

- ① 地表浅部（ほぼ150m以浅）で約6.0℃とやや高温であるが、その下方で温度が低下する。
- ② 温度分布の全体的傾向は、深度とともに直線的に上昇するが、その温度勾配は4℃/100mと非常に小さい。

GTE-7 が地熱徴候地の近傍に位置しているにもかかわらず温度勾配がきわめて小さいことは、坑内の温度分布がたんに熱伝導のみでなく、対流によって影響されていることが推定される。

3.7.2 熱水系と地殻熱流量

地熱地域は高熱流量を示す熱水の湧出地域によって特徴づけられるが、その周辺に水の浸透地域および低熱流量地域が形成されるのが一般的である。湧出地域は上昇する熱水のため浅部では温度が高いが深部では温度勾配が小さいのに対して、浸透地域は温度が低くかつ温度勾配も小さいのが一般的である。

3.7.3 サンカンペン地域の地熱系モデル

サンカンペン地域の地熱系は、NNW-SSE性のHuai Pong 断層と同方向のBan Mae Khu Ha 断層との間の地域に分布する。地熱徴候地は湧出地域に相当し、その周辺は浸透地域で断層などの破碎帯をつうじて地下水や地表部の温泉水が浸透しているものと推察される。

GTE-7 の温度分布の特徴から、坑井掘削地域は湧出地域の外側に位置する地下水の浸透地域であることが想定される。

3.7.4 地層温度におよぼす浸透水の影響についての試算

GTE-7 地域を浸透地域と想定し、地下水が細い管状通路をとって地表から地下に浸透し、その過程で温度が上昇する場合を計算した。深度Dまで達した浸透水の温度は次式によって求められる。

$$\theta_b = \theta_o + \alpha D - [1 - \exp(-rD)]$$

$$r = 2\pi rh/q\rho c$$

ここで

θ_b : 浸透水の深度Dでの温度

θ_o : 地表における浸透水の温度

- α : 地温勾配
- h : 冷却係数
- D : 浸透深度
- r : 管の半径
- q : 浸透水の流量
- ρ : 浸透水の比重
- c : 浸透水の比熱

上式にもとづいて、浸透水の地下における温度分布を求めた。そのさい、 α 、 r 、 θ_0 、 q を種々に変化させ、GTE-7の温度分布とのマッチングを試みた(表3.7-1)。最終的なマッチングの結果は良好であり、GTE-7の坑内温度分布は、浸透地域の個々のフラクチャーをとおって浸透した水が、周辺の岩石から熱を奪うことによってもたらされたと結論された。

各深度における計算結果とGTE-7の測定温度との比較を示すと次のとおりである。

表 3.7-1 GTE-7 坑内温度マッチング結果

浸 透 深 度	浸透水温度	GTE-7 坑内温度	差
150m : 0m	60 °C	60 °C	0 °C
400m : 250m	63 °C	70 °C	- 7 °C
650m : 500m	71 °C	77 °C	- 6 °C
900m : 750m	83.5°C	87 °C	- 3.5 °C
1,150m : 1,000m	99 °C	97 °C	+ 2 °C
1,227m : 1,077m	104 °C	100 °C	+ 4 °C

3.7.5 GTE-7 の掘削により得られた地熱系モデル

GTE-7の温度分布解析から、掘削地域は地下水の浸透地域であることが推定された。したがって、掘削地域は温度的にみて地熱ポテンシャルが小さいと評価された。

GTE-7 掘削地域と地熱徴候地の間に、地熱貯留層を画するNE-SW性の断層が推定された(Fig. 3.7-1)。

3.8 総 括

GTE-7 の掘削結果から、つぎの貯留層構造が推定された。

- ① 坑井地質調査の結果から、掘削地域は背斜軸部ではなく向斜構造地域であることが判明した。
- ② 電気検層結果と深部電気探査による比抵抗構造を比較した結果、深部電気探査による比抵抗構造は、電気検層の平均的な値より、より低い値で示されていることが知られた。
- ③ GTE-7の温度分布から、掘削地域は地下水の浸透地域であり、NE-SW性断層によって貯留層地域と画されていることが推定された。

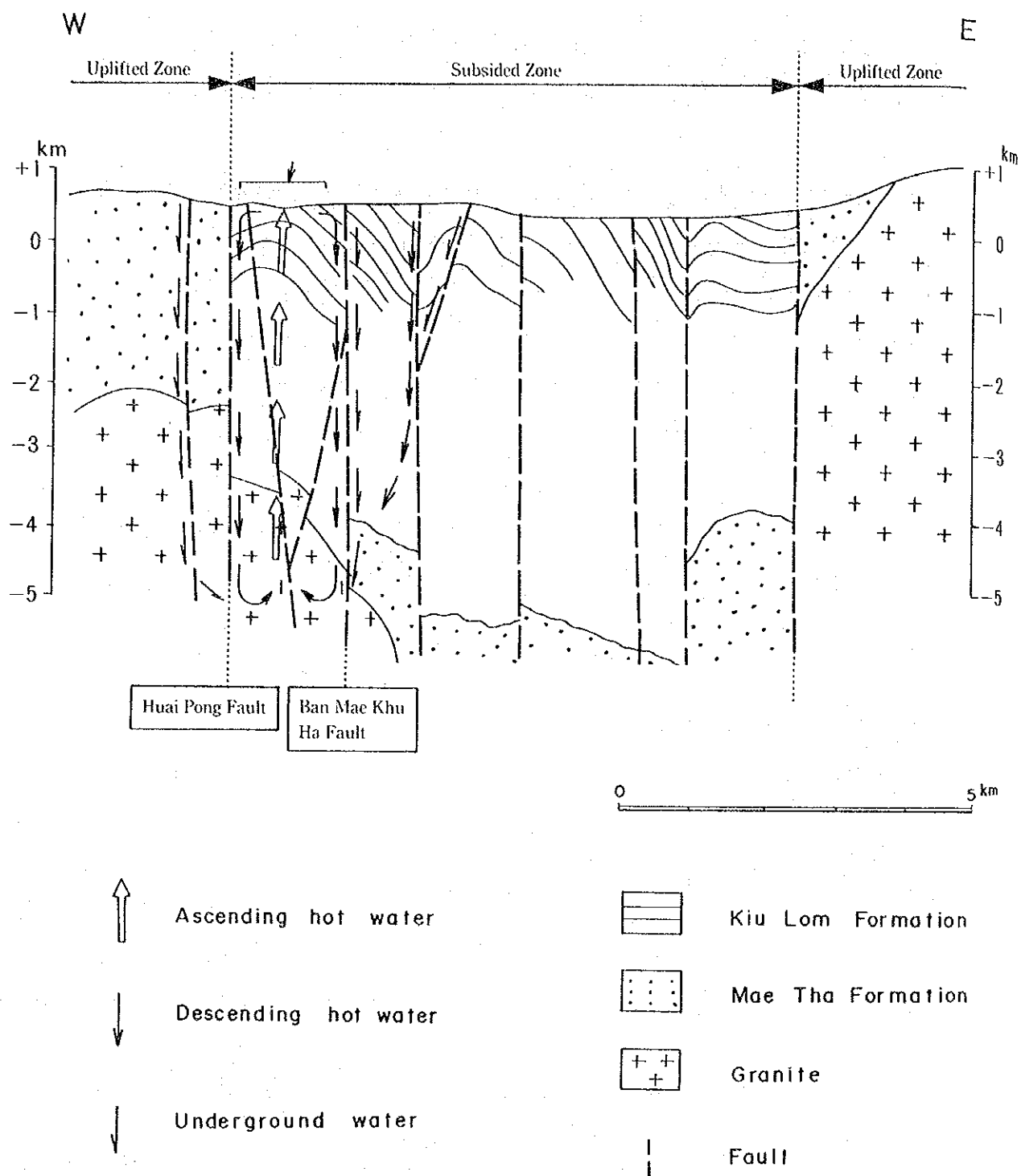


Fig. 3.1-1 Geothermal Model of the San Kampaeng Field

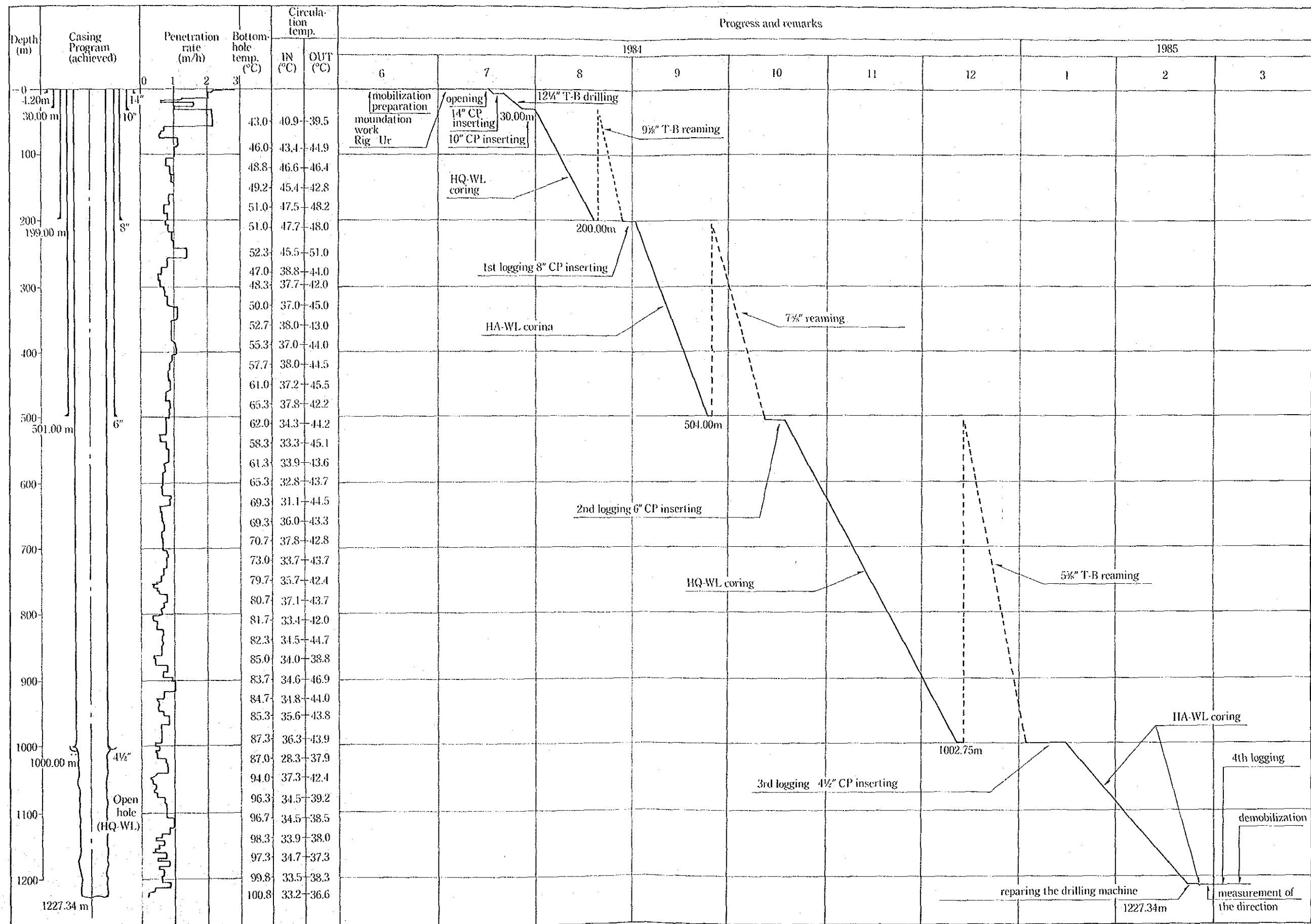


Fig. 3.2-1 Drilling Chart of GTE-7

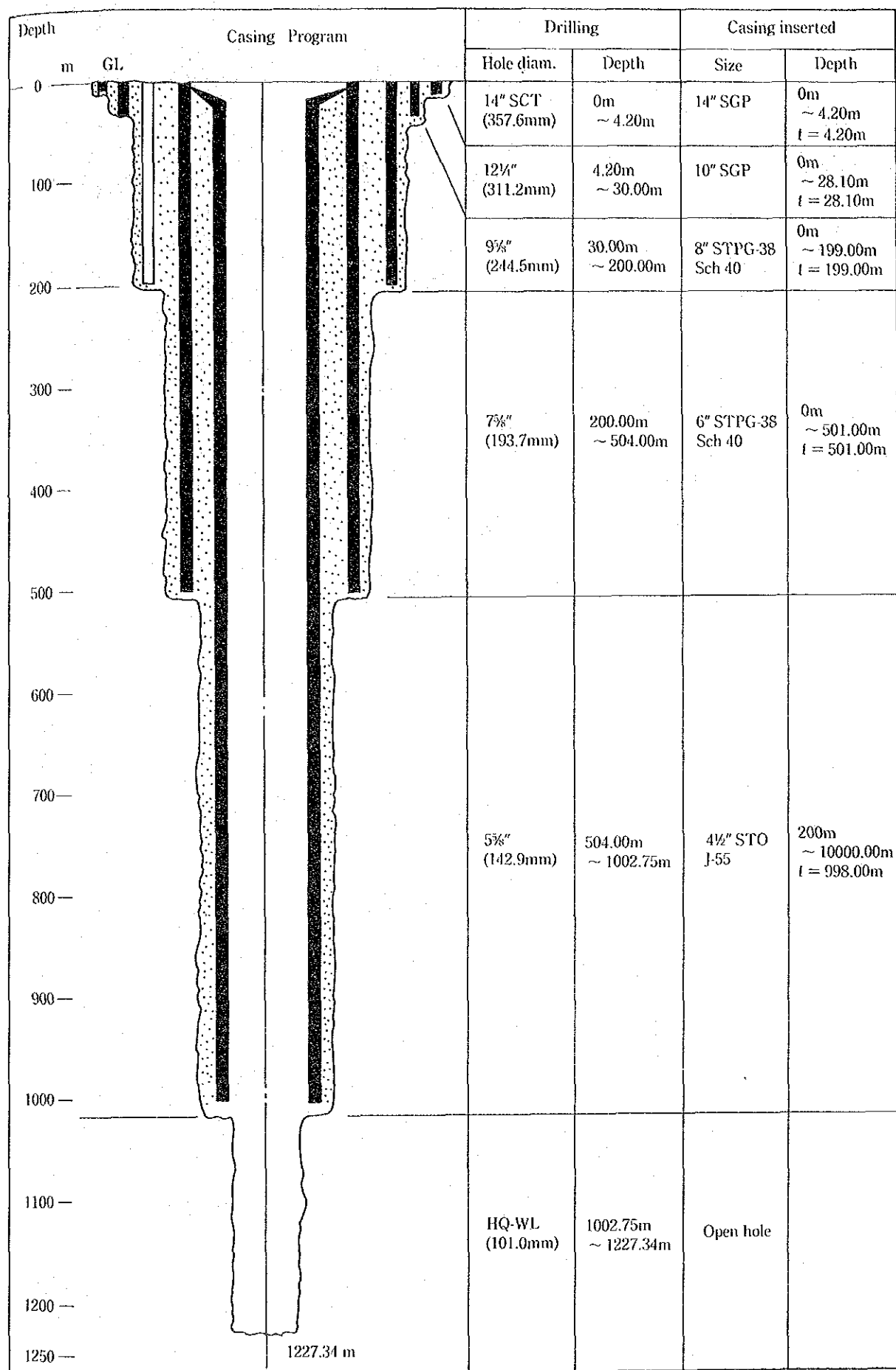
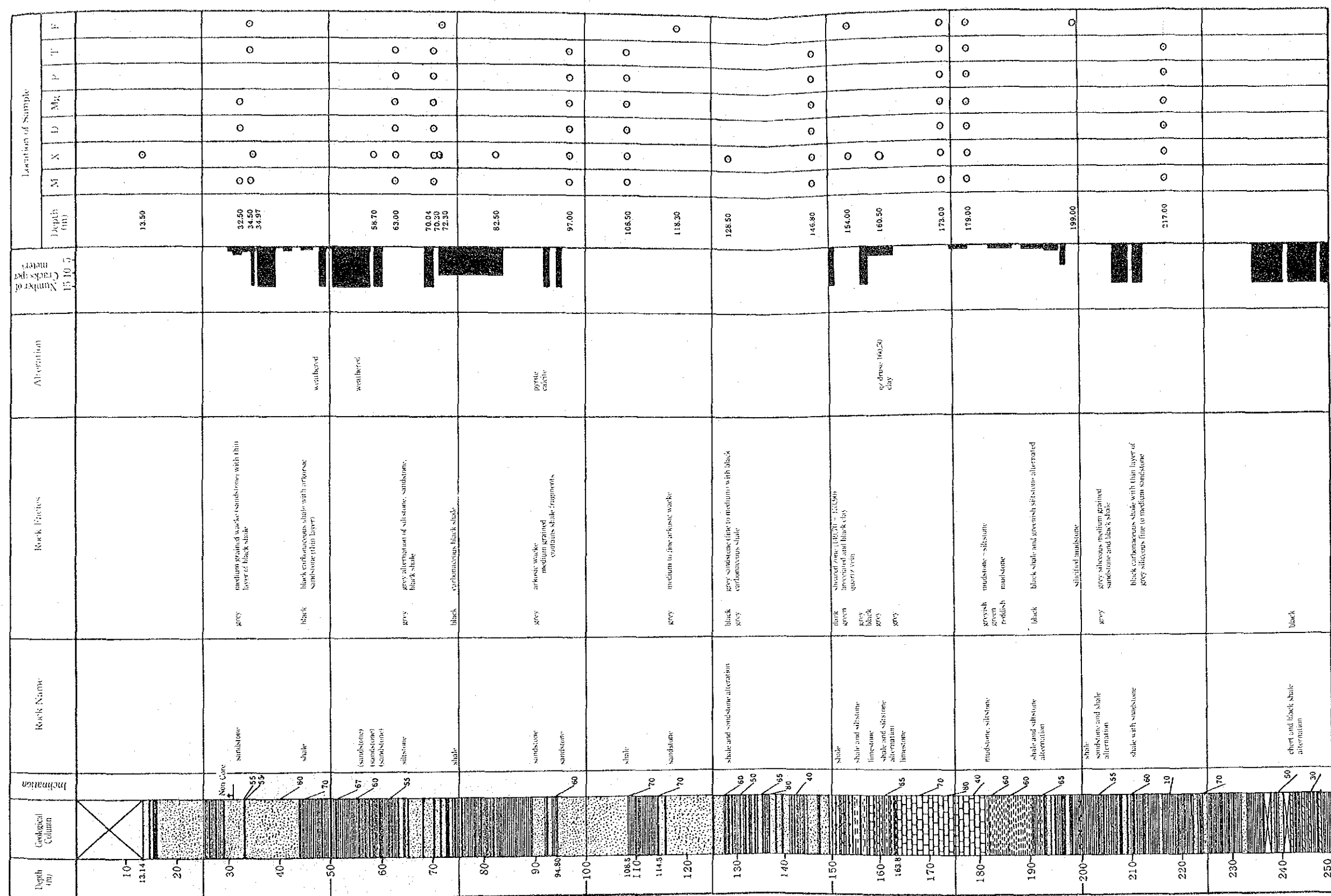


