

(3) 第四系

本地域の第四系は、更新世前期の活動に始まり、下位よりLas Mellizas formation、A° Trolope volcanic rocksおよびCopahue volcanic rocksからなり盆地内部を覆っている。

この他に、酸性火砕流堆積物が本調査地域外の環状地形東南方にHualcupen formation を覆って分布している。本層は、白色の黒雲母軽石凝灰岩～火山礫凝灰岩から構成されており、今回の調査でRiscos Bayos pyroclastic flow depositsと命名した。

本層はLas Mellizas formationの下位に位置すると考えられ、Pesce(私信)によれば、本層の多量な噴出により、火山性陥没が起こったとされている。本層は、主にA° Hualcupenより南方に、わずかに分布が認められているが、今回の調査により、Rio Agrio 沿いにも分布しているのが確認された。量的にはごく僅かであり、現在確認できる最大層厚は30mである。Hualcupen formation が現在でも山体の形を成して平坦面を残している部分でもこの層の分布は確認出来ず、Caldera formingの大量噴出があったのか、証明するに足るデータは得られていない。これが事実とすれば、盆地内には、本層が堆積しているものと考えられる。

Las Mellizas formationは、主に火山噴出物と湖成堆積物からなり、環状盆地内に厚く堆積している。Las Mellizas formationの主体をなす火山噴出物は、玄武岩質安山岩～安山岩溶岩、集塊岩、凝灰角礫岩、凝灰岩及び溶結凝灰岩から構成されており、環状盆地内及びChile側に分布している。火山噴出物の中心は、Las Mellizas formationを形成している原地形(溶岩流の方向)から、現在のVn. Copahue とほぼ同じ位置に相当すると考えられる。噴出の中心では溶岩は厚く、東側に行くに従い、火山碎屑岩の割合が多くなっている。

一方、湖成堆積物は、凝灰質礫岩、砂岩、泥岩から構成されており、環状盆地形成後盆地内に生じた湖に堆積したもので、Chile側のLas Mellizas formation中には分布していないものと推定される。この湖成堆積物は火山活動の中心部である西側で薄く、東側で厚く堆積しているものと考えられ、火山噴出物中に挟在している。今回、湖成堆積物の卓越する層を新たにCaviahue conglomerate memberとした。

Caviahue conglomerate memberは、上部層と下部層に大別される。上部層はA° Dulce やLago Agrioの南側に露出している。A° Dulce で掘削したPC-15は地表か

ら坑底(70m)間、礫岩を主体とする湖成堆積物であり、地表で確認している約30mを加えると100m以上の層厚をもつ。

また、6坑の熱流量調査坑に同層準の堆積岩類の記載がなされており、この内PC-1の泥岩を今回のコア調査で確認した。

下部層は、COP-2の814~1,160m間に分布する。COP-1では全量逸水のため、地質が不明である。

Las Mellizas formation最上部層として、Lago Agrioの南東部に溶結凝灰岩が分布する。本岩は分布も狭く詳細は明らかではなく、今後の課題となる。

Las Mellizas formationの厚層については、Chile側で1,800m以上(Pesce, 1987)、COP-2坑で1,241m以上を確認している。

年代に関するデータはないが、更新世前期には本層の活動はあったものと推定される。なお、Las Mellizas formation形成時に、Trolon volcanic rocks及びC° Bayovolcanic rocksが環状盆地北方で噴出した(Pesce, 1987)。

A° Trolope volcanic rocksはカルデラ内北部のA° Trolope及びその本流であるRio Agrio沿いに東西に分布している。本岩はマフィック鉱物の少ない斜長石安山岩であり、風化によって粒状になる特徴を示す。本岩は割れ目噴火によって形成されたものと考えられ、A° Trolopeの谷底に分布しているため、Pesce(1987)はEfusiones de Fondo de Valleと称している。一方、Lago Agrio近傍に分布するLas Mellizas formationの上部に上述の斜長石安山岩と類似の岩石が分布しており、A° Trolope volcanic rocksである可能性もあるが、今回の調査ではその関係は明らかにできずこれを下位のLas Mellizas formationとした。

Copahue volcanic rocksは環状地形西端に分布しており、本地域で最も新しい火山活動である。本岩は輝石かんらん石玄武岩及び火山砕屑岩からなる。Copahue火山は3回の火山活動によって形成され、Niemeyer y Muñoz(1985)は、前氷河期に現在の主な火山体が形成されたとしている。最後の火山活動は氷河期の後のもので、氷河による擦痕が認められないことは確かである。また、Pesce(1987)は、Copahue火山の南東の麓にショショナイト系列のドームが分布すると述べている。

その他、表層には氷河堆積物が、環状盆地斜面には崖錐堆積物が、Lago AgrioやLago Trolopeに注ぐ河川沿いには沖積層が分布している。この内、表層に広く分布している氷河堆積物は地質図からは複雑さをさけるため除いた。

3. 地質構造

本地域は広域的にみるとサブタグションゾーン後方のN-S方向に伸びる造構的起伏帯の引張応力場に位置する。一方、調査地域は鮮新世の成層火山を母体とし、そこに発生した火山性陥没による盆状構造の形成とそれに続く第四紀火山活動からなる複合火山体で特徴づけられる。

(1) 環状構造

環状の盆状構造は、Fig.5-6に示すようにWNW-ESE方向に長軸を持つ楕円形を成している。後述のブーゲ異常が示すように、環状盆地外縁のHualucupen formation分布域は高重力域となっており、環状盆地内のLas Mellizas formation分布域はLago Agrioの北方を中心とした低重力域となっている。低重力域の形態は、西方を除き盆状構造とほぼ一致し、火山性陥没構造を反映していると考えられる。

調査井、熱流量調査坑、現地踏査及び重力探査結果に基づき作成した本地域の地質断面をFig.5-7に示す。基盤(Hualucupen formation)までの深さは、重力の2次元深度解析結果から、Lago Agrio北方で2,000m程と考えられる。一方、Copahueを中心とする地熱徴候地周辺は、ホルストを成しており、カルデラ基盤までの深さは1,600m前後と考えられる。ホルスト側のCOP-2と後述するグラーベン側のCOP-1との間では、290mの落差が推定される。Las Mellizas formationに存在する湖成層は、重力探査結果からみると、Lago Agrio北方を中心に厚く分布するものと考えられる。

(2) 断層

当地域の構造を規制する主要な断層系は以下の通りである。

(a) WNW-ESE系

WNW-ESE系は、Paso Copahue-Lago Agrio グラーベンを形成した断層で代表される。この断層はカルデラを横断し、Chile側へと伸びている。このグラーベンの北側の断層は、Chancho Có, Las Mellizasの北岸及びLago Agrioの北岸を通り、ほぼ垂直ないしSSWに急傾斜する正断層である。Paso Copahue付近の地形から200m程の落差が認められるが、東方に向かってその落差は次第に小さくなる。

一方、WNW-ESE系は南方のA° Hualcupenの流路を規制するもの、及びVn. Copahueの頂上のものが認められる。また、環状地形の北及び南の壁もこの方向に規制されていると考えられる。

以上のようにWNW-ESE系の断層はその規模も大きく、N-S系の構造と共に広域的な応力場により形成されたものと考えられ、環状盆地形成前より活動しているものと思われる。

(b) NE-SW系

NE-SW系の断層は、Copahueを中心とする地熱地域に多く認められる。これらの断層は航空写真で明瞭に追跡でき、Vn. Copahue北東斜面から地熱徴候地の北東域にかけて分布が認められる (Fig. 5-8参照)。特にCopahue付近では平行する断層群により小さな落差の陥没を生じているが、その他は全般に落差が少ない。これらは張力断層で全般に急傾斜を成し、確認した断層では破碎幅は4~5mである。

また、NE-SW系はVn. Copahueの北西の沢、南東のPaso Picun Mahuidaの谷を規制しており、Lago Agrioの南西にも認められる。

以上の様にNE-SW系は、その分布からみてVn. Copahueの活動と密接に関連したローカルなものであり、その活動時期は新しい。

(c) NW-SE系

NW-SE系の断層は、Las Mequinas北東のA° Blanco沿いで今回確認した。この断層はN30°~40°W・60°~70°Wの走向・傾斜を持つ2本の逆断層で、破碎幅はいずれも10m前後に達する。

これらの断層を境に東側では、地熱徴候や変質帯が認められないことから、熱水流動をさえぎる不透水層の働きをしているものと考えられる。

また、これらの断層はLas Mellizas formationの最上部層に変位を与えておらず、航空写真によっても明瞭なリニアメントとして抽出できなかった。このことは、逆断層の主要な変位は、Las Mellizas formationの火山活動終了前に終了したことを示している。

Las Mellizas formationを切るNE-SW系の断層は、Vn. Copahue活動期のローカルな圧縮衝上に起因して発生しており、この時Termas de Copahue北東部に逆断層を伴ったとされている (Pesce, 1987)。この逆断層は本調査で見出した逆断

層よりさらに北東側に位置している。従って、ローカルな圧縮衝上は、Las Mellizas formation活動時とVn. Copahue活動時の2度存在したものと考えられる。

なお、今回確認した2本の逆断層は、重力探査結果からみて地熱徴候地を中心とするホルストの東側を境にするものと考えられ、電気探査結果の深部低比抵抗層の盛り上がり部とも一致する。

地表地熱徴候と断層との関係は以下の通りであるが、この一帯は後述のリニアメントの分布密度も全般に高い。

1) Las MaquinasおよびChancho-CóはWNW-ESE系の断層沿い

2) Copahue, Las Maquinitas及びAnfiteatroはNE-SW系の断層群の発達地域
LANDSAT画像及び航空写真から判読したリニアメントは、前述のWNW-ESE系及びNE-SW系の断層と同一方向のものが最も多く認められる。WNW-ESE系のリニアメントはほぼ全域に分布するが、Paso Copahue-Lago Agrioグラベン沿いに分布密度が高い他、環状盆地の北及び南縁にも認められる。NE-SW系のリニアメントは、Vn. Copahue, Copahue地熱徴候地及びLago Agrio北方にかけて分布密度が高い。

(3) 地質構造発達史

Copahue 地域にはいわゆる基盤岩類は分布せず、鮮新世から完新世まで続いた火山噴出物及び湖成堆積物から構成されており、アルゼンティン-Chile国境域にかけて発達する溶岩台地中に発達した火山活動によって特徴づけられる。前節までに述べた地質層序及び地質構造から、Copahue 地域の地質構造発達史は次のようにまとめられる(Fig.5-9)。

(a) 第1期(鮮新世)

明らかにされたCopahue地域の火山活動は鮮新世に始まり、Hualcupen formationを生じたこの火山は安山岩溶岩と集塊岩を交互に噴出し、Las Mellizas付近を山頂とする成層火山を形成した。層厚はChile側で1,800m以上である。

(b) 第2期(鮮新世後期~更新世前期)

酸性火砕流を伴う火山性陥没により環状盆地が形成した。この火砕流堆積物の

詳細データは得られていないが、現在の火砕流堆積物は本調査地域東方に分布しており、また環状盆地内にも堆積しているものと考えられる。

(c) 第3期（更新世前期～中期）

環状盆地形成後、その西端に安山岩～玄武岩質安山岩及び集塊岩からなるLas Mellizas formationが噴出し、環状盆地内及びChile側に流出した。一方、盆地内東側には湖が形成し、湖成堆積物が堆積した。湖成堆積物には大きく2回の堆積作用があったものと推定され、いずれも西側で薄く、東側で厚く堆積した。

Las Mellizas formationは環状盆地の大部分を埋めた。Las Mellizas formationの活動時に環状盆地の北側ではBayo火山やTrolon火山の活動があった。

また、Las Mellizas formationのマグマ活動に起因するホルストの形成が始まった。

(d) 第4期（更新世中期）

引き続き、A⁰ Trolope沿いに割れ目噴火によって安山岩が噴出し、環状盆地の外側まで流出した。

(e) 第5期（更新世後期～完新世）

Vn. Copahueの活動が起こり、玄武岩溶岩及び火砕岩が噴出した。本活動は、3回に大別でき、最後の火山活動は氷河期後の噴出である。Vn. Copahue活動時に、ホルストの隆起が再活動し、引張系の開口性の割れ目が多数発達した。Termas de Copahue, Las Mellizas及びAnfiteatroの地熱活動は、この時期のマグマ留りの上昇と断裂の活動に起因するものと推定される。

4. 地熱徴候

本地域には5カ所の地熱徴候地が存在し、このうち1カ所はチリ側に分布している。それらの面積は約1.2km²である。アルゼンティン側に分布している地熱徴候地は、Termas de Copahue, Las Maquinas, Las Maquinitas, Anfiteatroで、いずれもCopahue火山北東側のホルスト部に位置する。これらの地熱徴候地は全て馬蹄形状の窪地をなしており、酸性変質帯を形成している。これらの徴候地にはNE-SW系WNW-ESE系等の断裂が多数発達し、断裂と関係があるものと考えられる。窪地内には多数の噴気、温泉がみられる。噴出する総熱水量を推定することはできないが、蒸気の噴出が主であり、その流出している熱水が少ないことから地下からの地熱流体の供給は

多くないと考えられる。Chile側の地熱徴候地は、CopahueからChile側への国境、Paso de Copahueを越えたところにあるChancho C6に分布する。

以下に各地熱徴候地について記す。

(1) Termas de Copahue

Termas de Copahue は、本地域最大規模の地熱地帯であり、温泉治療のための施設 (Servicio Médico Termal) がある。Termas de Copahue の噴出する総熱水量は明らかではないが、最も大きな治療用プールから流出する熱水量は目測で200～300ℓ/分であり、その他2, 3のプール以外は顕著なものは認められない。治療用プールの内、“Chancho” と“Sulfurosu” と呼ばれているプールは、コロイド硫黄で白濁しており、ガスが随所で泡立っている。

Termas de Copahueの変質帯は白色粘土を主とし、窪地中央から北東側に広がっており、南壁にも分布している。

(2) Las Maquinas

Las Maquinasには、Termas de Copahueほど規模は大きくないが、大きな湯沼とそれを取り囲む噴気群がみられる。湯沼の温度は高くないが、ガスが随所に発生しており、コロイド硫黄で白濁している。噴気帯一帯は、昇華物を伴い変質が激しくてマッドポットもみられる。

Las Maquinasで A° Blancoの下流に2本の逆断層が確認され、その断層の東側では全く変質を受けていない。また、Las Maquinasの窪地内の噴気配列はWNW-ESEの方向を示す。

ここにはClinica Militarの保養設備があり、利用されている。

(3) Las Maquinitas

Las Maquinitasは、本地域の地熱地帯で最も小さな徴候地である。NE-SWの断層沿いの上下の2つの窪地からなり、現在活発な徴候地は下段の窪地である。ほとんどの流体の噴出温度は、この標高に見合う沸騰温度である93℃を越えないが、Las Maquinitasでは132℃の過熱蒸気の存在が知られている (JICA, 1987)。また、小さなプールも存在する。流出する熱水量はわずかで、雪解け水とあわせても50ℓ/分程度である。

(4) Anfiteatro

AnfiteatroはTermas de Copahueの属するホルストの最も西部に位置しており、あまり活発な地熱徴候地ではないが、噴気やマッドポットなどがみられる。この窪地は爆裂火口の跡とも見える様相を呈している。

(5) Chancho Có

Chancho Cóは顕著なWNW-ESE系の断層に沿って細長く分布しており、アルゼンティン側の地熱地帯の窪地内に発達しているものと異なる。Chancho Cóもほとんどが噴気であり、微々たる熱水が流れた跡が観察される。

以上の徴候地の他、Copahue火山にはガスの吹き込みによって酸性化した火口湖があり、湖水は強酸性で白く濁っており、HClと考えられる独特な刺激臭がある。また、この火口湖を源とするRio Agrioは、比較的下流でもpH1.2の強酸性を示しており、ClとSO₄が多量に含まれている。

5.1.3 物理探査

1. 重力探査

(1) 探査の概要

環状盆地内において、1975年にYacimientos Petroliferos Fiscales (Y P F)により重力探査が行われた。探査範囲は $14\text{km} \times 13\text{km} \approx 180\text{km}^2$ で、測点数は285点である。使用した重力計はウォルドン重力計である。入手出来た資料は、補正係数 $K = 0.215\text{mgal/m}$ ($\rho = 2.23\text{g/cm}^3$) 及び $K = 0.200\text{mgal/m}$ ($\rho = 2.59\text{g/cm}^3$) のブーゲー異常図と、 $K = 2.15\text{mgal/m}$ についての重力残差図 ($R = 1.5\text{km}$) である。

(2) 全体的構造

補正係数 $K = 2.5\text{mgal/m}$ のブーゲー異常図^(2, 6)を Fig. 5-10 に示す。

1) これによれば、Termas de Copahue からLas Maquinasにかけての付近には、高重力の張り出しが見られるが、この張り出しを除けば、全体としてかなり整然とした環状形状を示す。この形状は、火山構造的陥没を反映したものと考えられる。

2) Fig. 5-10に示すa-a'断面とb-b'断面について、JICAチームにより、2次元2層構造解析を試みた。解析は、まずa-a'断面について、両端付近のカルデラ壁に露頭するHualcupen formation をコントロールポイントとし、 $\Delta\rho = 0.20, 0.25, 0.30\text{g/cm}^3$ について行った。次にb-b'断面について、東端付近のカルデラ壁に露出するHualcupen formation とa-a'断面交点におけるa-a'の結果とをコントロールポイントとして解析した。解析結果をFig. 5-11に示す。

3) 解析された深度断面は、盆地底部を構成するHualcupen formation の上面をほぼ反映したものと考えられる。特に $\Delta\rho = 0.25\text{g/cm}^3$ による深度が比較的良く盆状構造を反映しているものと考えられる。但し、b-b'断面東部の最深部付近や、a-a'断面両側の最深部付近では、もう少し浅くなり $\Delta\rho = 0.3\text{g/cm}^3$ による解析深度に近くなる可能性が考えられる。

(3) 局部構造

1) Termas de Copahue からLas Maquinasにかけての付近には、高重力の張り出しがある。また、これから東南東に向けては、 $2 \sim 3\text{mgal}$ 程度の屋根がb-b'線を中心に約4kmの幅で延びる。これらの高重力帯にはホルスト構造の存在が考えらえ

るが、Las Mellizas formationの溶岩流出中心線とほぼ一致することから、密度の高い溶岩の厚みの影響もかなり大きいものと考えられる。

- 2) Las Maquinas付近を北西-南東に延びる西側傾斜の逆断層が確認されている。重力等高線は、これに沿って直線的な急傾斜を示し、その西側で高重力を示すが、これは上記逆断層によるホルスト構造を示すものと考えられる。
- 3) Laguna Las Mellizas (1)からCaviahueにかけて、低重力帯がWNW-ESEの方向に延びる。この低重力帯の北東沿いは、Chancho C6からLago Agrio北岸に続く断層とほぼ一致することから、この低重力帯に断層に伴う地溝を示す可能性が考えられる。

