

フィリピン共和国アクパン・イトゴン地区
地熱開発計画調査

報告書

(要約)

1985年9月

国際協力事業団

資計鉞

J R

85 - 193

フィリピン共和国アクパン・イトゴン地区
地熱開発計画調査

報告書

(要約)

JICA LIBRARY



1045957[6]

1985年9月

国際協力事業団

国際協力事業団

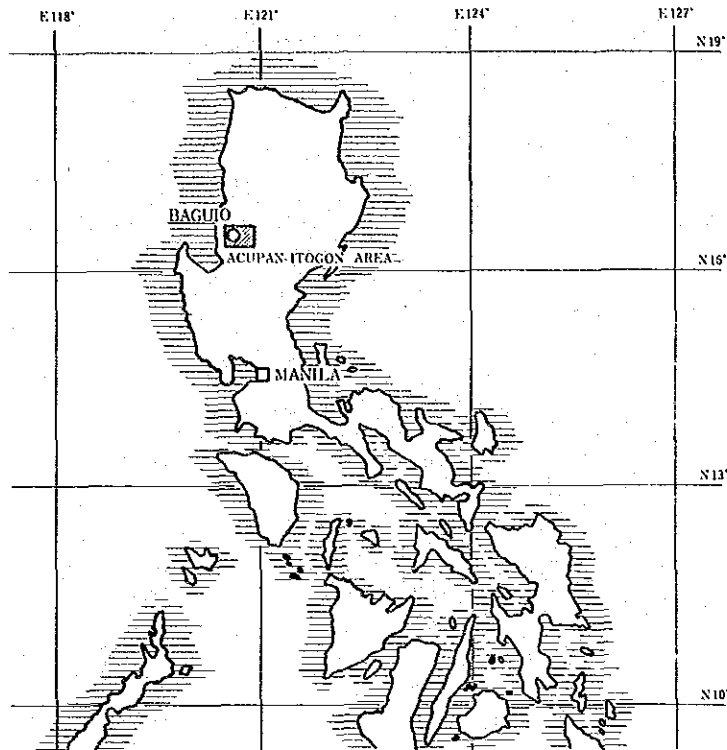
受入
月日 '85.10.14

118

登録No. 12049

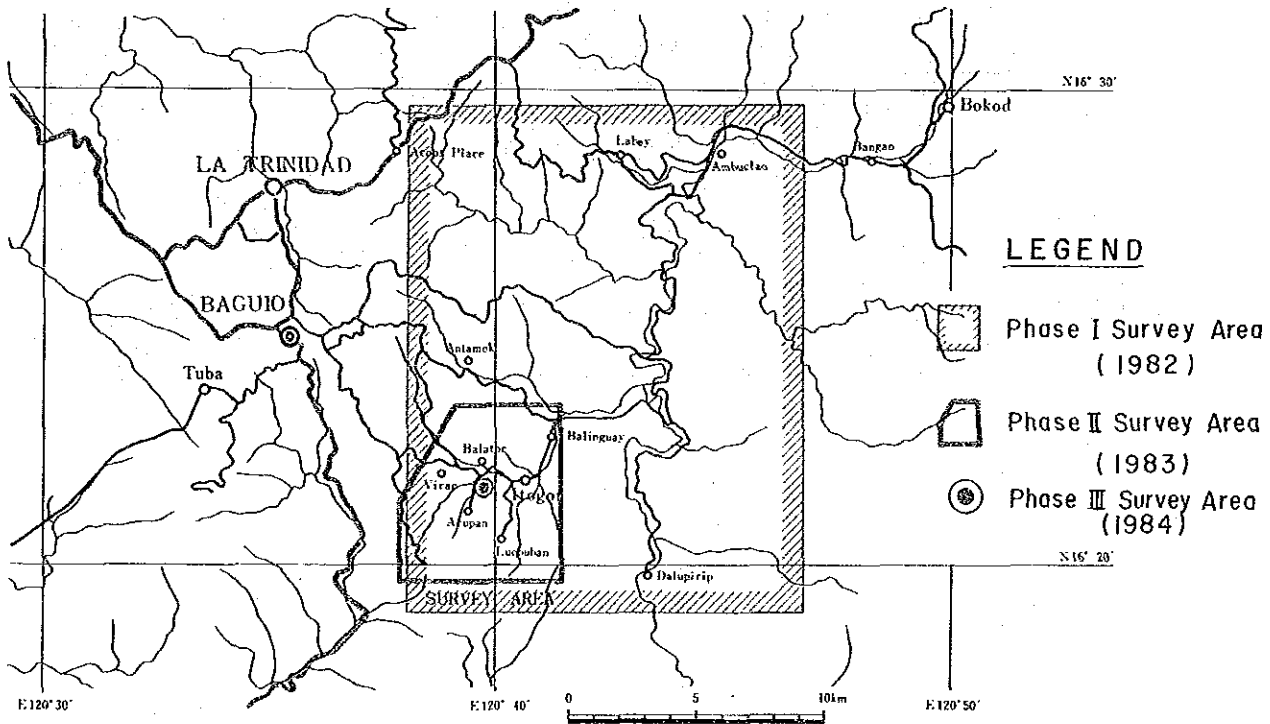
64.3

MPN






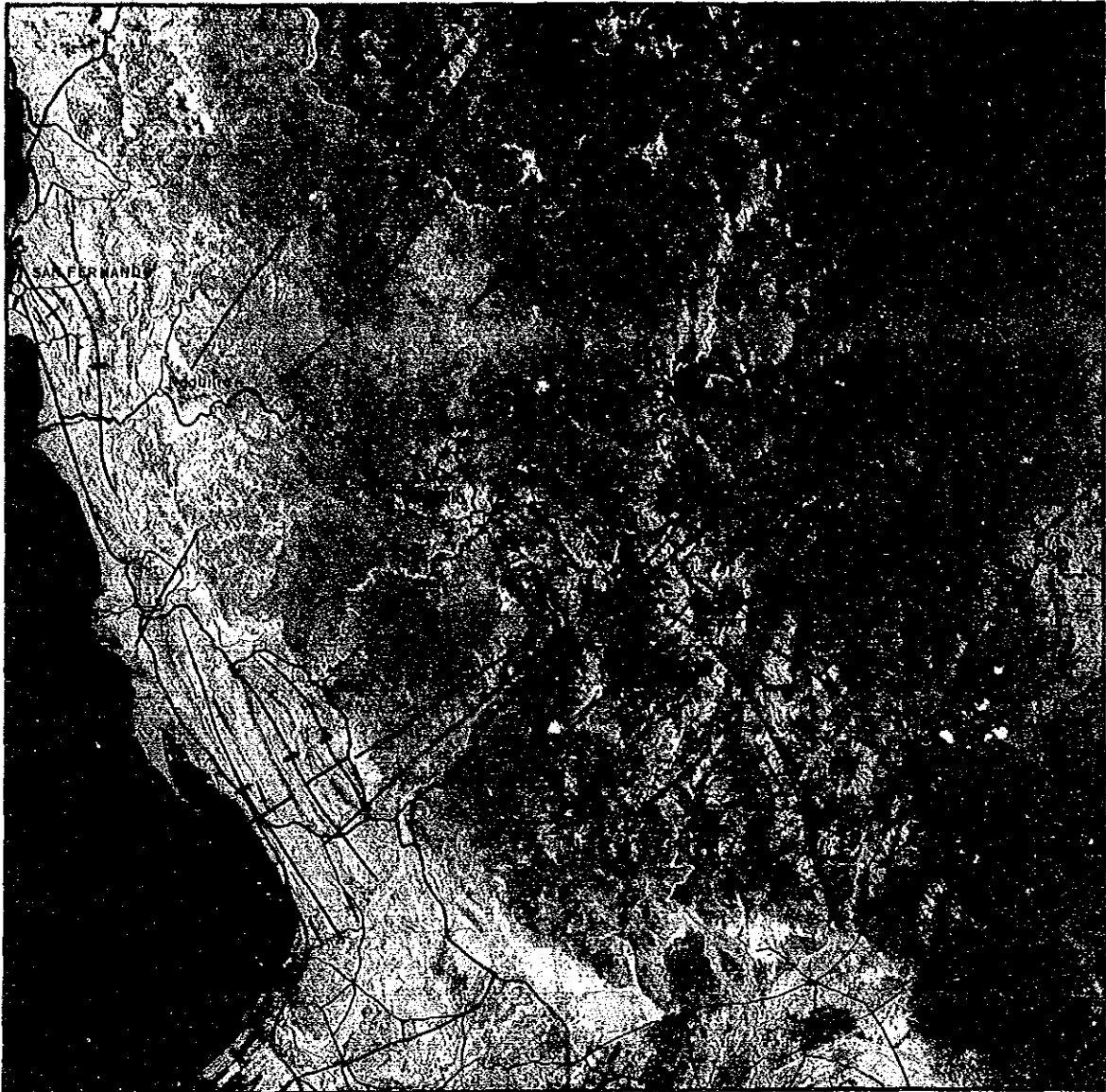
LOCATION MAP
OF
ACUPAN-ITOGON AREA

PROVINCE OF BENGUET
REPUBLIC OF THE PHILIPPINES







LEGEND

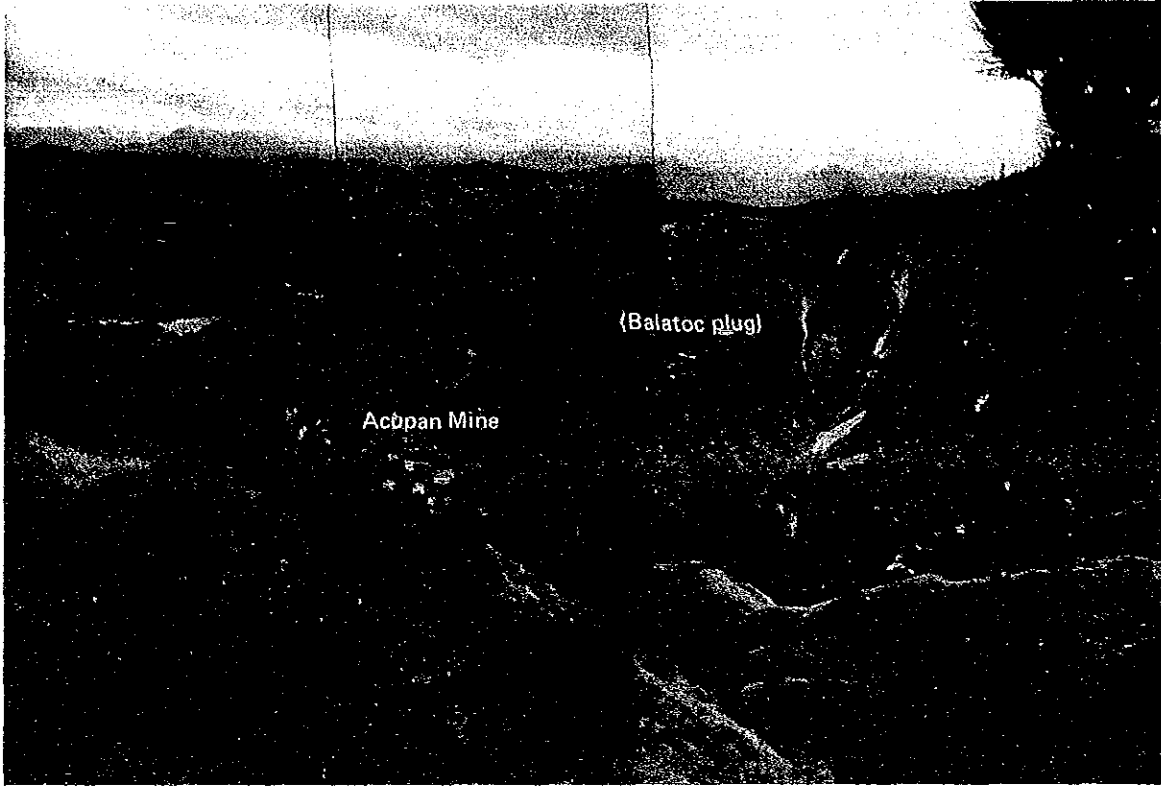
-  Phase I Survey Area (1982)
-  Phase II Survey Area (1983)
-  Phase III Survey Area (1984)



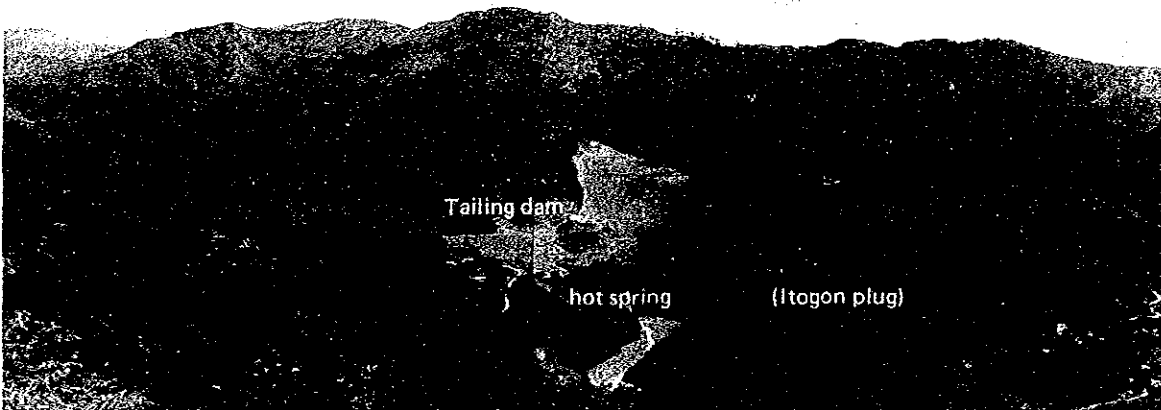
Legend

-  *lineament*
-  *anticline*
-  *syncline*
-  *dip and strike*

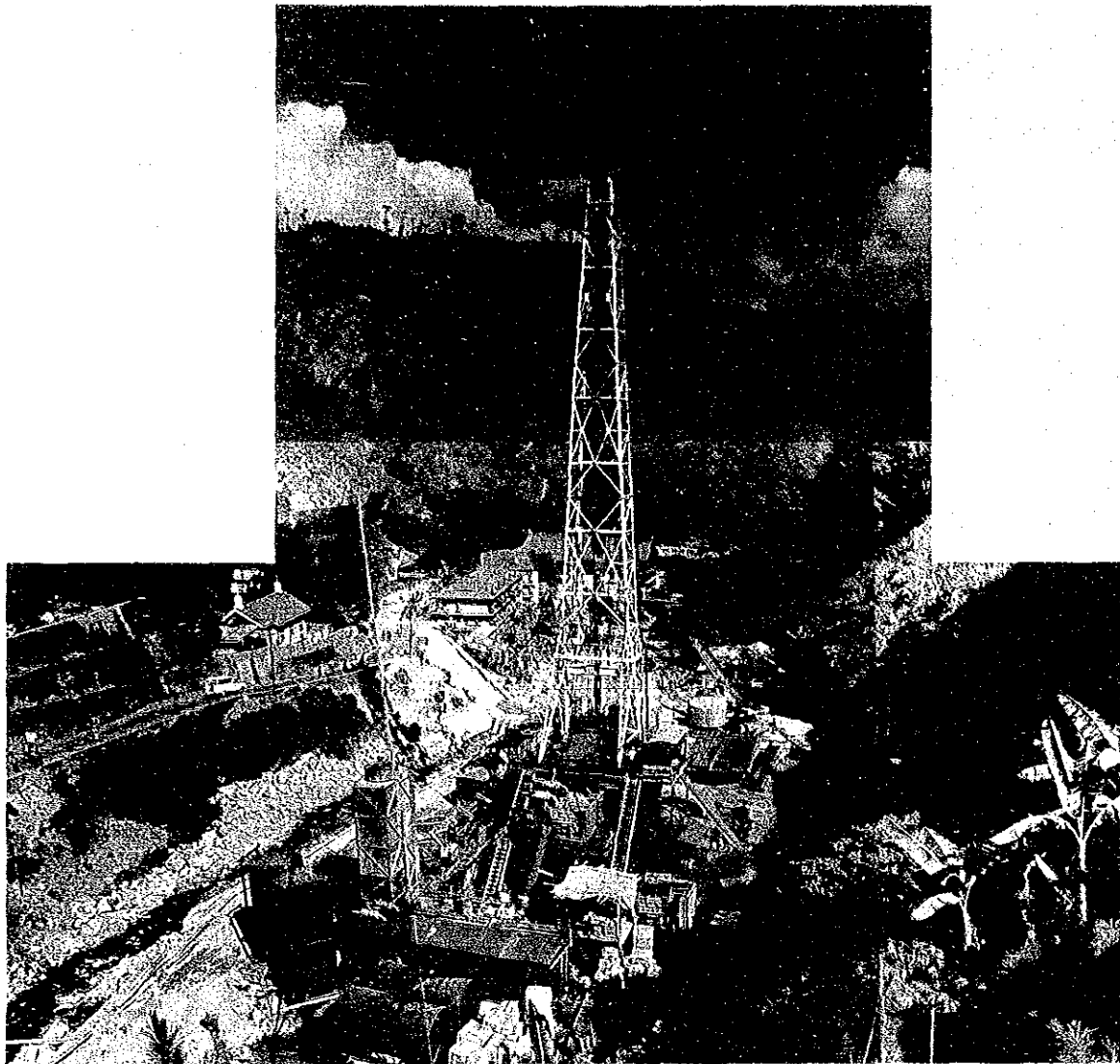
False Colour Imagery of the Land Sat



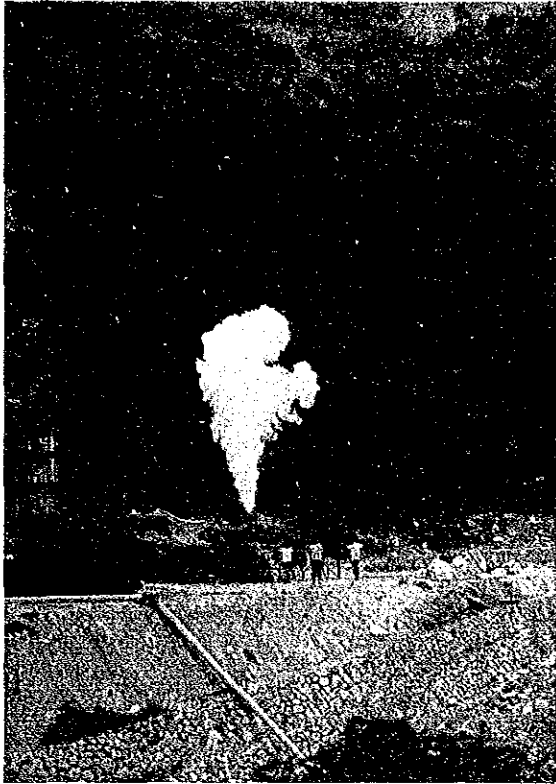
Perspective view of Acupan area



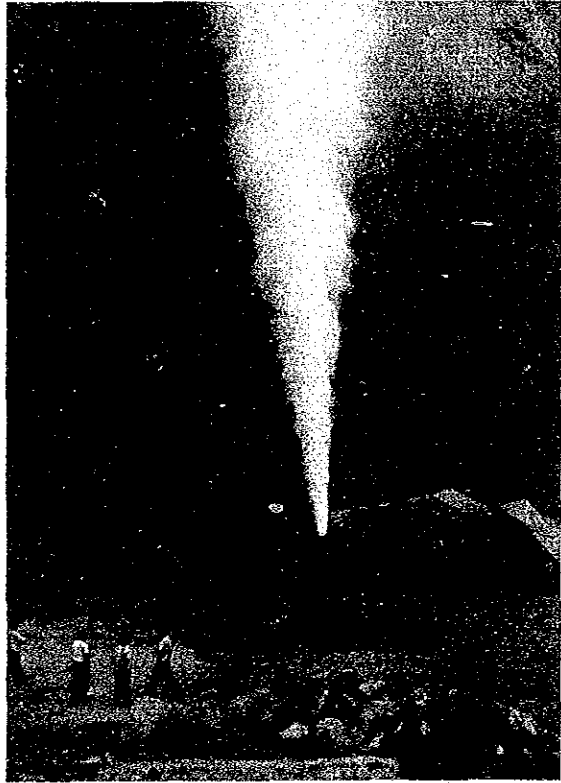
Perspective view of Itogon area



Drilling of the test well (AC - ID) (1)
Jan. / 1985



6:15 p.m.
Start of opening of wellhead valve.