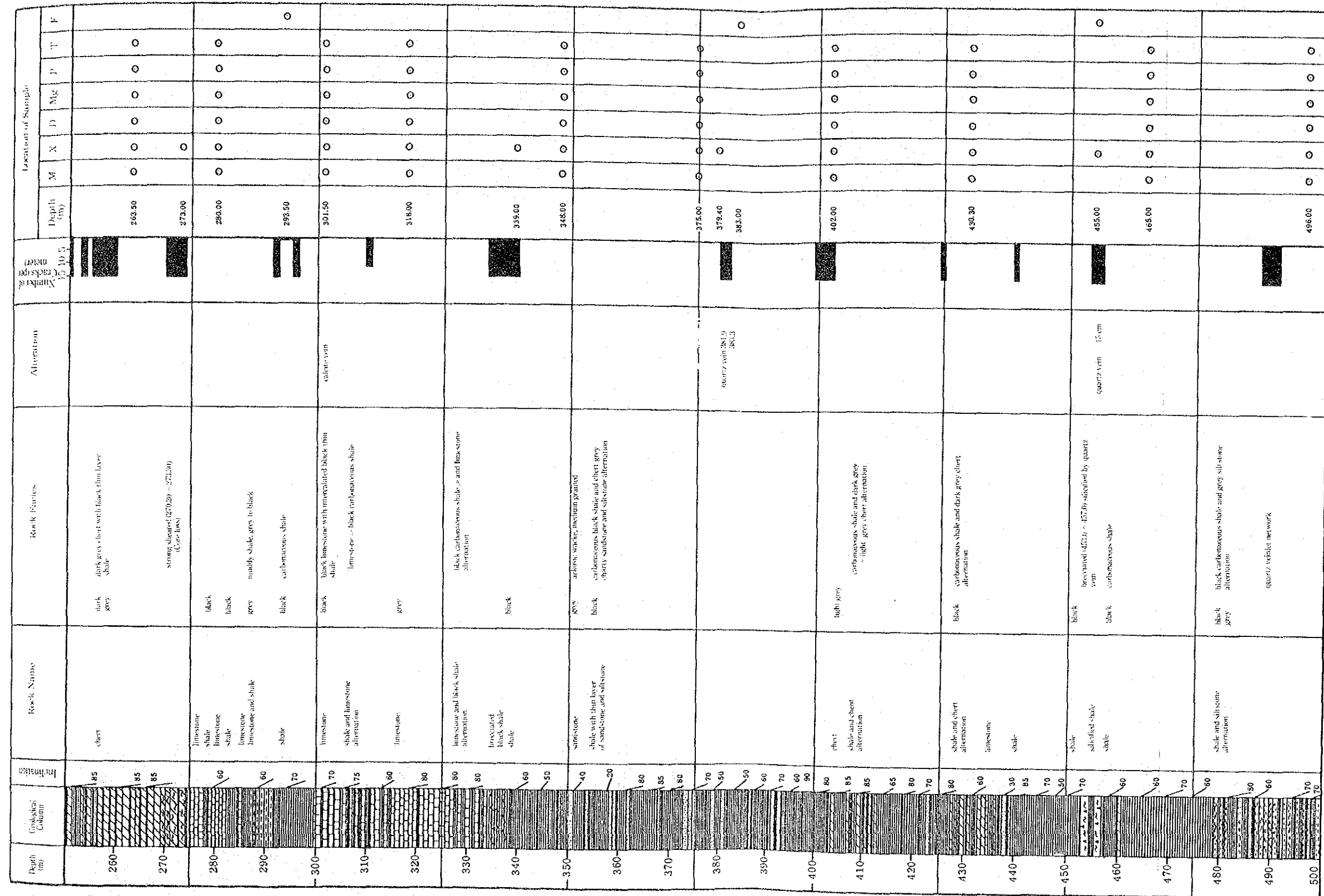
Fig. 3.2-2 Casing Program of GTE-7



Depth: 0m ~250m

- M — Microscopic Observation
 X — X-Ray Analysis
 D — Density Test
 Mg — Magnetism Test
 P — P-wave Velocity Measurement
 T — Heat Conductivity Measurement
 F — Fluid Inclusion Test
- sandstone
 shale
 siltstone
 chert
 limestone
 tuff
 fault breccia
 quartz vein
 bedding

Fig. 3.3-1 Compiled Column of GTE-7 (1)



Depth: 250m ~500m

Microscopic Observation
 M — — — — —
 X — — — — —
 D — — — — —
 Mg — — — — —
 P — — — — —
 T — — — — —
 F — — — — —

Legend:
 sandstone
 shale
 siltstone
 chert
 limestone
 tuff
 fault breccia
 quartz vein
 bedding

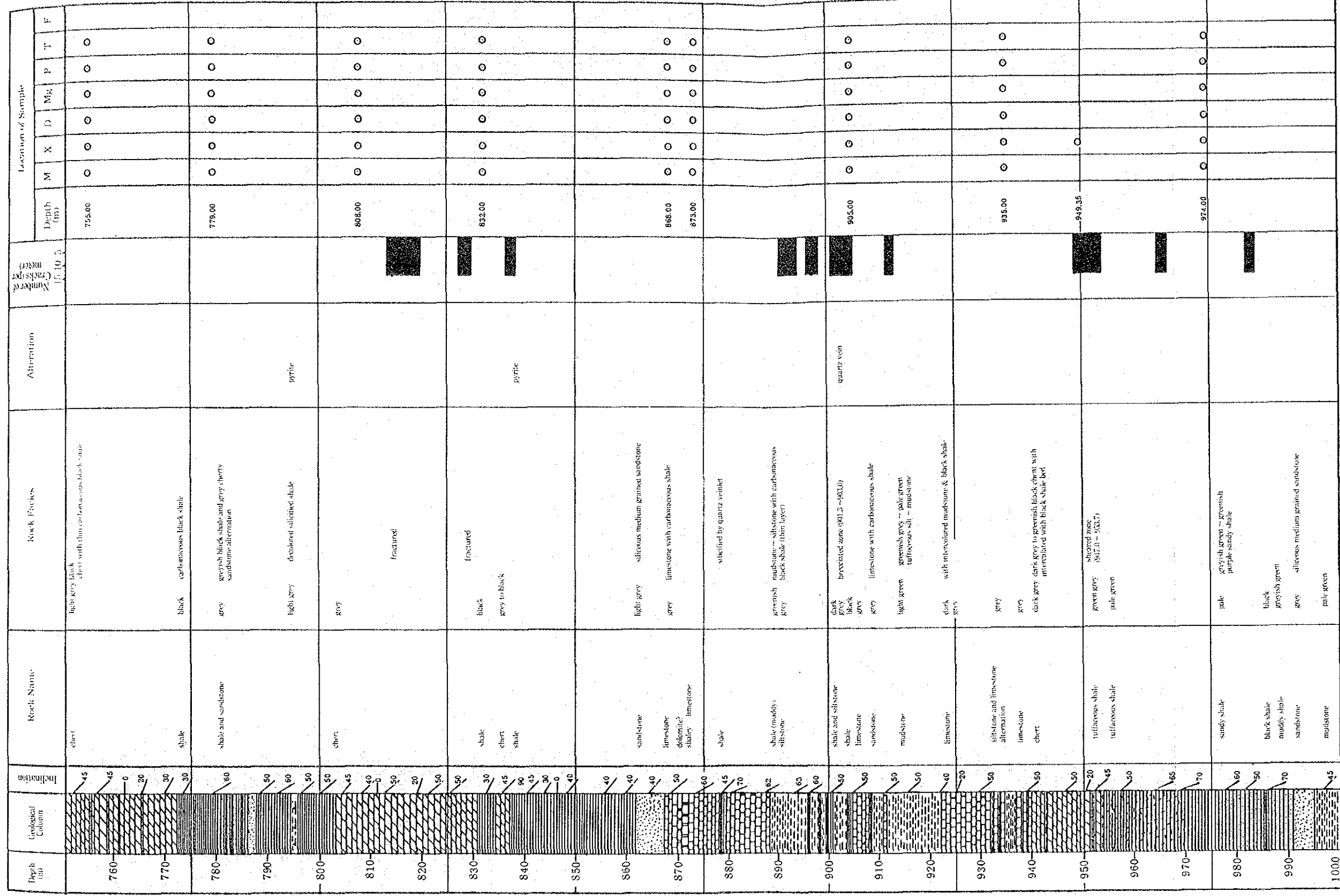
Fig. 3.3-2 Compiled Column of GTE-7 (2)

Depth (m)	Geological Column	Inclination	Rock Name	Rock Features	Alteration	Number of Rock Samples	Location of Sample					
							Depth (m)	M	X	D	P	T
510		60	shale-siltstone	black carbonaceous shale with thin layer of siltstone								
520		60										
530		80	siltstone	grey dolomitic siltstone with vertical crack (25.0 - 332.0)	pyrite		525.00					
540		80	shale	grey			530.00					
550		85	siltstone	black	pyrite		531.00					
560		85	shale	grey								
570		85	limestone	black carbonaceous black shale			543.50					
580		85	shale	grey								
590		85	shale	black			566.00					
600		85	shale	grey								
610		85	shale	black			565.50					
620		85	shale	grey								
630		85	shale	black			610.50					
640		85	shale	black								
650		85	shale	black								
660		85	shale	black			661.00					
670		85	shale	black			663.00					
680		85	shale	black								
690		85	shale	black			689.00					
700		85	shale	black			692.00					
710		85	shale	black								
720		85	shale	black			721.00					
730		85	shale	black								
740		85	shale	black			740.50					
750		85	shale	black								

Depth: 500m ~750m

- Microscopic Observation
- M — X-Ray Analysis
- X — Density Test
- D — Magnetism Test
- Mg — P-wave Velocity Measurement
- P — Heat Conductivity Measurement
- T — Fluid Inclusion Test
- Legend:
- shale
- siltstone
- chert
- limestone
- tuft
- fault breccia
- quartz vein
- bedding

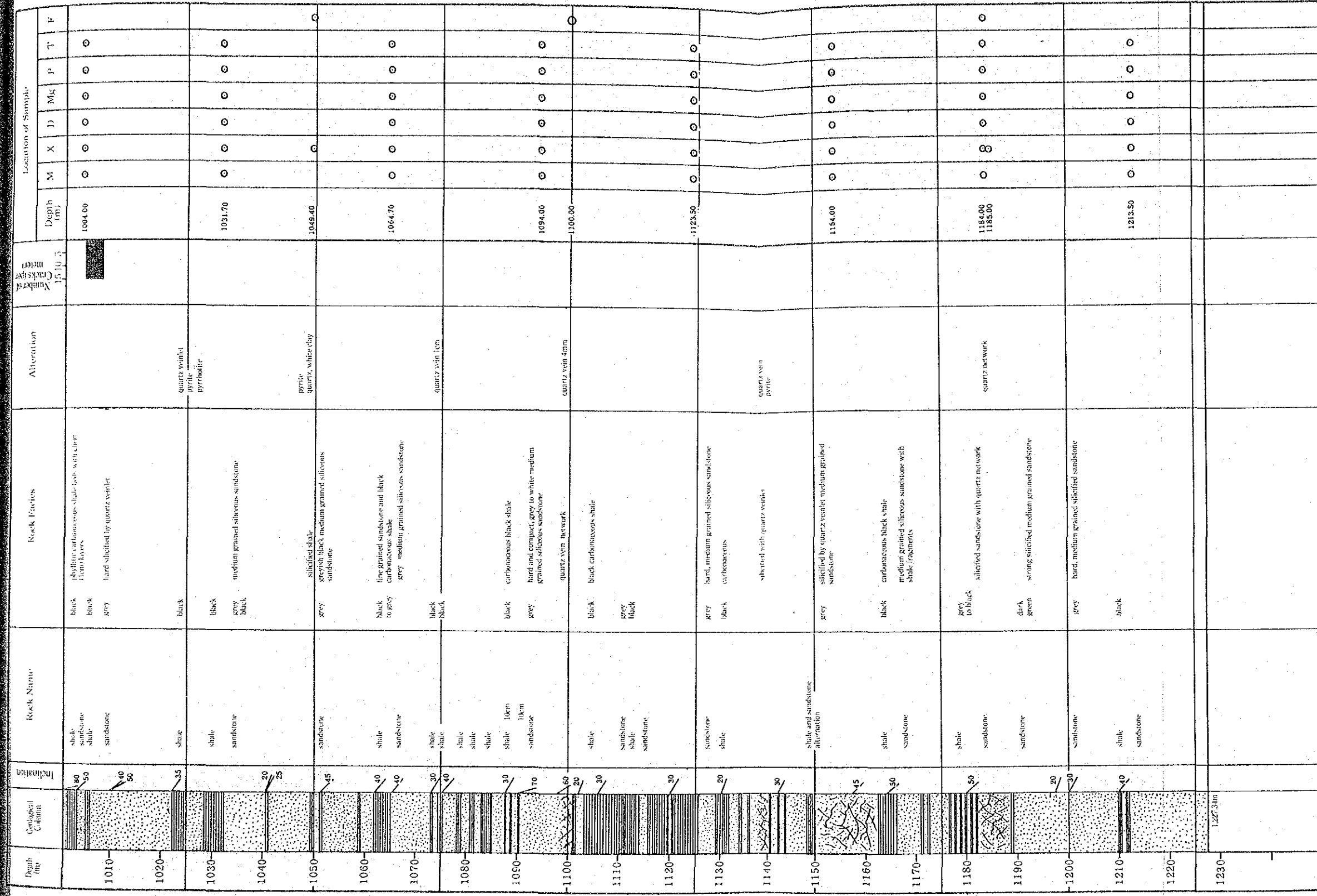
Fig. 3.3-3 Compiled Column of GTE-7 (3)



Depth: 750m ~1000m

- Microscopic Observation
- M - X-Ray Analysis
 - X - Density Test
 - D - Magnetism Test
 - Mg - P-wave Velocity Measurement
 - P - Heat Conductivity Measurement
 - T - Fluid Inclusion Test
 - F -
- Legend:
- sandstone
 - shale
 - siltstone
 - chert
 - limestone
 - tuff
 - breccia
 - quartz vein
 - bedding

Fig. 3.3-4 Compiled Column of GTE-7 (4)



Depth: 1000m ~ 1227.4m

- M — Microscopic Observation
 X — X-Ray Analysis
 D — Density Test
 Mg — Magnetism Test
 P — P-wave Velocity Measurement
 T — Heat Conductivity Measurement
 F — Fluid Inclusion Test
- sandstone
 shale
 siltstone
 chert
 limestone
 tuff
 fault breccia
 quartz vein
 bedding

Fig. 3-3-5 Compiled Column of GTE-7 (5)

