

## 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態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態とは、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。

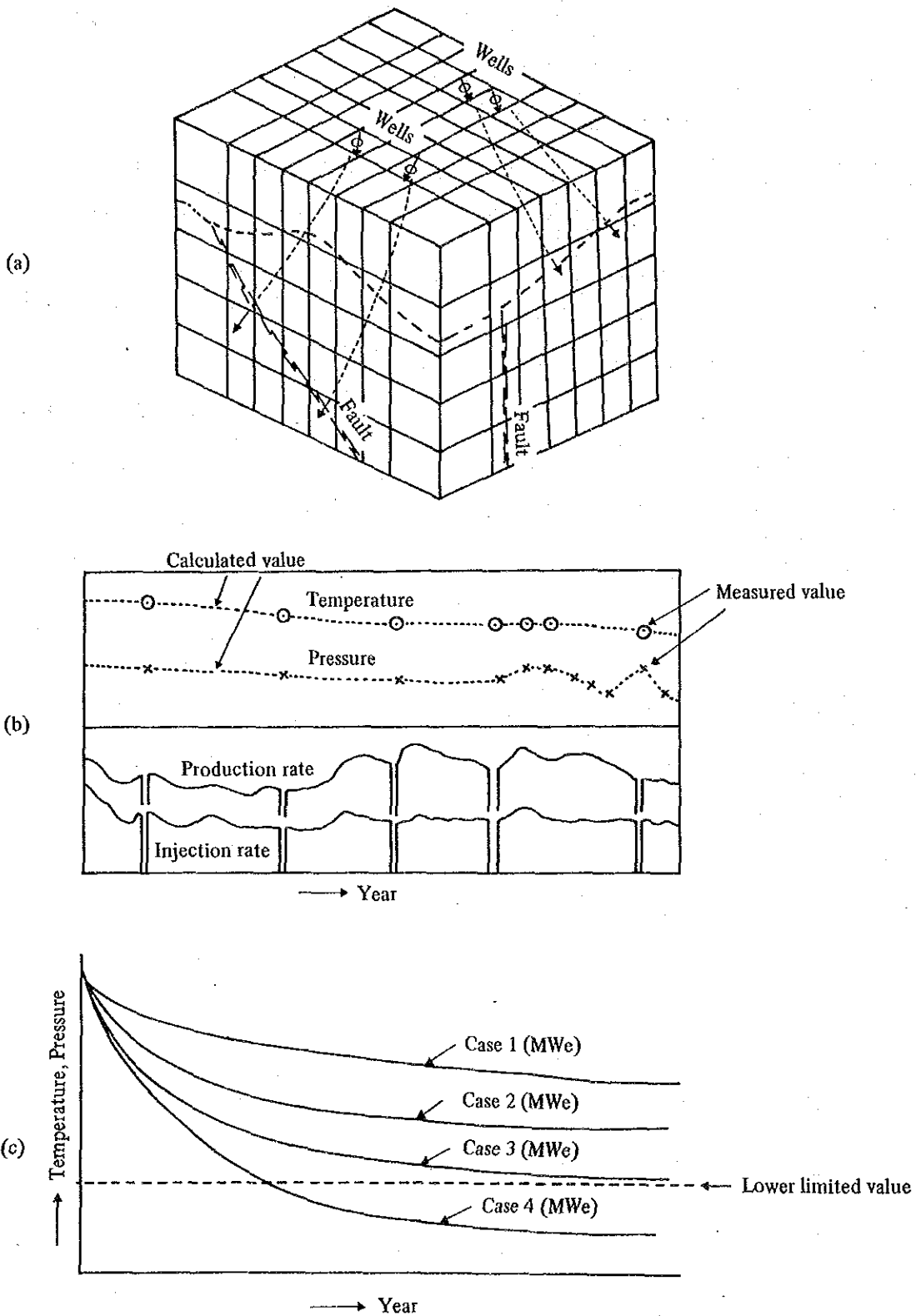
### (3) 将来予測 (prediction)

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. Ⅱ.2-1 のようになる。



**Fig. III. 2-1 Conception of Reservoir Simulation**

## 2.2 シミュレータの概要

ラ・プリマベ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

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

### 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)

本シュミレータの特徴は以下のとおりである。

- ① ポーラス・ダブルポロシティどちらにも対応できる。
- ② 熱水単相～2相～蒸気単相のいずれの状態にもそれらの間での相変化を含み対応できる。
- ③ 取扱い可能なグリッド数が多い。現在までのところ20,000個程度の計算でも問題なく使用されている。
- ④ 数値解法として、最新の技術である完全陰解法を採用しているため収束性が高く、事実上全ての問題に対して収束する。
- ⑤ 同様の理由により計算の実行速度が速い。
- ⑥ 使用可能な範囲が1～374.5℃, 0.001～1000 bar と広く、地下水問題を含む事実上全ての問題に対応できる。

## 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・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2章2.1.2の地熱貯留層の拡がりで推定したように、NW-SE方向に約2 km、NE-SW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-SE方向に4.8 km (20分割)、NE-SW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、断層通過個所を除き、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・レイヤー分割のプロック図を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 $22 \times 20 \times 6 = 2,640$ グリッドとした。

## (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





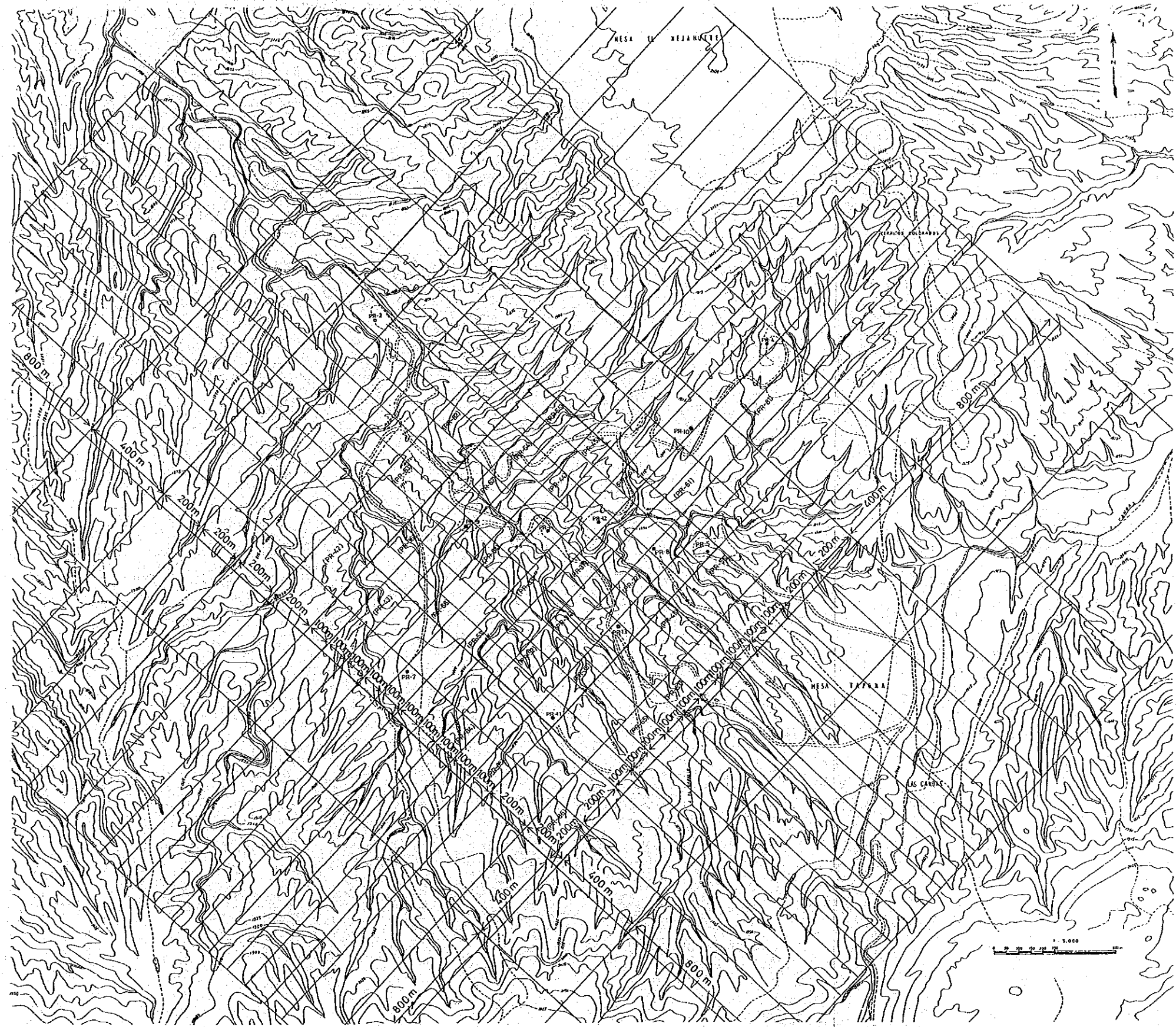


Fig. III. 2-2 Areal Computation Grid used to Simulate the La Primavera Field





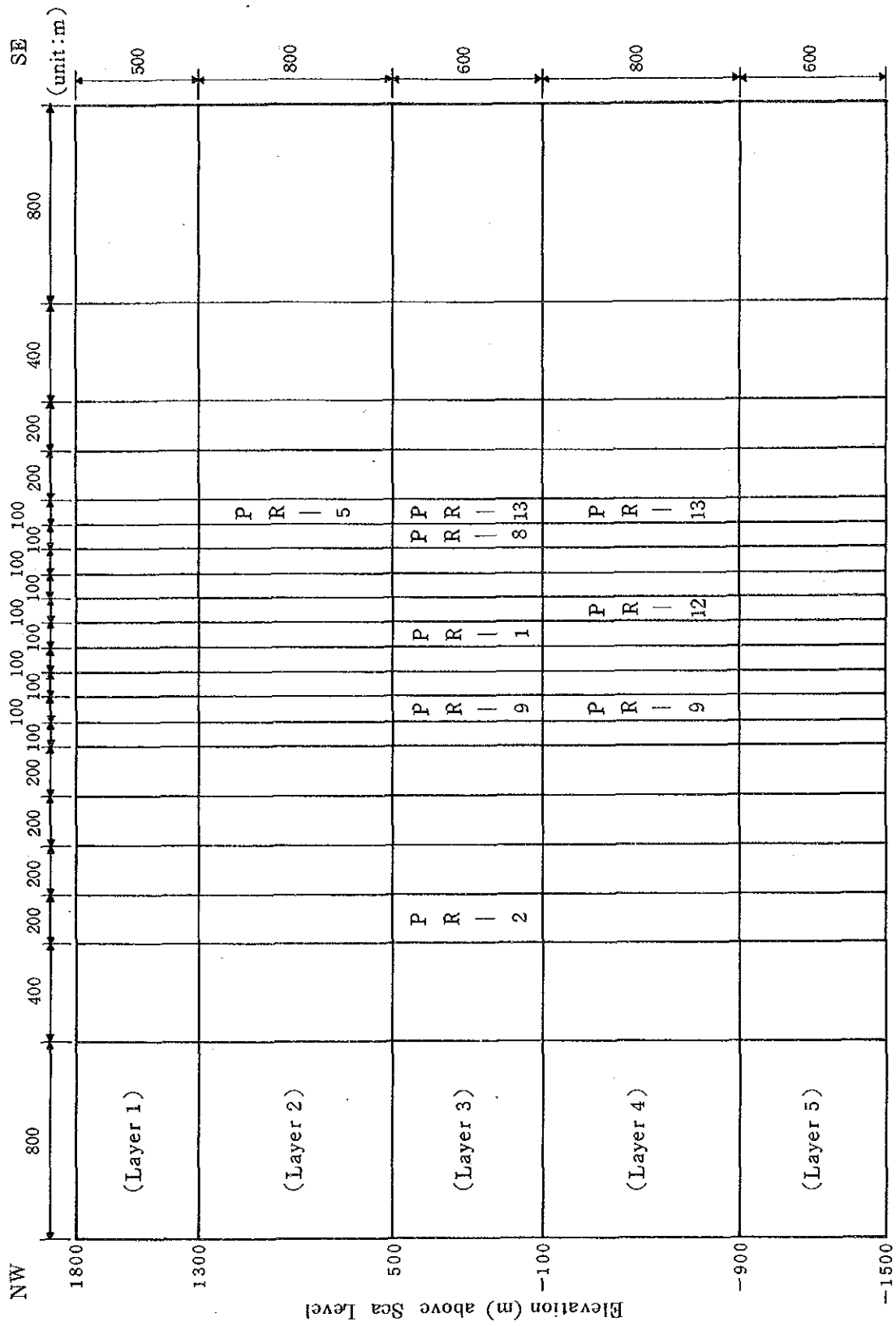


Fig. III. 2-3 Cross Section of Model used for the Simulation

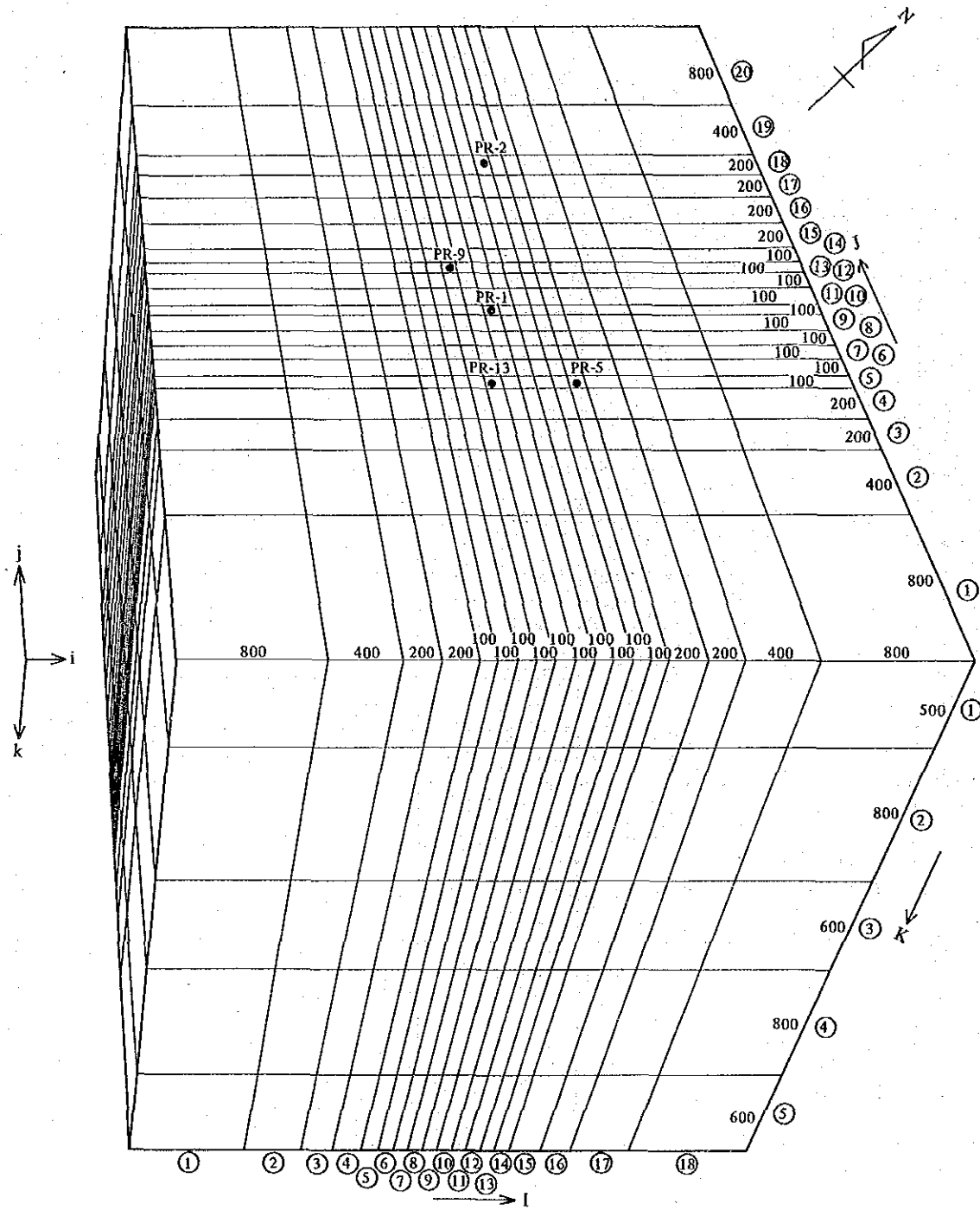


Fig. III. 2-4 Three Dimensional Model of the La Primavera Field

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 1.1.1 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など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。

Figs. Ⅲ.2-5 ~ 9 に、このようにして得られた初期温度分布図を示す。これらの図は、1981 年（昭 56）5 月 20 日（0.0 days）における推定温度分布であり、Z=1 はレイヤー 1、以下 Z=5 はレイヤー 5 に相当する。

#### (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。

その結果得られた初期圧力分布を、Figs. Ⅲ.2-10～14に示す。

(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、Table Ⅲ.2-2に示すような基準によって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.2-52～61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以下に述べる方法によって測定した。

① 採取したコアを直径5cm、高さ10cmの円柱にしあげ、これを円筒管に入れ、試料と管の間に接着剤を充填した。

② 試験装置は、Fig. Ⅲ.2-15に示すものを用い、所定時間中の透水した水量、水圧、水温を測定した。

③ マトリックス浸透率は下式を用いて計算した。

$$K_{15} = \frac{\mu_T \cdot L \cdot Q}{A \cdot P \cdot t} \cdot \frac{\mu_T}{\mu_{15}} \quad (\text{darcy}) \quad \dots\dots\dots (3.2.3)$$

ここで、 $K_{15}$  : 15℃に換算した浸透率

$\mu_T$  : T℃における粘性係数

$\mu_{15}$  : 15℃における粘性係数

L : 試料の高さ

Q : 透水量

A : 試料の断面積

P : 水 圧

t : 試験時間

以上のようにして測定した結果は、Table Ⅲ.2-3のようになる。本シミュレーションではこれらの試験値の平均値である0.0126mD(≐0.0126×10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>)を一律に与えた。

**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	



Table III. 2-2 Ranks of Initial Fracture Permeability

Rank	permeable					impermeable	
	I	II	III	IV	V	VI	VII
layer 1	complete lost circulation	encounter fault	permeable	less permeable			
layer 2			good fracture in geology	average permeability of fault	poor permeability of fault	high resistivity in MT	impermeable
layer 3	good fracture and less than 5Ω-m in MT	good fracture or less than 5Ω-m in MT	fracture and less than 10Ω-m in MT	average fracture or less than 10Ω-m in MT	less fracture and 10Ω-m < ρ < 50Ω-m in MT	less fracture or 10Ω-m < ρ < 50Ω-m in MT	poor fracture
layer 4		good fracture and less than 5Ω-m in MT	good fracture and more than 5Ω-m in MT	average fracture and 5Ω-m < ρ < 10Ω-m in MT	average fracture and high resistivity in MT	less fracture and high resistivity	impermeable
layer 5		upflow zone	low resistivity in MT				

Table III. 2-3 Matrix Permeability in each Well

Sample No.	Well	Depth (m)	Matrix Permeability (Darcy)
1	PR-7	276.0 ~ 276.5	$7.30 \times 10^{-7}$
2	PR-9	2,985.0 ~ 2,986.0	$6.17 \times 10^{-5}$
3	PR-11	1,719.0 ~ 1,719.2	$3.87 \times 10^{-6}$
4	PR-12	2,302.5 ~ 2,302.7	$7.45 \times 10^{-7}$
5	PR-13	1,500.6 ~ 1,500.8	$7.25 \times 10^{-6}$
6	PR-13	2,004.0 ~ 2,004.2	$1.20 \times 10^{-6}$

(7) 孔隙率、密度、熱伝導率、比熱

シミュレーション計算に必要なこれらの物性値のうち、比熱を除く各値はマトリックス浸透率と同様に、コアの測定値を基に設定した。コアの測定方法およびその結果については、第Ⅱ章 1.1.6 (1)に示したが、これらの値にさらに、Table III.2-3に示す6個のコアについても測定を行ったので、これらの値をもつけ加えた。

① 孔隙率

マトリックス孔隙率は、各レイヤー毎にコア物性試験による測定値の平均値を算出し、その値を各レイヤー毎に与えた。その結果をTable III.2-4に示す。

Table III. 2-4 Matrix Porosity in each Layer

Layer	Matrix Porosity (%)
Layer 1	7.8
Layer 2	17.3
Layer 3	12.5
Layer 4	6.7
Layer 5	4.5

フラクチャー孔隙率は、貯留層圧力の経時変化が明らかな場合、マッチング作業を通してその値を推定することは可能である。しかし経時変化が不明のため、ここでは一律1%として取り扱った。

② 密度

コアの採取深度と、密度測定との相関関係を調査したところ、Fig. III.2-16に示すように、密度はコア採取深度と強い相関関係のあることが判明した。この関係を、回帰直線で表わすと、(3.2.4)式が得られる。

$$\rho = 2.13 + 1.91 \times 10^{-4} * D \dots\dots\dots (3.2.4)$$

ここで、

$\rho$  : 密度 (g/cm<sup>3</sup>)

D : コア採取深度 (m)

この関係式から各レイヤーの密度値を算出し、各レイヤーの密度を Table III. 2-5 に示すように決定した。

Table III. 2-5 Density in each Layer

Layer	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Layer 1	2.19
Layer 2	2.31
Layer 3	2.45
Layer 4	2.58
Layer 5	2.71

③ 熱伝導率

また熱伝導率は、Fig. III.2-17 に示すように、密度と最も強い相関が強いことが判明した。そこで密度と同様に回帰直線を求め、この関係式より各レイヤーの熱伝導率を算出した。その結果を、以下に示す (Table III.2-6)。

$$\lambda = -5.864 \times 10^{-3} + 4.10 \times 10^{-3} * \rho \quad \dots\dots\dots (3.2.5)$$

ここで、

$\lambda$  : 熱伝導率 (cal/cm/s/°C)

D : 密度 (g/cm<sup>3</sup>)

Table III. 2-6 Thermal Conductivity in each Layer

Layer	Thermal Conductivity (cal/cm/s/°C)
Layer 1	2.19
Layer 2	2.31
Layer 3	2.45
Layer 4	2.58
Layer 5	2.71

④ 比熱

コアによる貯留岩の比熱の測定はなされていない。比熱は、厳密には Fig. III.2-18 に示すように温度の関数である (Somerton, W.H., 1958)。しかしながら、こ

ここでは生産層の温度が 300℃ ( 572°F ) 程度であることを考慮して、一律 0.265Kcal/kg/℃ ( 0.265Btu/lb/°F ) として取り扱った。

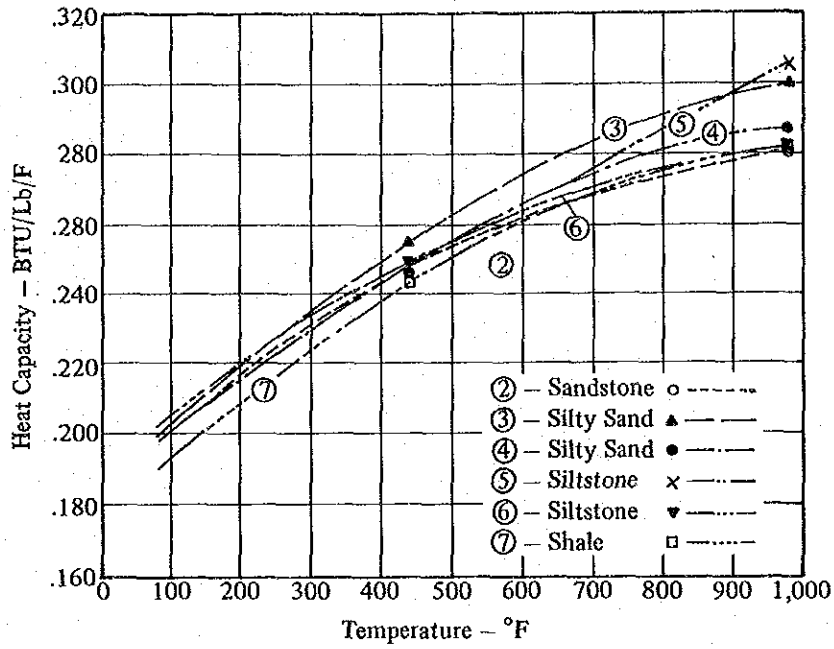


Fig. III. 2-18 Experimental Heat Capacities



INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

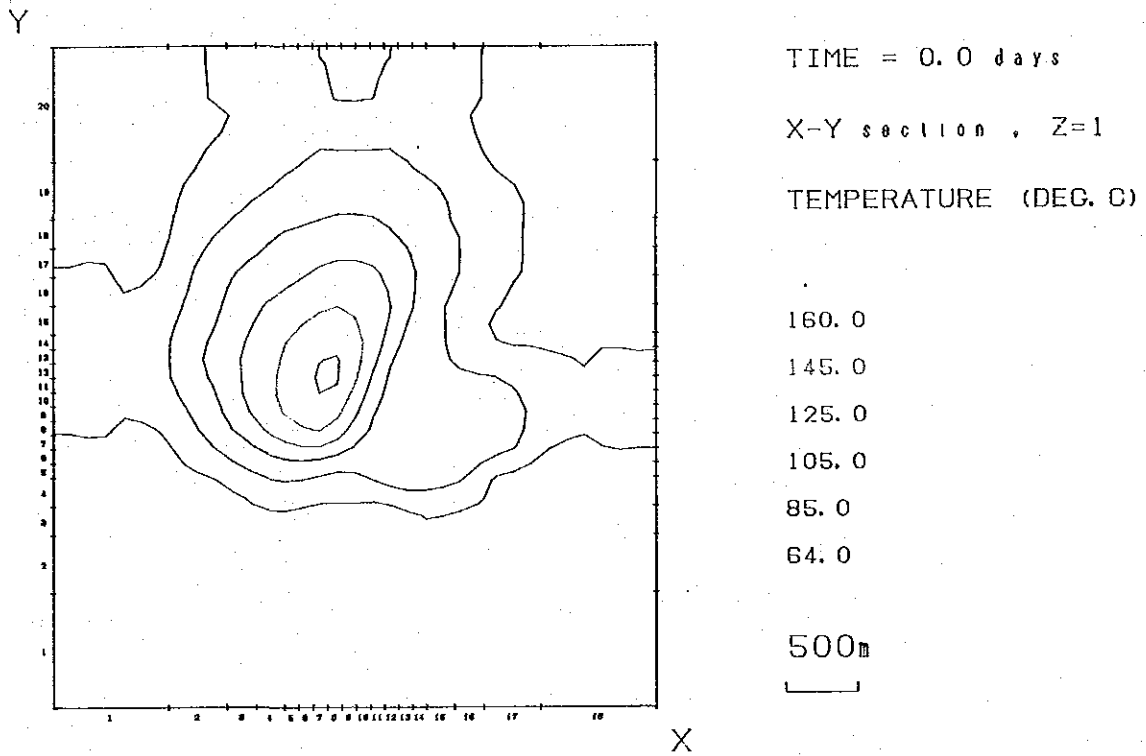


Fig. III. 2-5 Temperature in the Initial Condition (Layer 1)

INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

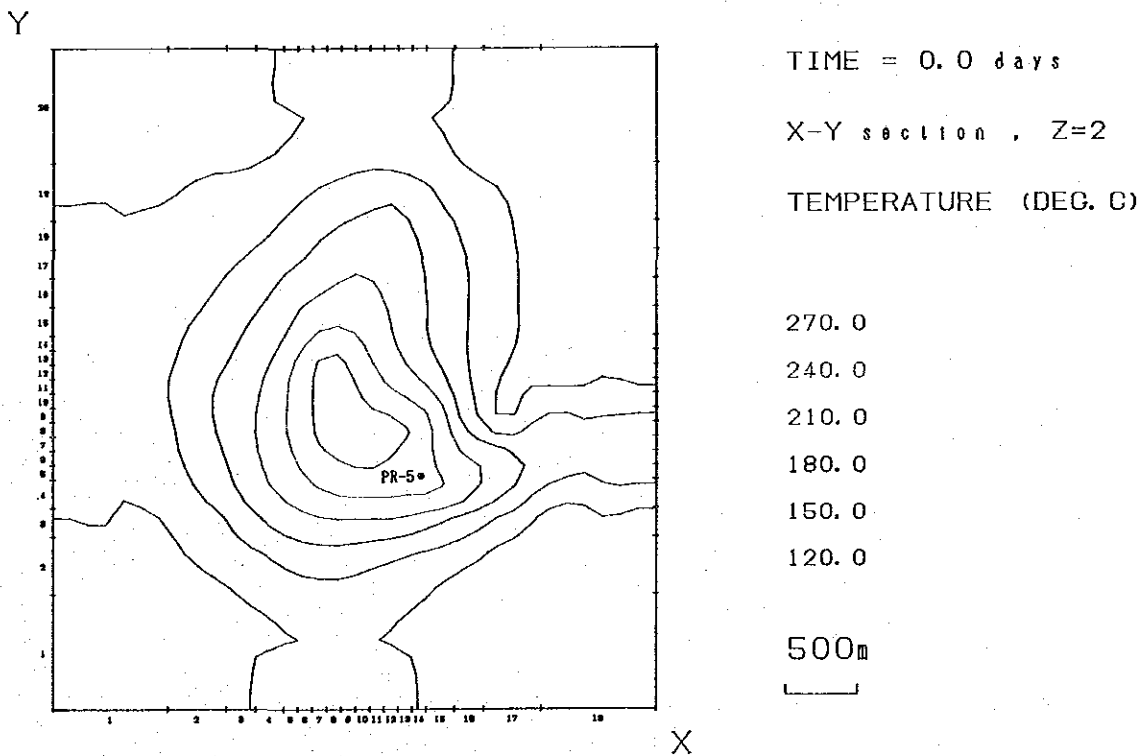


Fig. III. 2-6 Temperature in the Initial Condition (Layer 2)

INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

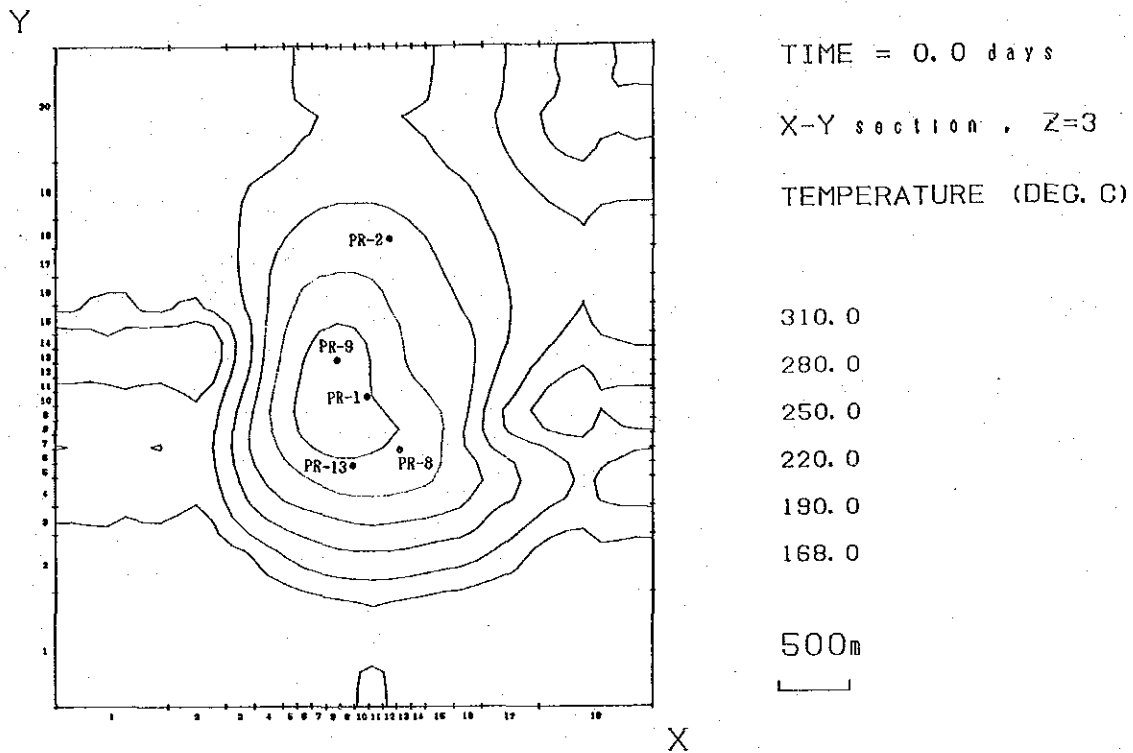


Fig. III. 2-7 Temperature in the Initial Condition (Layer 3)

INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

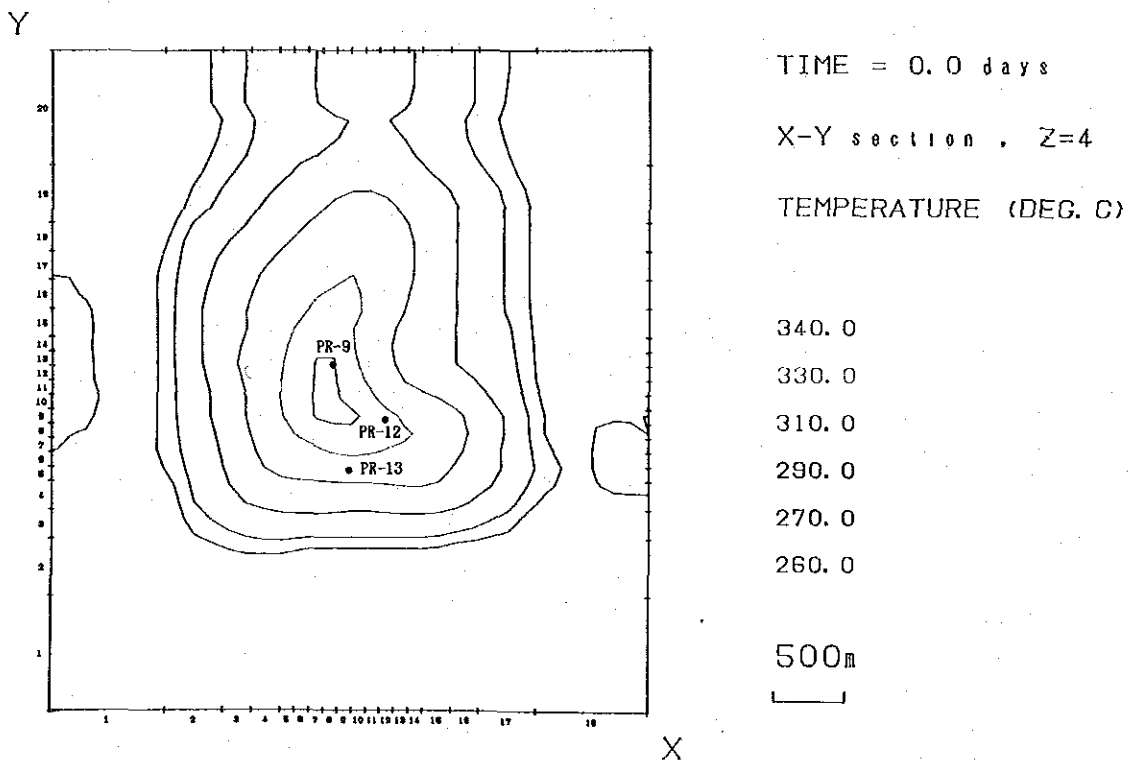


Fig. III. 2-8 Temperature in the Initial Condition (Layer 4)

INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

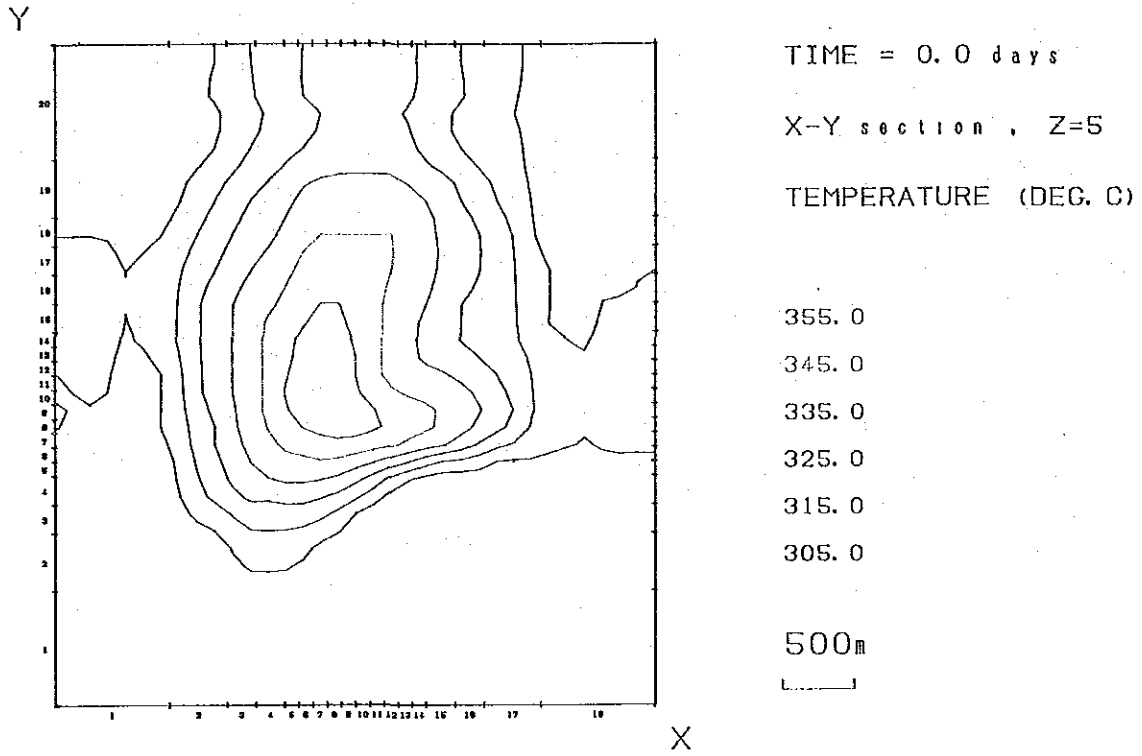


Fig. III. 2-9 Temperature in the Initial Condition (Layer 5)

INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

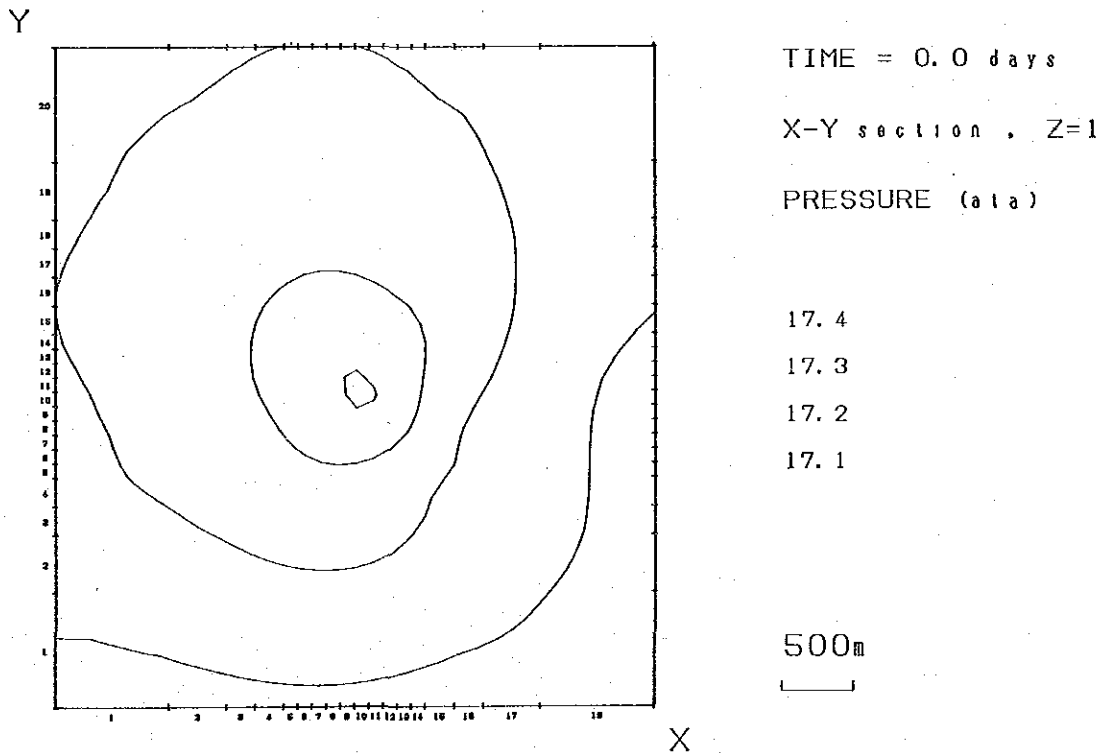


Fig. III. 2-10 Pressure in the Initial Condition (Layer 1)



INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

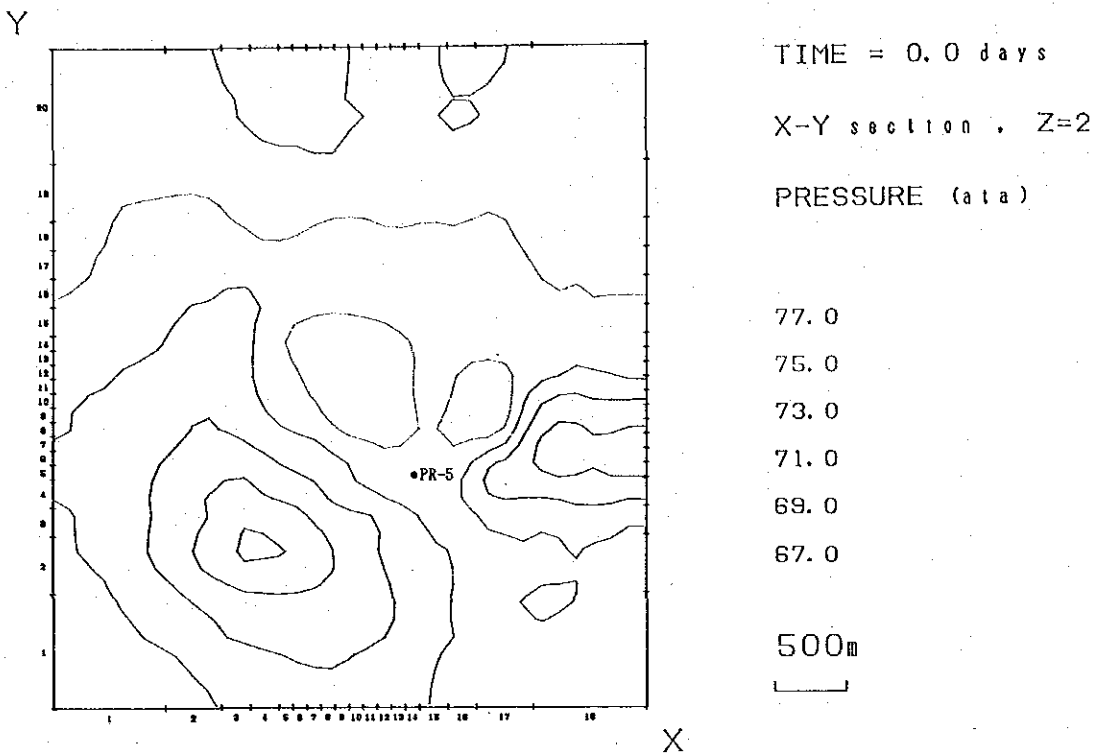


Fig. III. 2-11 Pressure in the Initial Condition (Layer 2)

INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

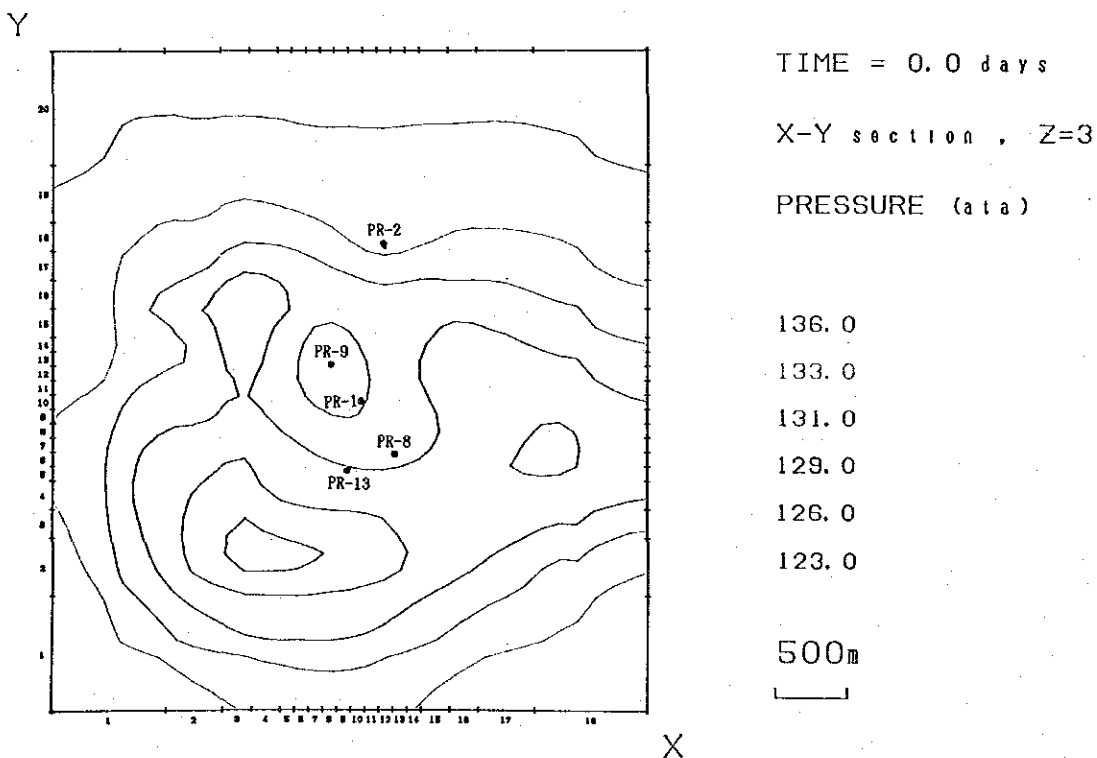


Fig. III. 2-12 Pressure in the Initial Condition (Layer 3)

INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

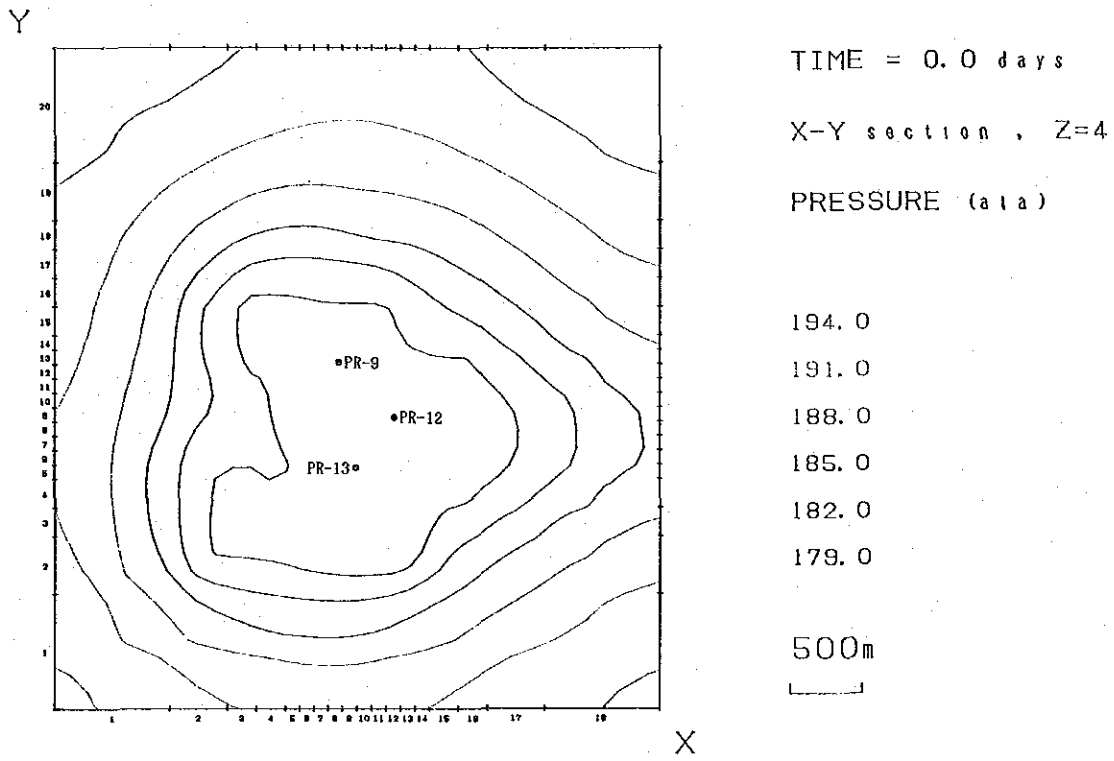


Fig. III. 2-13 Pressure in the Initial Condition (Layer 4)

INITIAL CONDITION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

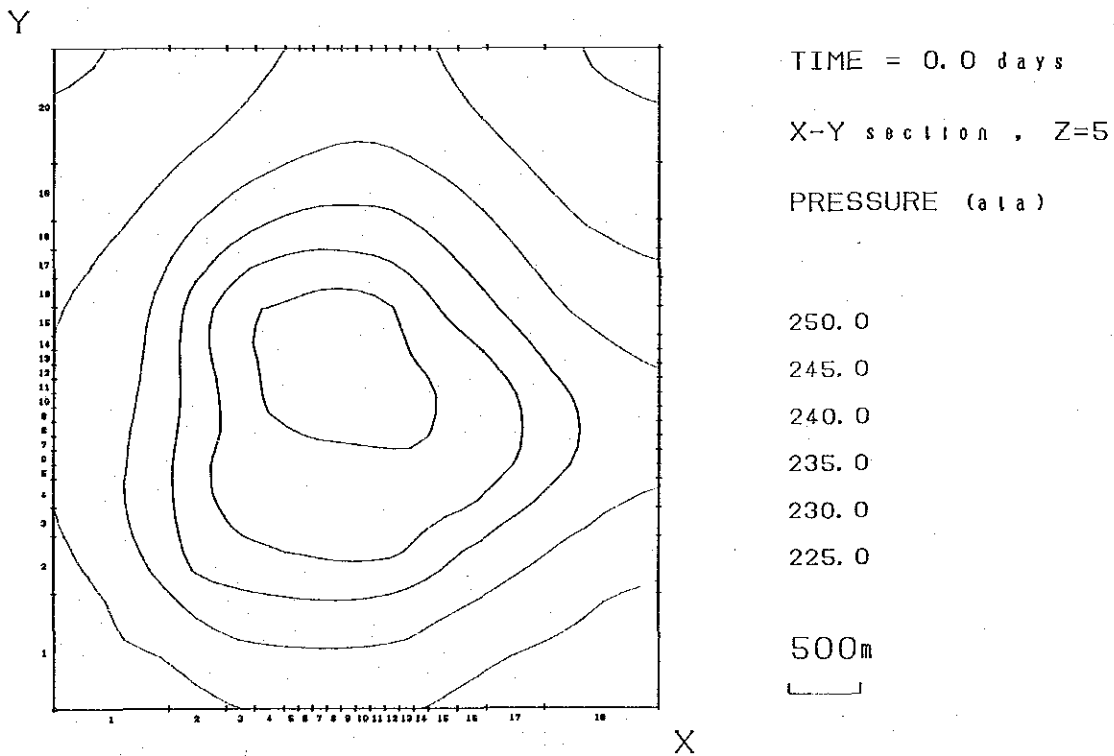


Fig. III. 2-14 Pressure in the Initial Condition (Layer 5)



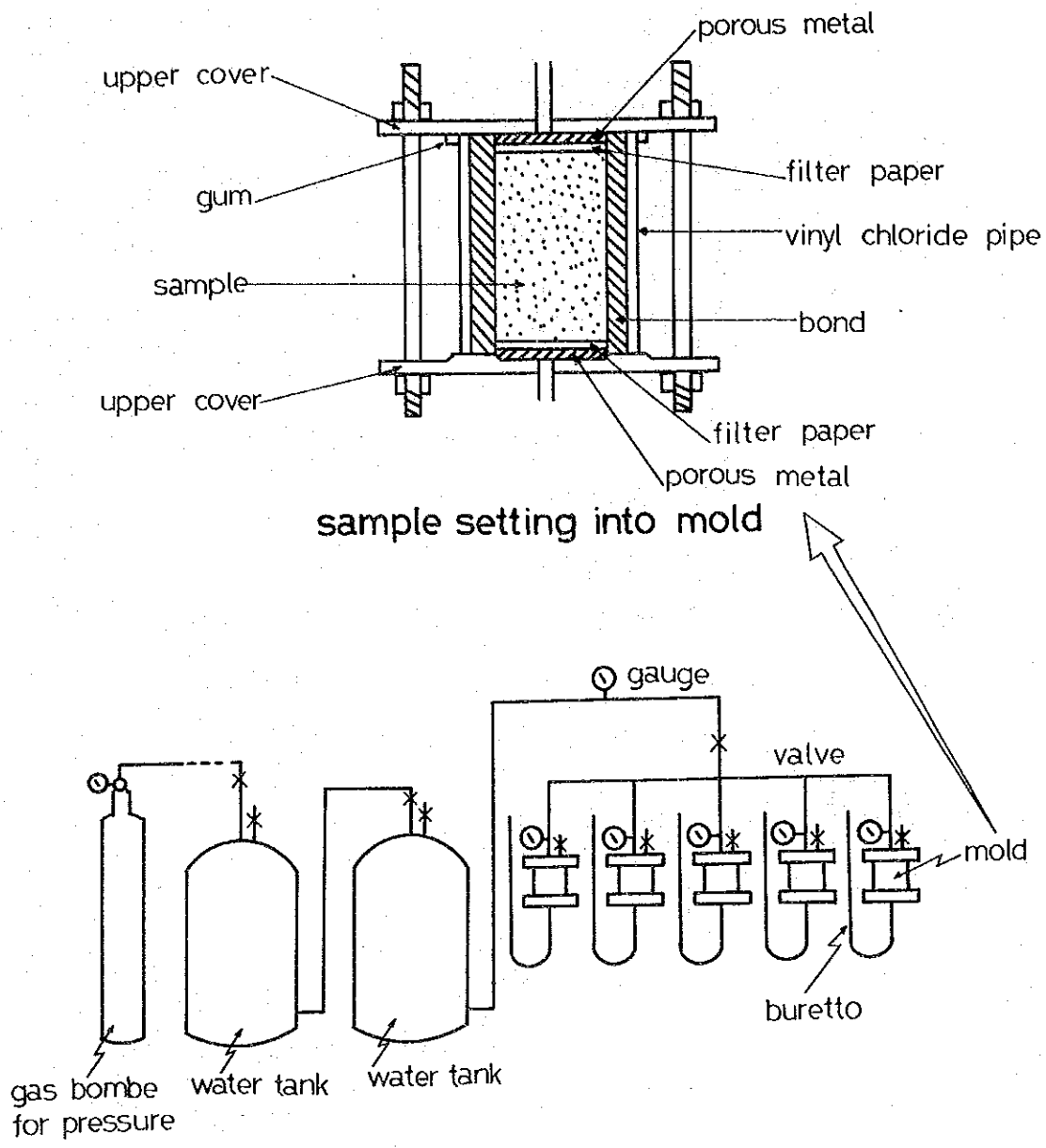


Fig. III. 2-15 Appratus for Core Permeability Test

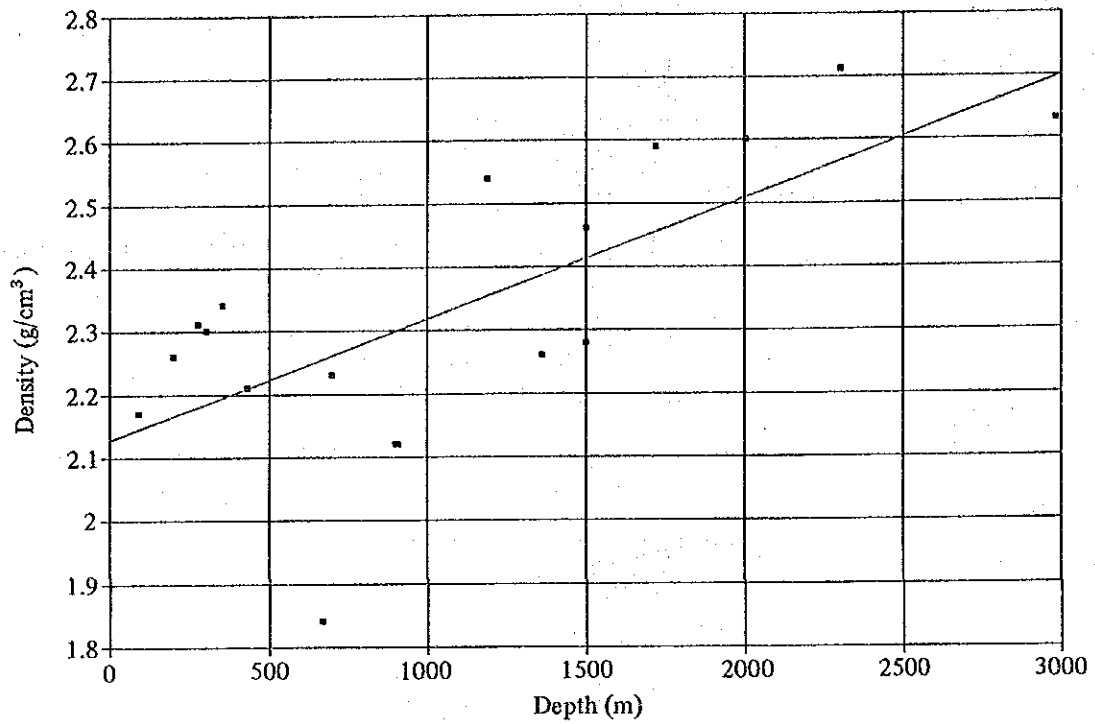


Fig. III. 2-16 Relation between Density and Depth

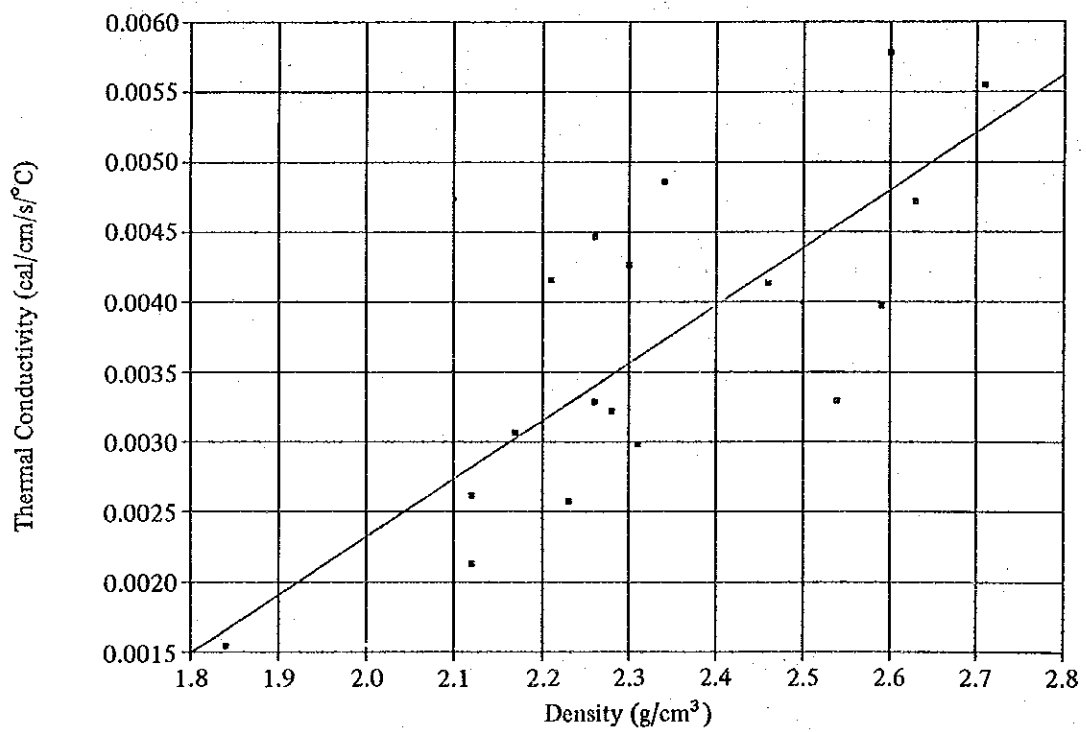


Fig. III. 2-17 Relation between Thermal Conductivity and Density

## 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・プリマベラ地域では、各坑井の流量測定が定期的には実施されていないため、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 VS. 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 Fig. Ⅱ.2-19 に示す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、Fig. Ⅱ.2-20 を参考に、ほぼ温度的に平衡状態に達したと思われる 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、Figs. Ⅱ.2-21 ~ 27 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・プリマベ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。Table Ⅱ.2-7 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・プリマベラ地域で比較的定期的には実施さ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。これらの理由は、以下のとおりである。なおTables III.2-8~13に、これらデータを示す。

