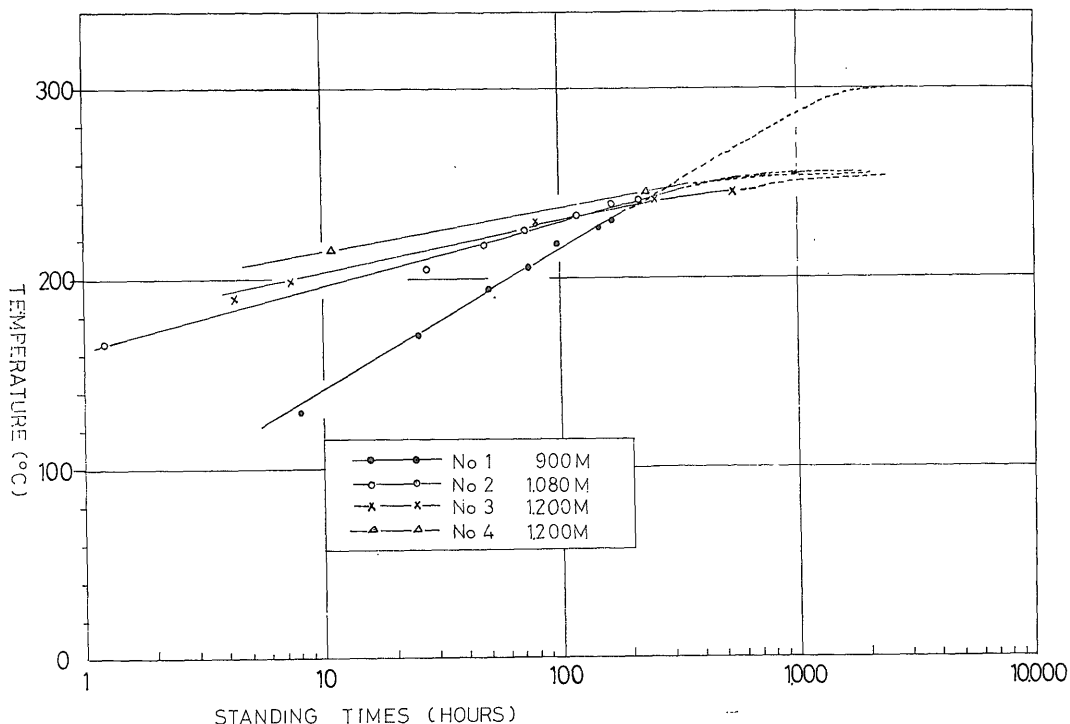
第13図 3号井温度分布図



第14図 4号井温度分布図

第15図は各坑井のある深度における温度の経過時間 (Standing Time) による変化を横軸に S. T. を対数にとりてプロットしたものである。

図によれば4坑井ともほぼ直線上にのることがわかる。1号井のみは他にくらべやや大きな勾配を示すがこれは本井は全量逸水のため多量の注水を行なったための



第15図 各坑井の温度回復曲線

結果と考えられる。

すなわち坑井内の温度が本来の地温々度に回復する時間的な関係は対数的となることを示すものである。またこれらの温度は漸近的に最終値に近づくものでその場合は対数的には変化しない。図の2, 3号井においても最終の2~3点はこの直線よりはずれ平衡値に近づいている。いま大略の最終値を推定するためこれらの点を延長すれば S. T. 3000~5000H において 260°C に漸近する。

また1号井については少なくとも 280~300°C に近づくと予想される。

4. 結 語

1) 地熱坑井での検層には高温の問題やそれともなう悪条件が重なり測定には種々の困難が伴う。特に熱による電極、電線類の絶縁低下には充分注意を払わねばならない。温度測定についてはサーミスターによる測定のみにつき記したが上記の点よりこの方法では当然限度がある。今回の経験では260°C以上ではまだ問題があるようである。今回の経験では260°C以上ではまだ問題があるようである。このような場合、現在松川において一部使用されているケーブルを使用しない機械的な感熱部による KUSTER 社製温度計の併用が望ましい。

2) 透水性地層の判定については、現段階では、電気

検層のみで一義的に決定するのは困難で、逸泥現象、温度変化等との相関より推定したにすぎない。一般にこれらの坑井では下部(600~800m以下)に存在する高抵抗層(石英安山岩質熔岩・熔結凝灰岩等)中に夾在する低抵抗部に着目して検討を加えている。この点については今後計画している噴気中での温度測定、坑井内流量測定等が行なわれればさらに明確な判断が下せるものと思う。

(昭和43年5月稿)

文 献

- ニュージーランド科学技術研究省編(1960):
ニュージーランドの地熱発電
- 中村久由(1967):松川地熱地域の地下構造,
地熱, no. 10
- 角 清愛(1968):松川地熱地における岩石の熱
水変質, 地質調査所報告, no. 225
- 早川正己・馬場建三(1967):地熱発電, 地下の
科学シリーズ, no. 12