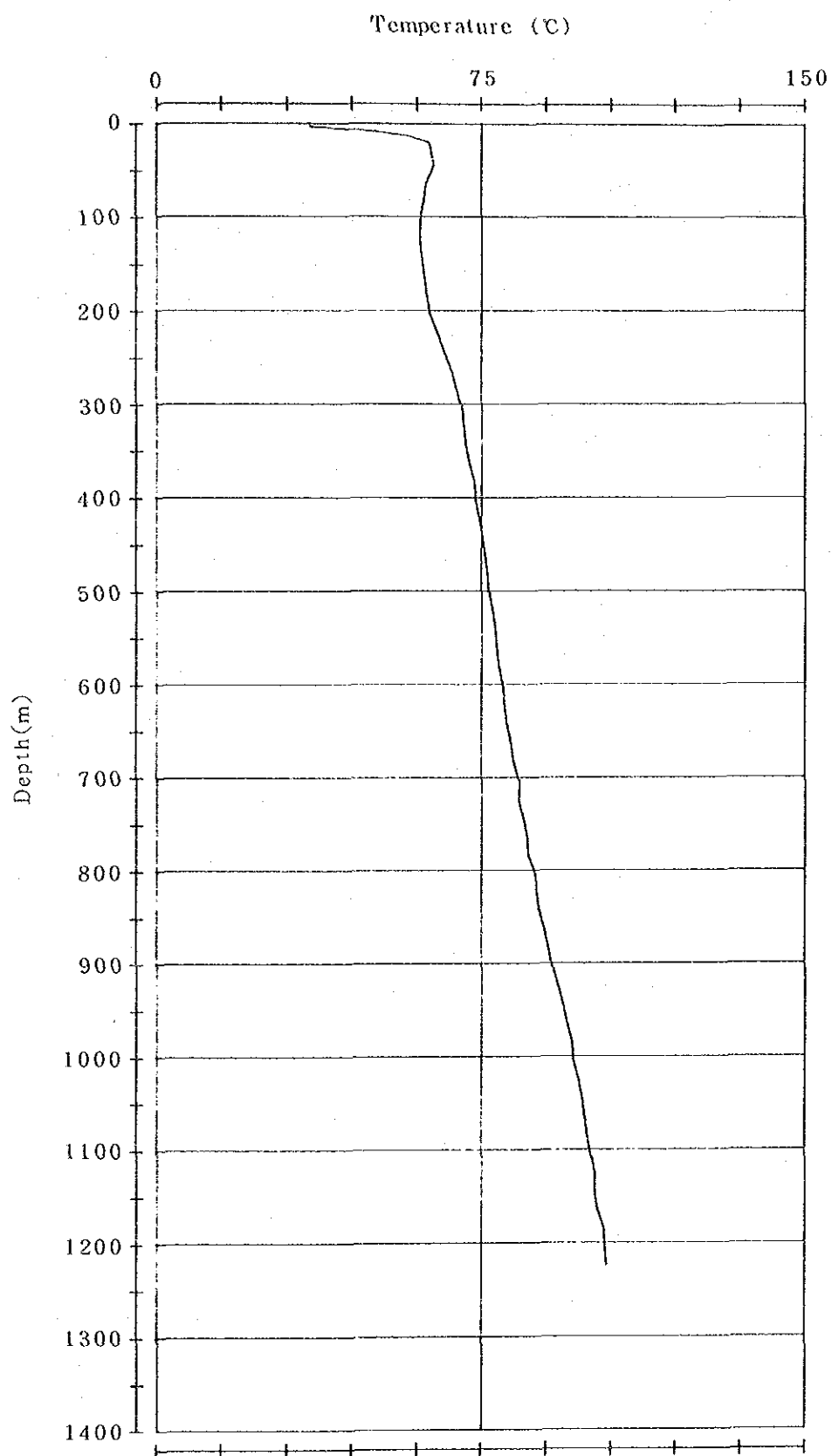


Fig. 3.5-1 Temperature Logging Chart of GTE-7

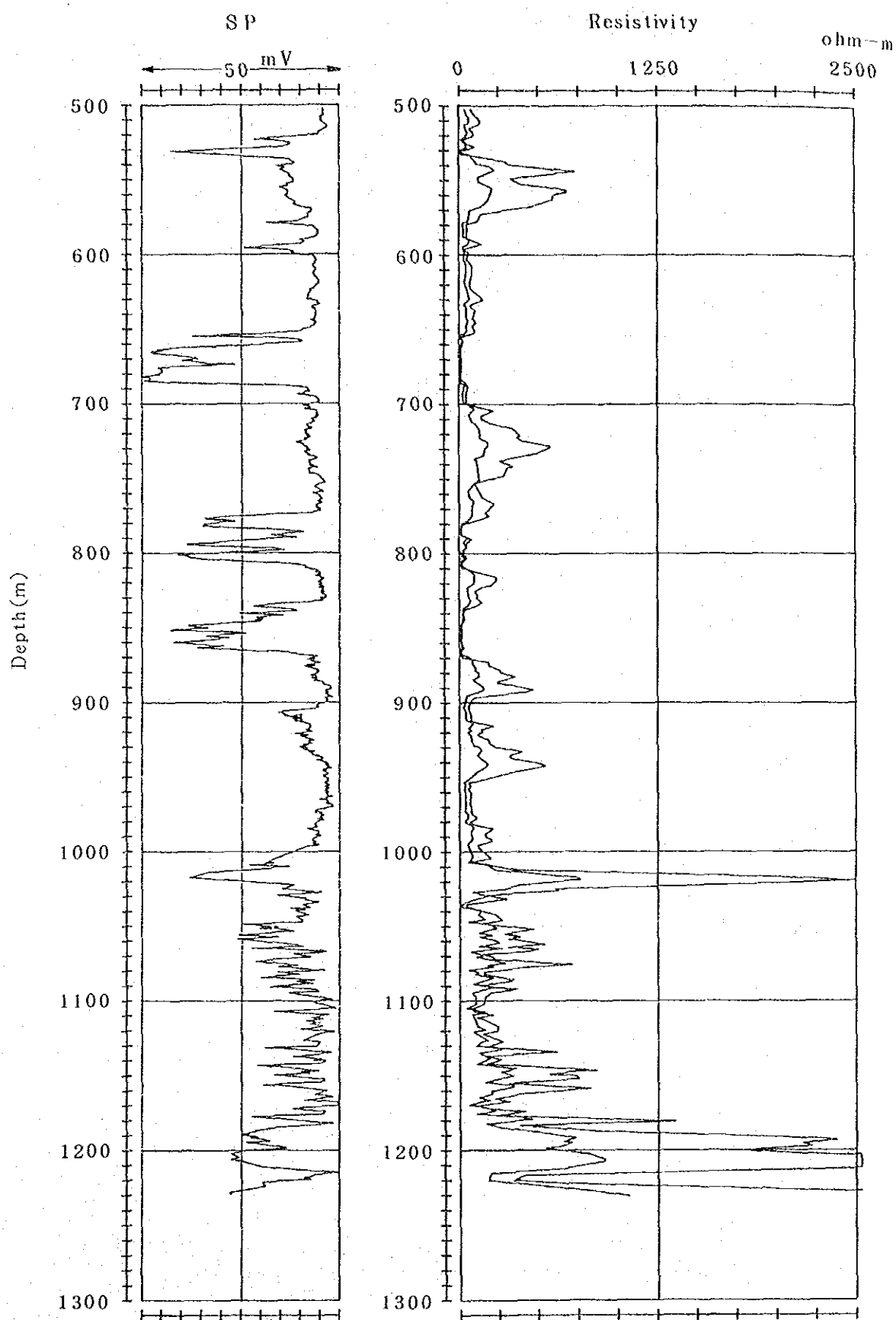


Fig. 3.5-2 Electrical Logging Chart of GTE-7

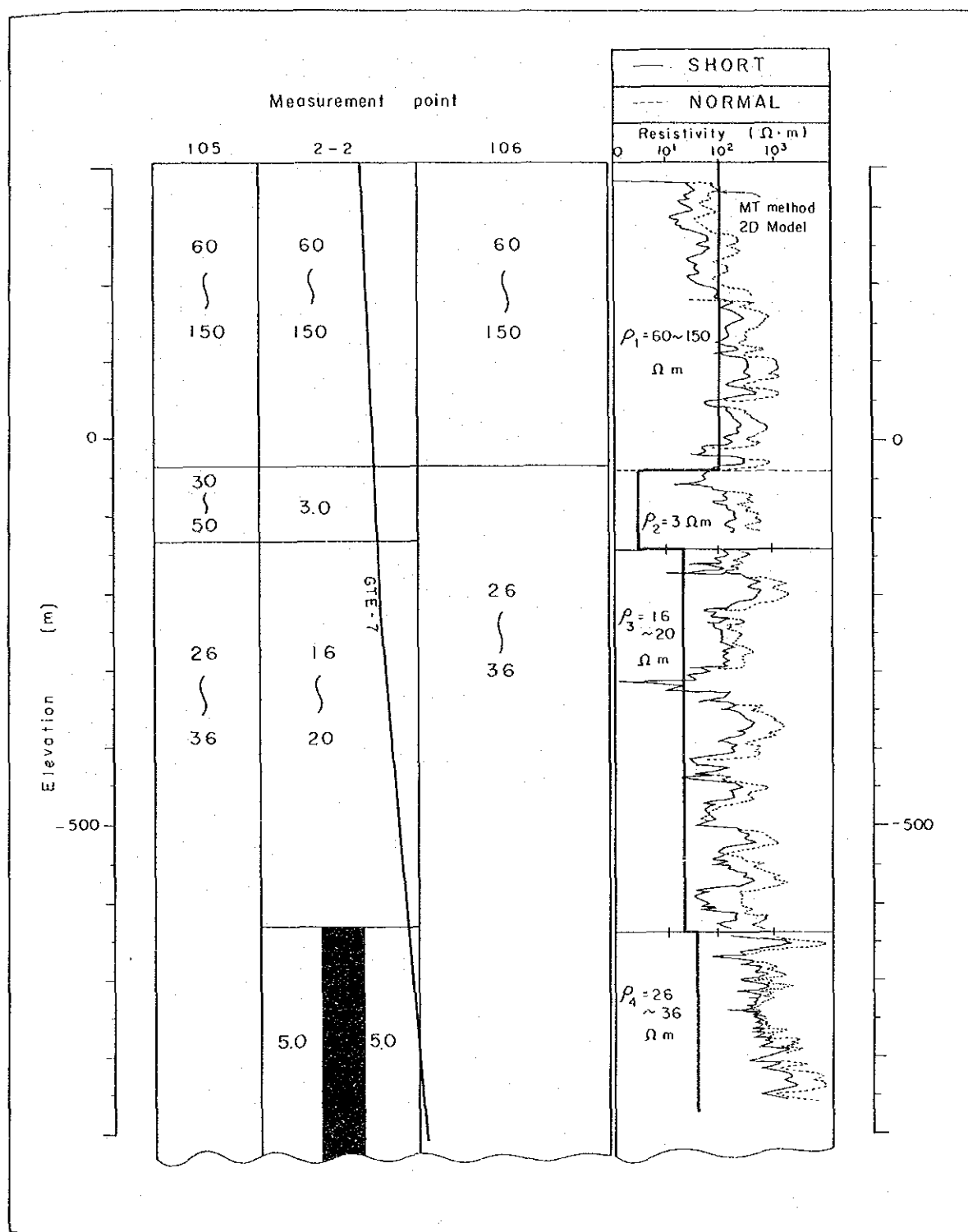


Fig. 3.6-1 Comparison of MT Interpretation Result and Electrical Well Logging Result (GTE-7)

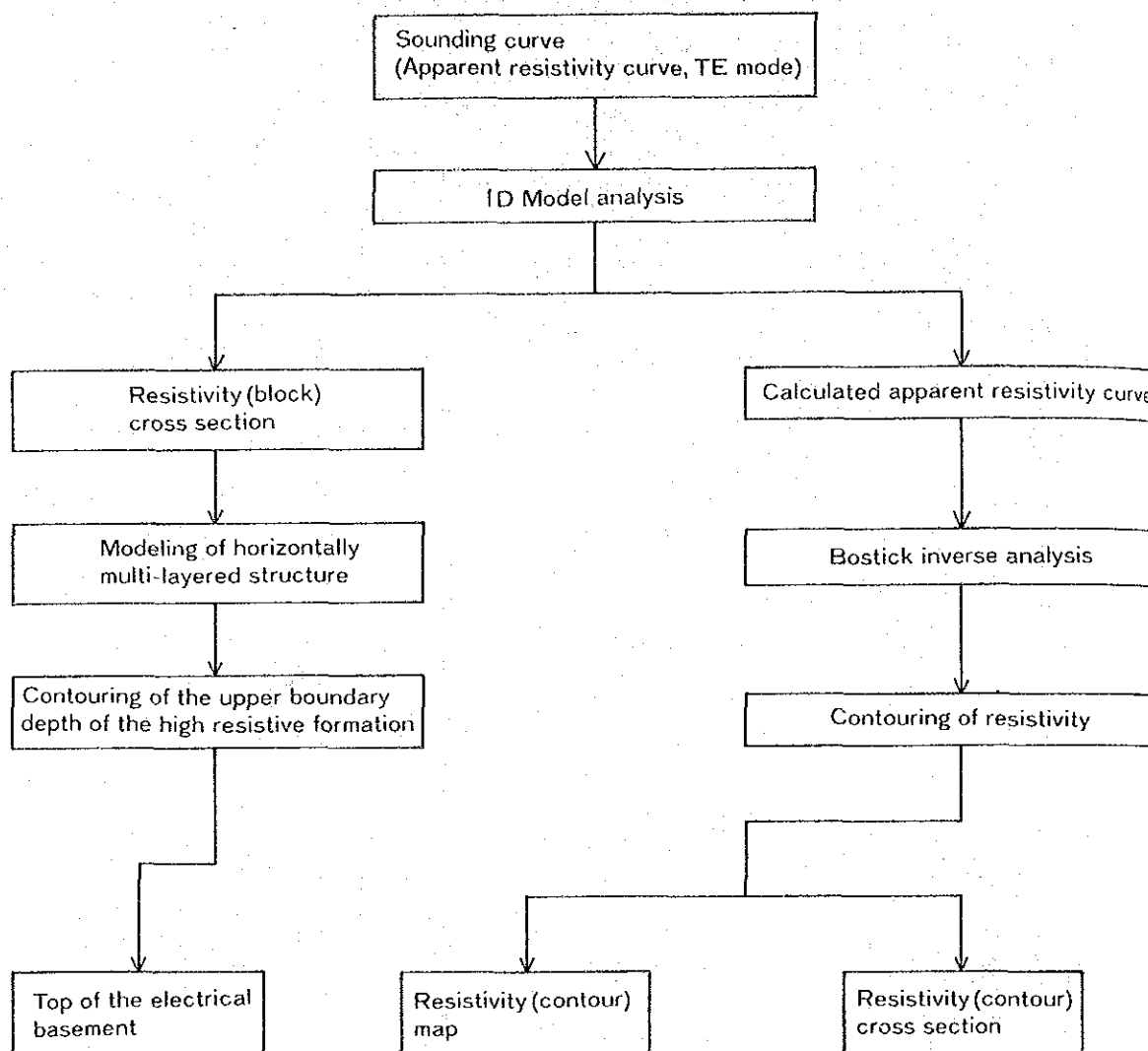


Fig. 3.6-2 Flow Chart of Interpretation (2nd Time)

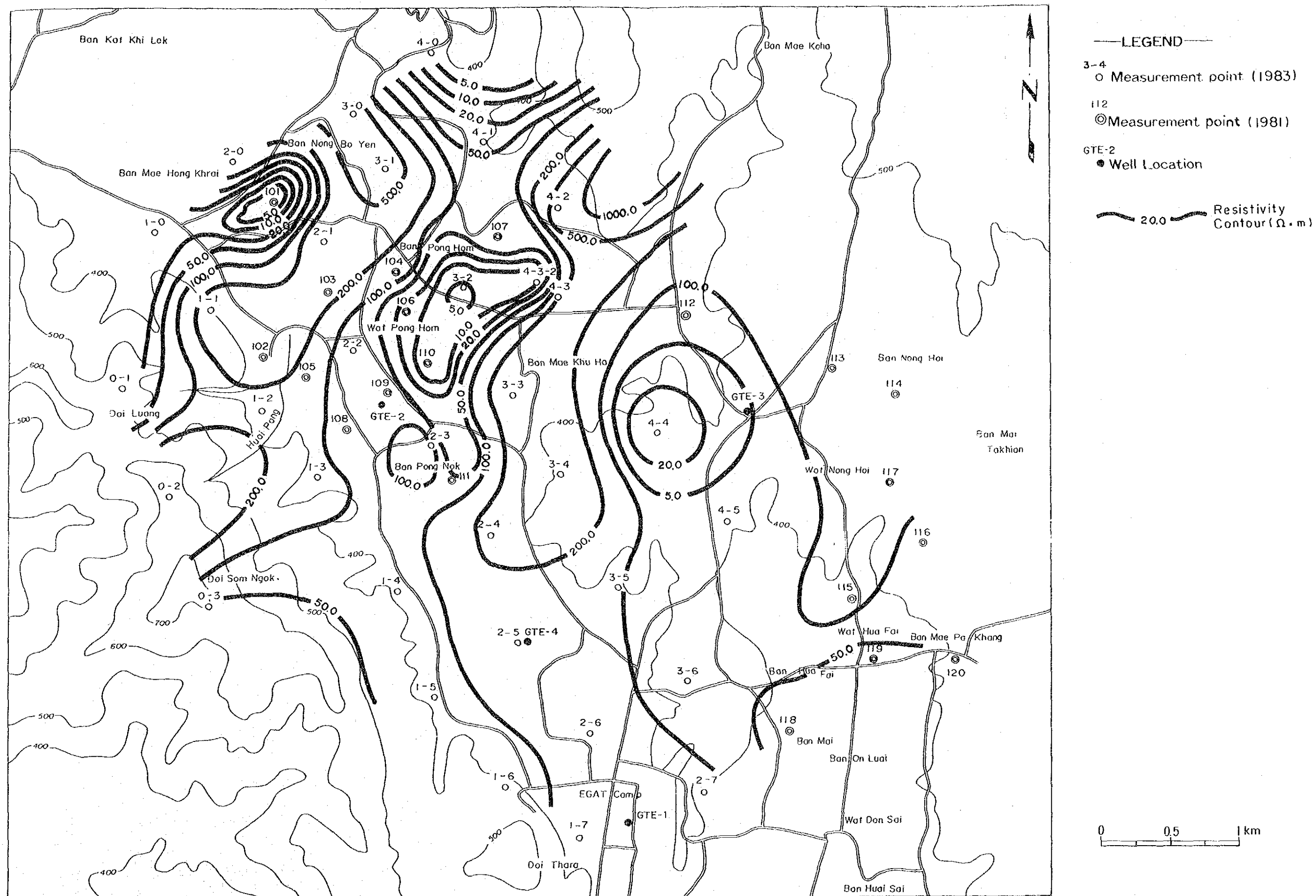


Fig. 3.6-3 Resistivity Map (SL=-200m)

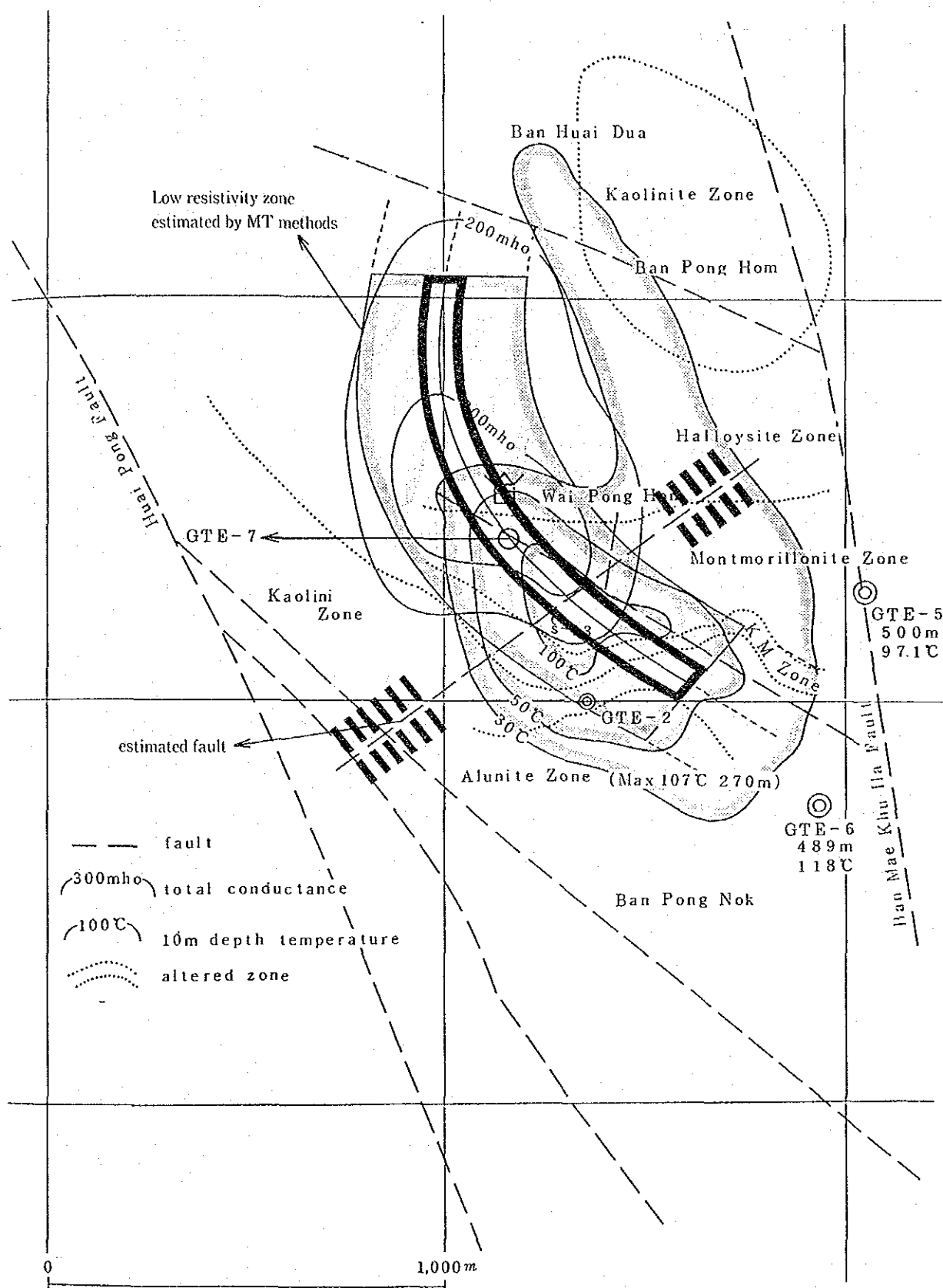


Fig. 3.7-2 Geothermal System Revised by Drilling Data of GTE-7

4. 貯留層解析のための補足調査

4.1 概 要

GTE-7 の掘削により、当地域が地下水の浸透地域であることが推定された。したがって、サンカンペン地域における地熱開発可能性を実証するためには、貯留層の存在範囲をより詳細に把握し、そこに調査井を掘削することによって貯留層の実態を解明することが必要であると判断された。

