

2. 5 地熱系概念モデル

2.5.1 地質構造

2.5.2 熱源

2.5.3 地下温度分布

2.5.4 熱水系地化学モデル

2.5.5 地熱構造モデル

2.5 地熱系概念モデル

地表調査（地質、地化学、重力・磁気探査、および電磁探査）、坑井調査および既存調査資料を再検討し、アマティトラン地域の地熱系概念モデルを作成した。

地質調査では、本地域の地熱系を規制すると思われる基盤構造、断層構造、貫入岩についての地質構造の抽出を行った。また、火山岩や変質岩の年代測定や岩石鉱物学的な解析による変質帯の分布域から熱源と関係する火山活動や熱水変質活動を明らかにした。地化学調査では、温泉や噴気ガス組成についてデータのレビューに加え、坑井 AMJ-1 および AMJ-2 における噴出流体分析結果から、地熱流体の上昇通路の推定や貯留層熱水の性状、流体の流動状況を解明し、流体流動モデルを作成した。重力・磁気探査および電磁探査結果から推定された花崗岩基盤の隆起構造、熱水変質帯の発達、貯留層分布域、および比抵抗構造についても、坑井 AMJ-1、AMJ-2 から得られた坑井調査結果と比較して検討した。以下にその概要を示す。

2.5.1 地質構造

アマティトラン地域における地質構造は、Fig. 2-5-1 に示すように N-S および NE-SW 系の基盤隆起構造、カルデラ構造、および Fig. 2-5-2 や Fig. 2-5-3 に示すデイサイトの貫入によって特徴づけられる。

1. 基盤隆起構造

地質調査および重力探査の結果から、本調査地域を東西に二分し、概略南北方向に延びる 1.5~2.0km 幅の隆起帯の存在が推定された。

本隆起帯の西端は、調査地域北方の Lago de Amatitlan 湖畔の Llan de Animas から El Pepinal にかけて N-S 方向に配列し、Cerro Hoja de Queso から坑井 AMF-2 周辺地域までのゾーンで、NE-SW 方向に向きを変えている。坑井 AMJ-2 の深度 1,594m で確認された逸水部は、本隆起帯西端深部に発達する断層に相当するものと解釈される。坑井 AMF-1 および AMF-2 によって 280℃ を超える貯留層が存在することが確認されており、噴気帯や変質帯などの分布の延びや配列方向もこれに平行している。さらに、Fig. 2-5-3 に示すように本隆起帯西端深部に推定される断裂構造に沿ってデイサイト質貫入岩が分布しているものと判断される。この貫入岩の一部は、坑井 AMF-2 のカッティングス解析においても確認されている。

基盤の標高は、坑井 AMF-1 および AMF-4 で標高 400~500m を示し、相対的な高まりを形成していることが確認された（坑井 AMJ-1 では標高約 230m）。一般的に花崗岩等の不透水性層の隆起帯は、多くの地熱地帯で地熱流体の上昇域に関与している。

2. カルデラ構造

調査地域内には、Amatitlan カルデラ群の南縁の一部が存在すると考えられ、INSIVUMEH (1978)、OLADE (1982)、および Roldan (1993) の報告から、大きく下記の 3 つのカルデラ縁が推定されている (Fig. 2-5-1)。

a. Cerro Grande を通る最も外側にあるカルデラ縁

Cerro Grande および Cerro Chino 北麓を通り、さらに Rio Michatoya 川沿いに谷を形成し、Volcan de Agua 東側に至る。アマティトラン地域において、最初に活動したカルデラと推定される。ただし、調査地域内においてはカルデラ縁沿いに地表地熱徴候が認められないため、地表近くでは、浅層地下水が断層に沿って流入していることが想定される。

b. El Cedro および坑井 AMF-2 南方付近を通る中間に位置するカルデラ縁

上記カルデラの次に活動したカルデラの一部と考えられる。Lago de Amatitlan 南東岸に面する崖壁として残っており、坑井 AMJ-1 と AMF-2 の間、El Cedro, San Vicente Pacaya を経て、その北西方へ抜ける。北端は Jalpatagua 断層によって境される。坑井 AMJ-2 の掘削深度 1,140m 付近で遭遇した逸水層は本カルデラ縁に相当する断層と考えられる。

電磁探査の結果から、坑井 AMJ-1, AMJ-2, AMF-2, および El Cedro にかけての一带で低比抵抗域として確認されている。さらに、後述の地下温度分布の高温異常域がカルデラ縁に沿って北西方向に延びていることから、本カルデラ縁は比較的規模が大きく、破砕が進んでいると考えられ、透水性が高いことが期待される。

c. Cerro Hoja de Queso 南方および坑井 AMF-4 付近を通る最も内側のカルデラ縁

Cerro Hoja de Queso 南方, AMF-4 付近, および San Vicente Pacaya 北方を通り、カルデラ形成の第三ステージに形成されたものと考えられる。

坑井 AMF-4 の深度 1,000m 付近では逸水に遭遇し、浅層地下水の流入が確認されている。また、後述の地下温度分布から、調査地域東部では本カルデラ縁に沿って低温領域が広がっており、Lago de Amatitlan の方向から湖水の流入が示唆されており、透水性が高いことが期待される。

この他、Laguna de Calderas 西方に、小規模なカルデラ構造(Laguna Caldera)が認められる。坑井 AMJ-2 の深度 1,539m で確認された逸水部は、本カルデラ縁を形成する断層に相当するものと考えられる。本地域は、多くの噴気帯および変質帯が存在しており、その変質状況や噴気の配列方向から地表の噴気活動は、この Laguna Caldera に沿っており、高温流体の上昇通路となっている可能性がある。

3. デイサイトの貫入

坑井 AMF-2 の掘削によって、デイサイトの貫入岩が存在することが確認された。これらは Lago de Amatitlan 南岸に露出するデイサイトドーム群と同質の岩石で構成されており、TL 年代測定結果から同時代に形成された可能性が高い。この貫入岩は重力探査の結果から推定された南北方向に延びる隆起帯西端部付近および Laguna de Calderas 西方の小規模カルデラの地下深部に分布しているものと考えられる (Fig. 2-5-2 および Fig. 2-5-3)。坑井 AMJ-1, AMJ-2, および AMF-2 の流体包有物均質化温度の結果から、バイモーダル

温度分布を示しており、このデイサイトの貫入に伴う新規熱水活動によって再加熱され、地下温度が上昇した可能性が考えられる。言い換えると、デイサイト質マグマの上昇に伴わない、貫入岩境界部付近に裂かが発達し、これが地熱流体の通路となっていることが想定される。

2.5.2 熱源

岩石および変質年代測定結果から、アマテイトラン周辺地域の火山活動は北から南へ移動しており、これに伴ない地熱活動の中心も北から南へ移動しているものと推定される。調査地域南方の Volcan de Pacaya は、坑井 AMJ-1 掘削期間中(2000年1月)に大規模なストロンボリ型の噴火を行った。この Volcan de Pacaya を始めとして、第四紀更新世後期(約 0.7Ma)から現世にかけて活動したマグマの熱あるいは火山ガスが本地域の地熱系の広域的な熱源となっているものと推定される。

また、Laguna de Carderas 西方の小規模カルデラの内側において、デイサイト貫入岩が存在し、重力探査の結果から推定される南北方向に延びる隆起帯西端の深部断層構造および小規模カルデラに伴った断層に沿って貫入しているものと推定される。さらに、流体地化学データおよび地下温度分布、および貫入時期を考慮すると、このデイサイト貫入岩が、アマテイトラン地熱地域に形成される地熱系の直接の熱源となっている可能性が高い。

2.5.3 地下温度分布

本調査地域内で掘削された6坑井の温度検層データおよび流体包有物均質化温度データを基に地下温度分布を検討した。

- 1) 本地域内の最高温度は、坑井 AMF-2 坑底付近で観測され、花崗岩質基盤岩上面付近で 300°C以上の地下温度を示す(標高 200m では 320°C)。
- 2) 坑井 AMF-3 では温度の逆転現象が見られ(Fig.4-3)、標高 500m 付近で 200°Cの温度コンターが北方に舌状に延びている。このことから、Laguna de Calderas 付近から基盤の隆起部に沿って、北方に高温の地熱流体が側方流動しているものと判断される。
- 3) 坑井 AMJ-1 付近から NW 方向に温度コンターが屈曲している。この地域周辺では、電磁探査結果による低比抵抗分布域が同じく NW 方向に延びており、カルデラ縁の方向とも調和的である。さらに、地化学解析結果から Rio Michatoya 川流域にまで達する西方への高温流体の流動が想定されていることから、カルデラ縁を構成する断層に沿って、高温流体が流動している可能性がある。
- 4) AMF-4 付近では温度コンターが、ESE 方向に屈曲していることから、最も内側のカルデラ縁に沿って周辺地域よりも相対的に低温の流体が浸入してきている可能性がある。このことは、AMF-4 掘削時に深度 1,000m 付近で逸水し、浅層地下水が流入していることとも調和的である。

以上のことから総合すると、本調査地域の地下温度分布は、Laguna de Carderas 西方の小規模カルデラの中央部に存在するデイサイト貫入岩付近を中心に放射状に温度が低下し、基盤隆起部を形成する断層およびカルデラ縁に伴った断層に沿って流体が流動する温度分布を示している。

2.5.4 熱水系地化学モデル

貯留層流体に関する地化学解析・検討結果に基づき、アマティトラン地熱地域の熱水系地化学モデルを構築した (Fig. 2-5-4)。

坑井 AMJ-1, AMJ-2, AMF-1, および AMF-2 により確認された地熱貯留層は、単一の熱水系を形成している。坑井 AMJ-1 からの噴出流体は蒸気のみであり、坑井 AMJ-2 および AMF-2 からの噴出流体には過剰な蒸気が含まれているが、熱水系は本質的には熱水 (液相) 卓越型である。それら坑井の貯留層流体は、330°C前後で Cl 濃度が 2,500mg/L の共通となる本源的流体に由来するものと考えられる。貯留層流体の起源は、基本的には深部にまで浸透した天水と少量のマグマ起源流体であるとみなされる。その天水は、本地域南側の高標高地の降水と北～北東からの Lago de Amatitlan の湖水を含む低標高地の天水が混合したものと推定される。噴出熱水の Cl/B 比は、主な貯留層母岩は、基盤の花崗岩ではなく、火山岩類であることを示唆している。

地熱流体の主な上昇域は、坑井 AMF-2 および AMJ-2 の近傍に位置すると解釈した。その理由としては、それらの坑井の地化学温度が、この地域で最も高温 (290～300°C) の流体の存在を示すことによる。深部高温流体の上昇は部分的な沸騰を伴っていると考えられ、その沸騰により貯留層流体の Cl 濃度 (約 2,700mg/L) は本源的流体の濃度よりもやや高くなっているとみなされる。その流体は上昇に伴ってさらに沸騰することにより、調査井 AMJ-2 の浅部において坑内に流入する比較的低温 (280°C未満) で蒸気割合と Cl 濃度が高い (2,800mg/L 以上) 流体を生成している可能性が高い。高温流体の大部分はさらに沸騰と蒸気分離を伴いながら北東方向に側方流動し、坑井 AMF-1 の貯留層を形成している。その流体から分離した蒸気の一部は浅部にまで上昇し、Laguna de Calderas 西方の自然噴気を形成していると考えられる。坑井 AMF-1 の貯留層における流体は、蒸気分離の影響を比較的強く受けており、その温度は 250°C程度にまで低下し、Cl 濃度は 3,300mg/L 程度にまで上昇している。Calderas 地域付近で深部から上昇した流体は、主に北～北東方向に向かって側方流動するとともに低温の地下水により希釈され、最終的には Lago de Amatitlan の南岸にまで達している。

2.5.5 地熱構造モデル

以上、地上調査結果および坑井掘削結果から作成したアマティトラン地域の地熱系概念モデルを Fig. 2-5-1, Fig. 2-5-2, および Fig. 2-5-3 に示す。

本地域に形成されている地熱系は、Laguna de Calderas 西方深部に存在するデイサイトの貫入岩を直接の熱源とし、地域南側の高標高地の降水や Lago de Amatitlan の湖水を含む低標高地の天水を起源とする火山性の熱水対流系である。また、現在も大規模な噴火を続けている Volcan de Pacaya をはじめとして、第四紀更新世後期 (約 0.7Ma) から現世にかけて活動した

火山活動に起因したマグマの熱あるいは火山ガスもまた広域的な熱源となっているものと思われる。

地下深部に流入した天水は、花崗岩質基盤岩上を北方ないし北東方向に流動し、残留マグマからの熱によって加熱される。加熱された天水は流動中に周囲の岩石と反応し、その化学組成を次第に中性 C1 型のものへと変化させるとともに、マグマ溜まりからのマグマ水との混合によって形成され、温度が 300~340°C に達する。この深部熱水が、本地域の本源的な地熱流体と想定される。

このようにして生成された深部熱水は、NE-SW 系の基盤隆起帯西端に相当する深部断裂、Laguna de Calderas 西方の小規模カルデラ構造縁を形成する断層、あるいはマグマの上昇に伴い裂かが進んだデイサイト質貫入岩境界部付近に沿って上昇し、断層沿いの破碎帯中に貯留される。

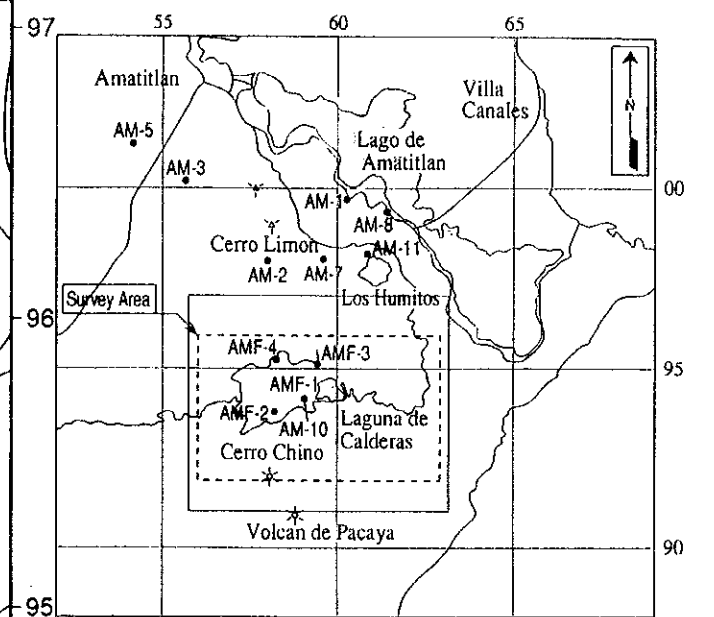
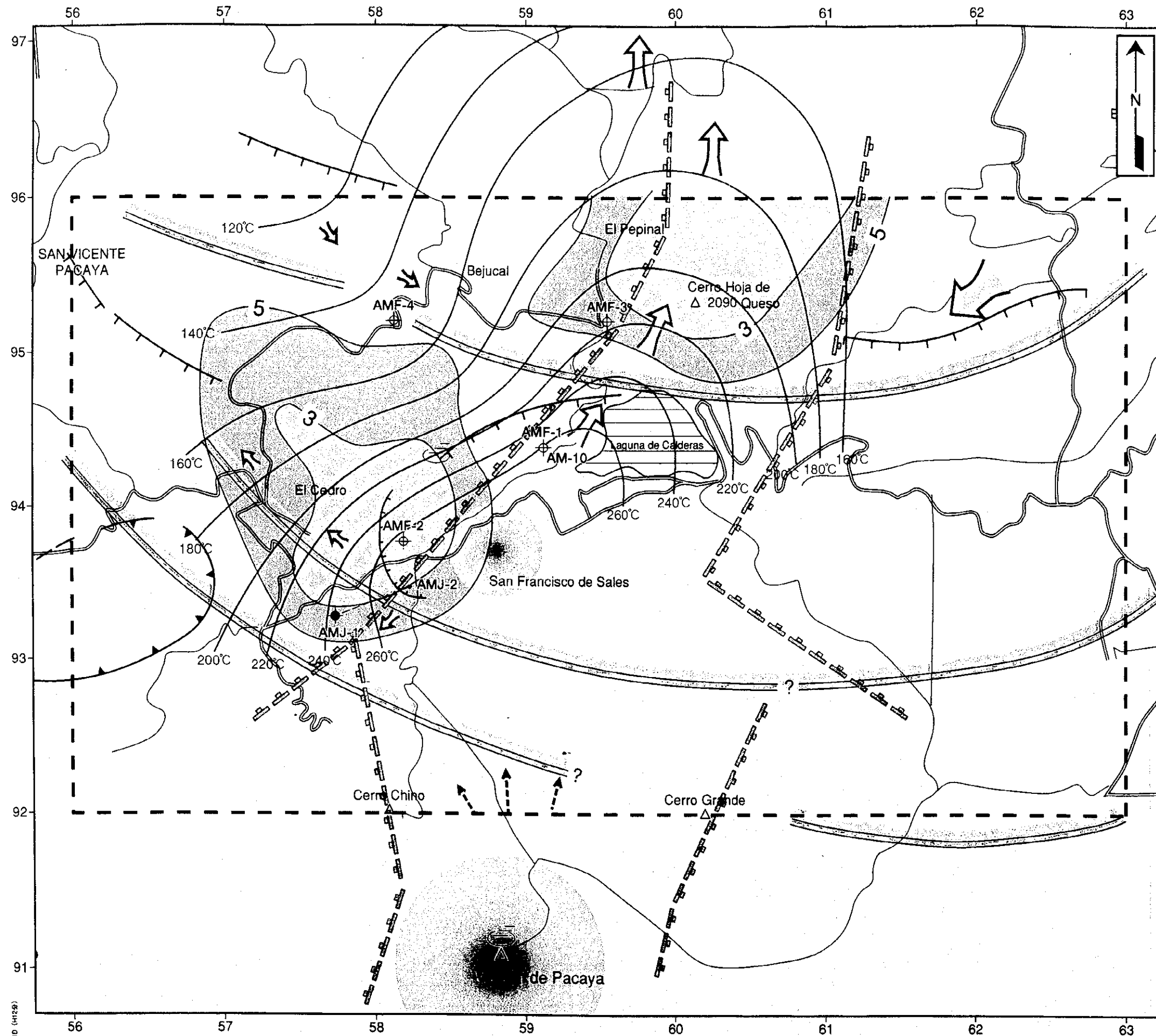
基盤隆起帯西端の標高 500m 付近では、深部の本源的な地熱流体が温度 290~300°C の熱水 (C1 濃度: 2,700mg/L) となり、断層に伴う破碎帯に貯留され、小規模カルデラを形成する断層に沿って上昇し、噴気帯や変質帯を形成している。この貯留層熱水は、沸騰しながら NE-SW 系断層に沿って AMF-1 付近に達し、ややエンタルピーの低い高塩濃度の熱水貯留層を形成している。

地熱流体の上昇に伴う沸騰は、シリカの沈殿や浅部の熱水変質作用による粘土化帯を形成し、それが地熱貯留層のキャップロックの役割を果たしている。AMF-1, 2 の周辺では、キャップロックの直下に気液 2 相の貯留層が存在している。熱水変質帯は、低比抵抗帯の分布から北方へ帯状に広がる可能性がある。熱水はこの変質帯をキャップロックとして、天水に徐々に希釈されて温度を低下させ、Lago de Amatitlan の湖岸に達し、温泉帯水層を形成している。

一方、調査地域西部で掘削された坑井 AMJ-1, 2 の掘削結果からは、熱水変質作用による粘土化帯はあまり形成されておらず、キャップロックの西方への広がりには期待できない。

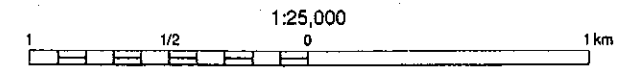
調査井 AMF-3 の温度検層結果から、地下温度の逆転現象がみられる。このことから、Lago de Amatitlan の湖水が南西方へ流入 (標高 500~0m) し、本調査地域北東部の地下温度を低下させている可能性がある。

AMF-2 東方深部のデイサイト質貫入岩は、ジルコン結晶系解析および年代測定の結果からも Lago de Amatitlan 湖畔のドーム状火山を形成したデイサイトと同様の岩石組成・年代を示している。このことから、本地域に発達する地熱系の直接の熱源と考えられるこのデイサイト質貫入岩は Cerro Limon や Cerro Durazno のデイサイトドーム群とはほぼ同じ年代に活動した可能性が高い (3,000~6,000 年前)。



凡例

- Estimated uplift obtained from gravity survey
- Phreatic Caldera and abalanche
- (Estimated) Fault
- Caldera Wall
- Low resistivity zone
- Isothermal Line (EL.+750m)
- Magmatic fluid
- Geothermal fluid
- Meteoric water flow
- Survey area
- Exploratory well
- (Estimated) Heat Source



Amatitlan Geothermal Development Project	
地熱構造モデル (平面図)	
Geothermal Structural Model	
JICA-WEST JEC	Fig. 2-5-1

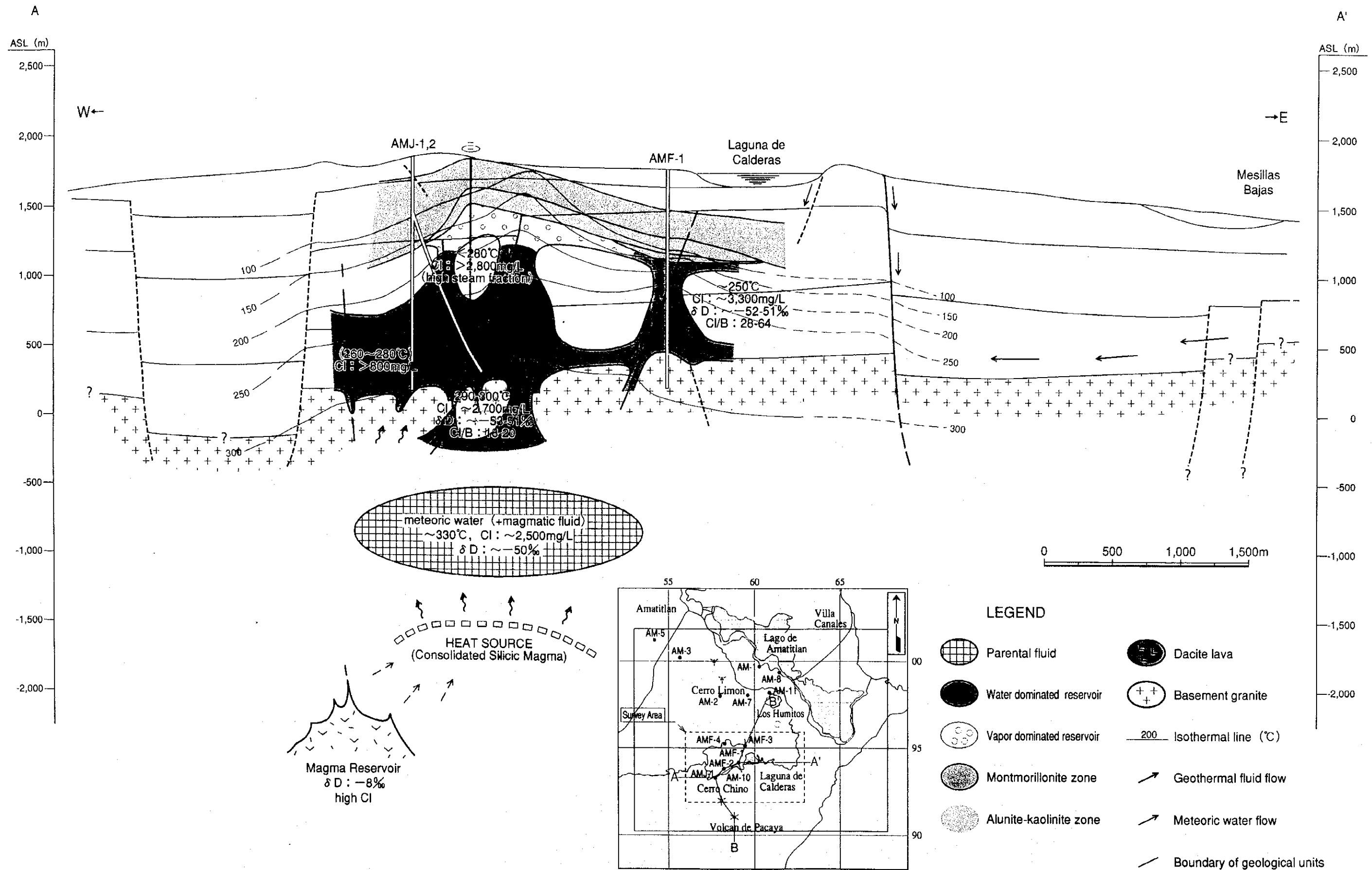


Fig. 2-5-2 Conceptual model of the Amatitlan Geothermal Area (A-A')
 地熱構造モデル (A-A'断面図)

MUR10140D (1/12/99)

