

昭和60年度
タイ王国サンカンペン地熱開発計画調査
中間報告書

昭和61年3月

国際協力事業団

JICA LIBRARY



1050005167

昭和60年度

タイ王国サンカンペン地熱開発計画調査
中間報告書

昭和61年3月

国際協力事業団

国際協力事業団	
受入 月日	01. 8. 26
	122
	64.3
登録No.	15265
	MPN

目 次

ま え が き	1
1. Q T B-7 調査井坑内検層結果の解析	3
1. コア調査	3
1-1 コア調査の結果に基づく地質構造の見直し	3
2. 電気検層	8
2-1 坑内比抵抗分布	8
2-2 M T法による調査結果との対比	8
3. 温度検層	12
3-1 Q T B-7 井を含む調査井坑内の温度分布	12
3-2 Q T B-7 井坑内温度分布の解析	15
3-3 温度分布の解析	15
4. 解析結果に基づく地熱系の概念モデル	21
4-1 従来想定された地熱系モデル	21
4-2 Q T B-7 の掘削結果により修正された地熱系モデル	21
5. 総括及び今後の調査方針	25

Ⅱ. 第三段階補足調査の結果	27
1. 調査の目的と内容	27
2. フィンガープリント法断層追跡調査	28
2-1 フィンガープリント法による断層調査の特徴	28
2-2 調査方法	28
2-3 調査結果	37
2-4 考 察	47
2-5 ま と め	51
3. 地下温度調査	53
3-1 温度調査孔の掘削	53
3-2 孔内温度の測定	53
3-3 深度100mにおける地下温度の分布と断層分布との関係	53
4. 調査結果から得られた地熱貯留層の概念	63
5. GTE-8掘削地点の選定	64
6. 総 括	65

ま え が き

タイ王国サンカンベン地熱開発計画調査の第三段階調査として、昭和59年度に前記地域において計画深度1,500mの調査井（QTE-7）の掘削を実施した。深度700m付近まで掘削は順調に進行したが、700m以深、地層が硬くなり、掘進率が低下したため、昭和60年2月末、深度1,227.3mで掘り止めとした。

掘削終了後、坑内の物理検層を実施したが、MT法による深部電気探査の結果で予想した垂直比抵抗分布に比べ、より高い比抵抗値が知られたこと、また大きな逸水箇所が存在しなかったこと、さらに坑内温度も予想外に低い値を示したことなどから、まず、昭和59年度に掘削したQTE-7から得られた資料を解析し、その総括的な評価の結果から、第三段階の補足調査として、昭和60年度にどのような調査を行うかについて検討する必要に迫られた。

この検討結果から、最終的にサンカンベン地域の地熱貯留層を評価する手段として地熱微候地を中心とする区域を対象とし、断層追跡調査を行うことが決定された。なお、断層追跡調査の補完的な作業として地表より100m深度における地下温度分布図の作成も企画されたが、この作業はBGA Tの協力により実施されることになった。

従って、昭和60年度の間接報告書の内容は二つの項目により構成されている。第一部はQTE-7より得られた資料の解析と評価を中心とする内容からなり、第二部は断層追跡調査の結果に重点がおかれている。なお、今年度は現地調査を伴う当開発計画調査の最終年度に当たるため、現時点までの調査結果に基づきサンカンベン地域の地熱貯留層の評価を試み、最後に、今後BGA Tにより調査井の掘削が取り上げられる場合、掘削候補地点の選定についても言及した。

本報告書を作成するに当たり、100m深度の温度調査孔の掘削（10孔）と孔内温度の測定に協力いただいたBGA Tの関係部局に対し、深甚の謝意を表する。

1. G T E - 7 調査井坑内検層結果の解析

1. G T E - 7 調査井坑内検層結果の解析

1. コア調査

1-1. コア調査に基づく地質構造の見直し

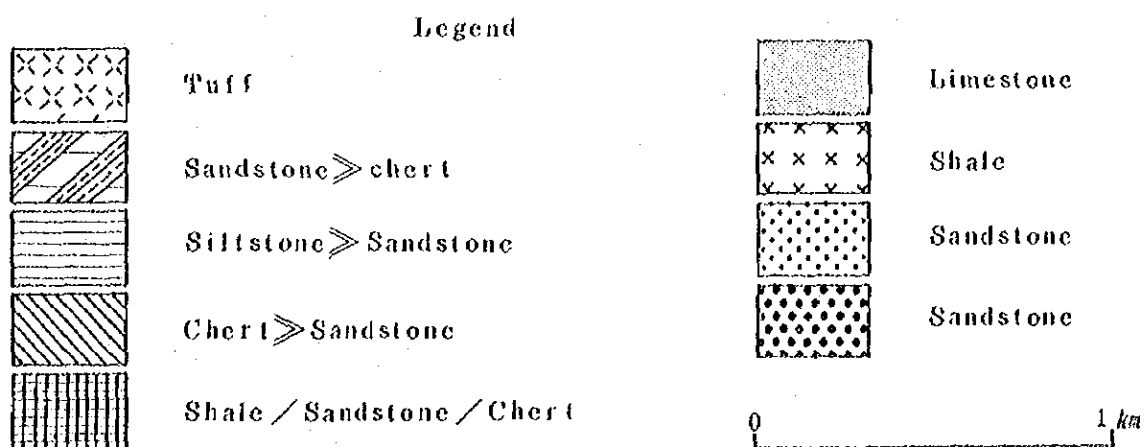
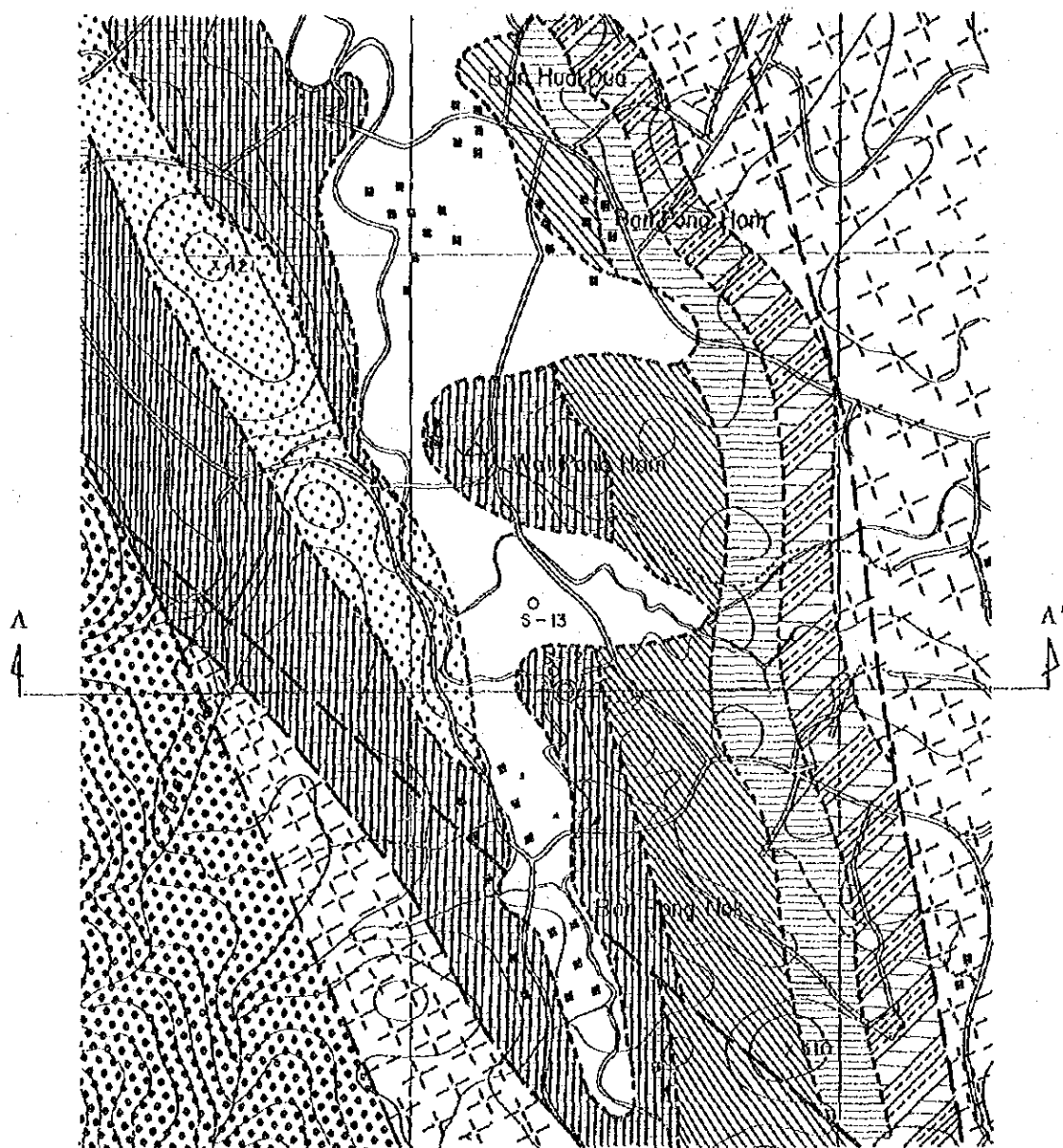
昭和57年7月から約2ヶ月にわたって実施された地質調査の結果から図-1に示すような地質図が作成された。図-2はG T E - 2を通る断面図である。

この時点では二疊紀Kiu Lom層下部の地質構造について不明な点が多く、深度500mまでの地質状況を知る手掛かりはG T E - 2の地質柱状図だけに限られていたので、この資料を参考にし、Kiu Lom層下部の地質構造としては、G T E - 2付近を通りほぼ南北方向に背斜軸が存在すると想定した。

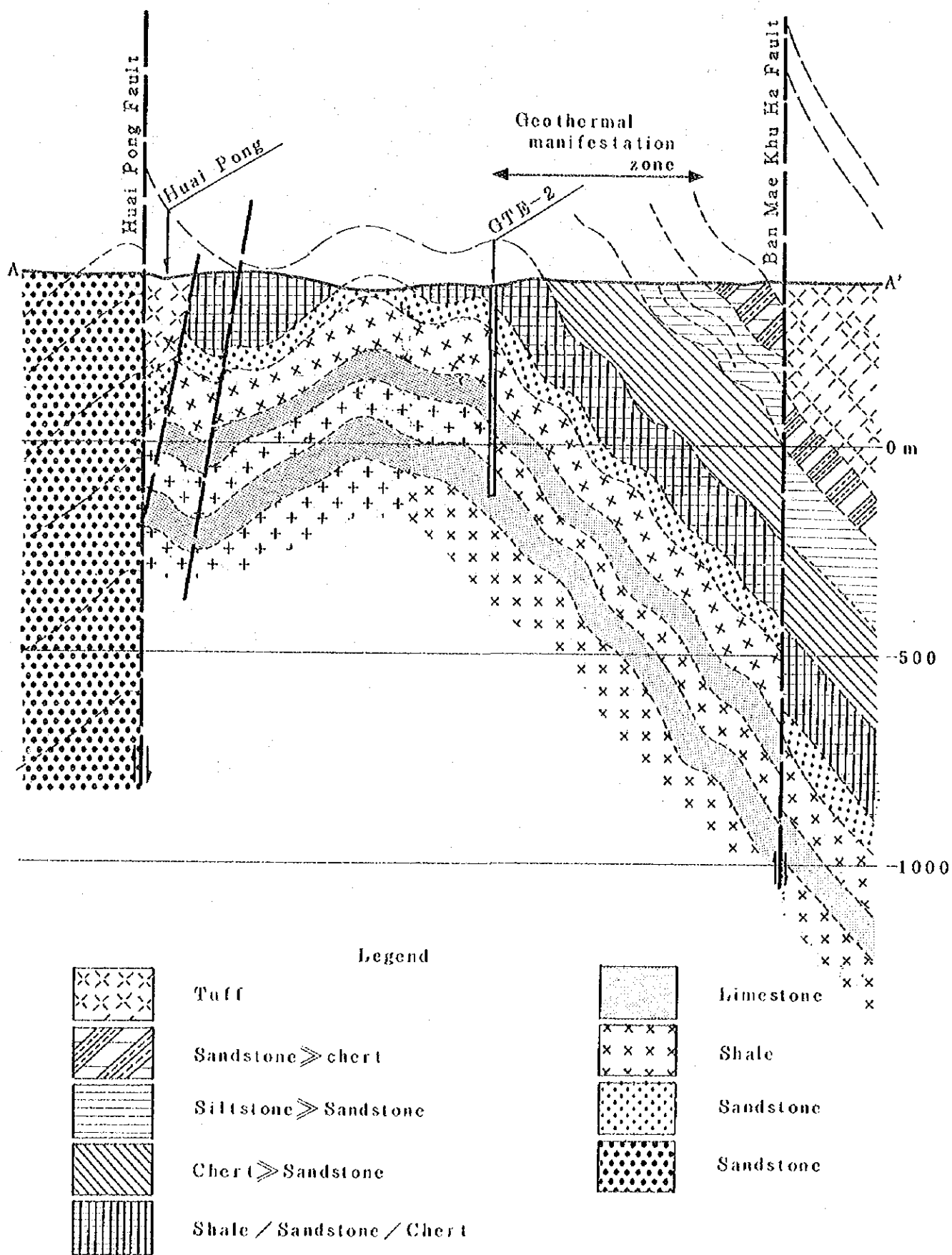
しかし、今回、G T E - 7の坑内から得られたコアの観察に基づき、地質構造を再検討した結果、Kiu Lom層下部の地質構造は、東に傾斜する単斜構造であることが明らかになった。修正された地質図及び地質断面図を図-3、図-4に示す。

さらに、G T E - 7から得られた地質柱状図に基づき、断層分布についても見直しを行った結果、若干修正部分が生じたが、その中で、地熱微候地とG T E - 7との間を通るN E - S W方向の断層が想定された。これは、G T E - 7の坑内温度が予想外に低く、この線を境にして北側では低温域であるのに対し、南側は高温域に含まれることから、この間に断層が存在し、この断層に沿って上昇した熱水が地熱微候地を形成したという考えから想定されたものである。

この点については、今後、断層追跡調査等を行い、果たして断層が実在するのかどうか確認する必要がある。



图一 1 GTE-2井周边地质图



図一 2 GTE-2 井を通る地質断面図

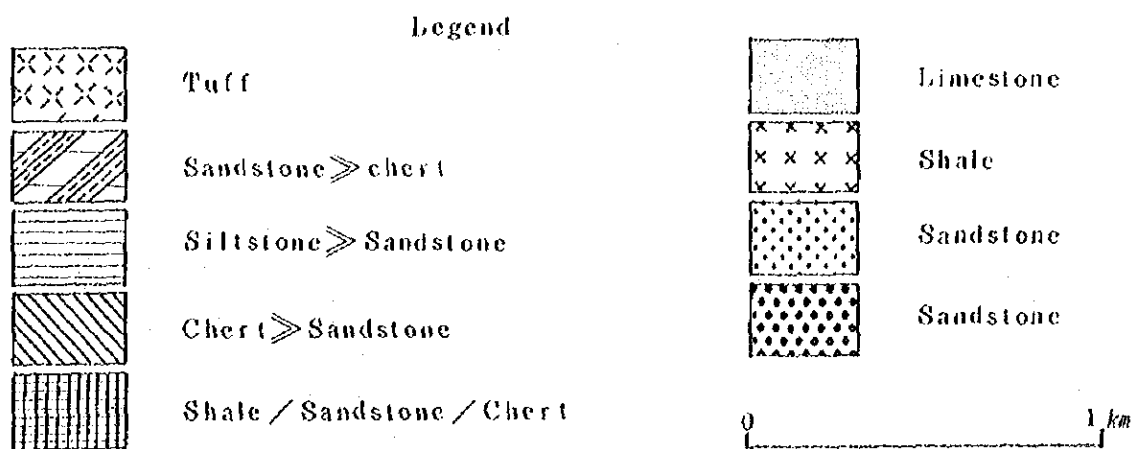
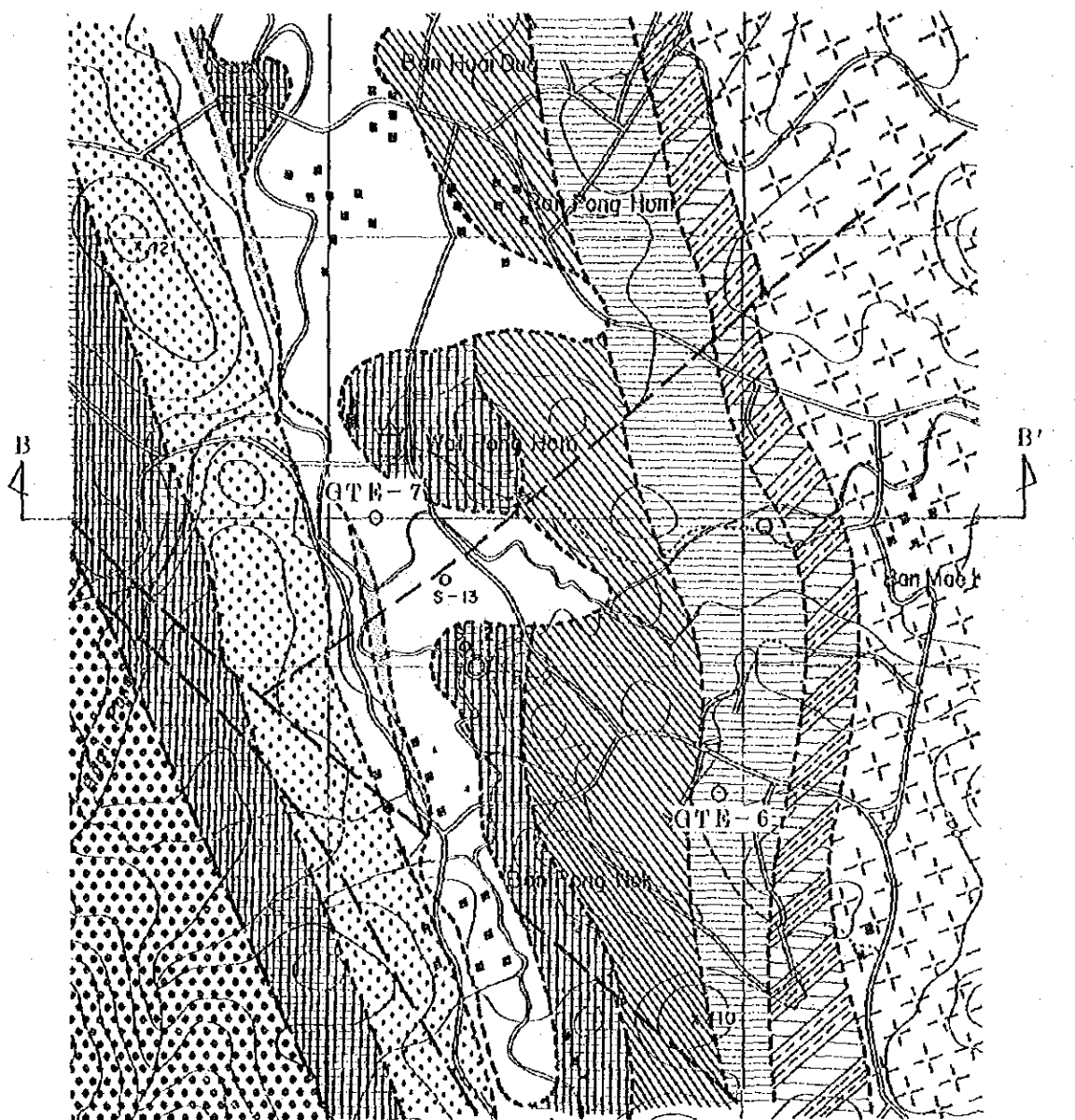
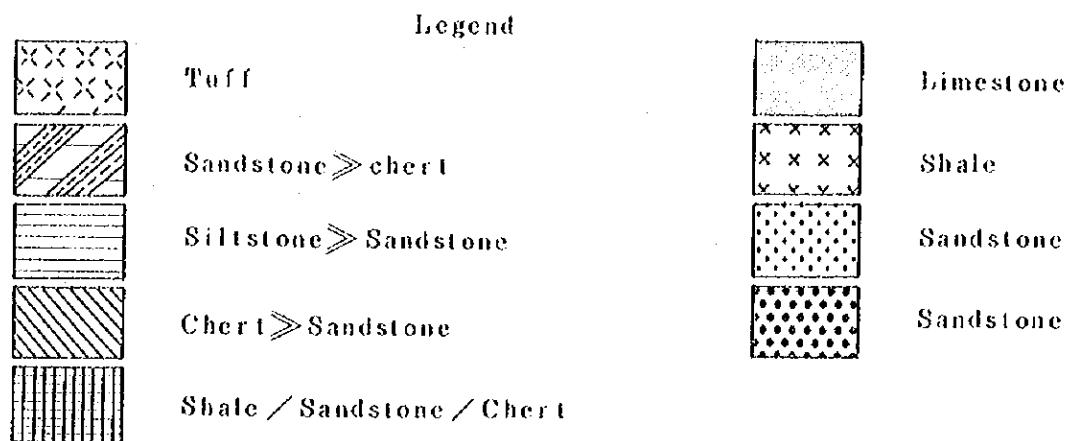
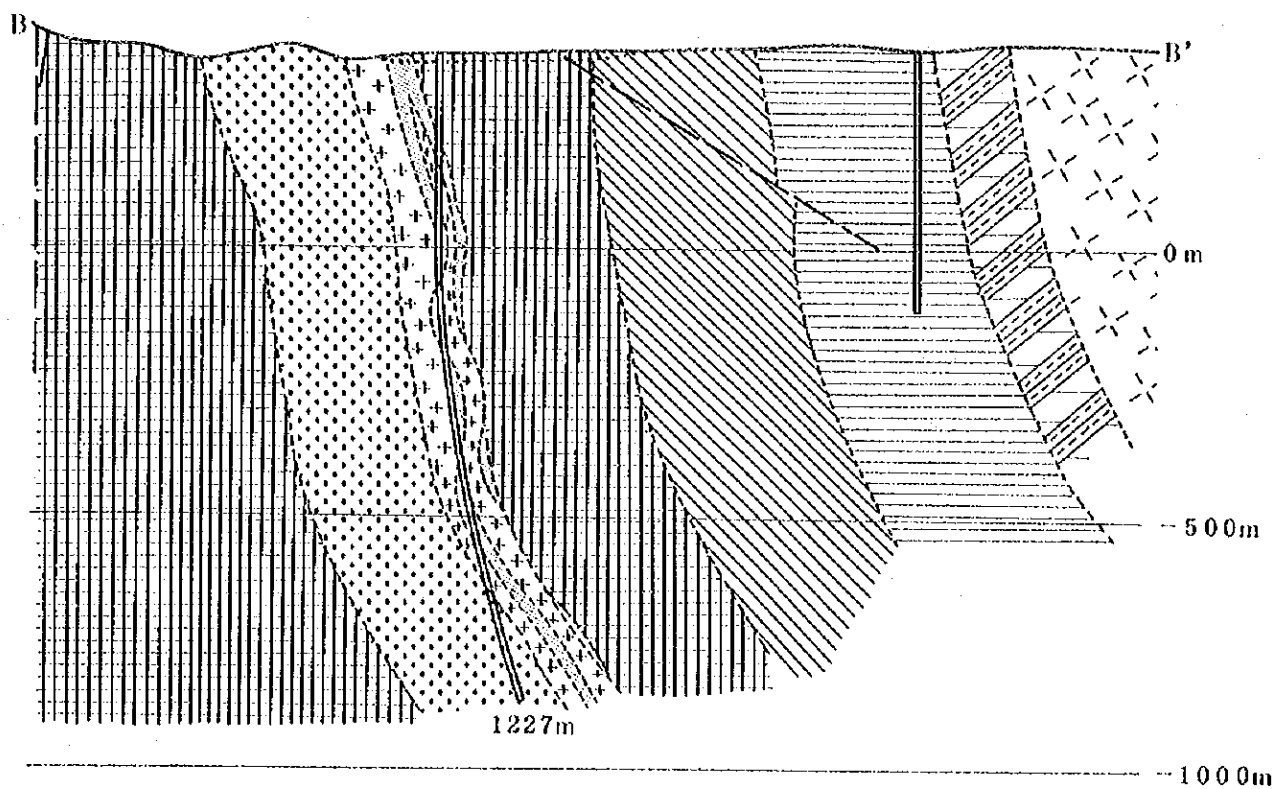