貯留層はフラクチャー（断裂系）に富み熱水を胚胎することで特徴づけられる。このためフラクチャーの検出を目的としてフィンガープリント法による地化学探査と、高温地域の検出のために100m深地下温度調査が実施された。

4.2 フィンガープリント法地化学探査

4.2.1 調査方法

フィンガープリント法地化学探査は、多成分のガス濃度を測定することにより、ガスをもたらした地層中にフラクチャー（断層、破碎帯等）を抽出する探査である。

フィンガープリント法の特徴は、①土壌ガス集積装置、②パイロリシス質量分析、③多変量統計解析の3種類の技術を組み合わせた総合技術である（Fig. 4.2-1）。

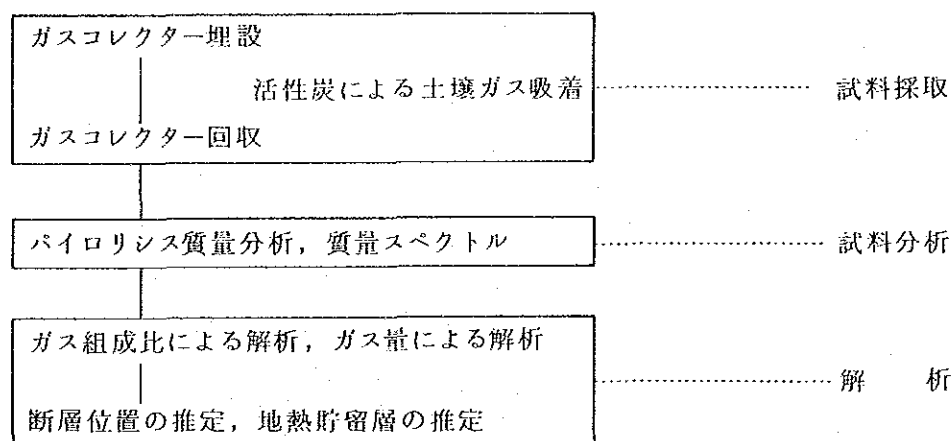


Fig. 4.2-1 Flow Chart of Finger Print Geochemical Survey

長期間ガスを集積し採取することにより、濃度の短期的変動を除去することができる。コンピュータと連動したパイロリシス質量分析計により、土壌ガスは質量数29から240までの成分が迅速に分析される。特定のガス成分だけでなく、分析された全てのガス成分につ

いてその絶対量、相対比、濃度分布パターンを統計解析し、断裂系を抽出する。

断裂系を認識する基準として、高質量ガス発散比、全ガス発散量、ガス成分パターンの類似性解析があげられる。

4.2.2 調査結果

(1) 高質量ガス発散比

本地域の高質量 ($M/Z \geq 120$) ガス発散比は、最低 0 %、最高 44 %、平均 2.3 % である。高質量ガス発散比が 2.5 % 以上の高質量ガス異常帯は、調査地域の中央部から南東端にかけて、NW-SE 方向に延びている。

(2) 全ガス発散量

全ガス発散量は、最低 4,656 イオンカウント (ic)、最大 1,083,756 ic、平均 81,259 ic を示す。100,000 ic 以上の高発散量異常帯は、調査地域の中央部から南東端にかけて NW-SE 方向に分布する。

(3) 異常ガス組成比

高質量ガス異常と高発散量異常を示す土壌ガス試料は、全部で 41 個である。この異常試料の分布状況から、断裂系を推定した。推定された断裂系 (断層) は、NW-SE 性が 4 本、NE-SW 性が 3 本、NS 性が 2 本の計 9 本である。

(4) 多変量解析による類似性解析

20 m 深地温が 70 °C 以上の地熱徴候地からフィンガープリントのモデル試料を選定し、各試料について多変量統計解析によりモデル試料との類似性を解析した。

類似性の尺度が 5 以上の地域は、北西部と南東部に分布する。

(5) 低質量ガス発散型異常

ガス発散がバックグラウンド値 (50,000 ic) 以下の低ガス発散量で、高質量ガス発散比が 1.0 % 以下の低い地域は、フラクチャーが乏しいかまたは変質帯等により土壌ガスの発散がおさえられている地域と考えられる。

4.2.3 判明した断裂系構造

異常ガス組成の分布から、NW-SE 性、NE-SW 性および NS 性の 9 本の断層が推定された (Fig. 4.2-2)。

また全ガス発散量 (Fig. 4.2-3) および高質量ガス発散比の異常帯は、NW-SE 方向の

楕円形を呈し、地温分布との重さねあわせから地熱貯留層の範囲を示すと考えられる。

類似性解析から、北西部の類似性地域は浅部の変質帯を、南東部のそれは深部の貯留層を示唆すると考えられる。

4.3 地下温度調査

4.3.1 温度調査孔の掘削

地下温度調査は、E G A Tの協力により実施された。温度測定のために掘削された調査孔は、深度100mで、本数は10本である。

4.3.2 孔内温度測定

孔内温度測定は掘削終了後、各孔ともほぼ平衡地層温度に達するまで数回にわたって実施された。その結果にもとづいて、100m深の地温分布図が作成された。

4.3.3 地温分布と断裂構造の関係

100m深地温分布とフィンガープリント法から推定された断層分布を重ねあわせた結果、つぎの貯留層構造が明らかになった (Fig. 4.3-1)。

- ① 70℃の高温帯はNW-SE性の断層に挟まれた地域に位置し、その延びの方向は断層ときわめて調和的である。
- ② 高温帯の北側への延びはNW-SE性の断層によって遮断されており、この断層が高温域 (熱水湧出域または貯留層範囲) と低温域の境界をなしていると想定される。
- ③ 90℃以上の高温帯は、地熱徴候地と南東部の2ヶ所に分布する。フィンガープリント法によるガス異常帯の分布と高温帯の分布から、地熱貯留層の存在範囲はNW-SE性およびNE-SW性断層にはさまれた幅約500m、長さ約1km以上の地域と推定される。

4.4 総括

貯留層解析のための補足調査により、サンカンペソ地域地下温度分布における高温帯、ガス濃度異常をもたらす断層構造が明らかになった。このデータにもとづき、本地域の地熱貯留層の範囲は現在の地熱徴候地をふくむ、幅約500mおよび長さ約1kmの地域と推定された。

地熱流体の温度は、実測の最高温度が深度 20m で 120℃ であり、地化学温度計による推定温度が 160~200℃ を示す。このことから通常の地熱発電あるいはバイナリー発電に必要な高温流体が存在する可能性が指摘される。

以上のデータからみて、サンカンペン地域の地熱開発の可能性を評価するために、調査井を掘削し、貯留層のフラクチャー分布・透水性・地熱流体の温度等を把握することが必要と考えられる。

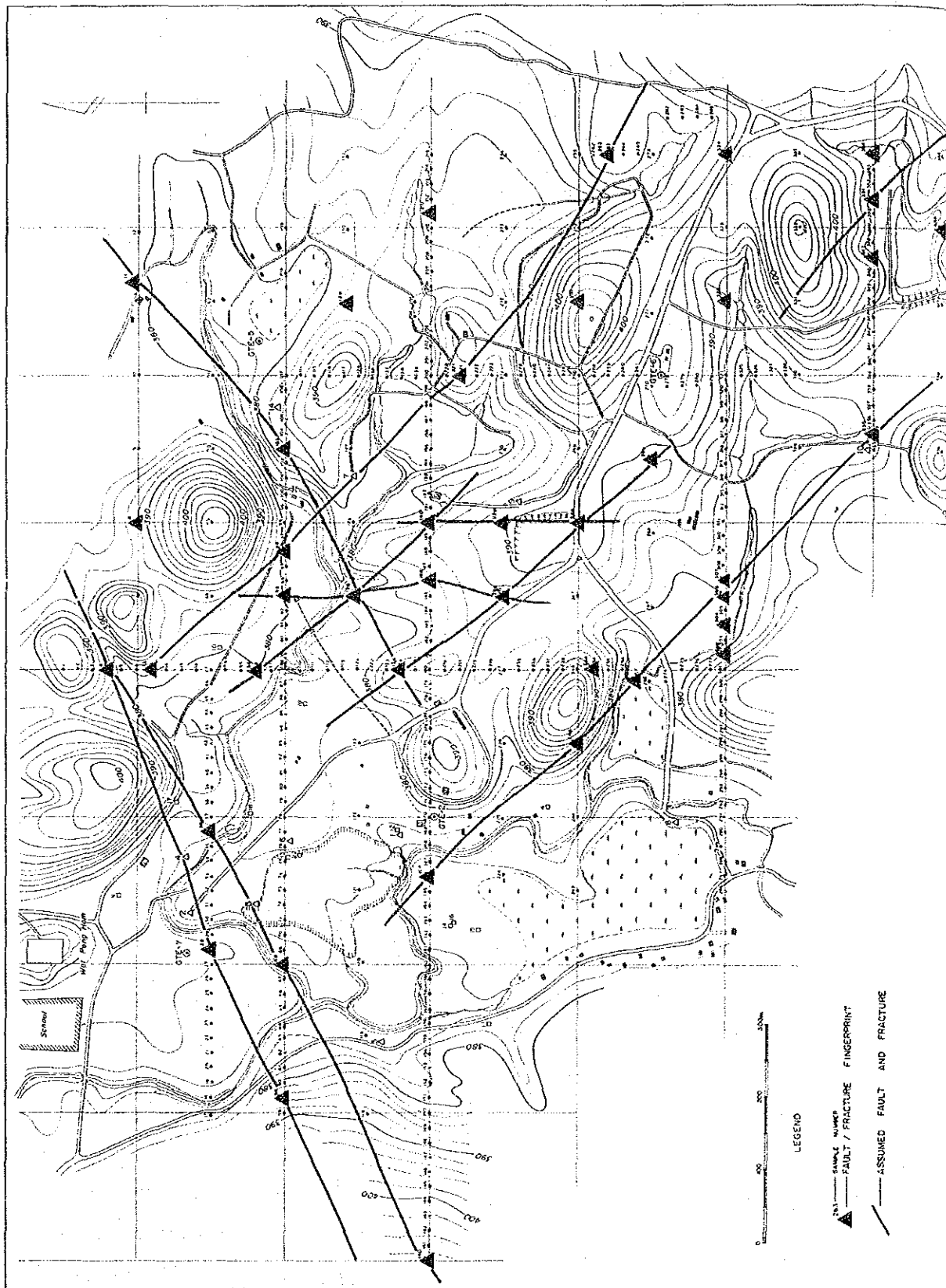


FIG. 2.2.2. Pattern and Pattern of Fault Fractures

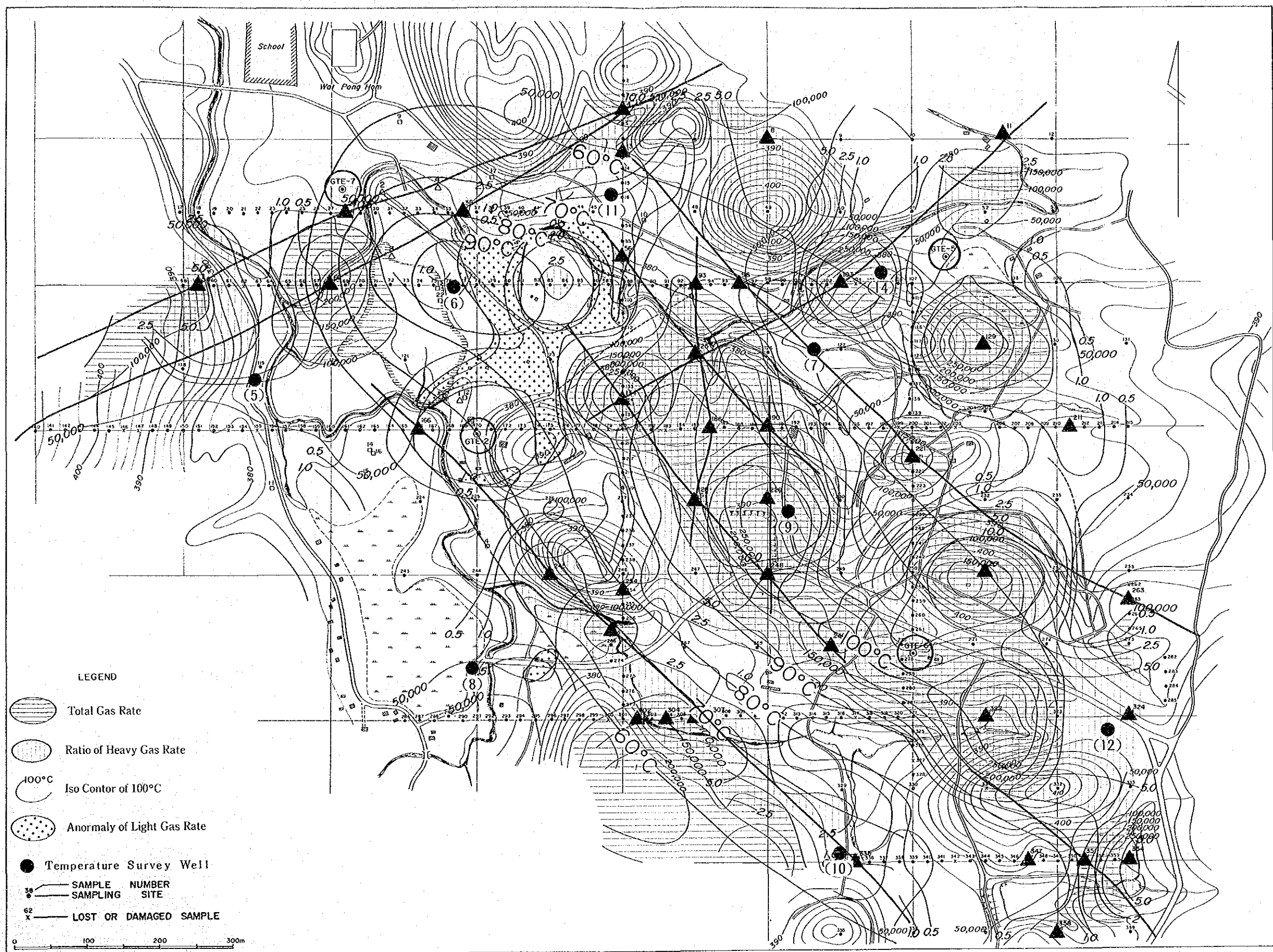


Fig. 4.2-3 Gas Concentration Anomaly

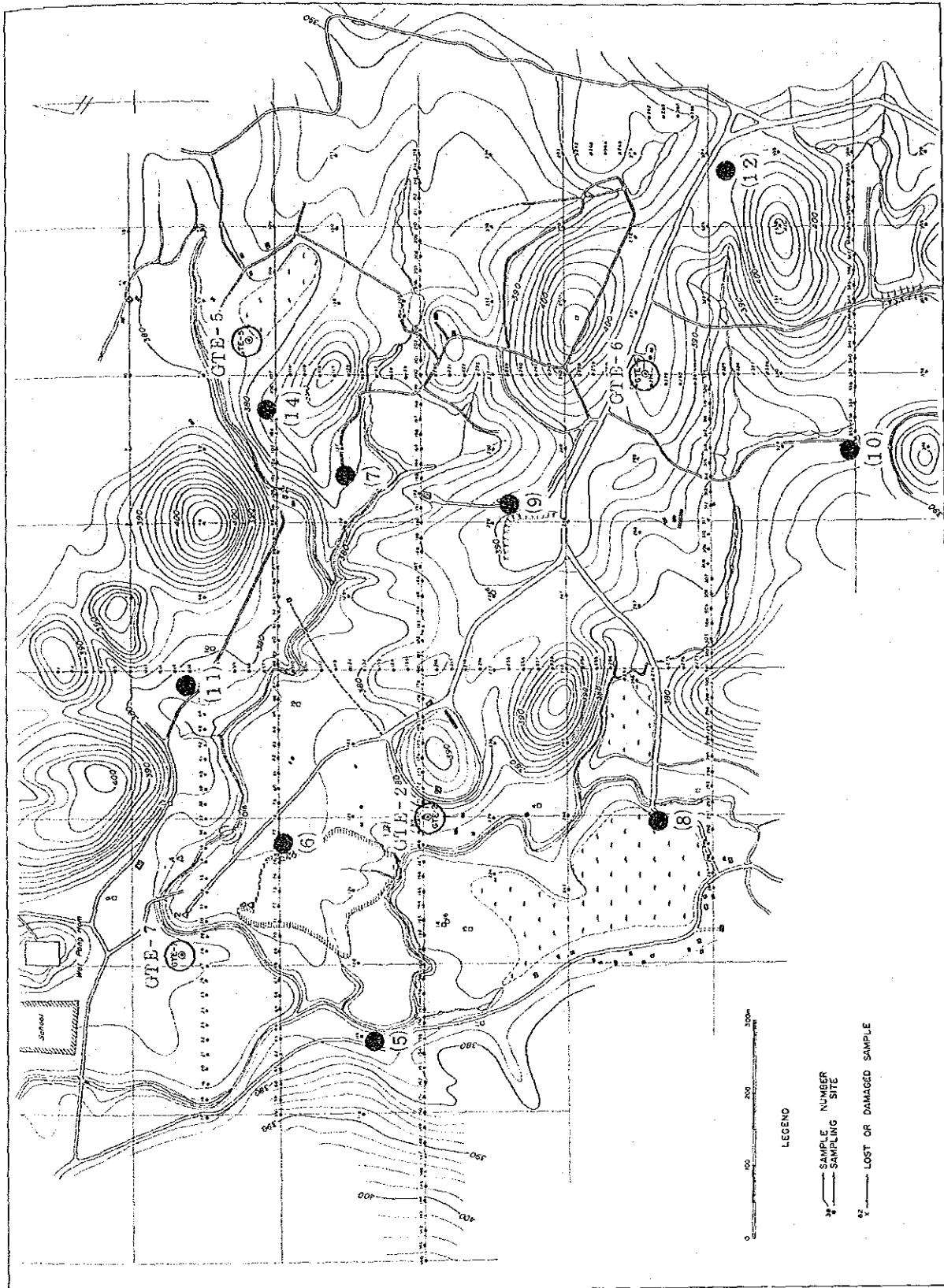


Fig. 4.3-1 Location of Temperature Survey Well

5. GTE-8 の掘削と調査解析

5.1 掘削地点の選定

昭和60年度に実施した断層追跡調査および100m深度の地下温度分布の調査結果から貯留層の広がり幅は約500m、延びは約1,000mと推定された。

この調査結果から地熱貯留層を評価するため調査井を掘削する価値があると判断され、その掘削地点としてはフィンガープリント法の調査結果等を勘案し、採石跡が選定された。

5.2 掘削状況

5.2.1 概要

GTE-8 の掘削深度は1,049.84mで最終坑径はHQ(98.7mm)の垂直井である。資材の準備および設営作業はすべてEGATにより行われた。掘削作業はJICA試験技師の指導のもとに、EGATの掘削チームにより行われた。昭和61年11月13日から掘削作業を開始し、一時中断はあったものの昭和62年12月4日に深度1,049.84mをもって掘削は終了した(Fig. 5.2-1)。