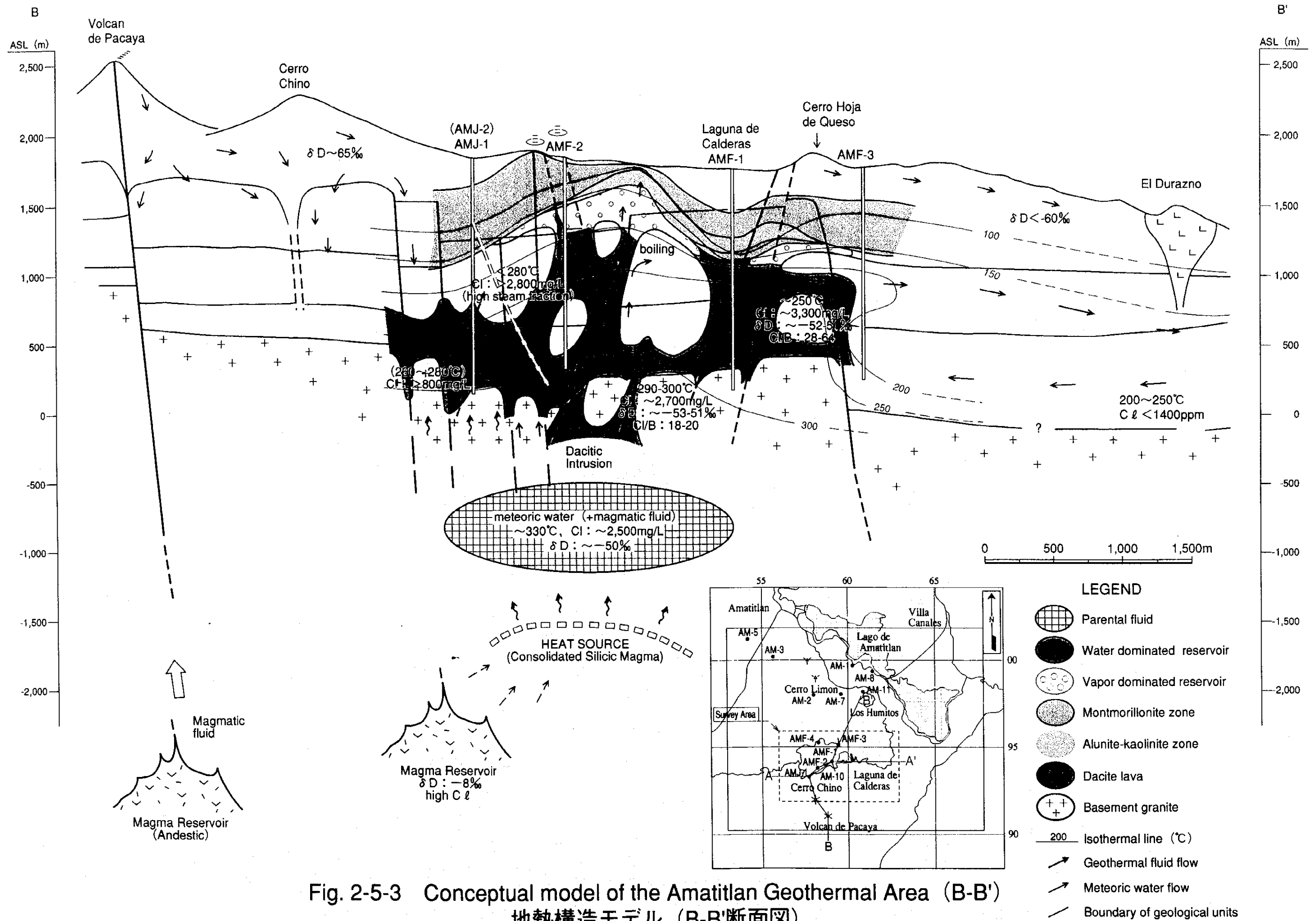
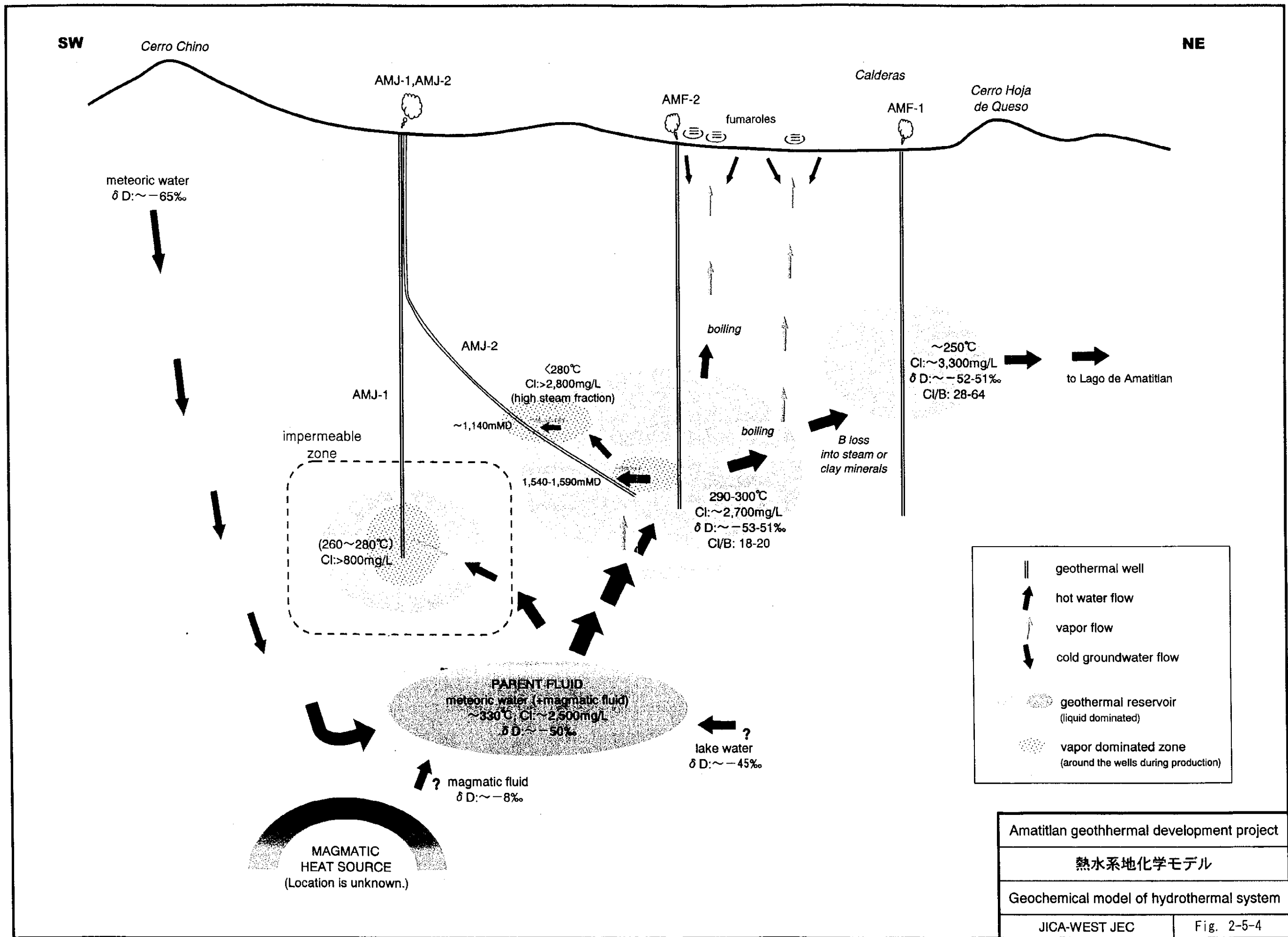


Fig. 2-5-3 Conceptual model of the Amatitlan Geothermal Area (B-B')
地熱構造モデル (B-B'断面図)



3. 地熱開発計画の策定

- 3.1 地熱資源量評価
- 3.2 地熱発電所建設計画
- 3.3 環境影響調査
- 3.4 経済・財務評価

3. 1 地熱資源量評価

3.1.1 数値モデル

3.1.2 自然状態シミュレーション

3.1.3 ヒストリーマッチング

3.1.4 将来予測および地熱資源量

3.1.5 出力予想結果

3. 地熱開発計画の策定

3.1 地熱資源量評価

3.1.1 数値モデル

アマティトラン地熱貯留層の資源量評価の作業手順を第3-1-1図に示す。数値モデルの分割方向は、NS-EW方向であり、面積は140 km² (NS方向：14km, EW方向：10km)である。数値モデルの範囲は、調査データが存在する範囲と比較してかなり広範囲であるが、本地域の地熱系の範囲と、計算結果に対する境界条件の影響をなくすために設定した。深度方向には、貯留層を表現するために5層に分割した(第3-1-2図参照)。

第1層(AE層)と第4層(AB層)、第2層(AD層)と第3層(AC層)は、それぞれ同じ形状を示し、ブロック分割数はそれぞれ225、285である。第5層(AA層)のブロック分割数は190である。したがって、ブロック分割総数は1210である。

さらに、境界ブロックを第5層の下面に設定し、深部からの流体流入を表現した。地表部分は第1層の上面に地表地形に沿って大気条件を設定した。また、第2層では側方への水理的な流動を表現した。

第3-1-1図に数値モデルに入力した岩石物性値を示す。これらは、アマティトラン地域で測定された岩石物性値のうち、代表的な数値を採用して数値モデルに設定したものである。

3.1.2 自然状態シミュレーション

自然状態シミュレーションの主な目的は、地熱貯留層の温度・圧力分布および流体と熱の挙動に関する計算結果の妥当性を評価し、必要に応じてモデルを修正することである。

多くの地熱系では、地熱貯留層内の熱力学的な状態を維持するために、熱や質量の供給源(リチャージ域)や流出域(ディスチャージ域)が存在する。既に述べたように、リチャージ域は2カ所、ディスチャージ域は5カ所存在し、それらは貯留層温度分布を計算で再現するために必要な条件である。第5層には336°Cの高温熱水が約450t/hの流量で流入していることが示された。また、第3層の北東の角からは50°Cの低温熱水が620t/hの流量で流入しており、それが本地域の北東-南西方向の流体挙動を表現するために必要な条件であることが示された。一方、ディスチャージについては第1層に浅層地下水の流出、第3層に深部のMichatoya川への流出を設定した。北東の角から流入する低温熱水の約75%は、これらのディスチャージ域からモデルの外へ流出している。残りの25%(156t/h)は、高温の地熱流体と混合し、第1層の浅層地下水のディスチャージ域から流出する。

3.1.3 ヒストリーマッチング

坑井試験データとしては3種類が得られている。すなわち、1つはINDE/West JECが1994年に実施したAMF-1とAMF-2の噴出試験データ、2つめはINDE/ICA/CFEがCalderasで5MW地熱発電所運転中(2年間)に測定したAMF-1, AMF-2, およびAMF-3(還元)の長期噴出試験デ

ータ、そして3つめに第2章で述べた AMJ-1 と AMJ-2 の試験データ(第2-4節を参照)である。2つめのデータはヒストリーマッチングを行ううえで質・量的に最も有効なものであるため、ヒストリーマッチングはこのデータを用いて実施した。AMJ-1 と AMJ-2 の噴出試験は、それぞれが1週間ずつ2回実施されたが、これは貯留層の特性変化を把握するには時間的に短いと判断される。

第3-1-3図と第3-1-4図および第3-1-5図と第3-1-6図に、それぞれ AMF-1 と AMF-2 の長期噴出試験中の噴出量/エンタルピーの経時変化と出力変化を示す。また、第3-1-7図に AMF-3 の還元量の経時変化を示す。

3.1.4 将来予測および地熱資源量

2001年度のJICAとの契約仕様書には、地熱開発に対する3つのシナリオの解析が盛り込まれている(第3-1-8図参照)。3つの地熱開発シナリオは、全て開発対象貯留層を小規模カルデラ(Laguna Caldera)内部に限定したものである。発電所建設候補地2箇所に関しては、次章で詳細に議論されている。候補地の一つはカルデラ内部であり、もう一つはカルデラの外側でEl CedroにあるINDE資材倉庫に隣接した地域である。

3つのシナリオは以下のとおりである。

1. 20MW 発電所の建設
2. 第1段階として20MW 発電所建設。さらに、第2段階として3年後に新規20MW 発電所を建設
3. 20MW 発電設備×2基、合計40MW 発電所の建設

既存坑井 AMF-1, AMF-2, AMJ-1 および AMJ-2 の地熱資源量を合計しても、対象とする発電容量はどのシナリオも満たさず、追加補充井の掘削が必要である。生産井および還元井の基地と掘削ターゲットを第3-1-9図に示す。

各生産井の出力予測は、噴出量を変化させることにより、坑口圧力を一定にして実施された。まず、生産井が掘削されたブロックの熱力学的な特性を考慮することによって、既存生産井毎の浸透率-層厚積(kh値)が計算される。この手順は、測定された蒸気・熱水の噴出量が数通りの坑井口元圧力に対して再現されるまで、トライアル&エラー方式で繰り返し実施される。計算は坑井シミュレータを用いて行われた。

これらのkh値は、各タイムステップの終わりにおいて、噴出量を予測するのに用いられる。同時に、貯留層シミュレーターからの生産井ブロックの熱力学的特性(圧力、温度)も予測に用いられる。噴出特性曲線がまだ得られていない生産補充井(MKU)については、その補充井の最も近くにある既存坑井で求めた数値を採用した。結果として得られるのは、開発期間における蒸気・熱水の噴出量である。坑口における出力が計算され、シングルフラッシュ型の発電技術および各坑井または全坑井の合計の出力変化を表した。噴出量の減衰に伴い設計発電出力に達しない場合には、新規生産井の掘削が設定された。

将来予測シミュレーション期間は25年とした。噴出量の合計と平均エンタルピーから、還元すべき分離熱水量が計算した。分離された熱水は、還元井毎の還元量を見積もるために稼働

中の坑井本数で分配した。還元井の追加掘削の必要性を調べるために、各還元井の水位を検討した。水位が口元付近あるいはそれ以上の場合には、新規還元井の掘削が設定された。

3.1.5 出力予想結果

貯留層挙動に関する条件が3つのシナリオとも異なることから、それぞれ個別の計算が行われた。結果は次のとおりである。

1. シナリオ 1: 20 MW

第 3-1-10 図に既存坑井と補充井 1 孔に対する全出力を、第 3-1-11 図には各坑井別の出力の予想結果を示す。

補充井として、生産井および還元井を各 1 孔ずつ掘削することによって、発電容量 20MW を確保することには、全く問題がない。しかし、第 3-1-8 図に示されているように生産井 1 孔、還元井 1 孔を予備として掘削することが望まれる。

2. シナリオ 2: 20 MW + 20MW

第 3-1-12 図に既存坑井と補充井 1 孔に対する全出力を、第 3-1-13 図および第 3-1-14 図には各坑井別の出力の予想結果を示す。

追加生産井 5 孔および追加還元井 2 孔を掘削することによって、1 号機（発電容量 20MW）および 2 号機（発電容量 20MW）を安定して、操業させることが可能である。しかし、第 3-1-8 図に示されているように生産井 1 孔と還元井 1 孔を予備として掘削することが望まれる。

3. シナリオ 3: 40 MW

第 3-1-15 図に既存坑井と補充井 1 孔に対する全出力を、第 3-1-16 図および第 3-1-17 図には各坑井別の出力の予想結果を示す。

シナリオ 2 と同じ本数の生産井および還元井を追加することによって、発電容量 (20MW) 2 基、合計 40MW 発電所を安定操業させることには、全く問題がない。しかし、第 3-1-8 図に示されているように生産井 1 孔と還元井 1 孔を予備として掘削することが望まれる。

Amatitlan Geothermal Field Reservoir Simulation

Fig.3-1-1 Control volume and grid used to represent the Amatitlan reservoir
 アマテイトラン地熱貯留層数値モデルのブロック分割

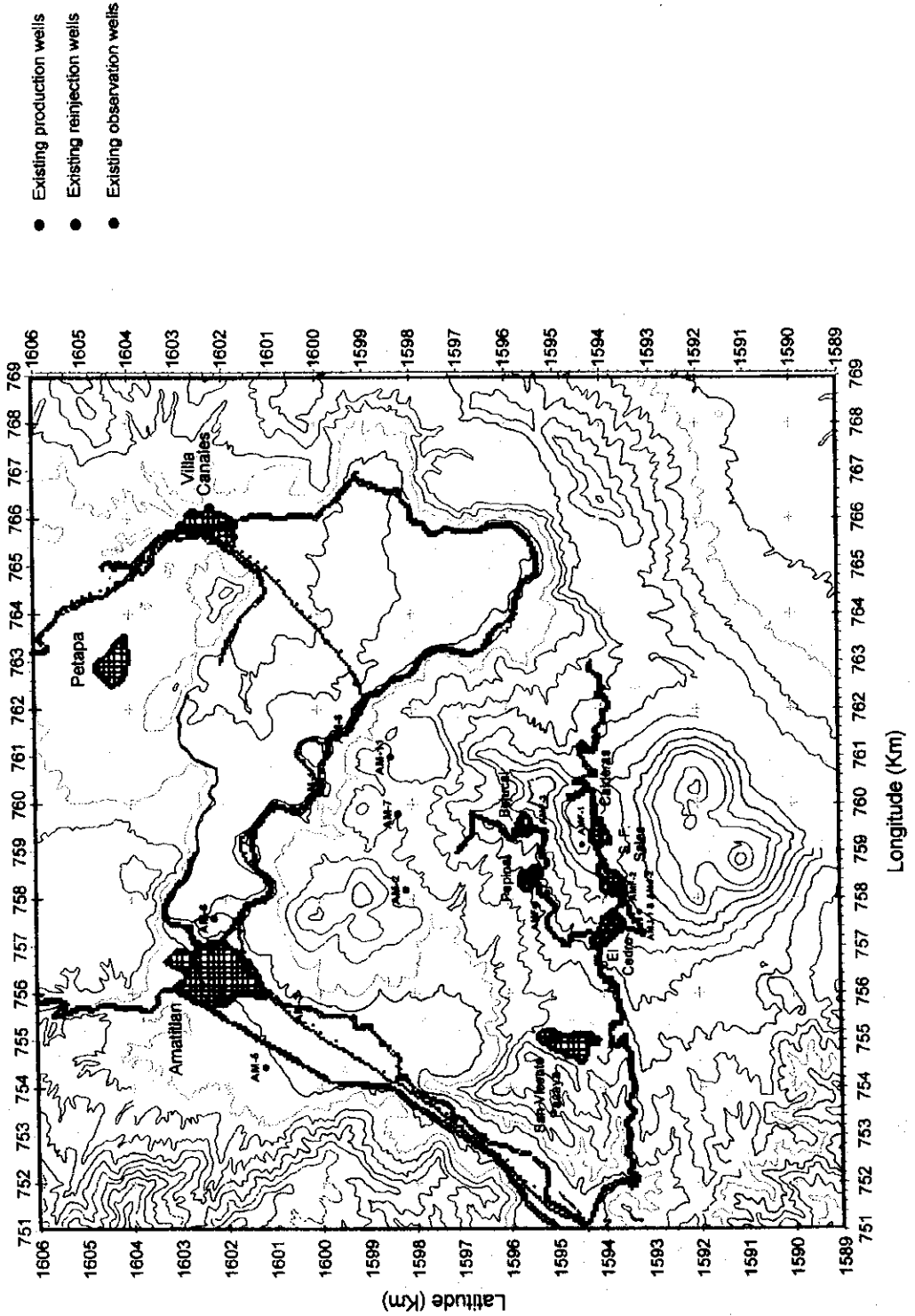
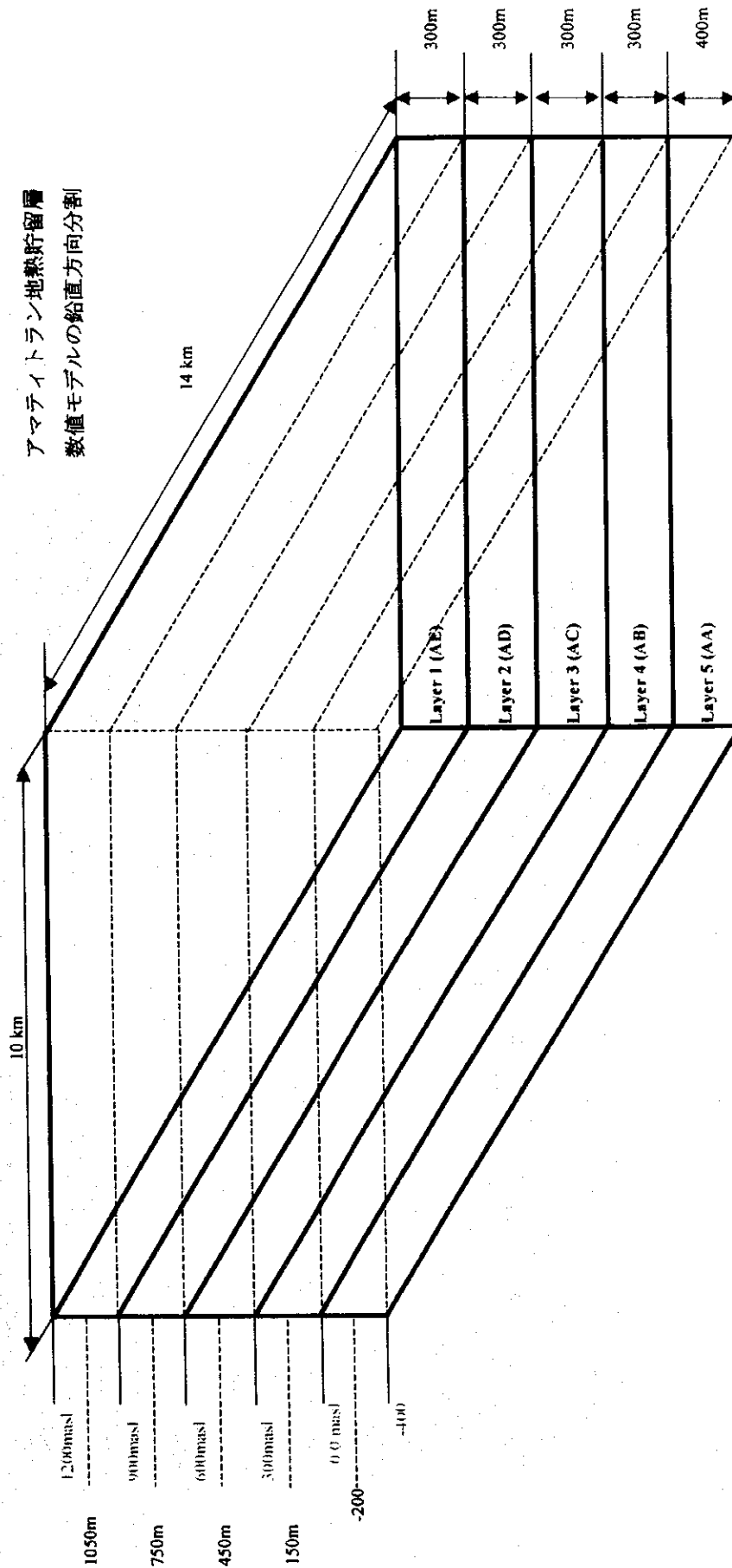
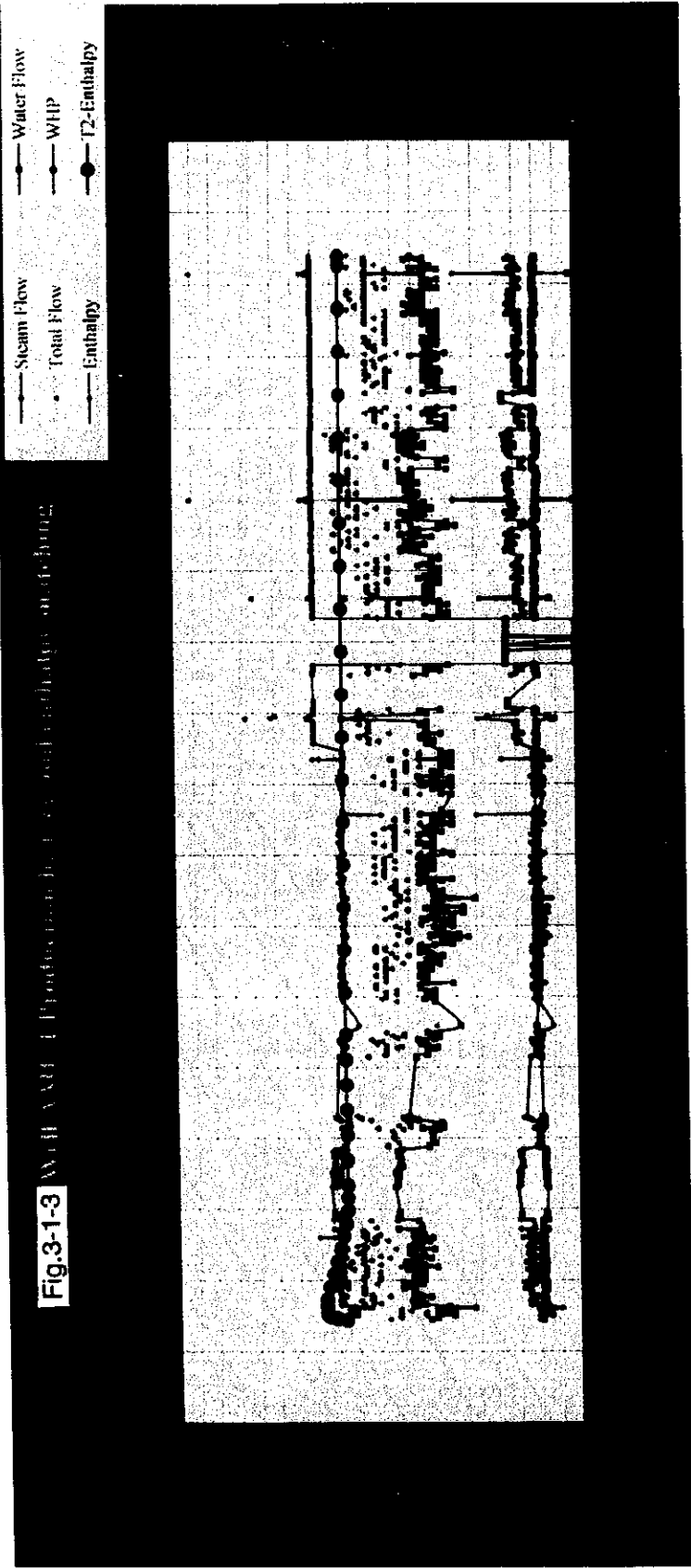