2. 電気探査

(1) 探査の概要

1980年(第一次)と1982年(第二次)の2回にわたり、Latinoconsult/ELC Electroconsultにより電気探査(シュランベルジャー法)が行われた。

第一次探査⁽¹⁾は、Copahue付近一帯からCaviahue付近一帯にかけての広い範囲について実施されたもので、最大電極間隔 $AB/2=2,000\text{m}$ (一部700, 1000, 3000m)により56測点が行われた。これらのうち、13測点については、直交する2方向の測線について測定したので、測点数は計69測点である。これらの結果は、 $AB/2=500, 1000, 1500, 2000\text{m}$ の4種類の見掛比抵抗分布図、13種類の解析比抵抗断面図、高比抵抗層上面深度分布等にまとめられている。

第二次探査⁽²⁾は、第一次探査で示徴を得た深部低比抵抗層の存在を確認する目的で実施された深部電探で、最大電極間隔 $AB/2=5,000\text{m}$ により7測点が行われた。これら7測点のうち、3測点については、異方性をチェックするため3~4方向の測線について測定したので、測線数は計15測線である。これらの結果は、既存データの再解析を加え、6種類の解析比抵抗断面図、高比抵抗層上面深度分布図、深部低比抵抗層上面深度分布図等にまとめられている。

これらのほか、1987年にCREGENによりLago Agrio北東方の一画で11測点($AB/2=1,500\text{m}$)が行われた。

(2) 比抵抗層とその解析精度

V E S 曲線の解析には一部主観の入る要素もあるが、見掛比抵抗分布やCOP-1, 2 坑における電気検層結果等を吟味した結果、第一次探査の解析は、概ね妥当であると考えられる。但し、深部低比抵抗層については、第二次探査の解析結果に従った。

(a) 解析比抵抗層の分布概要をFig. 5-12に示す。本探査地域の比抵抗層はFig. 5-14 に示す三角形の内部（以下三角地帯という）では3～4層に、外部では2～3層に解析される。これらの比抵抗層は次の6つに区分される。

- ① 表層部高比抵抗層：± 170Ω - m (100 ~ 700Ω - m)
- ② 周辺部中比抵抗層：± 20Ω - m (11 ~ 30Ω - m)
- ③ 浅部低比抵抗層：± 8Ω - m (4 ~ 14Ω - m)
- ④ 中深部高比抵抗層：± 150Ω - m (70 ~ 380Ω - m)
- ⑤ 深部低比抵抗層：± 7Ω - m
- ⑥ 深部高比抵抗層：± 150Ω - m

但し、噴気地一帯における比抵抗値は各層とも低く、次のように解析される。

- ①' ± 20Ω - m
- ③' ± 5Ω - m
- ④' ± 45Ω - m

なお、これらの比抵抗層区分のほかに、地表近くには薄い高比抵抗層（最大深度40m以浅）が分布するなど、断面図には①に含めて表示した。

(b) Fig. 5-12 からわかるように、最も特徴的なことは、上記三角地帯の内部と外部との間に明瞭な差異が認められ、三角地帯内部はいわゆる高比抵抗基礎の隆起帯として特徴づけられることである。すなわち、深度1,000m付近までの比抵抗構造は、三角地帯外部では高比抵抗層 - 中比抵抗層の2層に解析されるのに対し、三角地帯の内部では高比抵抗層 - 低抵抗層 - 高比抵抗層の3層に解析される。これらの特徴は、次の図に示すV E S 曲線のタイプのちがいから明瞭である。

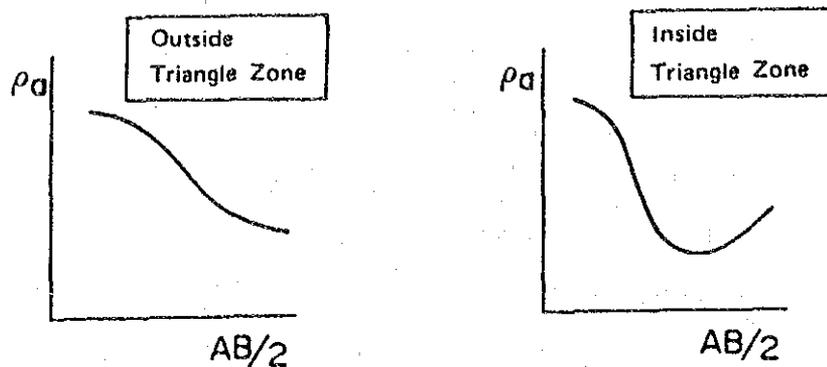


Fig. 5-13 Characteristics of VES Curves

(c) 深部低（又は高）比抵抗が、深部 800～1,800m間で認められた。一般に、最下部層の検出限界深度は $AB/2 = 2,000\text{m}$ で約1,000m、 $AB/2 = 5,000\text{m}$ で約2,000～2,500mである。従って、深部低（又は高）比抵抗層の深度及び比抵抗値は、多分に定性的であって、その誤差は大きい。

(d) 深部低比抵抗層の存在は、地熱構造の解明にとって重要である。今回の探査では9測点（9/10, 31/32, 7/8, 22/23, D-I, II, III, 13）で検出されたもので、その形状は深度1,800m付近に水平に分布するもの（⑤）と、Termas de Copahue 付近とLas Maquinas付近の比較的浅い深度に検出されるもの（⑥'）に分けられる（Fig. 5-12）。深部水平低比抵抗層（⑤）の存在については高い精度で確認された訳ではないが、地熱系モデルの構築にあたっては、本層は三角地帯内部に広く分布する緑泥石化した変質帯に対比されると考えられる。

(3) 各比抵抗層の解釈とその分布

各比抵抗層の解釈とその分布について述べる。

(a) 表層部高比抵抗層（①±170 Ω-m、①'±20Ω-m）

1) 本層は、調査地全域を覆って分布するもので、その深度は三角地帯内部で、100～150m、外部で150～300mである。本層の下面は、地下水位を反映し

た可能性が強いものとみられる。

2) 噴気地一帯では深度約50mと浅くかつその比抵抗値も低下する。

(b) 周辺部中比抵抗層 (② ± 20 Ω - m)

1) 三角地帯外部の深度 150~300 m以深に厚く分布するもので、11~30 Ω - mと比較的均一な比抵抗値を示す。

2) 溶岩層の比較抵抗値を 300 Ω - m、泥質岩の比抵抗値を 5 Ω - mと仮定し、地層の平均比抵抗値を20 Ω - mとすると、泥質岩の含まれる割合は約25%となる。

Lago Agrioに近い調査地南東部における本層の比抵抗値は11~15 Ω - mとやや低い値を示す。このことは、調査地北西部に比較して調査地南東部では、泥質岩類の含有量がより多くなることを示すものかもしれない。

(c) 浅部低比抵抗層 (③ ± 8 Ω - m、③' ± 5 Ω - m)

1) 三角地帯内部では、本層の上面深度は100~150mを示し、噴気地帯から離れられる南西側では次第に深くなる。層厚も同様で、南西側にかけて次第に厚くなる。

2) 現在の噴気地周辺では、深度50m付近から深度100~200m付近までの間に分布し、その上面深度と層厚は著しく浅くかつ薄い。ここでは、比抵抗値も5 Ω - mとやや低い。このような局部異常は、その他の個所には認められないことから、地熱流体の地表への流出個所は、現在の噴気帯に限られることを示すものと考えられる。

(d) 中深部高比抵抗層 (④ ± 150 Ω - m、④' 45 Ω - m)

本層の上面深度分布図をFig. 5-14に示す。地表から本層上面までの深度は一般に400~800mで、噴気地側で浅く南西側で深くなる。噴気地周辺では深度100~200mと著しく浅く、蒸気卓越ゾーンが地表近くまで迫っていることを示すものと考えられる。噴気地周辺では、比抵抗値は±45 Ω - mと低い。

(e) 深部低比抵抗層 (⑤、± 7 Ω - m)

深部低比抵抗層の検出深度を Fig. 5-15 に示す。このうち、深度1,800m付近に水平層として表示した深部低比抵抗層は、泥質基礎岩に相当する可能性も一応考えられる。しかし、三角地帯外部では本層は高比抵抗層として検出されることを考慮すると、その可能性は極めて少ないものと考えられる。本層は、貯留構造的にいて、塩分濃度に富む高温熱水層に相当するとみるのが妥当であろう。

(f) 深部高比抵抗層

三角地帯北側の測点59, 46, 63, 60とLago Agrio北側の42, 3, 16, 29, 28の深度1,500m付近に、深部高比抵抗層が検出された。これらのほか、13, 17, 40, 30でもその徴候が認められる。深度が深いため、解析深度とその比抵抗値についてはかなりの誤差を含むが、三角地帯を除く全調査地域に分布する可能性が強いように思われる。この場合、本層は基盤であるHualcupen formationに相当する可能性が強いように思われる。三角地帯内部では、本層は低比抵抗層として検出されるが、これは地熱構造に基づく局所的な現象と考えられる。

(g) 三角地帯外周境界

電気探査による高比抵抗基盤の隆起帯の境界は、次の断層とほぼ一致する。

- 1) 南西側境界：Chancho CóからLaguna Las Mellizas (1)を通り、Lago Agrio北岸に続く断層
- 2) 北側境界：Termas de Copahue北方約1.5km付近をENE-WSWに延びる断層
- 3) 東側境界：Las Maquinas 北東方約1 km付近をNW-SEに延びる2本の平行断層

(h) 三角地帯北東部の低比抵抗帯

Fig. 5-12 及び Fig. 5-15 に示すように、Termas de Copahue からLas Maquinasにかけての一带に、深部低比抵抗層の盛り上がりが検出された。

この盛り上りの上位にある比抵抗層も、④' ③' ①' といずれも他に比較して低い比抵抗値を示し、全体として低比抵抗帯を形成する。この低比抵抗帯の位置は、深部において前項で述べた逆断層と一致する。この低比抵抗帯は、地熱流体の上昇通路の周辺が幅広く変質されていることを示すものと考えられる。

5.1.4 地化学調査

1. 地表水及び温泉水の化学組成

(1) 既存資料の検討

地化学調査として系統的に行われたものとしては次の3つがある。

- ① Jurio (1977) による Analisis Quimico de Aguas y Condensados Acuosos, 16 データがある (文献C-20)。
- ② Latinoconsult/ELC-Electroconsult (1980) によるもので、Copahue を中心に約40点 (他にpHとECのみを測定したものを約40点) について主要なイオンの分析を行っている (文献C-1)。
- ③ Panarello et al. (1985) によってまとめられた同位体に係る報告書の一部として9地点について水の化学分析値が挙げられている (文献C-18)。

上記の②の40点のうち詳細な位置の不明なCopahue 地区の3地点を除き、③の中から位置の判っているCopahue地区の3点を採り、計40点について検討した。

なお、①については詳細位置が不明であり、データも古く、かつ有効数字も他より1桁粗い等の理由からすべて割愛した。

これらの試料の採取位置とその分析結果を Fig. 5-16 及び Table 5-3 に、分析結果のキーダイアグラム及びヘキサダイアグラムをそれぞれ Fig. 5-17 及び Fig. 5-18 に示す。

(2) 考察

本地域には4つの地熱徴候地があり、それぞれに対応する温泉水のサンプル番号は次のとおりである。

- ① Las Maquinas No.28, 29, 30, 31, 32
- ② Las Maquinitas No.33, 34
- ③ Anfiteatro No.35, 36, 37 (但し、本地区は1987年12月の調査時点では湧出がなく採取不可能)
- ④ Termas de Copahue No.38, 39, 40

これらの温泉水のうちNo.30, 37を除く試料について (除外理由については後述) 主要陰イオンの相対的な量比に注目するとLas Maquinas (No.32を除く)、Las Maquinitas, AnfiteatroはSO₄ 型に、Termas de Copahue はHCO₃ 型に分類できる。

主要陽イオンのNa, K, Ca, Mgに注目すると、これらの溶存量が極めて少ないという共通した特徴がみられる。Termas de Copahueは他の3地区に比較するとやや多い。つまり、Termas de Copahueの温泉水には上記陽イオンの炭酸塩がより多く含まれている。相対的な量比ではLas Maquinas, Las Maquinitas, Anfiteatroの温泉水はCaに乏しい。一方、それら以外の陽イオンでは、Las Maquinas, Las Maquinitas, AnfiteatroでNH₄が注目される。これらの温泉水はNH₄を含むものと全く含まないものと両極端に分かれる。あまり良い相関ではないが、pHの高い温泉水にはNH₄が含まれていないようである。今後Termas de CopahueについてNH₄の分析及びLas Maquinas, Las Maquinitas, Anfiteatroについての継続分析が期待される。以上をまとめると、Las Maquinas, Las Maquinitas, AnfiteatroはNH₄ - SO₄型、Termas de CopahueはHCO₃型（陽イオン不明）ということが出来る。いずれの成分も揮発性であることを考えると、これらの温泉の成因として地下深部からのガスによる浅部地下水への吹き込み、過熱が示唆される。

また、本地域ではTable 4-3に示す様に河川水、湖沼水、湧水等についても多数分析されている（No.1~27）。その多くは溶存成分が少なく、電気伝導度、湧出温度共に低く、ほとんど天水に近い地表水又は浅部地下水と考えられるが、2、3特徴的な点として以下のことが挙げられる。

① Rio Agrio沿いのNo.3, 4, 11は溶存成分特にSO₄とClが多く、pHも低い。

特にNo.11は本地域の分析値中最低のpHと最高の溶存量を示す。これは、その源流に火口湖Lag. del Volcanがあり、その湖水には大量のClとSO₄が溶存していることが推定され、その影響で下流の河川水が高ClとSO₄、低pHを示していると考えられる。この影響はLago AgrioのNo.5にまで及んでおり、また水系を異にするNo.2もLag. del Volcanに起因した土石流の分布により、この影響を受けていると推測される。同火口湖の湖水の化学分析値は得られていないが、下流の河川水が上述のように著しく高濃度のClとSO₄を溶存させていること及び湖水付近にHClガスが漂っていることから、この湖水に吹き込んでいるガスの化学組成はHClとSO₂（或いはH₂S）を主体とした高温の火山性ガスである可能性がある。

② 上記のLag. del Volcan の湖水の影響を受けていると思われる地表水、湧水を除くほとんどの試料の溶存成分は著しく低い。その中でわずかに溶存成分が多いものとしては、No 6, 7, 8, 13, 20, 24がある。No 20はTermas de Copahue の近傍、No 6, 13は地熱徴候地の下流に位置するのでそれらの影響を受けている可能性がある。残りのNo 7, 8, 24はわずかながら地熱徴候を示している可能性があり、前記Las Maquinas、Las Maquinitas、Anfiteatro、Termas de Copahue 以外にもLag. Las Mellizas付近にまで地表地熱徴候地が広がっているのかもしれない。

2. 噴気ガスの化学組成

(1) 既存資料

噴気ならびに蒸気中のガス分析については、過去数回に亘って行われているが、その概要は次のとおりである。

	文 献	文献No	内 容
①	Jurio (1977)	C-20	Chancho C6 2点を含む計11点
②	Latinoconsult/ ELC-Electroconsult (1980)	C-1	6地点12データ (注)
③	— (1981)	C-2	COP-1 を含み 3 データ
④	COPADE (1982)	C-4	COP-1 の 7 データを含む計13データ
⑤	PISA (1986)	C-22	COP-1 COP-2各 1 を含む計10点

注) この他、CO₂ を除いたガス組成が 8 データあるが割愛した。

(2) 考 察

本地域内の噴気ガスの組成を地域毎にまとめてTable 5-4 に示す。また、CO₂、H₂S、Rガスについてその相対的な比を Fig. 5-19 に示す。なお、JICAの実施したCOP-1、COP-3の結果もこれに併記した。これから次のことがいえる。

本地域の噴気ガスはそのほとんどが著しくCO₂ に富む (90%以上) という特徴を有する。唯一の例外としてChancho C6の噴気ガスはCO₂ が相対的に少なく、H₂S とH₂ がそれぞれ10~16%程度を占める。

Las Maquinas、Las Maquinitas、Anfiteatro、Termas de Copahue及び COP-1, 2, 3 の噴気ガスはCO₂ が90%以上でH₂Sが1%以下とCO₂ に富みH₂Sに乏しい組成を示す。

これは一般的な火山ガス或いは噴気孔に伴うガスとは異なり、むしろ温泉に伴うガスに近い組成である。

Las Maquinasのガス組成とCOP-1のそれは非常に似ており、ガス組成上からほとんど区別ができない。両者は地理的にも近接していることからLas Maquinasの噴気はCOP-1と同じ貯留層中の蒸気が断裂等を通して上昇し直接地表に達したものである。

なお、今回分析したCOP-3のガス組成はCO₂ が95%でLas Maquinitasの組成に近い。

ガス組成から計算された地化学温度 (D'Amore and Panichi, 1980) も Table 5-4 に併せて示してある。その結果も4試料を除くと残りは総て205~230°Cの範囲に入り、地区間にも顕著な差異は認められず、COP-1, 2, 3 で確認された温度に極めて近い値を示している。

3. 温泉水、地表水及び噴気と同位体組成

(1) 既存資料の検討

Copahue地区の同位体組成についてのまとまったものとして、Table 5-5 に示すようにPanarello et al. (1985) による報告がある (文献C-18)。それによると、同年2~4月、19地点においてサンプリング、定量がなされている。また、同報告にCOP-1の1982年のデータが1個引用されている。更にその後、1986年11月IIRG (Italy)によってCOP-1及びCOP-2の噴気について同位体の測定が行われている。これらの試料採取位置並びに $\delta^{18}\text{O}$ - δD の関係を Fig. 5-16 及び Fig. 5-20 に示す。なお、今回JICAが実施した結果も併記する。

(2) 考察

Fig. 5-20から以下のことが読み取れる。Las Maquinas、Las Maquinitasの噴気、及びCOP-1, 2及び3の噴気を除くと一般的な天水の同位体比を示すとされているCraig (1961)の式 $\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ を表わす線上に乗り、本地域の温泉水及び

地表水、地下水は基本的に天水起源であると考えられる。

Termas de Copahue の温泉水及び近傍の地表水 (I-9 ~13, 15) は $\delta D = 11 \sim 12\%$ 、 $\delta^{18}O = -82 \sim -85\%$ と非常に良くまとまった値を示す。これらの値は上で述べた標高 2,200 ~ 2,300m 付近の天水の値とは明らかに異なる。すなわち Termas de Copahue の温泉水の起源は比較的近傍に降って地下にしみ込んだ天水であり、遠くの高標高部に降りしみ込んだ天水が流れてきたものではないと考えられる。

Las Maquinas、Las Maquinitas の噴気 (I-6, 7) の同位体比は後述する COP-1, 2 の初期の噴気 (I-1, 4) の値に近く、同一の起源を有することが推定される。

