

## 第Ⅲ章 地熱貯留層評価のための総合解析



## 第1節 地熱貯留層構造

### 1.1 総合柱状図と断面図作成

第一次調査、第二次調査の結果に加え、C E Fが掘削した坑井の掘削資料や探査資料を総括し、第一次調査で作成した地熱貯留層構造の精度を上げようと試みた。ただし、J I C Aチームが独自に調査した資料以外の資料については入手できたものに限られるため、本地熱地域のすべての調査を総括したものではないことを付記しておく。

地熱貯留層構造を知るに当り、まず実施した事は各坑井の総合柱状図を作成することから始まった。総合柱状図には各坑井の性能を知るのに重要な、地質層序、逸泥、カッティングスの各種解析および温度測定値等が記載されている。PR-12とPR-13以外の総合柱状図をFigs. III.1-1~7に示す。

次に、これらの総合柱状図を基に、本地熱徴候地域をNW-S Eに切る地下断面(Fig. III.1-8)およびNE-SWに切る地下断面(Fig. III.1-9)を描いた。

以上の総合柱状図および地下断面図を基礎として、以下に述べるような、地下断裂系および地下温度構造についての考察を試みた。また坑井からの流体化学性状による流動様相についても言及した。

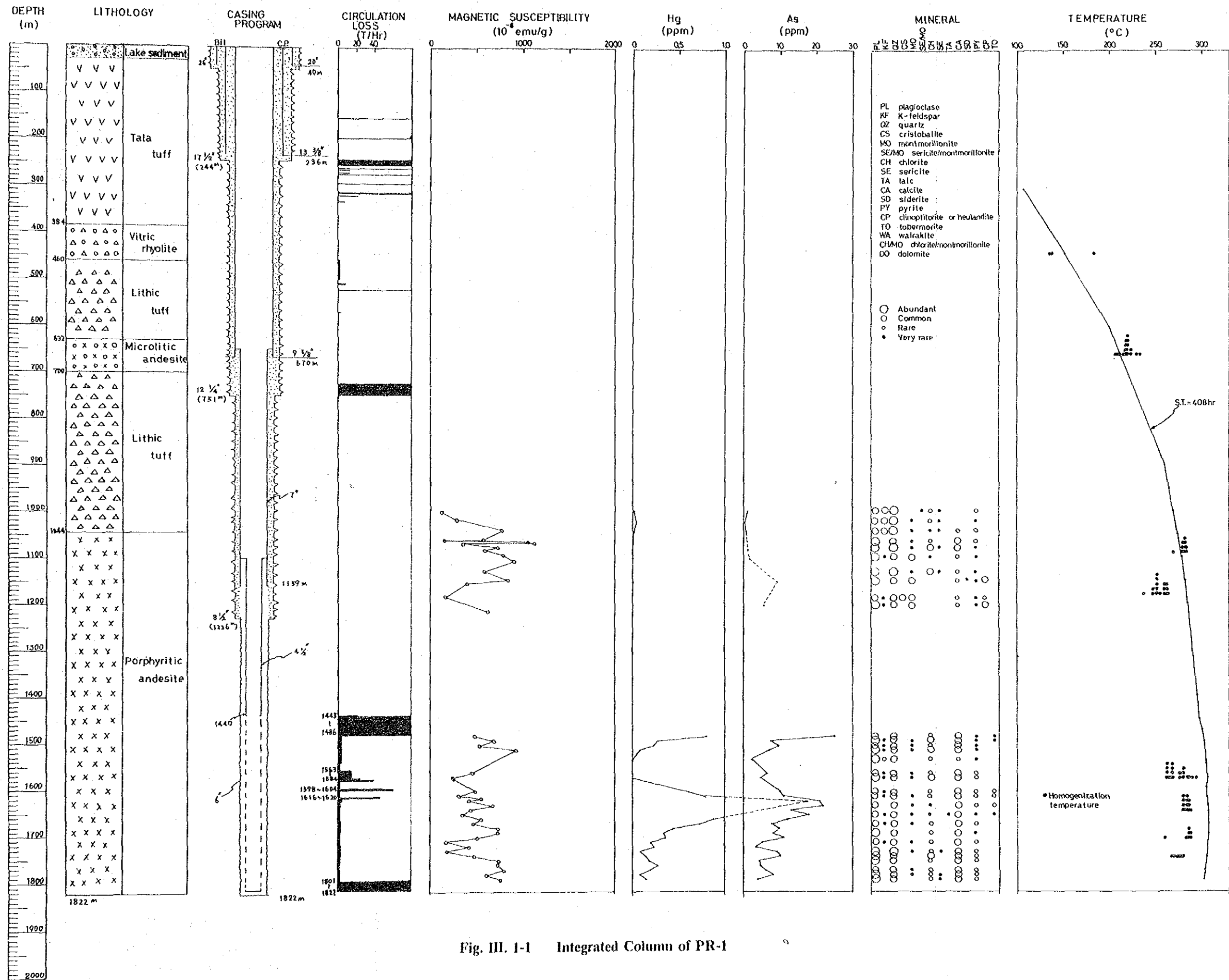


Fig. III. 1-1 Integrated Column of PR-1

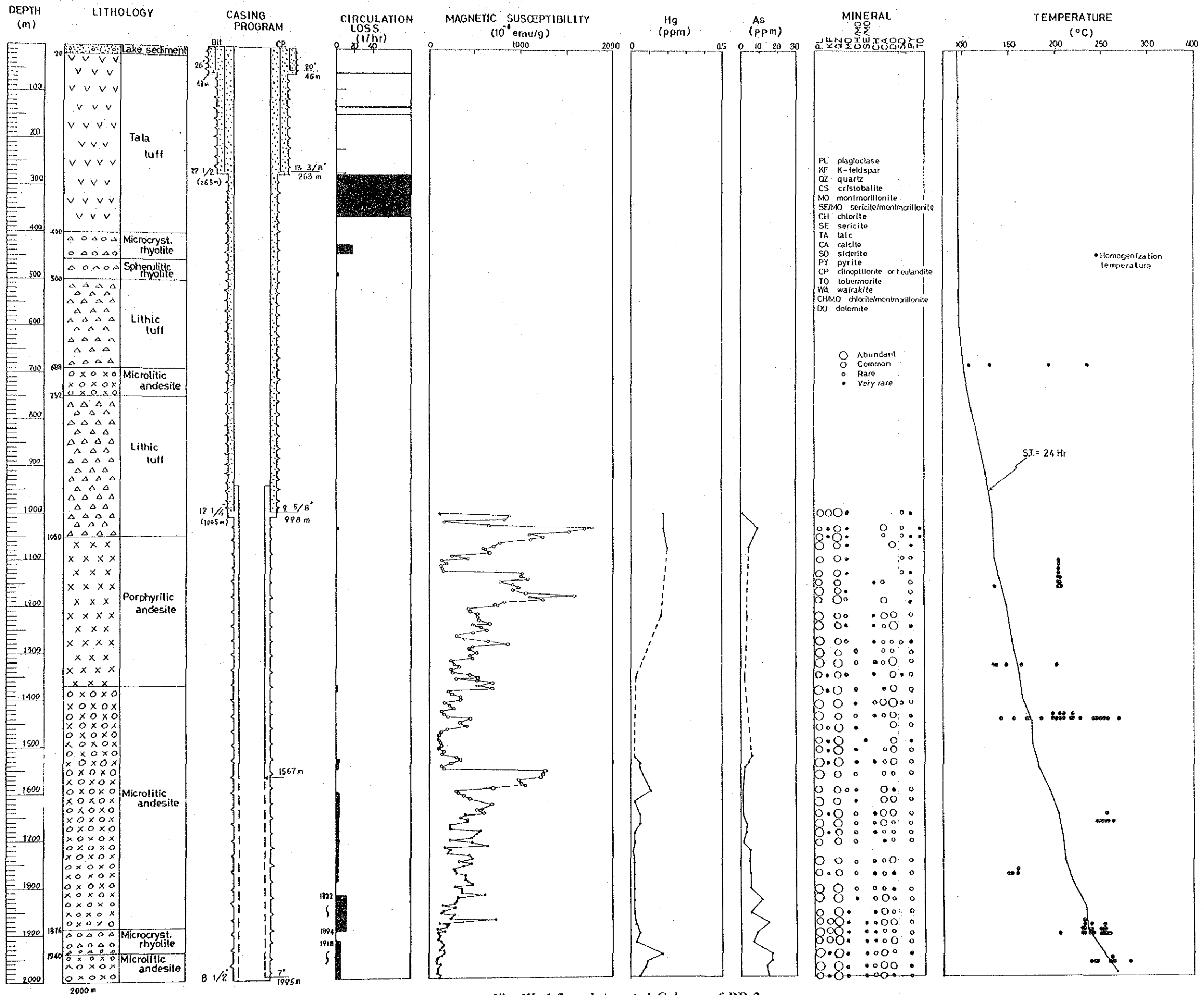


Fig. III. 1-2 Integrated Column of PR-2



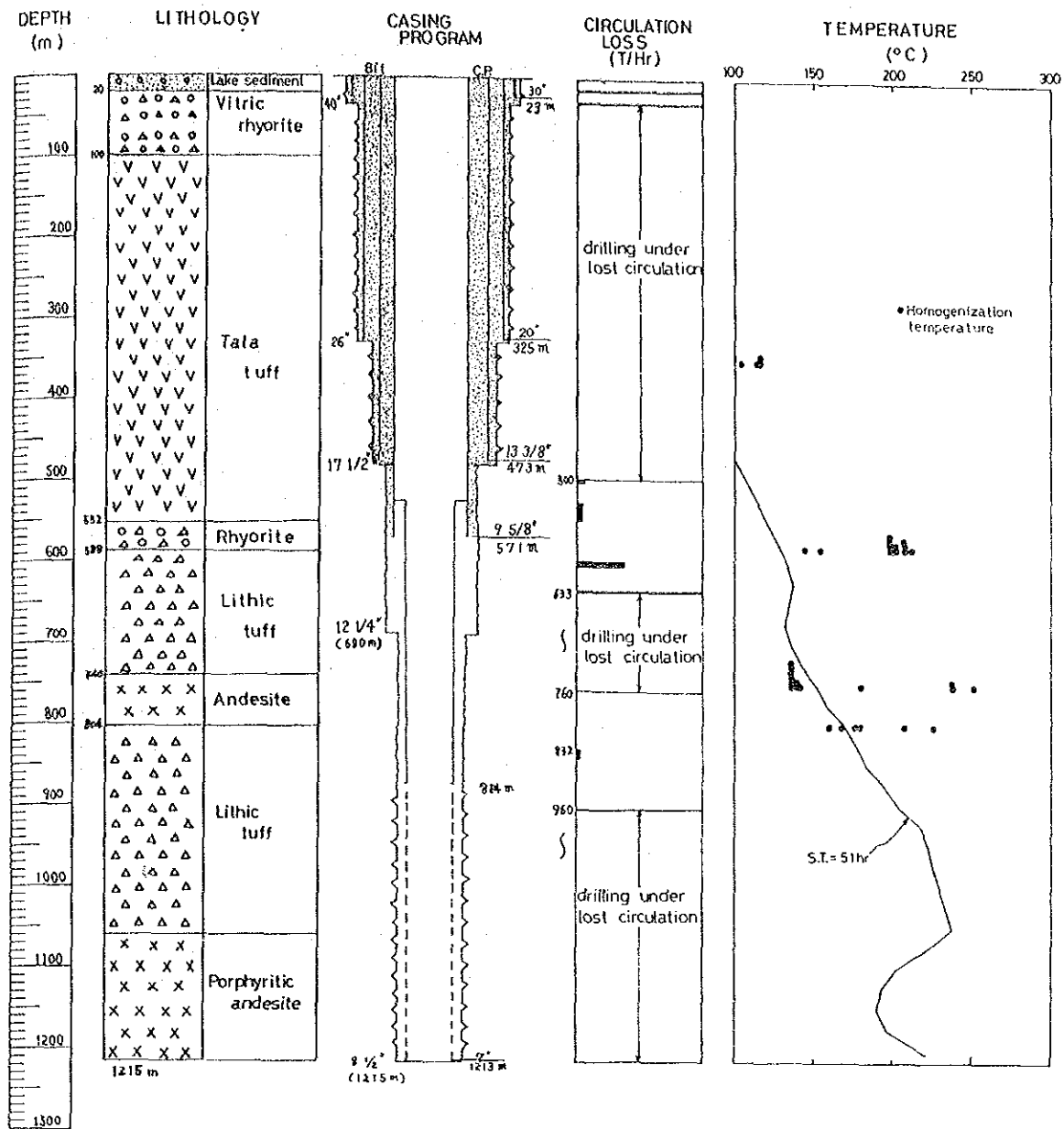


Fig. III. 1-3 Integrated Column of PR-5

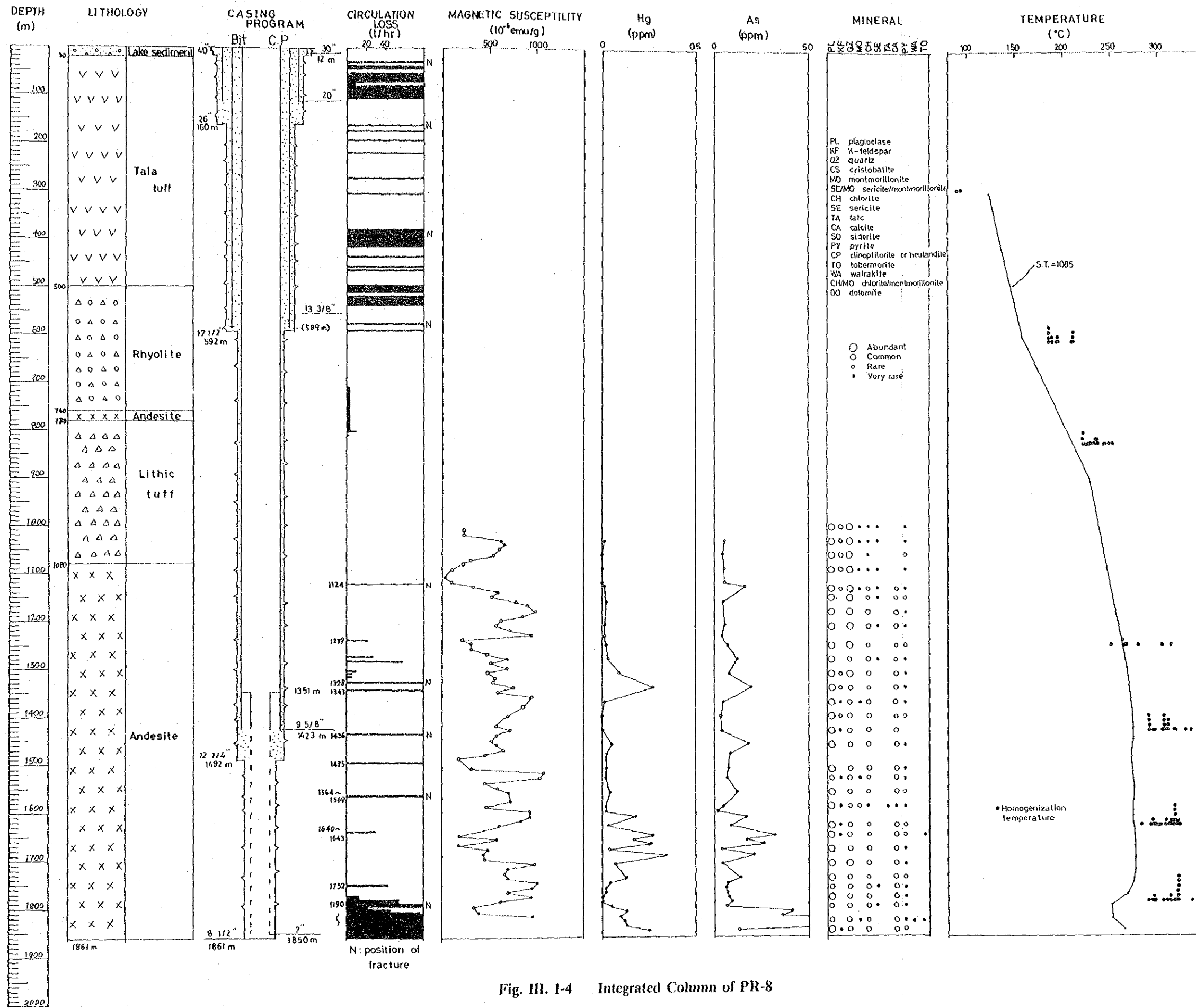


Fig. III. 1-4 Integrated Column of PR-8



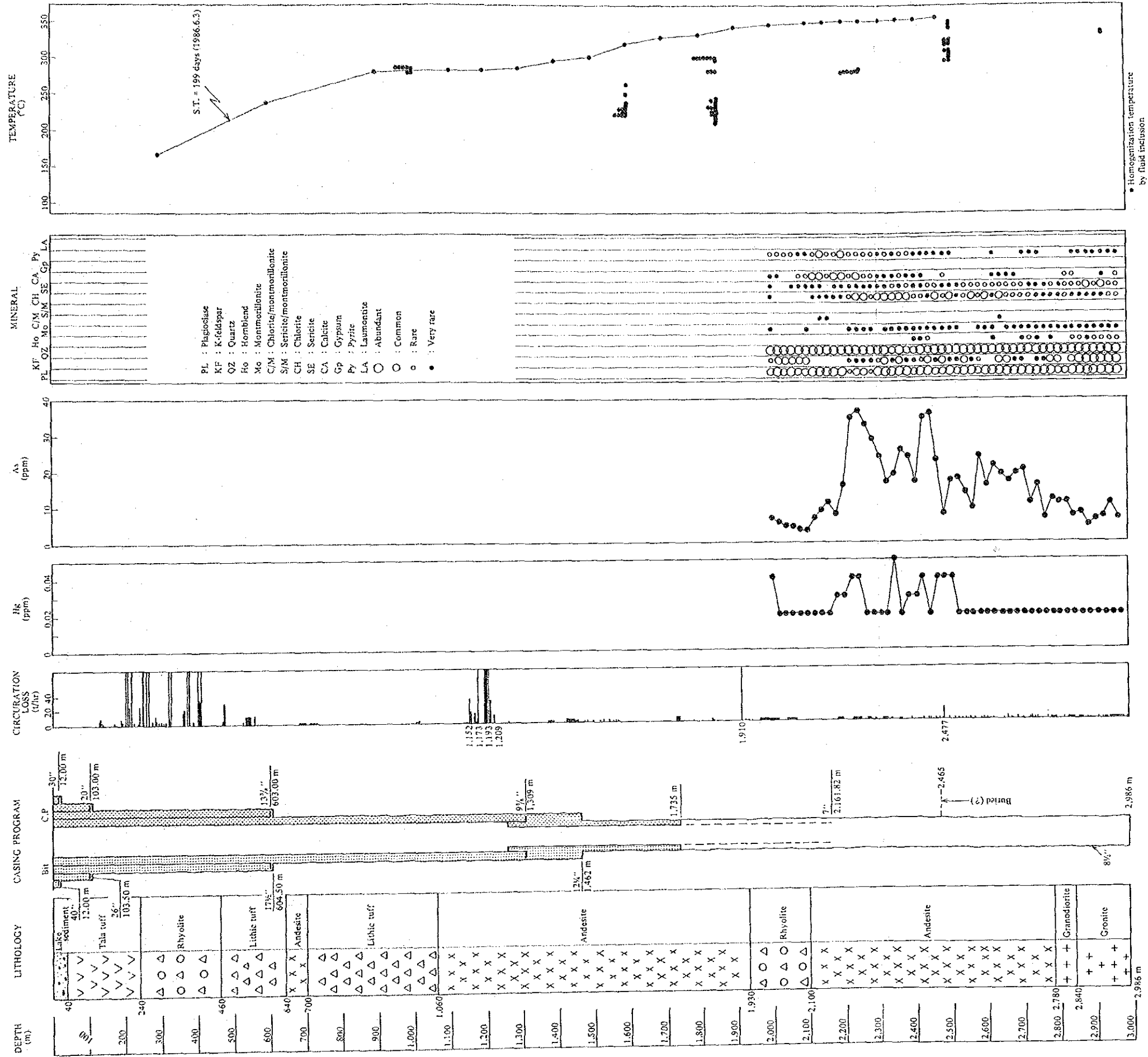


Fig. III. 1-5 Integrated Column of PR-9

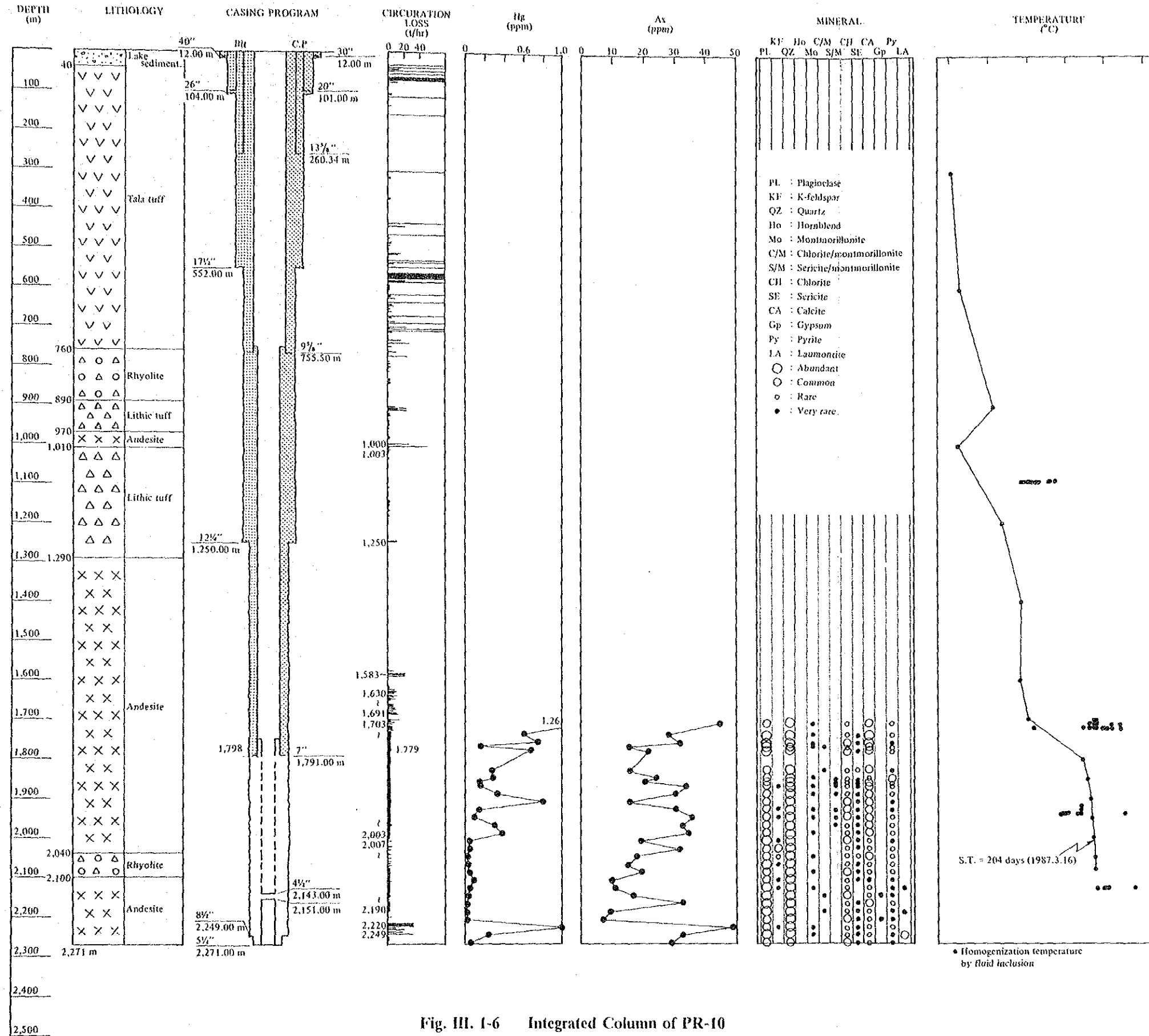


Fig. III. 1-6 Integrated Column of PR-10

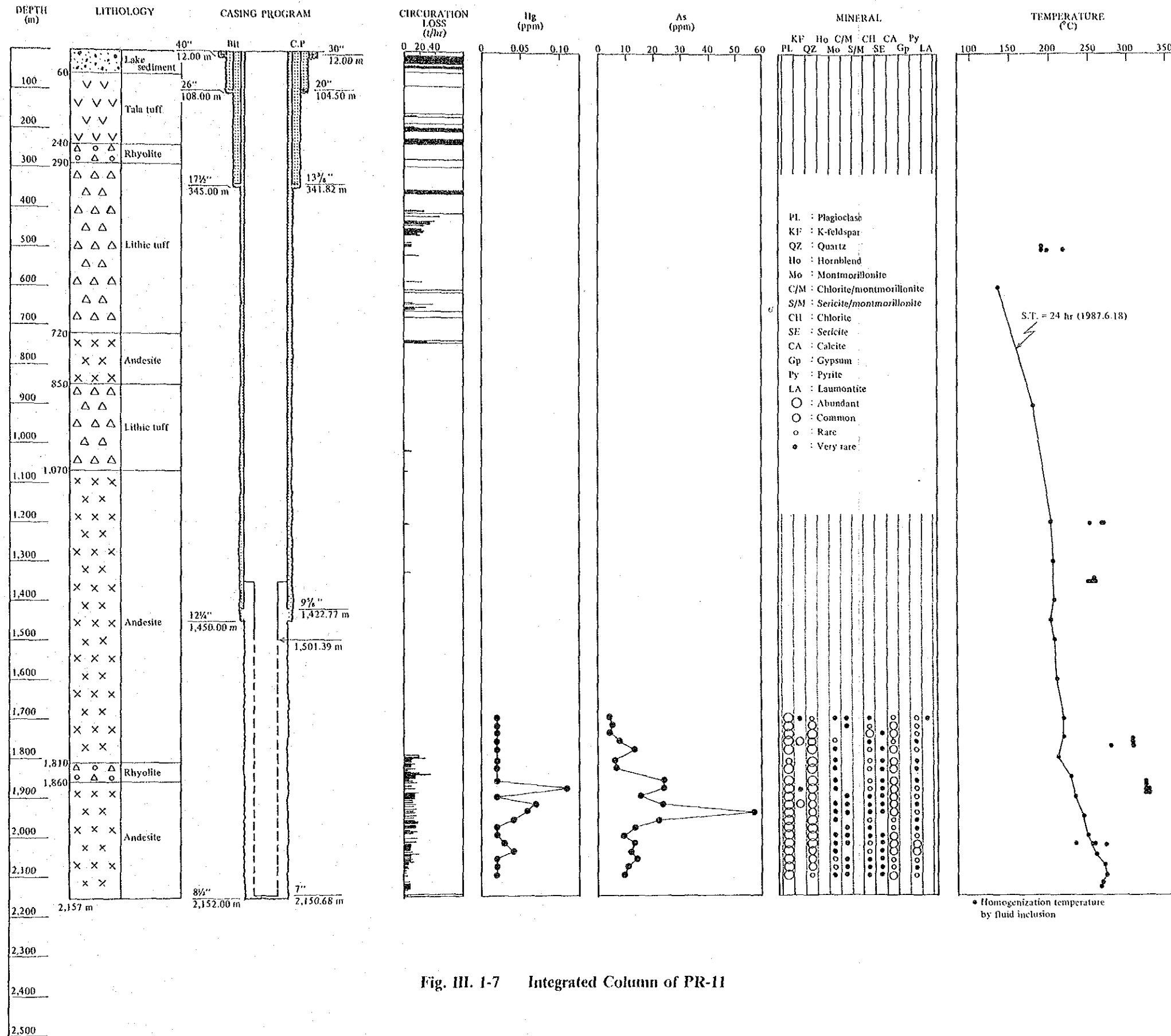


Fig. III. 1-7 Integrated Column of PR-11

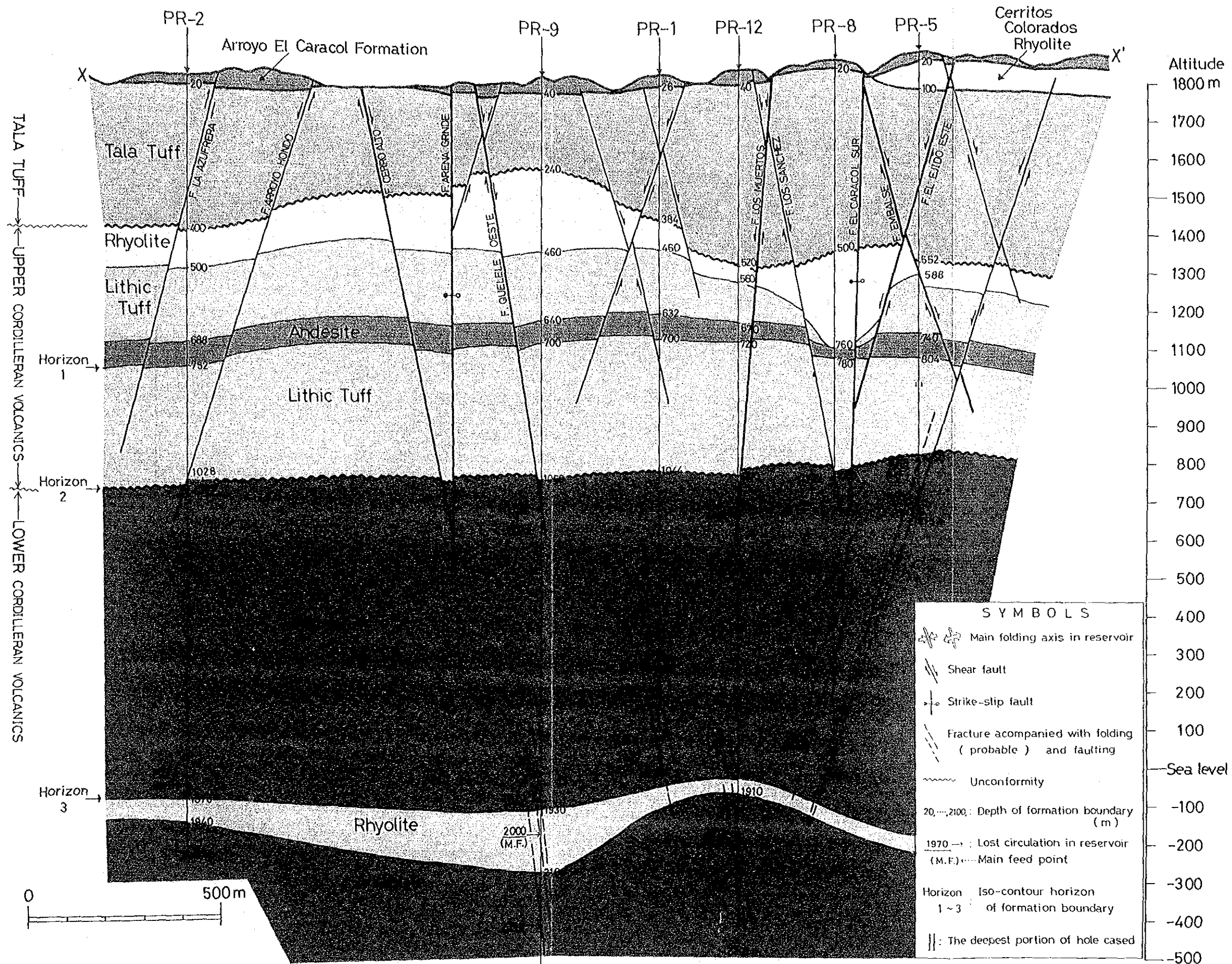


Fig. III. 1-8 Profile of Subsurface Structure in NW-SE Direction

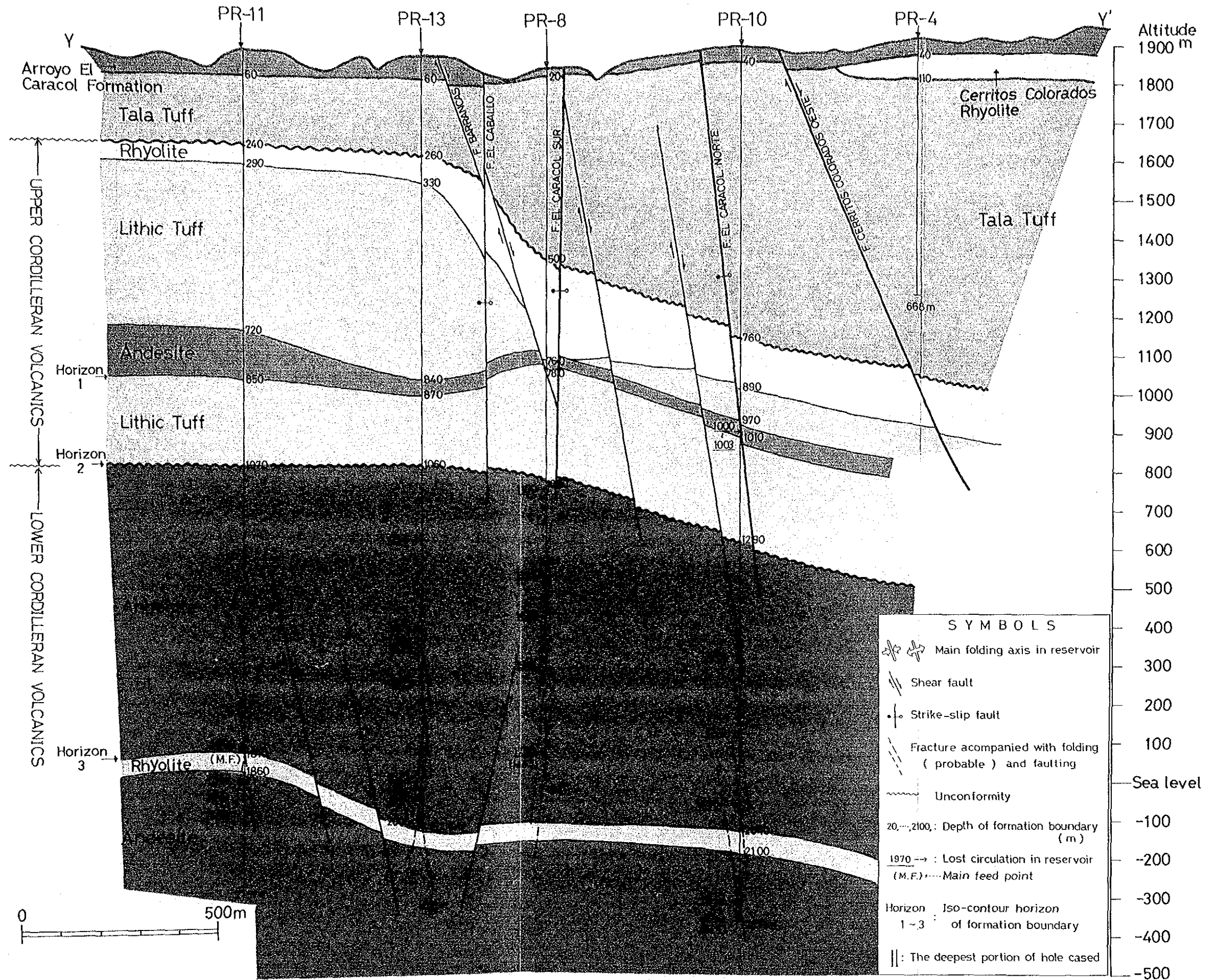


Fig. III. 1-9 Profile of Subsurface Structure in NE-SW Direction



## 1.2 地下断裂系についての考察

Figs. III.1-8 ~ III.1-9 に示しているように、深度 1,000m 深位までの断裂系（浅部断裂系）と主たる貯留層である 1,000m 以深の断裂系（深部断裂系）は異なっている。なぜこのように違うのか。また、それぞれの断裂系の特徴について述べる。