Fig.3-1-2 Layers of the control volume



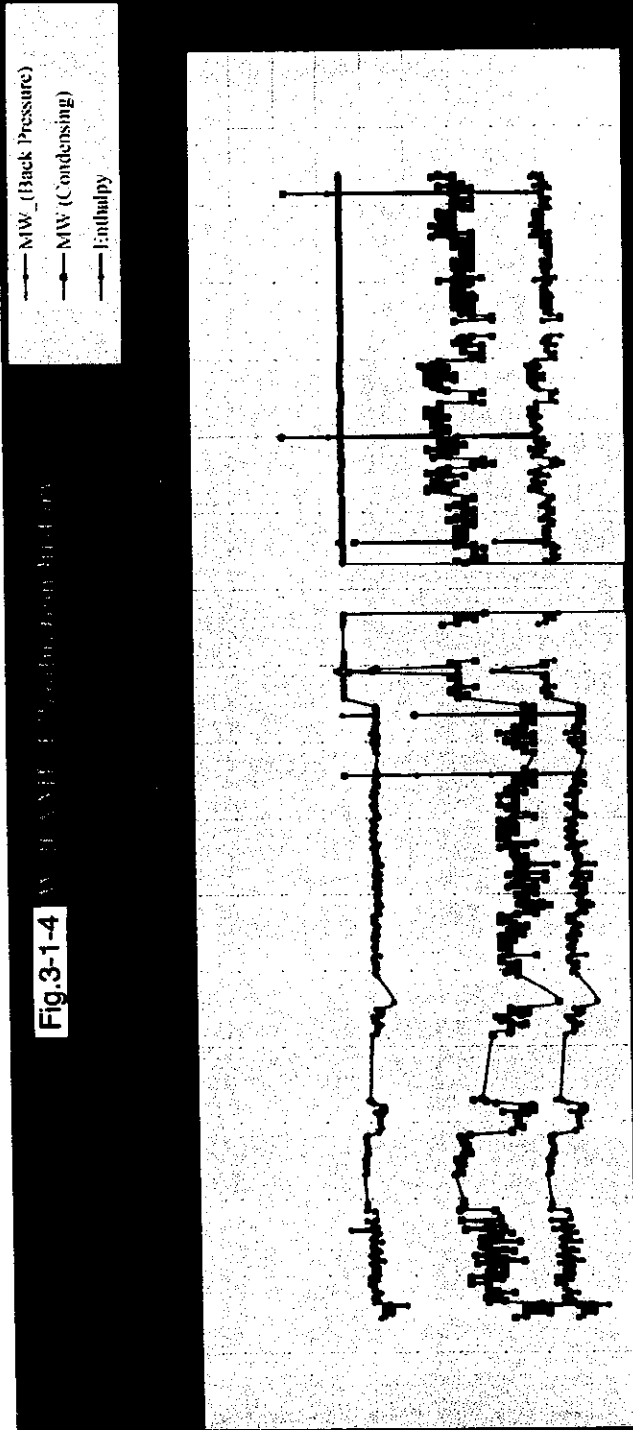
生産井 AMF-1 の噴出量変化とエンタルピーマッチング

Fig.3-1-3 Well AMF-1 Production flow, total enthalpy, and matching



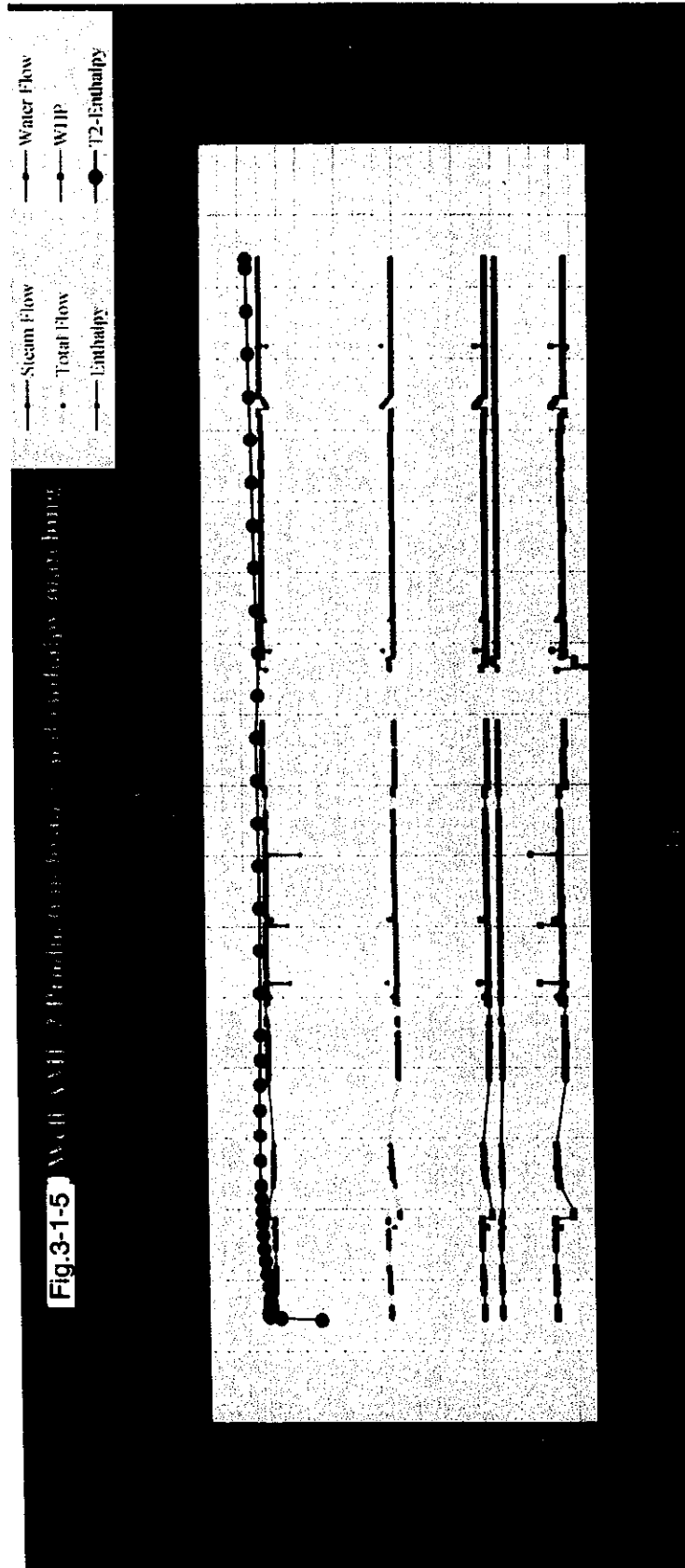
生産井 AMF-1 の出力変化

Fig.3-1-4 W. 91 AMF-1 Production Data



生産井 AMF-2 の噴出量変化とエンタルピーマッチング

Fig.3-1-5 Well AMF-2 Production history and enthalpy match

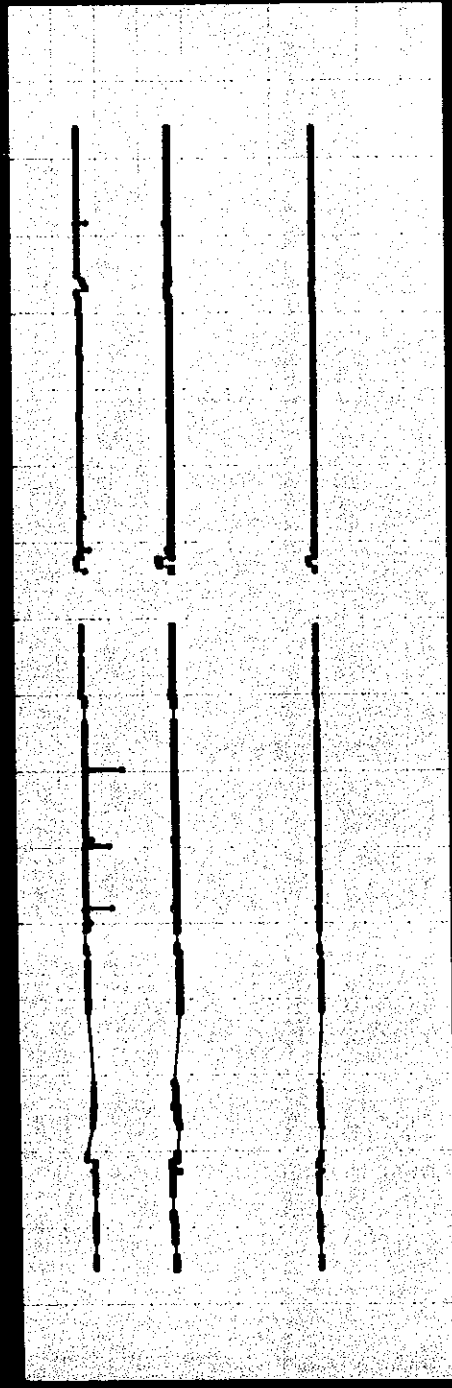


生産井 AMF-2 の出力変化

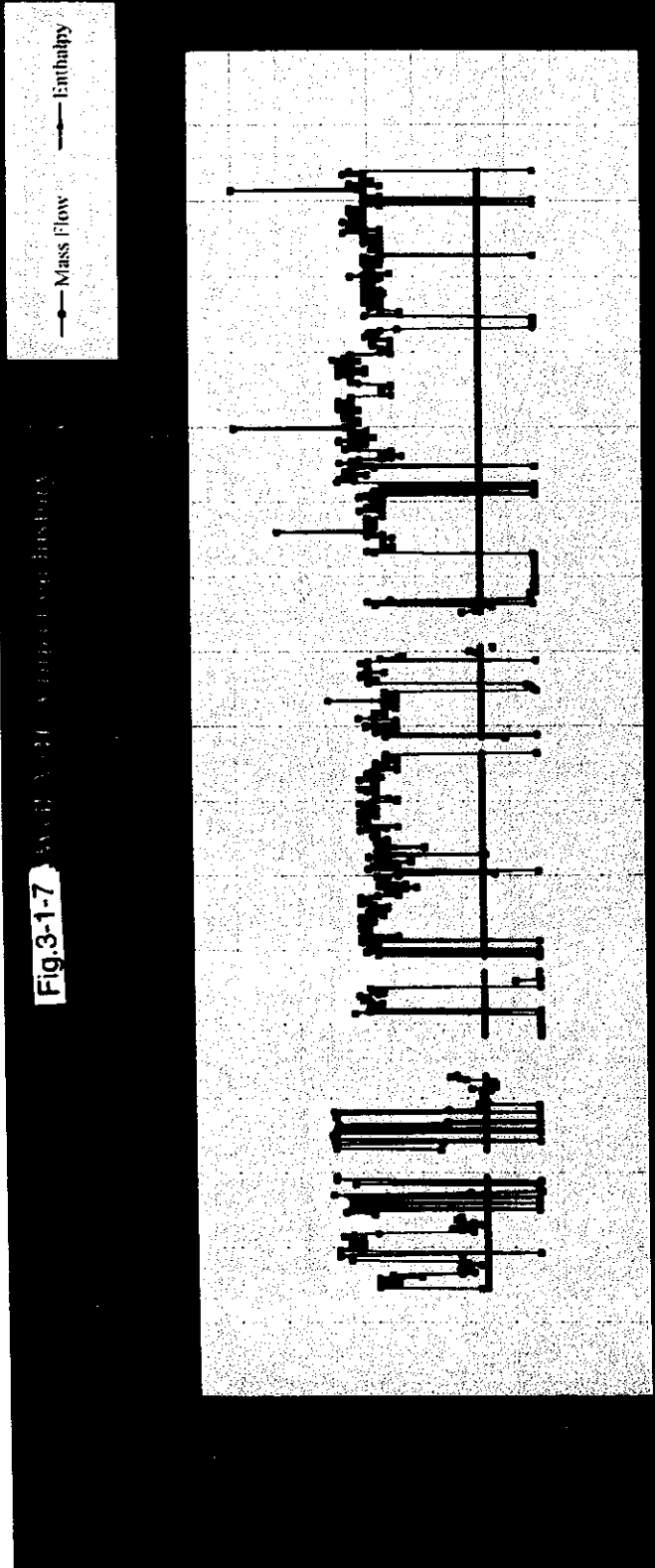
Fig.3-1-6

AMF-2の出力変化の記録

—●— MW (Back Pressure)
—●— MW (Condensing)
—●— Enthalpy

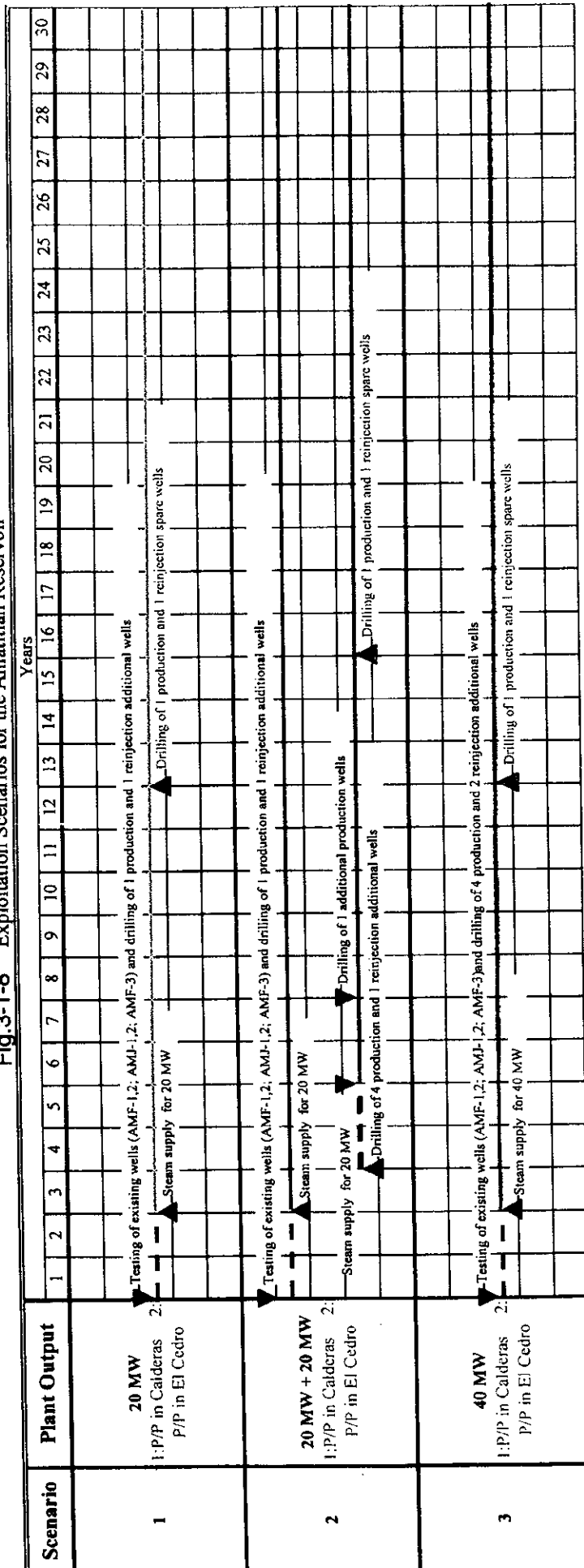


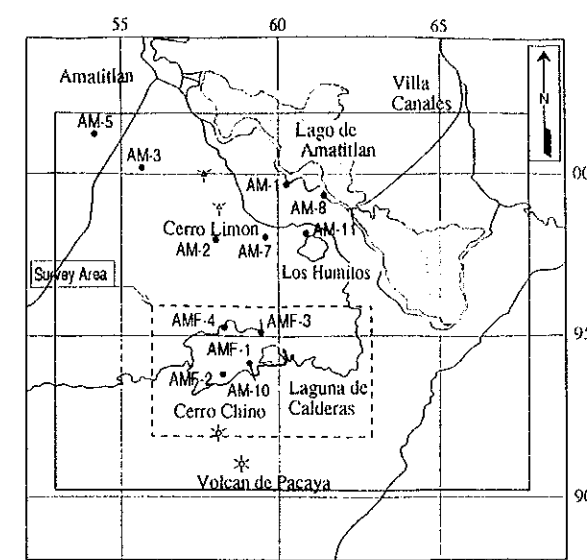
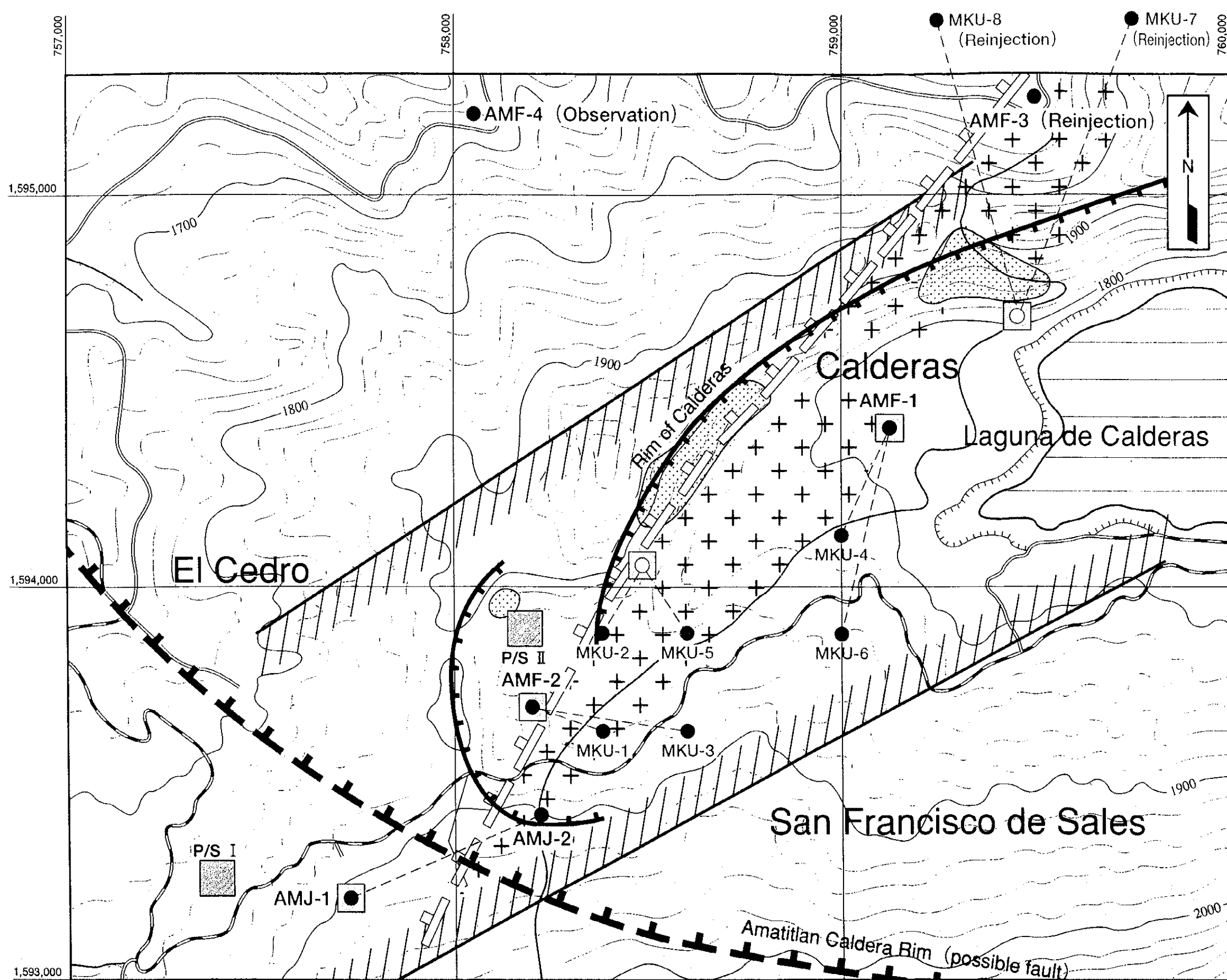
還元井 AMF-3 の還元量変化



貯留層の開発シナリオ

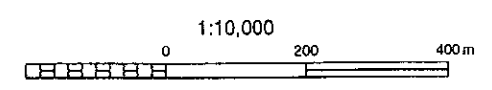
Fig.3-1-8 Exploitation Scenarios for the Amatitlan Reservoir



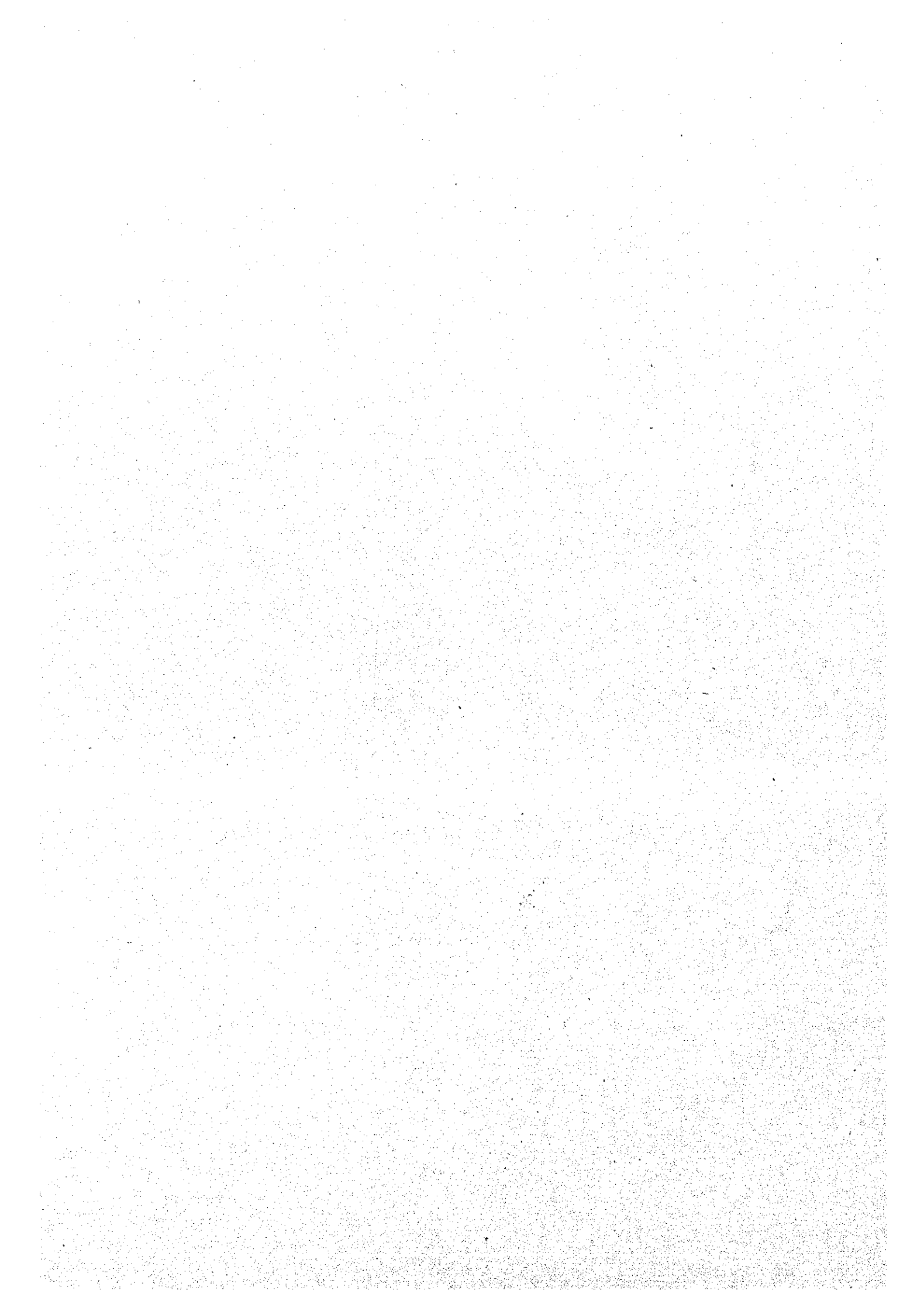


Legend

- Fumaroles and alteration Zones
- Promising area estimated from Geoscientific survey data
- Existing Well
- Make-up Well(Well head)
- Make-up Well(Bottom)
- Probable fault controlling fluid flow
- Caldera rim
- Uplifted zone
- Drilling Pad
- Proposed Site of Power Station