5.2.2 掘削作業

(1) ケーシングパイプ

ケーシングパイプは10"SGP、8"STPG-38、6"STPG、4 1/2"API 5Aの4段をセットした(Fig. 5.2-2)。

(2) 逸泥

掘削中の逸泥は、深度8mから915.45mまでの間に計15回発生した。それぞれの逸泥にたいしては、テルストップ等の逸泥防止剤で対処した。深度907.00mでの全量逸泥の際には熱水の自噴を防ぐため、高比重泥水を注水し、掘削を行った。深度915.45mでの全量逸泥の際には、逸泥防止は行わず、掘削を続行した。

(3) 温度測定

掘削中は、入排泥温度を測定した。

(4) 掘削経過

深度区分ごとの作業内容は、以下のとおりである(表5.2-1、)。

表 5.2 - 1 GTE-8 掘削作業総括

Depth (m)	Well Diameter (mm)	Bit				Drilling Mud				Casing		Lithology	Drilling activities
		Type	Size	Pressure (kg)	Revolution (rpm)	Temperature in/out (°C)	Mud Supplied (ℓ/min)	Type	Lost Circulation	Size	Depth inserted (m)		
0.00~ 37.00	311.20	Tricone	12-1/4"	1,000~ 1,300	20~ 30		780	Bentonite	None	10"	29.60	Siltstone Shale	Non Coring 10" CP cementation
37.00~ 203.00	244.50	Tricone	9-5/8"	3,000~ 5,000	25~ 40	32.0/39.5	780		40~60ℓ/min			Shale (siltstone) and Fine sandstone	Non Coring
	193.60	Tricone	7-5/8"	3,000~ 5,000	35~ 45	}	780	Bentonite		8"	14.220		8" CP cementation
		Tricone	5-5/8"	2,000~ 3,500	35~ 45	42.3/44.9	600						
203.00~ 424.00	193.65	Tricone	7-5/8"	3,000~ 5,000	40~ 45	41.6/43.8	660	Bentonite	40ℓ/min at 274.00m	6"	421.00	Shale and Fine sandstone	Non Coring 6" CP cementation
424.00~ 755.00	142.90	Tricone	5-5/8"	2,500~ 3,500	40~ 45	52.5/60.4	550						
	142.90	Tricone	5-5/8"	2,500~ 4,000	40~ 45	49.9/55.9	380		6ℓ/min at 435.94m 110ℓ/min at 480.00m 110ℓ/min at 643.24m 110ℓ/min at 706.92m	4-1/2"	752.50	Fine sandstone	To 499M Non Coring From 499M Coring
	98.7	Diamond	HQ-WL	1,500	100~150	46.2/60.3	110						
755.00~ 1,049.84	98.7	Diamond	HQ-WL	1,500~ 2,500	100~200		100~ 250	Water	110ℓ/min at 907.00m 150ℓ/min at 915.45m	Bare hole		Fine sandstone	

表 5.2 - 2 GTE-8 掘削工程実績

Items	Date	1986												1987																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

1) 0-37.00m

昭和61年11月13日に掘削を開始し、深度37.00mまで掘進した時点で10"ケーシングパイプをセットし、セメントで固定した。

2) 37.00-203.00m

9 5/8"トリコーンビットで深度37.00-145.20m間を掘削した。8"ケーシングパイプを深度142.20mまでセットし、セメントで固定した。

3) 203.00-424.00m

この区間は、7 5/8"トリコーンビットで掘削した。深度337.00mで坑内検層を行い、深度270.00mで110.3℃の熱水が湧出した。検層後、6"ケーシングパイプを深度421.00mまでセットし、セメントで固定した。

4) 424.00-578.07m

5 5/8"で深度499.00mまで掘削し、以深はHQ-WL工法でコア掘りを行った。深度480.00m付近の逸泥部から250ℓ/minの熱水が噴出したが、地熱流体の温度が低いことから逸泥箇所を閉塞した。

5) 518.07-755.00m

HQ-WL工法によるコア掘りを行ったが、深度643.24mで全量逸泥が発生し、その後も連続して溢流に見舞われたため、インナーチューブの再挿入ができず、掘削不能となった。そのため、5 5/8"トリコーンビットで拡張掘を行い、深度706.92mで全量逸泥に遭遇したが、逸泥掘りで深度755.00mまで掘削した。4 1/2"ケーシングパイプを深度755.00mまでセットし、セメントで固定した。

6) 755.00-1,049.84m

この区間はHQ-WL工法によるコア掘りを行い、試錐機ドラムの故障のため、深度1,049.84mで掘り止めとした。深度914.59mおよび1,031.89mで各種坑内検層および噴出試験を実施した。

(5) 泥 水

掘削に使用した泥水は、掘削方法（ビットの種類、拡張掘等）・坑井地質・温度等により組成をかえ、新規調泥・補泥・全量交換で対処した。泥水はベントナイト・テルナイト泥水を主体とした。

5.3 坑井地質調査

5.3.1 概 要

掘削中、深度 8.00—1,031.89m 間で、カッティング・コアの地質調査を行った。調査においては、地質・変質・フラクチャーに留意し地質柱状図を作成した。代表的試料について X 線回折分析および流体包有物測定を行った。

5.3.2 地 質

GTE-8 の地質は石英質砂岩、黒色頁岩の互層からなり、二疊紀の Kiu Lom 層に対比される (Fig. 5.3-1)。

(1) 0.00—421m

10m 程度の層厚の頁岩・砂岩互層主体であるが、深度 160~240m 付近では 40m 程度の厚層をなす。

(2) 421—755m

石英質細粒砂岩を主体とし、わずか層厚 10m 程度の頁岩を挟む。全体に塊状で地層面の発達は乏しく一部珪化作用が強い。

(3) 755—926m

頁岩が主体であるが、一部に砂岩を挟有する。頁岩は黒色頁岩で薄い砂質岩層を含み層理が発達する。

(4) 926—1,031.89m

石英質細粒砂岩が主体であり、わずか黒色頁岩の薄層を挟有する。

5.3.3 変 質

坑井全段にわたって、石英脈の沈殿と黄鉄鉱の鉱染がいちじるしい。石英・カリ長石（微斜長石）・緑泥石・セリサイト・黄鉄鉱が X 線回折分析により検出された。石英・カリ長石（微斜長石）はもっとも多量に含まれている。流体包有物測定の均質化温度の範囲は 119~134℃である (Fig. 5.3-2)。

5.3.4 フラクチャー

本坑井のフラクチャーは、頁岩と砂岩の薄互層である 920m 付近でいちじるしく発達して

いる。掘削中の逸泥は、深度100m、250m、450m、600～700m、900m付近で発生し、フラクチャーの存在を示している。

5.4 坑井テスト

5.4.1 目的

調査井GTE-8の掘削に伴って、掘削の途中の坑内検層、および噴出時の坑井内測定、噴出試験を行い（表5.4-1）、調査井周囲地層の物理特性、噴出流体の特性、貯留層特性等を明らかにした。また、連続噴気試験を行い、減衰や他の坑井への影響を調査した。

5.4.2 概要

今回実施した坑内検層および各種試験の内容を一括して示すと表5.4-1のとおりである。

表 5.4-1 GTE-8 坑内検層および各種試験一覧

測定種目		測定期間	測定内容	備考
検 層	第1段(0～203m)	61.12.23	電気検層、温度検層、キャリパー検層 圧力検層	
	第2段(0～424m)	62. 2.16	電気検層、温度検層、キャリパー検層、 圧力検層、音波検層、フローメーター検層	
	第3段(0～501m)	62. 3. 3 ～3.5	電気検層、温度検層、キャリパー検層、 圧力検層、フローメーター検層	JICA側立会い
	第4段(0～755m)	62. 7.18	電気検層、温度検層、キャリパー検層、 圧力検層、フローメーター検層	
	第5段(0～1,031m)	62.10. 9 62.11.19	電気検層、温度検層、キャリパー検層 圧力検層	
プ ロ ダ ク シ ョ ン テ ス ト	第 1 段 階	62.10.12	坑口圧力 $1.2 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ 総流量 45.6 t/h 温度・圧力検層、フローメーター検層	JICA 側立会い
	第 2 段 階	62.10.13	坑口圧力 $2.2 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ 総流量 35.9 t/h 温度・圧力検層	"
	第 3 段 階	62.10.14	坑口圧力 $3.1 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ 総流量 23.5 t/h 温度・圧力検層	"
流量特性測定		62.10.12 ～10.16	坑口圧力、蒸気ライン圧力・流量 熱水ライン圧力・流量	JICA 側立会い
噴 出 試 験		62.10.16 ～11.18	GTE-8 井坑口圧力、総流量 GTE-6 井坑口圧力、熱水流量	

5.4.3 調査結果

GTE-8 の坑内検層結果から、以下のことがわかる。(Fig. 5.4-1~3)。

- ① 温度検層結果による温度分布では、最高温度は深度 922m で 124℃ である。浅部の 100m 付近、240m 付近に温度の高くなる点があるが、それ以外では大きな変化はなく上昇する。922m で最高温度を示し、それ以深では温度は低下し、坑底では約 120℃ となっている。
- ② 電気検層の比抵抗分布によれば、低比抵抗ゾーン ($\sim 150 \Omega\text{-m}$) は、地表~100m、450~470m、620~635m、750m 付近、835~850m となっている。1,000 $\Omega\text{-m}$ 以上を示す高比抵抗ゾーンは 260m、270m、480~580m、670~745m、775~790m、905~920m にみられ、その中で 680~700m、730m 付近では 2,000 $\Omega\text{-m}$ 以上になっている。
- ③ 圧力検層によれば、1,031m で 99.3 kg/cm² G を示す。
- ④ GTE-8 は、掘削途中でたびたび逸泥に遭遇し、その後湧水、噴出を伴った。温度・フローメーター検層によれば、その深度は 260~270m、470~480m、706m 付近、915~930m であることがわかる。これらのうち、752m まではケーシングパイプで止めてあり、915~930m でのゾーンが、本調査井の最も優勢な流体が噴出している場所であると評価される。

掘削深度 1,031m でのプロダクションテストを実施した結果、次のことが明らかとなった。

- ① 噴出流体温度 約 124℃
- ② 噴出流体の流入深度 915~930m 付近
- ③ 産出指数 約 17 (t/h)/(kg/cm²)
- ④ 地層の透水量係数 約 $9 \times 10^{-12} \text{ m}^3$

したがって、GTE-8 は、流体温度は低い、地層の透水性は良好であることがわかる。

坑井噴出時の坑口圧力と総噴出量の測定から、坑井流量特性曲線を求めた。バルブ全開時の最大流量は、坑口圧力 1.2 kg/cm² G で約 45.6 t/h であり、流体温度が低いことから、地上で採取される蒸気量はきわめて少ない。

諸測定が終了した後、噴出状態の経時変化をみるため、約 30 日間の連続噴出試験を行った。また、他の坑井への影響をみるため、GTE-6 の噴出状態の測定を行った。それによれば、GTE-8 は噴出期間中坑口圧力の変化はほとんどなく、噴出量の減衰も約 2 t/h であった。GTE-6 の噴出状況は、GTE-8 の影響で、坑口圧力が 0.1 kg/cm² G、熱水量が約 1.7

t/h 減少がみられた。

5.5 流体化学調査

5.5.1 概 要

調査井 GTE-8 において噴出する地熱流体の化学性状を明らかにするために、蒸気、蒸気凝縮水および熱水の分析を行った。現地作業の工程は、以下のとおりである（表 5.5-1）。

表 5.5-1 GTE-8 流体地化学調査作業工程

年 月 日	作 業 内 容	備 考
62年10月13日	調査準備	
62年10月14日	蒸気ラインから蒸気採取および技術指導	坑口圧力 3.1 kg/cm ² G ライン圧力 0.17 kg/cm ² G
62年10月15日	蒸気ラインから蒸気および蒸気凝縮水採取 熱水ラインから熱水採取	坑口圧力 1.3 kg/cm ² G ライン圧力 0.4 kg/cm ² G
62年10月16日	小型セパレーターを用いて蒸気採取および技術指導	坑口圧力 1.2 kg/cm ² G ライン圧力 0.4 kg/cm ² G セパレーター圧力 0.2 kg/cm ² G
62年10月17日	小型セパレーターを用いて蒸気採取	坑口圧力 1.2 kg/cm ² G ライン圧力 0.4 kg/cm ² G セパレーター圧力 0.2 kg/cm ² G

5.5.2 調査結果

GTE-8 の現地調査結果およびサンカンペン地域の既存の地熱井や温泉の化学調査結果から、以下のことが明らかになった（表 5.5-2～3）。

- ① 熱水および温泉水の化学性状は類似しており、Na、SO₄ および HCO₃ の割合が多いが、溶存成分濃度は低い。
- ② ガス組成も地熱井と温泉で類似しており、CO₂ および N₂ が卓越している。
- ③ ガスの N₂/Ar 比からみると、当地域の地熱流体は地表水の影響が大きい。

- ④ ガスの H_2/Ar 比は、地下に溶存している大気の数より大きく、放射性元素起源の He の蓄積の可能性がある。
- ⑤ 地化学温度は、 $150\sim 200^{\circ}C$ 程度である。
- ⑥ 熱水の B/C 比は堆積岩を貯留母岩とする熱水の値を示すが、データ数が少ないため蒸気による加熱機構については明らかである。

表 5.5 - 2 G T E - 8 蒸気凝縮水分析結果

Well (Sampling date)		GTE-8 (Oct.17. '87)
Liquid - vapour separate Pressure (kg/cm ² G)		0.2
Total gas in steam (vol %)		0.83
Gas composition	H ₂ S (vol %)	2.60
	CO ₂ (vol %)	90.6
	N ₂ (vol %)	6.19
	H ₂ (ppm)	2230
	CH ₄ (ppm)	2540
	He (ppm)	63.9
	Ar (ppm)	1260

表 5.5 - 3 GTE-8、GTE-6 および EGAT-1 熱水分析結果

Component		GTE-8 (Oct.15. '87)	GTE-6 (May.18. '87)	EGAT-1 (May.18. '87)
Electrical conductivity	$\mu\text{S}/\text{cm}$	710	742	740
pH		9.36	9.3	9.2
SiO ₂	mg/l	173	158	144
Cl	mg/l	4.28	16.9	12.0
SO ₄	mg/l	76.7	24.8	44.2
H ₂ CO ₃	mg/l	0.24		
HCO ₃	mg/l	233	236	289
CO ₃	mg/l	40.5	5.4	16.8
Na	mg/l	148	146	146
K	mg/l	14.2	15.8	14.0
Li	mg/l	0.37	0.32	0.32
Ca	mg/l	2.28	1.71	2.86
Mg	mg/l	0.06	0.16	0.22
Fe	mg/l	0.03	<0.13	<0.13
Al	mg/l	0.24	<1.1	<1.1
Mn	mg/l	0.03	<0.03	<0.03
B	mg/l	1.45	2.07	1.84
H ₂ S	mg/l	4.8	28.5	25.5
TDS	mg/l	599	590	575
As	ng/l	9	33	24
Hg	ng/l	<0.5		