PR-1とPR-8を対象とした噴気中の温度検層が昭和61年1~2月に、第一次調査として実施されている。その結果、両坑井とも地層内フラッシュをおこしており、PR-1の深度1,800mでは温度が299℃で飽和状態、またPR-8の深度1,750mでは温度が231℃で、やはり飽和状態であることが判明している。

噴気流体温度は、地層内フラッシュのために明らかにされていないが、飽和状態の坑内温度より高温であることは確実である。従って、PR-1の噴気流体温度は、299℃以上、PR-8のそれは231℃以上と推定される。温度検層と同時期の化学温度計は、以下の値を示している。

[ PR-1 ]

Na/K温度計 by Truesdell (1976) .....	299℃
Na/K温度計 by Fournier and Truesdell (1973) .....	308℃
Na-K-Ca温度計 by Fournier and Truesdell (1973, 1974) .....	297℃

[ PR-8 ]

Na/K温度計 by Truesdell (1976) .....	247℃
Na/K温度計 by Fournier and Truesdell (1973) .....	249℃
Na-K-Ca温度計 by Fournier and Truesdell (1973, 1974) .....	280℃

これらの条件から、Fournier and Truesdell (1973)によるNa/K温度計が最も正しく噴気流体温度を現わしていると考えられ、これをマッチング対象データとして採用することにした。なお他の坑井に関しても同様であるとして取り扱った。

但しPR-2に関しては、Table III.2-9に示すように、どちらのNa/K温度計も極めて低い温度を示している。PR-2は、昭和60年10月15日にKuster社製

の温度計を用いた温度検層が実施されており、この時の測底値は、深度 1,900m付近で 210℃であった。同年 2 月から 9 月にかけて採取された流体の分析結果を各化学温度計に当てはめると、Na/K 温度計では約 120℃、Na-K-Ca 温度計では約 225℃となる。従って、実測温度と化学温度計とを比較すると、この坑井に関しては Na-K-Ca 温度計が最適であると判断された。

### (3) マッチング結果とその経緯

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 2,598 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. Ⅱ.2-28～40 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、主フイード・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. Ⅱ.2-41～51 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。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. Ⅱ.2-52～61 に示す。

#### 2) マッチング結果のコメント (discussion)

① 今回のヒストリー・マッチングでは、主にフラクチャー浸透率を修正することにより、噴気流体温度や貯留層圧力の実測値と計算値との満足できる一致を再現する事ができた。今回採用したフラクチャー浸透率の修正の方法は、以下のとおりである。

ラ・プリマベラ地域の坑井の多くは、静止時には坑内に水頭が存在するものの、噴気を開始すると地層内フラッシュを起こすことが、CFE や JICA による噴気中の温度・圧力検層の結果から明らかになっている。これは、少なくとも坑井周囲の浸透率があまり良くないことを意味しており、第一次調査による PR-1 と PR-8 の kh (Permeability-Thickness Products) が小さいという解析結果と矛盾



しない。また、マッチングの対象とした化学温度計と貯留層圧力の計算値の経時変化パターンを比較すると似たような形状を示しており、このことから少なくとも坑井近傍の浸透率は低いことが推定された。

更に、多くの坑井が地層内フラッシュを起こす地域のシミュレーションを実施する場合、飽和領域の範囲 ( Water Front ) が最も重要な問題となる。もし貯留層の大部分が飽和状態になるのであれば、系並びに境界の浸透率は全般的に小さく、流体の補給能力が低いことを意味する。しかし空間的および時間的に異なって実施されている静止中の圧力検層の結果、噴気をしていない状態では坑内に水頭の存在することが明らかとなっているため、この点に関しては、飽和領域は噴気中の坑井近傍に限定されていると推定した。

以上の理由により、噴気実績のある坑井のフィード・ポイントが位置するブロックのフラクチャー浸透率を主に低下させる方針を採用した。

マトリックス浸透率についても、当初  $1 \times 10^{-15} \text{m}^2$  としていたのをコア試験結果の平均値  $0.0126 \times 10^{-15} \text{m}^2$  にすることにより、貯留層圧力が鋭敏に変化するようになった。

その結果、噴気流体温度と貯留層圧力の経時変化を再現することはできたが、生産量が多いとフィード・ポイントの位置するブロックが蒸気単相状態になる現象も現われた。残念ながら、各坑井の気液比 ( 乾き度 ) に関するマッチングはなされていない。もし気液比の経時変化が明らかとなった場合には、生産ブロック中に坑井近傍の地層内流動を考慮するサブ・グリッドを設けて、フィード・ポイント周辺の浸透率を修正する必要があると思われる。

- ② 上述したように、噴気実績のある坑井のフィード・ポイントが位置するブロックのフラクチャー浸透率を主に低下させる方針により、PR-1, PR-8, PR-9, PR-5, PR-12の噴気流体温度と貯留層圧力の経時変化を再現することは可能であった。しかしながらPR-2に関しては、別の方針を採用している。この理由は、以下のとおりである。

PR-2の噴気流体温度の計算値は、ほとんど変化しておらず、化学温度計による噴気流体温度の観測値との差は約  $15^\circ\text{C}$  である。本坑井は、平均流量  $43 \text{tons/hr}$  の還元を1カ月以上にわたって実施している実績がある。このことを考慮すると、本坑井の透水性を低下させ地層内フラッシュを起こさせることにより、噴気流体温

度の化学温度計による観測値と計算値の一致を図ることは不可能と推測された。なぜならば、地層内フラッシュを起こすためには当該ブロックの浸透率を相当低下させなければならず、これにより還元時の圧力が極端に高くなるからである。そこでPR-2に関しては、浅部から低温の熱水を流入させる流動パターンを再現して噴気流体温度を低下させる方針を採用した。しかし坑井に噴気流体を供給するフラクチャーの容積と、浅部からの低温熱水流入量の割合から、このような噴気流体温度の変化を再現することは不可能であった。

- ③ PR-5のNa/K化学温度計による噴気流体温度は、噴気開始当初の昭和57年9月1日には243℃であったが、約1カ月経過した時点で207℃まで低下している。これは、地表にまで延びている断層を通じて天水起源の低温熱水が急激に流入したことによると解釈されている。

本マッチングではこの現象を再現するために、PR-5並びにその上部のブロックの垂直方向の浸透率を卓越させ、PR-2と同様、浅部から低温熱水が流入するようにしている。しかし、坑井に噴気流体を供給するフラクチャーの容積と浅部からの低温熱水流入量の割合から、このような急激な噴気流体温度の変化を再現することは不可能であった。

一方、PR-5噴気開始当初に実施された噴気中の温度検層結果より、本坑井も地層内フラッシュをしていることが明らかとなっている。そこで、生産に伴って当該ブロックの状態が飽和状態になるようにフラクチャー浸透率を低下させたところ、ほぼ化学温度計による噴気流体温度の経時変化と同様な変化を再現することができた。

このことから、PR-5の噴気流体温度の急激な低下の原因は、天水起源の低温熱水が流入したことの他に、坑井周囲の浸透性が低いことも挙げられると思われる。

- ④ ラ・プリマベラ地域で還元を実績のある坑井は、PR-2だけである。この還元は、78℃の熱水を平均43tons/hr.の流量で、昭和63年2月27日から同年4月5日まで試験的に実施された。しかしながら還元によるPR-2流体温度(計算値)の変化は、極めて微小である。このことから、PR-2の噴気初期の急激な流体温度変化を再現するには、坑井に噴気流体を供給するフラクチャーの容積と、同一ブロックへの低温熱水流入量とのバランスが重要であることが理解される。

従って本坑井の噴気流体温度の経時変化をより精度良く再現するためには、当該

ブロックの容積を小さくする方向で、本地域のグリッド分割を再考する必要があると思われる。

- ⑤ またPR-2は、昭和61年10月3日から昭和63年4月28日にかけて、静止中の圧力検層を数多く実施している坑井である。これらの検層結果から、還元試験を実施する前の本坑井の貯留層圧力は、初期圧力よりも約 $10 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 低下していることが読み取れる。

本シミュレーションでは、同期間中のPR-2の生産量に関するデータを入手していないために、PR-2は同期間中は噴気をしていないものとして取り扱っている。しかしこの圧力低下量は、他坑井の生産に伴う貯留層圧力の低下だけにしては大きく、本坑井も同期間中断続的に生産をしていた可能性を示唆していると思われる。

- ⑥ マッチングの期間は1988年(昭和63)6月30日迄であり、それまでPR-13は噴気をしていない。それにもかかわらず本坑井のレイヤー3の貯留層圧力は、1988年(昭和63)6月25日の静止中の圧力検層結果から、初期よりも約 $13 \text{ kg/cm}^2$ 低下していることが推定された。

残念ながら本シミュレーションでは、この圧力低下を十分再現できていない。しかし、この現象は主に同一レイヤーにフィード・ポイントを有するPR-8の噴気の影響であると、シミュレーション結果から解釈された。

PR-8の貯留層圧力は、噴気流体温度の経時変化が化学温度計より高めに再現されていることから、現実の圧力より高めに再現されていると推測される。従ってPR-8の貯留層圧力(噴気流体温度)経時変化をより精度良く再現することにより、PR-13の圧力低下を十分な精度で再現することは可能であると考えられる。

- ⑦ 境界条件は、前述したように全方向を開放系として取り扱い、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ている。これは、ヒストリー・マッチングを実施した期間の総生産量が計算領域の容積に比して少なく、1988(昭和63)年6月30日現在では境界の影響を受けていないためである。

境界条件を確認するためには、計算領域を狭めてヒストリー・マッチングを再実行するか、ないしは総生産量が計算領域に比して十分多くなった時点で再度マッチングを行なう必要があると思われる。

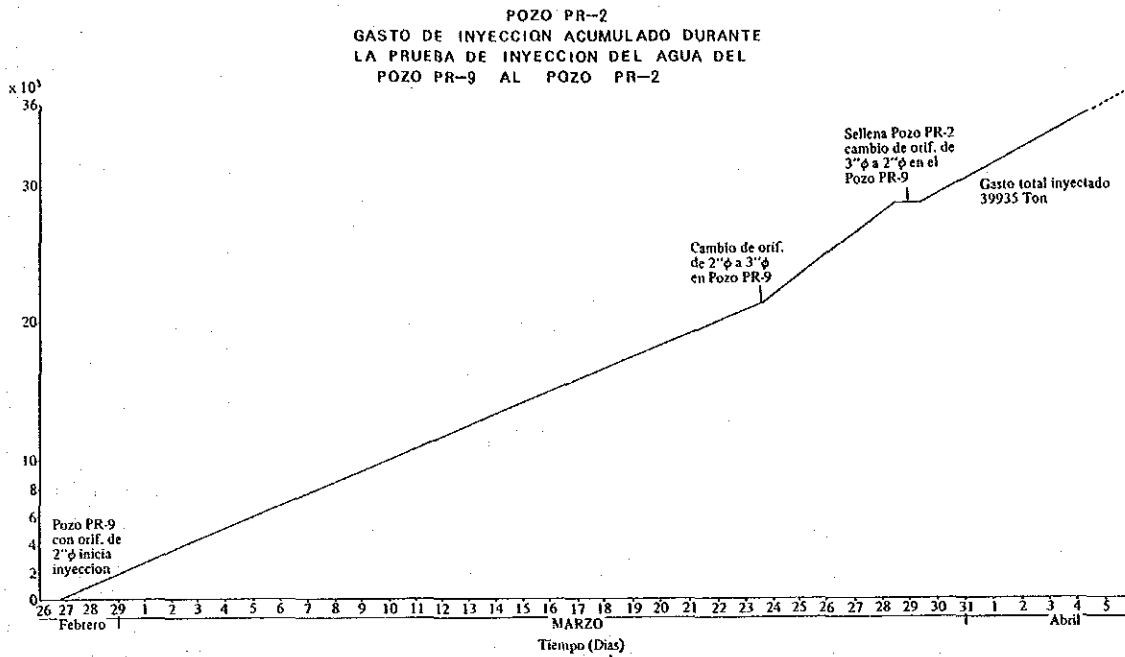


Fig. III. 2-19 Historical Change of the Cumulative Reinjection Flow Amount of PR-2