Amatitlan Geothermal Development Project
 既存坑井および補充井の掘削ターゲット
 Drilling Pads and Targets of Existing and Additional Wells
 JICA-WEST JEC Fig.3-1-9



シナリオ 1: 20 MW 発電の場合の出力予測

Fig.3-1-10

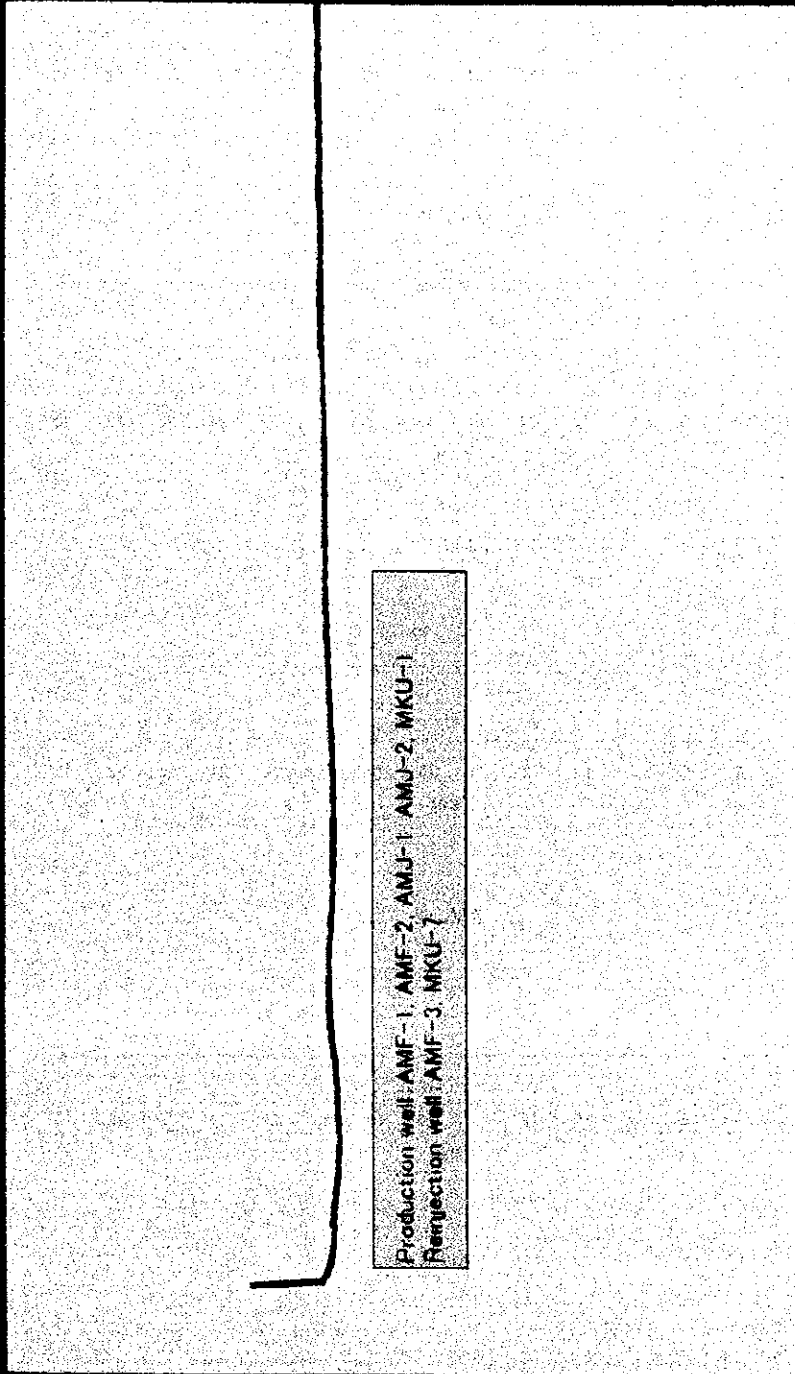
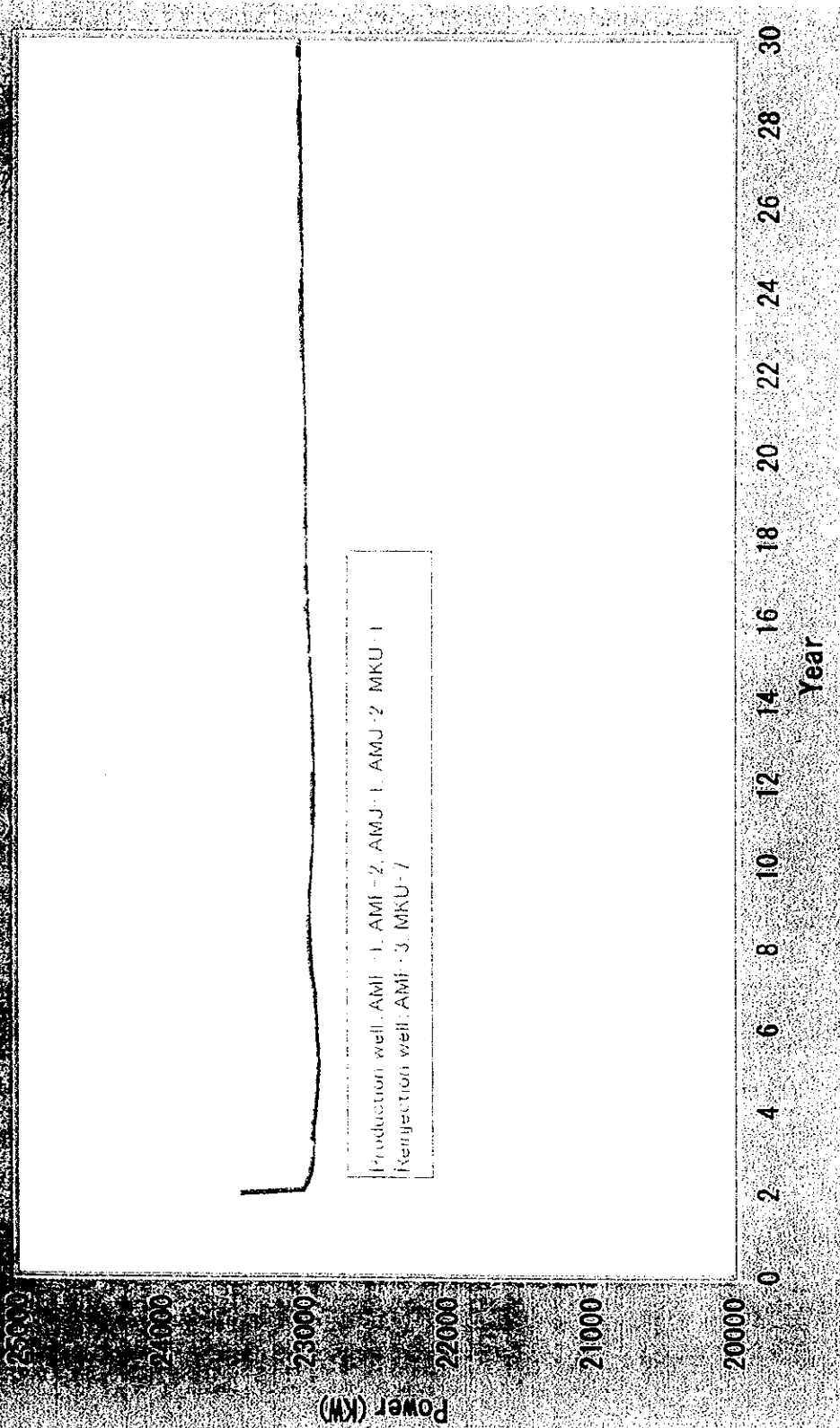
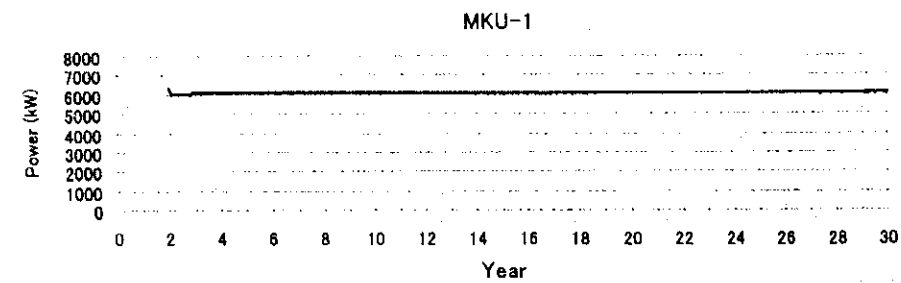
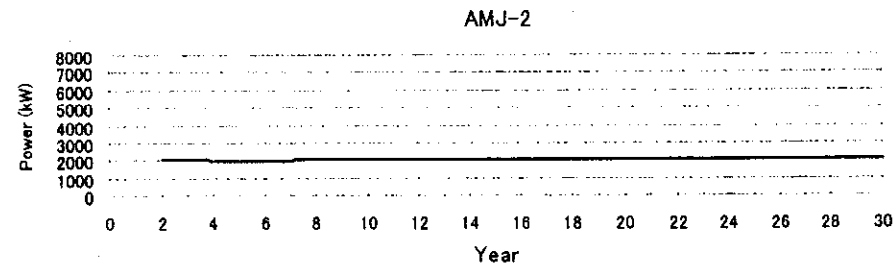
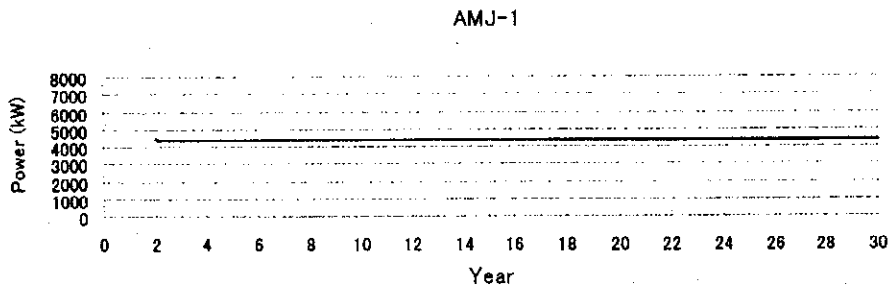
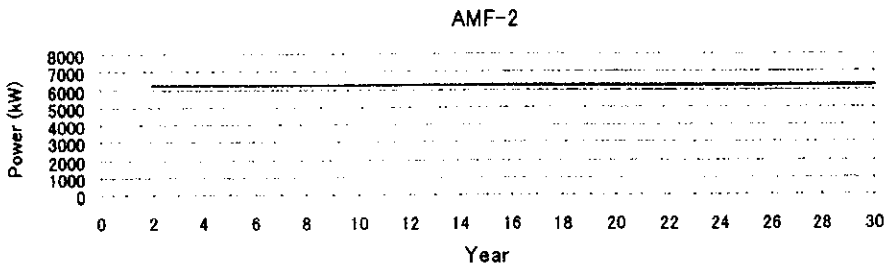
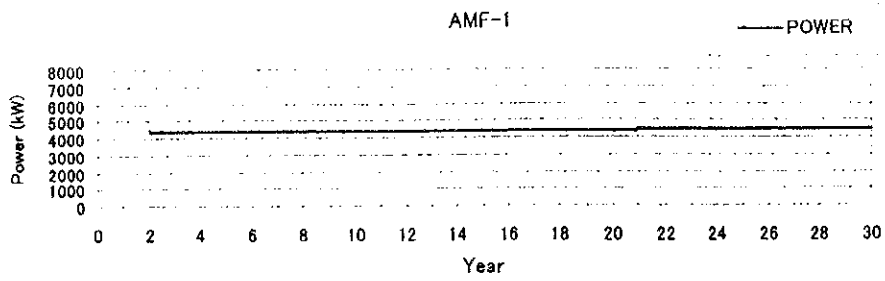


Fig.3-1-10 Scenario-1: 20 MW Results of Forecasting





* Power : Output from primary steam (Single flashed)

Fig.3-1-11 Scenario-1: Forecasted well production

シナリオ 1: 各生産井の出力予測

Fig.3.1-12

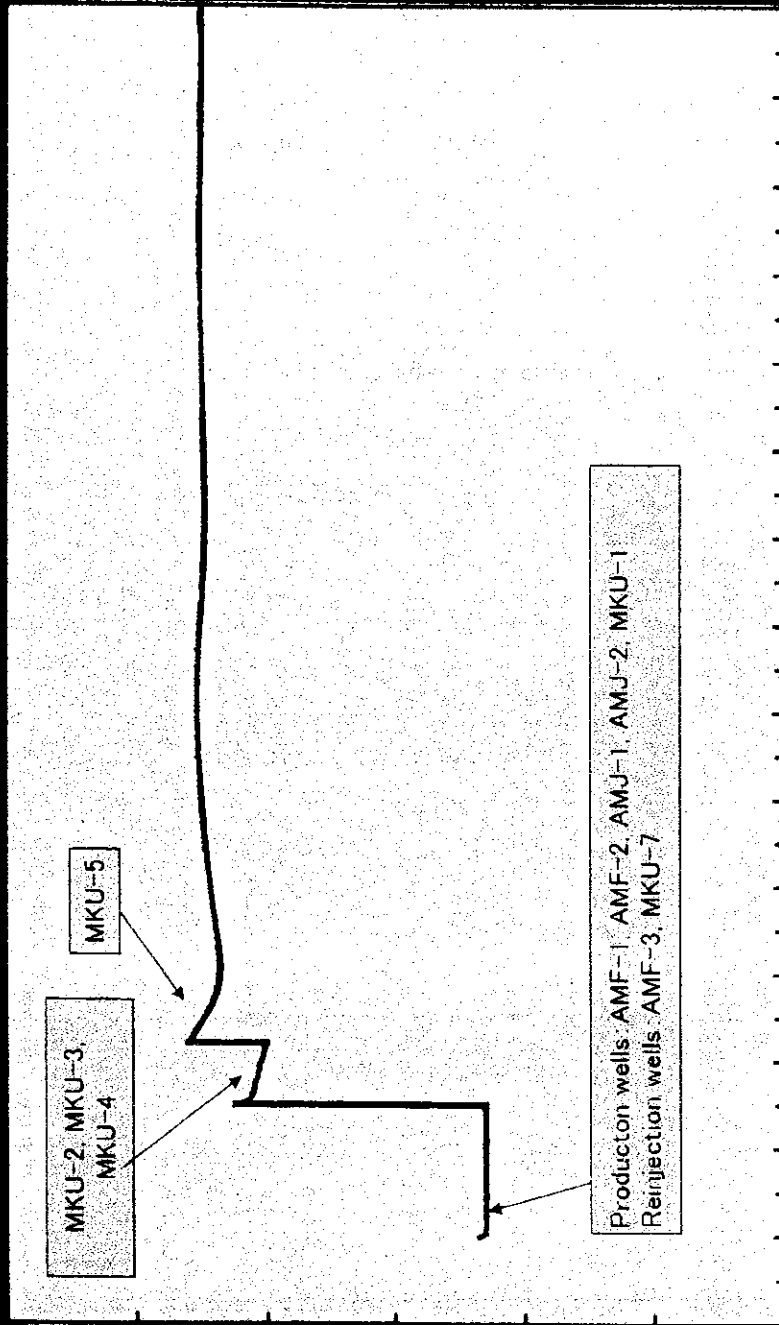
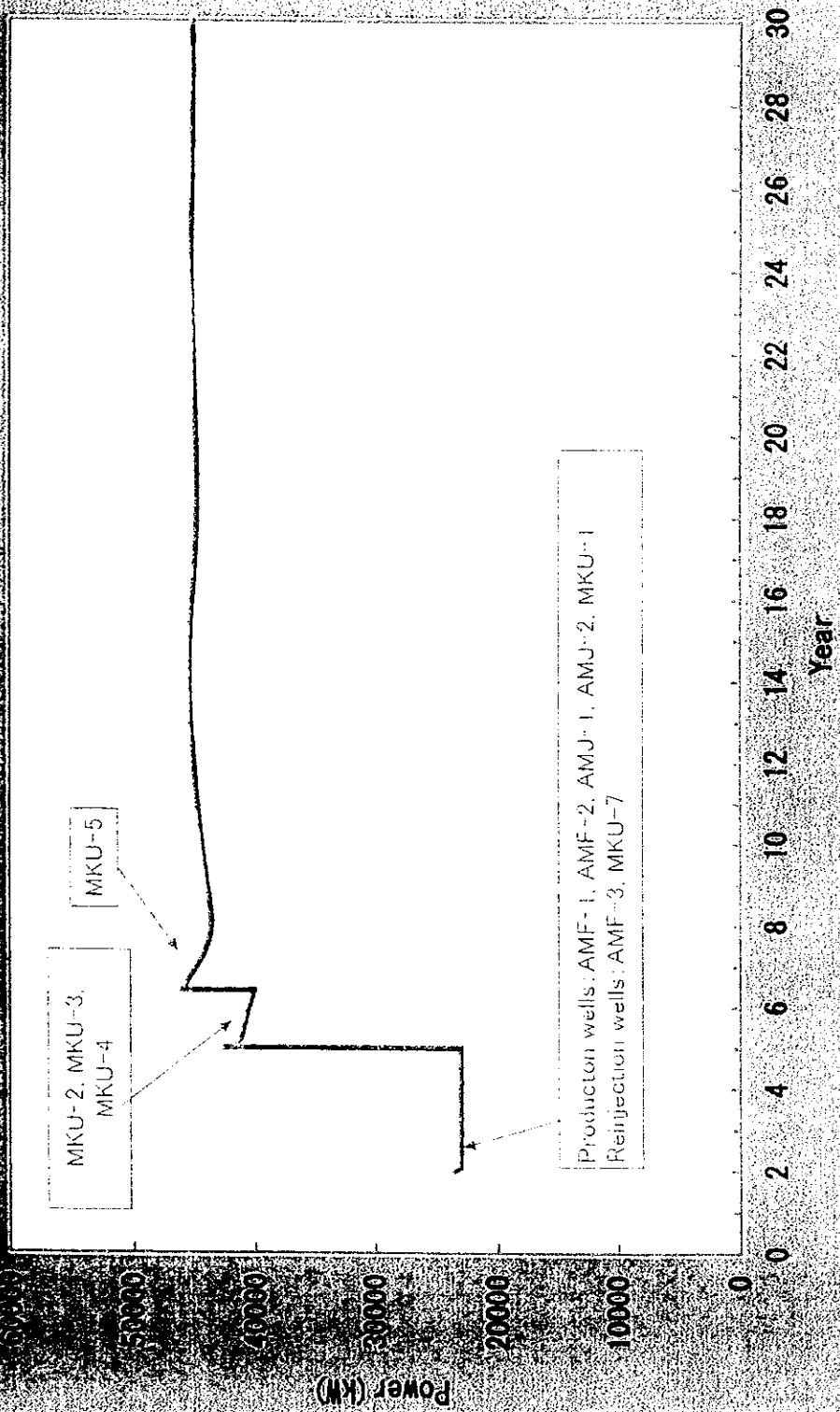
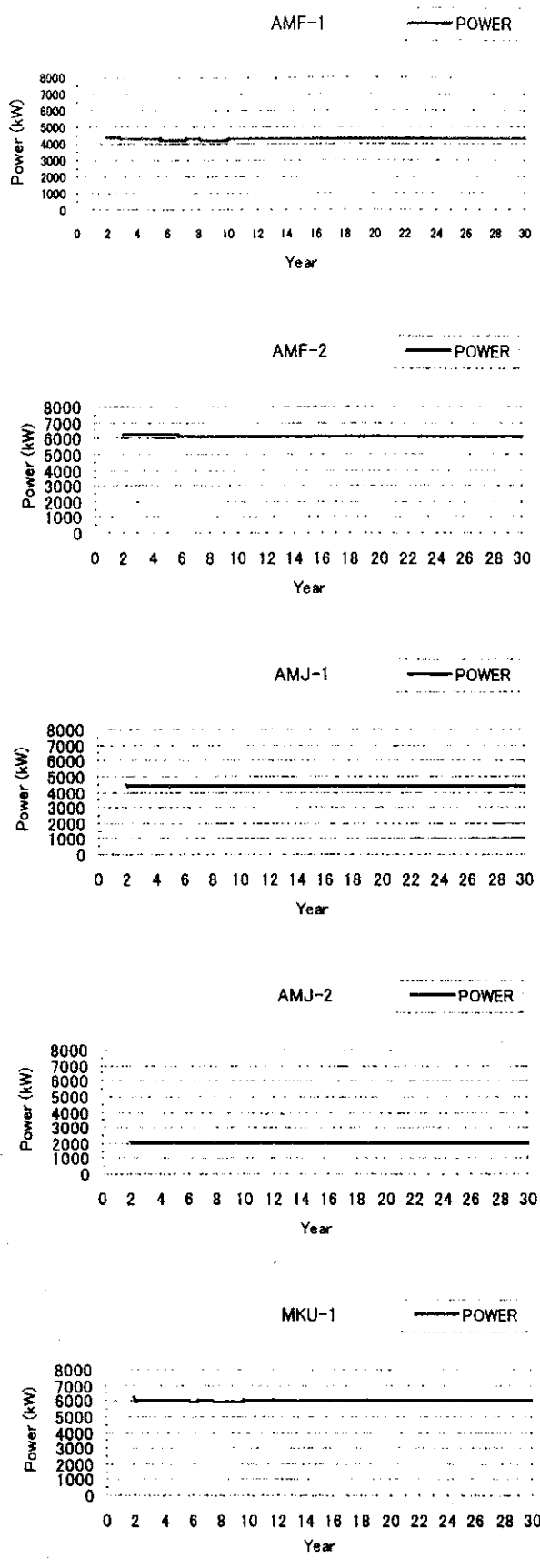


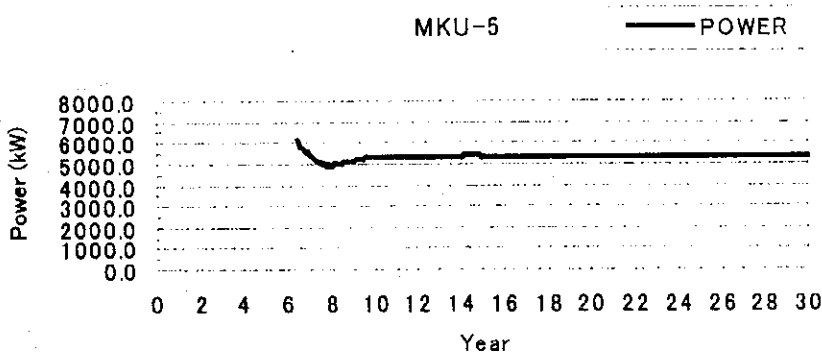
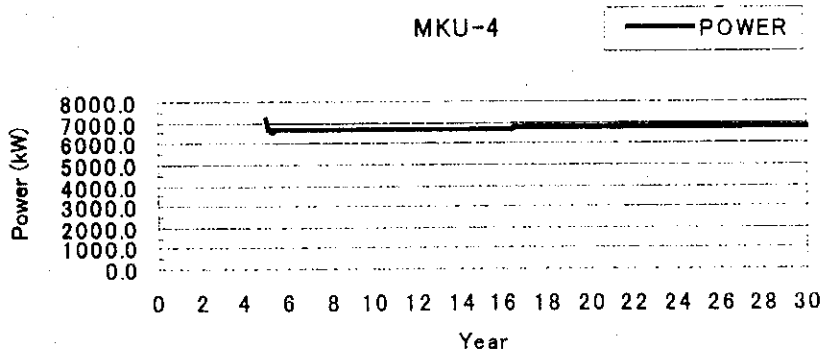
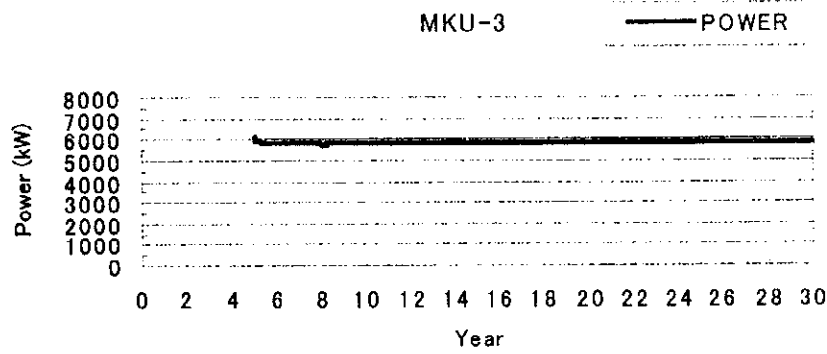
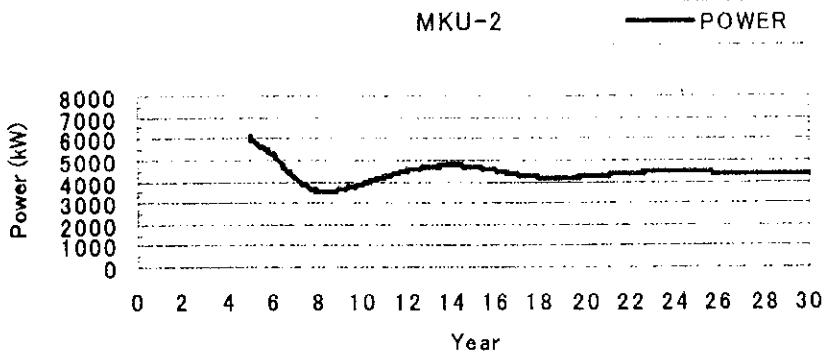
Fig.3-1-12 Scenario 2: 20MW + 20 MW results of forecasting





