

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 これまで実施された調査の総括

第一次調査、第二次調査の結果に加え、C E Fによって掘削された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、JICA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。

1.1.1 各坑井の特徴と地下地質断面

PR-12 と PR-13 の特徴についてはすでに第2章第3節で述べたが、両坑井以外の坑井の特徴について以下に述べる。各坑井の特徴を調べるにあたってはまず各坑井の総合柱状図を作成した（Figs. Ⅲ. 1-1～Ⅲ. 1-7 参照）。総合柱状図には、

- ① 地質柱状図
- ② ケーシング・プログラム
- ③ 逸泥状況
- ④ カッティングスの帯磁率
- ⑤ カッティングス中のHg・As 濃度
- ⑥ カッティングスのX線回折分析による鉱物
- ⑦ 坑内測定による地層温度
- ⑧ カッティングス中の流体包有物による充填温度

が記載されているが、①②⑦はC F Eの資料、④⑤⑥⑧はJICAの調査、③についてはC F Eの資料を基礎とした解析によって記載した。

(1) P R - 1

本坑井は深度1,226 mまで掘削され、その後1,822 mまで増掘された。したがって深度1,226 m以深の坑井レイアウトは径6"の裸孔、径4½"ライナーという変則的な形になっている。フラクチャーの特徴は以下のとおりである。

- ① 深度155～331 mの部分の全量逸泥はタラ凝灰岩中の節理や引張りフラクチャーさらには、P R - 1周辺に発達する正断層系のせん断フラクチャーに起因すると考えられる。この断層系は地表では明瞭でないが、タラ凝灰岩とその下位の流紋岩との境界深度が著しく変化することから推定される。

② コルディリェーラン火山噴出物上部層中の深度521m、723~751mの全量逸泥も

①で述べた正断層系のフラクチャーに付随するものと考えられる。

③ 深度1,226m以深の逸泥については、PR-1の掘削日報に逆のぼって詳しく調査し、1,445~1,486mの全量逸泥、1,563~1,620mの部分逸泥および1,801m~坑底の全量逸泥を確認した。これらを岩石中のHg、Asからみると、深度1,563~1,620mの部分逸泥のうち主たるフラクチャーは1,620m付近と判断される。

これらのフラクチャーの成因としては、Fig. Ⅱ. 1-10に示すように、uplift時の褶曲に伴う背斜翼部の縦型フラクチャーが考えられる。なお、深度1,445~1,486mと1,620mのフラクチャーはセメントによって充填されているので、本坑井の主流入点は1,801m以深のフラクチャーと推定されるが、坑井試験(Ⅱ. 1.4)で述べたように1,445~1,486mのフラクチャーはセメント欠落によって生きている可能性もある。

(2) PR-2

本坑井はコルディリェーラン火山噴出物下部層の安山岩中まで掘削され、深度2,000mで掘止めとなっている。しかし、深度360m以深に特筆すべき逸泥層(フラクチャー)がなく、生産能力の良くない坑井となっている。

① 深度360mまでの全量逸泥は、タラ凝灰岩中の節理、引張りフラクチャーに加え、断層の傾斜から判断するとLA AZUFRERA断層によるものと考えられる。

② ARROYO HONDO断層の傾斜から判断するとこの断層は、深度1,028~1,035mの少量逸泥の部分を通過すると思われる。

③ 深度1,373m以深の少量逸泥のうちで明瞭なフラクチャーを示すのは1,822mからの12kℓ/hの逸泥の部分であり、岩石中のHg、As濃度もここから高くなっている。

本坑井にフラクチャーがよく発達していない原因としては、Fig. Ⅱ. 1-10からわかるように、主たる貯留層であるコルディリェーラン火山噴出物下部層がほぼ水平的で変形していないことが考えられる。

本坑井から噴出している熱水の化学性状も第Ⅱ章で述べたように本地域の他の坑井と違うことから判断すると、本坑井は地熱貯留層の中心部へ連結していないと思われる。

Fig. Ⅱ. 1-8に本坑井の静止時および噴出時の温度・圧力検層値を示しているが、この図から、本坑井がフラクチャーの少ない熱伝導型の温度勾配で特徴づけられ、主流入点が深度1,822m付近であることが読みとれる。

(3) PR-5

本坑井はコルデイリェーラン火山噴出物下部層に入っただけで掘止めとなっている。エア・レーテッドドリリングや逸泥掘りを採用したために、正確な逸泥の位置は把握できない。また、カッティングスの分析もなされていないので、温度・圧力測定結果に基づいて考察する。

- ① Fig.Ⅱ.1-3に静止地層温度と流体包有物による最低充填温度を示しているが、この曲線から判断すると深度1,150m付近にフラクチャーが存在し、ここへは冷たい地表水の混入が想定される。したがって断面図(Fig.Ⅱ.3-10)には、地表水の混入が可能であるように、断層系を考えた。
- ② Fig.Ⅱ.1-9の噴出中の温度測定結果によると地熱流体は深度1,075mから流入していることが明らかとなっている。
- ③ このほか深度500m深までの逸泥掘りは、タラ凝灰岩中の節理や引張りフラクチャー、600~700m台の逸泥掘りは、EMBALSE断層等に起因するものと思われる。

(4) PR-8

本坑井はPR-1と同じような深度、地層層準まで掘削されている。深度600~1,100mの中深度を除き多くの逸泥が存在するが、深度1,100m以深のものについては掘削日誌まで逆のぼって詳しく調査するとともに、岩石中のHgやAs濃度も測定して、フラクチャー位置の決定に努めた。以下にその結果を述べる。

- ① 深度600m深までの多くの逸泥はタラ凝灰岩およびその下位の流紋岩に発達する節理や引張りフラクチャーによるものである。
- ② 深度1,124mの全量逸泥は、断層の傾斜から判断してLOS SANCHEZ正断層によるものと考えられる。深度1,239m以深にも少量の逸泥があるが、掘削中の逸泥対策記録と地層温度曲線がこの部分で“伝導型”を示すことから、1,124mの再発と思われる。
- ③ 深度1,328mから1,569mまで、全量逸泥が単発的に発生している。逸泥対策記録、岩石中のHg、As濃度および岩石中の帯磁率(マグネタイトの変化度合)から判断し、これらの逸泥のうち、1,328m、1,436m、1,564~1,569mの3箇所がフラクチャーの位置と判断した。この部分では、地層温度曲線も直線的な“対流型”を示し、主貯留層であることを示している。フラクチャーの性質としてはPR-1の主フラクチャーと同じように背斜翼部の縦型フラクチャーと考えられる。
- ④ 深度1,790mからの全量逸泥の部分では地層温度に大きな変化があり、1,800~

1,830mにかけては周囲より20~25℃低くなっている。この傾向はPR-5の深度1,150m付近の傾向と類似しており、本地域では例外的に地表水と連結する断層がこの深度まで延びているものと推定される(Fig. Ⅲ. 1-4参照)。昭和61年に行われたプロダクション検層によれば主流入点である深度1,790mのフラクチャーは埋没により生きていない可能性もあり、温度、フラクチャーの良さに比べて蒸気量があまり大きくないのはこのためかもしれない。

(5) PR-9

本坑井は深度2,986mまで掘削され、2,780mから基盤花崗岩類に入っている。本坑井のフラクチャーと温度の性質を以下に示す。

- ① 深度200~400mでの全量逸泥はタラ凝灰岩中の節理や引張りフラクチャーあるいは流紋岩中の節理等に起因すると考えられる。
- ② 深度1,152~1,209mの逸泥は断層の傾斜から推定してQUELELE OESTE正断層によるものと考えられる。
- ③ CFEの圧力ピボット解析によれば深度2,000m(158.5kg/cm²)にピボット点がある。また、カッティングス中のHg、Asの濃度も高い。このように深度2,000m以深には著しい逸泥はないものの、上記2点から考えるとここも流入点の1つと考えられる。
- ④ カッティングスによる調査は深度2,000m以深しか実施しなかったため、1,910mの全量逸泥の性格は不明であるが、ここにフラクチャーの存在はであると推定される。
- ⑤ 深度2,240m付近には著しい逸泥はないものの、Hg、Asの濃度が高くかつ硬石膏やローモンタイトの熱水変質鉱物が優勢であることから考えてここにフラクチャーの存在が推定される。
- ⑥ 深度2,465m以深検層器が入らないので、坑内は埋没していると思われるが、2,477mに部分逸泥とHg、Asの高い部分があり、小規模なフラクチャーが存在している。

以上のフラクチャーのうち、蒸気噴出に関係しているのは③~⑤の3箇所であり、これらは後述するように、コルディリーラン火山噴出物下部層の向斜軸に伴う縦型フラクチャーと考えられる。この深度間にフラクチャーが存在するのは、温度測定値が直線的で“対流型”を示すことから傍証される。

また、この主貯留層部の地層温度が330~350℃と高いので、PR-9から得られて

いる優秀な蒸気（坑口圧 8 bars で約 80 t/h）は、フラクチャーの透水性よりもむしろ高温のためと推定される。

(6) PR-10

本坑井は深度 2,271m まで掘削され、コルディリェーラン火山噴出物下部層中で掘止めとなっている。本坑井の特徴を以下に示す。

- ① タラ凝灰岩が厚く深度 760m 深まで出現している。この間の多くの全量逸泥は、タラ凝灰岩特有の節理や引張りフラクチャーによるものである。
- ② 深度 1,000~1,003m 間に、25~50kl/h の逸泥があるが、これは PR-10 近傍に位置する EL CARACOL NORTE 横ずれ断層によるものと考えられる。地層温度曲線においてもこの部分だけが 110°C と低く、地表水と通じた down-flow のフラクチャーである。
- ③ 断面図 Fig. Ⅲ. 1-6 では、PR-8 と PR-10 との間に 2 本の正断層を想定し、その 1 本が深度 1,583m 付近の逸泥を通るように考えた。これは、地層境界の構造等高線（Figs. Ⅲ. 1-14、Ⅲ. 1-15 の Horizon 1 と 2）を描くと PR-8 と PR-10 間で等高線が非常に混み、WNW-ESE 方向で最大 34° の地層境界になってしまい、周辺の地層が水平に近いことを考えるとこの間に上記の方向性をもつ正断層を想定した方が妥当と判断したからである。
- ④ 深度 1,630m から小規模な逸泥が続き、岩石中の Hg、As 濃度も高い。しかし、地層温度曲線を見ると、この部分は温度上昇部を示し、不透性と考えられる。むしろ、逸泥量は 2~4 kl/h と少ないが、深度 1,779m や 1,970m で、岩石中の Hg と As 濃度が高く、地層温度も“対流型”を示すので、これらの部分に小規模なフラクチャーが存在すると思われる。
- ⑤ 本坑井の主流入点は深度 2,220~2,249m にかけて生じた 11~36kl/h の逸泥の部分である。ここでは岩石中の Hg、As 濃度も非常に高く、ローモンタイトの変質鉱物も認められる。このフラクチャーは、1,779m や 1,970m と同じように、③で述べた断層に付随し、褶曲形成と関連する NW~WNW 性のフラクチャーと考えられる。

(7) PR-11

本坑井は深度 2,157m まで掘削され、PR-10 と同様コルディリェーラン火山噴出物下部層中で掘止めとなっている。本坑井については詳細な逸泥状況、十分回復した後の地層温度曲線、プロダクション検層などの情報が入手されていないために解析は不十分

である。得られた情報から次のような推定を試みた。

- ① 深度750m位までの多くの全量逸泥は単にタラ凝灰岩中の節理や引張りフラクチャーによるものではなく、石質凝灰岩中にも発生しているので、LOS SANCHEZ 正断層等の断層の影響によるものと考えられる(ただし、Fig. Ⅱ.1-11の断面図には断面と断層の方向が平行になるためにこの断層は表現できない)。
- ② 深度1,800m以深には10~20kl/hの逸泥が連続する。岩石中のHg、As 濃度から判断すると深度1,800m、1,880m、1,920~1,940m 付近にフラクチャーが存在すると思われる。地層境界の構造等高線Horizon 3 (Fig. Ⅱ.1-16)によるとPR-13とPR-11の間の等高線が混んでいて、NW-SE 30° N dipになる。周辺の地層の傾斜と比較すると、この間に、上記方向の正断層が存在する。上記フラクチャーはこれらの断層や褶曲に関連すると考えられる。
- ③ CFEの資料によると坑底付近に大きな逸泥が記録されている。しかし、この深度についての十分な情報がないので考察できない。また、地層温度曲線もスタンディング時間24時間のデータしかなかったので、このデータでの考察はできない。むしろ流体包有物の充填温度から深度1,800m以深の地層温度は、270~320°Cと推定される。