### (1) 浅部断裂系

1) 浅部断裂系は基本的に地表で認められる断層の延長によって構成されている。地表で認められる断層は、第 II 章 1.1 でとりまとめたように NE-SW 性断層が卓越するのは、次の理由が考えられる。

- ① シェラ・ラ・ブリマベラカルデラの形成過程における陥没あるいは隆起時の浅部応力配置を復元すると、 $\sigma_1$  が垂直に近く、 $\sigma_3$  が NW-SE 方向で水平に近かったため。
- ② 重力解析によれば NE-SW 方向の長軸をもつ楕円形ないし矩形の隆起が本地域浅部に生じたと考えられるので、このような隆起によって①に述べた応力配置になったため。

2) 一方、高温高压三軸圧縮下の岩石破壊試験を行うと通常 Fig. III.1-10 に示すような結果になる。Fig. III.1-10 (a)~(d) のうちのどの破壊形態になるかは、岩石が brittle であるか ductile であるかによって決定される。

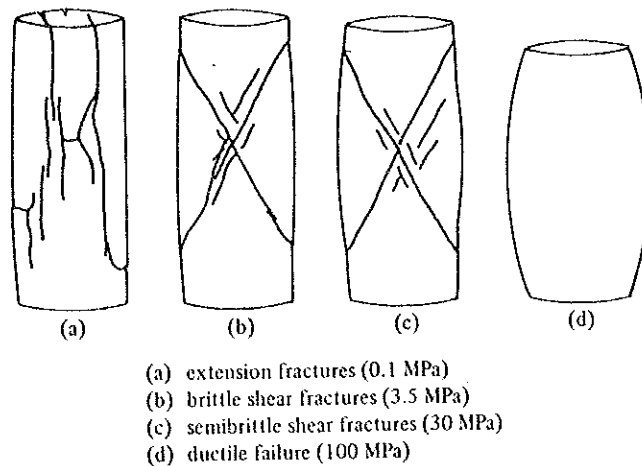


Fig. III. 1-10 Types of Failure in Experimentally Deformed Limestone at Varying Confining Pressure

brittle になる場合は、

- ① 緻密で堅い岩石（例えば火成岩類）
- ② 封圧が少ない

- ③ 差応力が大きい
- ④ 孔隙や孔隙水が少ない
- ⑤ 温度が低い

など様々の要因がある。一般的に地下が均質であれば、②⑤などの要因によって地下深部ほど ductile になる。しかし、ラ・プリアベラ地域の場合、地下深部に行くほど安山岩主体の地層になり①、④により brittle になりやすい。その実例として、Fig. II. 1-7 に示すようにコルディリェーラン火山噴出物の上部層と下部層の間で著しく密度が変わり、深部ほど高密度になっていることがわかる。さらに、本地域では主として深部からの uplift によって地層が変形したり断裂が生じたりしているため、地下深部ほど差応力が大きい(③)。このように、本地域では浅部で Fig. III. 1-10 の(b)(c)型断裂系が発達しやすいことが推測できるし、これらの断裂系がそのまま深部にまで延びていると考えるのには無理があることがわかる。さらに、Fig. II. 1-2 に示すように、コアの残留磁気測定とフラクチャー観察によって応力場を復元すると、地下 1,000m 位までは地表でうけた応力場と調和的な応力場をとることが知られている。

以上、①岩石破壊試験による考察、②岩石密度の違い、③応力場復元によって地表で認められる断裂系がコルディリェーラン火山噴出物上部層まで、同じような形態をとることが推測され、かつこれ以深は別の断裂系に支配されていることが示唆された。

3) 浅部断裂系ではNW-SE性の strike-slip断層も特徴的である。第II章 1.1で述べたように、この断層は横ずれの性格をもつために直接観察できないことが多い (Fig. II. 1-1)。このために、CFEの地質図には描かれていない。

しかし、

- ① 付録 2.000分の1ルートマップを参照してもわかるように、PR-12のすぐ東の EL CARACOL 沢で、N80°W、80°S、HONDO 沢付近でN83W 83°N等の断層面を確認することができた。
- ② NE-SW性断層の横ずれが地質図上にあらわれている。例えば、QUELELE OESTE断層はLA CUESTA断層へ、LOS MUERTOS断層は、EL EJIDO ESTE断層へ横ずれしながら連続している (Fig. II. 1-1参照)。
- ③ もし、NW-SE性の断層がなければ、NE-SW性の断層で囲まれた地域の地形は不自然に陥没したり、隆起したりしなければならない。すなわち、Fig. III. 1-11



に示すように、(a)のように平面的に描かれた断層があった時、横ずれ断層がなければその断面は(b)のようにそれぞれ独立した陥没地を作る。しかし、横ずれ断層があれば(c)のように描かれ、少なくとも(b)よりは自然の地形に近い。これはちょうど(d)に示すようなトランスフォーム断層と類似している。地熱地域における横ずれ断層の重要性については多くの人々が指摘しているので、本地域における大構造からみたNW-SE性断層の性格については後述する。

- 4) 浅部断裂系では以上のほかに、タラ凝灰岩中の節理や引張りフラクチャーおよびNE-SW、NW-SE性以外の断層も存在する。また、NE-SW性の断層に伴う各種地表徴候等の特徴もある。

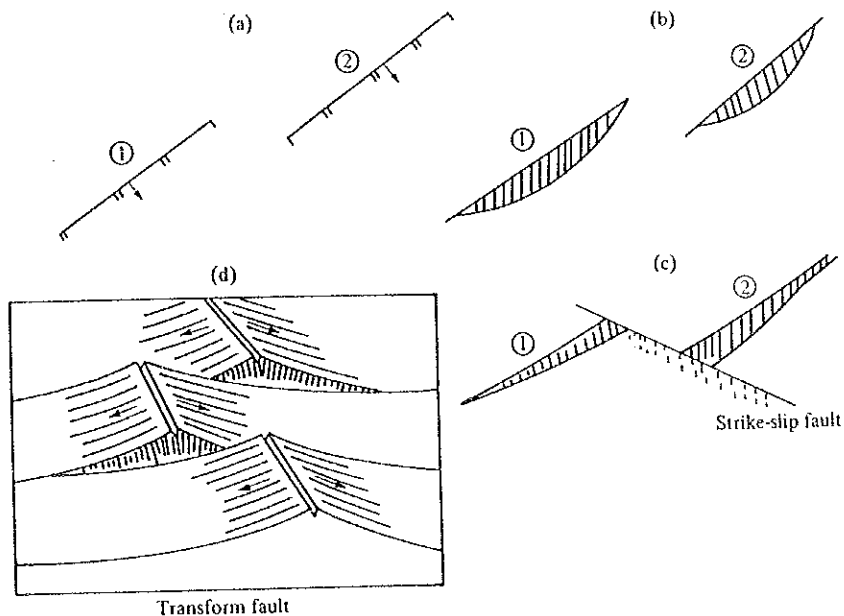


Fig. III. 1-11 Transcurrent and Transform Faults

## (2) 深部断裂系

- 1) ラ・ブリマベラ地域の深部断裂系が浅部断裂系とは違った性質をもつことが、(1)・(2)で考察され、Fig. III. 1-10 (a)の形をとることが推測された。また、第一次調査の電磁探査による比抵抗構造や広域的なブーゲー異常が深部ほどNW-SE方向になり、浅部断裂系とは異なった方向を持つことが示された。しかし、これらの事は情況証拠であって直接観察、測定によるものではないので、依然として浅部と深部を連結させて断裂系を考える人が多いかもしれない。

- 2) そこで、Figs. III. 1-1~III. 1-7 中に示す地質柱状図をもとに、ある特定の地質境界の構造等高線を描いた。特定の地質境界とは次の3層準である。

Horizon 1 : コルディリェーラン火山噴出物上部層中の安山岩とその下位の石質凝灰岩との境界 ( 深度 800~1,000m 深、浅部に属する )

Horizon 2 : コルディリェーラン火山噴出物上部層と下部層の境界 ( 深度 1,100~1,300m 深、浅部と深部の境界付近 )

Horizon 3 : コルディリェーラン火山噴出物下部層中の安山岩と流紋岩の境界 ( 深度 1,800~2,000m 深、深部に属する )

この 3 層準の構造等高線を 3 点法により描いた結果を、Figs. Ⅲ. 1-12~Ⅲ. 1-14 に示す。これらの図から以下のことが読みとれる。

- ① Horizon 1 : 全体的にみると PR-9 の西方ほど浅く、北東および南東に行くにつれて深くなる。すなわち、PR-9~PR-5 の東西方向に背斜部が存在する。全体的な地層の傾斜は 15~20° であるが、一部 PR-8 と PR-10 の間は最大 34° と等高線が混んでいる。このことは、本地域の地層が水平に近いことを考えると、その間に断層、特に北東傾斜 ( 北西走向 ) の断層の存在が考えられる。

従って、Fig. Ⅲ. 1-9 には、2 本の正断層を描いた。しかし、浅部断層系の中で、NW-SE 方向の正断層は全体からみると異質である。これらの断層は、正断層の成分を持つ横ずれ断層かあるいはコルディリェーラン火山噴出物上部に発達していた NW-SE 方向の断層の再動と考えられる。

- ② Horizon 2 : PR-1 付近が最も浅く、北東方向に深くなり、Horizon 1 と似たような傾向をもつ。しかし、Horizon 1 と比べ、全体として等高線の間隔は広く ( 傾斜がゆるく )、WNW-ESE 方向の構造となっている。

- ③ Horizon 3 : Horizon 1、2 とは異なるパターンであり、PR-11 から PR-12 にかけて N-S 性で最も隆起した様相を呈し、PR-12 近傍はドーム状構造になっている。ドームの南東側の PR-11 と PR-13 の間では等高線が混んでいて、最大 30° となっている。したがって、この間に北西走向、北東傾斜の断層の存在が考えられ、Fig. Ⅲ. 1-9 には 2 本の正断層を描いた。

以上のように、やはり浅部と深部の構造は不一致であり、深部には NW-SE 方向の断層の存在が明瞭となった。

- 3) 第一次調査では、深部断層系を推測するために広域地質調査も実施している。その結果の一部は第一次調査の項で述べたが、ここではさらに詳しい考察を試みる。

すなわち、本地域の主たる地熱貯留層は、コルディリェーラン火山噴出物下部を構

成するフラクチャーなので、このフラクチャーの性質を知ることが最も重要である。しかし、本地域にはコルディリエーラン火山噴出物は分布していないので、シエラ・ラ・プリマベラカルデラ周辺に分布するコルディリエーラン火山噴出物の構造を調べ、その特徴を内挿しようと試みた。カルデラ北東方 Santiago 川沿いの本 Volcanics には、NW-SE、NNE-SSW、ENE-WSW 系の断裂が多く、北西方の Santa Rosa ダム付近では NW-SE 方向の断裂が卓越している。一方、カルデラ南西～南方では、NW-SE 方向に加え、NS 性及び EW 性の断裂も多く認められる。このように全地域にわたって卓越しているフラクチャーは NW-SE 方向である。また、La Vega 西方に分布している中生界の走向・傾斜が  $N65\sim70^{\circ}W$ 、 $50^{\circ}N$  であり、本カルデラを含む Tequila 火山、Tepetitlic 火山など第四紀火山の配列が NW-SE であることを考えると、本地域の火山活動が、地下深部にある NW-SE 系のフラクチャーを通じて生じたものと推定される。

それでは、本地域周辺の第三系にはなぜ NW-SE 性のフラクチャーが発達しやすいかを、広域的な構造の面から考えてみる。

多くの地質学者によればシエラ・ラ・プリマベラ地域は、NW-SE および E-W 性のメキシコ中央火山帯と N-S 性のコルディリエーラン-コリマ地溝帯の交点にあたり、コリマ地溝帯は failed rift、メキシコ中央火山帯は failed transform 断層であることを指摘している。もし、これだけの地質状況であれば、NE-SW ないし、NS 性の open となる。しかし重要な点はメキシコ太平洋岸に沿う NW 性の subduction zone が存在しているために、これに近い本地域は Fig. Ⅲ.1-15 に示すように、NE-SW 方向の引張りの場 ( $\sigma_3$  が NE-SW)、NW-SE 方向が  $\sigma_1$  になりやすい。すなわち、本地域に存在する failed transform 断層は open になり、NW-SE 方向のフラクチャーが発達しやすいものと考えられる。

4) 以上1)~3)で述べたことを考慮して、Figs. Ⅲ.1-8 ~ Ⅲ.1-9 における深部断裂系を描いてあるが、この断裂系の基本概念は以下のとおりである。

- ① 深部断裂系の方向は一部 (PR-5 や PR-8 の温度逆転部では地表水の down flow が考えられるので、この部分は浅部断裂系と同じ)を除いて NW-SE 方向である。この方向は、本地域にカルデラ陥没あるいは隆起が生じた時に、第三系の既存フラクチャーである NW-SE 方向が再動したことを意味する。
- ② 深部断裂系の性質は基本的に Fig. Ⅲ.1-10 (a) に示すような extension 型フラク

チャーである。しかし、場所によつては、Fig. Ⅲ. 1-14の構造等高線から推定されるせん断型正断層系も存在することも予想される。

③ 深部断裂系はどこへも発達するというわけではなく、基本的に

i) 地層の変形に伴い、褶曲頂部(背斜軸や向斜軸)

ii) " 褶曲翼部

iii) 断層に付随して発達する

iv) 浅部断裂系の延長

の4種類が考えられる。これらを図示するとFig. Ⅲ. 1-16のようになり

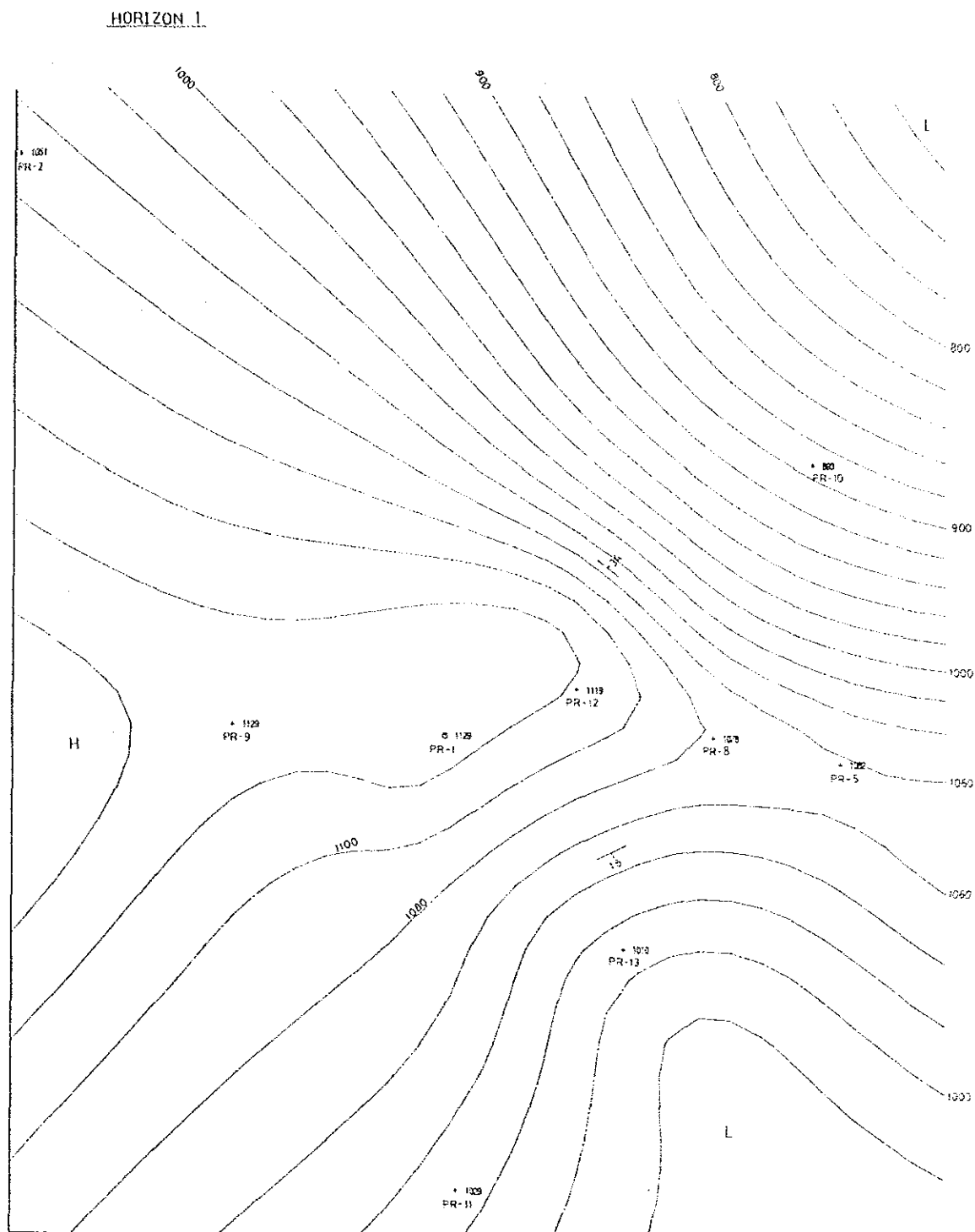
i) はⅢ. 1-16 (b)タイプでPR-9、PR-12、PR-13の深部断裂系

ii) は " (a)タイプでPR-1、PR-8、 "

iii) は " (c)タイプでPR-10、PR-11、 "

iv) はPR-5、PR-8の一部に認められる。

したがって、今後深部断裂系にターゲットを求める際には、上記i)~iv)について注目する必要がある。



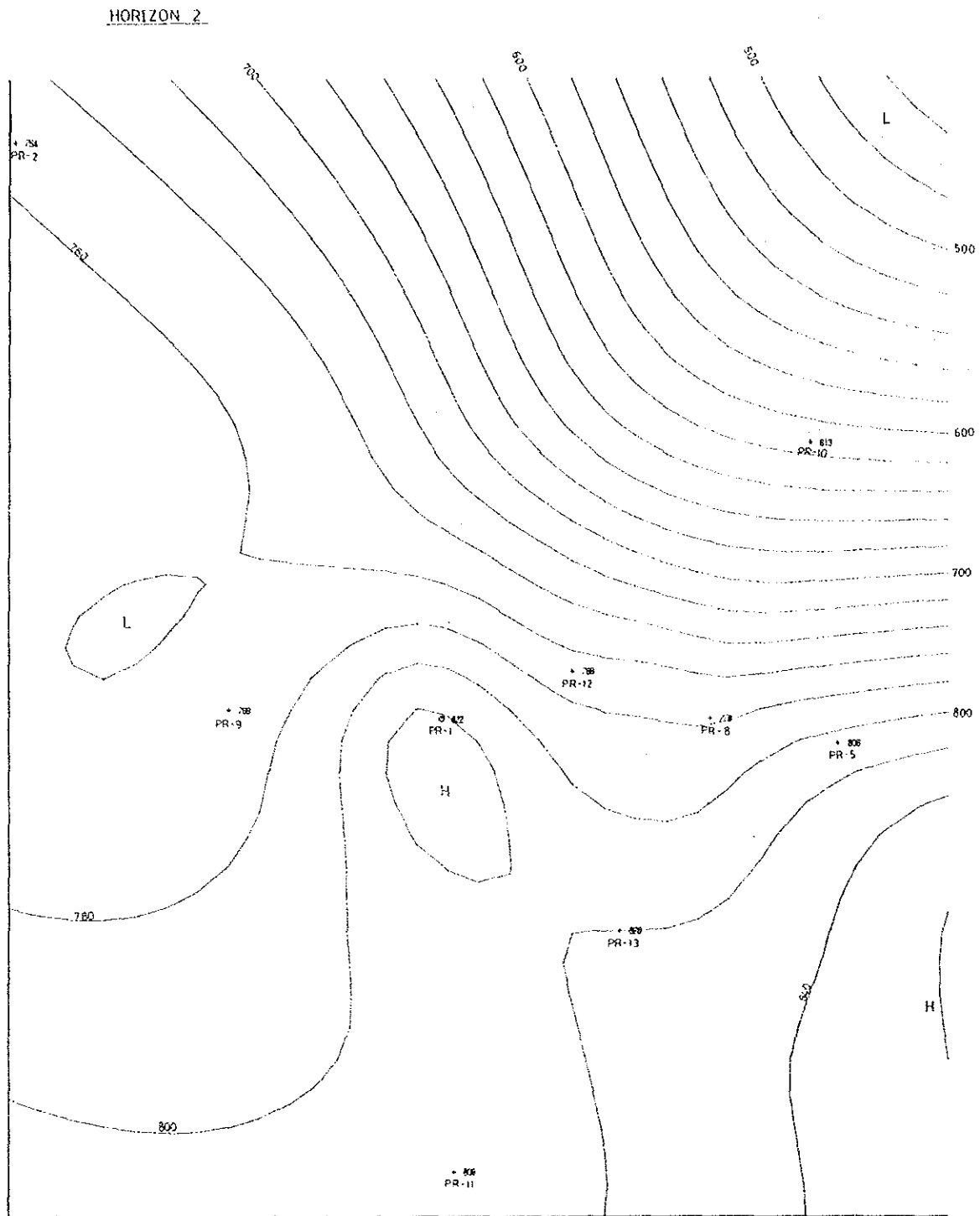
800 ~ 1000 : Altitude above sea level (m)

PR-1 ~ PR-13: Wells

H : Portion of high altitude

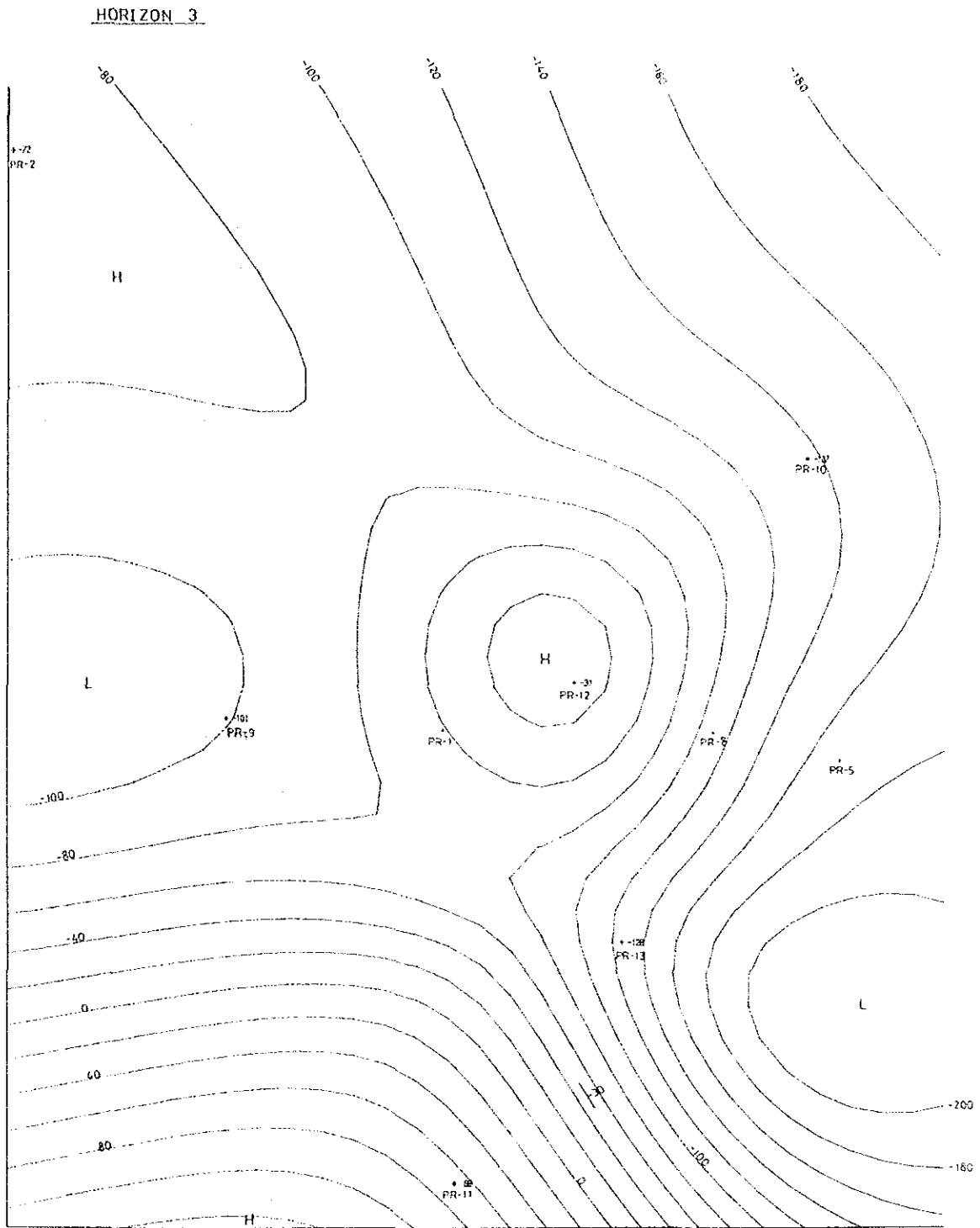
L : Portion of low altitude

**Fig. III. 1-12 Iso-Structural Contour of Horizon 1 (Boundary between andesite and lithic tuff of the upper Cordilleran Volcanics)**



500 ~ 800 : Altitude above sea level (m)  
 PR-1 ~ PR-13: Wells  
 H ; Portion of high altitude  
 L : Portion of low altitude

Fig. III. 1-13 Iso-Structural Contour of Horizon 2 (Boundary between lithic tuff and andesite)



-200 ~ 80 : Altitude from sea level (m)  
 PR-1 ~ PR-13 : Wells  
 H : Portion of high altitude  
 L : Portion of low altitude

**Fig. III. 1-14 Iso-Structural Contour of Horizon 3 (Boundary between andesite and rhyolite of the lower Cordilleran Volcanics)**