* Power : Output from primary steam (Single flashed)

Fig.3-1-13 Scenario-2: Forecasted well production-a
シナリオ 2: 各生産井の出力予測(a)



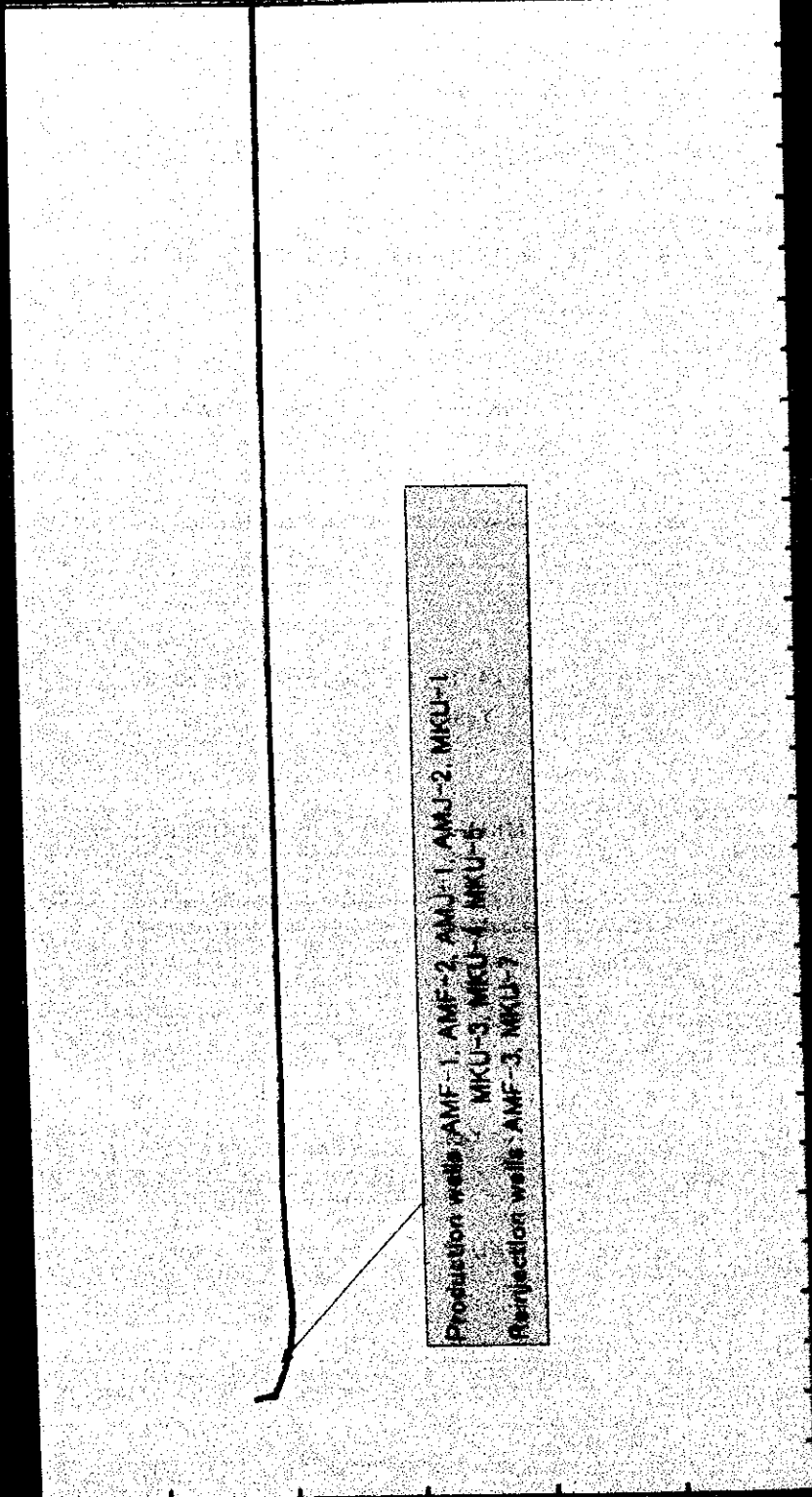
* Power : Output from primary steam (Single flashed)

Fig.3-1-14 Scenario-2: Forecasted well production-b

シナリオ 2: 各生産井の出力予測(b)

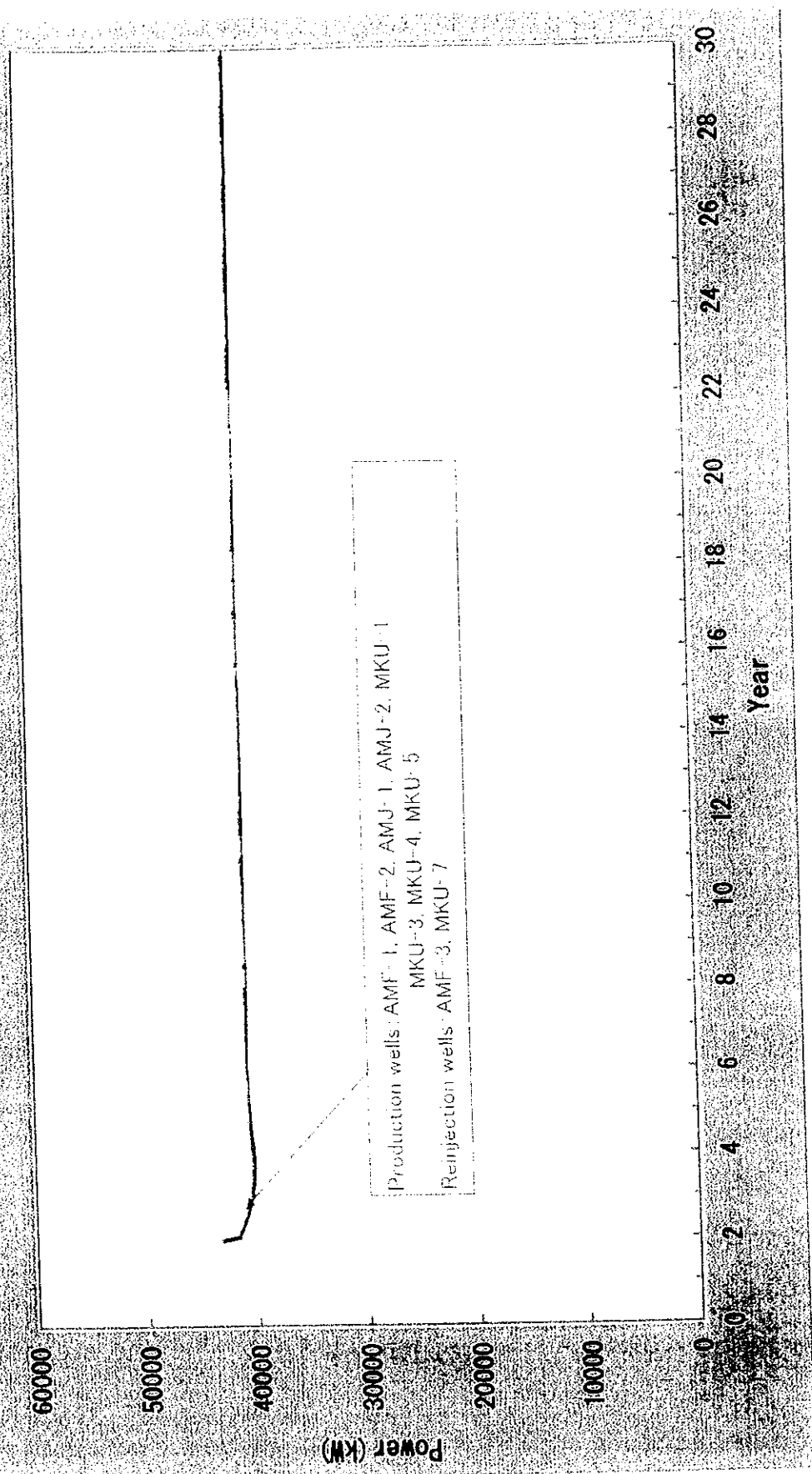
シナリオオ 3:40 MW 発電の場合の出力予測

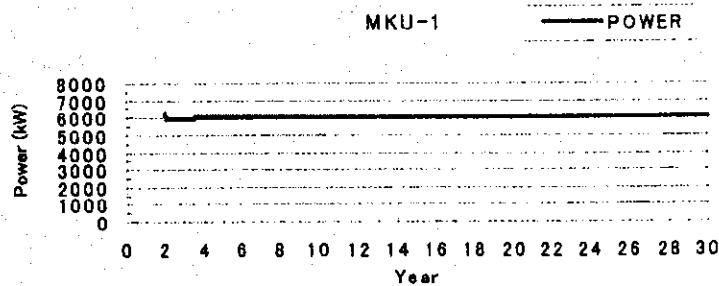
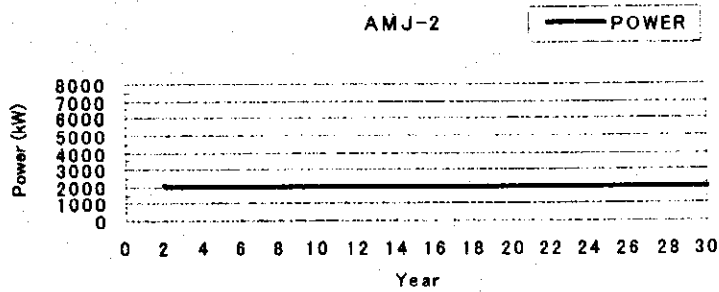
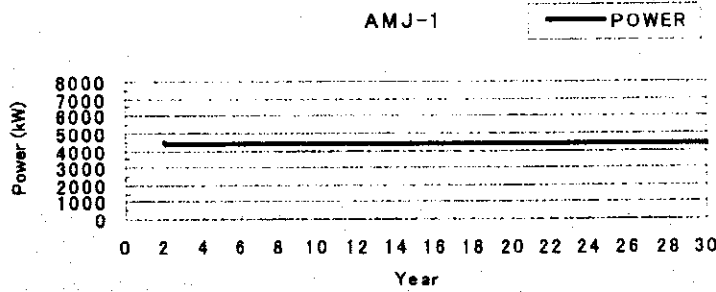
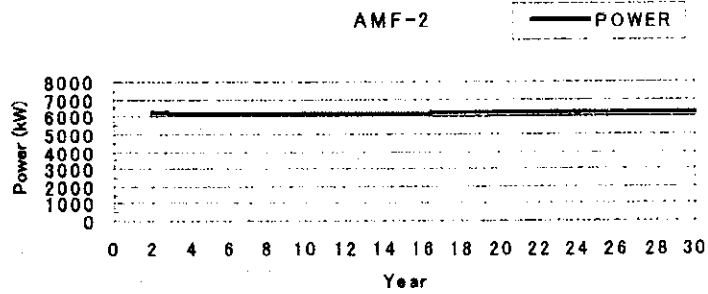
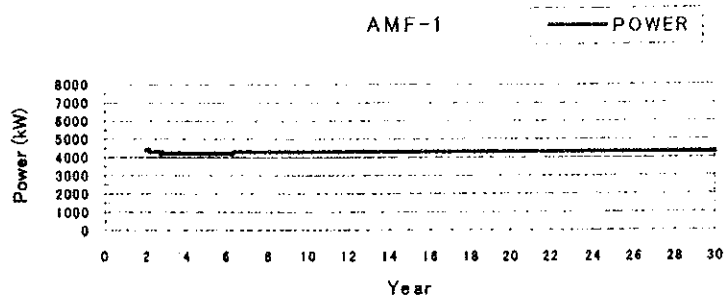
Fig.3-1-15



シナリオ 3: 40 MW 発電の場合の出力予測

Fig. 3-1-15 Scenario-3: 40 MW results of forecasting

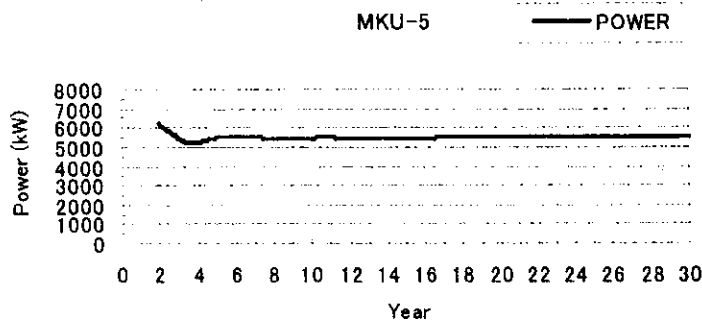
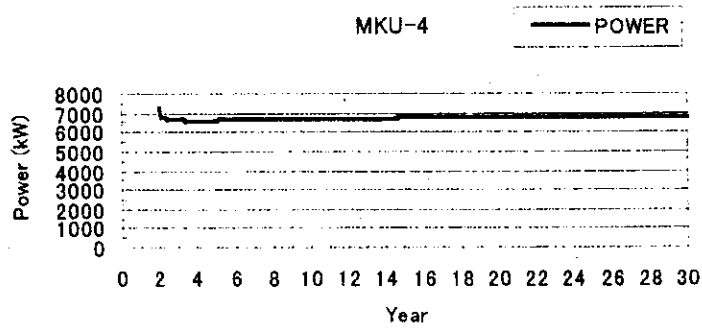
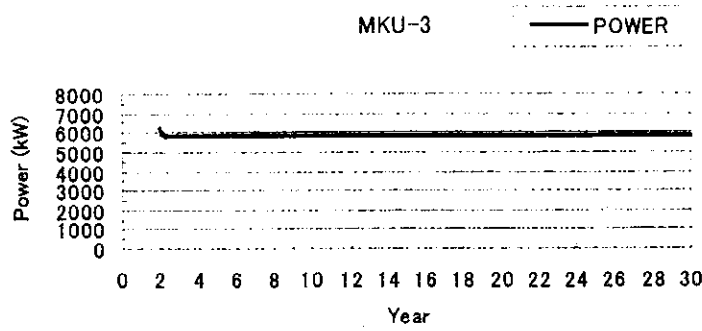
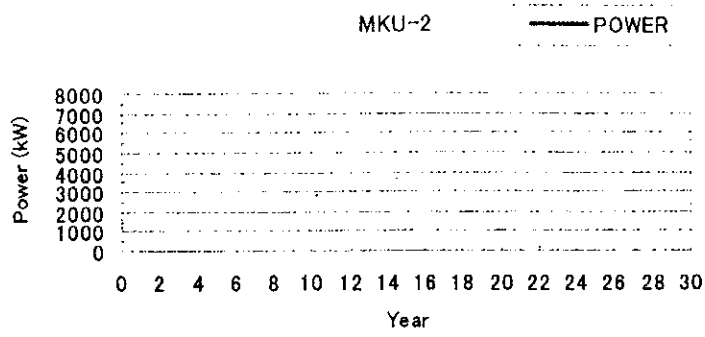




* Power : Output from primary steam (Single flashed)

Fig.3-1-16 Scenario-3: Forecasted well production-a

シナリオ 3: 各生産井の出力予測(a)



* Power : Output from primary steam (Single flashed)

Fig.3-1-17 Scenario-3: Forecasted well production-b

シナリオ3: 各生産井の出力予測(b)

数値モデルの岩石物性値

Table 3-1-1 Physical properties of materials in the numerical model

ROCK	DENSITY	POROSITY	PERMEABILITY			HEAT CONDUCTIVITY	SPECIFIC HEAT
	ROCK Kg/m ³		X m ²	Y m ²	Z m ²		
AIR01	2200	0.9000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.03	50000
TOP01	2200	0.9000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.20	50000
ROK01	2200	0.1000	1.000E-16	1.000E-16	1.000E-16	2.20	1000
ROK02	2200	0.1000	2.000E-15	2.000E-15	2.000E-16	2.20	1000
ROK09	2200	0.1000	3.000E-15	3.000E-15	5.000E-16	2.20	1000
ROK03	2200	0.1000	8.000E-15	8.000E-15	1.000E-14	2.20	1000
ROK04	2200	0.1000	2.000E-14	2.000E-14	3.000E-14	2.20	1000
ROK05	2200	0.1000	6.000E-14	6.000E-14	7.000E-14	2.20	1000
ROK06	2200	0.1000	7.000E-14	7.000E-14	2.000E-16	2.20	1000
ROK07	2200	0.1000	9.000E-14	9.000E-14	2.000E-16	2.20	1000
ROK08	2200	0.1000	4.000E-15	4.000E-15	2.000E-14	2.20	1000
AQU01	2200	0.1000	6.000E-14	6.000E-14	7.000E-14	2.20	50000
BAS01	2200	0.1000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.22	50000
LIM01	2200	0.1000	2.000E-12	2.000E-12	3.000E-12	2.20	1000
LIM02	2200	0.1000	6.000E-14	6.000E-13	2.000E-13	2.20	1000
AQU02	2200	0.1000	6.000E-12	6.000E-12	7.000E-12	2.20	50000

3. 2 地熱発電所建設計画

3. 2. 1 計画条件

3. 2. 2 地熱流体輸送・還元設備

3. 2. 3 発電設備

3. 2. 4 送電・変電設備

3. 2. 5 工事計画

3. 2. 6 工事費

3.2 地熱発電所建設計画

3.2.1 計画条件

1. 発電所サイト

抗井と発電所の位置関係、パイプラインの敷設容易性、地形、地質、既設道路までの距離、環境問題等を考慮し、地点 I(カルデラ外側)と地点 II(カルデラ内側)を発電所建設候補地として選定した。

2. 発電方式

中程度の比エンタルピーで非凝結性ガス量が比較的少なく、地熱発電としては中程度の開発規模という条件から、発電方式は復水式シングルフラッシュサイクルとし、熱水は高温高压で還元する。

3. 発電出力

20 MW×1 基のケースと 20 MW×2 基のケースについてそれぞれ検討する。

4. 系統への接続

系統へは INDE によって新設される 138kV の変電所 (パリン 2 変電所) を経て接続される。Fig. 3-2-8 に示すように、発電所建設地点から西におよそ 8km の距離である。グアテマラ国の系統上ではグアテスル変電所とフルンマリナラ発電所開閉所間に位置する。この系統図を Fig. 3-2-9 に示す。

3.2.2 地熱流体輸送・還元設備

建設地点 I (カルデラ外) と建設地点 II (カルデラ内) の配管ルートを Fig. 3-2-1 と Fig. 3-2-2 に示す。AMF-2 の南側の居住地区を避けるために、AMF-2 北西の尾根の鞍部を越えるよう配置する。そのため、上昇管での圧力損失や流動安定性の面で有利な分離輸送方式を採用する。Fig. 3-2-3 と Fig. 3-2-4 に、地点 I と地点 II の地熱流体輸送・還元設備の概念系統図をそれぞれ示す。図中の破線は、2号機建設時に追加する部分を示す。

3.2.3 発電設備

1. 配置計画

Fig 3-2-5 に発電所配置計画図を示す。開閉所は風上、冷却棟は風下に配置する。タービン発電機ユニットと周辺機器はタービン建屋内に設置する。復水器、ガス抽出装置、ミストエリミネーター等は屋外に配置する。

2. 土木建築設備

発電所、還元井基地、生産井 MKU-2 & MKU-5 までの進入道路を新たに建設する。発電所敷地及び還元井用基地と生産井基地、各 1 箇所を造成する。

3. 発電設備

発電設備は、設計費の抑制と、運転・保守の利便性向上、部品の共通化を図るために、1号機、2号機とも同じ仕様とする。Fig. 3-2-6 に主要配管系統の概念図を、また、Fig. 3-2-7 に単線結線図を示す。主な機器の仕様は以下の通り。

機 器	仕 様	
タービン	形式	単気筒単流型復水タービン
	定格出力	20 MW
	蒸気圧力/温度	7 bar, 165 °C
	非凝結ガス量	1.78 wt%
	回 転 数	3,600 rpm
復水器	形式	直接接触型
	圧力	0.095 bar
ガス抽出装置	構成	蒸気エジェクター + 液封式真空ポンプ
	NCG 排出先	冷却塔ファン排気で希釈し大気放出
冷却塔	形式	強制通風式
	構造	木製または FRP 製
発電機	型式	横置円筒回転界磁形、全閉空気冷却式 3 相同期発電機
	定格容量	25MW
	定格電圧	13.8kV
	力率	0.8 (遅れ)
変圧器	主変圧器	25MVA, 13.8/138kV
	所内変圧器	2,000kVA, 13.8kV/480V
開閉装置	13.8kV 用, 480V 用配電盤	
制御・計装・保護装置	タービン制御装置, 計装機器, 発電機保護盤, 他一式	

3.2.4 送電・変電設備

変電所は主変圧器、138kV 開閉装置建屋、及び送電線引留鉄構からなり、湿気と H₂S ガスを含んだ冷却塔排気による腐食を避けるため風上側(北側)に配置する。

この開閉所から、約 8 km 離れた INDE のパリン 2 変電所まで 1 回線の 138kV 送電線を建設する。138kV 送電線は、INDE 標準の 477MCM(約 243 mm²)の断面積を持った鋼心アルミより線(ACSR)を使用する。送電線の支持物は鉄塔を使用する。

3.2.5 工事計画

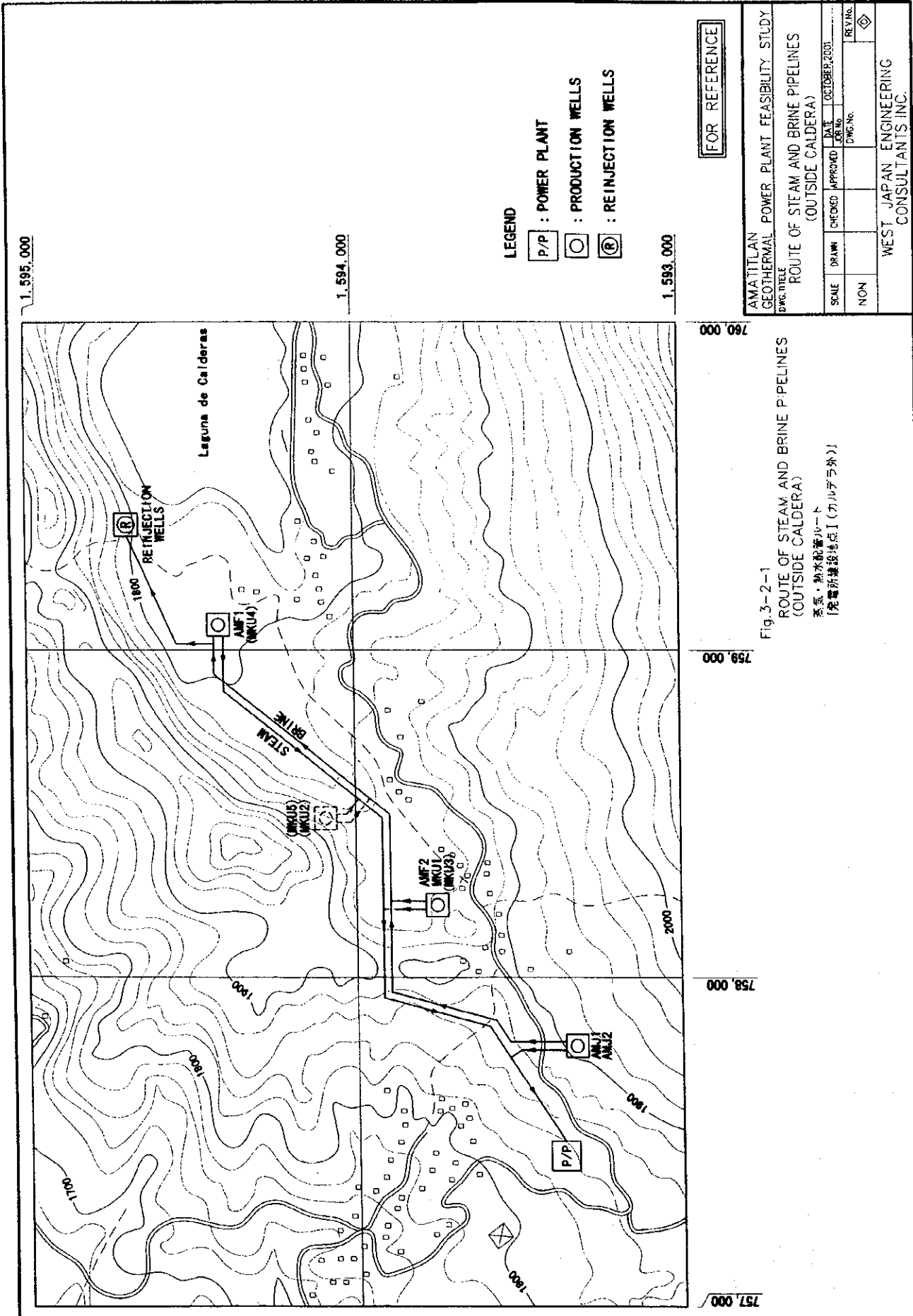
Fig. 3-2-10 ~ Fig. 3-2-12 にシナリオ1~3の建設工程をそれぞれ示す。

