

## 5.5 流体化学調査

### 5.5.1 目的

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ことを目的として、GTE-8の蒸気、蒸気凝縮水および熱水の分析を実施した。

### 5.5.2 調査結果

GTE-8の蒸気、蒸気凝縮水および熱水の分析結果を表5.5-1～3に示す。

蒸気および蒸気凝縮水試料は、GTE-8の二相流ラインに取り付けた小型セパレーターを用いて熱水から分離採取し、熱水試料は大気圧下で採取した。

サンカンペン地域ですでに掘削された調査井で流体が継続して噴出しているのは、GTE-6とEGAT-1である。この2坑井については、EGATにより定期的に調査がなされており、参考としてその調査結果も表5.5-3に示す。

### 5.5.3 化学性状の特徴

#### (1) 蒸気

非凝縮ガス組成は、 $\text{CO}_2$ が90vol%を占め、次いで $\text{N}_2$ の6.19vol%である。蒸気性状に関する分析結果は、GTE-8のみであるので、他坑井との比較はできないが、サンカンペン地域の温泉ガスの分析値と比較して、 $\text{H}_2$ - $\text{N}_2$ - $\text{CH}_4$ 三成分系図を作るとFig.5.5-1のようになる。GTE-8のガス性状は、 $\text{H}_2$ - $\text{N}_2$ - $\text{CH}_4$ 組成についてみると、当地域に共通するものと考えられる。

また、蒸気中に存在する非反応性ガス成分( $\text{He}$ 、 $\text{Ar}$ 、 $\text{N}_2$ )によってガスの由来や地熱貯留層の生成機構を検討することができる。

GTE-8の蒸気の $\text{N}_2/\text{Ar}$ 比=49は、 $10^\circ\text{C}$ で大気と平衡状態にある水に溶解した空気の値=4.0に似ており、 $\text{N}_2$ および $\text{Ar}$ は、地下水中に溶存した空気の影響を大きく反映しているものと考えられる。

一方、GTE-8の蒸気の $\text{He}/\text{Ar}$ 比は、 $5.07 \times 10^{-2}$ であり、大気と平衡の地下水の値= $1.6 \times 10^{-4}$ よりはるかに大きく、地殻起源の $\text{He}$ を蓄積している可能性がある。

#### (2) 蒸気凝縮水

GTE-8の蒸気凝縮水はpHが5.50弱酸性であり、AsとHgが僅かであるが検出されて

いる。

なお、溶存成分中の  $\text{SO}_4$  の濃度が高いのは、現地での試料採取から分析までに日数が経っており、溶存していた  $\text{H}_2\text{S}$  が酸化されたためと考えられる。

### (3) 熱水

GTE-8 の熱水性状は、pHが9.36アルカリ性であり、溶存成分濃度が低いことが特徴的である。

溶存化学成分について主要陽イオン組成 (Fig. 5.5-2) と主要陰イオン組成 (Fig. 5.5-3) をみると、GTE-8 の熱水は、 $\text{Na}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4$  を主成分としていることがわかる。

これらの熱水性状にみられる特徴は、GTE-6 および EGAT-1 さらにはサンカンベン地域に湧出する温泉水に共通する特徴であり、流体の生成機構が類似するものと考えられる。

## 5.5.4 地化学的考察

### (1) 地化学温度

地熱流体の温度を推定することを目的として、分析結果をもとに地化学温度を求めた。

利用した地化学温度計の一覧を表 5.5-4 に、GTE-8、GTE-6 および EGAT-1 について算出した流体温度を表 5.5-5 に示す。

算出した5種類の地化学温度をみると、GTE-8 について161~196℃とばらつきが大きいことがわかる。

地化学温度は基本的には熱水-岩石間のイオン交換反応および石英の溶解反応における平衡定数の温度依存性を利用したものであり、地下でこれらの化学反応が平衡状態にあり、その状態を保持したまま地上に熱水が湧出していることを前提にしている。

この点、GTE-8 をはじめサンカンベン地域の熱水性状は、溶存化学成分量が少ないことから水-岩石反応にもとづく地化学温度の信頼性に問題があると考えられる。

しかし、シリカおよびNa/K比温度をもとに推定すると、GTE-8 の貯留層深部での流体温度は160~180℃となる。その後、流体が貯留層内を上昇するにつれて熱伝導によって冷却され、GTE-8 に流入する流体温度は、検層温度および気液比から求めた温度120~130℃となるものと考えられる。GTE-6 および EGAT-1 も同様な傾向を示す。

## (2) 化学性状からみた地熱貯留層機構

GTE-8 で得られている流体は、溶存化学分量が少ないことから推察して、

- ① 地下に浸透した地表水が熱的にあまり優勢でない貯留母岩との接触で加熱される。
- ② 地下に浸透した地表水が地下深部まで気液分離した地熱蒸気により加熱される。

という2つの生成機構が考えられる。

この点を考察するために、B/C $\ell$ 図を作成した (Fig. 5.5-4)。

熱水中のB/C $\ell$ 比は、貯留層を構成する貯留母岩の化学的性質を反映し、蒸気卓越型などの地熱貯留層機構などによっても変化することが知られている。一般に火山岩および火山砕屑岩地帯の熱水中のB/C $\ell$ モル比は、0.02~0.07の範囲にあり、堆積岩を貯留母岩とする熱水のB/C $\ell$ モル比は、1.0付近であるとされている。

また、蒸気卓越型地熱地域ではBとC $\ell$ の蒸気圧の差から蒸気中にBが濃集して、上記の範囲より高いB/C $\ell$ 比を示すとされている。

Fig.5.5-4からわかるように、GTE-8はB/C $\ell$ 比が1.0の直線近傍に位置し、GTE-6およびEGAT-1はB/C $\ell$ 比が0.50の直接近傍に位置する。

このように当地域で得られる坑井熱水のB/C $\ell$ 比は、堆積岩を貯留母岩とする熱水の値に近く、現実の地質条件とよく一致するが、溶存化学分量が少ないことから蒸気による加熱機構の存在する可能性もある。

したがって、加熱機構をさらに詳しく検討するためには、サンカンベン地域を含めた広範囲の地域の温泉水のB/C $\ell$ 比と地質条件とを比較する他に、熱水および蒸気的主要成分であるHCO<sub>3</sub>やCO<sub>2</sub>炭素同位体組成を明らかにして、これらが堆積岩中の有機物起源か火山ガス起源かを区別する必要がある。

さらにガス組成のN<sub>2</sub>/Ar比からみると、地下水の影響が大きいことが推定されるのに対し、He/Ar比は地下水から予想される値よりもはるかに大きく、Heについては放射性元素に由来するHeの蓄積が考えられる。このことは、<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比から確認することができるので、調査地域の地熱系が、地殻由来のガスを蓄積できる構造を持つか否か知る上に重要であると考えられる。

### 5.5.5 まとめ

GTE-8の現地調査結果およびサンカンベ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。

- ① 熱水および温泉水の化学性状は類似しており、Na、SO<sub>4</sub> およびHCO<sub>3</sub> の割合が多いが、溶存成分濃度は低い。
- ② ガス組成も地熱井や温泉で類似しており、CO<sub>2</sub> およびN<sub>2</sub> が卓越している。
- ③ ガスのN<sub>2</sub>/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He/Ar 比は地下水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 地化学温度は高いものでも約200℃である。
- ⑥ 熱水のB/Cℓ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かどうかについては明らかでない。

今後、さらに流体の加熱機構と挙動を明らかにするためには、

- ① 地熱水の水素、酸素同位体組成を測定し、水の起源および岩石との反応時間を定性的に把握する。
- ② 広い範囲での温泉水のB/Cℓ比を測定し、貯留母岩とB/Cℓ比との対応を確認する。
- ③ <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比を測定してガスの供給源を明らかにする。