図-3 GTE-7 井周辺地質図（コア調査により修正）



図一4 GTE一7井を通る地質断面図

2. 電気検層

2-1. 坑内比抵抗分布

調査井GTB-7で行った坑内物理検層のうち、電気検層の比抵抗分布及び自然電位分布を深度ごとに示したものが図-5である。

ケーシングパイプがセットされている1,001mまでの深度を対象に比抵抗分布をみると、540~570m, 700~770m, 805~830m, 865~890m, 910~950m付近でショート及びロング共変化がみられ、高い比抵抗値を示す。それ以外の深度では低比抵抗値(100 Ω -m以下)となっている。

また、1,000m以深では1,010~1,030m, 1,140~1,160m, 1,175~1,215m, 1,220m~1,227m(坑底)で変化がみられ、特に1,010~1,030m, 1,175~1,215m, 1,220~1,227mでは高比抵抗値を示す。

これらの比抵抗分布をみると、低比抵抗のゾーンと高比抵抗のゾーンが交互に出てくる点に特徴がある。その中で、ロングが500 Ω -m以上の高比抵抗のところがあり、1,200m付近では2,500 Ω -m以上になっている。

従って、比抵抗検層や、掘削時の状況とを考え併せると、地層が極めて硬いことが察知される。

2-2. MT法による調査結果との対比

GTB-7は掘削後に行ったシングルショット方式の方位・傾斜測定により坑底の偏距が160~173mあるものと推定された。

この坑跡をMT法調査結果中の比抵抗垂直断面図と対比した結果、GTB-7はMT法で推定された低比抵抗ゾーンを通過しておらず、坑底は26~36 Ω -m程度と推定される地層内に位置することが明らかとなった。

実際の坑跡とMT法調査結果の比較を図-6に示す。

次に、GTB-7電気検層結果とMT法による調査結果との対比を実施したが電気検層から得られる比抵抗値は泥水の抵抗によってスライドした値であり絶対値ではないので、ここでは両者の傾向の対比に重点を置いた。

電気検層と調査結果の比較を図-6に示し、これらの対比によって得た結論の概要を以下に述べる。

- ① 坑井内の地層が互層をなし、電気検層結果から知られた比抵抗の分布は極めてバラつき数 Ω -m~数千 Ω -mを示している。MT法はこれらの互層中の低比抵抗層を反映したものとみなされる。

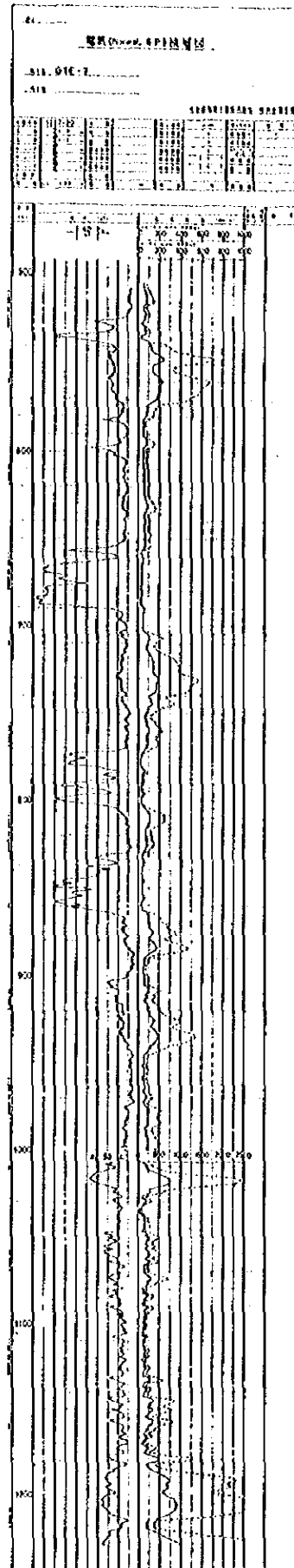
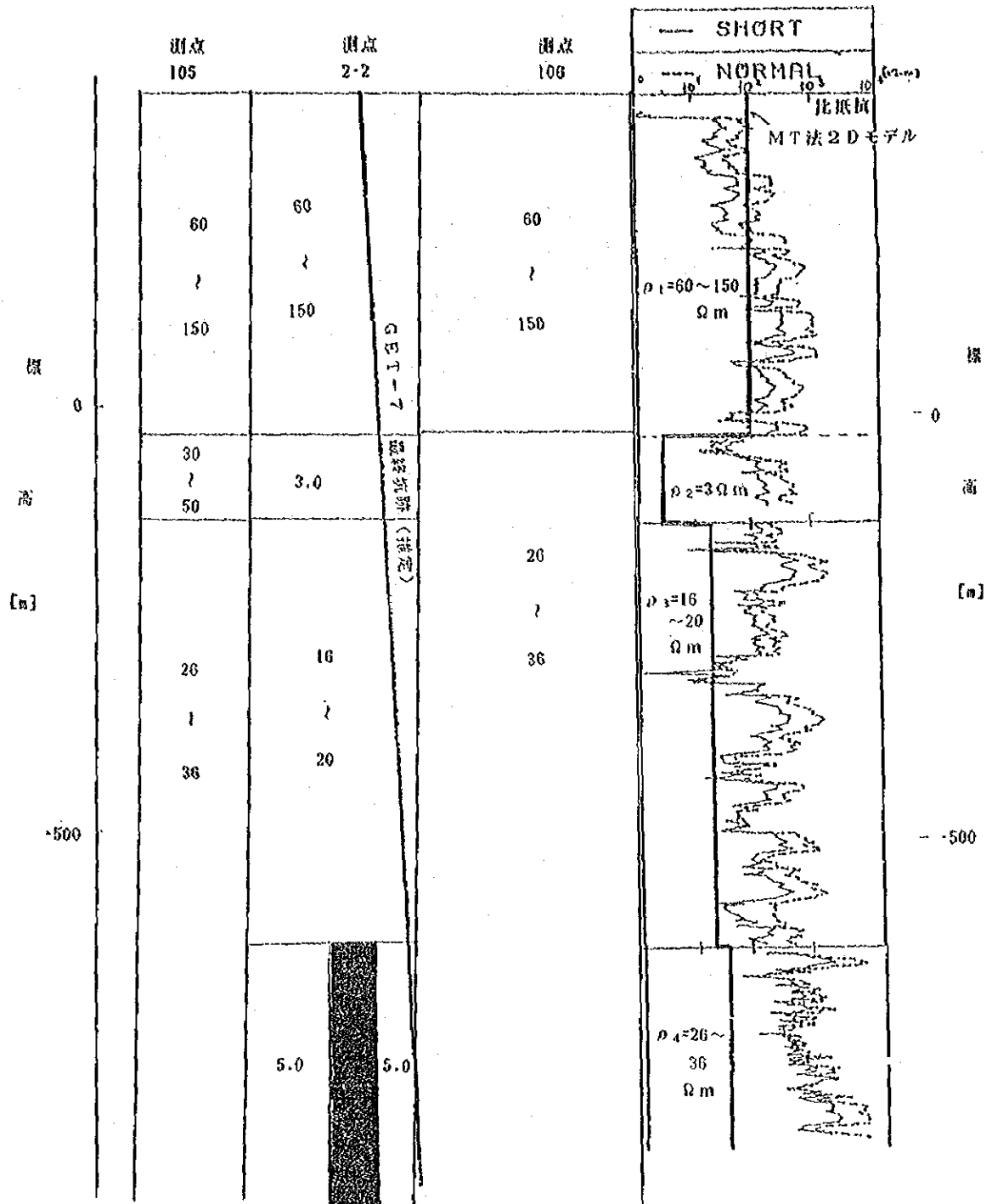


圖-5 GTE-7 坑內電氣檢層圖



これはMT法の原理的な特徴の一つであって、低比抵抗層に極めて敏感であることから地層が低比抵抗層と高比抵抗層の互層で構成される場合、MT法ではその平均値が示されるのではなく、より低比抵抗層に近い値が示されることによる。

- ② 電気検層結果はMT法と比べて相対的にやや高い比抵抗を示しているものの両者の比抵抗分布の傾向はほぼ対応している。
- ③ 電気検層では坑底の近くで比抵抗が非常に高くなる傾向が認められるが、これは低比抵抗層との互層中的一部分とみなされる。
- ④ 電気検層結果で示された比抵抗の分布は極めてバラついているが深部に至るほど高い比抵抗を示す。深度的に若干のずれはあるがMT法結果の中にも同様な傾向が認められる。
- ⑤ MT法による比抵抗分布が比較的低い値を示す他の理由として、地熱微候地周辺に発達する変質帯の影響と考えられる可能性もある。

3. 温度検層

3-1. QTE-7井を含む調査井坑内の温度分布

調査井QTE-7坑内温度測定の結果と、タイ王国 (EGAT) 側で実施したQTE-1~QTE-6の坑内温度測定の結果を併せて図-7, 図-8に示す。

QTE-1~QTE-6の掘削深度は500m未満であり、QTE-7より浅い深度であるが、その温度分布から各坑井とも次のような特徴をもつことが明らかにされている。

◦ QTE-1

深度470m付近まではほとんど直線状に温度が上昇しており、温度分布が熱伝導に支配されていることを示している。470m以深500mまで温度勾配が小さくなる傾向がみられる。470mより上部での温度勾配は $10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ($1^{\circ}\text{C}/10\text{m}$) である。

◦ QTE-2

地熱微候地の近くで掘削された調査井で現在でも坑口から少量ではあるが温泉水が自然湧出している。

掘削終了直後に測定した坑内温度の分布をみると、深度300m付近で最も高く約 106°C を示すが、それ以深ではむしろ温度が低下する。しかし、昭和60年2月の再測定結果によれば深度300m付近の温度は以前より低下し、温度分布の形としては、むしろ対流型の様相を呈する。坑口の温度が高い (66°C) のは温泉水が自噴するためである。掘削直後に比べ坑内温度がこのように低下したのは300m付近で湧出した温泉水の水量が少ないため、地表浅部における冷却の影響が坑井内に及んだ結果とみなされる。

◦ QTE-4

この坑井内の温度分布も直線状に上昇しており、熱伝導型であることを示しているが、深度280m付近を境にして温度勾配が異なる。すなわち280m以浅では $8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ($1^{\circ}\text{C}/12.5\text{m}$) であるが、それ以深では $18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ($1^{\circ}\text{C}/5.5\text{m}$) を示し、その値は大きくなる。この違いは上記深度を境にして岩石の熱伝導率が異なる (上部で大、下部で小) ためと考えられる。

◦ QTE-5

この坑井の温度分布も典型的な熱伝導型であって温度勾配は $12^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ($1^{\circ}\text{C}/8.3\text{m}$) と比較的大きい値を示す。

◦ QTE-6

EGAT側で掘削した調査井の中で唯一の蒸気、熱水を噴出した坑井であり、この図で示した温度分布は噴出直後に坑口をしぼって測定した結果から得られたものである。割れ目に到達した坑底の温度は 118°C 、坑口では 103°C であるが、この間の温度低下は

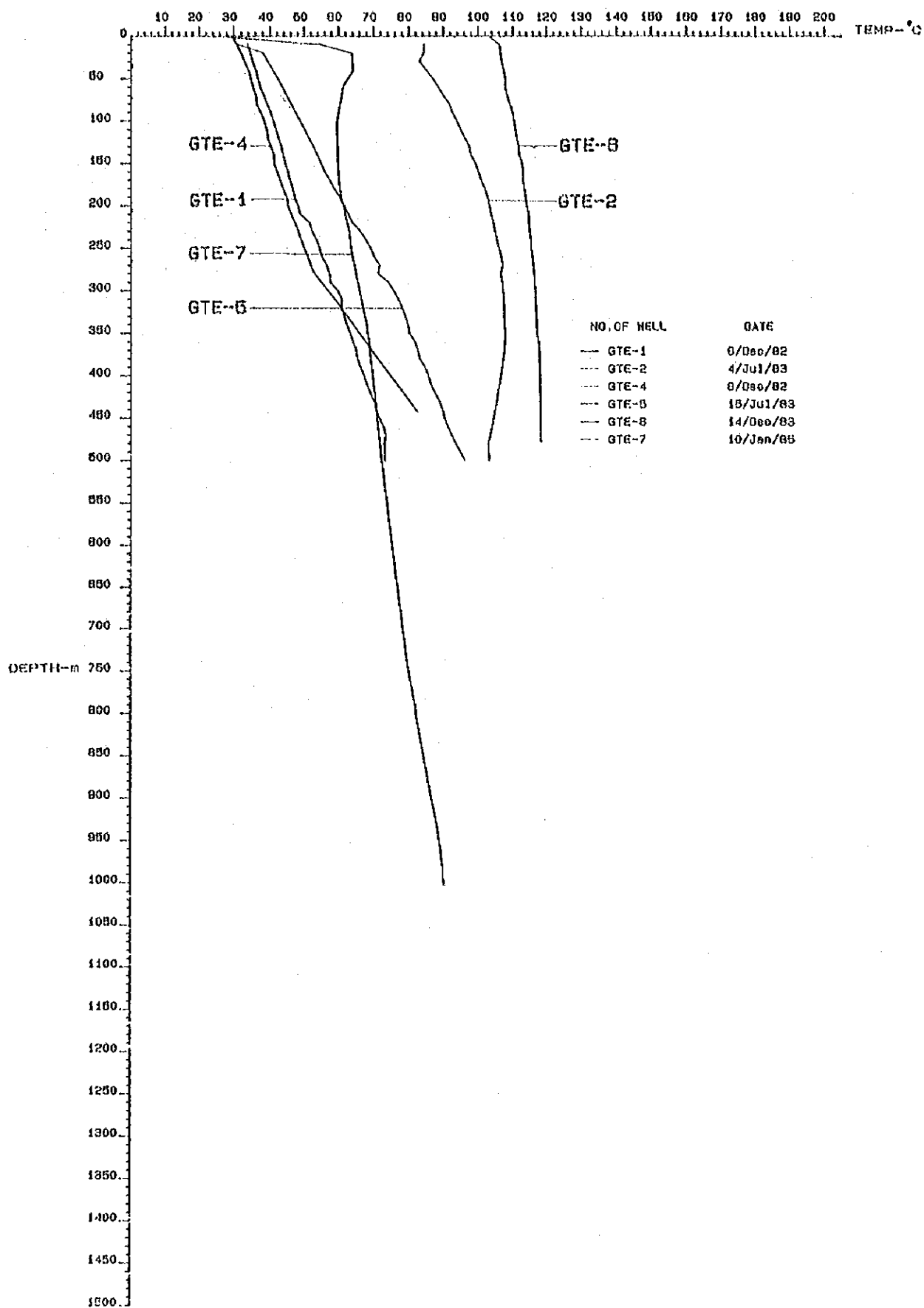


图--7 棚查井坑内温度分布图

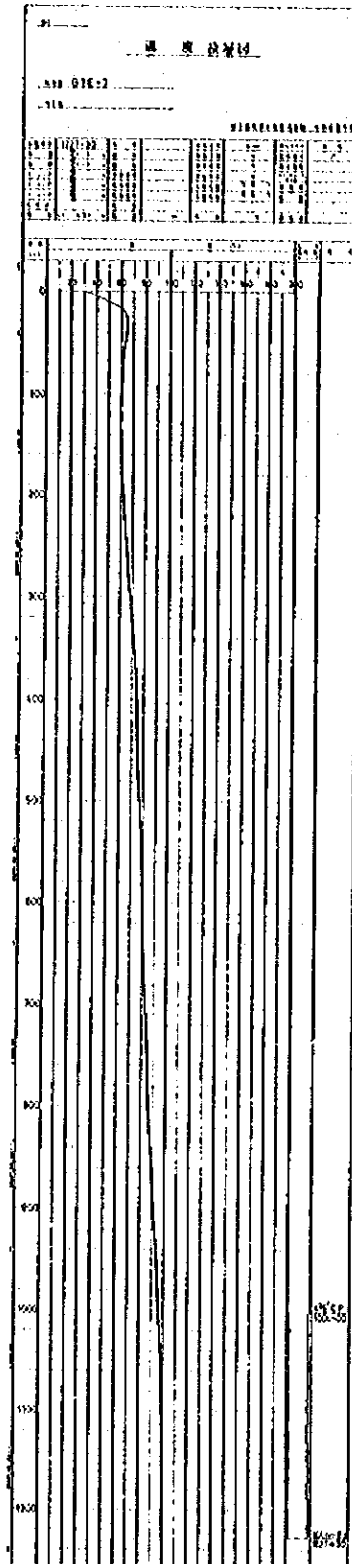


圖-8 GTE-7 溫度檢層結果

地表浅部の冷却の影響によるものとみなされる。

○ QTB-7

掘削深度 1,227 m の本調査井における温度測定は、掘削ポンプ停止後 72 時間の状況で実施したが、坑内状況から判断してほぼ地層温度と平衡状態に達していると考えられる。

その温度分布によれば、地表付近では 65℃ と比較的高温を示すけれども、それ以深 150m 付近までは逆に低下し、その後上昇するが坑底付近では約 100℃ と極めて低いものであった。上昇形態は、ほぼ直線状になっており、温度勾配は非常に小さいのが特徴である。

3-2. QTB-7 井坑内温度分布の解析

まず目につくことは、温度分布の形態がほぼ直線状に立っており、温度勾配は 4℃/100m (1℃/25m) に過ぎず、その値が小さいことで特徴づけられることである。

次に、地表浅部 (ほぼ 150m 以浅) では、むしろ下方より温度が高いことが知られるが、これは、この坑井の掘削地点が地熱微候地に近く位置するため、表層部の砂礫層及び基盤岩の風化帯の中に含まれる温泉水がこの付近まで広がり、その影響がこのような形であらわれたものと判断される。しかし、ここで注目を引くのは 150m 付近の深度でも 60℃ と比較的高い温度を示し、他の坑井で見られるような地表浅部の冷却の影響があらわれていないことである。

このように、一般に自噴しない坑井の場合には、表層部が温泉水の存在のため高温帯を形成してもその下部では冷却の影響を受け急激に温度が低下するのが普通である。しかし、QTB-7 のように、深度 150m 付近でも 60℃ という高い温度を保つこと、さらに 150m 以深における温度勾配が地熱微候地に接近した位置にあるにもかかわらず温度勾配の値が極めて小さいことは、QTB-2、QTB-6 を除く他の坑井のように、坑内の温度分布が単に熱伝導によってもたらされたということだけでは説明はつかず、別な角度からその理由を追究する必要があるように思われる。

3-3. 温度分布の解析

1) 熱水系と地殻熱流量

熱水系が存在する場所では、高熱流量域を含む熱水の湧出地域 (discharge area) が形成されるが、その周辺では水の浸透地域 (recharge area) 及び深部からの熱の供給に対応して低熱流量域が生じる可能性がある。そして recharge area では温度は低く温度勾配も小さいが discharge area では上昇する熱水のため地表浅部では温度は高

いが深部では温度勾配は小さくなるのが一般である。

2) サンカンベン地域の地熱系モデル

昭和59年4月に開かれた「昭和58年度深部電気探査補足調査」報告会で説明したように、サンカンベン地域の地熱系はNNW-SSW方向に走るHuai Pong断層と同方向のBan Mae Khu Ha断層との間にはさまれた地域を中心として形成され、現在の地熱微候地はdischarge area、その周辺はrecharge areaからなり、断層や浸透性の地層を通じ地下に流入する水は、地下水のほか、地熱微候地の表層部に存在する温泉水もこれに含まれると考えられる(図-9)。

以上述べた事柄から推察して、GTB-7坑内の温度分布が

- ① 地熱微候地に接近して位置するにもかかわらず、坑内温度が予想外に低く、かつ温度勾配も小さい。
- ② 一方、表層部の温泉水の影響が及ばないと思われる深度150m付近でも比較的温度が高い。

などの特徴をもつことを併せ考えると、GTB-7坑内の温度分布はdischarge area外側の温泉水のrecharge areaのそれを示しているのではないかという見方が生まれてくる。

3) 地層温度に及ぼす浸透水の影響についての試算

① 基本式

いま、水が細い管状通路を通して地表からDの深さまで浸透し、再び地表に戻ってくると考えると、下降時の温度上昇は次の式で示される。

$$q\rho c \frac{d\theta}{dz} = 2\pi r_0 h'' \{ \theta - (\theta_0'' + \alpha(D-z)) \}$$