以上の考察を基に、本地熱徴候地域をNW-SEに切る地下断面 (Fig. Ⅱ.1-10) およびNE-SWに切る地下断面 (Fig. Ⅱ.1-11) を描いた。これらの断面図を基にした解析および解釈については次項目で述べる。

1.1.2 地下断層系についての考察

Figs. Ⅱ.1-10~Ⅱ.1-11 に示しているように、深度1,000m深位までの断層系 (浅部断層系) と主たる貯留層である1,000m以深の断層系 (深部断層系) は異なっている。なぜこのように違うのか。また、それぞれの断層系の特徴について述べる。

(1) 浅部断層系

- 1) 浅部断層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1.1.4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・プリマペー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、 σ_1 が垂直に近く、 σ_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、高温高圧三軸圧縮下の岩石破壊試験を行うと通常 Fig. III. 1-12 に示すような結果になる。Fig. III. 1-12 (a)~(d)のうち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。

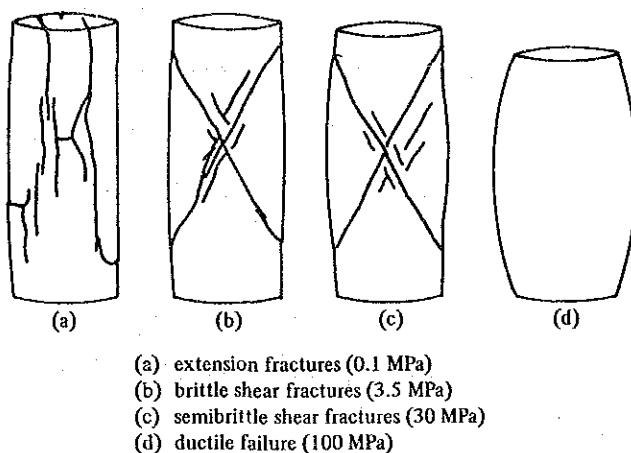


Fig. III. 1-12 Types of Failure in Experimentally Deformed Limestone at Varying Confining Pressure

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・プリマベラ地域の場合、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. 1-25 に示すようにコルディリエ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の、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. 1-12

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、第2章1.1.4で述べたように、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(Fig. II. 1-8)。

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1.1.4で述べたように、この断層は横ずれ的性格をもつために直接観察できないことが多い(Fig. II. 1-4)。このために、CFEの地質図には抽かれていない。

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、 $N80^{\circ}W$ 、 $80^{\circ}S$ 、HONDO沢付近で $N83W$ $83^{\circ}N$ 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、Table II. 1-3参照)。
- 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

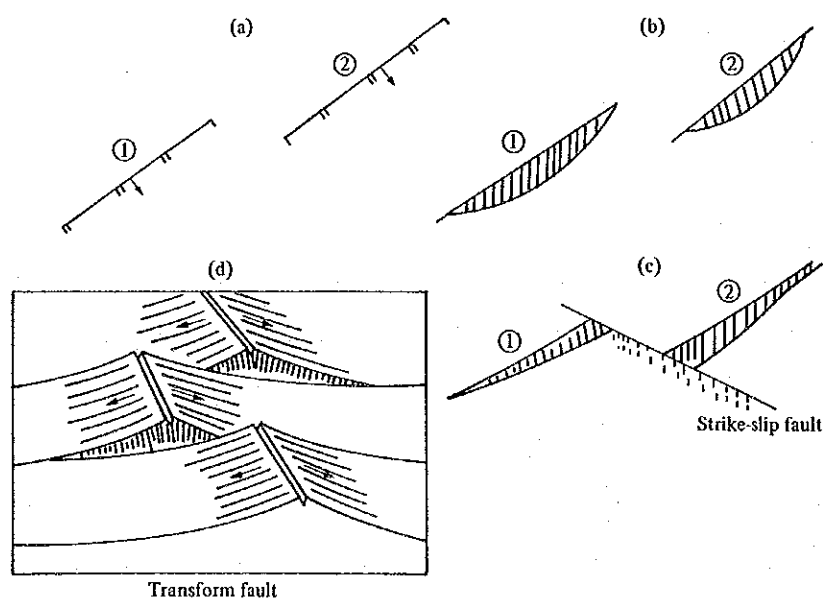


Fig. III. 1-13 Transcurrent and Transform Faults

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. 1-13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。これらについてはすでに第Ⅱ章1.1.4で詳しく述べた。

(2) 深部断裂系

- 1) ラ・プ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. 1-12(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 : コルディリエ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、浅部に属する)

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

Horizon 3 : コルディリエ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. 1-14~Ⅲ. 1-16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. 1-11には、2本の正断層を描いた。しかし、浅部断裂系の中で、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エーラン火山噴出物上部に発達していたNW-SE方向の断裂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. 1-11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、深部断裂系を推測するために広域地質調査も実施した。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、コルディリエ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・プリマペー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ノー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. 1-17 に示すように、NE-SW 方向の引張りの場 (σ_3 が NE-SW)、NW-SE 方向が σ_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。

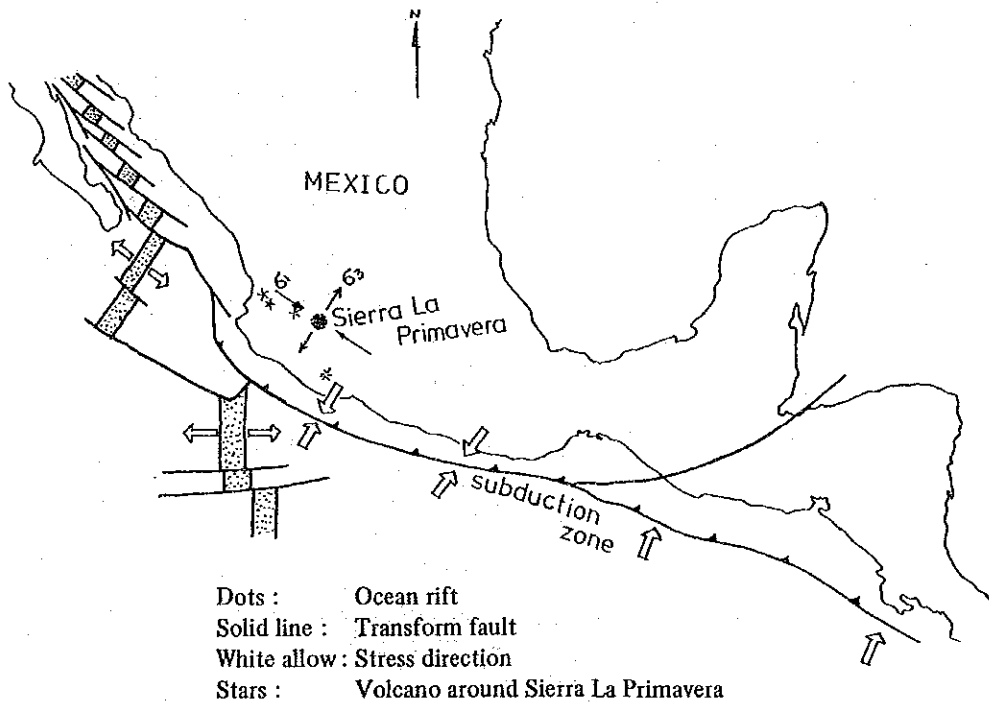


Fig. III. 1-17 Regional Stress Distribution along Pacific Coastal Area of Mexico

4) 以上1)~3)で述べたことを考慮して、Figs. III. 1-10~III. 1-11における深部断層系を描いてあるが、この断層系の基本概念は以下のとおりである。

- ① 深部断層系の方向は一部 (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、この部分は浅部断層系と同じ)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. 1-12 (a)に示すような extension 型フラクチャーである。しかし、場所によっては、Fig. III. 1-16 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. 1-18 のようになり

i) は III. 1-18 (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。

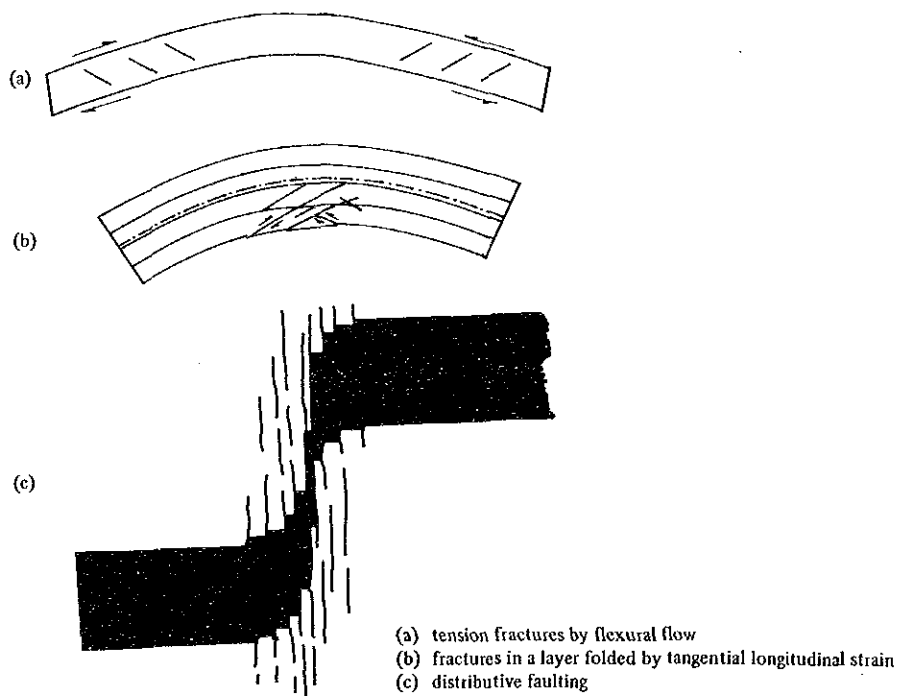


Fig. III. 1-18 Relation between Folding and Fractures

1.1.3 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.2-41～Ⅲ.2-45参照）。

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.1-19）。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、Fig.Ⅲ.1-10とⅢ.1-19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つに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.1-20）。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 (Fig. Ⅱ. 1-19 と Ⅱ. 1-20 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。

1.1.4 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. 1-18 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

試料採取を行った各坑井の蒸気組成は、PR-12 および PR-13 の蒸気分析結果表にあわせて示す。(Table Ⅱ. 3-1 および Table Ⅱ. 3-15)。

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CO₂であり、いずれの坑井でもCO₂濃度が99 vol. %程度である。化学反応性が高いH₂とH₂S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、N₂、CH₄、HeおよびArに関しては大きな差はない。N₂、CH₄、HeおよびArの中では、いずれの坑井でもCH₄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、H₂Sが検出されないことのほかにCH₄濃度が14,400 ppmと極めて高いことが特徴的である。

N₂、HeおよびArの3成分についてみると、Fig. III. 1-21に示すように、ラ・プリマベラ地域の蒸気の(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}比に反映されると考えられる。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、N₂、CH₄、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・プリマベ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・プリマベ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・プリマベ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800~1,300mg/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。

熱水のB濃度とCl濃度の関係をラ・プリマベラ地域周辺の温泉水のデータとともにFig. Ⅲ. 1-22に示す。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で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. 1-23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 δD 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、貯留層内で起き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℃を越える温度検層値やNa/K温度がいくつかが得られており、高温で反応速度が速すぎるSiO₂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320~330℃と推定した。また、PR-13については、貯留層温度を280℃程度と推定した。

Fig. Ⅲ. 1-24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C I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C I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 $h = 56.9 + 0.397 \times C I$ (h :熱水の比エンタルピー; $C I$:C I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C I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C I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C I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、SO₄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SO₄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SO₄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のデータおよび土壌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・ブリマペー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℃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。