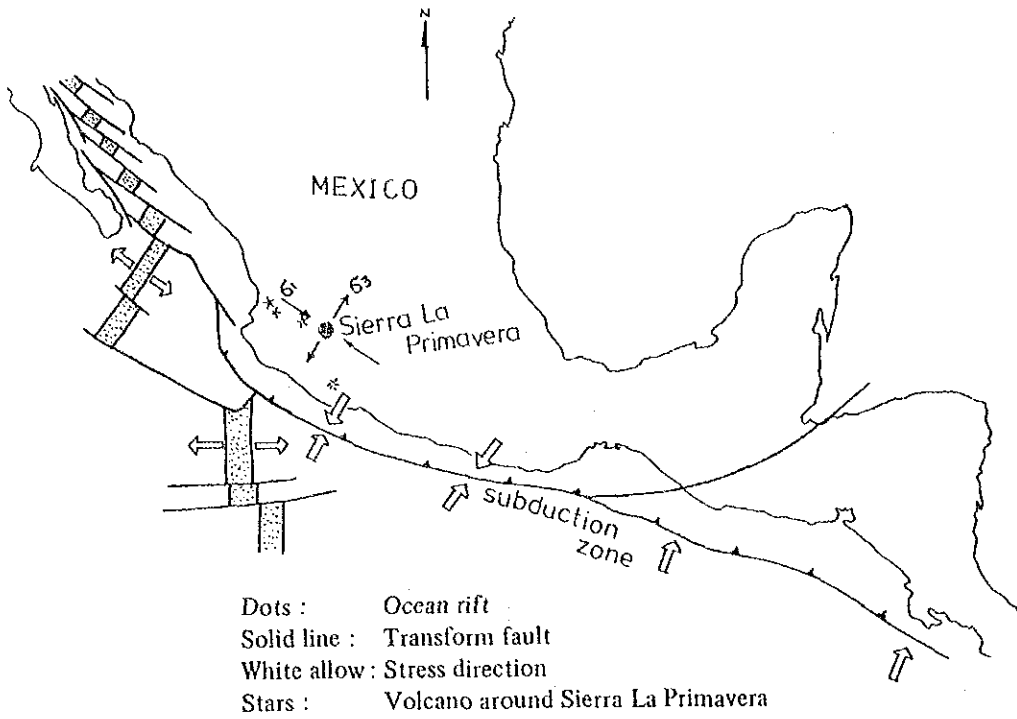


Fig. III. 1-15 Regional Stress Distribution along Pacific Coastal Area of Mexico

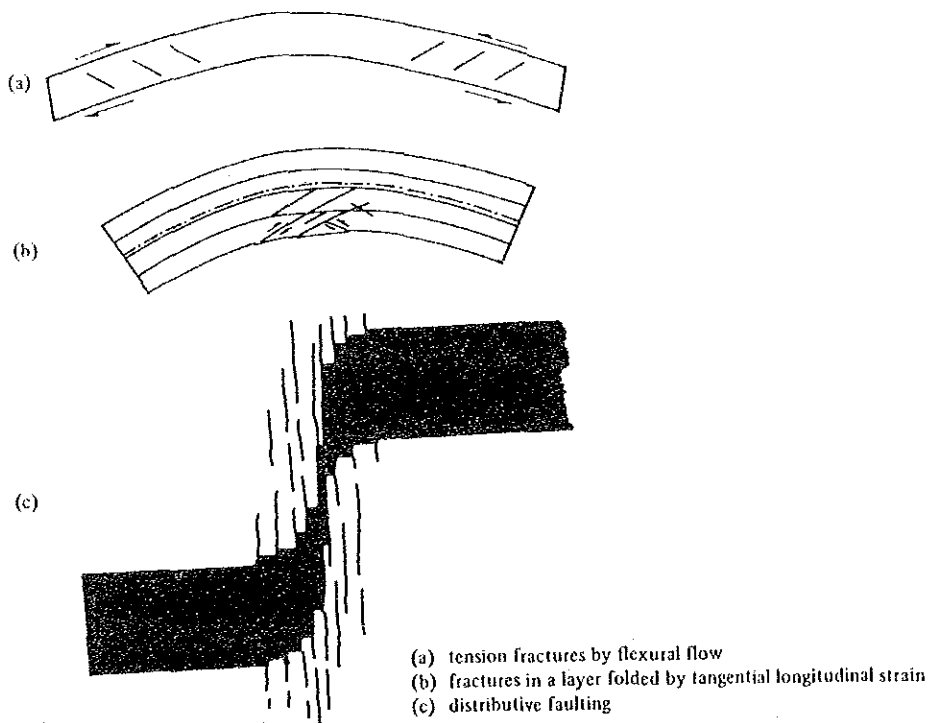


Fig. III. 1-16 Relation between Folding and Fractures



### 1.3 地下温度構造

#### (1) 坑内温度測定による地下温度断面

地下温度構造は3次元的に考えねばならないが、水平断面は実測データが少ないと描くことが難しいので、ここでは地下温度断面について考察し、水平断面はシミュレーションによって描くこととした（Figs.Ⅲ.2-25～Ⅲ.2-28参照）。

各坑井の総合柱状図には静止時の坑内温度測定値も示したが、掘削終了後に十分な回復時間において温度検層を実施している坑井の検層結果を用いて、当地域の現在の地下温度断面を作成した（Fig.Ⅲ.1-17）。断面線は最低均質化温度断面と同じである。その結果、PR-9からPR-5付近、とくにPR-9、PR-1、PR-12付近の深部に300℃以上の高温のup-flow帯が認められる。したがって、当地域の現在の地熱流体はこの付近の地下深部から縦型フラクチャーに沿って上昇していることがわかる。

第一次調査終了時には、このup-flowの中心はPR-1からPR-8の深部にあり、uplift帯と一致した形をとると考えた。今回、第二次調査および各坑井の測定を加味して地下温度断面を描くと、主たる貯留層のある深度1,000～2,000m深ではPR-9とPR-12の近傍に温度上昇部が認められる。すなわち、Figs.Ⅲ.1-8とⅢ.1-17を比較してもわかるように、PR-9は向斜軸部、PR-12は背斜軸部に位置しており、これに伴う縦型フラクチャーがのびているために2つのup-flowがわかれたような形をとると考えられる。

しかし、340℃以上の部分では両者が合体し、PR-1の深部にup-flow帯の中心があるように描かれる。この深い部分の形は推測によるもので、後述するように化学性状調査によると高温流体の中心はPR-12の深部にあると考えられる。

#### (2) 流体包有物の最低均質化温度による地下温度断面

各坑井にて測定した流体包有物の最低均質化温度データを用いて、当地域の地下温度断面を作成した（Fig.Ⅲ.1-18）。断面線はRC-1→PR-2→PR-9→PR-1→PR-12→PR-8→PR-5を通るようにした。その結果、PR-9からPR-5付近、とくにPR-1、PR-12、PR-8付近に280℃以上の高温のup-flow帯が認められるのに対し、PR-2では深度2,000mの坑底付近においても200から240℃とかなり低い。したがって、当地域の流体包有物トラップ期の地熱流体はPR-1、PR-12、PR-8付近の地下深部から縦型フラクチャーに沿って上昇していることがわかる。なお、PR-1、PR-8、PR-12の坑井試験の結果から、これらの坑井で

は噴気流体は坑井近傍の地層内でフラッシュし、坑井内には二相流状態で流入していることも判明した。

### (3) 当地熱地域の熱履歴

第Ⅱ章 3.1.2 や 3.3.1 で明らかとなったように、モンモリロナイトや濁沸石などの変質期から流体包有物トラップ期を経て現在に至る間に、当地域の地下温度はほぼ一定ないし上昇傾向にあったと推定される。上述の流体包有物トラップ期と現在の高温の up-flow 帯を比較すると、過去から現在にかけて up-flow 帯のエリアを西方へと拡大していることがわかる ( Figs. Ⅲ.1-17 と Ⅲ.1-18 の比較 ) 。

このことは、今後の地熱賦存を考える場合、西方にむけてNWあるいはWNW性のフラクチャーと対応しつつ考慮すべきことを示唆している。

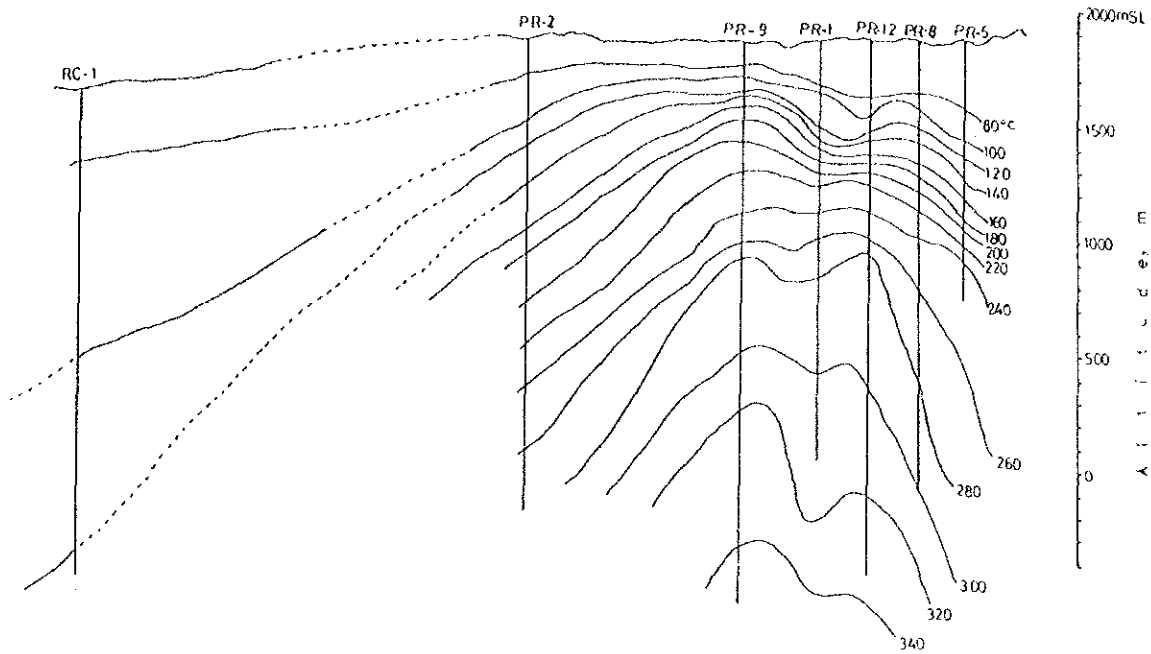


Fig. III. 1-17 Cross-Section of Downhole Temperature Profile

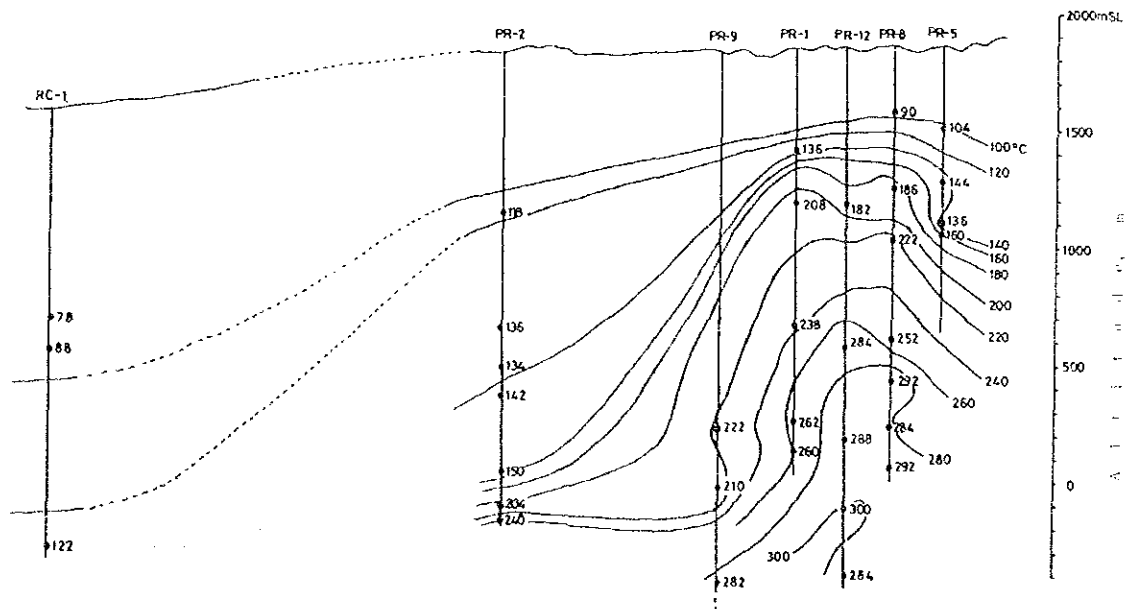


Fig. III. 1-18 Cross-Section of Minimum Homogenization Temperature Profile

#### 1.4 坑井の流体化学性状による考察

これまでに実施した第一次調査および第二次調査の地熱流体の化学性状調査では、主目的としていた坑井以外にも、現地調査時に噴気していた坑井について、より多くのデータを収集する目的で試料採取を行った。さらにC F Eで実施した化学調査結果も加味して貯留層内における地熱流体の流動を検討した。

ラ・プリマベラ地域で掘削された地熱井の多くは、Fig. II.1-4に見られるように、PR-2以外は土壤水銀濃度の高濃度域に位置している。昭和61年9月の中間報告書では、熱水の比エンタルピーとC1濃度との関係から、PR-2が他の坑井とは別の流体生成機構を有することを述べた。また、同じ土壤水銀濃度の高濃度域に位置しているPR-1、PR-4、PR-5およびPR-8は、同一のエンドメンバーの混合によって流体が生成されていると考えられた。今回、あらたに調査対象に加わったPR-12およびPR-13は、やはり同じ土壤水銀濃度の高濃度域に位置しておりPR-1およびPR-8の近くに掘削されている。

##### (1) 蒸気組成からの検討

昭和63年1月のPR-12調査時に同時に試料採取した坑井のうち、PR-1およびPR-9のトータルガス濃度が0.24および0.12 vol.%と他とくらべて著しく低い。さらにPR-1については、C F Eの耐圧鉄製セパレーターを設置した状態での昭和61年2月の測定値である2.20 vol.%よりも低い。これは、二相流ラインの横向きバルブに取り付けた小型セパレーターに選択的に熱水が流入し、小型セパレーター内で二次的に気液分離してガス濃度の低い蒸気が生成したためであり、したがって、これら2坑井の値は、本来の地熱蒸気の組成とは異なっていると考えられる。一方、その他のデータは地下情報をもたらしていると考えられる。

今回調査を行ったラ・プリマベラ地域の蒸気のトータルガス濃度は、1.76~3.46 vol.%であり、セロプリエトや日本の多くの地熱発電所蒸気と比較して高濃度である。ガス成分のうち最も多いのはCO<sub>2</sub>であり、いずれの坑井でもCO<sub>2</sub>濃度が9.9 vol.%程度である。化学反応性が高いH<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Sは、坑井間および調査時期の違いによって濃度に差が見られるが、N<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、HeおよびArに関しては大きな差はない。N<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、HeおよびArの中では、いずれの坑井でもCH<sub>4</sub>が高濃度であるが、蒸気をとまわず、ガスのみが噴出していたPR-11は、H<sub>2</sub>Sが検出されないことほかにCH<sub>4</sub>濃度が14,400 ppmと極めて高いことが特徴的である。

$N_2$ 、He および Ar の 3 成分についてみると、Fig. Ⅲ、1-19 に示すように、ラ・ブリマペーラ地域の蒸気の  $(He/Ar)_s/(He/Ar)_{air}$  比は、これらの値が大きい深部ガスと地表水に溶解した大気との混合によって規制されているといえる。比較的接近して地熱井が存在している地域では、単純な混合機構が不活性な気体成分の組成を決めているすれば、 $(He/Ar)_s/(He/Ar)_{air}$  比の高い深部ガスが熱水とともに上昇し、溶存大気のみを含んで浸透した地表水と混合した結果が  $(He/Ar)_s/(He/Ar)_{air}$  比に反映されることが考えられる。このような仮定は、先に述べたように当地域の蒸気のガス組成で、 $N_2$ 、 $CH_4$ 、He および Ar に関しては大きな差はないことから成り立つと考えられる。ラ・ブリマペーラ地域で正規のセパレーターを用いて二相流の全量を気液分離した状態での測定値および温泉ガス (Hervores de la Vega) の中で、 $(He/Ar)_s/(He/Ar)_{air}$  比を比較するとその大きさは、次のとおりである。

PR-12 > PR-8、PR-13 > 温泉ガス (Hervores de la Vega)

蒸気の  $(He/Ar)_s/(He/Ar)_{air}$  比がこのような順序になることから、ラ・ブリマペーラ地域の地下において、PR-12 近傍に  $(He/Ar)_s/(He/Ar)_{air}$  比の高い深部ガスを含んだ熱水が上昇し、これが周辺の PR-8、PR-13 等の方向へ流動する間に、地下に浸透した地表水と混合していると考えられる。

## (2) 熱水組成からの検討

ラ・ブリマペーラ地域で継続的噴気をしている坑井の熱水は、Na と Cl に富んでおり、大気圧下で採取したものの Cl 濃度は 800~1300mg/l の中性~弱アルカリ性であり、特に際立った特徴を持つ坑井はない。

熱水および温泉水の B/Cl 比はモル比で 0.4~0.5 とほぼ一様であり、広範囲において貯留層の化学的性質に違いはないといえる。また、B/Cl 比が一様であることから、熱水の B 濃度と Cl 濃度を規制しているものは、高塩類濃度の熱水と溶存成分の少ない地表水との混合であると考えられる。B/Cl 比を変化させる要因の一つである貯留層内の気液分離はないと推定できる。このことおよび当地域で蒸気卓越型貯留層の存在を予想させるような高い B/Cl 比を持った蒸気が坑井から噴出していないことからみて、当地域の地下で 300℃ を越える高い温度が確認されてはいるものの、現在のところ部分的に蒸気卓越型貯留層が形成されているとは考えられない。

熱水の水素および酸素の同位体組成を、周辺の温泉水のデータとともに Fig. Ⅲ、1-20 に示す。温泉水の値は、地表水を示す  $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$  の直線付近にプロットさ

れているが、熱水の値は  $\delta D$  および  $\delta^{18}O$  ともに温泉水の値よりも重くなっている。熱水の測定データ数が少ないので明確ではないが、地下深部で岩石-熱水間の酸素同位体交換反応の結果重い酸素同位体を濃縮した熱水と地表水との混合が、貯留層内で起っていると考えられる。

熱水の B/Cl 比、水素および酸素の同位体組成および先に述べた蒸気の  $N_2$ 、 $He$  および  $Ar$  の 3 成分のいずれからも、ラ・プリマベラ地域においては地下での混合機構が地熱流体の化学性状を決める上で重要であることが考えられた。つぎにこの混合機構と地熱流体の熱的状況との関係を地化学温度から検討する。

地化学温度計には様々なものが提唱されているが、どの値を採用するかを決めるのはかなり困難な仕事である。ラ・プリマベラ地域の坑井では、 $300^{\circ}C$  を越える温度検層値や  $Na/K$  温度がいくつか得られており、高温で反応速度が速すぎる  $SiO_2$  温度計の高温を示す坑井への適用は困難と考えられる。ここでは、PR-12 の熱水化学性状調査のところでも述べたように温度検層値との比較や各種の地化学温度計で求めた値の比較検討結果から、PR-12 の貯留層温度を  $320\sim 330^{\circ}C$  と推定した。また、PR-13 については、貯留層温度を  $280^{\circ}C$  程度と推定した。

Fig. 1-21 にラ・プリマベラ地域における気液分離前の貯留層内熱水の比エンタルピーと Cl 濃度との関係を示す。ここでは、坑井の初噴気直後の貯留層の不安定さを避けるために比較的最近のデータのみを採用した。すなわち、PR-1、PR-8、PR-9 および PR-12 に関する CFE の昭和 62 年 12 月～昭和 63 年 1 月の化学データと JICA が行った PR-1、PR-8、PR-12 および PR-13 の坑井熱水化学性状調査の結果をプロットした。

熱水の比エンタルピーと Cl 濃度との間には、強い正の相関がみられ、最小二乗法によって得られた回帰式は  $h = 56.9 + 0.397 \times Cl$  ( $h$ : 熱水の比エンタルピー;  $Cl$ : Cl 濃度) であり、相関係数は 0.83 となっている。このことは、高温で Cl 濃度が高い熱水と低温の地表水が当地域の貯留層で混合していることを意味している。熱水の比エンタルピーと Cl 濃度の高さの順位は、ほぼ次のとおりである。

PR-12 > PR-1 > PR-9、PR-13 > PR-8

また、蒸気の  $He/Ar$  比が、PR-12 > PR-8、PR-13 であることから、PR-12 が最も高温で Cl 濃度と  $He/Ar$  比の高い地熱流体の上昇域に近く、ここを中心として PR-1、PR-8、PR-9 および PR-13 方向に離れるにしたがって次第に地

表水の影響が大きくなっていると考えられる。

一方、 $\text{SO}_4$ 濃度は地表水の影響が大きいと考えられる坑井の値が高い傾向にあるが、昭和61年2月に調査したPR-1およびPR-8と昭和63年に調査したPR-12およびPR-13の4坑井についてCaと $\text{SO}_4$ の濃度の積は、PR-1およびPR-12が $6.9\sim 8.3\times 10^{-9}$ 、PR-8およびPR-13が $1.2\sim 1.5\times 10^{-8}$ （フラッシュ=前熱水のモル濃度）である。これは、硬石膏の溶解平衡によって、地表水の影響が大きい低温部でCaと $\text{SO}_4$ の濃度積が大きくなったものと考えられ、このことからPR-1およびPR-12が優勢な地熱流体の上昇域に近いと考えられる。

なお、昭和61年の中間報告書では、これらの坑井の周辺部に位置するPR-2とPR-4についてCFEのデータおよび土壤水銀調査の結果から、PR-2は独立的に存在し、PR-4は地表水の影響が大きいとした。これら2坑井はいずれも熱的には他坑井に比べて劣性である。

以上に述べたことから、総合的にラ・フリマベラ地域における地熱流体の流動を検討すると、当地域での主要な高温流体の上昇域はPR-12近傍の深部であり、ここでは少なくとも $330^\circ\text{C}$ を越える流体が上昇し、周辺部に向かって流動しながら低温の地表水と混合していると考えられる。熱水および地表水の流動経路としては、NW-SE系およびNE-SW系のフラクチャーが重要な役割を果たしていると考えられる。

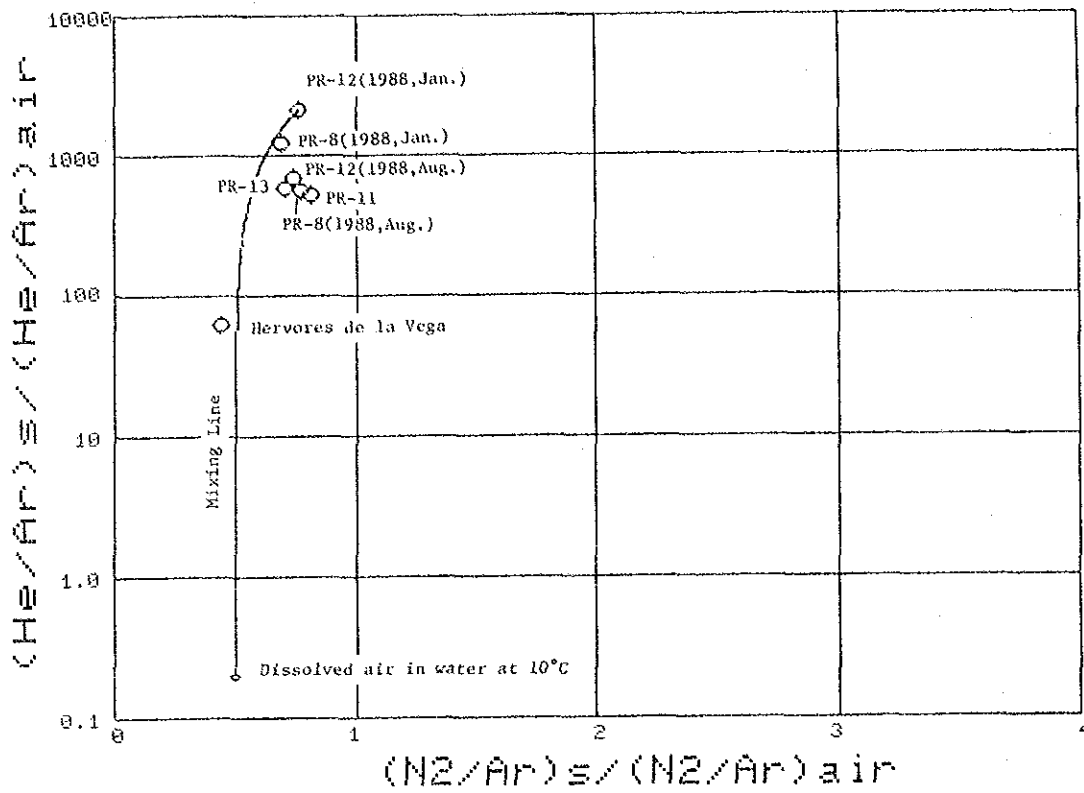


Fig. III. 1-19 Relationship between He/Ar and H<sub>2</sub>/Ar Ratios of Geothermal Gaseous Discharge

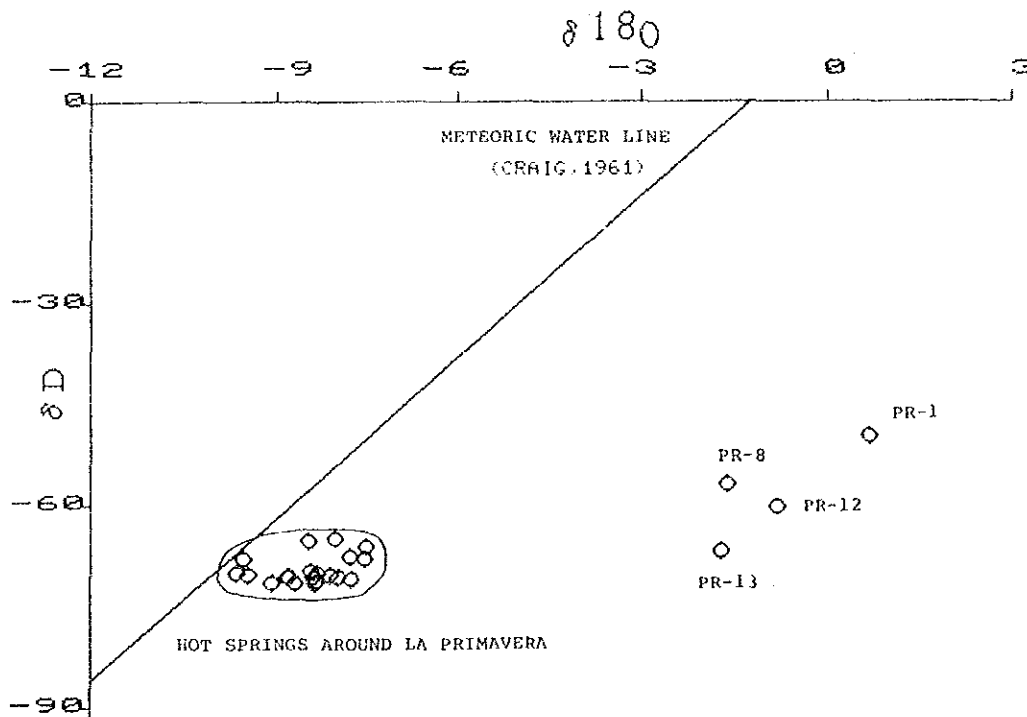


Fig. III. 1-20 Isotopic Composition of Geothermal Water



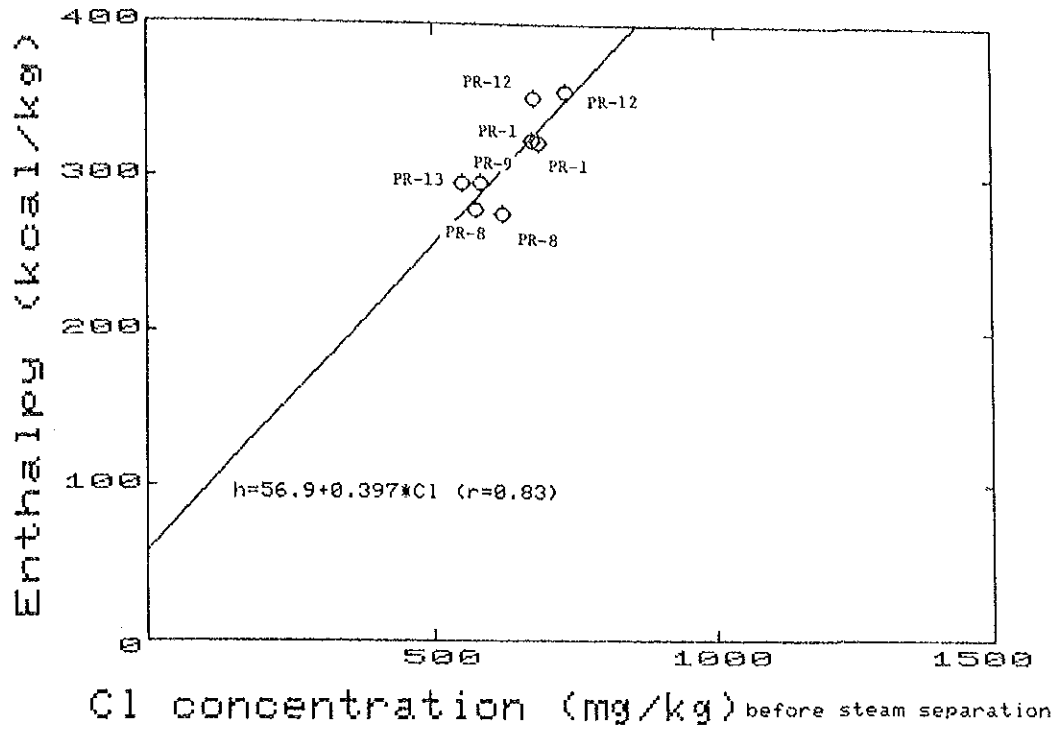


Fig. III. 1-21 Relationship between Cl Concentration and Enthalpy of Hot Water

## 1.5 地熱貯留層構造のまとめ

本地域の地熱貯留層構造については、すでに第一次調査終了時にとりまとめを行った。その要点を以下に記すが、今回第二次調査やその後のC F Eからの資料をも含み地熱貯留層構造を考えると、基本的に第一次調査終了時の構造は変わらず、むしろその構造を裏づけるようなデータがそろったといえる。

### (1) 第一次調査終了時の貯留層構造

- ① 本地域の主たる貯留層は深度約1,000m以深のコルディリエーラン火山噴出物中のフラクチャーによって構成されていて、そのフラクチャーは、電磁探査や重力探査によればNW-SE方向と推定された。
- ② このNW-SE性フラクチャーはカルデラ形成時のupliftによって形成されたものであり、その中心はPR-1~PR-8付近に位置することが推定された。
- ③ 地化学温度計、流体包有物および坑内温度測定等によれば、本地域の高温部もPR-1~PR-8付近にあり、いわゆるup-flow帯とuplift帯が一致した縦型貯留層を作っている。
- ④ この貯留層の拡がりは、北はPR-10まで、南はPR-8の南約1km、東はPR-1の東約1km、西はPR-2の手前までと推定され、NW-SE方向に約2km、NE-SW方向に約1.5kmの矩形を示すと考えられた。
- ⑤ 流体の化学性状調査によると、高温の流体はPR-1付近から上昇して、PR-8→PR-5の方向に流動し、さらに、浅部に発達するNE-SW性の断層に沿ってPR-4の方向へ流れていく機構が考えられた。なお、PR-2の熱水はこれとは別の機構で生じた独立の貯留によると推定された。

### (2) 第二次調査およびC F Eの資料によって確認・追加された事項

- ① 坑井の地質柱状図を基にして地質境界の構造等高線を描くと、主たる貯留層であるコルディリエーラン火山噴出物下部層(深部)は、PR-12近傍で最も隆起し、PR-11とPR-13の間にNW-SEでNE dipの断層の存在が確認され、やはり浅部と深部の断層の主方向が違うことが確認された。
- ② NW-SE方向の深部のフラクチャーは、元来本地域の主構造方向であって、これがカルデラ形成時の陥没や隆起によって再動extension型となったと推測された。このフラクチャーは基本的に地層の変形に伴い、褶曲頂部、褶曲翼部および断層に付随して発達すると考えられる。

- ③ PR-5とPR-8の温度曲線を再解析すると、高温部中の低温領域は地表水の down-flowのためと考えられ、この部分では浅部で発達しているNE-SW系の断層が深部にまで延びていると推測された。
- ④ 坑内地下温度検層および流体包有物による最低均質化温度によると、本地域の高温部はPR-9～PR-1～PR-12の付近にあり、ここがup-flow帯となっていることが判明した。しかし、縦型フラクチャーの規制により、現在の地下温度断面は主貯留層部においてはPR-9とPR-12の2つのup-flowにわかれた形を呈している。一方、当地域の熱履歴を考えると変質形成期→流体包有物トラップ期→現在にかけて温度が上昇しており、up-flowの地域は西方へと拡大していることがわかる。
- ⑤ 流体の化学性状調査によると、330℃以上の高温の流体はPR-12の深部から上昇し、PR-1→PR-9、PR-13→PR-8→他の地域へと流動しながら低温の地表水と混合していく機構が考えられた。

以上の事実は、uplift および up-flow の中心がPR-12の深部に位置していることを示し、第一次調査で推測されていた中心部（PR-1～PR-8付近）がさらに精密に絞りこまれたことになる。

### (3) 地熱貯留層構造発達史

(1)(2)からわかるように地熱貯留層構造はFig. Ⅱ. 2-1と本質的に変りはないので、改めて図示はしない。むしろFig. Ⅱ. 2-1の詳細についてはFigs. Ⅲ. 1-8～Ⅲ. 1-9に示しているとおりである。そこで、地熱貯留層構造のまとめとしては、Table Ⅲ. 1-1に示すような発達史を考えた。

1) 構造発達を考える場合、本地域の主貯留層のフラクチャーがいつどのような機構で形成されたのか、が最も重要な課題となる。

すなわち、

地質調査および応力場復元等により、本地域のフラクチャーがカルデラ形成に関連していることは明瞭である。しかし、これらの調査からはフラクチャー形成が陥没によるものか隆起によるものかは判断できない。そこで次のような構造発達の面からの考察により、フラクチャー形成がカルデラ隆起 (uplift) に最も関係していることが推定された。