Intensity of steam discharge lasted
for about 45 minutes.

Discharging of the test well (AC - ID)
May 14 / 1985

序 文

目 次

第1章	序 論	1
1.1	調査概要	1
1.1.1	地熱開発計画調査実施の背景	1
1.1.2	調査の目的・内容	1
1.1.3	調査体制	2
1.1.4	調査工程	2
1.2	フィリピン共和国側の一般事情	3
1.2.1	エネルギー需給	3
1.2.2	地熱開発の動向	5
第2章	調査結果の概要	7
2.1	地表調査	7
2.1.1	地質調査	7
2.1.2	地化学調査	7
2.1.3	重力探査	11
2.1.4	電気探査	13
2.1.5	微小地震探査	13
2.2	坑井調査	17
2.2.1	测温孔調査	17
2.2.2	調査井の仕上状況	17
2.2.3	調査井の坑井試験	22
2.2.4	調査井の噴気試験	24
2.3	地熱系のシミュレーション	25
2.3.1	タンクモデル計算	25
2.3.2	2次元シミュレーション	26

第3章	Acupan-Iitogon地区の地熱系	29
3.1	地表調査結果から推定される地下地熱系	29
3.1.1	地質構造	29
3.1.2	熱構造	30
3.1.3	水理構造	31
3.2	坑井調査による貯留層の検討	34
3.2.1	坑井試験の結果	34
3.2.2	噴気試験の結果	35
3.3	モデル計算による地下地熱系の検討	37
3.3.1	タンクモデル計算の結果	37
3.3.2	2次元シミュレーションの結果	38
3.4	地熱系の考察	42
3.4.1	地熱構造モデル	42
3.4.2	地熱系の考察	43
第4章	結論と勧告	46
4.1	結論	46
4.2	勧告	48

圖一覽

Fig.	1	Geological map	8
	2	Hg anomaly map	10
	3	Second derivative map of gravity	12
	4	Resistivity map	14
	5	Epicentral distribution map	15
	6	Disposition map of gradient holes and test well	18
	7	Geological and thermal logging of gradient holes	19
	8	Trajectory of the test well	20
	9	Completion of the test well	20
	10	Geological and thermal logging of the test well	23
	11	Lamped parameter model of the Acupan geothermal field	25
	12	Geological profile of the test well	28
	13	Block diagram of geology and isothermal profile	31
	14	Conceptual model of geothermal system of the Acupan-Itogon area	33
	15	Thermal and pressure logging after and before the flashing test	36
	16	Estimated properties of the hot water in the reserve	37
	17	Relation between the hot water properties in the reserve and the Cl-concentration	38
	18	Simulation model K	39
	19	Temperature distribution (model K) in $^{\circ}\text{C}$	40
	20	Pressure distribution (model K) in bar	40
	21	Heat flow distribution (model K) in MW	41
	22	Mass flow distribution (model K) in kg/s	41
	23	Conceptual model of geothermal system through the test well	44

表一覽

Table	1	List of spring water samples	9
	2	Temperature of gradient holes and test well	17
	3	List of rock mechanical properties	21

4	Summaries of the test well.....	21
---	---------------------------------	----

第 1 章 序 論

1.1 調査概要

1.1.1 地熱開発計画調査実施の背景

フィリピン共和国 Luzon島北部には、Batong-Buhay, Buguias, Daklan 及びAcupan-Ilogon の如く有望な地熱地帯が多いが未だ地熱発電に至っていない。Baguio市に近い水力発電ダム、Ambuklao, Binga の能力低下と電力需要の増加に伴い、北部 Luzonの電力事情は緊迫しつつある。Tiwi(330MW), Mak-Ban(220MW) の両地熱発電所により、Luzon島の電力消費の24%をも供給しているフィリピンとしては、早急に北部 Luzonの地熱開発を進めたいと考えている。

このような背景のもとにBED(Bureau of Energy Development)は、Baguio市や鉱山会社などの電力消費地に近い本地区を選定し、再度JICAによる調査を要請してきた。これを受けてJICAは、1982年3月に事前調査団を派遣し、対象地域の地熱開発の可能性の確認を行った後、本調査に関するS/Wを作成し、Implementing Arrangementの調印が行われた。

1.1.2 調査の目的・内容

この調査は、同国 Benguet州のBaguio市東南方に位置する Acupan-Ilogon地域の地熱ポテンシャルを評価することを目的とするものである。調査は3段階からなり、初年次では地質、地化学及び物理の各地表探査を面積約 300km²の範囲について実施して、地熱開発の可能性の高い40km²を抽出した。第二年次の調査ではその精査地域に対して測温孔探査を含む各種調査を行い、当該地区についての概念的な地熱構造モデルを作ると共に、地下の地熱流体を直接的に確認すべく、調査井の掘削地点を検討した。

第三年次では、当初掘削長 1,500mの調査井を計画したが、近接する鉱山での採掘に起因した地下水位の低下に伴ってか、地温の上昇が当初の見込みよりは若干低く、その為に掘削深度を 2,000mにまで増掘した。調査井掘削によって知り得た事項の詳細は以下に示すとおりであるが、本報告書はその資料を基に、当該地域の地熱ポテンシャルについて解析した結果を取りまとめたものである。

1.1.3 調査体制

本調査団の編成の大略は以下のとおりである。

JICAチーム

団長 坂井定倫 以下17名（大手開発㈱）

業務調整 永田邦昭，小沢勝彦（国際協力事業団，鉱工業計画調査部）

BEDチーム

Project Manager Alfredo C. Troncales 以下23名 (Bureau of Energy Development, Ministry of Energy)

1.1.4 調査工程

本調査の工程は下表に示すとおりである。

Table. Work Schedule

Date	1982					1983					1984					1985													
	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Phase I	Contents of Survey																												
	Geological Survey																												
	Geochemical Survey																												
	Gravity Survey																												
	Electric Survey																												
Report																													
Phase II	Geological Survey																												
	Geochemical Survey																												
	Microearthquake Survey																												
	Temperature Gradient hole Survey																												
	Report																												
Phase III	Drilling of Test well																												
	Logging and Completion Test																												
	Flashing Test																												
	Report																												

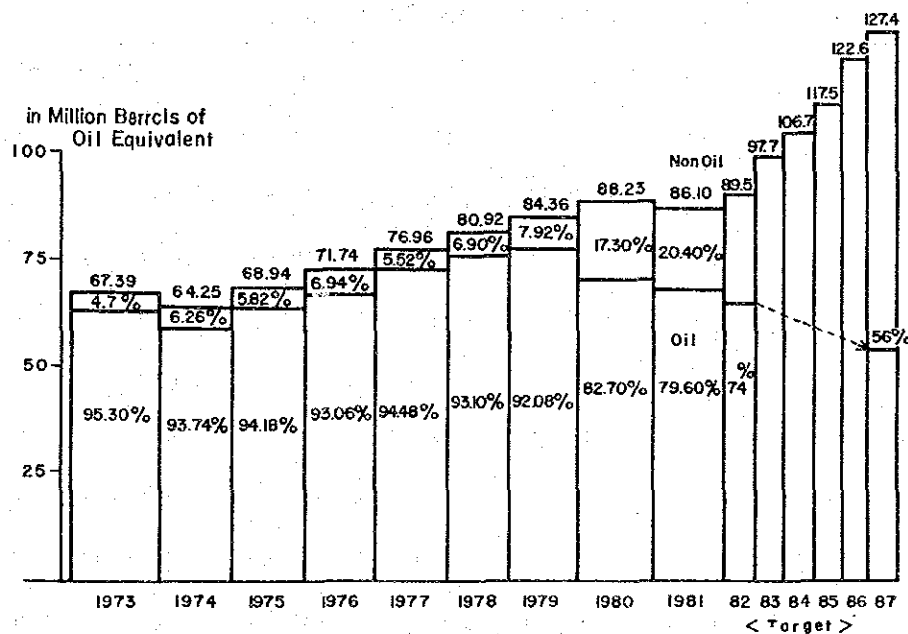
1.2 フィリピン共和国側の一般事情

1.2.1 エネルギー需給

フィリピンにおける石油の消費量は年々増加しているものの、1973年10月の第一次石油危機を契機として石油依存は大巾に減少しつつある。

1960年代に3,600万人のフィリピン人が1人当たり1.05バレルの石油を消費していたが、1980年代初頭には、人口4,950万人、1人当たり1.74バレルに上昇した。今後の統計資料によれば、1987年までにエネルギーの消費予想は、127.38 million barrel となり、これは5,700万人のフィリピン人、1人当たり2.24バレルということになる。

一方、全エネルギー消費に占める石油の割合は、1973～1979年には92%であったが、石炭、地熱、水力など Non-Oil の供給の増加に伴い、1980年には82.7%に、1981年には79.6%に低減した。1987年には、地熱で13.97%を供給し、石油依存率を44%に下げる計画である。



電源別発電構成比率推移 (MMBOE)

将来計画では Non-Oil の中では、石炭がますますその率が向上し、石油換算で18%を上まわると思われる。水力は12%、地熱は14%の成長が見込まれている。1987年の地熱は、1,554MWであり、全電力の19%を占めることになる。

フィリピン1次エネルギー供給構成比 (%)

	1981年	1984年	1987年計画
輸入石油	78.00	55.23	39.24
国産石油	1.59	5.81	4.99
石油計	79.59	61.04	44.23
原子力	0	1.01	4.76
輸入石炭	0	1.31	6.67
国産石炭	1.05	10.70	11.84
石炭計	1.05	12.01	18.51
水力	7.46	8.46	12.37
地熱	5.52	12.26	13.97
その他	6.38	5.22	6.16
合計	100.00	100.00	100.00
石油換算 (M M B O E)	86.10	106.71	127.38

フィリピン電源別発電能力・構成比

	1981実績		1982実績		1987計画	
	MW	%	MW	%	MW	%
水力	944.4	20.24	1,292.4	26.46	2,509.9	30.61
地熱	446.0	9.56	504.0	10.32	1,554.0	18.96
石炭	100.0	2.14	185.0	3.79	750.0	9.15
原子力	-	-	-	-	620.0	7.56
ディーゼル	1,070.79	22.85	948.79	19.43	639.79	7.80
石油	2,105.0	45.11	1,925.00	39.41	1,925.0	23.48
その他	-	-	29.0	0.59	200.0	2.44
計	4,666.19	100.00	4,884.19	100.00	8,198.69	100.00

1.2.2 地熱開発の動向

フィリピンにおける地熱開発は、1970年代にめざましい成長を示し、1983年、Palimpinon及びTongonanの運転開始により、地熱発電能力は781MWとなり、アメリカに次ぐ世界第二の地熱開発国の位置づけを確たるものとしている。

さらに、1987年までのエネルギー開発6ヶ年計画によれば、1987年末までにさらに8地域での地熱開発を実施し、地熱フィールドを14地域に拡大する目標をもっている。

現在の6地域は、

Tiwi	Albay州	330MW
Makiling-Banahaw	Laguna州	220MW
Tongonan	Legte州	115.5MW
Palimpinon	Southen Negros州	115.5MW
Manito	Albay州	(開発中)
Daklan	Benguet州	(開発中)

有望な8地域としては、

Batong-Buhay
Acupan-Itogon
Batangas
Davao
Nothern Negros
Cagayan
Zambales
Cotabato

である。

これらの地区ではボーリングと地表調査が行われ、1987年末には、累積556本の調査井が掘削されることになっている。また、その結果、利用可能な地熱蒸気量は大巾に増え、3,076MWになると見込まれている。現在の蒸気量は1,750MWであるから、4年でさらに880MW増加することになる。一方、発電機容量は、1987年末には1,554MWになると期待されている。

フィリピンでは、確認されている蒸気量が常に発電機容量を上まわっており、予算の許

す限りの追加の発電機を増設するのが現状である。

1983年、新たな地熱発電として、Philippine National Oil Company (P N O C) により、Tongonan 115.5 MW と Southern Negros (Palimpinon) 115.5 MW が増設された。これにより、現在の発電機容量は、

Tiwi 55.0 MW × 6 unit = 330
 Mak-Ban 55.0 MW × 4 unit = 220
 Tongonan 37.5 × 3 + 3.0 × 1 = 115.5
 Southern Negros 37.5 × 3 + 3.0 × 1 = 115.5

となり、合計出力は 781 MW となっている。

フィリピン地熱発電蒸気開発実績・計画

	開発地域 (ヶ所)	坑井数 (本)	掘削延長 (m)	平均掘削 深度 (m)	蒸気生産 能力 ④ (MW)	累計発電 能力 ⑤ (MW)	④ ÷ ⑤
1973	1	4	7,150	1,788	10.4	-	-
74	2	4	6,661	1,665	17.3	-	-
75	2	8	14,567	1,821	28.5	-	-
76	3	18	27,335	1,519	120.7	-	-
77	3	24	43,184	1,799	131.5	3	-
78	3	34	54,947	1,616	191.6	58	-
79	4	58	95,249	1,642	315.0	223	-
80	4	59	100,988	1,712	385.0	446	-
81	6	60	136,406	2,273	501.0	446	-
小計 ①	6	265	486,487	1,836	1,701.0	446	3.81
82	6	44	107,670	2,447	210	504	-
83	7	59	148,500	2,517	285	671.5	-
84	8	59	147,000	2,492	285	894	-
85	10	56	134,400	2,400	260	894	-
86	14	55	125,700	2,285	215	1,554	-
87	14	28	63,000	2,250	120	1,554	-
小計 ②	14	301	726,490	2,414	1,375	1,554	0.88
計 ① + ②	14	566	1,212,977	2,143	3,076	1,554	1.98

第2章 調査結果の概要

第一年次から第三年次にわたっての各調査項目について、その概要を次に示す。

2.1 地表調査

2.1.1 地質調査

第一年次の広域的な地質概査及び第二年次の地質精査の結果、当該地域の地質は次のとおり要約される (Fig. 1)。

- (1) Luzon 島北部の広域的な地質構造はNS方向に伸びる地塊構造で特徴付けられ、それは中央隆起帯と、その東・西両側に広がる沈降帯とからなる。本調査地域は、この中央隆起帯とその西側にある沈降帯との漸移帯に位置し、1981年JICAの手で実施された Buguias 地域の地熱開発計画調査地域は本調査地域の北北東約45kmの処にあり、地質構造的には中央隆起帯を挟み、本調査地域とは反対側の東側の漸移帯に位置している。
- (2) 中央隆起帯は後期白亜系の Dalupirip変成岩類と、その中に後期漸新世から鮮新世にかけて貫入した深成岩類のAgoパソリスからなる。一方、東、西の両沈降帯はKlon-dyke層等の中新統の堆積岩類からなり、中央隆起帯との漸移帯にはより新期の火山活動が生じ、本調査地域では後期鮮新世の安山岩複合岩及び後期鮮新世～更新世の安山岩質ないし石英安山岩質なプラグ類の火山活動があった。
- (3) 断裂構造としてはNS系、NE-SW系及びNW-SB系のものがみられるが、これら断裂構造の分布は中央隆起帯から西側の沈降帯にかけての漸移帯に集中して発達しており、その東及び西側では乏しい。また新期の火山活動である安山岩複合岩及びプラグ類は、これら断裂構造と密接に関連するものとみられ、特にプラグ類はNS系とNE-SW系の断裂の交点にその活動がみられる。
- (4) 調査地域内には温泉水が各所で湧出するのが認められている。それらの分布はいずれも上記の断裂構造に規制されており、また最も新期の火山活動であるプラグ類の活動のみられるAcupan-Ilogan 地区で、最も泉温が高い。そこは現在金鉾山が操業下にあり、坑内及び地表から多量の熱水が流出しており、調査地域内では放熱量も最も高く、従って第三次調査における調査井の掘削地点もそこに選定された。