COP-1, 2 の蒸気凝縮水の同位体比はいずれも δD 、 $\delta^{18}O$ 共に増加するという経時変化を示す。これはその蒸気をもたらしている本源的な地熱流体の同位体比が変化したというよりも地下深部における気液分離時の条件の変化で気液比が変わったことによると考えられ (D'Amore et al., 1987)、貯留量に比して生産量の割合が大きい可能性が指摘された。

3H についてみると、地表水及び浅層地下水 (I-14 ~ 22) は 2 ~ 5 TU 程度のほぼまとまった値を示す。これより大きな分析値は得られていないことも考え合わせるとこれらの値は本地域の現在ないしは近い過去の天水中の 3H 濃度を示していると考えられる。Termas de Copahue の温泉水の 3H 濃度は 2 ~ 3 TU と上記の値と似ているが、若干低めの値を示す。従って、これらの温泉水の起源は近い過去に降った天水と考えられる。1950年代以降の本地域の天水の 3H 濃度の変化は全く不明であるが、仮に分析試料中最高値を示す 4.8 TU を天水の値、Termas de Copahue 温泉の値を 3 試料の平均値 2.5 TU とし、閉鎖系とすると降水後 10 年程度たった水という計算になる。

Las Maquinas、Las Maquinitas の噴気及び COP-1, 2, 3 の蒸気の値はいずれも 1 TU 以下と低い値を示す。これが古い降水起源を示すものか、気液分離時の同位体分別効果に起因するものかは明らかでない (恐らく後者の影響が強いであろう)。

4. 土壌地化学調査

土壌地化学調査は 1 m 深地温、土壌ガス中の CO_2 濃度及び土壌中の Hg 濃度の 3 項目が測定されている (Pedro et al., 1986)。

測定は Copahue 地区で 70 点、Caviahue 地区で 50 点行なわれ、その測点は 500 m 間隔

のグリッドに配置されている。測定は86年1月から2月にかけて実施され、1 m深地温については、経日変化測定と高度補正が行われている。

調査結果によると、Cavihue地区で得られた各測定値は使用機器の限界に近く、また顕著な変化が認められない。一方、Copahue地区では温度、CO₂濃度及びHg濃度とも顕著な異常が認められる。

Copahue地区の調査結果をFig. 5-21に示す。Termas de Copahue 及びLas Maquinasの徴候地は、1 m深地温（残存温度 > 4.5 °C）、Hg濃度（> 100ppb）及びCO₂濃度（> 0.15%）のいずれもが高く、現在及び過去において活発な地熱活動が行われてきたことを示している。また、Las Maquinasの徴候地の周辺も各測定値は比較的高い値を示している。

一方、調査地域の北東域にHg濃度（> 20ppb）及びCO₂濃度（> 0.1%）の高い地域が認められるが、その地域はLas Maquinitas, Las Maquinasから流下する小河川によって運ばれた土砂で覆われ、植物が繁茂しており、Hgはその運搬された土砂の影響をCO₂はその植生の影響を受けている可能性がある。同じく、Co. de Las Maquinas南東部のCO₂高濃度地域（> 0.15%）は、1 m深地温、Hg濃度のいずれも低い値を示すことから、CO₂は植生の影響によるものとみられる。

5. 坑井地化学調査

(1) 調査数量

JICAはCREGENの協力のもとCOP-3の噴気試験期間中にCOP-1及びCOP-3に対してTable 5-6に示す地化学調査を実施した。

本調査項目の内、水ガス比（Gas Vapor Ratio）の測定は現地で、残りの分析項目については前処理を施し日本に持ち帰って実施した。

また、CREGENにおいても同時に調査が実施されている。

(2) 調査結果

JICAによるCOP-3噴気中のCOP-1、COP-3の地熱流体の分析結果はTable 5-7、5-8、5-9に示すとおりである。

(a) 水ガス比

水ガス比のガスの占める割合が大きいため、COP-3 については10回の測定を実施し、その平均値をとった。

① COP-1

水ガス比のガスは5.8% (以下特に記さない限り、Volume%) である。

② COP-3

水ガス比のガスは5%であり、COP-2噴気初期の値3.5~5%とオーダーは同じである。JICAのこの値はCREGEN実施の値(62.8ℓ NGas/kgVapor=5%、2/June/1991)とも一致する。

(b) ガス成分

① COP-1

ガス成分のアルカリに吸収されないRガスは8.75%であり、その組成はTable 4-7 に示すとおりである。

② COP-3

ガス成分の95.79%がCO₂ である。H₂S濃度は0.39%である(NaOH溶液に吸収後、酢酸カドミニウムで固定し、湿式分析)。なお、CREGENの測定では0.45% (北川式ガス検知管による) である。

ガス成分のRガスは3.82%である。

(c) 凝縮水

① COP-1

pHは5.6、電気伝導率は470μs/cmを示し、各成分とも薄くTSMは24mg/ℓである。HCO³⁻はガス成分の大半がCO₂ であることを反映して他成分と比べ含有率が高くなっている。

② COP-3

pHは5.8、電気伝導率は830μs/cmを示し、各成分とも薄くTSMは17mg/ℓである。COP-1と比較するとホウ素(B)とアンモニア(NH₃)が多く、他の含有成分に関してのオーダーはほぼ同じである。

(d) 熱水成分

① COP-1

COP-1は蒸気の産出のみであり、熱水は伴わない。

② COP-3

COP-3の噴気試験時には三角堰に熱水が0~0.8t/h僅かに出ている。しかし、Table 5-8に示す分析値を見ると電気伝導率が $300\mu\text{s}/\text{cm}$ 、 Cl^- 濃度も $2.2\text{mg}/\ell$ 小さく、また各成分とも非常に薄く、地下深部の熱水(brine)が上昇して来たとは考えにくい。

COP-3の熱水は本源的な熱水ではなく、凝縮水が変化したものと推定される。

(e) 同位体

① COP-1

Table 5-9、Fig. 5-20に示す今回のCOP-1の δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 値とも過去に調査された値と異なっている。 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ はそれぞれ -11.5% 、 -100.1% を示し前者で $15\sim 25\%$ 、後者で $3\sim 4\%$ 程度過去の値よりも軽くなっている。

この原因としては蒸気に凝縮水が混じっている状態であれば配管内でフラッシュする際に同位体分別により蒸気側で δD が数 10% 、 $\delta^{18}\text{O}$ が数%軽くなっている可能性と、本来の同位体の値を示している場合には、涵養条件または流入箇所が変化した可能性が考えられる。現地でのサンプリングは主蒸気配管から5m程度分岐した管から行っているため前者の同位体分別が生じた可能性が高い。

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ は1985年にCOP-1で測定された値は -10.9% であり、今回は -8.9% であり、オーダーは同じである(Sierra et al. 1990)⁽³⁸⁾。

$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ は $+3.6\%$ を示す。

② COP-3

COP-3の凝縮水(Condensate、I-24)の δD 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値はそれぞれ -85.3% 、 -9.4% であり、COP-1とCOP-2の値とはほぼ同じである。一方、COP-3の三角堰から採取された熱水I-25の δD 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値はそれぞれ -62.4% 、 -4.3% であり、これは温度 $100\sim 114^\circ\text{C}$ における同位体分配に一致することからセパレーター内部での動的な蒸発が原因で生じたものと考えられる。この2つの値

と蒸気量、熱水量から元の蒸気同位体比を求めると δD は約 -84 %、 $\delta^{18}O$ は約 -9% となる。

また、Fig. 5-20に示すように I-24 は COP-2 の I-4 と I-5 を結ぶ線上に乗る。

$^{13}C/^{12}C$ は凝縮水で -9.3%、熱水で -14.1% を示す。凝縮水の値は COP-1 と同程度である。

$^{34}S/^{32}S$ は凝縮水で -3.6%、熱水で +12.3% となっている。この値の差は本質的なものではなく、セパレーター内他で重い ^{34}S が熱水中に濃集したための結果と考えられる。

3H 濃度は 0.3TU 未満である。COP-1、COP-2 の蒸気の値もいずれも 1TU 以下と低い値を示している (Sierra et al. 1990)。この値は気液分離時の同位体分別の影響を受けている可能性もある。

(3) 考 察

COP-3 は坑口圧力 1.4 kg/cm² のもと蒸気 9.4 t/h を産出した。噴気試験時には三角堰から 0 ~ 0.8 t/h の熱水が流出していたが、この熱水と蒸気の化学成分を比較した結果、熱水は凝縮水の性状が変化したものであり、本源的な熱水では無いということが判明した。

また、水ガス比のガスは 5% と多く、そのガスの約 95% が CO₂ ということが判明した。但し、今回分析を実施していないが凝縮水中に 21 mg/l の NH₄⁺ が存在することから NH₄ ガスが存在する可能性も考えられる。

3H 値は 0.3TU 未満であるが同位体分別の影響が生じている可能性も考えられ、その年代については不明である。

D'Amore and Celati (1983), D'Amore and Truesdell (1985) などによって蒸気卓越地熱地域のガス組成から貯留層の温度 (T)、蒸気分率 (y) 等を求める試みがなされている。この地化学温度計について D'Amore and Truesdell (1985) は、今後数多くの地熱地域で検証される必要があると述べている。

このガス温度計を使用し、蒸気卓越系貯留層の状態を推定しようという試みが本地点の COP-1 及び COP-2 においても CREGEN (Sierra et al. 1990) により実施されている。

今回分析した COP-3 噴気試験時のガス組成値を使用し、計算式 (D'Amore and

Truesdell(1985)) により、温度と蒸気分率を求めると $T=200^{\circ}\text{C}$ 、 y は若干 1 を超える値となる。また、D'Amore and Panichi(1980) のガス地化学温度計によれば Table 5-4 に示す様に 215°C となる。

これらの値の誤差等を考慮すれば $T=200\sim 215^{\circ}\text{C}$ 、 $y=1$ が適当と考えられる。

なお、計算 (D'Amore and Truesdell(1985) の式) にあたっての、各ガス成分の蒸気相と液相間のモル分配係数(BI)はGiggenbach(1981)によった。

この値 ($T=200\sim 215^{\circ}\text{C}$ 、 $y=1$) は過去に COP-1、COP-2 の初期噴気時に計算された値と良く似ている。即ち、COP-1の値は初期(1982年)には $T=175^{\circ}\text{C}$ 、 $y=1$ であり、その後1987年には $T=245\sim 250^{\circ}\text{C}$ 、 $y=0.45$ に変化している。この初期の状態はThe Geysers で報告されている"gas cap" と推定され、生産初期の 1カ月間程度存在するとしている(Sierra et al.1990)。

同様に COP-2 の値も初期(1986年)には $T=200^{\circ}\text{C}$ 、 $y=1$ であり、その後1987年には $T=235^{\circ}\text{C}$ 、 $y=0.35$ と変化している。

このように COP-3 の近傍に掘削された COP-1、2 において生産に伴い T 、 y が変化していることから、COP-3 においても同様の変化が生じる可能性がある。

今後、COP-3 において水ガス比、ガス成分をモニタリングして経時変化を把握することが望まれる。

6. 地化学調査のまとめ

以上から本地域の温泉、噴気の成因として以下のモデルが考えられる。

地下深部に $230\sim 240^{\circ}\text{C}$ 程度の蒸気系が存在し、これが本地域の本質的なリザーバーになっているものと考えられる。4箇所ある地熱徴候地の噴気ガスが非常に似た組成を示すことから貯留層内の地熱流体も均質的な組成を示すと考えられる。すなわち貯留層内の非凝縮ガスは、その大部分が CO_2 であり、その一部は断裂等を通して上昇し、地表に達して噴気孔を形成している。一方、地下浅部で天水起源の地下水にこれらのガスが吹き込み加熱されることによって HCO_3^- 型の温泉が形成される (Termasde Copahue)。

しかし、一方で Las Maquinas、Las Maquinitas、Anfiteatro には SO_4 型の温泉が存在している。これらは低 pH を示すものが多いので炭酸が大気中に逃げて形成された可能性もある。しかし、温泉水中の SO_4 に対してガス中の H_2S は余りにも少なく、そ

れが濃縮される過程及び低pHを示す理由も考えにくい。場合によっては岩石或いは土壌中からの硫化物の溶出を考える必要があるかもしれない。いずれにしても本地域を特徴づける地熱流体はCO₂を非凝縮ガスの主体とする蒸気とNH₄ - HCO₃で特徴づけられる地下浅部の温泉水である。その他にはVn, Copahueの頂上東側に火口湖Lag. del Volcanがあり、そこにはHCl、SO₂（或いはH₂S）を主成分とする火山性ガスが吹き込んでいる可能性がある。このガスによりこの湖水はCl、SO₄が大量に溶存され下流の河川水に影響を与えているものと考えられる。また、同火山北麓のChancho C6にはLas Maquinas、Las Maquinitas、Anfiteatro、Termas de Copahueよりも火山性に近い組成のガスが噴気しており、同火山との関係が示唆される。

温泉水の水の起源は比較的近い過去に近傍に降った天水であることは、ほぼ確実であるのに対し、貯留層中の地熱流体の起源については、その水が天水と火山性ガスとの混合である可能性の指摘に留まり、CO₂についても火山性ガスの関連は考えられるもののいずれも推測の域を出ない。D'Amore et al. (1987)によるとガス中のN₂、Ar、Heの比からCOP-1、2にはマグマ性ガスの関与が指摘されている。

この貯留層より深部に熱水系が存在するかどうかについて、蒸気卓越系の成因モデルからその存在が推測されるものの、本地域において存在を裏付ける地化学的な証拠は得られていない。

なお、今後COP-1、COP-3について水ガス比、ガス成分変化を把握することが重要と考えられる。特にH₂Sガス濃度の正確な把握が必要であろう。

5.1.5 坑井調査

1. 熱流量調査坑

(1) 地質

本地域には深度11~200mの17坑のボーリングが1974~1976年にかけてY. P. F. によって実施されている。そのうちの14坑井の地質及び坑内温度測定結果の資料が収集できた。

COP-1, 2及び3坑を含む地質対比を Fig. 5-22 に示す。大部分のボーリング上の部数10mは、Las Mellizas formationの玄武岩質安山岩である。また、カルデラ内東側で掘削された坑井(6坑)には、安山岩の下位に礫岩・砂岩・泥岩の湖成堆積物が捉えられている。このうち、PC-1のコア(117~120m)の泥岩をY. P. F. の研究所で観察することができた。

(2) 温度分布

調査地域の温度分布の特徴を把握するため、各坑井から得られた温度検層データを基にTemperature vs Depth Diagram of Thermal Gradient Hole(Fig. 5-23)を作成し、地下温度推定のための基礎資料とした。温度検層は、2~3ヶ月の間に数回測定が行われており、地層温度に最も近いと思われる実測温度を採用した。

これらの結果を基に熱流量調査坑及びCOP-1, 2の坑内温度及び温泉・噴気の分布から50m深地温分布図(Fig. 5-24)を作成した。地温分布の特徴は次のとおりである。

- (a) 25℃以上の高温域には、地熱徴候地を取り囲む三角形を呈しており電気探査で捉えられた高比抵抗基盤の隆起帯と調和的である。この高温域はディスチャージ域をなしており、断裂に沿って温泉・噴気地が分布している。
- (b) このディスチャージ域の東及び南西方向は、温度が急激に低下する。北側は坑井がないため明らかではないが、同様に温度が急激に低下するものと推定される。
- (c) Lago Agrio方向に向って15℃の等温線の伸びが認められる。また、Temperature vs Depth Diagram of Heat HolesからもLago Agrio近くの熱流量調査坑の坑内温度は深度上昇型を示すことから、Lago Agrio北岸周辺の深部には高温が期待される。

(d) Chancho Có変質帯には噴気がみられ、またChile国境付近のPC-9が高温であったこと、Chancho Cóから東西に伸びる断層が認められることから、高温域がAnfiteatroからChancho Cóに伸びるものと考えた。

(e) 以上の50mの深温度分布は熱流量分布（EPEN資料）と調和的であり、浅部の熱構造を示しているものと思われる。

2. 調査井 COP-1

本坑井はLaguna Las Mellizas (2)の湖岸、標高2,005mに位置する。掘削は1976年2月から1981年3月にかけて行われた。この間954mで一旦掘削が中断され、1981年に再開、増掘されたが、遺留事故により、1,414mで掘り止めた。最終坑径8 1/2インチで、9 5/8 インチのプロダクションケーシングを736mまで、7インチの孔明管を1,132.29mまで挿入しており、それ以深は埋没していると思われる。噴気テストは、1981年4月5日から1988年4月まで断続的に行われ、1988年4月以降670kWの（バイナリーサイクル）パイロットプラントの運用に用いられている。

(1) 地質

本坑井は20～948mのカッティングとスポットコア(458～463m, 630～631m, 930m)が採取されており、Y.P.F.の研究に於いてそれらを観察することができた。本坑井の地質は、Integrated Columnar section of COP-1(Fig. 5-25)に示すとおり、地表から948m間はLas Mellizas formationであり、玄武岩質安山岩～安山岩溶岩及び火砕岩からなる。60～80m間には泥岩の岩片が混在しており、本層をCaviahue conglomerate memberの上部層に対比した。

増掘後989m間はビット1本当りの掘削長は約50mであったのに対し、989～1,414m間は約150mであり、989m以深は非常に掘り易い地層であったことが推定される。この区間の地層は後述するCOP-2を含め周辺の地質から、湖成堆積物であることが推定される。また、坑底付近の岩盤の硬度が増したという事実から、再び溶岩の中に入り、ここで逸水層に遭遇したものと推定される。

(2) 変質

今回、Y. P. F. より提供していただいた9試料(130~930 m)についてJICAによりX線分析を行った(Table 5-10)。その結果は次のとおり3帯に分帯できる。

458m以浅はモンモリロナイトで代表されるゾーンである。458~801 m間は、石英+緑泥石/モンモリロナイト混合層鉱物で代表されるゾーンでモンモリロナイト、緑泥石、濁沸石を含む。930mは葡萄石を含む石英+緑泥石+葡萄石で代表されるゾーンで、肉眼では緑簾石が認められる。

本坑井の変質鉱物から推定される地温は、坑内温度に比べて若干低い。逸水層直上の930mの試料(変質安山岩)は変質が強く、高温二次鉱物である葡萄石及び緑簾石が検出されている。更に明確ではないが、ワイラケ沸石が認められる。このことから、本坑井は地下深部で地熱活動の活発なゾーンに遭遇したものと思われ、後述する温度曲線と調和的である。

(3) 逸水

逸水についての詳しい記録はないが、830m及び950mで全量逸水があり、950 m以深逸水掘りをしている。更に坑底でも大規模な逸水に遭遇した記録もあるが、現在は埋没している可能性がある。従って主要生産ゾーンは950mであると考えられる。但し、このゾーンは掘削中逸水対策をしているため、透水性悪くなっている可能性もある。

(4) 検層結果

本坑井では、1,414 mまで増掘後の時点で注水中、注水後、並びに初期噴気後に一連の温度検層が実施されており、それらの結果から、主要逸水ゾーンの位置が、940m付近、1,060m付近並びに1,410m付近に推定されている。掘削中の逸水の記録と合せて考察すると、COP-1の蒸気産出に寄与する主要流入ゾーンは、950m付近にあるのと推定される。