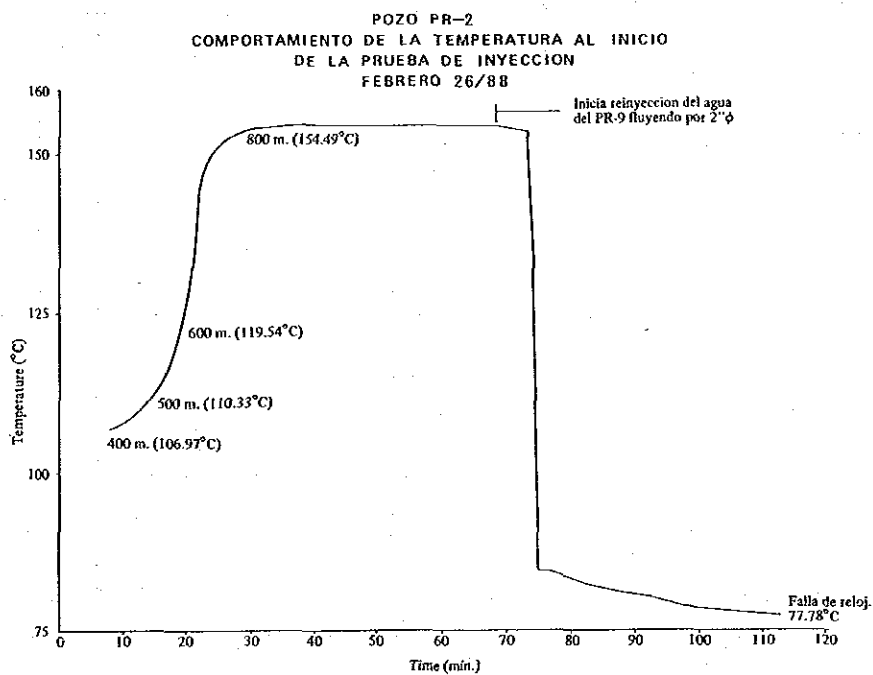


Fig. III. 2-20 Temperature Change of PR-2 due to Reinjection of Water of PR-9

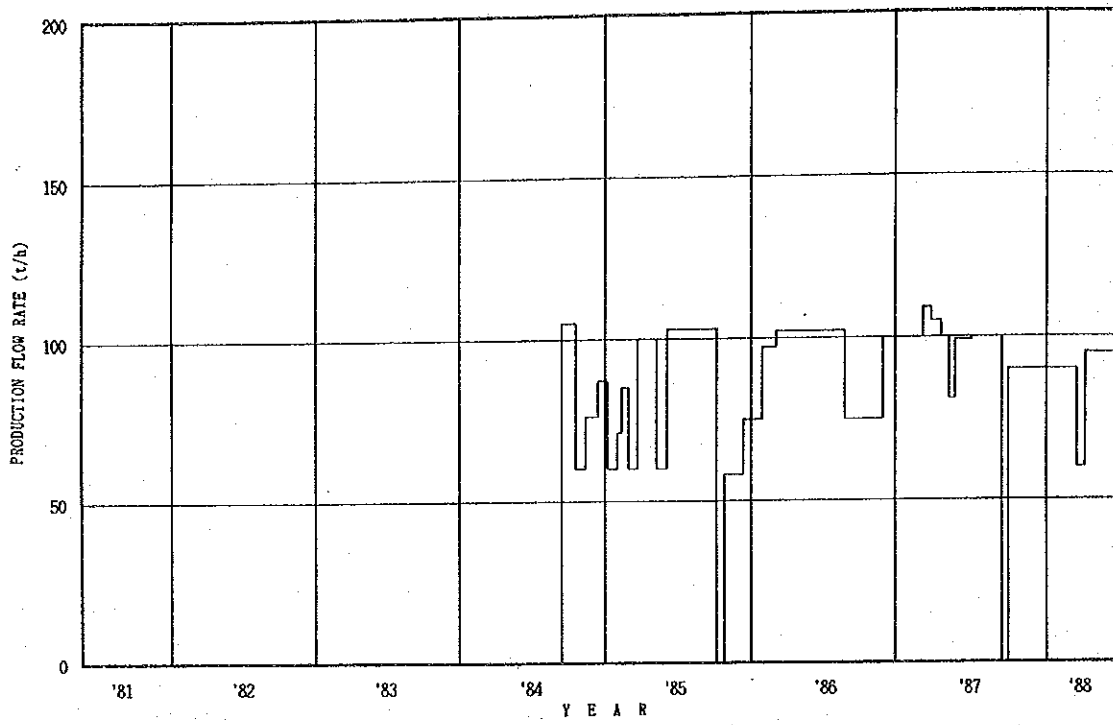


Fig. III. 2-21 Production Flow Rate of PR-1

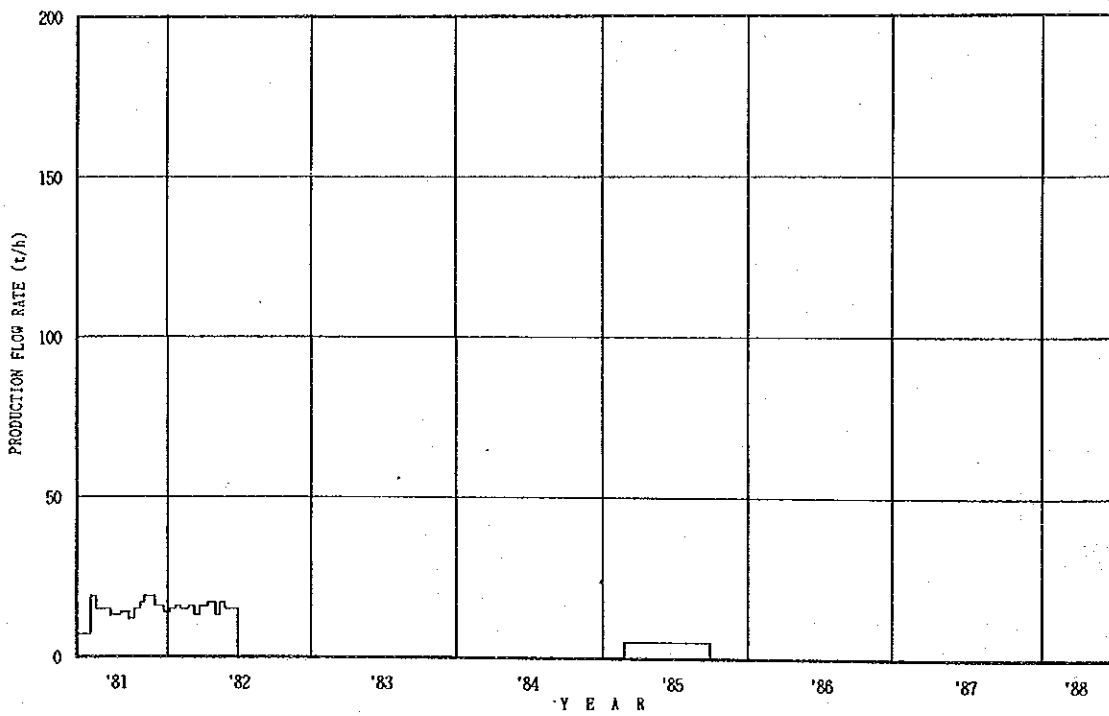


Fig. III. 2-22 Production Flow Rate of PR-2

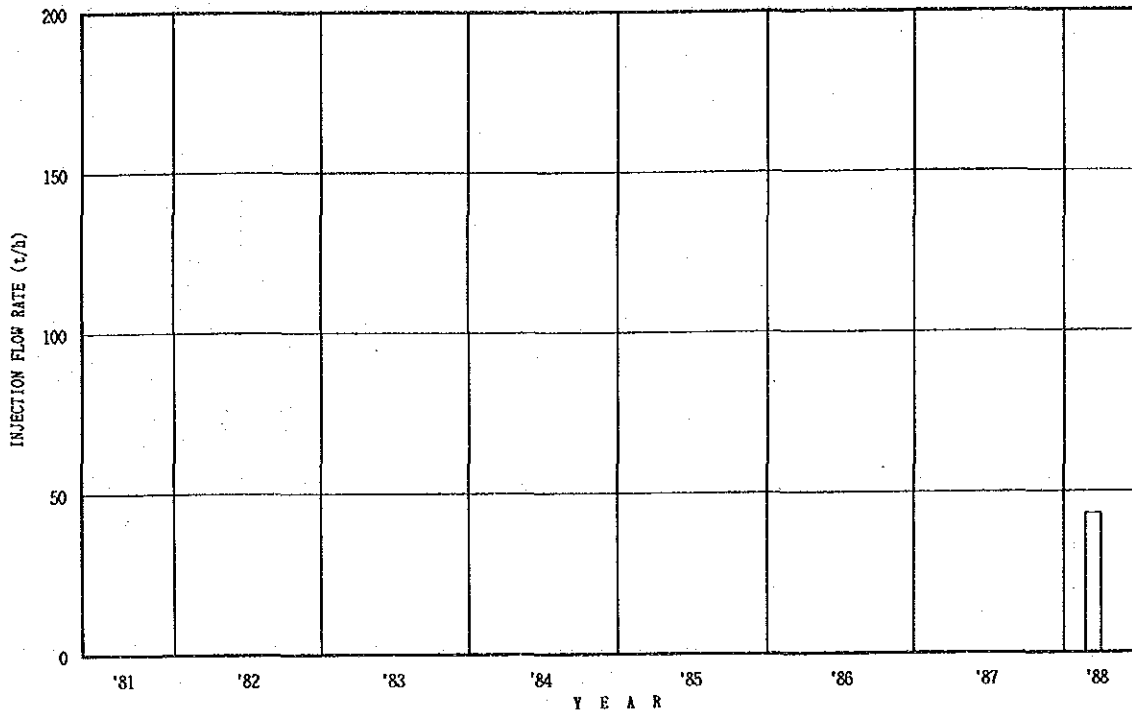


Fig. III. 2-23 Injection Flow Rate of PR-2

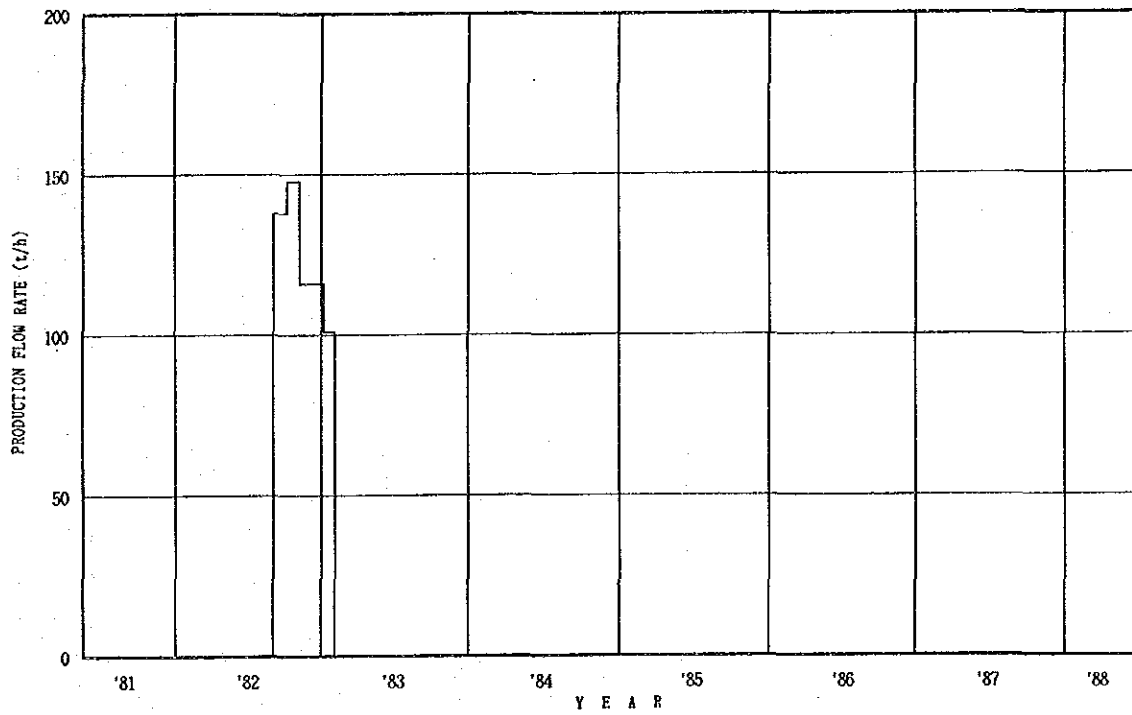


Fig. III. 2-24 Production Flow Rate of PR-5

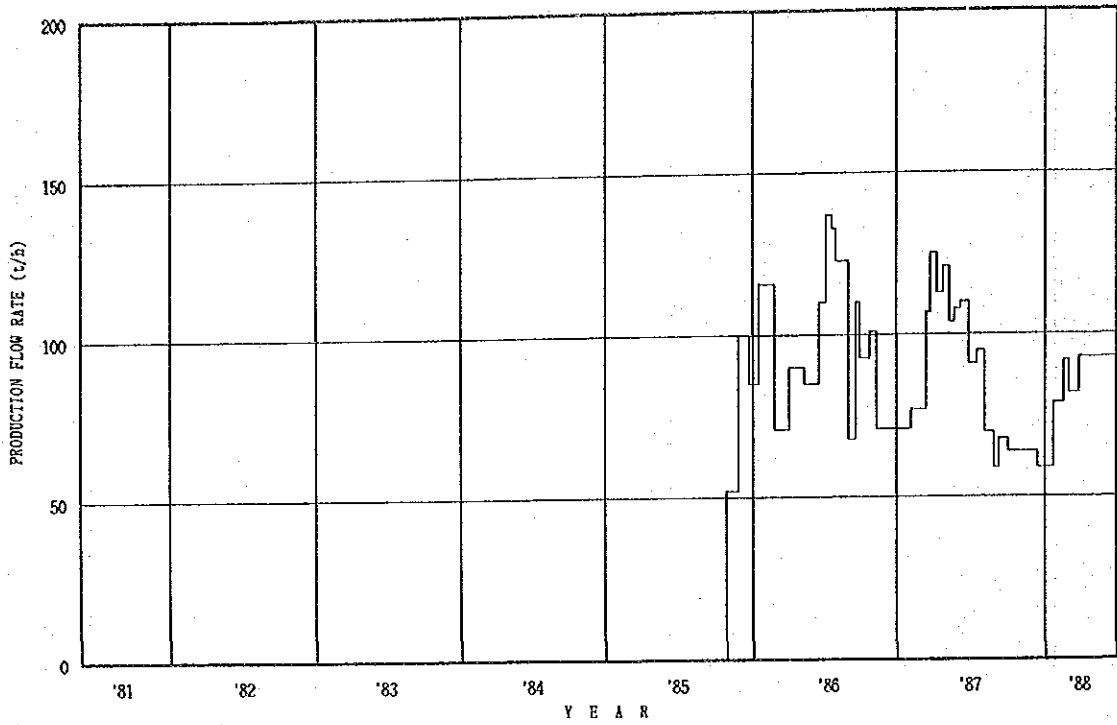


Fig. III. 2-25 Production Flow Rate of PR-8

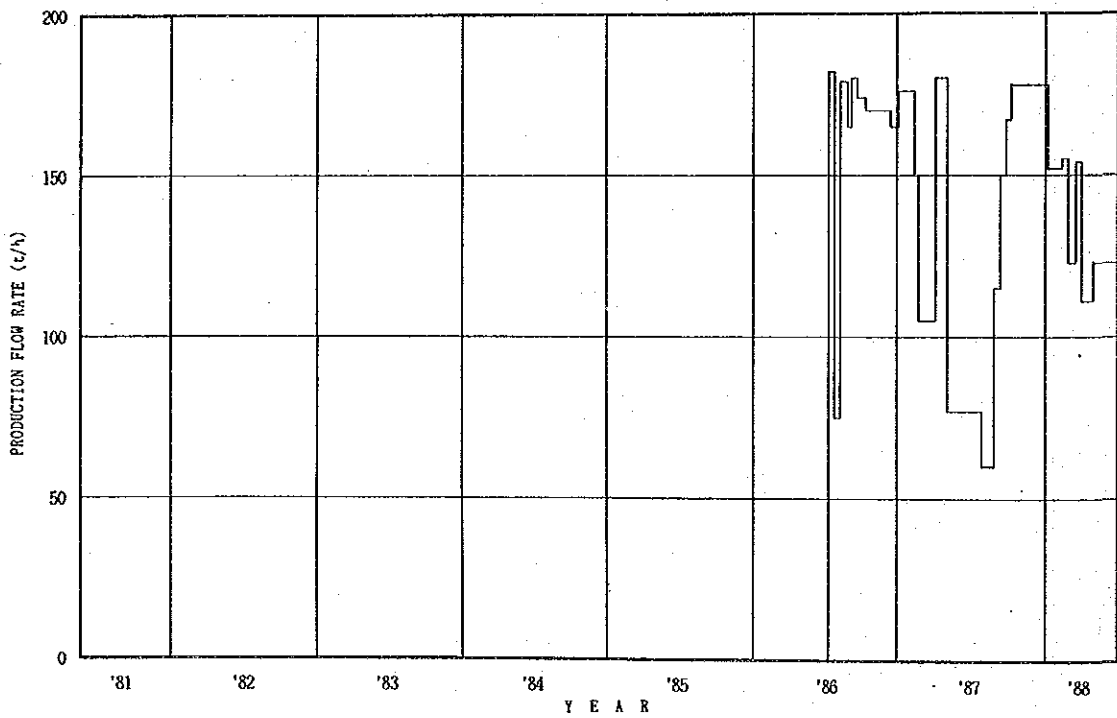
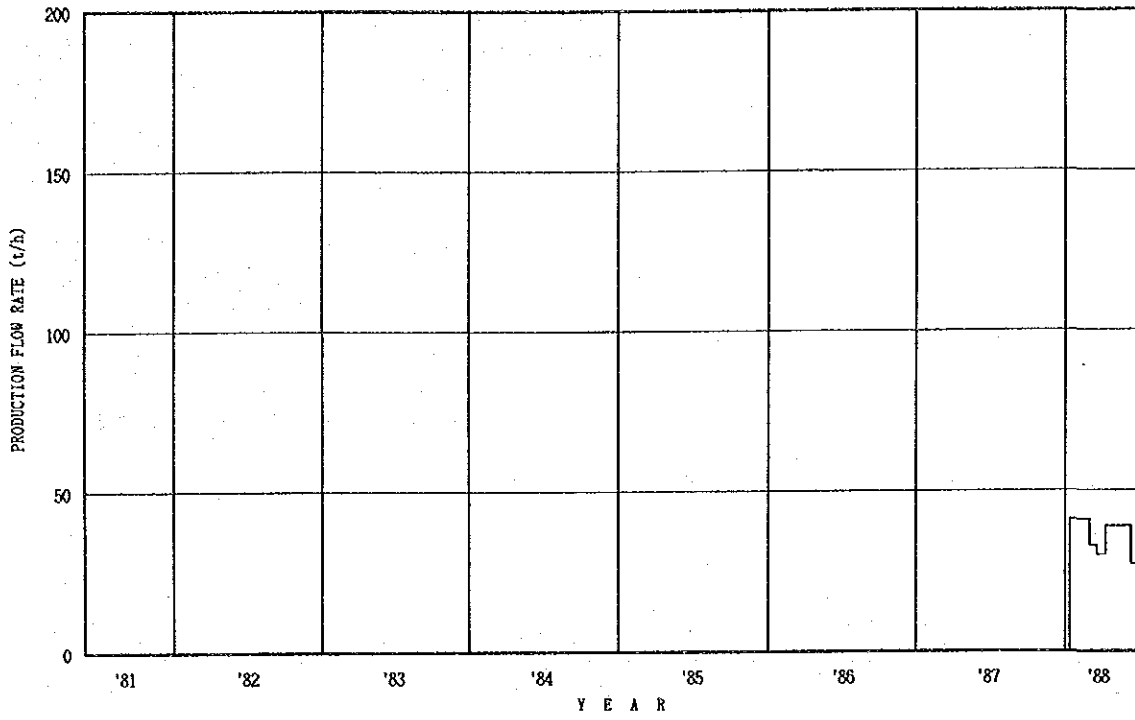
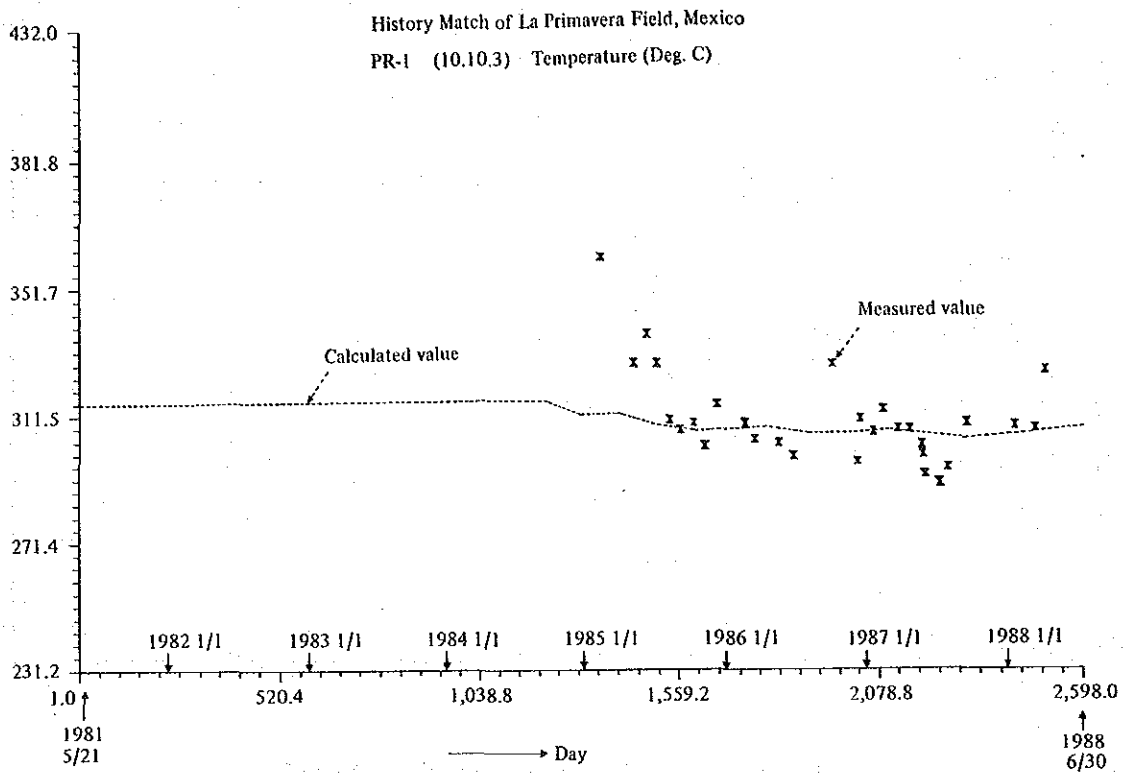


Fig. III. 2-26 Production Flow Rate of PR-9

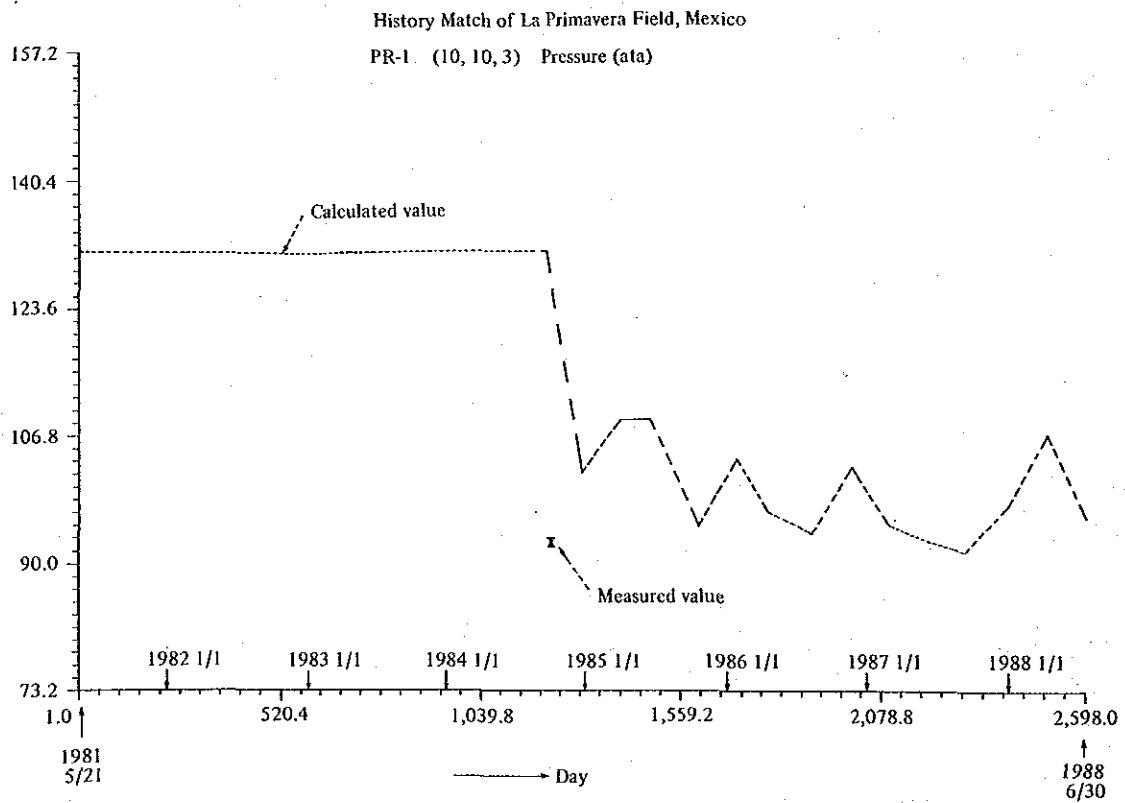


**Fig. III. 2-27 Production Flow Rate of PR-12**

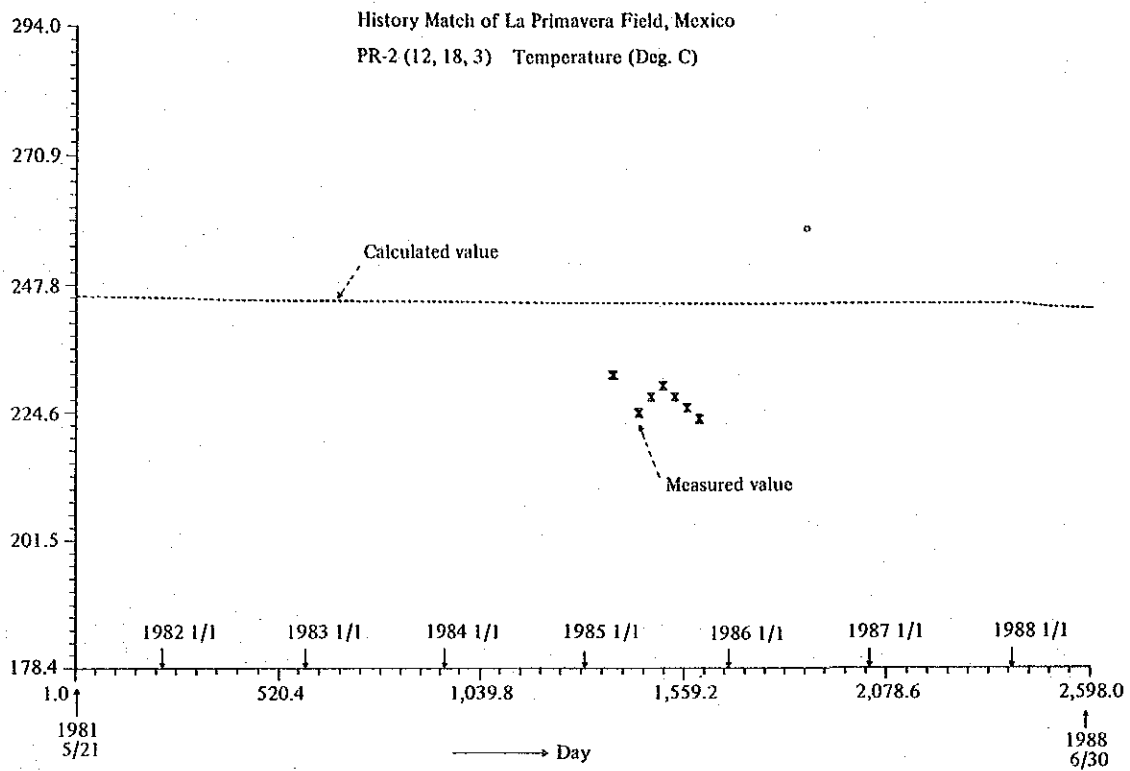




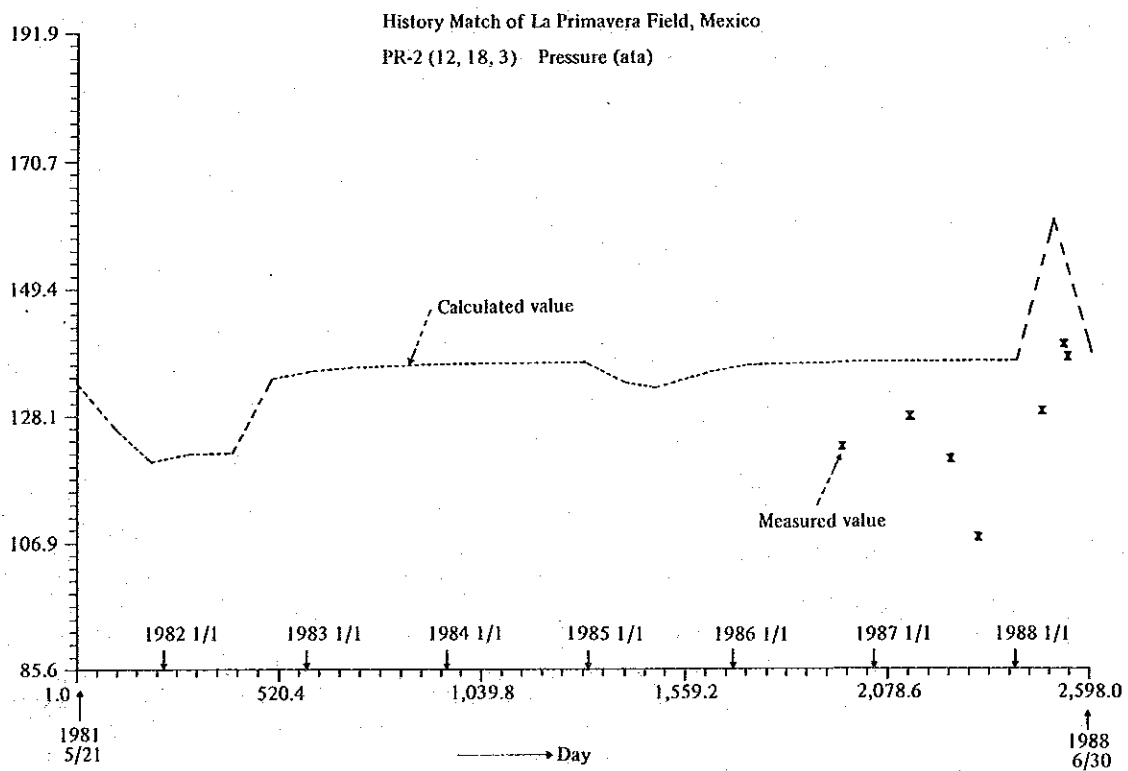
**Fig. III. 2-28 Result of History Match of Temperature for PR-1**