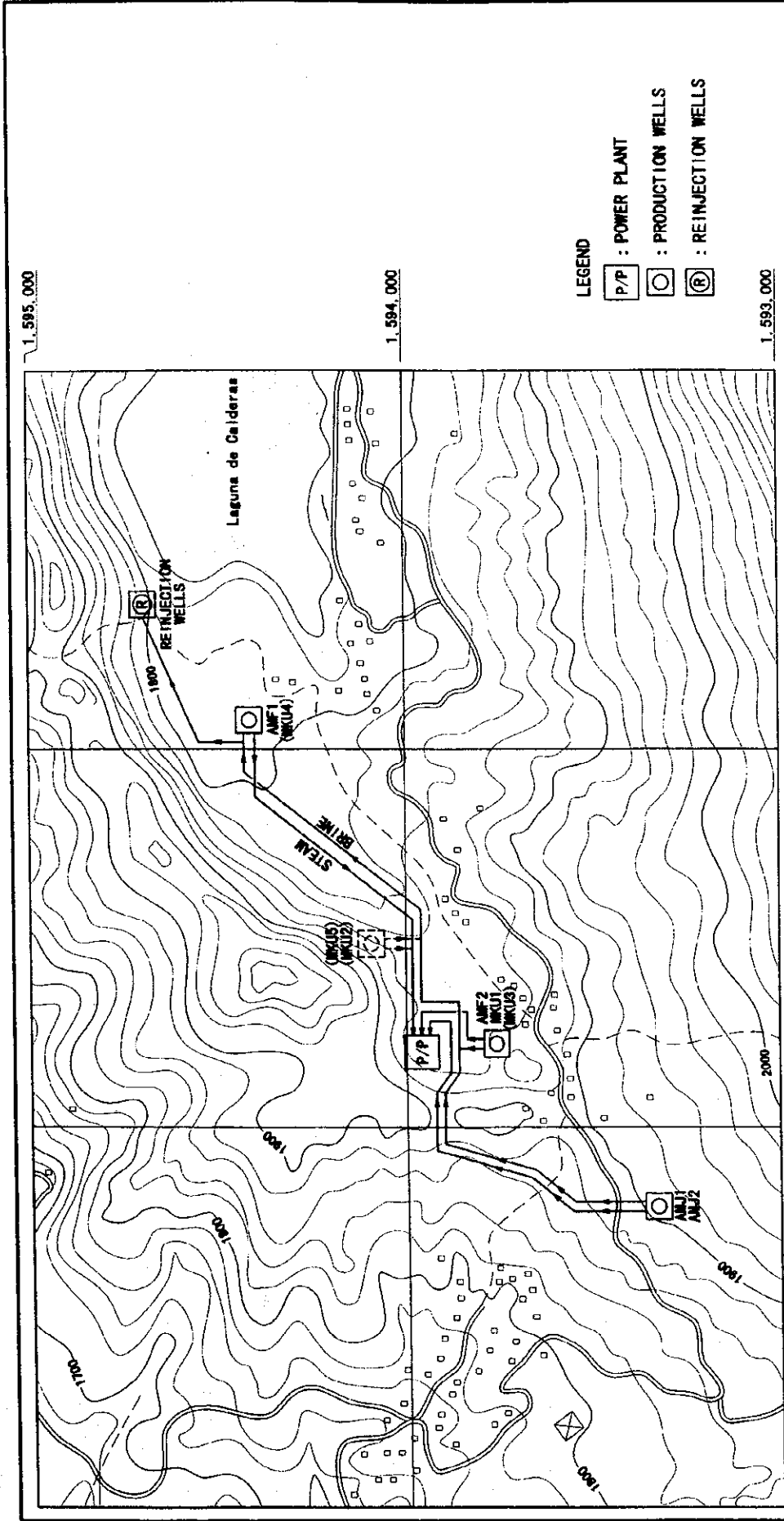
荷揚・通関港は、太平洋側の Quetzal 港がサイトまで最も近く最適である。大西洋側は Barrios 港で荷揚・通関が可能である。荷揚港からサイトまでは、大型トレーラーによる輸送とする。道路状況は比較的良好で、発電機器の輸送は可能である。

3.2.6 工事費

下記の事業範囲について、発電所建設地点 I(カルデラ外)の工事費見積を Table 3-2-1 に、発電所建設地点 II(カルデラ内)の見積を Table 3-2-2 にそれぞれ示す。見積には設計費、材料費、輸送費、土木建築工事費、および据付工事費を含む。

- 1) 進入道路の建設
- 2) 敷地造成
- 3) 取水給水設備の建設
- 4) 生産井及び還元井の掘削工事
- 5) 地熱流体輸送・還元設備の建設
- 6) 発電設備の建設
- 7) 発電所構内開閉所の建設
- 8) 送電線建設
- 9) 通信設備





757,000 758,000 759,000 760,000

Fig. 3-2-2
 ROUTE OF STEAM AND BRINE PIPELINES
 (INSIDE CALDERA)
 蒸気・熱水配管ルート
 [発電所建設地帯Ⅱ(カルデラ内)]

FOR REFERENCE

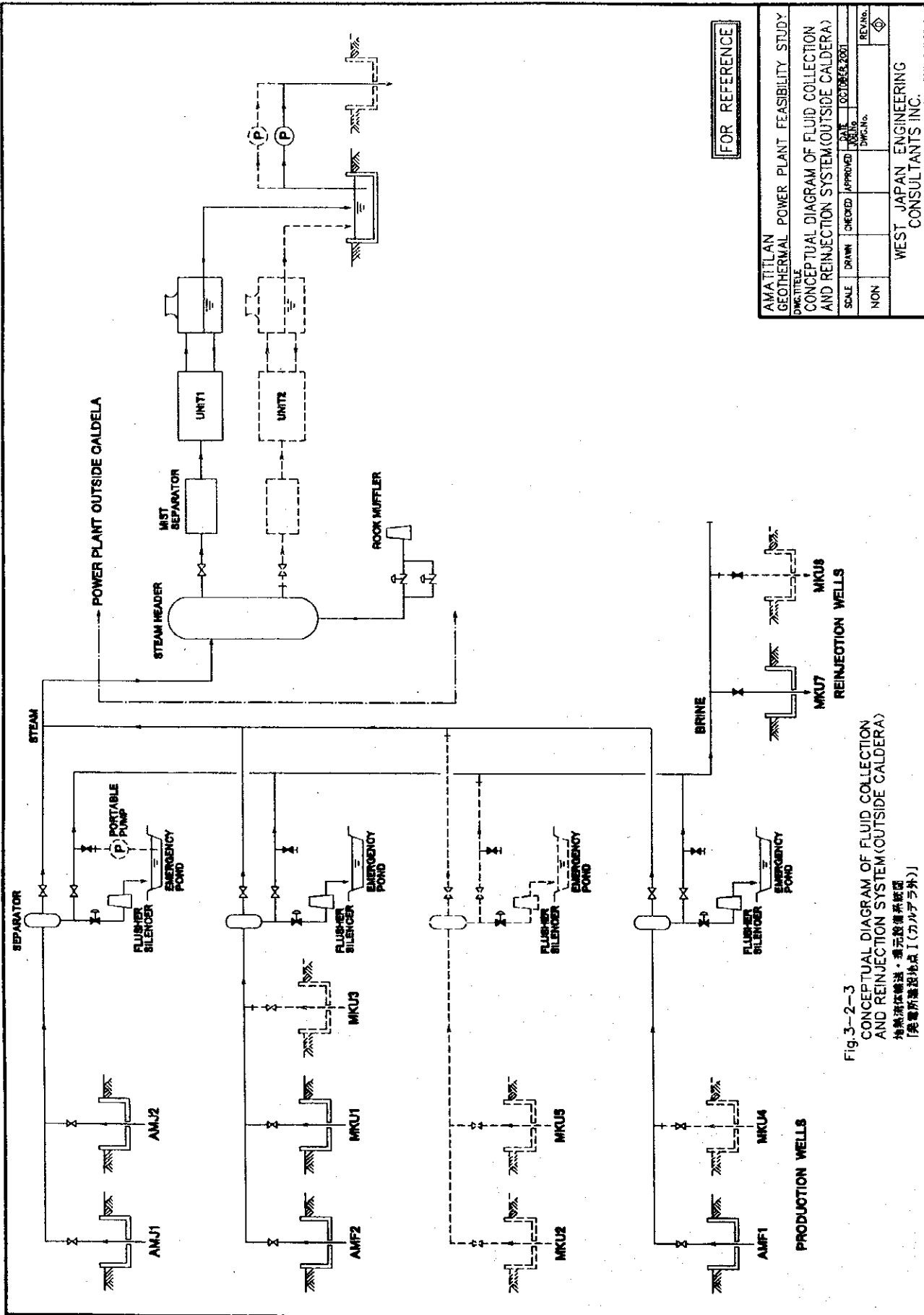
AMATITLAN
 GEOTHERMAL POWER PLANT FEASIBILITY STUDY
 DWG. TITLE

ROUTE OF STEAM AND BRINE PIPELINES
 (INSIDE CALDERA)

SCALE	DRAWN	CHECKED	APPROVED	DATE
NDN				OCTOBER, 2003

DWG. No.	REV. No.
	⊠

WEST JAPAN ENGINEERING
 CONSULTANTS INC.



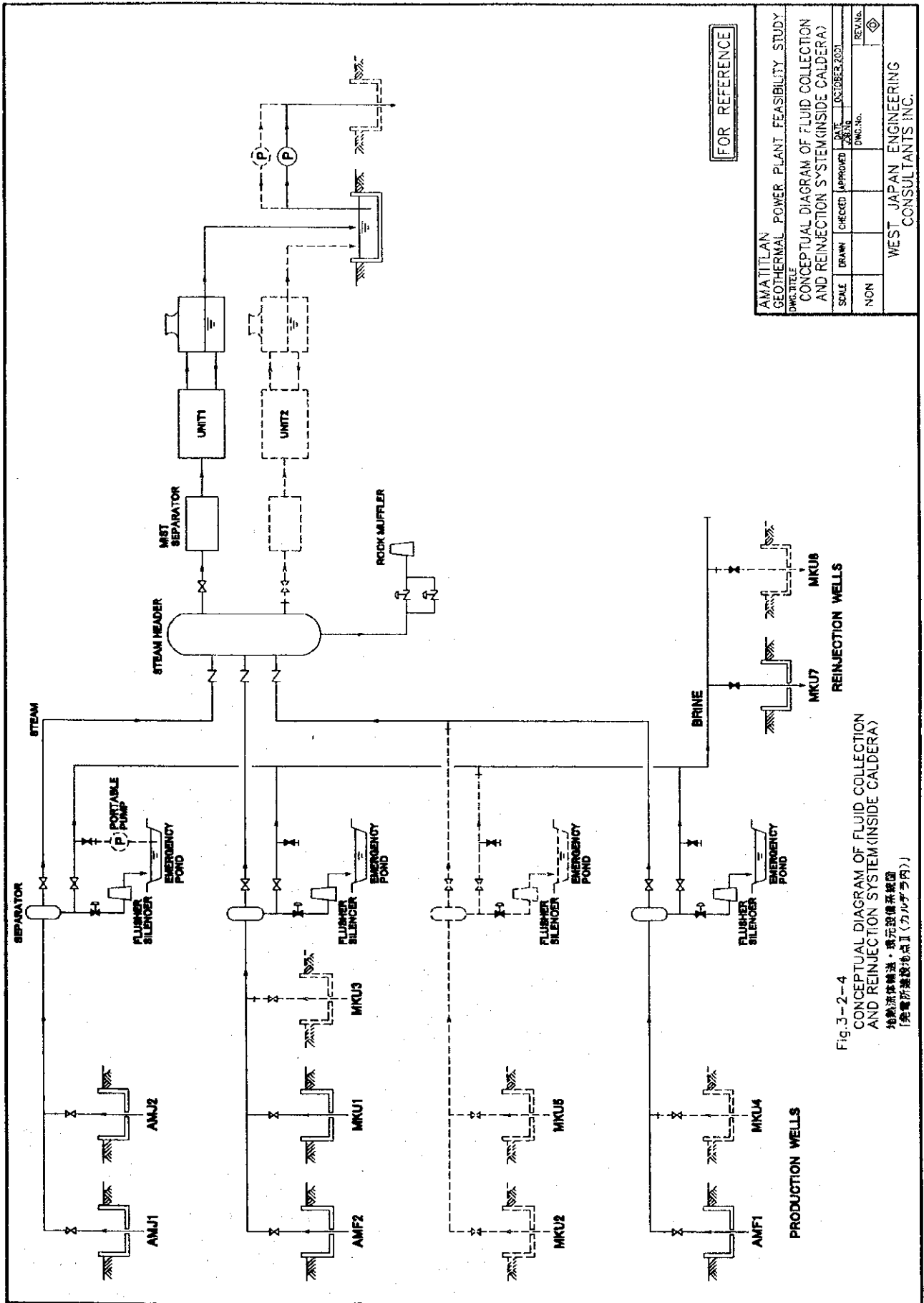
FOR REFERENCE

AMATITLAN GEOTHERMAL POWER PLANT FEASIBILITY STUDY
 DWG. TITLE
 CONCEPTUAL DIAGRAM OF FLUID COLLECTION AND REINJECTION SYSTEM (OUTSIDE CALDERA)

SCALE	DRAWN	CHECKED	APPROVED	DATE	REV. No.
NON				OCTOBER 2001	
				DWG. No.	REV. No.
					◇

WEST JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

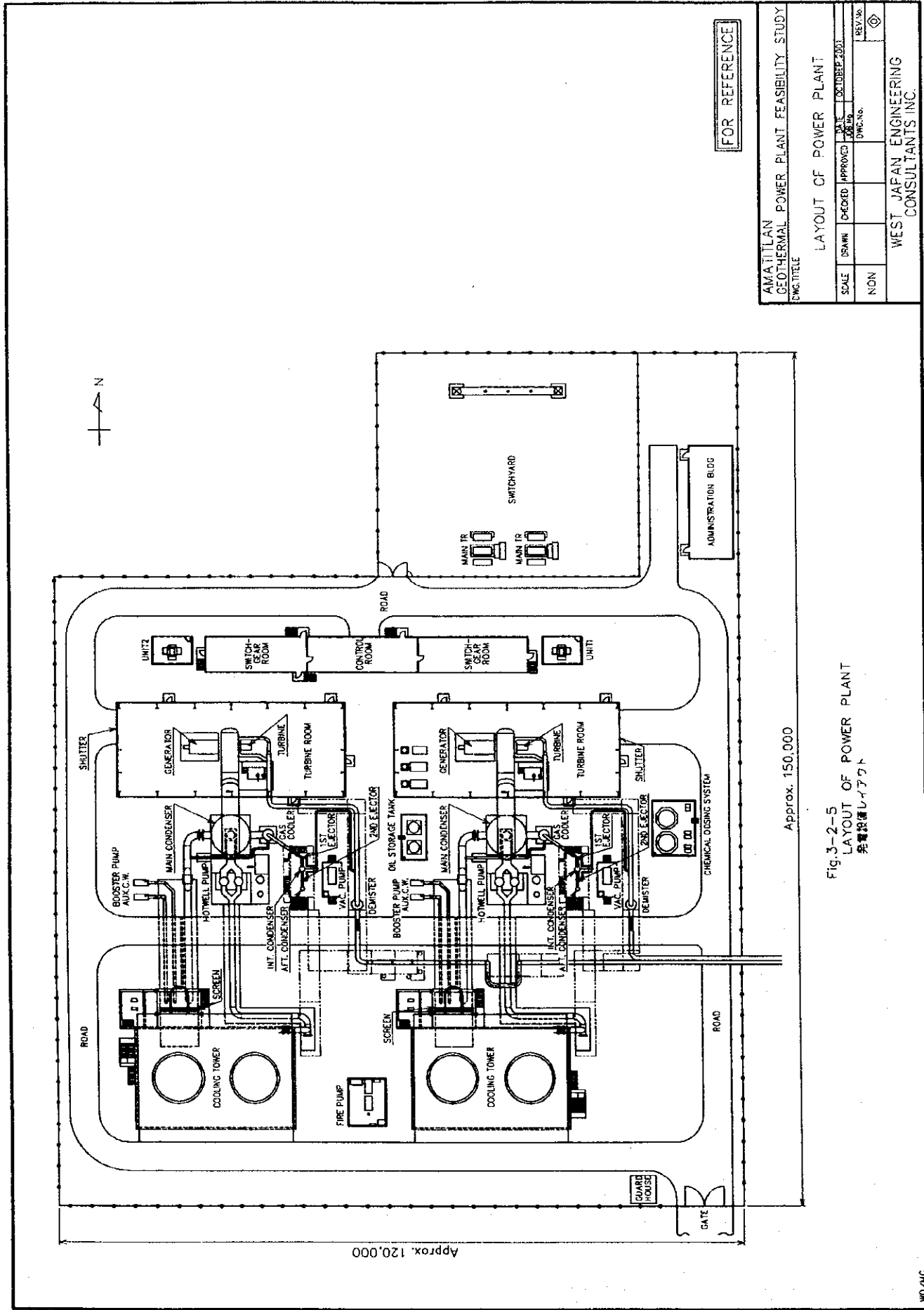
Fig. 3-2-3
 CONCEPTUAL DIAGRAM OF FLUID COLLECTION AND REINJECTION SYSTEM (OUTSIDE CALDERA)
 地熱流体輸送・還元設備系統図
 「発電所周辺地点 I (カルデラ外)」



FOR REFERENCE

AMATITLAN GEOTHERMAL POWER PLANT FEASIBILITY STUDY			
DWC/TITLE			
CONCEPTUAL DIAGRAM OF FLUID COLLECTION AND REINJECTION SYSTEM (INSIDE CALDERA)			
SCALE	DRAWN	CHECKED	APPROVED
NON			
			DATE: 10/06/83
			DWG. NO.
			REV. NO.
			WEST JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

Fig. 3-2-4
 CONCEPTUAL DIAGRAM OF FLUID COLLECTION AND REINJECTION SYSTEM (INSIDE CALDERA)
 地熱流体集液・還元設備系統図
 (発電所蒸気地床内)



Approx. 120,000

Approx. 150,000

FOR REFERENCE

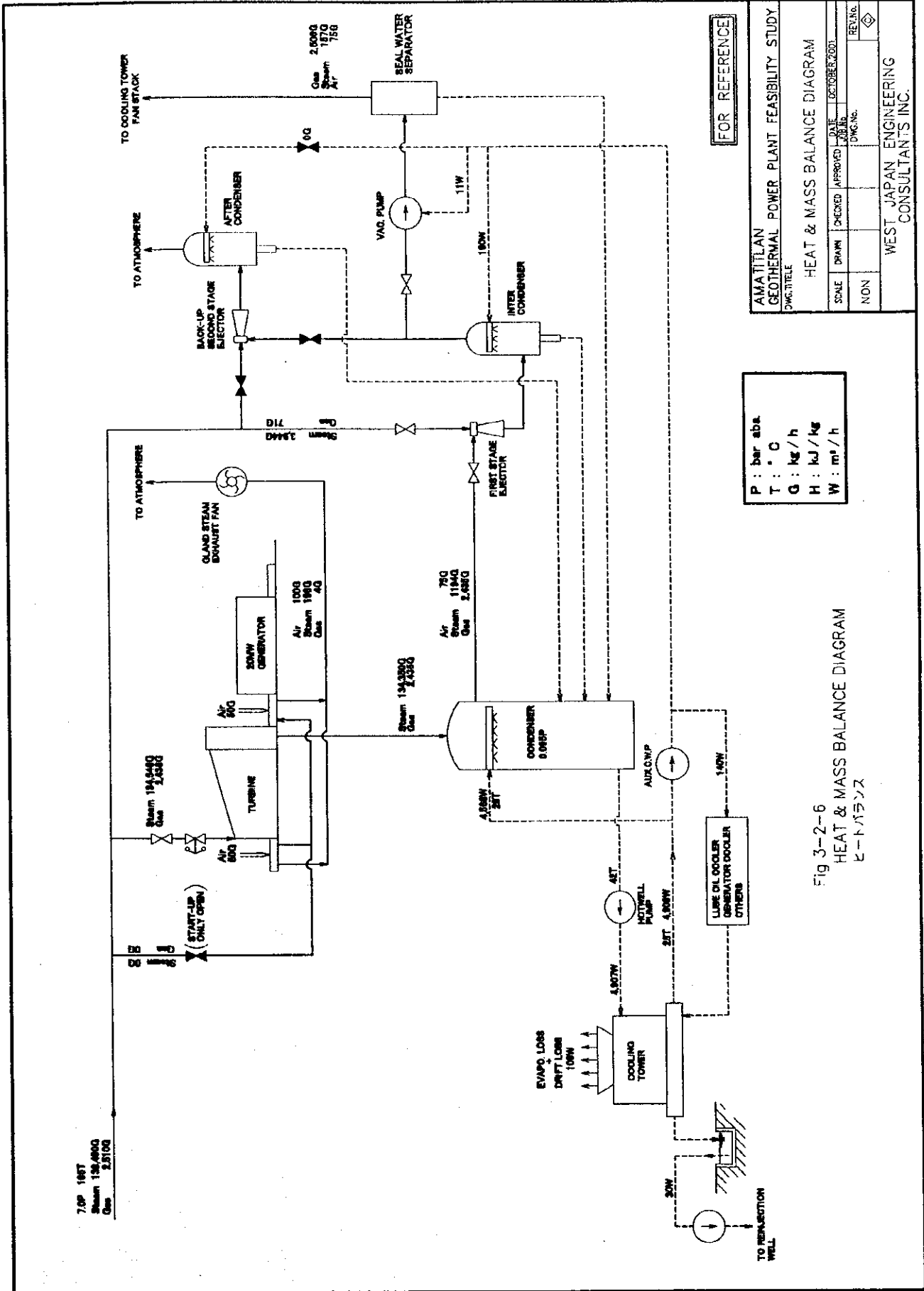
AMATILAN
GEOTHERMAL POWER PLANT FEASIBILITY STUDY
ENGINEER

LAYOUT OF POWER PLANT

SCALE	DRAWN	CHECKED	APPROVED	DATE
NON				DECEMBER 2003
				DWG. No.
				REV. No.

WEST JAPAN ENGINEERING
CONSULTANTS INC.

Fig.3-2-5
LAYOUT OF POWER PLANT
発電設備レイアウト

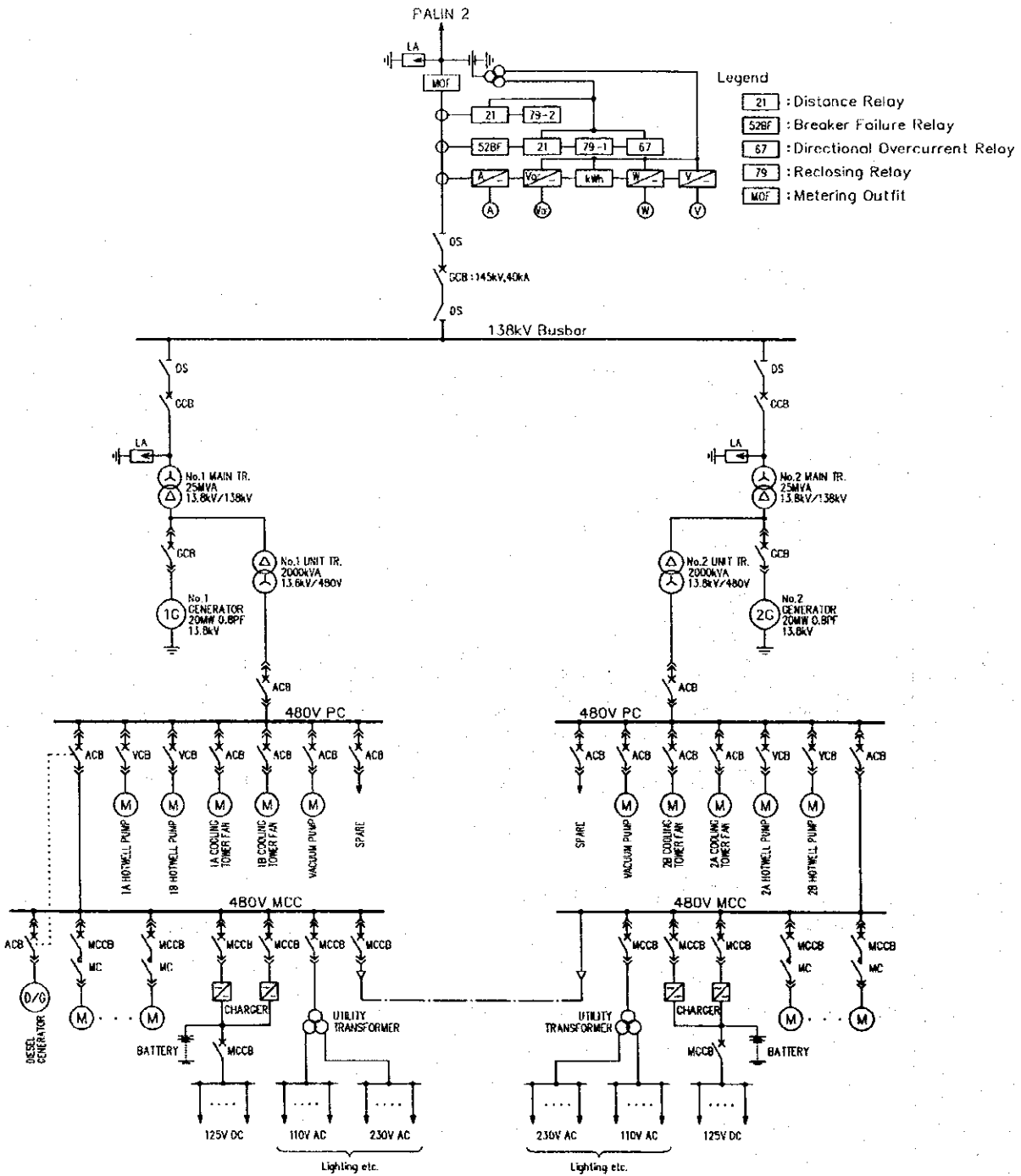


FOR REFERENCE

AMATITLAN GEOTHERMAL POWER PLANT FEASIBILITY STUDY			
DWG: T1EE			
HEAT & MASS BALANCE DIAGRAM			
SCALE	DRAWN	CHECKED	APPROVED
NON			
DATE	OCTOBER 2001		
DWG. NO.			
REV. NO.	◇		
WEST JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.			