1.2 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以深のコルディリェ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ェ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°C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. 1-10～III. 1-11に示すとおりである。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間からの考察により、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 σ_1 が垂直の応力配置になり、Fig. III. 1-12(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、カルデラ陥没が一挙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、コルディリェーラソ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 I, 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うけているので、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。

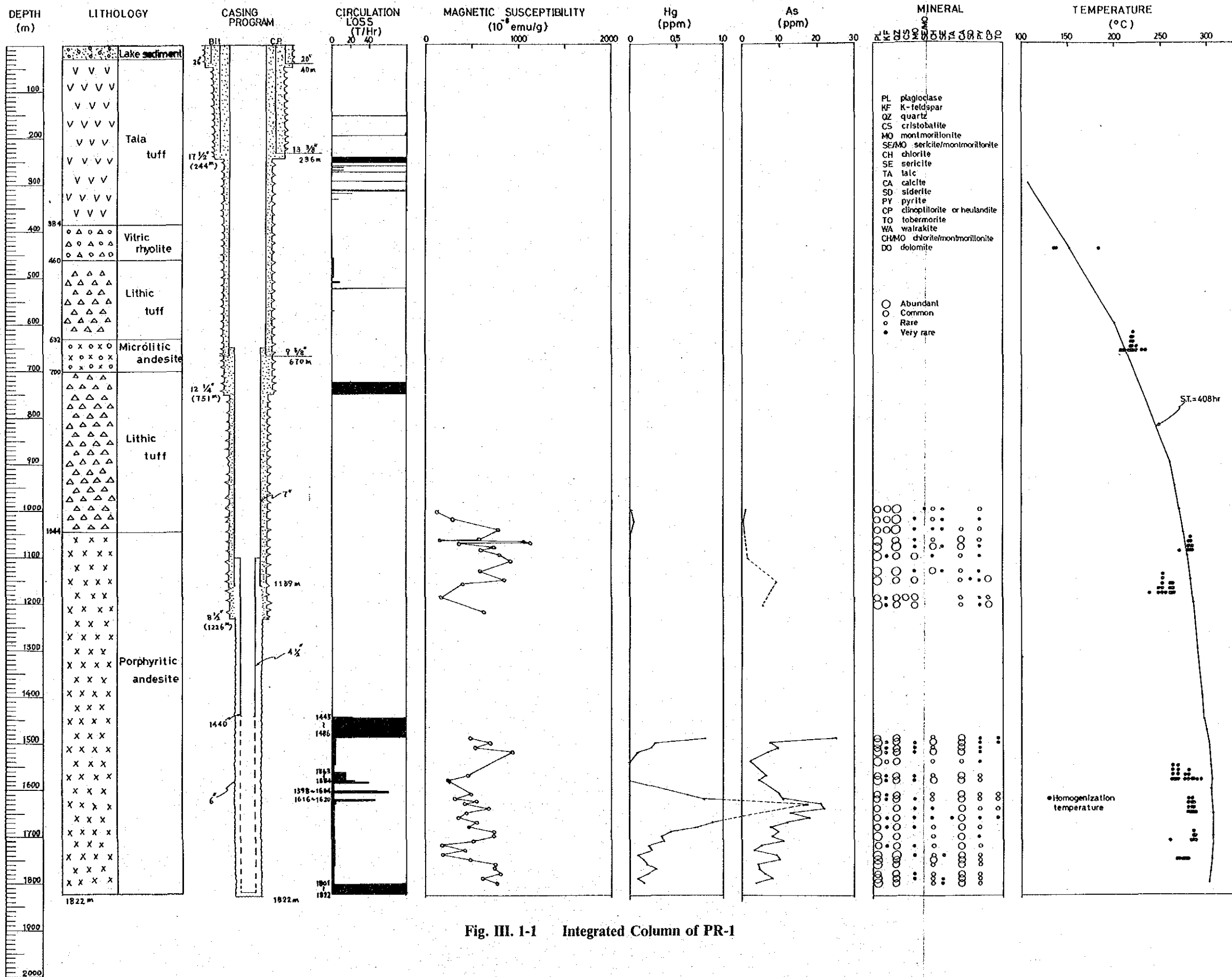


Fig. III. 1-1 Integrated Column of PR-1

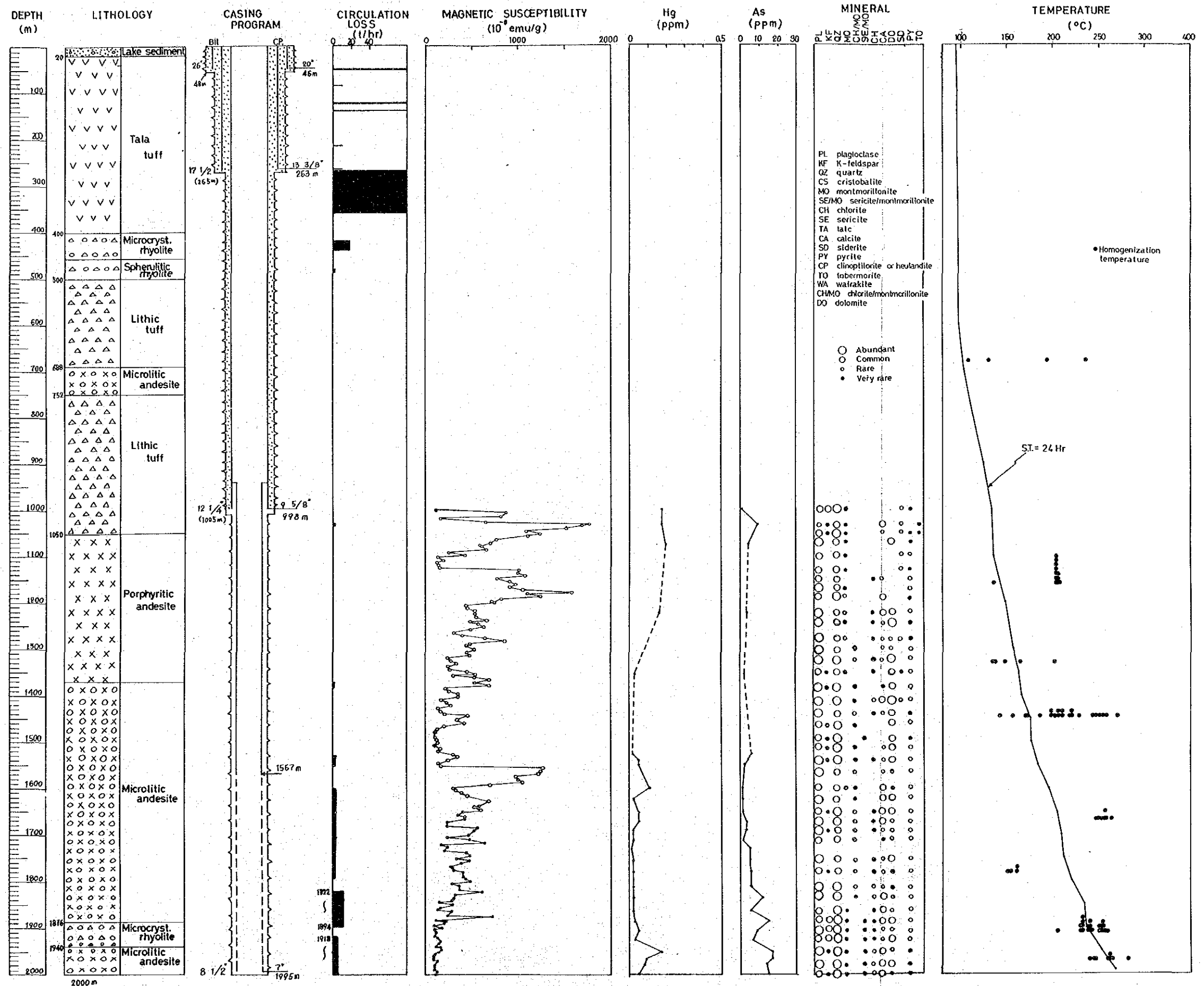


Fig. III. 1-2 Integrated Column of PR-2

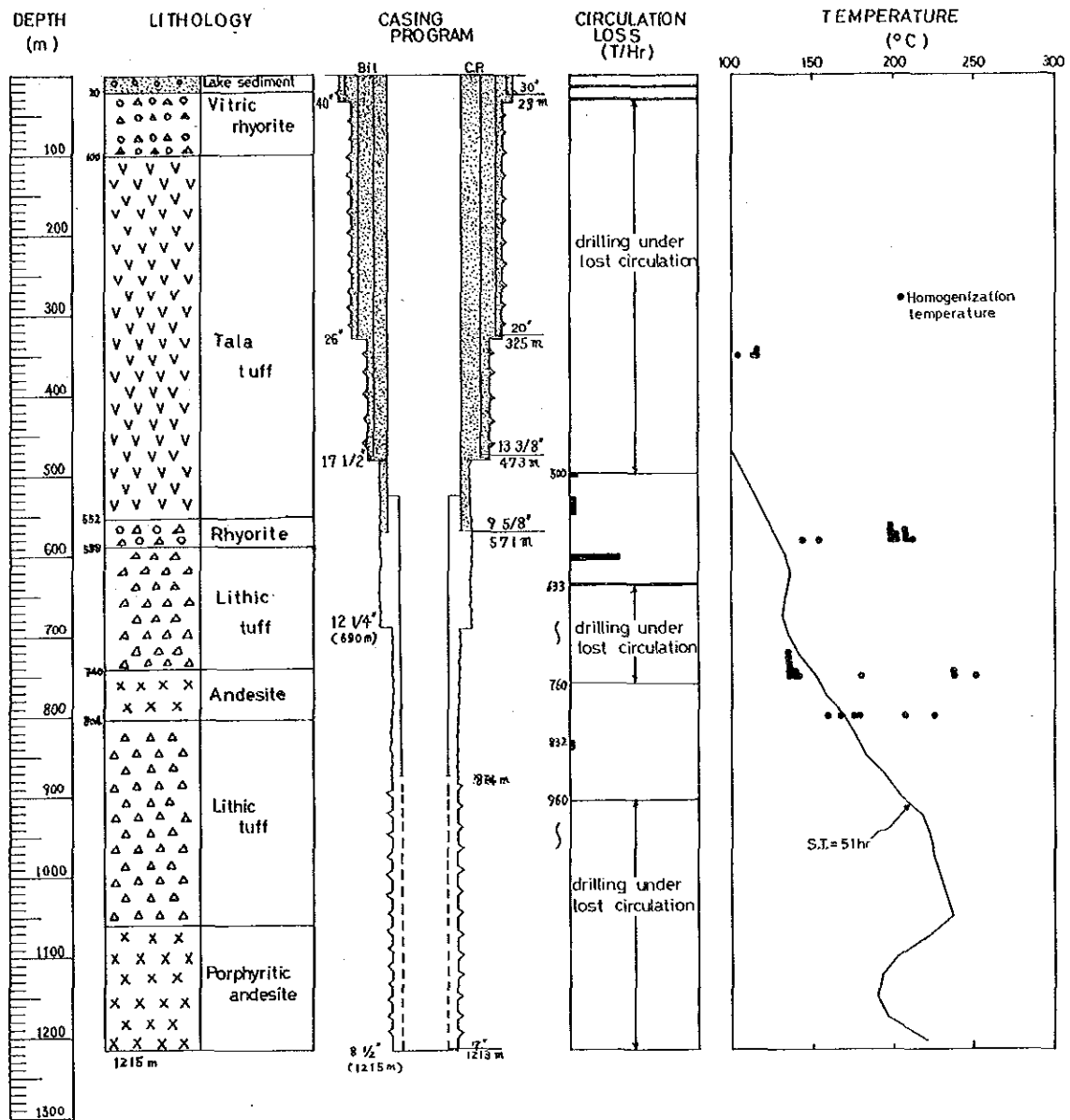


Fig. III. 1-3 Integrated Column of PR-5

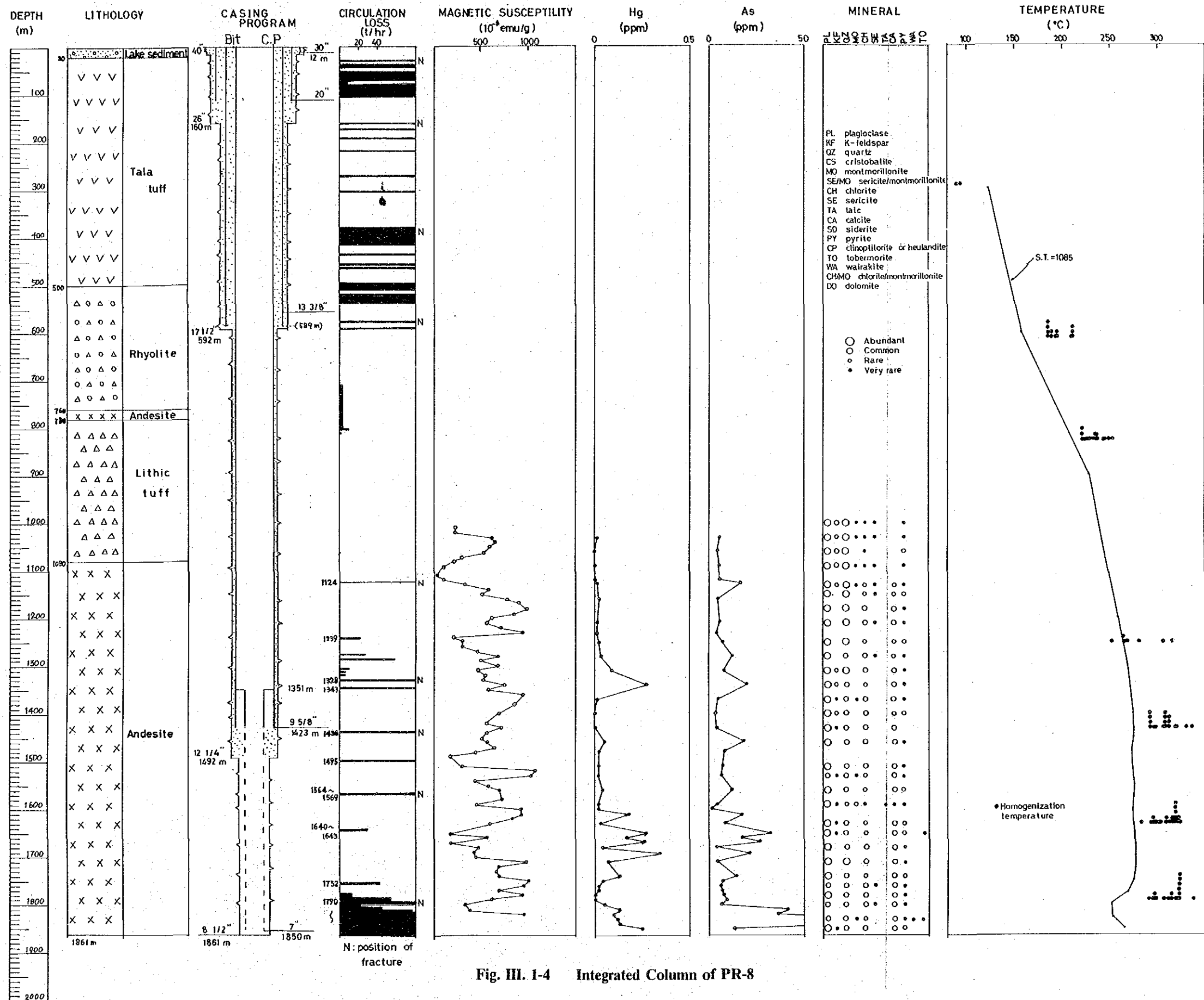