2.1.2 地化学調査

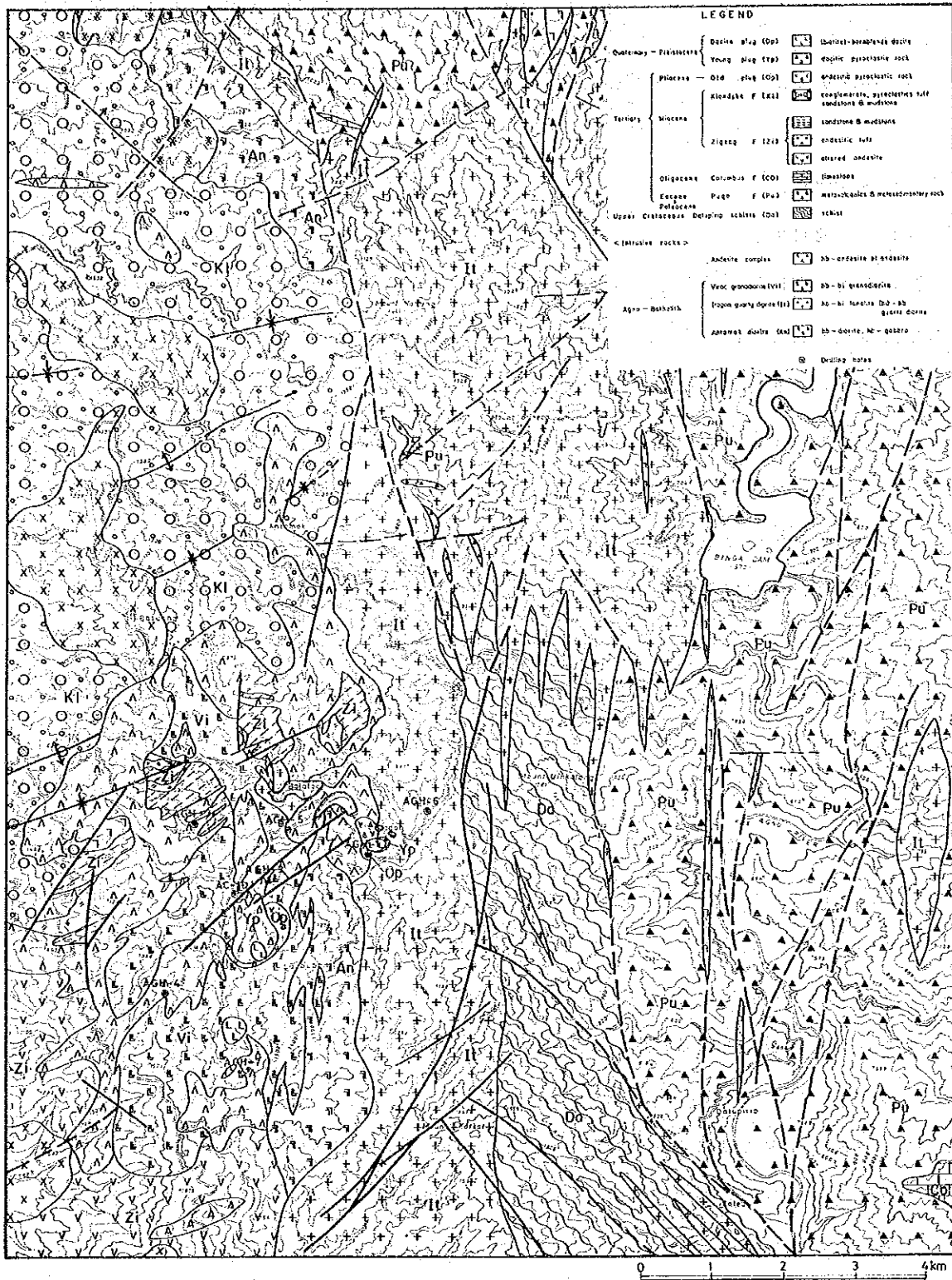


Fig. 1 Geological map

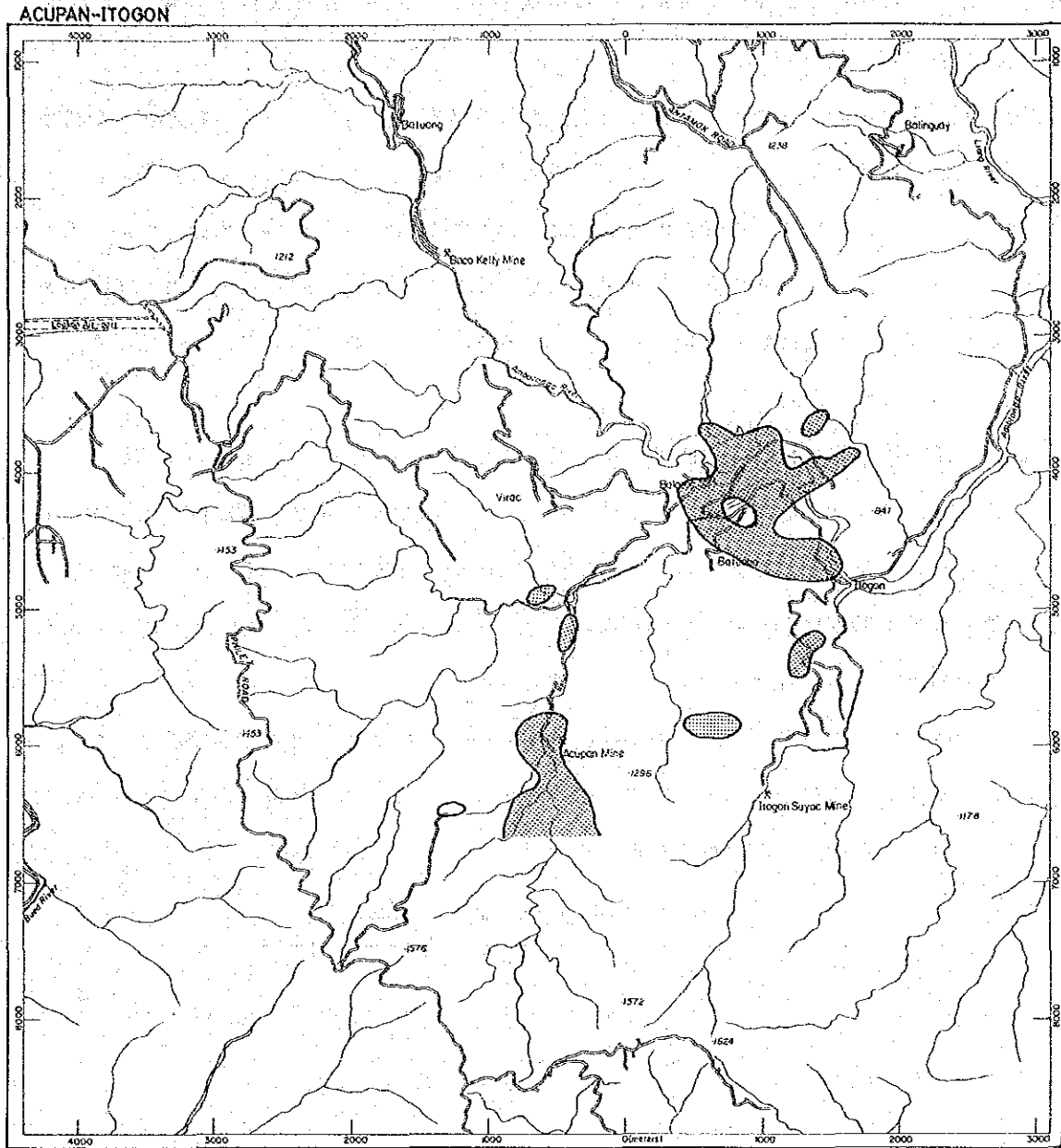
地化学調査は地温探査と温泉水の化学・同位体分析からなる。地温探査は1 m深の地温測定その他、土壌中の水銀濃度分析及び土壌空気中のラドンガス濃度分析を実施した。結果は次のとおりに要約される。


- (1) 1 m深の地温分布には小範囲に分散した異常(27.8℃以上)がみられるが、その多くは地形に依る影響とみられ、地下の熱構造を反映するものとは考えられない。
- (2) ラドンガスは敷居値を90T/Dとした時、濃度異常はAcupan鉱山の周辺を中心としてみられる。しかし、その大半は尾根又は地形上の高所に偏在することと考え併せると地形及び地下水面に依る影響とみなされ、ラドンガスの濃度異常は地下の熱構造を示すものではない。
- (3) 土壌中の水銀は極めて特徴的な濃度分布を示す(Fig. 2)。つまりBalatocプラグ及びItogonプラグを囲む様に、その外周に沿って断続的に異常(478ppb以上)が分布しており、かつ互いに独立しながら全体的にはNE-SW方向の配列を示す。Acupan鉱山他の金鉱床形成にも水銀の濃度異常は関連するものと考えられるが、また同時に温泉水の湧出にみられる地熱徴候とも対応する。

調査地域内で湧出する代表的な温泉水をTable. 1に示す。液性は弱酸性ないし弱アルカリ性で、高温泉はAcupan鉱山及びItogonにみられるが、温泉水の化学組成及び同位体組成から次のことが明らかとなった。

Table 1 List of spring water samples

Sample Code	Hot Spring Location	Elevation H.a.s.l.	Temperature (°C)	pH	Discharge Vol. (ℓ/min)	Acid gas V%		Deposit	Country Rock/Geology
						CO ₂	H ₂ S		
DA	Dalupirip	420	42.5	5.5	>50	-	-	calcite & quartz vein CaSO ₄ & FeSO ₄ films	gravels on Pugo formation
IT-1	Itogon	680	89.5	7.5	5	99.94	0.66	calcite veinlet calcite sinter, gypsum-like	Balatoc Plug
IT-2			62.2	7.5	5	-	-	crystals, FeSO ₄	along the contact between lower Balatoc plug and overlying detritus
KL	Klondyke	240	49.5	7.5	10	<0.05	<0.005	calcite veinlet	andesitic tuffaceous sandstone (Rosario Formation)
AS	Asin	260	73.8	8.0	not sure	<0.05	<0.005	none	gravels
PU	Pugo	80	36.3	7.0	5-6	<0.05	<0.005	none	gravels on tuffaceous sandstone (Rosario Formation)
LA-1	Laboy	660	47.5	7.0	10	-	-	calcite thin veinlet along jointing	hb. qtz diolite
LA-2		700	47.5	7.0	15	-	-	calcite epidote veinlet	granite
BA-1	Balatoc (Acupan Mine)	Acupan min 3300 level (519 m)	81.0	7.5	25	-	-	gypsum and calcite vein	diorite
BA-2		3150 level (565 m)	62.1	8.0	60-80	?	?		andesite
103C	Liang	530	66.0	8.3	4	-	-		diorite
76-B-12	Antamok	Antamok 1850 level	51.7	?	?	?	?	?	?



L E G E N D
 Hg > 478ppb

0 200 1000 2000 m

Fig. 2 Hg anomaly map

- (4) 地表で高温泉のみられるAcupan鉱山及びItogonでは、地化学的な推定温度は、 T_{SiO_2} で147 ~ 229 °C、 $T_{Na-K-Ca}$ で193 ~ 236 °Cの高温が期待される。
- (5) 温泉水はいずれも降雨水で涵養された地下水にその起源が求められる。
- (6) 温泉水はその化学組成から Na/Cl型、Ca/SO₄型及び Na/SO₄-HCO₃型に泉質分類される。
- (7) Acupan鉱山では Na/Cl型の温泉水は略、Balatocプラグに沿う様に分布し、その上方及び側方はCa/SO₄型の温泉水が分布する。ここで、Na/Cl型の温泉水のみがオキシジェン・シフトを示す。
- (8) Itogonプラグ中には Na/SO₄-HCO₃型の温泉水が地表に湧出する。陽イオンとしてNaを有する温泉水は全体として BalatocプラグとItogonプラグとを結ぶ全体としてはNE-SW方向の配列を示す。

2.1.3 重力探査

測点は、道路及び尾根沿いに500 ~ 700 m間隔に設定し、測点密度は約1.7点/km²である。鉛直2次微分図をFig. 3に示す。

- (1) 調査地域内に露出する岩石試料の平均密度は約2.7と比較的に高く、しかも岩種間の差が少ない。従ってブーゲ異常も最大77mgal、最小49mgalで、その差が小さい。
- (2) 補正密度2.60のブーゲ異常が最も地下構造を反映しているものと考えられる。
- (3) 調査地域の略中央、Itogon橋の東をN-S系の低重力異常がみられる。ここは地質的にはItogon石英閃緑岩及びトータル岩のいずれも珪酸量の多い酸性岩の分布に対応し、一方、調査地域西方の高重力異常は相対的に塩基性の安山岩類の分布に対応する。
- (4) Balatocプラグからの岩石試料についての平均密度は2.46と低い。Acupan鉱山付近に小規模な低重力異常がみられるが、これは Balatocプラグの分布に起因するものと考えられる。
- (5) 調査地域内には例えば盆状構造を規制するような断層構造はブーゲ異常図からは認め難い。
- (6) Itogon橋の東に在るN-S系の低重力異常は岩石の組成差等に関連する密度差のみでは解釈し切れない。深部に何らかの大規模な破碎帯、又は熱源等の密度低下の要素があるのかもしれない。

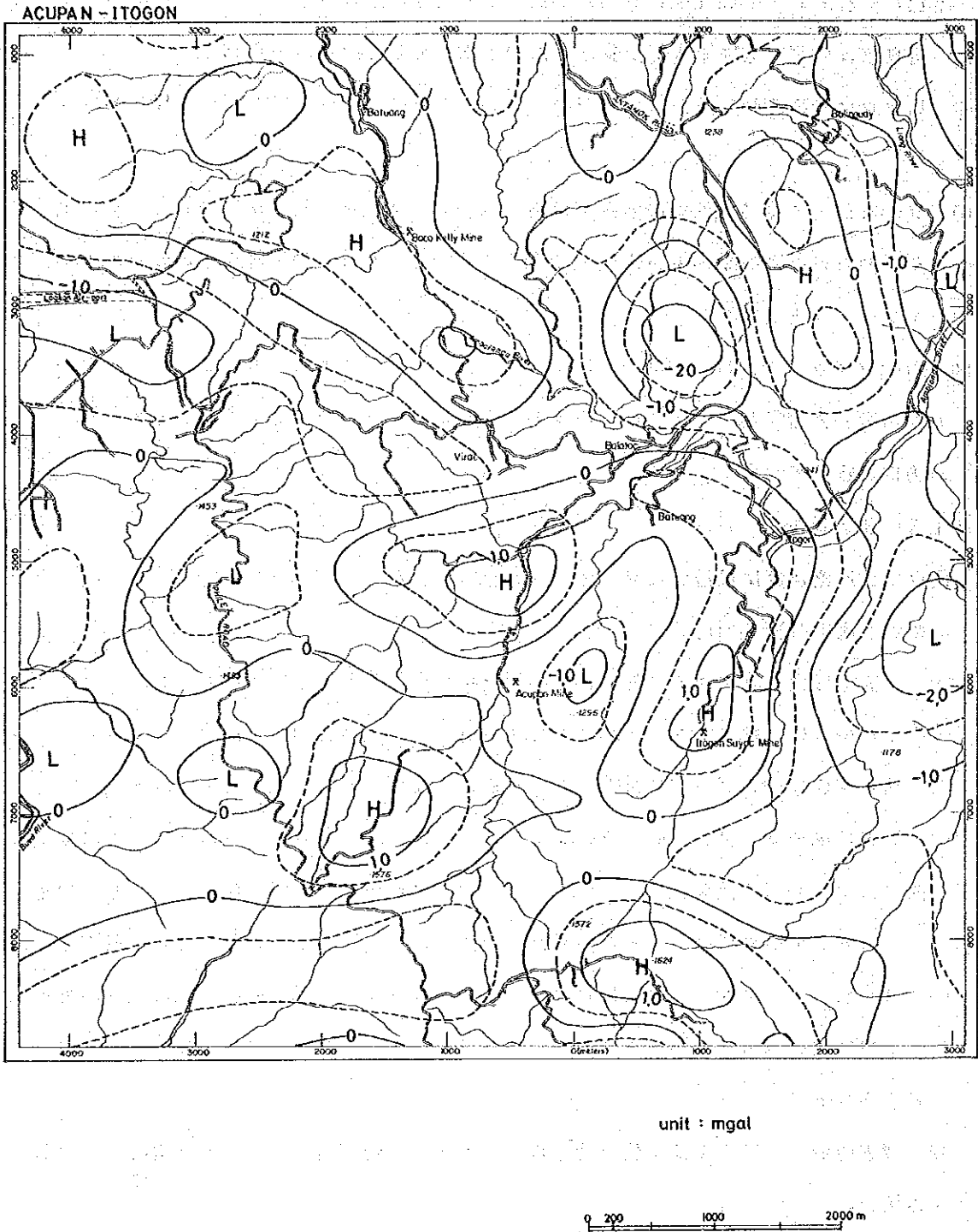


Fig. 3 Second derivative map of gravity

2.1.4 電気探査

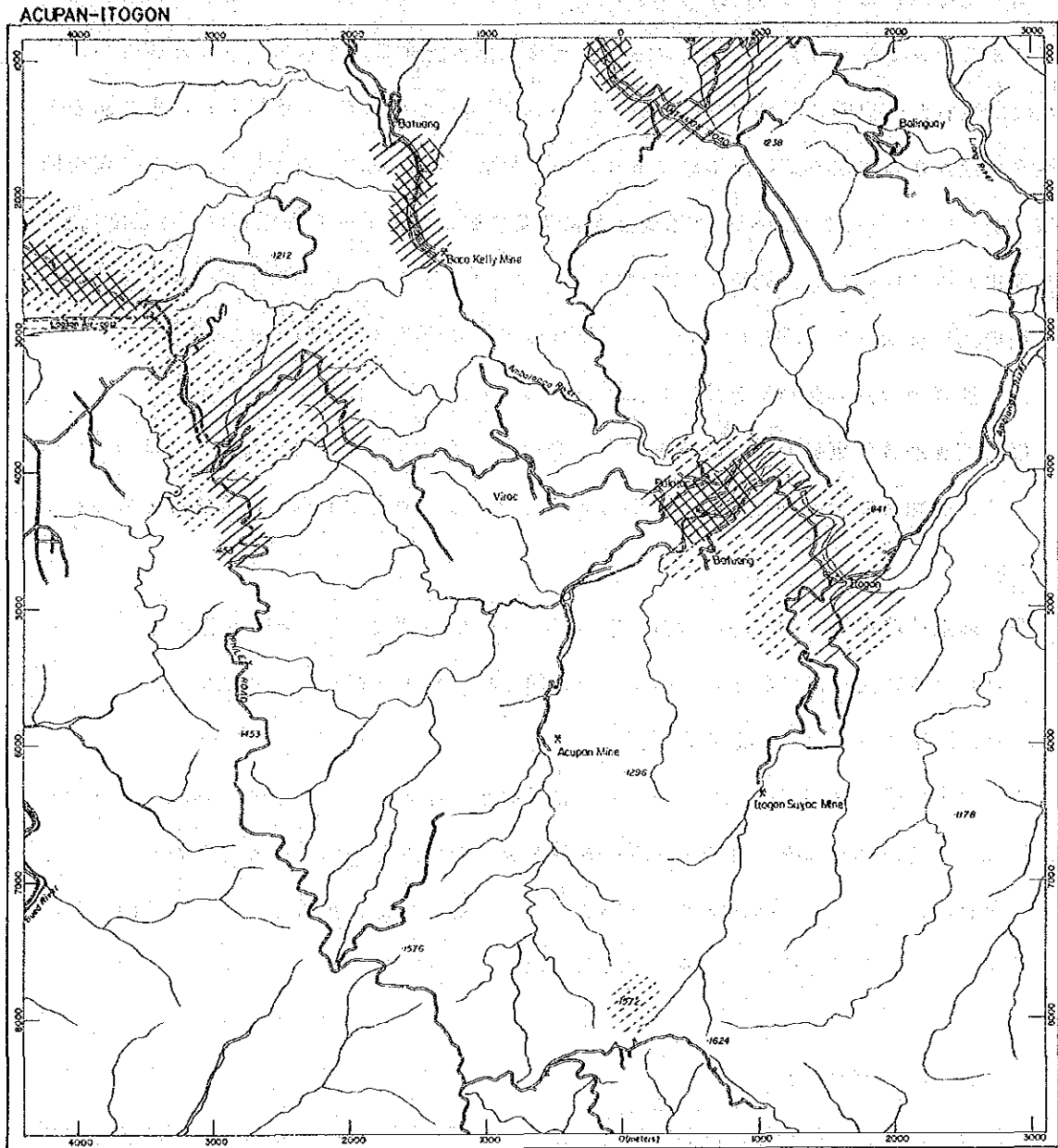
調査地域内には数多くの金鉱山が稼行中で、その為に電氣的ノイズが顕著である。従って通常のシュランベルジャー法による比抵抗探査は実施することができず、本調査用に特別設計された受信器 (Signal Enhanced DC Resistivity Meter) を使用した。また調査地域内は地形が急峻な為、道路沿いに9測線、合計69.6kmについて測定した。ただ、調査地域東端のDalupiripでは上記した鉱山操業に依る影響は無視できると思われ、そこでは温泉湧出地点を中心とした測線1kmについてシュランベルジャー法とダイポール・ダイポール法の比抵抗探査を実施した。調査結果は次の様に要約される (Fig. 4)。

- (1) 調査地域内の表層及び浅部の比抵抗値は、およそ50~1,000 Ω mを示す。
- (2) 調査地域の東部では500 Ω m以上の高比抵抗帯が広がる。地質的にここはDalupirip変成岩類及びItogon石英閃緑岩の分布域に対応し、地表でも母岩の変質は認められない。
- (3) 調査地域東端のDalupirip温泉ではN-SないしNNW-SSE走りの弱線帯に沿うとみられる低比抵抗帯がみられるが、その幅は狭く、また低比抵抗帯は極く地表近くのみ限定されている模様である。
- (4) 調査地域の西側ではいくつかの低比抵抗帯が分布する。このうち、Antamok, Baco-Kelly及びItogon橋周辺の低比抵抗帯は金鉱山の付近で、鉱化変質に起因するものと思われる。また、Baguio空港及び調査地域北西端の低比抵抗帯も、そこに鉱山はないが、いずれも鉱化変質に関連したとみられる。




2.1.5 微小地震探査

地震観測は、1983年10月14日から12月7日までの55日間で実施した。その間に総数973個の地震が観測された。そのうちS-P時間が5秒以下の213個の地震について解析を行ったが、そのマグニチュードはいずれも3以下であった。精査域周辺での震央分布はFig. 5に示すとおりであり、そこから次の事項が明らかとなった。

- (1) 震源分布を立体的にみると、調査地域の北側に分布が多く、また西側の震源ほどその深度が深い。
- (2) 震源分布の密度は調査地域の北側で、より密であり、一方、調査地域の南で、より疎と言える。



LEGEND

- low resistivity zone
-  100m depth (50Ω -m)
 -  200m depth (100Ω -m)
 -  300m depth (100Ω -m)