- ① もし、カルデラ陥没が一挙に生じたとすればこの影響で $\sigma_1$ が垂直の応力配置になり、Fig. Ⅲ. 1-10(a)～(c)に示すようなフラクチャーが形成されると思われる。

しかし、地表調査や坑井掘削結果によればカルデラ噴出に関係するタラ凝灰岩は、200~700mと厚く堆積し、かつ、11枚以上のflow unitにわかれていることが判明した。この事は、カルデラ陥没が一举におきたのではなく、噴出と陥没が同時に進行していったことを示す。したがって、応力集中があまりおきずフラクチャーが新しく作られるまでには至らなかったと考えられる。むしろ、この陥没により、コルディリエーラン火山噴出物中の既存フラクチャーの再動あるいは開口がおきたものと思われる。

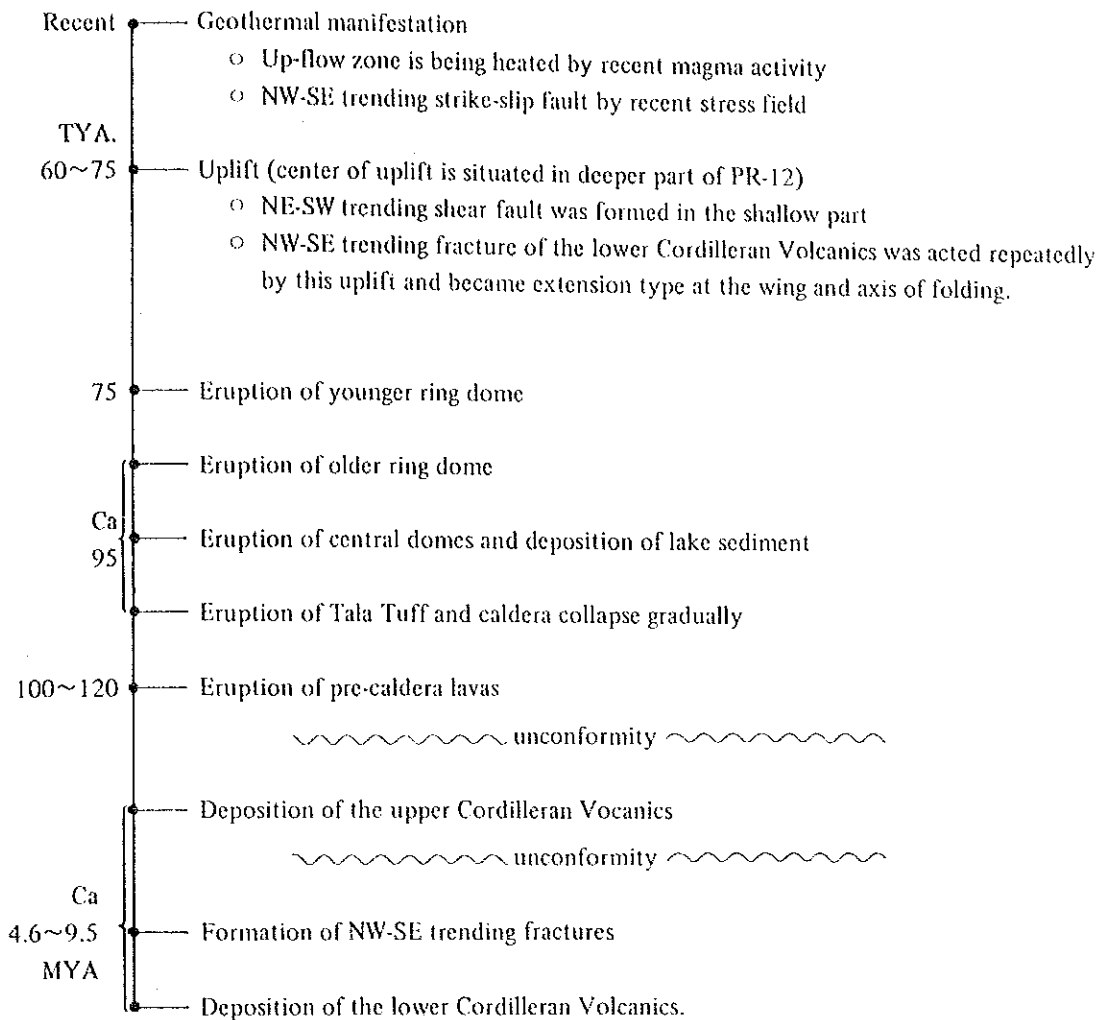
- ② カルデラ隆起 (uplift) は約6~7.5万年に生じたと考えられる (MAHOOD, 1980)。upliftの原因については種々考えられるが、MAHOOD (1980) が指摘しているように resurgence (再生) よりもむしろ insurgence として広い地域からマグマが供給されたためと考える方が妥当と判断される。これは、本調査でも明らかになったように、変質期→流体包有物トラップ期→現在にかけて地下温度が上昇していることから支持される。

uplift が起れば地層自体が引張りの環境下におかれるので、これまで述べたように、地表付近の浅部ではNE-SW性の正断層の発達、深部ではNW-SE性の既存フラクチャーの再動や開口が促進される。

- 2) Table Ⅲ. 1-1には本地域の熱発達史は描かれていない。これは、変質の形成年代および流体包有物のトラップ期が年代測定がないために明らかになっていないからである。今後これらの測定が必要であるが、現状では次のように考えている。

- ① 各坑井に出ているモンモリロナイト、セリサイト、沸石類で特徴づけられるいわゆる中性~アルカリ性変質鉱物は、地表にあらわれているフラクチャー等の規制を受けていないので、カルデラ uplift 以前に形成された。
- ② これに対し、カオリナイト、アルナイト等の酸性変質帯はNE-SW性のフラクチャーの規制を受けているので、uplift に関係する。
- ③ 流体包有物の最低均質化温度は現在の坑井温度測定値と比較的調和しているので、現在に近い時期に、包有物がトラップされたと考えられる。

**Table III. 1-1 Summary of Geothermal and Geological Histories of the Sierra La Primavera Geothermal Area**



Remarks TYA: thousand years ago.  
 MYA: million years ago.

## 第2節 シミュレーション法による地熱賦存量の評価

### 2.1 シミュレーション法の概要

地熱貯留層の評価には種々の方法があるが、貯留層の特性が不均質かつ異方性であり、生産歴が長い場合は、グリッド・モデルによる貯留層評価手法が用いられることが多い。

グリッド・モデル等の貯留層シミュレータを用いた貯留層評価とは、種々の開発計画に対して生産性がどう変化するか、また貯留層の物理的挙動がどう変化するかを、定量的に予測するための技術である。このためには、一般的に次の3段階の作業が要求される。

#### (1) 地熱貯留層の数理的モデリング

一般的に貯留層の数理的モデリングとは、系全体にわたる物理的状态を定量的に記述した予備モデル(概念モデル)を作成することである。ここで言う物理的状态とは、貯留層の形状と地質、岩石特性の空間的分布(密度、孔隙率、浸透率、熱容量等)、流体特性の空間的分布(温度、圧力、水飽和率等)である。更に生産井、還元井の場所、流量等の記述、及び系の周辺での熱や流体の補給等にかかわる境界条件がこの中に含まれる。

#### (2) 地熱貯留層モデルの構築(history match)

対象の系に対して推定された物性分布、並びに生産・還元量を貯留層シミュレータに入力し、計算結果を得る。

この場合、計算結果としては、任意の時期の温度・圧力分布、水飽和率分布等が出力される。また入力値として仮定されるものとしては、貯留層への熱や流体の補給、孔隙率および浸透率分布、地質構造、さまざまな岩種についての熱的性質、対象の系の形と大きさである。

次に計算結果を対象の系についての既知の事実と比較する。すなわち圧力変化の経時変化、噴出流体の温度やエンタルピー等について計算結果と、観測データの比較が行われる。

通常、計算結果と観測結果を比較してみると、はじめの予備的モデルが不十分で、変更を加える必要が出てくる。そこでフィールド・データの再評価を行い、予備モデルを修正する。そして再び貯留層シミュレータによる計算を行い、その計算結果と観測結果との比較を行う。

この繰り返しの過程は、計算結果と観測事実の間に満足できる一致（マッチ）が得られるまで続けられる。

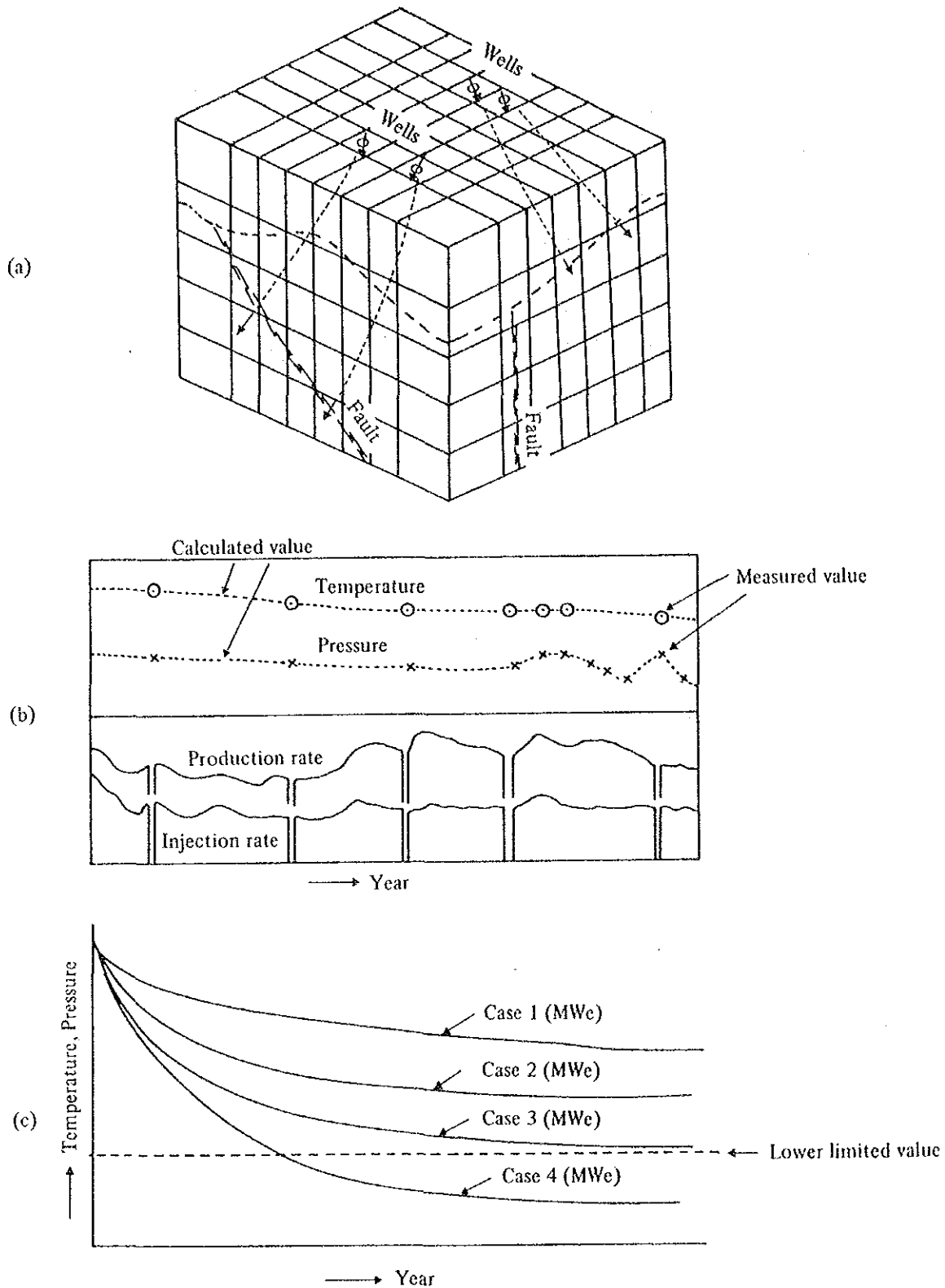
### 3) 将来予測 (prediction)

上述したヒストリー・マッチングの過程を通して得られた最終モデル（最適モデル）は、生産性予測や貯留層の物理的挙動予測を行う将来予測シミュレーションの入力として使用することが可能である。

そこで、この最終モデルを入力値として、種々の生産・還元計画に対する貯留層の温度・圧力・水飽和率等の変化や、生産性の変化を定量的に予測する。

なお生産性の変化を高い精度で予測するには、これまでの段階で用いられてきた貯留層シミュレータの他に、坑井内流動モデルの存在が、この段階で不可欠となる。

以上の3段階を概念的に図示すると Fig. Ⅲ.2-1 のようになる。



(a) Mathematical grid modeling of reservoir  
 (b) History matching against measured values  
 (c) Prediction based on best matched model Case 3 (MWe) is adequate capacity in this figure.

Fig. III. 2-1 Conception of Reservoir Simulation



## 2.2 シミュレータの概要

ラ・ブリマペーラ地域の貯留層評価を行う際に使用した貯留層シミュレータは、多成分の2相流を取り扱うことのできる3次元ダブル・ポロシティ・グリッド・モデルである。この貯留層シミュレータは、質量保存式およびエネルギー保存式を完全陰解法による差分方程式で表わし、これらの方程式をNewton - Raphson法により線形化し、その補正係数を1 lineの逐次過緩和法 (Successive Over - Relaxation Method: ILSOR) により解いて行くものである。

以下に、この貯留層シミュレータで用いられている質量並びにエネルギー保存式の基本型を示す。

### a) エネルギー保存式

$$\begin{aligned}
 & -\nabla \cdot (h_w \rho_w u_w + h_g \rho_g u_g) - \nabla \cdot U_c + q_{vw} h_w + q_{vg} h_g + q_{Lv} \\
 & = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_w S_w u_w + \phi \rho_g S_g u_g) + \frac{\partial}{\partial t} [(\rho c)_l (1 - \phi) T] \\
 & \dots\dots\dots (3-2-1)
 \end{aligned}$$

### b) 質量保存式

$$\begin{aligned}
 & -\nabla \cdot (\rho_w u_w + \rho_g u_g) + q_{vw} + q_{vg} \\
 & = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_w S_w + \phi \rho_g S_g) \dots\dots\dots (3-2-2)
 \end{aligned}$$

ここで、

$\nabla$  : ハミルトンの演算子 (Hamiltonian operator)

$$\nabla \cdot F = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial F}{\partial z}$$

$\rho$  : 流体密度 (fluid density)

$u$  : 流速 (convective velocity)

$U_c$  : 伝熱量 (conduction rate)

$h$  : 比エンタルピー (specific enthalpy)

$T$  : 温度

$S$  : 飽和率

$\phi$  : 孔隙率 (porosity)

$t$  : 時間

$q_v$  : 生産、還元量 (source or sink)

$q_{Lv}$  : 熱損失 (heat loss or gain)

$(\rho c)_f$  : 地層の熱容量 (formation specific heat)

{ 添え字 }

w : 液相

g : 気相

v : 単位体積当り (per unit volume)

## 2.3 評価のためのグリッドモデル(数理的モデル)の作成

ラ・プリマベラ地域のシミュレーションでは、当該地域の貯留層が部分的に2相状態になると予想されたため、ダブル・ポロシティー・タイプのグリッド・モデルを用いることにした。なお、貯留層内を流動する流体、並びに生産・還元される流体は純水として扱い、溶存成分の影響はないとした。

### (1) グリッド・レイヤー分割

グリッド・レイヤー分割のうちまず平面的なグリッド分割については次のような考えの下に実施した。

- ① 第Ⅱ章 2.1 の地熱貯留層の拡がりから推定したように、NW-S E方向に約2 km、NE-S W方向に約1.5 km<sup>2</sup> (面積約3 km<sup>2</sup>) の範囲が入るように設定した。
- ② すでに、CFE ( J・Rosas E., 1988 ) によって推定されている貯留層の範囲2.73 km × 1.545 kmの範囲も包括した。
- ③ 既存坑井もすべてグリッド内に入るようにし、一つのグリッドに2坑井が入らないように分割した。
- ④ 性能がよく、かつ、本地域の貯留層の中心部に掘削された坑井については ( PR-1、5、8、9、11、12、13 )、100 m毎の正方形グリッドに入るようにし、それ以外については周囲部ほど広い長方形とした。
- ⑤ 主要地質構造およびMT法における主低比抵抗帯が包括されるようにした。

以上の考えのもとに、NW-S E方向に4.8 km ( 20 分割 )、NE-S W方向に4.2 km ( 18 分割 )、計20.16 km<sup>2</sup>の範囲を設定した。

( Fig. Ⅲ.2-2 参照 )。

次に、立面的なレイヤー分割については次のような考えの下に、5レイヤーとした。

- ・レイヤー1 ( 海拔1,800~1,300m, 厚さ500m ) — 主としてタラ凝灰岩が分布する層で、一部コルディリェーラン火山噴出物上部も含まれる。逸泥が多く、節理や引張りフラクチャーがよく発達する good permeable レイヤーである。
- ・レイヤー2 ( 海拔1,300~500m, 厚さ800m ) — コルディリェーラン火山噴出物上部層から一部下部層にかかる部分で、断層通過箇所を除き、逸泥はなく、impermeable レイヤーである。地表の断裂系がそのまま延長できる“浅部”はこのレイヤーまでである。
- ・レイヤー3 ( 海拔500~-100m, 厚さ600m ) — コルディリェーラン火山噴出物

下部層の安山岩質の部分に相当し、縦型フラクチャーが発達している。深度1,400～2,000m位になるので、本地域の主たる坑井のフィード・ポイントはこのレイヤーに含まれ、“主貯留層”となっている。

- ・レイヤー4（海拔－100～－900m，厚さ800m）－ いわゆる基盤花崗岩類の上位までのコルディリェーラン火山噴出物下部層に相当する。

このレイヤーを貫いているのはPR-9だけなので詳しい実態は把握できないが、less permeableレイヤーと考えられる。

- ・レイヤー5（海拔－900～－1,500m，厚さ600m）－ 基盤花崗岩類に相当するレイヤーである。

以上の5レイヤーの分割図をFig. Ⅱ.2-3に示し、グリッド・レイヤー分割のブロック図をFig. Ⅱ.2-4に示す。

## (2) 境界条件

以上のように $20 \times 18 \times 5 = 1,800$ グリッドを設定したが、実際の計算に当っては、この範囲の外側にバッファゾーンを設けている。バッファゾーンの長さ（立面的には厚さ）は無限であるが、設定したグリッドとバッファゾーン間の境界条件は以下のとおりである。

- ① 水平4方向、垂直2方向の全境界は、初期圧力・温度を維持しながら系内と流体の授受を行なう開放系として取り扱った。
- ② 境界面の初期温度は、隣接ブロックの初期温度と同値、また初期圧力は貯留層から地熱流体を生産していない初期状態で流体の流動が発生しない圧力とした。
- ③ 境界面の浸透率は、その面と接するブロック群の平均的な浸透率ランクと同様の値を与えた。最適モデルでのこれら値は、水平方向の4面については一律 $0.12 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、垂直方向の浅部側境界面は $360 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、そして深部側境界面は $120 \times 10^{-15} \text{m}^2$ であった。

したがって、実際の計算グリッドは $22 \times 20 \times 6 = 2,640$ グリッドである。

## (3) 各坑井のフィード・ポイント位置並びに流量割合

フィード・ポイントの深度を調査する最適な方法は、噴気中のスピナー検層である。また同時に温度や圧力を測定することにより、各フィード・ポイントの流入流体温度や貯留層圧力を算出することは可能である。

また生産井には、噴気に関与するフィード・ポイントが複数個存在していることが多

い。このような場合、各フィード・ポイントからの噴気流量割合は、噴気中のスピナー検層、温度検層並びに圧力検層の結果を解析し、各フィード・ポイントの圧力ポテンシャルと透水性から決定される。

しかし、本地域ではこのような検層は実施されていないので、第Ⅲ章第1節で詳しく述べたような逸泥、Hg、Asデータ、温度曲線およびピボット点を参考としてフィードポイントを決め、Table III.2-1のように配置した。

#### (4) 初期温度分布

ここでいう初期とは、ラ・プリマベラ地域で坑井が初めて連続的に噴気を開始した1981年(昭56)5月20日を指すものと定義する。

ラ・プリマベラ地域の初期温度分布は、当時、広範囲な地下深地温分布や観測井・テスト井による温度検層、地層温度の推定などが不十分なために明瞭ではない。

そこで測定時期はまちまちであるが、各坑井の最もスタンディング・タイムの長い温度回復試験結果を用いて、温度等温度線図を作成し、それを初期温度分布とした。但し、PR-5およびPR-11に関しては、スタンディング・タイムがそれぞれ約61時間、24時間と短く、まだ温度的に回復途上であると判断されたため、これらの検層結果は採用していない。また、スタンディング・タイムが短い坑井も含めて、静止状態での温度検層が実施されていない坑井に関しては、流体包有物から推定される温度を参考とした。なお、フラクチャーとマトリックスの初期温度は等しいものとして取り扱った。

#### (5) 初期圧力分布

ラ・プリマベラ地域の初期圧力分布に関しても、初期温度分布と同様、十分明らかでない。但し、当地域で最も早く連続的に噴気を開始したPR-2を対象に、1981年(昭56)5月6日静止状態での圧力検層が実施されている。その結果、PR-2の主フィード・ポイントが存在するブロック(12, 18, 3)の初期圧力値が、135ataであることが判明している。

そこで、上述した温度分布の下で、no flow状態の初期状態シミュレーションを実施し、当該ブロックの初期圧力が135ataになるような初期圧力分布を再現した。なお、フラクチャーとマトリックスの初期圧力は等しいものとして取り扱った。

#### (6) 初期浸透率分布

① シミュレーションを開始する前のフラクチャー浸透率分布は、地質状況(断層やフラクチャー存在位置)とMT法の結果を基に、各ブロック毎にランク付けを行った。

本地域では垂直方向のフラクチャーが卓越しているために、各レイヤーともに水平方向の浸透率は垂直方向の浸透率から1ランク低下させたランク付けで初期浸透率分布を決定した。この場合、浸透率の絶対値は坑井試験による kh 値を参考とした。このようにして設定した浸透率分布はヒストリーマッチングの間に徐々に修正され、最適モデルでは Figs. III.2-29 ~ 32 に示すような分布となった。

② マトリックス浸透率については、PR-7, 9, 11, 12, 13 から採取されたコアについて測定した結果、平均  $0.0126 \text{ mD}$  ( $\equiv 0.0126 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ) となったのでこの値を用いた。

(7) 孔隙率、密度、熱伝導率、比熱

これらの物性値のうち、比熱を除く各値はコアの測定値を Table III.2-2 のように決定した。比率は一律  $0.265 \text{ kcal/kg/}^\circ\text{C}$  とした。

Table III. 2-2 Matrix Porosity Density and Thermal Conductivity in each Layer

| Layer   | Matrix Porosity (%) | Density ( $\text{g/cm}^3$ ) | Thermal Conductivity ( $\text{cal/cm/s/}^\circ\text{C}$ ) |
|---------|---------------------|-----------------------------|---|
| Layer 1 | 7.8                 | 2.19                        | 2.19  |
| Layer 2 | 17.3                | 2.31                        | 2.31  |
| Layer 3 | 12.5                | 2.45                        | 2.45  |
| Layer 4 | 6.7                 | 2.58                        | 2.58  |
| Layer 5 | 4.5                 | 2.71                        | 2.71  |

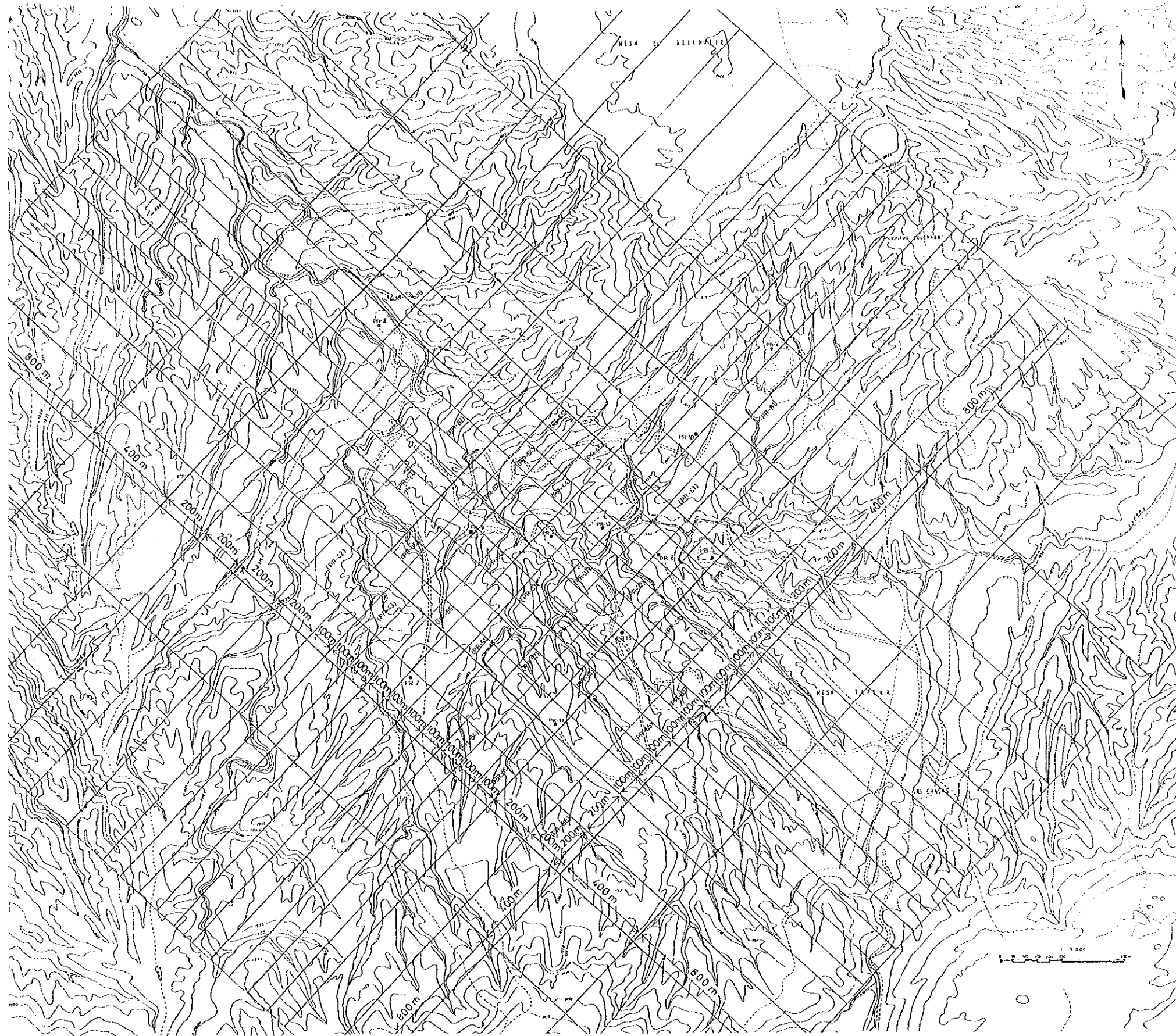


Fig. III. 2-2 Areal Computation Grid used to Simulate the La Primavera Field





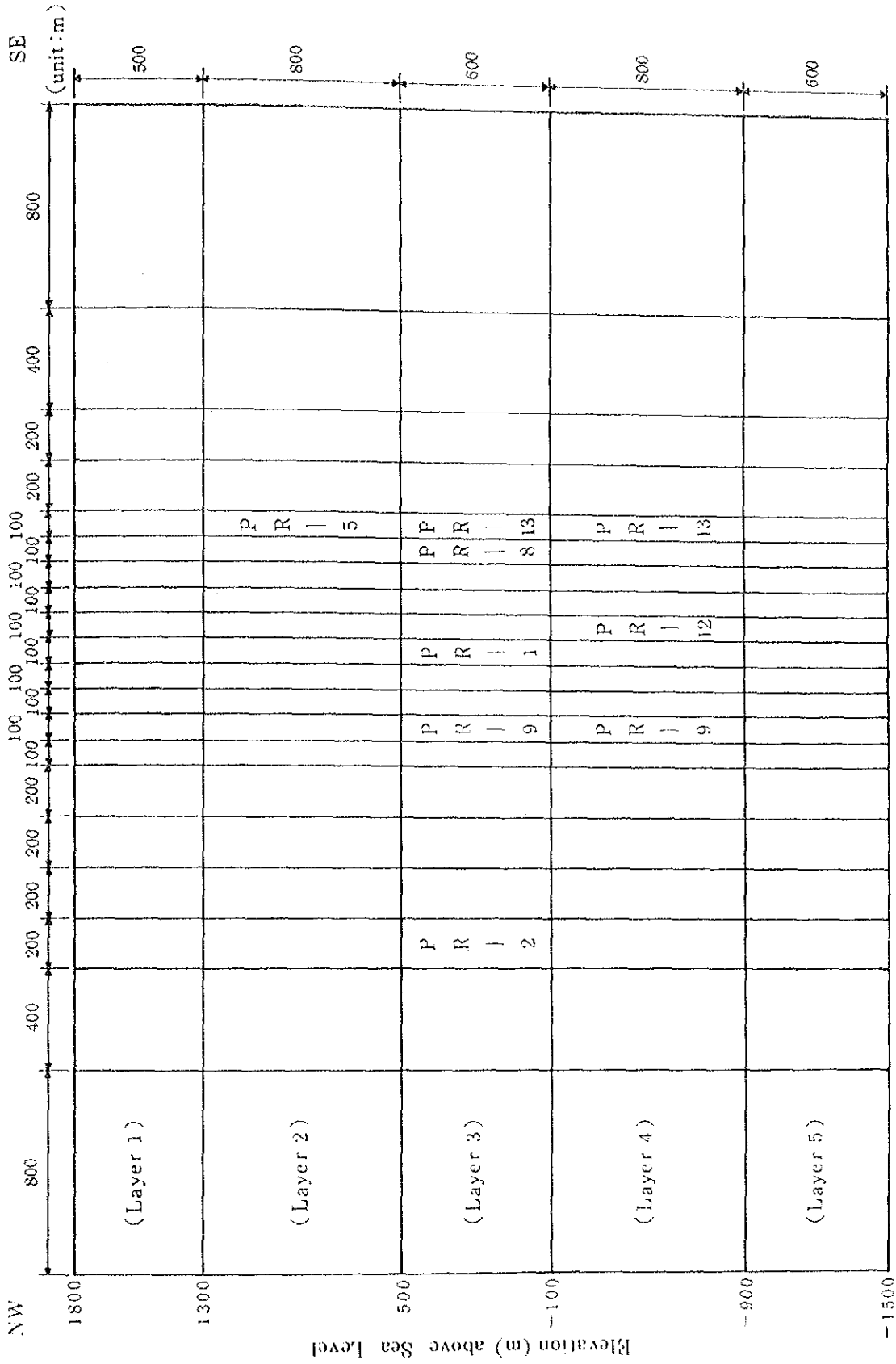


Fig. III. 2-3 Cross Section of Model used for the Simulation

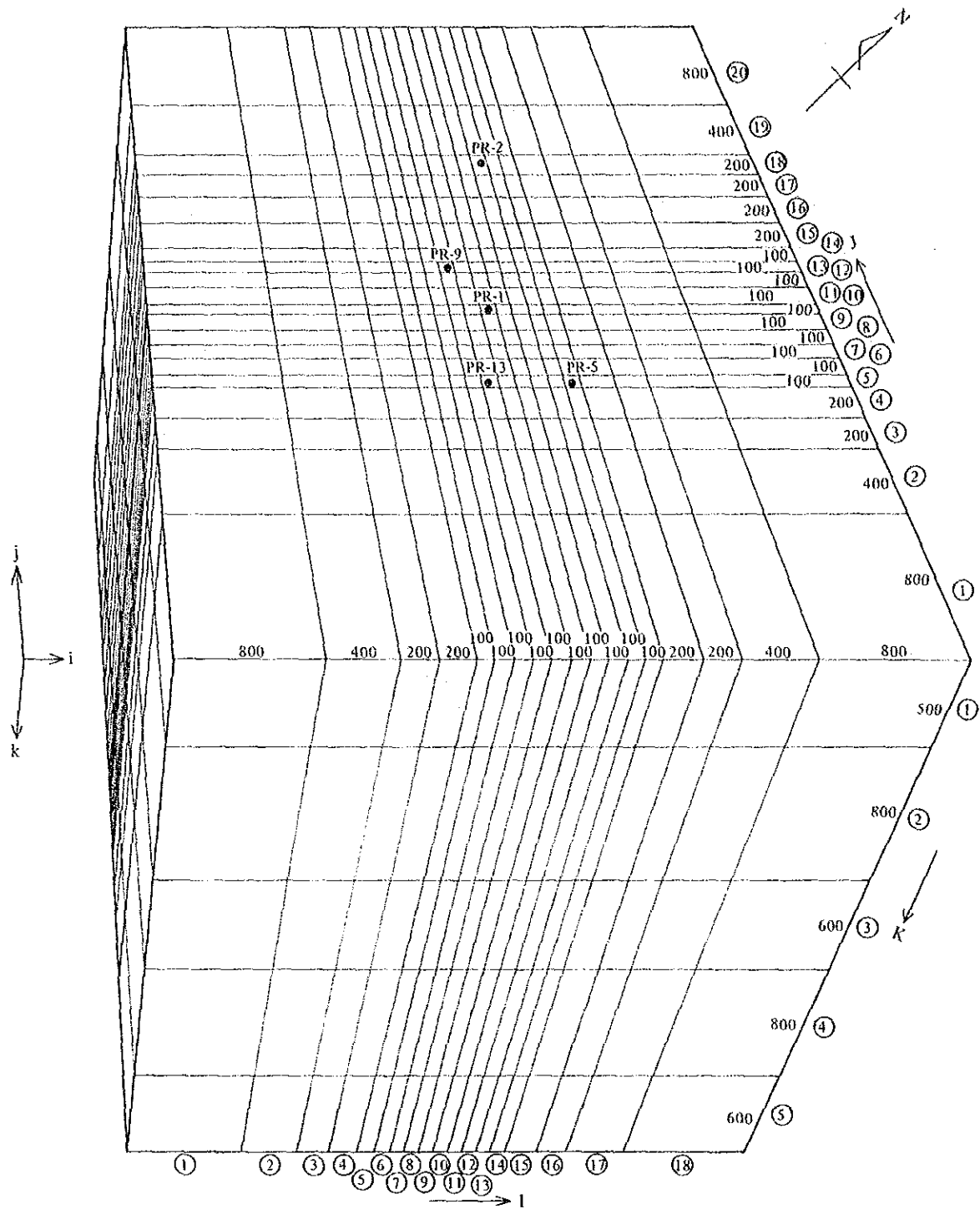


Fig. III. 2-4 Three Dimensional Model of the La Primavera Field

Table III. 2-1 Location of Feed Points and Flow Ratio

| Well  | Location |    |   | Flow Ratio (%) | Remarks  |
|-------|----------|----|---|----------------|--|
|       | I        | J  | K |                |  |
| PR-1  | 10       | 10 | 3 | --             |  |
| PR-2  | 12       | 18 | 3 | --             |  |
| PR-5  | 14       | 5  | 2 | --             |  |
| PR-8  | 13       | 6  | 3 | --             |  |
| PR-9  | 8        | 13 | 3 | 10             |  |
|       | 8        | 13 | 4 | 90             |  |
| PR-12 | 12       | 9  | 4 | --             |  |
| PR-13 | 9        | 5  | 3 | 95             | Do not produce during the period of history match simulation |
|       | 9        | 5  | 4 | 5              |  |