ここに、 θ : 管内の水温

q : 流量

ρ, c : 水の比重と比熱

r_0 : 管の半径

h'' : 冷却係数

z : 浸透深度、下降時は負にとる

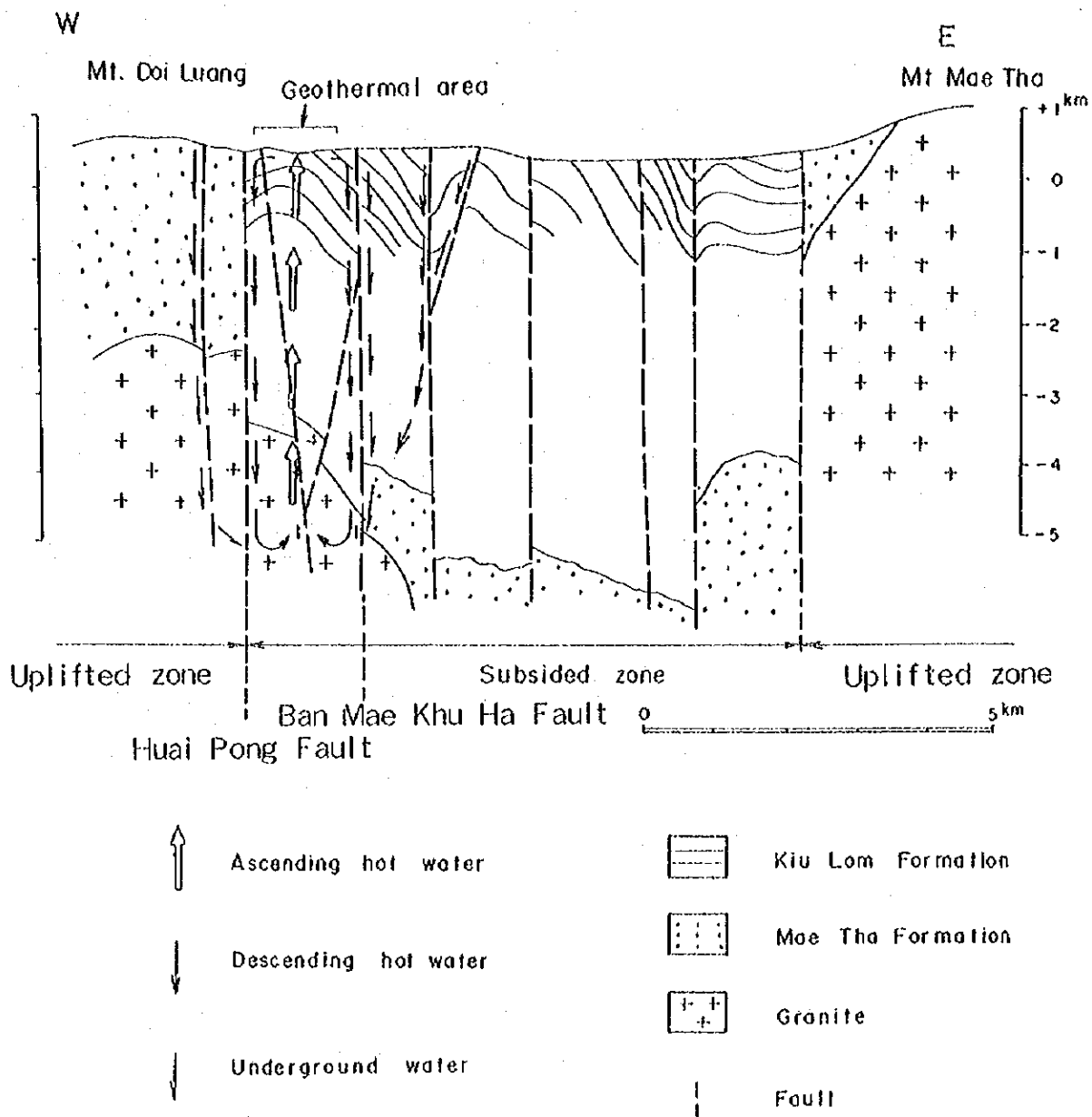
θ_0'' : 地表面(=浸透水)温度

α : 地温勾配

$z=D$ で $\theta=\theta_0''$ のときの上式の解は

$$\theta = \theta_0'' + \alpha(D-z) - \frac{a}{r} \{ 1 - \exp\{-r(D-z)\} \}$$

ここに $r = \frac{2\pi r_0 h''}{q\rho c}$ である。



図ー9 サンカンペン地域における地熱系モデル概念図

管の下端での水温 θ_b は、 $z=0$ とおくと

$$\theta_b = \theta_0'' + \alpha D - \frac{\alpha}{r} (1 - \exp(-rD))$$

これが浸透深度 D における水温を求める基本式である。

② QTB-7 坑内温度分布へのマッチング

recharge areaにおいて、水が地下へ浸透する場合、恐らく一個所から多量の水が浸透するのではなく、小さな割れ目等を通り比較的少量の水が流入し、これらの割れ目の集合体がいわゆる recharge areaを形成しているものと考えられる。従って、浸透する水の全量は個々の割れ目を通して地下に流入する水の総量となる。

サンカンベン地域は硬い地層で構成されている地域であるから、恐らく浸透する水も上で述べたように個々の小さな割れ目を通して地下に流入するものと思われる。

このため、recharge areaでは、もともとの地層温度が熱を奪われ、かなり低下しているものと想定される。いいかえると、QTB-7の坑内温度はこの冷却された地層の温度を反映している可能性が強いということである。

以上の事柄から、どのような条件のもとで浸透した温水が現在の坑内温度分布に近似した状態まで温度が低下するかについてマッチングを試みた。この場合、マッチングの対象はいうまでもなくQTB-7の坑内温度の分布である。

このマッチングのため

- 地層中の初期温度分布： α
- 浸透する割れ目の大きさ： r_0
- 浸透水の水温： θ_0''
- 浸透水の流量： q

とし、その値を種々に変え、既述の基本式を用い、浸透深度 (D) の下端における水温 (θ_b) を求め、その温度分布がQTB-7の坑内温度分布に近似するかどうかを検討し、もし近似する場合には、上で述べた考えが著しく間違っていないとみることができよう。

これまで行った計算の中から比較的QTB-7の温度分布に近似する場合をとり上げ、その結果を示すと次の通りである (図-10)。

ここで

α : $1^\circ\text{C}/9\text{m}$ (QTB-5の $1^\circ\text{C}/8.3\text{m}$ とほぼ同程度の勾配とする)

r_0 : 半径 2cm の細管

θ_0'' : 60°C (QTB-7の深度 150m における地下温度を浸透する温泉水の水温とみなす)

q : $20\ell/\text{min}$ ($1,005\text{m}$ 以深の逸水量 $20\ell/\text{min}$ を参考)

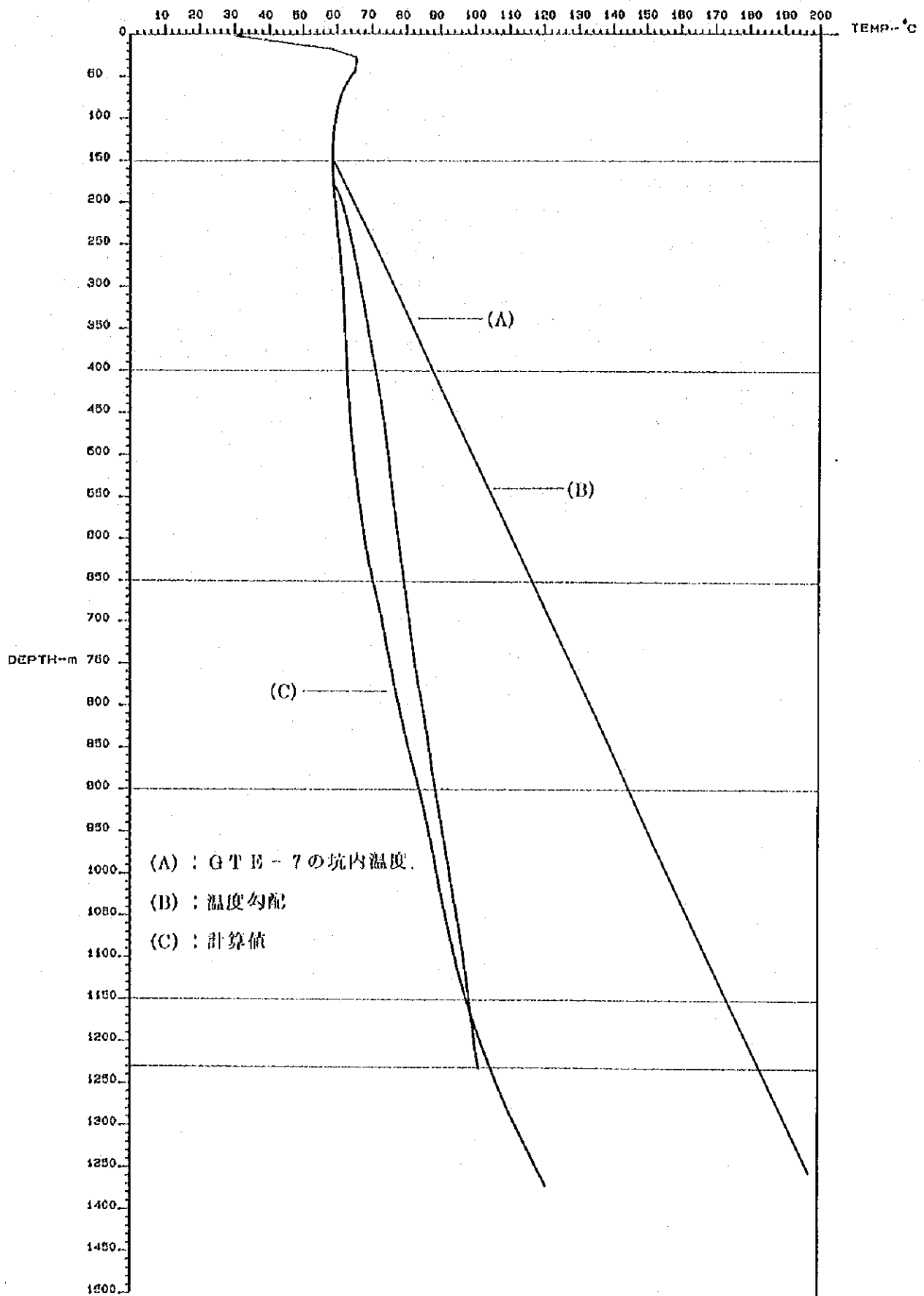


図--10 浸透水の深度と水温との関係

以上のほか

$$\rho c : 1 \text{ cal/cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h'' : 0.25 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$$

とする。

図-10において、150m以浅の温度分布はQTB-7のそれと同じとみなし、60℃の温水がこの深度付近から地下に浸透したとして取り扱った。(A)はQTB-7の坑内温度分布、(B)は温度勾配、(C)は各深度における計算値から求めた温度分布曲線を示したものである。

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

浸透深度	浸透水温度	QTB-7坑内温度	差
150m : 0m	60℃	60℃	0℃
400m : 250m	63℃	70℃	-7℃
650m : 500m	71℃	77℃	-6℃
900m : 750m	83.5℃	87℃	-3.5℃
1,150m : 1,000m	99℃	97℃	+2℃
1,227m : 1,077m	104℃	100℃	+4℃

この結果をみると、計算値では1,150m以浅でやや温度が低く、以深ではやや高くなるが、全体的にはほぼQTB-7の温度分布に近似しているとみることができよう。

この計算では、半径2cm程度の細管(割れ目に当たる)から水温60℃、水量20ℓ/minの温泉水が浸透した場合をとり上げたのであるが、この結果から、既に述べたように、いわゆる浸透地域から浸透する水量の総計は不明であるにしても浸透地域内の個々の割れ目から流入した水によって高温の岩盤が熱を奪われることにより地中温度が低下し、現在、QTB-7の坑内温度分布で見られるような特徴的な様相を呈するに至ったと結論される。

4. 解析結果に基づく地熱系の概念モデル

4-1. 従来想定された地熱系モデル

図-11は、Ban Pong Nok 地区における断層の分布、深度10mにおける地下温度の分布、さらに変質帯の分布に加えて昭和58年度のMT補足調査で得られたトータルコンダクタンスの分布を連ね合わせたものである。なお、図-11の中で地熱徴候地を通り、NW-S E方向に延びるゾーンは、50-m以下の低比抵抗帯の分布を示したものである。

図-11において、200mho以上の高コンダクタンスの分布、50-m以下の低比抵抗帯の分布が地質構造、地下温度の分布と調和的であることから、この低比抵抗帯はNNW-SSE方向のHuai Pong断層及びBan Mac Khu Ha断層と、これに直交するNW-S E方向の断層に沿って形成された破砕帯に当たり、この破砕帯が当地域の地熱貯留層を形成すると判断された。

従って、当地域の地熱系のモデルとしては図-9に示すように、上記断層にはさまれた地域内に破砕帯が存在し、この破砕部分に沿って地熱流体が上昇し、地上付近に到達したあと、地熱流体はその両側の破砕部分に沿って地下に下降し、ここに対流系が形成されるという地熱系のモデルが想定された。

図-9は地熱徴候地を通るBW断面であるが、地下温度の分布状況から判断して、高温流体を含む貯留層、すなわち、破砕帯は地熱徴候地よりさらに北側に延びていることはまず確実と思われた。GTE-7の掘削地点が地熱徴候地のやや北側に選定されたのも以上の理由によるものである。

4-2. GTE-7の掘削結果により修正された地熱系モデル

GTE-7掘削により得られた結果の要点を列記すると次のとおりである。

- ① 50-m以下の低比抵抗帯に小規模ではあるが割れ目の存在が知られた。
- ② 一方、坑内の温度分布の解析結果から、掘削地点は温水の浸透地域であると判定された。
- ③ 従って、GTE-7が、仮りに大きな割れ目に遭遇したとしても水温が低く評価に耐え得るものではないと予想される。
- ④ GTE-7の掘削地点側は低温域、地熱徴候地の存在は高温域とみなされることから、この間にNE-SW方向の断層が推定された(図-12)。
- ⑤ すなわち、当初、GTE-7の掘削地点は熱水の存在地域(湧出地域)と考えられ、50-mの低比抵抗帯はそれに当たると判断された。
- ⑥ しかし、掘削の結果、GTE-7付近は温水の浸透地域であり、流体は1-1で記した推定断層に伴う割れ目を通して地下に浸透する場所であるとみなされるに至った。

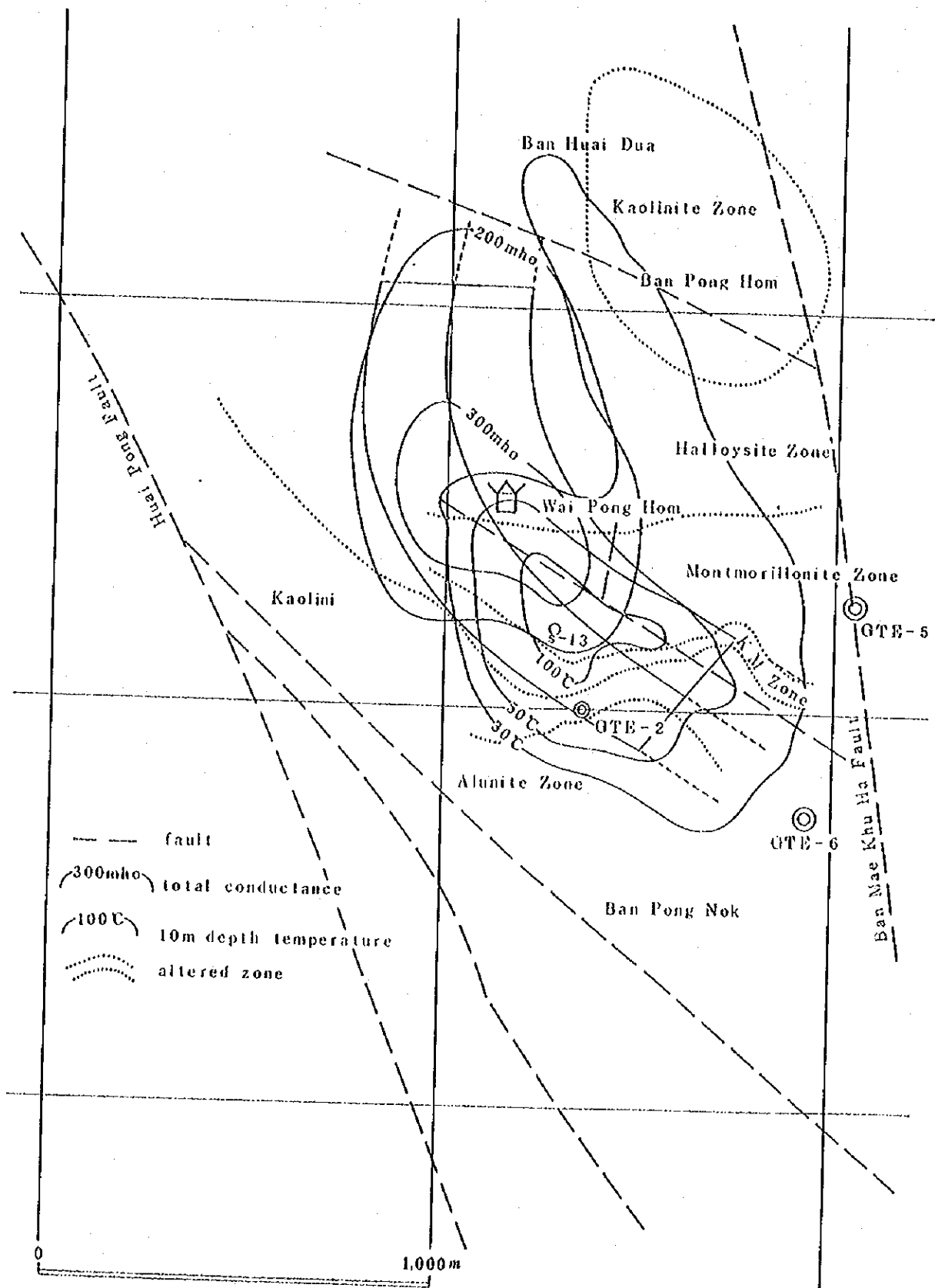


図-11 地上調査結果のコンパイルマップ(昭和58年度)

以上の事柄から当初想定した地熱系の概念は修正を余儀なくされ、高温熱水を含む湧出地域すなわち地熱貯留層は前記のN E - S W の方向をもつ推定断層以南に限定されることが明らかになった。G T B-7 の掘削結果により修正された平面的な地熱系モデルの概念を図- 12 に示す。

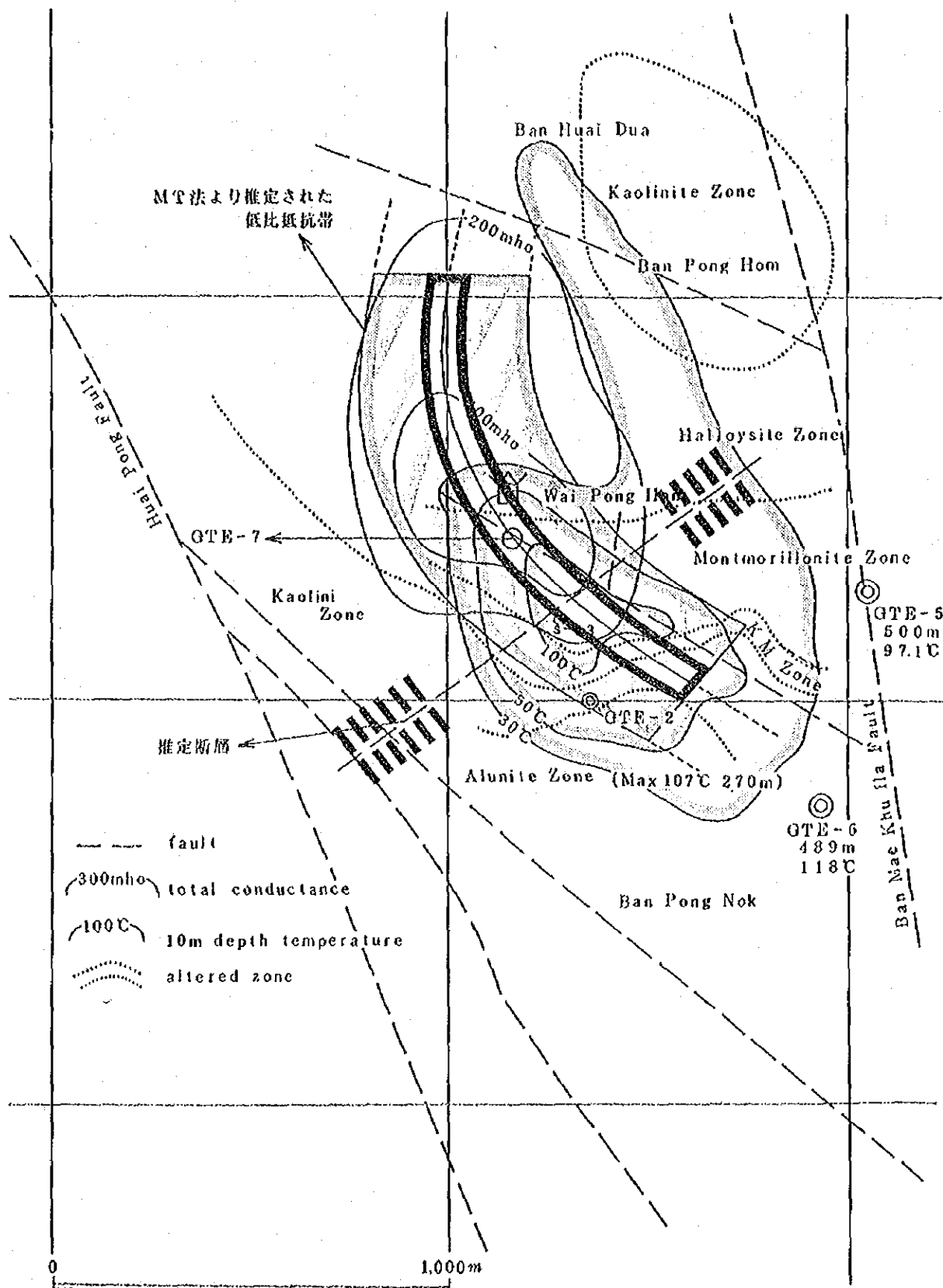


図-12 GTE-7の掘削結果により修正された地熱系

5. 総括及び今後の調査方針

GTE-7のコア調査の結果から、地質構造についての見直しがなされ、従来、GTE-2付近を通り、背斜軸が存在すると想定されていたが、コア調査の結果から構造的にはむしろ単斜構造であることが明らかとなった。また、GTE-7坑内の温度が異常に低いことから、地熱徴候地とGTE-7との間に、NE-SW方向の断層の存在が推定された。