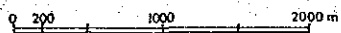
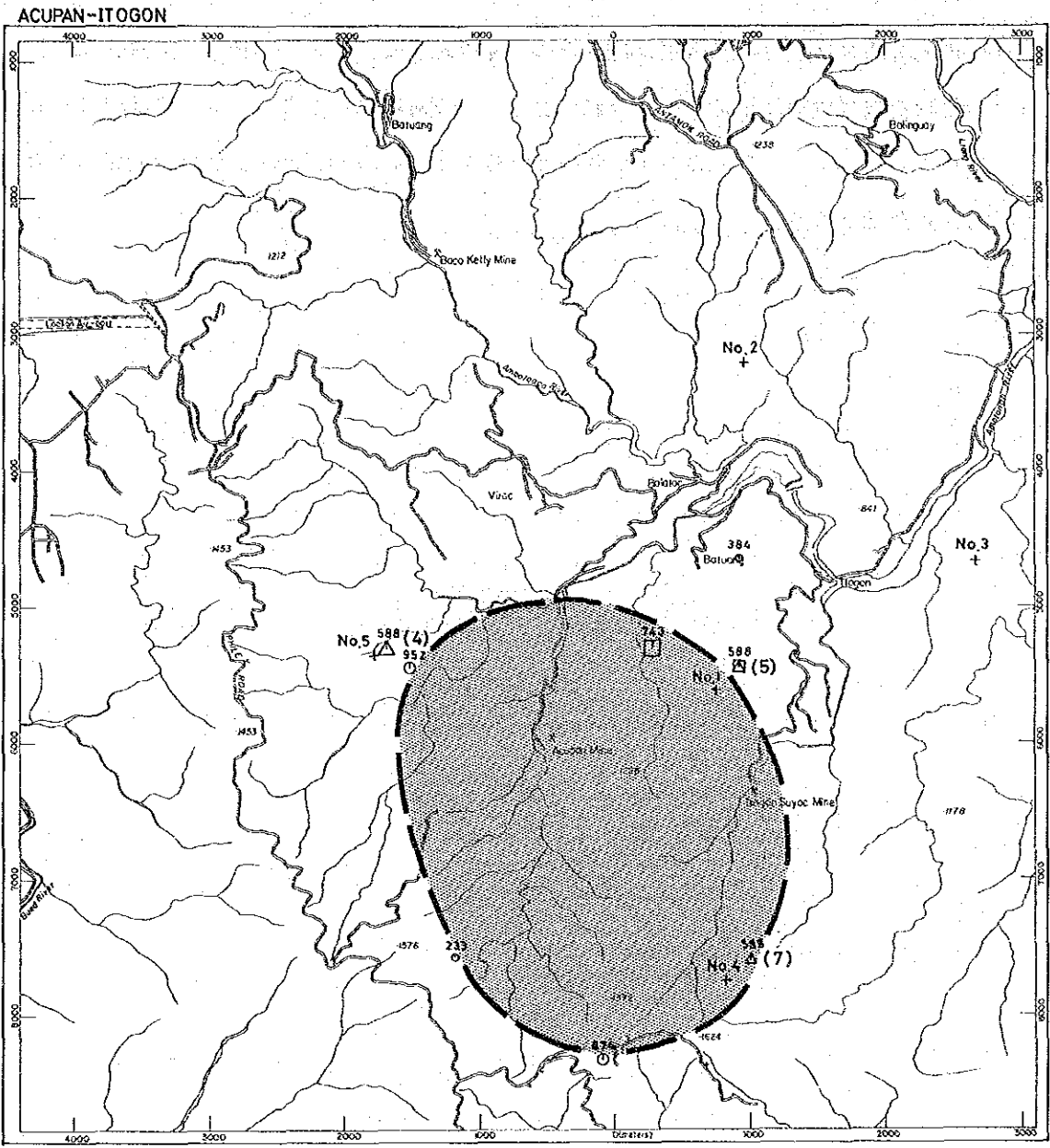
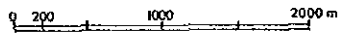


Fig. 4 Resistivity map



LEGEND



No 1

+ Seismograph

Depth (Z)	Magnitude (M)		
	$0 \leq M < 1$	$1 \leq M < 2$	$2 \leq M < 3$
$0 < Z \leq 10$	○	○	○
$10 < Z \leq 20$	□	□	□
$20 < Z$	△	△	△



Anomalous microearthquake activity zone

Fig. 5 Epicentral distribution map

- (3) 上記した震源分布の広域的にみた特徴の他、局所的な特徴として、Acupan鉾山から Itogonにかけてみられるパイプ状の震源分布が挙げられる。
- (4) 震源分布に関する上記事項は地質構造とも対応する。つまり、N-S走向、W傾斜の板状構造は中央隆起帯とその西側の沈降帯との漸移帯に相当し、また局所的なAcupan鉾山からItogonにかけてのパイプ状の震源分布は Balatocプラグ及びItogonプラグの分布に対比される。

2.2 坑井調査

2.2.1 測温孔調査

測温孔を7孔掘削した。その位置をFig. 6に、そして各坑井の概要をTable. 2に示す。

温度検層結果はFig. 7に示すとおりで、その他コアの地質、地化学及び物性測定 of 調査結果を取りまとめると次の事項が明らかとなった。

Table 2 Temperature of gradient holes and test well

Well No.	Well Head a.s.l. (m)	Depth (m)	Water Level (m)	Bottom Temp. (S.F.T. °C)	Gradient (°C/100m)	(Estimated) Actual Formation Temperature			
						500 m	1,000 m	1,500 m	2,000 m
Gradient Hole	AGH-1	690	112.85	0	90.7	?			
	AGH-2	905	357.50	190	115.0	28 (14)	(136)	(206)	(276)
	AGH-3	977	322.50	0	24.0	?			
	AGH-4	1,350	538.0	185	24.0	?			
	AGH-5	755	400.0	30	62.0	8	(70)	(110)	(150) (190)
	AGH-6	685	207.15		32.0	4	(44)	(64)	(84) (104)
	AGH-7	1,451	301.5	55	29.4	?			
Test Well	AC-1D Vertical Conversion	821	2,000.0 1,677	230	221	11	55	125	195

(1) 地下の増温率及び地下温度はTable. 2のとおり推定され、海拔-1,000 m地並の推定地温分布はFig. 6に示すとおりである。

なお、AGH-1, 3, 4, 7孔は地下増温率の推定は難しい。

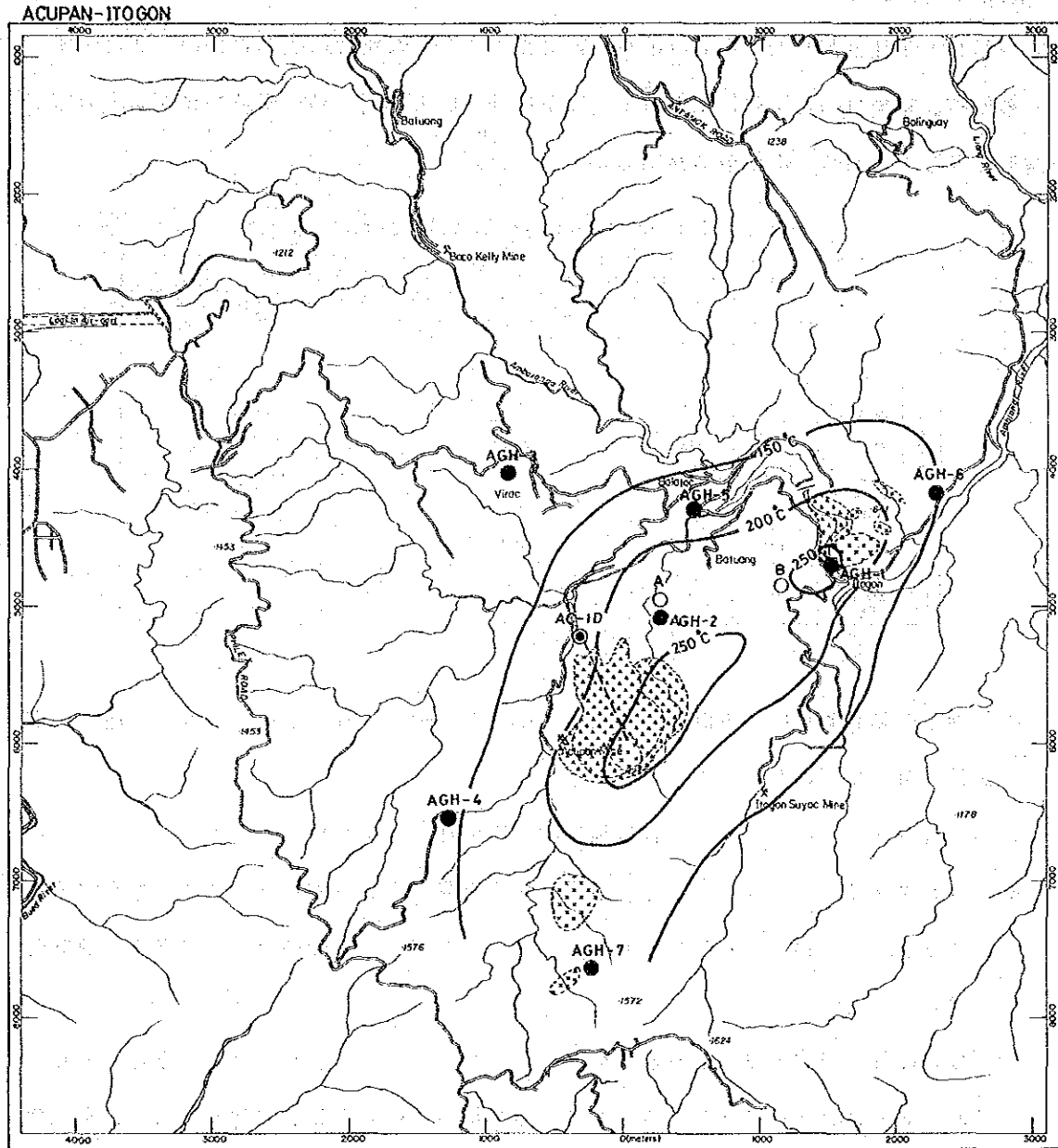
(2) スメクタイト、イライト、緑泥石、 α -石英及び方解石が全体的に広く分布する他、カオリナイト、緑れん石及び硬石膏等がみられるが、孔井間の差異は少なく、変質分帯は難しい。

(3) 地熱流体の通路では、AGH-2 坑の例の如くSi, K, As及びRbの富化、そしてCa, Na及びSrの劣化がみられる。地熱流体に依り斜長石が溶脱され、二次鉱物としてイライト等が生成したことに起因するものと考えられる。

(4) 地質別のコア物性は、Table. 3に示すとおりである。

2.2.2 調査井の仕上状況

調査井の(AC-1D)掘削位置をFig. 6に示す。調査井の掘削概要をTable. 4、掘削軌跡の平・断面をFig. 8及び沿角沿いにみた坑井の仕上状況をFig. 9に示す。



LEGEND

- gradient hole
- ⊙ test well
- proposed drilling site for test well
- isothermal line (-1000m a.s.l.)
- ▨ dacite plug
- ▤ young plug
- ▥ old plug
- isothermal line at -1000m a.s.l. 700 °C

Fig. 6 Disposition map of gradient holes and test well

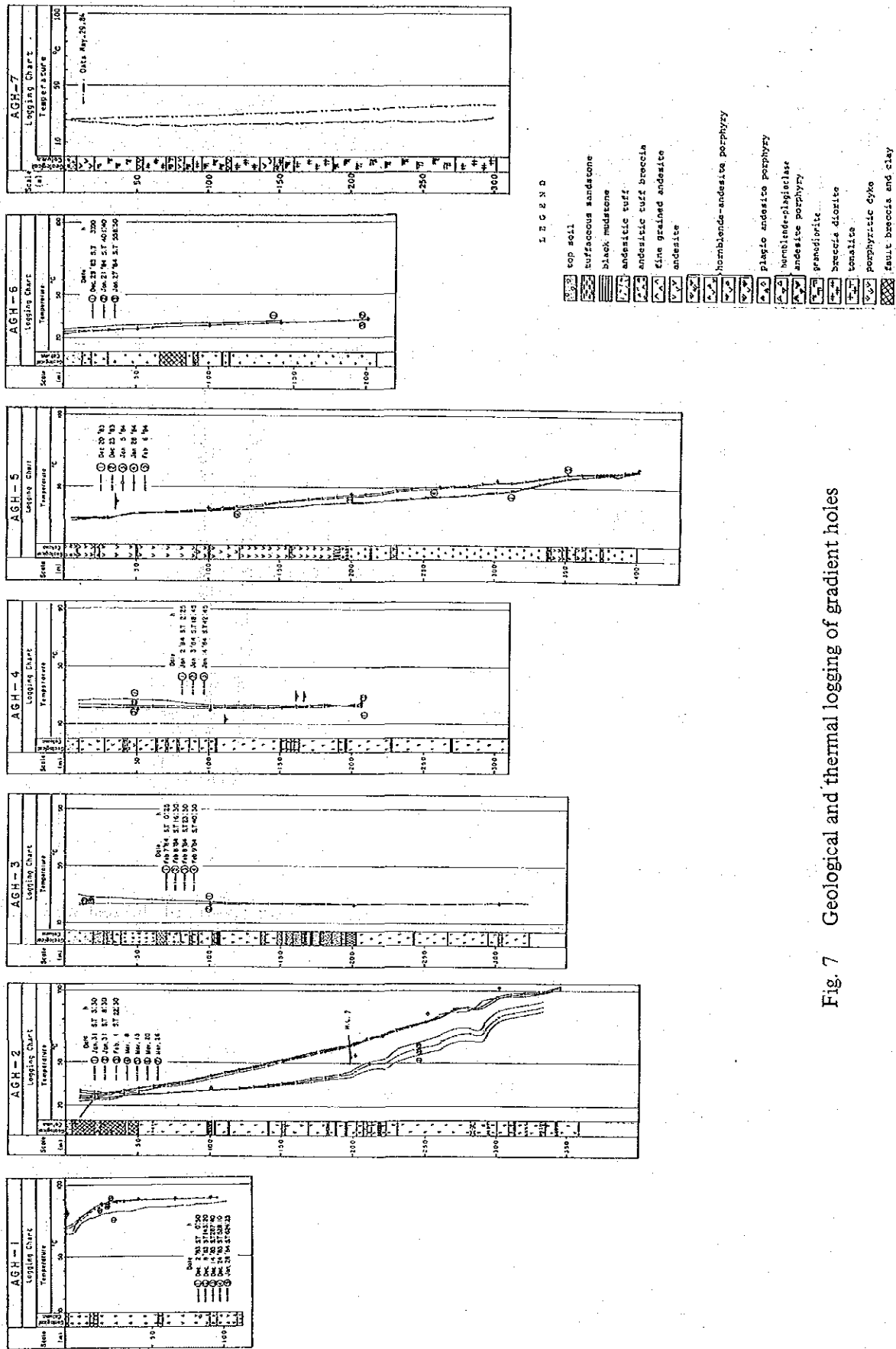


Fig. 7 Geological and thermal logging of gradient holes

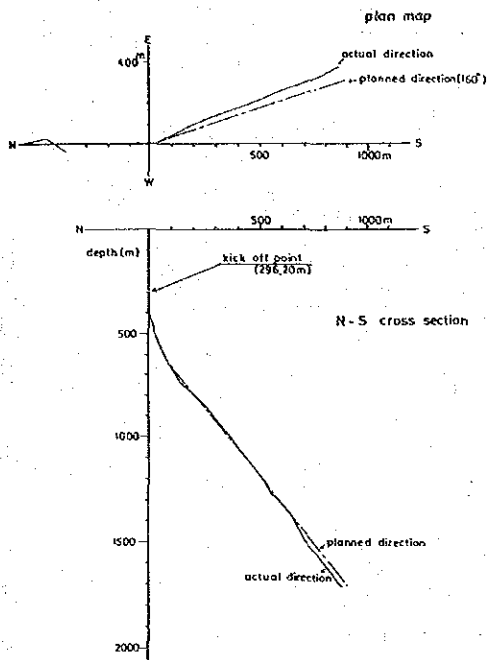


Fig. 8 Trajectory of the test well

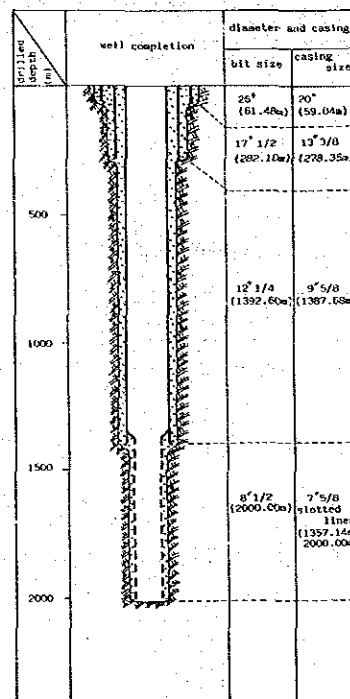


Fig. 9 Completion of the test well

Table 3 List of rock mechanical properties

Formation or Body	Sonic velocity (km/sec)	Thermal conductivity ($\times 10^3$ cal/cm-sec- $^{\circ}$ C)	Density (g/cm 3)			Porosity (%)	Permeability (darcy)	Specific electric resistance (Ω -cm)	Specific heat (g/cal)
			natural condition	wet	dry				
Old plug	3.63	6.245	2.66	2.68	2.63	4.96		9.25×10^5	0.230
Andesite porphyty dykes	5.07	6.828	2.77	2.77	2.76	0.83		4.06×10^6	0.219
Andesite complex	5.29	6.103	2.79	2.79	2.79	0.18		2.68×10^5	0.208
Virac granodiorite body	5.42	5.880	2.78	2.78	2.78	0.40		1.59×10^6	0.214
Itoyon quartz diorite body	5.45	6.663	2.71	2.72	2.71	1.41		8.98×10^5	0.212
Miocene sedimentary rocks	4.34	6.623	2.67	2.71	2.66	4.71		1.98×10^5	0.222

Table 4 Summaries of the test well

Location	:	Acupan, Benquet Province
Date spuded	:	December 22, 1984
Date completed	:	February 17, 1985
Total depth drilled	:	2000.0 mMD/1,677.1 mVD
CHF elevation	:	821 AMSL
CHF coordinates	:	5,180 S ; 345 W
Bearings	:	155.7 $^{\circ}$
Bottomhole coordinates	:	6,055 S ; 35 E
Bottomhole throw	;	942.5 m
Kick-off point	;	296.2 m
Rate of inclination	;	2.5 $^{\circ}$ / 30 m
Programs of drilling / casing		
26" / 20"	;	61.48 m / 59.04 m
17 1/2" / 13 3/8"	;	282.10 m / 278.35 m
12 1/4" / 9 5/8"	;	1,392.60 m / 1,387.69 m
8 1/2" / 7 5/8" (slotted)	;	2,000.00 m / 2,000.00 m
top of slotted liner	;	1,382.1 m

2.2.3 調査井の坑井試験

調査井 (AC-10) のカッティングスの地質、地化学、坑井内検層及び注水試験の結果は次のように要約される (Fig. 10)。

- (1) 調査井は目標とした Balatoc プラグに縫着した。
- (2) 坑底地温は約 221℃ と推定され、温度条件では貯留層としての必要条件を満たしている。
- (3) カッティングスの変質鉱物及び化学組成上の特性から判断すると深度 660 m 付近、1,040 m 付近及び 1,550 ~ 1,620 m 付近に浸透層の存在が推定される。このうち 1,550 ~ 1,620 m 深については注水試験後の温度回復試験でも確認することができるが、他の 2ヶ所についてはケーシング及びセメンチングの為に確認することはできない。
- (4) その他、浸透層は温度回復試験から 1,850 ~ 1,995 m 深にも存在が推定されるが、ここについてはカッティングスの変質鉱物及び化学組成上の特性からも確認できる程度に顕著なものではない。
- (5) なお、上記の深度 1,550 m 付近及び 1,850 ~ 1,995 m 付近の浸透層は、注入量 1.0 t/min 内外、圧力約 100 kg/cm² の加圧試験 (水圧破砕) によって形成されたものである。
- (6) 注水試験の結果、透水性は約 11 ℓ / min · kg / cm² で、浸透率 × 層厚の値は 0.2 ダルシー・メートルと推定された。この値は地熱生産井としては十分に高い値ではないと言える。
- (7) 少なくとも、深度 1,550 m 以浅の浸透層においては化学組成上 S、-H₂O 及び lg loss が高く、かつ鉱物組成上シリカの量が多いことを考えると、石英、方解石及び粘土鉱物等の熱水からの空隙中への沈澱に依る自己閉塞が推定される。それに対して、1,850 ~ 1,995 m 深の浸透層は注水試験後に新たに形成された熱水の通路であり、未だ浸透層としての化学的特徴は顕著でなく、またさらに熱水からの化学物質沈澱に起因する自己閉塞作用も少ない。
- (8) 1,850 ~ 1,995 m 深の浸透層は、1,550 m 深の浸透層に比較して透水性が高いと推定される。その根拠となるものは温度回復試験及びボイラー・ステイミュレーション前後の温度検層結果である。