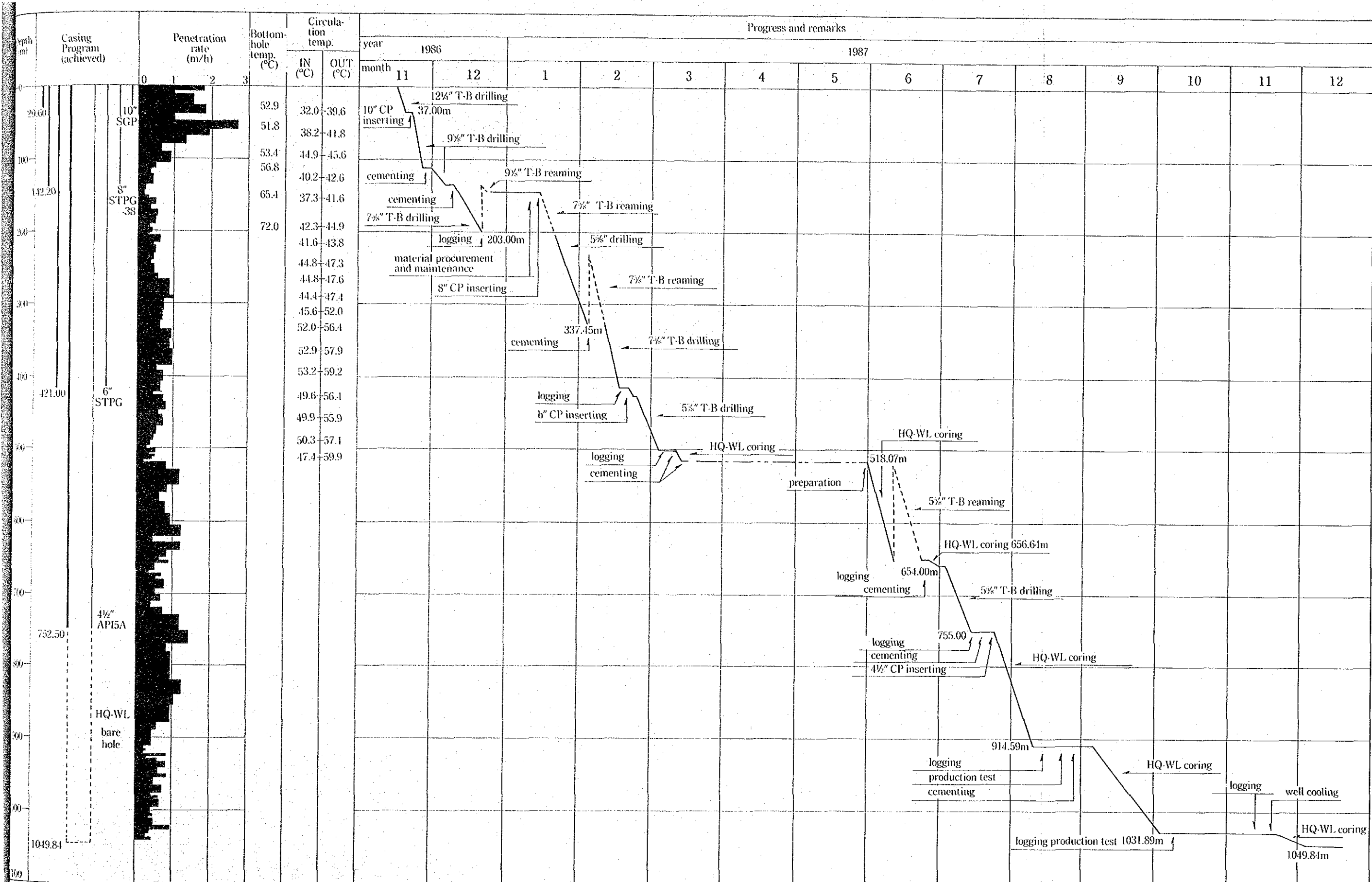


Fig. 5.2-1 Drilling Chart of GTE-8

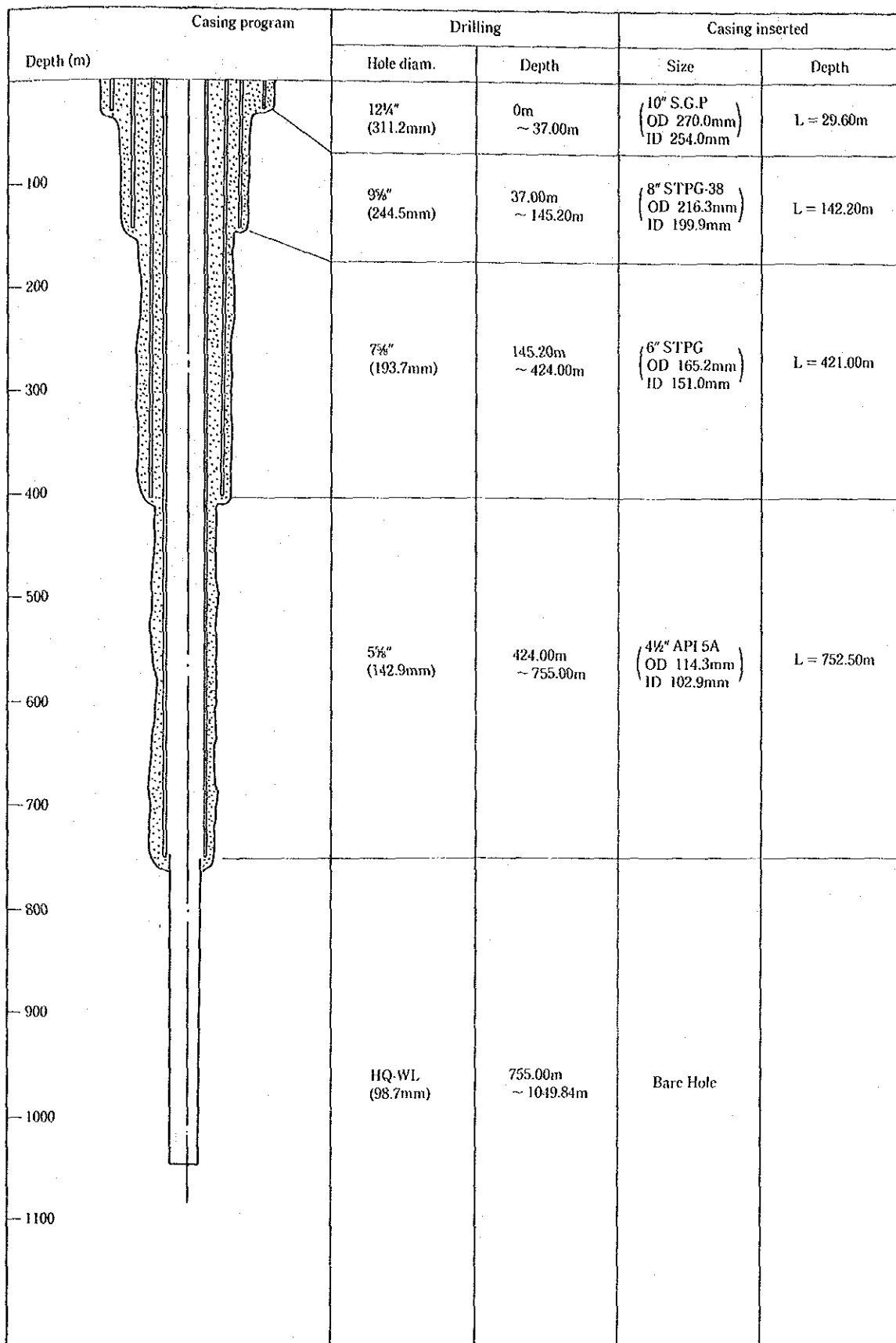


Fig. 5.2-2 Casing Program of GTE-8

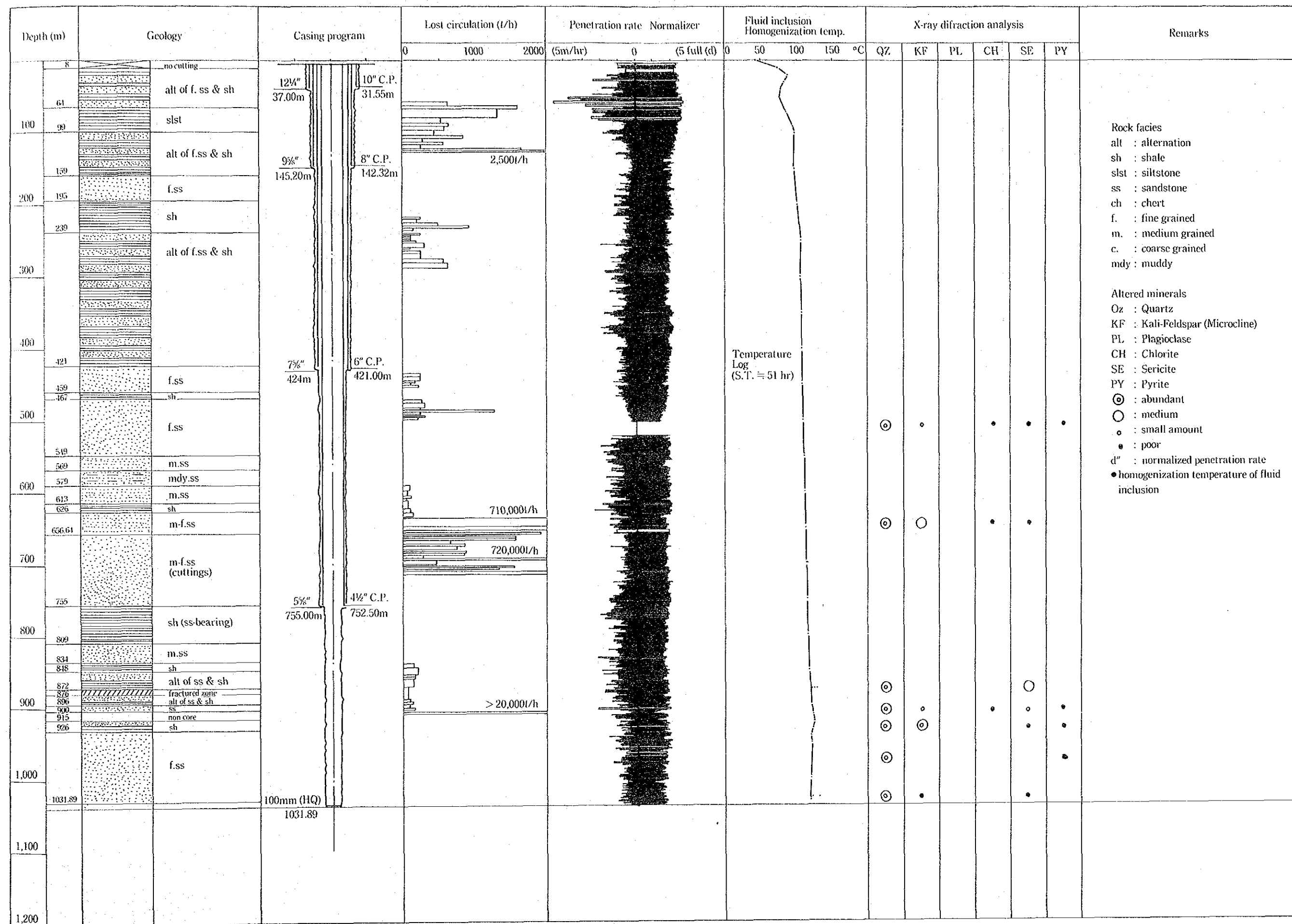


Fig. 5.3-1 Geological Column of GTE-8

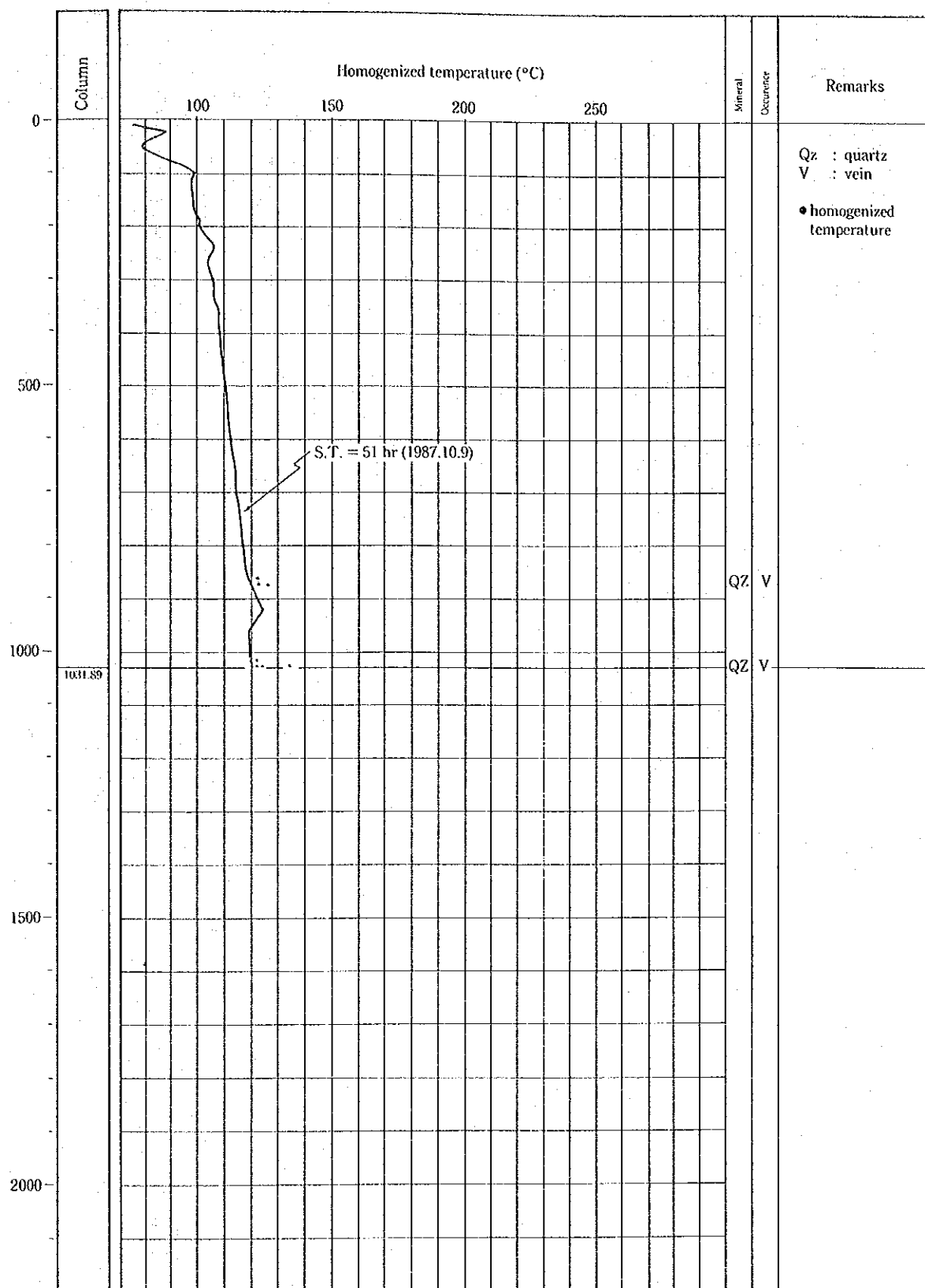


Fig. 5.3-2 Homogenized Temperature of GTE-8

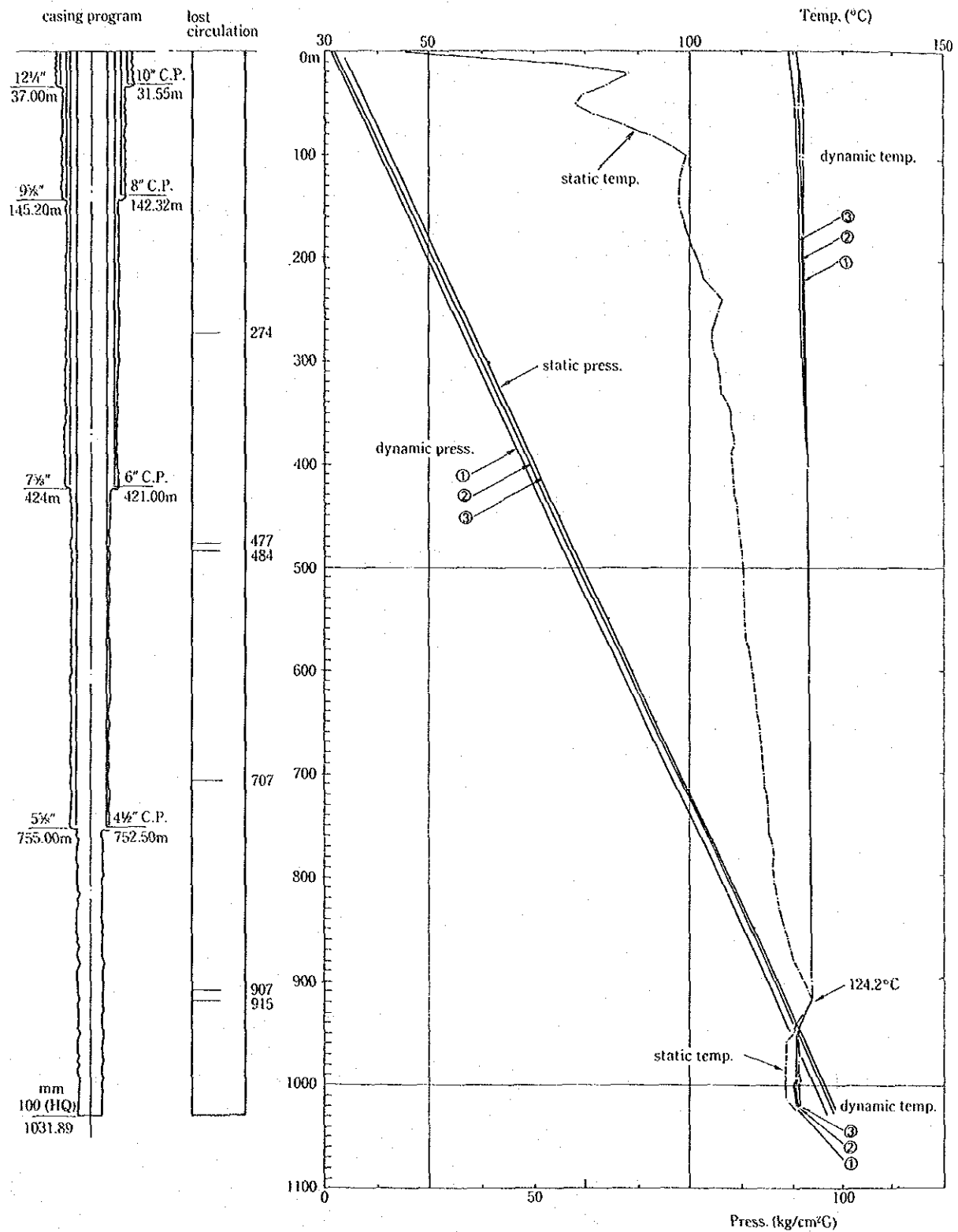


Fig. 5.4-1 GTE-8 Well Logging (Temperature, Pressure)