坑内比抵抗検層の結果と、前回のMT法二次元解析から求めた比抵抗断面、今回試みた一次元解析に基づく比抵抗断面が対比されたが、いずれの場合も、高比抵抗層と低比抵抗層の互層からなる検層結果に対し、MT法の解析結果では低比抵抗層に対比された。これは、MT法の場合、低比抵抗層の影響が強くあらわれ、高比抵抗層が存在してもその分解能に欠けていることに起因する。

従って、GTE-7の掘削結果との対比からは、若干の孔曲りのため、坑底付近は、MT法の解析による低比抵抗層のやや外側に位置すると判断された。

問題は、GTE-7の坑内温度の分布であって、地熱徴候地に近く掘削地点が位置するにもかかわらず、1227mの坑底でもたかだか100°C程度の地下温度を示すに留まった。

なぜ、このように低温であるのかについて坑底が100°C程度にもかかわらず、深度150m付近の温度が60°Cという比較的高い温度を示すことから、坑内の温度分布を解析した結果、GTE-7掘削地点付近は60°C程度の水温を有する温水の浸透地域(recharge area)であると判断された。

この浸透地域がどの程度の範囲を占めるかは明らかでないが、コア調査の結果から推定された地熱徴候地の北側を通るNE-SW方向の断層がその境界に当たる可能性も存在する。

いずれにしても、今回のGTE-7の掘削により、MT法による調査の測点2-2付近はいわゆる低温地域であると評価され、サンカンベン地域の地熱貯留層を把握するためには、今後地熱徴候地周辺において掘削を行い、地熱流体の上昇通路に当たる断層の存在、地熱流体の温度を確認する必要があると結論された。

〔参考文献〕

湯原浩三，瀬野錦蔵：温泉学，地人書館，昭和44年（1969）。

湯原浩三：地殻熱流量におよぼす熱水系の影響，火山，第2集，第18巻，第3号，
昭和48年（1973）。

Ⅱ. 第三段階補足調査の結果

II. 第三段階補足調査の結果

1. 調査の目的と内容

サンカンペン地熱開発計画調査の第三段階調査として、昭和59年度GTE-7調査井(深度1,227.3m)がJICA調査団により掘削されたが当地域の貯留層を評価するための有用な資料が得られなかったため、坑内検層の結果を解析し、その結果から第三段階調査の補足調査として、昭和60年度に地熱微候地を含む熱水湧出地域を中心として断層追跡調査及び地下温度調査が実施されることになった。

調査目的は、上記調査により、地熱貯留層の存在範囲を明らかにし、その結果に基づき今後BOATで計画しているGTE-8の掘削計画について、掘削する価値を有するか否かについて評価を行い、掘削する価値があると判断された場合には、GTE-8の掘削地点をBOATに提言することにある。

本編(第二部)は以上の第三段階補足調査の結果をとりまとめたものであるが、上記調査のうち、断層追跡調査はフィンガープリント法と呼ばれる地化学探査を採用し、JICA調査団により実施された。一方、地下温度100mの温度調査孔(10本)の掘削と孔内温度の測定がBOATにより実施され、その結果に基づき深度100mにおける地下温度分布図が作成された。

調査結果の解析は上記調査から得られた資料に基づきなされたものである。

2. フィンガープリント法断層追跡調査

2-1. フィンガープリント法による断層調査の特徴

断層の直上では、各種土壌ガスに異常があることが知られている。これは、断層がガスの移動経路となり、地下深部のガスが地表に到達しているためと解釈される。土壌ガスの分析による断層調査は、こうした現象を応用したものであって指示ガスとしては CO_2 、 Hg 、 He 、 Rn 等のガスが知られている。しかしながら、従来の土壌ガス調査には、次の様な問題点がある。

- ① 土壌ガス濃度の短期的変動
- ② 地表付近の要因によるガス濃度異常
- ③ 単一成分の分析のみによる信頼性の欠如

本調査では、上述の問題点を大きく改善したフィンガープリント技術を用いた。フィンガープリント技術は地化学ガス集積-パイロリシス質量分析(PY-MS)-多変量統計解析の複合技術であり、その特徴は大別すると次の2点に要約される。すなわち

- ① 土壌ガス成分、濃度の短期的変動を除去するため、一定期間ガスを集積・採取する。
- ② 従来のガス地化学探査のように、特定のガス成分の濃度を解析するのではなく、すべてのガス成分の分析を行い、それらの相対比(パターン)を解析する。

の2点である。また、断層の直上の異常を捕えるだけでなく、ガス量、ガス組成比の類似性を解析することにより、地熱系そのものの広がりも推定することも可能である。

2-2. 調査方法

1) 試料採取

試料採取に用いたガスコレクターを図-13に示す。ガスコレクターは栓付のガラス管とその中に収められたワイヤーとから成る。ワイヤーの先端にはガスの吸着剤としての機能を有する活性炭がコーティングされている。活性炭はガス吸着剤として広範囲に用いられており、(i)低濃度における吸着性が大きい、(ii)対象とするガスが多種類からなる混合ガスに対しても有効である、(iii)空気中の水蒸気の影響を強く受けない等の特徴を有している。

現地調査では、まず清浄な状態で密栓したガスコレクターを試料採取点まで運び、そこでハンドオーガーを用いてコレクター埋設のため深度30cmの小孔を掘削した後、ガスコレクターを開栓し開穴部を掘削孔の底部に設置するようにして、素早く土壌中に埋設した。この時、カラーテープを共に埋設してその先端が地表にあらわれる様にして回収時の目印とした。

10日間以上その状態で放置した後、埋設時の順序に従ってガスコレクターを回収した。

ガスコレクターが埋設されている間に、地下から発散されてくるガスは活性炭に吸着される。この場合、一週間以上集積時間をとることによって、(i)ガス発散の短期的変動によるノイズの除去、及び(ii)微量ガス成分の濃縮の効果があると考えられる。

回収したガスコレクターは直ちに密栓し分析所へ急送した。

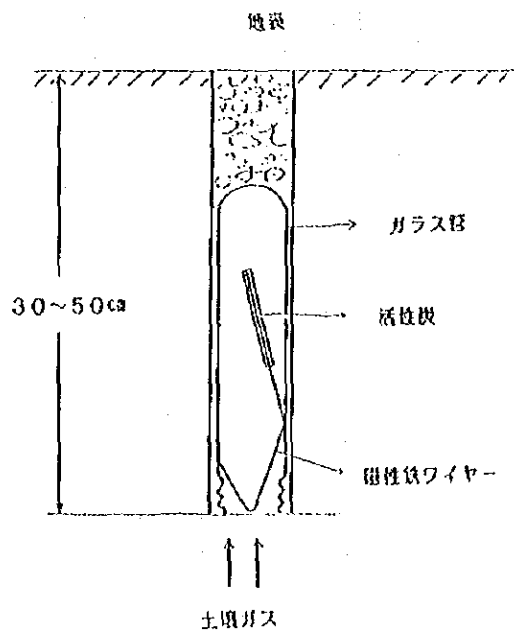
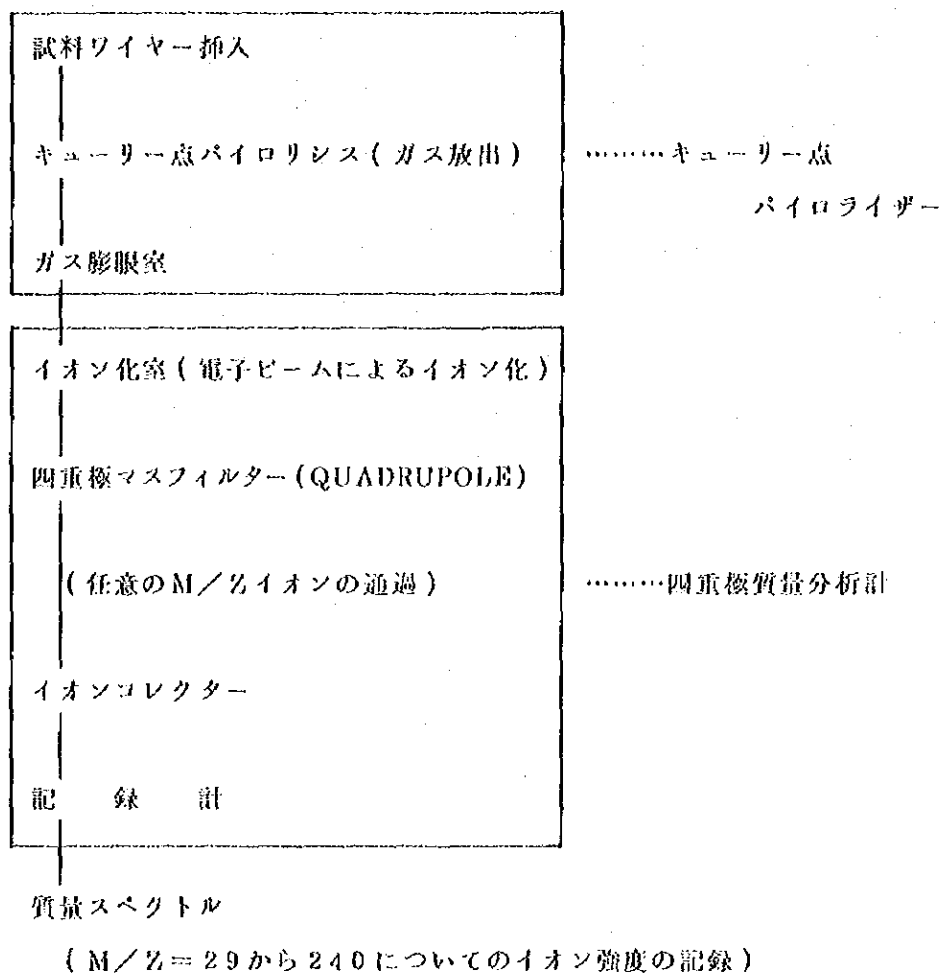


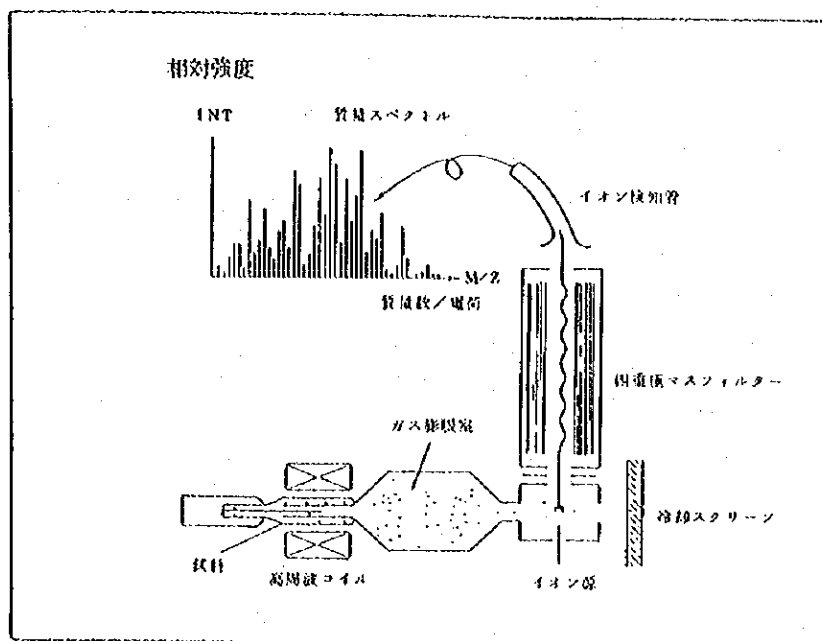
図-13 ガスコレクター

2) 分析方法

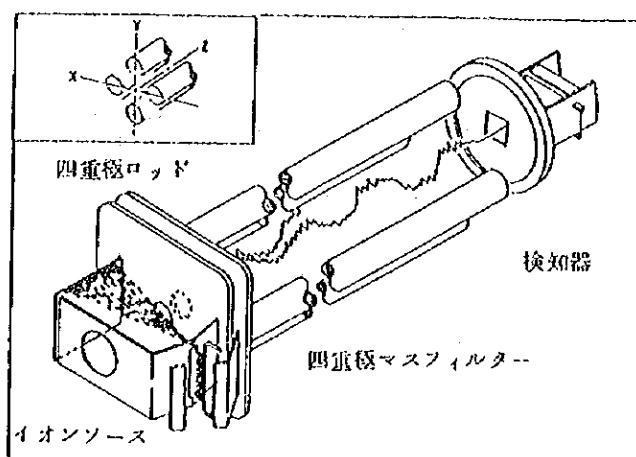
試料はコンピューターと連動したパイロリシス質量分析計で質量数 29 から 240 までの成分について分析される。その分析フローを以下に示す。



パイロリシス質量分析システムと四重極質量分析計の概念を図一 14 に示す。



パイロリシス質量分析システム概念図



四重極マスフィルター概念図

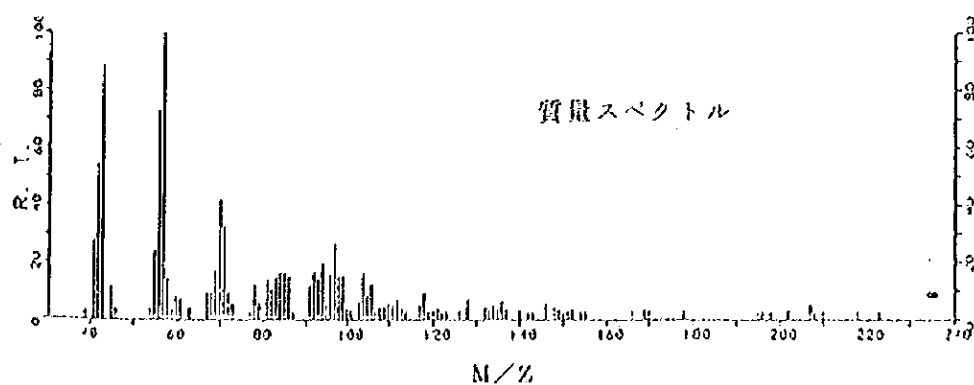


図-14 パイロリシス質量分析システムと四重極質量分析計の概念図

(1) キュリー点パイロリシスによる吸着ガスの放出

キュリー点パイロリシスとは、強磁性体のキュリー点を応用した誘導加熱によるパルス加熱法である。強磁性体は誘導加熱されると急速に発熱して磁性転移点（キュリー点）で、その磁性を失い一定温度になる性質がある。このキュリー点は金属の組成で一義的に決まり変動はない。従ってキュリー点パイロリシスでは、連続加熱法やフィラメントやレーザーを用いる方式に比べて、はるかに安定した再現性の良い加熱が行われる。また再現性の良い事に加え、熱源の強磁性体から放出されたガスが直ちに低温の雰囲気に移行するため、二次反応がほとんど起こらない利点がある。

本手法では、試料ライナーに強磁性体を使用することによって、これを熱源とし、コーディングされた活性炭から吸着ガスを放出させ質量分析を行うものである。

(2) 四重極質量分析計によるガス分析

質量分析法は試料単位あたりの情報量が他の測定機器に比べて最も多く感度も最もすぐれている分析法である。

活性炭から放出されたガスは、ガス膨脹室を経てイオン化室に導入され電子衝撃(EI)によりイオン化される。生成したイオンは電場にて加速され四重極マスフィルターに入射される。

四重極マスフィルターは4本の平行な柱状極から構成されており、対角線上の2極を各電気的に連結し、交流電圧 (V_{rf}) と直流電圧 (V_{dc}) が加えられる。四重極マスフィルターに入射したイオンは一定速度で z 軸方向に進みながら電場の作用によって振動する。電圧等の条件を適当にとることによって、特定の m/z の値のイオンのみが安定に振動しフィルターを通過することができる。他のイオンは不安定に振動し、ついには極柱と衝突する。フィルターを通過してコレクターに入ったイオンは増幅されて、その強度が記録される。電圧等の条件を変化させ m/z の異なるイオンの強度を順次記録することによって質量スペクトルが得られる。

得られた質量スペクトルの例を図-15に示す。ここで縦軸は相対強度 (R, I) 横軸はイオン質量 ($a. m. u.$) 対単位電荷数 z の比、 m/z をあらわしている。すなわち横軸にそって右側ほど高質量、左側ほど低質量のイオンを意味し、それぞれの相対強度が縦軸にあらわれている。この相対強度の最大のピークを100%として正規化されたものである。また、イオンの強度は土壌中のガス濃度、活性炭に対するガスの吸着性、ガス分子のイオン化ポテンシャル等によって決定されるため、単純に土壌ガスの絶対濃度を与えるものではない。しかしながら全試料が同じ条件で採取・分析されているので相対的な比較は可能である。

3) データ解析

(1) 断層・割れ目地点の解析

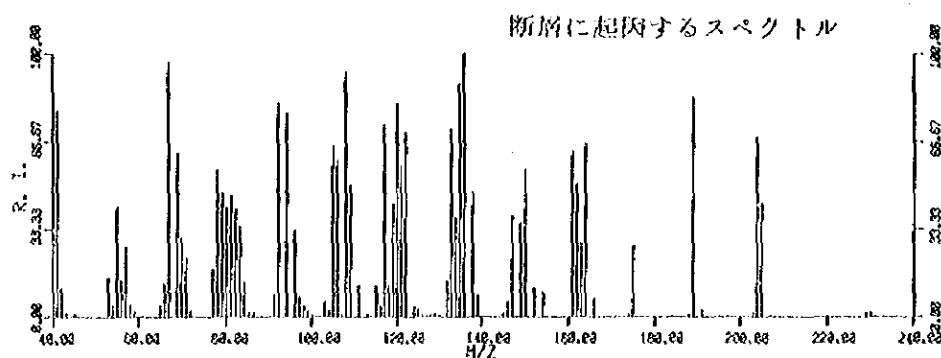
一般に高質量のガスは拡散性が低く、また、分子サイズも大きいので、地下深部に存在したとしても、低質量のガスより地表に到達しにくい。従って地表では高質量のガスは低質量のガスに比べて存在比が小さいか、あるいは存在していない。しかしながら、断層等の開いた割れ目が通路として存在する場合は、低質量、高質量のガスの両者とも地表に到達すると考えられる。本解析は、このような開いた割れ目を通して地表に到達するガスをその組成比の面から検知し、バックグラウンドから区別するものである。

a. 異常ガス組成比の試料の選定

断層・割れ目の存在に起因するガス組成は、調査地域の地質条件によって若干の変動を示すが、一般に特徴的な組成比を有することが経験的に明らかにされている。

すなわち、そのガス組成は質量スペクトル図上で次のような特徴を有する(図-15)。

- ・ 高質量域の数ヶ所に大きなピークが認められる質量スペクトル



- ・ 高質量全域にわたって多数のピークが認められる質量スペクトル

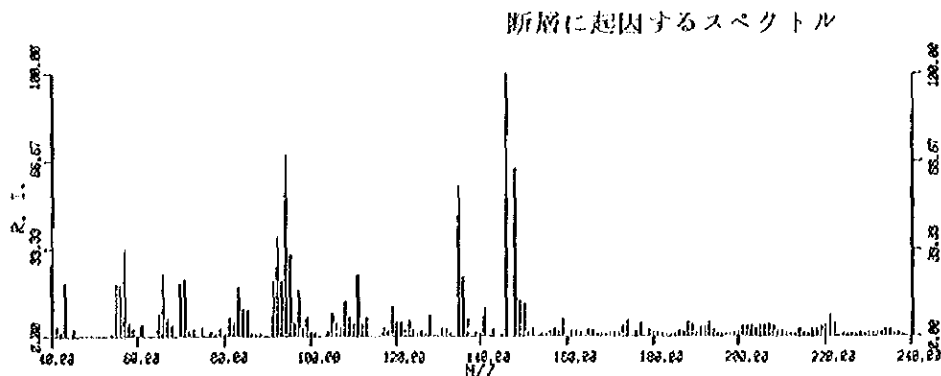


図-15 断層に起因するスペクトルの例

ここで高質量域とは一般に $M/Z \geq 120$ の領域を意味する。しかしながら、バックグラウンドの質量スペクトルに $M/Z = 100$ 以下のピークしかないような場合には $M/Z \geq 100$ の領域のピークも異常として解釈する必要があり得る。

また、高質量域のピークが存在しなくとも、バックグラウンドの質量スペクトルと比較することによって、断層・割れ目を指示していると判定される場合もある。次のような質量スペクトルはそうした例である(図-16)。

- ・ 低質量域ほどピークが大きくなるという通常のバックグラウンドのガス組成比が逆転しており、質量の大きいほどピークが大きくなっている質量スペクトル。

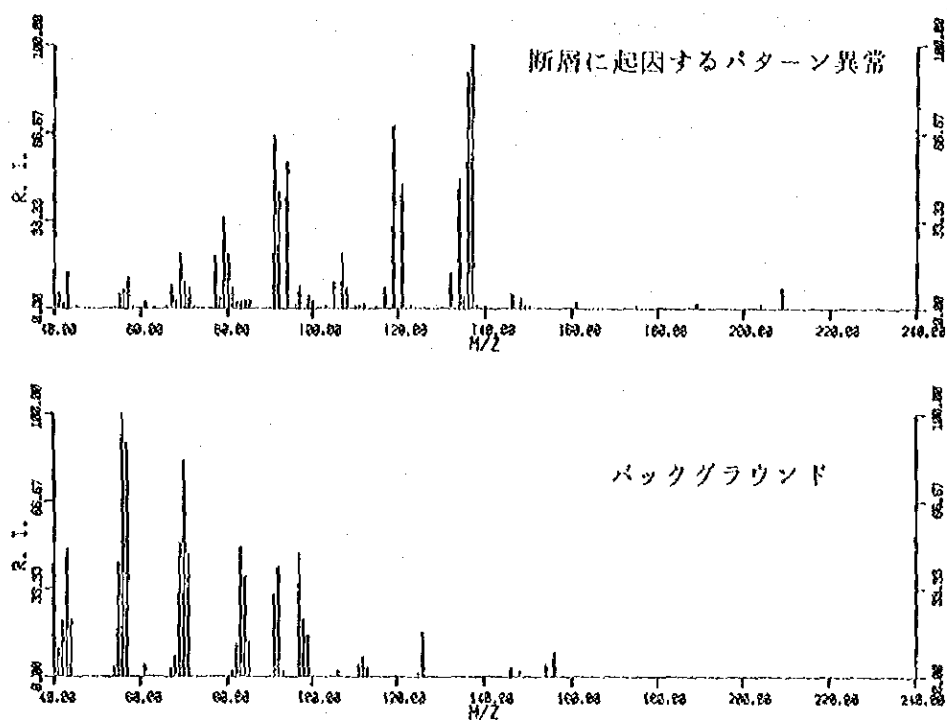


図-16 低質量域におけるパターンの異常

こうした異常ガス組成比の試料の選定は、必ずその周囲のバックグラウンドと比較しながら行うことが必要である。

b. 高質量ガス発散比解析

上述の目視による異常試料の選定に加えて高質量域のピークのイオン強度の発散比を求め、高質量のイオンの発散量の多い地域を抽出して比較検討する。

ここでは高質量ガス発散比を次の様に定義する。

$$\text{高質量ガス発散比} = \frac{\sum M/Z \geq 120 \text{ のピークのイオン強度}}{\text{補正全イオン強度(率)}} \times 100$$