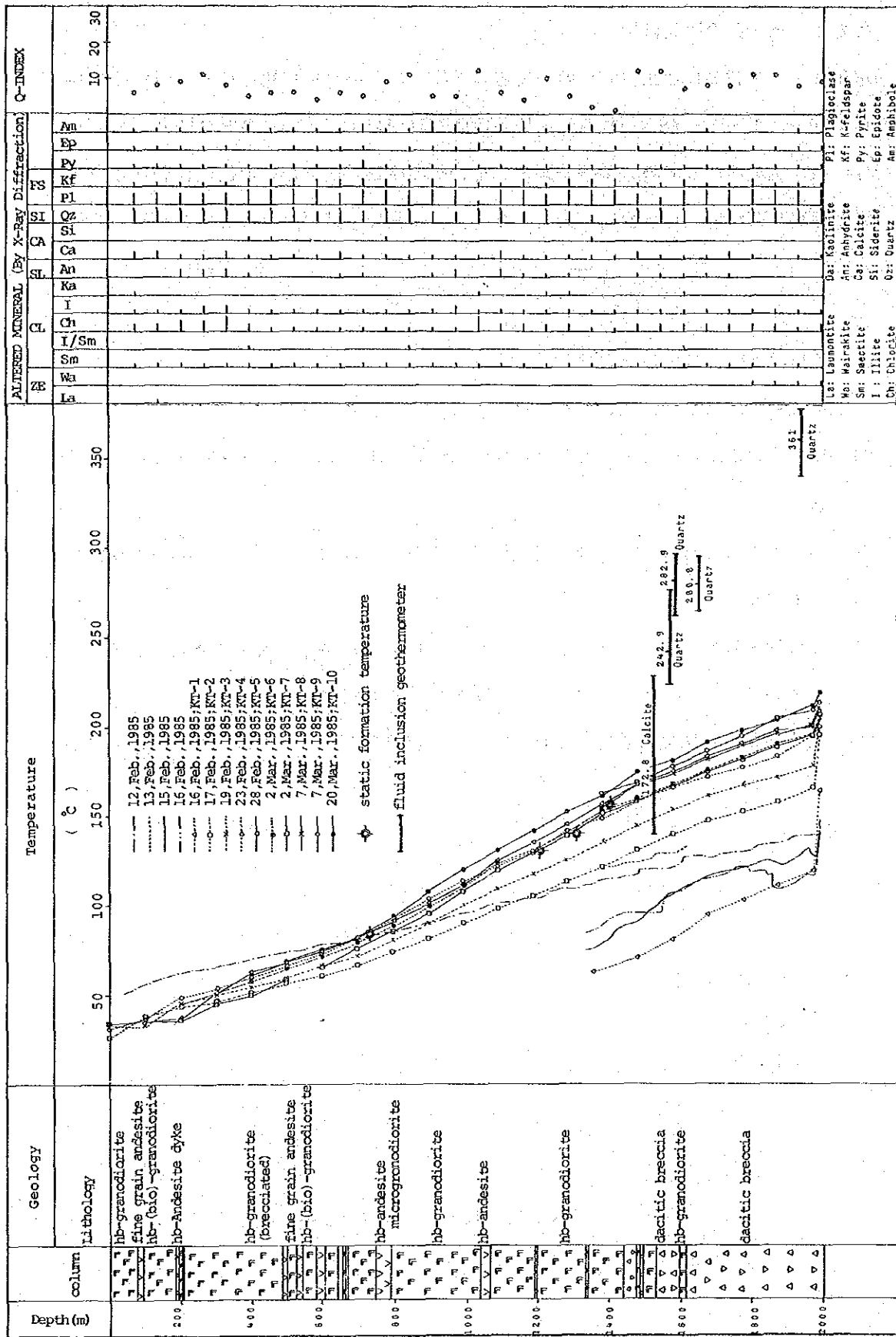


Fig. 10 Geological and thermal logging of the test well

2.2.4 調査井の噴気試験

昭和60年2月13日に加圧注入試験を実施した後、坑井の温度回復を待ち、同年5月14日の14:30分にボイラーから加熱蒸気を坑井内に27時間の間圧入し、翌日の6月15日の17:40分にバルブを開放して噴気試験を開始した。その噴気試験実施の前後には、坑井内からの流体採取及び温度・電気検層を実施したが、その分析・試験結果は次のとおりに要約される。

- (1) 噴出試験直前の坑口圧力は720psi。
- (2) 圧入した蒸気温度は 245.6℃で27時間連続注入した。
- (3) 加熱蒸気の圧入によって坑口から約 200m深にあった水頭面は 600m深にまで下げられた。
- (4) バルブ開放後は約40分間連続噴気するも、その後は間欠的となり、約一昼夜後には、噴気を完全に停止した。
- (5) この噴気作用によっても、噴気前の坑井内にあった熱水の大半は噴気停止後にも残存していることが、坑井内の熱水の化学分析より判明した。
- (6) 調査井が連続噴気に成功しなかったのは、坑井の透水性が極めて低いことに原因すると考えられる。

2.3 地熱系のシミュレーション

2.3.1 タンクモデル計算

Fig. 11は、Acupan地熱地域の深部地熱貯留層を予測するために使用したlamped parameter model である。

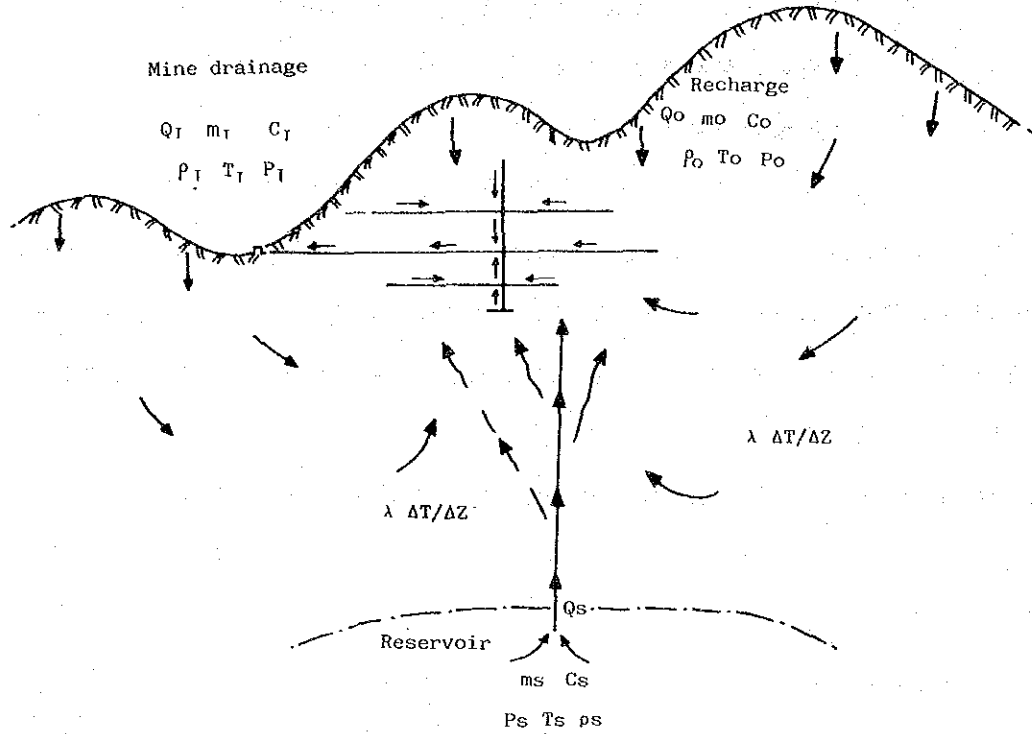


Fig. 11 Lamped parameter model of the Acupan geothermal field

当地域にある放熱量はAcupan鉱山の坑排水による放熱量で代表される。そして、この放熱量は、地下深部にある地熱貯留層から、地殻の割目を通して上昇する熱水と、降雨により補給されるrechargeが、地下を流動中に、伝導地熱で加熱され、坑内に湧出する坑内水とにより放出されるものである。

地下水及び地熱の流動はともに定常状態にあると仮定すると、地下水の質量収支、エネルギー収支及び溶存物質の収支に関する3つの方程式が成立する。

$$\rho_T Q_T = \rho_o Q_o + \rho_s Q_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho_T Q_T \cdot T_T C_T = \rho_o Q_o \cdot T_o C_o + \rho_s Q_s \cdot T_s C_s + \lambda \cdot A \cdot \Delta T / \Delta Z \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_T Q_T \cdot m_T = \rho_s Q_s \cdot m_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、	Q	: 水の流量	m^3/min
	ρ	: 水の密度	ton/m^3 or g/cm^3
	T	: 水の温度	$^{\circ}C$
	C	: 水の比熱	$Mcal/ton \cdot ^{\circ}C$ or $cal/gr \cdot ^{\circ}C$
	m	: 塩素イオンの濃度	mgr/kg or $cal/gr \cdot ^{\circ}C$
	λ	: 岩石の熱伝導率	$W/m^{\circ}C$
	A	: 地域の面積	m^2
	$\Delta T / \Delta Z$: 地温勾配	$^{\circ}C/m$

であり、添字の r はMine Drainageを、 s はReservoirを、また o はRechargeを意味する。

(3)式から上昇熱水の質流量 $\rho_s Q_s$ を求め、これを(1)式に代入して、rechargeの質流量 $\rho_o Q_o$ を得る。伝導放熱量を推計し、以上の値を(2)式に代入すれば、このときの貯留層の状態 T_s, C_s を求めうる。

上記の3式を解く際には次の各項目について検討を行った。

- (1) 冷泉の平均水温と塩分濃度
- (2) 河川水の温度と塩分濃度
- (3) 温泉放熱量
- (4) 比流量
- (5) 坑内水の影響圏
- (6) 熱伝導量
- (7) 貯留層内熱水中の塩分濃度
- (8) 貯留層内熱水状態

2.3.2 2次元シミュレーション

今回用いたシミュレータ SHAFT Kは SHAFT 79 を改良したもので、より深部の高温・高圧の領域での計算を可能としている。以下にその概略を示す。

大地を多面体状の岩体エレメントの集合で近似する。個々のエレメントの重心位置が示す温度と圧力及び熱水の状態とはそのエレメントの平均値とする。こうすると、隣接エレメント間を移動する質量とエネルギーとの収支には、次のバランス方程式が成立する。

$$\frac{\partial (\phi \rho)}{\partial t} = -\text{div} F + q \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\text{div} G + Q \quad \dots\dots\dots (2)$$

where ϕ = effective porosity (有効孔隙率)

ρ = density of fluid (流体の密度)

q = mass source (質流源)

F = mass flux (質流点)

U = volumetric internal energy (内部エネルギー)

Q = energy source (熱源)

G = energy flux (熱流点)

and t = time (時間)

Mass flux is given by Darcy's law at two phase condition. Energy flux contains conductive and convective terms. The volumetric internal energy is :

$$U = \phi u \rho + (1 - \phi) \cdot \rho_r C_r T \quad \dots\dots\dots (3)$$

with u = internal energy of fluid (流動内部エネルギー)

ρ_r = density of rock (岩石の密度)

C_r = specific heat of rock (の比熱)

and T = temperature (温度)

以上の諸式中には、温度 T 、圧力 p 及び飽和度 S からなる未知変数が含まれている。また各係数には未知変数の値によって変化する非線形項が含まれているために、地熱 2 相流問題の計算には多くの困難がある。このため、SHAFT では未知変数として流体の内部エネルギー u とその密度 ρ とを採用し、Newton-Raphson の手法と、多元連立 1 次方程式の直接解法とを組合せた効果的な解法を採用している。

現在もなお、地熱現象の中心はこれら鉱床の下部にある。その放熱量の全量は少なくとも 50MW 以上と推定され、しかもこの大部分が割目を上昇した熱水に上ると考えられる。これらの放熱量は Balatoc プラグの山頂を中心とした半径約 3 km の範囲内にあり、熱構造的には円柱状モデル或いは NE 方向の走向を持つ岩脈状モデルとして近似しうる。

Fig. 12 は Acupan 立坑、AC-1D 及び AGH-3 を通る地質断面図に、モデル計算に用いる地殻

ブロックを图示したものである。このブロック図はAcupan立坑を中心とした円柱対称構造モデルの断面図である。

モデル計算に利用できる放熱ならびに水文のデータが少なく、推定要素が多いために、種々の仮定を設けたシミュレーションを実施する必要がある。このため、計算が容易となるように、ブロック数を少なくしてある。図に示した2次元断面モデルには、地形に沿った地表層が与えてある。これは降雨によるrechargeを与えるためと、地表面と大気との間のニュートン冷却を効果的に実現するためのものである。最下部には一般的地熱流量と、火山性地熱源に相当する熱源或いは熱水源を与えるためのブロックがある。また、金鉱採掘による地下空洞の存在は、地下水位の降下と放熱量とに大きく関係するので、このモデル計算では、地下空洞からの排水と放熱とは最も重要なチェックポイントとなっている。

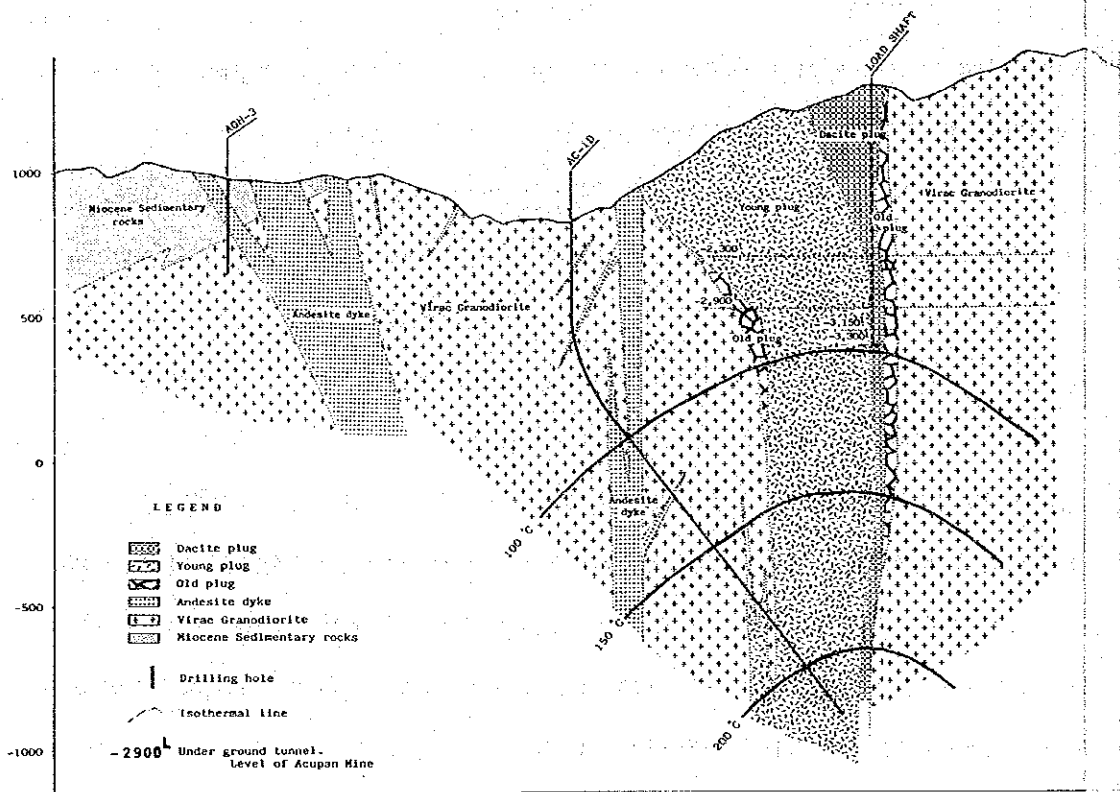


Fig. 12 Geological profile of the test well

ブロックを図示したものである。このブロック図はAcupan立坑を中心とした円柱対称構造モデルの断面図である。

モデル計算に利用できる放熱ならびに水文のデータが少なく、推定要素が多いために、種々の仮定を設けたシミュレーションを実施する必要がある。このため、計算が容易となるように、ブロック数を少なくしてある。図に示した2次元断面モデルには、地形に沿った地表層が与えてある。これは降雨によるrechargeを与えるためと、地表面と大気との間のニュートン冷却を効果的に実現するためのものである。最下部には一般的地熱流量と、火山性地熱源に相当する熱源或いは熱水源を与えるためのブロックがある。また、金鉱採掘による地下空洞の存在は、地下水位の降下と放熱量とに大きく関係するので、このモデル計算では、地下空洞からの排水と放熱とは最も重要なチェックポイントとなっている。

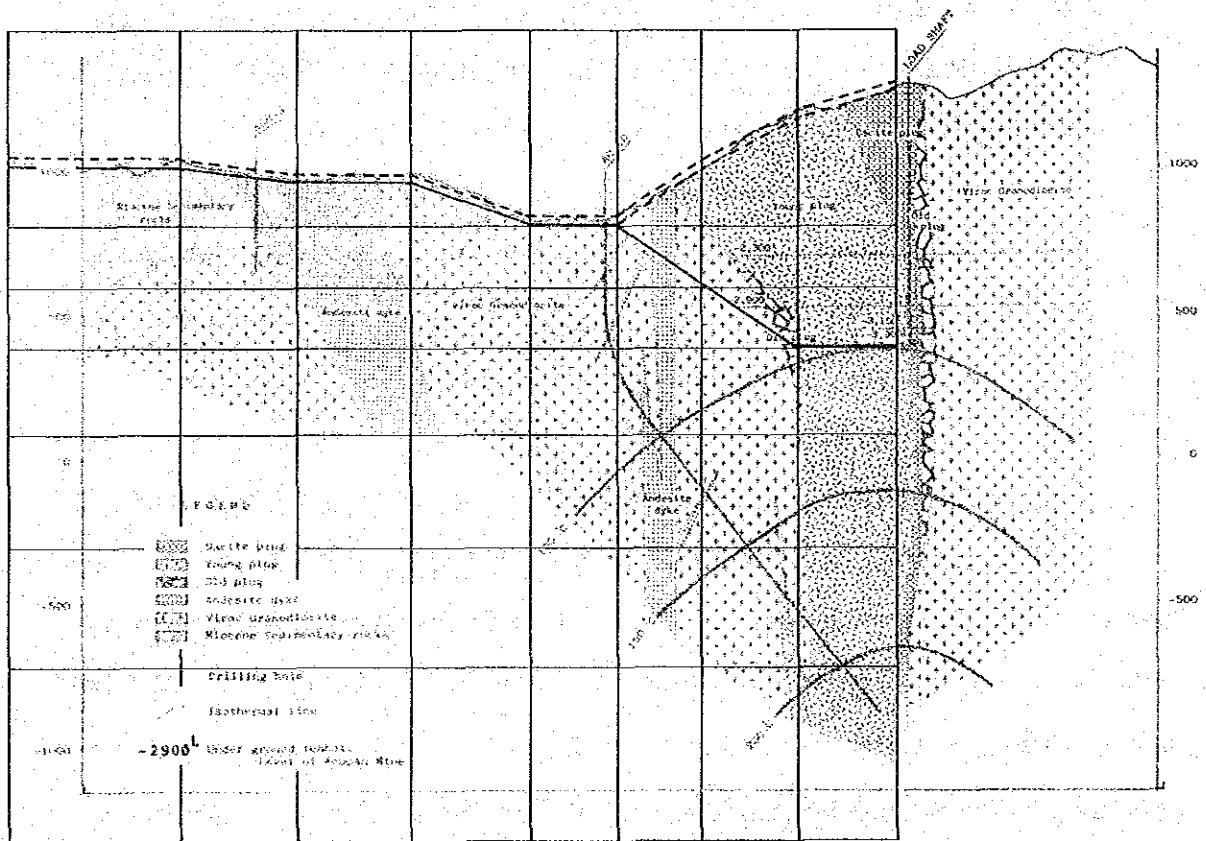


Fig. 12 Geological profile of the test well

第3章 Acupan・Itogon地域の地熱系

3.1 地表調査結果から推定される地下地熱系

3.1.1 地質構造

Luzon島北部の地質構造は、N-S方向に延びる地塊構造で特徴づけられ、中央隆起帯とその両側の沈降帯からなる。第四紀火山岩の大部分はこの中央隆起帯中にはほぼ南北に配列して分布し、地熱徴候地もこれらの火山周辺で知られている。