温度については、最も地層温度に近いと思われる温度をTemperature VS Depth Diagram (Fig. 5-26)に示した。最高温度は、アメラダゲージの測定範囲を越えたため明らかではないが、1,200 ~1,370mで250℃以上の温度であることは確かである。

本坑井の噴気中並びに静止中の温度・圧力の代表的な検層結果をまとめて Fig. 5-27 に示す。

静止中の圧力プロファイルを見ると、坑口から坑底までほぼ一定の気相の圧力勾配を示している。坑内で液相を示す圧力勾配は認められず、貯留層状態では、蒸気と水は飽和状態になっているものと考えられる。実測値を平均的に勘案すると貯留層流体圧力はほぼ 35~38ata 程度、温度は飽和状態を仮定することにより 240~246°C 程度と推定される。

電気検層（インダクションログ）の結果を総合柱状図（Fig. 5-25）に示す。本検層データと地質を比較する大略調和的であり、一般に溶岩は高比抵抗値を示し、火砕岩は 10Ω m 以下の低比抵抗値を示す。

(5) 透水性に関する試験

本坑井では、掘削終了後、注水試験が行われており、注水中の 950m 深の圧力遷移がアメラダゲージで測定されている。Latinoconsult/ELC-Electoroconsult^{c2} (1981) によれば、注水試験結果から本坑井の還元指数 (I. I) が $2.3 \text{ l/sec/kg/cm}^2$ (= $8.3 \text{ m}^3/\text{h/kg/cm}^2$) と得られている。またポンプの性能上注水量が不安定だったため、正確な解析結果とはいえないという注釈付きで、以下 2 点が述べられている。

- ・主要生産ゾーンのトランスミシビティは $9.4 \frac{\text{d-m}}{\text{cp}}$ である。
- ・掘削中の逸泥により坑壁のダメージが認められる。（＝スキン効果）

注水試験の結果から、真に生産に寄与する地層の逸水性の程度を表わすのは困難な場合が多いので、1981年 4 月 11 日のダイナミック温度・圧力検層の結果 (Fig. 5-27) を用いて本坑井の生産指数 (P. I.) を試算してみた。

950m 深の静止中の圧力と噴気中の圧力差により得られた生産指数は $P. I = 0.72 \text{ t/h/Kg/cm}^2$ となった。

以上の事から、本坑井が逢着している貯留層の浸透性は比較的小さく、坑井の産出能力はあまり良くない事が明らかである。

(6) 産出特性

本坑井は 1981 年 4 月に噴気を開始して以来、途中、幾つかの中断を挟んで連続噴気試験が行われている。本坑井はほとんど乾き蒸気 (1~1.5 volume% の水を含む) を産出する坑井であり蒸気中には 6~7% (質量濃度) の非凝縮ガス (主に CO₂) が

含まれている。

現在までに得られている質量流量とその時の坑口圧力のデータのほとんど全てを用いて坑井噴出特性をプロットしたものを Fig. 5-28 に示す。蒸気量と坑口圧力の経時変化は Fig. 5-29 に示すとおりである。又、CREGENは、この経時データをもとにして、Rumi(1972)の半経験式を用いて計算した理論特性カーブにより坑口圧力8ataのデータに正規化した噴気量並びに他の推定値をプロットし、Fig. 5-30 に示す様な概念的噴気経時変化図を作成している。

長期間の蒸気量の変動は、Fig. 5-29 に示す様に1982年～85年にかけての連続噴気中の3年間で約4 t/hの減衰がみられる。また、長期間噴気を停止させた後、数ヶ月噴気させた1987年のデータでは、測定時の条件が不明であるため、この期間の噴気量変動についてはあまり明確ではない。

3. 調査井 COP-2

本坑井はLaguna Las Mellizas (2)の北方、標高2,120mに位置し、坑長1,241mである。掘削はCREGENの管理のもとで1986年2月に開始され、38日間で終了した。

736以深は空気掘りで行われた。最終坑径は8インチで、9 5/8インチのプロダクションケーシングを674mまで、7インチの孔明管をほぼ坑底まで挿入している。噴気テストは1986年3月20日から1987年11月14日まで断続的に行われている。

(1) 地質

本坑井はコアリングが採取されており、今回CREGENに於いてそれらを観察することができた。本坑井の地質はIntegrated Columnar Section of COP-2 (Fig. 5-31) に示すとおり、地表から坑底(1,241m)までLas Mellizas formationであり、玄武岩～安山岩溶岩、火砕岩及び堆積岩類からなる。736m以深は、空気掘りのため、コアリングが細粒になっているが、814～1,160m間には明らかに凝灰質泥岩を主体とした湖成堆積物が分布しており、本層をCaviahue conglomerate memberの下部層に対比した。本層には溶岩及び凝灰角礫岩が挟在している

(2) 変質

本坑井はCOP-1坑に比べて変質を受けているゾーンは少ないが610～814m間には原岩の組織が残っていない程白色変質を受けており、黄鉄鉱や緑簾石の二次鉱物が多量に認められる。また、408～472m間も黄鉄鉱を生じる変質を受けている。

今回実施したX線分析の結果(Table 5-10)はCOP-1と同様に次のとおり分帯できる。

415～643m間は石英+緑泥石/モンモリロナイト混合層鉱物で代表されるゾーンでモンモリロナイト及び緑泥岩を含む。643～1,205m間は、石英+緑泥石+緑簾石で代表されるゾーンで葡萄石とワイラケ沸石を含む。

本坑井の変質鉱物から推定される地温は、坑内温度と調和的であり、COP-1と比較するとより高温である。しかし、1,160m以深は変質が弱く高温下での変質鉱物は少なくなっている。

(3) 逸水

逸水については736m以深が空気掘りのため不明だが、湖成堆積物では逸水がなく、溶岩で多くの逸水が発生している。主要生産ゾーンは種々の検層データから872mと1,132mであると考えられ、湖成堆積物と溶岩の境界付近に相当する。

(4) 検層結果

温度については、地層平衡温度に最も近いと思われる温度をTemperature VS Depth Diagram (Fig.5-26) に示した。最高温度は950m及び1,000mで234.7℃であり、深度600m以深はほぼ一定の温度を示している。1,150mで温度が低下するのは注水した冷水による影響によるものと考えられ、地層温度は約235℃であると考えられる。

本坑井の静止中並びに噴気中の坑内温度・圧力測定結果をまとめて Fig.5-32 に示す。測定値を平均的にみれば、貯留層流体圧力としては約30ata前後、温度は約235℃前後にあるものと推定される。

深度1,150mまでの静止圧力勾配(1986年4月13日測定)においては、深度100m～700mの間はガス100%の場合の圧力勾配と平衡であり、深度700m～1,150mは水蒸気の圧力勾配と平衡であり、静止中の坑内上部に非凝縮ガス(主にCO₂)

が濃集している事が推定されている。また、噴気中及び静止中の圧力プロファイルのいずれの場合でも約 1,150m 以深では水の静水圧勾配を示しており、この深度から坑底の間にはフラクチャーが存在しない事が推定できる。

電気検層（デュアルラテロログ）の結果を Fig. 5-31 に示すが、地質と比較しても相関性はない。蒸気相の影響を強く受けたものかも知れない。

(5) 透水性に関する試験

掘削終了後、アメラダゲージを一定深度(1,050m) に設置し、注水試験が行われた。注水量 593,844,1050 及び 1,278 l/min で各段階 20 分間づつ注水する間のこの圧力データを用いて、還元指数 (I. I) を計算してみると、平均して $I. I = 7$ t/h/kg/cmf と得られた。

また、生産指数についてはダイナミック温度・圧力検層を行った時の流量のデータが不明であるため、正確なことは言えないが、坑口圧力と坑井特性曲線からその時の流量を約 16t/h と推定し、1986年 4 月 12 日に測定した 1,100m 深の噴気中圧力を用いて P. I を試算すると 0.59~0.75t/h/kg/cmf となった。

EPEN (1968) ⁹³ では $kh = 5.18$ darcy m、skin factor = 0 という値が報告されている。これは坑口圧力から算出されたとされているが原データの詳細は不明である。今回の第 1 次調査団が入手した 1986年 4 月 8 日の坑口密閉試験のビルドアップデータをプロットした結果を Fig. 5-33 に示す。この資料からは kh (浸透率・層厚積) = 3.4 darcy-m、 $S = -1.3$ となり EPEN から報告されている値と近い結果が得られた。

以上の各種坑井試験結果から判断すると、坑壁のダメージは認められないが、COP-2 坑が達着している貯留層の逸水性は比較的小さく、坑井の産出能力はそれほど大きくないといえる。

(6) 産出特性

本坑井は 1981年 3 月 20 日に噴気を開始して以来、途中約 3 ヶ月の停止をはさんで 1987年 11 月 14 日まで噴出試験が実施されている。本坑井はほとんど乾き蒸気を産出し、蒸気中には 6~10% (質量濃度) の非凝縮ガス (主に CO₂) が含まれている。

坑井噴出特性をプロットしたものを Fig. 5-34 に示す。蒸気量と坑口圧力の経時

変化はFig. 5-35に示すとおりである。又、COP-1と同様、O. Rumi(1972)の半経験式を用いてCRBGENが作成した概念的噴気経時変化図をFig. 5-36に示した。

坑口噴気特性 (Fig. 5-34) をみると、1986年4月の生産データは、明らかに1つの曲線に沿った形を示している。それから1年後の1987年4月の噴気特性の測定値は、図に示す様にバラついており、噴気が安定した所のデータではない可能性がある。しいて曲線を引くと坑口圧力4 ata、13 ataでそれぞれ蒸気量 \sim 11t/h、約6 t/h という特性となり、1年間で4 \sim 5 t/h 程度蒸気量が減衰していることになる。更に約8ヶ月噴気を継続した1987年11月では、6 ataで7 t/h 程度を示している。上記の蒸気量の減衰については、Fig. 5-35及びFig. 5-36に示した生産履歴にも示されている。

4. 調査井COP-3

(1) 掘削位置の選定

調査井COP-3の位置は、1987年12月から翌年1月の間に、それまでに実施されていた物理探査、地化学調査、坑井調査等の結果を整理すると共に現地踏査を行った上で慎重な検討を経て選びだされた。選定の理由はプロGRESS・レポートに詳述したが、要約すると以下のとおりである。

Copahue 地熱地域には、地質構造、地温分布及び電気比抵抗分布等の特徴から、地熱貯留層存在の可能性が高い範囲として、約13km²の面積を持つ三角形をなす地域が浮かび上がった。Termas de Copahue 等4ヶ所の地熱徴候地及び調査井COP-1及びCOP-2もこの地域内に位置する。これら2本の調査井は、生産性は高くはないものの深さ800m以深で蒸気卓越型貯留層を確認している。COP-3はこの三角形地域内で高い生産性が期待される断層帯を狙うこととして検討の結果、A、B、Cの3地点を候補として選び出した。これら3地点の位置はFig. 5-50、5-51に、特徴はTable 5-11に示す。3地点は結果的に1辺約2kmの正三角形をなし、上述の地熱有望三角地域の中央部をカバーする地域を占めており、資源量把握の確度を上げるためには、3地点とも掘削することが望まれる地域である。

今回、3候補の中から敢えて優先すべきものとしてA地点を選んだが、その理由は下記のとおりである。

- ① WNW-ESE 方向をもつ本地域では卓越した断層沿いに位置する。Chancho Có, Las Maquinas及びCOP-1がこの断層上にあり、噴気の可能性が最も高い。

- ② COP-1, 2と共に1辺1km前後の三角形をなす位置にあり、COP-1, 2による資料と合わせて調査を面的に広げるのに好位置にある。
- ③ 掘削準備期間が限定されている中でアクセシビリティが良い。

(2) 掘削作業及び坑井試験

既存の調査井COP-1及び2は、ロータリー試錐機を用いて大口径でそれぞれ1,414m及び1,241mまで掘削されている。COP-3はより深部までの情報をコア掘りによって得ることを目的とし、目標深度は熱水タイプ貯留層胚胎の可能性が推定されるHualcupen formationの上部に到達すると思われる1,800mとされた。

COP-3掘削のための試錐機及び亜国内で調達できない資機材はJICAから供与された。この試錐機はロータリー・スピンドル兼用の機械であり、NQビット(外径75mm)で2,000mの掘削能力を持っている。

掘削作業はJICA派遣の試錐技師指導の下、EPENが組織した掘削チームによって実施された。COP-1からLag. Las Mellizasの湖岸に沿った約1kmの道路の改良とボーリング敷地の整地作業が1988年12月にEPENの手で完成した。直ちにNeuquénで製作されたサブストラクチャーと日本から運ばれた試錐機が搬入組み立てられ、1989年1月17日掘削が開始された。

当初の計画では、COP-3の掘削は1988年10月から1989年5月の間で終了する予定であったが、掘削作業の過程で遭遇した種々のトラブルによって工程が大幅に遅延し、JICA、AREXA協議の上で、結局1988年10月～1989年5月、1989年11月～1990年3月、1990年12月～1991年5月の3シーズンに亘って作業を継続した。

1991年は冬の到来が早く、982mまで92mmケーシングを挿入し(1,000mまで4インチ1/8掘削)、1,000mからのNQ-WL掘削を開始した4月15日には第1回目の猛吹雪に見舞われ、作業は数日の中断を余儀なくされた。このことから、JICAとAREXAの協議により、掘削は4月27日で打ち切って坑井仕上げを行い、坑井試験の準備に入ることが予定され、この間に出来るだけ深く掘削することになった。NQ-WL掘削はセメント追切り中に994.7mで逸水して以降全量逸水の状態で続けられ、4月27日に1,065mで打ち切られた。

掘削終了後、電気検層と温度検層が実施され、986mから坑底の間に2インチのストレナーパイプが設置された。引き続いて注水試験と回復温度の測定が実施さ

れた。実績ケーシングプログラムは Fig. 5-37 に示す。

COP-3の噴気試験は、温度回復を待ち、吹雪の中で噴気装置及び噴気記録装置を設置して1991年6月1日に開始された。これに伴い、噴気前(5月31日)及び噴気中(6月12日～15日)の坑井内温度・圧力測定並びに噴気停止後のBuildup Test等の坑井試験がJICAにより実施された。また同時にCOP-3のコア・カッティングス観察、X線回折、流体包有物観測並びにコア物性試験が実施された。これらの室内試験及び坑井試験結果について以下に述べる。

(3) 地質、変質、物性

(a) 地質

COP-3の掘削地点は、Las Mellizas上流湖の東岸から約30m、Rio Mellizasの右岸から約20mのところにある。

Rio Mellizasの河床には安山岩溶岩が全面に露岩している。従って、COP-3の掘削地点でも、土被りは極薄く、1m以下で着岩している。

COP-3を構成する地質は、Fig. 5-38 Columnar Section of COP-3 に示すとおりである。

坑口から1,065mの坑底まで第四紀更新世前期とされているLas Mellizasformationの火山噴出物及びそれに挟在する湖成堆積層よりなっている。

地表より深さ70mまでは、紫蘇輝石玄武岩溶岩になっており、凝灰角礫岩の薄層を挟んでいる。深さ70～210mまでは安山岩質及びデイサイト質な変質粗粒凝灰岩であり、安山岩層を挟んでいる。

深度210～420mまでは両輝石玄武岩質安山岩溶岩となっている。300～320m間には変質火山礫凝灰岩を挟んでいる。

深度420～480m間には局地的に堆積したと思われる湖成層である凝灰岩質泥岩・砂岩・礫岩が分布する。

深度480～830m間には輝石玄武岩溶岩が分布しているが、この輝石は全て普通輝石から成っていることで特徴付けられる。620～640mには、凝灰岩質砂岩層を挟んでいる。変質鉱物として、緑簾石が亀裂を充填して広く分布している。

800m以深では、岩石全体に熱水変質を強く受けている。

830～876mまでは変質凝灰角礫岩が分布し、一部に安山岩溶岩を挟んでいる。

深度876~1,008mまでは、強く変質した安山岩溶岩であり、角礫化しており、掘削中循環泥水の逸水が頻繁に起こっている。

特に1,009~1,018m間は安山岩溶岩が断層により破碎されており、断層帯となっている。この部分で最も逸水が激しく、COP-3に於ける主要な生産ゾーンとなっている。

1,026m以深から坑底の1,065mまでは、完晶質のポーフライトとなっており、亀裂がほとんどない状態が続いている。

(b) 亀裂及び断層の状況

782~882.9m及び1,000~1,065mは、NQサイズのコアボーリングが行われた。782~882.9mについては、コアが採取されなかった区間のうち、断層と関係があると思われる区間はつぎの2箇所である。

・814.1 ~ 818.7m

・821.2 ~ 822.1m

この前後のコアはフラクチャーにより角礫化しており、また逸水深度とも一致していることから現在も開いている断層と考えられる。この他、785.0~785.4mと790.6~792.2mはコアが採取されなかったが、前者はコア詰まりによるもので、後者は掘削中の逸水深度と異なっており、フラクチャーとの関係は明らかではない。

その他、823.4~823.8mは、フラクチャーにより角礫化しており、逸水と関係があると考えられる。また、801.7~802.7mは石英と方解石の晶洞と開口性の割れ目が観察され、逸水と関係があると考えられる。

1,000~1,065m間については、1,000m以浅より安山岩溶岩が続くが1,017.5mまで一つのフローユニットであり、その底の部分が角礫化している。また、この部分で断層が通っており、主断層及び副断層で3~4本あり破碎帯を形成している。これらの部分では、コアは3~5cmのフラグメントになっており、二次的な地熱流体の通路になったと見られ、その近傍は強度の変質作用を受けている。すなわち、

・1,009.08~1,009.75mは、圧碎され強変質している断層帯である。

・1,009.75~1,013.8 mまでは1m~1.5mおきに圧碎されている。

- ・1,013.8 ~1,015.9 mまでは断層破碎帯であり、全体に圧砕を受け、亀裂面にはスリッケンサイドも認められる。
- ・1,017.3 ~1,017.5 m間にも小断層が認められる。

このように、1,009~1,018mは、COP-3における最も大きな逸水帯であり、蒸気の生産ゾーンともなっている。

1,017.5m以深、坑底の1,065mまでは、他のフローユニットとなっており、塊状でほとんど亀裂がない。わづかにあるクラックも、全て緑泥石や緑簾石等の変質鉱物で充填されている。特に1,030m以深では全く塊状となり、長さ3m以上の棒状コアも採取されており、この部分での地熱流体の移動は困難であろうと思われる。

(c) 変質

COP-3の変質は、70~210 mの比較的強いモンモリロナイト、緑泥石化作用を除くと、肉眼的には620mの湖成層を境に変質の程度が異なる。すなわち、620m以浅は変質の強弱はあるものの全体的にみると変質が弱い、620m以深は変質は強く、全体的に緑泥石化を受けている。また、660m以深に緑簾石が出現し、割れ目を充填しており、730m以深は緑簾石の産出は普遍的になる。