Fig. III. 1-4 Integrated Column of PR-8

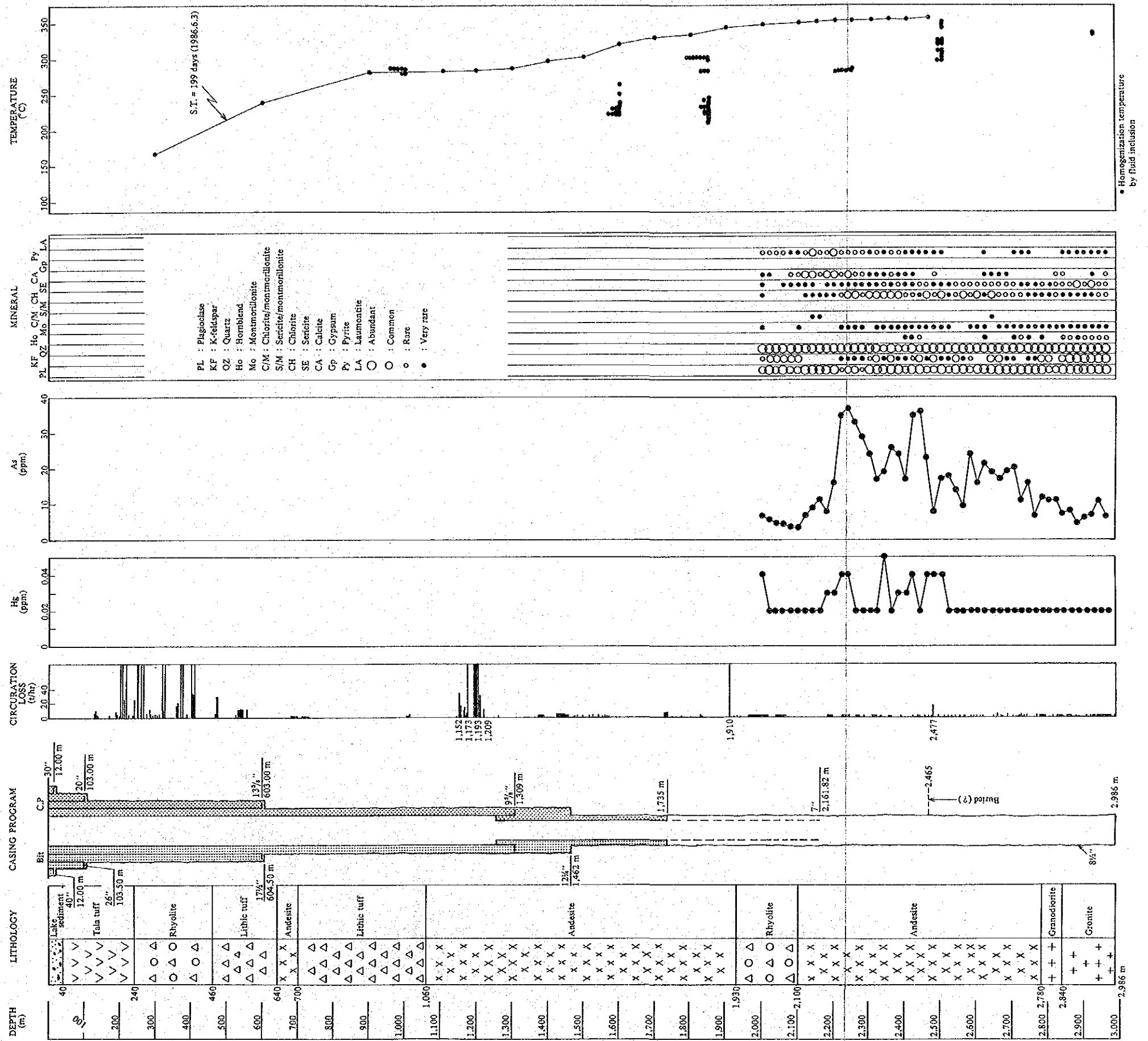


Fig. III. 1-5 Integrated Column of PR-9

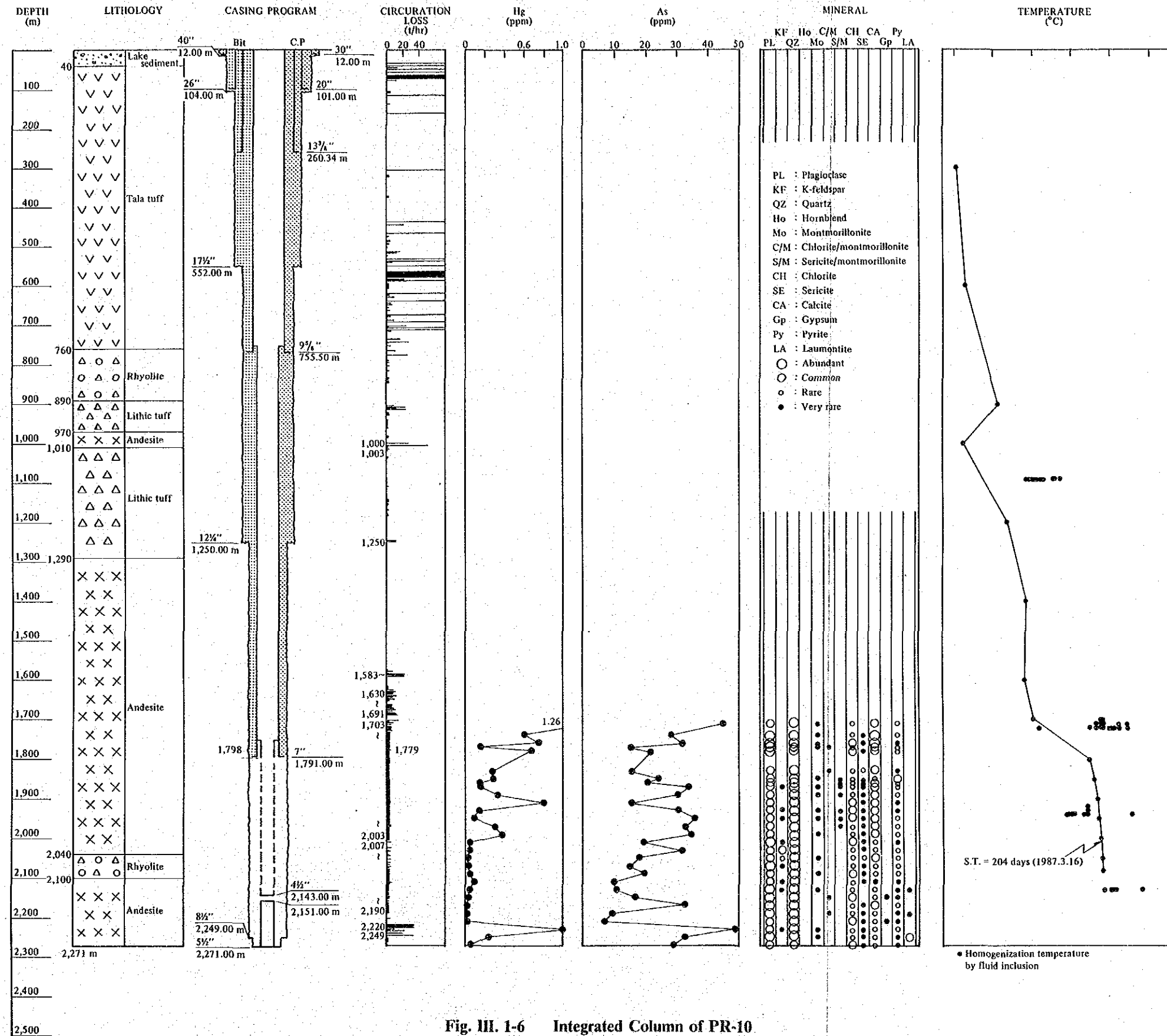


Fig. III. 1-6 Integrated Column of PR-10

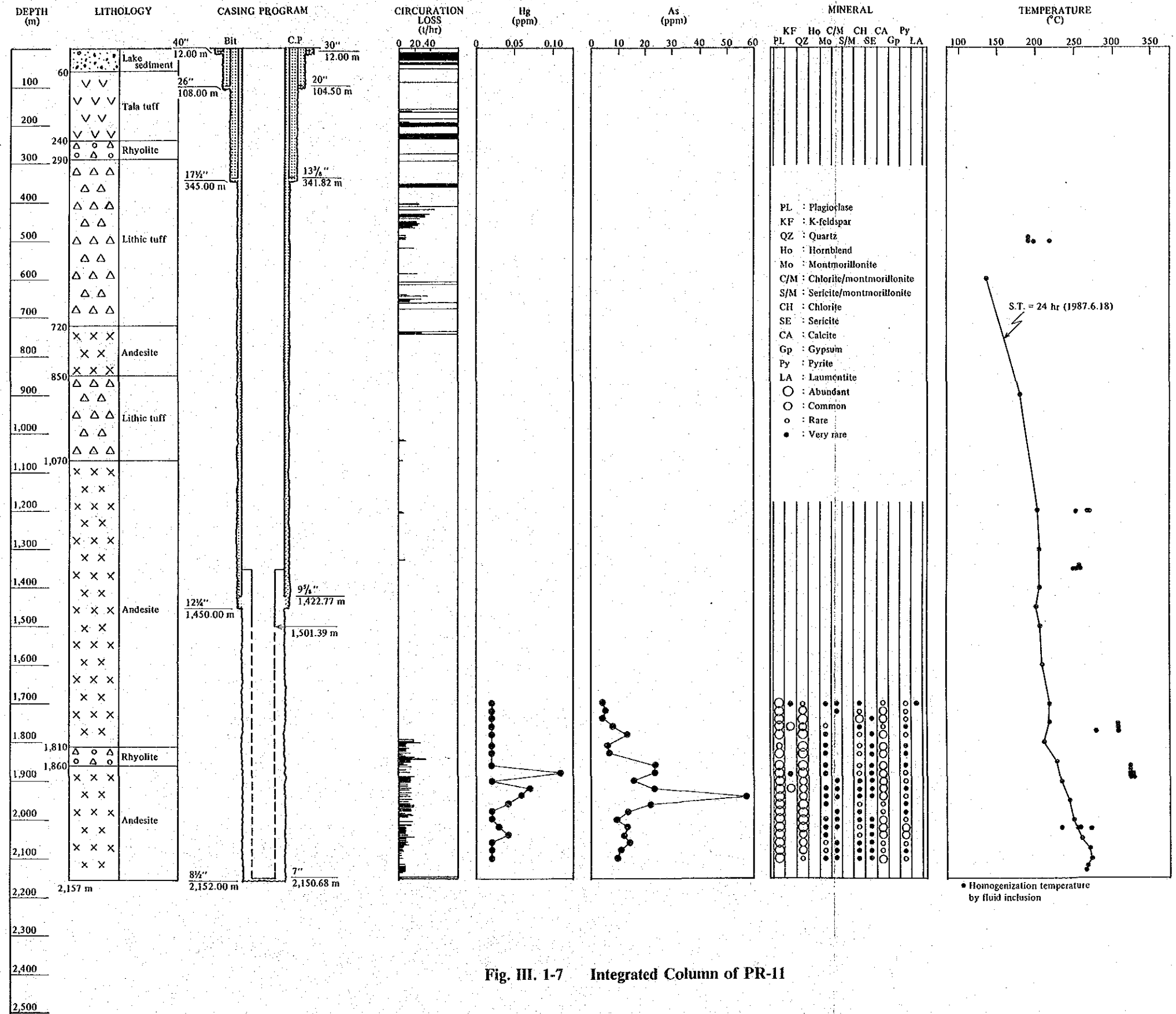


Fig. III. 1-7 Integrated Column of PR-11

1981. 4. 22, 1981. 10. 26

Downhole temperature

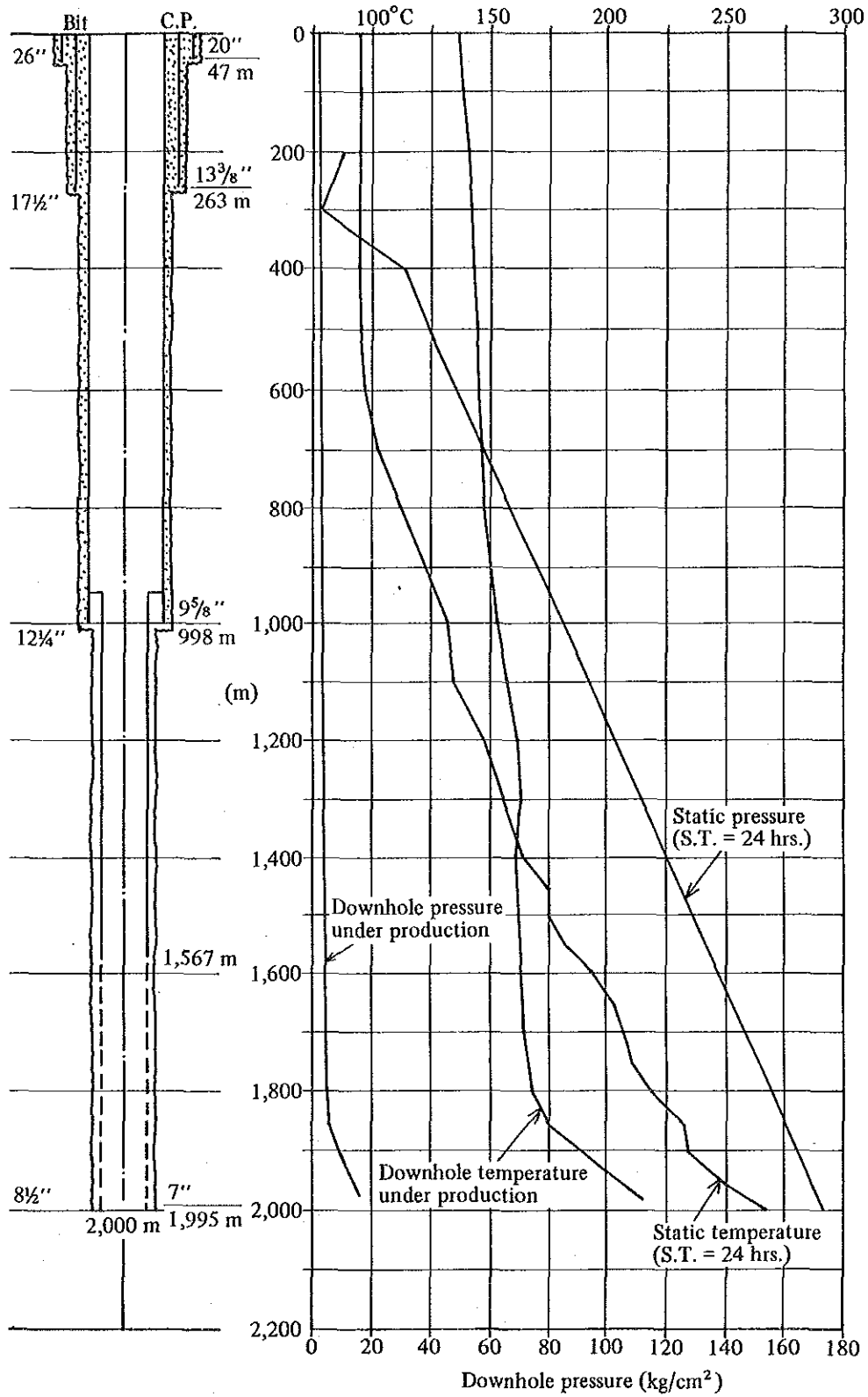


Fig. III. 1-8 Downhole Temperature and Pressure of PR-2 in Static Condition

1982. 7. 22-24, 1982. 9. 2 Downhole temperature (°C)