などの地化学調査が有効であると考えられる。

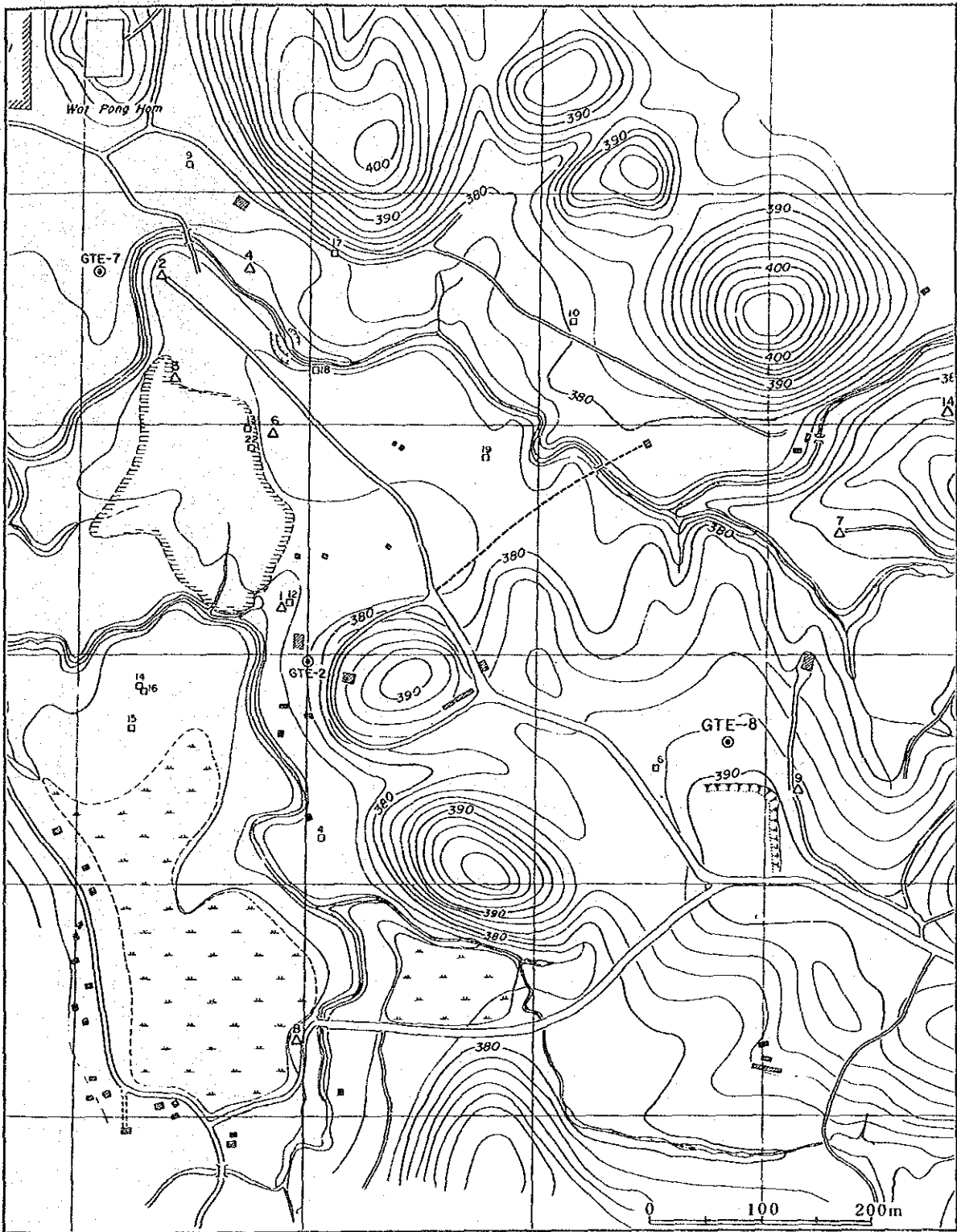


Fig. 5.2-1 Location of GTE-8



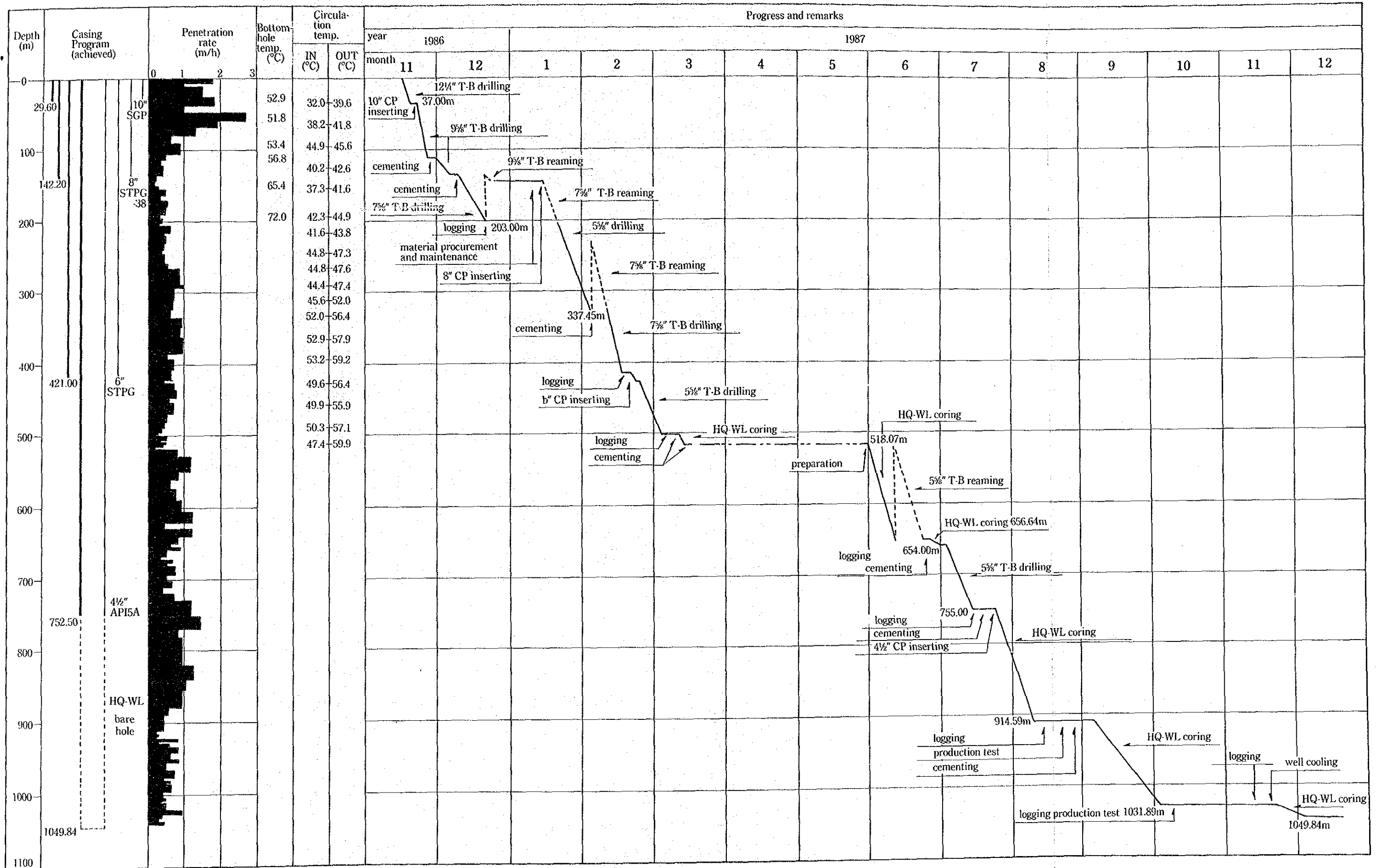


Fig. 5.2-2 Drilling Chart of GTE-8





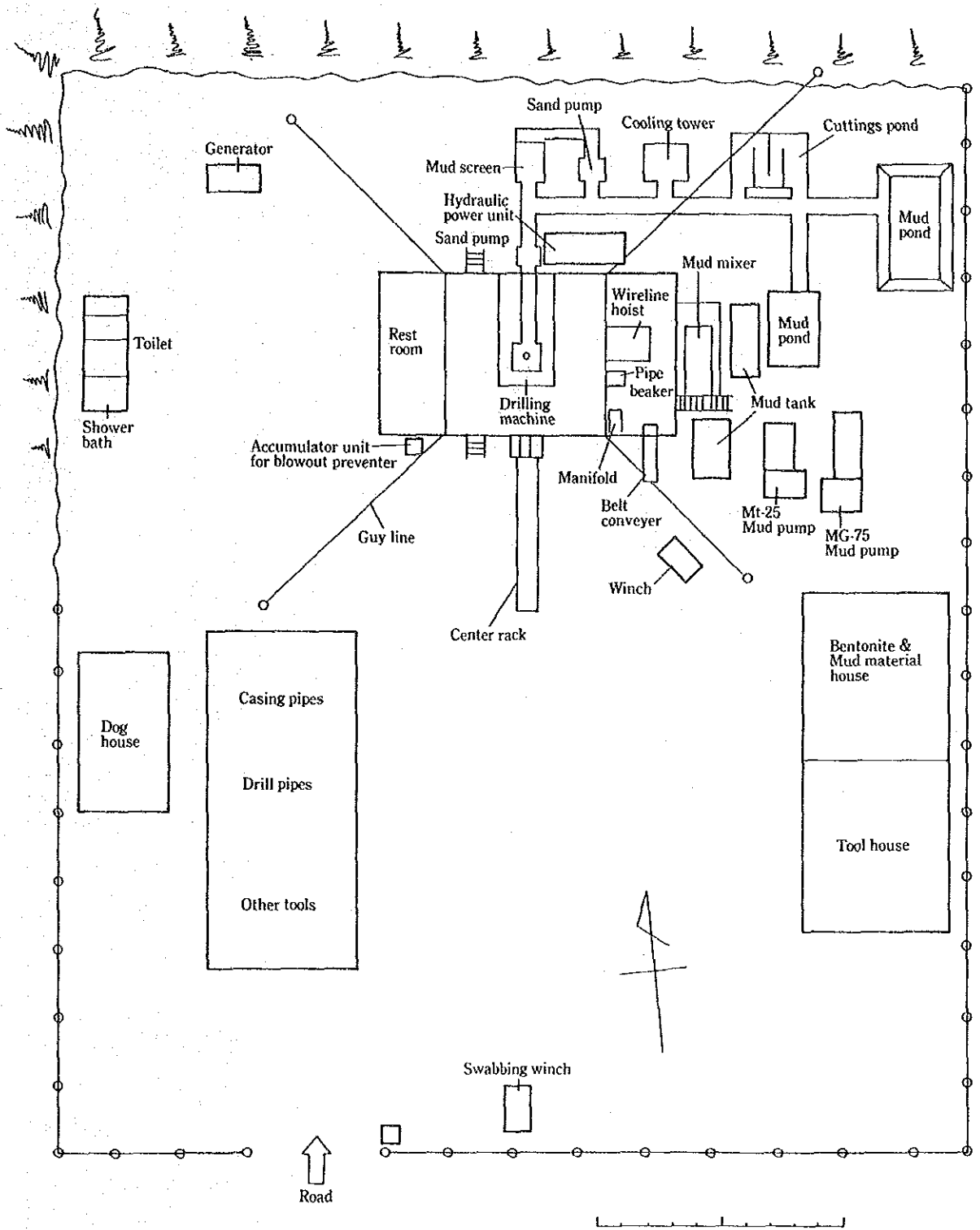


Fig. 5.2-3 Layout of Drilling site of GTE-8

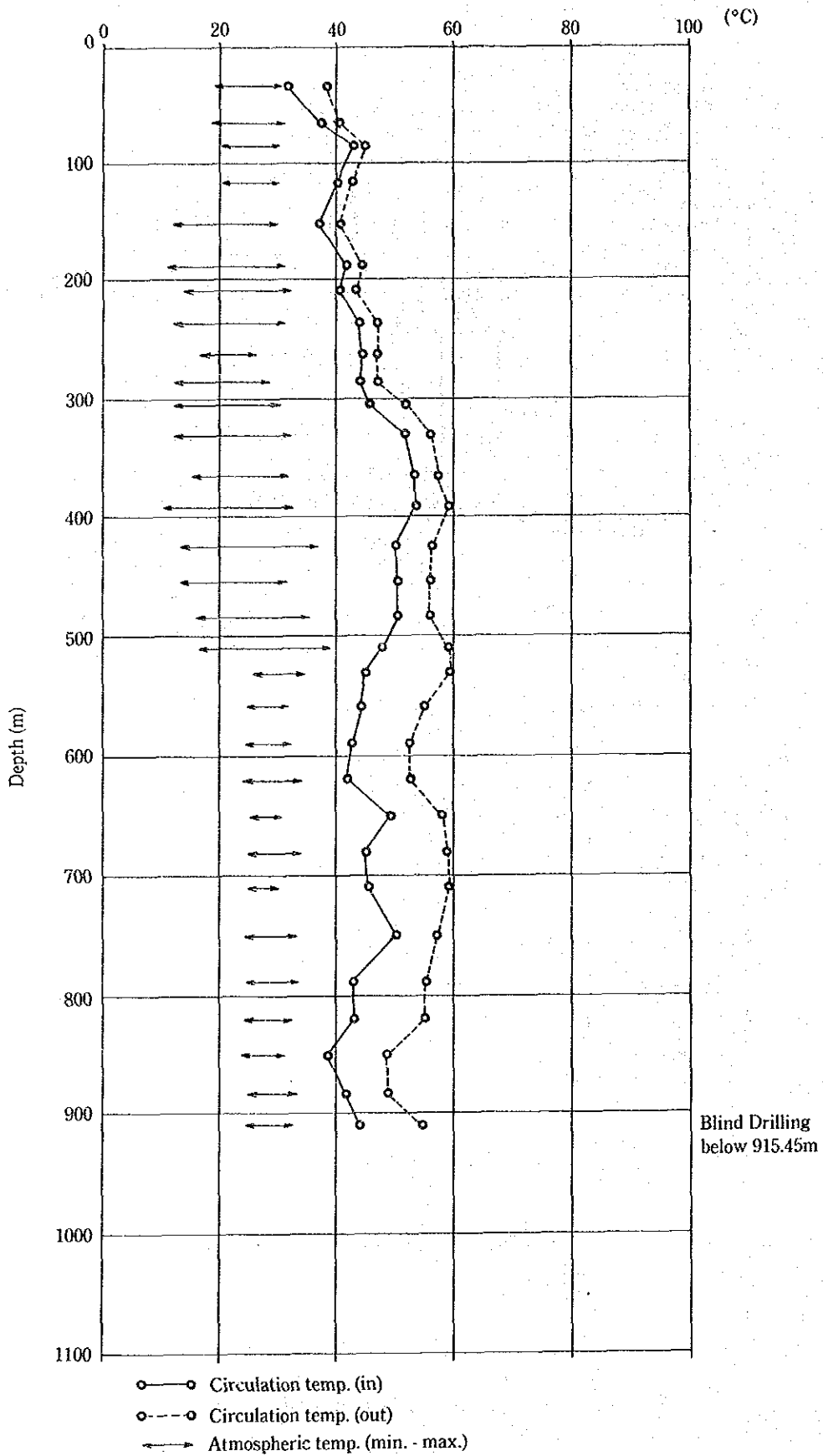


Fig. 5.2-4 Circulation Temperature of GTE-8

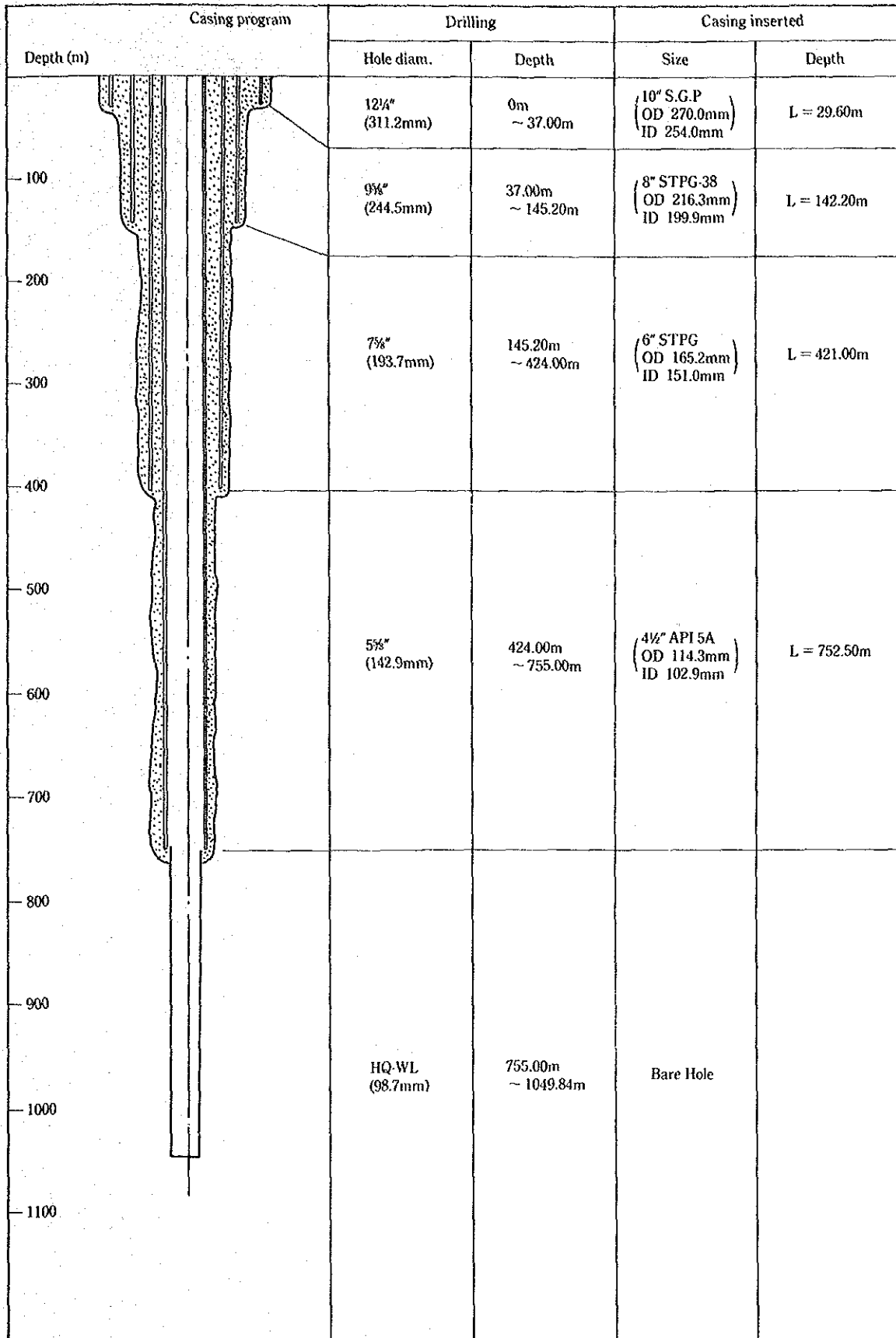


Fig. 5.2-5 Casing Program of GTE-8

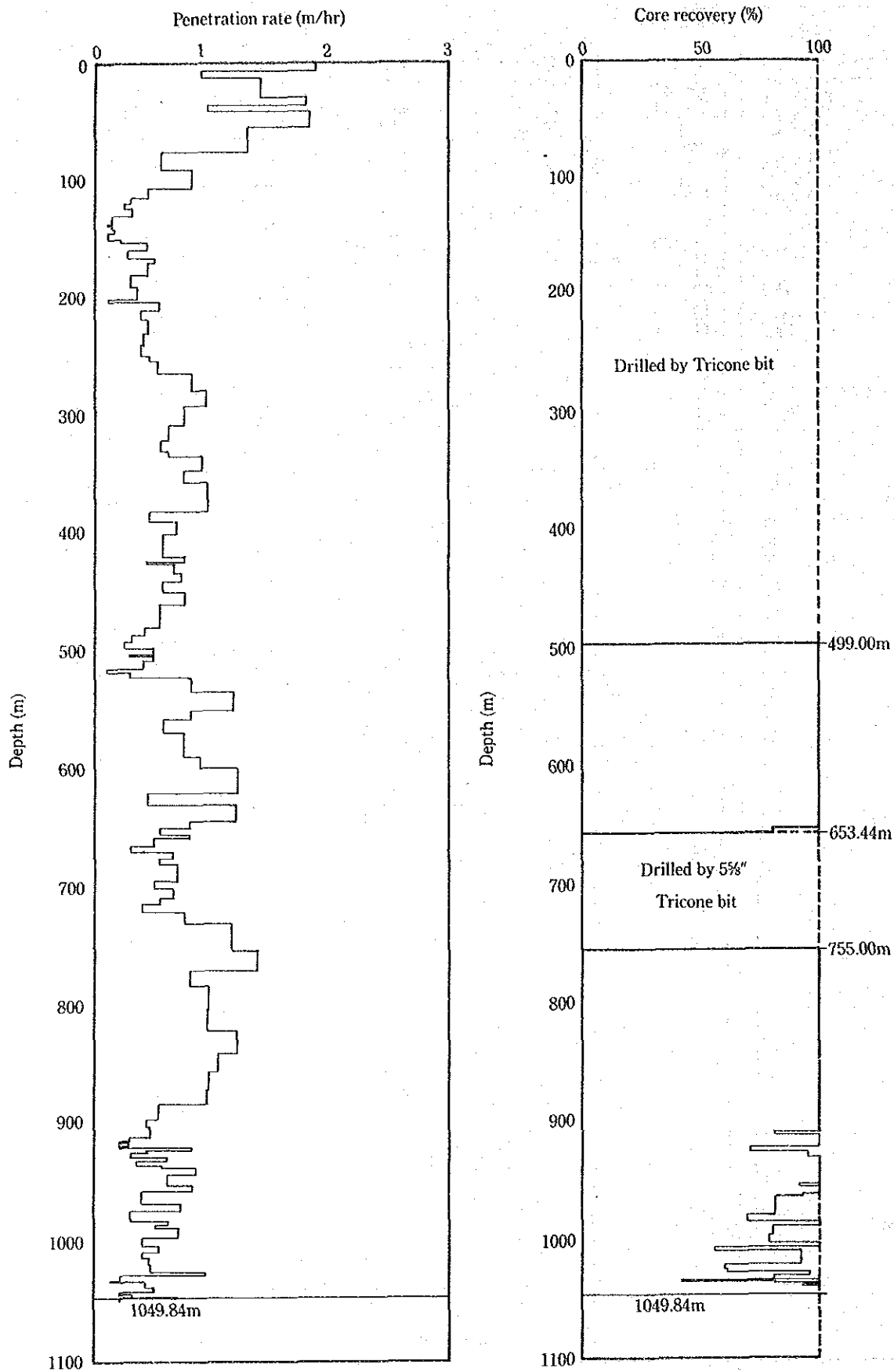
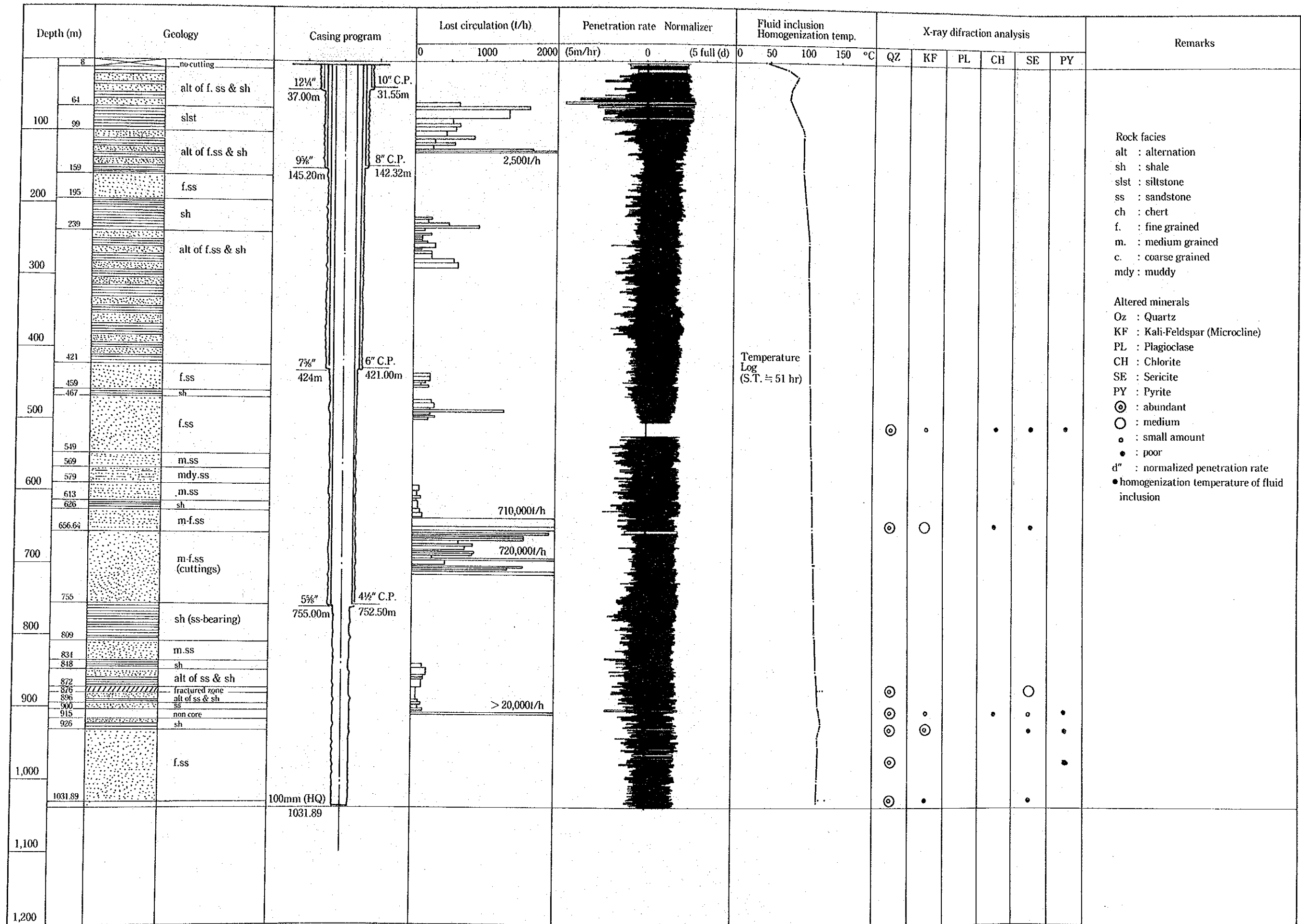


Fig. 5.2-6 Penetration Rate and Core Recovery of GTE-8



Rock facies  
alt : alternation  
sh : shale  
slst : siltstone  
ss : sandstone  
ch : chert  
f. : fine grained  
m. : medium grained  
c. : coarse grained  
mdy : muddy

Altered minerals  
Oz : Quartz  
KF : Kali-Feldspar (Microcline)  
PL : Plagioclase  
CH : Chlorite  
SE : Sericite  
PY : Pyrite  
⊙ : abundant  
○ : medium  
◦ : small amount  
● : poor  
d" : normalized penetration rate  
• : homogenization temperature of fluid inclusion

Temperature Log  
(S.T. ≈ 51 hr)

Fig. 5.3-1 Geological Column of GTE-8



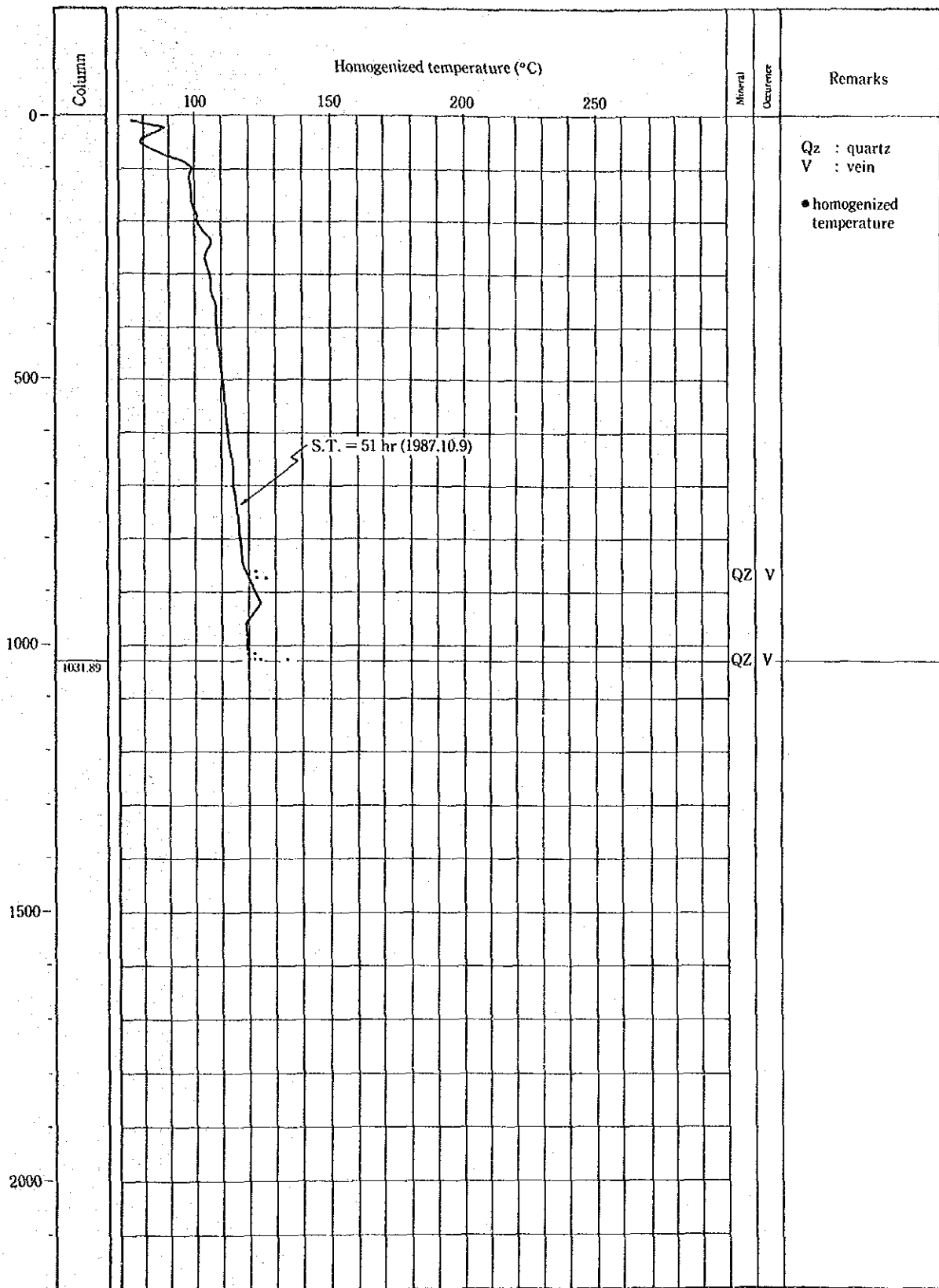


Fig. 5.3-2 Homogenized Temperature of GTE-8

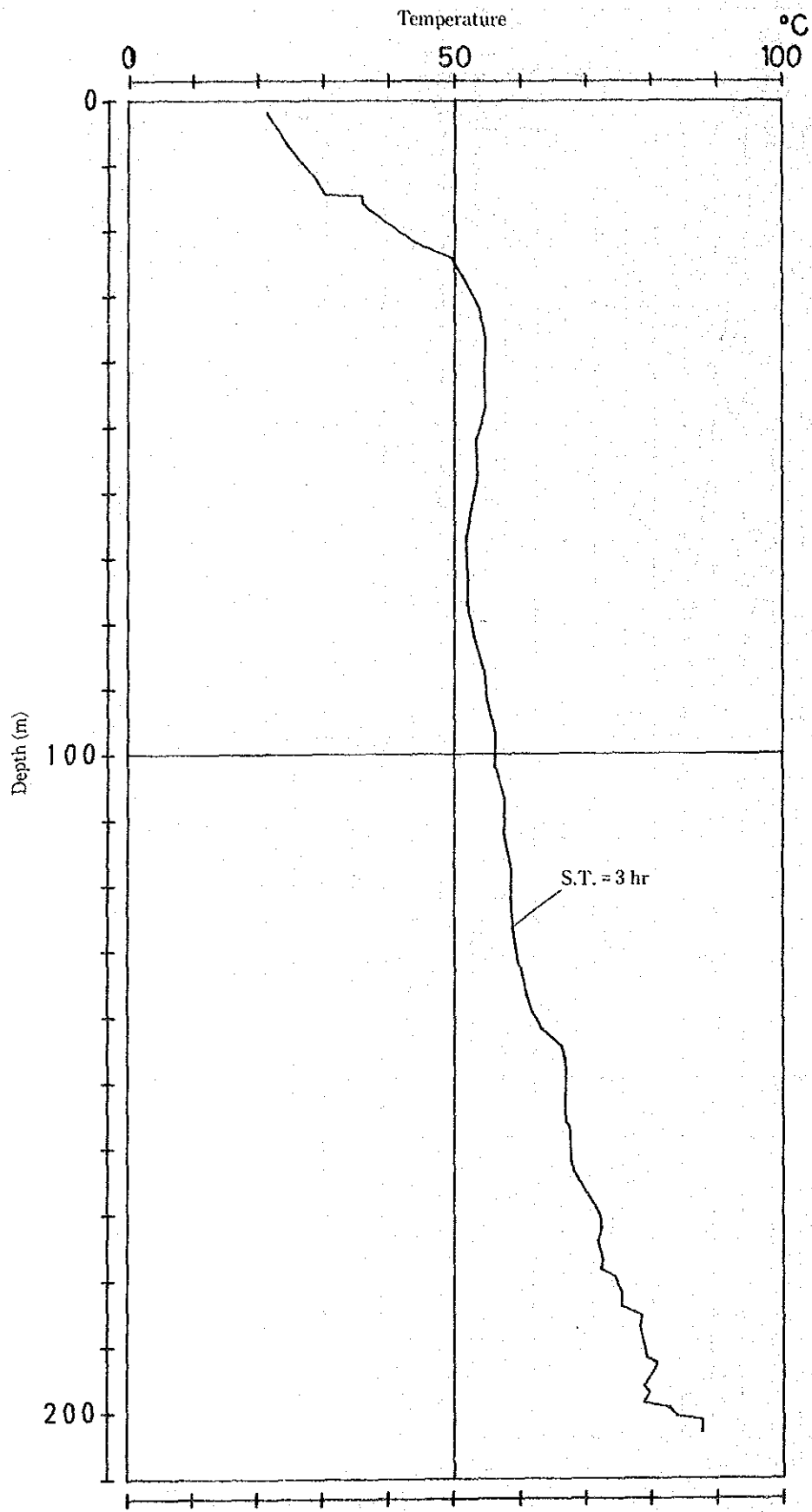


Fig. 5.4-2 Temperature Logging Chart of GTE-8 (Depth 0~203m)



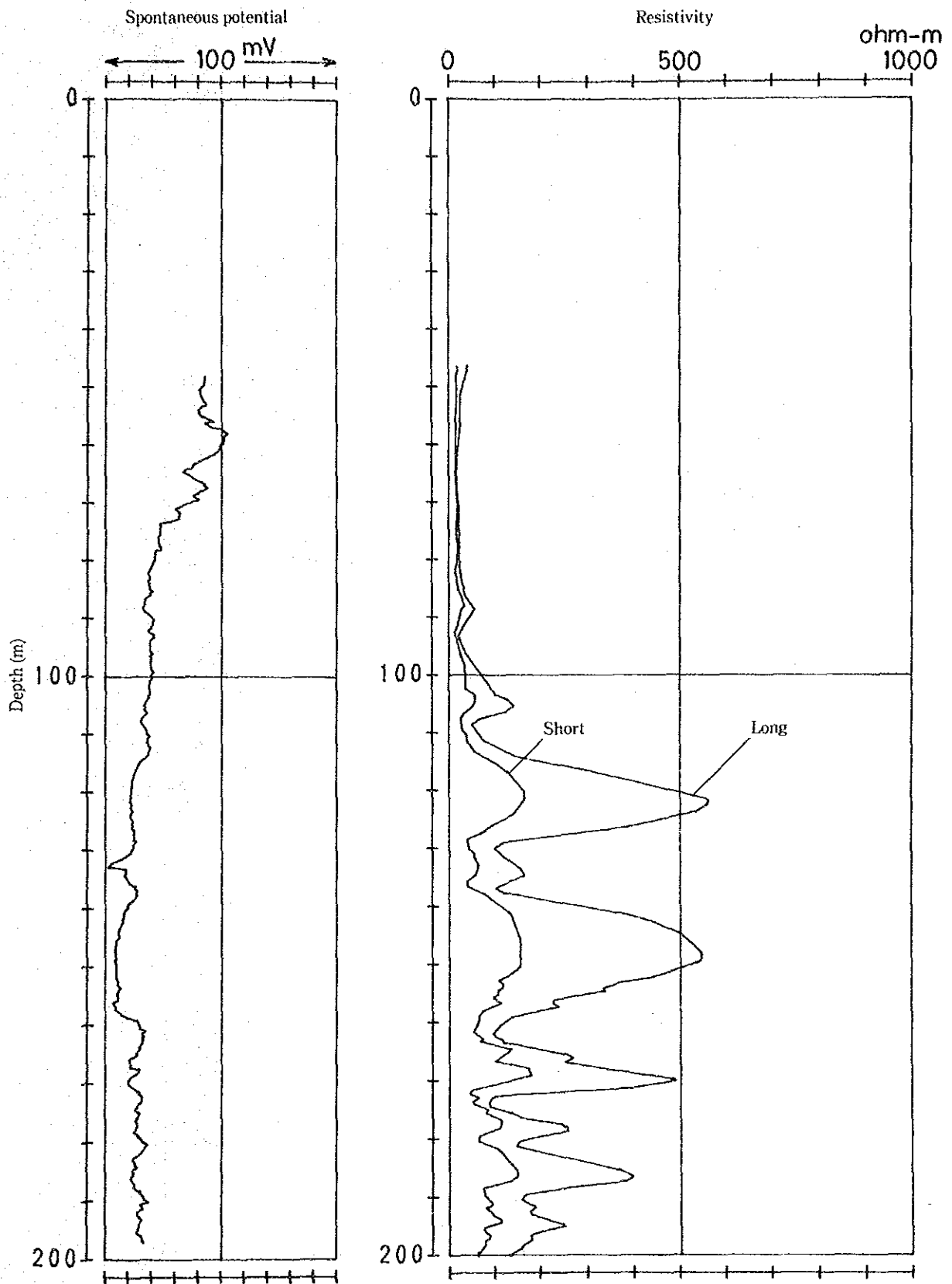


Fig. 5.4-3 Electrical Logging Chart of GTE-8 (Depth 30~200m)

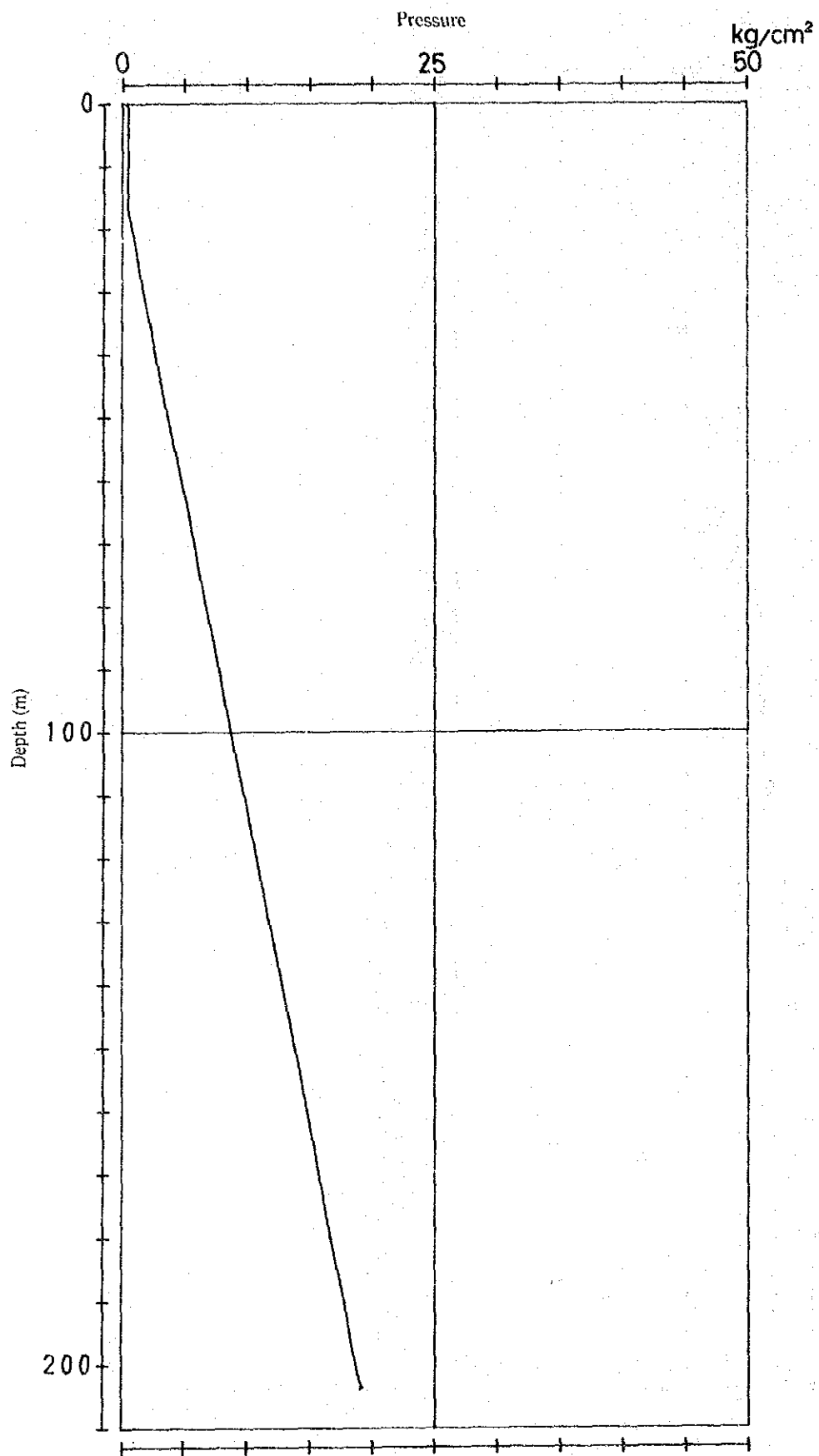


Fig. 5.4-4 Pressure Logging Chart of GTE-8 (Depth 0~203m)

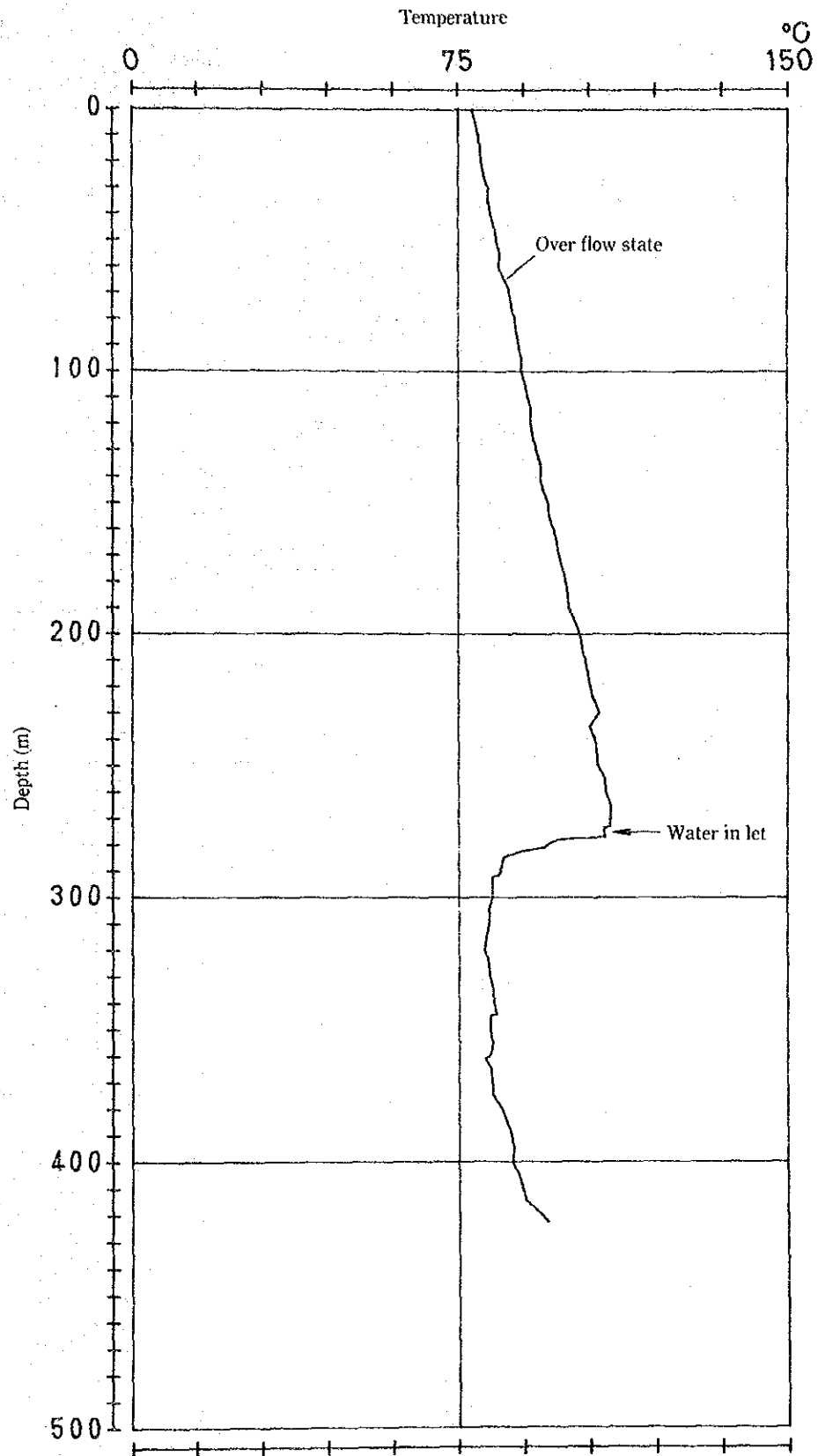


Fig. 5.4-6 Temperature Logging Chart of GTE-8 (Depth 0~424m)