**Fig. III. 2-29 Result of History Match of Pressure for PR-1**



**Fig. III. 2-30** Result of History Match of Temperature for PR-2



**Fig. III. 2-31** Result of History Match of Pressure for PR-2

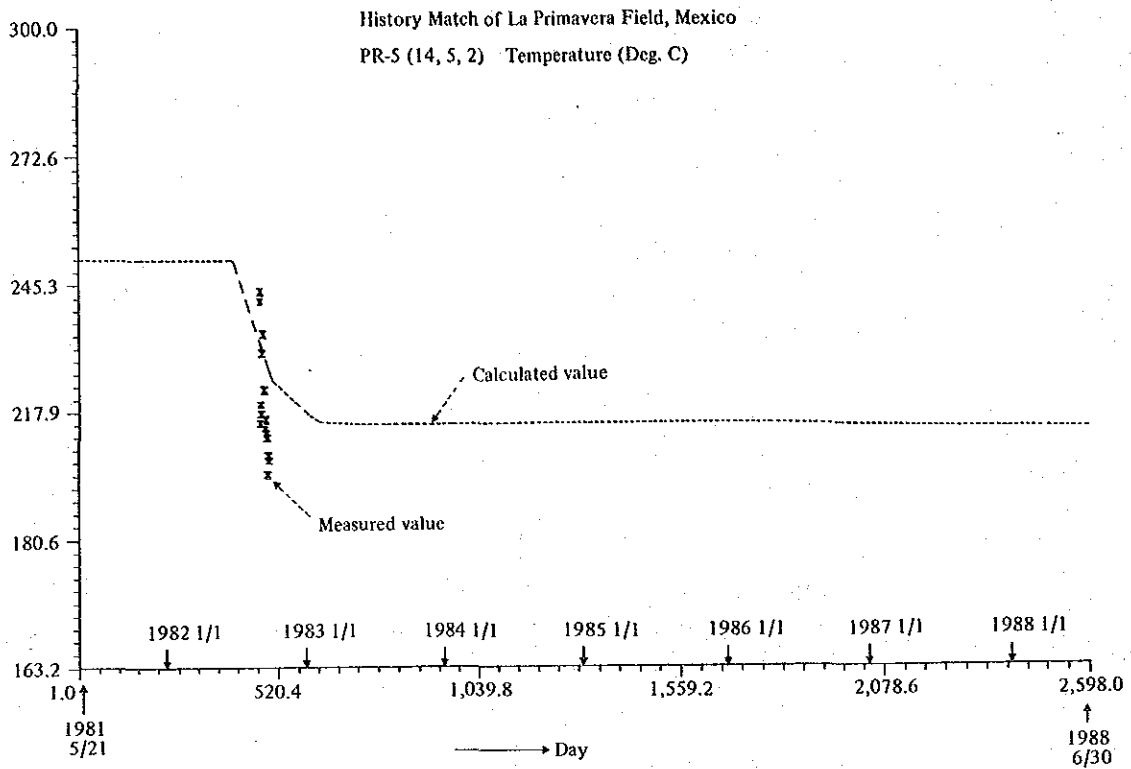


Fig. III. 2-32 Result of History Match of Temperature for PR-5

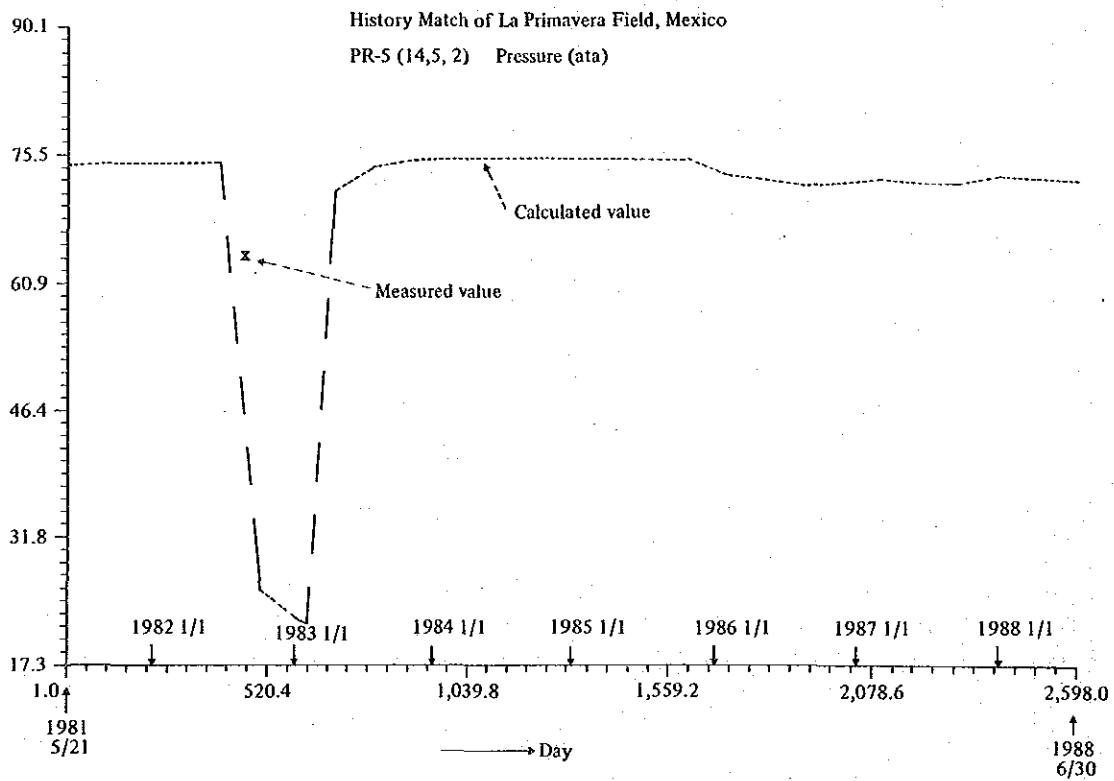


Fig. III. 2-33 Result of History Match of Pressure for PR-5

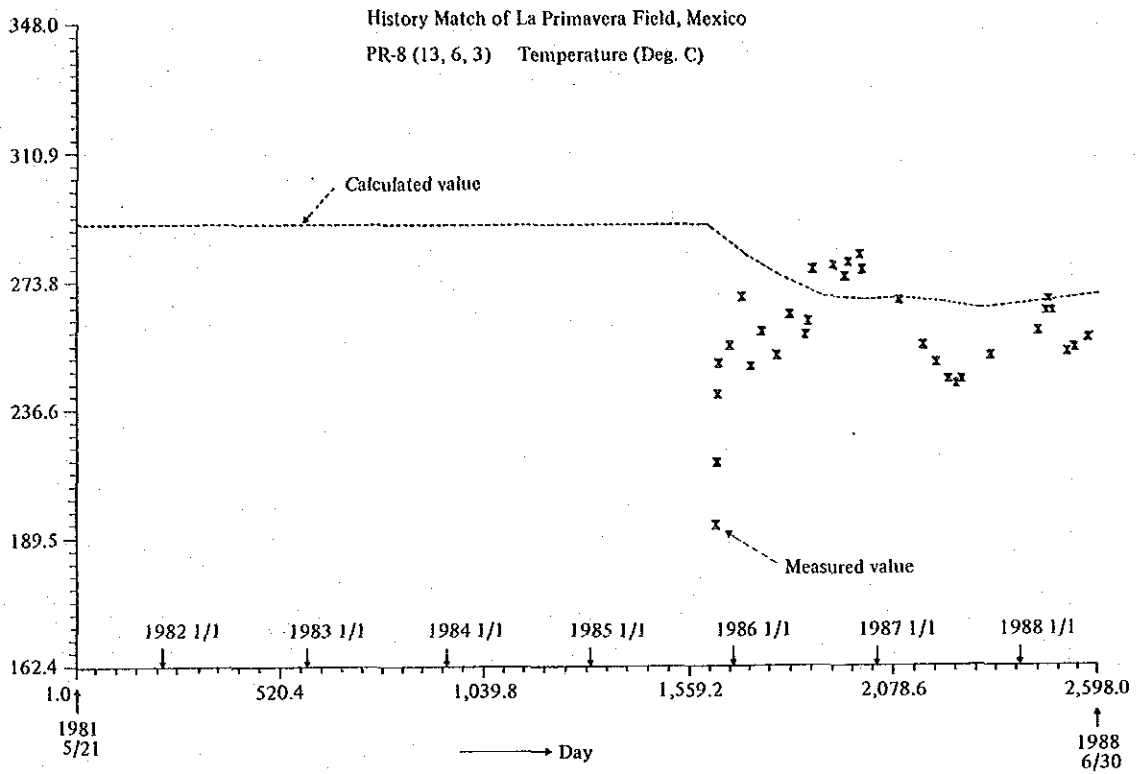


Fig. III. 2-34 Result of History Match of Temperature for PR-8

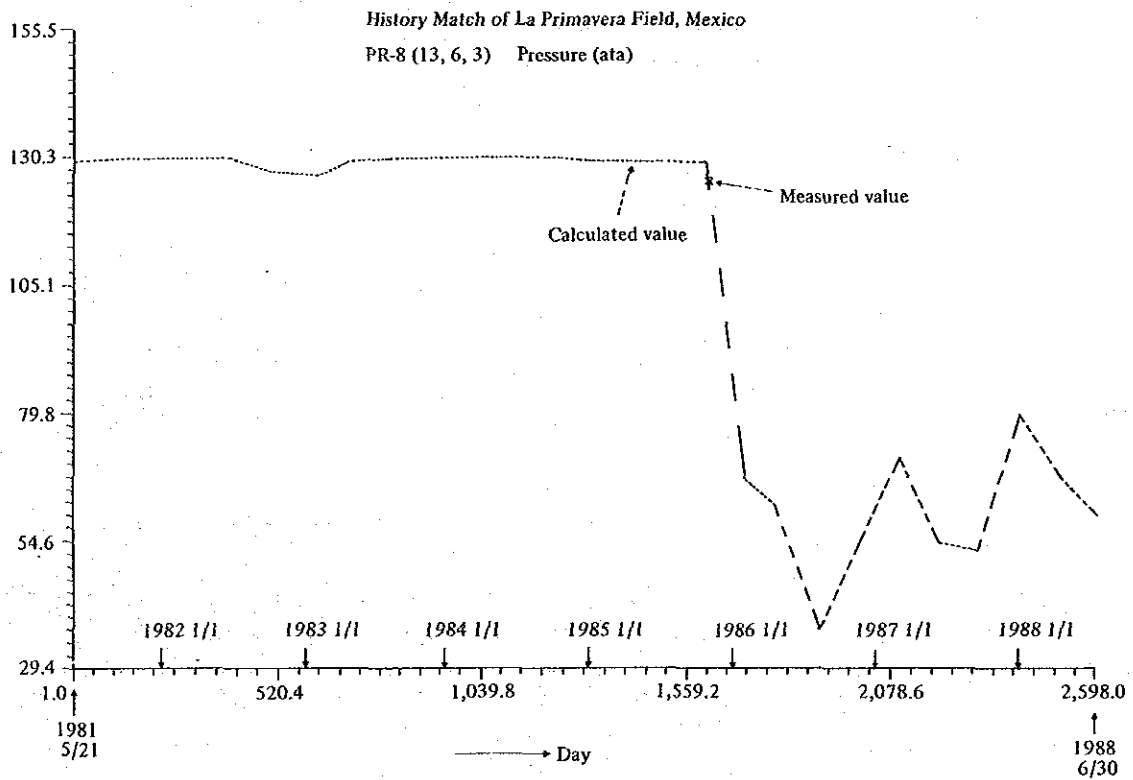
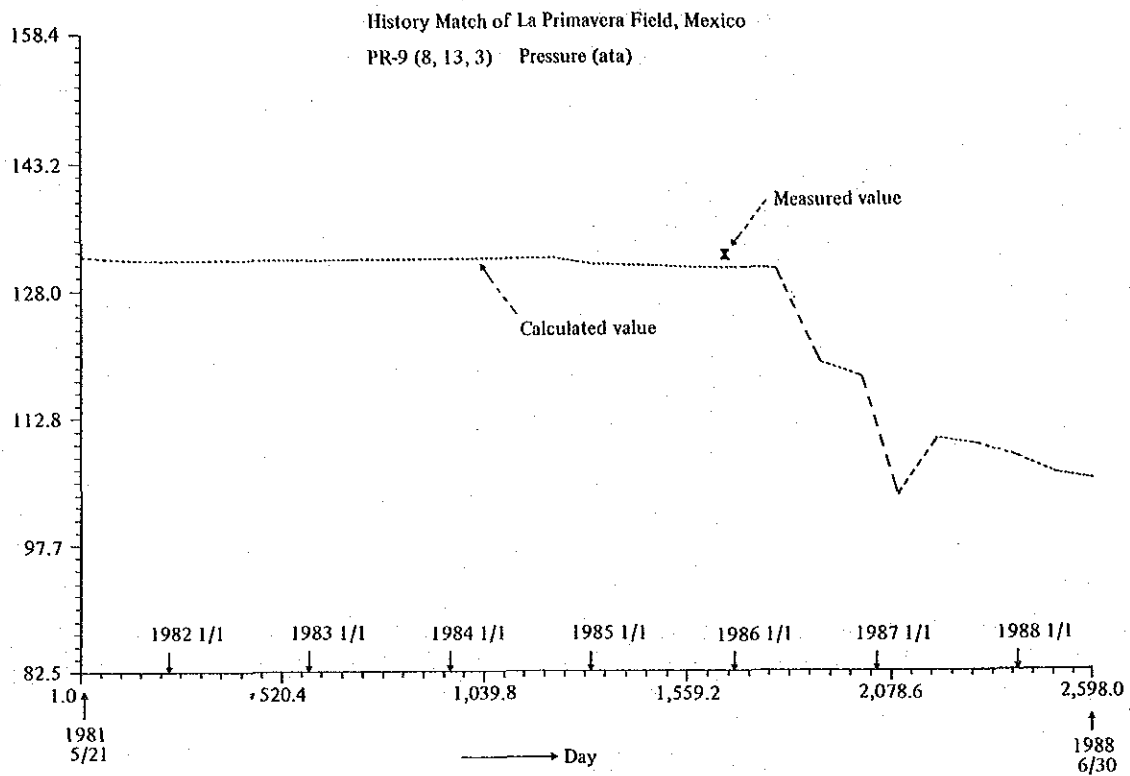
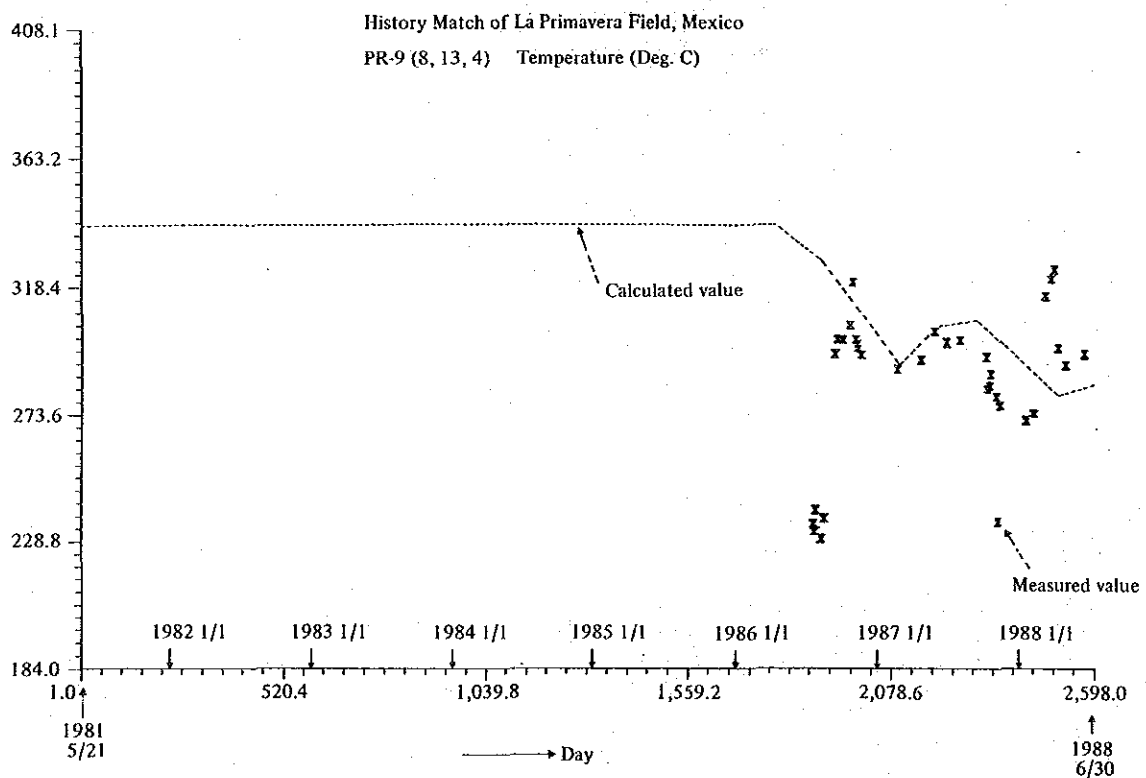


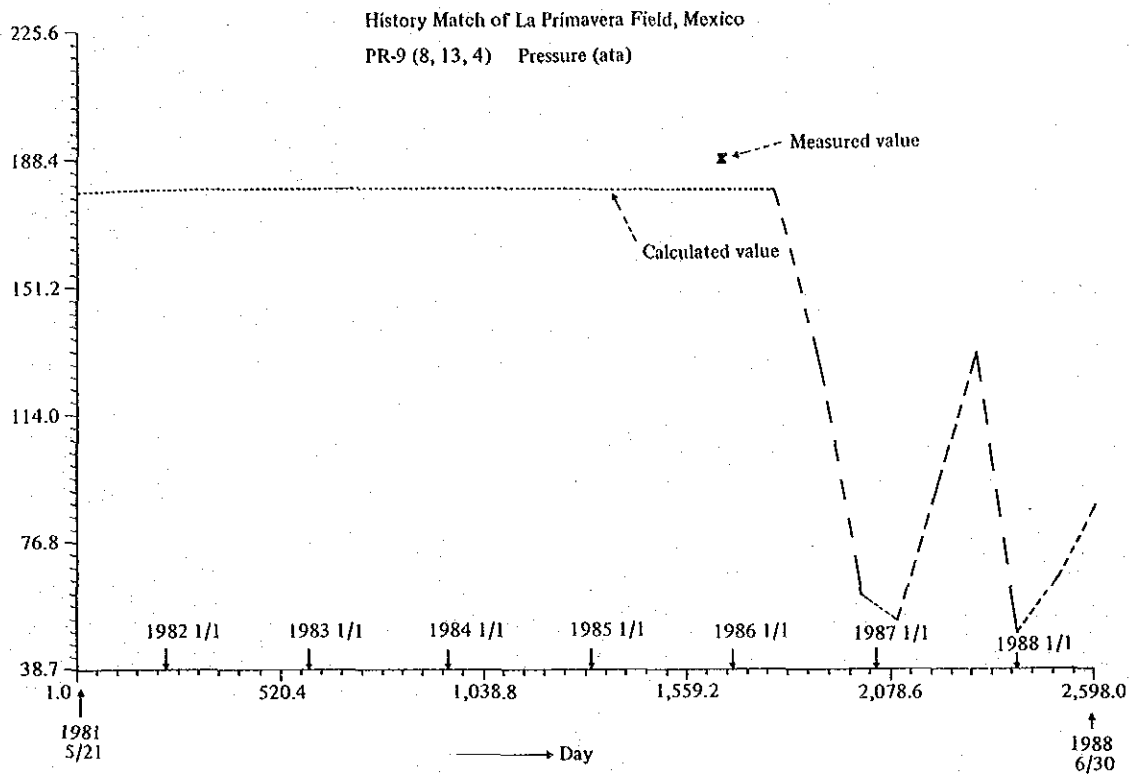
Fig. III. 2-35 Result of History Match of Pressure for PR-8



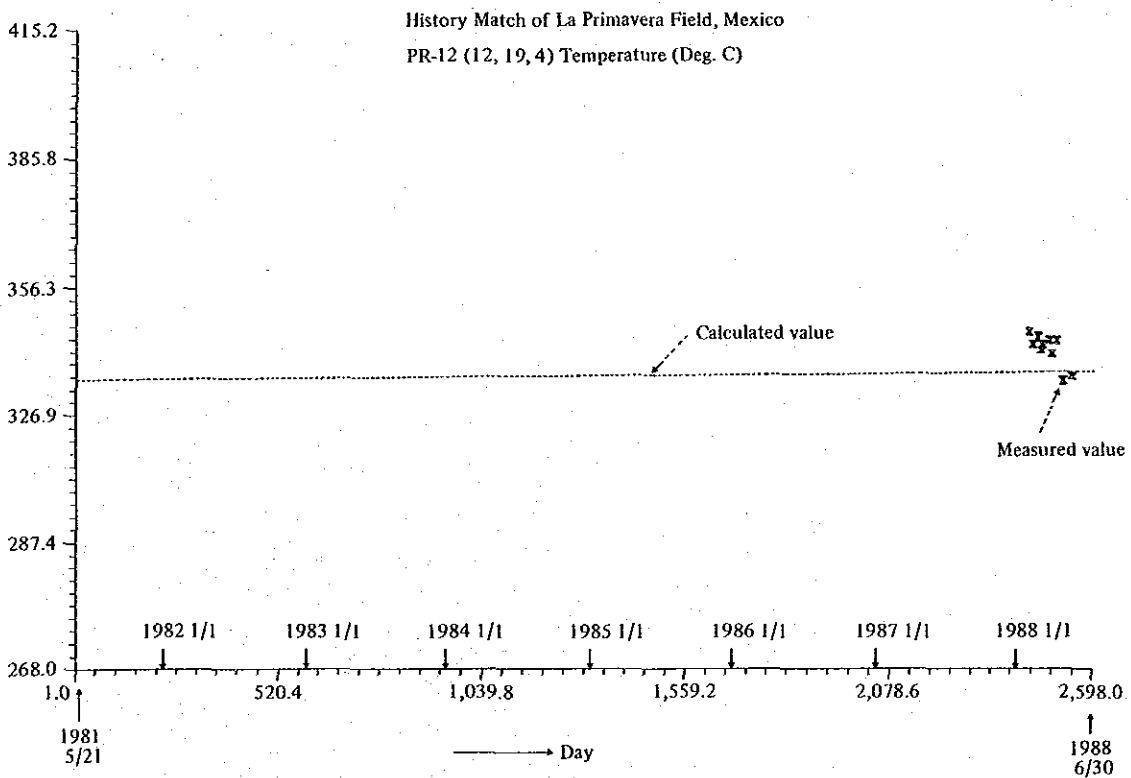
**Fig. III. 2-36 Result of History Match of Pressure for PR-9 (Layer 3)**



**Fig. III. 2-37 Result of History Match of Temperature for PR-9**



**Fig. III. 2-38 Result of History Match of Pressure for PR-9 (Layer 4)**



**Fig. III. 2-39 Result of History Match of Temperature for PR-12**

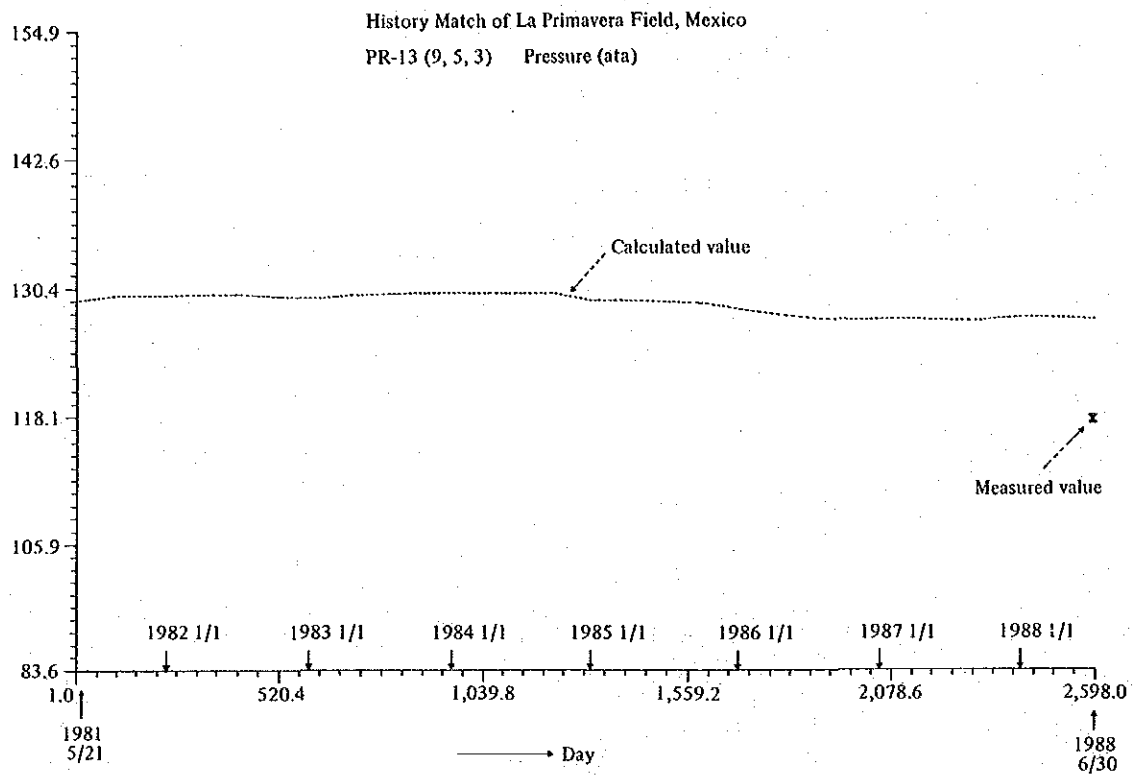


Fig. III. 2-40 Result of History Match of Pressure for PR-13

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

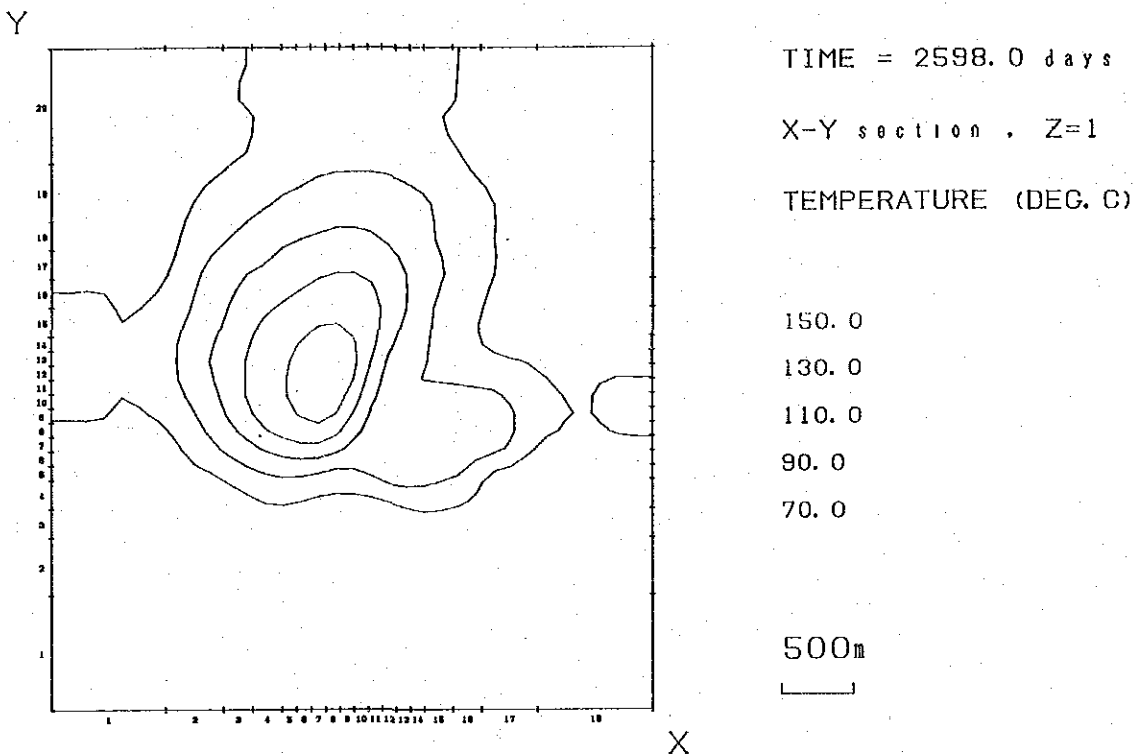


Fig. III. 2-41 Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 1

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

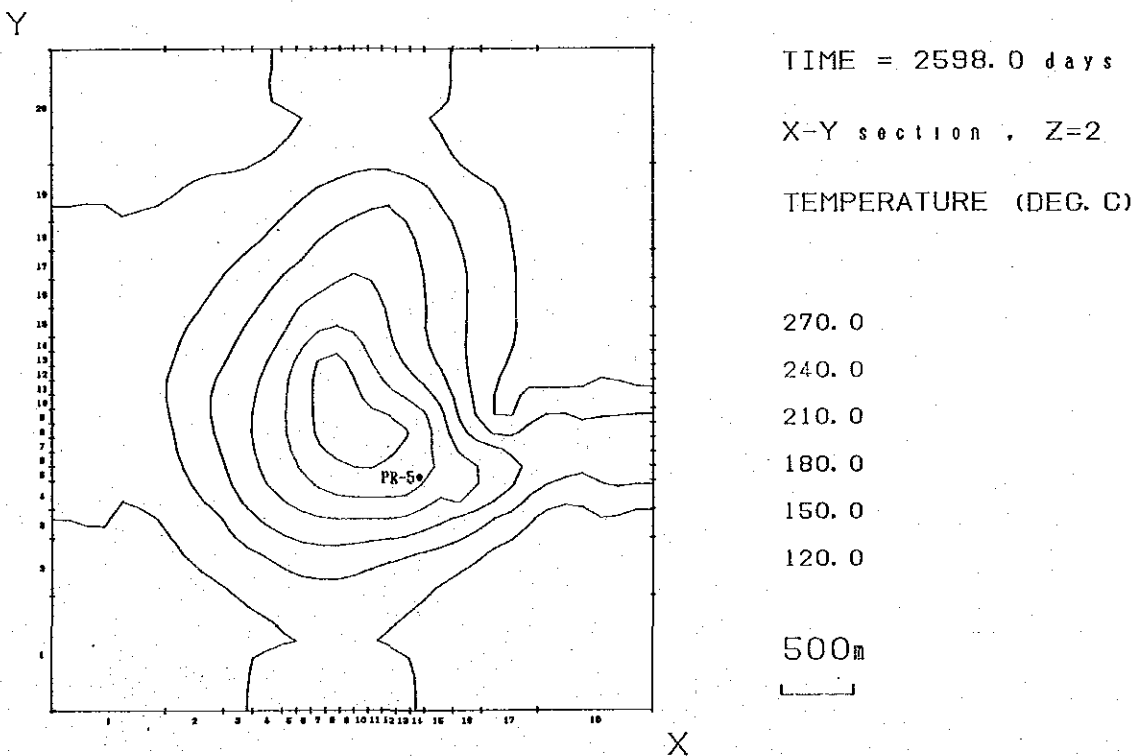


Fig. III. 2-42 Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 2



HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

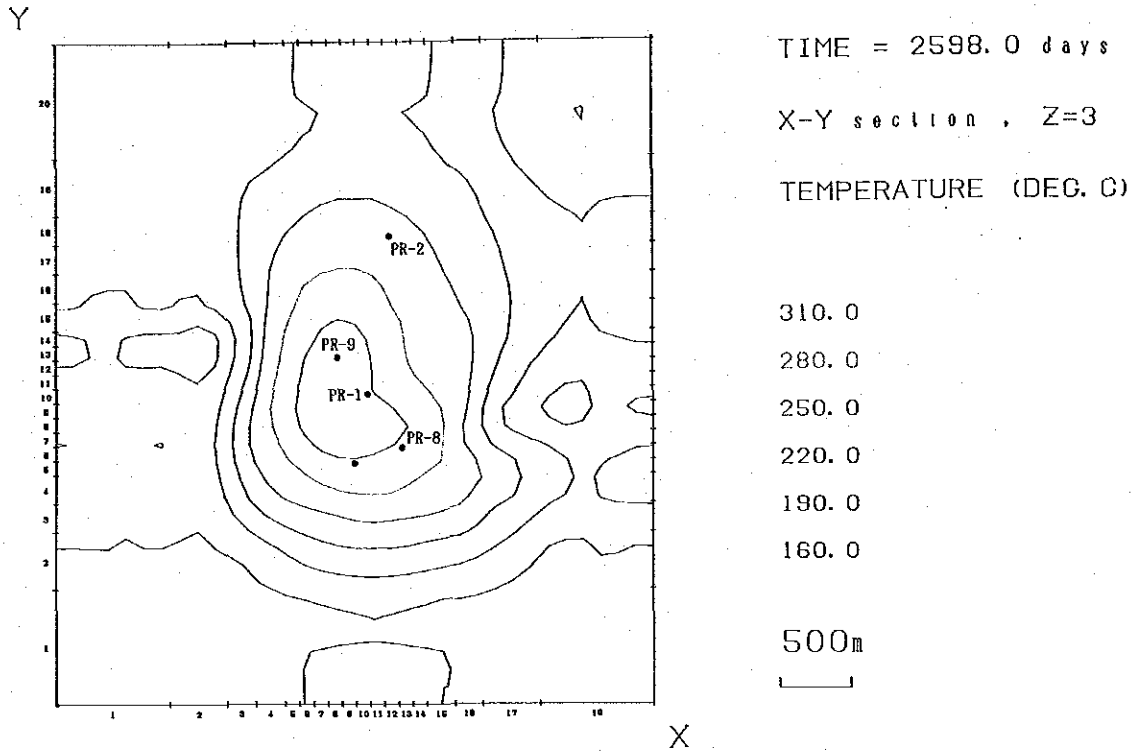


Fig. III. 2-43 Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 3

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

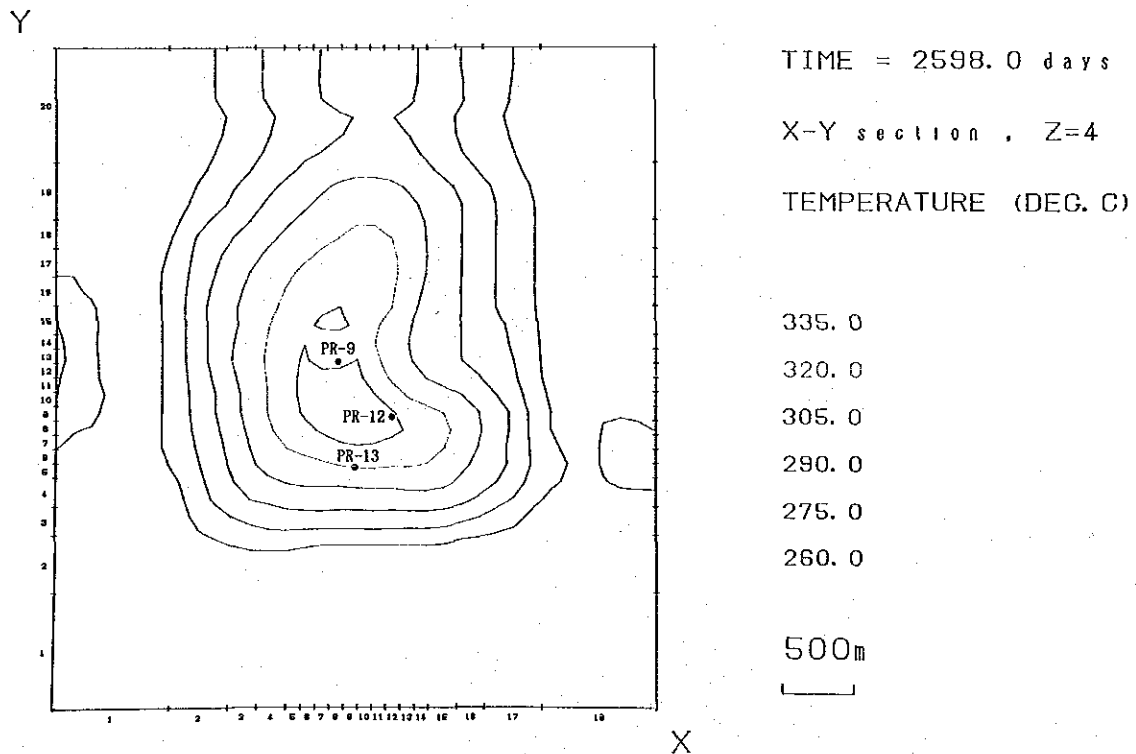


Fig. III. 2-44 Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 4

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

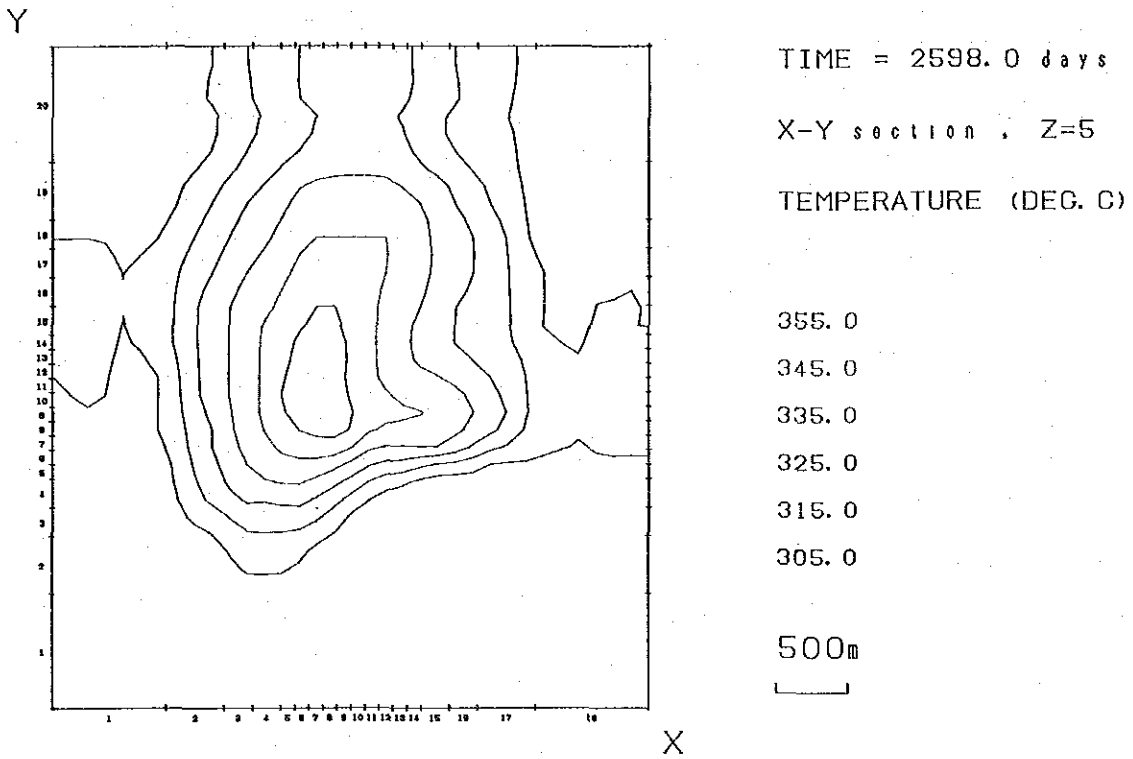


Fig. III. 2-45 Temperature Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 5