800 m以深の地熱流体の採取に関連する変質については、3回の異なった変質作用があったことが考察される。

その一つは、深度800m以深の全岩に広く認められる緑泥石化変質作用である。盆地状構造の中で、Las Mellizas formationの下部が、広く、ほぼ均一に変質しているものである。

第二には、亀裂や割れ目を充填している緑簾石や葡萄石等の変質鉱物の存在である。これは現在の地熱流体対流系以前のものであり、ほとんど全ての亀裂を埋め尽くしているため、逆に透水性を悪くしている。

第三には、断層破碎帯部に発達する開口割れ目において、前述の緑簾石の表面に結晶しているワイラケ沸石の存在である。このワイラケ沸石の存在は、蒸気の良い通路を示しており、そのような場所は良い蒸気のプロダクションゾーンをなしている。

X線回折結果 (Fig. 5-39, Table 5-13) から COP-3 の変質分帯を行うと、次に示すような分帯を行うことができる。

- ・ ~ 320m : モンモリロナイト + 緑泥石帯
- ・ 320 ~ 528m : 石英帯
- ・ 528 ~ 660m : モンモリロナイト帯
- ・ 660 ~ 956m : 緑泥石 + 緑簾石帯
- ・ 819.8 ~ 956m : 緑泥石 + 緑簾石 (+ 葡萄石) 帯
- ・ 956 ~ 1,065m : 緑泥石 + 緑簾石 + 絹雲母 (+ 葡萄石 + ワイラケ沸石) 帯

ここで、石英帯中及びモンモリロナイト帯中の湖成堆積物は現位置での変質作用を受けたものではないと考え、分帯の考察からは除外した。また、() 内の変質鉱物は必ず出現するとは限らないものである。全体的にみると320 mから深くなるとともに、高温変質鉱物が出現し低温変質鉱物が消失する。モンモリロナイトは620mで消失し、その消失温度は流体包有物から推定した温度 (後述) で約190°Cである。これはHayashi (1973) の石英 + モンモリロナイトの生成温度 (100~200°C) とよい一致をみる。緑泥石は660m以深は連続的に出現する。緑泥石化は前述のモンモリロナイト化を含めて、割れ目沿いだけでなく母岩全体が被っており、割れ目の発達しないコアにおいても緑泥石化が認められる。ワイラケ沸石は上述のとおり逸水層と深い関係があり、956~1,045mの割れ目沿いのみ晶出している。

酸性生成鉱物であるカオリナイトは、200~320m、400~760m及び812~854.5mに検出され、逸水を生じないフラクチャーゾーンに発達していること、及びカオリナイトが発達するゾーンは坑内温度が急激に上昇している温度パターンから、カオリナイトは割れ目等をシールし、キャップロックの役目を果たしているものと考えられる。なお、Universidad Nacional del Surで実施したX線分析のうち、坑底付近の1,022~1,045mの試料でパイロフィライトが報告されているが、JICAが実施した顕微鏡観察及びX線分析では認められていない。

なお、コア物性試験の結果を、Table 5-14 に示す。

(d) 流体包有物

Universidad Nacional del Surにおいて11試料の、JICAにおいて2試料の流体包有物均質化温度が測定された(Table 5-15)。このうち、180, 210, 320 mの3試料はカッティングスより石英の結晶をピックアップしたものであり、528m以深の10試料はコア中の石英脈及び方解石脈である。

Fig. 5-40 に180~320mのカッティング試料の結果を除いた流体包有物均質化温度を示す。この結果、次のことがいえる。

- ・初成包有物の均質化温度は2次包有物の均質化温度よりも低く、時間的に後にトラップされた流体包有物の方が低温であったものと推定される。
- ・528mの均質化温度最低値は162.6 °Cと低いが、801m以深の流体包有物均質化温度は240~250°Cのほぼ一定の温度を示す。
- ・流体包有物均質化温度と推定平衡温度を含む静的温度検層結果を比較すると、現在の地層温度は900m以深がほぼ一定の240~250°Cの温度を示し、それ以浅は浅部に向かって温度が急激に低下する。均質化温度最低値はこの温度検層による温度より若干低いが非常に近い値である。
- ・806と1,009mの石英中の流体包有物の中には気相包有物が観測されている。

一方、180~320mの流体包有物均質化温度については、その均質化温度最低値は207~221°Cと浅部の温度としては高温を示す。これら3試料はカッティングスであり、かつ凝灰岩片が多く含まれているためその深度の温度ではなく、より深部の温度を示している可能性が考えられ、今回の考察から除外することにした。なお、180mの350°C以上の均質化温度を示す包有物はネッキングダウンをおこしているため実際より高温を示している可能性も考えられる。

以上のことから、COP-3の地層温度は、噴気試験直前に実施したスタティック温度検層(ST=390h50m)よりさらに温度が回復するものと考えられる。すなわち、COP-1の温度とほぼ等しく、約800m以深がほぼ一定の240~250°Cの温度を示し、それ以浅は浅部に向かって温度が急激に低下するものと推定される。また、COP-3の貯留層はその温度パターンから約800m以深であると考えられる。CO₂相の記載がないが、気相包有物が存在することからも蒸

気卓越型貯留層であることがいえる。

(4) 逸水

本坑井は、深度795.9mまでは掘削中の逸水は認められず、それ以深では Columnar Section of COP-3 (Fig. 5-38) に示すとおり主に溶岩層で頻繁に逸水が発生した。主な逸水ゾーンは、795.9～828.4 m (50～全量;300ℓ/min以上)、895.0～909.55m (130～240ℓ/min)、954.09m (全量;288ℓ/min以上)、980.61m (全量;580ℓ/min以上)、991.1m (全量;580ℓ/min以上) 及び995.0m (全量;580ℓ/min以上) であり、986.13mまで92mmCPを挿入設置後は、坑底(1065.0m)まで全量逸水掘りを行った。

(5) 検層結果

本坑では、温度・電気検層、温度回復試験、噴気前及び噴気中の坑内温度・圧力測定を実施した。

温度については、スタンディング・タイムの最も長い検層結果をTemperature vs Depth Diagram (Fig. 5-26) に示した。最高温度は1,000m深で236.9℃であり、900mまではほぼ直線的に上昇し、それ以深ほぼ一定温度となっている。温度回復試験の結果を用いて推定した1,000m以深の地層平衡温度は240～245℃である。COP-1及びCOP-2の温度曲線と比較すると、浅部の温度勾配はいずれの坑井も同様の上昇傾向を示すが、COP-3は他調査井特にCOP-2に較べて浅部の温度が全体的に低くなっており、COP-3の位置ではキャップロックが厚く、言い換えれば貯留層上面深度が深くなっている可能性がある。

本坑井の静止中並びに噴気中の坑内温度・圧力測定結果をまとめて Fig. 5-41 に示す、また流入ポイントと推定される1,010m付近の静止中温度圧力の測定値を Table 5-16 に示す。本坑井の静止中の温度圧力検層結果は、坑口から1,010m付近までは蒸気の静止圧力勾配を示しており、フィードポイントの貯留層流体圧力は38.16kg/cm²G、温度は約240℃と考えられる。この貯留層はCOP-1坑等で確認されているものと同様の蒸気型であり、貯留層の状態では蒸気とフラクチャー中の熱水は飽和状態にあると考えられ、又CO₂ガスの影響で飽和温度が純水のそれに較べて若干下がっているものと考えられる。また、噴気中及び静止中の圧力プロファイル

のいずれの場合でも約1,017m以深では水の静水圧勾配を示しており、この深度から坑底の間にはフラクチャーが存在しない事が推定できる。

電気検層の結果をFig. 5-38に示す。本検層データは地質とほぼ調和的であり、一般に溶岩類で高比抵抗を示し逸水ゾーンではカーブが乱れている。フィードゾーンが含まれる998~1,016mの区間の測定は坑壁崩壊の影響等でゾンデが降下せず、測定ができなかった。

(6) 透水性に関する試験

本坑井では、掘削終了後、注水試験を実施し、Fig. 5-42に示すとおり注水中の深度986mの圧力遷移をアメラダゲージで測定した。各流量段階の最終の圧力値と静止中の圧力の差から産出した還元性能をFig. 5-43に示す。圧力測定ポイントがフィードゾーン深度より上に位置していたため、圧力データは坑内水柱の温度変化の影響を受けているが、概略の還元指数は平均で $I. I = 38(t/h)/(kg/cm^2)$ となり、COP-1及びCOP-2坑に較べて一桁大きい値が得られた。

フィードゾーン深度までデータが得られている1991年6月13日及び6月15日のダイナミック温度・圧力検層の結果(Fig. 5-41)を用いて本坑井の生産指数(P. I.)を計算した。

$$P. I. = \frac{G}{(P_{ws} - P_{wi})}$$

ここで G = 生産量 (5.7及び6.9t/h)
 P_{ws} = 静止中圧力 (kg/cm²)
 P_{wi} = 噴気中圧力 (kg/cm²)

得られた生産指数はそれぞれ $PI = 17.4(t/h)/(kg/cm^2)$ [6月13日] 及び $PI = 3(t/h)/(kg/cm^2)$ [6月15日] である。二つの値でかなり差が出ているが、いずれにしてもCOP-1及びCOP-2坑に較べてかなり大きい値であり、貯留層の透水性が大きいことを示している。またFig. 5-41の噴気中の圧力プロファイルから明らかであるが、本坑は最終坑径がNQ(78mm)で0~986.13mに92mmCPを設置した小坑径の坑井であるため、生産性能が、貯留層ではなく坑井で規制されているものと推定される。

1991年6月15日に実施したビルドアップテストの結果をFig. 5-44に示す。上記のとおり、小坑径の坑井のため、生産量が小さくまた噴気中の圧力降下も小さいため圧力測定の精度の問題で解析の精度は良くない可能性があるが、 kh (浸透率・層厚積) = 207 darcy-m、スキンプァクター $S = 130$ という値が得られた。かなり大き

な坑壁のダメージが認められるが、本坑の裸坑（ストレーナー仕上げ）区間（986.13～1,065.0m）は想定される貯留層の実際の厚さに較べてはるかに小さいので、このスキン効果には坑井の部分貫入の影響も含まれているものと考えられる。

更に、噴気中の坑井近傍の流速はかなり早い可能性があり、流れがDarcy則からずれて、いわゆるNon-Darcy 効果も含まれているのかもしれない。

これらの坑井試験により、本坑井は坑壁のダメージを受け、また坑井の部分貫入の影響等も認められるが、非常に浸透性のよい貯留層に達しているものと考えられ、仮に坑径を大きくすれば、かなりの生産量が見込まれるものと推定される。

(7) 産出特性

本坑井は、掘削終了後温度回復を待って1991年6月1日～15日に噴出試験が実施された。15日間の生産量、坑口圧等の経時変化を Fig. 5-45 に示す。本坑井はほとんど乾いた蒸気（乾き度が0.92～0.99）を産出し、蒸気中には11%（質量濃度）の非凝縮ガス（主にCO₂）が含まれている。噴気初期には掘削泥水の影響等により熱水量も比較的多かったが、噴気の継続と共に急速に熱水量は低下していった。

本坑井の噴気特性曲線を Fig. 5-46 に示す。本坑は最大蒸気量約9 t/h（坑口圧力1.4 kg/cm²G）であり、前述のとおり貯留層の浸透性が高いため、小坑径の坑井にもかかわらず良好な噴気特性を示す。また、坑口バルブを絞り、坑口圧力を上げるほど蒸気が湿ってくる傾向を示し、これに伴い坑口比エンタルピーも、644 kcal/kg から595 kcal/kg に低下している。これは地層平衡温度の低い坑井上部からの熱損失及び坑井近傍の貯留層の蒸気飽和度の変化に伴う相対浸透率の影響と考えられる。

本坑井の長期的な産出特性の変化については、長期噴気試験の結果により明らかになると思われるが、1991年8月末までのデータによれば、熱水量が無視できるほど少なくなったが、蒸気量については顕著な変化は認められていない。

5.2 総合解析

5.2.1 熱構造

- (1) 調査地域には、Thermal de Copahue, Las Maquinas, Las Maquinitas, Anfiteatro及びChancho C6の地熱徴候地が分布し、多くの噴気・温泉が見られる。この内、Las Maquinitasでは 132°Cの過熱蒸気の存在が知られている。
- (2) アルゼンティン側の地熱徴候地は、地質的にホルストに位置しており、このホルスト内に掘削された熱流量調査坑は25~35°C/100mと非常に高い地温勾配を示し、浅部で温度が急上昇する。また、COP-1, 2, 3の坑内温度も浅部より急上昇し、COP-1, 3は800mで230°Cに達し、COP-2はそれより浅い600mで230°Cに達する。それ以深は、3坑ともほぼ一定の温度を示すが、COP-1では1,200m付近より更に温度が上昇し、250°C以上を記録している。

一方、ホルスト外における地下50mまでの地温勾配は小さく5°C/100m前後であり、ホルストから離れるに従い温度は急激に低下する。このように、ホルスト内と外では温度的に著しい差があり、地下数100mまでの地温分布は、ホルスト地域を中心に盛り上がった形状を示していることがわかる。また、Lago Agrio付近の熱流量調査坑(PC-4)は坑底付近で温度勾配が高くなり、深部で高温が期待される。
- (3) COP-1, 2, 3の生産ゾーンは800m以深でその流体温度は温度圧力検層から約240°Cである。ホルストに位置する地熱徴候地のガス組成から計算される温度は、205~230°Cであり、COP-1, 2, 3の温度と調和的である。
- (4) 地熱徴候地の噴気ガス成分を比較すると、アルゼンティン側の4つの徴候地及びCOP-1, 2, 3は、90%以上のCO₂を含み、H₂Sは1%以下と非常に少ない。一方、Chile側のChancho C6は、CO₂が70%前後であり、H₂S及びH₂は10数%含む。従って、Chancho C6は、他徴候地より火山性ガスの寄与が大きい可能性があり、Vn. Copahue との関係が示唆される。
- (5) D'Amore et al. (1987)は、噴気ガス中のN₂, Ar, He比から、COP-2の流体はCOP-1の流体よりもより深部からの流体が供給したもので、マグマ溜りの存在の可

能性を示唆している。また、COP1, 2 坑の凝縮水の同位体比から貯留層の中の地熱流体の起源は天水と高温マグマ水との混合による可能性がある。

(6) 本地域の最も新しい火山は、Vn. Copahueであり、氷河によるさっ痕が認められない溶岩流のユニットがあることから、この溶岩は完新世の噴出であると考えられる。

また、Vn. Copahueの頂上付近には、HCl とSO₂ (あるいは、H₂S を主体とした高温の火山性ガスの吹き込みによって酸性化したと考えられる火口湖があり、現在もVn. Copahueの下には熱いマグマ溜りが存在しているものと思われる。

(7) Vn. CopahueとLas Mellizas formationの噴出の中心は、ほぼ同じ位置と考えられ更新世から完新世まで連続的な火山活動があったものと考えられる。

(8) 従って本地域の熱源には、Vn. Copahue及びLas Mellizas formationの後期の火山活動に起因するもので、地下深所のマグマ溜りからの熱伝導によるものと考えられる。また、COP-1, 2, 3 坑のガス、凝縮水成分から火山性ガスの寄与が考えられ、この地下深部にも熱源となり得るマグマ溜りが存在する可能性がある。それは環状盆地形成後に活動したVn. Copahueとは別の環状盆地内の火山活動によるものと思われる。

5.2.2 貯留構造

(1) 層序と環状構造

調査地域には、第三系～第四系の火山噴出物が厚く堆積する。それらは下位より鮮新世のHualcupen formation, 鮮新世末～更新世のRiscos Bayos pyroclastic flow deposits(作業仮説), Las Mellizas formation, A° Trolope volcanic rocks 及び更新世～完新世のCopahue volcanic rocksに区分される。

成層火山をなしていたHualcupen formation は鮮新世末から更新世初頭にかけて火山性陥没により環状盆地を形成した。環状構造はNW-SE方向約19km、NE-SW方向約14kmの大きさを有し、環状盆地内にはその後噴出した安山岩、玄武岩質安山岩、同質集塊岩及び湖成層からなるLas Mellizas formationが厚く堆積している。等重力線図に地質分布も重ね合わせたものをFig. 5-47に示す。

Hualcupen formationの露出する環状山脈は高重力域に、Las Mellizas formationの分布する環状盆地内は西方を除き低重力域になっている。環状盆地内では、Termas de Copahue を中心とするホルストは高重力異常を、Paso Copahue-Lago Agrioグラブは低重力異常を示し、その隆起・陥没形態をうかがい知れる。また、Lago Agrio北部を中心とする低重力域は熱流量調査坑でみられるような湖成堆積物が地下で厚く存在することによると考えられる。

基盤 (Hualcupen formation) までの最大の深さは、重力探査の2次元解析結果からLago Agrio東方で、2,000m程、Copahue地熱地域を中心とするホルスト部では、1,600m程と考えられる。なお、ホルストはLas Mellizas formationとVn. Copahueの2度に渡る火山活動時に衝上を受け、形成されたと考えられる。

(2) 断層

調査地域に認められた主要な断層として次の3系列がある。

- (a) Copahue地熱地域を中心とするホルストの東端を境するNW-SE系の逆断層は、深部低比抵抗層の盛り上がり部の位置と一致しており、断層破碎部の粘土化とその西側の深部での地熱流体の上昇を示していると考えられる。
- (b) NE-SW系の断層はVn. Copahueの活動時に形成された新しい断層帯で、Termas de Copahue, Las Maquinitas及びAnfileatro及びChancho C6の噴気地への流体の通路となっている。
- (c) WNW-ESEの断層は、Chile側へと続く大規模なものでLas Maquinitas及びChancho C6の噴気地への流体の通路となっている。

COP-1の北を通るWNW-ESE方向の断層はCOP-1及びCOP-2のLas Mellizas formation中の湖成層の分布標高から200m以上の落差が認められており、この落差はPaso Copahueでその地形からも認められる。

(3) 透水性

Las Mellizas formation中に存在する湖成層は固結度が低く可塑性を持ち、透水性の高いフラクチャーはできにくいと考えられる。また湖成層にみられる泥岩層の透水性は極めて小さいであろう。従って、ほぼ水平に分布する湖成層は上下方向の流体移動を規制する不透水層としての性格をもつものと考えられる。

COP-1 の主要生産部は、深度830m及び950mであり、共に湖成層より上位の安山岩中の逸水部である。またCOP-2の主要生産部は深度872m及び1,132m付近であり、前者は湖成層中の安山岩、後者は湖成層より下位の安山岩中の逸水部と考えられる。COP-3 の主要生産部は深度1,009~1,018m間の安山岩中に数条発達した断層帯であり、蒸気の通路である開口性割れ目に生成したと考えられるワイラケ沸石が分布している。これらの生産部はいずれも岩石中の小さな開口性のフラクチャーと考えられる。