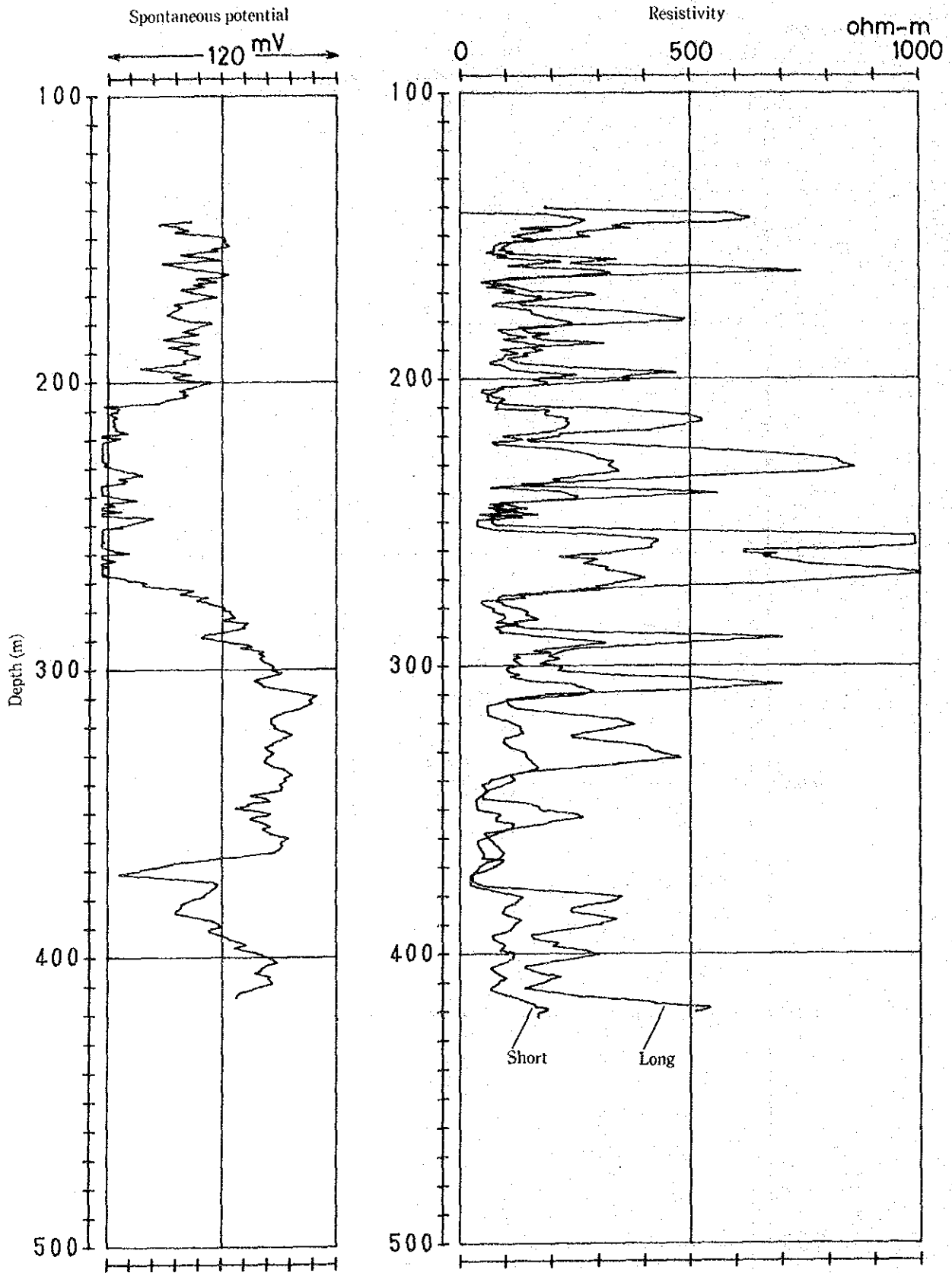


Fig. 5.4-7 Electrical Logging Chart of GTE-8 (Depth 140~420m)

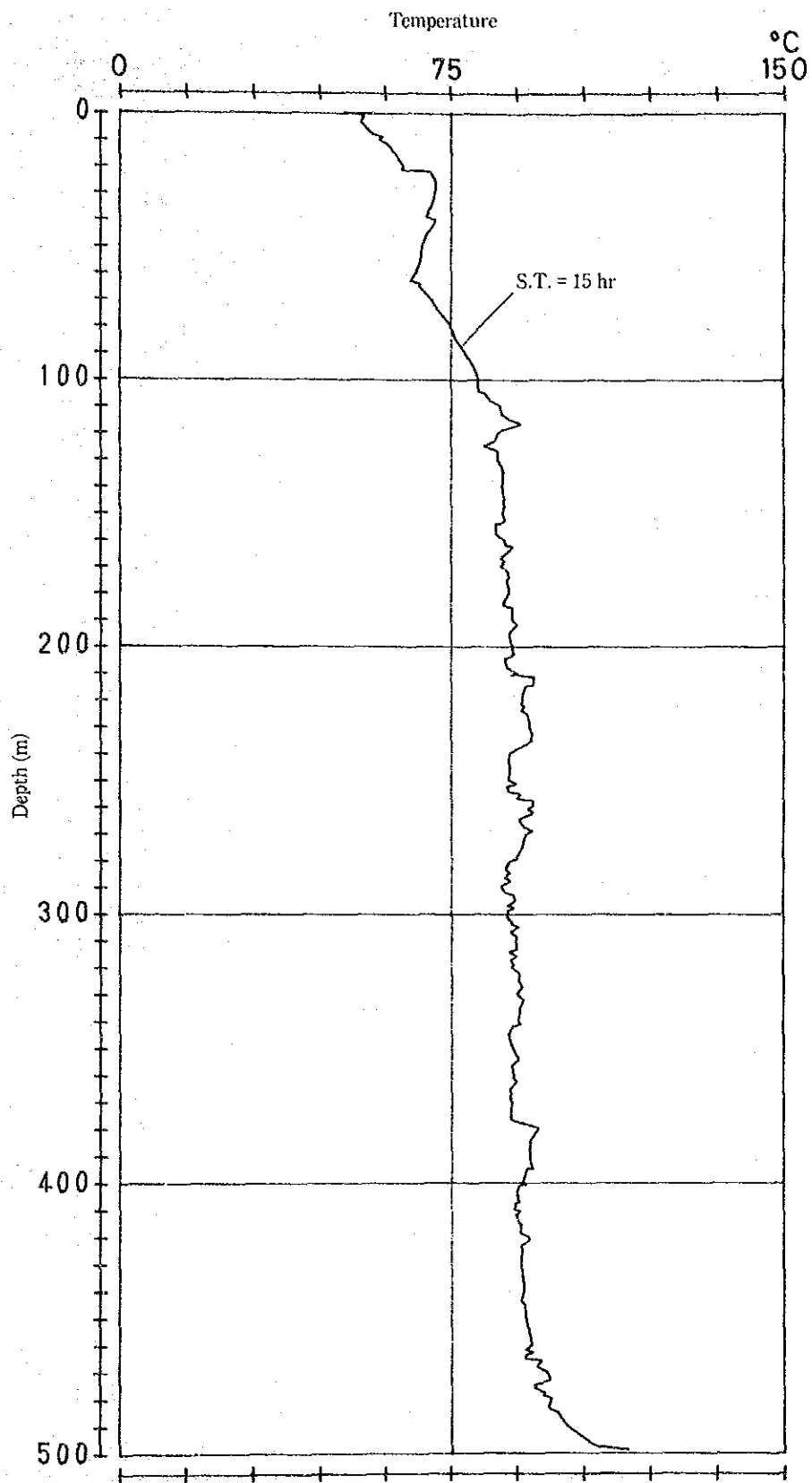


Fig. 5.4-9 Temperature Logging Chart of GTE-8 (Depth 0~499m)

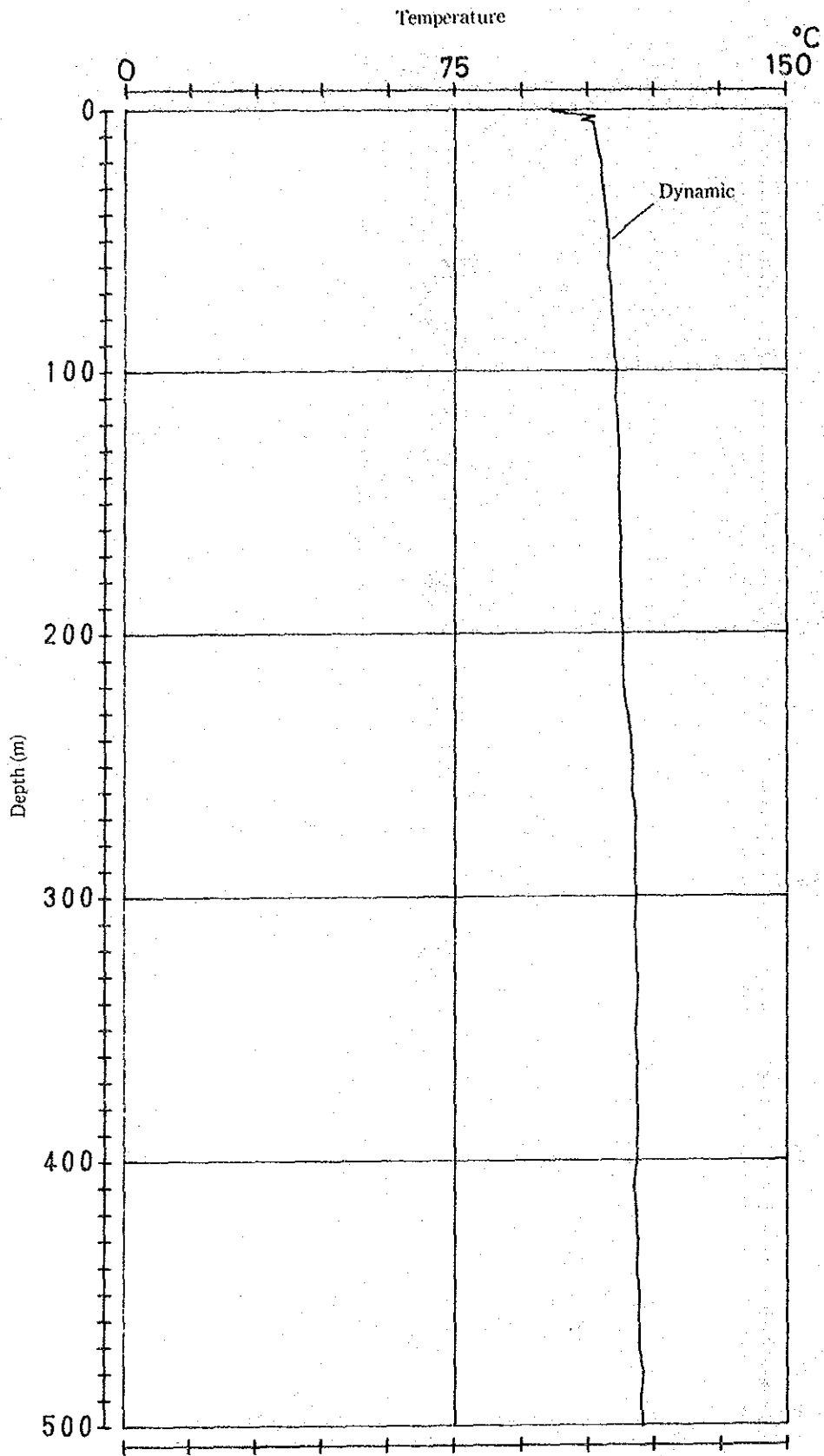


Fig. 5.4-10 Temperature Logging Chart of GTE-8 (Depth 0-500m)

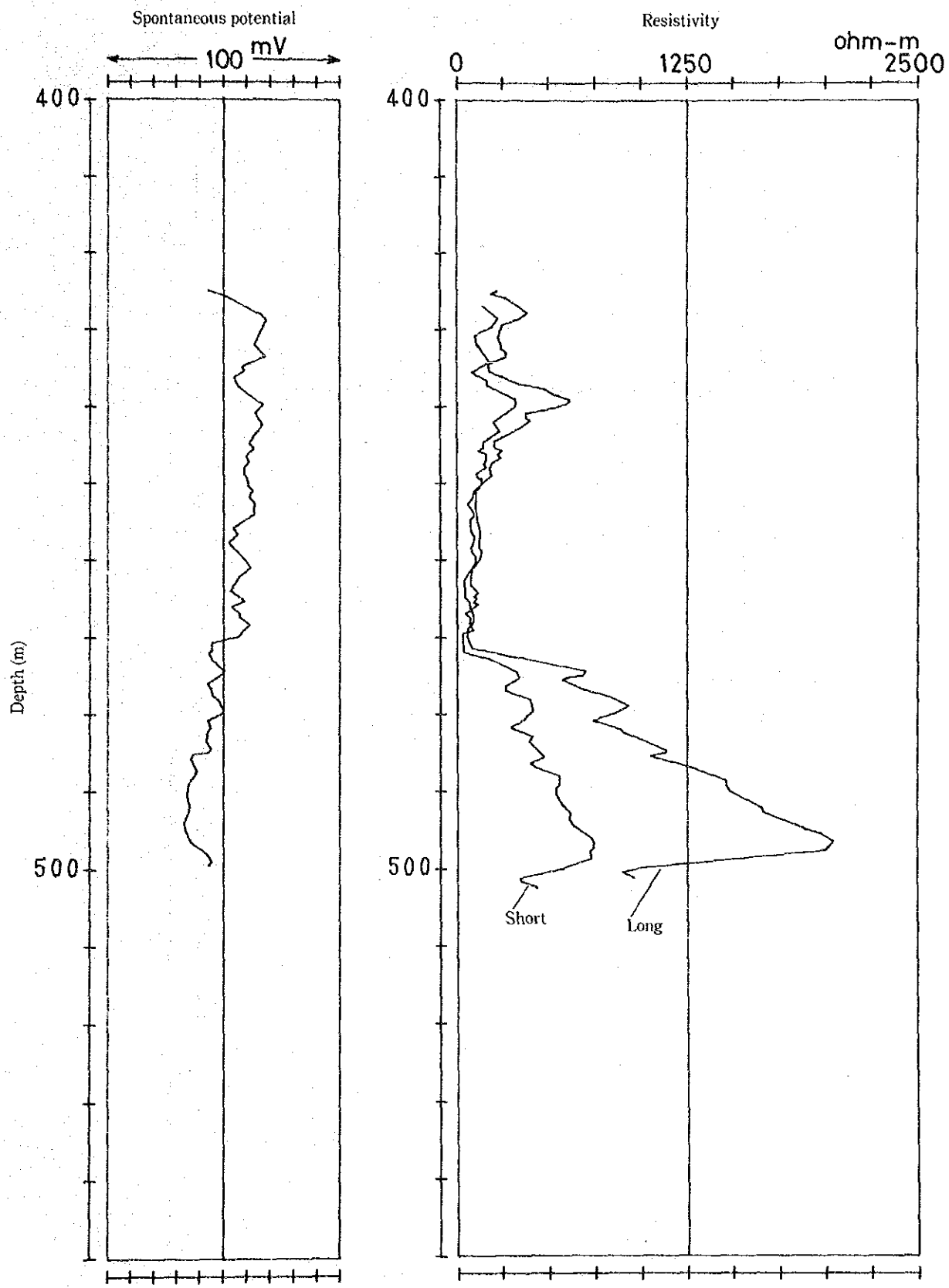


Fig. 5.4-11 Electrical Logging Chart of GTE-8 (Depth 420~550m)

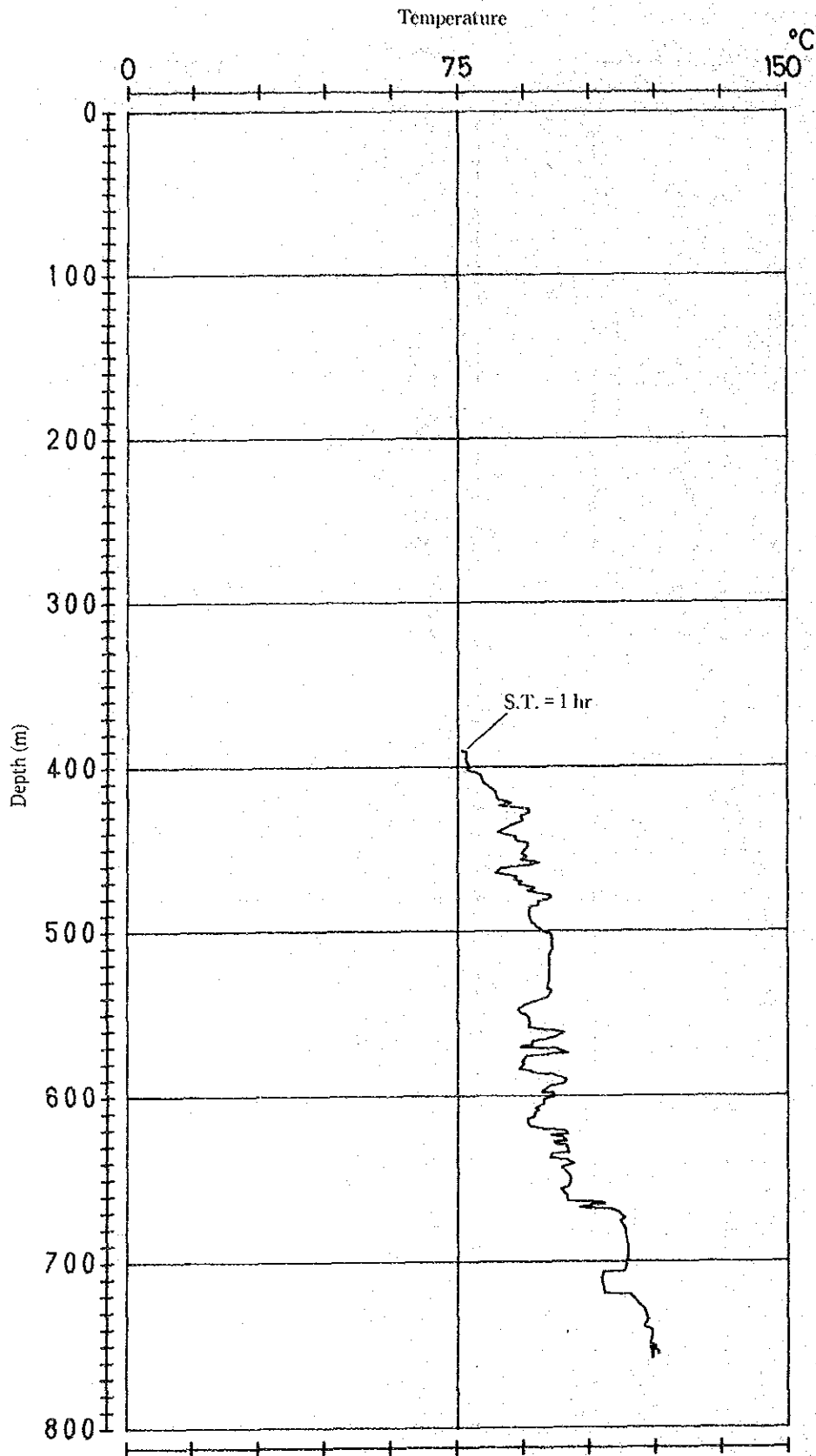


Fig. 5.4-13 Temperature Logging Chart of GTE-8 (Depth 390~755m)



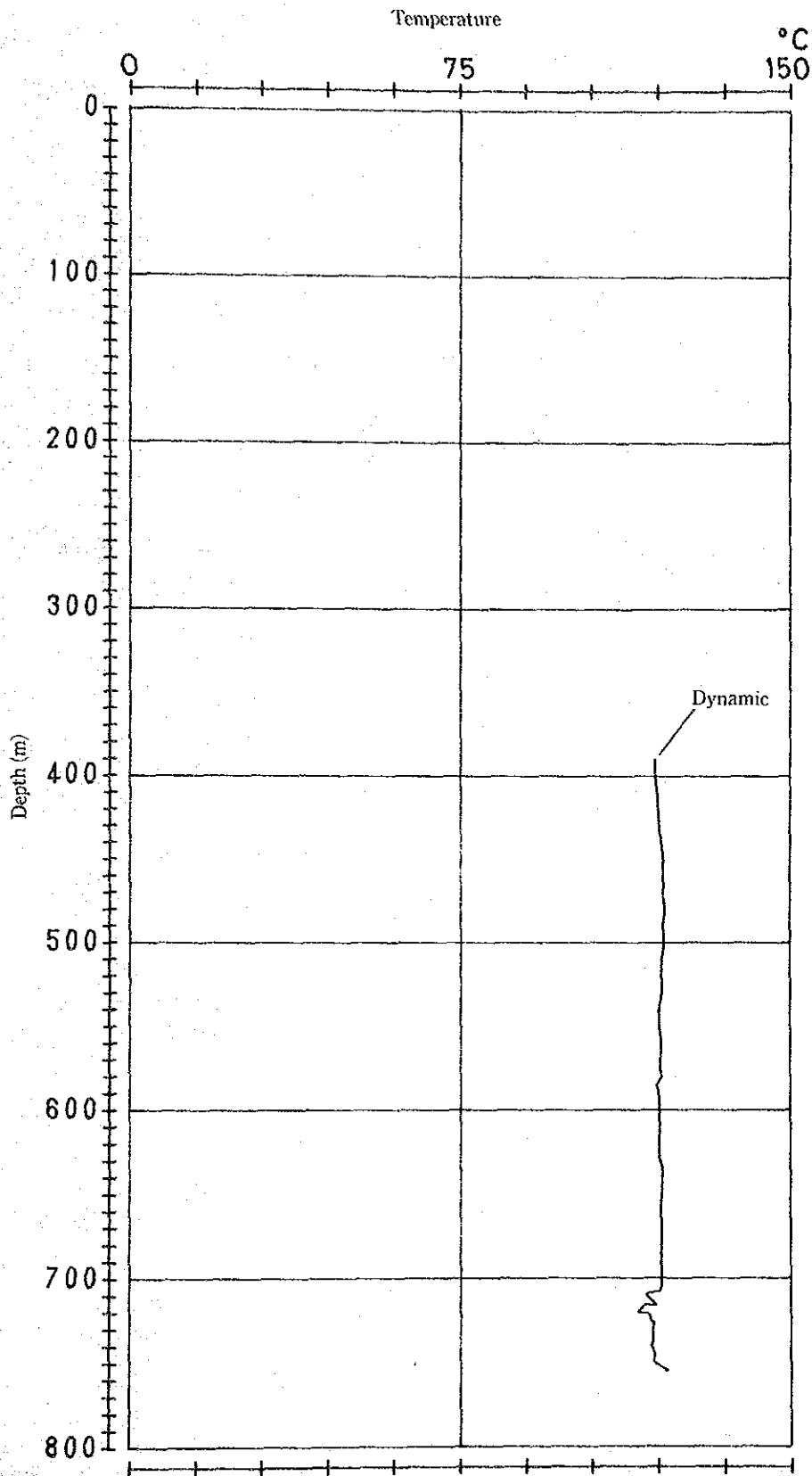


Fig. 5.4-14 Temperature Logging Chart of GTE-8 (Depth 390~755m)

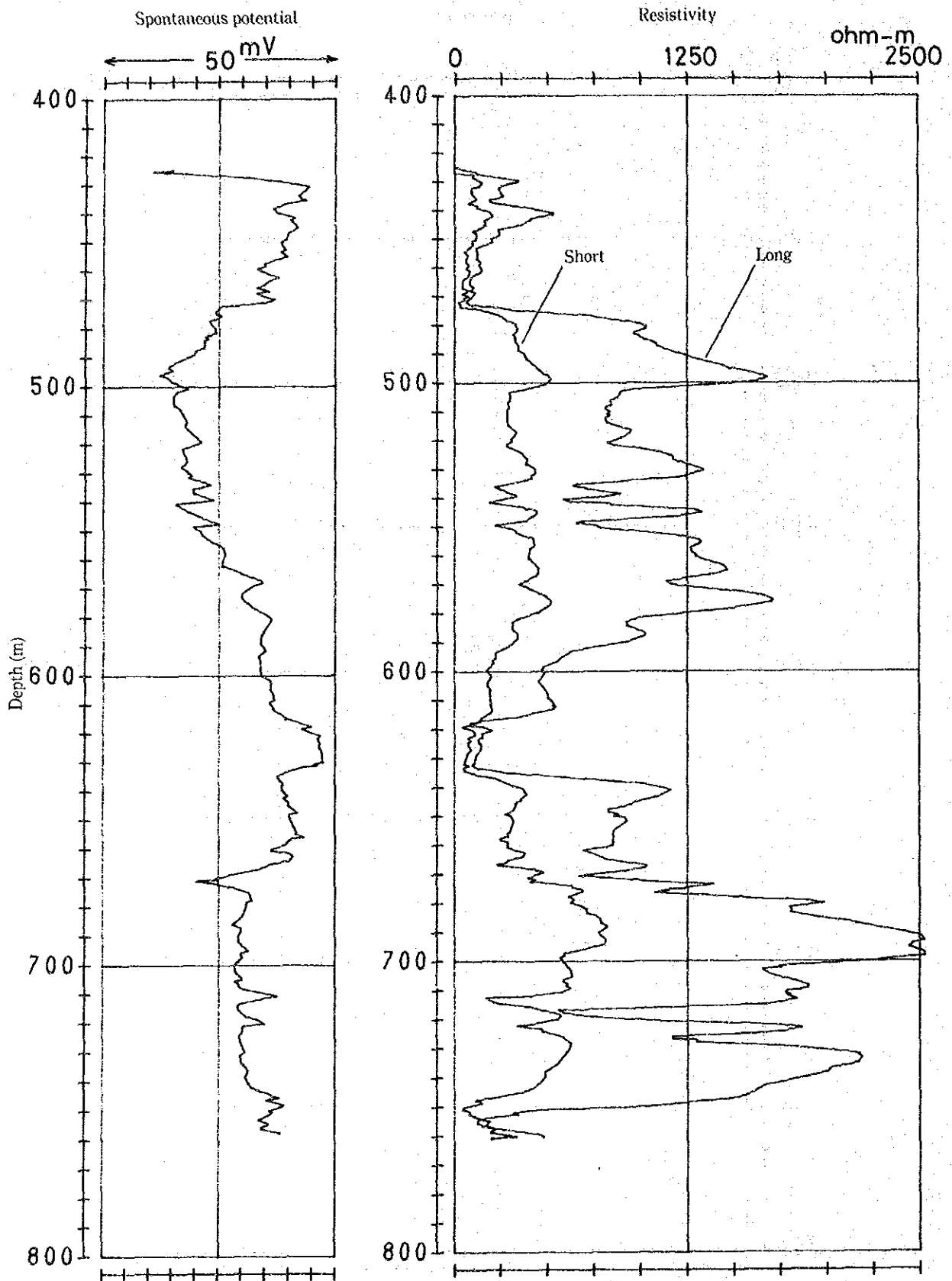


Fig. 5.4-15 Electrical Logging Chart of GTE-8 (Depth 420~755m)

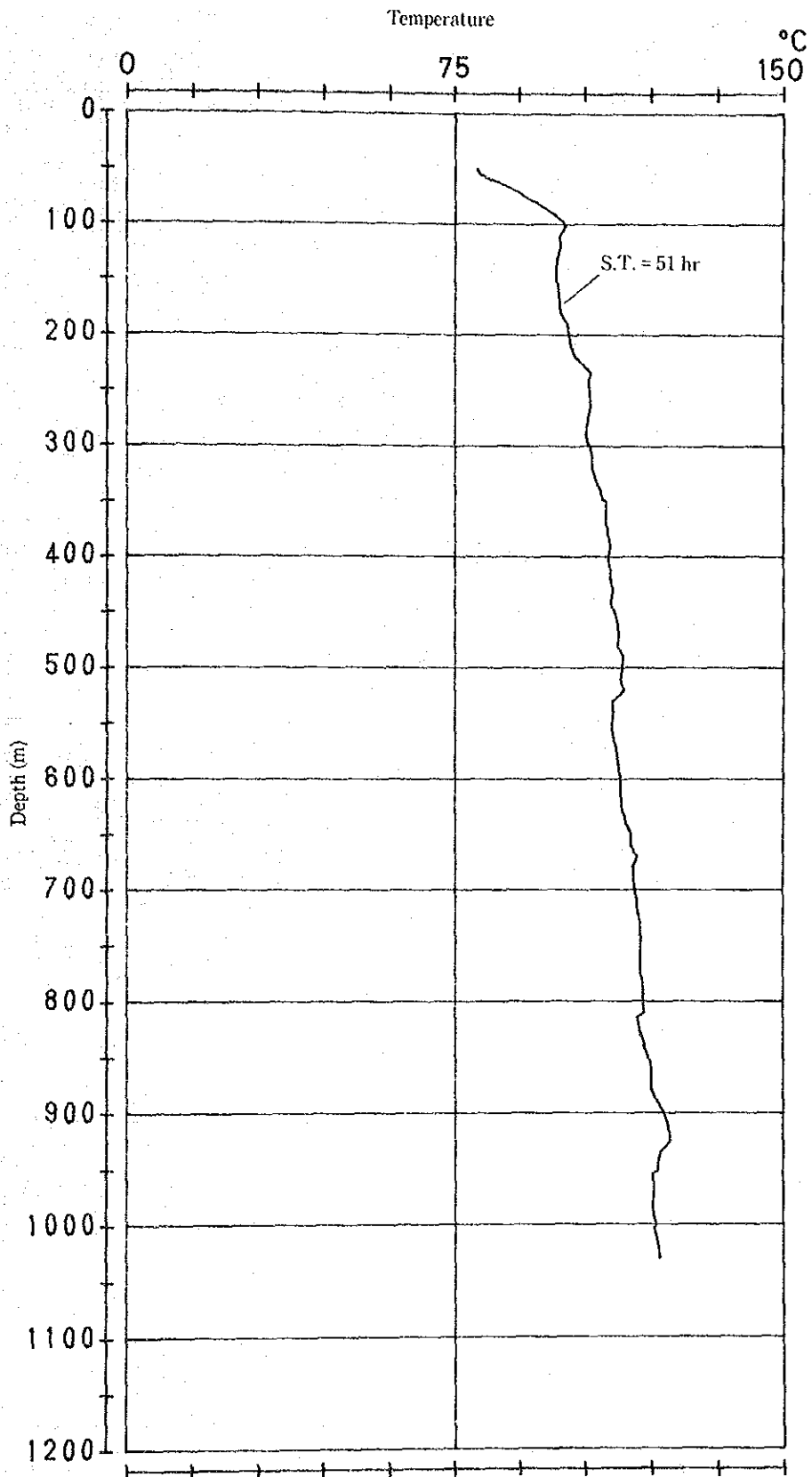


Fig. 5.4-17 Temperature Logging Chart of GTE-8 (Depth 0~1,031m)