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

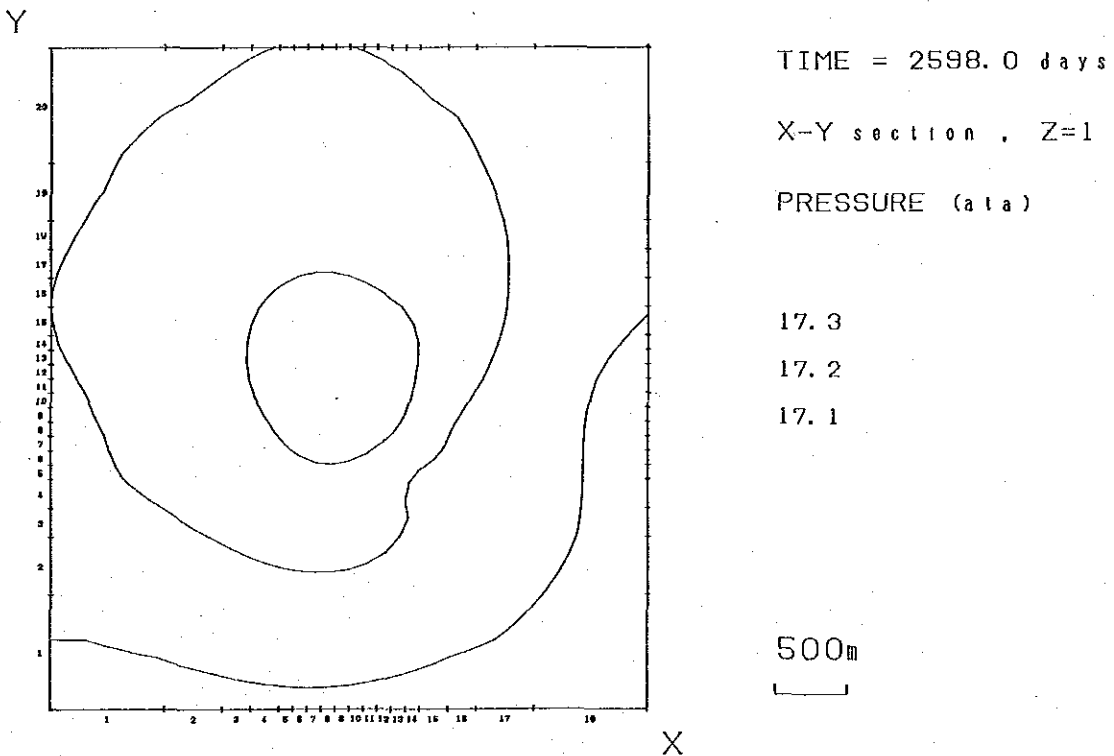


Fig. III. 2-46 Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 1

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

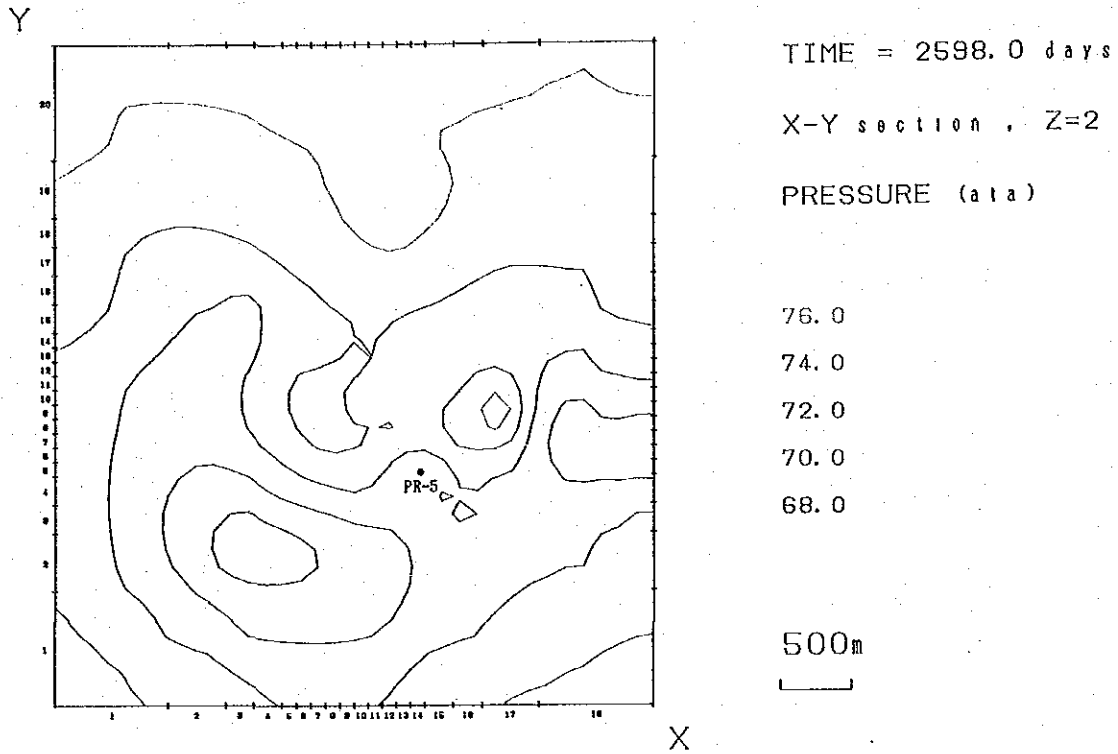


Fig. III. 2-47 Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 2

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

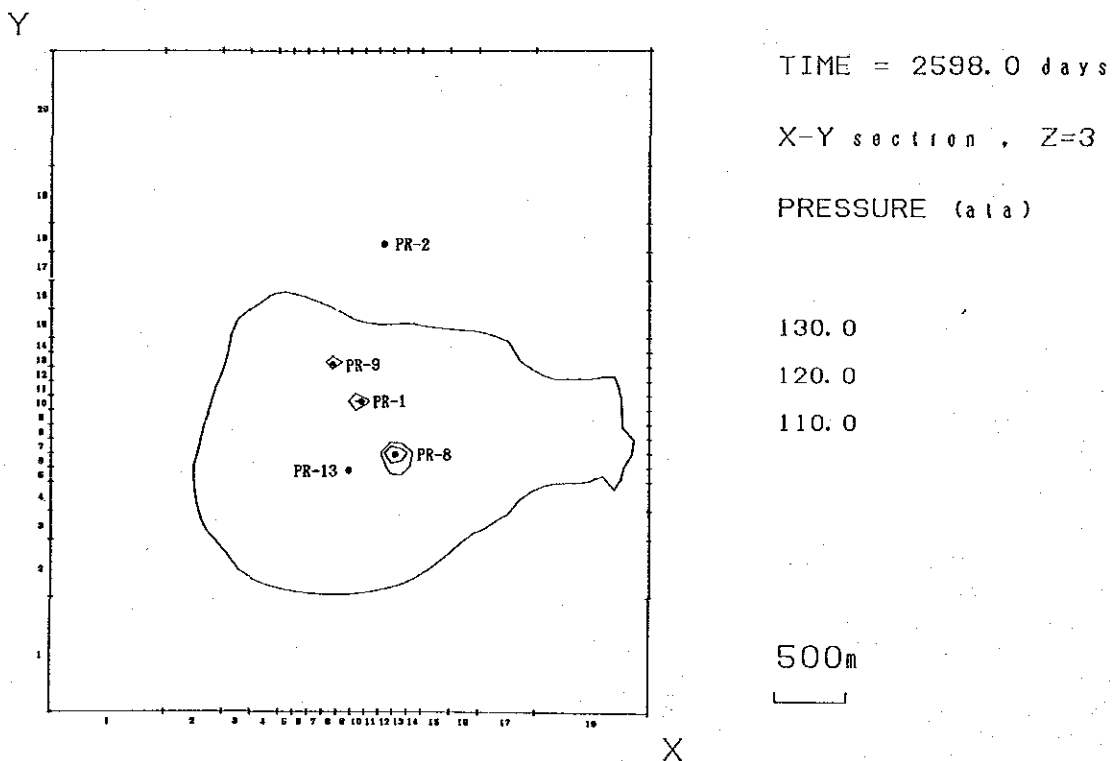


Fig. III. 2-48 Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 3

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

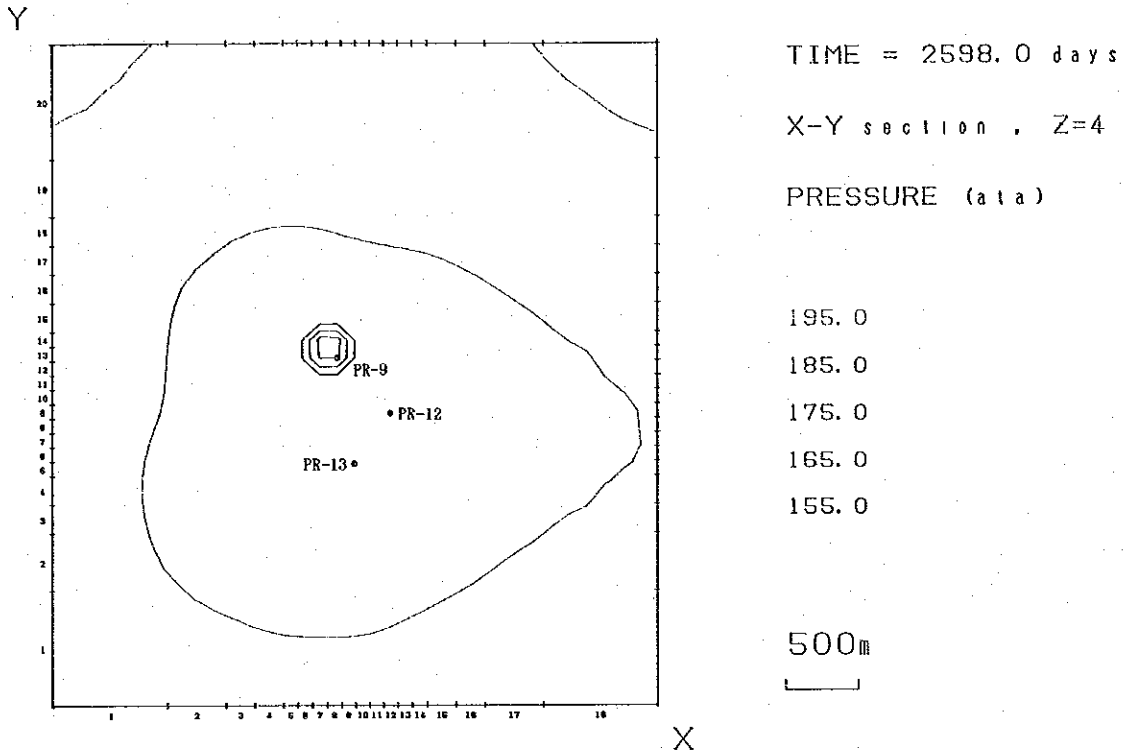


Fig. III. 2-49 Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 4

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

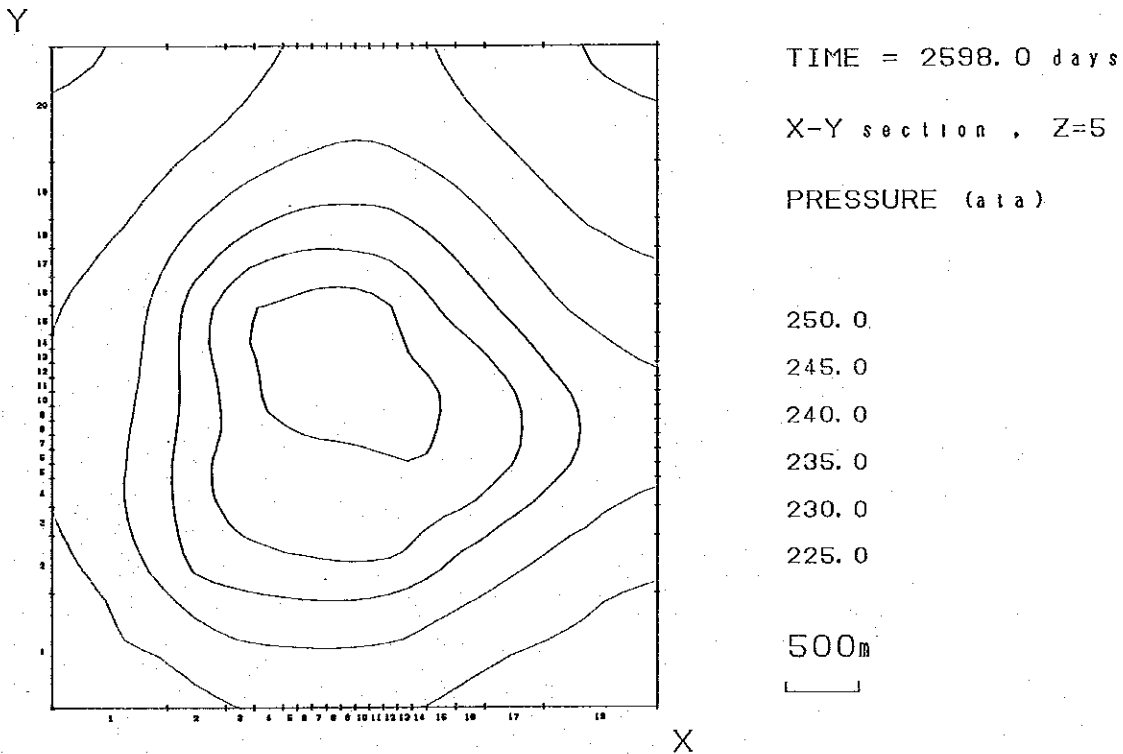


Fig. III. 2-50 Pressure Distribution after 2,598 Days (1988/6/30), Layer 5

HISTORY MATCH OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO

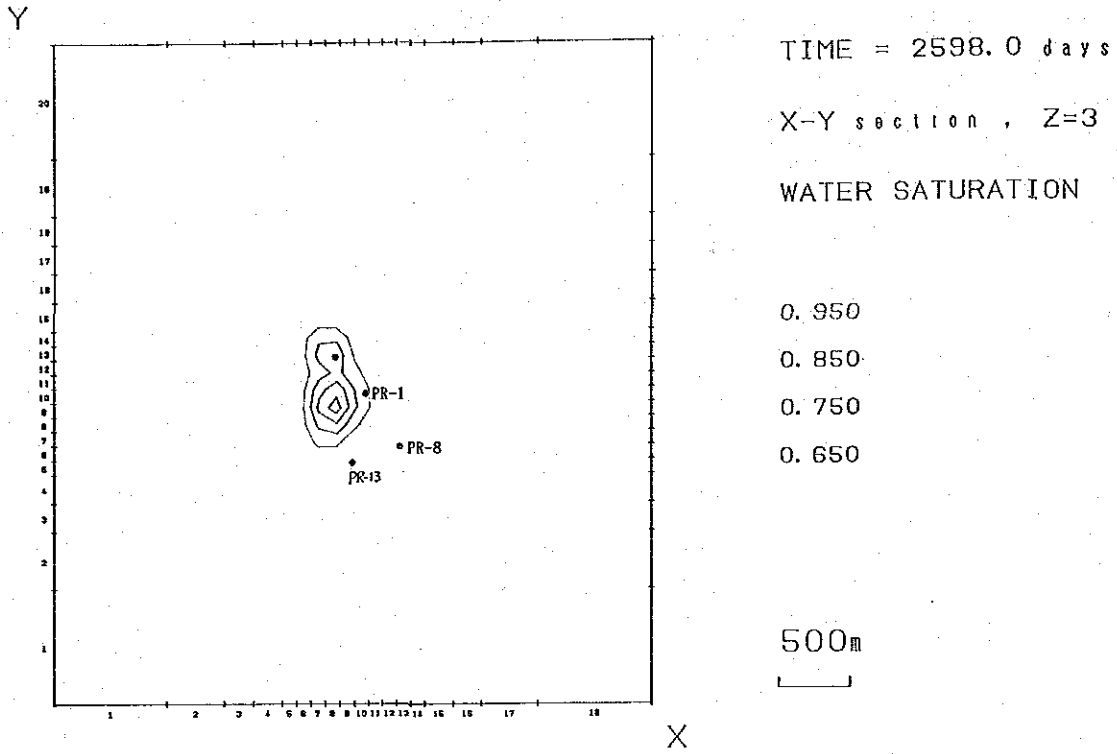


Fig. III. 2-51 Water Saturation after 2,598 Days (1988/6/30)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	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
17	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
15	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
13	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
11	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
9	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
7	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
5	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
3	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
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

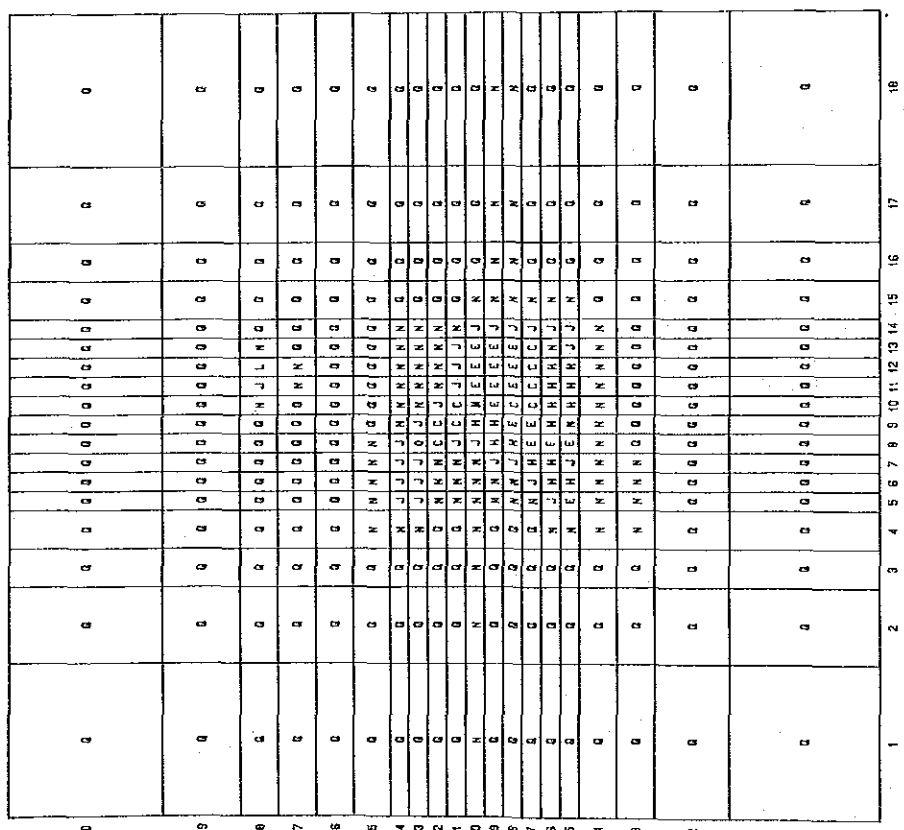
A: 1200    B: 840    C: 600    D: 420    E: 360    F: 300  
 G: 180    H: 120    I: 24    J: 12    K: 6    L: 4  
 M: 2.4    N: 1.2    O: 0.6    P: 0.4    Q: 0.12    R: 0.012  
 (X 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>)

Fig. III. 2-53 Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
20	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
19	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
18	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
17	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
16	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
15	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
14	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
13	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
9	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

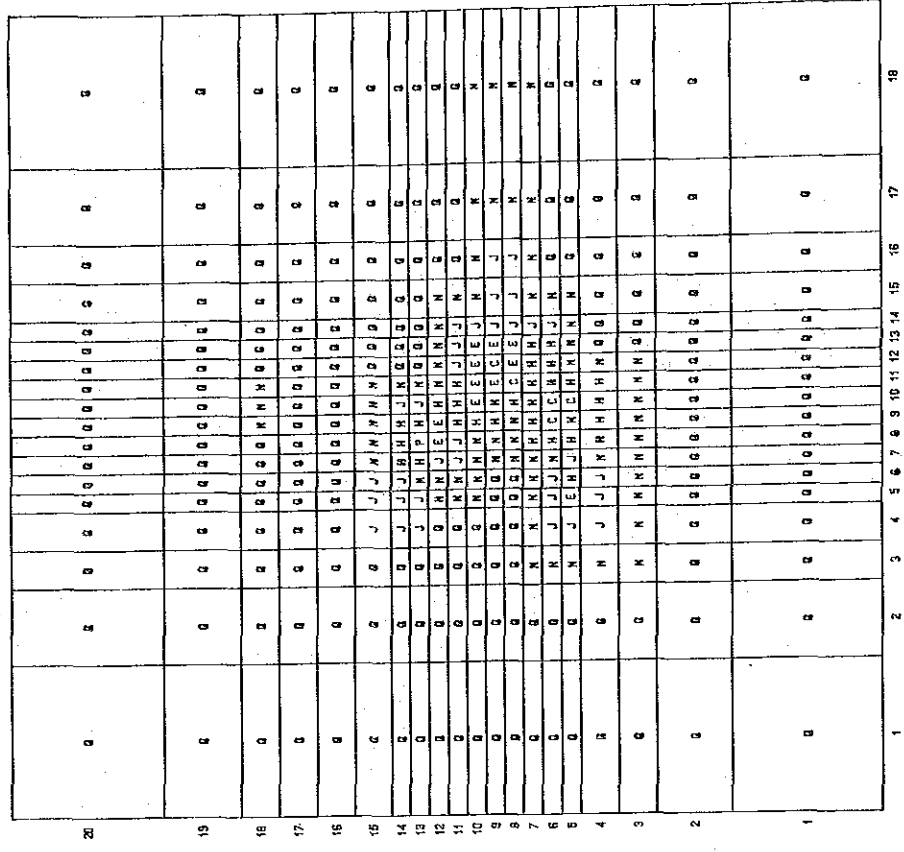
A: 1200    B: 840    C: 600    D: 420    E: 360    F: 300  
 G: 180    H: 120    I: 24    J: 12    K: 6    L: 4  
 M: 2.4    N: 1.2    O: 0.6    P: 0.4    Q: 0.12    R: 0.012  
 (X 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>)

Fig. III. 2-52 Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 1



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    R: 0.06    S: 0.03    T: 0.015    U: 0.0075    V: 0.00375    W: 0.001875    X: 0.0009375    Y: 0.00046875    Z: 0.000234375  
 (x 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup>)

Fig. III. 2-54    Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 3



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    R: 0.06    S: 0.03    T: 0.015    U: 0.0075    V: 0.00375    W: 0.001875    X: 0.0009375    Y: 0.00046875    Z: 0.000234375  
 (x 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup>)

Fig. III. 2-55    Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 4

20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
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

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    ( $\times 10^{-15} m^2$ )

Fig. III. 2-56    Distribution of Horizontal Permeabilities in Layer 5

20	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
19	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
18	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
17	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
16	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
15	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E
14	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E
13	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E
12	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
11	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
10	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
9	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E
8	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E
7	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E
6	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E
5	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
4	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
3	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
2	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
1	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E

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    ( $\times 10^{-15} m^2$ )

Fig. III. 2-57    Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 1



20	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
19	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
18	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
17	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
16	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
15	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
14	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
13	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
6	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
5	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
4	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
3	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
2	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
1	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

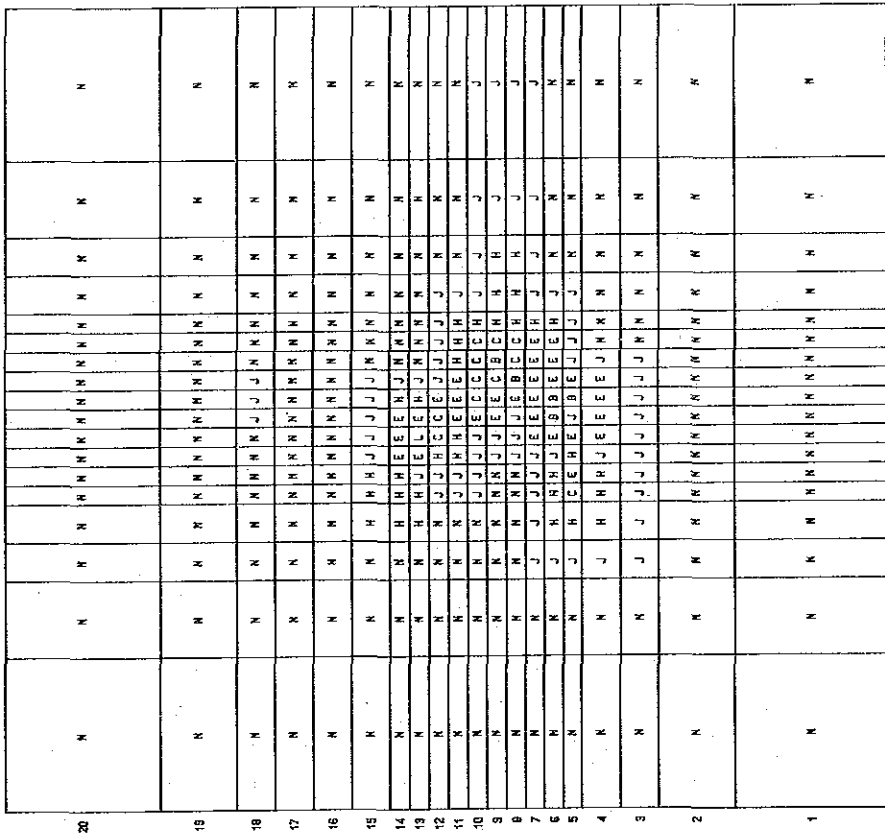
A: 1200    B: 840    C: 600    D: 420    E: 360    F: 300  
 G: 180    H: 120    I: 24    J: 12    K: 6    L: 4  
 M: 2.4    N: 1.2    O: 0.6    P: 0.4    Q: 0.12 ( $\times 10^{-15} m^2$ )

Fig. III. 2-58 Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 2

23	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
19	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
18	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
17	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
16	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
15	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
14	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
13	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
12	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
11	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
6	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
5	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
4	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
3	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
2	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
1	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

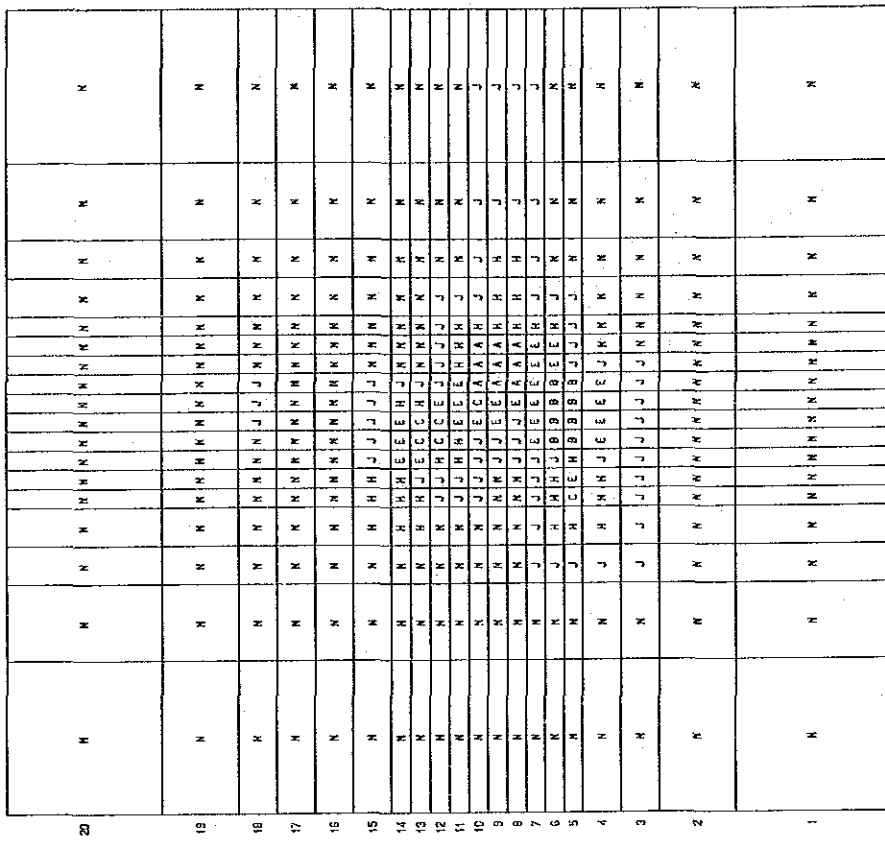
A: 1200    B: 840    C: 600    D: 420    E: 360    F: 300  
 G: 180    H: 120    I: 24    J: 12    K: 6    L: 4  
 M: 2.4    N: 1.2    O: 0.6    P: 0.4    Q: 0.12 ( $\times 10^{-15} m^2$ )

Fig. III. 2-59 Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 3



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 ( $\times 10^{-15} \text{m}^2$ )

Fig. III. 2-60 Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 4



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 ( $\times 10^{-15} \text{m}^2$ )

Fig. III. 2-61 Distribution of Vertical Permeabilities in Layer 5



Table III. 2-7 Reservoir Pressure for Match (ata)

Well	Location		Measured Date	Layer				
	I	J		1	2	3	4	5
PR-5	14	5	1982/08/28	—	64	—	—	—
PR-1	10	10	1984/09/28	—	—	93	—	—
PR-8	13	6	1985/10/18	—	—	125	—	—
PR-9	8	13	1985/11/27	—	—	132	188	—
PR-2	12	18	1986/10/03	—	—	122	—	—
PR-2	12	18	1987/03/20	—	—	127	—	—
PR-2	12	18	1987/07/02	—	—	120	—	—
PR-2	12	18	1987/09/12	—	—	107	—	—
PR-2	12	18	1988/02/17	—	—	128	—	—
PR-2	12	18	1988/02/24	—	—	128	—	—
PR-2	12	18	1988/04/19	—	—	139	—	—
PR-2	12	18	1988/04/28	—	—	137	—	—
PR-13	9	5	1988/06/25	—	—	117	—	—

Table III. 2-8 Geothermometers of PR-1

Date	Concentrations (ppm)			Geothermometers (°C)		
	Na	K	Ca	Na/K (W)	Na/K (F)	NaKCa
1985/02/06	782	232	2.4	345	360	318
1985/04/27	760	193	2.4	316	327	304
1985/05/31	751	200	2.4	324	336	307
1985/06/26	764	194	2.2	316	327	305
1985/07/30	770	179	2.2	301	309	298
1985/08/30	768	175	3.2	297	306	290
1985/09/30	760	175	2.6	299	308	294
1985/10/29	764	170	2.2	293	301	294
1985/11/29	758	180	1.4	304	314	306
1986/02/07	751	173	2.1	299	308	297
1986/03/04	745	167	2.2	295	303	294
1986/05/06	749	167	3.6	294	302	286
1986/06/14	733	160	1.2	290	298	299
1986/09/22	730	185	1.6	316	326	308
1986/11/28	718	155	1.4	289	296	296
1986/12/04	710	165	1.4	301	309	302
1987/01/07	725	165	1.6	297	305	299
1987/02/03	720	170	1.6	303	312	302
1987/03/11	733	167	1.8	297	306	297
1987/04/10	730	167	2.4	298	306	293
1987/05/13	723	161	1.8	294	301	295
1987/05/18	731	160	2.6	291	298	289
1987/05/26	750	159	1.8	286	292	292
1987/06/30	744	155	4.0	283	289	279
1987/07/16	729	156	1.6	287	294	293
1987/09/05	730	168	3.0	299	308	291
1988/01/05	742	170	1.6	298	307	300
1988/02/25	745	170	1.5	298	306	301
1988/03/23	705	177	1.9	314	324	304