## 2.4 マッチングによる最適モデルの選択

### (1) 生産・還元流量

ラ・ブリマペーラ地域では、各坑井の流量測定が定期的に行われていないため、その経時変化が明らかでない。しかし各坑井の噴気流量特性（噴気流量V S、坑口圧力）がスポット的に測定されているほか、坑口圧力の経時変化も測定されている。そこで各坑井の生産流量の経時変化は、噴気流量特性を用いて、坑口圧力の経時変化から推定した。

またPR-2は、一時期還元井として使用された実績がある。この時の還元流量の経時変化に関しても、詳細は不明である。そこで積算還元量の経時変化から、平均還元流量を算出して用いた。また還元熱水の温度は、78℃を採用した。

このようにして推定された各坑井の生産・還元流量の経時変化を、Fig. 2-5～11に示す。

### (2) マッチング対象データ

本シミュレーション解析において、計算結果との比較に使用された観測データは、以下のとおりである。

- ・ 静止時の圧力検層による貯留層圧力
- ・ 噴気時の化学温度計による噴気流体温度

#### ① 貯留層圧力

ラ・ブリマペーラ地域の多くの坑井は、掘削終了後、十分なスタンディング時間をもって、静止中の圧力検層が実施されている。この圧力検層結果より、各坑井のフィード・ポイントが位置するレイヤーの中心深度における圧力を求め、これらを圧力に関するマッチング対象データとした。Figs. 2-13, 15, 17, 19, 20, 22, 24にこれらデータを示す。

#### ② 噴気流体温度

噴気流体温度とは、各坑井から生産される流体のフラッシュ前の熱水温度を意味すると定義する。

もし坑井内にフラッシュ開始点が存在するのであれば、噴気流体温度を最も確実に把握する方法は、噴気中の温度検層である。しかしながら、本地域では噴気中の温度検層があまり実施されておらず、またこれらの検層結果から、多くの坑井は地層内フラッシュをしていると判断された。そこで噴気流体温度の経時変化を示す指標として、ラ・ブリマペーラ地域で比較的定期的に行われている化学分析の結果に基づいて算

出された化学温度計を採用することとした。

化学温度計には、種々の経験式が公表されているが、ここではWhite ( 1965 ) と Ellis ( 1970 ) のデータによるNa/K温度計 ( Truesdell, 1976 )、Fournier and Truesdell ( 1973 ) によるNa/K温度計、そしてFournier and Truesdell ( 1973, 1974 ) によるNa-K-Ca温度計の3種類をとりあげ、どれが噴気流体温度を最も良く現わしているかを検討した。その結果Fournier and Truesdell ( 1973 ) によるNa/K温度計が、最適な化学温度計であると推定された。但しPR-2に関しては、Fournier and Truesdell ( 1973, 1974 ) によるNa-K-Ca温度計が最適であると判断された。各坑井の化学温度計の変化をFigs. Ⅲ.2-12, 14, 16, 18, 21, 23に示す。

### (3) マッチング結果

マッチングは1981年(昭56)5月20日を0.0年とし、1988年(昭63)6月30日までの2,589日間実施された。タイムステップは状況により異なるが、1日～30日の間である。

#### 1) マッチング結果

Figs. Ⅲ.2-12～24に、坑井毎のマッチング結果を示す。実測値と計算値の比較・検討を行なった坑井は、PR-1, PR-2, PR-5, PR-8, PR-9 ( レイヤー3 ), PR-9 ( レイヤー4 ), PR-12, PR-13 ( レイヤー3 ) の7坑井、8種類であり、全般的に満足できる一致が得られていると思われる。PR-9のNa/K化学温度に関しては、主フィールド・ポイントが位置するレイヤー4から噴気している流体の温度を反映しているとしてマッチングさせている。

なお、Figs. Ⅲ.2-25～28には、マッチングの結果得られた1988年(昭63)6月30日現在の温度・圧力・水飽和率分布を示す。また後述するように本ヒストリー・マッチングでは、主にフラクチャーの浸透率を修正することにより実測値と計算値の一致を再現させた。なぜ、フラクチャー浸透率を主として修正させたかは次のような考え方に基づいている。すなわち、これまでの坑内検層の結果から、当地域の坑井の多くは地層内フラッシュを起こすことが知られている。このことは坑井周辺の浸透率があまり良好でないことを意味するので、浸透率の値の調整がマッチングに大きく影響すると判断されたためである。マッチングの結果得られたフラクチャー浸透率の分布を、Figs. Ⅲ.2-29～32に示す。

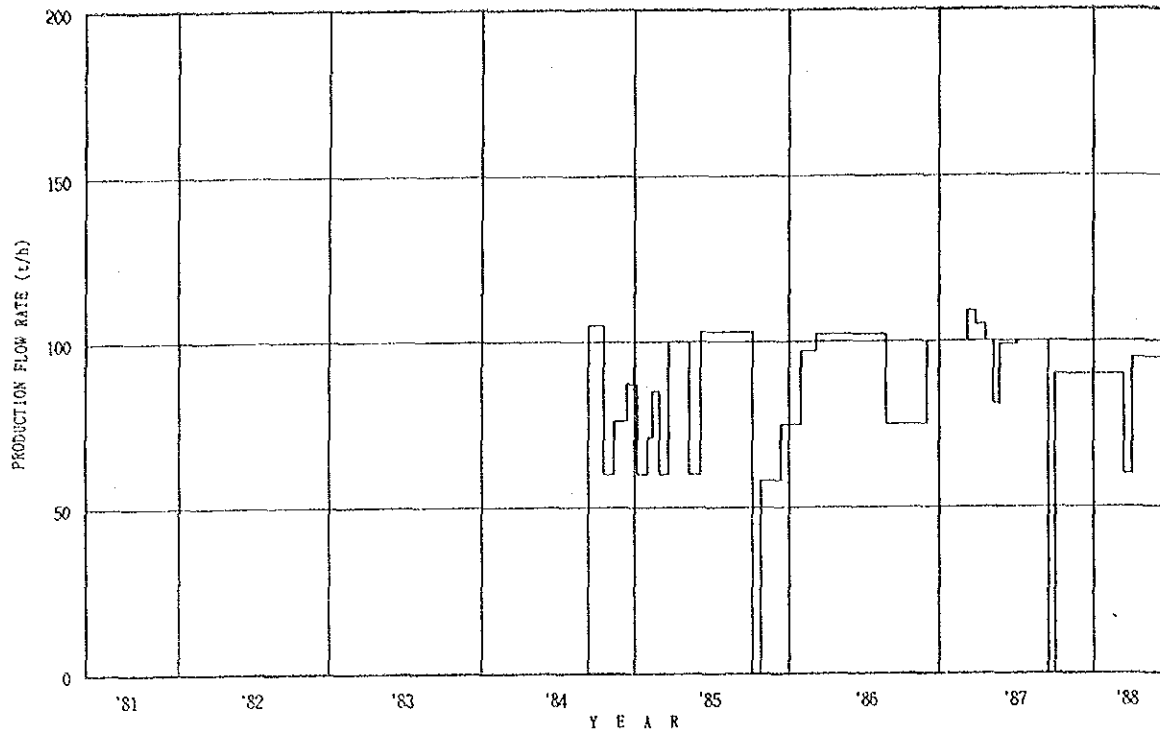


Fig. III. 2-5 Production Flow Rate of PR-1

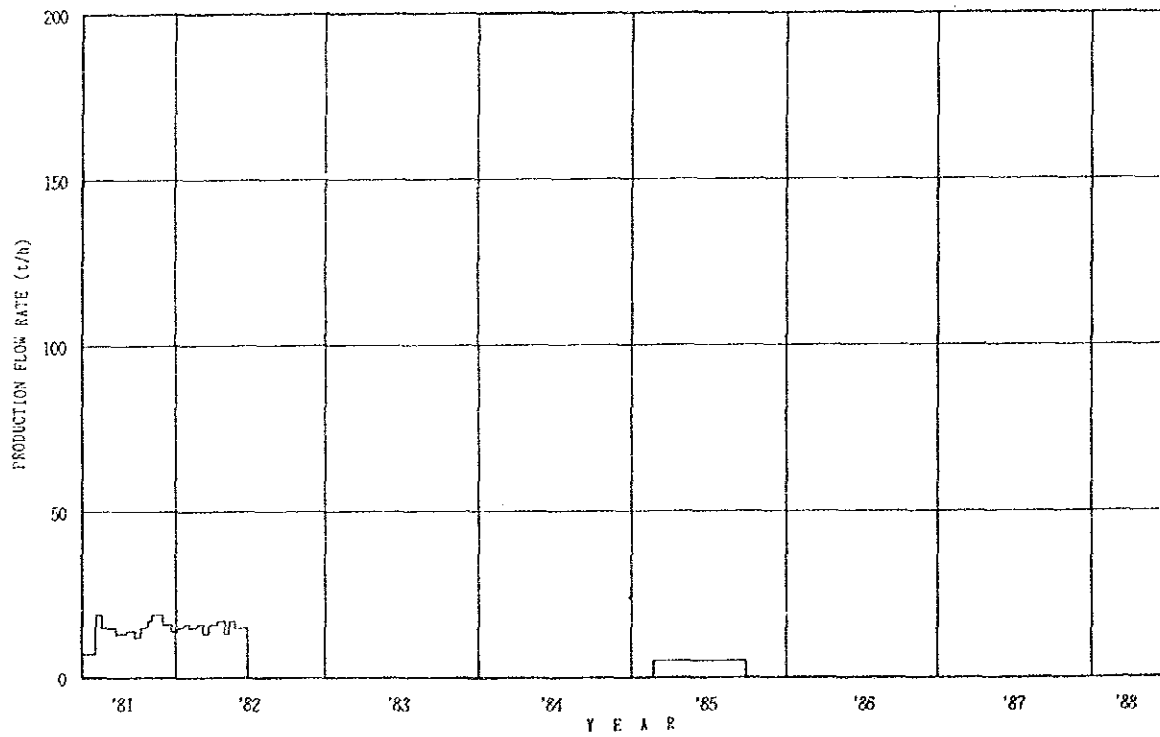


Fig. III. 2-6 Production Flow Rate of PR-2

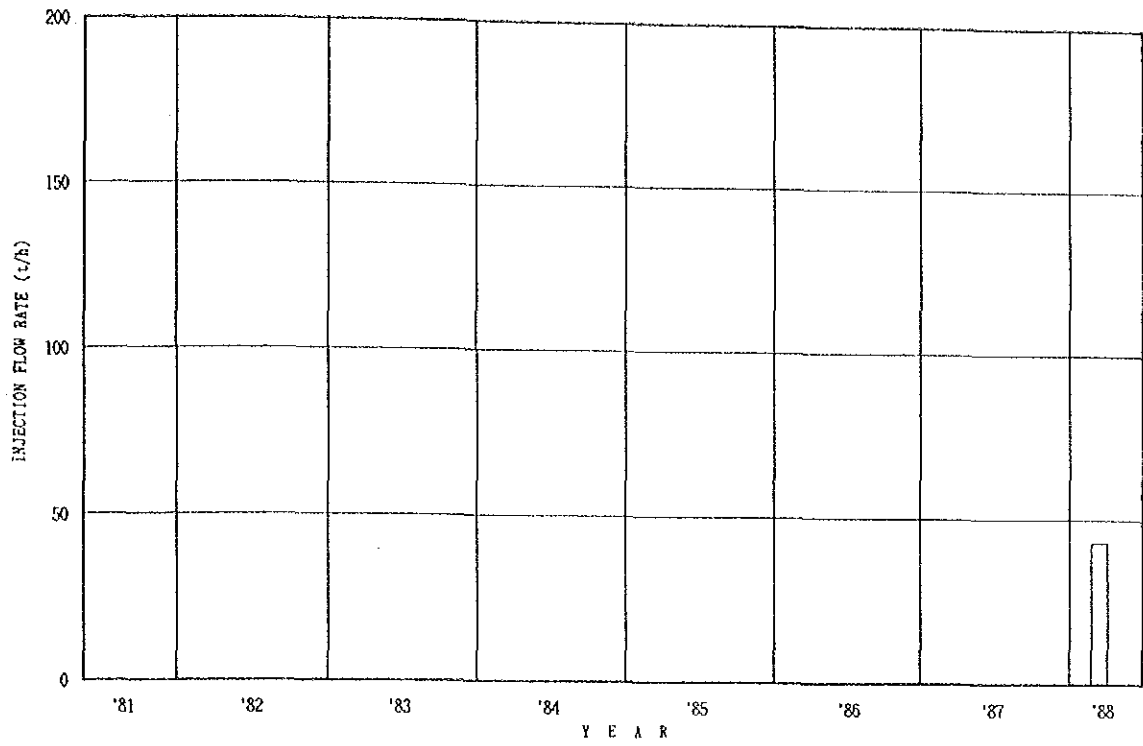


Fig. III. 2-7 Injection Flow Rate of PR-2

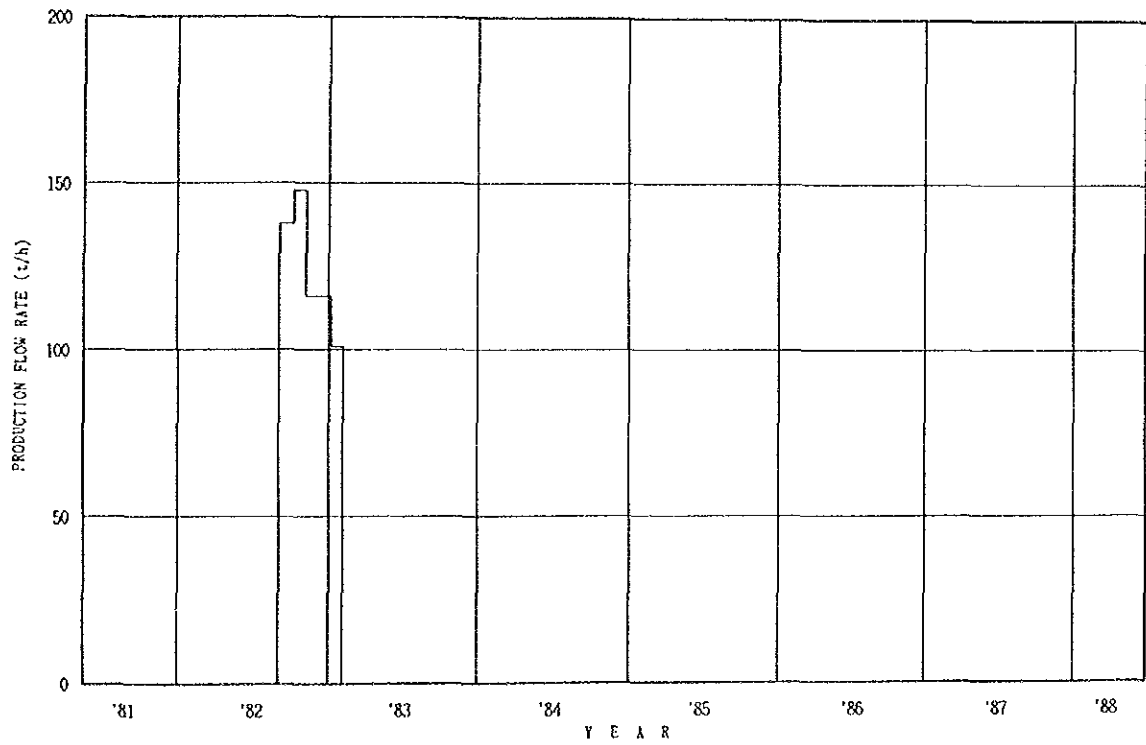
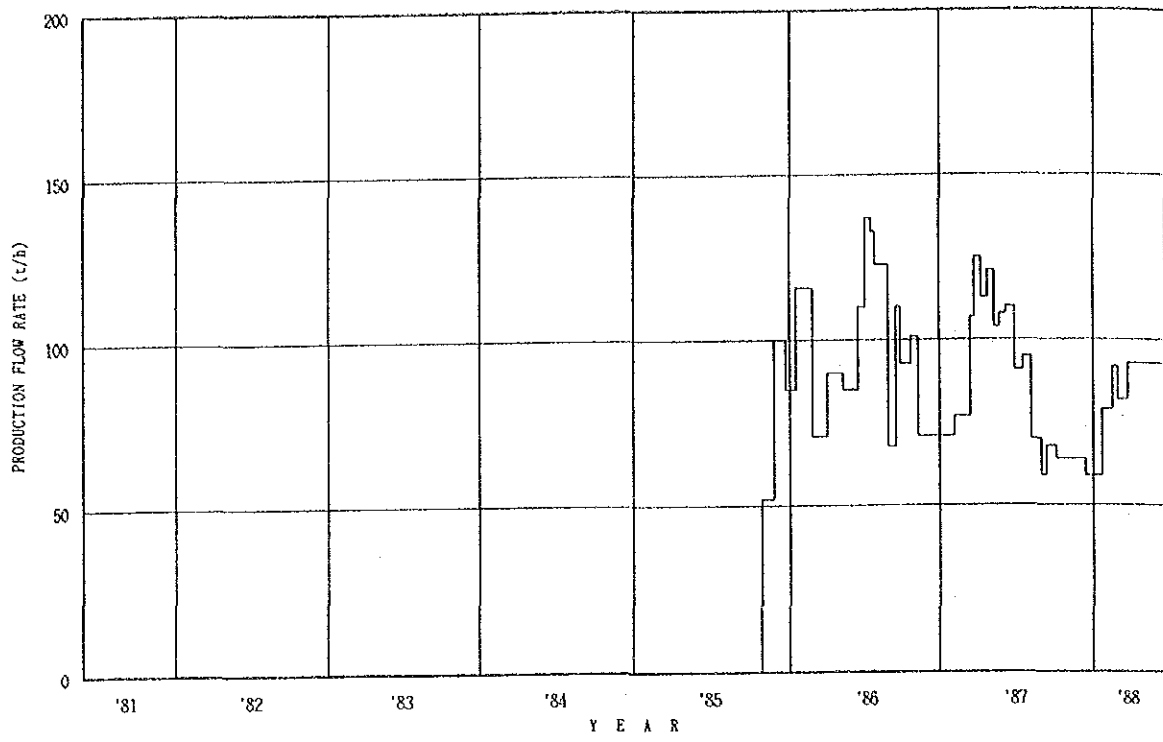
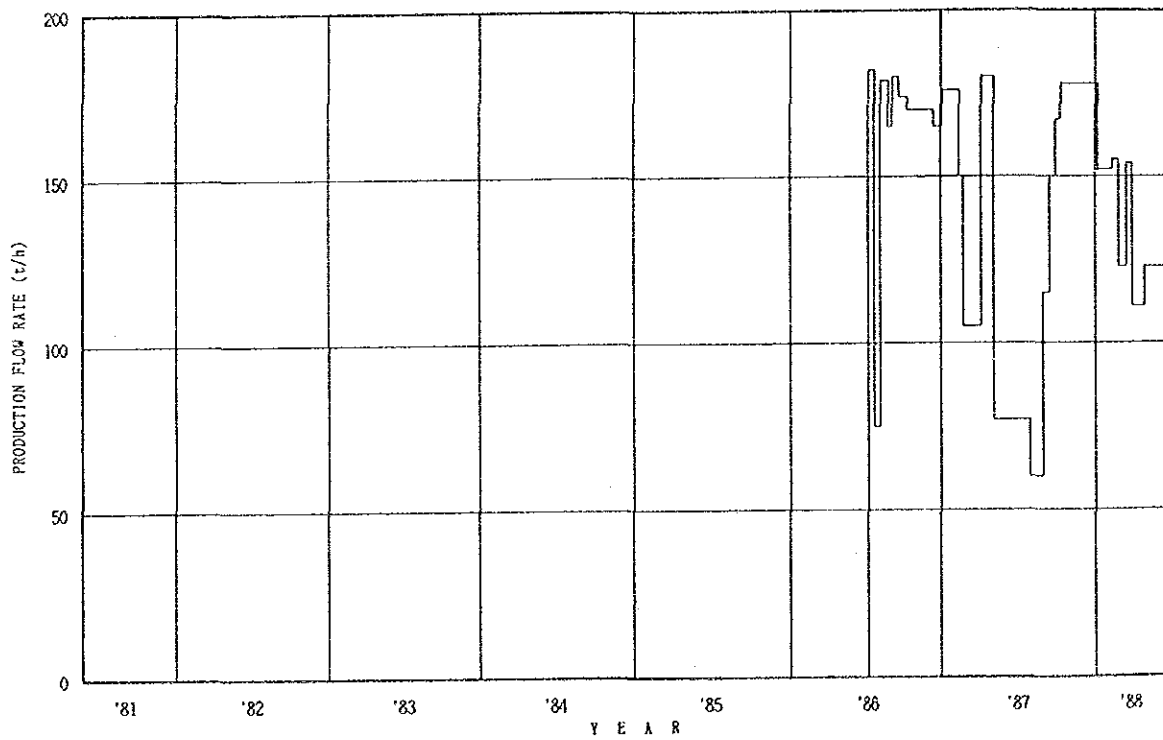