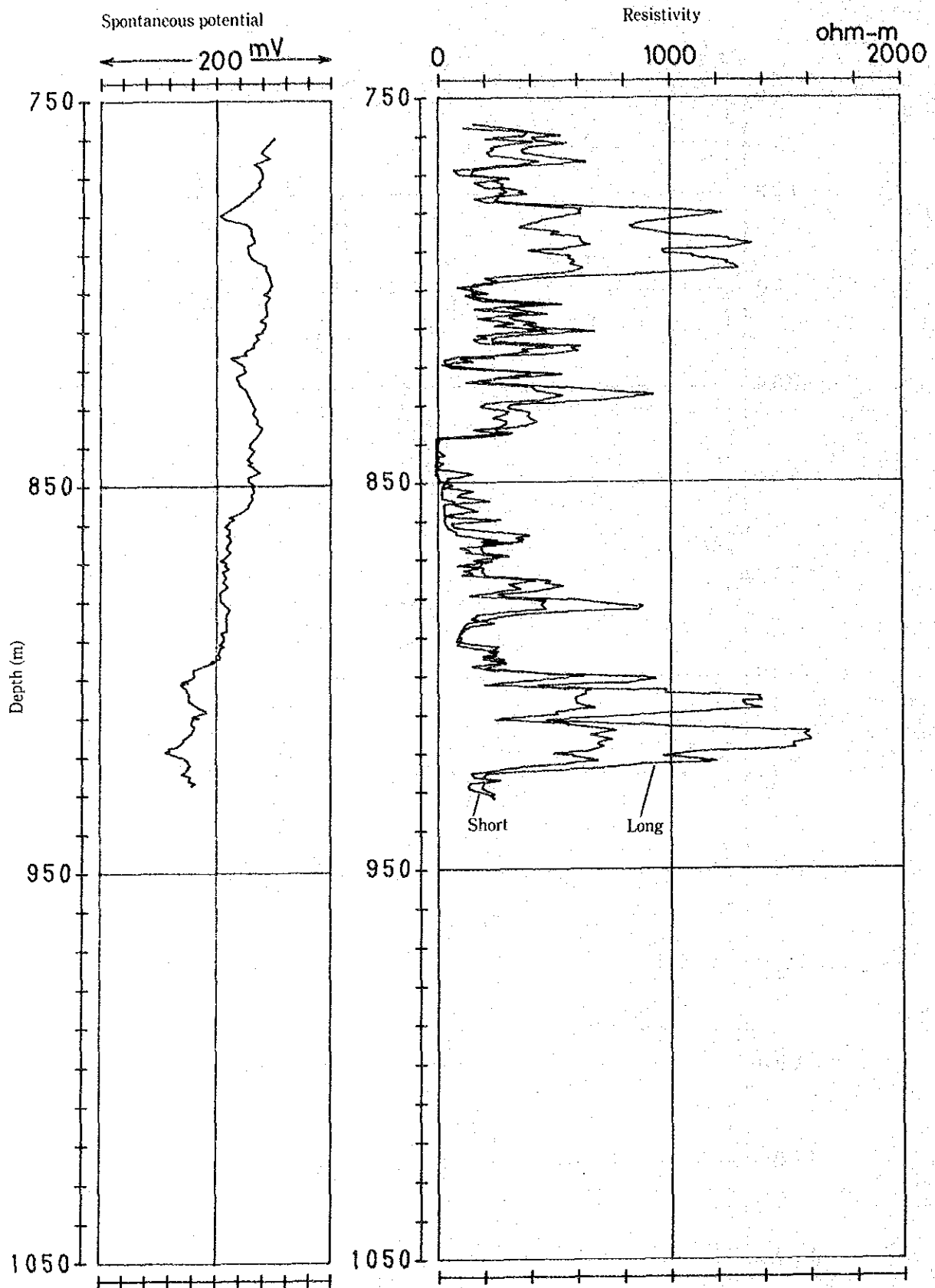


Fig. 5.4-18 Electrical Logging Chart of GTE-8 (Depth 750~930m)

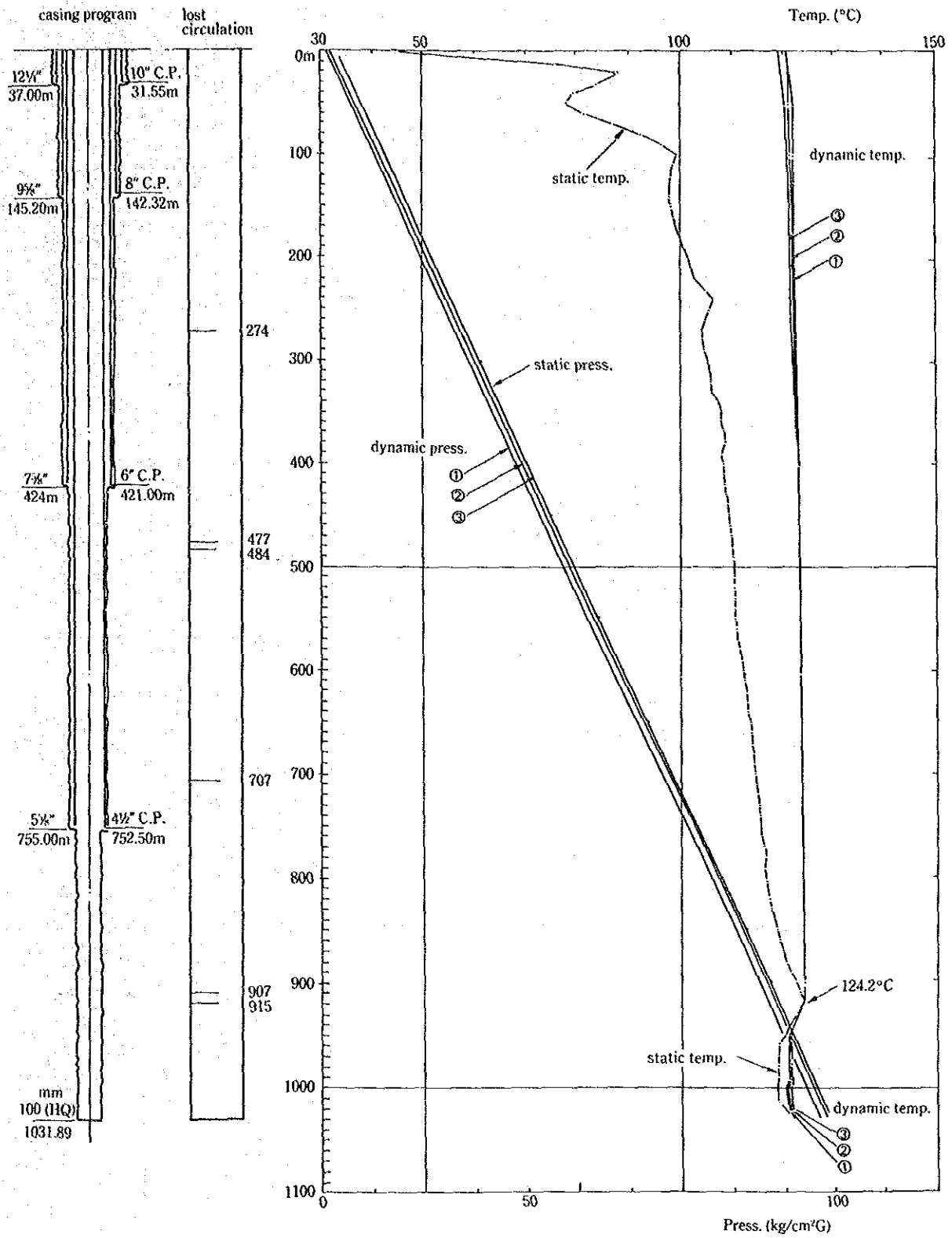


Fig. 5.4-21 GTE-8 Well Logging (Temperature, Pressure)

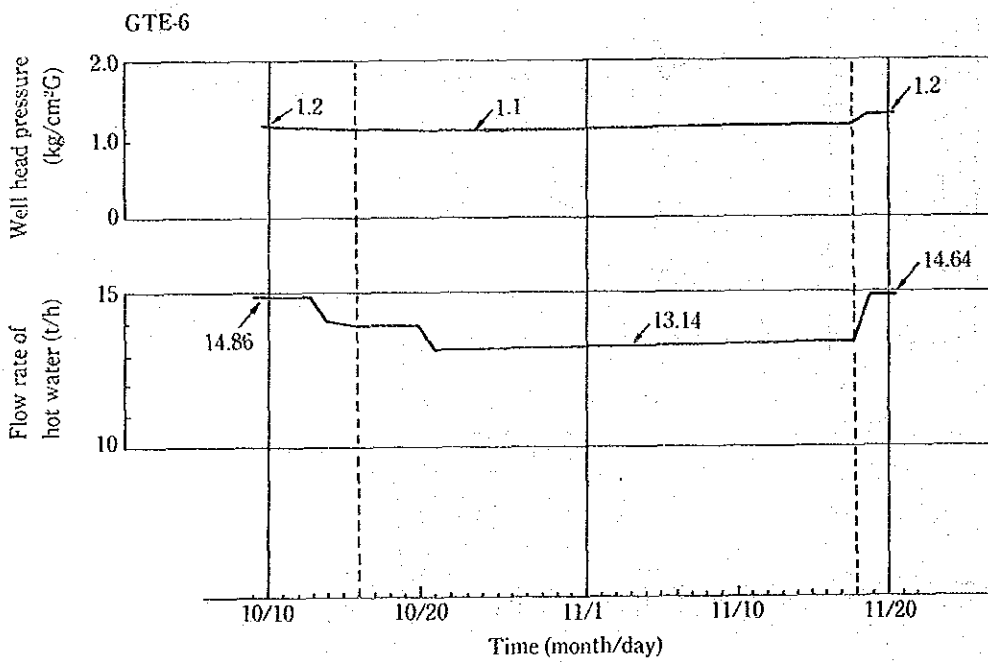
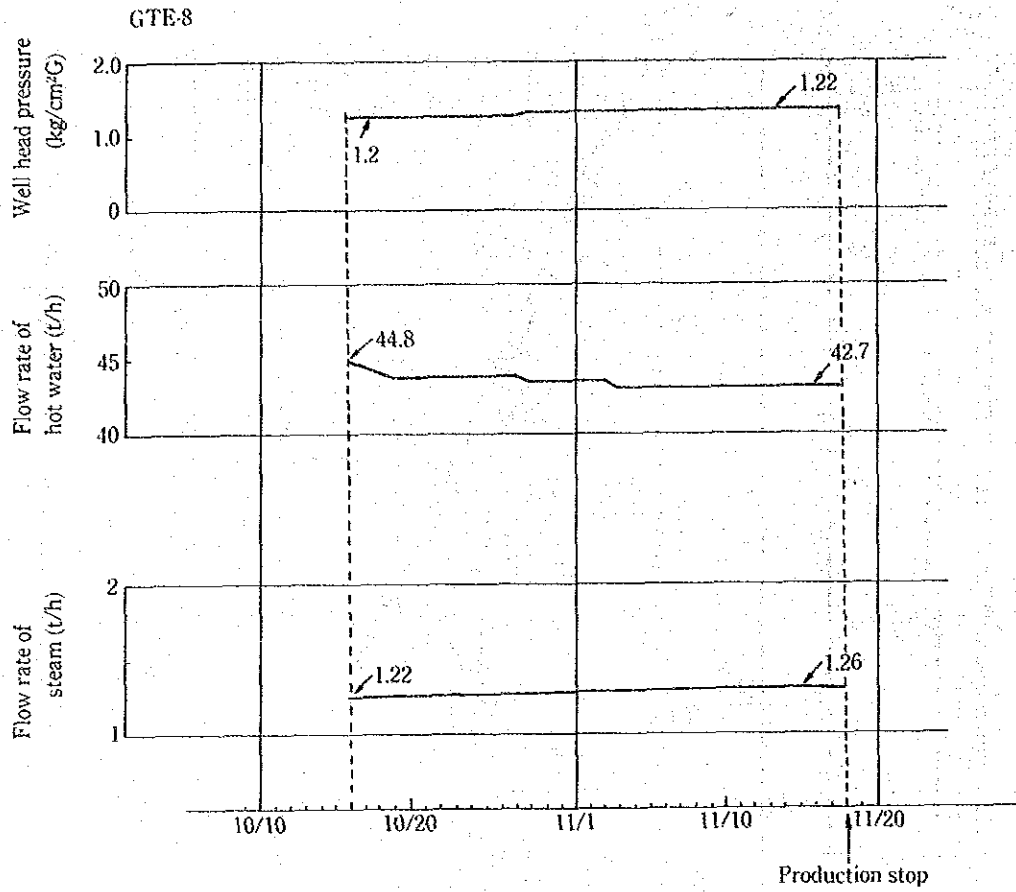


Fig. 5.4-23 Change of Production on GTE-8 and GTE-6

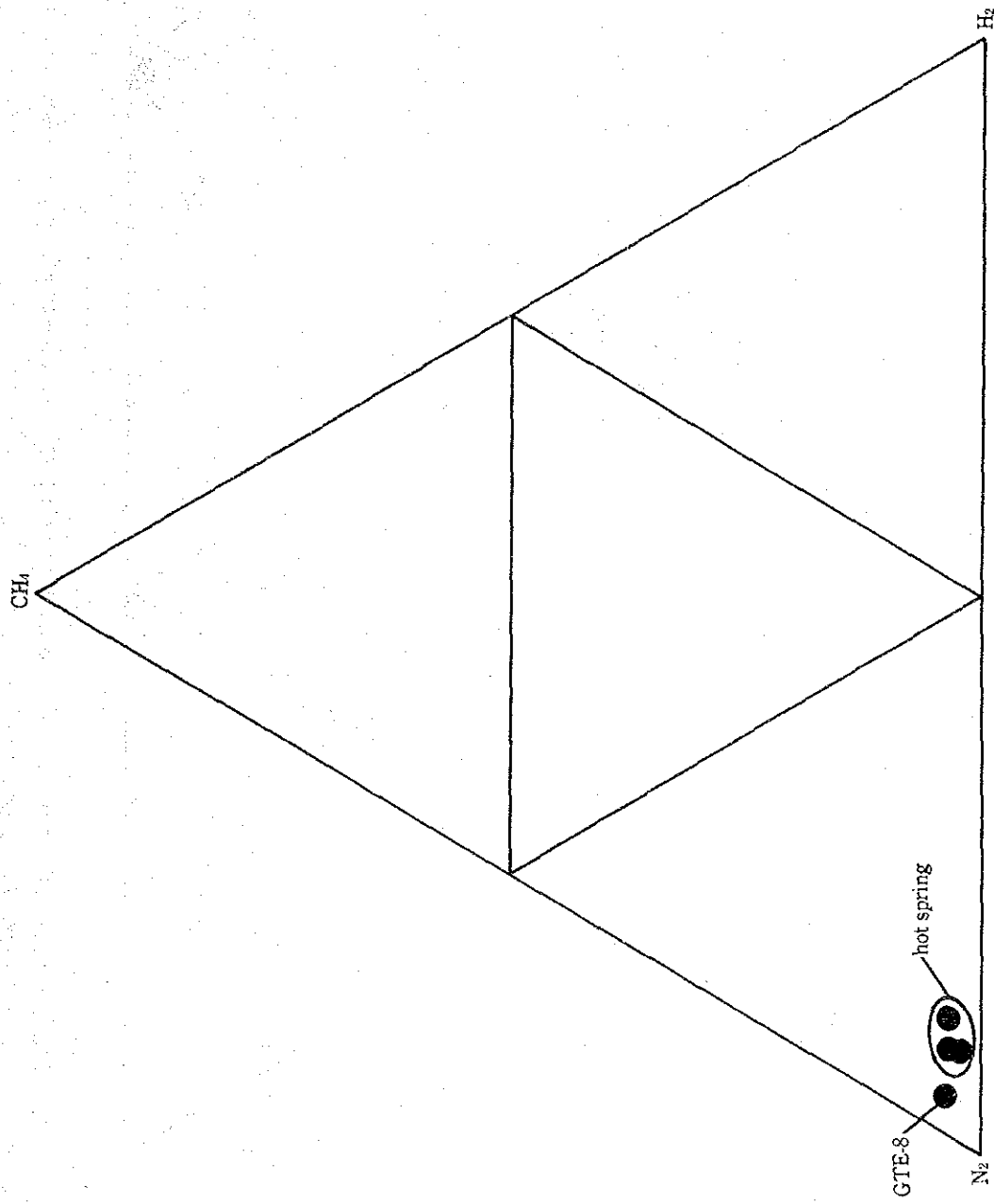


Fig. 5.5-1 Relationship among H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in Geothermal Gases from GTE-8 and Hot Springs in and around San Kampaeng

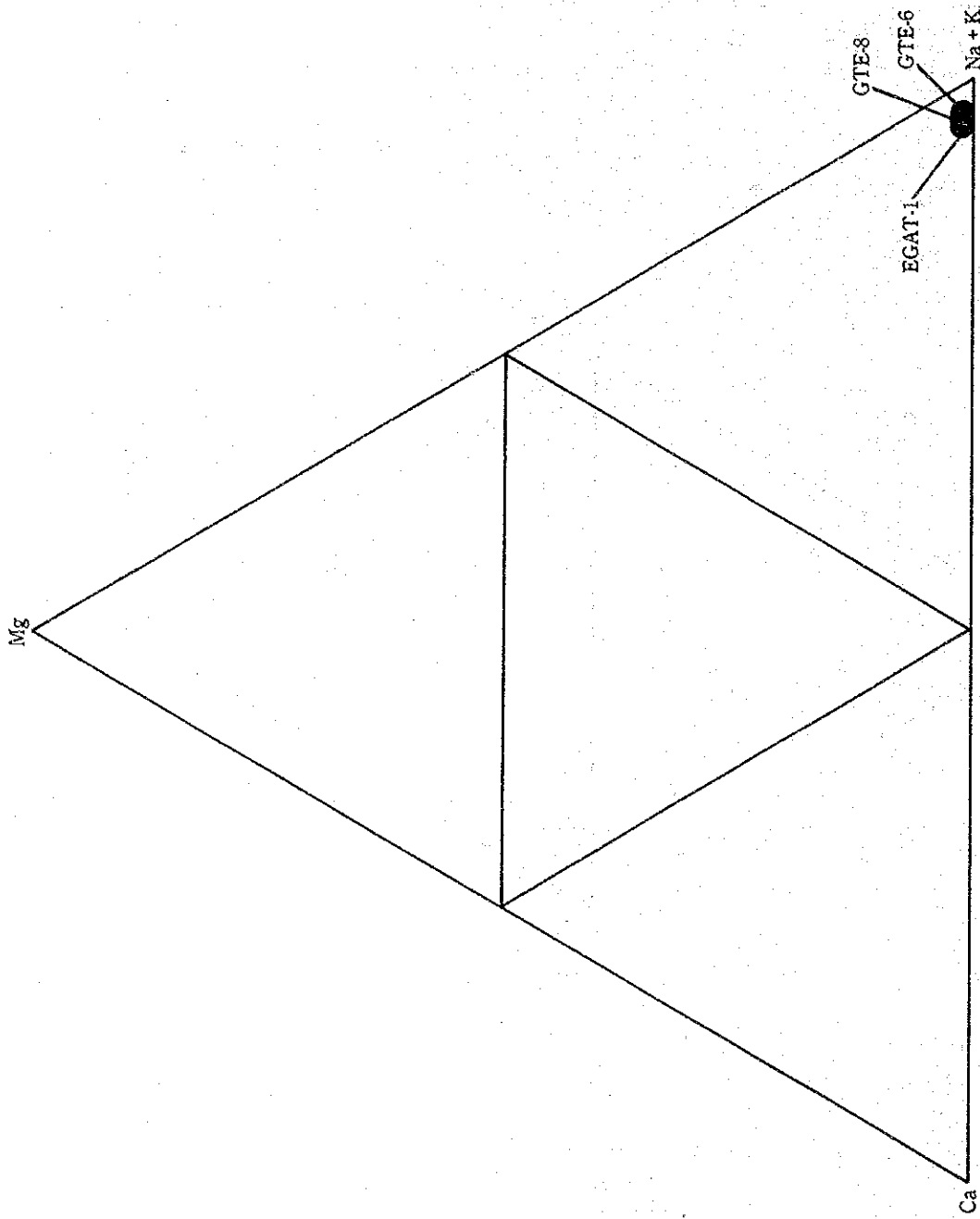


Fig. 5.5-2 Relationship among Molal Concentrations of (Na+K), Ca and Mg in Well Waters from GTE-8, GTE-6 and EGAT-1



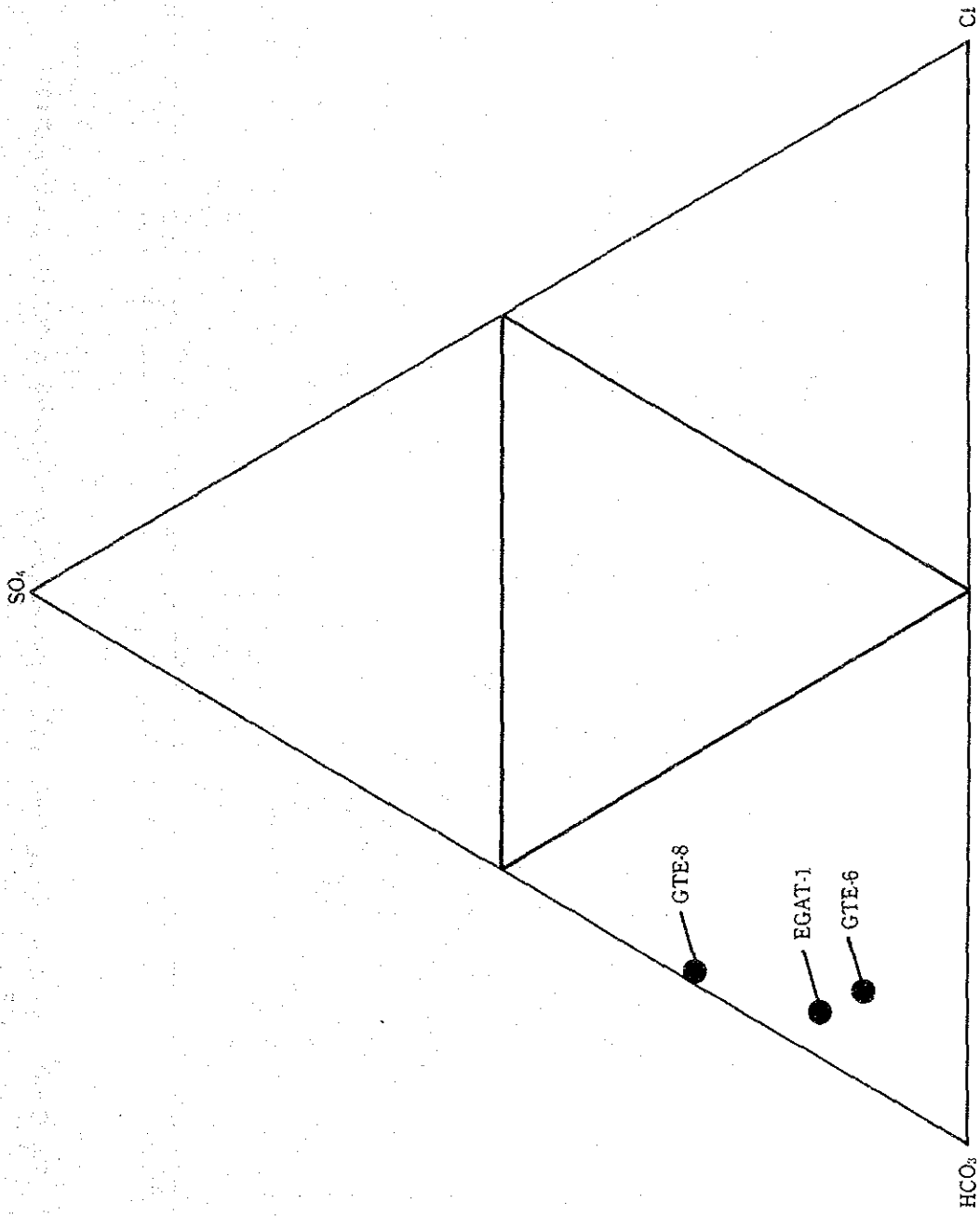


Fig. 5.5-3 Relationship among Molal Concentrations of Cl,  $\text{HCO}_3$  and  $\text{SO}_4$  in Well Waters from GTE-8, GTE-6 and EGAT-1