**Table III. 2-9 Geothermometers of PR-2**

Date	Concentrations (ppm)			Geothermometers (°C)		
	Na	K	Ca	Na/K (W)	Na/K (F)	NaKCa
1985/02/25	2,577	134	0.6	126	118	231
1985/04/29	2,538	126	0.8	123	115	224
1985/05/31	2,439	127	0.8	127	119	227
1985/06/29	2,489	127	0.6	125	117	229
1985/07/30	2,336	132	1.2	133	126	227
1985/08/30	2,351	129	1.2	131	123	225
1985/09/30	2,380	133	1.6	132	125	223

**Table III. 2-10 Geothermometers of PR-5**

Date	Concentrations (ppm)			Geothermometers (°C)		
	Na	K	Ca	Na/K (W)	Na/K (F)	NaKCa
1982/09/01	745	117	0	242	243	—
1982/09/02	789	122	0	240	241	—
1982/09/03	777	100	0	216	215	—
1982/09/04	716	95	0	220	219	—
1982/09/06	691	90	0	218	217	—
1982/09/09	726	104	0	230	230	—
1982/09/10	699	103	0	233	234	—
1982/09/11	652	88	0	222	222	—
1982/09/13	642	82	0	215	214	—
1982/09/14	638	86	0	222	222	—
1982/09/15	640	83	0	217	216	—
1982/09/17	632	82	0	217	216	—
1982/09/18	649	82	0	214	213	—
1982/09/21	629	79	0	213	212	—
1982/09/22	620	73	0	206	204	—
1982/09/24	592	72	0	210	208	—
1982/09/27	582	70	0	208	207	—

Table III. 2-11 Geothermometers of PR-8

Date	Concentrations (ppm)			Geothermometers (°C)		
	Na	K	Ca	Na/K (W)	Na/K (F)	NaKCa
1985/10/29	1,078	126	5.2	205	203	242
1985/10/30	972	130	4.4	221	221	251
1985/11/01	890	137	2.6	239	241	266
1985/11/05	854	140	2.8	248	250	269
1985/12/04	842	143	1.2	253	255	282
1986/01/03	824	152	2.8	264	269	277
1986/01/30	834	136	1.1	247	249	280
1986/02/21	856	149	1.4	256	259	283
1986/03/04	848	147	1.6	256	259	280
1986/04/04	851	141	1.8	249	252	275
1986/05/06	849	152	0.8	260	264	292
1986/06/14	849	147	0.8	255	258	290
1986/06/19	851	151	0.6	259	262	296
1986/07/03	826	160	2.0	272	277	286
1986/07/07	826	160	2.0	272	277	286
1986/08/25	819	160	0.7	273	278	301
1986/09/22	810	155	1.4	270	275	289
1986/10/01	815	160	1.2	274	279	293
1986/10/09	840	165	1.2	274	279	294
1986/10/30	831	165	1.2	276	281	295
1986/11/06	826	160	1.2	272	277	293
1987/02/09	816	150	0.8	264	268	294
1987/04/10	809	137	1.0	252	255	283
1987/05/13	848	139	0.8	248	250	285
1987/06/12	857	136	0.9	243	245	281
1987/07/04	823	130	0.8	243	244	281
1987/07/16	805	128	0.8	244	245	281
1987/09/28	812	135	2.6	250	252	269
1988/01/27	795	138	1.1	256	259	284
1988/02/18	783	141	1.0	261	265	288
1988/02/22	776	143	0.8	264	268	292
1988/02/27	773	141	0.9	263	267	290
1988/03/04	775	140	1.0	261	265	288
1988/04/14	803	134	1.0	250	253	282
1988/05/02	810	136	1.2	251	254	280
1988/06/02	808	139	1.0	254	257	285

Table III. 2-12 Geothermometers of PR-9

Date	Concentrations (ppm)			Geothermometers (°C)		
	Na	K	Ca	Na/K (W)	Na/K (F)	NaKCa
1986/07/11	1,350	200	109.0	234	235	229
1986/07/14	824	120	19.0	232	232	236
1986/07/15	720	105	11.0	232	233	239
1986/07/17	716	110	6.0	239	240	250
1986/07/21	717	105	4.4	233	233	250
1986/07/31	701	100	3.4	229	230	251
1986/08/07	701	105	3.6	236	237	254
1986/09/01	650	140	1.7	288	295	290
1986/09/09	655	145	2.2	293	300	289
1986/09/22	635	140	1.8	292	300	290
1986/10/09	660	150	2.0	297	305	293
1986/10/20	630	155	1.2	310	320	305
1986/10/24	655	145	1.2	293	300	297
1986/10/27	683	150	3.0	291	299	285
1986/10/30	689	150	1.8	290	297	292
1986/11/06	675	145	1.8	288	295	290
1987/02/09	670	140	1.0	283	290	290
1987/04/10	676	144	2.0	286	293	288
1987/05/13	678	152	5.2	295	303	279
1987/06/12	687	151	2.4	291	299	288
1987/07/16	643	142	0.4	292	300	313
1987/09/24	646	138	2.6	287	294	283
1987/09/28	659	132	3.2	277	283	276
1987/10/03	658	133	2.8	278	284	278
1987/10/06	661	137	3.8	282	288	276
1987/10/20	655	129	1.5	274	280	284
1987/10/26	849	127	1.5	235	236	269
1987/10/31	650	126	2.0	272	277	279
1988/01/05	691	130	1.8	267	272	280
1988/01/28	676	129	1.8	270	274	280
1988/02/25	673	161	1.0	306	315	308
1988/03/11	659	163	0.9	311	321	312
1988/03/18	659	165	0.9	313	324	313
1988/03/26	667	145	1.1	290	297	298
1988/04/15	666	140	0.9	284	291	298
1988/06/02	665	143	1.0	288	295	298



Table III. 2-13 Geothermometers of PR-12

Date	Concentrations (ppm)			Geothermometers (°C)		
	Na	K	Ca	Na/K (W)	Na/K (F)	NaKCa
1988/01/21	810	226	3.6	333	346	308
1988/01/28	740	203	4.8	330	343	299
1988/02/04	756	208	3.6	330	343	305
1988/02/11	772	214	3.2	332	345	308
1988/02/17	766	209	3.4	329	342	305
1988/02/25	748	206	4.6	331	343	301
1988/03/11	741	205	3.0	331	344	307
1988/03/18	706	192	3.2	328	341	303
1988/03/26	752	208	3.0	331	344	308
1988/04/14	810	214	3.3	323	335	304
1988/05/02	776	206	3.0	324	336	305
1988/06/17	723	200	2.2	331	344	311
1988/06/20	731	206	2.6	335	348	310
1988/06/27	756	210	2.6	332	345	310
1988/07/05	757	203	2.6	326	338	307
1988/07/11	733	200	2.6	329	342	308

## 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.2-14 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200m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CFEによって Table III.2-15 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.2-16 に示す。

Table III.2-16 の仮想生産井による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）、MT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と Table III.2-17 に示すような蒸気生産量となる。実際の計算では Table III.2-17 に基づく仮定生産能力によって実施した。

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.2-16 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.2-14 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-

シヨンは全て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.2-62～77は、TableⅢ.2-14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100MWすなわち蒸気生産量1,000t/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.2-74～76参照)。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75MWすなわち蒸気生産量750t/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68ata、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.2-78～79参照)。

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75MW前後とみるのが妥当であると結論される。

**Table III. 2-14 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. 2-15 Well Efficiency in the La Primavera Area**

\* Temperaturas estabilizadas.

Pozo No.	Profundidad de Isothermas (°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. 2-16 Summary of Tentative Production Wells

Well		Location			Rank of Productivity	Notes	
		I	J	K			
Existing wells	PR-1	10	10	3	1	Used for case 1 ~ 4	
	PR-8	13	6	3	1		
	PR-9	8	13	3 ~ 4	1		
	PR-10	16	9	4	2		
	PR-11	5	5	3	1		
	PR-12	12	9	4	2		
	PR-13	9	5	3 ~ 4	2		
Future wells	PR-31	10	8	3	2		
	PR-32	11	6	3	3		
	PR-33	8	9	3	4		
	PR-34	8	7	3	3		
	PR-35	7	5	3	4		
	PR-36	6	14	3	5		
	PR-41	11	4	4	4		
	PR-42	4	15	4	5		
	PR-43	4	13	4	5		
	PR-44	12	11	4	5		
	PR-45	14	11	4	5		
	PR-46	14	9	4	5		
	PR-51	5	9	3	6		
	PR-52	6	7	3	5		
	PR-54	12	13	3	6		
PR-55	14	13	3	6			
PR-56	14	4	3	6			
Future wells	PR-61	15	7	4	6		Used for case 1, 3, 4
	PR-62	10	13	4	5		
	PR-63	8	15	4	6		
	PR-64	8	11	4	5		
	PR-65	7	3	4	6		
	PR-66	5	11	4	6		
	PR-81	17	7	4	6		
	PR-82	11	15	4	6		
	PR-83	9	3	4	6		
	PR-84	3	7	4	6		
	PR-85	3	5	4	6		
PR-86	3	3	4	6			

Rank of Productivity	1	2	3	4	5	6
Proportion of Steam Production (%)	100	70	50	30	20	10

Table III. 2-17 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 (p r 07)

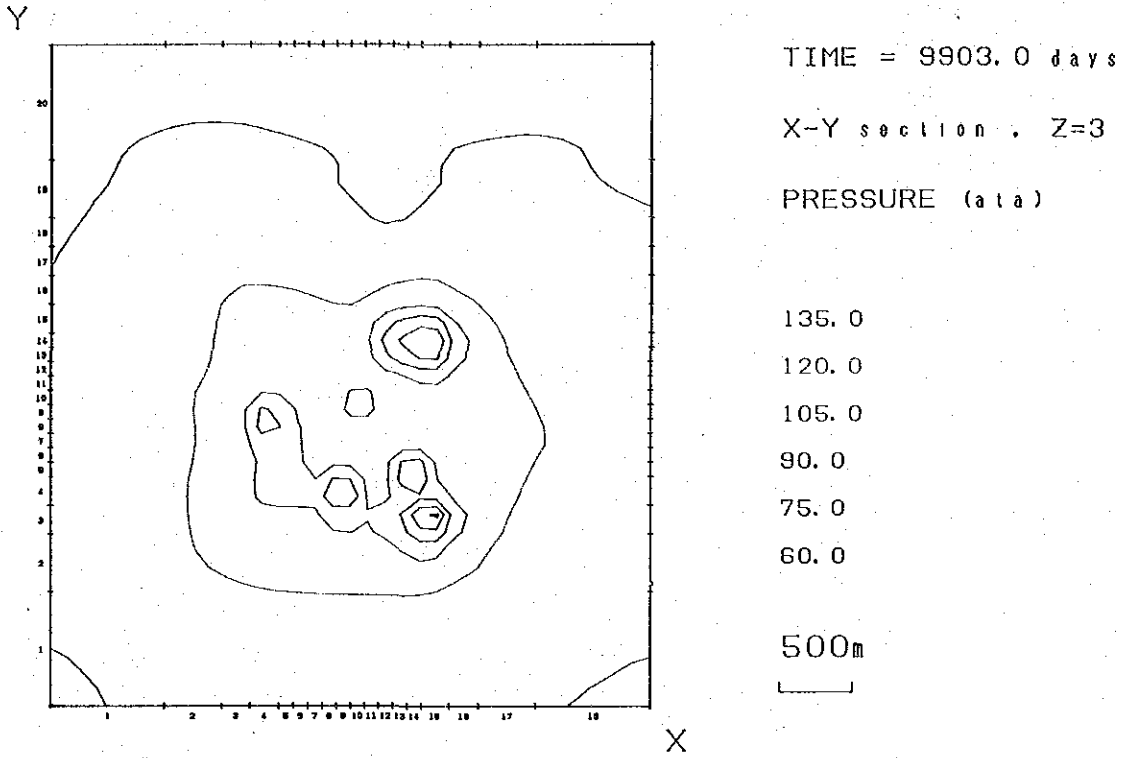


Fig. III. 2-62 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 1)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (p r 07)

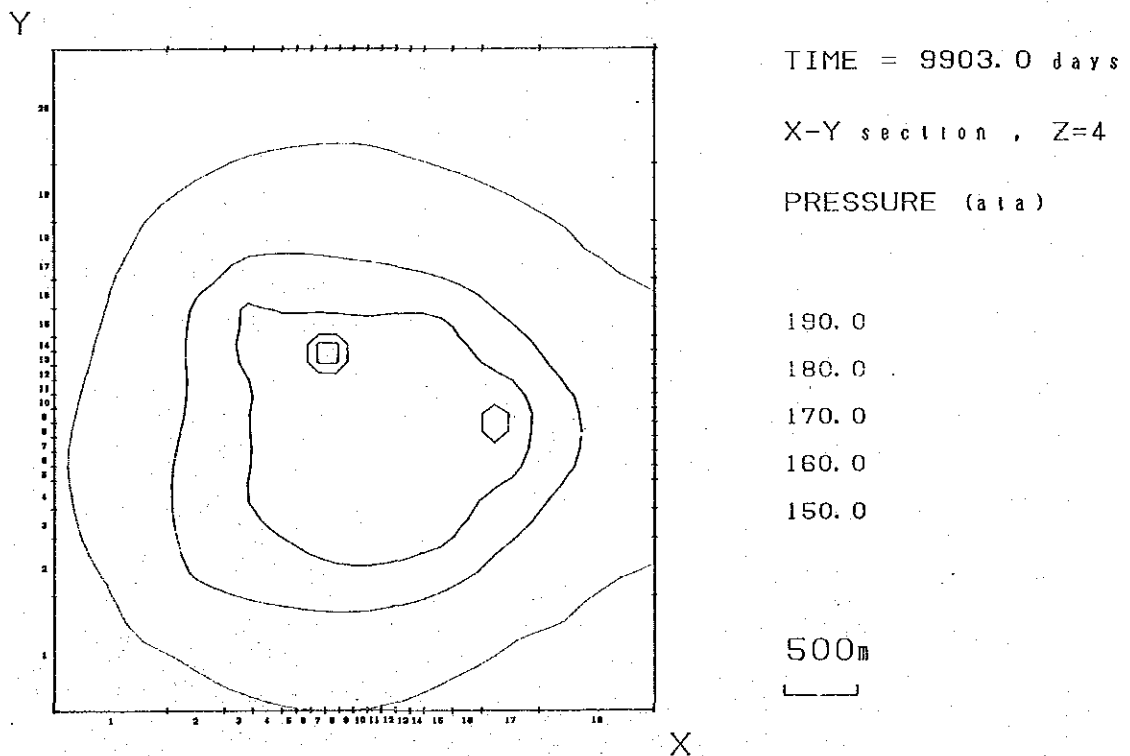


Fig. III. 2-63 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 4 (case 1)



PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (pr 07)

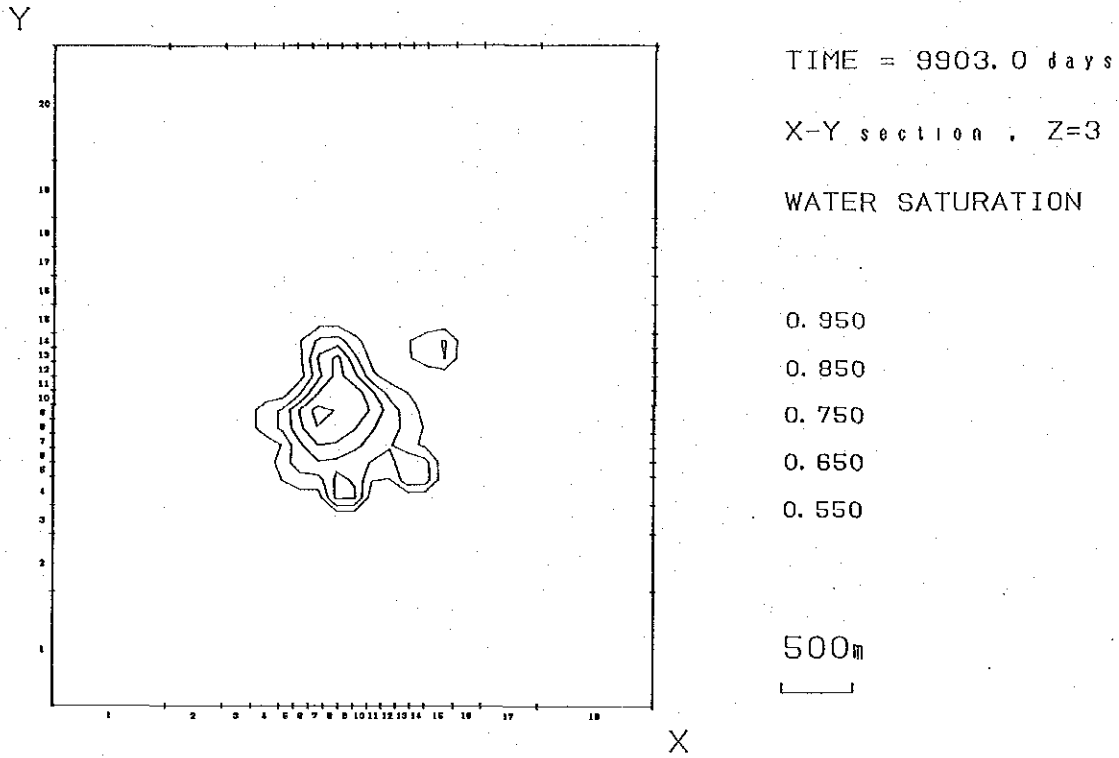


Fig. III. 2-64 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 1)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (pr 07)

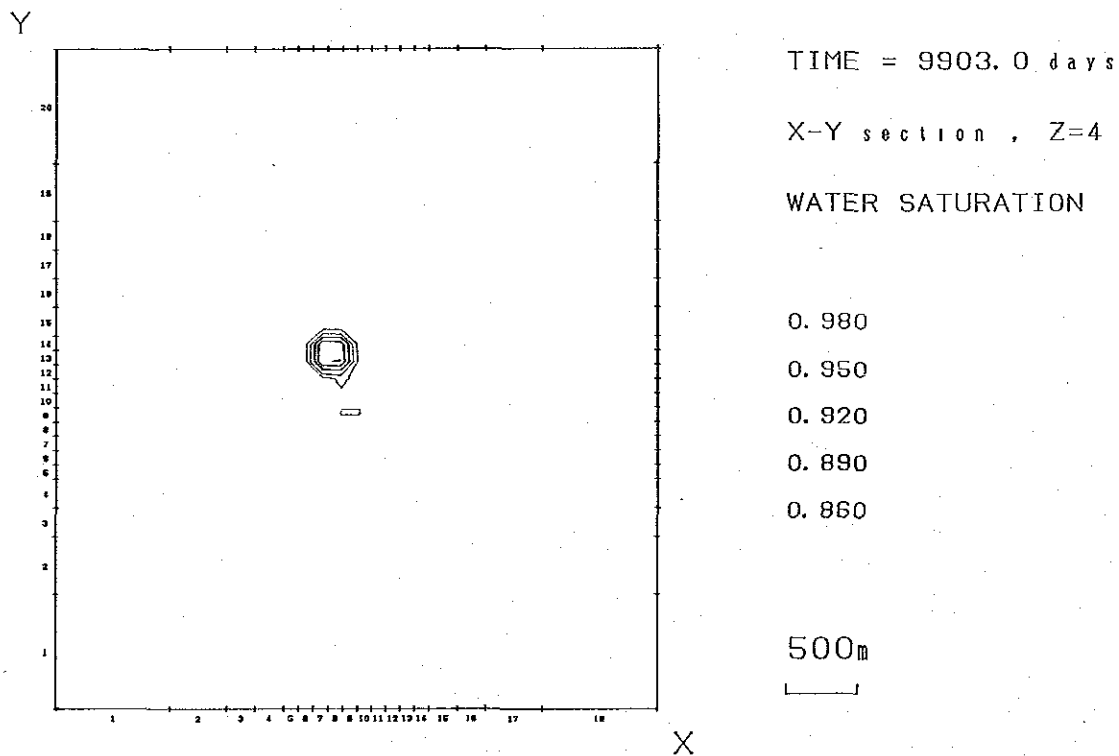


Fig. III. 2-65 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 1)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (pr 05)

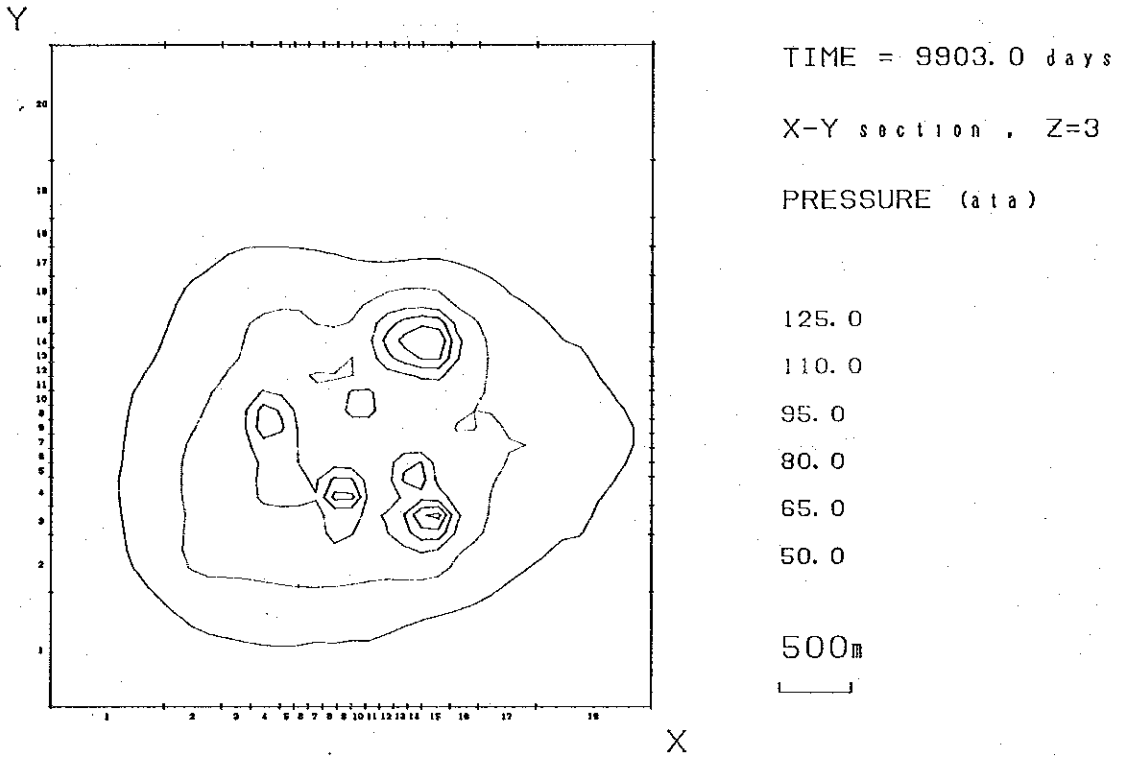


Fig. III. 2-66 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 2)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (pr 05)

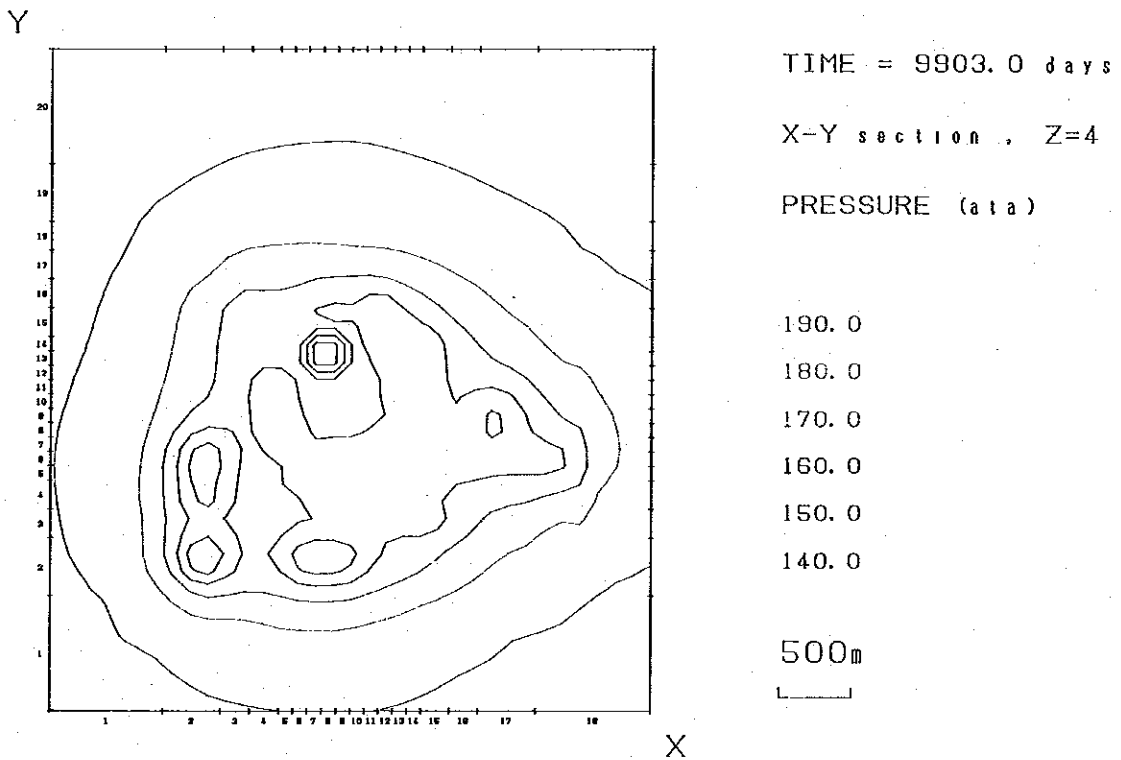


Fig. III. 2-67 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 4 (case 2)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (p r 05)

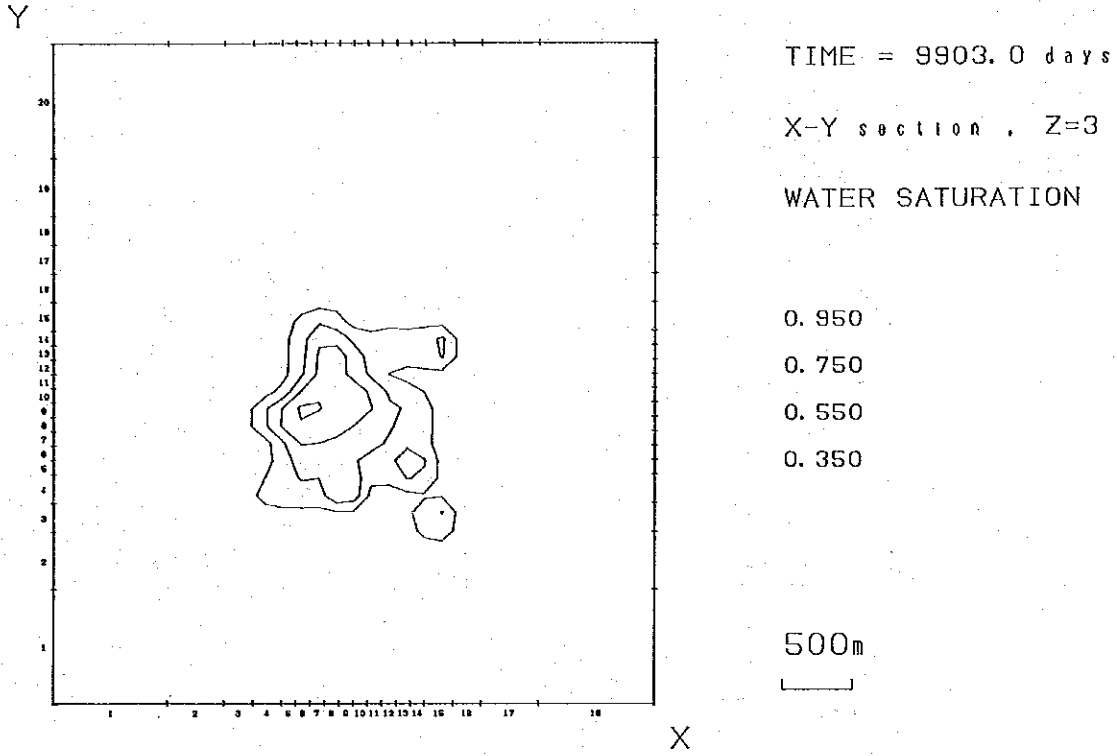


Fig. III. 2-68 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 2)

PREDICTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (p r 05)