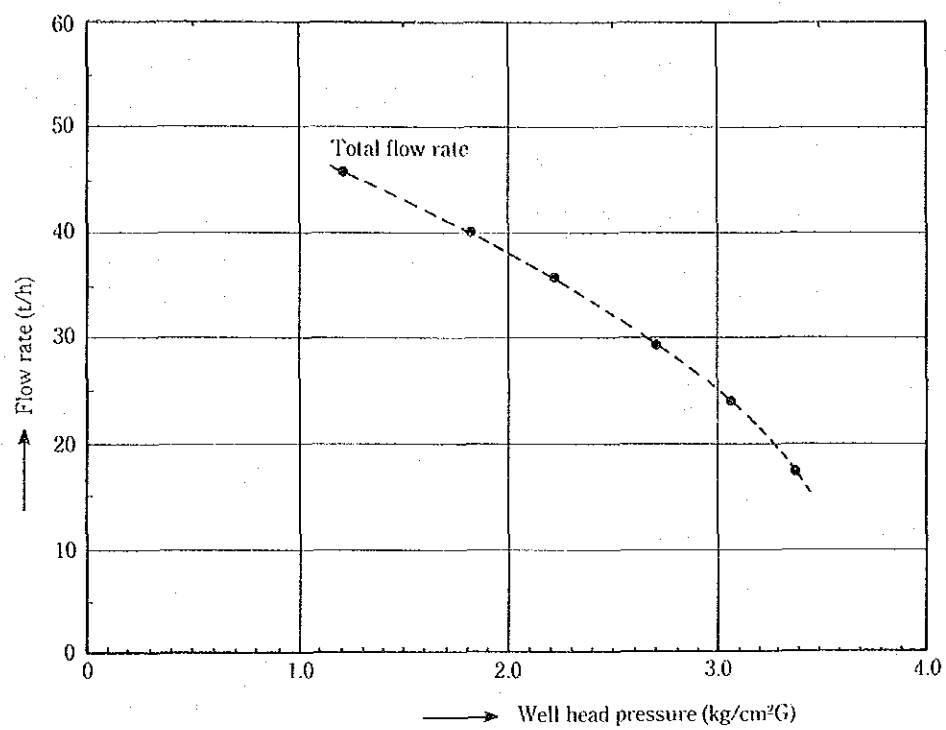


Fig. 5.4-2 Characteristic Curve of Flow Rate of GTE-8

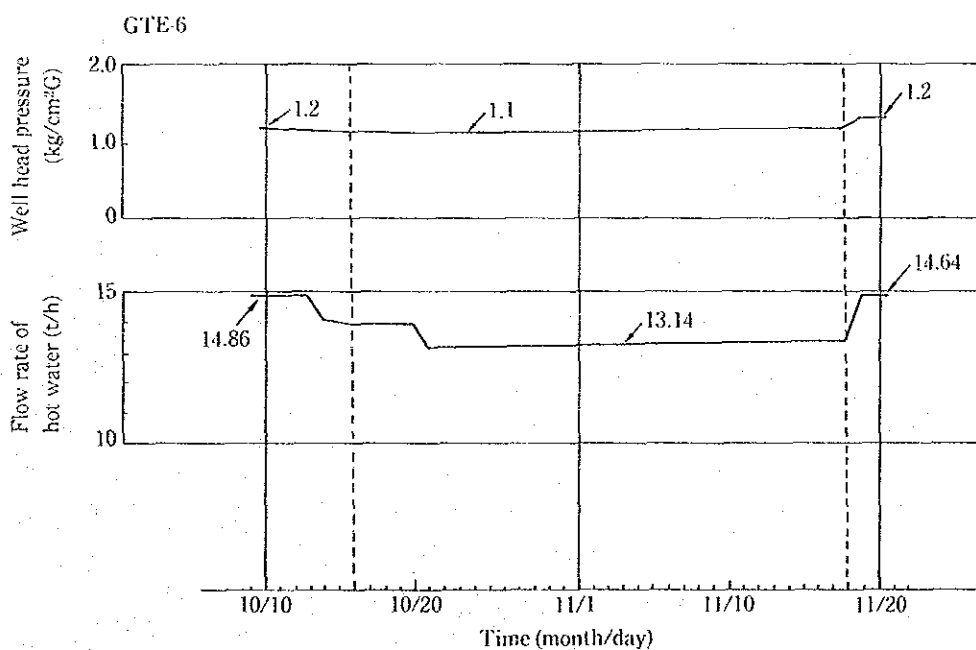
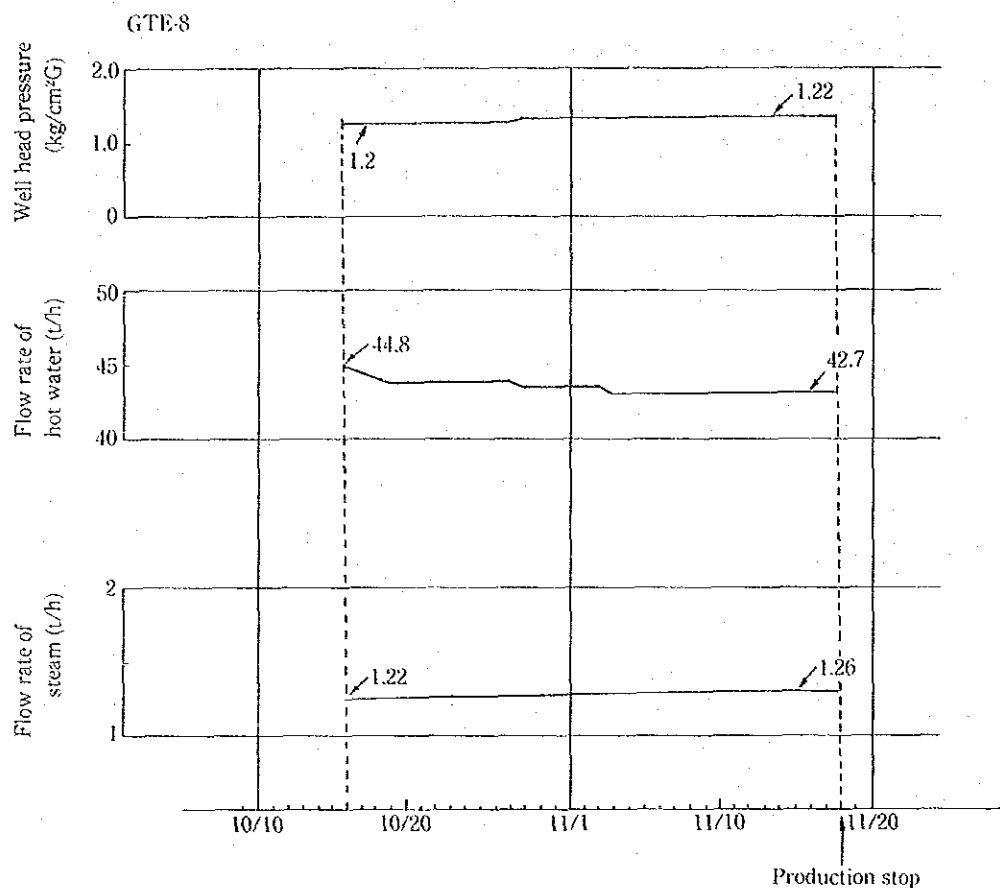


Fig. 5.4-3 Change of Production on GTE-8 and GTE-6

6. 貯留層評価

6.1 目的

これまで実施してきた各種の調査結果を総合的に検討し、地下に存在する地熱流体を取り出した場合の貯留層内で生じる変化について、熱水流動シミュレーションをもとにして貯留層評価を行った。

6.2 概要

まず、各種の調査結果をもとに、解析範囲を設定し (Fig. 6.2-1) 貯留層モデルを作成した (Fig. 6.2-2~5)。その後、入力する貯留層特性値、各種条件を設定した。その概要は次のとおりである。

○ 貯留層モデル

計算範囲 $\left\{ \begin{array}{l} \text{水平方向：} 3 \text{ km} \times 1.5 \text{ km} \\ \text{垂直方向：} 2 \text{ km} \end{array} \right.$

グリッド分割 $\left\{ \begin{array}{l} \text{水平方向：} 3 \times 3 \\ \text{垂直方向：} 2 \text{ レイヤー} \end{array} \right.$

○ 貯留層特性値

- ・ 孔隙率 7 ~ 10 % (各レイヤー一定)
- ・ 浸透率 3 ~ 20 m darcy (各セル)
- ・ 岩石密度 2.67 g/cm³
- ・ 熱伝導率 $10 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$
- ・ 岩石比熱 0.25 kcal/kg $\cdot^\circ\text{C}$

○ 流体特性

純水の熱水として取扱い、GTE-8 の流体温度の実測値 125℃を用いた。

○ 初期条件

各種の地表・坑井調査から、温度・圧力分布を求め、初期条件として与えた。

計算の基本式には、次の 3 次元熱水流動式を用いた。

質量保存の式

$$\nabla \cdot \frac{k\rho}{\mu} \nabla P - G = \phi \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

エネルギー保存の式

$$\nabla \cdot \frac{k\rho h}{\mu} \nabla P + \nabla \lambda \rho T - q_L - G \cdot h = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho h + (1 - \phi) \rho_r C_r T)$$

k ; 浸透率 (m^2)

ρ ; 熱水の密度 (kg/m^3)

μ ; " 粘性係数 ($\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$)

P ; 圧力 (kg/cm^2)

G ; 生産量 (t/h)

ϕ ; 孔隙率

t ; 時間 (sec)

q_L ; 系外への熱損失 (kcal)

h ; 熱水の比エンタルピー (kcal/kg)

ρ_r ; 岩石の密度 (kg/m^3)

C_r ; " 比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)

T ; 温度 ($^\circ\text{C}$)

λ ; 熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$)

質量保存の式は、一つのグリッドへの熱水の流入量から流出量及び生産量を差し引いたものは、そのグリッドに蓄積される熱水量に等しいことを示す。

またエネルギー保存式は、一つのグリッドへのエンタルピーの流入量に、熱伝達による流入量を加え、これから系外への、あるいは生産に伴う熱損失を引いたものは、そのグリッド内のエネルギー変化量に等しいことを示す。

これらの基本式を3次元貯留層モデルに適用し、計算機を用いて解析を行う。

計算ケースは、貯留層の中心から、熱水を連続的に生産し、還元は行わないとし、生産量を7段階(75、250、500、750、1000、1250、1500 t/h)に変化させた場合の貯留層内の10年間の経時変化を計算した(Fig. 6.2-6)。

6.3 結果および考察

シミュレーション結果の概要は次のとおりである。

- ① 貯留層内圧力は、生産開始後、生産井周囲を中心として圧力降下が生じ、早い時期で圧力が一定になる。生産量が多いほど圧力降下は大きい（生産量 75 t/h で圧力降下約 1 kg/cm²、1,500 t/h で約 26 kg/cm²）。
- ② 貯留層内温度の低下は直線的に生じ、10 年後でも続いているが、1,000 t/h の場合でも低下量は初期温度に比較し約 3℃と小さい。

これらの結果から、生産量を多くした場合、温度の低下は小さいが、圧力の低下は大きいことがわかり、貯留層から生産できる熱水量を規制するのは、生産井周囲の貯留層圧力であることが判明した。

したがって、貯留層圧力の降下をうまく把握・管理することが熱水を連続的に生産する上で重要な要因であるといえる。

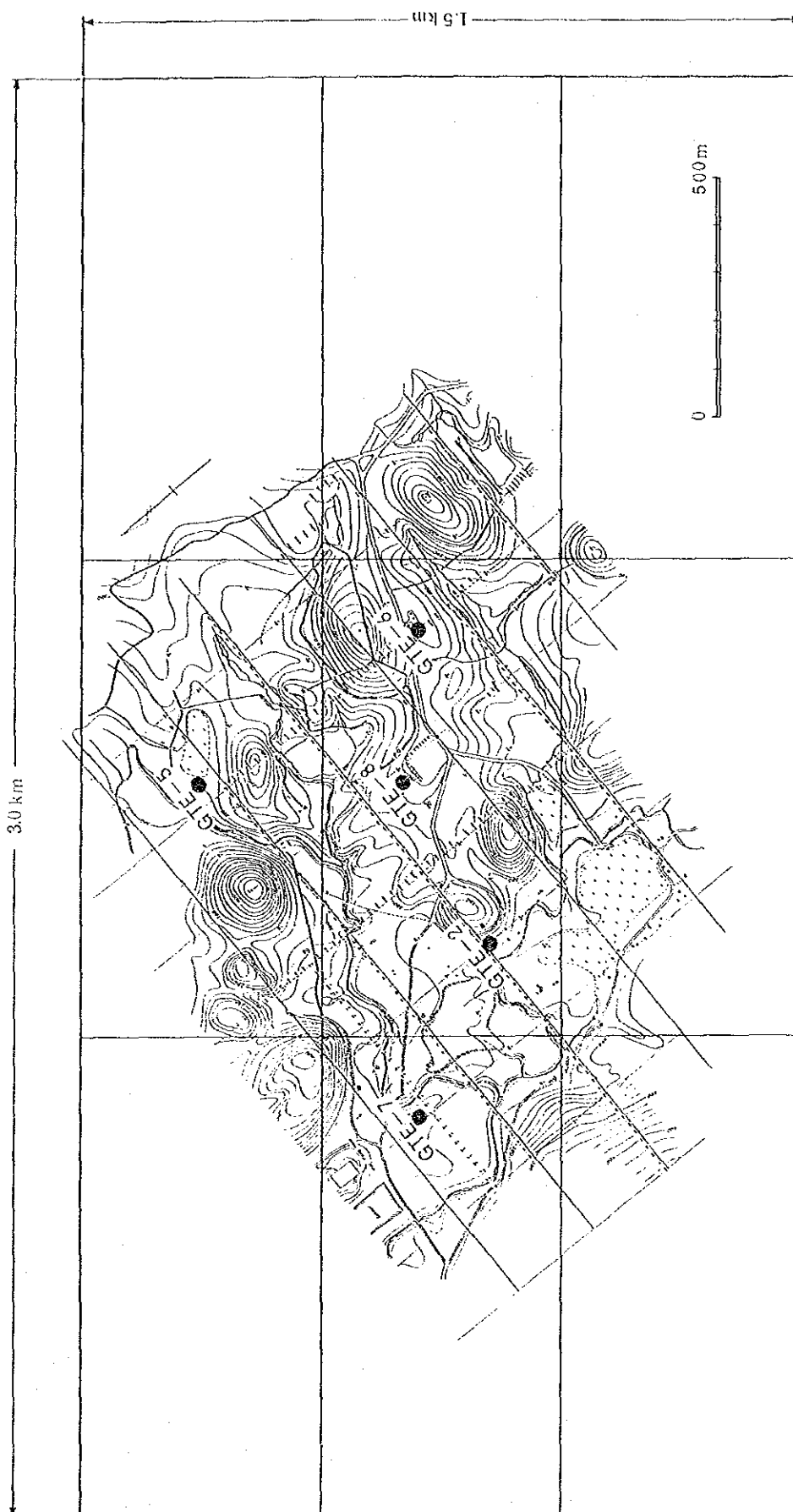
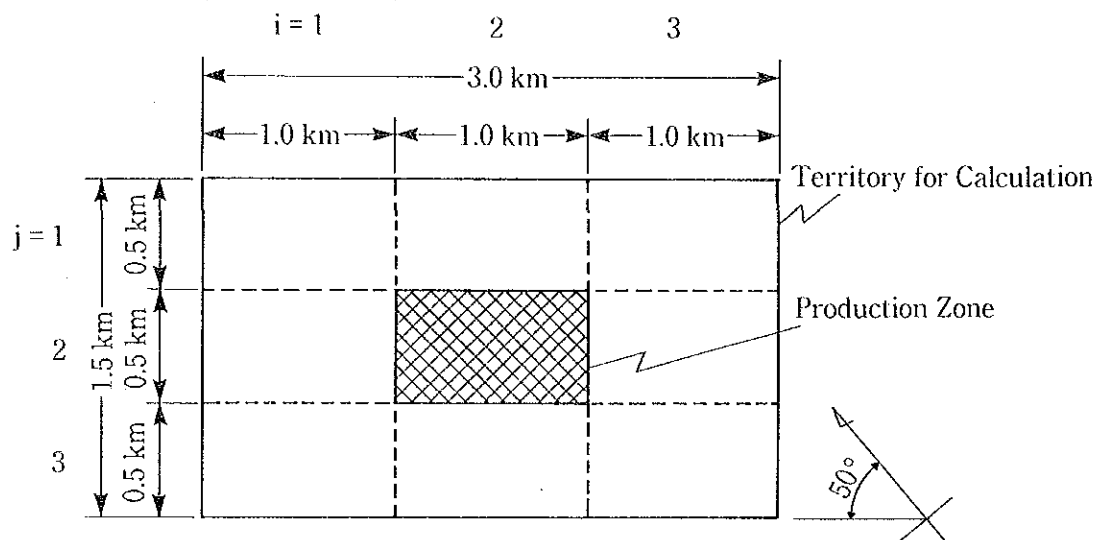