調査地域は、地質構造的には中央隆起帯と西側沈降帯の境界部付近に位置し、第四紀に活動した石英安山岩質プラグがNE-SW~N-S方向に点在し、これらの周辺で温泉の湧出等の地熱徴候が認められる。

本地域の中央隆起帯の地質は、変成岩類(Dalupirip schists)、変火山岩類(Pugo層)及び石英閃緑岩~閃緑岩の底盤(Agno Batholith)等で構成され、西側沈降帯は中新世の変質安山岩や堆積岩類(Zigzag層, Klondyke層)からなる。この中央隆起帯と沈降帯の漸移部には、鮮新世の安山岩貫入岩及び安山岩岩脈やプラグ類の活動がある。

この漸移部の地質構造としては、N-S系、NE-SW系、NW-SB系の断層構造やN-S及びNE-SW方向の褶曲構造、また岩脈や石英脈の卓越する方向からN-S、NE-SW及びNW-SB方向の断裂構造の発達が推定される。

これらの構造は、中央隆起帯を構成するAntamok閃緑岩やItogon石英閃緑岩中には乏しく、中央隆起帯の隆起運動に伴ってその縁辺に形成された構造であると考えられる。

本地域の地熱系の熱源と密接に関連していると考えられるItogon橋付近やAcupan鉍山周辺のプラグ類の活動は、中央隆起帯縁辺部に発達するN-S、NE-SW及びNW-SB方向の断層及び断裂構造に支配されていると考えられる。

Acupan鉍山付近のBalatocプラグは、このN-S系とNE-SW系の推定される断裂の交点部に位置している。

Acupan鉍山付近に発達する金鉍床は、主にNE-SW方向の鉍脈中に胚胎する鉍床で、またGolden Gate断層やStar断層と呼ばれる断層群もNE-SW方向を示して、ItogonプラグとBalatocプラグ間で発達する。

本地域に認められる温泉や変質などの地熱徴候及び金鉍床の形成は、これらのプラグ類の周辺やプラグ間に発達するNE-SW方向の断層構造に密接に関連することからみて、中央

隆起帯の隆起運動に伴いその縁辺部に発達した断裂構造が、本地域の地熱系の貯留層構造や、熱源に関連する鮮新世末～更新世のプラグ類の活動を支配しているものと考察される。

3.1.2 熱構造

調査地域内には金鉱床が多数分布するが、この鉱床の生成は広義の地熱現象の一部とみなすことができる。これら金鉱床に伴い地表には白色粘土化変質帯が各所に分布するが、調査地域内にはその他の地熱示徴として多くの温泉水の湧出がみられる。

これら地表でみられる地熱現象をもたらしている地下地熱系の熱源は、後期鮮新世～更新世にかけての安山岩質火山砕屑岩（旧期プラグ）と石英安山岩質火山砕屑岩（新期プラグ）及びこれら貫く石英安山岩等をもたらした火山活動と考えられ、この周辺に湧出温度の高い、かつ化学組成から推定される地下貯留層温度の高い温泉水が湧出する。即ち、それは Balatocプラグに対してのAcupan鉱山坑内での温泉水であり、また Itogonプラグに対してのItogon橋周辺の温泉水である。また、ここにおいては温泉水の温度が高いのみならず、その湧出に伴う放熱量が極めて高いことから、調査地域内のうち特に、Acupan-Itogon地区を精査対象地区とした。

調査地域内で、最も優勢な地熱系があると推定される Acupan-Itogon地区においても地表の地温示徴は弱い。これは地下の地熱系の熱源となる火山活動の地質的要因に依るのか、または熱水からの溶存物質の沈澱に起因する自己閉塞作用に依るものかは明らかではないが、その他金鉱床の採掘に伴う坑道の開削も影響しているものと考えられる。しかしAcupan鉱山の坑内岩盤温度とBalatocプラグとの位置関係は極めて明瞭である。つまり、プラグが貫入する時、またはその直後、プラグ自身のピストン運動的な上下運動に伴ってプラグの縁辺が角礫化され、その多孔質部に沿って地下深部の熱水が上昇し、プラグ縁辺部の岩盤温度が高くなっている。そしてプラグ自身の中の孔隙率は低いとみられ、岩盤温度も若干低く、また地表の土壤中の水銀濃度もItogonプラグ及びBalatocプラグの外側で高濃度を示す。それ故、深部地熱流体の上昇流はプラグの分布に基本的には規制されているものと考えられる。

海拔 - 1,000 m 地並の地温分布はFig. 6 のとおりと推定される。高地温部は Balatoc及びItogonのプラグを結ぶNE-SW方向の伸長を示し、200℃以上の範囲は約 3.5km × 1 km の拡がりとなり、約10℃ / 100 m 以上の地下増温率を示す。それに対して、北西及び南東の方向

では温度の減衰が激しく，地下増温率は極めて低い値を示す。このNE-SW方向と，NW-SE方向との極だった異方性は深部地熱流体の上昇がプラグ縁辺の角礫化帯のみならず，深部熱水の上昇が地質構造的に二次的に規制されている為に生じるものと考えられ，具体的には North断層，Star断層等のNE-SW走向を示す断裂構造が作用しているものと考えられる (Fig.13)。

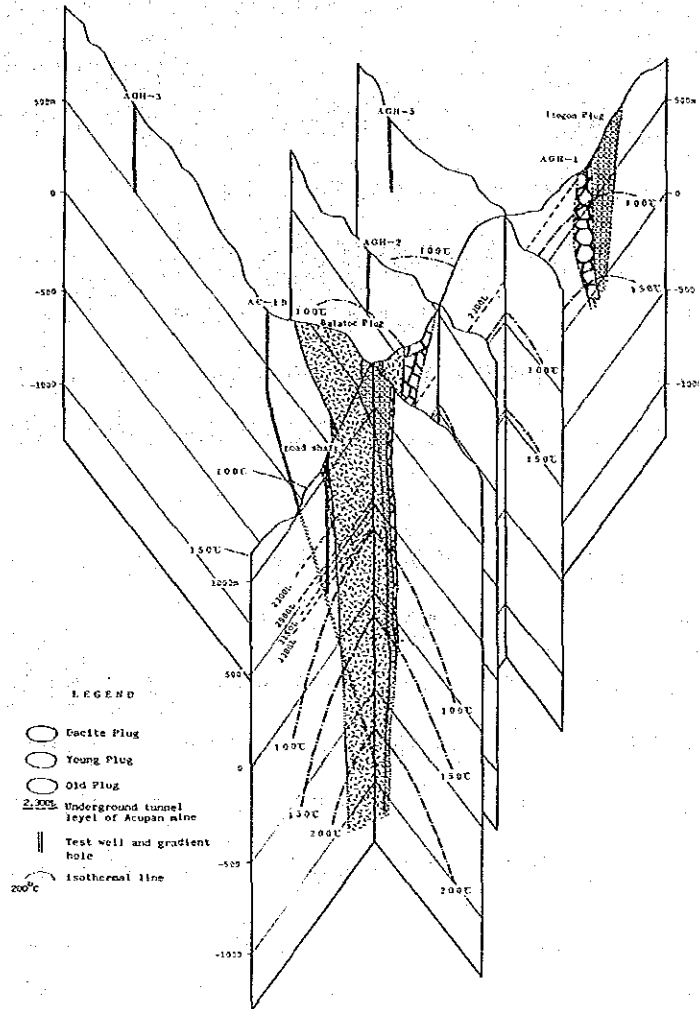


Fig. 13 Block diagram of geology and isothermal profile

3.1.3 水理構造

調査地域内にはDalupirip, Itogon, Klondyke, Asin, Pugo, Laboy, Balatoc (Acupan

鉞山坑内), Liang 及びAntamok 鉞山の坑内に温泉水の湧出がみられる。温泉水の湧出の大半は、地質的観点からすると、中央隆起帯とその西側の沈降帯とを画する漸移帯の中の断裂系に構造規制され、しかも高い泉温を示す温泉水は後期鮮新世～更新世に活動したプラグの周辺に湧出が限定される。

温泉水の泉質は溶存陽イオン及び陰イオンの組成からNa/Cl型 (Acupan, Klondyke, Asin, Pugo), Ca/SO₄型 (Acupan, Antamok, Laboy), Ca/SO₄ - HCO₃型 (Antamok), Na/SO₄ - HCO₃型 (Itogon, Antamok), Na/SO₄型 (Dalupirip) の5泉質型に分けられ、最も泉温の高いものはBalatocプラグに近接して湧出するAcupanのNa/Cl型泉と、Itogon プラグに接して湧出するNa/SO₄ - HCO₃型泉の沸騰泉である。

調査地域内で採取した降雨水、河川水及び温泉水の多くは、その水素及び酸素の同位体組成がCraig (1963) のMeteoric water line よりも若干左側にはシフトした

$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 15$ の直線上に乗るので、温泉水の起源水は降雨水で涵養された地下水に起源を求めることができるだろう。ただ、ここでAcupanのNa/Cl型を示す高温泉にはオキシジェン・シフトがみられる。

精査域のAcupan-Itogon地区についてみると、温泉水の水素及び酸素の同位体組成の観点からすると起源水となる降雨水の集水域は2大別できる。つまり同じAcupan鉞山の坑内においても、Ca/SO₄ 型泉の集水域はNa/Cl型泉の集水域に対して δD 値に換算して10%ほど海拔標高の高い所に存ると言え、この δD 値の差は標高差にしてはほぼ数100mに相当する。Ca/SO₄ 型泉の水素及び酸素の同位体組成は、ほぼそこと同様な標高における降雨水のそれと等しいのでNa/Cl型泉の起源水は比較的遠方、例えばKlondyke付近の低地帯に求められるだろう。

Acupan鉞山の坑内には前記のとおりNa/Cl型泉とCa/SO₄ 型泉とが湧出する。その泉質の差は後述するとおり各々の泉質型の温泉水の加熱機構の差に起因するものだが、温泉水の起源水である地下水を涵養する降雨水の集水域も異にしている。ここで各々の型の間には漸移型のみられないことが特徴的であり、これはNa/Cl型泉の起源水とCa/SO₄ 型泉の起源水とは混合することなく、両者は互いに不透水層を境として隔離されることを意味するものである。調査地域内の地質からすると、この不透水層として例えば泥岩層等の特定の地層が作用しているとは考え難く、むしろ熱水中の溶存成分が母岩の空隙中に化学的に沈澱することで目詰りしたような不透水層が考えられる (Fig. 14)。これは所謂、自己閉

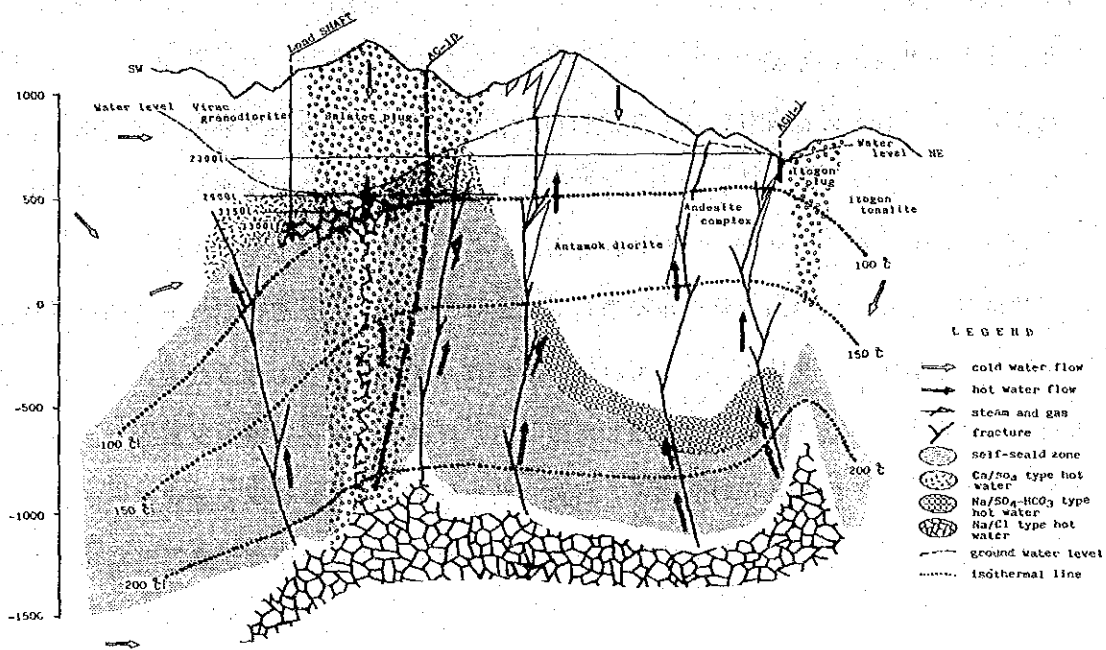


Fig. 14 Conceptual model of geothermal system of the Acupan-Itogon area

塞帯であり、この存在は調査井（AC-1D）のカッティングス調査及び調査井の注水試験の結果からも支持されるものである。

上記事項を総合すると、Acupan鉱山坑内からItogonにかけて湧出する温泉水の加熱機構は次のとおり考えられる。つまりNa/Cl型泉は深部熱水と考えられる、その起源水は低標高地での降雨水で涵養された地下水である。それに対してCa/SO₄型泉は深部熱水から分離したCO₂及びH₂Sガス等によって地下水が比較的浅部で加熱されたもので、その起源水は直上の降雨水で涵養された地下水に求められる。Acupan鉱山の坑内ではBalatocプラグの縁辺の破碎帯及びその外側に各々の泉質型の温泉水が湧出するのであろう。Itogonでは直上の降雨水が比較的深部にまで浸透し、そこで地下水がCO₂ガス及びH₂Sガスで加熱され、それが地表に到達する間に母岩中のNaを溶解することでNa/SO₄-HCO₃型の温泉水が形成されたものと考えられる（Fig. 14）。

3.2 坑井調査による貯留層の検討

3.2.1 坑井試験の結果

調査井 (Ac-1D) の地質は Virac 花崗閃緑岩、安山岩岩脈及び石英安山岩質火山砕屑岩 (新期プラグ) からなる (Fig. 12)。新期プラグは地表地質からの予測とほぼ同様であるが、若干その径が小さくなっている模様である。

坑井地質は全体的に熱水変質作用を覆っており、その変質から推測される熱水の液性は中性ないし弱アルカリ性で、しかも坑底付近にはワイラケ沸石もみられることから温度も高かったと考えられる。坑井の貫通した区間内には高温熱水の通路の痕跡がいくつか認められるが、そこでは斜長石の溶脱と、石英、粘土鉱物及び非鉄金属の硫化物等が岩石中の孔隙に沈澱して目詰りを生じているものと考えられる、これは所謂、自己閉塞作用である。

調査井 (AC-1D) の坑底 (2,000 m 深、垂直深度 1,677 m、標高 - 856 m ASL) での地層平衡温度は 220℃ 内外であった。これは地熱流体の噴出に必要な温度条件を十分に満たすものである。傾斜掘削沿いの増温率も 11℃ / 100 m と十分に高いものであるが、調査井 (AC-1D) の掘削区間内ではその増温率がほぼ一定で、このことは不透水層の分布に起因する熱伝導卓越の状態を示している。この不透水層は自己閉塞作用の結果として形成されたものと考えられるが、これは現在の地層平衡温度が石英脈中の流体包有物の充填温度で示される往時の温度に比較して、例えば 1,600 m 深では 60~100℃ 程度降下していることとも符号する。

調査井 (AC-1D) の掘削途上では逸泥は全くみられず、坑井内で透水ゾーンを捕捉することはできなかった。しかし 2 回にわたる水圧破砕作業の結果、微弱ながら透水ゾーンを形成することができた。この透水ゾーンは現在は自己閉塞されているも、往時は熱水の通路として作用していた裂かか、人工的に再開口したものと考えられる。注水指数及び浸透率・層厚の値は各々、 $1.79 \ell / \text{min} \cdot \text{MPa}$ 、 $0.257 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ と極めて小さい値であり、これは地熱発電を行うに必要な蒸気量を噴出させるには十分ではないが、ある程度の噴気は期待できる。

水圧破砕で形成された透水ゾーンは深度 1,550 m 付近と、深度 1,850~1,995 m 付近の上下 2ヶ所にみられる。このうち上部の透水ゾーンは Balatoc プラグ縁辺の地質境界であり、地化学資料から推定すると往時は熱水の顕著な通路であったと考えられる。しかし現

在は石英及び粘土鉱物等で閉塞されており、水圧破碎後においても透水性はさほど高くはない。一方、坑底近くの透水ゾーンは、地化学的には往時の熱水通路としてさほど顕著ではないが、水圧破碎後は上部の透水ゾーンに比較して透水性が高い。

以上のとおり、調査井（AC-10）は温度条件としては地熱流体の噴出に十分に高い温度であるが、透水性は低い。これは調査井の坑底が自己閉塞帯の中に在り、未だその下位にあると期待される貯留層ゾーンに達していない為と考えられる。

3.2.2 噴気試験の結果

調査井（AC-10）の掘削完了後、90日間の温度回復期間を与え、1985年5月15日に噴気試験を実施した。

噴気試験に先立って、坑井内に加熱・加圧蒸気を注入した。注入開始は5月14日14時30分で、27時間の連続注入を実施し、坑井内温度を高めると共に、水頭面を下げた。注入した蒸気温度は245.6℃で、注入時の坑井内口元圧力は720psiである。

坑口バルブを5月15日17時40分に開放した。バルブの開放後は約40分間、熱水まじりの蒸気が噴出したが、そのうち最初の10分間の噴気が強かった（巻頭写真）。噴出状況は写真にみられるとおり熱水をほとんど伴わない大部分が蒸気からなるもので、特に約40分間連続した最後の数分間は全くの乾き蒸気であった。

噴気はその後間欠的となり、5月16日まで間欠的ながらも弱い噴気のみられたが、その後は全く噴気を停止した。

Fig. 15には噴気試験前後の温度・圧力検層の結果を示す。KP-6の圧力検層曲線にみられるとおり、加熱蒸気を坑井内に加圧注入する以前は坑口から約200m深の位置にあった水頭面は蒸気に加圧注入によってKT-13の温度曲線から推定されるとおり坑口から約600m深の位置に下がり、約400mの水頭面降下があった。

さらに、噴気試験の2日後には温度検層（KT-15）曲線及び圧力検層（KP-8）曲線にみられるとおり、坑井内の温度及び水頭位置は噴気試験以前の状態に回復しているので坑井内である程度の地熱流体が流動していることには誤りはない。