P : bar abs
T : °C
G : kg / h
H : kJ / kg
W : m³ / h

Fig 3-2-6
HEAT & MASS BALANCE DIAGRAM
ヒートマス



FOR REFERENCE

Fig 3-2-7
 所内単線結線図
 SINGLE LINE DIAGRAM

AMATITLAN GEOTHERMAL POWER PLANT FEASIBILITY STUDY DWG. TITLE					
SINGLE LINE DIAGRAM					
SCALE	DRAWN	CHECKED	APPROVED	DATE	OCTOBER, 2001
NON				DWG. No.	REV. No.
WEST JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.					

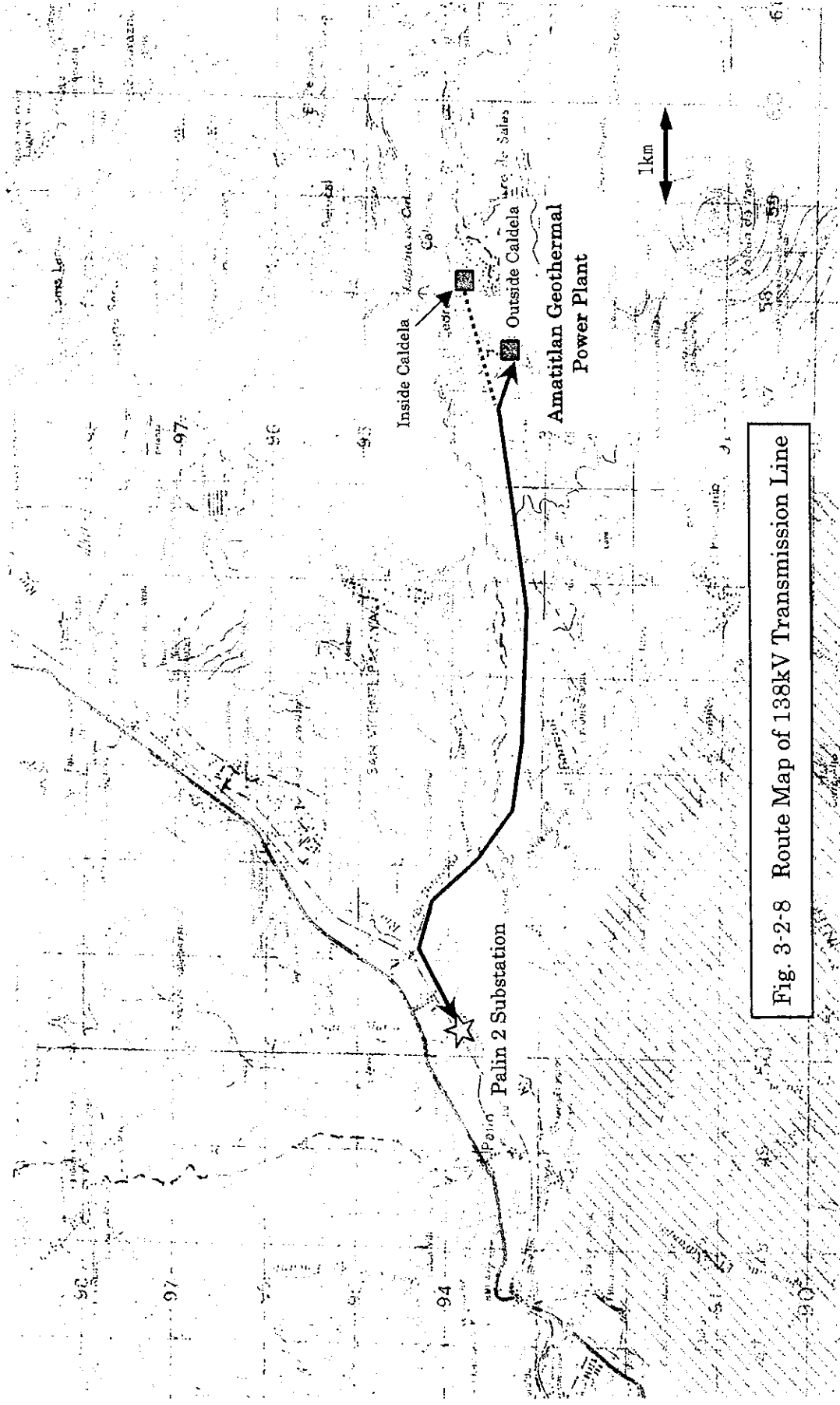
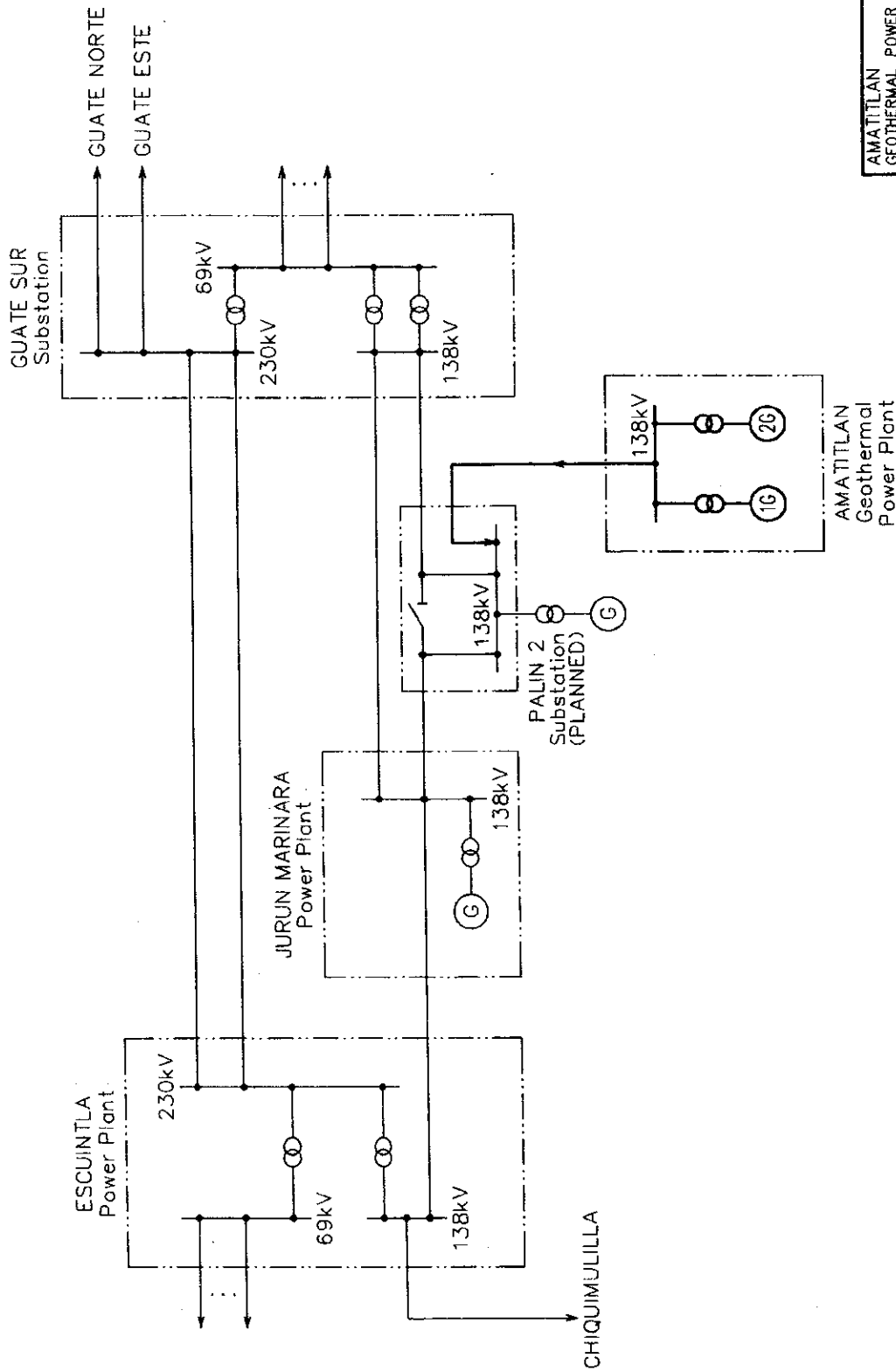


Fig. 3-2-8 Route Map of 138kV Transmission Line

FOR REFERENCE



AMATITLAN
GEOHERMAL POWER PLANT FEASIBILITY STUDY
[DWC:TELE]

TRANSMISSION NETWORK DIAGRAM

SCALE	DRAWN	CHECKED	APPROVED	DATE	BY
NON				06/10/2007	
				DWG. No.	REL. No.
					④

WEST JAPAN ENGINEERING
CONSULTANTS INC.

Fig 3-2-9
送電線系統圖
TRANSMISSION NETWORK DIAGRAM

Fig. 3-2-10 CONSTRUCTION SCHEDULE (CASE 1)
建設計画 (CASE 1)

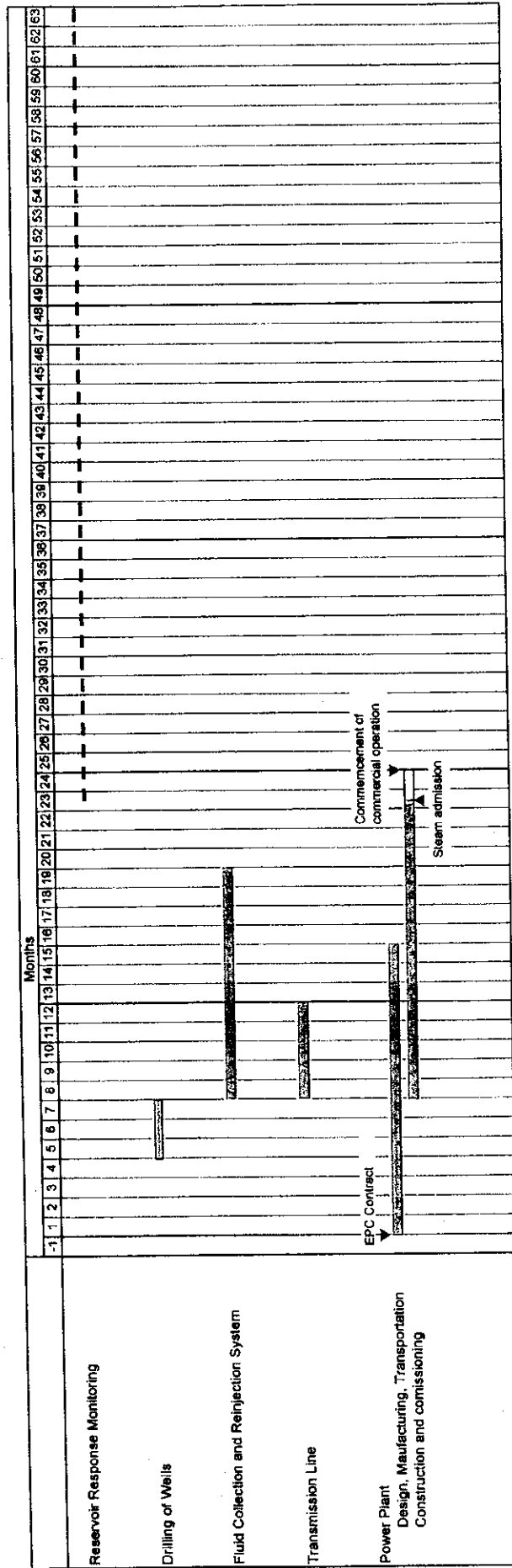


Fig. 3-2-11 CONSTRUCTION SCHEDULE (CASE 2)
建設計画 (CASE 2)

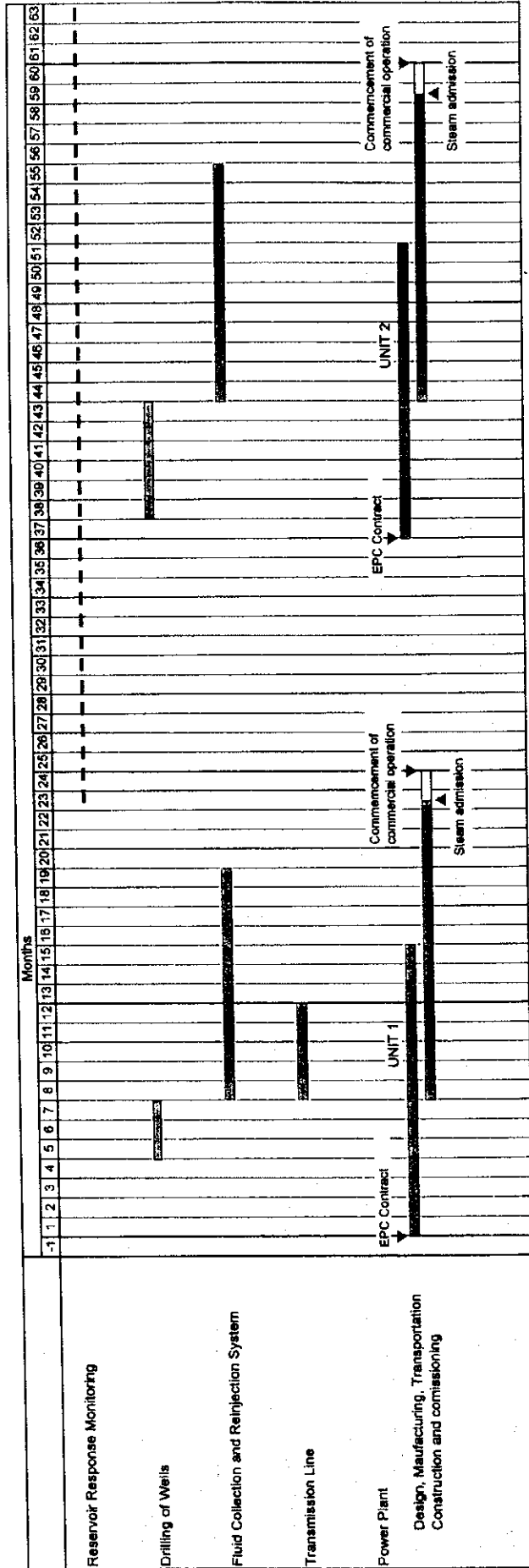


Fig. 3.2-12 CONSTRUCTION SCHEDULE (CASE 3)
建設計画 (CASE 3)

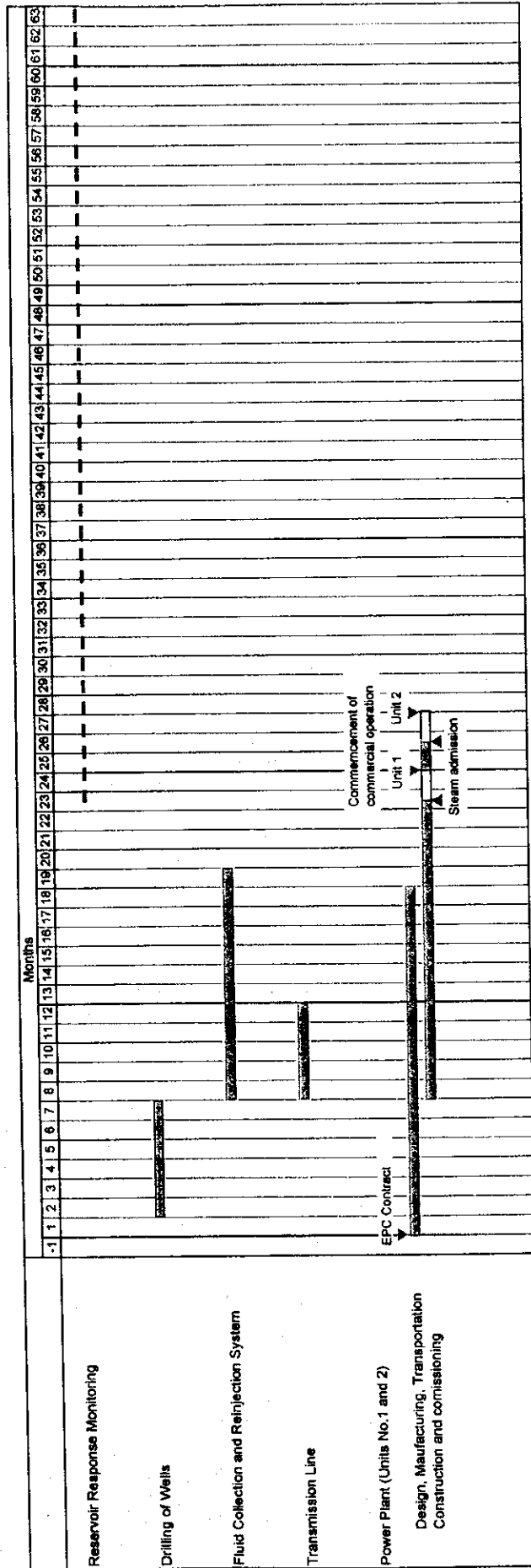


Table3-2-1 Estimated Project Cost (Plant Site I, Outside Caldera)
 工事費見積 (発電所建設地点 I : カルデラ外)

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
1. Well Drilling			
Base cost	3.20	9.60	8.00
Price contingency	0.09	0.68	0.25
Physical contingency	0.16	0.51	0.41
2. Fluid Collection and Reinjection System			
Base cost	10.10	11.00	11.00
Price contingency	0.30	0.39	0.33
Physical contingency	0.52	0.57	0.57
3. Power Plant			
Base cost	29.15	55.65	53.00
Price contingency	0.88	3.35	1.76
Physical contingency	0.90	1.77	1.64
4. Transmission Line and Substation			
Base cost	2.90	3.50	3.50
Price contingency	0.09	0.14	0.11
Physical contingency	0.09	0.11	0.10
5. Geoscientific, General and Administrative Cost			
Base cost	5.46	10.92	7.55
Price contingency	0.16	0.67	0.26
Physical contingency	0.28	0.58	0.39
6. Land Acquisition and Compensation			
Base cost	0.75	1.50	1.50
Price contingency	0.02	0.08	0.05
Physical contingency	0.04	0.08	0.08
Project Cost Total			
Base cost	51.56	92.17	84.55
Price contingency	1.54	5.31	2.76
Physical contingency	1.99	3.62	3.19
TOTAL	55.09	101.10	90.50

Table3-2-2 Estimated Project Cost (Plant Site II, Outside Caldera)
 工事費見積 (発電所建設地点Ⅱ : カルデラ内)

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
1. Well Drilling			
Base cost	3.20	9.60	8.00
Price contingency	0.09	0.68	0.25
Physical contingency	0.16	0.51	0.41
2. Fluid Collection and Reinjection System			
Base cost	7.30	8.20	8.20
Price contingency	0.22	0.31	0.25
Physical contingency	0.38	0.43	0.42
3. Power Plant			
Base cost	29.15	55.65	53.00
Price contingency	0.88	3.35	1.76
Physical contingency	0.90	1.77	1.64
4. Transmission Line and Substation			
Base cost	3.10	3.70	3.70
Price contingency	0.09	0.14	0.11
Physical contingency	0.10	0.12	0.12
5. Geoscientific, General and Administrative Cost			
Base cost	5.46	10.92	7.55
Price contingency	0.16	0.67	0.26
Physical contingency	0.28	0.58	0.39
6. Land Acquisition and Compensation			
Base cost	1.20	2.40	2.40
Price contingency	0.02	0.12	0.07
Physical contingency	0.06	0.13	0.12
Project Cost Total			
Base cost	49.41	90.47	82.85
Price contingency	1.46	5.27	2.70
Physical contingency	1.88	3.54	3.10
TOTAL	52.75	99.28	88.65

3. 3 環境影響調査

3.3.1 はじめに

3.3.2 グアテマラ国における環境関連法規制

3.3.3 環境地勢調査結果

3.3.4 調査井掘削、噴出試験までの環境測定結果

3.3.5 発電所建設に向けた環境影響評価

3.3.6 今後のプロジェクト推進に当たっての推奨事項

3.3 環境調査

3.3.1 調査井掘削、噴出試験までの環境測定結果のまとめ

Amatitlan 地区に掘削された2本の地熱井(AMJ-1&2)の掘削時および噴出作業時の環境影響調査結果については、次のように結論付けられた。

- ・ AMJ-1&2 坑井掘削の前後において、同域周辺の小水流、50m の浅井戸、Calderas 湖水の水質に大きな変化は認められなかった。
- ・ 同 坑井掘削中の周辺大気環境の H₂S 濃度は総体的に低く、AMJ-2 坑井噴出作業時の居住区での H₂S 濃度は 0.010ppm 以下と極めて低いものであった。
- ・ また、隣接する 5MW の地熱発電所運転時の H₂S 濃度も低く、2000 年 4 月以降の最大濃度は 0.012ppm に過ぎなかった。
- ・ AMJ-1&2 坑井噴出作業時の騒音レベルは、隣接する村落での測定値が 58～66dB 程度で、作業停止時(バックグラウンド)の値とほぼ同じであった。
- ・ 掘削泥水、掘屑については、既に埋め戻し処理されており、坑井湧出熱水は還元井に、作業用水等については計画通り、準備されたピットに放流、処理された。

3.3.2 発電所建設に向けた環境影響評価

1. 水質環境

先のモニタリング結果からは、水質環境関連の影響は認められなかった。とは言え、発電所がカルデラ内に設置された場合は、その地形が、Calderas 湖を底部とするすり鉢状になっていることから、発電所建設に係わる作業用水、雑用排水などが湖水に流入する可能性があるかもしれない。したがって、発電所がカルデラ外に設置される事は、この点でも推奨される。

a. 地熱水の処理

本域に掘削された AMF-1&2 と AMJ-1&2 の4本の坑井からの総湧出熱水量は、大略 165t/h である。その熱水中の有害成分である As 濃度は 7～8ppm 程度、B は 40～50ppm 程度と高濃度であることから、当然、排出される熱水の全量は、他の地熱発電所と同様、地下還元すべきである。熱水の地下還元は、環境対策のみならず、地熱貯留層の涵養の面でも重要である。

b. 主冷却水オーバーフロー水の処理

現状では、発電所運転開始時のオーバーフロー水の水質は想定できない。しかし、その水質は、基本的に蒸気の凝縮水の性状に左右される。AMJ-1&2 の2本の坑井の蒸気凝縮水の分析結果では、As、Hg 濃度とも、WB (World Bank, 1998) の規定する公共水域への排出基準値 (As:0.1mg/l, Hg:0.05mg/l) を下回っている。しかし、WHO (World

health Organization) の飲料水基準値 (As:0.01ppm, Hg:0.001ppm) をわずかではあるが上回っている。また、発電所運転開始時には、主冷却水系統での硫黄酸化細菌、藻の発生を防止するため、ある種の化学薬品 (Biocide など) が使用されることも想定されることから、発電所主冷却水のオーバーフロー水もまた、地下還元することを推奨する。

c. 作業、雑用水の処理

発電所建設、運用に係わる作業用水、雑用排水については、坑井掘削時と同様、専用の排水池に排出し、中和処理すべきである。

d. 掘削泥水の処理

追加掘削される坑井の排出泥水、堀屑は、AMJ-1&2 坑井掘削時と同様、専用の池に排出、貯蔵後、可能な限り水分を減じた状態で埋め戻し処理すべきである。

2. 大気 (H₂S) 環境

a. 現況での H₂S 濃度

記述したように、AMJ-1&2 坑井噴出作業時の現場周辺定点での H₂S 濃度は、何れも 0.010ppm 以下と WB の工業生産に係わる環境ガイドラインが規定する H₂S 環境濃度 10ppm を大きく下回るものであった。しかし、H₂S は、0.3ppm 程度の濃度でも人間の臭覚に感じるとされていることから、放出への配慮が必要である。ちなみに、AMF-1&2 坑井の生産蒸気を用いて発電中の 5MW 発電所定点での H₂S 濃度も最大で 0.012ppm と低いものであった。

b. H₂S の特性

地熱地帯あるいは地熱発電所周辺では、一般的に、広域的に H₂S の臭気を感じる人が多い。H₂S は空気より重く、高濃度では燃焼する有毒なガスである。0.3ppm 程度の比較的低い濃度でも臭気として感じ、それは卵の腐った臭いとされている。このため、住居、職場環境でしばしば問題にされることがある。WB(World Bank), TLVACGIH(Threshold Limit Values of American Conference of Government and Industrial Hygienists)の基準値は 10ppm である。H₂S の濃度が濃くなると臭気は甘く感じられるようになり、105ppm を越す濃度ではその臭気を感じられなくなるとされている。また、600ppm を越すような高濃度では、1 時間以内に死にいたることがあるとされている。