Fig. III. 2-8 Production Flow Rate of PR-5



**Fig. III. 2-9 Production Flow Rate of PR-8**



**Fig. III. 2-10 Production Flow Rate of PR-9**



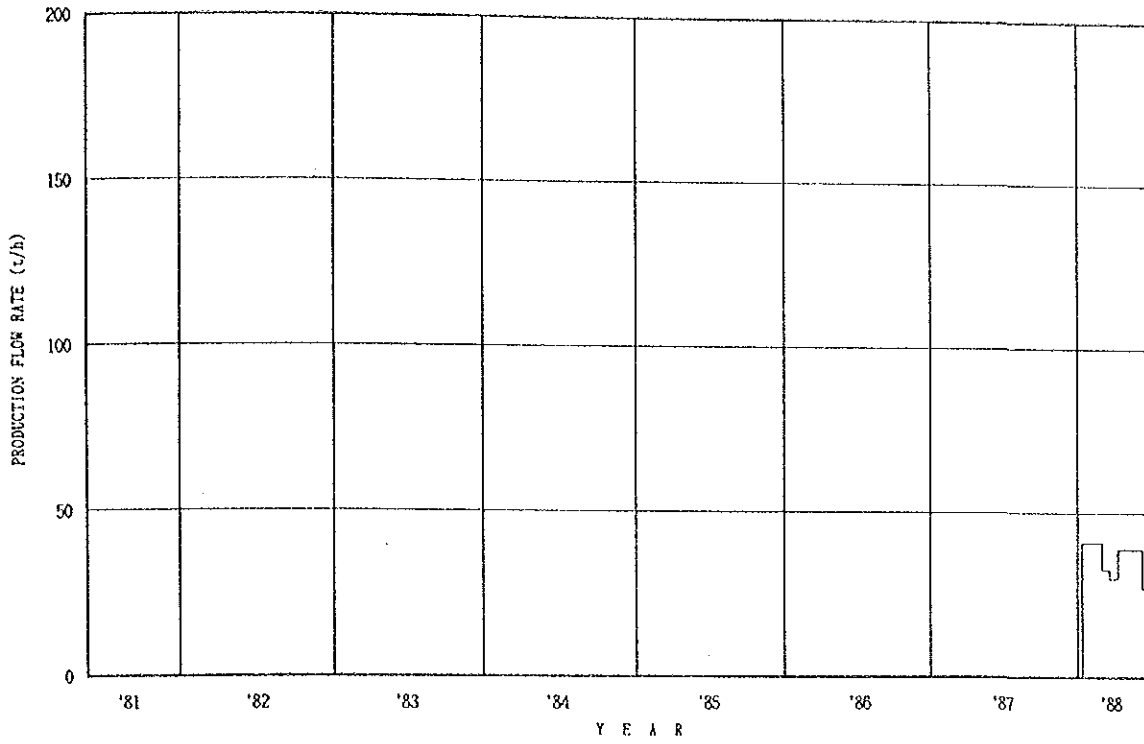


Fig. III. 2-11 Production Flow Rate of PR-12

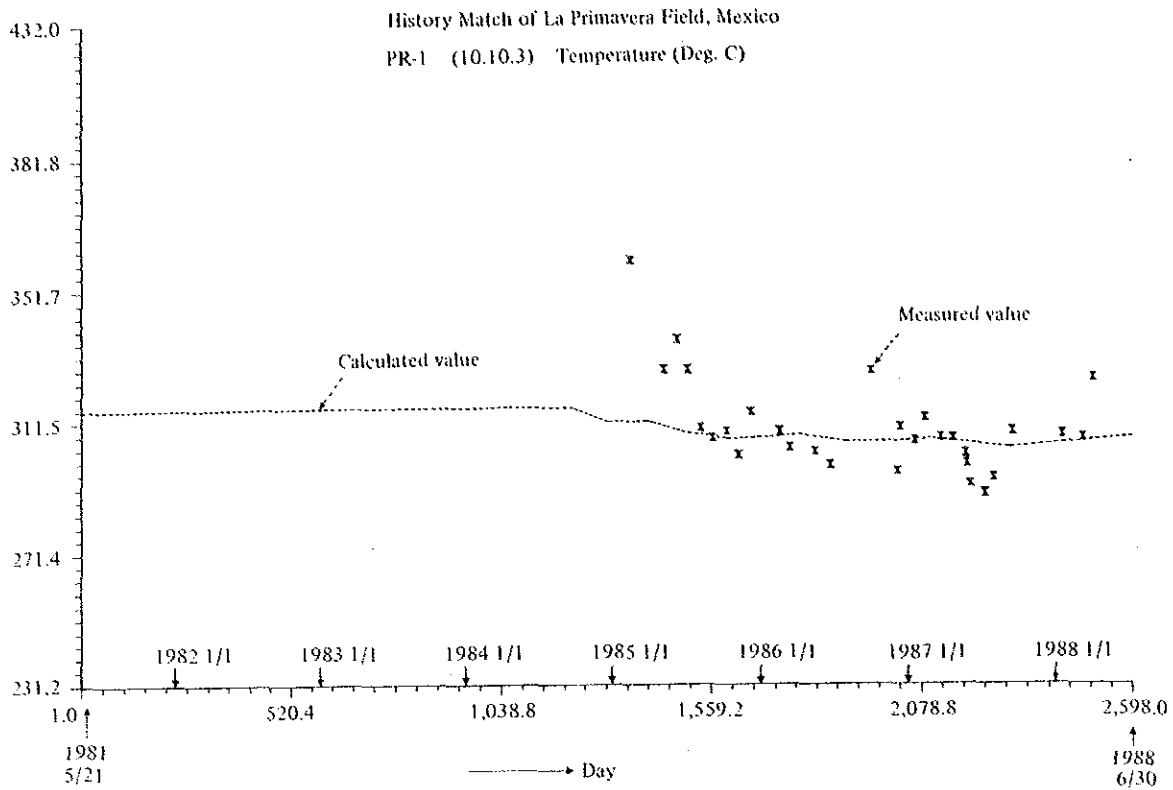


Fig. III. 2-12 Result of History Match of Temperature for PR-1

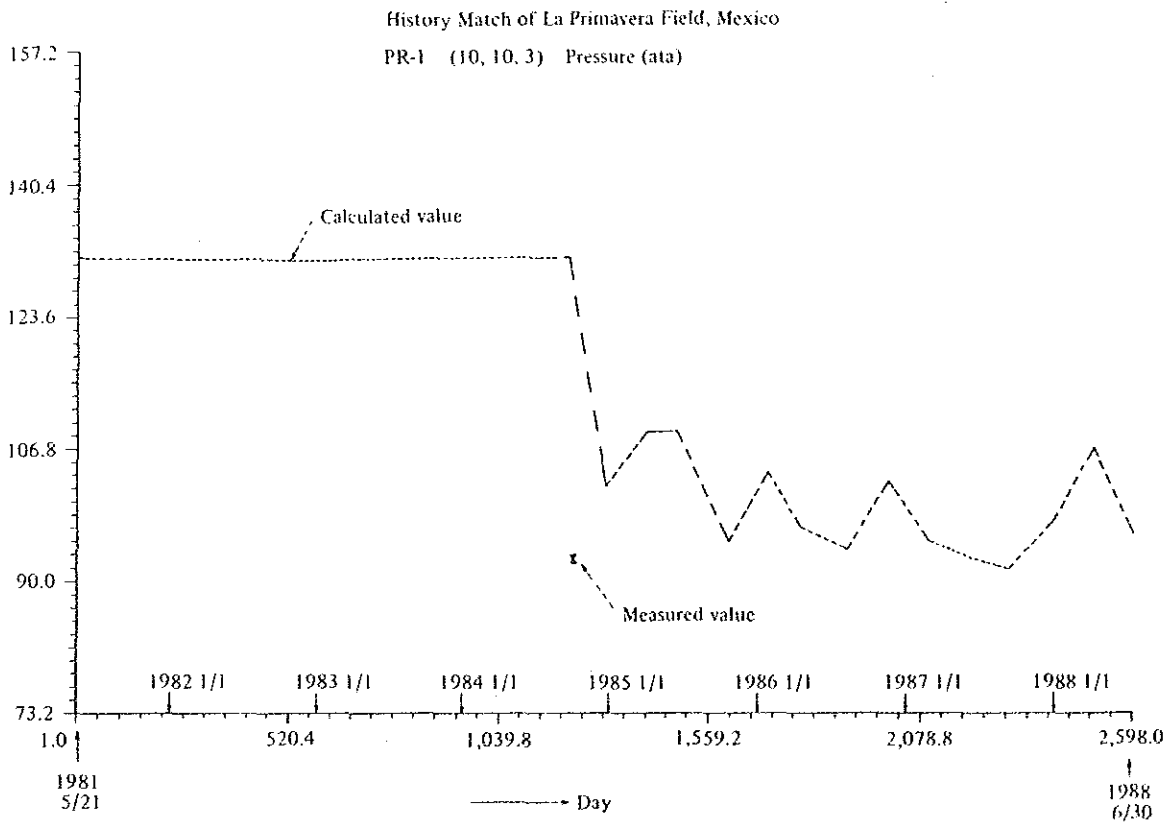


Fig. III. 2-13 Result of History Match of Pressure for PR-1

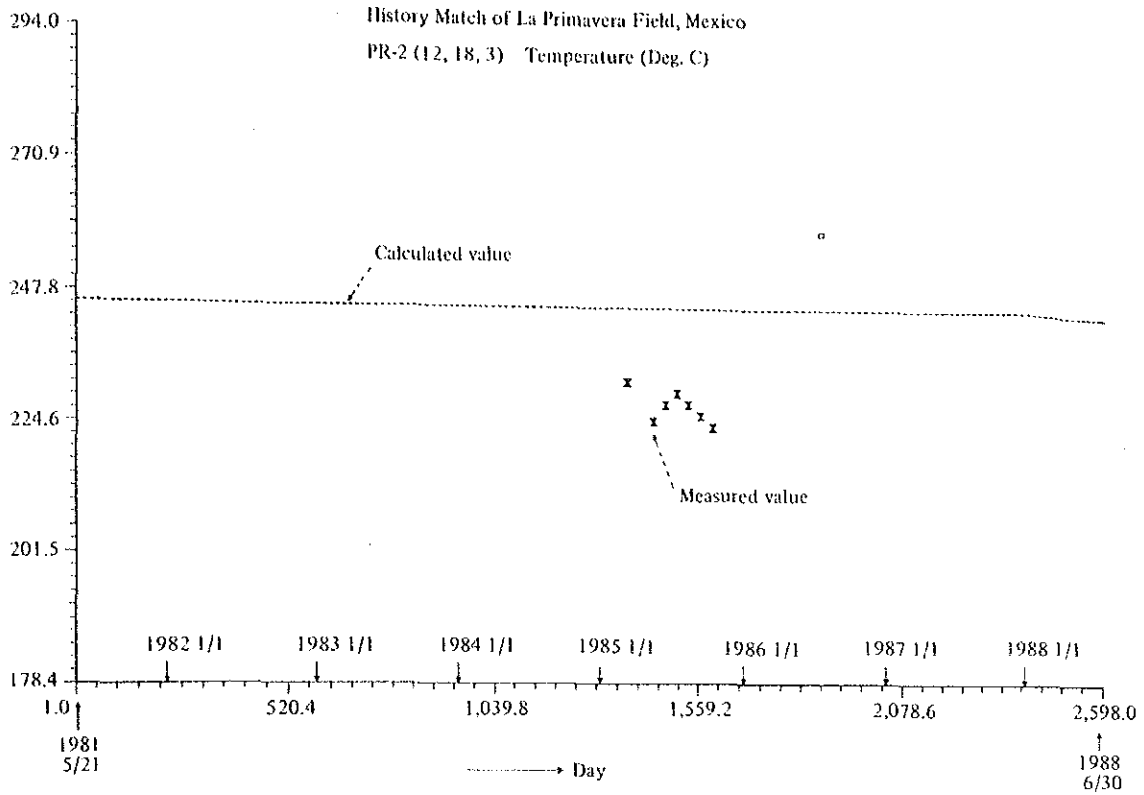


Fig. III. 2-14 Result of History Match of Temperature for PR-2

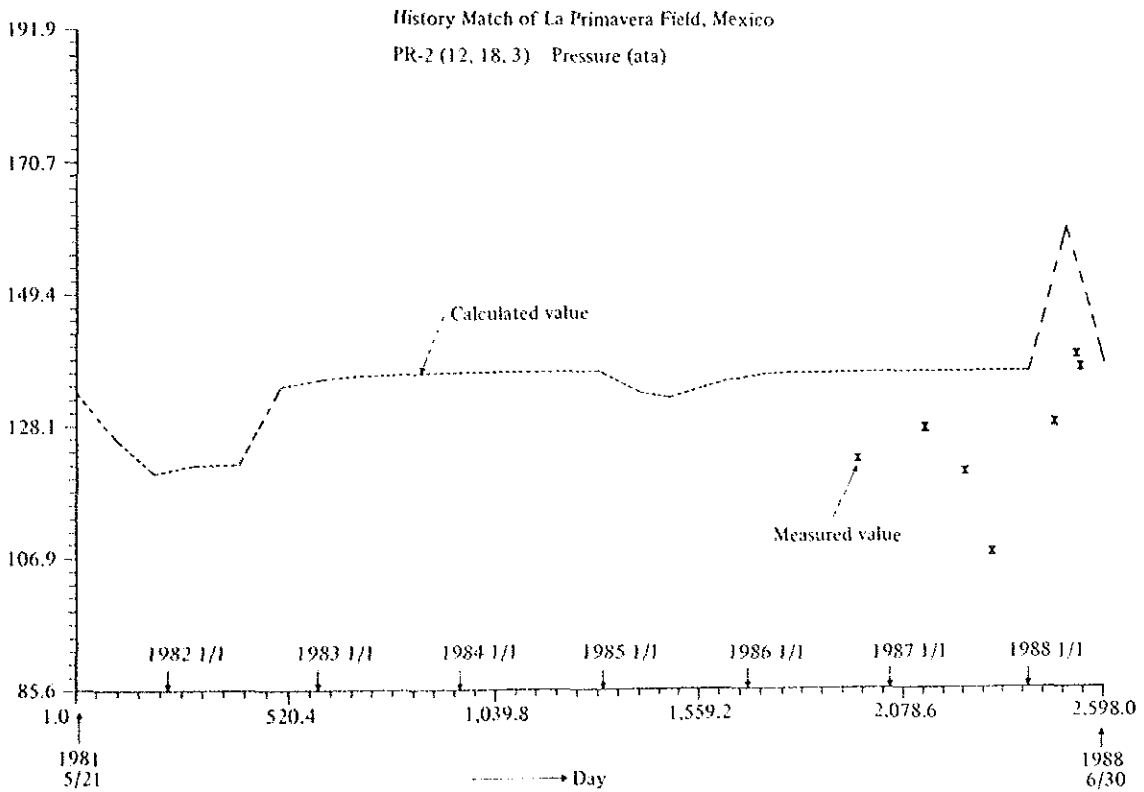


Fig. III. 2-15 Result of History Match of Pressure for PR-2

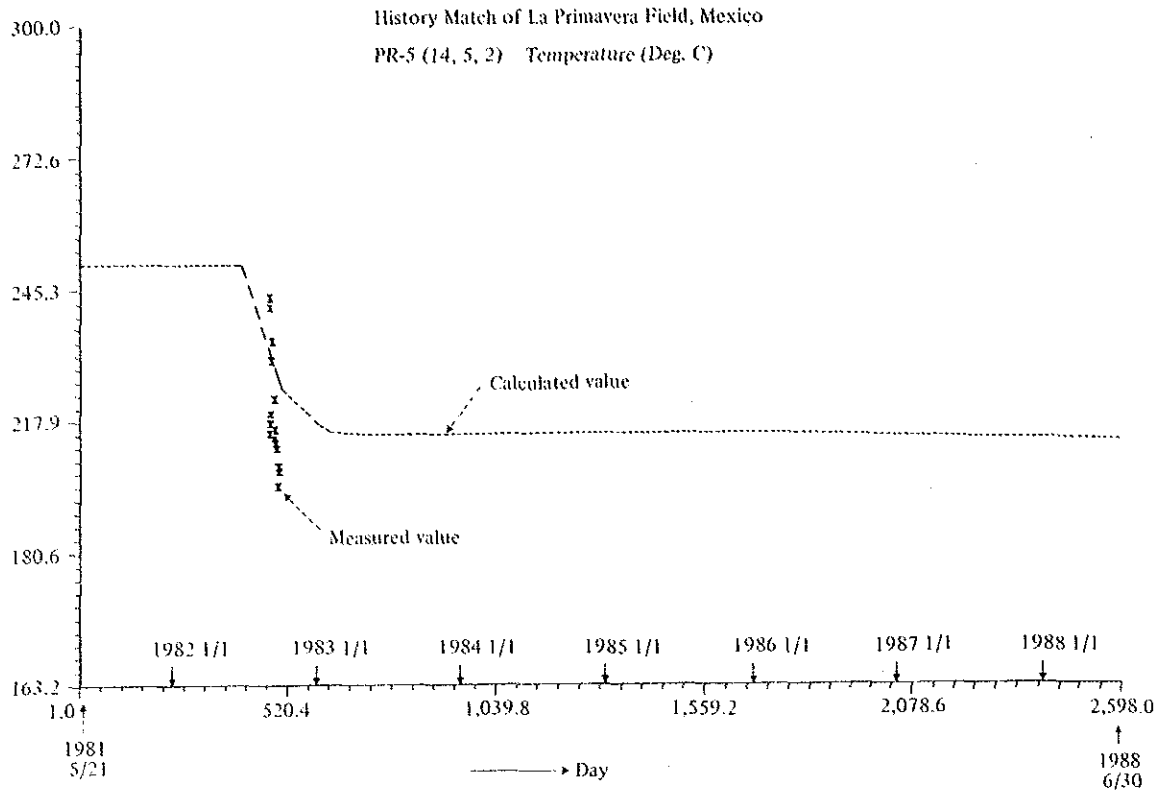


Fig. III. 2-16 Result of History Match of Temperature for PR-5

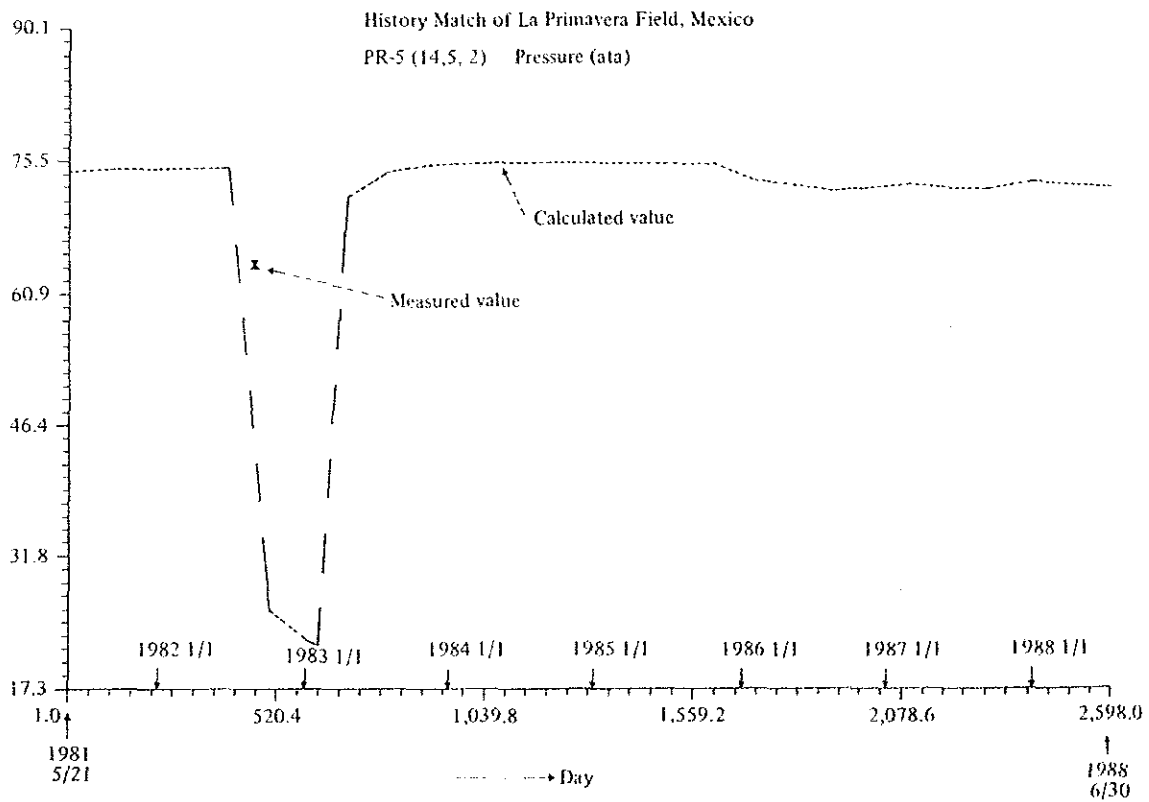


Fig. III. 2-17 Result of History Match of Pressure for PR-5

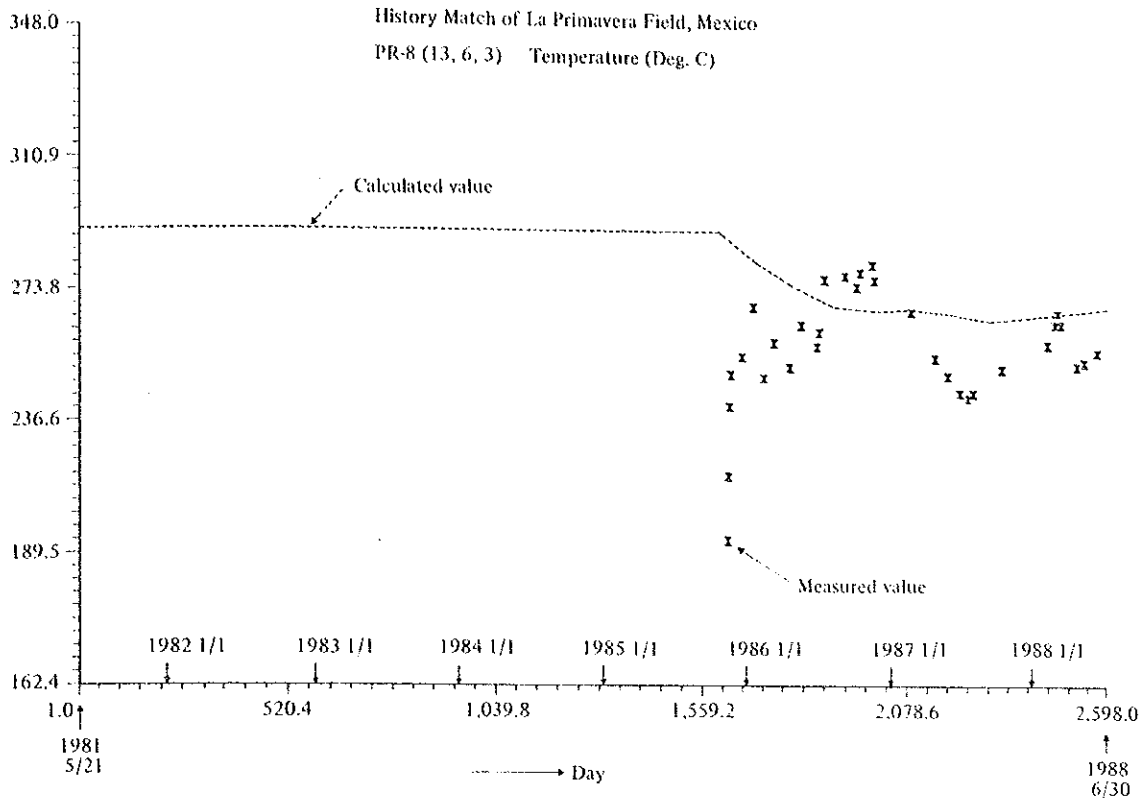


Fig. III. 2-18 Result of History Match of Temperature for PR-8

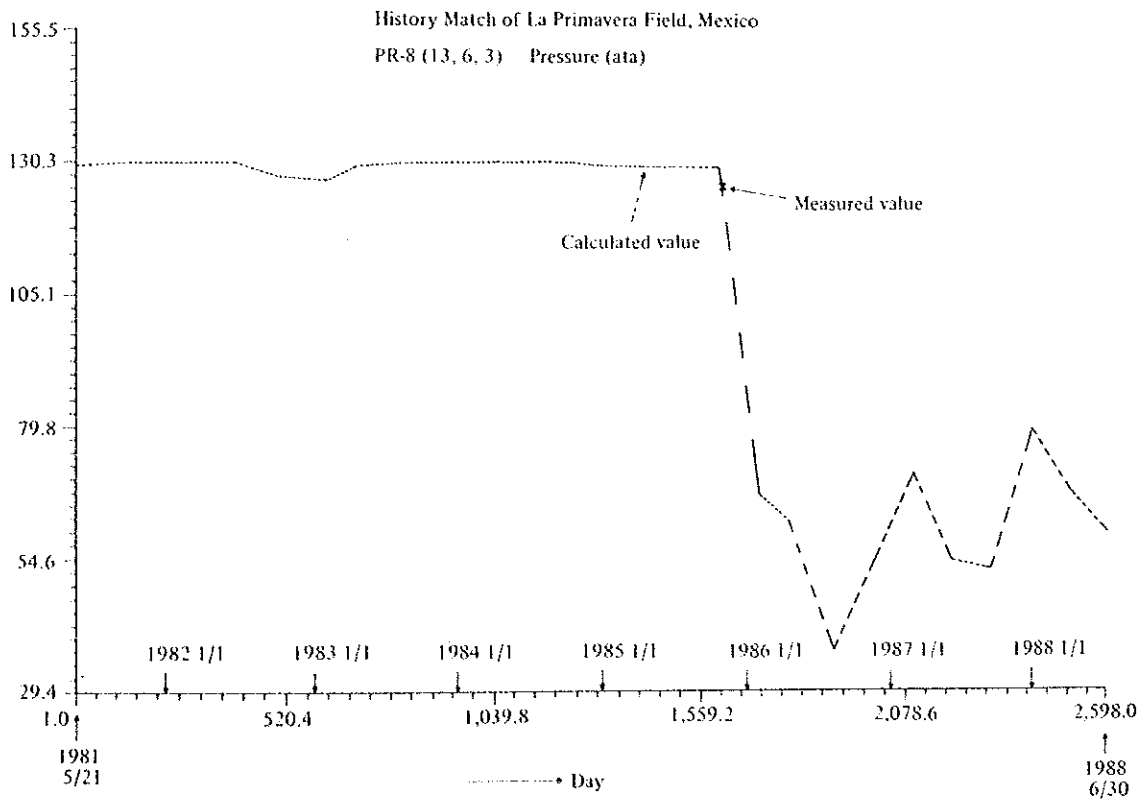
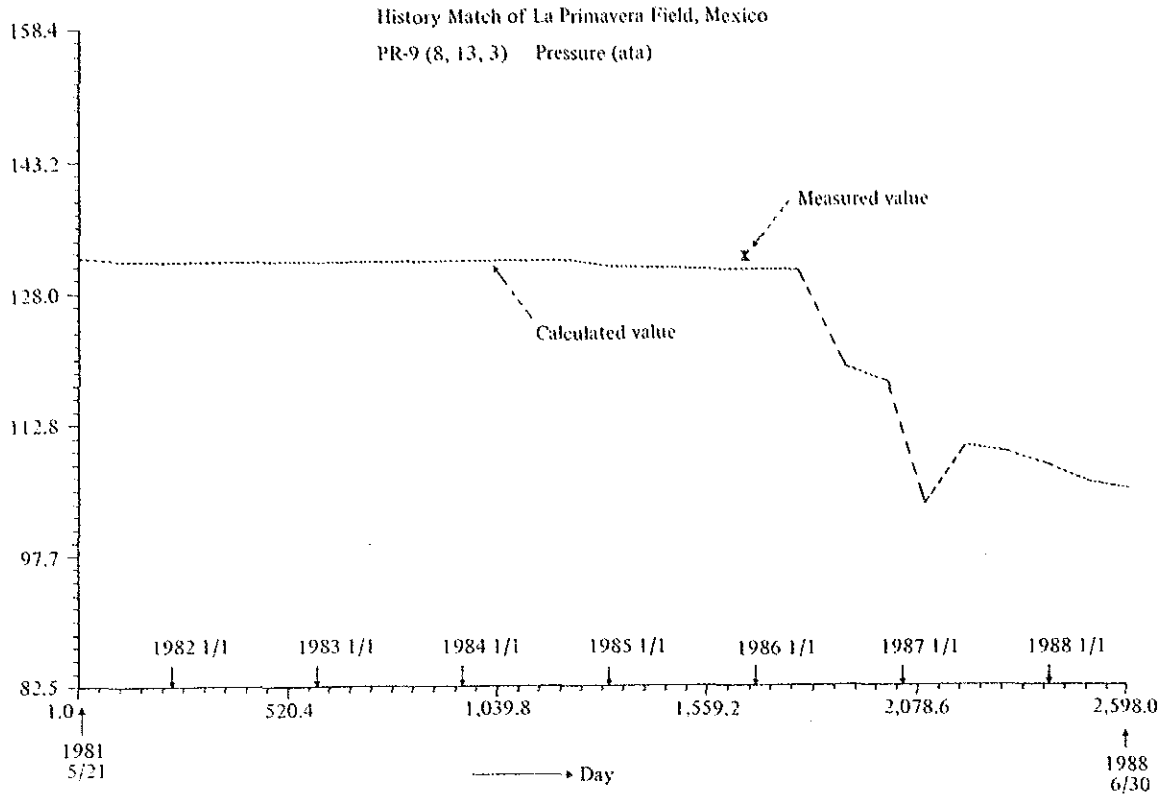
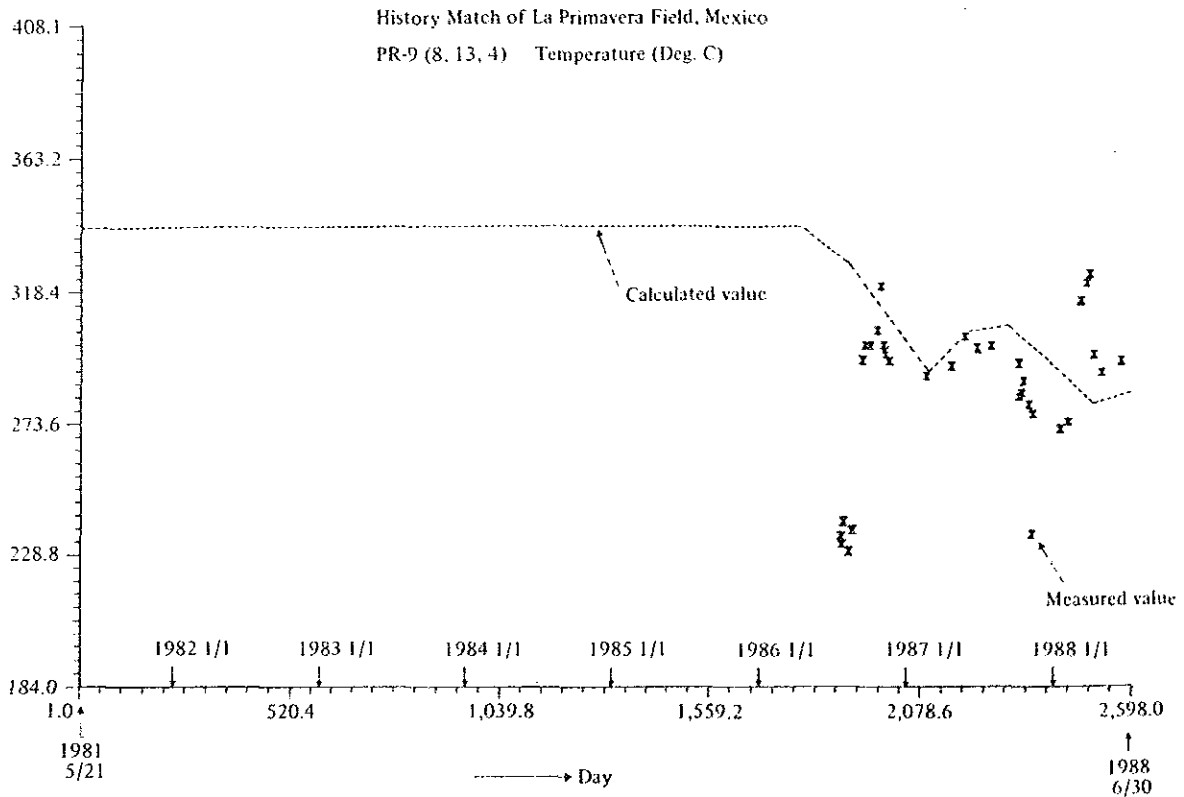


Fig. III. 2-19 Result of History Match of Pressure for PR-8



**Fig. III. 2-20 Result of History Match of Pressure for PR-9 (Layer 3)**



**Fig. III. 2-21 Result of History Match of Temperature for PR-9**

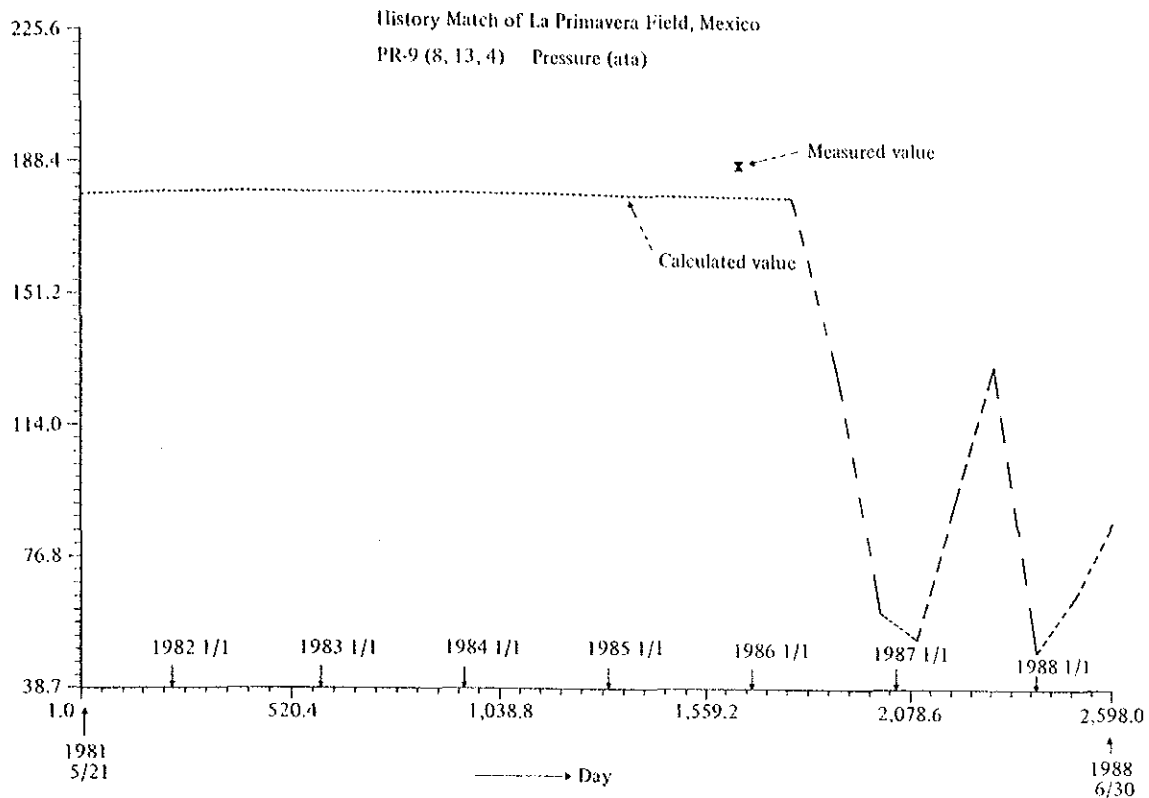


Fig. III. 2-22 Result of History Match of Pressure for PR-9 (Layer 4)