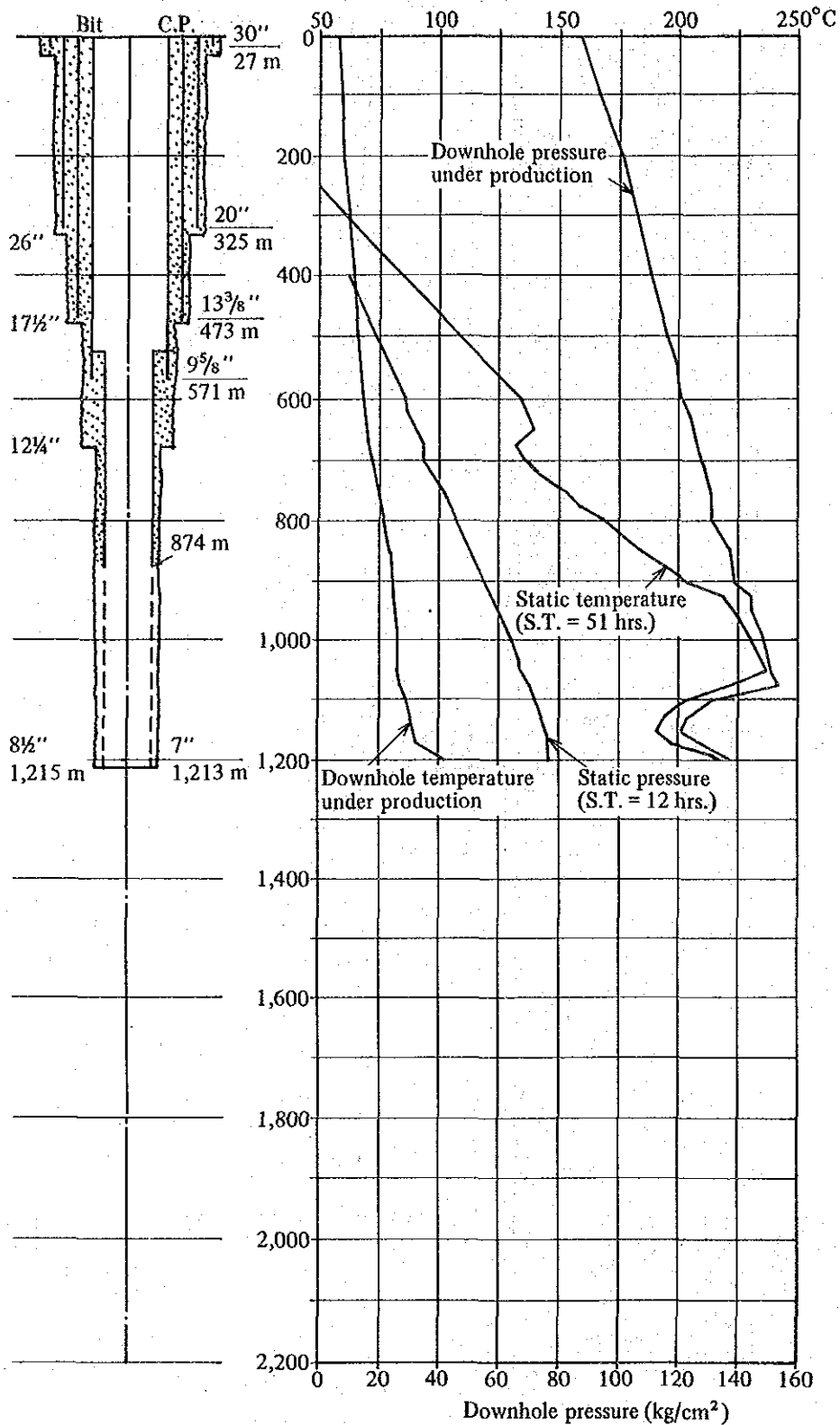


Fig. III. 1-9 Downhole Temperature and Pressure of PR-5

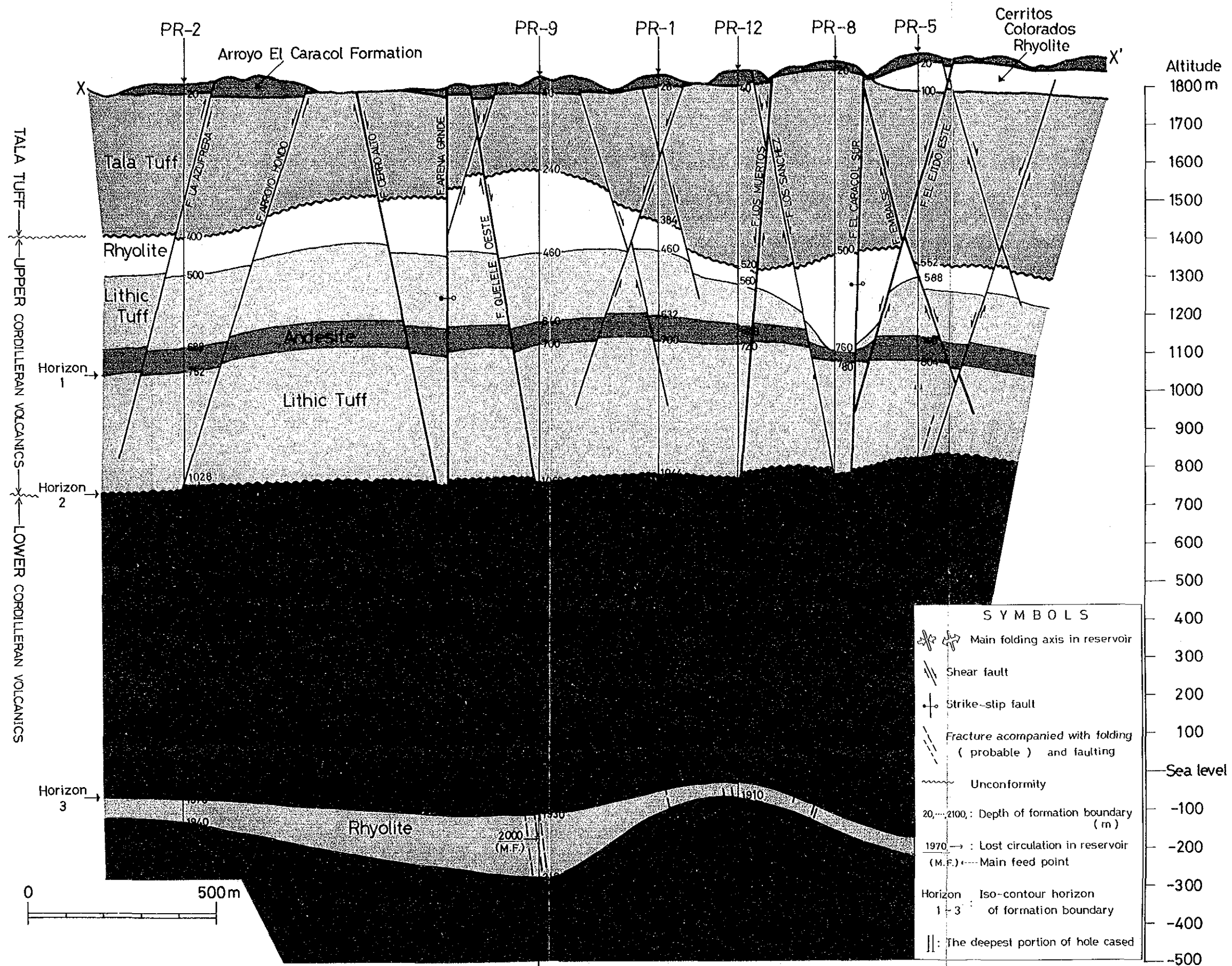


Fig. III. 1-10 Profile of Subsurface Structure in NW-SE Direction

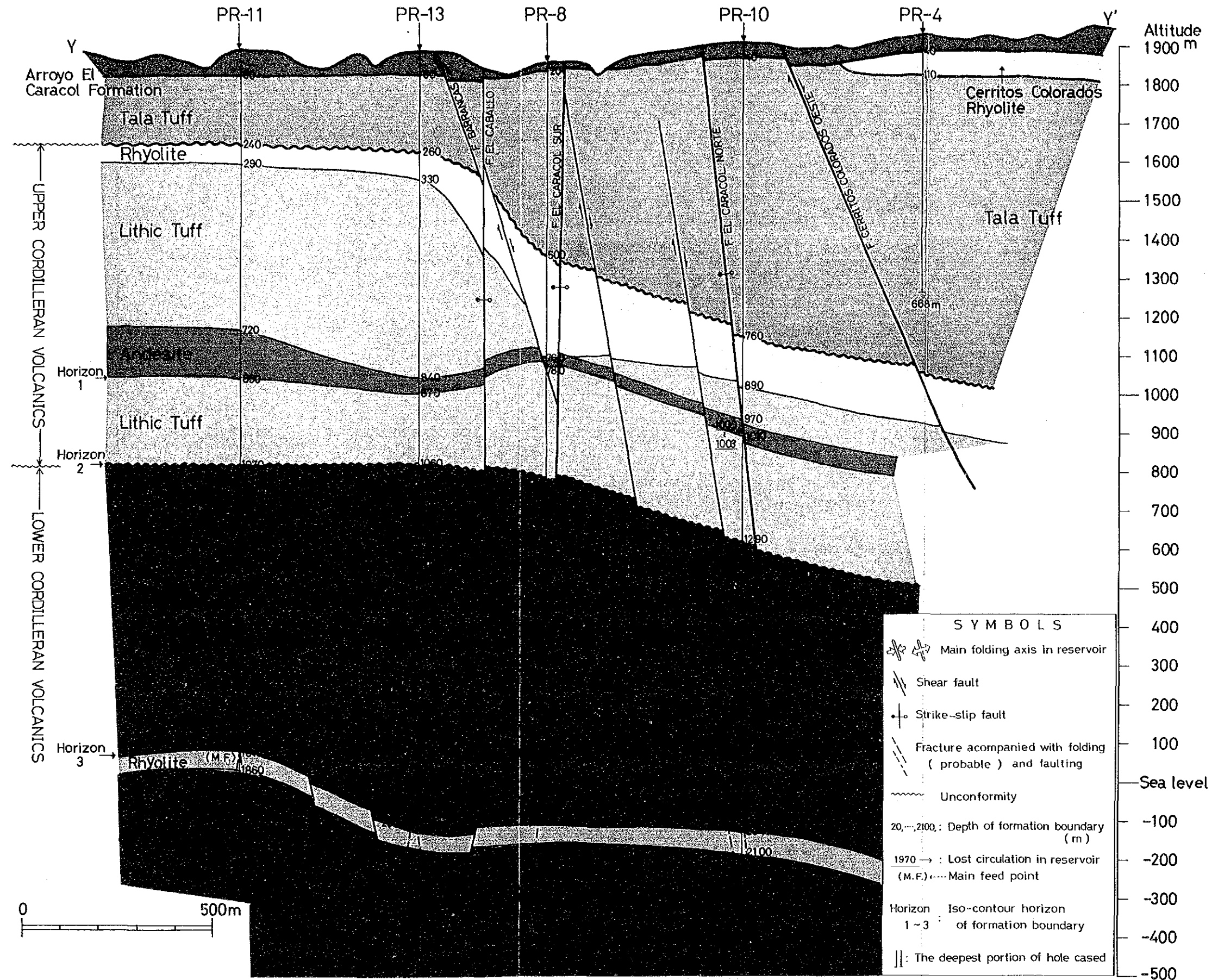
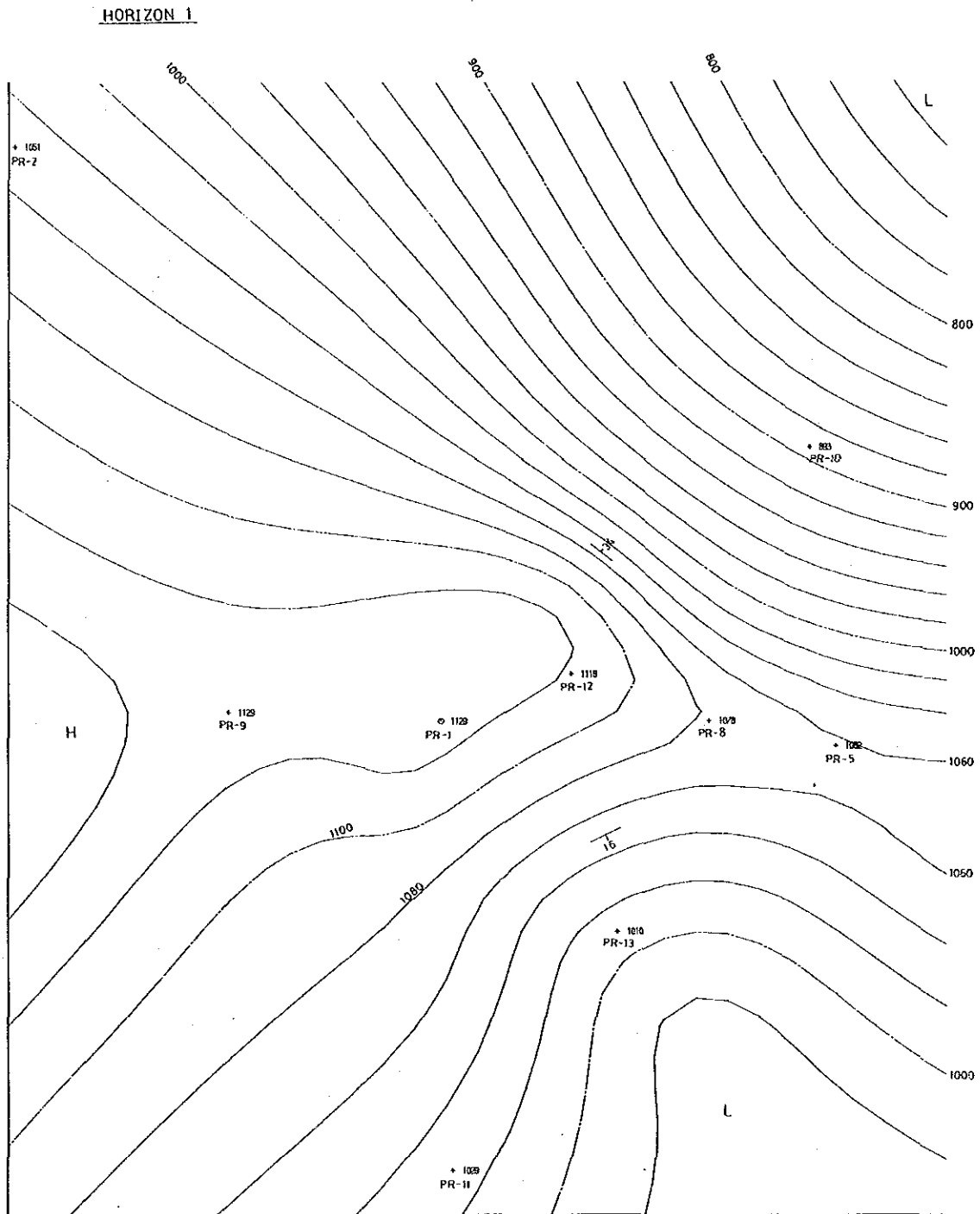
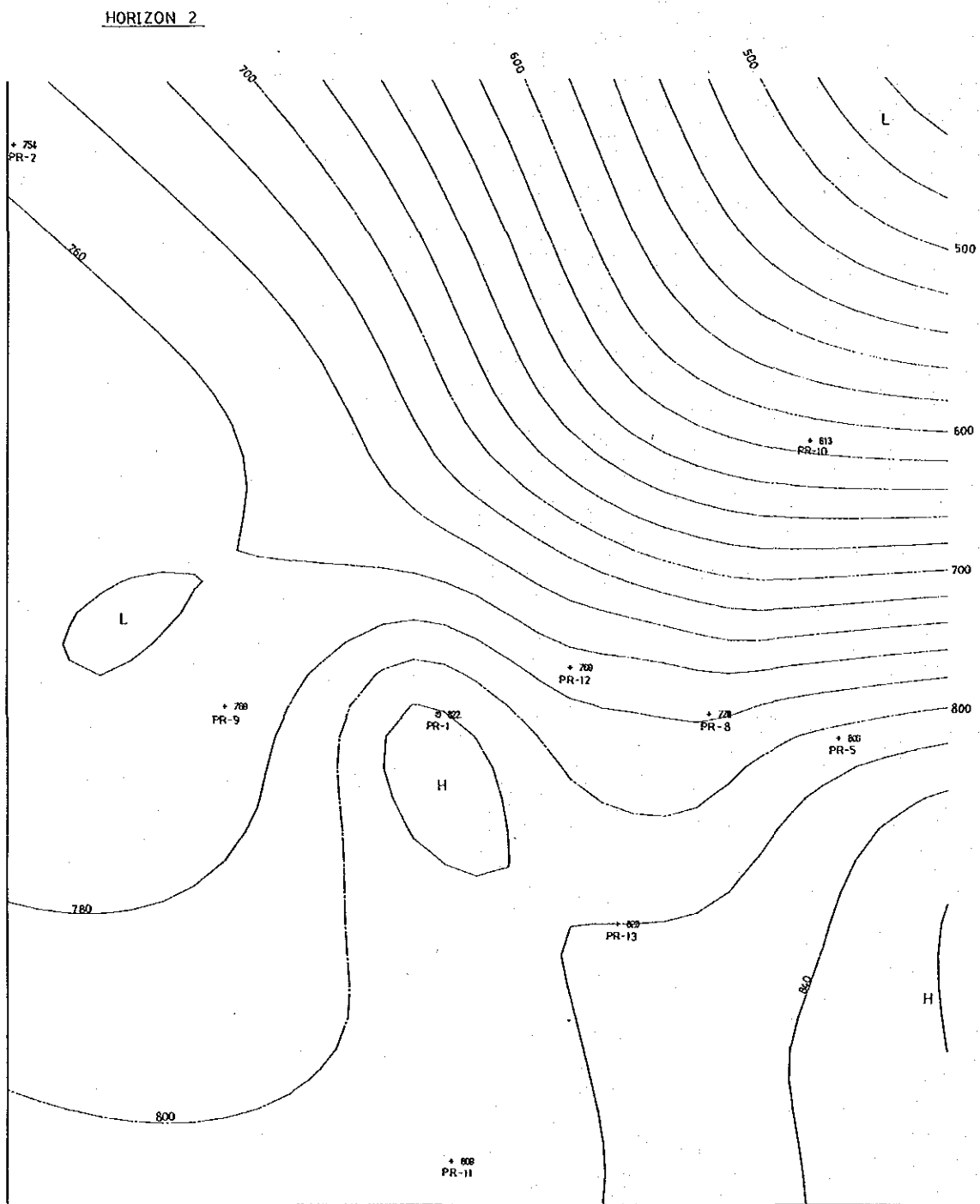