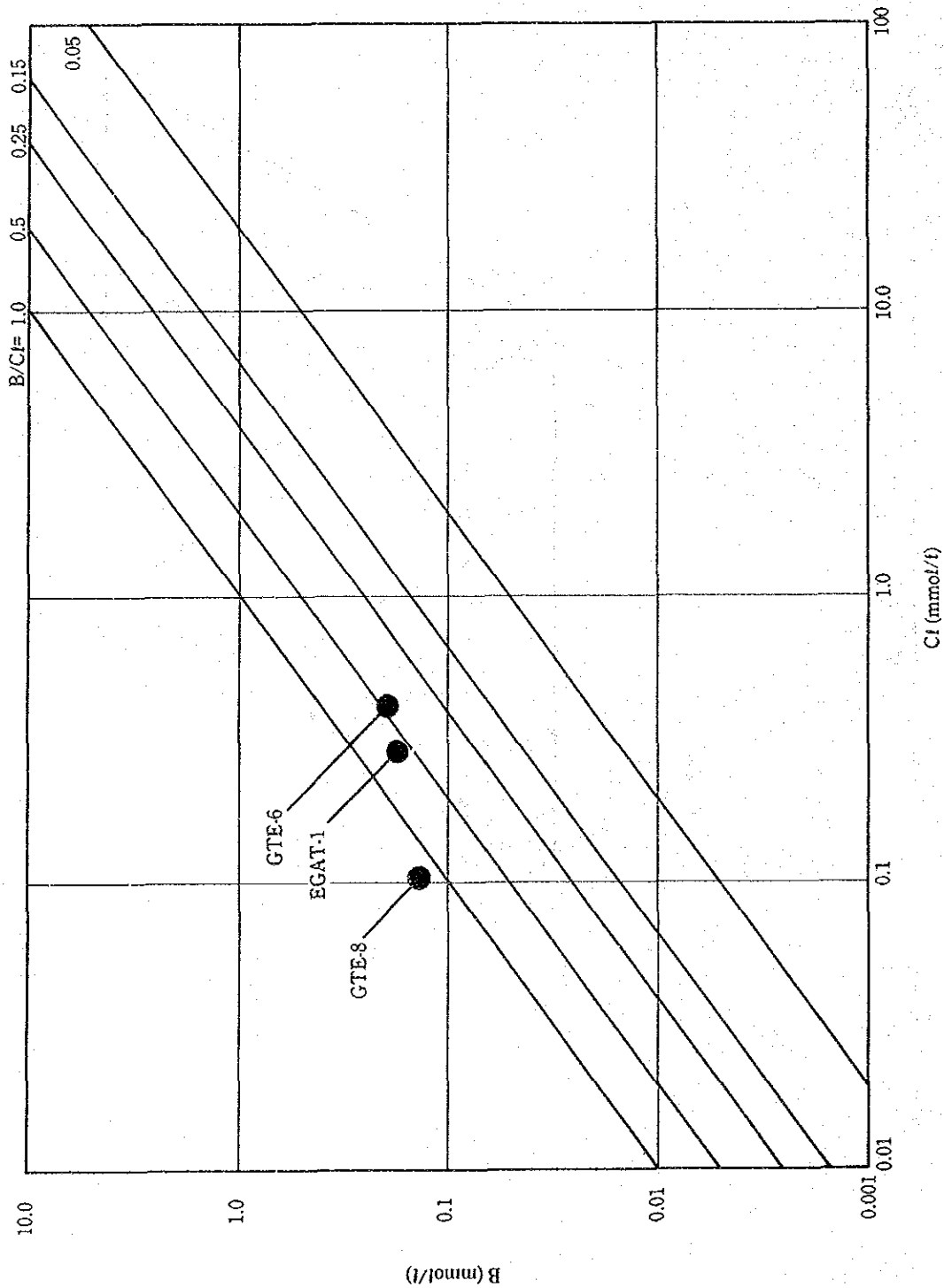


Fig. 5.5-4 Relationship between Molal Concentrations of B and Cl in Well Waters from GTE-8, GTE-6 and EGAT-1

表 5.2 - 1 G.T.E-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	32.0/39.6	780		40~60ℓ/min			Shale (siltstone) and Fine sandstone	Non Coring 8" CP cementation
	193.60	Tricone	7-5/8"	3,000~5,000	35~45	}	780	Bentonite		8"	142.20		
	203.00	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
	142.90	Tricone	5-5/8"	2,500~3,500	40~45	52.5/60.4	550						
424.00~755.00	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
	755.00	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

Date	1987													
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Items	12													
Foundation Work & Rig-up														
Mobilization (JICA Engineer)	10,12 H						25,26 H							
0.00m ~ 37.00m	13,18 H													
37.00 ~ 203.00	19 H	22 H	14 H	15 H										
203.00 ~ 424.00				17,19 H	20 H									
424.00 ~ 518.07				4 H	8 H	17 H								
518.07 ~ 755.00							27 H		16 H	20,28 H				
755.00 ~ 1,049.84										29 H		3 H	25 H	4 H
203.00m		23 H												
424.00m				16 H										
501.00m														
654.00m									23,25 H					
755.00m										17,19 H				
914.00m											12,19 H			
1,031.00m												4 H	17 H	18,19 H
1,049.00m														17,19 H
Production test												4 H		24 H
Machine trouble & Others														5 H
Demobilization (JICA Engineer)														20,23 H

表 5.2 - 3 GTE-8掘削作業の内訳(1)

Depth	Work Items	Period	No. of Calendar days	No. of Working days	Other days
0.00 m ~ 37.00 m	12-1/4" T.B (0.00 m ~ 37.00 m)	1986 Nov. 13 ~ Nov. 16	4	4	0
	10" C.P insertion	Nov. 17	1	1	0
	Wait on cement	Nov. 18	1	1	1
	Total		6	5	1
37.00 m ~ 203.00 m	9-5/8" T.B (37.00 m ~ 56.04 m)	Nov. 19 ~ Nov. 20	2	2	0
	Cementing, Drilling out cement	Nov. 21	1	1	0
	9-5/8" T.B (56.04 m ~ 121.50 m)	Nov. 22 ~ Nov. 27	6	6	0
	Cementing, Waiting on cement, Drilling out cement	Nov. 28 ~ Nov. 30	3	3	0
	9-5/8" T.B (121.50 m ~ 137.51 m)	Dec. 1 ~ Dec. 4	4	4	0
	Cementing, Wait on cement, Drilling out cement	Dec. 5 ~ Dec. 8	4	4	0
	9-5/8" T.B (137.51 m ~ 139.22 m)	Dec. 9	1	1	0
	7-5/8" T.B (139.22 m ~ 144.47 m)	Dec. 10 ~ Dec. 11	2	2	0
	Fishing T.B cone	Dec. 12	1	1	0
	7-5/8" T.B (144.47 m ~ 150.40 m)	Dec. 13 ~ Dec. 15	3	3	0
	5-5/8" T.B (150.40 m ~ 203.00 m)	Dec. 16 ~ Dec. 22	7	7	0
	Well logging	Dec. 23	1	1	0
	9-5/8" T.B reaming (139.22 m ~ 145.20 m)	Dec. 24 ~ Dec. 26	3	3	0
	Cementing (145.20 m ~ 203.00 m)	Dec. 27	1	1	0
	Material procurement and machine maintenance	1987 Dec. 28 ~ Jan. 10	14	11	3
	Preparation of 8" C.P Insertion	Jan. 11 ~ Jan. 12	2	2	0
	8" C.P Insertion, Cementing	Jan. 13	1	1	0
Wait on cement	Jan. 14	1	1	0	
Total		57	54	3	
203.00 m ~ 424.00 m	7-5/8" T.B Drilling out cement and reaming (145.20 m ~ 203.00 m)	Jan. 15 ~ Jan. 20	6	6	0
	7-5/8" T.B (203.00 m ~ 235.44 m)	Jan. 21 ~ Jan. 24	4	4	0
	5-5/8" T.B (235.44 m ~ 337.45 m)	Jan. 25 ~ Feb. 2	9	9	0
	Well logging, Cementing	Feb. 3	1	1	0
	Wait on cement	Feb. 4	1	1	0
	7-5/8" T.B Drilling out cement and reaming (235.44 m ~ 337.45 m)	Feb. 5 ~ Feb. 10	6	6	0
	7-5/8" T.B (337.45 m ~ 424.00 m)	Feb. 11 ~ Feb. 15	5	5	0
	Well logging	Feb. 16	1	1	0
	6" C.P Insertion, Cementing	Feb. 17	1	1	0
	Wait on cement	Feb. 18 Feb. 19	2	2	0
Total		36	36	0	
424.00 m ~ 518.07 m	B.O.P. Installation, 5-5/8" T.B Drilling out cement	Feb. 20	1	1	0
	5-5/8" T.B (424.00 m ~ 435.94 m)	Feb. 21	1	1	0
	Cementing	Feb. 22	1	1	0

表 5.2 - 3 GTE-8 掘削作業の内訳 (2)

Depth	Work Items	Period	No. of Calendar days	No. of Working days	Other days
424.00 m ~ 518.07 m	Drilling out cement	Feb. 23	1	0	1
	5-5/8" T.B (435.94 m ~ 499.00 m)	Feb. 24 ~ Mar. 2	7	7	0
	Machine repairs	Mar. 3	1	1	0
	HQ-WL Coring (499.00 m ~ 501.69 m)	Mar. 4	1	1	0
	Well logging	Mar. 5 ~ Mar. 7	3	3	0
	Cementing	Mar. 8	1	1	0
	Measurement of hole deviation	Mar. 9	1	1	0
	Drilling out cement	Mar. 10	1	1	0
	HQ-WL Coring (501.69 m ~ 518.07 m)	Mar. 11 ~ Mar. 14	4	4	0
	Cementing, Wait on cement	Mar. 15 ~ Mar. 17	3	3	0
	Total		26	25	1
518.07 m ~ 755.00 m	Preparation of Drilling	May 27 ~ May 28	2	2	0
	5-5/8" T.B Drilling out cement	May 29 ~ May 31	3	3	0
	HQ-WL Coring (518.07 m ~ 653.44 m)	Jun. 1 ~ Jun. 11	11	11	0
	5-5/8" T.B Reaming (to 654.00 m)	Jun. 12 ~ Jun. 22	11	11	0
	Well logging	Jun. 23 ~ Jun. 25	3	3	0
	Cementing	Jun. 26	1	1	0
	Wait on cement, Drilling out cement	Jun. 27 ~ Jun. 29	3	3	0
	HQ-WL Coring (654.00 m ~ 656.64 m)	Jun. 30	1	1	0
	Cementing, Wait on cement, Drilling out cement	Jun. 1 ~ Jul. 2	2	2	0
	5-5/8" T.B (654.00 m ~ 755.00 m)	Jul. 3 ~ Jul. 16	14	14	0
	Well logging	Jul. 17 ~ Jul. 19	3	3	0
	Cementing, Wait on cement, Drilling out cement	Jul. 20 ~ Jul. 24	5	5	0
	4-1/2" C.P Insertion, Cementing, Wait on cement	Jul. 25 ~ Jul. 28	4	4	0
	Total		63	63	0
755.00 m ~ 1049.00 m	HQ-WL Coring (755.00 m ~ 914.59 m)	Jul. 29 ~ Aug. 11	14	14	0
	Well logging, Flow test	Aug. 12 ~ Aug. 19	8	8	0
	Cementing, Wait on cement, Drilling out cement	Aug. 20 ~ Sep. 5	17	17	0
	HQ-WL Coring (914.59 m ~ 1031.89 m)	Sep. 6 ~ Oct. 3	28	28	0
	Preparation of Production test	Oct. 4 ~ Oct. 8	5	5	0
	Well logging, Production test	Oct. 9 ~ Oct. 17	9	9	0
	Flow test, Machine maintenance	Oct. 18 ~ Nov. 17	31	31	0
	Well logging	Nov. 18 ~ Nov. 19	2	2	0
	Preparation of Drilling	Nov. 20 ~ Nov. 24	5	5	0
	HQ-WL Coring (1031.89 m ~ 1049.84 m)	Nov. 25 ~ Dec. 4	10	10	0
	Miscellaneous work	Dec. 5 ~ Dec. 7	3	3	0
	Repairs of Brak drum, Inspection of Drilling tools	Dec. 8 ~ Dec. 16	9	9	0
	Well logging	Dec. 17 ~ Dec. 19	3	3	0
	Total		144	144	0
	Grand Total		332	327	5

表 5.2-4 GTE-8 セメンチング実績

(1) Casing Pipe Cementing

Casing Step	1st step	2nd step	3rd step	4th step	Remarks
Nominal dia. x depth	10B x 29.60 m	8B x 142.20 m	6B x 421.00 m	4B x 752.50 m	
Volume of clearance between well wall and casing	1,174 L	1,919 L	3,796 L	5,241 L	
Q'ty of slurry pressed in	1,760 L	2,552 L	4,942 L	7,196 L	
Q'ty of cement used	2,217 kg	2,302 kg	4,007 kg	4,092 kg	API class G cement containing Silica four
Specific gravity	1.80	1.80	1.80	1.50	
Setting time	48 hr	40 hr	65 hr	64 hr	
Method	one-plug method	two-plug method	two-plug method	two-plug method	

(2) Plug Back Cementing

Depth of well bottom (m)	Purpose	Q'ty injected (kg)	Method	Cement head (m)	Result
56.00	Preventing cave-in	2,850	Squeezed through HQ rod	24.60	Success
121.50	Preventing lost circulation	2,180	Squeezed through HQ rod	88.00	Failure
137.51	Preventing lost circulation	4,800	Squeezed through HQ rod (2 times)	90.00	Success
203.00	Preventing lost circulation	1,200	Squeezed through HQ rod	145.20	Success
337.00	Preventing blow-out	2,800	Squeezed through HQ rod (2 times)	203.00	Success
435.94	Preventing lost circulation	1,279	Squeezed through HQ rod	361.54	Success
499.00	Preventing blow-out	2,132	Squeezed through HQ rod	445.24	Success
518.07	Preventing blow-out	1,535	Squeezed through HQ rod	420.00	Success
643.00	Preventing blow-out	7,103	Squeezed through BQ rod (2 times)	630.00	Success
706.92	Preventing blow-out	9,720	Squeezed through BQ rod (3 times)	650.00	Success
907.00	Preventing blow-out	13,211	Squeezed through BQ rod (4 times)	870.00	Success
907.00	Preventing blow-out	9,600	Plug method (2 times)	530.00	Success

表 5.2 - 5 GTE-8 逸泥および掘削泥水

Depth of Lost circulation	Water level	Rocks	Mud circulation in/out (lost (-) or over (+) flow) (ℓ/min)	Drilling mud used
8.00 m		Siltstone	700/683 (-17)	Tel-stop (grain) 5 kg
61.80 m ~ 79.60 m	17 m	Shale & Siltstone	780/720 (-40 ~ -60)	Tel-stop (powder) 25 kg
119.22 m ~ 121.50 m	8 m	Shale & Fine sandstone	780/730 (-40 ~ -50)	Tel-stop (grain) 134 kg Tel-stop (powder) 100 kg Cement slurry 2400 ℓ
137.51 m		Fine sandstone	780/730 (-50)	Cement slurry 4090 ℓ
272.80 m ~ 279.34 m		Shale & Fine sandstone	660/677 (+8 ~ +17)	Tel-stop (powder) 4 kg Cement slurry 2051 ℓ
435.94 m		Fine sandstone	380/374 (-6)	Tel-stop (powder) 2 kg Cement slurry 1485 ℓ
472.94 m ~ 484.00 m		Fine sandstone	380/385 (+5)	Tel-stop (powder) 2 kg Cement slurry 2502 kg
484.00 m		Fine sandstone	380/0 (-380) Recovered by supplementing mud	Tel-stop (grain) 16 kg
484.00 m ~ 499.00 m		Fine sandstone	380/385 (+5)	Tel-stop (grain) 29 kg
501.69 m		Fine sandstone	120/370 (-250)	Cement slurry 2361 ℓ
518.07 m		Fine sandstone	110/260 (-150)	Cement slurry 2833 ℓ
643.24 m		Fine sandstone	110/0 (-110)	Cement slurry 7962 ℓ
706.92 m		Fine sandstone	350/0 (-350)	Cement slurry 10284 ℓ
907.00 m		Fine sandstone	110/0 (-110)	Cement slurry 26063 ℓ
915.45 m		Fine sandstone	150/0 (-150)	



表 5.4 - 9 GTE-8坑内檢層結果 (1)

(Drilling Depth 1,031.89 m, Casing Depth 752.50 m)

State	Static		Dynamic 1		Dynamic 2		Dynamic 3	
Date	Oct. 9, 1987		Oct. 12, 1987		Oct. 13, 1987		Oct. 14, 1987	
	Blow out stop at $\approx$ 51 hr Well head press. 3.1 kg/cm <sup>2</sup> G	Oct. 7 8:40	Well head press. 1.2 kg/cm <sup>2</sup> G Total flow-rate 45.6 t/h Steam flow-rate 1.2 t/h (at 0.4 kg/cm <sup>2</sup> G) Hot water flow-rate 44.4 t/h (at 0.3 kg/cm <sup>2</sup> G)		Well head press. 2.2 kg/cm <sup>2</sup> G Total flow-rate 35.9 t/h Steam flow-rate 1.1 t/h (at 0.35 kg/cm <sup>2</sup> G) Hot water flow-rate 34.8 t/h (at 0.3 kg/cm <sup>2</sup> G)		Well head press. 3.1 kg/cm <sup>2</sup> G Total flow-rate 23.5 t/h Stem flow-rate 0.7 t/h (at 0.17 kg/cm <sup>2</sup> G) Hot water flow-rate 22.8 t/h (at 0.2 kg/cm <sup>2</sup> G)	
Depth (m)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)
0	44.7	3.1	120.6	1.1	120.8	1.9	119.4	3.0
10	75.7	4.0	121.5	2.0	121.1	2.8	119.9	3.9
20	88.3	5.0	121.6	2.9	121.2	3.8	120.1	4.9
30	84.2	6.0	121.7	3.8	121.3	4.7	120.2	5.8
40	79.6	6.9	121.8	4.8	121.4	5.7	120.4	6.7
50	78.5	7.9	121.9	5.7	121.5	6.6	120.5	7.6
60	81.9	8.9	122.0	6.6	121.6	7.6	120.6	8.6
70	87.5	9.8	122.0	7.6	121.6	8.5	120.8	9.6
80	92.6	10.8	122.1	8.5	121.7	9.5	120.9	10.5
90	96.7	11.7	122.1	9.4	121.8	10.4	121.0	11.5
100	99.2	12.6	122.2	10.3	121.8	11.4	121.1	12.4
10	98.5	13.6	122.2	11.3	121.9	12.3	121.2	13.3
20	98.1	14.5	122.2	12.3	121.9	13.3	121.2	14.3
30	97.9	15.5	122.3	13.2	122.0	14.2	121.3	15.2
40	98.0	16.4	122.3	14.1	122.1	15.2	121.3	16.2
50	98.2	17.3	122.4	15.0	122.1	16.1	121.4	17.1
60	98.7	18.3	122.4	16.0	122.1	17.0	121.5	18.0
70	99.2	19.2	122.5	16.9	122.2	18.0	121.5	18.9
80	99.9	20.1	122.5	17.9	122.2	18.9	121.6	19.9
90	100.8	21.1	122.6	18.8	122.3	19.9	121.6	20.8
200	101.5	22.0	122.6	19.7	122.3	20.8	121.5	21.7
10	101.9	22.9	122.6	20.6	122.4	21.7	121.7	22.7
20	102.5	23.8	122.7	21.6	122.4	22.7	121.8	23.6
30	104.7	24.8	122.7	22.5	122.4	23.7	121.9	24.6
40	106.0	25.7	122.7	23.5	122.5	24.6	121.9	25.5
50	105.4	26.6	122.8	24.4	122.5	25.5	122.0	26.4
60	104.8	27.6	122.8	25.3	122.6	26.4	122.0	27.4
70	104.2	28.5	122.8	26.2	122.6	27.4	122.1	28.3
80	104.1	29.4	122.8	27.2	122.6	28.3	122.1	29.2
90	104.7	30.3	122.9	28.1	122.7	29.3	122.2	30.2
300	105.2	31.3	122.9	29.0	122.7	30.2	122.2	31.1

表 5.4 - 9 GTE-8 坑內檢層結果 (2)

Depth (m)	Static		Dynamic 1		Dynamic 2		Dynamic 3	
	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)
10	105.5	32.2	123.0	29.9	122.8	31.1	122.3	32.0
20	105.7	33.1	123.0	30.9	122.8	32.1	122.3	32.9
30	106.2	34.0	123.0	31.8	122.8	33.0	122.4	33.8
40	107.2	35.0	123.0	32.7	122.9	33.9	122.4	34.8
50	107.7	35.9	123.1	33.7	122.9	34.9	122.4	35.7
60	107.9	36.8	123.1	34.6	122.9	35.8	122.5	36.6
70	108.1	37.8	123.1	35.5	123.0	36.8	122.3	37.6
80	108.3	38.7	123.2	36.5	123.0	37.7	122.5	38.5
90	107.9	39.6	123.2	37.4	123.0	38.7	122.6	39.4
400	108.0	40.5	123.2	38.3	123.0	39.6	122.6	40.3
10	108.2	41.5	123.3	39.3	123.1	40.5	122.7	41.3
20	108.4	42.4	123.3	40.2	123.1	41.5	122.7	42.2
30	108.6	43.3	123.3	41.2	123.1	42.5	122.8	43.1
40	108.9	44.3	123.3	42.1	123.2	43.4	122.8	44.1
50	109.2	45.2	123.4	43.0	123.2	44.3	122.9	45.0
60	109.4	46.2	123.4	43.9	123.3	45.3	122.9	46.0
70	109.7	47.1	123.4	44.9	123.3	46.2	122.9	46.9
80	109.9	48.0	123.4	45.8	123.3	47.1	123.0	47.8
90	110.1	49.0	123.5	46.8	123.3	48.1	123.0	48.8
500	110.2	49.9	123.5	47.7	123.4	49.0	123.1	49.7
10	110.3	50.8	123.5	48.6	123.4	50.0	123.1	50.7
20	110.3	51.7	123.6	49.5	123.5	50.9	123.1	51.6
30	110.4	52.7	123.6	50.5	123.5	51.8	123.2	52.5
40	110.4	53.6	123.6	51.4	123.5	52.8	123.3	53.4
50	110.6	54.5	123.7	52.3	123.6	53.7	123.3	54.3
60	110.7	55.5	123.7	53.2	123.6	54.7	123.3	55.2
70	110.9	56.4	123.7	54.2	123.6	55.6	123.4	56.2
80	111.2	57.3	123.7	55.1	123.6	56.6	123.4	57.1
90	111.6	58.3	123.7	56.1	123.7	57.5	123.5	58.0
600	111.9	59.2	123.8	57.0	123.7	58.4	123.5	58.9
10	112.2	60.2	123.8	58.0	123.7	59.4	123.5	59.9
20	112.5	61.1	123.8	58.9	123.8	60.3	123.6	60.8
30	112.8	62.0	123.9	59.8	123.8	61.3	123.6	61.7
40	113.0	63.0	123.9	60.8	123.8	62.2	123.6	62.7
50	113.2	63.9	123.9	61.7	123.9	63.2	123.7	63.6
60	113.5	64.9	123.9	62.7	123.9	64.1	123.7	64.6
70	113.7	65.8	123.9	63.6	123.9	65.1	123.8	65.5
80	113.8	66.7	123.9	64.5	123.9	66.0	123.8	66.4
90	114.0	67.6	124.0	65.5	124.0	67.0	123.8	67.3
700	114.2	68.6	124.0	66.4	124.0	67.9	123.9	68.3

表 5.4 - 9 GTB-8坑內檢層結果 (3)

Depth (m)	Static		Dynamic 1		Dynamic 2		Dynamic 3	
	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> G)
10	114.6	69.5	124.0	67.3	124.0	68.8	123.9	69.2
20	114.9	70.4	124.0	68.3	124.1	69.8	123.9	70.1
30	115.2	71.4	124.0	69.3	124.1	70.7	123.9	71.1
40	115.4	72.3	124.1	70.1	124.1	71.6	124.0	72.0
50	115.5	73.2	124.1	71.0	124.1	72.5	124.0	72.9
60	115.7	74.2	124.1	72.0	124.1	73.5	124.0	73.9
70	116.0	75.1	124.1	72.9	124.1	74.4	124.1	74.8
80	116.3	76.0	124.1	73.9	124.1	75.4	124.1	75.8
90	116.2	76.9	124.2	74.8	124.2	76.3	124.1	76.7
800	116.4	77.9	124.2	75.7	124.2	77.3	124.1	77.6
10	116.7	78.8	124.2	76.7	124.2	78.2	124.1	78.6
20	117.1	79.7	124.2	77.6	124.2	79.1	124.2	79.5
30	117.6	80.7	124.2	78.5	124.2	80.1	124.2	80.5
40	118.1	81.6	124.2	79.4	124.3	81.0	124.2	81.5
50	118.6	82.5	124.2	80.4	124.3	81.9	124.2	82.4
60	119.2	83.5	124.2	81.3	124.2	82.9	124.1	83.3
70	119.8	84.4	124.2	82.2	124.2	83.8	124.1	84.2
80	120.5	85.3	124.2	83.1	124.2	84.7	124.1	85.1
90	121.3	86.2	124.2	84.0	124.2	85.6	124.1	86.0
900	122.1	87.2	124.1	85.0	124.2	86.6	124.1	87.0
10	123.1	88.1	124.0	86.0	124.2	87.5	124.2	87.9
20	123.9	89.0	123.1	86.9	124.2	88.4	123.2	88.8
30	122.6	89.9	122.3	87.8	123.1	89.3	120.9	89.7
40	121.0	90.8	120.9	88.7	121.0	90.2	121.0	90.6
50	120.2	91.7	120.9	89.6	121.0	91.1	121.3	91.5
60	118.8	92.7	121.0	90.6	121.1	92.1	121.4	92.4
70	118.8	93.6	121.0	91.5	121.2	93.0	121.5	93.3
80	118.8	94.5	121.0	92.4	121.2	94.0	121.5	94.2
90	118.8	95.5	121.0	93.3	121.3	94.9	121.5	95.2
1000	118.6	96.4	120.2	94.2	121.4	95.8	121.2	96.1
10	118.9	97.3	120.7	95.1	120.6	96.7	121.5	97.0
20	120.0	98.2	120.6	96.0	121.1	97.6	121.4	97.9
30	120.3	99.2	120.6	97.0	121.1	98.6	121.5	98.9
31	120.3	99.3	120.6	97.1	121.1	98.7	121.5	99.0

表 5.5 - 1 GTE-8 蒸氣分析結果

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

表 5.5 - 2 GTE-8 蒸氣凝縮水分析結果

Component		GET-8 (Oct. 15, '87)
Electrical conductivity	μS/cm	97.4
pH		5.50
SiO <sub>2</sub>	mg/l	0.07
Cl	mg/l	0.02
SO <sub>4</sub>	mg/l	11.3
Na	mg/l	0.03
K	mg/l	0.04
Ca	mg/l	<0.01
Mg	mg/l	<0.01
Fe	mg/l	<0.01
Al	mg/l	<0.01
As	mg/l	0.015
Hg	mg/l	1.1
total-CO <sub>2</sub>	mg/l	164
H <sub>2</sub> S	mg/l	51

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

Component		GET-8 (Oct. 15, '87)	GET-6 (May 18, '87)	EGAT-1 (May 18, '87)
Electrical conductivity	μS/cm	710	742	740
pH		9.36	9.3	9.2
SiO <sub>2</sub>	mg/l	173	158	144
Cl	mg/l	4.28	16.9	12.0
SO <sub>4</sub>	mg/l	76.7	24.8	44.2
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	mg/l	0.24		
HCO <sub>3</sub>	mg/l	233	236	289
CO <sub>3</sub>	mg/l	40.5	54	168
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 <sub>2</sub> 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		

表 5.5 - 4 利用した地化学温度計

Geothermometer	Formula	Remarks
T SiO <sub>2</sub> (adia)	$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{1533.5}{5.768 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ , $125^{\circ}\text{C} \sim 275^{\circ}\text{C}$ SiO <sub>2</sub> Concentration: mg/l
T SiO <sub>2</sub> (cond)	$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{1315}{5.205 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , $125^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ SiO <sub>2</sub> Concentration: mg/l
T Na-K (Truesdell, 1975)	$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{855.6}{\log (\text{Na}/\text{K}) + 0.8573} - 273.15$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ , $100^{\circ}\text{C} \sim 275^{\circ}\text{C}$ Na, K Concentration: mg/l
T Na-K (Fournier & Truesdell, 1973)	$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{777}{\log (\text{Na}/\text{K}) + 0.70} - 273.15$	Na, K Concentration: mg/l
T Na-K-Ca (Fournier & Truesdell, 1973, 1974)	$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{1647}{\log (\text{Na}/\text{K}) + \beta \log (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2.24} - 273.15$	$\beta = 4/3$ for $\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}} > 1$ and $t < 100^{\circ}\text{C}$ $\beta = 1/3$ for $\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}} < 1$ or $t > 100^{\circ}\text{C}$ Na, K, Ca Concentration: mol/l

表 5.5 - 5 GTE-8, GTE-6 および EGAT-1 の地化学温度

WELL	GTE-8 Oct. 15, '87	GTE-6 May 18, '87	EGAT-1 May 18, '87
T-SiO <sub>2</sub> (adia.)	161	157	152
T-SiO <sub>2</sub> (cond.)	170	164	159
T-Na/K (Truesdell)	183	196	183
T-Na/K (Fournier & Truesdell)	179	193	179
T-Na, K, Ca (Fournier & Truesdell)	196	206	193
Steam-Water ratio*	123 - 124	-	-
Downhole temperature	124	-	-

(Unit: °C)

\* Data of under 30 l/h of total flow rate was excluded.