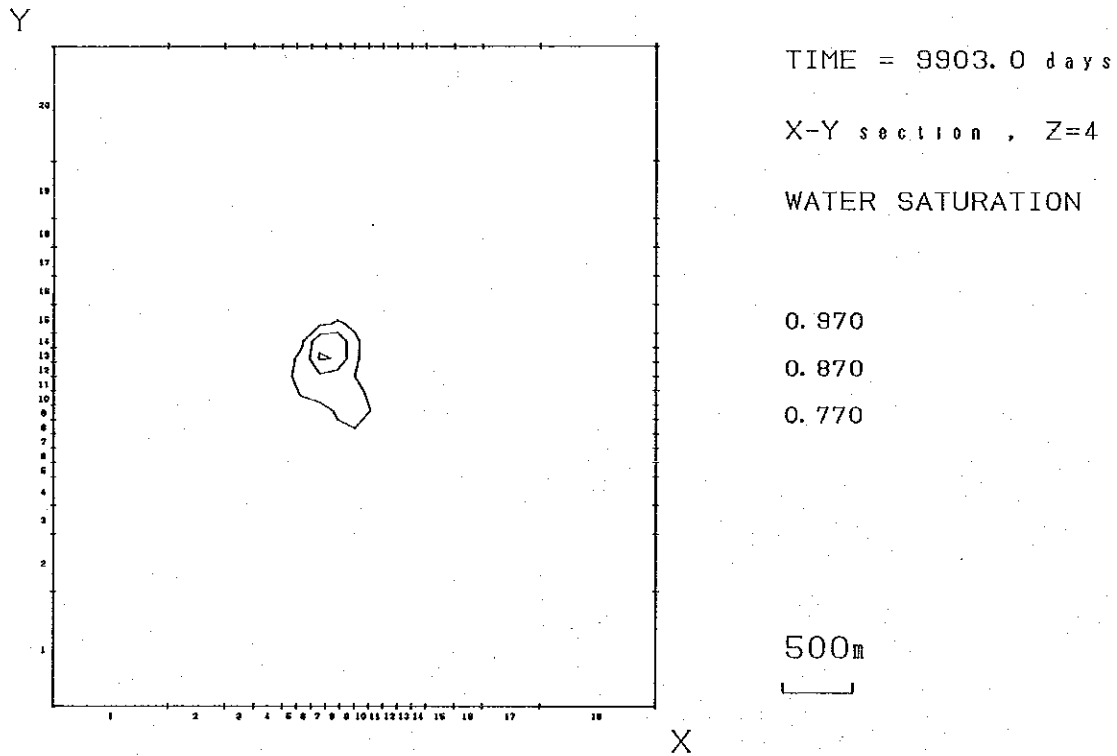


Fig. III. 2-69 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 2)

PREDIOCTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (p r 04r 2)

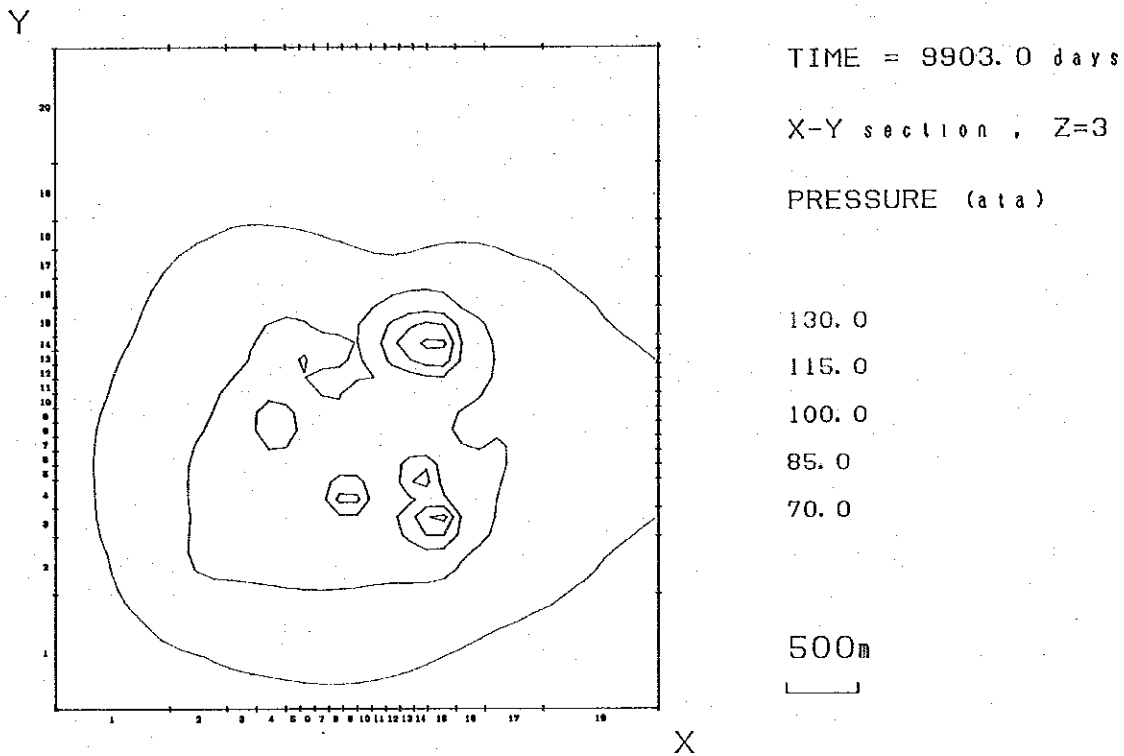


Fig. III. 2-70 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 3)

PREDIOCTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (p r 04r 2)

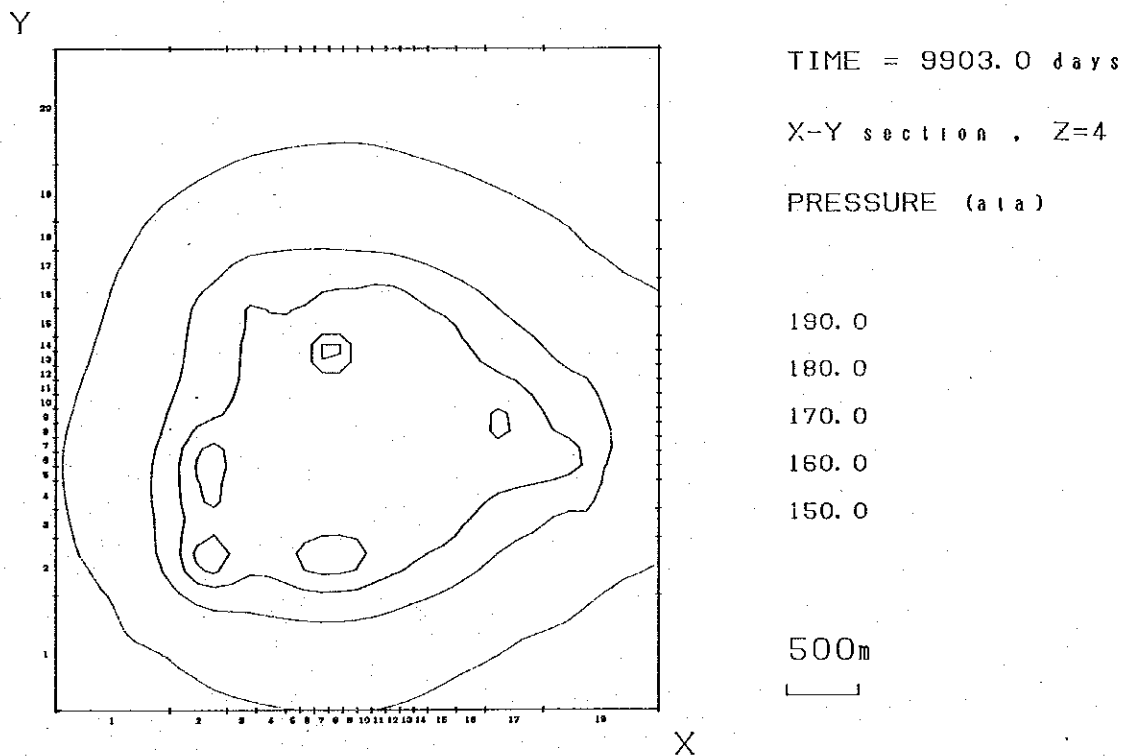


Fig. III. 2-71 Prediction of Pressure after 9,903 Days, layer 4 (case 3)

PREDIOCTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (pr 04r 2)

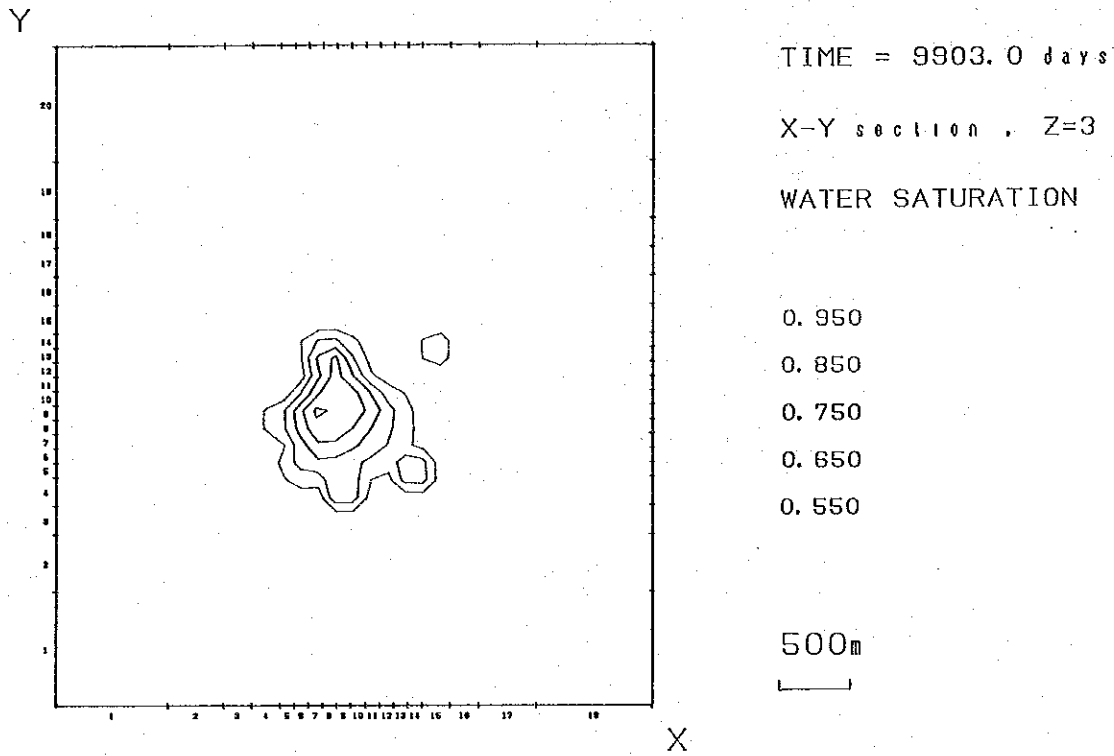


Fig. III. 2-72 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 3)

PREDIOCTION OF LA PRIMAVERA FIELD, MEXICO (pr 04r 2)

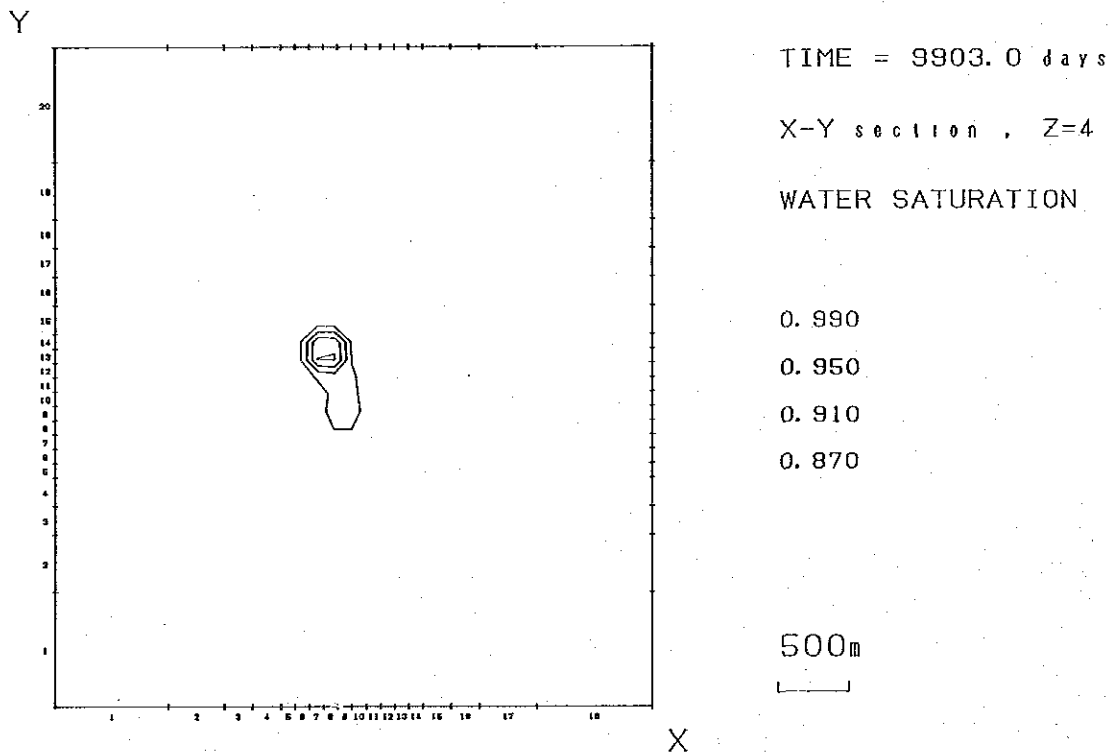


Fig. III. 2-73 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 3)

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

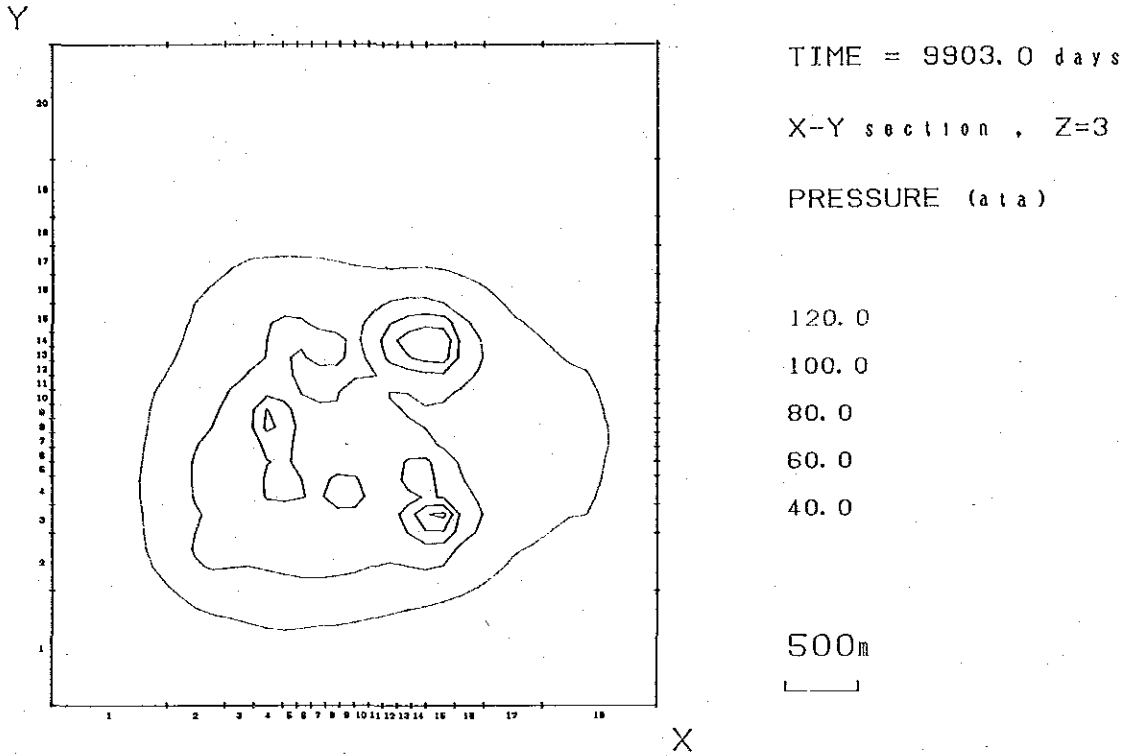


Fig. III. 2-74 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 3 (case 4)

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

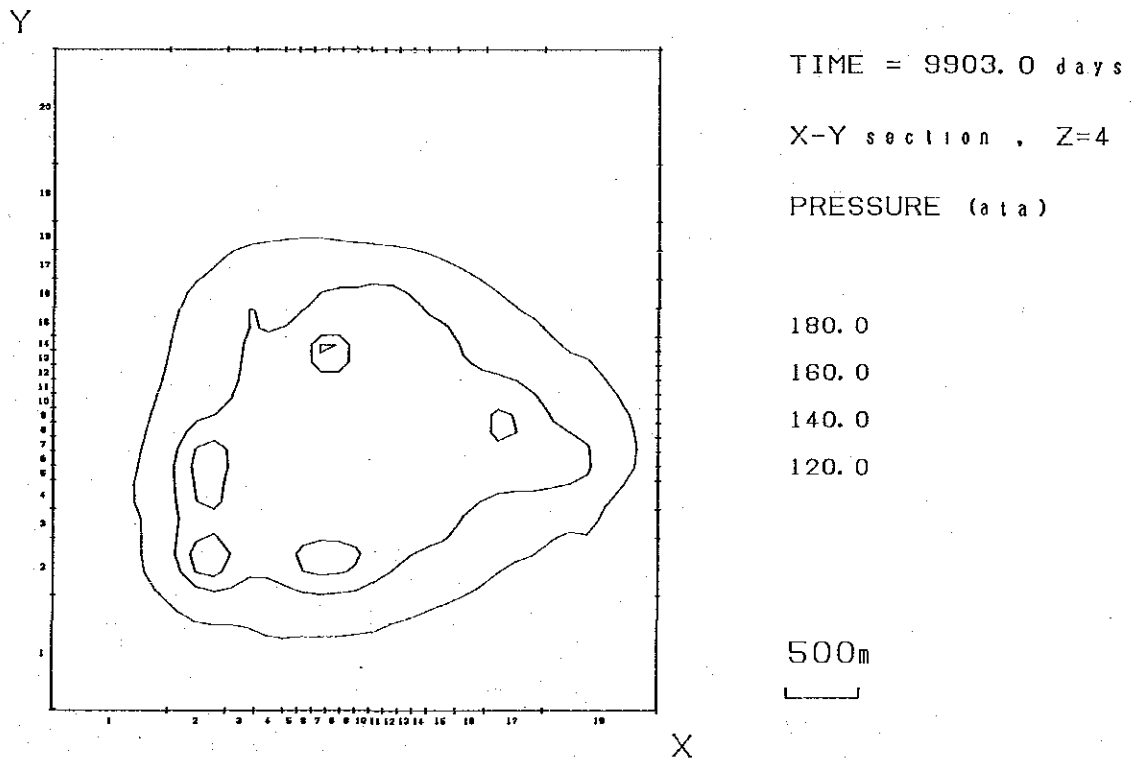


Fig. III. 2-75 Prediction of Pressure after 9,903 Days, Layer 4 (case 4)

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

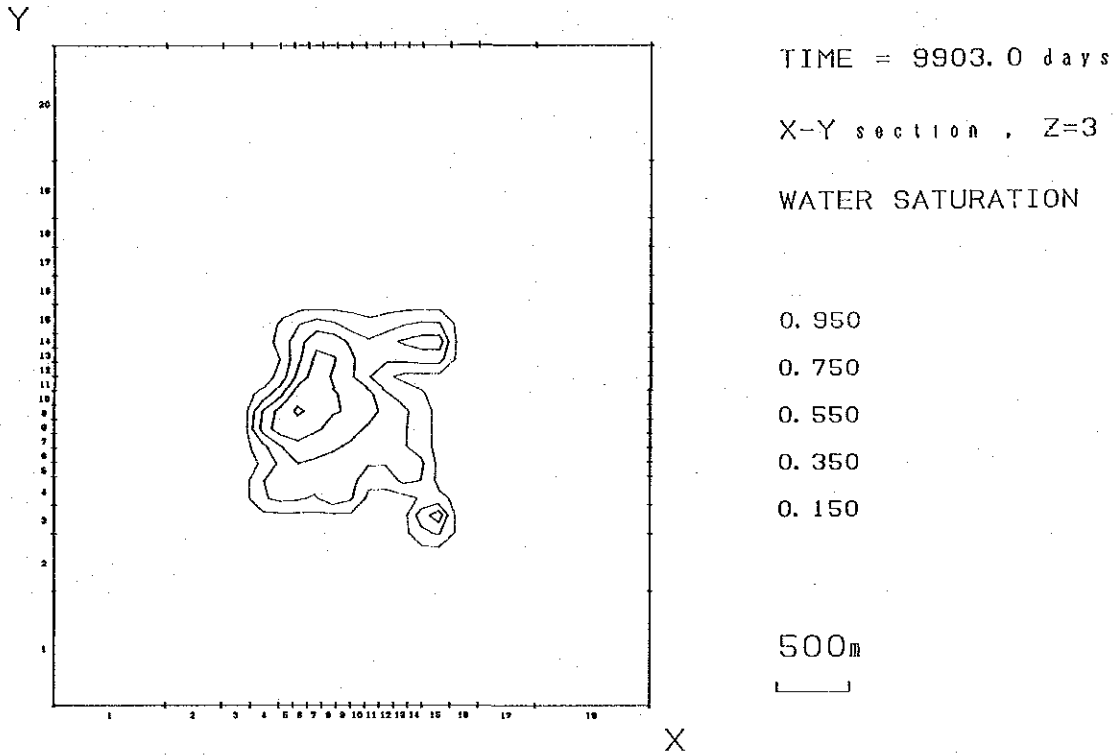


Fig. III. 2-76 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 3 (case 4)

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

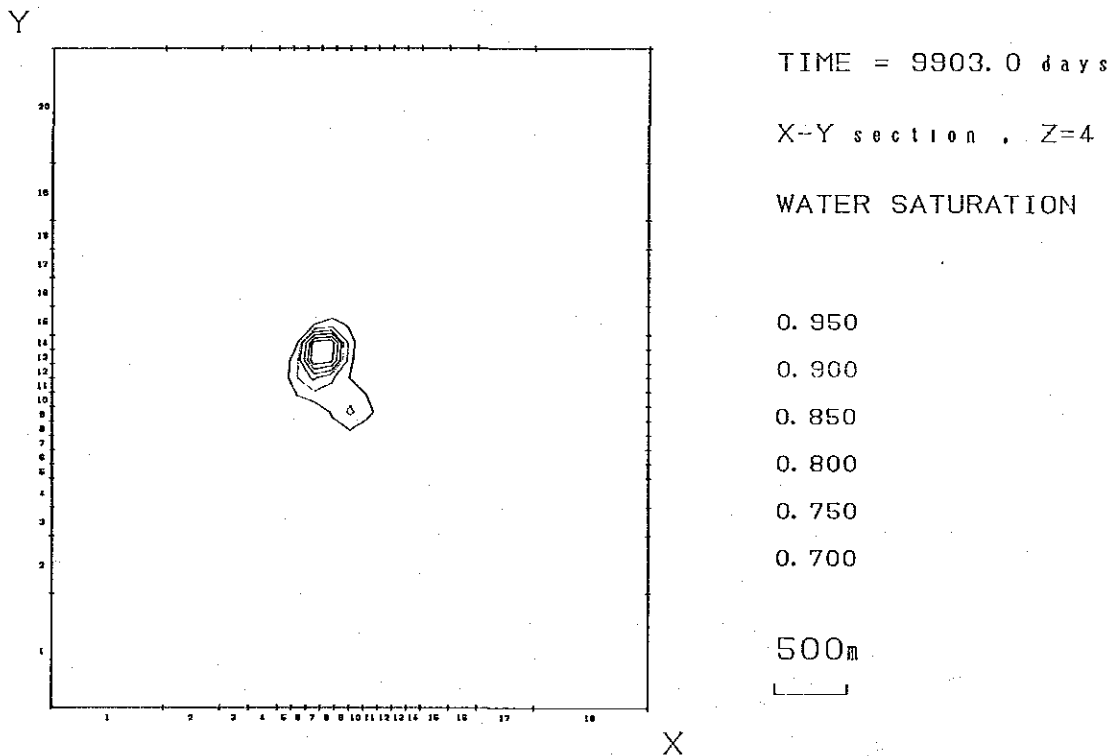
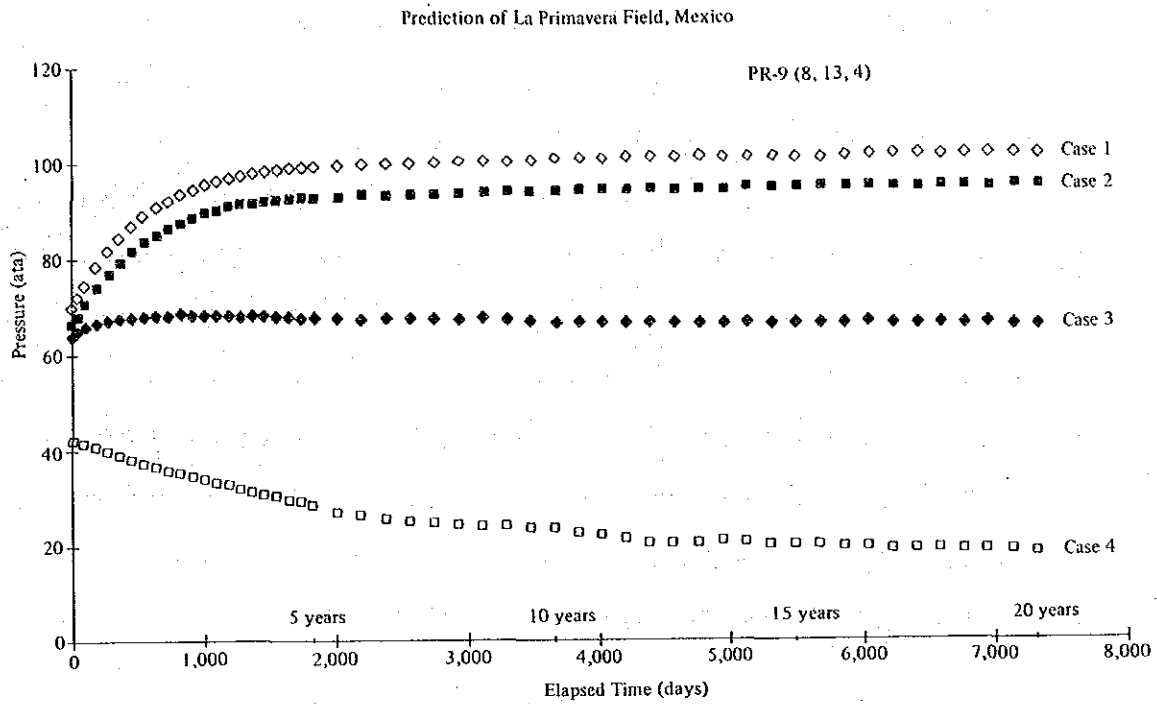
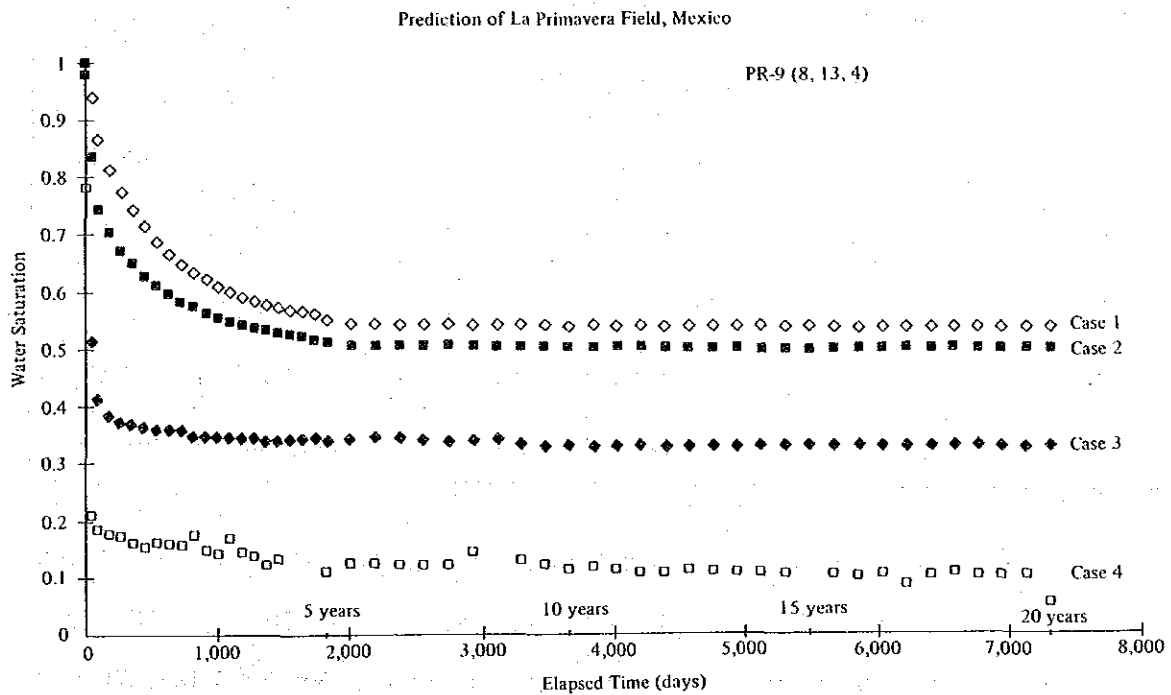


Fig. III. 2-77 Prediction of Water Saturation after 9,903 Days, Layer 4 (case 4)



**Fig. III. 2-78 Prediction of Reservoir Pressure near PR-9**



**Fig. III. 2-79 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 F 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.3-5、II.3-23 および Table II.2-15 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 II.2-18 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およ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になる。

- 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  $1 \text{ MW} \div 10 \text{ t/h}$  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。

発電单元	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。

JICA

メキシコ合衆国ラ・プリマヘーラ地熱開発計画調査

報告書

平成元年二月

国際協力

JICA

615  
643  
MM