この定量比較によって断層、割れ目の地点の選定を客観的に補足すると共に異常試料の平面上での連続性を把握することが可能である。

(※ 補正全イオン強度については次の(2)参照)

(2) 発散量解析

質量スペクトルのイオン強度は、ガスコレクターによって集積されたガスの分子数に比例している。前述のようにこのイオン強度は単純に土壌ガスの絶対濃度を与えるものではない。しかしながら、すべての試料が同じ条件で採取、分析されているので、相対的な比較は可能である。

ここでは、質量スペクトルにあらわれた全イオン強度 (Total Ion Count) から大気成分の影響を差し引いたものを補正全イオン強度 (Total Modified Ion Count) としてあらわした。言いかえれば、この補正全イオン強度は、その地点において地下から地表に発散してくるガスの総量を相対的に示していると考えられる。

断層・割れ目が通路となって地下深部からガスを供給している場合には、ガスの絶対量も増大すると考えられるので、この補正全イオン強度の分布から断層・割れ目の傾向を推定する。

(3) 多変量統計による類似性解析

質量スペクトルの各ピークは、それぞれ特定のガス成分の濃度を反映している。

類似性解析とは、これらガス成分の存在比の類似性を解析する手法である。これはガス成分の濃度が種々のノイズの影響を受けるのに対して、ガス成分の存在比、つまりパターンは比較的安定しているという性質を応用したものである。地下にガスを発散するなんらかの源 (炭化水素、地熱流体等) があれば、それに起因する地表でのガス発散量は岩石の孔隙率、地下水等の影響により大きく変動したとしても、各種ガス成分の存在比は、それほど変わらないと考えられる。従って、ガス組成の類似性によって分類した試料の分布から地下の地熱系及び地熱系の広がり規制している断層・割れ目を推定することができる。

質量スペクトル (= ガス組成比) の類似性解析はコンピューターによる多変量統計手法により実施した。まず、質量スペクトルを多次元ベクトル (= パターン) に次のように変換する。

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$$

ここで X_i は i 番目の試料の質量スペクトルであり、 $X_{i1}, X_{i2}, \dots$ は、それぞれ M/Z (質量数/電荷) = 29, 30, ... のピークのイオン強度である。

次式により、各パターン間の Euclidean 距離を計算してこれを類似性の尺度とした、

$$D_{ij} = \left[\sum_{k=1}^f (X_{ki} - X_{kj})^2 \right]^{1/2}$$

ここで D_{ij} は X_i との距離を表す。

例として次表のように 3 成分からなる系を考える。

	成分 A	成分 B	成分 C
試料 No 1	30.0	60.0	10.0
試料 No 2	29.0	61.0	10.0
試料 No 3	14.0	50.0	36.0
試料 No 4	70.0	20.0	10.0

各試料の 3 次元ベクトルに変換した後、3 次元空間での位置をプロットして、試料間の相対距離を計算すると次のようになる（図-17）。

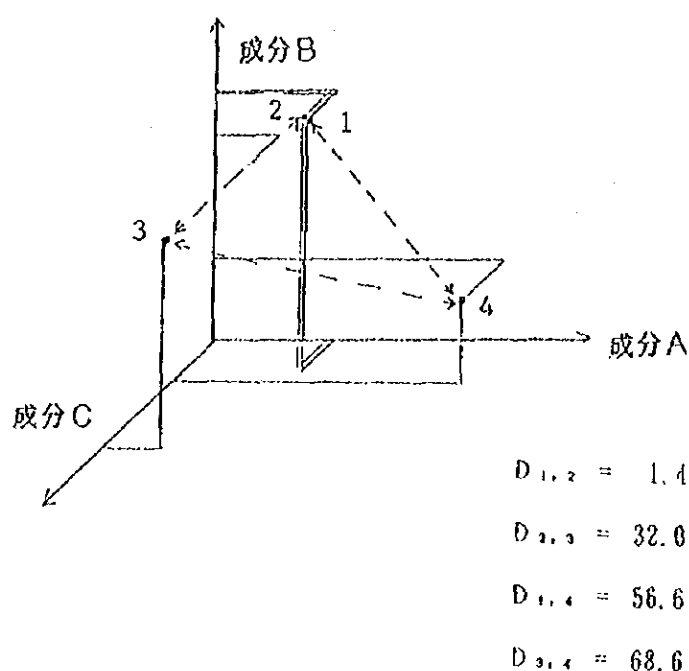


図-17 相対距離の算出

ここで、試料間の距離は小さいほど類似性が高いことを意味する。この場合、試料 No 1 と No 2 は類似性が高いが、No 3 と No 4 は互いに、また No 1 と No 2 もまた互いに、あまり類似性がないことを示している。

本調査においては、地熱、地熱微候地を代表すると推定される試料を選定し、これをモデルとして、モデルとの類似性を定量化した。また、適当なモデルが得られない場合には、バックグラウンドと推定される試料を選定し、これを反モデルとして類似性を定量化することにより、異常なガス組成比の地帯を抽出した。

2-3. 調査結果

1) 現地調査

現地調査では、試料採取に先立ち、採取点の位置を設定した。設定時にはポケットコンパスによる測量を行い、図-18に示す様に20m間隔のライン線及び100m間隔のグリッド点を組み合わせた359地点を設定した。ガスコレクターは設定した359地点のすべてに埋設したが紛失及び昆虫類による汚染が認められたガスコレクターは24個に達し、分析用に回収できた試料は335試料にとどまった。

2) 解析結果

(1) 断層・割れ目地点の解析

a. 異常ガス組成比の試料の選定

まず、分析結果である質量スペクトルのパターンを目視検討し、2-2, 3)で述べたように、断層・割れ目を指示していると考えられる試料を選定した。選定した試料は次の41試料である。

No	4.	8.	11.	13.	28.	36.	56.	59.
	68.	93.	96.	103.	125.	129.	134.	140.
	166.	186.	190.	211.	221.	228.	229.	245.
	248.	251.	254.	257.	263.	269.	302.	304.
	306.	307.	322.	324.	335.	347.	351.	354.
	358.							

上記41試料のうち、代表的なものの数例について以下にその質量スペクトルと周囲のバックグラウンドの試料の質量スペクトルの比較を示す(図-19)(1)、(2)、(3)。

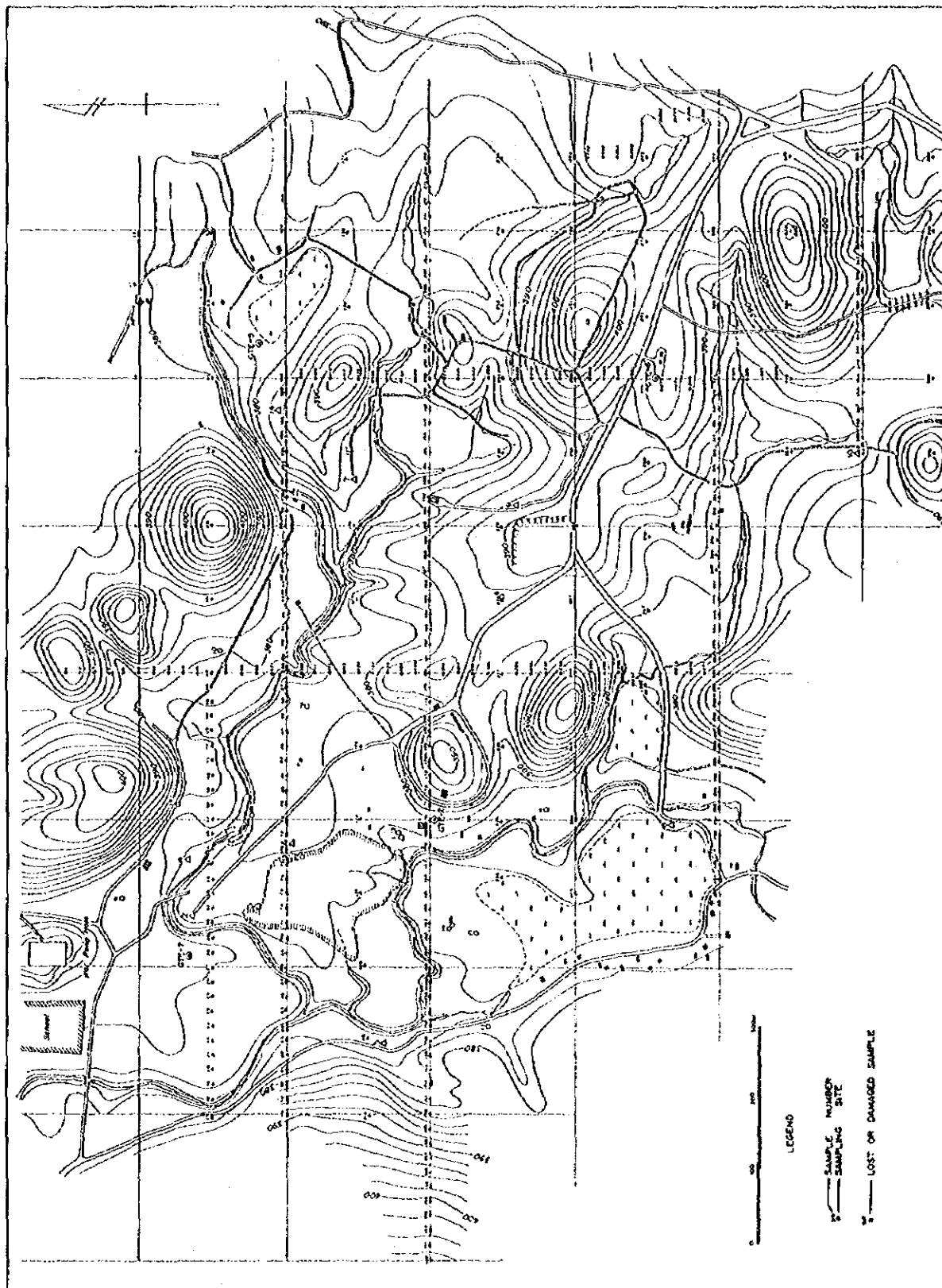
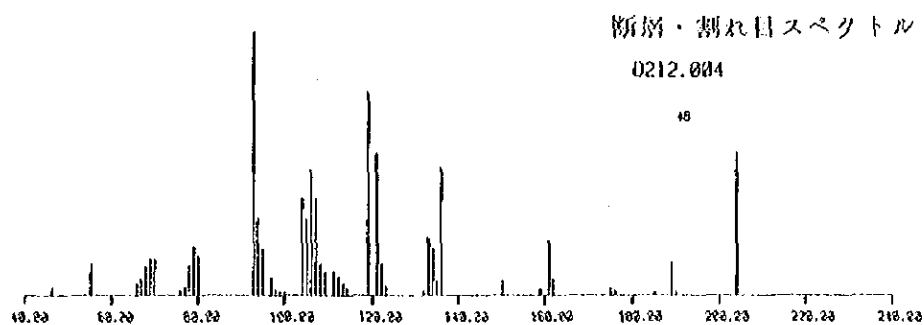
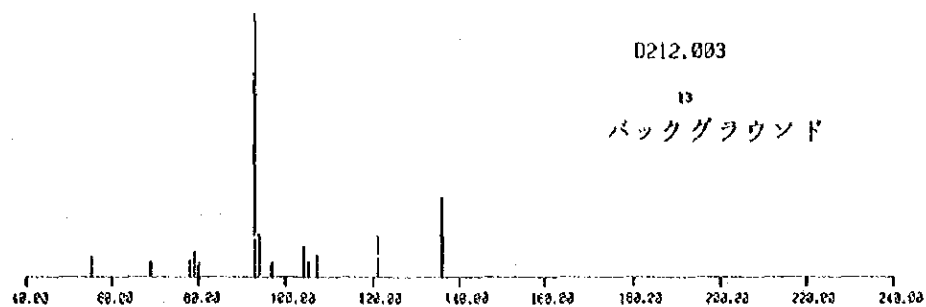


図-18 測線及び測点の配置図

(a)



(b)

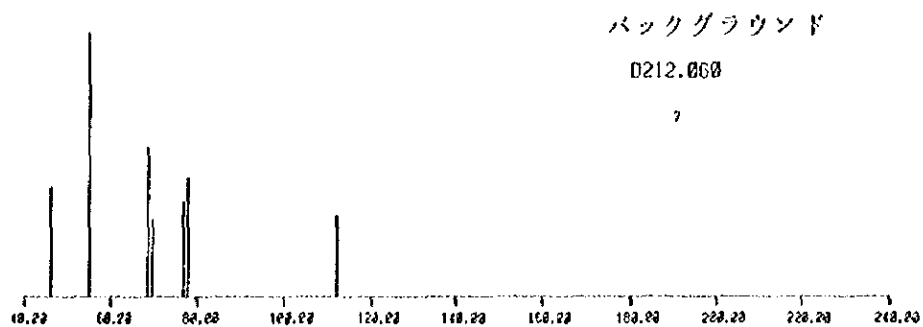
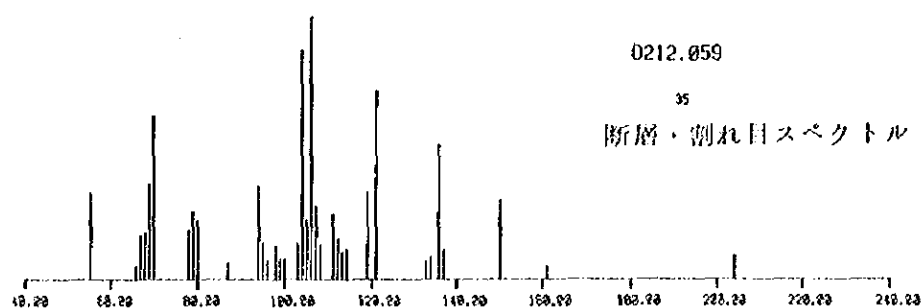
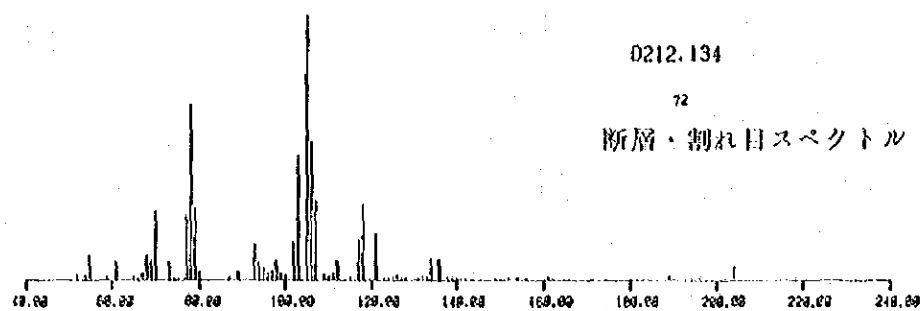


図-19(1) 調査地域における質量スペクトルの例

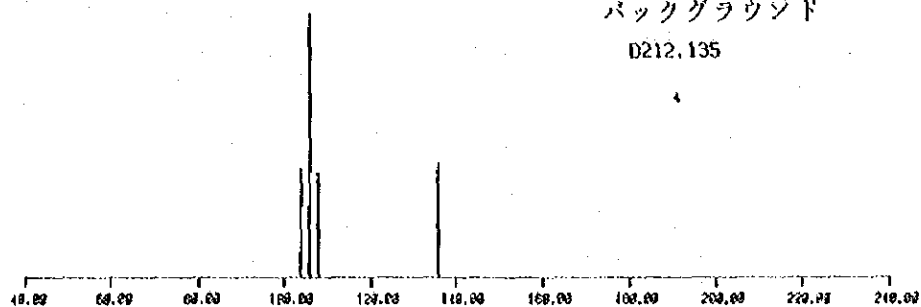
(c)



バックグラウンド

0212.135

4

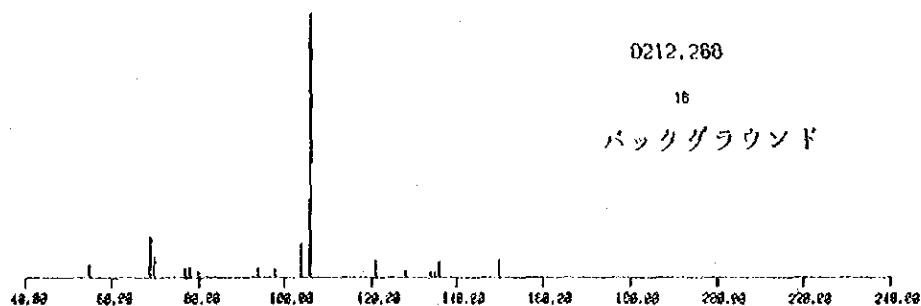


(d)

0212.260

16

バックグラウンド



断層・割れ目スペクトル

0212.269

30

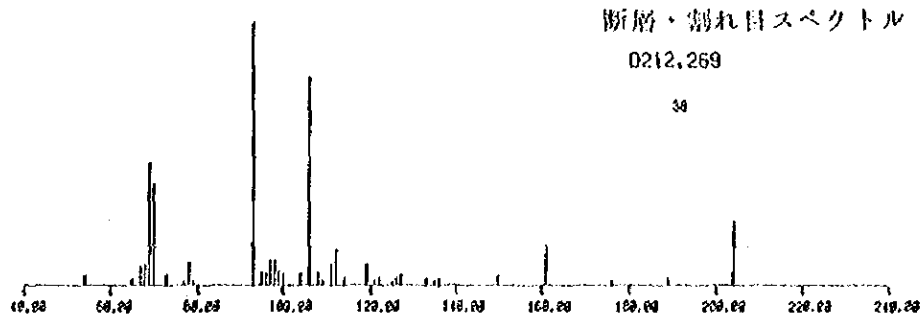
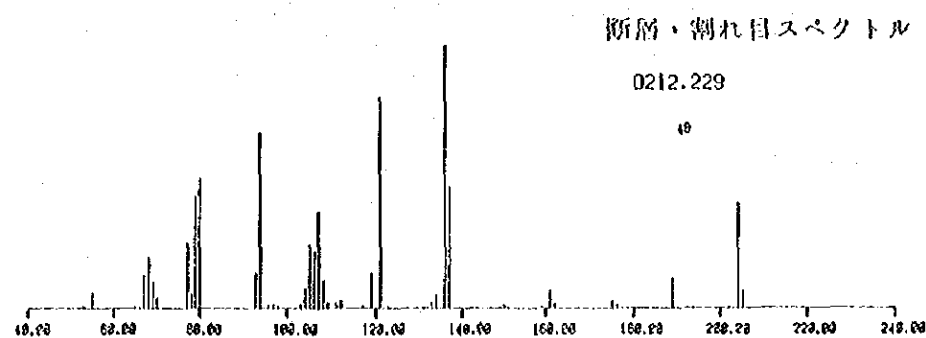
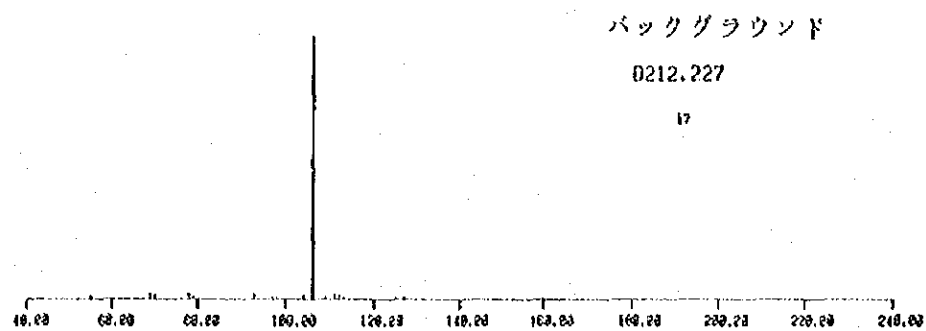
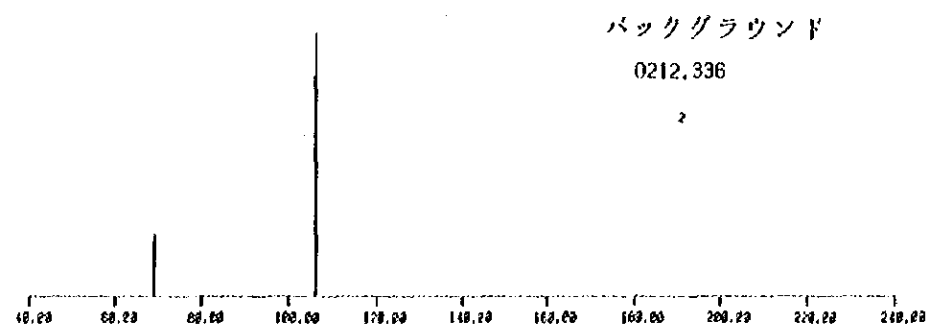
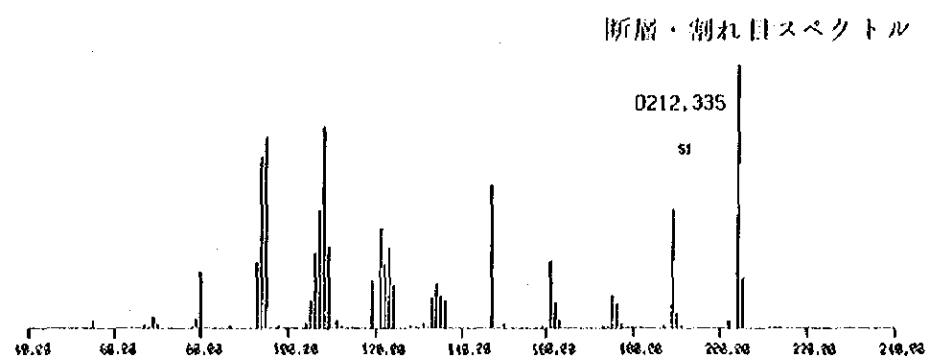