Fig. III. 1-11 Profile of Subsurface Structure in NE-SW Direction



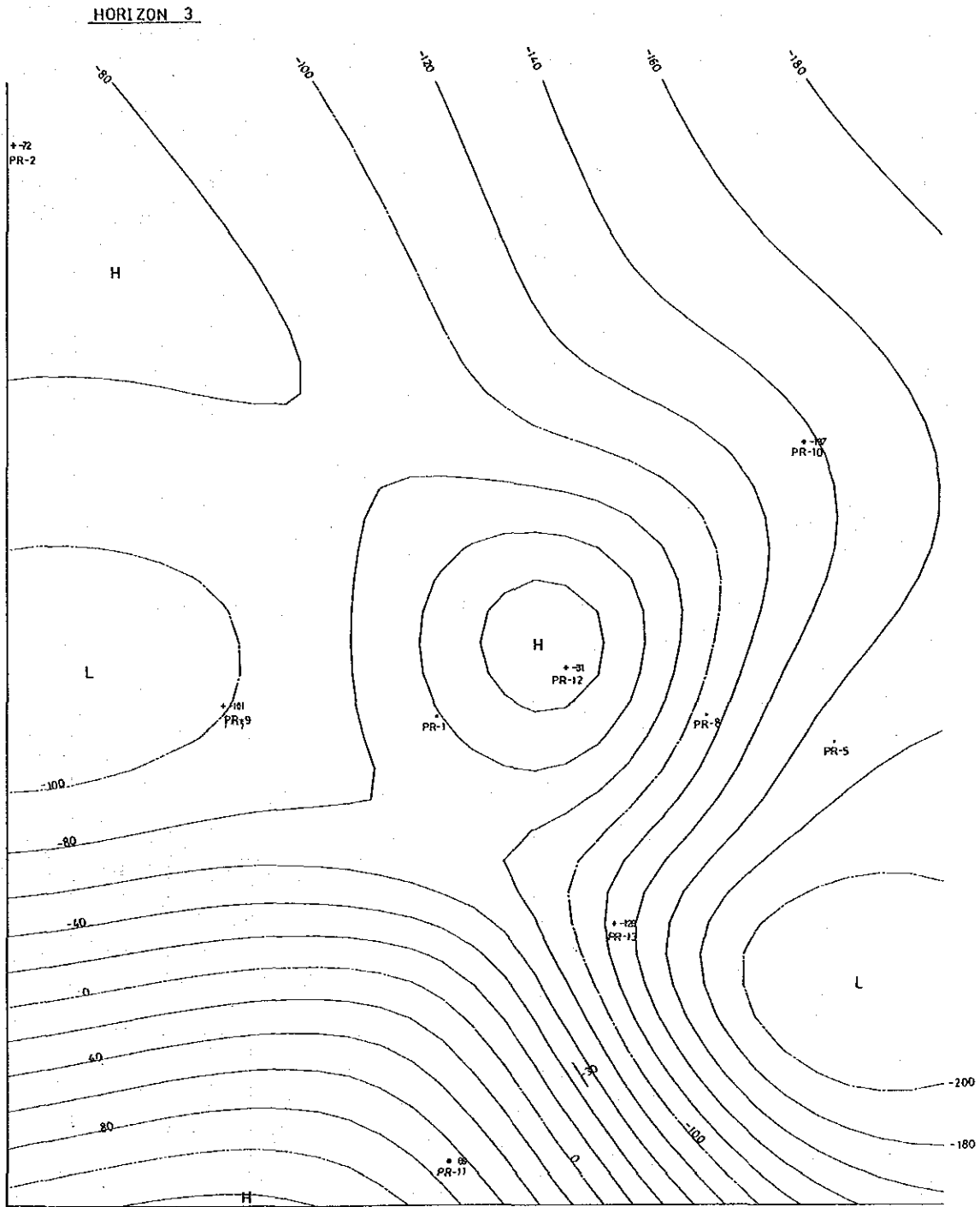
800 ~ 1000 : Altitude above see level (m)
 PR-1 ~ PR-13: Wells
 H : Portion of high altitude
 L : Portion of low altitude

Fig. III. 1-14 Iso-Structural Contour of Horizon 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. 1-15 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. 1-16 Iso-Structural Contour of Horizon 3 (Boundary between andesite and rhyolite of the lower Cordilleran Volcanics)

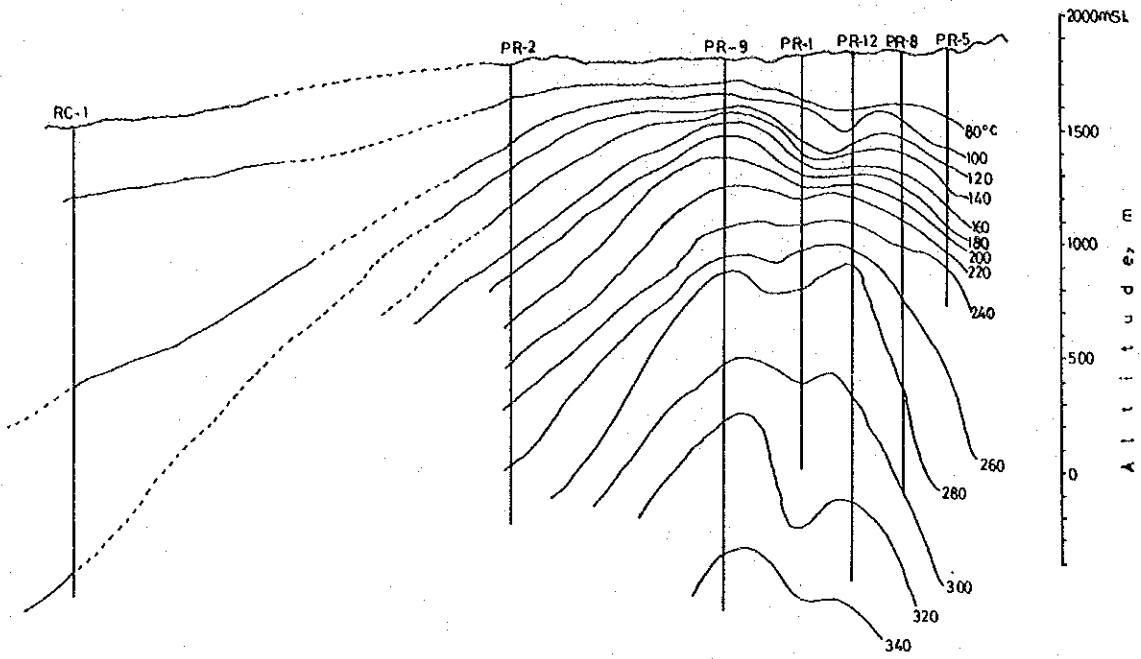


Fig. III. 1-19 Cross-Section of Downhole Temperature Profile

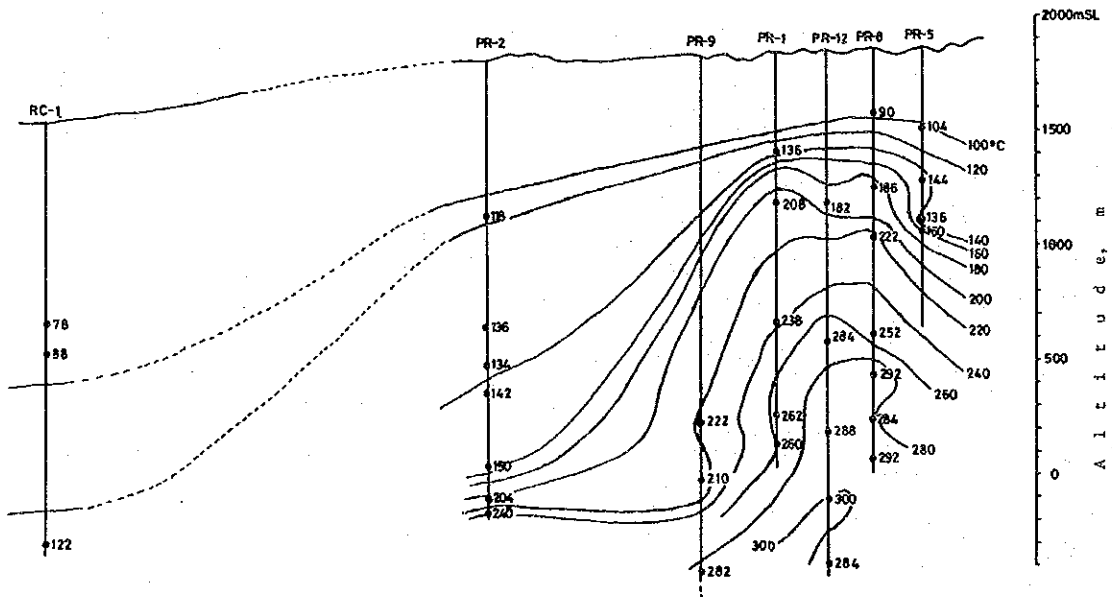


Fig. III. 1-20 Cross-Section of Minimum Homogenization Temperature Profile

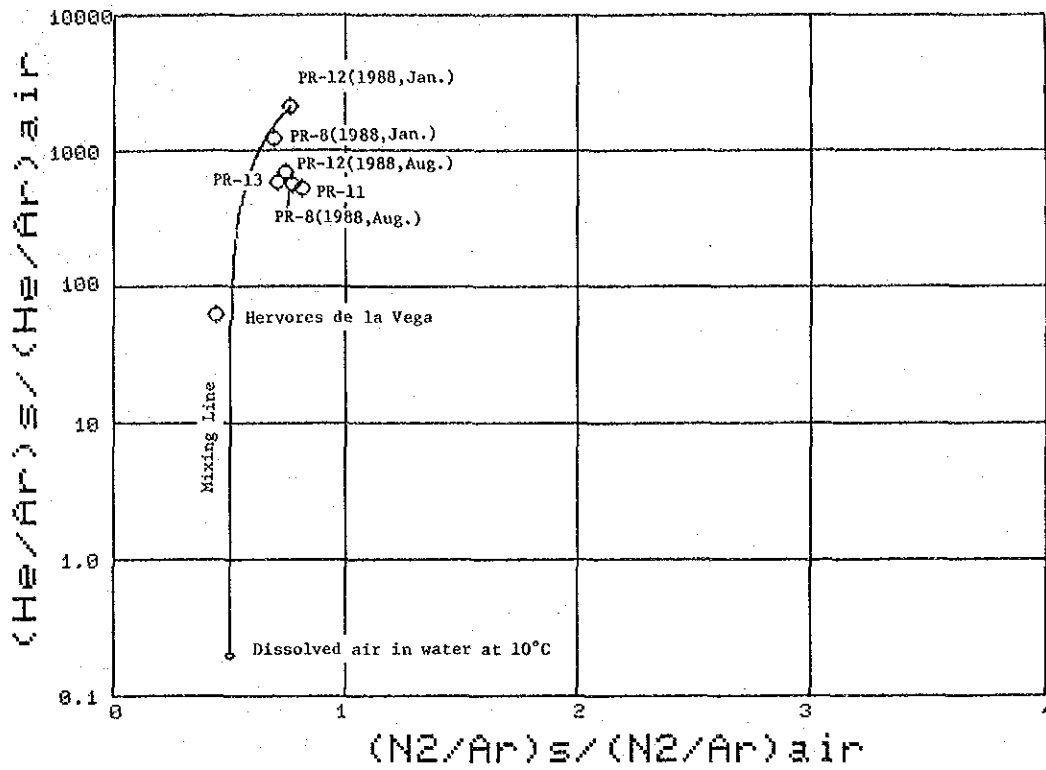


Fig. III. 1-21 Relationship between He/Ar and H_2/Ar Ratios of Geothermal Gaseous Discharge