しかし噴気試験の後、坑井内から採取した熱水のpH値及び分析結果の値から推定すると噴気試験後の坑井内の熱水は加熱蒸気の圧入時の復水の影響が強く残っており、それ故噴出試験によって坑口から吐出した蒸気及び熱水は、噴出試験直前に坑井内に滞留していた

地熱流体の極く一部であったとみられる。

これは調査井 (AC-10) の透水ゾーンの透水性が極めて低いことを意味するもので、噴気試験前に予測していた注水指数及び浸透率・層厚の値、各々 $1.79 \text{ l/min} \cdot \text{MPa}$ 、 $0.257 \times 10^{-12} \text{ m}$ よりもはるかに低い値であると考えられる。この透水性に関する予測と実験の大きなずれの原因はいくつか挙げられるだろうが、そのうち最も大きな要素は予測をした時点から噴気試験を実施した時点の間の時間差であると考えられる。つまり、注水指数及び浸透率・層厚の値を求めたのは水圧破砕を実施した時点であり、その後約3ヶ月の間に人工的に開口した割れ目が再び閉じてしまったのではないかと考えられる。

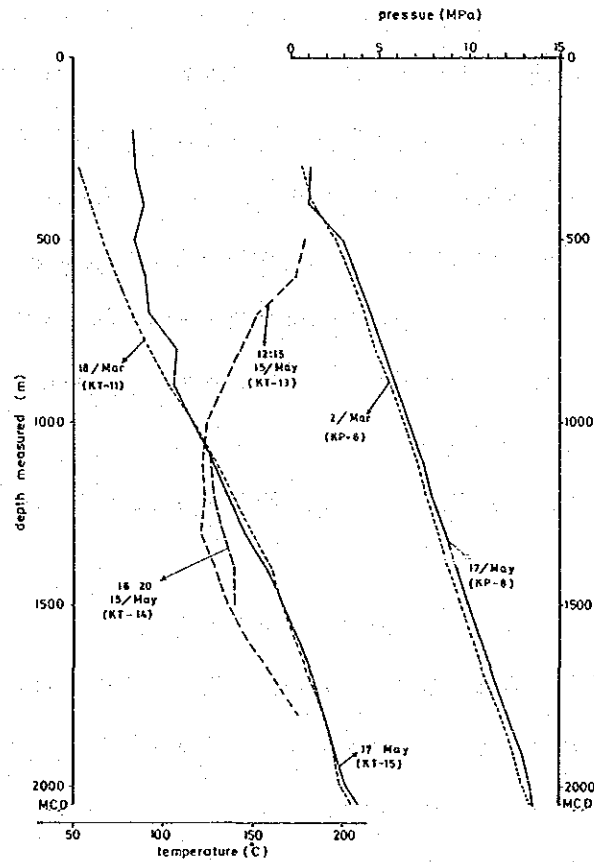


Fig. 15 Thermal and pressure logging after and before the flashing test

3.3 モデル計算による地下地熱系の検討

3.3.1 タンクモデル計算の結果

地下水の量収支、エネルギー収支、及び溶存物質収支を解いて得たFig. 16, 17から m_s が 1,600~3,200mg τ / ℓ のときの貯留層内熱水の温度、圧力と上昇熱水流量を求めることができる。今、仮に貯留層内熱水のC ℓ 濃度 m_s を 2,000mg τ / ℓ とすると、

$$T_s = 273^\circ\text{C}, C_s = 1.17\text{Mcal/ton}, \rho_s = 0.68\text{ton/m}^3,$$

$$P_s = 198\text{bar}, Q_s = 2.22\text{m}^3/\text{min} \text{ となる。}$$

この図をみると、温度 T_s は濃度 m_s の上昇とともに上昇するが上昇傾度は下がり、 $m_s = 3,200\text{mg}\tau/\ell$ では $T_s = 320^\circ\text{C}$ のほぼ安定した値に達する。この時、 $P_s = 250\text{bar}$ と予想され、そこに貯留層があるとすればその深度は海拔が略 -1,700m と推定される。

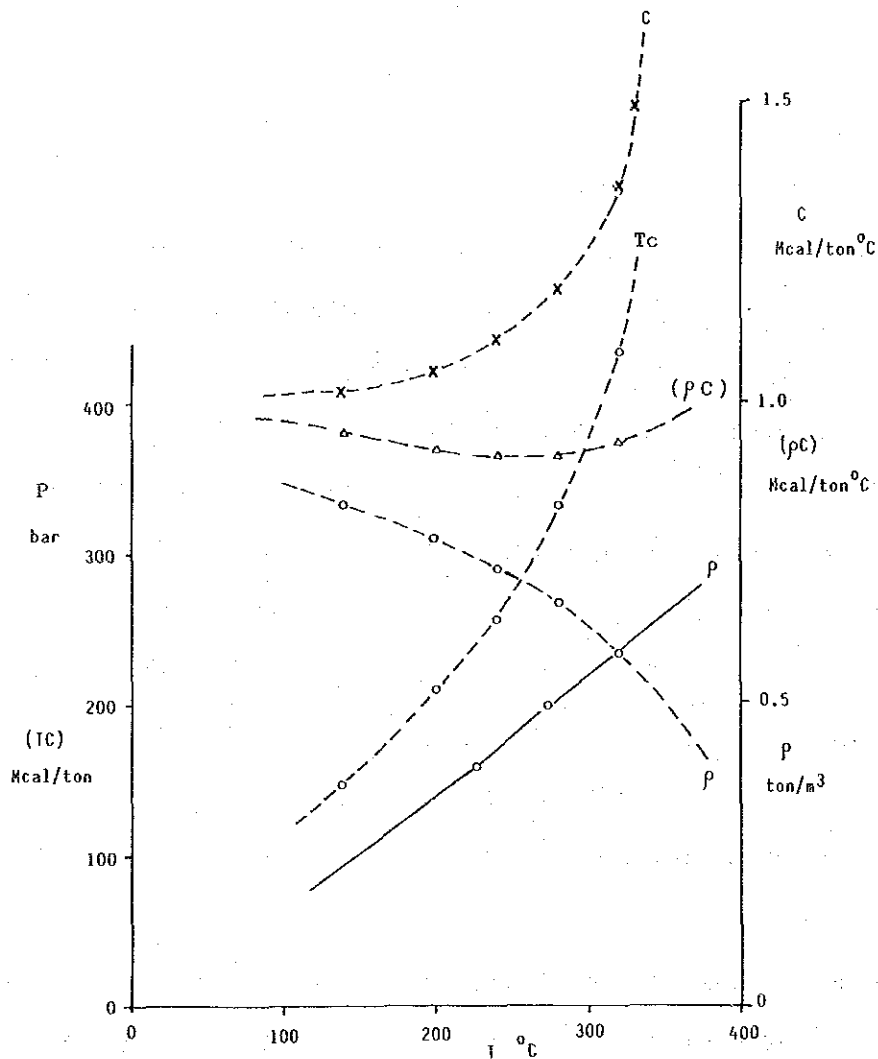


Fig. 16 Estimated properties of the hot water in the reserve

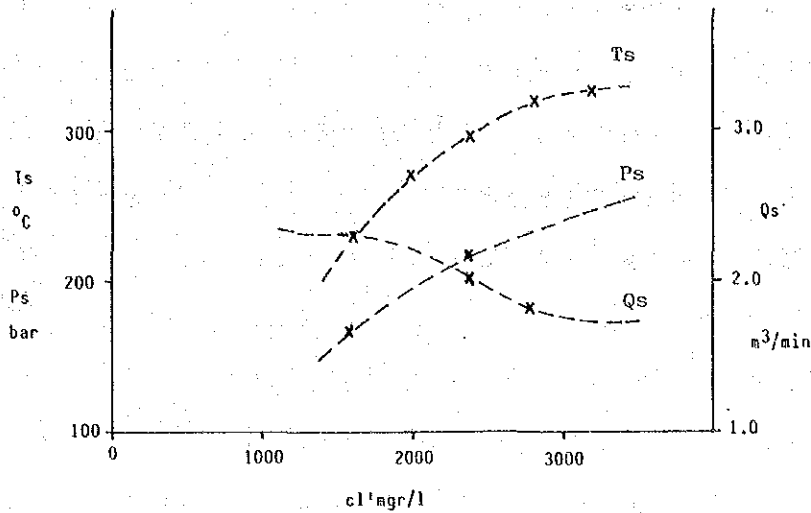


Fig. 17 Relation between the hot water properties in the reserve and the Cl-concentration

3.3.2 2次元シミュレーションの結果

以上のごとき考えのもとに、更に数回の修正計算を実施して得られたモデルをFig. 18に示してある。貫入岩類と基盤岩類との透水性には有意差は無く、深部から上昇する1次熱水は領域の周辺部に向ってやや少なくなる傾向を与えてある。約2万年後の定常温度分布を示すと、Fig. 19の如くである。地下の温度勾配は小さく、温度分布もAC-10試験井内の実測値に接近する傾向を示している。地下の温度分布に対応した圧力分布をFig. 20に示してあるが、この図からは直接に地下の地熱構造を読み取ることは困難である。地下熱水の流動状況はFig. 21の熱流量分布図及びこれとほとんど同様な傾向を示すFig. 22の質流量分布図によって推定できる。これを見ると、Acupan坑内に浸出する質流量は8.60kg/s、また熱流量は2.308MWとなって、実測値に近づいている。更に数回の修正計算を実施すれば、ほぼ実測結果と同様なモデル計算結果に到達し得るであろう。現在までのシミュレーションの観点からは、Acupan地熱地域の深部地熱構造として次のような推定をすることが可能である。

- (1) Acupan地域の深部基盤岩類は貫入岩類であるか否とにかかわらず、透水性は極めて悪く $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ のオーダーであり、方向性はほとんどないと見られる。

- (2) 深部熱水の上昇通路となるような特に大きな開放割目の存在は無いと考えられる。
これは金鉱床生成等に関係した自己閉塞作用が強く、新しい活断層を作るような造山運動が弱いためと推定される。
- (3) 深部1次熱水の上昇は BalatocプラグやNE系の地質構造に支配される傾向はあまりないと推定される。深部熱水の上昇は、むしろ当地域広汎な現象と考えられる。少くとも、今回のモデル領域となった半径3 km内では、ほぼ一様であると推定される。
- (4) Acupan坑内に湧出する33MW以上の深部熱流量の大部分は、鉱山の地下深部開発に関係した地下水の湧出とその廃水にあって、このような人工的変化の無かった時代では、現在のItogon付近に見られる温泉現象と大差は無かったと推定される。
- (5) 今回のシミュレーションの領域外となる海拔-1,500 m以深において、透水性の良い開放割目が発達しているか否かは現在のところ判定できない。