## 6. 貯留層評価

### 6.1 評価方法

当地域の貯留層の形状、範囲、構造、フラクチャー特性、賦存地熱流体の特性を捉えるために、各段階ごとに調査を実施し、成果を得てきた。その成果の一つとして調査井GTE-8における熱水の噴出があり、これら噴出時での各種の測点および試験結果が、貯留層の挙動を解析する場合の一つの手掛りとなる。

ここでは、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温度・圧力の変化について、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。

解析手法の手順は次の Fig 6.1-1 に示すとおりである。

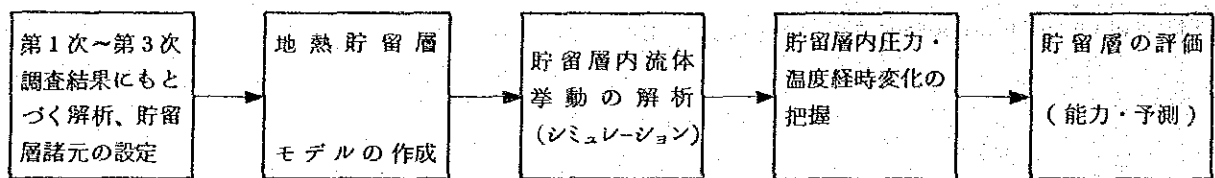


Fig. 6.1-1 Flow Chart of Reservoir Analysis

#### (1) 地熱貯留層諸元の設定と貯留層モデルの作成

各種の調査結果により、貯留層の解析範囲を設定するために、貯留層の形状、規模（水平方向・乗直方向）、地層構造等を検討した。その結果、解析範囲としては、地温分布の高い領域、地表調査から推定される断層で区分される範囲を地熱流体賦存領域として考え、GTE-8を中心とした水平3 km×1.5 kmを設定した（Fig. 6.1-2）。

また、乗直方向について、データが十分でないため、GTE-7、GTE-8の調査井の結果から約2 kmの深度までを設定した。

このように設定した領域を貯留層モデルの範囲とし、グリッドの分割数としては水平方向3×3、乗直方向2レイヤーとした。（Fig. 6.1-3）。

次に貯留層モデルに入力するパラメータについては妥当と思われる数値を設定し、パラメータの検討に際しては、各種の地表物理探査、調査井の坑内検層、プロダクションテストの結果を参考とした。

#### 1) 貯留層特性

##### ① 孔隙率



孔隙率の設定には、掘削中に得られたコアの試験結果を参考にしたが、試料がフレッシュなこと、逸泥すると持続性があることにより、コア試験値より大きな値を与えた。

設定は、レイヤーごとに一律とした。

レイヤー 1 : 7%

レイヤー 2 : 10%

## ② 浸透率

浸透率の設定には、GTE-8のプロダクションテストの結果、各調査井の逸泥状況を参考にして、各セルごとに変化をもたせた。その範囲は、3~20m darcyで、中心部を大きくし、その範囲は小さな値とした(Fig.6.1-4)。

## ③ 岩石熱伝導率、岩石密度、岩石比熱

これらの値は、岩質、岩相によって異なるが、それほど大きな差異をもたらすパラメータではないため各セル一律とした。

・熱伝導率  $1.0 \times 10^{-3}$  Cal/cm. sec °C

・岩石密度 2.67 g/cm<sup>3</sup>

・岩石比率 0.25 Kcal/kg. °C

## 2) 流体特性

貯留層内の流体は、GTE-8から噴出する流体に近いものと考え、その特性を設定した。

すなわち、流体温度はGTE-8坑内での実測値125°Cとし、また化学成分は分析結果から熱水に近いものとみなし、粘性係数、密度を設定した。

## 3) 初期条件

貯留層内の初期条件の設定に当っては、初期温度・初期圧力分布を、各セルに与えることにした。設定に際しては、これまでに得られた坑井調査測定値および温度分布値を参考した。また、初期圧力は各レイヤーごとに一定とした(Fig. 6.1-5~6)

## 4) 境界条件

計算領域の境界は、上方が閉鎖でその方向は開放系とした。

## (2) 貯留層内流体挙動の解析

貯留層内での熱水流動を表わす基本式は、質量保存とエネルギー保存の両面が成り立つとして次式を用いる。

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

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

$k$  ; 浸透率 ( $m^2$ )

$\rho$  ; 熱水の密度 ( $kg/m^3$ )

$\mu$  ; " 粘性係数 ( $kg \cdot sec/m^2$ )

$P$  ; 圧力 ( $kg/cm^2$ )

$G$  ; 生産量 ( $t/h$ )

$\phi$  ; 孔隙率

$t$  ; 時間 ( $sec$ )

$q_e$  ; 系外への熱損失 ( $kcal$ )

$h$  ; 熱水の比エンタルピー ( $kcal/kg$ )

$\rho_r$  ; 岩石の密度 ( $kg/m^3$ )

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

$T$  ; 温度 ( $^\circ C$ )

$\lambda$  ; 熱伝導率 ( $kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$ )

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。

### (3) 計算ケース

貯留層からの生産条件として、生産ゾーンをレイヤー2の中心部 ( $i=2, j=2$ ) とし、流体温度  $125^\circ C$  の熱水を連続的に生産するが、還元は行わないと設定し、10年間の貯留層内の圧力・温度挙動の計算を行った。

計算ケースは、生産量を75、250、500、750、1,000、1,250、1,500 t/hの7段階に変化させた。

## 6.2 計算結果

シミュレーションの結果、生産による影響の変化が最も大きく出るのは、生産域であり、この生産域の挙動を中心に検討を行った。

初期温度分布をFig. 6.2-1に、生産量を変化させた場合の計算結果のうち、75、750、1,500 t/hについての10年後の各レイヤーの温度・圧力分布をFig. 6.2-2～7に示す。

また、生産域の温度・圧力の経時変化をFig. 6.2-8に示す。

これらの結果から次のことがわかる。

- ① 10年後の温度分布をみると、どの生産量の場合でも、分布のパターンは同じである。生産量が多い場合でも、生産域の温度の低下は小さく、初期温度に比較して約3℃の低下となっている。
- ② 10年後の圧力分布をみると、各生産量とも、中心部で圧力降下が見られ、生産量が多くなるほど降下量が大きくなる。圧力降下は、生産域のみならず、浅部にも広がりがみられる。
- ③ 生産域の温度・圧力の経時変化をみると、生産量の大小に関係なく変化するパターンは類似している。

すなわち、温度の経時変化をみると、直線的に温度が低下し続けることがわかる。

また、圧力変化をみると、生産開始後短時間で圧力が降下し、早い時期で安定し定常状態になる。

## 6.3 考察

貯留層内の熱水挙動のシミュレーション解析の結果、10年間における温度・圧力の変化を定量的に把握することができた。

計算結果によると、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、生産域内の貯留層圧力であることが判明した。

このような点から、生産量と生産ゾーン貯留層圧力降下量との関係を示したのがFig. 6.3-1である。これによれば、生産量が増加すれば圧力降下量も増加し、その関係は直線

的であることがわかる。

したがって貯留層圧力の降下を適度に制御、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ことができる。

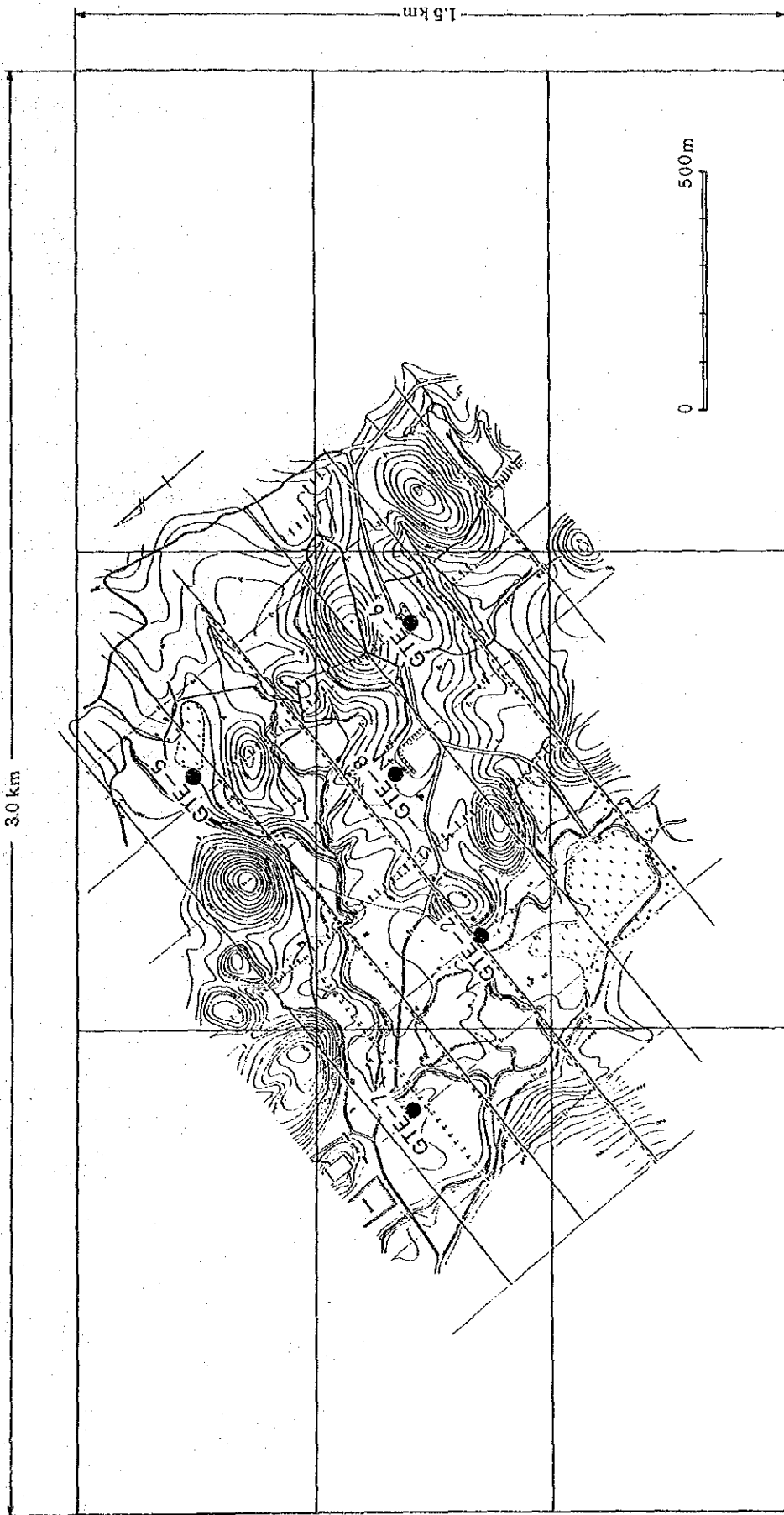
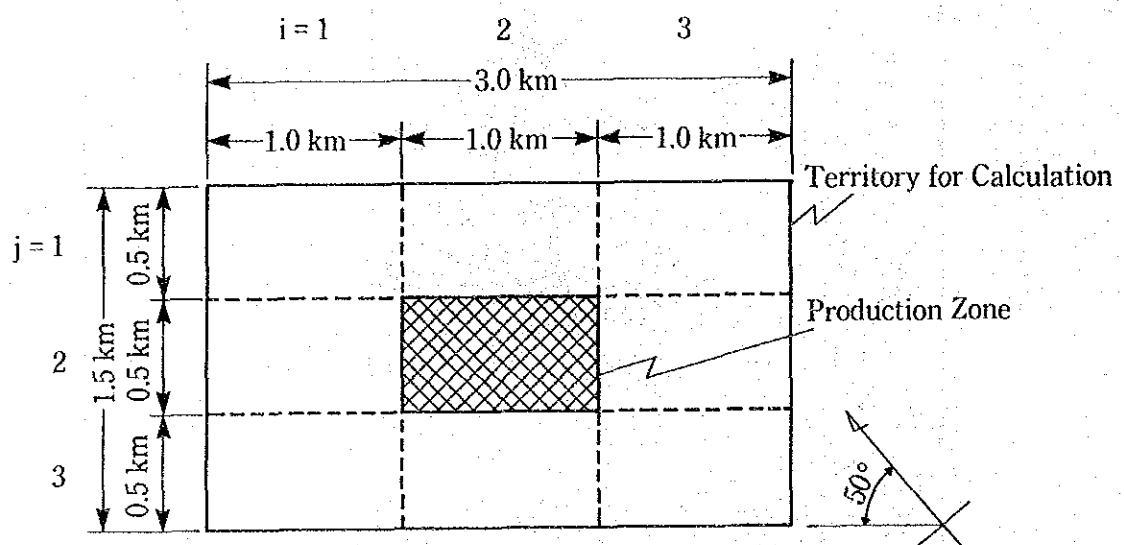


Fig. 6.1-2 Area of Reservoir Analysis

- 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

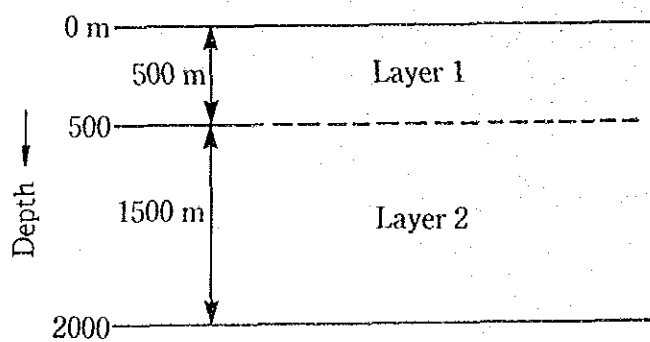


Fig. 6.1-3 Conceptual Reservoir Model

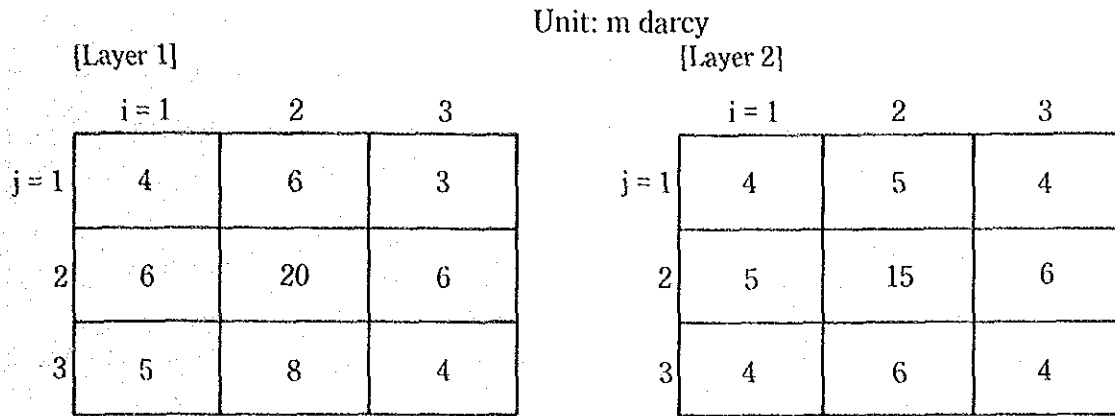


Fig. 6.1-4 Distribution of Permeability

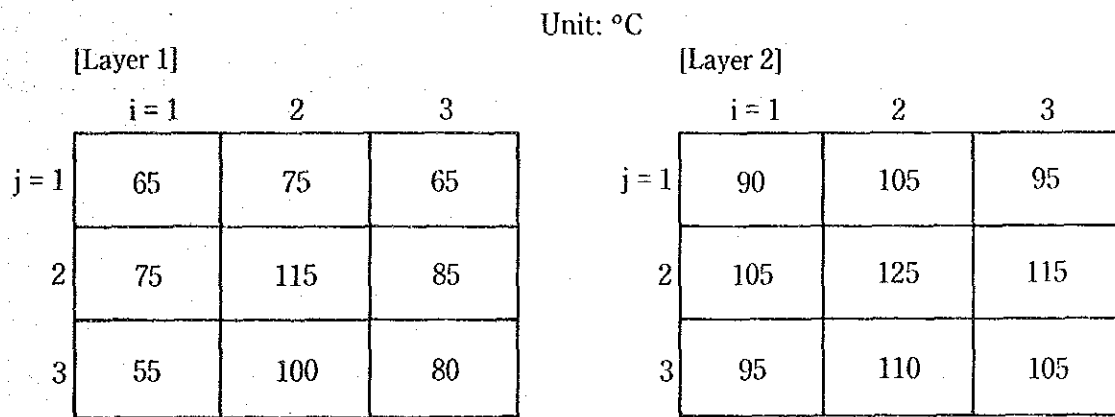


Fig. 6.1-5 Distribution of Initial Temperature

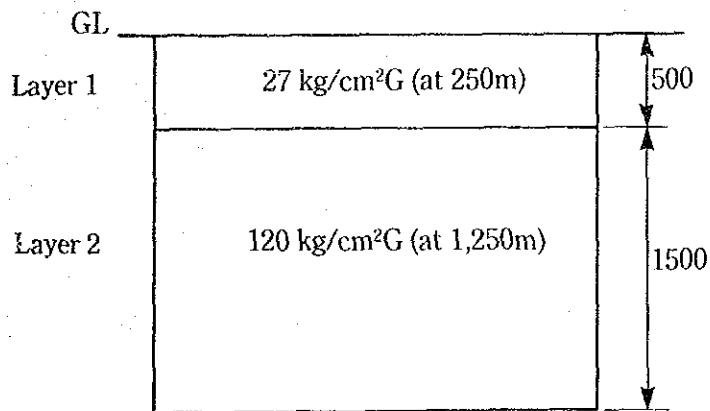


Fig. 6.1-6 Distribution of Initial Pressure

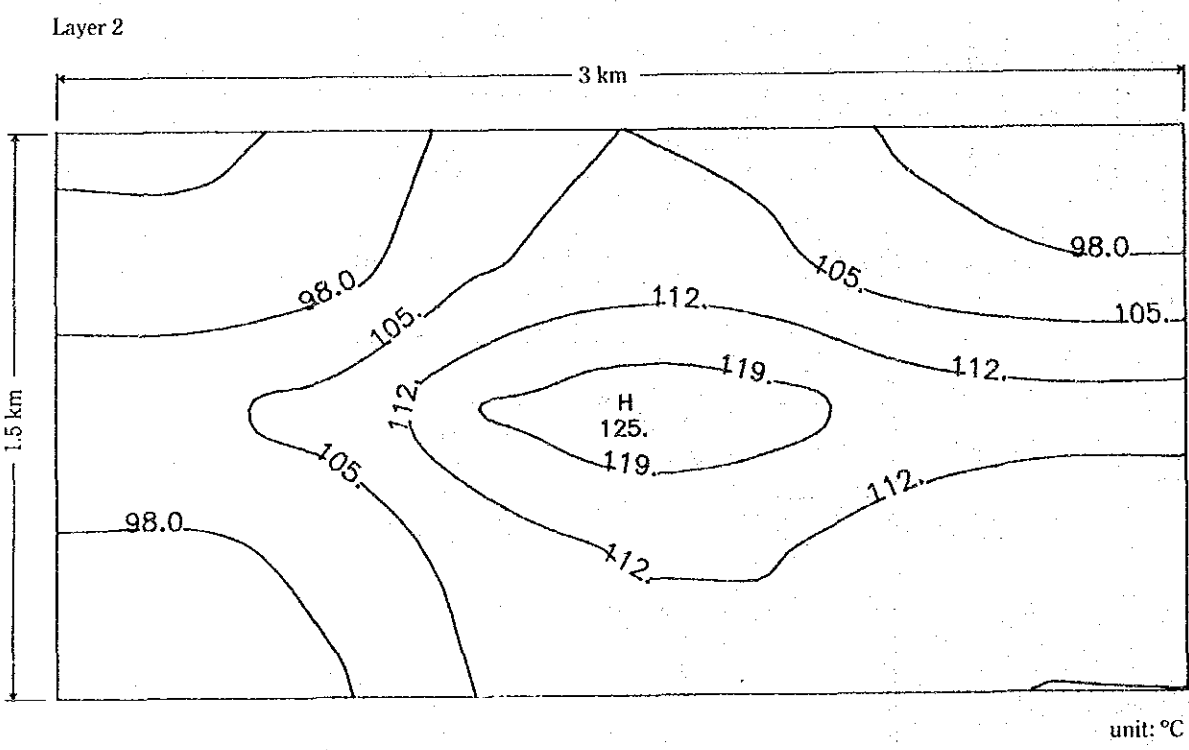
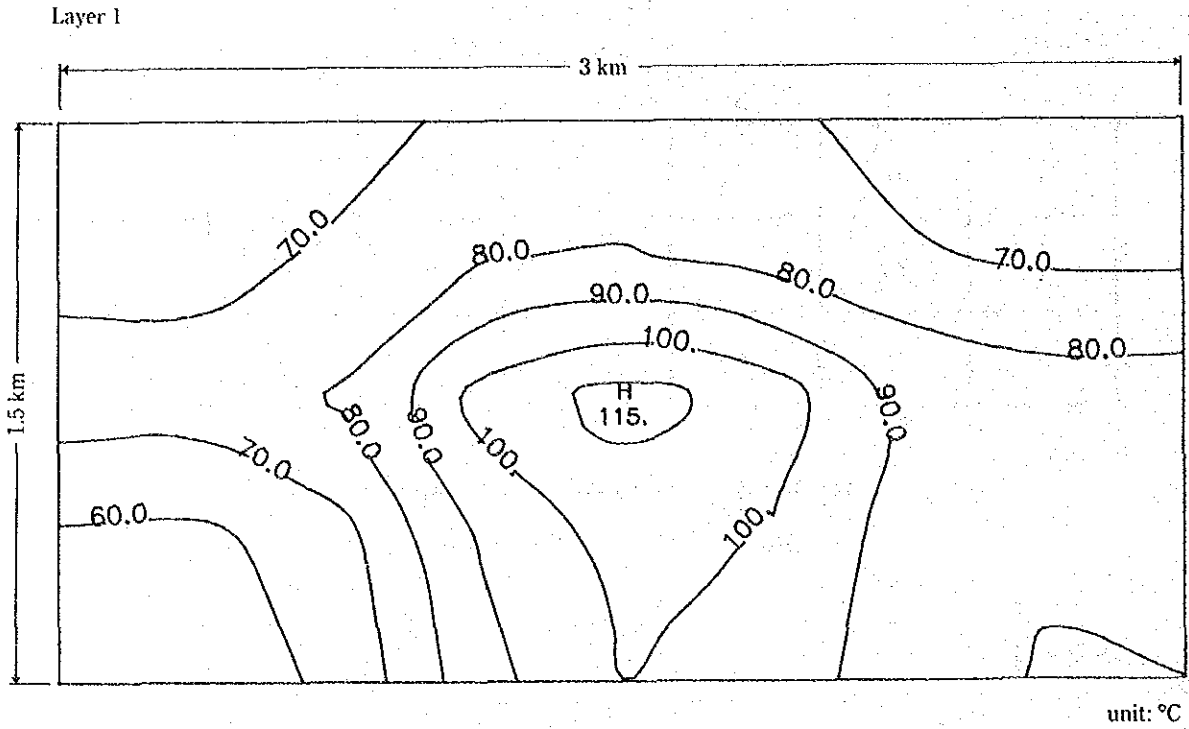
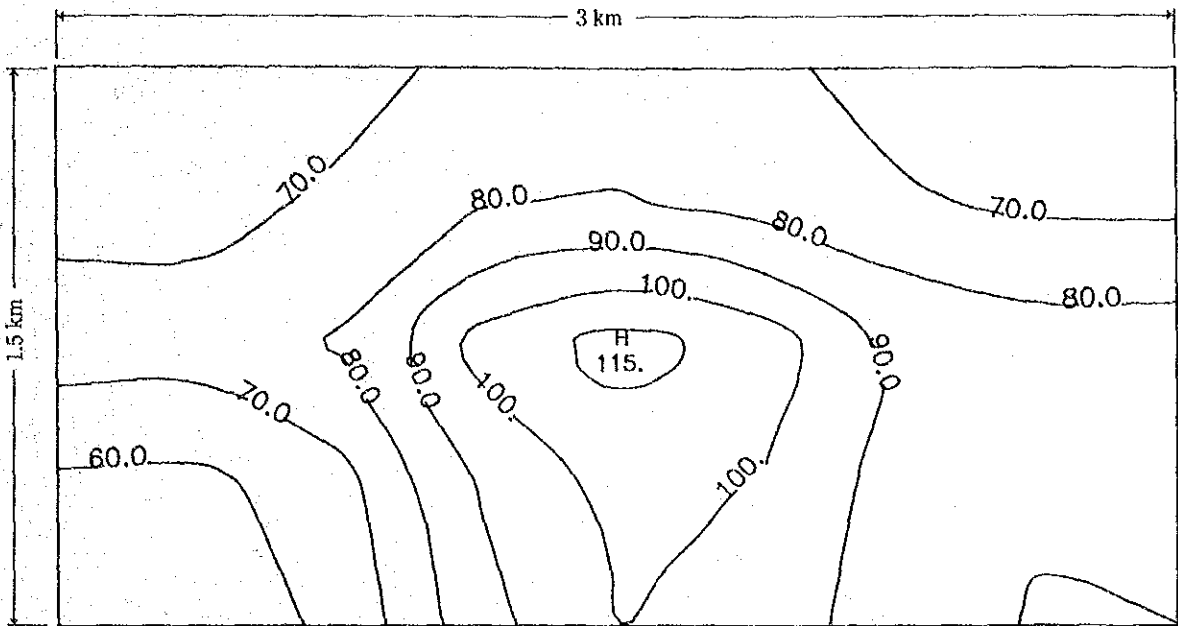


Fig. 6.2-1 Distribution of Initial Temperature

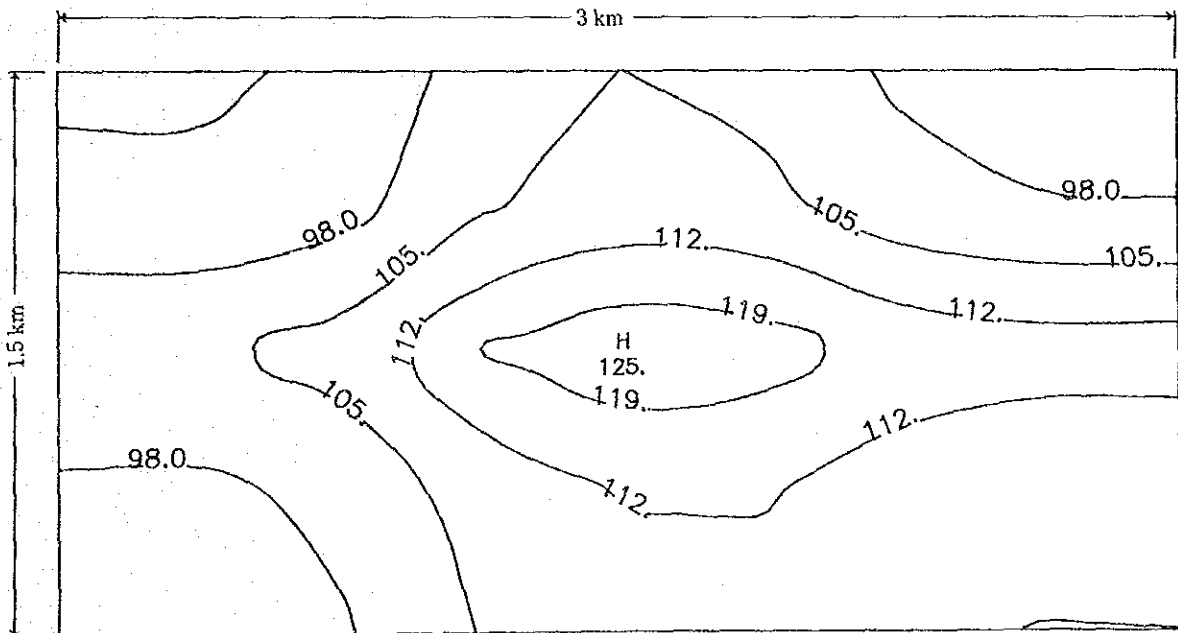


Layer 1



unit: °C

Layer 2



unit: °C

Fig. 6.2-2 Distribution of Temperature after 10 years — Rate of Production 75 t/h