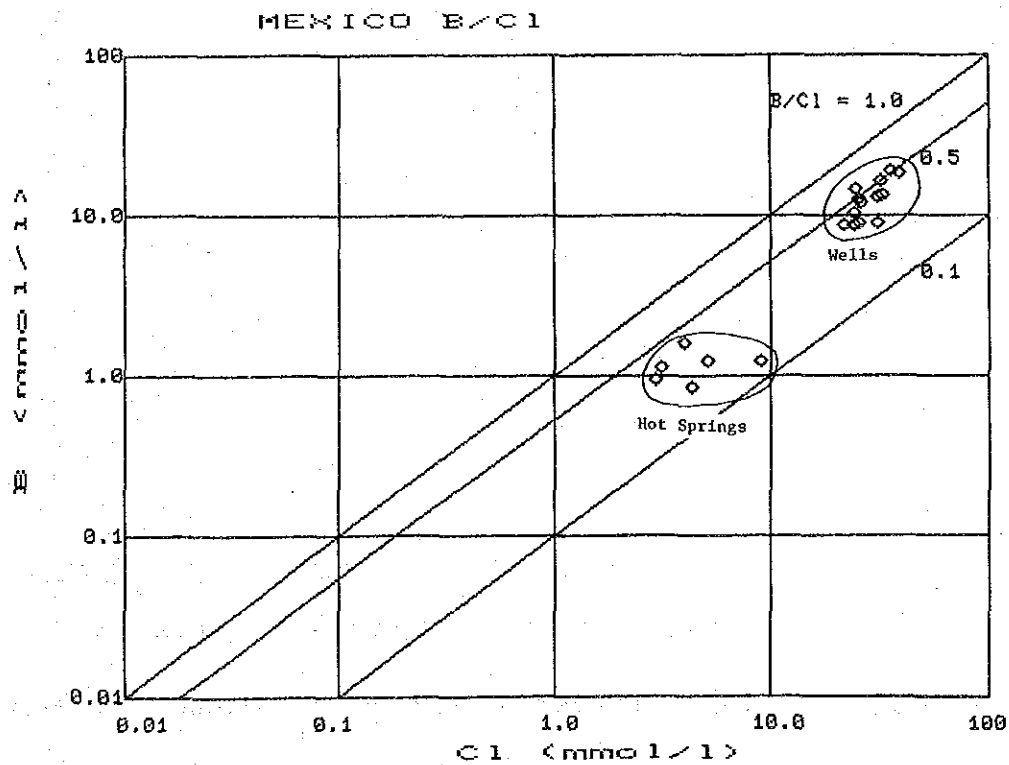


Fig. III. 1-22 Relationship between Cl and B Concentration

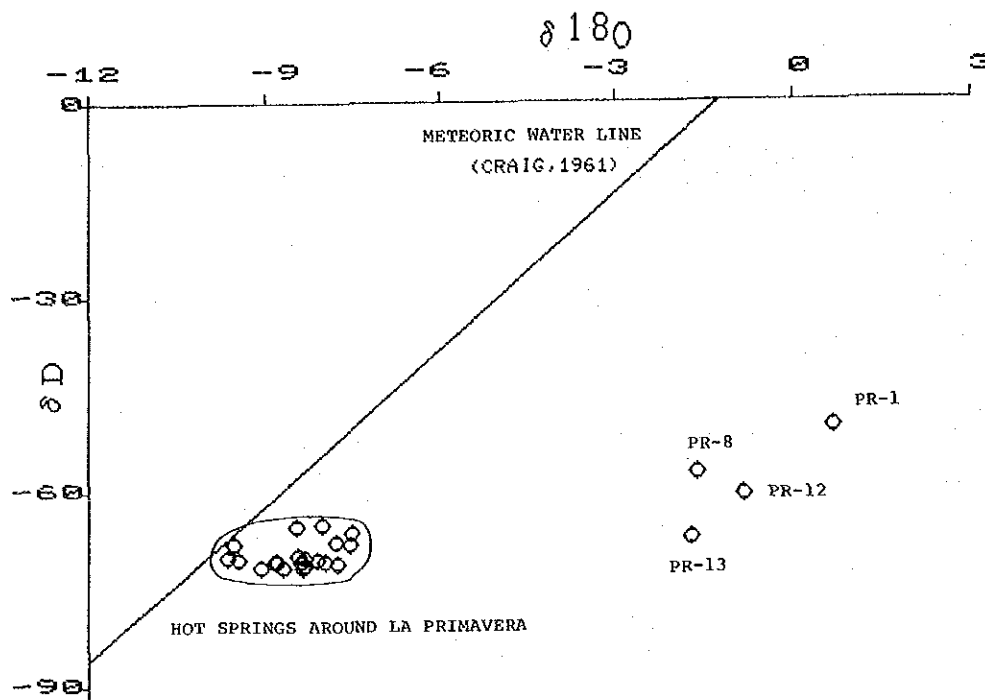


Fig. III. 1-23 Isotopic Composition of Geothermal Water

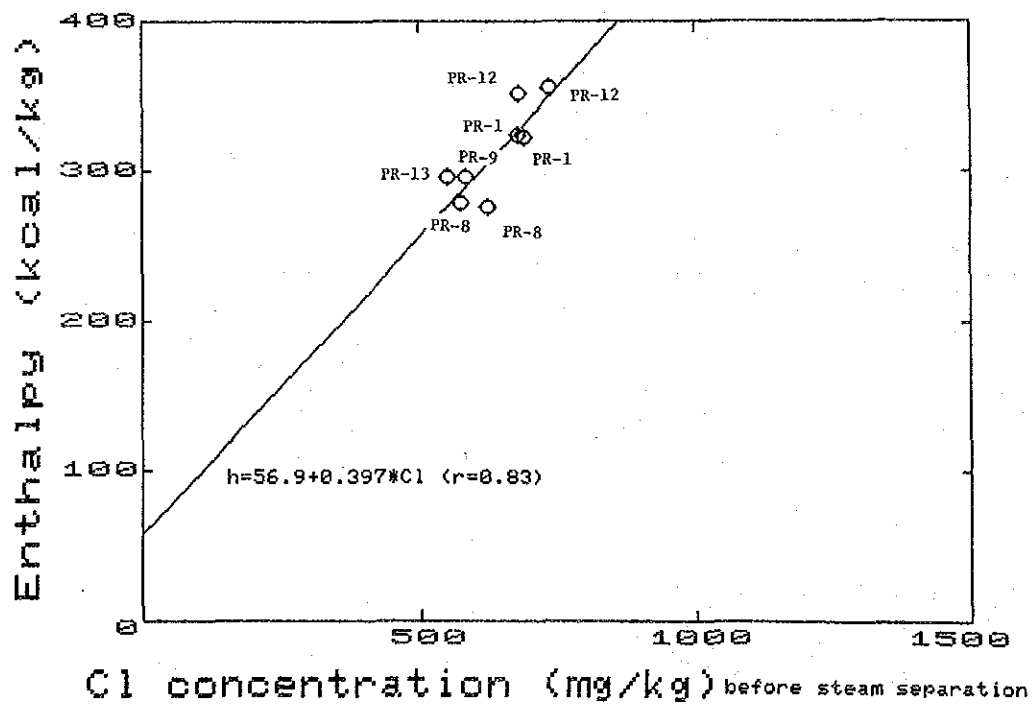
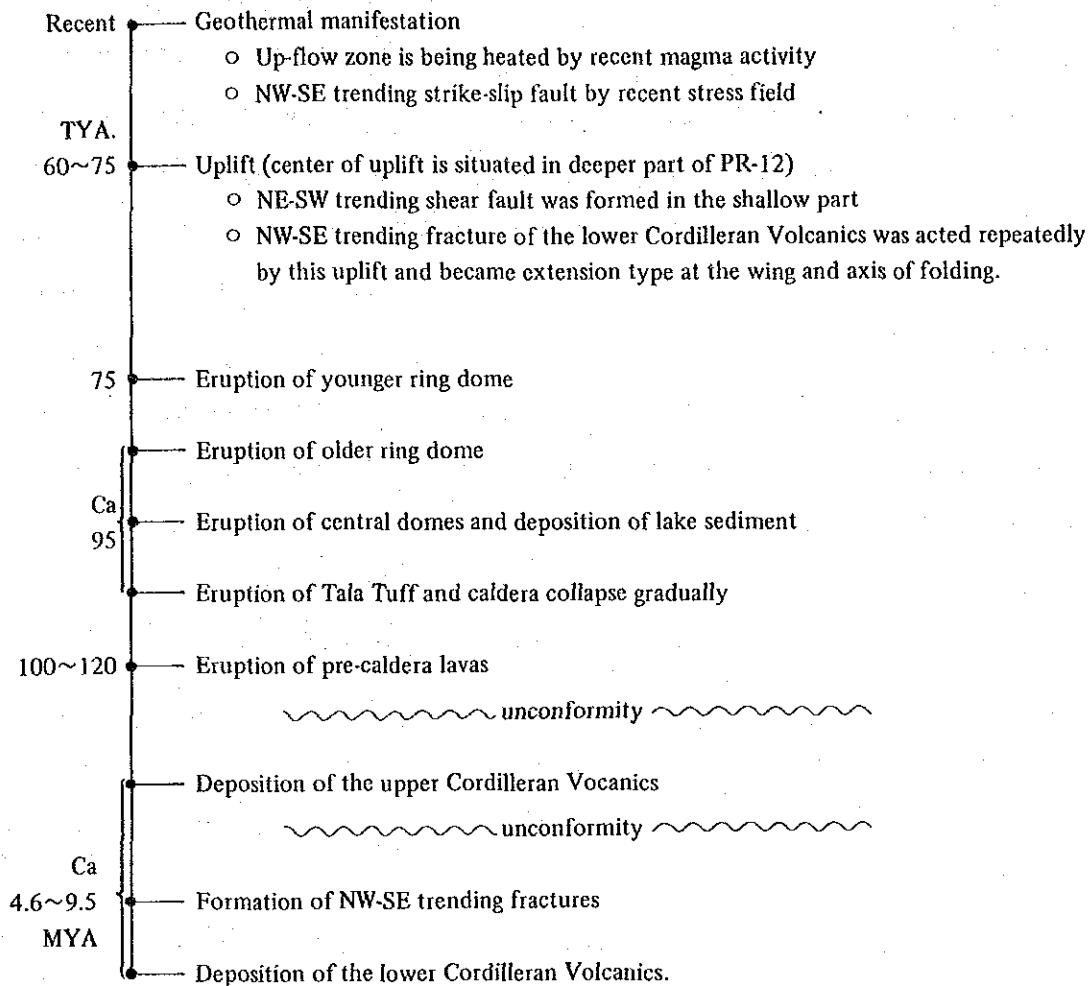


Fig. III. 1-24 Relationship between Cl Concentration and Enthalpy of Hot Water

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.