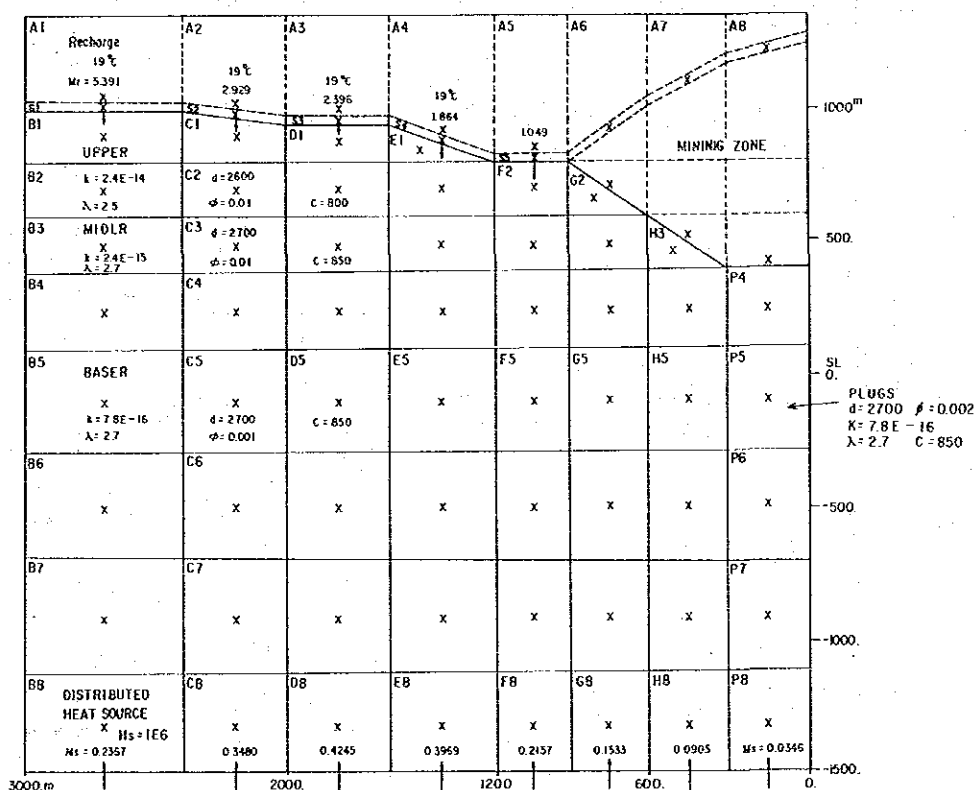


Fig. 18 Simulation model K

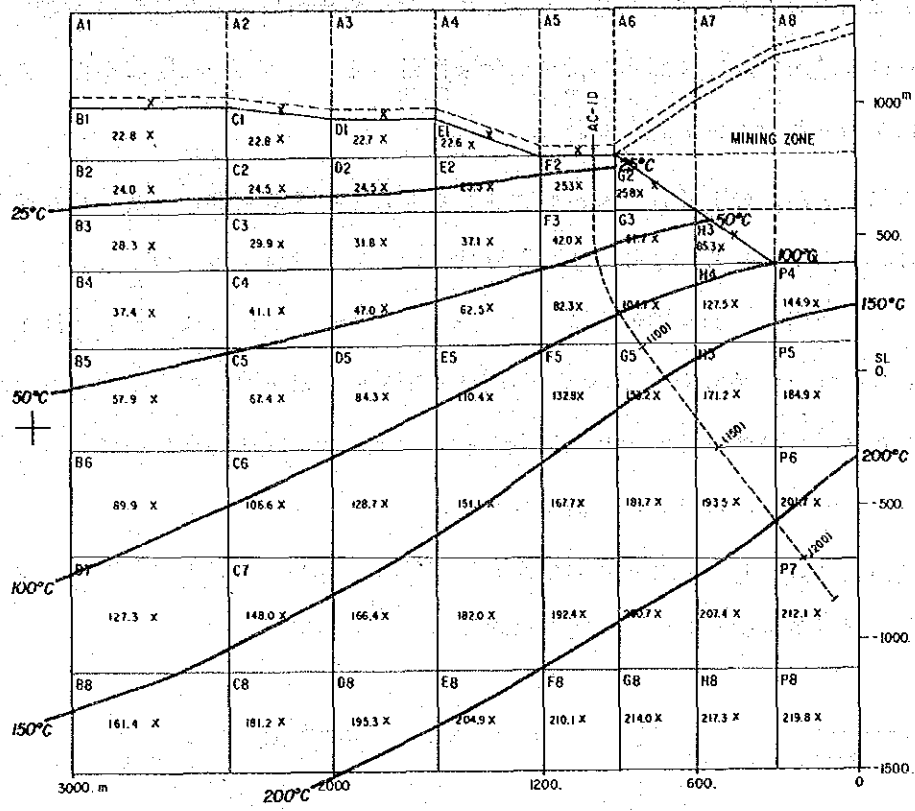


Fig. 19 Temperature distribution (model K) in °C

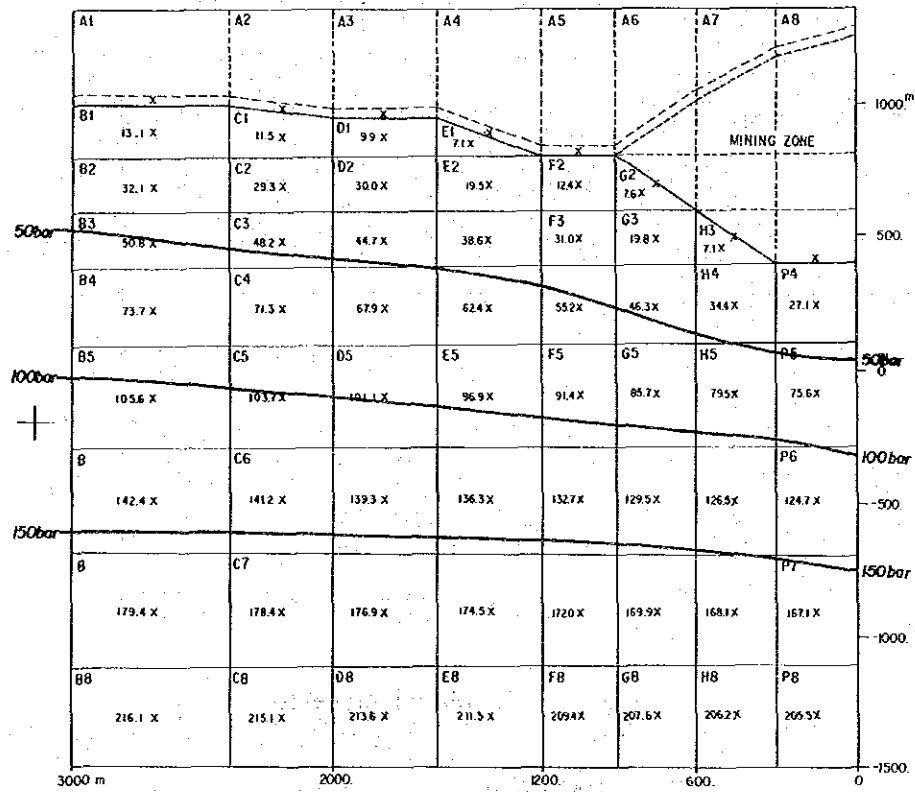


Fig. 20 Pressure distribution (model K) in bar

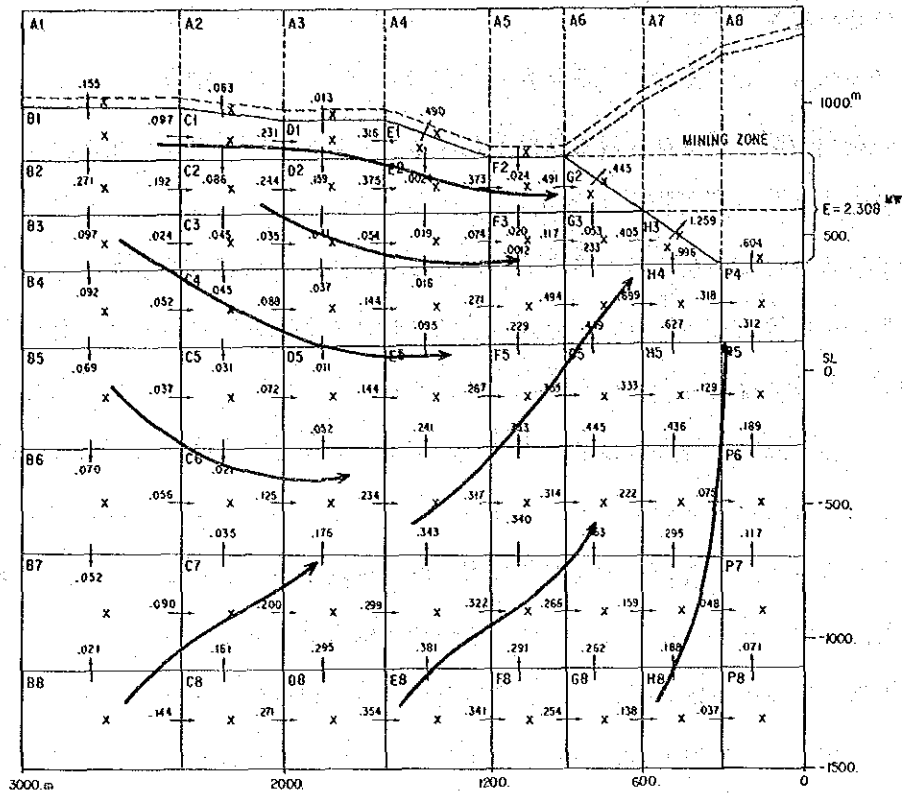


Fig. 21 - Heat flow distribution (model K) in MW

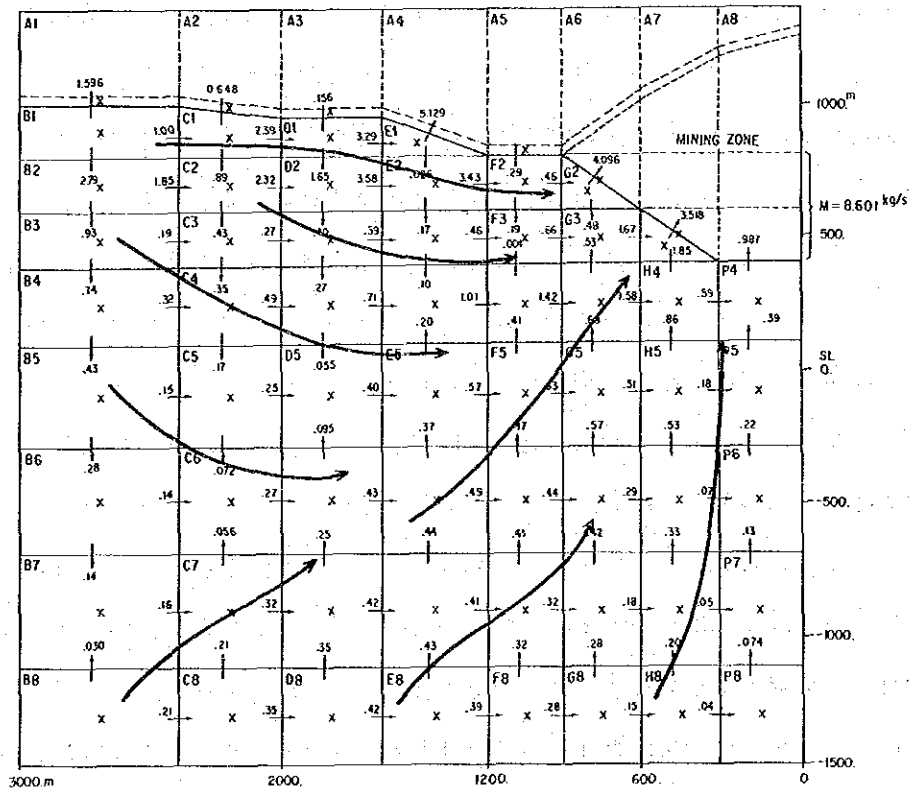


Fig. 22 - Mass flow distribution (model K) in kg/s

3.4 地熱系の考察

3.4.1 地熱構造モデル

Acupan-Itogon地区の地質は岩石物性上孔隙率の極めて小さい火成岩類から構成されることが特徴的である。

当地区では断裂がその孔隙率を高めるものとして作用する他、熱源に関連する新期火山岩類の活動の場も規制しており、ここは典型的な断裂規制型の地熱系であると言える。海拔-1,000 m地並の温度分布についてみると、それはNE-SW方向に伸長し、地温が200℃以上の範囲は約3.5km×1.0kmの規模を持つが、その北東及び南西端は熱源に関連するプラグで、またその間はNE-SW走向の断裂で占められ、そこが地下深部からの地熱流体の上昇流域と考えられる。その地温勾配は10℃/100m程度であるが、その北西側及び南東側では温度勾配の低下が著しく、そこが地熱流体の下降流域と考えられる。つまり当地区の地熱系の形態は断裂に主眼を置けばNE-SW方向に伸長した板状のモデルとして、または熱源に関連するプラグに主眼を置けばAcupan及びItogon各々における円柱状モデルの複合として考えることができる。

次に、地下水、エネルギー及び熱水中の溶存物質の各収支の観点から当地熱系の性状をみる。

地下水の流動予測に際してはAcupan鉱山の影響を無視することはできない。つまり鉱山の操業に伴ない、そこを中心とした地下水面の降下が相当広い範囲に生じたものと考えられる。この影響によって、Acupan-Itogon地区の流域面積は見掛上9km²であるにも拘わらず、Acupan坑内に向う地下水の流動水域はさらに外側にまで広がり、坑内浸出地下水の実質的な流域面積は約15km²の広さに達すると考えられる。これはBalatocプラグの直上に中心を持ち、北東方向の半径約2.6km、北西方向の半径約1.9kmの楕円の範囲にはほぼ相当する。この範囲にはItogonプラグも含まれ、少なくともこの範囲の天水で涵養された地下水は表層においてはBalatocプラグに収れんする求心的な流動方向を示すと考えられる。そしてAcupan鉱山の坑内及びItogonで湧出する温泉水のうち、Ca/SO₄及びNa/SO₄-HCO₃型の温泉水はこの地下水が地下に浸透して加熱されたものと考えられる。

Acupan-Itogon地区の温泉水のうちNa/Cl型の温泉水は深部熱水に由来するものと考えられる。その起源水はAcupan-Itogon地区の降雨水で涵養された地下水ではなく、相対的に標高の低い処の降雨水で涵養された地下水に求められるであろう。それが地下深部の高

温状態で加熱される間に、母岩中からNa及びCl等の化学成分を溶脱したものと推定されるが、当地域の地質は火成岩類が多く、海成の堆積岩類が極めて少ない為に熱水中のCl濃度もさほど高くはない。Acupan鉱山の坑内で湧出する温泉水のうち最高のCl濃度は1,700mg/ℓ程度であるが、その泉温と考えられる程度の地表水との稀釈を考えると、地下貯留層内での熱水中のCl濃度は2,000～4,000mg/ℓ程度であろう。

Acupan-Itogon地区で最も温泉水の湧出の多い処はAcupan鉱山の坑内である。ここでは地下深部のNa/Cl型熱水はBalatocプラグの縁辺の破砕帯に沿って、その囲りの自己閉塞帯を切って上昇し、坑内で沸騰泉として湧出する他、坑内にはその他Ca/SO₄型の低温性の熱水も湧出している。坑内の-2,000レベルではそれらの混合として43℃の熱水を20m³/minの割合で坑外に排出しておりこれによる放熱量は極めて大きい。しかしその他に依る放熱量は極めて少なく、全体としてはAcupan-Itogon地区で33.8MW程度の放熱量であると推定され、この値は普通の地熱地帯でみられる値である。

3.4.2 地熱系の考察

Acupan-Itogon地区の地熱系はBalatocプラグとItogonプラグを結ぶ板状モデルとも、また各々のプラグにおける円柱状モデルの複合とも考えられる。しかしここで、最も大きい放熱量を示すのはBalatocプラグ沿いの温泉水の湧出であり、またそこは調査井(AC-1D)が掘削され、地下情報も最も豊富なので、Balatocプラグ沿いの円柱状モデルとして以下の考察を進める。

Fig. 23はBalatocプラグ及び調査井(AC-1D)沿いの円柱状モデルの一断面である。自己閉塞帯の分布、Balatocプラグとそれに沿ってのNa/Cl型熱水の上昇、また地下水の流動とCa/SO₄型温泉水の形成機構及び地下の温度分布は図に示すとおりで、その詳細は前述したとおりである。ここで、主に地質及び地化学的資料から帰結されたこのモデルをシミュレーター(SHAPT-K)を使用して検証した結果と総合すると次のとおりである。なおシミュレーションの範囲は円柱状モデルの半径3km、深度は海拔-1,500m以浅で、中心角15度の扇形立体内を熱水・蒸気2相の非定常流として解いたものである。

深部熱流量については地質・地化学資料からは全く不明であるが、シミュレーションの結果から推定すると、熱量供給源の深度を仮に海拔-1,500m付近に想定した場合、それはBalatocプラグの直下のみに限定されるものではなく、かなり平面的な拡がりは大い

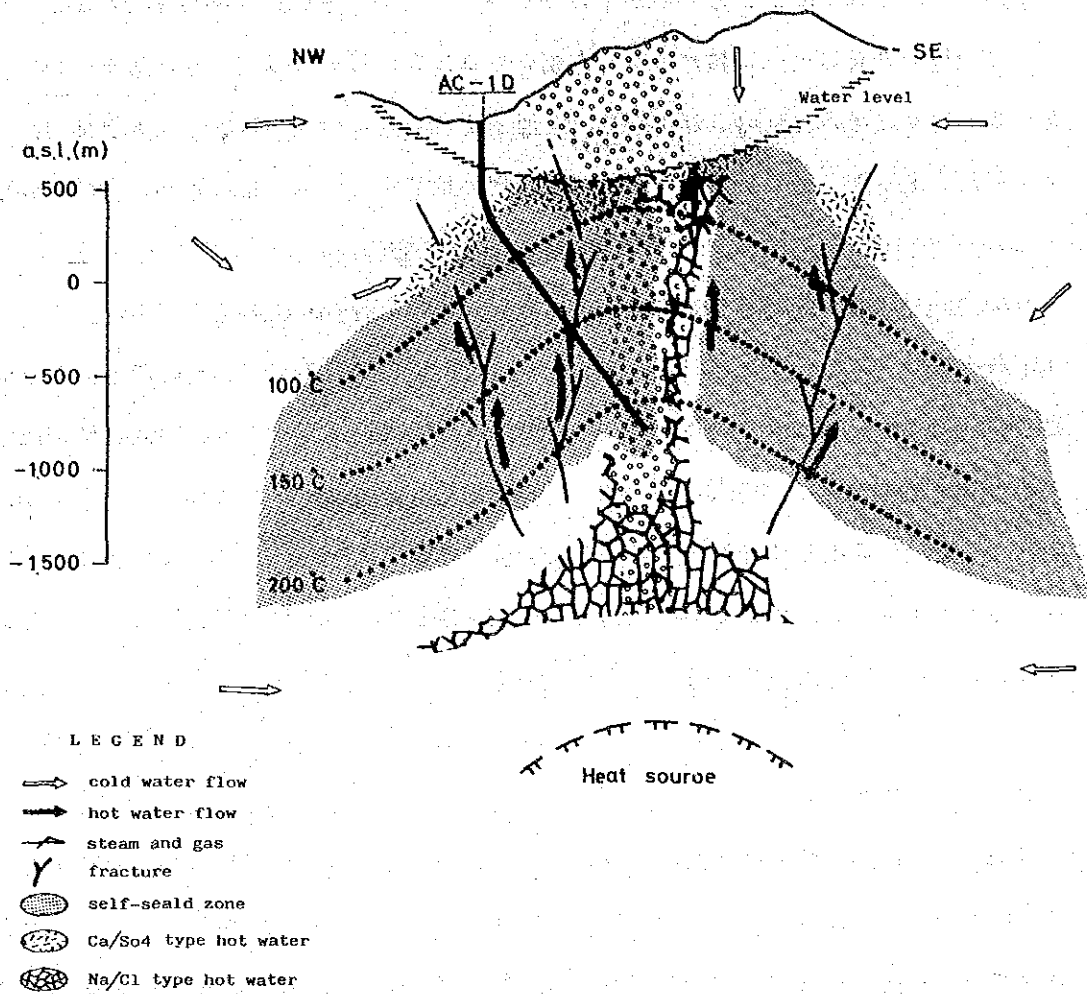


Fig. 23 Conceptual model of geothermal system through the test well

ものと推定される。逆に Balatoc の直下のみに熱量供給源を想定するとすれば、その深度は極めて深く、かつ温度も極めて高いものとなる。実際の熱量供給源が上記両極端の場合のどちらに近いかは不明だが、Itogon プラグ周辺での温泉水湧出との関連から推定すれば、前者の場合に近いものと考えられる。そしてその場合は例えば海拔 -1,500 m 深においては、比較的広い範囲に高地温域が広がっていると考えて良いだろう。

Acupan 鉱山の坑内へは大量の温泉水が湧出しているが、その温泉水の形成に十分な地下深部からの熱流体の上昇にはシミュレーションによれば $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ オーダの透水性があれば説明し得る。この値は非常に小さいもので小さい割れ目が極く稀にしかないと示唆しており、これは地質及び地化学の資料から推定されている自己閉塞帯の分布を裏

付けるものである。またこの値は調査井（AC-10）の水圧破碎で生じた割れ目の透水性にほぼ等しい。この程度の透水性でもある程度の連続噴気は期待できるものであるが、実際は調査井（AC-10）の噴気試験の結果にみるとおり、連続噴気には到らなかった。これの意味することは調査井（AC-10）が未だAcupan鉱山坑内に温泉水の湧出をもたらしている熱水の通路に未だ縫着していないことを示すと共に、水圧破碎で生じた割れ目は噴気試験の実施時には既に閉じてしまったことを示すと考えられる。

また現在もなお、Acupan鉱山坑内には約33.6MWに相当する大量の温泉水が湧出している。この温泉水形成に寄与する深部熱水の上昇が何故にAcupan鉱山の坑内に限られるかについては鉱山の操業に伴う地下水面の低下も大きな要因であると考えられる。つまり、地下水面の低下による圧力減が地下深部の熱水の上昇を誘発しているとみなすことができる。その観点に立てば、Itogonプラグ周辺での温泉水の湧出に伴う放熱量は約0.2MW相当とBalatocプラグ周辺でのそれに比較して極めて小さいが地下深部の地熱資源ポテンシャルとしてはさほどの差はないとも考えられる。事実、土壌中の水銀濃度及び地表の変質帯分布で比較すると、Itogonプラグ周辺とBalatocプラグ周辺とでは地熱示徴の強さは、ほぼ同じと言える。

第4章 結論と勧告

4.1 結 論

Phase I から Phase III にかけての調査結果を取りまとめた結果、次のような結論に達した。

1) 地質構造と熱源

Acupan-Itoyon 地区は中央隆起帯と西部沈降帯との漸移部に位置する。そこには断裂構造が顕著に発達し、それが地層の有効孔隙率を高め、地熱貯留層としての場を形成するとともに、それら主に N-S 及び NE-SW 系の断裂の交叉部は熱源に関連する鮮新世末から更新世にかけてのプラグ類の活動の場となっている。つまり当地区の地熱系は典型的な裂か規制型の地熱構造であると考えられる。

2) 貯留層の温度

温泉水の化学組成から推定される地化学温度は、シリカ温度で 229℃、アルカリ比温度で 236℃と高温で、貯留層温度としての必要条件を満たしている。これは調査井 (AC-10) の坑底温度が 220℃であったことにより裏づけられる。

3) 貯留層の形態と広がり

当地域が金鉱山の操業地帯であるため、電氣的ノイズが高く比抵抗調査など物理探査による深部情報は全く得られなかった。しかし7本の測温孔(深度 100~400m)と調査井 (AC-10) の測温結果から推定される 200℃以上の貯留層は、海拔-1,000m 地並において NE-SW 方向に伸長する約 3.5km × 1.0km の楕円状の範囲と考えられる。

4) 温泉水の起源と生成機構

同位体組成分析の結果、温泉水の起源はいずれも降雨水で涵養された地下水に求められる。温泉水は Na/Cl 型、Ca/SO₄ 型、Na/SO₄-HCO₃ 型に分類される。Na/Cl 型泉は中性の深部熱水に由来し、標高の低い処の降雨水で涵養されたものであり、Ca/SO₄ 型及び Na/SO₄-HCO₃ 型泉は深部熱水から解離した蒸気及びガスによって地下浅部で加熱された熱水と考えられる。

5) 調査井 (AC-10) の掘削

当地域の地形条件、周辺的环境保全並びに掘削用水の確保等に制約され、調査井位置選定は当初計画位置より、大巾な変更を余儀なくされた。掘削位置が鉱山操業地域に隣

接したため、浅部の温度上昇率は测温孔のそれに比べて低い値を示した。しかし、深部では11℃/100mの増温率で、直線的な熱伝導的溫度上昇がみられ、500m増掘した深度2,000mの坑底では220℃に達した。これは地熱発電に必要な温度条件を満たしている。

6) 調査井 (AC-1D) の透水性

調査井の掘削中には逸泥現象が全く認められず、透水ゾーンは捕捉し得なかった。しかし、掘削終了後の水圧破碎試験により1,550m付近と1,850m～1,995m付近の上下2ヶ所に透水ゾーンが形成された。注水試験の結果、注水指数及び浸透率・層厚はそれぞれ1.79ℓ/min MPa及び $0.259 \times 10^{-12} \text{m}^2$ と低い値を示した。

この人工的な透水ゾーンは、採取されたカッティングスの多成分分析結果よりNaの溶脱、シリカ、粘土鉱物、硫化物の富化などの熱水通路の形跡を示しており、過去においての熱水の通路をなしていたものが自己閉塞され、それが水圧破碎により再開口したものと考えられる。

7) 調査井 (AC-1D) の噴気試験

上記の低い透水性からは十分な蒸気生産は期待できないが、一般的には多少の蒸気噴出が可能はずである。坑井浅部の温度が低いため、ボイラーによる加熱、加圧を行い噴気させたが、連続噴気に至らなかった。これは水圧破碎により開口した割れ目が、温度回復試験を行った約3ヶ月の間に再び閉塞したものを推定される。

8) 地熱系シミュレーション

当地域における地下深部より上昇している熱量はタンクモデルによって33MWと推定される。二次元断面のシミュレーションを行った結果、 $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{m}^2$ 程度の小さな透水性でも上記の熱流量が得られ、この熱流量を与える深部の熱源は広く分布することが予想される。これは調査井 (AC-1D) が坑内に熱水を湧出させる深部熱水の上昇通路に未だ到達していないことを意味するものと考えられる。

9) 地熱資源ポテンシャル

当地域は厚い自己閉塞帯により覆われ、浅部は透水性に乏しい貯留層であるものの、シミュレーションの結果からはその下部には、平面的にかなりの広がりをもつ高地温帯があるものと考えられる。また調査井による貯留層実測温度は200℃を超え、熱水の性質も中性の食塩泉で地熱発電に適している。調査井の温度は深部で上昇の傾向を示し、貯留層温度が更に高くなると予想され、深部においては自己閉塞帯が消滅すると考えられ

る。当地域に卓越するN-S, NE-SW系の裂かは、深部まで連続し、熱水の貯留及び通路としての役割を果たしているものと推察される。

このように、当地域の地熱貯留層は深度が深くなるものと予想されるが、当地域が人口密度が高く、電力多消費の鉱山地帯という地域性がみられ、経済的観点からも探査の継続価値は十分に認められる。

4.2 勧告

Phase I からPhase III の調査結果から得られた地熱構造モデルを確認し、当地域の地熱資源量を把握するには次の項目について今後の追加調査の実施が望まれる。

- 1) Acupan 鉱山坑内外について断裂系の分布調査を行う。これによって開口性の割れ目の分布を予測する。
- 2) 地域全体の水文ならびに熱エネルギー流動に関する調査・解析を行い、当地域の地熱資源量把握の一助とする。
- 3) 追加調査井を掘削し、地熱貯留層の規模を直接確認する。尚、その際は次の事項の検討が必要である。
 - (1) 調査井の掘削位置及び深度の決定は、地域の環境保全に留意し、坑井の連続試験が可能な地点を選定し、上記した調査結果と地熱構造モデルを考慮して行う。
 - (2) 調査井の各種測定作業に際しては、検層機器等の整備と検定を充分に行う。
 - (3) 坑井の噴気誘導は、坑井特性に応じた方法を採用する。つまり、透水性の低い坑井では、エアリフト、またはスワッピングを実施し透水性の回復につとめる。
- 4) 当地域の高い地熱ポテンシャルと逼迫したエネルギー事情から判断し、効果的な追加調査を実施するため、鉱山会社を含めた開発体制の確立が必要である。

JICA