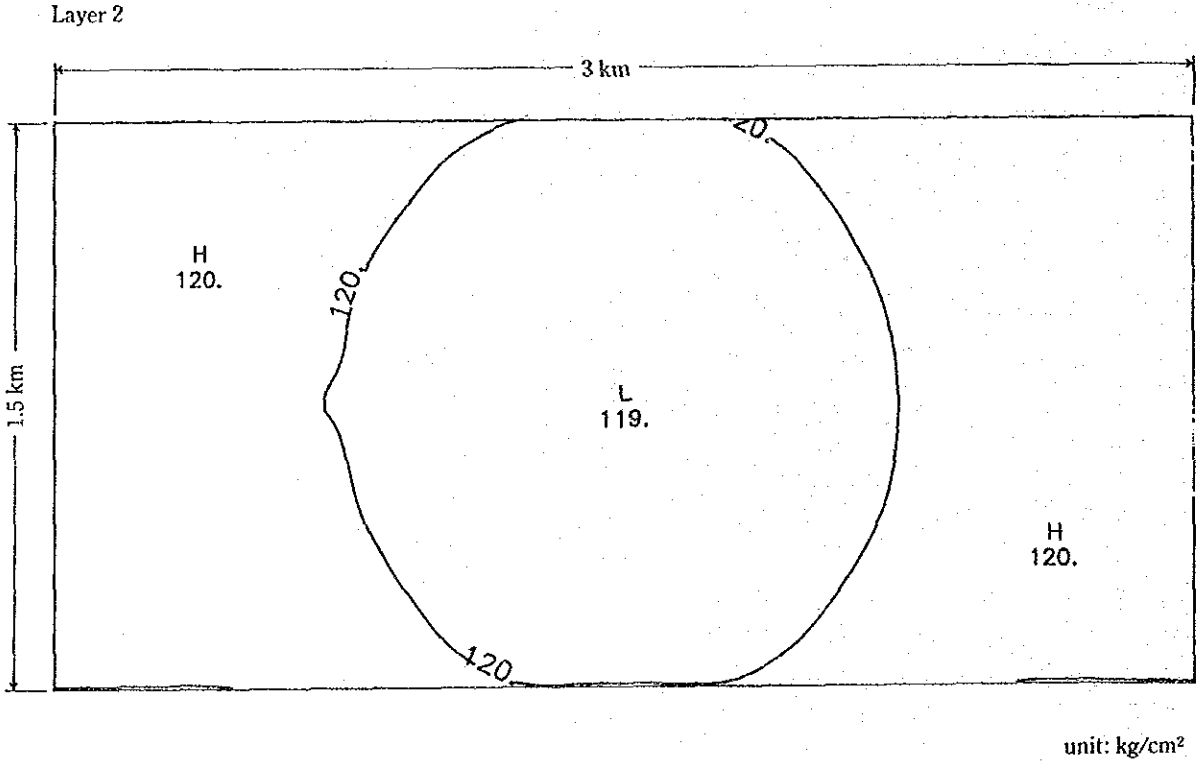
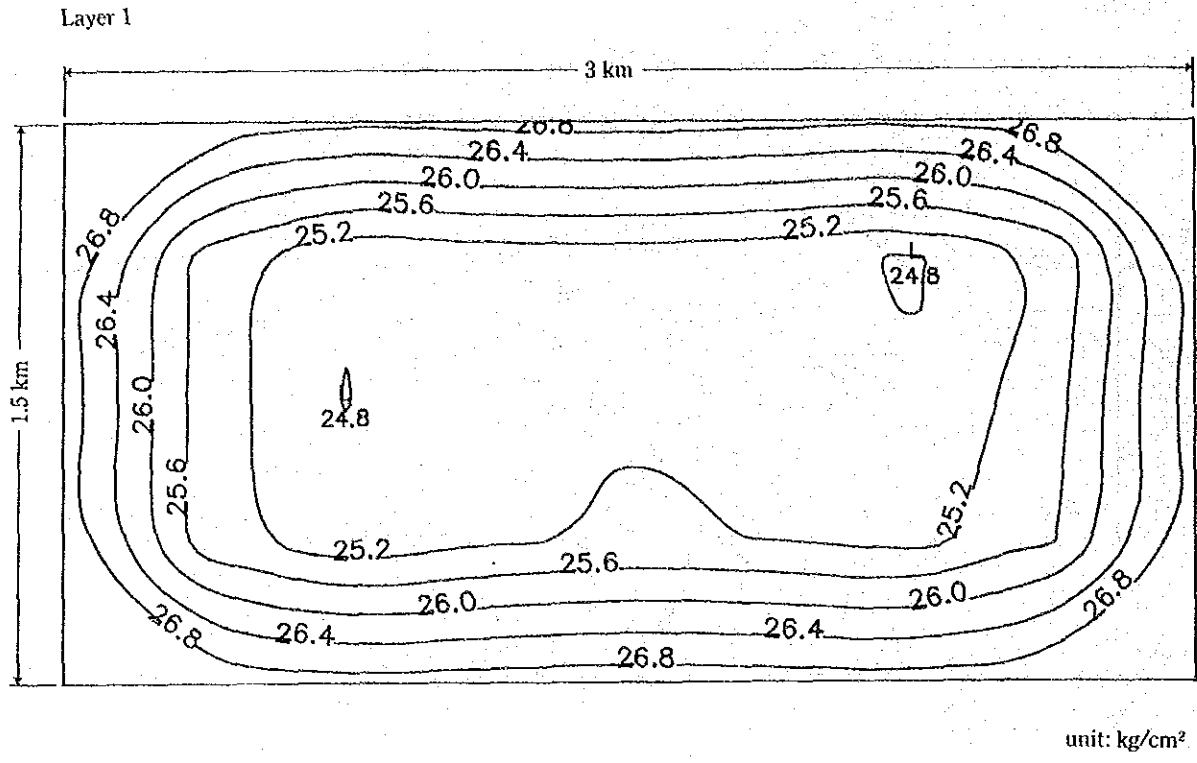


Fig. 6.2-3 Distribution of Pressure after 10 years — Rate of Production 75 t/h

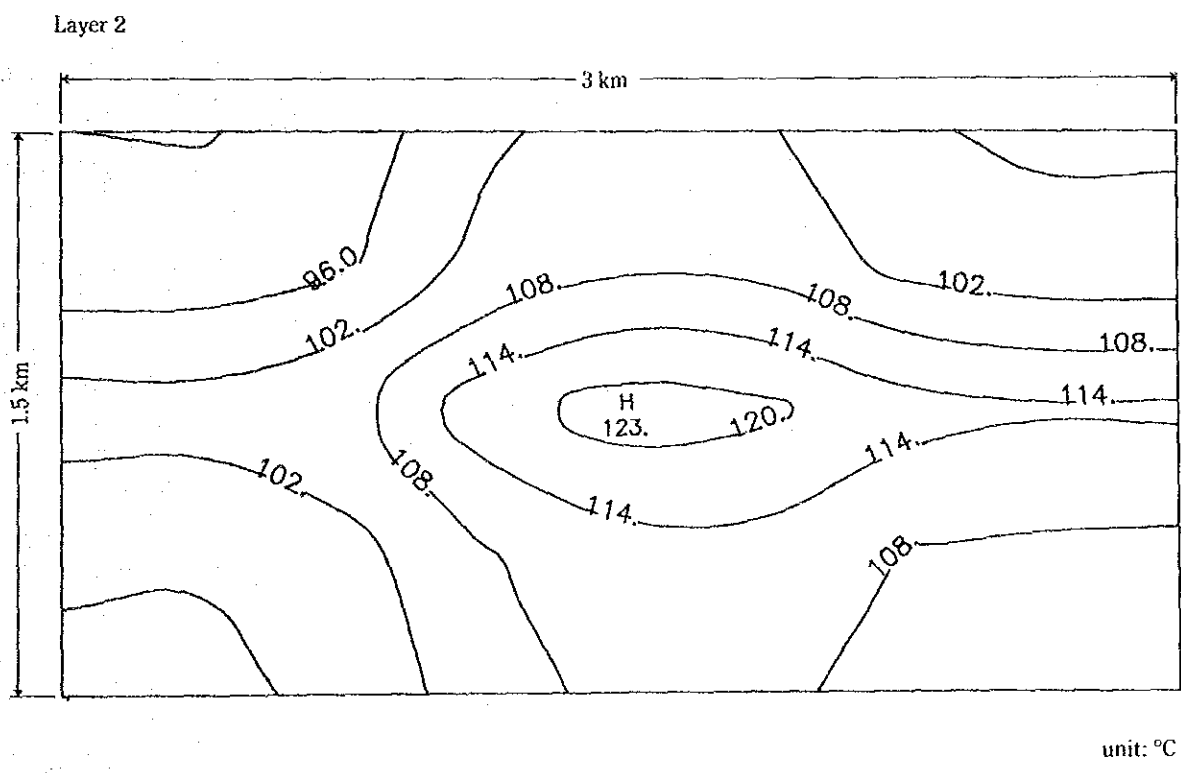
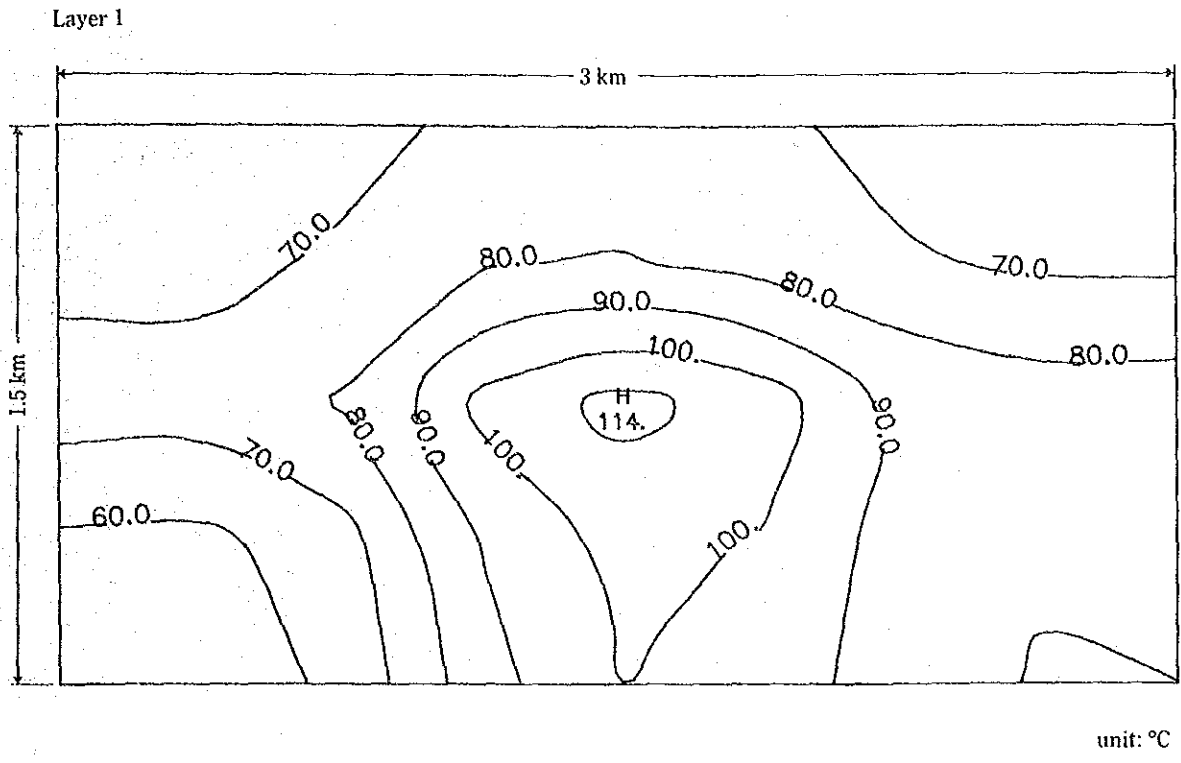


Fig. 6.2-4 Distribution of Temperature after 10 years — Rate of Production 750 t/h

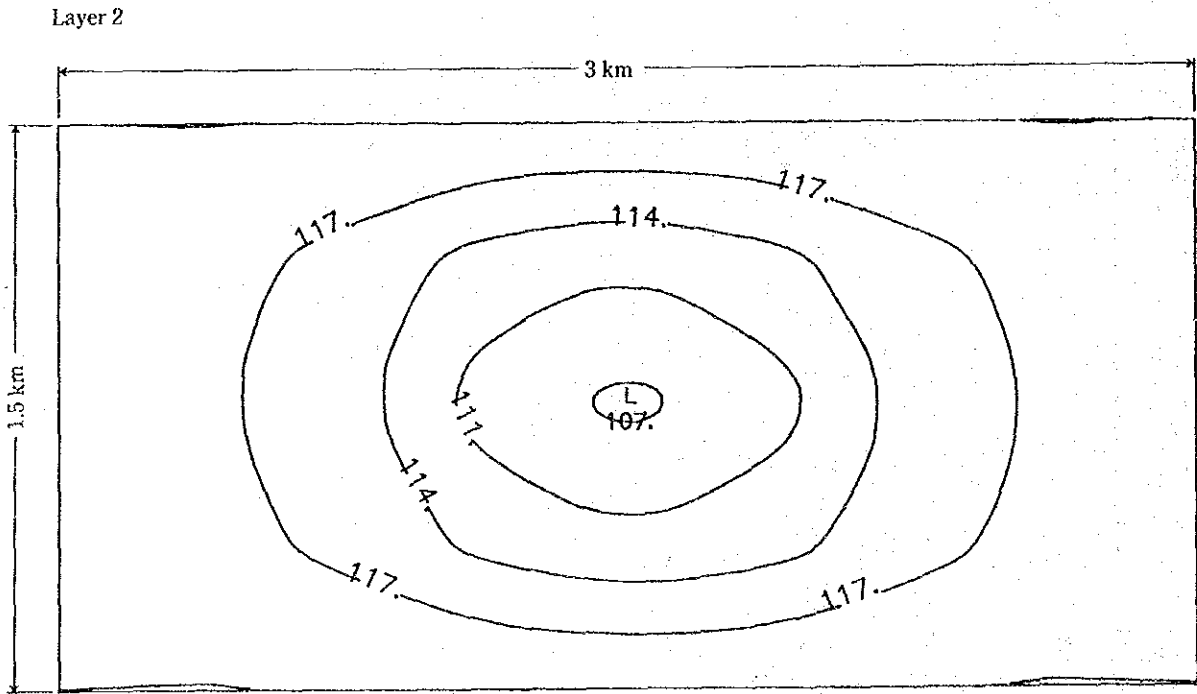
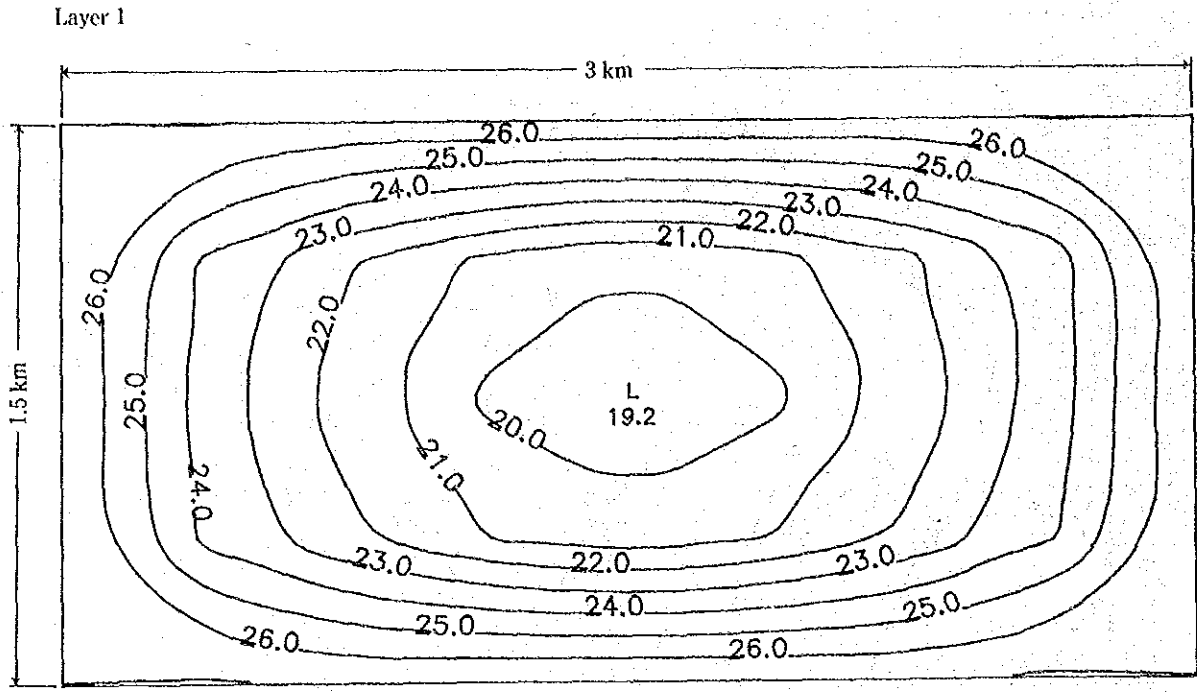


Fig. 6.2-5 Distribution of Pressure after 10 years — Rate of Production 750 t/h

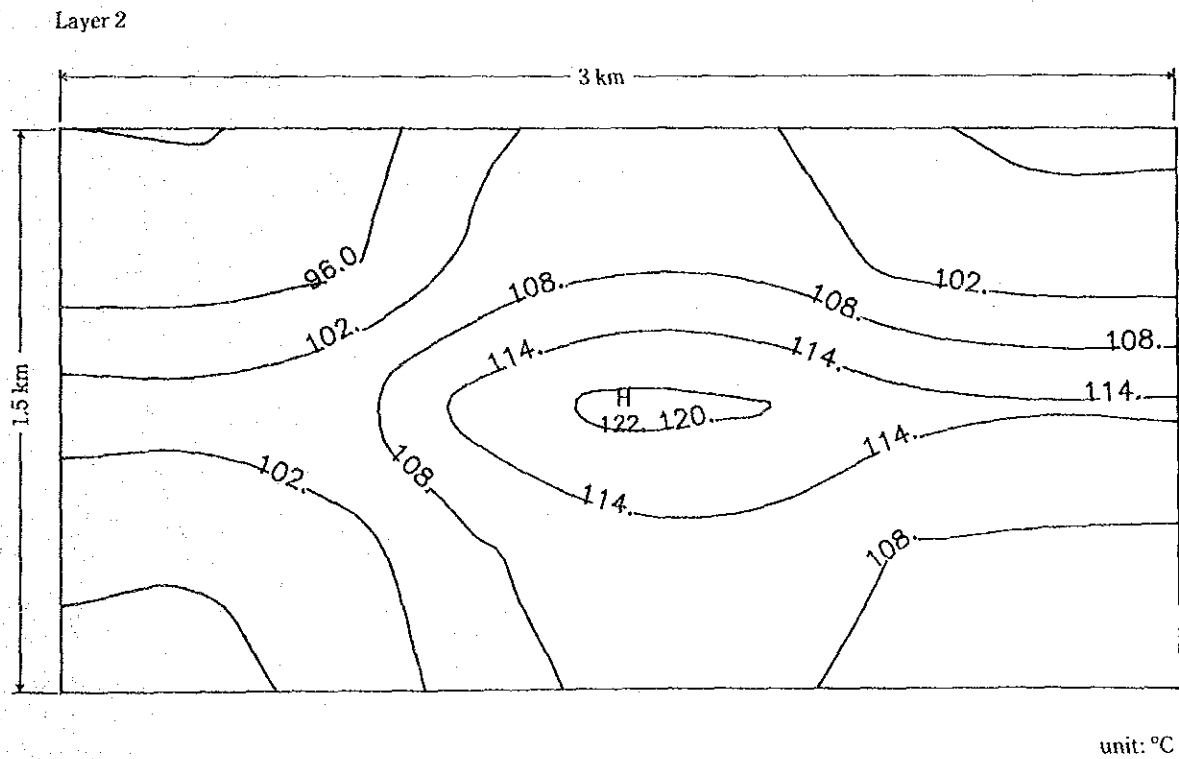
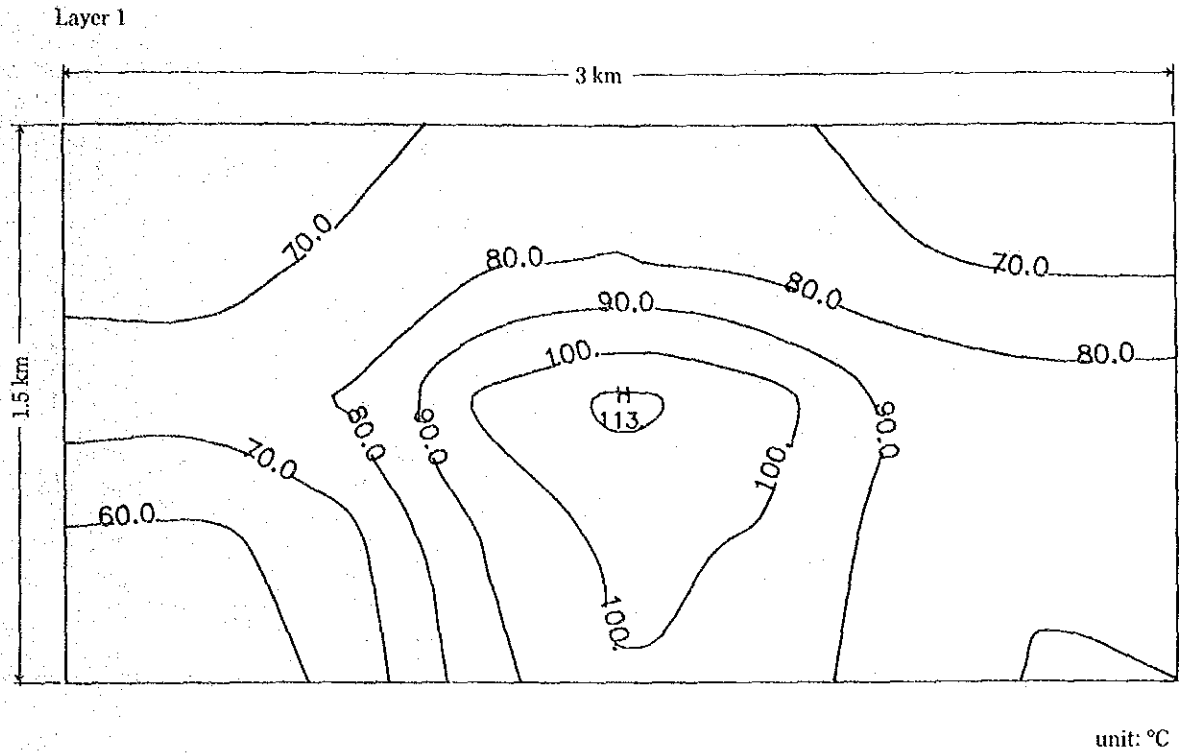


Fig. 6.2-6 Distribution of Temperature after 10 years — Rate of Production 1,500 t/h

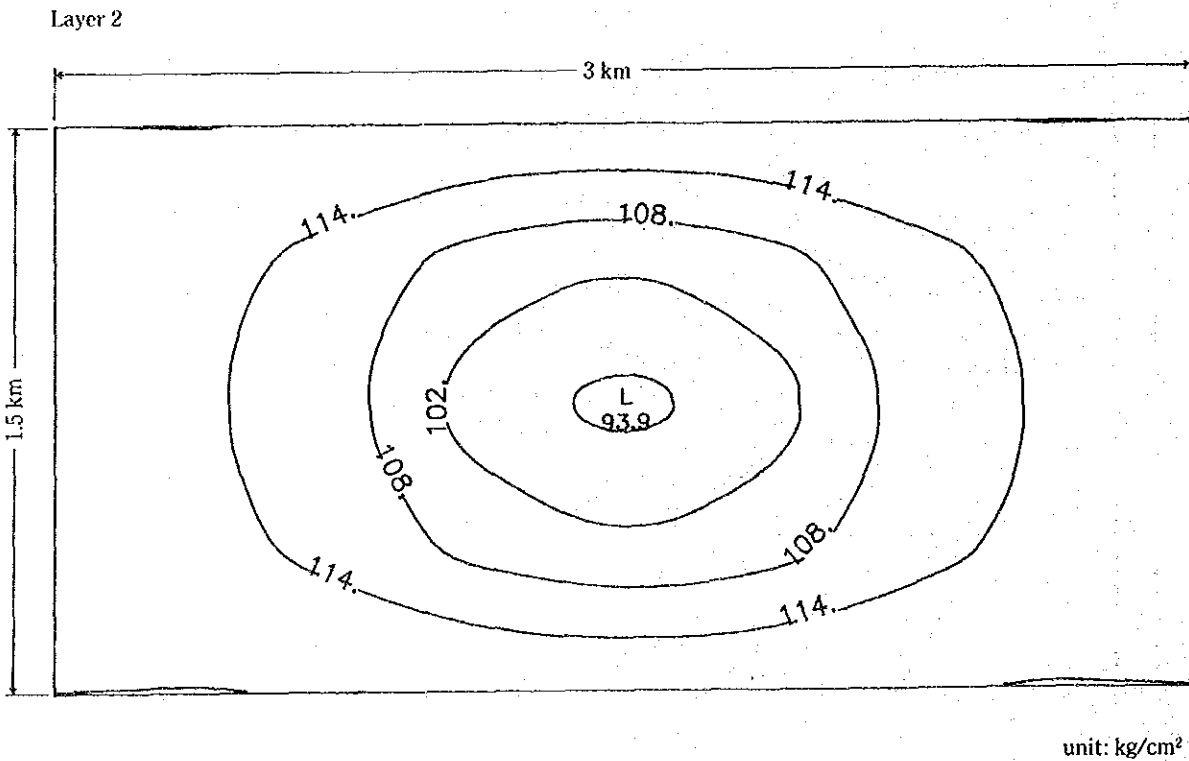
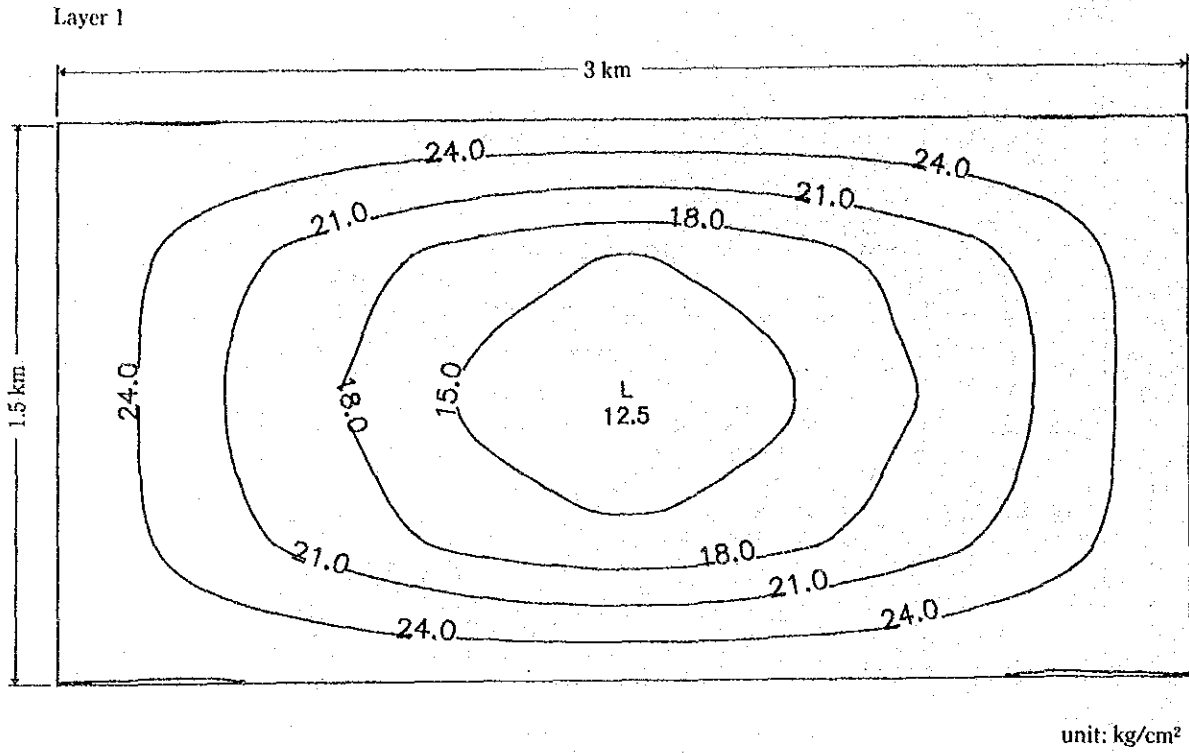