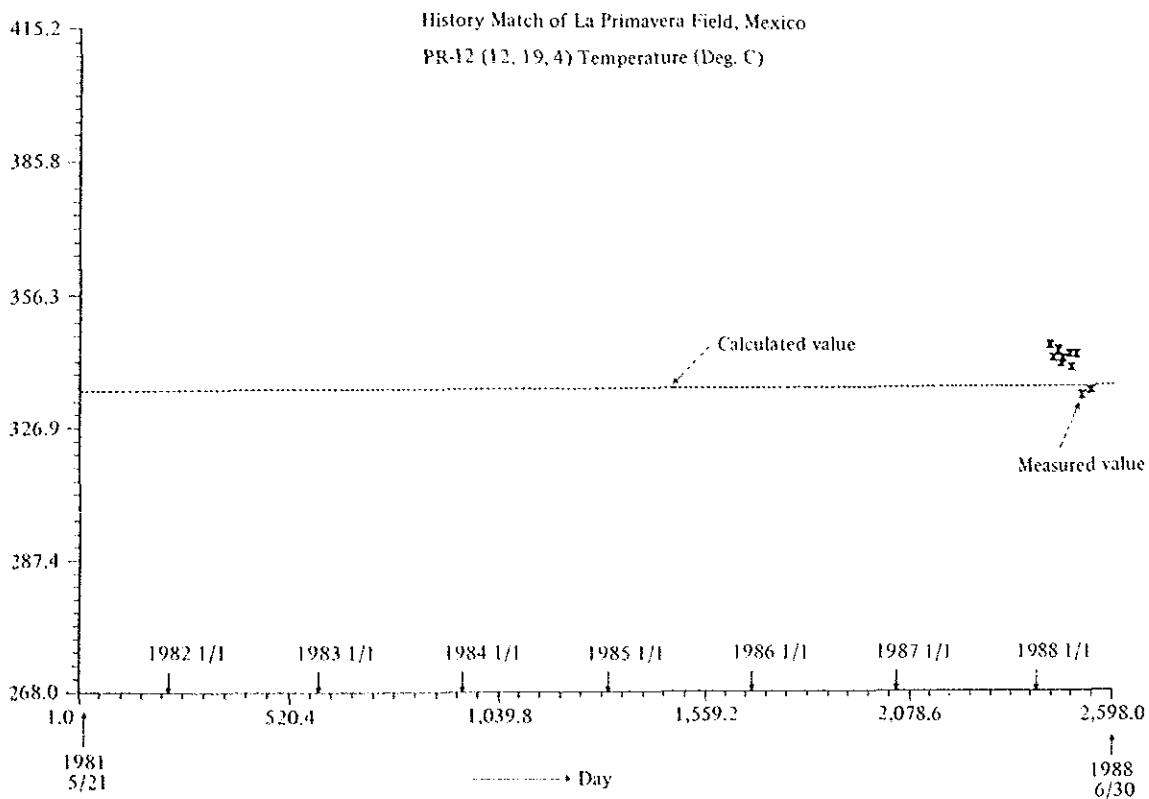


Fig. III. 2-23 Result of History Match of Temperature for PR-12

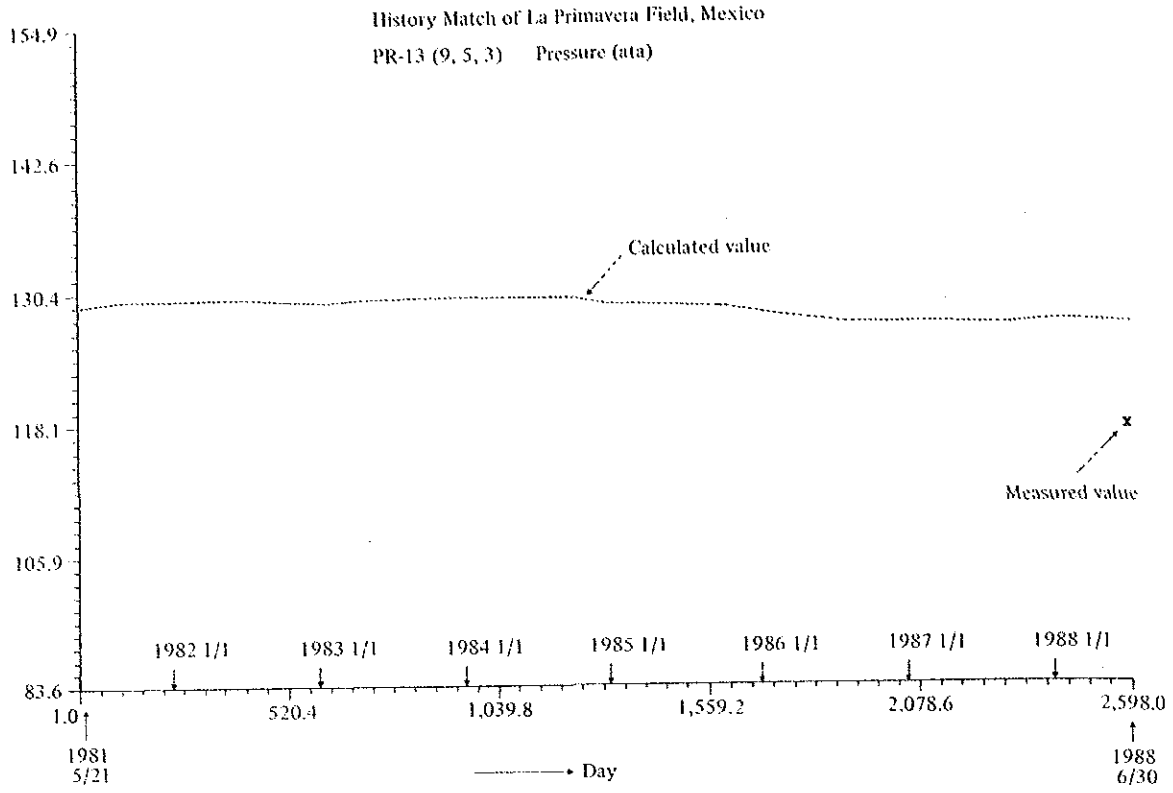


Fig. III. 2-24 Result of History Match of Pressure for PR-13



HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

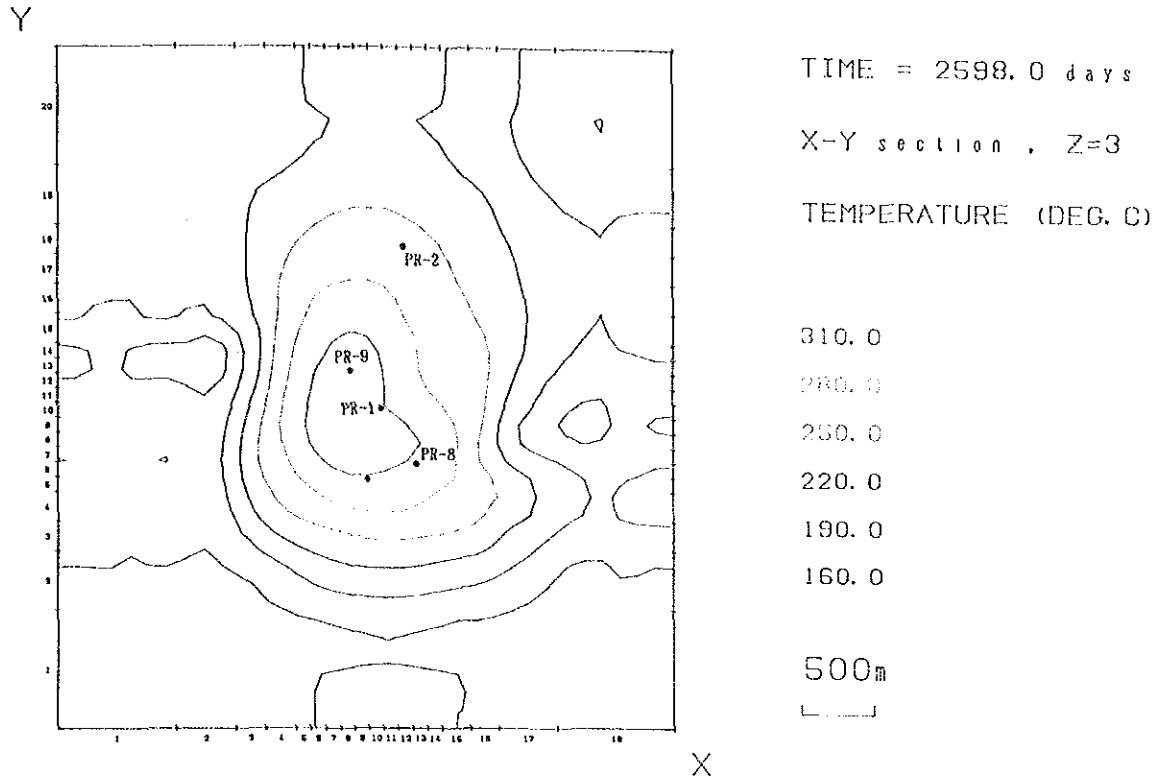


Fig. III. 2-25 Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 3

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

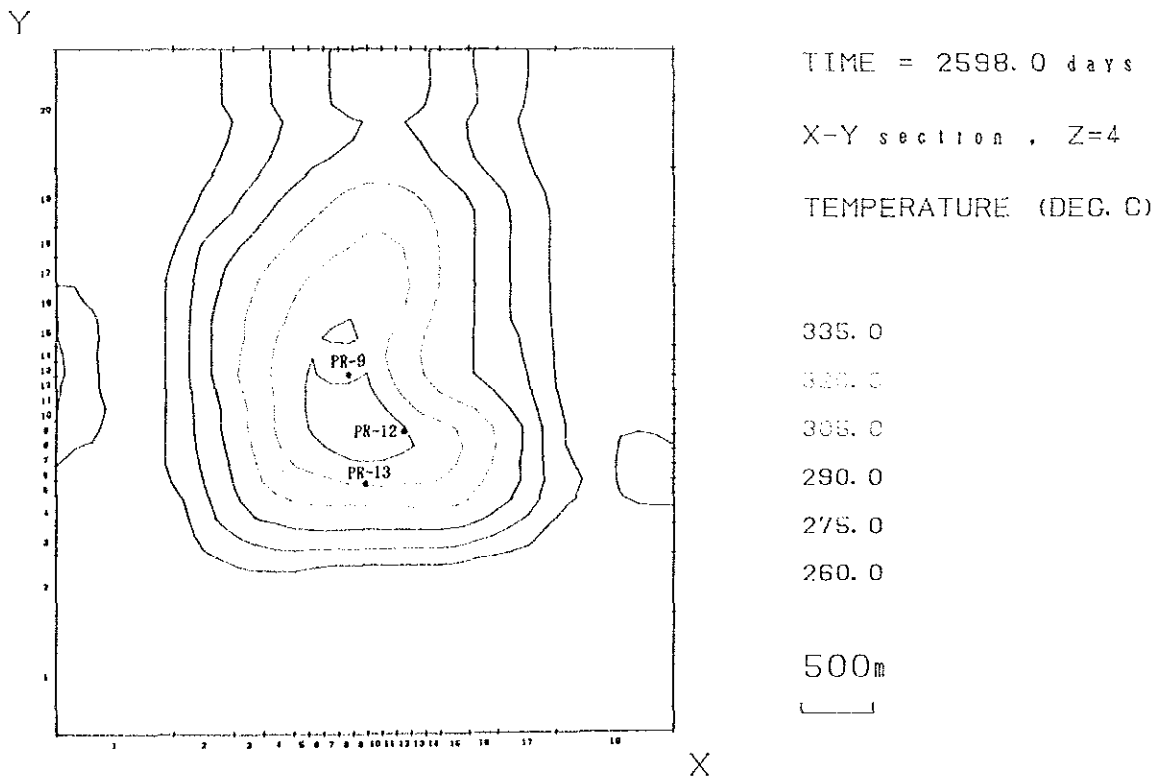


Fig. III. 2-26 Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 4

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

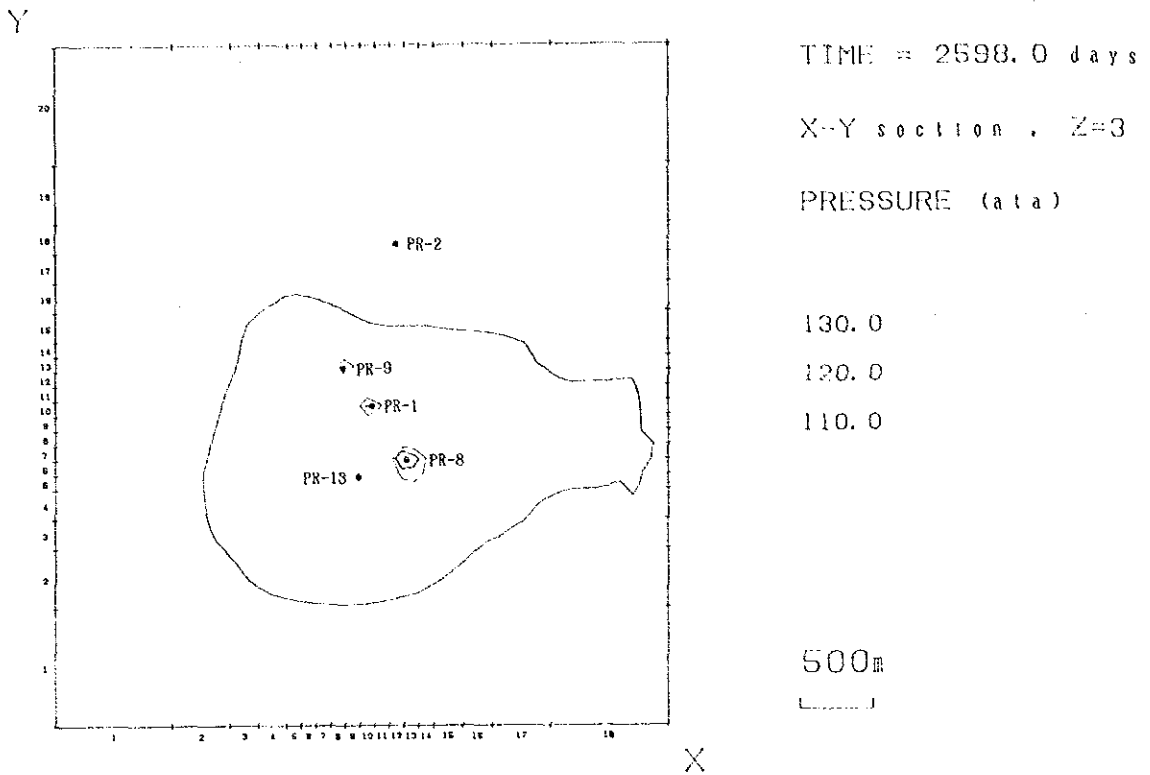


Fig. III. 2-27 Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 3

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

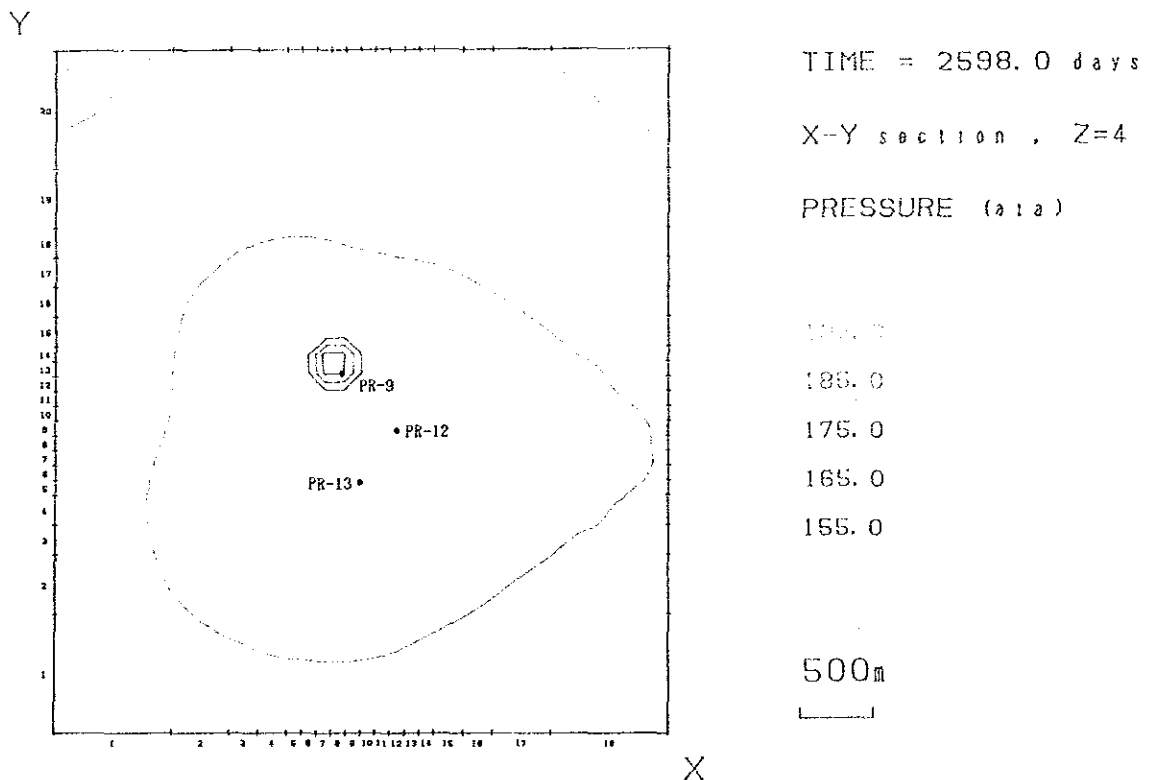


Fig. III. 2-28 Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 4

Fig. III. 2-29 Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 3

| 22 | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 |        |        |        |        |        |        |        |       |       |      |      |        |        |        |        |         |                |   |
|----|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|------|--------|--------|--------|--------|---------|----------------|---|
|    | A: 1200                                      | B: 840 | C: 600 | D: 420 | E: 360 | F: 300 | G: 180 | H: 120 | I: 24 | J: 12 | K: 6 | L: 4 | M: 2.4 | N: 1.2 | O: 0.6 | P: 0.4 | Q: 0.12 | (X 10^-1 cm^2) |   |
| 19 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 18 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 17 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 16 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 15 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 14 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 13 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 12 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 11 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 10 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 9  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 8  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 7  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 6  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 5  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 4  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 3  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 2  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 1  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |

Fig. III. 2-29 Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 3

Fig. III. 2-30 Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 4

| 22 | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 |        |        |        |        |        |        |        |       |       |      |      |        |        |        |        |         |                |   |
|----|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|------|--------|--------|--------|--------|---------|----------------|---|
|    | A: 1200                                      | B: 840 | C: 600 | D: 420 | E: 360 | F: 300 | G: 180 | H: 120 | I: 24 | J: 12 | K: 6 | L: 4 | M: 2.4 | N: 1.2 | O: 0.6 | P: 0.4 | Q: 0.12 | (X 10^-1 cm^2) |   |
| 19 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 18 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 17 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 16 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 15 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 14 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 13 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 12 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 11 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 10 | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 9  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 8  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 7  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 6  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 5  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 4  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 3  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 2  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |
| 1  | 0  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0              | 0 |

Fig. III. 2-30 Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 4

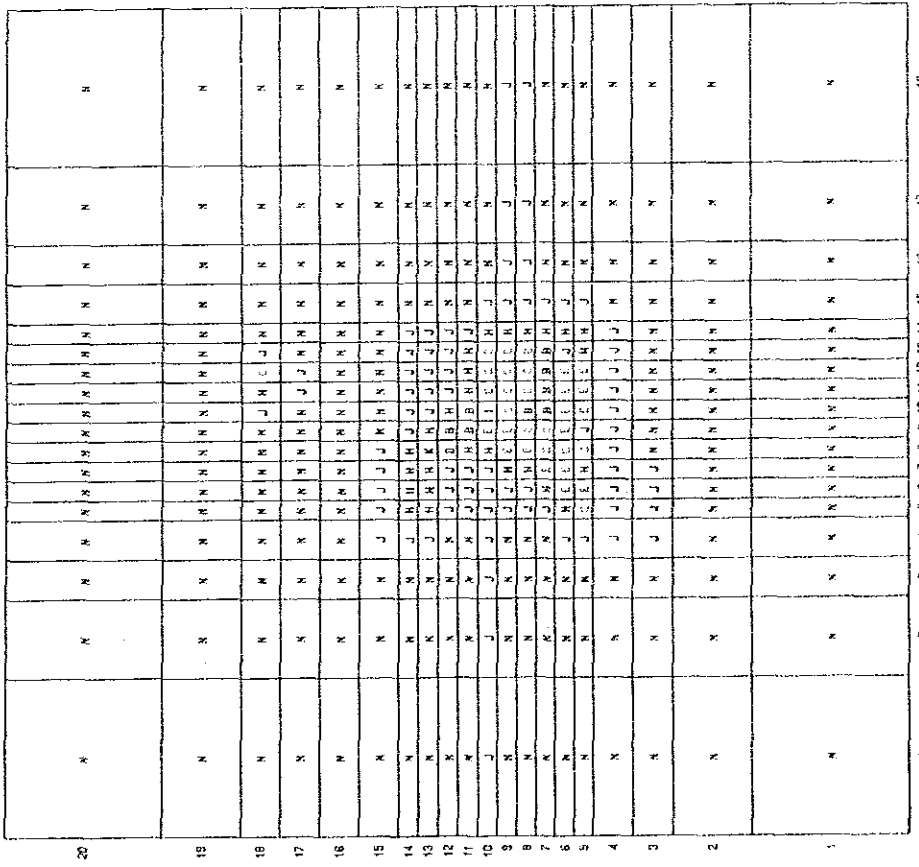


Fig. III. 2-31 Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 3

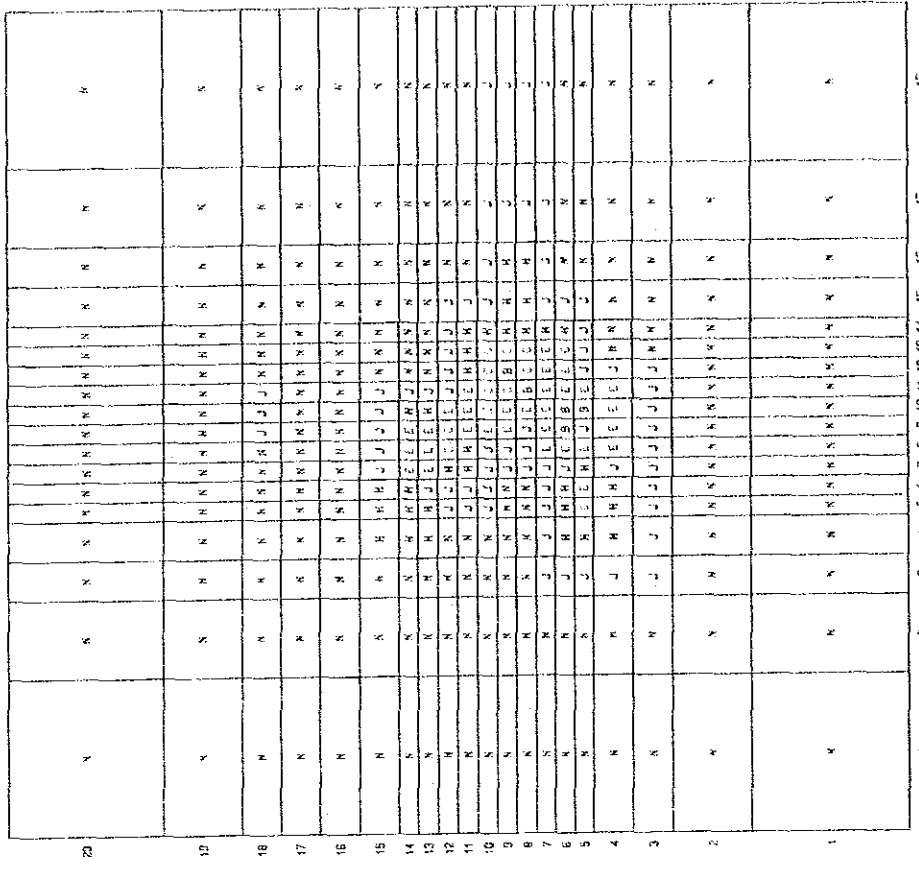


Fig. III. 2-32 Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 4

## 2.5 将来予測結果

### (1) 将来予測方法

ここまで述べてきたヒストリー・マッチングによって構築された最適モデルを用い、以下に述べる、将来予測シミュレーションを実施した。この将来予測シミュレーションは、種々の開発条件を想定したケースにおける将来の貯留層挙動を予測し、各々の開発条件が実施可能なものであるかどうか、また経済的に見合うものであるかどうかを判断するために実施するものである。実施したケースを Table Ⅲ.2-3 に示す。この表にあるように、将来予測シミュレーションにおいては、かなりの本数の生産井を想定して計算に使用した。これらの生産井については、第Ⅲ章第1節に述べた地熱貯留層構造に基づき、生産ゾーンとして有望と考えられる地域内に 200 m 以上の間隔をもって配置した。また、これらの生産能力についても同じく第Ⅲ章第1節に述べた地熱貯留層構造に基づいて設定した。既存坑井の実際の生産能力は C F E によって Table Ⅲ.2-4 に示されているが、各生産井のグリッド上の位置と生産能力を Fig. Ⅲ.2-2 と Table Ⅲ.2-5 に示す。

Table Ⅲ.2-5 に示す仮想生産井の生産能力については、Fig. Ⅲ.2-2 に示された各坑井の位置での地質状況（フラクチャー存在の有無等）、M T 法による比抵抗値および温度を考慮して、そのグリッドの生産能力のランク付けをした。このランク付けに従って、各ケースの総流量を比例配分することで生産能力を仮定した。

今回実施した将来予測方法は、発電出力を一定とした場合の貯留層挙動である。すなわち、所定の発電出力を維持するために必要な蒸気生産量を所定の坑口圧力状態において生産し続けるものとした。ここでは発電出力として、50、75、100 MW の3種類を想定した。また、蒸気の電力への変換効率は 10 t/h/MW とした。このため、各々のケースにおける蒸気生産量はそれぞれ、500、750、1000 t/h となる。生産井の坑口圧力は 6.5 ata と仮定した。

この発電出力を維持するためには現在掘削された生産井だけでは不十分であるので、Table Ⅲ.2-5 に示す生産井が掘削されるものとした。これらの生産井からは、蒸気の生産に伴い若干の熱水が生産されるが、これは還元されることなく地上で処理されるものとした。尚、発電出力が 50 MW のケースについては Table Ⅲ.2-3 に示すように、生産井数の異なる2ケースの将来予測を行った。これらの将来予測シミュレーションは全て 20 年間の貯留層挙動を予測した。そして、20 年後において予測された圧

力分布ならびに水飽和率分布の予測結果に基づき、ここで設定したケースの開発が実施可能であるかどうかを検討した。

## (2) 将来予測結果

将来予測シミュレーションの結果を以下に述べる。Figs.Ⅲ.2-33～40は、TableⅢ.2-3に示す各ケースの、主要な生産レイヤーであるレイヤー3、4の20年後におけるフラクチャーの圧力と水飽和率の分布である。これらの図に見られるようにいずれのケースにおいても、圧力と水飽和率は低下はするが発電を継続するための坑口圧を維持することができないほどではない。しかし、出力100 MWすなわち蒸気生産量1,000 t/hの場合には、圧力低下量、水飽和率の低下量は他のケースに比べてはるかに大きい(例えばFigs.Ⅲ.2-37～38参照)。したがって、このケースの場合には当地域の系外からの流体の補給が限界に近いことを意味するものと思われる。

また、出力75 MWすなわち蒸気生産量750 t/hの場合には、最も圧力、水飽和率が低下するPR-9を含むグリッドにおいて発電開始して間もなく、圧力は約68 ata、水飽和率は約35%に落ち着き20年間はほとんどこのまま推移する傾向がみられるため、安定した状態で発電が維持できるものと思われる。(Figs.Ⅲ.2-41～42参照)。

したがって、将来予測シミュレーションの結果に基づき、ラ・プリマベラ地域において安定した状態で発電が維持できる可能出力の規模は75 MW前後とみるのが妥当であると結論される。

Table III. 2-3 Cases for Reservoir Predictions

- (1) Well head pressure is set to be 6.5 ata.  
 (2) Reservoir behaviors are simulated for twenty years.

|        | Output Power (MWe) | Steam Production Rate (t/h) | Number of Production Wells | Number of Existing Wells | Number of Future Wells |
|--------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| Case 1 | 50                 | 500                         | 36                         | 7                        | 29                     |
| Case 2 | 50                 | 500                         | 24                         | 7                        | 17                     |
| Case 3 | 75                 | 750                         | 36                         | 7                        | 29                     |
| Case 4 | 100                | 1,000                       | 36                         | 7                        | 29                     |

Table III. 2-4 Well Efficiency in the La Primavera Area

\* Temperaturas estabilizadas.

| Pozo No. | Profundidad de Isotermas (°C = MT) |       |       |       |       | Intervalo Productor | Produccion a Separacion al |       | Presion de aire | Prof. Total |
|----------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|----------------------------|-------|-----------------|-------------|
|          | 100°C                              | 150°C | 200°C | 250°C | 300°C |                     | Vapor                      | Agua  |                 |             |
| 1        | 500                                | 660   | 770   | 1,280 | 1,800 | 1,440 - 1,818       | 63                         | 55.4  |                 | 1,822       |
| 2        | 610                                | 975   | 1,300 | 1,630 | 1,900 | 1,567 - 1,995       | 8                          | 4     |                 | 2,000       |
| 4        |                                    |       |       |       |       |                     |                            |       | Cerrado         | 668         |
| 5        | 350                                | 630   | 840   | 1,070 |       | 874 - 1,213         |                            |       | Cerrado         | 1,215       |
| 8        | 680                                | 940   | 1,190 | 1,700 |       | 1,423 - 1,850       | 48                         | 75    |                 | 1,861       |
| 9        | 450                                | 730   | 1,270 | 1,380 | 1,845 | 1,735 - 2,161       | 80                         | 117.7 |                 | 2,986       |
| 10       | 675                                | 1,240 | 1,750 | 1,920 | 2,271 | 1,798 - 2,143       |                            |       | Calentamiento   | 2,271       |
| 12       | 550                                | 675   | 825   | 1,330 | 1,750 | 1,877 - 2,293       | 26.13                      | 30.3  |                 | 2,303       |
| 11       | 450                                | 660   | 860   | 1,300 | 1,800 | 1,800 - 2,150       |                            |       | Calentamiento   | 2,157       |

Table III. 2-5 Tentative Efficiency of each Well in Four Cases

| Well  | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| PR- 1 | 44     | 48     | 65     | 66     |
| 8     | 44     | 44     | 44     | 45     |
| 9     | 44     | 48     | 65     | 94     |
| 10    | 29     | 33     | 46     | 66     |
| 11    | 44     | 48     | 65     | 94     |
| 12    | 29     | 33     | 46     | 66     |
| 13    | 29     | 33     | 46     | 28     |
| PR-31 | 29     | 33     | 46     | 66     |
| 32    | 22     | 24     | 33     | 47     |
| 33    | 12     | 14     | 20     | 28     |
| 34    | 22     | 24     | 33     | 47     |
| 35    | 12     | 14     | 20     | 28     |
| 36    | 8      | 10     | 13     | 19     |
| PR-41 | 12     | 14     | 20     | 28     |
| 42    | 8      | 10     | 13     | 19     |
| 43    | 8      | 10     | 13     | 19     |
| 44    | 8      | 10     | 13     | 19     |
| 45    | 8      | 10     | 13     | 19     |
| 46    | 8      | 10     | 13     | 19     |
| PR-51 | 4      | 5      | 6      | 9      |
| 52    | 8      | 10     | 13     | 19     |
| 54    | 4      | 5      | 6      | 9      |
| 55    | 4      | 5      | 6      | 9      |
| 56    | 4      | 5      | 6      | 9      |
| PR-61 | 4      |        | 6      | 9      |
| 62    | 8      |        | 13     | 19     |
| 63    | 4      |        | 6      | 9      |
| 64    | 8      |        | 13     | 19     |
| 65    | 4      |        | 6      | 9      |
| 66    | 4      |        | 6      | 9      |
| PR-81 | 4      |        | 6      | 9      |
| 82    | 4      |        | 6      | 9      |
| 83    | 4      |        | 6      | 9      |
| 84    | 4      |        | 6      | 9      |
| 85    | 4      |        | 6      | 9      |
| 86    | 4      |        | 6      | 9      |
| Total | 500    | 500    | 750    | 1,000  |



PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (pr 07)

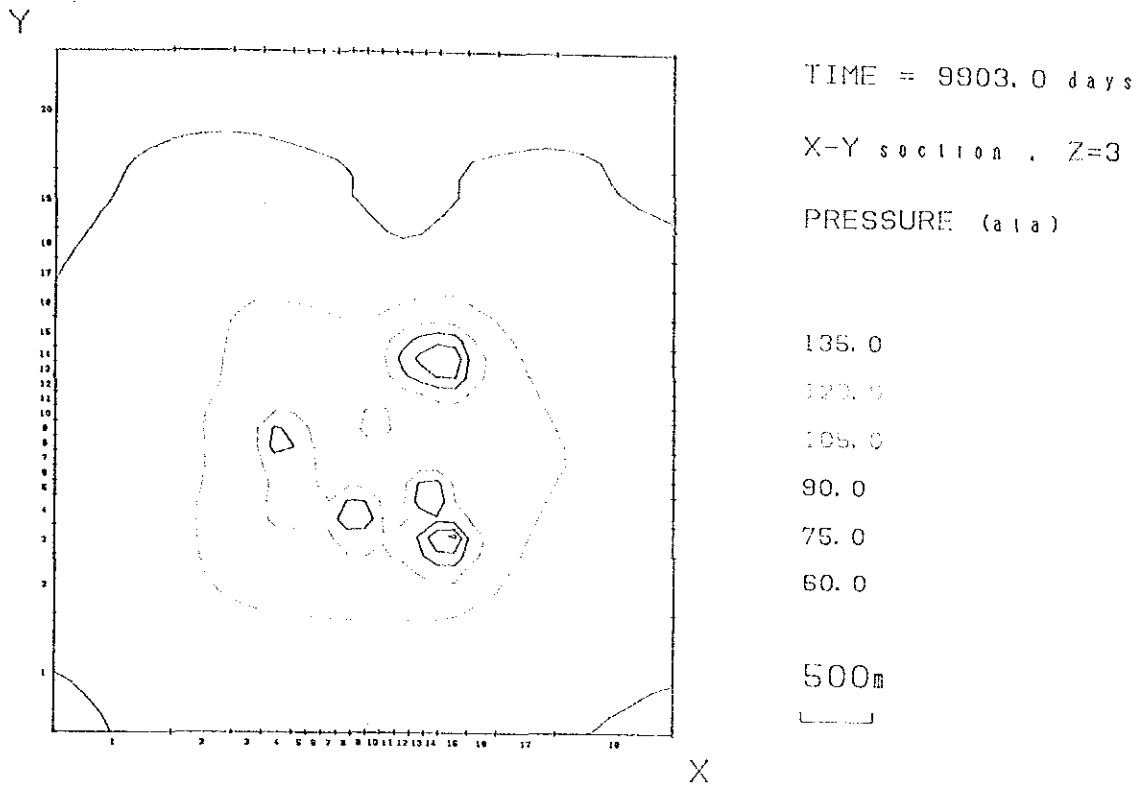


Fig. III. 2-33 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 1)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (pr 07)