図-19(2) 調査地域における質量スペクトルの例

(e)



(f)



図一 1 9 (3) 調査地域における質量スペクトルの例

- ① バックグラウンドの003と比べると004はピーク数が4倍近くあり、また、高質量域に大きなピークがかなり認められる。
- ② 059はバックグラウンドと比べてピーク数が5倍あり、また、高質量域に小さいながらもいくつかピークが認められる。
- ③ 134は高質量域に極めて小さいながらも多数のピークが認められる。ピーク数も格段に多くなっている。
- ④ 269はバックグラウンドに比べてピーク数もやや多く高質量域にいくつかのピークが認められる。
- ⑤ 229は高質量域に大きなピークが多数認められる。
- ⑥ 335は高質量域に大きなピークが多数認められる。

以上41試料の分布を図-20に示す。

これらの試料の分布から、連続性、直線性及び地形との関係を基準にして、試料間を線で結ぶと次の線が断層・割れ目の可能性を持つものとして抽出された。

・ NW—SE系の断層・割れ目

No 166 — 245 — 257 — 306, 307 — 335

No 134 — 228 — 248 — 269 — 351

No 56 — 125 — 190

No 13 — 96 — 221 — 263

・ NE—SW系の断層・割れ目

No 4 — 28 — 59

No 4 — 36 — 68 — 140

No 11 — 103 — 125 — 134

・ N—S系の断層・割れ目

No 93 — 125 — 186 — 228

No 190 — 229 — 248

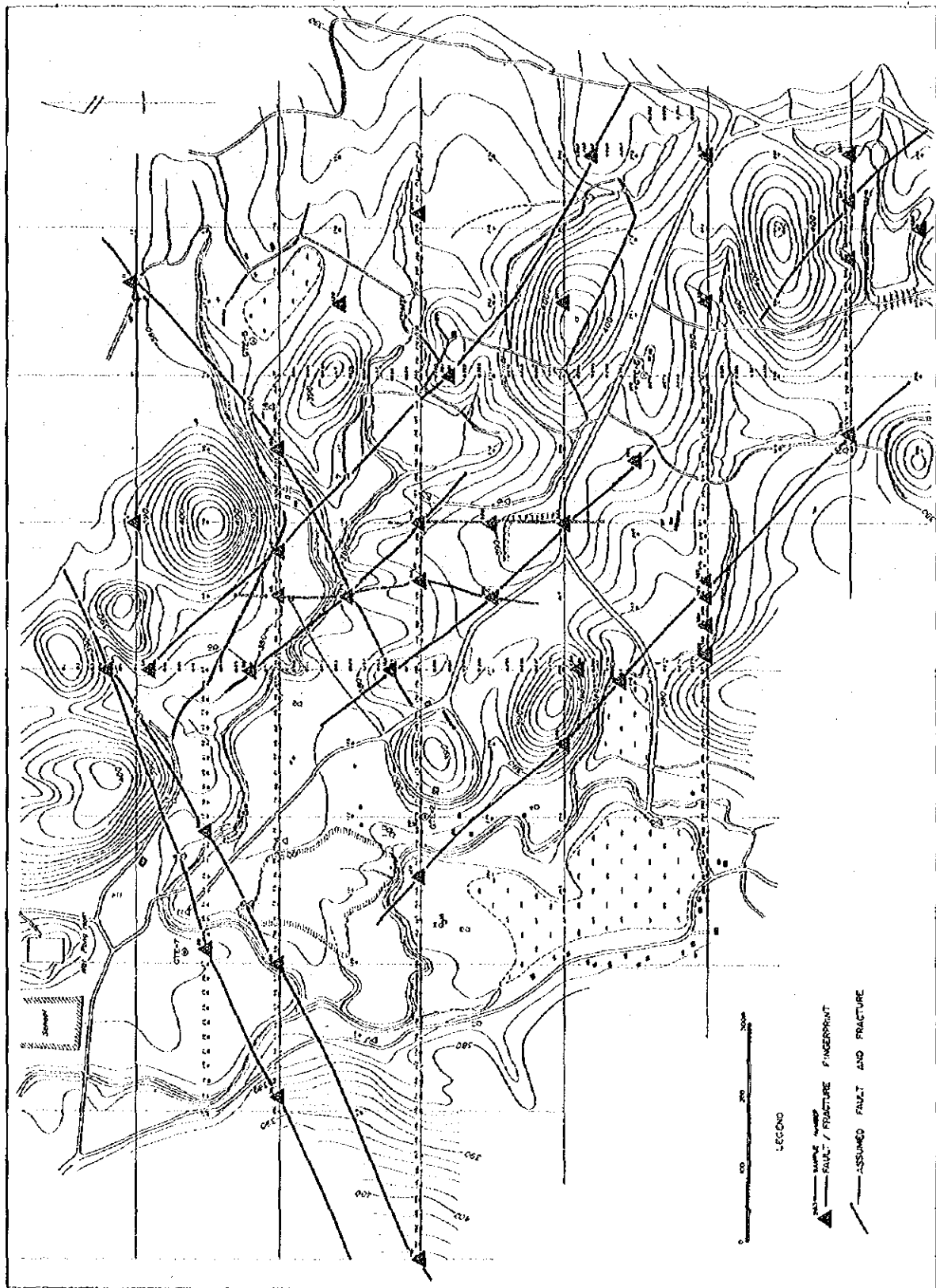
b. 高質量ガス発散比

$M/Z \geq 120$ の高質量ガス発散比のコンターを図-21に示す。本図には前記、a.で選定した異常試料の位置も併せて示す。

高質量ガス発散比は最低が0%最大が44%であるが、最低値0%の試料が半数近くあり、全体としてみると低い値の側に片寄った分布となっており、平均は2.3%である。本図では2.5%以上の地帯をアノーマリーとして示した。

本図では次の二つの傾向が認められる。

まず第1は調査地域の西側が東側に比べて相対的に発散比の値が低いことである。



図一20 断層割れ目を示すベクトル出現点の分布とそれにより
抽出された断層、割れ目のパターン

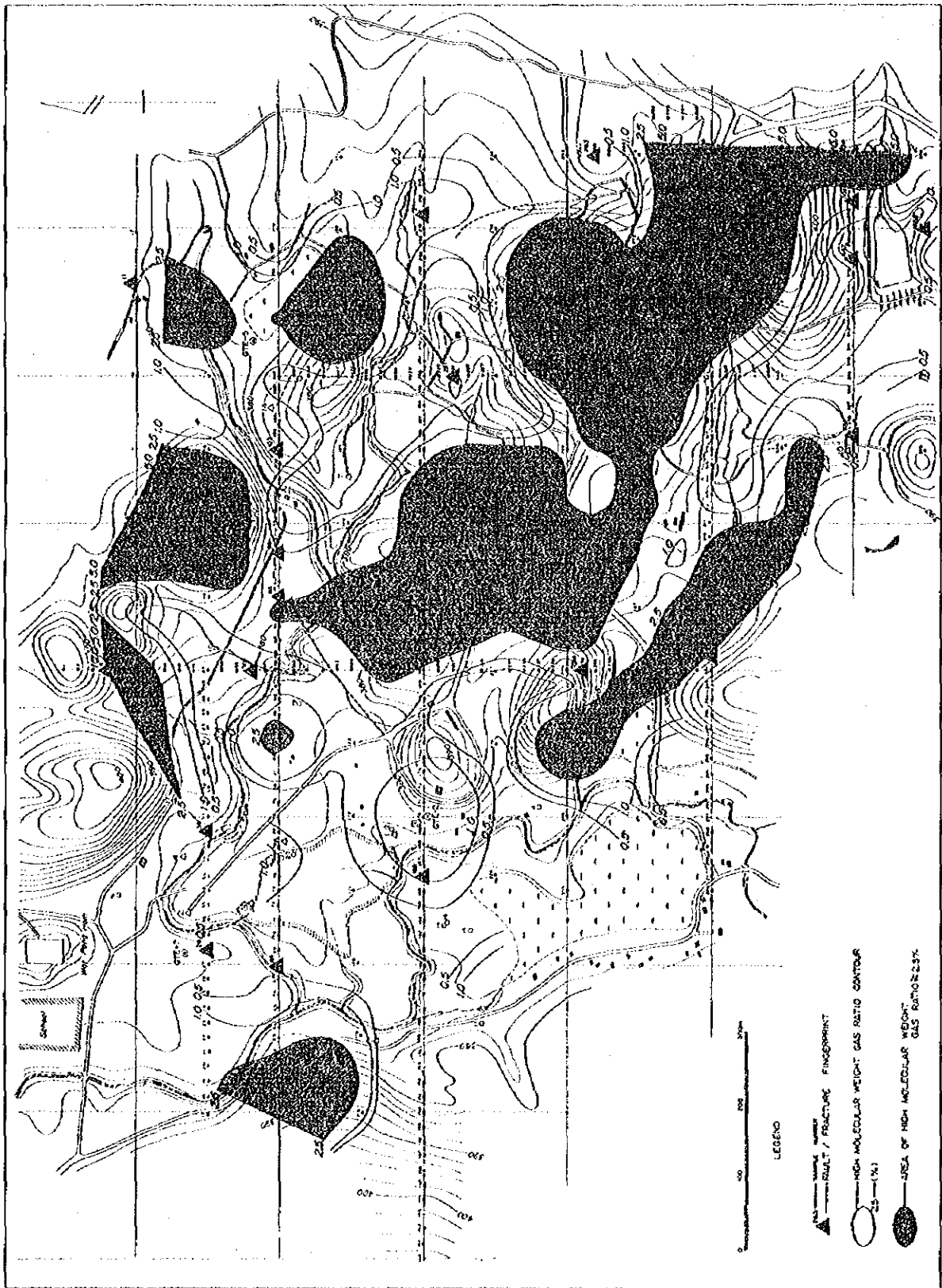


図-21 高重量ガス ($M/Z \geq 120$) 発散比コンターマップ

これは断層・割れ目の分布よりもむしろ地層の違いによるものと考えられる。第2の点は調査地域の南東側からNW-SEの方向性で発散比の高い2つのゾーンが平行して配列していることである。西側のやや幅の狭いゾーンは前述のNW-SE系の推定線166-245-257-306, 307-335と一致している。東側の幅の広いゾーンは前述のNW-SE系の推定線134-228-248-269-351にN-S系の推定線92-125-186-228と190-229-248が重なったゾーンを示している。

このゾーンの東には発散比の低いゾーンが平行に配列している。ここで興味深い点はこの発散比の高いゾーンと低いゾーンの境界と前述のNW-SE系の推定線13-96-221-263が一致することである、本図からはNE-SWの傾向は読みとれない。

c. 発散量解析

全ガス発散量は最低が4656最大が1083,756であり、その平均は81,259である。図-22に全ガス発散量のコンター図を示す。本図では100,000 Ion Count以上の地帯を高発散量の地帯としてあらわした。

本図で認められる点は次のようである。まず、高質量ガス発散比の分布と同じように地域の西側でガス発散量が低い傾向がみられる。これは前述したようにやはり地層の違いによるものと推定される。

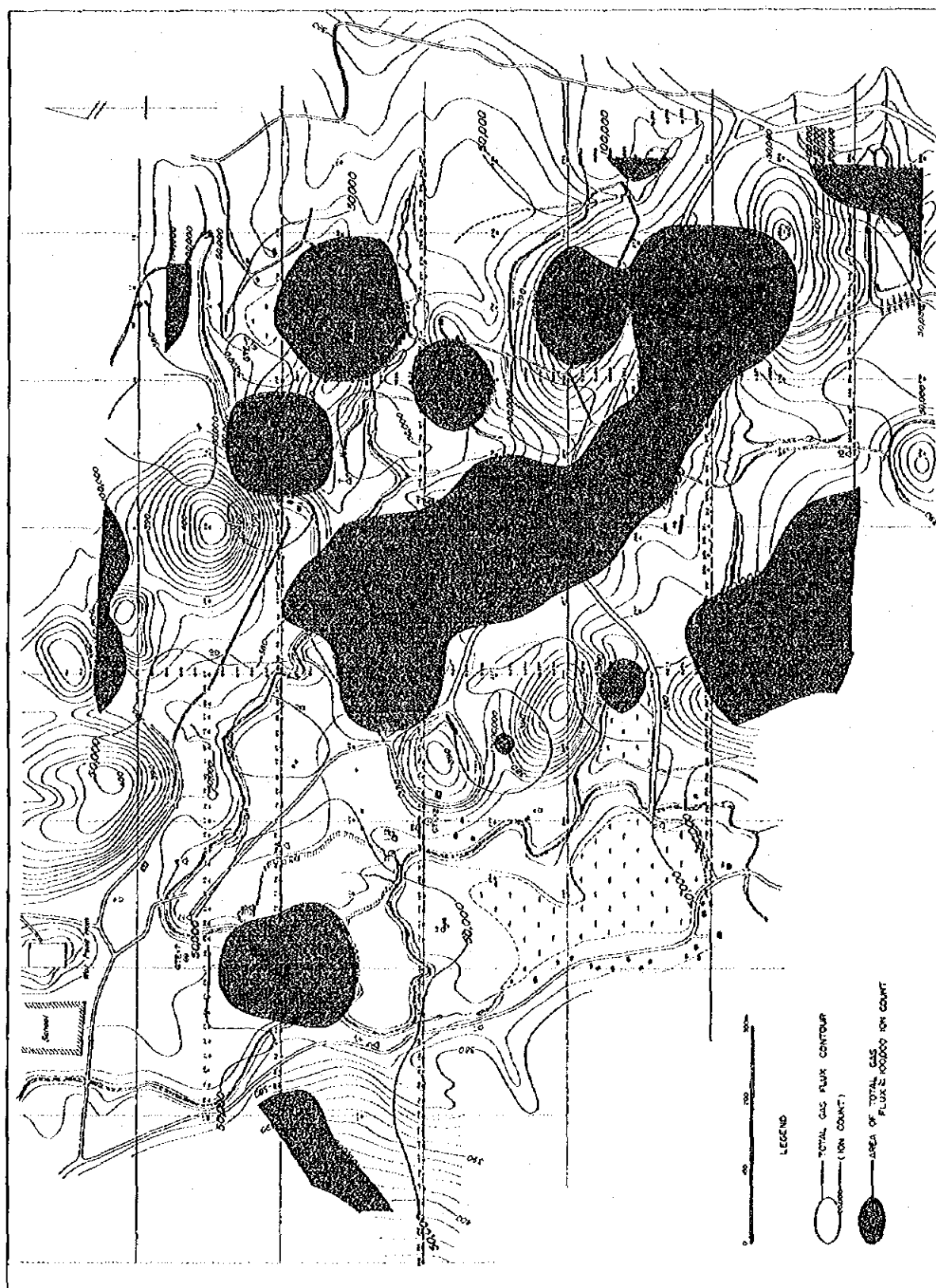
次に認められるのは、地域の南東端からNW-SEの方向性で伸びる発散量の高いゾーンの存在である。このゾーンは前節で述べた高質量ガス発散比のアンーマリーともほぼ一致しており、NW-SE系とN-S系の推定線が重なったゾーンである。従ってこのゾーンは一本の断層線を示すよりは、一つの破砕ゾーンをあらわしていると考えられる。

このゾーンの北東側にもいくつかの高発散の地帯が認められるが、やや点在しており連続した一つの傾向を示すには至っていない。

- ① 南側にはやはりNW-SEの傾向を示す高発散の地帯が認められる。これは前述したNW-SEの推定線166-245-257-306, 307-335よりやや南にずれている。
- ② 地域の北西側にも高発散の地帯が存在する。これは前述したNW-SE系の166-245-257-306, 307-335とNE-SW系の4-36-68-140の予想交差域にあり、また、さらにその西側にはNE-SWの傾向を示す高発散の地帯が認められる。これらの高発散の地帯は地域北西側でのNE-SW系断層の存在を示唆するものと考えられる。

d. 多変量統計による類似性解析

まず20m深70℃以上の地表微候地からモデル試料を選定し解析・計算を実施した。しかしながら計算の結果、モデル試料の間で互いに類似性の悪いことが判明した。これは本地域の地表微候地では、一定したガス組成比よりもむしろバラツキの大きいガ



図一 2 2 全ガス発散量コンターマップ

ス組成比の発散が特徴であることを示している。

そこで本地域での一般的なバックグラウンドのガス組成比をもつ試料を反モデル試料として異常なガス組成比を有する地帯を求めた。図-23に計算により得られた類似性距離のコンター図を示す。ここで距離は大きいほど反モデル試料と似ていない。すなわちガス組成比が異常であることを意味する。また、コンター図作製時には前記、a. で断層・割れ目指示として選定した異常試料を除外し、データ欠損として扱った。これはこれらの異常試料が格段に大きな距離を示すため全般的な地帯の傾向よりも異常点の分布のみがコンター図に反映されることを防ぐためである。

本図では距離5以上の地帯をアノーマリーとして取扱った。アノーマリーのうち、もっとも大きなものはOTB-2から北側の地表微候地を含み、地帯の南東方向に広がるものである。これは地表微候地にあらわれた異常なガス発散がその源を南東方向に発している可能性を示唆している。

また興味深い点は地表微候地にあらわれたアノーマリーが前記、a. で述べた推定線のうち、

NW-SE系の166 — 245 — 257 — 306, 307 — 335と

NB-SW系の4 — 36 — 68 — 140, 11 — 103 — 125 — 134

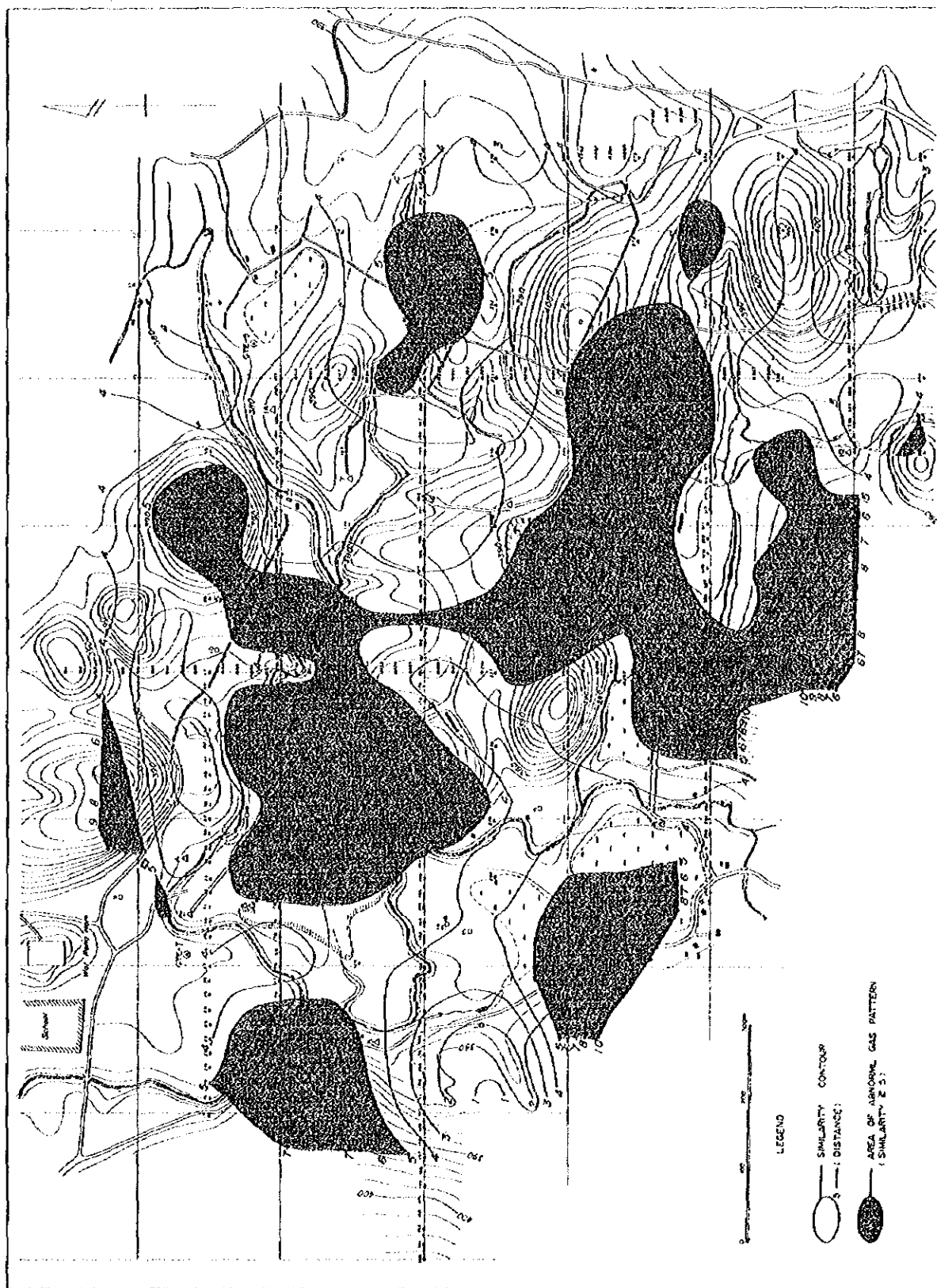
によって囲われた形で広がっていることである。これはこれらの推定線が地熱流体の広がりを規制する断層であることを示唆していると考えられる。このアノーマリーからの南東側への広がりはN-S系の93-125-186-228とNW-SE系の134-228-248-269-351の推定線に沿っているように認められる。これは、これらの推定線が、断層・割れ目として地熱流体の通路となっていることを示していると考えられる。