Fig. 6.2-1 Area of Reservoir Analysis

- Territory for Calculation { Horizontal: 1.5 km x 3.0 km
Vertical: 2.0 km

- Number of Grid { Horizontal: 3 x 3
Vertical: 2 Layer

- Horizontal Grid



- Vertical Grid

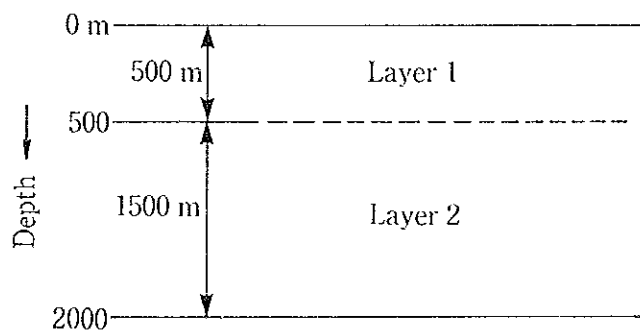


Fig 6.2-2 Conceptual Reservoir Model

Unit: m darcy

[Layer 1]

	i = 1	2	3
j = 1	4	6	3
2	6	20	6
3	5	8	4

[Layer 2]

	i = 1	2	3
j = 1	4	5	4
2	5	15	6
3	4	6	4

Fig 6.2-3 Distribution of Permeability

Unit: °C

[Layer 1]

	i = 1	2	3
j = 1	65	75	65
2	75	115	85
3	55	100	80

[Layer 2]

	i = 1	2	3
j = 1	90	105	95
2	105	125	115
3	95	110	105

Fig 6.2-4 Distribution of Initial Temperature

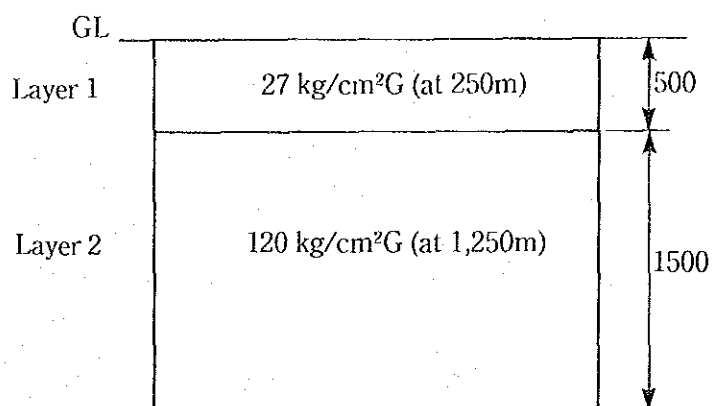


Fig 6.2-5 Distribution of Initial Pressure

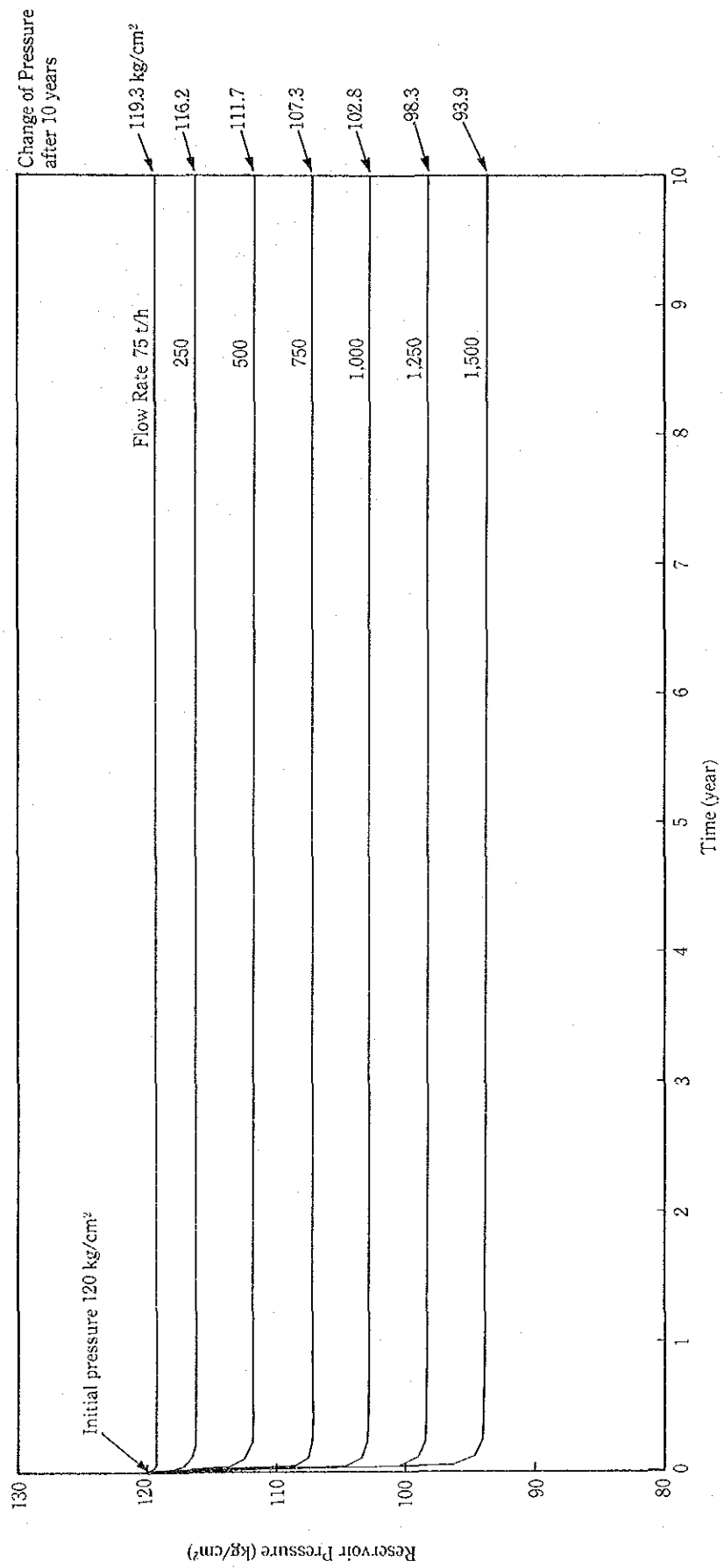
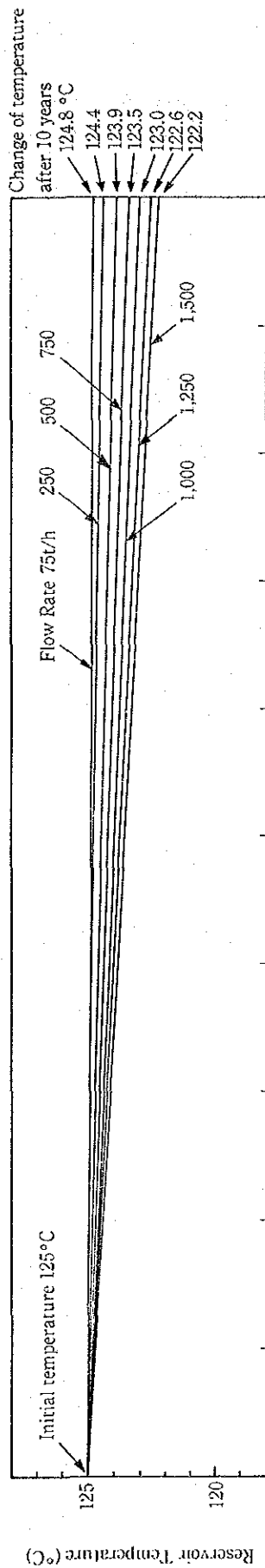


Fig 6.2-6 Change of Reservoir Pressure and Temperature in Time in Production Zone

Ⅲ． 調査結果の総括的評価

Ⅱ. 調査結果の総括的評価

サンカンペン地域における地熱貯留層の存在区域は昭和 60 年度に実施された断層追跡調査と 100 m 深度の地下温度調査によって設定された。

GTE-8 調査井は EGAT の協力により掘削されたが、掘削に当っては次のような目的が課せられた。

(1) 上記の調査で設定された貯留層が果してフラクチャーに富み、かつ熱水を胚胎するかについての実証

(2) 掘削後あるいは掘削中に貯留層評価のために必要な資料の収集

上記の課題と併せて、最終的にサンカンペン地域の地熱開発の可能性を評価するため

(3) 流体温度の評価

(4) 地熱流体の供給能力

についての情報を得ることも要求された。

GTE-8 は、深度 1,500 m を目標として掘削されたが、逸泥の多発、硬岩への達着、ビットの不足等のため深度 1,049.84 m で掘止めとなったが、掘止め直前に実施されたプロダクション検層の結果から、上記課題の解明に必要な資料が得られたので、当計画調査の目的はほぼ達成できたといえることができる。

以下、得られた結果について述べる。

1. 貯留層の水理構造

(1) フラクチャーの分布

GTE-8 は掘削中しばしば逸泥し、そのあと熱水が噴出した。このことはフラクチャーに富むことを示すものであり、貯留層が多数のフラクチャーで構成されていることを意味する。しかし、この貯留層の北側で掘削された GTE-7 ではほとんどフラクチャーがみられなかったことを考えると、フラクチャーの発達はある範囲内に限られ、その周辺部では急激にフラクチャーに乏しくなることが予想される。その範囲は断層追跡調査、地下温度調査の結果から北西-南東方向に幅 500 m 長さ 1,000 m と推定される。

また、貯留層を構成するフラクチャーはこれ迄掘削された GTE-2、GTE-8 の結果から東側に傾斜すると思われる可能性が強い。この点、今後さらに明らかにする必要があるが、いずれにしても GTE-8 の掘削により貯留層の存在は実証されたといえることができる。

(2) フラクチャーの透水性

フラクチャーの透水性に関連ある産出指数の算出及び貯留層特性の1つである透水量係数の算出に必要な資料は、深度915～930mのフラクチャーから熱水を噴出させた状態で実施されたプロダクション検層の結果から得られた。

産出指数の値としては平均 17 t/h/kg/cm^2 、透水量係数は 9 darcy m ($9 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$) であるが、このうち透水量係数 (kh) は透水係数 (k) と有効層厚 (h) を掛け合せたものであり h の値によって k の値が変わるので kh の値から直接透水性の優劣を論ずることは難しい。これに対し、産出指数 (PI) は圧力 1 kg/cm^2 を下げる (上げる) ことによる生産量の増加 (減少) を意味するので 17 という値は、フラクチャーの透水性としては良好な範囲に属する。

以上の産出指数は深度915～930mのフラクチャーを対象としたものであるが、500m以深では次の深度にフラクチャーが確認されており、また熱水も噴出した。

深 度	熱 水 量
707 m	68 t/h
907 m	58 "
(915～930 m	45 ")

上記各深度から噴出する熱水の圧力条件はほぼ同じとみなされるので、その熱水量から判断して、各深度のフラクチャーを対象とした場合の産出指数は、今回得られた 17 以上の値をとるものと思われる。すなわち、500m以深におけるフラクチャーの出現頻度は高い上に各々のフラクチャーはいずれも良好な透水性を示すということである。

以上の点からサンカンベン地域の地熱貯留層は極めて有利な水理構造を有すると評価される。

2. 地熱開発の可能性

(1) 流体温度の評価

シリカを化学温度計として用いた場合、タイ側で行った温泉水の分析、また今回GTE-8、GTE-6、EGAT-1から噴出する熱水の分析の結果から流体温度を求めたところいずれも 160°C 前後の値を示した。このことから、地下深部における熱水は 160°C 前後の温度を有することは確かと思われるが、実際にはGTE-8の坑内で測定した流体温度の最高は

126℃を示すに過ぎなかった。勿論、これは深度900m台の値であり、より深く掘削することにより160℃に近づくものと思われるが、いずれにしても流体温度の面からみて蒸気を用いての地熱発電は基本的に困難であるといわざるを得ない。

然し、最近、媒体として沸点の低い二次流体を用いるバイナリーサイクル発電が開発され、すでに実用の域に達している。適用温度は180℃以下100℃程度とされているので、サンカンペン地域では温度の点からみて十分バイナリーサイクル発電が可能であるということが出来る。

Fig.3 に示した流体温度－出力の図によると、サンカンペン地域で30℃の冷却用水、125℃の熱水を利用した場合、熱水1t/h当たり約4kWの出力が得られることになる。従って、GTE-8 から45t/hの熱水が生産されているので、現状でも180kW程度の発電が可能ということになる。

勿論、商業用の発電では出力を高めることが要求されるので、将来、サンカンペン地域でどの程度出力が得られるかが問題となる。いいかえると、サンカンペン地域の地熱貯留層からどの程度の熱水量の生産が期待できるかということである。この問題は結局、貯留層の熱水供給能力の問題に置き換えられ、貯留層評価を論ずる問題となる。

(2) 貯留層の熱水供給能力

地熱貯留層から流体を生産するに伴い周囲あるいは深部からの供給に応じ貯留層内の流体の温度、圧力に変動が生じる。

今回実施したGTE-8のプロダクション検層の結果から、透水量係数、初期温度、圧力が知られたので、シミュレーションの手法により熱水の生産量に応じた貯留層温度、圧力の経年的な変化の予測を試みた。

この結果によると、75t/hの熱水の生産を行った場合、10年後には温度はほとんど変わらず、圧力の低下は約1kg/cm²である。これに対し、1,000t/hの熱水を生産した場合には温度が約2℃低下することに併せて圧力も20kg/cm²程度低下する。

ただ、今回設定した貯留層モデルでは、主として熱水は水平方向から供給されるとみなし、かつ生産域外周セルの浸透率を小さく見積っているので、比較的大きな圧力低下が生じるという結果となっている。然し、貯留層内への熱水の供給は、実際にはタテ方向のフラクチャーに沿いup flowの形で深部から供給されるものと思われたので、モデルと実際の貯留層の水理構造との間には若干の違いはあるが、モデルにおける側方からの供給を深部からの供給と置き換えて考えても、基本的には大きな間違いはないように思われる。い

いかえると、深部から熱水が供給されるにしても結果的には今回の予測にほぼ近い値を示すということである。一方、温度の点については深部からの供給を重視すると恐らく低下よりむしろ上昇の傾向を示すものと思われる。

GTE-8 の坑口圧は高く、密閉圧で約 4 kg/cm^2 である。従って、 75 t/h 程度の生産量では動力を用いることなく継続的に熱水が噴出することが見込まれる。

然し、生産量が高めると、圧力の低下が増大するため生産量を維持するにはダウンホールポンプを設置しなければならなくなる。ダウンホールポンプの設置深度は $300 \sim 500 \text{ m}$ とみこまれるので、深度 300 m に設置したと想定した場合、 300 m における圧力が 3.2 kg/cm^2 であるので、生産に伴う圧力の低下も 17 kg/cm^2 すなわち $1,000 \text{ t/h}$ 前後の生産量に抑える必要がある。すなわち、 $1,000 \text{ t/h}$ 程度の生産量が生産量としての限界であるということである。勿論、ダウンホールポンプの設置深度をより深くすることにより生産量をも高めることも可能であるが、過剰揚水は一方的な圧力の低下を招くので、 $1,000 \text{ t/h}$ 程度が妥当な数値であると判断される。

以上シミュレーションの結果に基づき、安定した状態で出力を保つための生産量の限界を試算したが、より深く掘削した場合 125°C より温度が上昇することが期待されるので、実際には $5,000 \text{ kW}$ 程度の出力が得られるものと期待される。

このように、サンカンベン地域の地熱貯留層から生産される熱水を発電に利用する場合、 $5,000 \text{ kW}$ 程度の出力が見込まれるという結論が得られたのであるが、問題はその経済性についてである。

バイナリーサイクル方式による地熱発電は媒体として二次流体を利用するため、熱交換器を含む装置の設計が複雑となり、かつ所内動力も蒸気発電に比べその占める割合が大きくなるという問題がある。このため、タービン、発電機を含む発電設備自体のコストおよび送電端のコストが蒸気発電に比べ割高になる点が先ず挙げられる。これに加えて、サンカンベン地域のように、生産井を掘削し熱水を採取し、この熱水を熱源として利用しなければならない時は、更に生産井の掘削費およびダウンホールポンプの設置費がこれに加わり、全体の建設費が増加する反面所内動力の使用割合が増え、発電端のコストを一層引上げることになる。

以上述べた点から推して、現段階ではサンカンベン地域の熱水を商業用の発電に利用することは経済的な面に問題が多いが、もしバイナリー発電所から排出される熱水を穀物の乾燥、灌漑用水、リゾート向けに用いるなどこの地熱資源を多目的に利用することができ

るなら、この資源の社会、経済面に及ぼす利点は大きく、商業用のバイナリー発電のみを行った場合の経済性についての制約を十分補いうることができる。

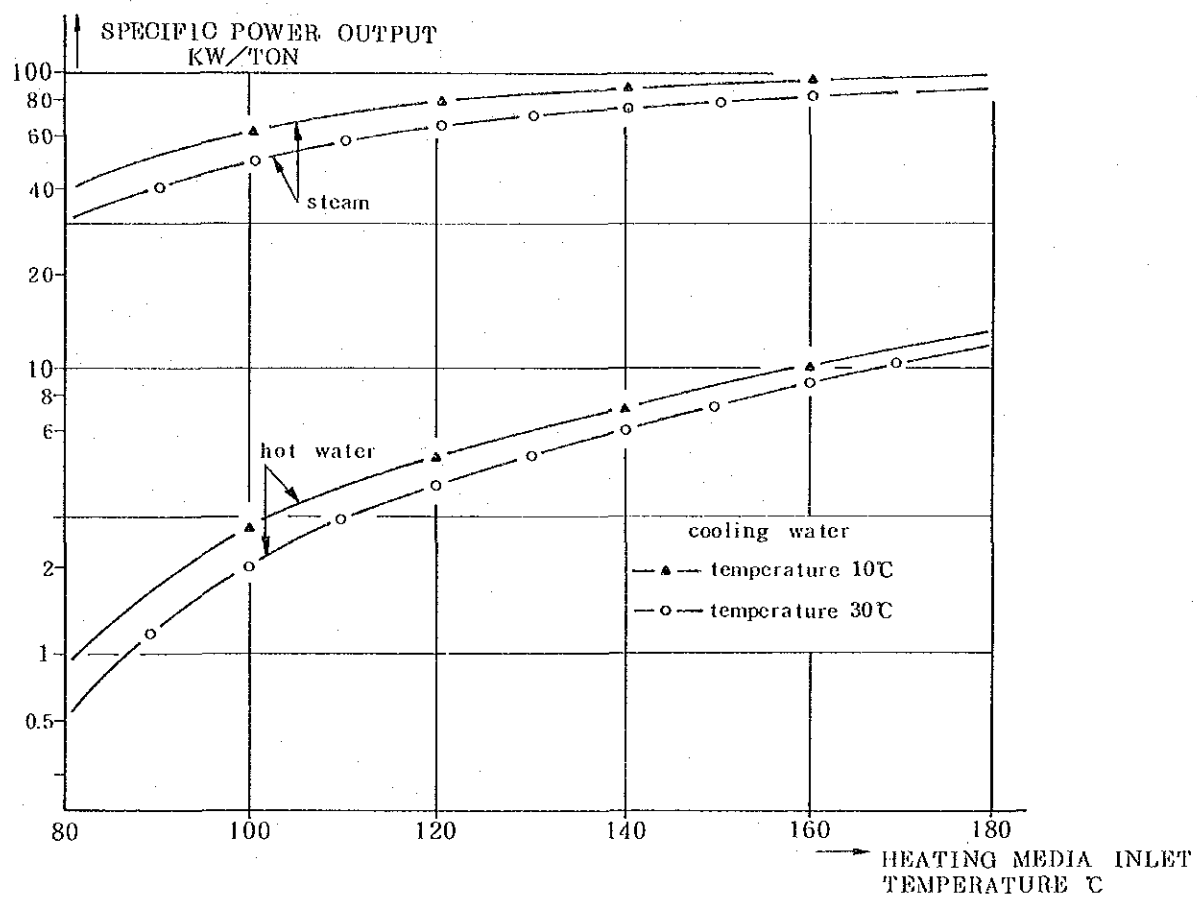


Fig. 1 OEC Specific Performance *

JICA