Fig. 6.2-7 Distribution of Pressure after 10 years — Rate of Production 1,500 t/h

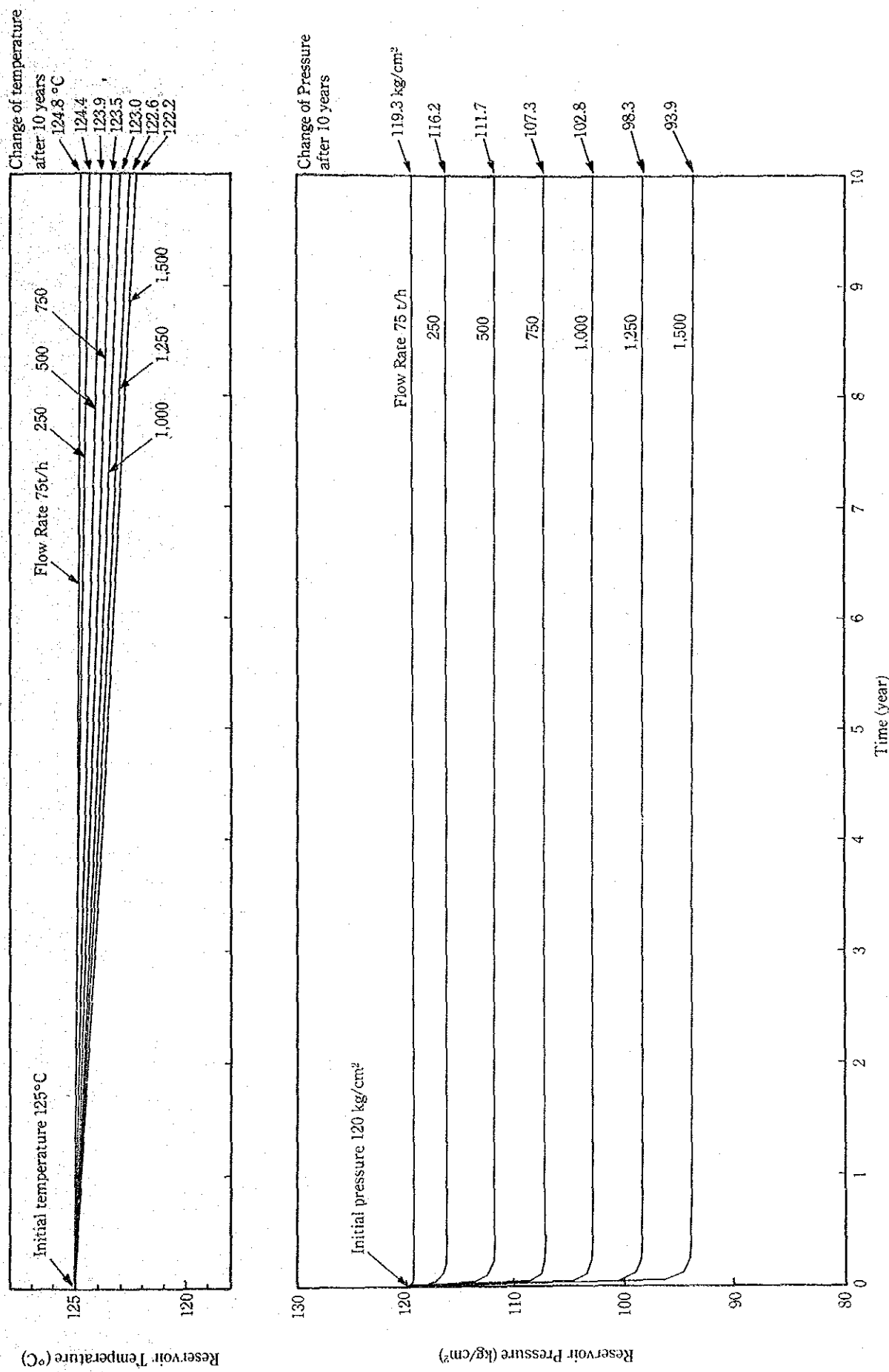


Fig. 6.2-8 Change of Reservoir Pressure and Temperature in Time in Production Zone

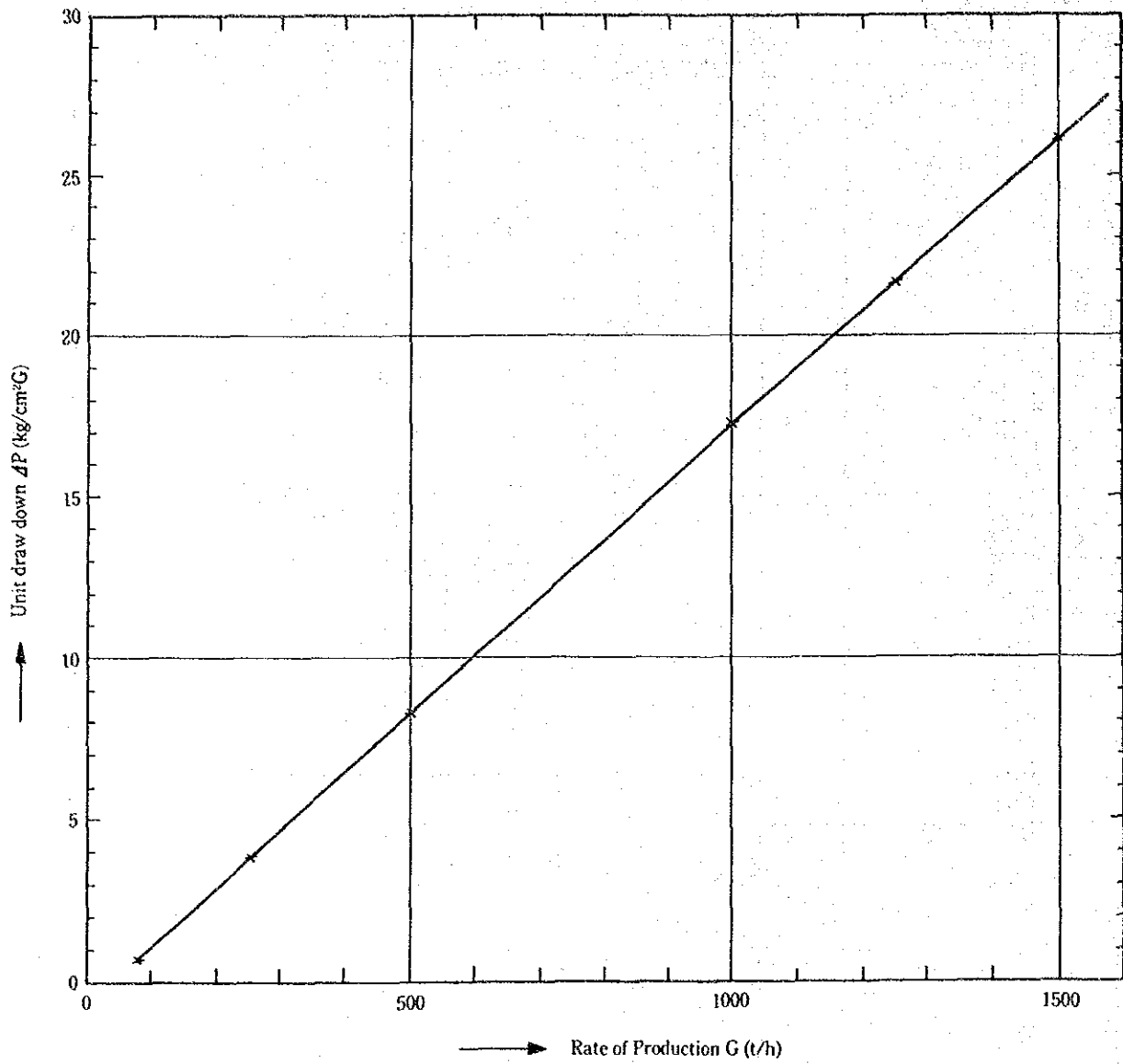


Fig. 6.3-1 Relation between Rate of Production and Unit Draw Down



### Ⅲ. 調査結果の総括的評価



### Ⅲ 調査結果の総括的評価

既に各年度の調査結果の中で説明したように、サンカンベン地域における地熱貯留層の存在区域は、昭和60年度に実施したフィンガープリント法による断層追跡調査と100m深度の地下温度調査の結果によって具体的に把握されたといつて過言でない。

調査井GTE-8はEGATの協力により掘削されたものであるが、掘削に当っては次のような幾つかの使命が課せられた。

- (1) 断層調査、地下温度調査の結果から設定された貯留層が、果してフラクチャーに富み、熱水を胚胎する状態にあるかどうかの実証
- (2) 掘削終了後あるいは掘削の過程で貯留層解析のために必要な貯留層特性等の資料の収集以上の課題に関連して、最終的に、サンカンベン地域における地熱開発の可能性を事前に判定するには、
- (3) 流体温度の評価
- (4) 地熱流体の供給能力

についての概念を得ることも要求された。

GTE-8の掘削は昭和61年度から62年度に亘りJICA調査団の掘削専門家の指導により実施された。当初計画の掘削深度は1,500mであったが逸泥の多発、硬岩への逢着さらにビットの不足等により深度1049.84mで掘止めとなった。しかし、掘止めの直前になされたプロダクションロッキング及びプロダクションテストの結果から上記課題の解明に必要な資料が収集され、調査段階における地熱貯留層の評価、地熱開発についての事前評価についての情報が得られたため、ここにサンカンベン地熱開発計画調査の目的はほぼ達成できたといふことができる。

以下、上記課題の順序に従い調査結果および得られた資料にもとづく解析の結果についての総括的な評価を試みることにする。

## 1. 貯留層の水理構造

### (1) フラクチャーの分布

GTE-8は掘削の過程でしばしば逸泥し、その後熱水を噴出したことはすでに前項で説明されたとおりである。このことは極めて透水性のフラクチャーに富むことを示すものであり、断層調査及び地下温度調査の結果から設定された貯留層は多数のフラクチャーからなるいわばフラクチャーの集合体であるといえることができる。しかし、GTE-7の掘削結果が示すように、この貯留層の北西方の延長上にあり極めて短距離の地点に位置するGTE-7では全くといってよほどフラクチャーに乏しかった事実を勘案すると、フラクチャーの発達はある範囲内に限られ、その周辺部では急速にフラクチャーに乏しくなることが予想される。現在、この貯留層内で掘削された調査井の本数は少ないため貯留層の範囲を正確に抑えることは困難であるが、断層追跡調査、地下温度調査の結果から判断すると幅約500m、長さ約1,000mの範囲を占めると推定される。

なお、フラクチャーの傾斜については、垂直に掘削したGTE-8がしばしばフラクチャーに逢着したこと、深度920m以深ではむしろ温度が低下し、かつフラクチャーの発達が認められなかったこと、またGTE-2においても深度300m付近でフラクチャーに到達し熱水が湧出したがそれ以深では温度が下り、かつフラクチャーに逢着しなかったことなどを併せ考えると、貯留層内のフラクチャーは東側に傾斜している可能性が強い。

この点については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の掘削によりフラクチャーに富む貯留層の存在が実証された点は先ず確かである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、および貯留層特性の一つである透水量係数の算出等に必要な資料を収集するには、坑井を用いてプロダクションロッキングを行う必要がある。

GTE-8は500m以深、707m、907m、915mでフラクチャーに逢着し、熱水が噴出したが、より深部を掘るため上記フラクチャーのうち707m、907mのものはセメントで充填された。このため、プロダクションロッキングは深度915m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が前項で説明したように産出指数(PI)の算出のために必要な $\Delta P$ (圧力差)および $\Delta G$ (生産量の差)の測定値が得られたため、算出さ

れた産出指数を用い坑井周辺の透水量係数 (kh) の算出も可能となった。得られた資料のうち透水量係数 9 darcy m (kh) は透水係数 (k) と有効層厚 (h) を掛け合せたものであり、k の値は h の値によって変るため k と h を含めた数値で透水性の優劣を判定することは直接できないが、産出指数の方は透水性の優劣について或程度の日安をえる。今回の測定の結果からその値としては平均  $17 \text{ t/h/kg/cm}^2$  が得られたが、産出指数の意義すなわち、圧力を  $1 \text{ kg/cm}^2$  下げる (上げる) ことにより、生産量が  $17 \text{ t/h}$  増える (減ずる) という点を考えると 17 前後の値はフラクチャーの透水性としては良好な部類に属するといえることができる。

以上の産出指数は、深度 915 ~ 930 m のフラクチャーを対象としてのものであるが、既に述べたように 500 m 以深では幾つかのフラクチャーに遭遇し各々から次に示すような熱水量が噴出した。

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熱水量の数値からみ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産出指数  $17 \text{ t/h/kg/cm}^2$  には、近い値を示すものとみて大きな間違いはない。すなわち、500 m 以深におけるフラクチャーの出現頻度は極めて高い上、各々のフラクチャーはいずれも良好な透水性を、有するということである。

今回掘削した GTE-8 は断層追跡調査、地下温度の調査の結果から設定された地熱貯留層のほぼ中心部に位置するが、掘削の結果が示すように、貯留層内ではフラクチャーの発達が著しく、かつフラクチャー自体の透水性にも優れていることが明らかとなった。

以上の点から結論として、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

地下深部に貯留される流体の温度を推定する方法としてしばしば化学温度計が用いられる。そのうち、最も多く用いられるのはシリカを用いる化学温度計であるが、この計画調査が開始される以前、タイ側で分析したサンカンペン地熱徴候地周辺から湧出する温泉水中のシリカ濃度から地下の熱水の温度として160℃という値が示されていた。

今回、GTE-8のプロダクションテストの折、GTE-8、GTE-6、EGAT-1から噴出する熱水を採取し、同じくシリカ濃度の値から流体温度を求めたところ152～161℃という値が得られた。この値はタイ側の値とほぼ一致するものであり、地下深部における流体が少くとも160℃前後の温度を有するとみてまず間違いないように思われる、然し実際にはGTE-8の坑内温度の測定の結果、流体温度の最高値としては160℃を示すに過ぎなかった。勿論この測定深度は900m台であり、より深部で160℃に近づくことも十分予想されるが、いずれにしても今後の地熱発電を対象としてその可能性を考えた場合、流体温度の点、すなわち蒸気を用いる場合の流体温度は最低180℃を必要とする点からみて、蒸気を用いる発電方式はサンカンペン地域の場合、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、もはや実用の域に達している。バイナリーサイクル発電方式が適用される流体温度は中低温熱水すなわち180℃以下80℃程度までとされているので、サンカンペン地域の地熱貯留層から産出される流体はその温度の点からみて十分バイナリーサイクル発電用として利用可能であるといえることができる。

Fig. 1は80℃から160℃までの中低温熱水を利用した場合の熱水1 t/h当りから得られる出力を図示したものであるが、この図によるとサンカンペン地域で30℃の冷却用水、125℃の熱水を用いると1 t/h当り約4 kWの出力が得られることになる。従って、現在、GTE-8から45 t/hの熱水が噴出しているので現状でも180kW程度のバイナリーサイクル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の規模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バイナリーサイクル方式により商業用の発電所を建設することを想定した場合、どの程度の規模の発電出力が望めるか、すなわち、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産出が期待されるかという点についてこの際検討しておく必要があるよう

に思われる。この問題は結局、地熱貯留層の熱水供給能力の問題におきかえられるので、貯留層評価の一面に通じることを意味する。

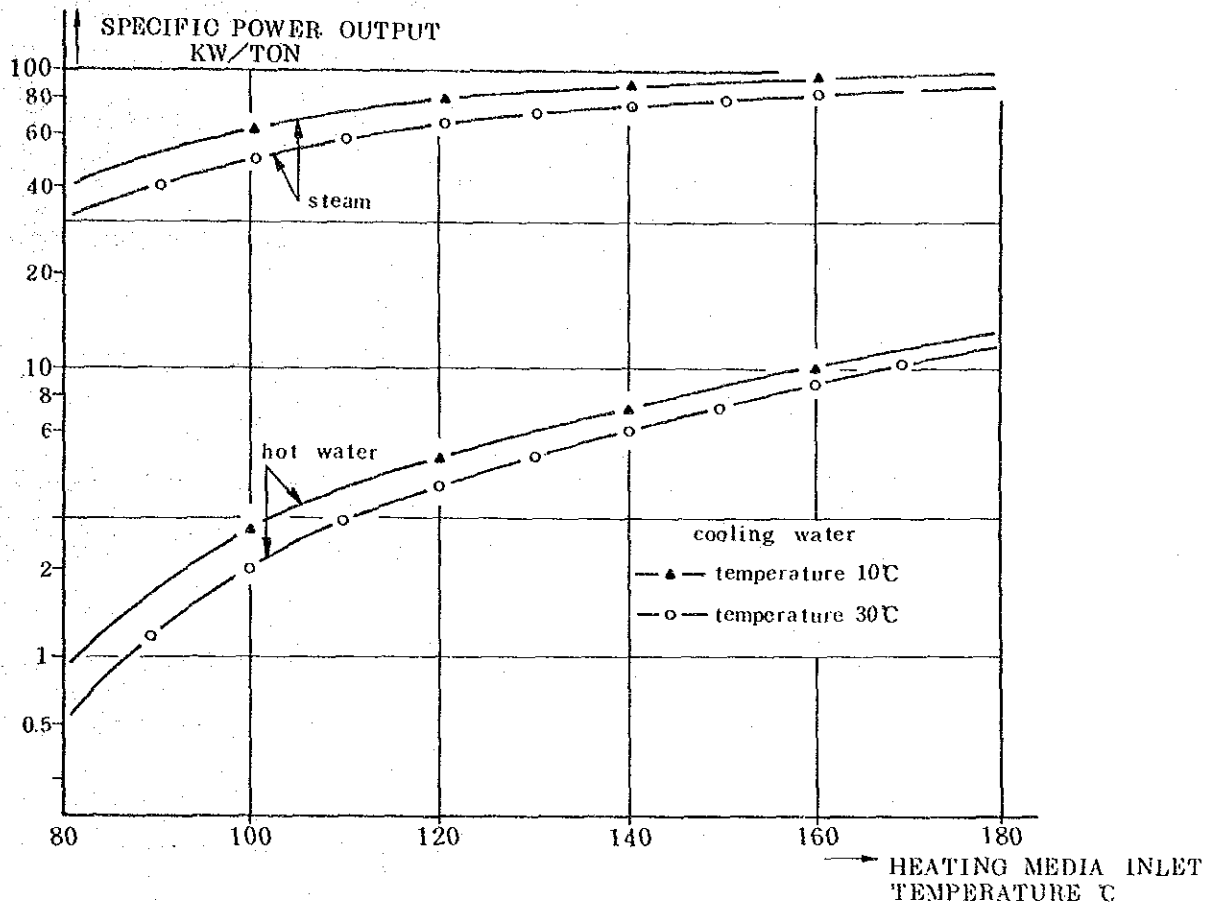


Fig. 1 OEC Specific Performance

(2) 貯留層の熱水供給能力

石油貯留層と地熱貯留層の大きな違いとしい、前者は貯留層内の資源が有限であるのに対し、後者ではその周囲あるいは深部から供給があるという点があげられる。前者の化石資源に対し、後者が循環資源あるいは再生資源といわれる所以である。

地熱貯留層から流体を生産するに伴い、周辺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。従って、貯留層内から流体を取り出す場合、貯留層の流体の供給能力に応じた最適の生産量を予め設定することが望ましい。この供給能力すなわち生産量の規模の評価は貯留層の評価に通じるものであり発電所を建設するに当たって十分検討すべき重要な課題の一つに含まれる。

今回実施したGTE-8のプロダクションロッキングの結果から透水量係数、初期温度、圧力等の資料が得られたので、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。

その結果は既に前項で述べた通りであるが、その中で幾つか補足的な説明を要する点があるように思われるので、その点につき先ず触れておく。

#### 1) 浸透率の設定

グリッドセルに与えた浸透率 (K) のうち、生産層 (Layer 2,  $i=2, j=2$ ) 浸透率として 15 m darcy の値を与えたが、これは次の理由による。

GTE-8 から得られた透水量係数 (kh) は 9 darcy m すなわち  $9 \times 10^{-12} m^3$  であるが生産層の厚さは 1,500 m と設定したので

$$k = \frac{9 \times 10^{-12} m^3}{1,500 m} = 6 \times 10^{-15} m^2 = 6 \text{ m darcy}$$

となる。然し、GTE-8 坑内では数個のフラクチャーに遭遇しているので、Layer 2 の生産層の浸透率はこの値の 2.5 倍程度と見積り 15 m darcy の値を与えたものである。

この生産層の浸透率に対しその周辺のセルの浸透率の値を小さくしたのは、生産層周辺における地層のフラクチャーが乏しくかつ透水性も劣ると判断したためである。

#### 2) 圧力の設定

Layer 1 の圧力を  $27 \text{ kg/cm}^2$ 、Layer 2 の圧力を  $120 \text{ kg/cm}^2$  としたのは、GTE-8 の静止状態における圧力測定の結果深度 250 m (Layer 1 の中間深度) で約  $27 \text{ kg/cm}^2$  の値が得られ、深度 1,000 m までの直線上にのる事実測値をそのまま延長すると 1,250 m (Layer 2 の中間深度) の深度では約  $120 \text{ kg/cm}^2$  が得られるのでこれらの値を採用し、各々  $27 \text{ kg/cm}^2$ 、 $120 \text{ kg/cm}^2$  としたものである (Fig. 2)。



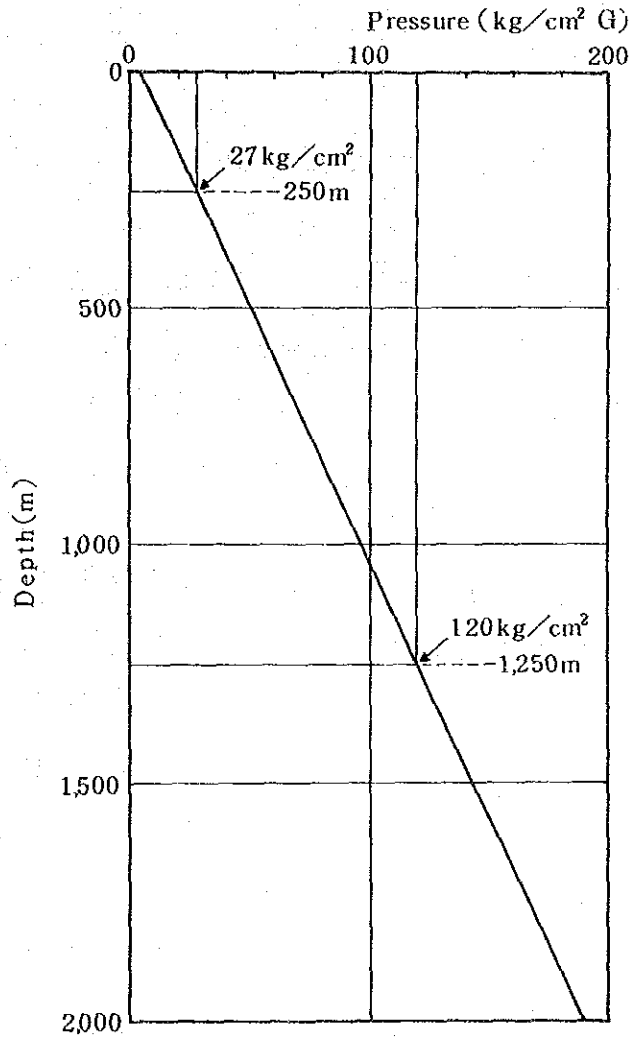
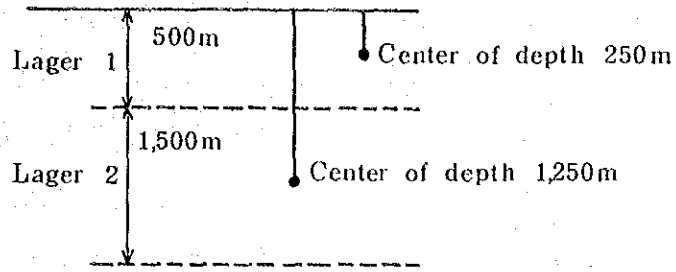


Fig. 2 Estimate of Reservoir Pressure

さて、生産量に応じた貯留層の挙動すなわち、10年後の温度、圧力の変化は既に前項で示した通りであるが、このうち、75 t/hの熱水の生産を行った場合、温度はほとんど変わらず圧力の低下は1 kg/cm<sup>2</sup>程度である。これに対し、最高の1,500 t/hの熱水を生産した場合には温度が約3℃低下することに併せ圧力も26 kg/cm<sup>2</sup>程度低下する。

ただ、今回設定した貯留層モデルでは、主として熱水が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ため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、サンカンベン地域における地熱貯留層内への熱水の供給は、タテ方向のフラクチャーが発達しているため実際には側方よりむしろ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る。このように、シミュレーションに用いたモデルと実際の地熱貯留層の水理構造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up flowの形でより深部から供給されるものとみなし、両者を置き換えて考えても基本的に大きな間違いはないように思われるので、実際には深部から熱水が供給されるにしても、結果的には圧力の低下は今回の予測にほぼ近い値を示すものと思われる。一方、温度の点については深部からの供給を重複すると恐らく低下よりむしろ一定ないし上昇の傾向を示すものと思われる。

前項で述べたように、流体温度が125℃の場合1 t/h当り4 kWの出力が望めるので75 t/hの熱水量では300 kWの発電が可能ということになる。しかも圧力の低下は10年間でたかだか1 kg/cm<sup>2</sup>程度に過ぎない。

GTE-8の坑口圧は比較的高く、その密閉圧が約4 kg/cm<sup>2</sup>であることが実測の結果から知られている。いかえると、75 t/h程度の生産量では動力を用いることなく熱水が継続的に噴出するということである。

然し、生産量を高めるに従い圧力の低下が増大するため生産量を維持させるにはダウンホールポンプ等の動力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300mから500m程度と見込まれているので、深度300mに設置したと想定した場合、深度300mにおける圧力が32 kg/cm<sup>2</sup>程度とみこまれるので、生産に伴う圧力の低下も26 kg/cm<sup>2</sup>すなわち1,500 t/h前後の生産量が生産量としての限界であろうと思われる。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高めることも可能であるが実際問題として過剰揚水は一方的な圧力の低下を招くので、1,000 t/h程度の生産量が妥当な数値であるように思われる。出力に換算すると、これは約4,000 kWに相当する。

以上はシミュレーションの結果にもとづき、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内容を述べたが、より深く掘削することにより熱水の温度が上昇することが期待されるので、実際には5,000 kW以上の出力が得られるもので期待される。

このように、サンカンペ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 kW程度の出力が見込まれるという結論が得られたものであるが、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、サンカンペン地域のように、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ぬ時は、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ペ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、リゾート向けに用う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。





JICA