2-4. 考 察

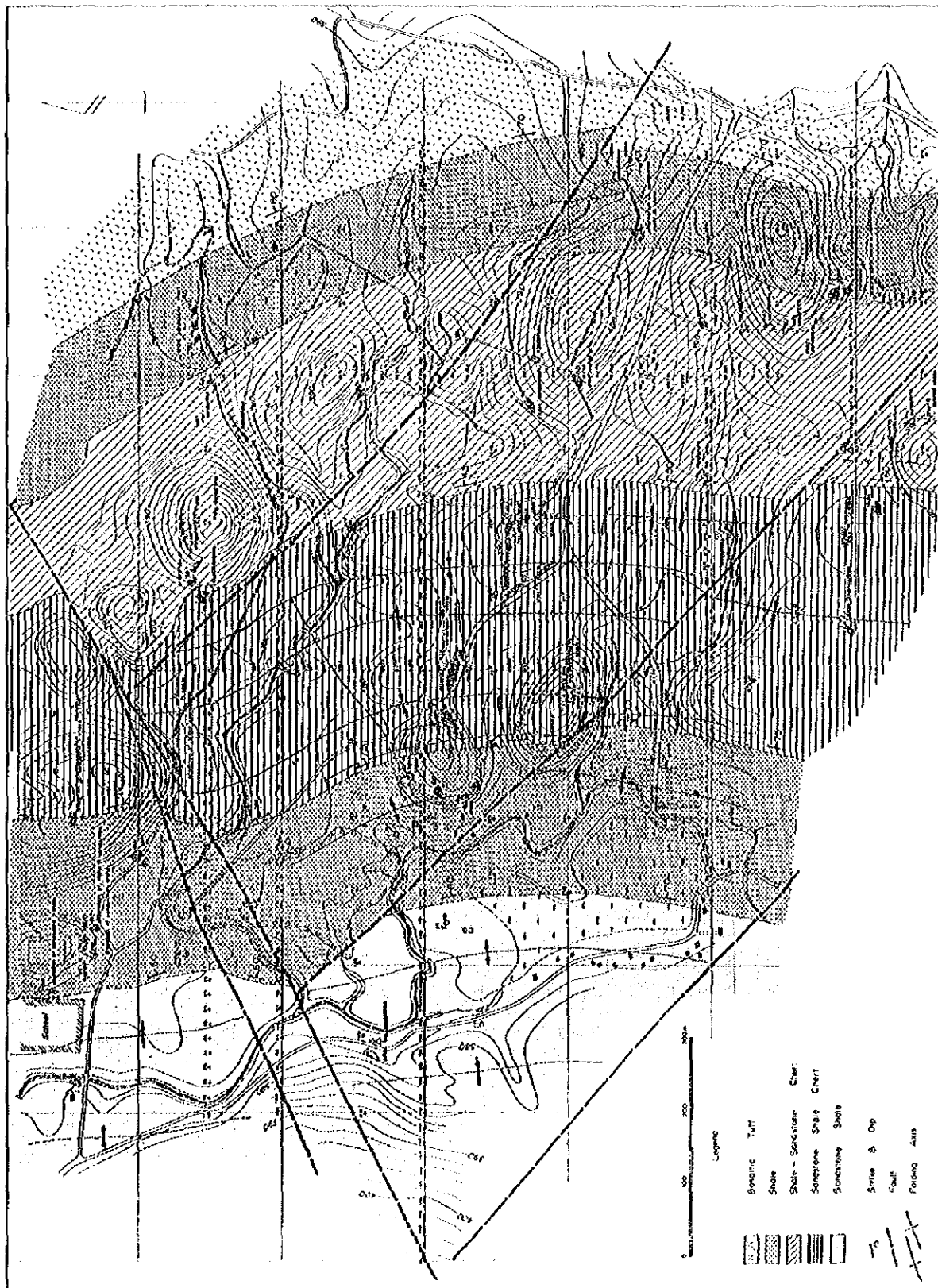
1) 調査地域の地質構造(図-24)

本地域は、主として二疊系の下部Kin Lom層から構成されている。本層は砂岩、頁岩、陸岩、石灰岩及び玄武岩質凝灰岩の互層からなるが、その構成岩石の違いによって下位から上位に向って砂岩層、石灰岩・頁岩互層、砂岩層、頁岩卓越層、砂岩卓越層、砂岩・頁岩互層、頁岩卓越層及び玄武岩質凝灰岩層に分帯される。これら各層間はいずれも整合的關係にある。

地層の走向は南北ないし北西-南東を示し、傾斜は一般に東方へ50°以上の急傾斜を示す。このため東部はど上位層が露出し、地質構造は全体として東側へ傾斜する単斜構



图—23 类似性异常图



圖一24 調查地域地質構造圖

造を示す。しかし、一部では西傾斜の所もあり南北方向の軸をもつ小規模な背斜・向斜構造が認められる。なお、本層の最下部層にあたる砂岩層と石灰岩・頁岩互層は地表では認められず、GTE-7、GTE-2などの深度200m以下で認められることから本地区の西縁には南北方向の軸をもつ大きな背斜構造の存在が予想される。

本地域の断層は露頭状況が悪く、地表で認められるものはないが、地層の分布その他からNW-SE系とNE-SW系の断層が推定される。NW-SE系としては本地域の中央北部から南東部にかけてGTE-5とGTE-6の間を通る断層と北西部からGTE-2西側を通して南東中央に達する断層が推定され、NE-SW系としては西縁中央からGTE-7とGTE-2の間を通して北縁中央に達する断層が推定された。

2) 調査結果と地質構造の関係

地質調査と現在までの各種試錐の結果から明らかになった地質構造の特徴は上記のように地層の単斜構造とNW-SE系、NE-SW系断層の存在である。今回の断層追跡結果とこれらの地質構造の関係は次のようにまとめられる。

(1) 断層割れ目を指示する地点の分布と地質構造

フィンガープリント法によって検出された断層・割れ目パターンを示す地点のうち、地質調査によって推定された断層直上に位置するものは、41地点のうち15地点に達し、極めて良好な整合性を有している。このことはこれらの推定断層の存在を裏付けると同時に比較的大きな断層を示すと考えられる。すなわち上記の3断層は本地域の重要な断層をなすものと推定される。さらに、その他の断層・割れ目パターンを示す地点のうち15地点はこれら3断層に囲まれる範囲に存在しており、小規模ながらNW-SE系、NE-SW系、NS系などの方向性が認められ、このブロックの中では小規模な割れ目が発達している可能性を示している。

(2) 発散量解析結果と地質構造

高質量ガス発散比、全ガス発散量ともほぼ同様な傾向を示している。すなわち、西側が東側に比べていずれも低い値を示すことである。このことはこの地域の地層の分布形態と関係がありそうである。

高質量ガス発散比の高い所は西側のNW-SE断層とほぼ一致する線上に分布するほか、前述の3断層で囲まれる範囲にいずれもNW-SE方向に延びる形で分布している。なお、後者の範囲には全ガス発散量の高い範囲が一致している。

また、全ガス発散量の高い範囲は、NE-SW系断層とNW-SE系断層の交会部とその西側でも認められる。

これらの事実は本地域に断層の存在、破砕帯の存在を暗示するものとして興味深い。とくに西側のNW-SE断層及びこれとNE-SW系断層の交会部、並びに3断層で囲

まれる範囲に集中して高いアノマリーが得られたことは、断層系が熱の上昇に深い関係があることを示すものと考えられる。

(3) 類似性解析結果と地質構造

類似性解析結果では、地熱微候地では一定したガス組成比を示さないことが判明した。このような地熱微候地と同じようなものは上述の3断層に囲まれた範囲に集中しており、南東側に大きく広がっている傾向を示した。このことは本地域の熱源が南東方下部に存在し、熱の上昇がこの3断層で囲まれた範囲に特に強く働いており、この地域が地表調査では不明であったが熱水の通過しやすい破碎化の進んだ地区であることを示している。

2-5. ま と め

断層・割れ目の位置、傾向を把握するためにフィンガープリント法による地化学調査を実施した。現地調査では359個のガスコレクターを埋設し、その内335個を回収・分析し、解析により次の事が明らかとなった。

① 上記回収個数のうち、41地点で断層・割れ目を指示するフィンガープリントが検出された。

② 上記41地点の分布から、直線性、連続性、地形を考慮して次の断層・割れ目が推定された。

NW	—	SE系	3本	(大・中規模)
NE	—	SW系	3本	(大・中規模)
N	—	S系	2本	(小規模)

特に、NW—SE系(Na13 → Na263)(Na166 → Na335)及びNE—SW系(Na4 → Na140)の3本は、極めて顕著な断層と考えられた。

③ 高質量ガス($M/Z \geq 120$)発散比コンター図からは上記2本のNW—SE系推定断層にはさまれた地域と後者の推定断層上に高異常が認められ、いずれもNW—SE方向に伸長している。

④ 全ガス発散量コンター図からは上記2本のNW—SE系推定断層にはさまれた地域に高発散地帯が認められ、NW—SE方向に伸長している。

⑤ 類似性解析による異常ガスパターン分布図からは、地表地熱微候地と類似するものが、この南東側(上記NW—SE2断層にはさまれる)に認められた。

上記のフィンガープリント法によって検出された断層パターンは、地質調査の結果から推定された断層と極めて良く一致するほか、地質調査では明らかにし得なかった中・小規模断層・割れ目等の存在を暗示している。

特に前述の二つのNW-SW系断層と北西部のNE-SW系断層に囲まれた内側では、SE方向へ伸長する各種の異常域が重複して検出されており、地表地熱微候地の南東域に有望な地熱資源の賦存している可能性が高いことを示している。

3. 地下温度調査

3-1. 温度調査孔の掘削

この調査はBGA Tの協力により実施されたものであって、フィンガープリント法による断層追跡調査と並行して100m深度における地下温度調査のため、昭和60年7月から10本の温度調査孔の掘削が開始された。

地下温度調査の目的は深度100mにおける地下温度分布図を作成し、温度分布と断層分布との関連を検討することにあるので、温度調査孔は断層追跡調査のため取り上げた調査範囲内に配置するようにした。温度調査孔の位置図を図-25に示す。掘削本数は10本であるが、このうち1本(Nr13)は図-25の南側(Nr10の南850m)に位置するため図-25には含まれていない。

温度調査孔の掘削の過程で、もし蒸気、熱水または温泉水が湧出する場合には、孔内温度は正常の地層温度ではなく、湧出する流体温度を示すことになるので、逸水箇所はすべてセメントで充填し、さらに孔底まで鉄管を挿入し孔内で温度の擾乱が生じないように配慮した。代表的な調査孔の仕上げの状態を図-26(1)~(2)に示す。

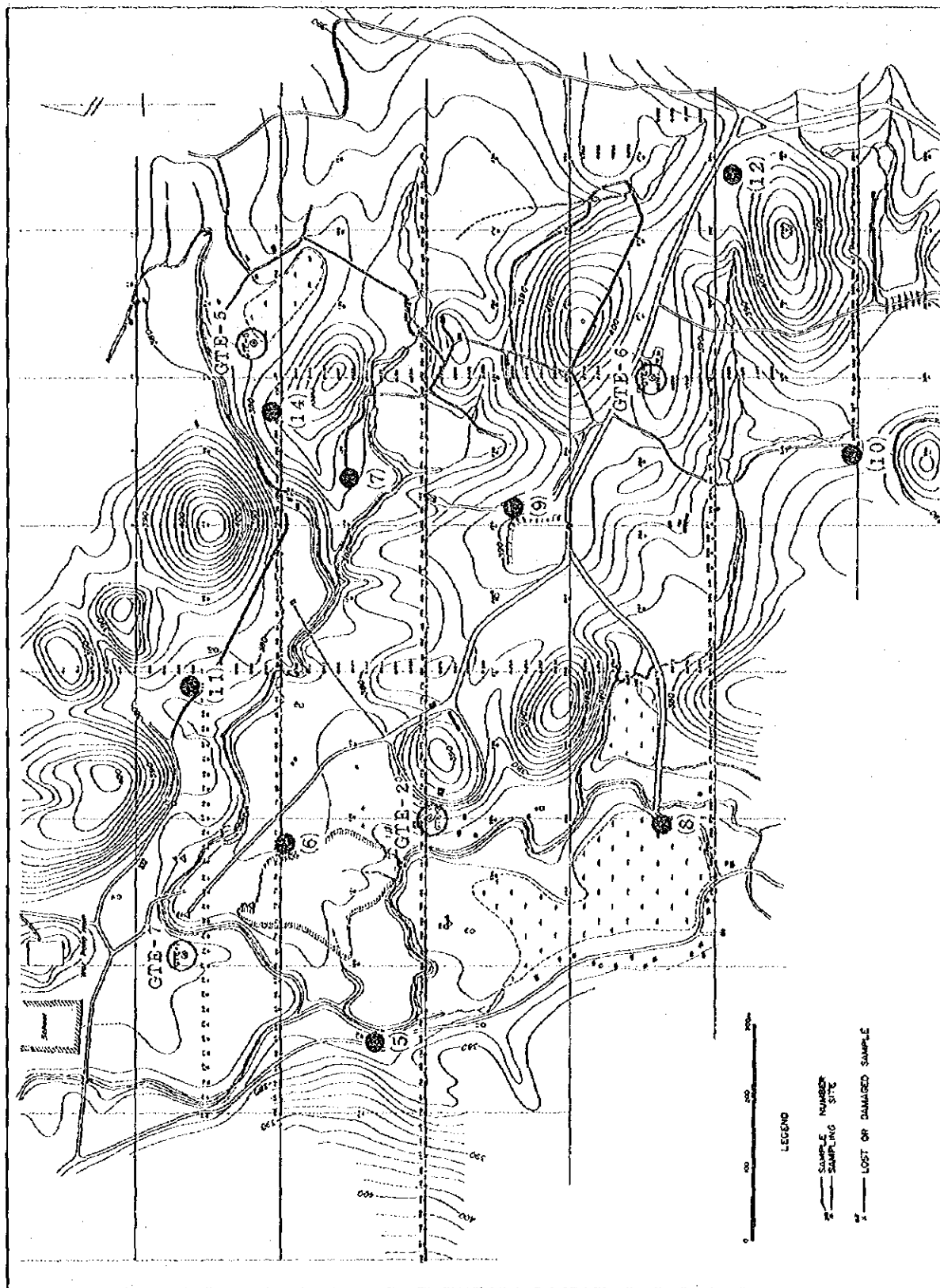
3-2. 孔内温度の測定

各調査孔の掘削終了後、数度にわたって孔内温度が測定されたが、各孔ともほぼ地層温度と平衡状態に達したと思われる時期に測定した結果に基づき作成した孔内温度の分布を図-27(1)~(3)に示す。

なお、表-1は、各調査孔の孔底温度を示したものである。以上の温度調査孔のほか調査地域には、GTB-2、GTB-5、GTB-6、GTB-7の調査井が掘削されている。このうち、GTB-2、GTB-5からは熱水が湧出するので、坑内温度は地層温度と一致しないが、他の調査井坑内の流体は静止状態にあり、かつ長時間放置されているため、坑内の温度分布は地層温度に合致しているものとみなされる。表-1には、静止状態にある調査井の深度100mにおける坑内温度も付記したが、100m深度の等温線を描く場合、調査井坑内の温度も参考値として用いた。

3-3. 深度100mにおける地下温度の分布と断層分布との関係

表-1に示した測定値を基にして、深度100mにおける等温線を描いたのが図-28である。この深度100mにおける地下温度の分布とフィンガープリント法により知られた断層分布を重ね合わせたのが図-29であるが、両者の関係から知られた事柄は次のとおりである。



图一 2 5 温度调查孔掘削地点位置图

EGAT-6

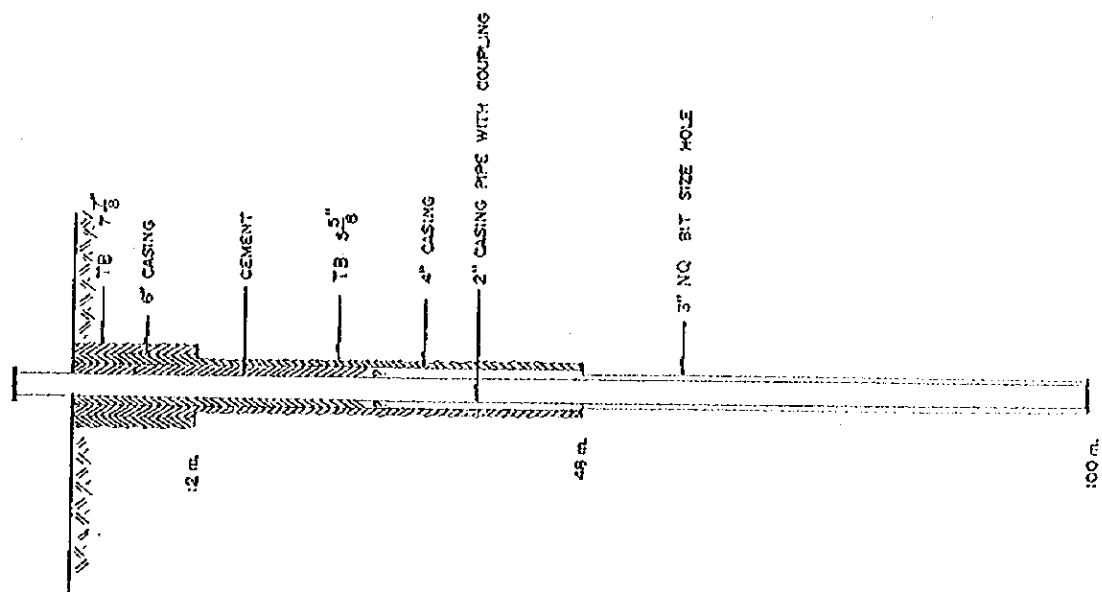


図-26(1) 温度調査孔の仕上げの例(No.6)

EGAT-7

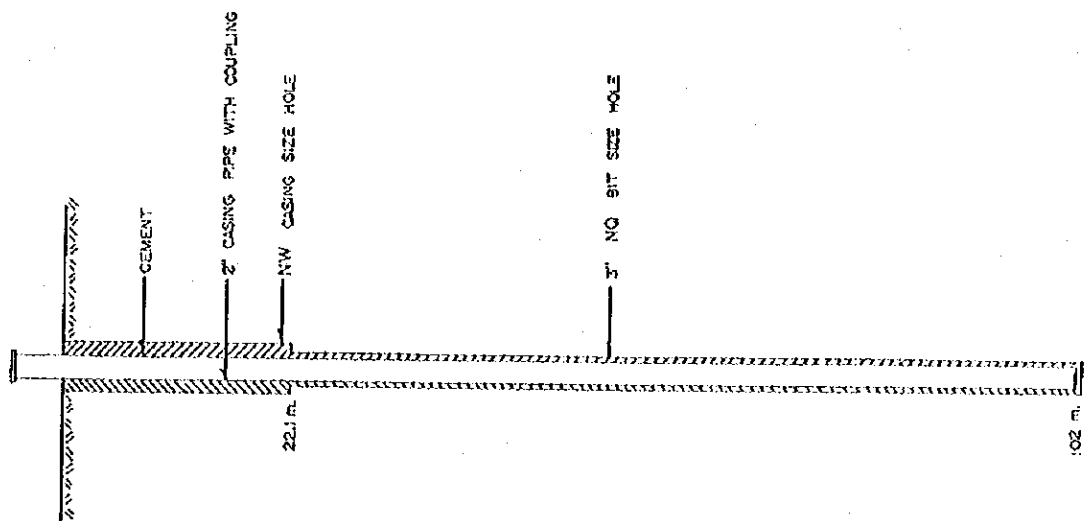
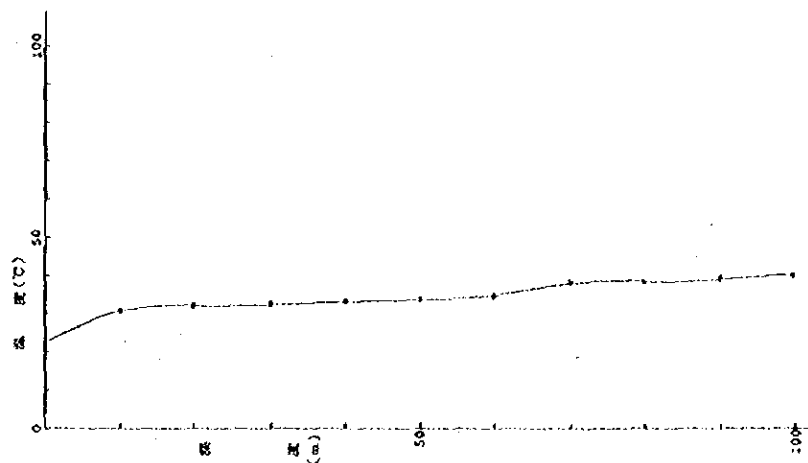
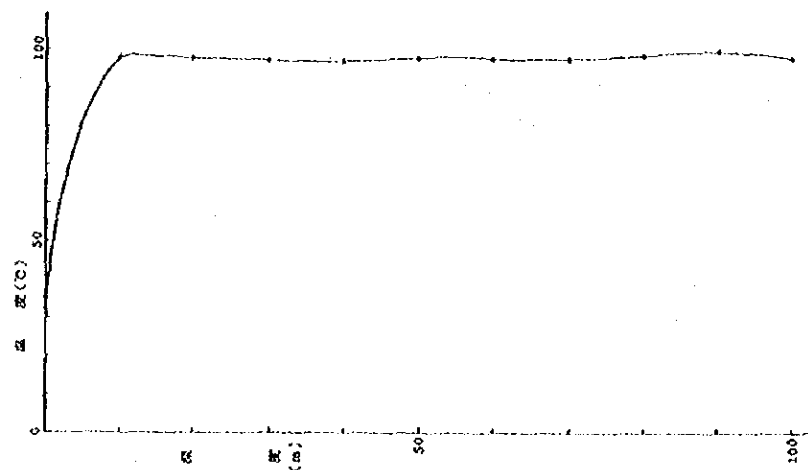


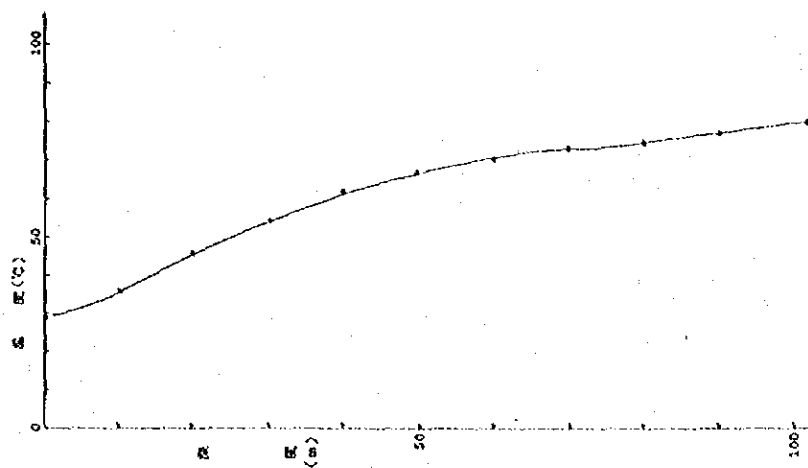
図-26(2) 温度調査孔の仕上げの例(No.7)



No.5 Heat Hole.