生産ゾーンの透水性は、COP-2 で $kh = 3 \sim 5 \text{ darcy} \cdot \text{m}$ と比較的小さい値を示し、COP-1もそれと同等かそれより若干大きい程度である。それに対して、COP-3で得られた kh は $\sim 200 \text{ darcy} \cdot \text{m}$ とかなり良い透水性を示した。

長期噴気試験で、生産量の減少がCOP-1,2で認められ、特にCOP-2はその減少が大きい。これは、おそらく貯留層の透水性が比較的小さいことによるものと思われる。またCOP-1,2 の同位体比の経時変化から、リザーバー内の貯留体量に比して両坑井の生産量の割合が大きい可能性が指摘されている。

(4) 帽 岩

COP-1,2の変質については500~600mの以深の約200m間で強くなり、黄鉄鉱等を含む粘土化帯となっている。また、COP-3 では、200~850m間にカオリナイトがほぼ連続的に分布している。この粘土化帯の分布より深部は温度が240°C前後で一定となり、蒸気卓越型貯留層となっている。従ってこの粘土帯は帽岩としての役割を果たしているということがいえる。

(5) 比抵抗構造と貯留層の拡がり

COP-1,2の電気検層結果とその周辺における電気探査結果はよく一致する。即ち、深度500~800m間の粘土化帯を境に蒸気卓越型の貯留する下位は高比抵抗(±150 Ωm)を、上位は低比抵抗(±8 Ωm)を示す。

COP-1,2 の地域でみられるこのような比抵抗構造は、高比抵抗基盤隆起帯に限って特徴的に認められ、これは蒸気卓越型貯留層の賦存地域を示すものと考えられる。

高比抵抗基盤隆起帯は、Fig. 5-49に示すように3方向の断層に囲まれたホルスト部にほぼ一致し、その広さは約13km²である。Fig. 5-48に示すようにその深度は一般

に400~800mで、地熱徴候地のある北側及び東側で浅く、これより離れる南西側で次第に深くなる。

上記高比抵抗層の下(深度1,600m以深)には、深部低比抵抗層が検出されているが、これは蒸気卓越型貯留層の下位に塩分濃度に富む熱水タイプの貯留層の存在の可能性を示唆するものと考えられる。

5.2.3 流体流動

(1) 本地域の温泉水は酸素と水素の同位体比から天水起源であると考えられる。

Termas de Copahueの温泉水の同位体比は、標高2,200~2,300m付近に降った天水のそれと異なり、比較的近傍に降って地下にしみ込んだものであると考えられる。

(2) Termas de Copahueの ^3H 濃度は地表水のそれとほぼ同じような値(2~3 TU)を示し、これらの温泉水の起源は近い過去に降った天水と考えられる。

(3) Las Maquinas, Las Maquinitas及びAnfiteatroの温泉は、 $\text{NH}_4\text{-SO}_4$ 型、Termas de Copahueのそれは HCO_3 型である。いずれの温泉水も主要陽イオンの溶存量が少なく、揮発性成分が多く含まれている。すなわち、これらの温泉の成因として、地下深部からの蒸気、ガスが浅部地下水へ吹き込み、加熱されたものと推定される。

(4) Vn. Copahueの北麓のChancho C6には、他の地熱徴候地よりも火山性に近い組成のガスが噴気しており、同火山との関係が示唆される。

(5) 温泉水の起源は、比較的近い過去に近傍に降った天水であることは、ほぼ確実であるのに対し、COP-1, 2, 3でとらえた流体のリチャージエリアは明らかでないが、地形条件から高標高地であるVn. Copahue及びC° Chancho C6であると考えられる。この流体の流動方向については、流体地化学からは気水分離する前の流体の同位体比が推定できないため言及できないが、Fig. 5-49に示すようにNE-SE系の断層のVn. Copahueへの伸びとそれに沿う電気探査の見掛低比抵抗の伸びは、Vn. Copahueからホルスト深部への流体の流動を示唆しているのかもしれない。

(6) 5.2.2の「貯留構造」で述べたとおり、流体流動に関係の深い断層としてWNW-ESE系、NE-SE系及びNW-SE系がある。これらの断層は、5.2.4の「地熱系モデル」で述べるように、断層沿いには流体の通路の役目と側方流動を制限する役目を果たしているものと考えられる。

(7) 従って広域的な流体活動は次のように考えられる。リチャージエリアと考えられるVn. Copahue及びC° Chanco Cóから浸透した天水が深部で暖められ、ホルストを境している断層やホルスト中の断層に沿って上昇する。途中熱水がフラッシュし、蒸気卓越型貯留層となり、一部の蒸気、ガスが地表の噴気を形成したり、浅層地下水へ吹き込み、加熱されて温泉水として湧出する。また、Vn. Copahueの火口を満たしている湖水は火山ガス吹込水と考えられる。

5.2.4 地熱系モデル

熱構造、貯留構造及び流体流動から以下地熱系モデルを構築した (Fig. 5-50及び Fig. 5-51)。

(1) 本地域の熱源は、Las Mellizas formationからVn. Copahueまで続いた一連の火山活動をもたらしたマグマ溜りであり、Vn. Copahueからホルストにかけて熱伝導の高い地域となっているものと考えられる。

(2) 本地域の温度断面は、ホルストを中心に盛り上がった形状を示し、深度600~800mで230℃以上を示す。それ以深は蒸気卓越型貯留層に入り、ほぼ一定の温度(230~240℃)である。ホルストの縁辺に位置するCOP-1, 3とホルストの中心寄りに位置するCOP-2の坑内温度を比較すると熱的にはCOP-2の方がより中心に近いものと考えられる。

(3) Termas de Copahueをはじめ各地熱徴候地に出ている流体は、³Hからその滞留時間は短く、また酸素と水素の同位体比から深部から供給されたものではなく、比較的近傍に降って地下に染み込んだ天水が蒸気とガスの混入によって暖められたものであると考えられる。

(4) 一方、COP-1, 2, 3 から得られる深部流体のリチャージエリアは地形から高標高地であるVn. Copahue及び C° Chancho C6であると考えられる。流体の流動方向について流体の地化学解析からは本フィールドは推定できないが、NE-SW系の断裂とそれに沿う電気探査の見掛け低比坑 ($AB/2 = 1,500\text{m}$) の伸びがVn. Copahueからホルスト深部への流体の流動を示唆しているのかもしれない。

しかし、その水の供給量は次のことから大きくないと考えられる。

- (a) 本貯留層は、COP-1, 2, 3 での事実及び温泉水の流体地化学から蒸気卓越型貯留層であり、そこから放出される流体の量が大きくないこと
 - (b) ホルストの南西を境するWNW-ESE系の断層は、変質して粘土化を受けており、流体のホルストへの側方流動を制限しているものと考えられること
- (5) ホルストの東を境するNW-SE系の2本の断層もまた、断層沿いに変質が発達しており、それが低比抵抗分布に明瞭にあらわれている。これは、流体流動を示唆するものである。

(6) COP-1, 2, 3の坑内温度が約240°Cで一定の温度になる深度、すなわち、蒸気卓越型貯留層の上部には変質帯が存在しており、これが帽岩となっていると考えられる。電気探査からも推定されるこの変質帯は、上昇してくる蒸気の逸散をとめると同時に、上方からの天水の浸透をおさえている。

(7) COP-1, 2, 3で確認された貯留層は、Las Mellizas formationの破碎された溶岩に流体が貯留されていると思われている。COP-1, 2の生産性はプロダクションテストからあまり良くない。生産指数は両坑とも約0.7t/h/kg/cfである。一方、COP-3では生産指数3~17(t/h)/(kg/cf)とかなり良い生産性を示した。また、COP-1, 2の同位体比の経時変化から貯留層内の貯留流体量は、両坑井の生産量(約5t/h/we 11)に比して、小さい可能性がD'Amore et al. (1987)によって指摘されている。

(8) 環状盆地の基盤であるHualcupen formationの深度は、ホルスト部で重力探査から1,600m程度であると考えられる。その上位には、不透水層のRiscos Bayos pyroclastic flow depositsが分布している可能性が考えられる。この不透水層直

下のHualcupen formationの上部にも環状地形急崖での観察から、溶岩が卓越する層であり、断裂沿いには優秀な貯留層を形成しているものと推定される。

(9) 本貯留層形成に関連の深い断層として、地質、坑井データ及び地熱徴候の分布から次の3系列が考えられる。

- (a) Chanco CóからLago Agrioに続くWNW-ESE系の断層
- (b) 地熱徴候地に発達するNE-SE系の断層
- (c) Las Maquinasの東側のNW-SE系の逆断層

(a)は、本地域で最も卓越した断層で、電気的な不連続帯の境界に一致する。このような電気的境界は、経験的に優秀な貯留層を成すことが多い。(b)は、本地域の最も新しい開口性の断層である。この断層は地熱徴候と深い関係にある。(c)は前述の通り、流体の上方への移動をもたらす断層である。この断層はLas Maquinitas変質帯を形成している。

これらの断層沿い及び近傍の破碎された溶岩に流体が貯留されているものと考えられる。

また、以下の調査結果は、確認された蒸気卓越型貯留層の下位に熱水貯留層の存在の可能性を示唆しているかもしれない。

- (a) 電気探査によって深部低比抵抗層が捉えられていること
- (b) COP-1の坑底付近で250℃以上の温度を記録していること

5.3 地熱資源量の評価

5.3.1 地熱資源量評価方法の概要

地熱資源量の評価のためには種々の方法があり、データ取得量の多い地域の評価に対しては、地下の貯留層の不均質構造を反映させた数値シミュレーションによる解析が一般的に行われているが、当地域のデータ取得量を勘案すれば、複雑なグリッド構造を持つシミュレーションは余り意味のある結果をもたらさないであろう。従って、ここでは以下のとおり2段階にわけて、当地域の発電規模の評価を行った。

1) 2次元数値シミュレーション

第5章で詳述したCopahue地域の地熱系モデルに基づき、2次元断面の貯留層自然状態の数値モデリングを実施し、地熱系概念モデルの精緻化を行う。

2) 容積法による地熱資源量の評価

精緻化された地熱系概念モデルに基づいて貯留層のパラメータを検討し、容積法により地熱資源量及び発電規模の評価を行う。計算に際しては、確率的アプローチにより、貯留層パラメータの不確実性を考慮する。

この解析の概念フローを Fig. 5-52 に示す。

5.3.2 自然状態のモデリング

1. 数値シミュレーション手法

数値シミュレーションは、多孔質媒体中の質量（水・蒸気）及び熱の移動を取り扱う2相の貯留層シミュレーターを用いて実施した。本シミュレーターは積分差分法をもちいている。

地熱系は地質学的時間で進化するものであり、その長い時間内で地熱系内の熱力学的条件及び水理学的条件が力学的平衡を得る方向に向かって変化する。この変化の度合いは、これらの系に対する地熱開発に伴って生ずる変化に比較して極めて小さく、従って未だ開発されていない地熱系は準定常状態にあると考えられる。この自然状態（又は初期状態）の数値モデルを作成することにより、地熱系概念モデルの検証・改善が可能となり、正確な貯留量の推定が可能となる。すなわち、最終的に作成された自然状態のモデルは温度分布等の観測データと定量的に（少なくとも定性的に）一致

するものであろうし、この作業を進める間に、地層の浸透率、深部における熱的境界条件、系内全般の流体の熱力学的状態等重要な地熱系の特徴に対する知見を得ることができる。また、たとえこれらのパラメータを明瞭正確に定量化できなくても、地熱系モデルの改善や貯留量推定の改善のために役立つ各種パラメータの制約条件を定め直すことが可能となるものである。

Copahue 地域の自然状態シミュレーションは、データの量・密度等を勘案し、当地域の地熱系を代表するものとしてFig. 5-51に示すA-A'断面を選定して、断面2次元の解析を実施した。本断面におけるシミュレーショングリッド分割を Fig. 5-53 に示す。蒸気貯留層が想定されている中心部及びガス等の上昇が想定されるCopahue火山の深部は比較的小さなグリッド分割（幅1 km）とした。垂直方向には、地質及び変質を考慮して標高+1500m～-2000mを6層に分割した。合計ブロック数は10（水平）×6（垂直）=60である。なお、断面の奥行き方向の厚さは2 kmとしている。

側面の境界条件は透水境界で一定温度境界とした。また底面の境界条件は不透水で断熱とし、最下層(Z=1)にheat source及びmass sourceを与えた。中央部のheat sourceは、COP-2及びCOP-3の浅部（キャップロック）の温度勾配27～29°C/100mから計算される熱流量（0.5～0.6W/m²）を参考として与え、Copahue火山の深部には最終的に2 kg/sのmass sourceを設定した。上面の境界条件は浸透境界（一定圧力）及び温度一定の条件とした。

これらの条件のもとで、実測に基づく温度・圧力分布と計算値がマッチするように浸透率分布をトライ・アンド・エラーで修正してゆき、最終的に自然状態のモデルを作成した。特に蒸気卓越型貯留層の特徴的な条件である、難透水性のキャップロックと側面のバリアーの浸透率及び貯留層内の浸透率並びにTermas de Copahue等の地表噴気・流体流出部分の断裂帯の浸透率のバランス関係等の検討を行った。なお、一回の計算ランでは、計算開始後5万年の計算結果を現在の自然状態とし、この結果と実測に基づく温度・圧力値の比較を行った。

2. 数値シミュレーション結果

当地域の最終モデルを推論するにあたっては、蒸気・熱水2相領域の温度・圧力条件が実測から推定されるものとあっているか？その広がりほどの程度か？といったことに特に注意して実施した。最終的なモデルを得るまで、合計29回の計算ランが必要

であった。

最終的に得られたCopahue地域の2次元断面モデルの温度分布、圧力分布、蒸気飽和度分布並びに流束ベクトル分布をそれぞれ Fig. 5-54、Fig. 5-55、Fig. 5-56 及び Fig. 5-57 に示す。

概念モデルでは、Las Mellizas層の変質帯をキャップロックとし、電気探査や地表踏査等で得られた断層、変質帯を側面のバリアーと想定して、それらで囲まれる領域に蒸気卓越型の貯留層の存在を推定している。数値シミュレーションの結果は、これらの推定を強く支持するものといえる。即ちTermas de Copahue 及びLas Maquinitas等の地熱徴候地の地下の変質帯で囲まれた部分に2相領域が広がっており、蒸気は上昇して、その一部がキャップロックの割れ目を通して浅部地下水層に吹き込んでいる。上面から流出する蒸気流量の計算値は1.6kg/secであった。モデルではZ=2以深で熱水層となりその上位の2相領域中の熱水の挙動も含めて広く熱水対流系を形成している。この蒸気層と熱水層の境の位置や蒸気飽和度の値の問題は貯留層上部からの質量(蒸気)の流出と側方からの水のリチャージとのバランスの問題でもあり、深部についての坑井データが無い現状では、これ以上の定量的な検討は無意味であろう。

Fig. 5-58に最終モデルで設定した浸透率分布を示す。

実測データが十分でなく、深部の状況についても明確ではないが、本数値シミュレーションにより、Copahue地域の中央深部からの熱伝導により加熱された蒸気卓越型貯留層の熱力学的条件の一部が明らかとなり、概念モデルを定量的な面から精緻化することが出来たと考えられる。

5.3.3 容積法による評価

1. 容積法による資源量評価手法

探査段階の地熱系においては、貯留量の推定はしばしば容積法に基づいておこなわれている。今回のCopahue地域の解析はUSGS(White and Williams, 1975; Muffler and Guffanti, 1978)により導入された容積法の方法を改善したものを使用した。更にこの手法に対して、いくつかのパラメータの不確実性を考慮するため、確率的な基礎を用いた改良を行った。

容積法においては、最大維持可能な発電所容量(E)は下記の式により与えられる。

$$E = A \cdot h \cdot C (T - T_0) \cdot R / F / L \quad (5.3.3.1)$$

ここで A =貯留層の面積

h =貯留層の厚さ

C =貯留層の容積比熱

T =貯留層の平均温度

T_0 =基準温度 (年平均気温に相当する)

R =全回収率 (貯留層に保有される熱エネルギーのうち発電所で電気エネルギーに変換される割合)

F =発電所の設備利用率 (年間ベースで発電所が電力を生産する時間の割合)

L =発電所の耐用年数

上の (5.3.3.1) 式のパラメータ R は次のとおり定められる。

$$R = \frac{w \cdot r \cdot e}{C_r \cdot (T - T_0)} \quad (5.3.3.2)$$

ここで r =回収率 (坑口において熱エネルギーとして回収し得る地下のエネルギーの割合)

C_r =貯留層流体の比熱

W =生産された流体による熱力学的に最大の有効仕事

e =実際の発電サイクルで起こる機械的及びその他の損失を説明する利用効率

(5.3.3.1) 式のパラメータ C は次式により与えられる。

$$C = \rho_r C_r (1 - \phi) + \rho_f C_r \phi \quad (5.3.3.3)$$

ρ_r =岩石マトリックスの密度

C_r =岩石マトリックスの比熱

ρ_f =貯留流体の密度

ϕ =貯留層の空隙率

(5.3.3.2) 式中のパラメータ W は熱力学第1法則及び第2法則により導かれ、次により与えられる。

$$dW = dq (1 - T_0/T) \quad (5.3.3.4)$$

$$dq = C_r dT \quad (5.3.3.5)$$

ここで q は熱エネルギーを表す。

方程式 (5.3.3.1) ~ (5.3.3.5) を用いて、地熱地域から回収できる最大電力容量で表した貯留量を推定することができる。

Copahué 地域に対して、大きな不確実性がなく推定されたパラメータは次のとおりである。

$\rho, C, = 2360 \text{kJ/m}^3 / ^\circ\text{C}$ (岩石の典型的な値)

$T_0 = 10^\circ\text{C}$ (年平均気温)

$e = 0.6$ (蒸気型の地熱発電所の典型)

$F = 0.85$ (現在の地熱発電所の典型)

$L = 30$ 年 (発電所の一般的耐用年数)

貯留量推定に必要な残りのパラメータ (面積、厚さ、空隙率、平均温度、蒸気飽和度、回収率) には幾らかの不確実性があると考えられる。従って、貯留量は、モンテ・カルロシミュレーション手法を使って、確率的な方法により計算を行った。

確率的な手法により回収可能な貯留量の推定を行うには、次の二つの事が必要である。

a) パラメータの各々に対する確率分布の推定

b) これらの確率分布の繰り返しサンプリングの方法

不確実なパラメータに確率分布関数をあてはめるに際しては、パラメータの一様分布あるいは三角分布を仮定することが全ての実際目的にたいして有効である。一様分布は指定した最小値と最大値の範囲内で均一に存在しうる変数を表す。かなりの不確実性がある場合は、均一分布がランダム変数に対して唯一実際的な定義を与えるものであろう。しかしながら、設定範囲内のある部分の確率が高いと判断される場合には、三角形分布の方が適切な変数を示す。

モンテカルロシミュレーションの手法は一つのサンプリング手法であり、これにより一つ又はそれ以上の確率分布を含むような非常に複雑な式を簡単に評価することができる。本質的には、本手法は、地熱地域の開発のような一つの過程を、不確実さを持つ入力パラメータの無作為抽出によってシミュレートすることからなっている。