H₂S は比重の重いガスであるため、低層部に停滞し易い。空気による希釈、拡散効果が少ない場合、結果としてドレンピット等に濃集することになる。したがって、大気中の H₂S 濃度の多寡は気象条件の影響を受けやすく、風が弱く、温度が低い条件、また大気湿度が高いほど高濃度になりやすい。結局、地熱開発地帯周辺での H₂S 濃度は、地形的な影響、風速、風向、湿度など気象条件に大きく左右されることになる。

大気環境中の H_2S は、 H_2S の水への溶解性が低く、また酸化され難いことから、雨水あるいは表層水への混入成分としては存在し難い。とは言え、 H_2S の幾分かは酸化され硫酸を生成し酸性雨の要因になることも考えられる。しかし、一般に H_2S の排出との直接的な関係は認められていない。

c. H_2S 放出量の予測

1) 試算条件

H_2S の放出量を推測するに当たって、次のような条件を設定した。

- a) 発電出力 : 20,000kW
- b) 消費蒸気量 : 146t/h
- c) 蒸気中の非凝縮性ガス : 2.1wt% (1 & 2 坑井噴出実績を加重平均)
- d) 非凝縮性ガス中の H_2S : 5.8%
- e) 冷却塔排出空気量 : $2.6 \times 10^6 \text{Nm}^3/\text{h}$

2) H_2S の放出量

- a) ガス流量 : $146 \times 2.1/100 = 3.066 \text{t/h}$
- b) H_2S の排出量 : $3.066 \times 5.8/100 \times 10^{-3} = 178 \text{g/h}$
- c) 全 H_2S 放出量 : $178 \times 22.4/34 = 117 \text{Nm}^3/\text{h}$

3) 冷却塔での H_2S 放出量

- a) 冷却塔排出 H_2S 濃度 : $117/2.6 \times 10^6 \times 10^6 = 45 \text{ppm}$

4) H_2S 放出量の比較

本 Amatitlan 地区において、将来的に 20MW 相当の地熱発電所が建設された場合の H_2S の全放出量 ($117 \text{Nm}^3/\text{h}$)、および冷却塔からの排出 H_2S 濃度 (45ppm) を試算し、その値を幾つかの代表的地熱発電所の実績値と比較した結果を Table 3-3-1 に示す。この比較結果から判断すると、通常の立地に建設される条件では、発電所周辺の H_2S 濃度はさほど高くないものと推察される。

d. H_2S の放出抑制策

これまで述べてきたように、本域に 20MW の地熱発電所を設置した場合の冷却塔排出点での H_2S 濃度は、他の地熱発電所に比較してもさほど高くないものと推測される。ましてや、発電所周辺で H_2S 濃度が WB や TLVACGIH の定める基準値 10ppm を越える事はないと考えられるが、 H_2S は、地形、気象条件などの影響を受けやすいので、発電所の設置場所を盆地状のカルデラ内では無く、その外縁部外とすることが望まれる。

なお、 H_2S の環境への影響を極力抑制するには、次のような方策を採用するのが望ましい。

- a) 冷却塔排出空気量の増大による希釈，拡散
- b) 集合式冷却塔の採用による拡散
- c) バイナリー発電などクローズド方式での地熱発電設備の採用
- d) 各種 H₂S 除去装置の採用

3. 騒音

AMJ-1 坑井を口元弁全開で噴出させた場合の騒音の最大値は，サイレンサーの直ぐ横で 116dB であったが，同時期，坑井より大略 100m 離れた位置にある作業用道路進入口での騒音は 76～88dB で，バックグラウンドの値を上回るものの Typical Noise Level (by A. Freeston, 1993) とされる大都会の路上での平均騒音レベル 75dB とほぼ同等であった。騒音の環境への影響は，騒音の大きさと居住区との位置関係で決まる。AMJ-2 坑井掘削時の作業地に近接する村落での騒音レベルは 58dB でバックグラウンドの値とほぼ同じ値であった。

発電所建設後の定常運転時は，坑井噴出作業時のような高いレベルの騒音は発生しないものと考えられる。発電所が AMJ-1 坑井掘削地付近に設置されたとすると，上記の騒音源と居住区との騒音レベルから推測すると，既居住区での騒音レベルは，WB の工業生産に係わる環境ガイドラインが規定する騒音レベル（居住区／昼間：55dB(A)）を上回ることは無いと推測される。

3.3.3 今後のプロジェクト推進に当たっての推奨事項

- a) このプロジェクトの継続に当たっては，坑井掘削地域周辺住民へ“地熱開発への理解を得る” 教宣活動を行い，協力を得られるよう努力すること。
- b) 開発に関連して既環境条件を変化させた場合，その原形回復に十分な配慮を払うこと。
- c) 今後，本プロジェクトが継続して実施され，発電所建設，運用に至る場合は，これに関連するさらなる環境影響評価調査が行われるべきである。
- d) 新たな環境影響調査，評価を行うに当たっては，先に策定した ①環境影響（水質，大気，騒音）モニタリング計画 ②坑井掘削，噴出に係わる環境影響緩和計画 ③坑井掘削，噴出に係わる健康安全・保安対策 をより豊富化し，これに基づく，水質，大気，騒音などの測定も，測定機器の充実，測定技術の習熟を含め体制を強化して行うのが望ましい。

Table 3-3-1 Comparison on Total H₂S Emission and H₂S Concentration
with Other Existing P/P

総 H₂S 排出量と H₂S 濃度の他の地熱発電所との比較

Name of Power plant	Out Put (MW)	H ₂ S Concentration at cooling tower (ppm)	H ₂ S Emission (Nm ³ /h)	Predicted H ₂ S around P/P (ppm)
Amatitlan	(20)	45	117	—————
A	27.5	62~120	58	0.03~0.06
B	50	14~120	140	0.006~0.008
C	65	49~110	~730	0.141~0.193
D	55×2	6~10	128	0.006~0.007

3. 4 経済・財務評価

3.4.1 プロジェクトの必要性

3.4.2 Least Cost Solution 経済性評価

3.4.3 財務評価

3.4 経済・財務評価

3.4.1 プロジェクトの必要性

1. 電力需要

近年の INDE による電力需要予測 (Medium) によると、今後 10 年間で、平均 7.7% から 8% の電力需要の伸びを予測しており、本プロジェクトが完成する 2005 ないし 2006 年度においては、可能設備能力約 1,400 MW に対し約 1,600 MW 程度の総設備容量が必要となる。また、現状の老朽化した地方の電力設備などの退役などを考慮すると、高い設備稼働率が期待できる 20 MW x 2 基の地熱発電設備の投入は、電源の多様化と安定した電力供給の面から非常に有意義なものと考えられる。

2. 再生可能エネルギーの有効利用

地熱発電は同国固有の再生エネルギーを有効利用するものであり、合計 40 MW の地熱発電が実現され、同等の年間発生電力量 (308 GWh) の内燃力発電を回避とした場合、年間 30.2 百万 US ドルの外貨節約となる。

また、地熱発電は化石発電等の燃焼による CO₂ の発生がほとんど無いことから、地球環境保全に大きく貢献する事業として注目を浴びており、京都議決書による先進国の CO₂ 取引が具体化したときに、先進国を相手に CO₂ の取引が可能となることも考えられる。

3.4.2 Least Cost Solution 経済評価

1. kW 建設単価と発電原価

Table 3-4-1 kW 建設単価と送電端発電原価

ケース	カルデラ内サイト			カルデラ外サイト		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
出力, MW	20	40	40	20	40	40
建設単価, \$/kW	2,471	2,262	2,071	2,578	2,304	2,114
発電原価, C/kWh	4.73	4.11	3.82	4.89	4.17	3.88
既設井戸掘削費を加えた場合	5.33	4.41	4.12	5.50	4.48	4.19

2. 結論

地熱帯開発、発電所建設単価、ならびに発電原価から、短期間で 20 MWx2 基を建設する Case3 のカルデラ内サイトの建設が最小の建設単価、発電単価を得ることができる。

また、カルデラ内、カルデラ外の比較については Case1 で 0.16 セント、Case2, Case3 で、0.06 セントの差であり、土地取得面積、価格、補償費などの優位性などを今後検討の上最適地選択する事を推奨する。

3.4.3 財務評価

1. プロジェクトコストと予備費

Table 3-4-2 プロジェクトコスト

(単位：百万\$)

ケース	カルデラ内サイト			カルデラ外サイト		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
ベースコスト	49.41	90.47	82.85	51.56	92.17	84.55
価格予備費	1.46	5.27	2.70	1.54	5.31	2.76
物理予備費	1.88	3.54	3.10	1.99	3.62	3.19
プロジェクトコスト	52.75	99.28	88.65	55.09	101.10	90.50

2. 資金調達条件と機会費用

Table 3-4-3 融資条件

	日本国内銀行	国際開発銀行
通貨	US\$	US\$
シェア	40%	60%
金利	6.03%+3.08%	8%
返済期間	12年	20年
返済猶予期間	2年 (3年)*	2年 (3年)

注*： Case3 の返済猶予期間については、工事期間が 2.5 年と計画されているため、3 年の返済猶予期間とした。

上表より、融資の WACC (Weighted Average Cost of Capital) は 8.44% となり、これを本プロジェクトの機会費用とする。

3. その他の想定条件

蒸気単価、売電単価

蒸気単価 : 1.1 US セント/kWh

売電単価 : 8.0 US セント/kWh

減価償却 : 残存価値無し of 定額償却
 : 供給設備 : 10 年,
 : 発電プラント : 20 年のとした。

税金 : 売電利益に対し、31%

2. 財務的内部収益率

各ケースおよびカルデラ内外の財務的収益率、および累積利益は下表のとおり

Table 3-4-4 財務的内部収益率

	財務的内部収益率	
	カルデラ内	カルデラ外
Case 1	11.14%	10.48%
Case 2	11.15%	10.87%
Case 3	13.75%	13.44%

上表のとおり全ての場合において、機会費用である 8.44%を超えており、本プロジェクトの投資効果があると判断される。

Table 3-4-5 累積利益

	累積利益 (百万\$)	
	カルデラ内	カルデラ外
Case 1	47.22	35.79
Case 2	76.81	73.44
Case 3	111.33	106.56

キャッシュフローから判断すると、Case1, Case2については、運開後何年も運転資金が不足状態となり、財務的に困難である。一方、Case3については、運開後直ちに純益を計上することが可能であり、追加坑井が必要な年のみ赤字となるが、その赤字も前年度までの利益で十分カバーすることができる。また、債務返済比率 (Debt Service Ratio) をみても同様に Case 1, Case2 については財務的に実行可能性があるとは言えず、財務的には Case3 のみフィージブルである。

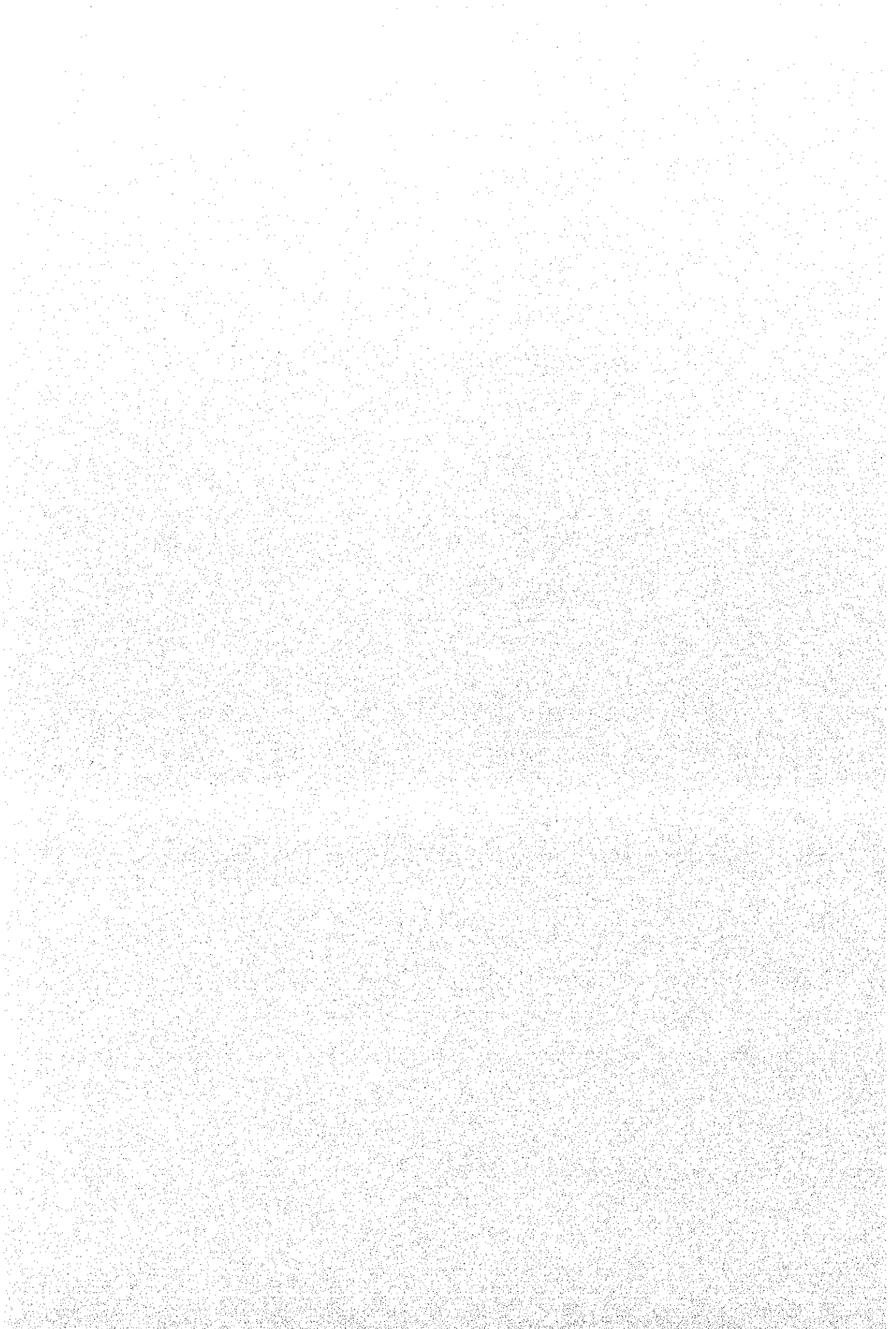
3. 結論

カルデラ内外での3ケースのプロジェクト開発計画を経済・財務評価の結果、カルデラ内 Case-3 が最適であると判断される。ただし、上述の通り、想定 of 借款金利では投資回収効果が低いため、想定された融資条件より有利な借款商品の開拓が必要と判断される。また、運開後資金不足にならないように、借款条件としての、返済猶予期間、返済期間等を慎重に検討し資金不足に陥らない借款条件を選定する必要がある。

4. 総合評価および提言

4.1 総合評価

4.2 提言



4 総合評価および提言

4.1 総合評価

アマティトラン地熱地域で、地質、地化学、物理探査（重力、磁気、電磁探査）などの地球科学的な調査の結果および AMJ-1, AMJ-2 の 2 本の調査井をもとに、地熱系モデルを構築し、さらに開発可能な資源量を評価した。

アマティトラン地熱地域の地熱構造は、主にカルデラ構造、N-S 方向の基盤岩類の隆起構造、および石英安山岩質の貫入岩によって特徴付けられる。これらの構造の形成に伴う断裂は深部では地熱貯留層形成の場となっている。AMJ-1, AMJ-2 の 2 本の調査井掘削の結果、地熱流体が基盤の花崗岩類や火山岩類中に断裂型貯留層に胚胎することを確認した。

本地域に形成されている地熱系は、Calderas 西方深部に存在するデイサイトの貫入岩を熱源とし、天水を起源とする熱水対流系である。また、現在第四紀更新世後期（約 0.7Ma）から現世にかけて火山活動に起因したマグマあるいはそれに付随する火山ガスも熱源となっている。主な地熱活動は、アマティトランカルデラ形成後、少なくとも 3 回認められ、大局的には北から南へと活動が新しくなっている。

地下深部に流入し、加熱された天水は、深部花崗岩基盤内に本源地熱流体と解釈される 300°C ~ 340°C の中性 Cl 型深部熱水となる。深部熱水は、NE-SW 系の基盤隆起帯の西側境界に当たる深部断裂、カルデラを形成する環状断層に沿って上昇し、標高 500m 付近に 290°C ~ 300°C の熱水（中性、Cl 濃度；2, 700mg/L）貯留層を形成している。この高温熱水は、NE から SW に伸びる深部断裂に沿って南から北へと流動していることが明らかになった。また、一部はアマティトランカルデラの南壁に沿って西～北西に流動していることも指摘された。

調査井からの地熱流体は、既存の坑井と同質の pH 値が中性の高 Cl 濃度を示し、坑井周辺の貯留層温度は 260 ~ 280°C であることが明らかになった。これらの地熱流体の化学特性は、地熱発電に利用しても問題がない。

調査井のうち、AMJ-1 は噴出特性から、温度は高いが、貯留層が 2 相状態であることから、透水性がやや低いことが明らかとなり、生産対象となる高温貯留層の西側境界に掘削されたと解釈された。一方、AMJ-2 は 2 個所のフィードゾーンがあり、上部のゾーンは蒸気卓越型であり、下部は熱水卓越型となっている。これは既存の AMF-2 とよく似た噴出環境にある。

既存の AMF-1, AMF-2 の 2 坑井に加えて、本調査で掘削した AMJ-1, AMJ-2 の 2 坑井の噴出能力は、現状では 20MW の発電所を建設するには、やや不足している。しかしながら、3 次元数値モデルに基づく貯留層シミュレーションの結果、アマティトラン地域は、50MW の発電ができるだけの貯留層規模であるとの結論を得た。しかも、AMF-1 と AMF-2 の既存の 2 坑井は、蒸気/熱水比はほとんど変化しておらず、また約 2 年間噴出を継続している。これらのデータはアマティトラン地域の地熱貯留層の規模は大きく、安定していることを裏付けている。

本年度資源量評価の解析内容は、アマティトラン地域における地熱開発の 3 つのシナリオでの出力予想と、今後の掘削計画である。いずれのシナリオも開発対照貯留層をカルデラ内部に

限定したものである。発電所建設候補地をカルデラ内部とカルデラ外の INDE 資材倉庫隣接地の2箇所として検討した。

発電方式は、アマティラン地熱地域が中程度の比エンタルピーで、非凝縮性ガス量が比較的少なく、熱水中のシリカ成分が高いことから、本地域では発電方式としては復水式シングルフラッシュサイクルで、熱水の高圧還元が適しているものと判断した。

資源量評価の結果を考慮して、発電出力規模は、40MW とした。INDE の意向も考慮し、20MW x 1機、20MW x 2機のケースで概念設計を行った。後者の場合でも同一敷地内に隣接して建設することとする。発電後の出力は新設される 138 kV の変電所（パリン 2 変電所）で、送電系統への接続される。

地熱流体の輸送・還元設備は、カルデラ壁の鞍部を越える可能性があるため、上昇管での圧力損失や流動安定性などを考慮して、蒸気だけを発電所に送る分離輸送方式を採用することにした。

モジュール型タービン発電機ユニットを設置し、それに隣接させて冷却塔側に複水器、ガス抽出装置などを配置する。モジュール型復水水蒸気タービンを採用した場合、工場での設計・製作期間が短くなり、輸送が容易である上に、据付工期も短く、価格が安いことなどが上げられる。

グアテマラ国では、1998年8月の法改正により、地熱調査に伴う調査井掘削については、事前に「環境影響評価」申請書を CONAMA (Comision Nacional del Medio Ambiente) に提出し、承認を得なければならなくなった。CONAMA の環境調査基準書には、具体的な環境規制項目はなく、基準値の記載もない。過去に提出された「環境影響評価申請書には、WHO、IDB などの基準値が参考値として記載されているのみである。

想定される発電所概念設計条件に基づいた環境影響評価の結果、地熱水中に砒素、ホウ素が高濃度に含まれることから、発電所から排出される熱水は全量地下還元すべきである。本地域に 20MW の地熱発電所を設置した場合の冷却塔排出点での H₂S 濃度は、他の地熱発電所に比較してもさほど高くないため問題は小さいが、冷却塔から排出に当たって希釈、拡散を図ることが望ましい。

前述した3つの開発シナリオの経済性評価およびカルデラの内側と外側の2地点での発電所設置のコストの違いについても検討した。

その結果、シナリオ1（20MW の発電所建設）の場合、発電単価はカルデラ内で 4.73 セント/kWh、カルデラ外で 4.89 セント/kWh、シナリオ2（20MW の発電所2基の段階的建設）の場合、カルデラ内で 4.11 セント/kWh、カルデラ外で 4.17 セント/kWh、およびシナリオ3（20MW の発電所2基の同時建設）では、それぞれ 3.82 セント/kWh と 3.88 セント/kWh となった。kWh 当たりの発電単価はカルデラ内に短期間で 20MW x 2機の発電所を建設するシナリオ3で、最小となる。一方、カルデラ外の 20MW のみ発電所の場合、発電単価が最も大きくなる。上述のように、最大でも発電原価は 4.89 セント/kWh であり、予想される蒸気価格 1.1 セント/kWh を上乗せした価格でも 5.99 セント/kWh であり、現在稼働中の火力発電所と十分対抗できる価格である。カルデラ内外でのコスト比較の結果、両者に大きな違いはなかった。

3つのシナリオで、カルデラの内と外での計6ケース開発案に対し財務的内部収益率 (FIRR) を求め、本プロジェクトの財務性を評価するとともに、キャッシュフローにて財務的健全性を検討した。

いずれのケースをみても、財務的内部収益率 (FIRR) は10%~14%の間にあり、本プロジェクトの投資効果はあると判断される。ただし、財務的健全性を考慮すれば、少なくとも12%以上が望ましく、短期間で40MW (20+20) の発電所を建設するというシナリオ3が財務的には最適である。キャッシュフローから判断すると、シナリオ3は運転開始後直ちに純益を計上することが可能であり、財務的にフィージブルであることが明らかになった。

4.2 提言

4.2.1 アマティトラン地熱地域の開発

調査地域の地熱系モデルおよび地熱井から貯留層特性をもとに、資源量評価を行った結果調査地域では、40MW の発電が十分に可能な地熱資源が存在することが明らかとなった。この開発方針は、経済・財務評価から、シナリオ3の20MW+20MW の2基の発電所を同時に建設するというケースが、運転開始までのリードタイムが短く、最も経済的であることが明らかになった。さらに、財務分析における融資条件として、為替変動にリスクを避けるため、年率8~9%の融資条件を想定した。想定した借款金利では投資回収効果が低いため、想定された融資条件より有利な借款商品が必要と考える。そのため、2%程度と利率の有利な日本政府からの通常円借、もしくは環境円借を申請し、INDE自身が本プロジェクトを実施することも、財務的にみれば推奨できる。

4.2.2 発電所位置

調査地域において発電所のサイトとして地熱貯留層の中心に近いカルデラ内部と地熱貯留層の西側に位置するカルデラ外の2箇所を検討した。カルデラ内のサイトは、開発した貯留層をその場で利用でき、カルデラ外に比較して経済的である。しかしながら、カルデラという盆上構造内で、発電所からのH₂Sガスの排出、拡散という観点から判断すると、環境上のリスクは存在する。また、経済性についてもそれ程大きな差は無いことから、発電所は、カルデラ外に設置することを勧める。

4.2.3 環境

地熱発電の事業化に当たっては、坑井掘削地域や発電所計画地点周辺の住民に対し“地熱開発への理解を得る”ための教宣活動を行い、CONAMA等との理解と協力を得て、スムーズな開発ができるよう努力をする必要がある。H₂Sガスに関して、盆状というカルデラ特有の地形から考えて、発電所をカルデラの外側に置くことが望ましい。また、カルデラ内に設置せざるを得ない場合は、発電所にH₂S除去装置の設置を検討しておく必要がある。

4.2.4 周辺地域の開発

アマティトラン地熱地域の地熱資源量は、本調査地域のカルデラス周辺地域のみで、40MW以上の発電が可能であることが明らかとなった。調査の結果では、地域北方のドーム状岩体などを作るマグマ溜まりを熱源とした 200℃～300℃の地熱貯留層が調査地域から北方 5～6km のアマティトラン湖の南縁付近まで広がっているものと推定された。したがって、この地域での地熱資源は北方までを含めると膨大なものとなり、カルデラス周辺地域での地熱開発と同時にドーム状岩体周辺の調査・開発もグアテマラ国の地熱資源の有効利用という観点から重要と考えられる。

JICA