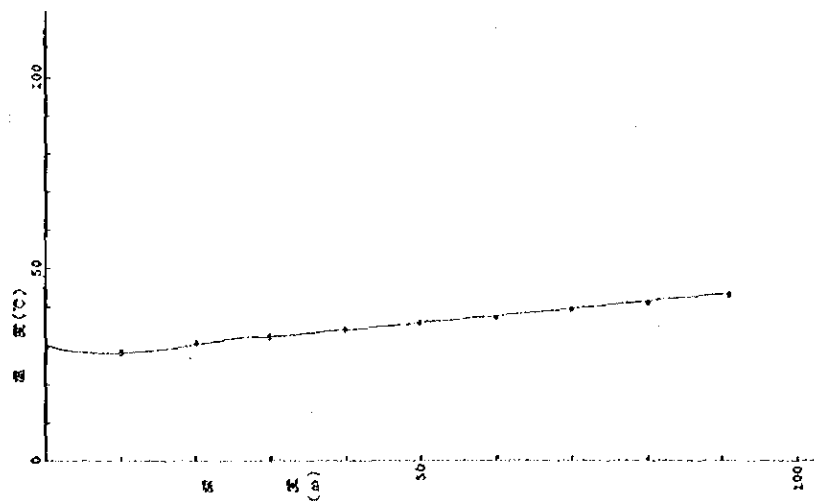


No.6 Heat Hole.

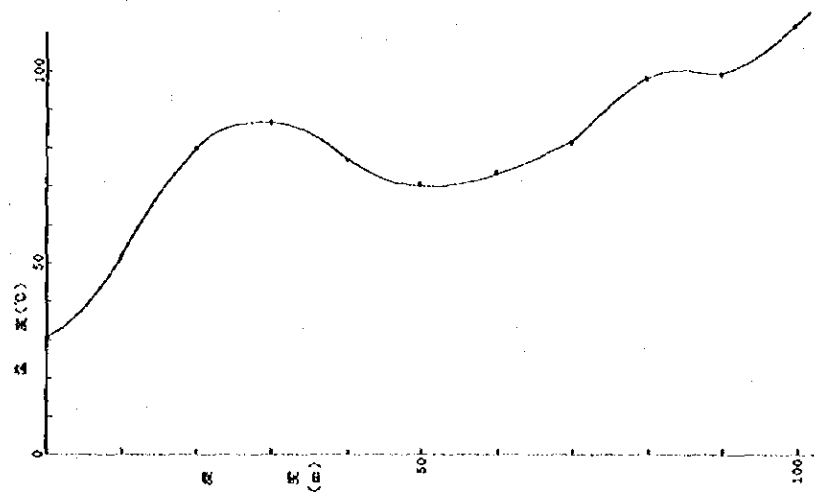


No.7 Heat Hole.

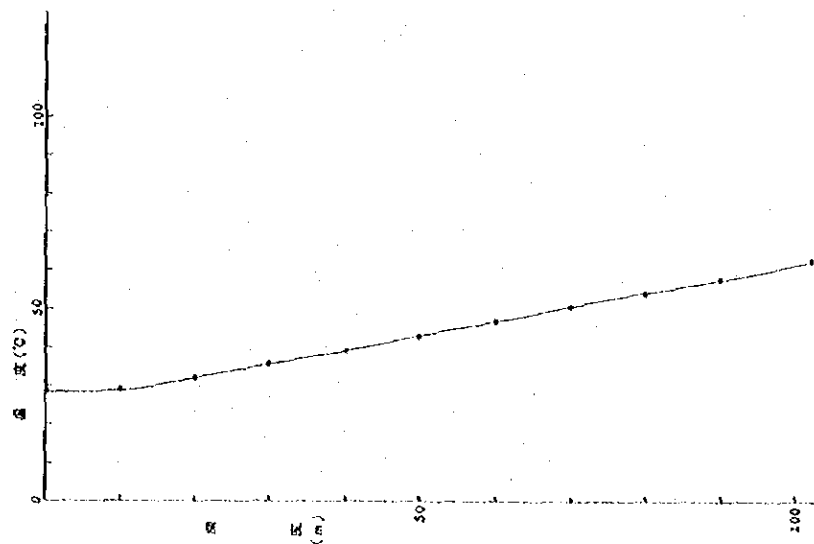
图一27(1) 孔内温度



No. 8 Heat Hole.

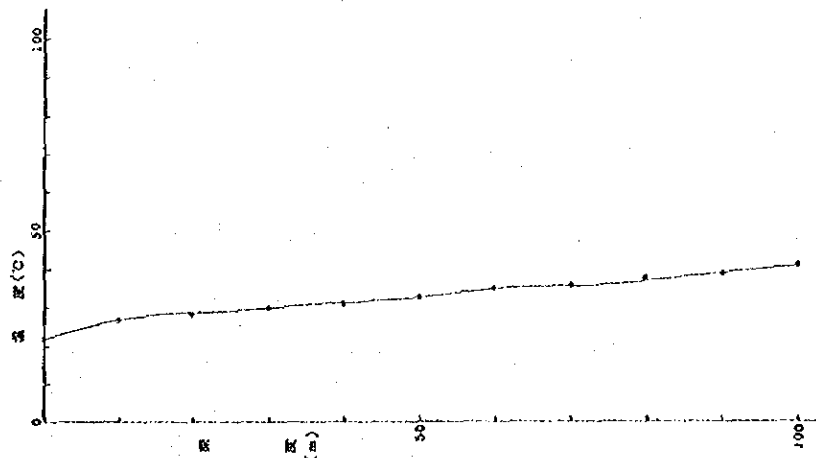


No. 9 Heat Hole.

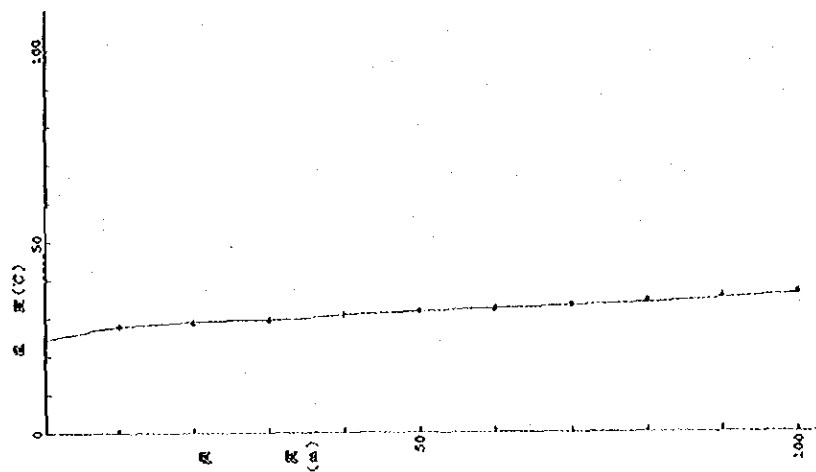


No. 10 Heat Hole.

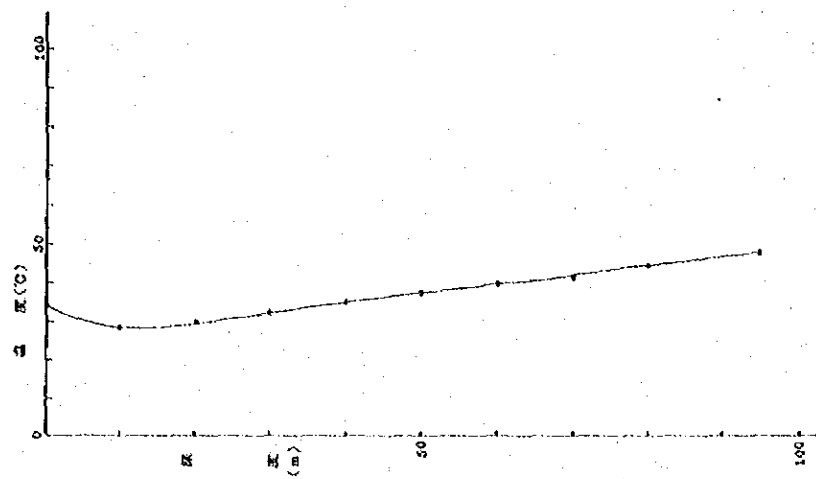
图一 27 (2) 孔内温度



No. 12 Heat Hole.



No. 13 Heat Hole.



No. 14 Heat Hole.

圖一 27 (3) 孔內溫度

表 - 1 温度調査孔孔底温度

番 号	孔 底 温 度 (深 度)
No 5	4 0. 3 ℃ (1 0 0 m)
6	9 8. 2 ℃ (1 0 0 m)
7	7 9. 6 ℃ (1 0 2 m)
8	4 3. 6 ℃ (9 2 m)
9	1 1 2. 3 ℃ (9 9. 5 m)
1 0	6 2. 2 ℃ (1 0 2 m)
1 1	7 8. 0 ℃ (9 2 m)
1 2	4 0. 7 ℃ (1 0 0 m)
1 3	3 7. 0 ℃ (1 0 0 m)
1 4	4 8. 1 ℃ (9 4. 5 m)

調査井番号	坑内温度 (深度 1 0 0 m)
QTE-2	—
QTE-5	4 4. 2 ℃
QTE-6	—
QTE-7	6 0. 0 ℃

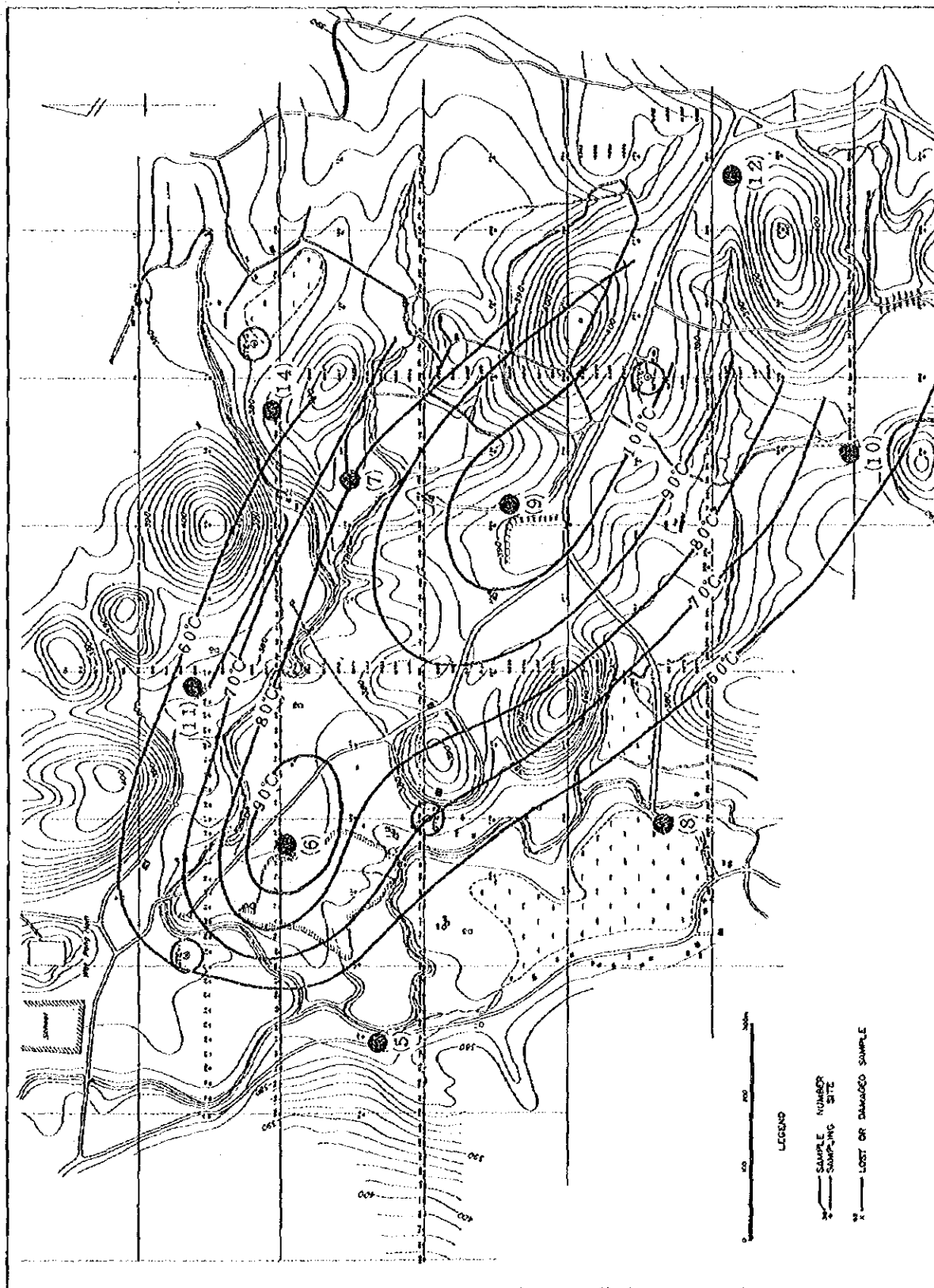
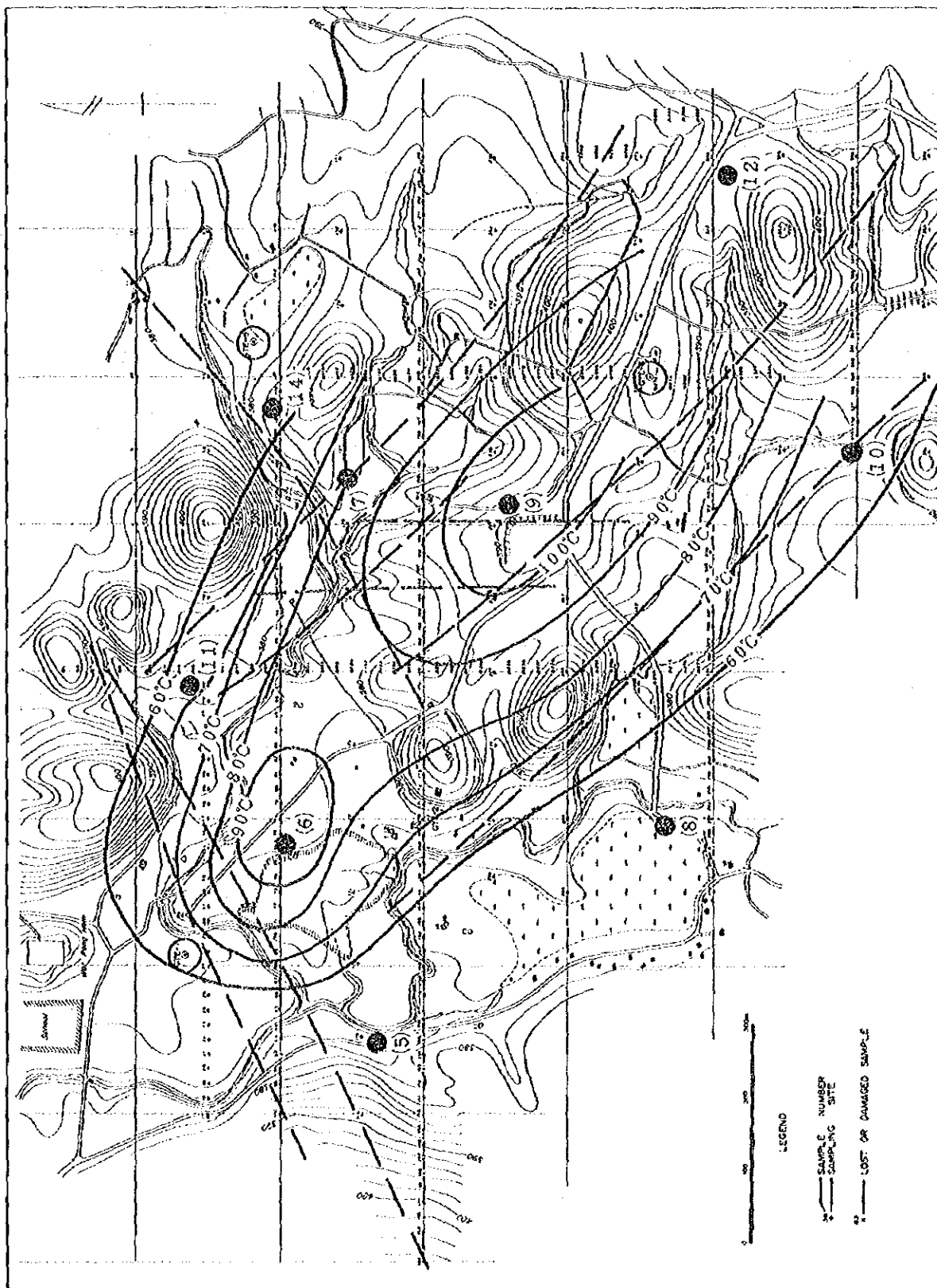


図-28 深度100mにおける温度分布図



図一 29 断層帯の分布と地熱分布

- ① 70℃以上の高温帯は前述のようにNW-SW系の2本の断層にはさまれた地域内にあり、その延びは断層の延びの方向と極めて調和的である。
- ② 高温帯の北側への延びはNE-SW系の断層によって遮断されており、このことからこの断層が高温域（熱水湧出地域または存在地域）と低温域（水の浸透地域）との境界に当たるとみなされる。すなわち、QTB-7の掘削結果から推定した事柄の裏づけが得られたといつてよい。
- ③ 高温帯の中でも特に90℃以上の目玉は地熱微候地とその南東部の2個所にみられる。このこともフィンガープリント法の解析結果と一致する。特にNo.9の孔底温度が112℃という最高温度を示すことから、高温熱水は上記断層にはさまれた約500mの幅をもち1km以上の延びを有する地域内に貯留されているとみなされる。
- ④ 以上の結果を総合すると、断層調査及び地下温度調査によって、サソカンベン地域の地熱貯留層の存在範囲すなわち貯留層の幅、延びの長さ、方向等について具体的な手掛りが得られたといふことができる。

4. 調査結果から得られた地熱貯留層の概念

サンカンベン地域のように硬い岩石、地層で構成されている地域では、地熱流体の流動は硬い岩石、地層中に発達する割れ目を通じて行われる。いいかえると、実際の地熱開発地域の対象となる範囲は割れ目の卓越する範囲に限られるということである。

フィンガープリント法を含む各種の地化学探査は、土壌におおわれた硬い岩盤中の割れ目の存在その方向を探知しようとする方法である。すなわち、高温熱水の存在の有無に関係なく、断層・割れ目の存在を探知しようとするものである。従って、この断層、割れ目の中に地熱流体が貯留される部分は、高い地下温度を示す温度の異常地域でもある。

今回実施した断層追跡調査によって、まず断層の分布が明らかにされ、次いで行われた地下温度調査により、100m深度における地下温度の分布も明らかとなった。

この両者の重ね合わせにより、断層、割れ目の方向と、70℃以上の高温帯の伸びの方向と一致することは、地熱流体が断層・割れ目に貯留されていることを意味する。すなわち、ここに地熱貯留層の存在地域と伸びの方向が明らかになったということである。

勿論今回実施した調査は、地下温度調査に関する限り深度100m程度までの深さであるから、より深いところでは、地熱流体の存在範囲がさらに広い範囲を占めるであろうことは十分に期待される。一応100m深度で70℃以上の範囲を地熱貯留層の範囲とみなすと、その規模は幅500m、伸びの長さは1,000m以上となる。

上で述べた地熱貯留層の中に貯留される地熱流体の温度が少なくとも深度1,000m付近でどの程度の値を示すかがサンカンベン地域の地熱開発の問題に関して大きな分岐点となる。仮に、180℃以上の温度を有するとなれば、蒸気利用の地熱発電は可能であろう。しかし、180℃以下160℃程度であれば、蒸気発電は無理であるにしてもバイナリーサイクルシステムによる地熱発電の可能性は残される。

このいずれであるかは、結局、調査井を掘削し、実際に流体温度を測定する以外に方法はないが、化学温度計により推定した地熱流体の温度が160℃～200℃を示すこと、さらに、地熱微候地では深度20mで120℃、今回の地下温度調査の結果では地熱微候地の東南側で最高112℃の温度が記録されたことなどから、サンカンベン地域の地熱貯留層の評価のため、今後、さらに調査井を掘削し、地熱流体の温度、割れ目の透水(量)係数等を測定する必要があるものと評価される。

5. GTE -- 8 掘削地点の選定

今回の調査により、さらに調査井を掘る価値があると評価された。このためBQATにより計画されているGTE--8の掘削の場合の参考として、掘削地点についての意見を述べると次のとおりである。

掘削候補地点としては、地熱微候地の周辺及びその東南側の高温部(温度調査孔No.9)周辺の2箇所が挙げられるが、フィンガープリント法の解析結果によれば、No.9周辺に断層、割れ目が発達する傾向がみられるので、No.9周辺に掘削地点を求めることが望ましいと考えられる。立地条件等を勘案すると、碎石場跡が適当であろうと結論される。

6. 総 括

- (1) QTB-7の坑内検層、特に温度検層記録の解析結果から、QTB-7掘削地点は温水の浸透地域に位置すると判断された。
- (2) このため、高温域（地熱微候地を含む熱水湧出または存在地域）と低温域（水の浸透地域）を画する断層がQTB-7と地熱微候地の間に存在すると想定された。
- (3) QTB-7の掘削結果からサンカンベン地域の地熱貯留層を評価する資料が得られなかったため、昭和60年に地熱微候地周辺において断層追跡調査、地下温度調査を実施し、サンカンベン地域の地熱貯留層の実態を把握することになった。
- (4) 断層追跡調査はフィンガープリント法と呼ばれる地化学探査により行われたが、その結果から地熱微候地をはさむ両側にNW-SB系の断層の存在が知られた。一方、地熱微候地の北側にNE-SW系の断層の存在が検知された。
- (5) BQATの協力により実施された深度100mの温度調査孔10本の掘削及び孔内の温度測定の結果に基づき孔底における地下温度の分布図が作成された。
- (6) この結果は断層分布と極めて調和的であり、上記の2本のNW-SB方向の断層にはさまれた地域に沿って70℃以上の高温帯が分布することが知られた。以上の断層分布と地下温度の分布から想定される貯留層の広がり幅は500m以上、延びは1,000m以上と想定された。
- (7) サンカンベン地域の地熱貯留層が蒸気発電、バイナリーサイクル発電の対象になり得るかどうかは、調査井を掘削し、流体温度、透水性等の測定を行い、その結果で判断する以外に方法はないと考えられる。
- (8) 化学温度計の結果から流体温度が160～200℃と推定されること、さらに地熱微候地、その南東部で各々100℃以上の地下温度が記録されていることなどから判断して、調査井の掘削は十分価値あるものと評価される。
- (9) BQATが計画しているQTB-8の掘削候補地点としてはフィンガープリント法による調査結果等を勘案し、温度調査孔No.9地点周辺の砕石場跡が望ましいと結論される。