資源評価のためのモンテ・カルロ・シミュレーションの基本的方法をFig. 5-59にフローとして示した。

モンテ・カルロ・シミュレーションの結果は、Eの値の最小値から最大値の間を小区間範囲に区切り、その各範囲に入る計算値の数 (及びこれから得られる計算値の割合) をカウントして頻度で示した。この推定電力量の百分率頻度分布は、その調査プロジェクトの内在するリスクをグラフで表示したものである。例えば、もしそのよう

な頻度分布が鋭い形であれば（すなわち、標準偏差が小さければ）内在するリスクは小さい。それに反して、分布が平坦な場合（すなわち標準偏差が大きい場合）は、リスクは大きい。また、結果を累積頻度（あるいは累積百分率確率）分布で表示することも必要である。この累積頻度（あるいは確率）グラフから、発電容量の任意の値について達成できる確率を直接読み取ることができる。

2. 不確実なパラメータの決定

Copahue地域の貯留量推定に際しては、以下の2つのケースに分けて計算を行った。

a) 確認地域

COP-1, COP-2及びCOP-3により貯留層が確認されている地域を評価の対象としたケース。

b) 全体地域

Termas de Copahue 等地熱徴候地を全て含んだ三角形で囲まれる地域（電気探査で把握された地域）全域を評価の対象としたケース。

上記の地域区分の平面分布を Fig. 5-60 に示す。また、蒸気卓越型地熱貯留層の下位に想定されている深部熱水層の存在は確認されていないので、まず蒸気貯留層のみを対象として貯留量推定を実施した。

(1) 確認地域

Copahue 地域の中でCOP-1, 2及び3により貯留層の存在が確認された地域のみを対象として貯留量の評価を実施した。3坑井で形作られる一辺が約1kmの正三角形の地域の外側に幅1kmの帯域を設けた地域を確認地域として抽出した。その面積は約4km²である。

貯留層の厚さの正確な推定は坑井の数及びその深度が十分でないため困難であるが、最小値としてCOP-1の深度800m～1400m（+1200mASL～+600ASL）で確認された区間、すなわち厚さ600mを選択した。また、最大値としては、COP-2で確認された貯留層上面深度（+1400m）から標高+200m（深度約2200m）まで貯留層が存在すると仮定して、厚さ1200mとした。また、典型的な値として標高+1300mからLas Mellizas層の下面深度（+400mASL）までの厚さ900mを最尤値とした。

貯留層の平均温度は、COP-2の貯留層温度約230℃、及びCOP-1の最高温度約

250℃をそれぞれ最小値及び最大値として抽出し、最尤値は 240℃として、三角形確率分布を与えた。

パラメータ ρ_i と C_i は温度 T が推定されれば、蒸気表から求めることができる。平均空隙率 ϕ はコア物性試験や地熱地域の一般的値を参考として、最小値及び最大値をそれぞれ 4 % 及び 10 % とする一様分布を設定した。また水飽和率は、最小値として典型的な残留飽和度 0.3 を取り、最大値は 0.5 と設定して、一様分布を与えた。

回収率は、最も設定困難なパラメータであるが、ここでは、Nathenson(1975) の回収率の図（回収率は温度、空隙率及び水飽和率の関数として表される）及び上記のとおり設定した空隙率並びに水飽和率の最大値・最小値を用いて推定した。すなわち、空隙率及び水飽和率の最小値 0.04 及び 0.3 から理論的な回収率は約 5 % と得られる。これは全体的に浸透性の良い理想的な貯留層についての値であり、実際の貯留層では全体の約 75 % 程度が浸透領域と考えても良いだろう。従って、回収率の最小値として 0.04 を採用した。一方、回収率の最大値は、同様に空隙率と水飽和率の最大値 0.1 と 0.5 から理論的な回収率が約 20 % と得られたが、同様に実際の貯留層では最大その 75 % が浸透領域であると仮定して、0.15 を採用した。回収率の確率分布は一様分布を設定した。

Table 5-17 に、確認地域の評価で用いたパラメータの一覧を示す。

(2) 全体地域

Copahue 地域全体の貯留層の面積としては、地熱徴候地を含む三角形で囲まれる地域（電気探査で把握された地域）約 13 km² が最大と考えられる。しかし、実際の貯留層面積はこれより小さいかもしれず、最小値として Las Maquinas, Las Maquinitas, Termas de Copahue, Anfiteatro および COP-3 で囲まれる地域に幅 500 m の帯域を加えた平行四辺形の地域約 11 km² を選択した。この中での最尤値は決め得ないため、貯留層面積として、最大値、最小値がそれぞれ 13 km²、11 km² の一様分布を設定した。

貯留層の厚さについては、確認地域のパラメータと同様、最小値、最大値及び最尤値をそれぞれ 600 m、1200 m 及び 900 m と設定した。

貯留層の平均温度は、最小値及び最大値をそれぞれ 230℃ 及び 250℃ とし、一様確率分布を与えた。

平均空隙率 ϕ 及び水飽和率も確認地域と同様の考えを適用した。従って回収率の最大値も同様の値（15%）となる。回収率の最小値については、全て浸透領域である理想状態の回収率（5%）に対して、実際の広域の評価対象地域に於てはその半分程度が浸透領域であると考えられるので、0.025を採用した。

Table 5-18に、全体地域の評価で用いたパラメータの一覧を示す。

3. 評価結果

ここでは前節で述べたパラメータにより計算したモンテ・カルロ・シミュレーションの結果について、それぞれ確認地域及び全体地域にわけて記述する。

(1) 確認地域

Fig. 5-61 に計算されたMW容量の頻度分布を示す。確認地域の計算MW容量の平均値は35.9MWである。不確実なパラメータは無作為に1000回抽出され、貯留量は、抽出されたパラメータの組毎に計算された。Fig. 5-62 には、計算されたMW値の平均値を試行回数関数として示している。この図から、安定した統計上の結果を限定するのに、1000回の試行が適切だったことがわかる。

Fig. 5-63 に、MW容量の累積確率分布を示す。この図から、貯留量が20MW以上である確率は約86%であることがわかる。

Fig. 5-64 及び Fig. 5-65 には、それぞれ単位面積当たりの貯留量(MW/km²)の頻度分布と累積確率分布を示す。平均値は、9.0MW/km²である。また、7.0MW/km²以上である確率は約67%である。

(2) 全体地域

Fig. 5-66 に計算されたMW容量の頻度分布を示す。全体地域の計算MW容量の平均値は99MWである。不確実なパラメータは無作為に1000回抽出され、貯留量は、抽出されたパラメータの組毎に計算された。Fig. 5-67 には、計算されたMW値の平均値を試行回数関数として示している。

Fig. 5-68 に、MW容量の累積確率分布を示す。この図から、貯留量が50MW以上である確率は約70%以上であることがわかる。

Fig. 5-69 及び Fig. 5-70 には、それぞれ単位面積当たりの貯留量(MW/km²)の頻度分布と累積確率分布を示す。平均値は、8.3MW/km²である。また、7.0MW/km²以上である確率は約58%である。

5.4 発電出力の評価および決定

5.4.1 発電規模の評価

ある地熱地域に存在する地熱資源量の算定方法の一つとして、前述の容積法があり、開発の初期の段階において有効に使われている。調査が進み、その地域の情報が、より詳細に得られた段階においては、分配パラメータモデルによる3次元流体流動シミュレーションを行い、将来予測も含めた適正発電規模の決定が行われる。

本地域の発電規模を評価するに当たり、調査の内容及び数量などを考慮し検討した結果、容積法による評価が妥当であると考えられる。

容積法を本地域に適用するに当たり、地熱徴候地、物理探査結果、地質構造、地温分布などから地熱貯留層の賦存が想定される全体地域と、その中でも実際の調査井掘削により、地熱流体の賦存が確認されている確認地域とに分けて検討を行った。

1. 確認地域の発電規模

確認地域における容積法の結果は、前節に示したが、そのモンテカルロシミュレーションによる発電電力量の累積確率分布では、通常、目安とされる85%で21MW、90%で18MWとなっており、およそ20MW以上の発電が可能であるとの結果が得られた。

一方、確認地域には、COP-1、COP-2および今回掘削したCOP-3の3本の坑井がある。COP-1およびCOP-2において確認された、蒸気卓越型の貯留層は、必ずしも良好な透水性を持っていないように思われたが、COP-3においては十分な透水性を、言い替えば良い生産性を持っていることを確認することが出来た。すなわち、COP-3においては、最終掘削口径が、NQサイズ(φ96mm)と小口径のボーリングにもかかわらず最大9.4ton/hrの蒸気量を産出した。貯留層温度、地熱流体のエンタルピー、生産指数等が同一と仮定して最終口径8-5/8インチの生産井を掘削した場合を想定し、計算すると50ないし60ton/hrの蒸気量が得られることになる。これは発電出力に換算して約6~7MWに相当する。

これらのことは、COP-3程度の生産井規模の井戸が3ないし4本蒸気の噴出に成功すれば、20MWの発電は可能である事を示している。

2. 全体地域の発電量

本地域全体については、確認地域を除き詳細な坑井調査は実施されておらず、貯留層温度や透水性については、かなり推定に基づき入力している。

今回は、蒸気卓越型についてのみモンテカルロシミュレーションを含む容積法により資源量を算出した。

この計算結果から、発電量の度数分布を見ると、その形は平たく、30MWから150MWまで、有意のピークが見いだせない。中央の値として、90MWが得られた。累積確立分布では50%で95MWとなっている。調査の進んでいない時点では、この程度の可能性を仮定した方が、良いのかも知れない。85%では48MW、90%では40MWと低い値となっているが、調査が進み、度数分布がピークを持つようになれば、大きな値を取るようになるだろうと思われる。

なお、貯留層温度230℃、厚さ600m蒸気卓越型として決定式により計算した結果では、81MWの値が得られている。

これらの結果より、低く見積っても蒸気卓越型貯留層として80MW程度の発電量が期待される。

前述の確認地域に関しては、調査井によりその存在が確認されているが、全体地域については、坑井による確認はされていない。今後、CSAMT法などの有効な物理探査等を実施し、有望地域を絞り込み、調査井による貯留層の存在の確認と規模を明確にする調査の実施が必要である。現時点における評価としては、実際に地熱発電所が開発されている地域における発電規模と容積法による資源量の関係から、容積法による発電量の半分以上の実現は、比較的容易であることより、本地域においても50MW程度の発電は可能と考えられる。

3. 熱水卓越型貯留層の可能性について

深度にして1400mより深部において、熱水卓越型の貯留層の存在が推定されており、この部分については、決定式容積法により資源量を算定した。

算出条件：貯留層分布面積	13 km ²
貯留層厚さ	700 m
平均温度	250℃
基本温度	10℃

回収率	0.25
耐用年数	30年
設備利用率	0.85
岩石の密度	2430 kg/m ³
岩石の比熱	0.972 KJ/kg・℃
利用効率	0.3 熱水卓越型では低くなる。

この計算結果として、141.2MW ≒ 140MWが得られている。

この熱水卓越型の存在については、直接に証明できる証拠は得られていないが、その規模が、140 MWと大きいため、今後、調査井等によって確認する価値が充分にあると考えられる。

5.4.2 発電出力の決定

本地点の1,200m付近に賦存する蒸気を用いて、30年間発電する場合の地下資源としての出力評価としては、10～50MWと幅の広い数値が提示されている。

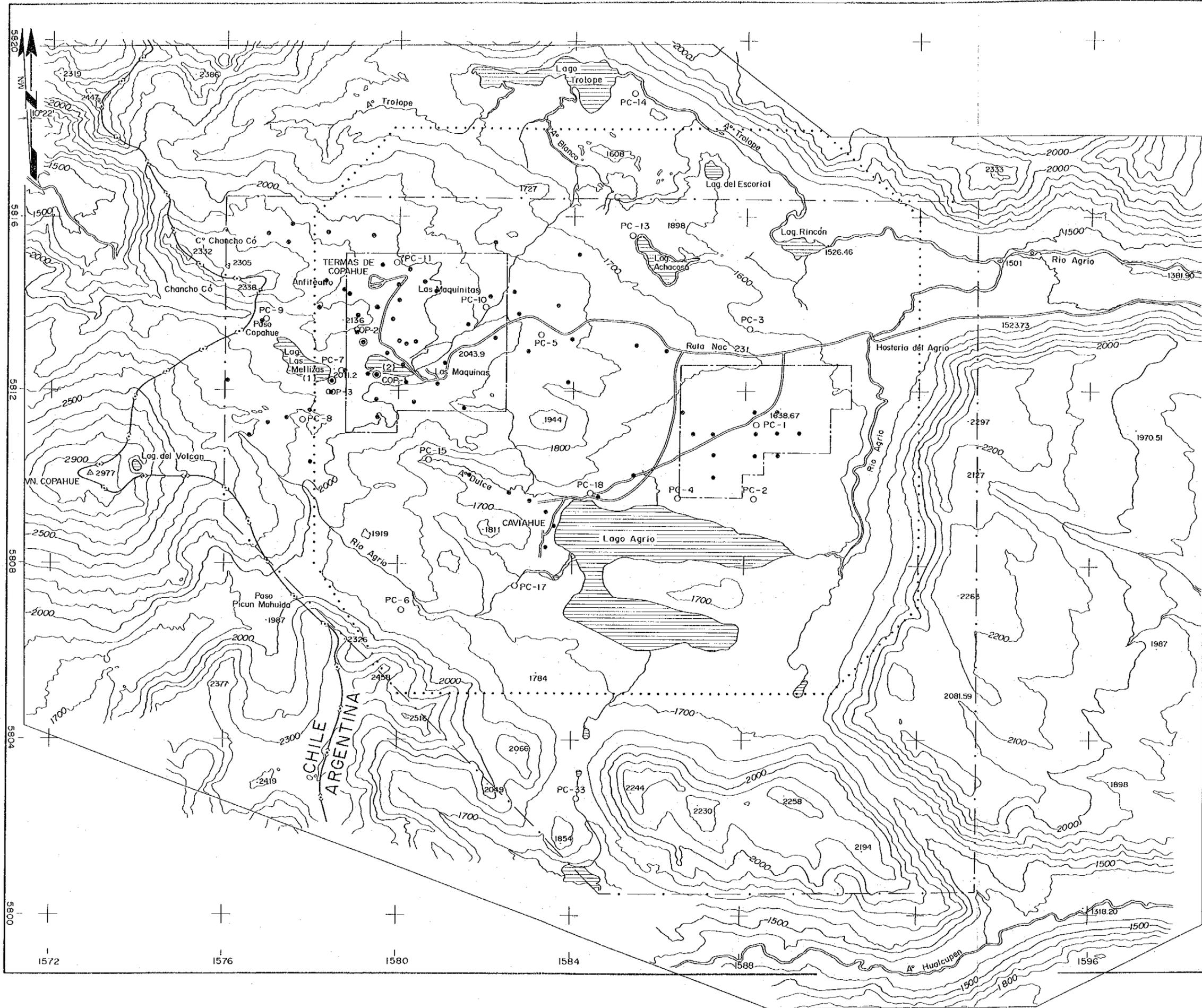
このように評価の幅が広いと云う事は、調査が初期の段階にある事を意味するものであり、調査の進展に伴いその幅は小さくなるのが一般的である。

現段階ではこの出力幅に於ける確率は100～15%であり、80%確率での出力は20MW、60%確率では30MWとなっている。

一方、経済性の面から見ると、発電ユニットの規模が概略50MW以下の範囲では出力が小さいほどユニットコストは上がり、プロジェクトが実現する確率は低くなる。今、仮にコストの目標値を30Mill/kWhとし、経済面での実現可能性の確率を30Mill/kWh以下では90%、50Mill/kWh以上では10%とすると、ラフな試算ではあるが、その出力と確率の関係は各々10MWで10%、20MWで53%、30MWでは84%となる。

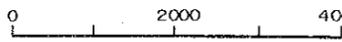
従って、資源面および経済面の両面から見た可能性は両者を掛け合わせたものとなり、その最高点は25～30MW付近となる。(Fig. 5-71参照)

一般に調査が初期の段階では、資源面での評価確率カーブは低出力側に偏る傾向にある事を勘案して出力はやや大きめの30MWとした。



LEGEND

- Geological Survey
- Photogeology
- Soil Geochemical Survey
- Fluid Geochemical Survey
- Gravity Prospecting
- Electrical Prospecting Point
- Thermal Gradient Hole
- Exploratory Well