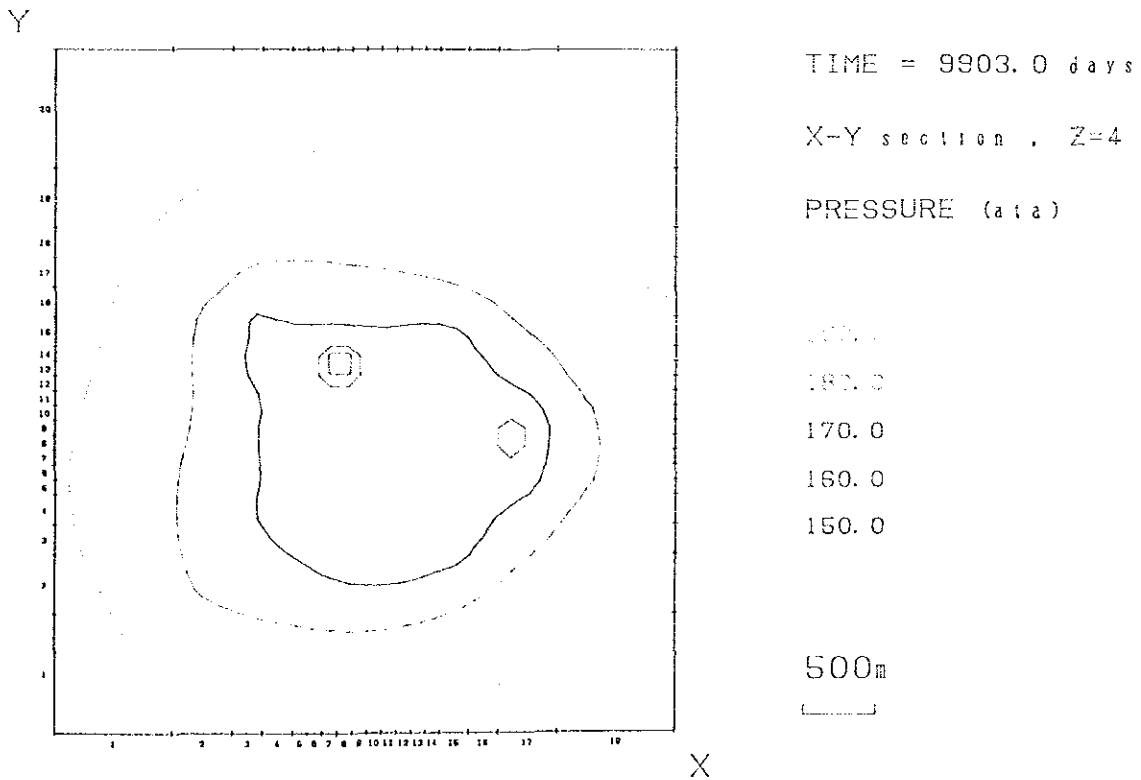


Fig. III. 2-34 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 4 (case 1)

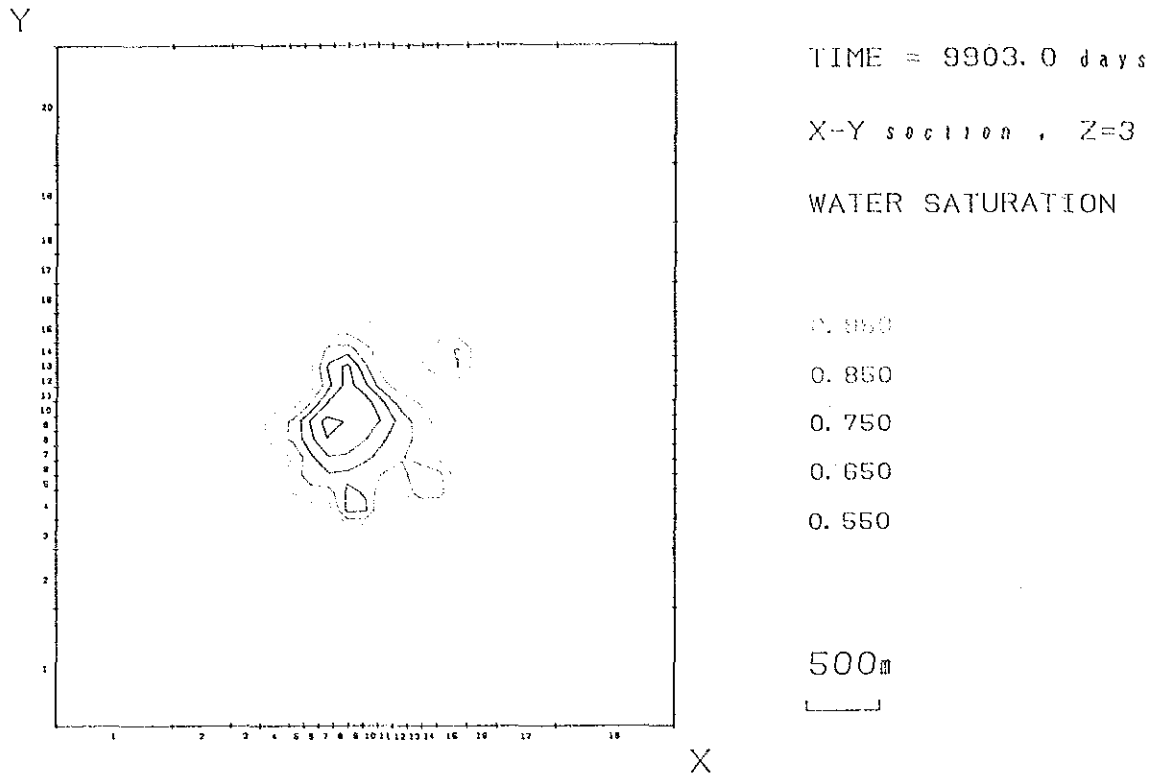


Fig. III. 2-35 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 1)

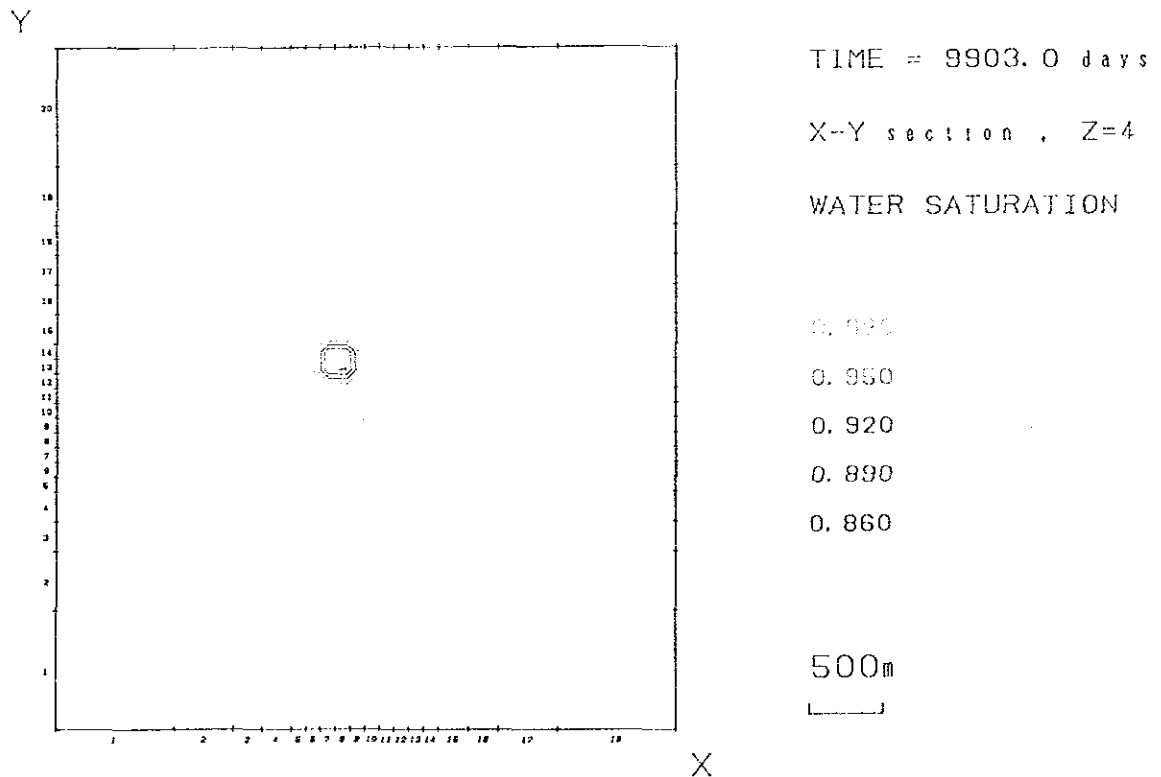


Fig. III. 2-36 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 1)

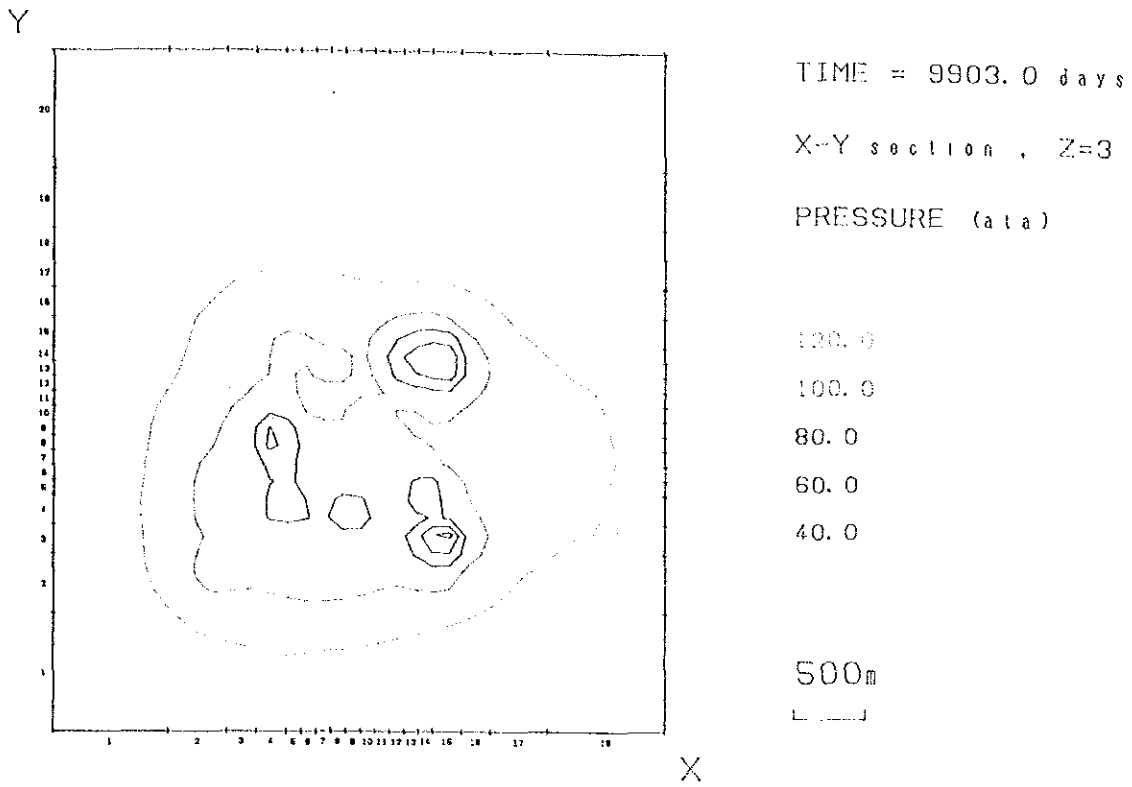


Fig. III. 2-37 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 4)

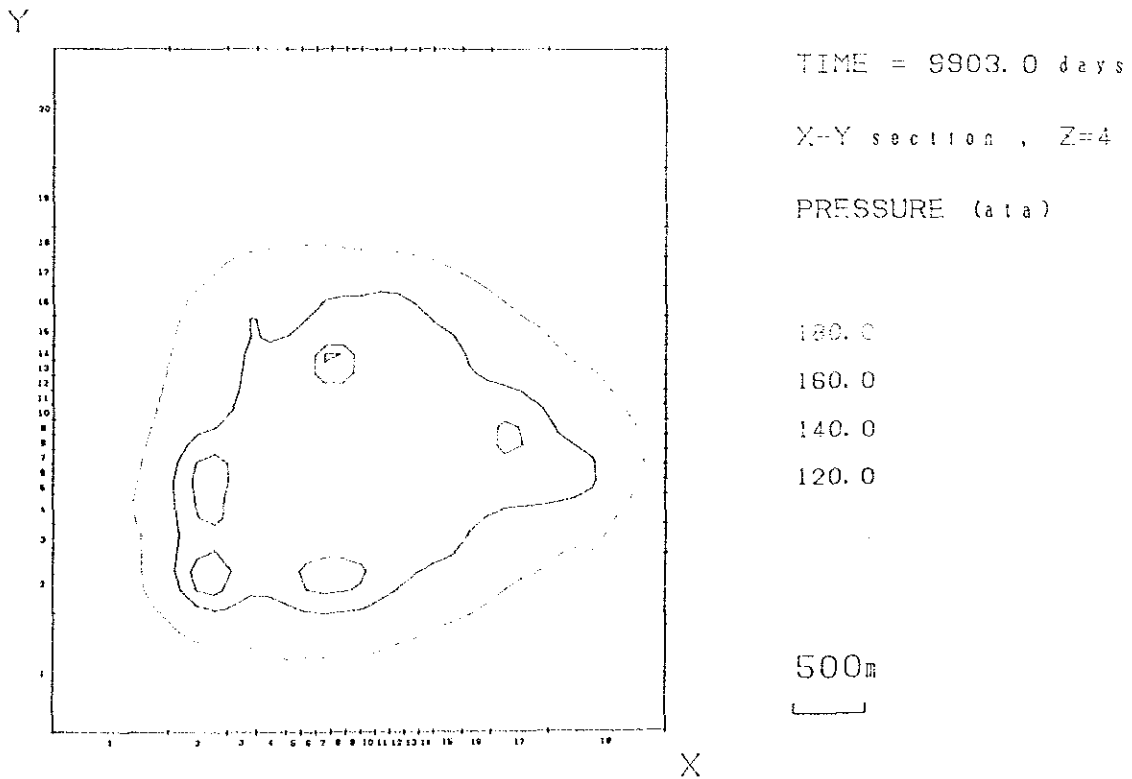


Fig. III. 2-38 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 4 (case 4)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (p r 06r 2)

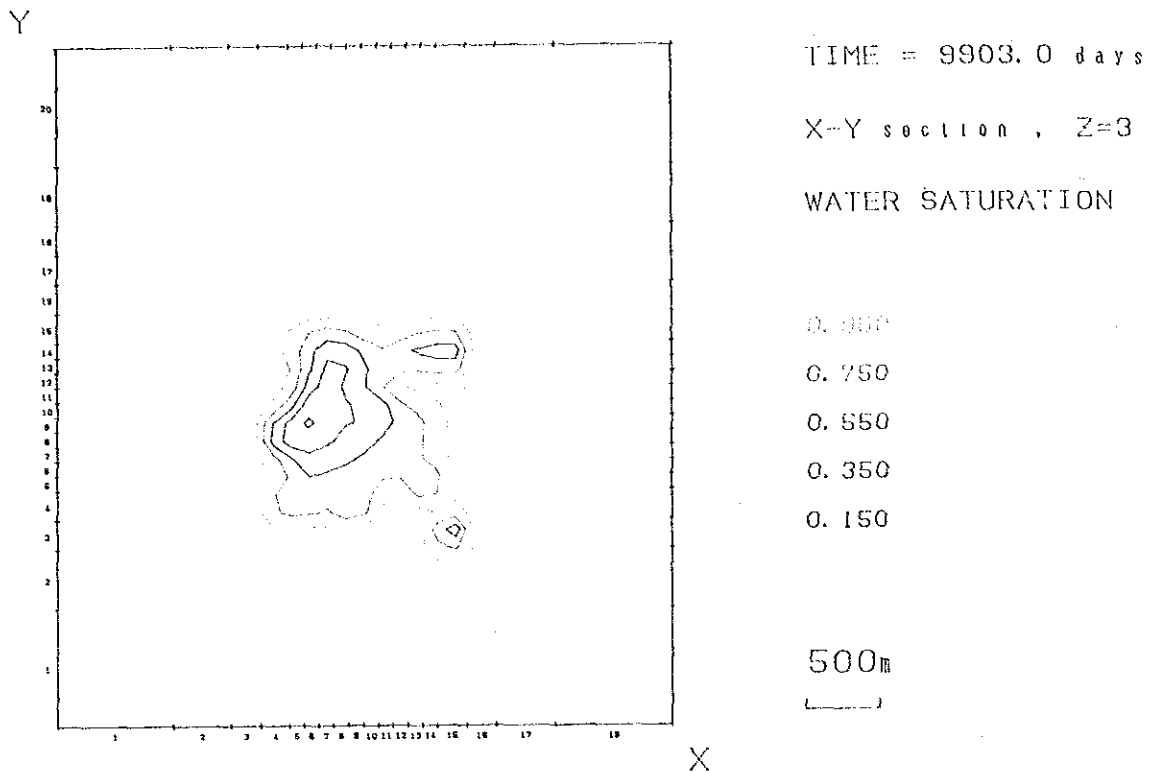


Fig. III. 2-39 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 4)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (p r 06r 2)

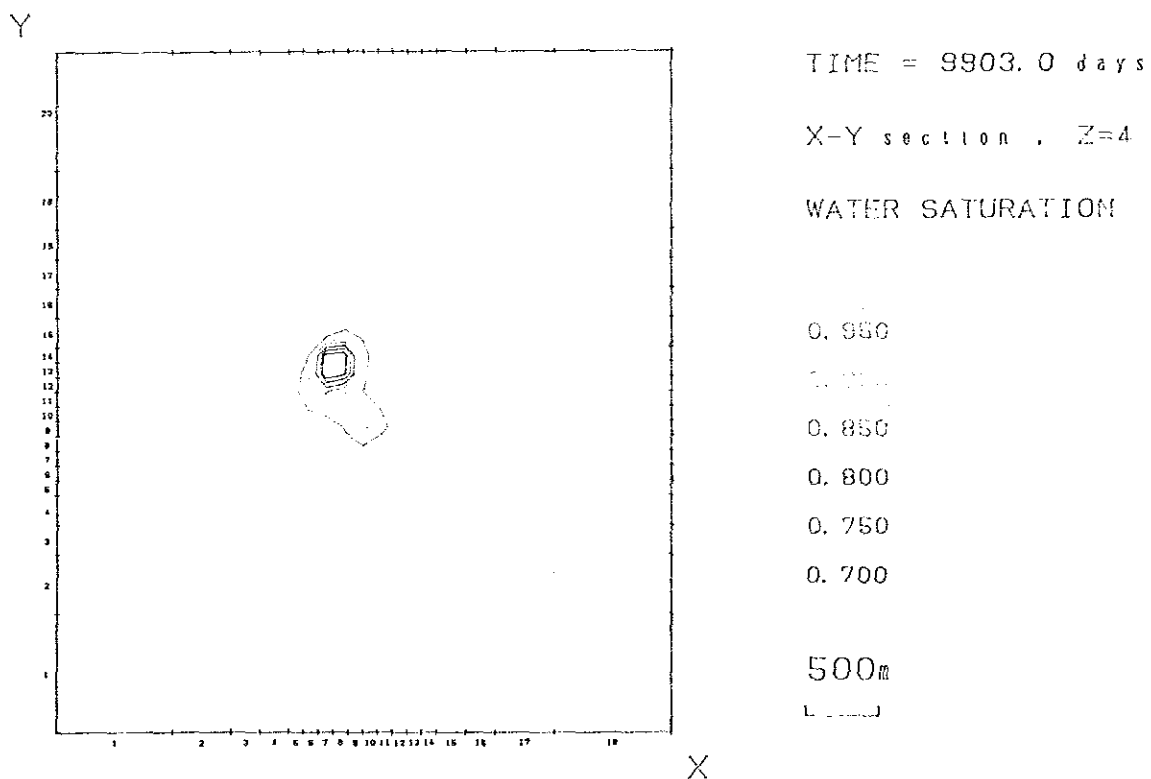


Fig. III. 2-40 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 4)

Prediction of La Primavera Field, Mexico

PR-9 (8, 13, 4)

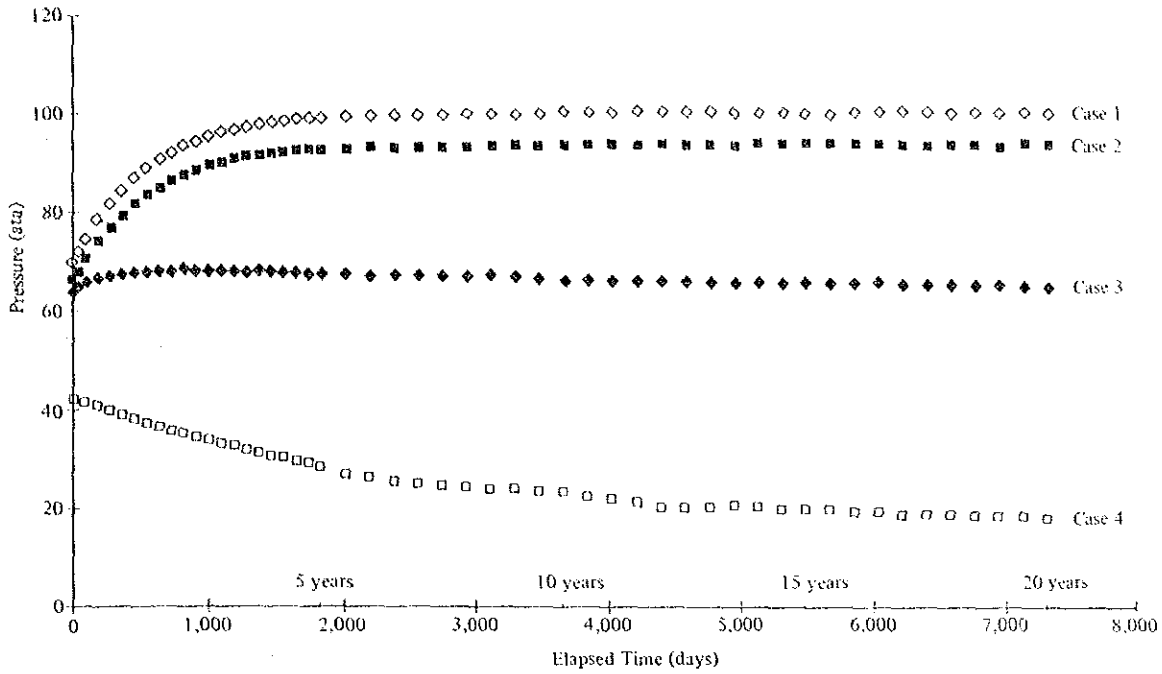


Fig. III. 2-41 Prediction of Reservoir Pressure near PR-9

Prediction of La Primavera Field, Mexico

PR-9 (8, 13, 4)

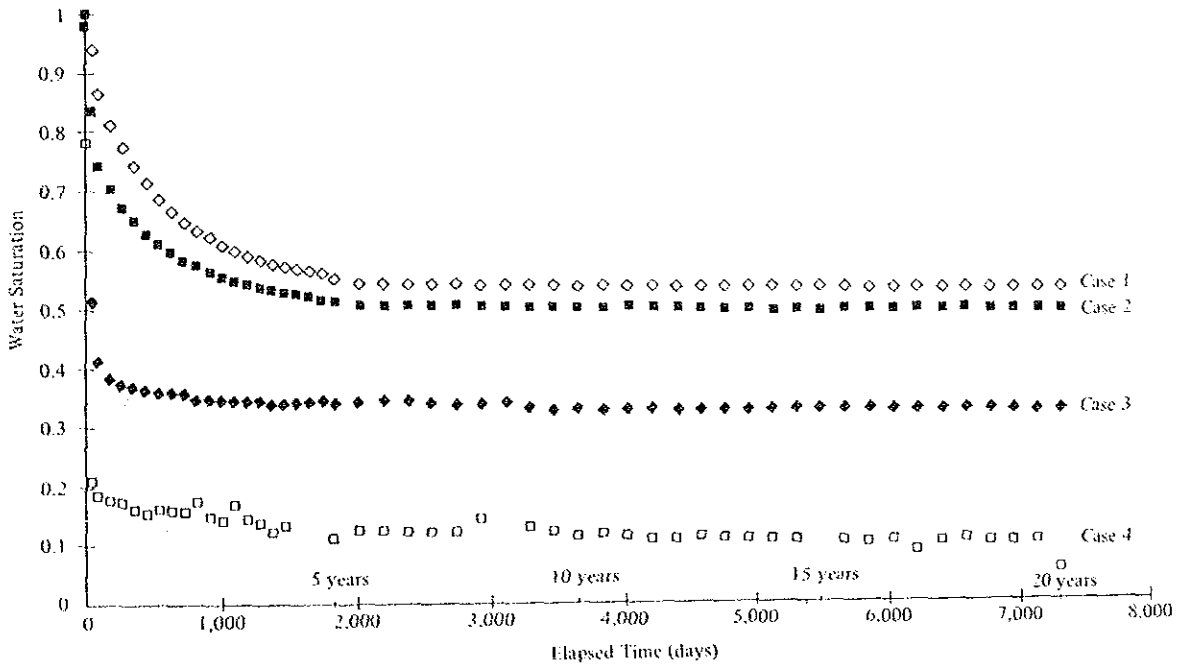


Fig. III. 2-42 Prediction of Water Saturation near PR-9

### 第3節 発電規模の策定

#### 3.1 現時点での可能発電規模

前節で述べた 75 MW という数値は、あくまでも可能出力であって実際に発電所を建設する場合、どの程度の出力にするかについては、さらに次の諸点を検討した上で決定する必要がある。

① すでに C P E および J I C A によって掘削が終了した生産井の能力は Figs. II. 3-3、II. 3-11 および Table III. 2-4 に示すとおりである。ここでの坑井は PR-1, 8, 9, 12, 13 の 5 坑井を含んでいるが、まだ坑井テストが終了していない PR-10 および PR-11 の性能を加味して発電規模を考慮する必要がある。そこで、Table III. 3-1 に示すような表を作成して、PR-10 および PR-11 の性能を予想した。

Table III. 3-1 Well Data in the La Primavera Area

| Well  | kh (m <sup>3</sup> )          | Static Temp. at main feed point | Fluid Temp. at main feed point | Chemical thermometer | Vapor at wellhead (8 ata) (7 atg) |
|-------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| PR-1  | 7.6 × 10 <sup>-13</sup>       | 304 ~ 305°C                     | 299°C                          | 300°C                | 40 t/h                            |
| PR-8  | 2.1 × 10 <sup>-13</sup>       | More than 270°C                 | 231°C                          | 280°C                | 19 t/h                            |
| PR-9  |                               | 345°C                           |                                |                      | 61 t/h                            |
| PR-10 |                               | 295°C                           |                                |                      |                                   |
| PR-11 |                               | 275°C                           |                                |                      |                                   |
| PR-12 | 2.7 × 10 <sup>-13</sup>       | Approx. 330°C                   | 220°C                          | 320 ~ 330°C          | 26 t/h                            |
| PR-13 | 2.6 ~ 3.3 × 10 <sup>-13</sup> | Approx. 280°C                   | 276°C                          | Approx. 280°C        | 40 t/h                            |

Table III. 3-1 からわかるように本地域の kh はほぼ 10<sup>-13</sup> (m<sup>3</sup>) オーダーとばらつきが少なく、蒸気噴出量は流入点での流体温度に比例している。したがって、PR-10、PR-11 の流体温度がわかればおよそその蒸気量がわかるが、残念ながら測定値がない。そこで、流体温度と地層温度がほぼ等しいと仮定すると、PR-10、PR-11 とともに 40 t/h 程度の蒸気量が見込めることが判明した。

- ② これらの値を考慮すればすでに  $265 \text{ t/h}$  (坑口圧力  $7 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ ,  $8 \text{ ata}$ ) の蒸気量が得られたことになる。もし、本地域で、集合型地熱発電 (坑口をパイプラインでつなぎ 1つの発電所に蒸気を集める方式) を行うとすると  $1 \text{ MW} \approx 10 \text{ t/h}$  なので  $26 \text{ MW}$  の発電はすでに可能である。したがって、今後更に約  $235 \text{ t/h}$  の蒸気量が得られるなら  $50 \text{ MW}$ 、また約  $485 \text{ t/h}$  の蒸気量が得られるなら  $75 \text{ MW}$  の発電が可能である。
- ③ 地下温度、圧力および浸透率の分布を勘案し、今後当地域において掘削可能な、生産井の坑数を推定すると約 30 坑となる。しかし、問題は  $235 \text{ t/h}$  ないし  $485 \text{ t/h}$  の蒸気量を確保するため生産井何坑を必要とするかという点である。
- ④ 生産井の坑数の多寡は地熱発電のコストにはね返るので、発電出力を決定する以前に経済性を含み、開発可能性調査 (Feasibility study) を行う必要がある。

### 3.2 発電規模策定のための次段階への提言

以上述べたように、今後具体的に発電所の出力を決定するまでには、なお問題が残されているように思われるので、次の段階として以下述べるような開発可能性調査を含む諸調査を実施することを提案したい。

- ① 貯留層の挙動を確実に把握するためには、既存の生産井7坑を一斉に長期(約1年)にわたって連続噴気させることが最も望ましいが、反面、未利用のまま蒸気を放出することになるので、経済性の面からみて実際には実施不可能と考えられる。
- ② 以上述べた点を補うものとして、ロス・アスプレスで行っているような口元発電(wellhead generation)の方法が考えられる。現時点で既存坑井を利用すれば、1ユニット、(5MW)のものが3ユニットすなわち15MWの発電が可能である。その内訳は次の通りである。

背圧式口元発電の試算条件を次のように仮定する。

|        |       |                             |
|--------|-------|-----------------------------|
| 発電単元   | 1ユニット | 5MW                         |
| タービン回転 |       | 3,600回転                     |
| 坑口圧力   |       | 7kg/cm <sup>2</sup> G(8ata) |
| 坑口温度   |       | 170℃                        |
| 蒸気消費率  |       | 5MWe ≒ 60t/h                |

この条件にかなう坑井は単独ではPR-9だけである。したがって若干のパイプラインを敷いて坑井を結べば、

PR-1とPR-12で1ユニット、

PR-11とPR-13で1ユニット

PR-8は予備井

となり、計3ユニット15MWの発電がすでに可能である。この方法は本格的な発電所完成時までの生産井の遊休時間を活用させることに効果があるのみならず、貯留層挙動についてのデータの収集にも寄与する。

- ③ 一方50MWないし75MWの地熱発電の経済性について検討が必要である。この場合、経済的に成り立つ生産井の坑数がキーポイントとなる。
- ④ 上記の調査と平行して今後掘削する生産井が1坑当たりどの程度の蒸気量が見込まれるかを確認するため、今回設定した温度、圧力、浸透率分布を参考にして、2~3本の調査井を掘削することが望ましい。その理由は、この結果を用いることにより、どの地点



で生産井を掘削すればどの程度の蒸気量が得られるかの予測が可能となるからである。

以上の経済性調査、蒸気量の確認調査の結果を総括的に評価し最終的に発電所の出力規模を決定することが、次の段階で必要な手順であると結論される。

最後に、次の2点を付け加える。

- ① シミュレーション法によれば出力限界は貯留層内圧力低下および水飽和率の低下に規制されていることが明らかになったので、熱水の還元によってこれらの低下を防ぐ計画もたてた方がよい。
- ② uplift帯とup-flow帯はともにPR-12付近に位置していて、PR-9の西方には過去から現在にわたる地温上昇部およびNWないしWNW性の断層の延長部が推定されているので、このような地域を対象に開発を考えた方がよい。





ADIF