CENTRO REGIONAL DE ENERGIA GEOTERMICA
DEL NEUQUEN
REPUBLICA ARGENTINA

FEASIBILITY STUDY
OF
COPAHUE GEOTHERMAL DEVELOPMENT PROJECT

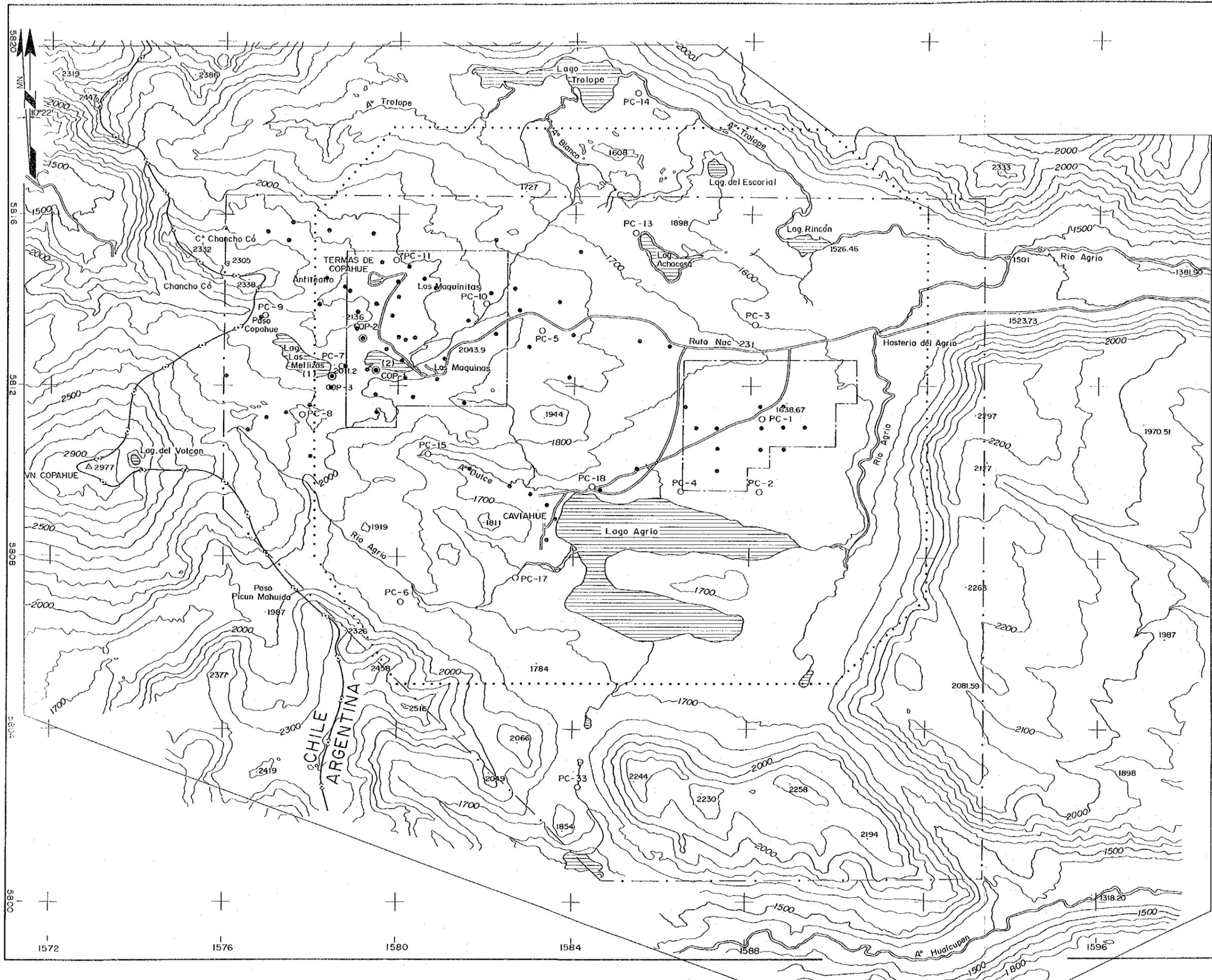
LOCATION MAP
OF
INVESTIGATION WORKS

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

DATE: _____ Fig. _____

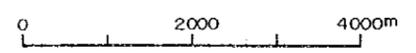
5820
5816
5812
5808
5804
5800

1572 1576 1580 1584 1588

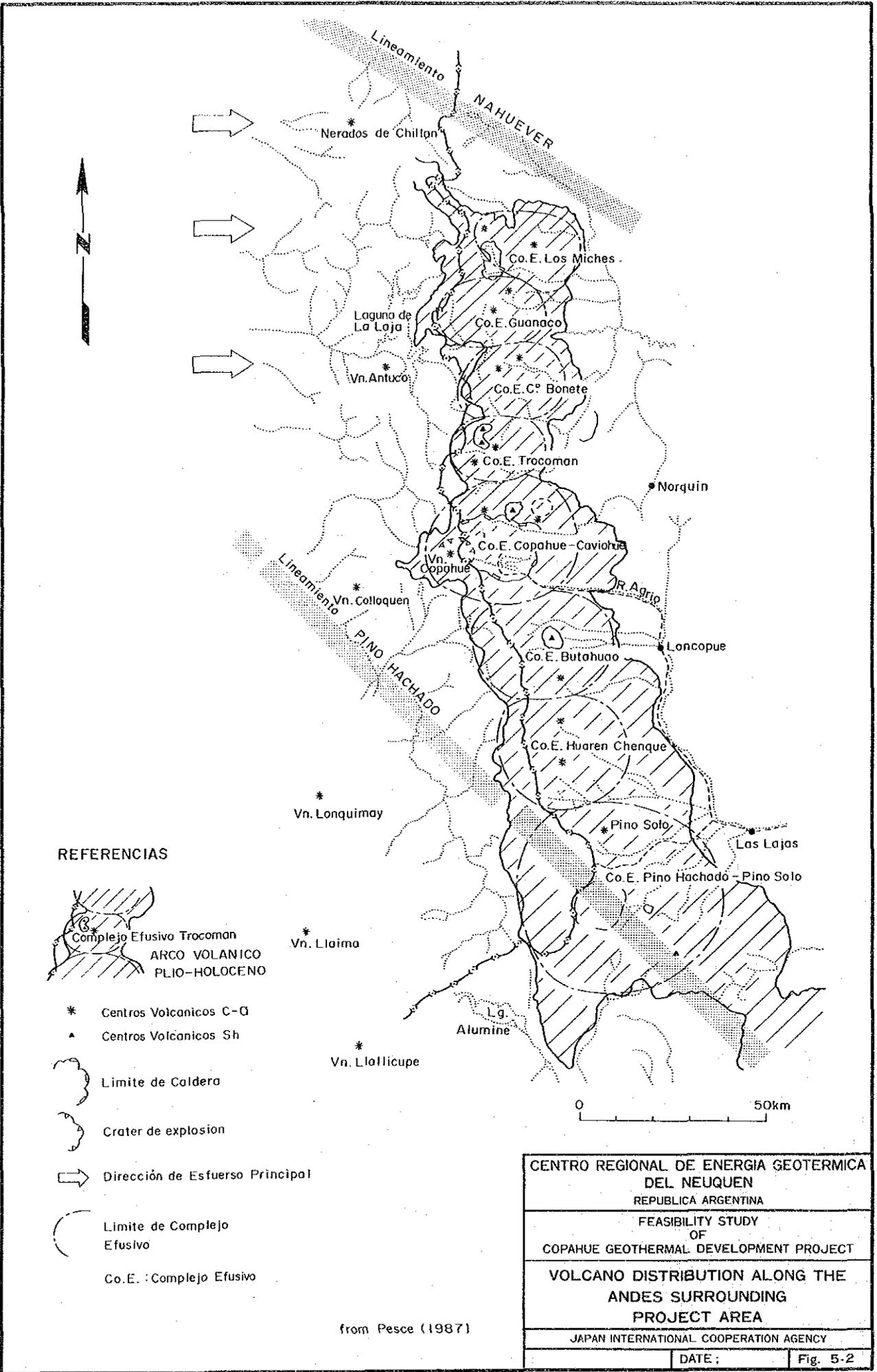


LEGEND

- Geological Survey
- Photogeology
- Soil Geochemical Survey
- Fluid Geochemical Survey
- Gravity Prospecting
- Electrical Prospecting Point
- Thermal Gradient Hole
- Exploratory Well



CENTRO REGIONAL DE ENERGIA GEOTERMICA DEL NEUQUEN REPUBLICA ARGENTINA	
FEASIBILITY STUDY OF COPAHUE GEOTHERMAL DEVELOPMENT PROJECT	
LOCATION MAP OF INVESTIGATION WORKS	
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY	
DATE :	Fig. 5-1



REFERENCIAS



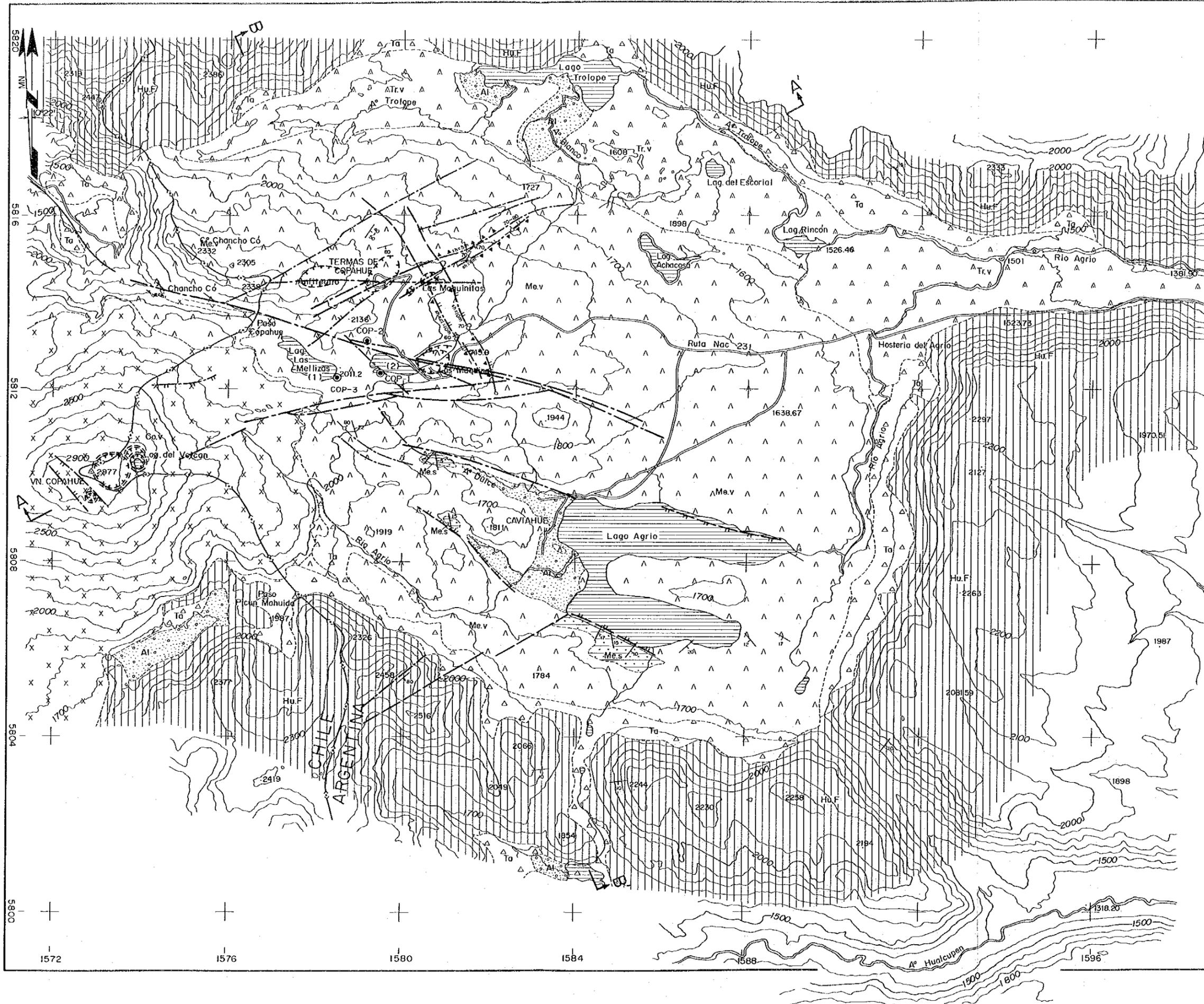
- * Centros Volcanicos C-Q
- ▲ Centros Volcanicos Sh
- ☪ Limite de Caldera
- ☪ Crater de explosion
- ➡ Dirección de Esfuerzo Principal
- Limite de Complejo Efusivo
- Co.E. : Complejo Efusivo

from Pesce (1987)

CENTRO REGIONAL DE ENERGIA GEOTERMICA DEL NEUQUEN REPUBLICA ARGENTINA	
FEASIBILITY STUDY OF COPAHUE GEOTHERMAL DEVELOPMENT PROJECT	
VOLCANO DISTRIBUTION ALONG THE ANDES SURROUNDING PROJECT AREA	
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY	
DATE :	Fig. 5-2

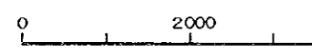
Age	Formation	Geological Column	Lithology		Remarks
			Alluvium	Talus	
Quaternary	Holocene		Alluvium	Talus	
	Copahue Volcanic Rocks		Gracial Deposits		
	A° Trolope Volcanic Rocks		Pyroxene Olivine Basalt, Liparite, and Pyroclastic rocks		
	Las Mellizas Formation		Welded Tuff Olivine Pyroxene Basaltic Andesite Agglomerate		Thickness • More than 1240m (in COP-2) • More than 1800m (in Chile)
			Pyroxene Andesite, Agglomerate		
		Caviahue Conglomerate Member		Tuffaceous Conglomerate, Sandstone, Mudstone	
			Pyroxene Andesite, Agglomerate		
	Riscos Bayos Pyroclastic Flow Deposits		Biotite Pumice Tuff ~ Lapilli Tuff		Outside of the survey area
Tertiary	Hualcupen Formation		Fine Pyroxene Andesite, Olivine-bearing Pyroxene Andesite Agglomerate		Thickness More than 1800m (in Chile)
			Tuff Breccia, Tuff		
			Tuffaceous Conglomerate, Sandstone		

Fig. 5-3 Geologic Columnar Section of the Survey Area



LEGEND

- | | | |
|------------|--|----------|
| Quaternary | | Alluvium |
| | | Talus |
- | | | |
|-------------|--|--|
| Pleistocene | | Copahue Volcanic Rocks
Pyroxene Olivine Basalt, Lipa
Pyroclastic Rocks |
| | | A ⁰ Trolope Volcanic Rocks
Pyroxene-bearing Plagioclase |
| | | Las Mellizas Formation
Lake Sediments and Glac
Conglomerate, Sandstone
Mudstone |
- | | | |
|-------------------|--|--|
| Tertiary Pliocene | | Hualcupen Formation
Fine Pyroxene Andesite, Aggl
Tuff Breccia, Tuff etc. |
|-------------------|--|--|
- | | |
|--|---|
| | Geologic Boundary |
| | Strike and Dip of Strata |
| | Fault sh; Shear Zone(m)
cl; Fault Clay(m) |
| | Fault (Assumed) |
| | Strike and Dip of Normal Fault |
| | Strike and Dip of Reverse Fault |
| | Fumaroles and Hydrothermal
Alteration Zone |
| | Crater |
| | Location of Section |
| | Exploratory Well |

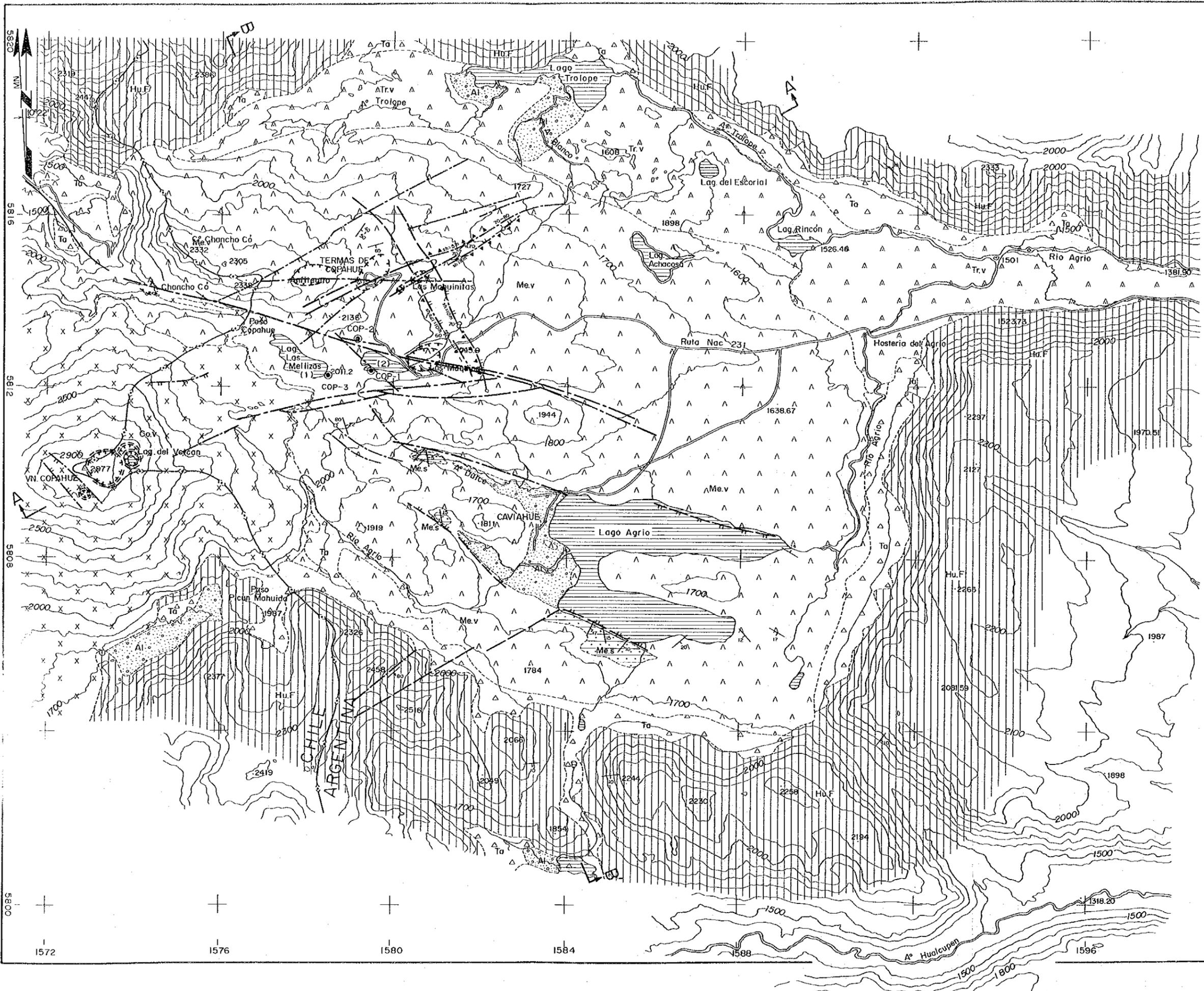


CENTRO REGIONAL DE ENERGIA GEO
DEL NEUQUEN
REPUBLICA ARGENTINA
FEASIBILITY STUDY
OF
COPAHUE GEOTHERMAL DEVELOPMENT I

**GEOLOGIC MAP
OF THE SURVEY AREA**

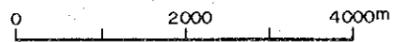
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AG

DATE: _____



LEGEND

- | | | | |
|-------------|---------------------------|--------|--|
| Quaternary | Holocene | [Al] | Alluvium
Gravel, Sand and Mud |
| | | [Ta] | Talus
Gravel, Sand and Mud |
| | | [Co.v] | Copahue Volcanic Rocks
Pyroxene Olivine Basalt, Liparite and
Pyroclastic Rocks |
| Pleistocene | Las Mellizas
Formation | [Tr.v] | A ⁰ Trollope Volcanic Rocks
Pyroxene-bearing Plagioclase Andesite |
| | | [Me.v] | Olivine Pyroxene Basaltic Andesite,
Pyroxene Andesite and Agglomerate
etc. |
| | | [Me.s] | Lake Sediments and Glacial Deposits
Conglomerate, Sandstone and
Mudstone |
| Tertiary | Pliocene | [Hu.F] | Hualcupen Formation
Fine Pyroxene Andesite, Agglomerate,
Tuff Breccia, Tuff etc. |
-
- Geologic Boundary
 - ↘ Strike and Dip of Strata
 - |— Fault sh; Shear Zone(m)
cl; Fault Clay(m)
 - |— Fault (Assumed)
 - ↘ Strike and Dip of Normal Fault
 - ↘ Strike and Dip of Reverse Fault
 - ⊙ Fumaroles and Hydrothermal
Alteration Zone
 - ⊙ Crater
 - |— Location of Section
 - ⊙ Exploratory Well



**CENTRO REGIONAL DE ENERGIA GEOTERMICA
 DEL NEUQUEN**
 REPUBLICA ARGENTINA
 FEASIBILITY STUDY
 OF
 COPAHUE GEOTHERMAL DEVELOPMENT PROJECT

**GEOLOGIC MAP
 OF THE SURVEY AREA**
 JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY