

トルコ共和国

ディキリ・ベルガマ地熱開発計画調査

最終報告書

(要約)

1987年12月

国際協力事業団

鉦計資

J R

87-159

トルコ共和国

ディキリ・ベルガマ地熱開発計画調査

最終報告書

(要約)

JICA LIBRARY

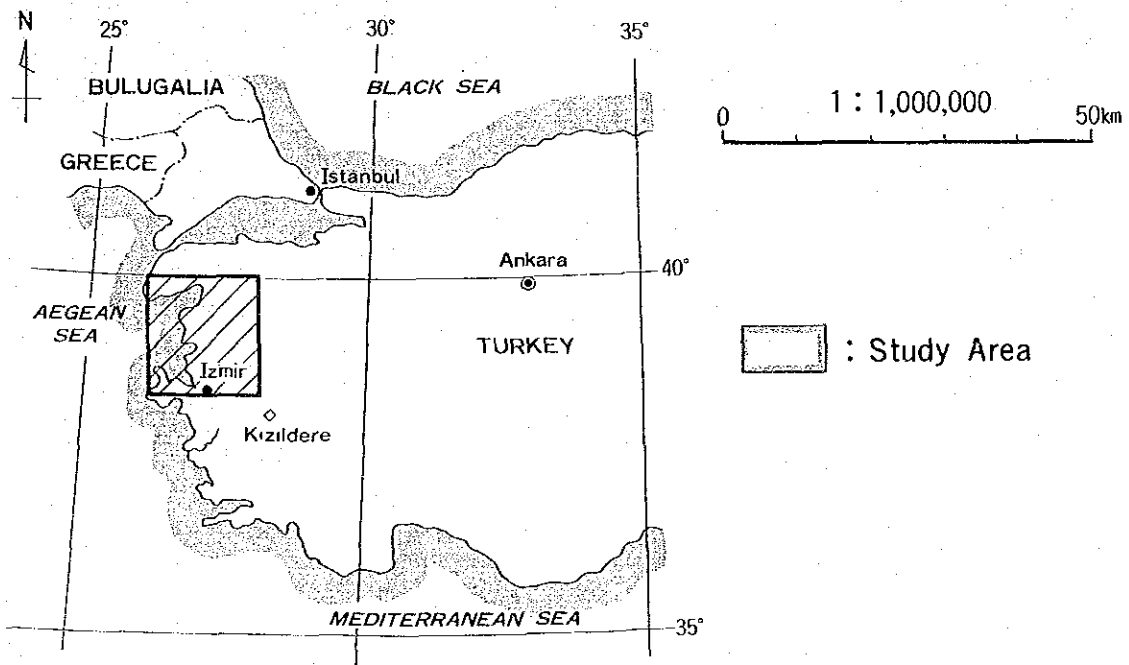
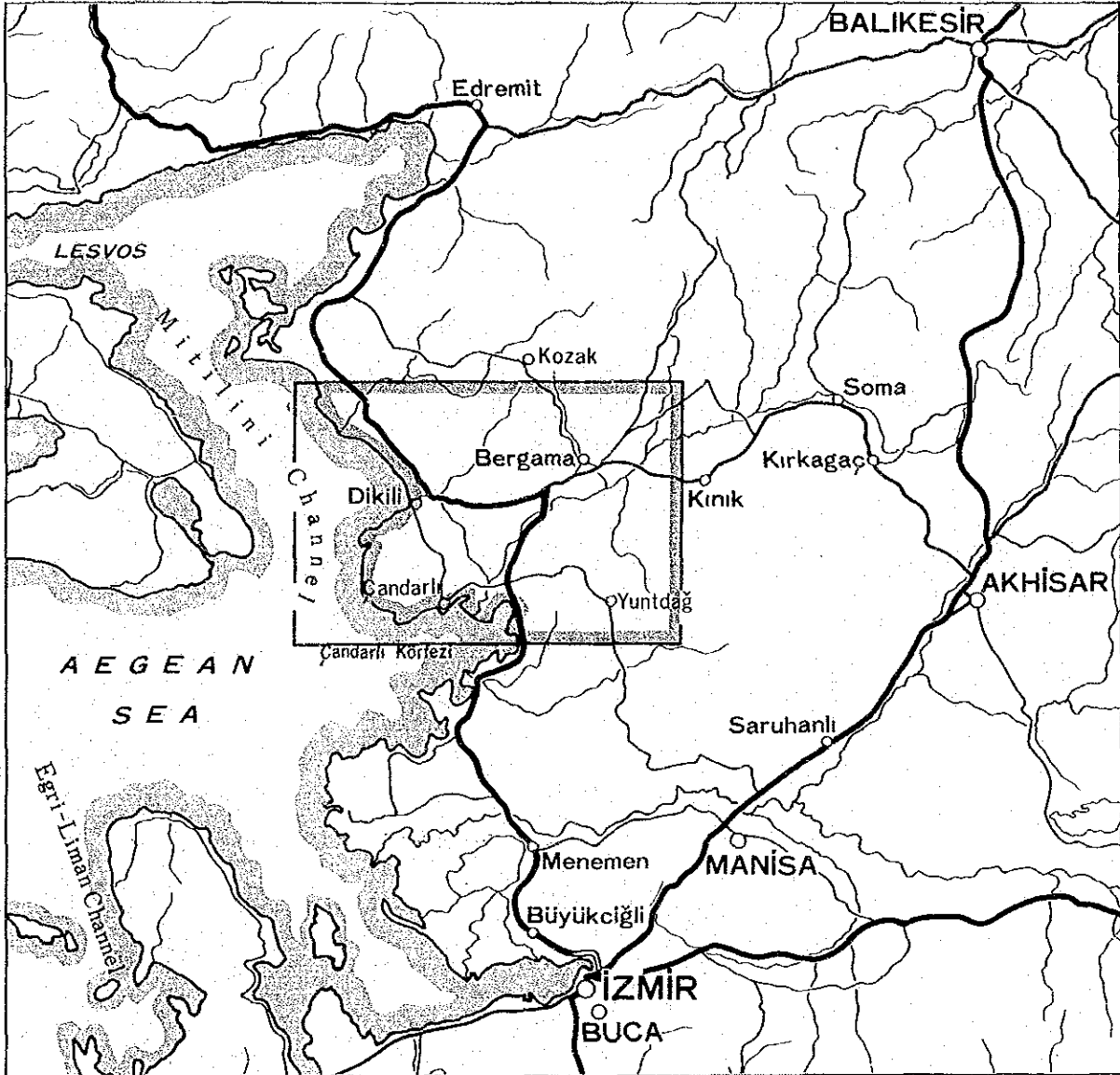


1041183[3]

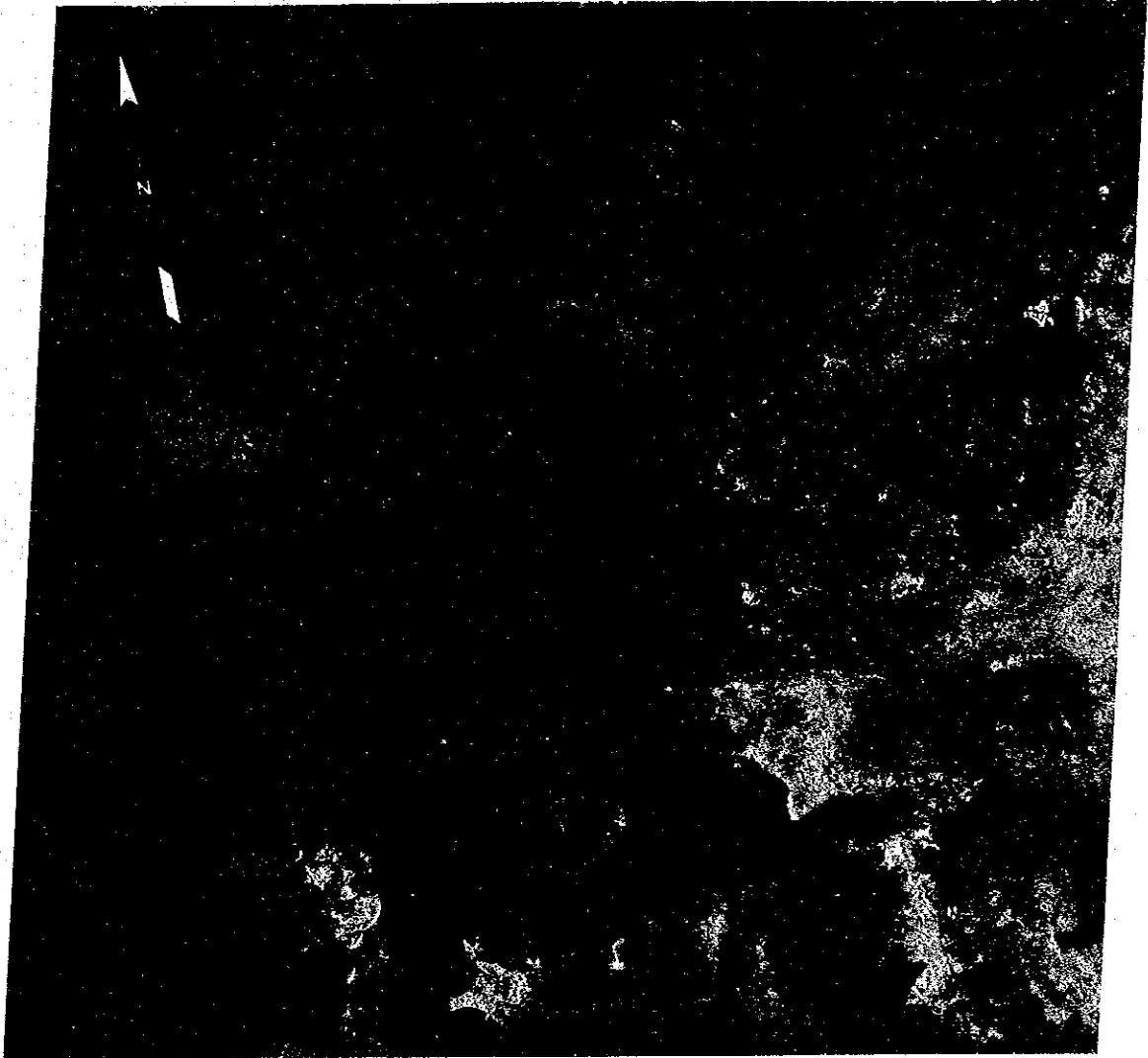
1987年12月

国際協力事業団

國際協力事業団	
入'88. 2. 16 入	314
入'88. 17169	64.3
	MPN

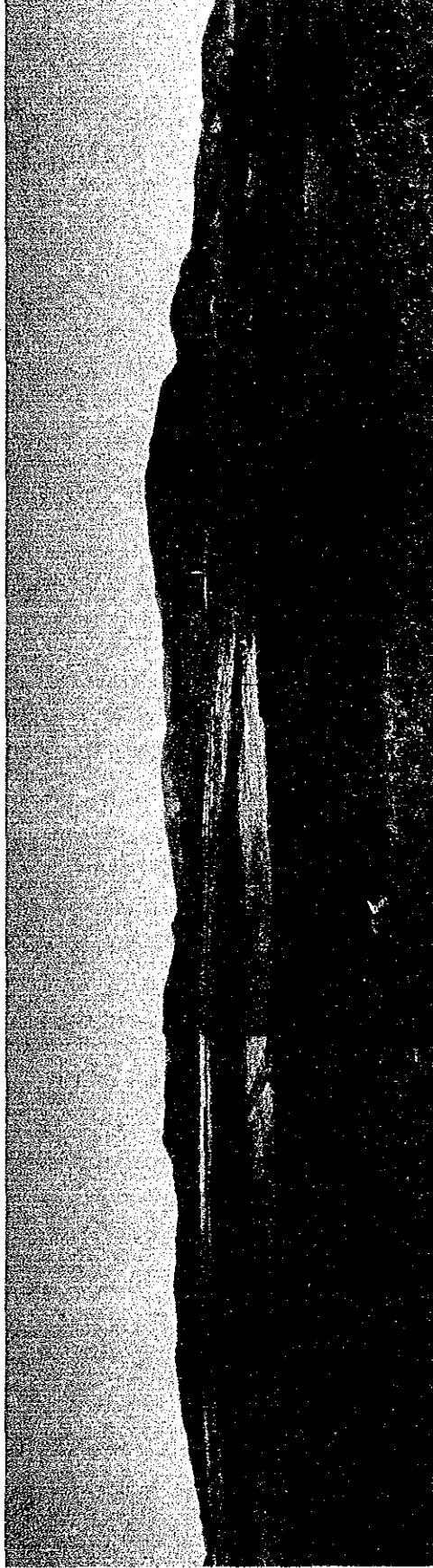


Location Map of Dikili-Bergama Geothermal Area



0 50 100km

Color - Composite Landsat Image of Study Area
(LANDSAT-5 18 MAY, 1984)



Panorama of the Kaynarca geothermal area

目 次

調査の結論及び提言	1
第 I 章 総 論	
I. 1 調査の背景と経緯	5
I. 2 調査の目的	5
I. 3 調査方法の概要	5
I. 4 調査の体制及び調査団の編成	
I. 4. 1 調査の体制	8
I. 4. 2 調査団の編成	8
I. 5 調査日程	10
I. 6 調査地概要	11
I. 7 調査の実施作業量	12
第 II 章 各 論	
II. 1 第 1 次調査の概要	
II. 1. 1 第 1 次調査結果の概要	15
II. 1. 2 広域地質構造と地熱活動	25
II. 1. 3 地熱構造概念モデル	29
II. 1. 4 有望地域の選定	29
II. 2 第 2 次調査の概要	
II. 2. 1 第 2 次調査結果の概要	29
II. 2. 2 深部地質構造	37
II. 2. 3 火山及び地熱活動史	42
II. 2. 4 貯留層流体の温度、化学特性	43
II. 2. 5 地熱構造モデル（流体の流動モデル）	44
II. 2. 6 最有望地域の選定	46
II. 3 第 3 次調査の概要	
II. 3. 1 第 3 次調査の概要	48
II. 3. 2 地 熱 構 造	70
第 III 章 総 合 解 析	
III. 1 貯留層範囲の推定及び地熱系モデル	72
III. 2 調査地域の地熱ポテンシャル（開発可能性）の評価	76
第 IV 章 今後の開発について	
IV. 1 当調査地の開発について	78
IV. 2 多目的利用について	78
IV. 3 スケール生成予測及び対策の提案	79

付 図 ・ 付 表 リ ス ト

付 図

- Fig. I. 1. 1 トルコ共和国 Dikili-Bergama 地熱開発計画調査フロー
- Fig. II. 1. 1 地質区及地質区毎のリニアメント分布図
Main tectonic block and radial diagrams for lineament of each geological block
- Fig. II. 1. 2 ランドサット画像解析結果図
Geological interpretation map from Landsat image
- Fig. II. 1. 3 Pyroclastic Rocks(Tp)及び新期 Yuntdag 火山岩類(Tyu3)の分布
Distribution map of Pyroclastic rocks(Tp) and youngest Yuntdag volcanics(Tyu3)
- Fig. II. 1. 4 空中写真による地質構造解析結果図
Geological interpretation map from aerial photographs
- Fig. II. 1. 5 Dikili-Bergama 地熱地帯地質図
Geological map in Dikili-Bergama geothermal area
- Fig. II. 1. 6 Dikili-Bergama 地熱地帯の温泉湧出位置図及び泉温
Location and measured temperature of hot springs in the Dikili-Bergama geothermal field
- Fig. II. 1. 7 Dikili-Bergama 地熱地帯の温泉水及び地表水採取位置図
Sampling sites of hot spring waters in the Dikili-Bergama geothermal field
- Fig. II. 1. 8 Dikili-Bergama 地熱地帯の温泉水主要溶存イオン分布図
Piper tri-linear plots of hot springs in the Dikili-Bergama geothermal field
- Fig. II. 1. 9 Dikili-Bergama 地熱地帯の温泉水及び地表水の酸素・水素同位体比関係図
Deuterium and oxygen-18 isotope ratios of hot spring and cold water(surface water) in the Dikili-Bergama geothermal field

- Fig. II. 1. 10 Dikili-Bergama地熱地帯の推定地下温度（シリカ温度）分布図
Reservoir temperature calculated by using silica thermometer in the Dikili-Bergama geothermal field
- Fig. II. 1. 11 Dikili-Bergama地熱地帯地熱概念モデル
Conceptual model of Dikili-Bergama geothermal area
- Fig. II. 1. 12 第2次調査地域の選定
Survey area for second stage exploration
- Fig. II. 2. 1 変質分帯図
Alteration zone map
- Fig. II. 2. 2 Dikili-Kaynarca地熱地帯熱水系流体流動推定図
Fluid flow pattern of the Dikili-Kaynarca system
- Fig. II. 2. 3 地化学探査（1 m深地温, Hg, Rn, CO₂調査）結果図
Tectonic lines relating to geothermal activity
- Fig. II. 2. 4 ブーゲー異常図
Detailed bouguer anomaly map ($\rho = 2.4$)
- Fig. II. 2. 5 重力残差図
Detailed residual gravity map ($\rho = 2.4$)
- Fig. II. 2. 6 Dikili-Ovacik地域地質図
Geological map of Dikili-Ovacik area
- Fig. II. 2. 7 Dikili-Ovacik地域地質断面図
Geological cross section of Dikili-Ovacik area
- Fig. II. 2. 8 Dikili-Kaynarca熱水系水文地化学モデル図
Hydrogeochemical model of the Dikili-Kaynarca system in the Dikili-Bergama geothermal field
- Fig. II. 2. 9 土壌ガス中水銀分布図
Smoothed iso-concentration contour map of Hg in soil gas
- Fig. II. 2. 10 土壌中水銀分布図
Smoothed iso-concentration contour map of Hg in soil

- Fig. II. 3. 1 Kaynarca地熱地帯鳥かん図
Bird's-Eye view of the Kaynarca geothermal area
- Fig. II. 3. 2 Kaynarca地熱地帯地質図
Geological map of the Kaynarca geothermal area
- Fig. II. 3. 3 Kaynarca地熱地帯における断裂系
Composite map showing fracture pattern in the Kaynarca geothermal area
- Fig. II. 3. 4 熱水脈の幅及び走向・傾斜プロット図
Plot of width and orientation of hydrothermal veins in the Kaynarca geothermal area.
- Fig. II. 3. 5 Kaynarca地熱地帯における応力場解析図
Presumed stress field in the Kaynarca geothermal area
- Fig. II. 3. 6 Kaynarca地熱地帯地熱構造図
Geothermal structure of the Kaynarca geothermal area
- Fig. II. 3. 7 CSAMT法から推定される地熱構造
Geothermal structure estimated from CSAMT
- Fig. II. 3. 8 電氣的調査結果から推定される地熱構造
Geothermal structure estimated from electrical surveys
- Fig. II. 3. 9 点電極による電位偏差分布図
Residual potential map using point source
- Fig. II. 3. 10 200mケーシングによる電位偏差分布図
Residual potential map using 200m casing pipe
- Fig. II. 3. 11 500mケーシングによる電位偏差分布図
Residual potential map using 500m casing pipe
- Fig. II. 3. 12 測温孔位置図
Location of thermal gradient holes
- Fig. II. 3. 13 DG-1地質柱状図
Geologic column of DG-1

- Fig. II. 3. 14 DG-2, DG-3地質柱状図
Geologic Column of DG-2, DG-3
- Fig. II. 3. 15 Kaynarca地熱地帯地質断面図
Geological cross section of the Kaynarca geothermal area
- Fig. II. 3. 16 各測温孔の熱流量解析結果図
Heat flow of thermal gradient hole
- Fig. II. 3. 17 Kaynarca地熱地帯地下温度分布図
Isothermal line of the Kaynarca geothermal area
- Fig. III. 1. 1 総合解析結果図
Synthetic interpretation map
- Fig. III. 1. 2 Kaynarca地熱地帯地熱概念モデル
Conceptual model of the Kaynarca geothermal field

付 表

- Table. II. 1. 1 Dikili-Bergama地熱地帯地質層序
Geological succession of Dikili-Bergama geothermal area
- Table. II. 3. 1 Kaynarca地熱地帯地質層序
Geological succession of the Kaynarca geothermal area

調 査 の 結 論 及 び 提 言

調査の結論及び提言

結論

当調査は、トルコ共和国のDikili-Bergama地熱地帯において、第1～3次の段階的調査により、将来の開発調査の対象とすべき最有望地区を把握・選定し、対象地域の地熱ポテンシャル評価を行うことを目的として実施された。

1. 調査結果の要約

Dikili-Bergama地熱地帯には、20以上の温泉が存在する。これらのうち、60℃以上の温泉は調査地域南西部のDikili周辺のYuntdağ火山岩類Ⅲ分布域、特にDikili-kiliklar地溝帯内及び断層上に集中している。即ち、本地域の比較的高温の温泉は新期火山活動に起因するもので、しかも断層と密接な関係があることが明らかとなった。本地熱地帯のうち、沸騰泉が認められるKaynarcaを中心にして、諸調査・探査を実施し、以下のような結論を得た。

- 1) 熱源は北部後背山地にある調査地域で最も新しいKoca Tepe及びSulu Kaya火山岩類のマグマ活動に由来していると推定される。しかしこれらの火山は約200万年以上前の鮮新世に活動した可能性が大きく、しかも規模が小さいため、本地域の地熱活動はすでに活発な時期を過ぎ、退潮期にあるものと考えられる。
- 2) 熱水の起源はKaynarcaの北東部で地下に浸透した天水と考えられ、トリチウム濃度より循環時間は75年以上と計算され、他の活発な地熱地帯における流体の循環時間と比較しても、流体の地下における滞留時間は十分であると考えられる。したがって、Kaynarca周辺には、流体が深部まで循環する規模の大きい熱水系が存在すると考えられる。
- 3) 温泉水の化学成分から判断すると、地下深部Yuntdağ火山岩類Ⅰ中には180～200℃の貯留層が存在するものと考えられる。いくつかの化学データはより深部に220℃以上の地熱流体が存在する可能性があることを示している。
- 4) 土壌及び土壌ガス中の水銀濃度の分布、CSAMT法の高縦電導度域や流電電位法の低電位異常域の広がりから、地熱貯留層はKaynarca南部域、約1 km²の範囲にあると考えられる。また、深部地熱流体の上昇通路は、NE-SW系、NW-SE系の2系統の断層の交点付近で比較的狭い範囲と考えられる。
- 5) 熱流量調査孔の掘削結果、Kaynarcaの北部では、深度約700mまでは顕著な断層は認められず、温度は100℃程度と低い。電気探査結果からみると、電気基盤層上部の低比抵抗層の厚さは

600~800mであり、地熱貯留層が通常電気基盤層中に存在することを考慮すると、調査地域に期待される深部地熱貯留層は、800m以深に存在するものと推定される。

- 6) 温泉水の化学成分から判断すると、開発に際しては生産井内の炭酸カルシウム系スケールの析出（蒸気発生設備のコスト増大）や高い不凝結ガス濃度による低質の蒸気の供給（発電効率の悪化）等の問題が生じる可能性が高い。

以上のようにDikili-Bergama地熱地帯で最も活発な地熱徴候を有するKaynarca地区においても1000m以浅における200℃以上の貯留層が広く分布する可能性は小さい。本地熱地帯はすでに開発が成功したどの地熱地帯と比較しても、更にトルコ共和国のKızıldereやGermencik地熱地帯に比べても地熱ポテンシャルが低いと判断される。

2. 調査結果の評価

本地熱地帯は、地下に貯留される発電利用可能な流体の温度がそれ程高くない、貯留深度が深い、さらに貯留規模が小さい、いわゆる地熱ポテンシャルの低い地熱地帯であること、また、開発に際して、スケール問題や不凝結ガス問題が生じる可能性の高い地熱地帯であること等から、経済的に発電用の地熱開発を行うことは難しいと判断される。

3. 技術移転について

調査は、調査地域の特殊性を考慮した調査フローに基づいて、トルコ側カウンターパートの理解のもとに実施した。

組織立った地熱探査に関する技術的指導を行うと共に、JICAより供与された機材の使用法、保守点検についても指導した。また、トルコの他の地熱地帯の調査を行う際に、トルコ側カウンターパート自身で評価ができるように十分な技術移転を実施した。

本プロジェクトは、トルコの探査技術レベル向上に貢献し、同国の今後の地熱開発を促進する意味においても、非常に効果的であったと考えられる。

提 言

本プロジェクトの各段階調査から、最終的に有望地域として選定され、地熱開発の評価対象となったKaynarca地熱地帯は十分なポテンシャルを有していないため、現段階では調査の継続により発電を目的として開発することは経済的観点から困難であると判断される。

しかし、この判断は発電目的に限定せず、地熱資源の有効利用の観点から多目的利用の可能性を否定したものではない。従ってこの可能性を検討する場合は更に深部の資源量の確認調査を行うことが必要である。

第 I 章 總 論

第 1 章 総 論

1. 1 調査の背景と経緯

トルコ共和国は1960年来エネルギー源の多様化と国産化をおこなうため、MTAによって国内に賦存する地熱エネルギー開発を行ってきた。調査の結果、トルコ国内に莫大な地熱エネルギーが賦存することが明らかになった。発電利用を目的とした地熱開発が1968年 Kızildere-Denizli 地域で開始された。トルコ国内で最初の地熱発電所が Kızildere に建設され、1984年発電容量20MWで運転開始し現在も稼動中である。

トルコ国内に多く賦存する地熱資源の開発は、国内のエネルギー不足解消に役立つと思われる。しかしながら地熱開発用の掘削機の数に限られており、かつ開発費が高いことなどから、地熱エネルギー開発をスローダウンせざるを得ない状況となった。

このような状況のもとで、トルコ政府は日本政府に対し、地熱開発計画調査の協力要請を行った。トルコ政府の要請を受け国際協力事業団は1985年7月、トルコ国内の地熱開発について予備調査を実施し、Dikili-Bergama地熱地帯を有望として選定した。国際協力事業団の事前調査団は1986年1月Dikili-Bergama地熱開発計画調査に関し、トルコ政府機関とScope of Workの取り決めを行った。

このScope of Workに基づき、国際協力事業団は1986年6月江島を団長とする調査団をトルコに派遣することになった。

1. 2 調査の目的

本調査の目的は、地質調査、地化学調査、物理探査および熱流量調査を実施し、Dikili-Bergama地熱地帯のポテンシャルを評価することである。更に調査地域の今後の開発計画についても考察を行う。

1. 3 調査方法の概要

当該調査は、西部アナトリアのDikili-Bergama地熱地帯の1,000km²を対象とし、最終的に最有望地区の選定、熱流量测温孔の地点選定、最有望地区の地熱ポテンシャルの評価、及び今後の開発計画策定を行うため、Fig. 1. 1. 1のフローチャートに従い、段階的に実施した。各段階の調査概要は次のとおりである。

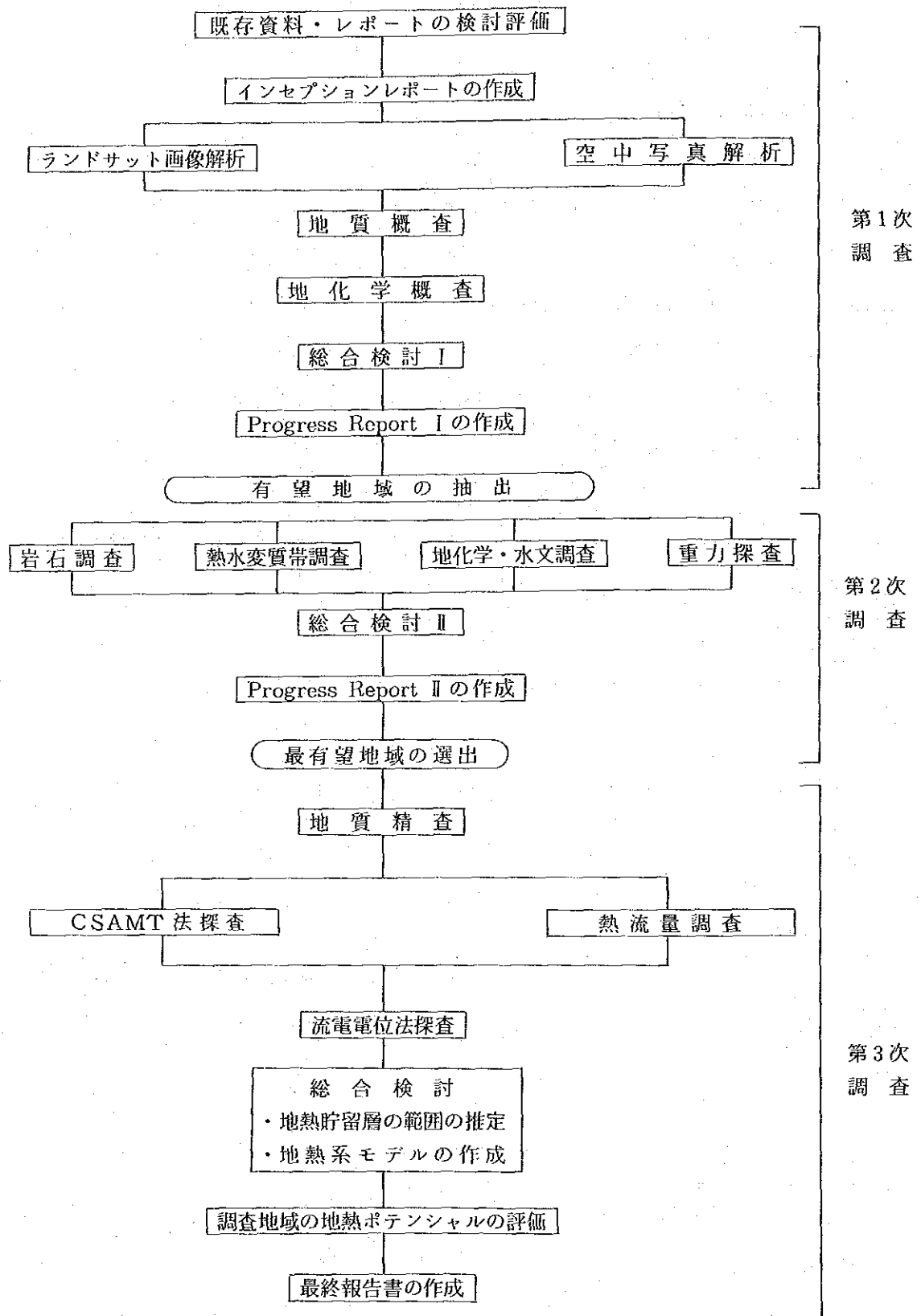


Fig. 1.1.1 トルコ共和国 Dikili-Bergama 地熱開発計画調査フロー

(1) 第1次調査

第1次調査は、既存資料・レポートの検討評価によりインセプションレポートを作成のうえ、広域地質構造解析、地質概査、地化学概査を行い、その結果を総合的に検討し、有望地域(274 km²)の抽出を行った。この結果から、第2次調査の具体的な計画の策定を行った。

このため、既存資料としてトルコ共和国関係機関による調査資料の他に、広域地質、造山運動、プレートテクトニクス、マグマ活動、地震活動等の文献を出来る限り収集し、それらを整理検討した。

また、地化学データの詳細な検討を行い、広域の熱水系についての考察を行い、調査地域の構造支配型地熱系の成因及び活動メカニズムを把握した。

(2) 第2次調査

第2次調査は、岩石調査、熱水変質帯調査、地化学・水文調査、重力探査（トルコ側で実施）を実施し、その結果から最有望地域を選定し、第3次調査にかかる具体的な計画の策定を行った。このうち、地化学・水文調査では、地質諸調査から選定される地下構造概念図に、水文モデルを適用し、地熱貯留層の成因、熱水の流れ方向・起源及び地熱貯留層温度等の推定を行った。また第1次調査結果に基づき、CO₂、Hg、Rn等により地熱構造を解明する土壌ガス調査を実施した。

重力探査は、トルコ共和国で調査から解析まで全て実施し、日本側は、調査の計画及び解析作業の監督を担当した。

第3次調査のための最有望地域(42km²)は、各調査結果を総合的に検討し、スケール等の問題を十分把握した上、選定した。

(3) 第3次調査

第3次調査は、地質精査、CSAMT法探査、流電電位法電気探査、熱流量調査を実施し、最有望地域の貯留層範囲の推定及び地熱系モデルの作成を行った。これらの結果に基づき、当該調査地域のポテンシャルの評価を行い、発電及び多目的利用等の今後の開発についても提言した。

なお、各段階の調査は、トルコ側技術者と密接な協力のもとに実施し、各々の過程で日本側技術者からトルコ側技術者への技術移転が行われた。

1.4 調査の体制及び調査団の編成

1.4.1 調査の体制

当該調査の日本、トルコ共和国双方のS/Wにもとづく体制は次の通りである。

日 本 側 : 国際協力事業団

トルコ共和国側 : 鉱物資源開発総局 (MTA)

また、当該調査の実務面では

日 本 側 : 西日本技術開発株式会社

トルコ共和国側 : MTA

◦ エネルギー・鉱物資源開発部地熱課

◦ Izmir 支所

が担当した。

1.4.2 調査団の編成

調査団は下記の通り編成した。

(1) JICA調査団

団 長	江 島 康 彦	西日本技術開発㈱	総括, 総合解析
団 員 (地質主任)	藤 野 敏 雄	西日本技術開発㈱	地質概査, 熱水変質帯調査 地質精査
団 員	高 木 博	西日本技術開発㈱	熱水変質帯調査, 地質精査 熱流量調査
団 員	田 口 直 人	アジア航測㈱ (協力会社)	ランドサット画像解析
団 員 (地化学主任)	島 田 寛 一	西日本技術開発㈱	地化学概査 地化学・水文調査
団 員	岩 永 達 人	西日本技術開発㈱	地化学・水文調査
団 員 (物探主任)	下 池 忠 彦	西日本技術開発㈱	CSAMT法探査 流電電位法探査
団 員	田 籠 功 一	西日本技術開発㈱	CSAMT法探査 流電電位法探査
団 員	米 田 吉 宏	日鉄鉱コンサルタント㈱ (協力会社)	重力探査
団 員	松 尾 公 一	日鉄鉱コンサルタント㈱ (協力会社)	流電電位法探査
団 員	村 上 裕	通商産業省地質調査所	重力探査

(2) M. T. A. カウンターパート

MTA Team

Project Manager (Assoc. Prof.)	Şakir ŞİMŞEK
Deputy Manager	Ali KOÇAK

Geological Survey Unit

Geologist (Camp Chief)	Servet YILMAZER
Geologist	Ali İhsan GEVREK
Geologist	Tuncer EŞDER
Geologist	Zühal SÜNGER
Geologist	Ramazan PEKATAN

Geochemical Survey Unit

Geochemist	Nazım YILDIRIM
Geochemist	Ziya SARIDAL
Geochemist	Işıl KAYRAN
Geochemist (Lab. Work)	Gülay ATAMAN
Geochemist (Lab. Work)	Süheyla TUNCER
Geochemist (Lab. Work)	Muzaffer ŞÖNMEZ

CSAMT Survey, Mise-à-la-masse Survey, Logging Unit

Geophysicist (Chief)	Altan İÇERLER
Geophysicist (Camp Chief)	Tuğrul TOKGÖZ
Geophysicist (Camp Chief)	M. Emin ÖZGÜLER
Geophysicist	Kenan TEZCAN
Geophysicist	Kadircan AKTAŞ
Geophysicist	Mete YÜCEL
Logging Engineer	Mesut ÖNDER
Logging Engineer	İskender TUNCAY
Surveyor	Ümit KILIÇASLAN
Surveyor	Mehmet GÖKGÜL
Surveyor	Hüseyin ACAR

Gravity Survey Unit

Geophysicist	Serter GÖÇTÜ
Geophysicist	Arslan ÇINAR
Surveyor	Haydar KONAKÇI
Surveyor	Murat ÇETİNDAG

Drilling Unit

Drilling Engineer (Chief)
Drilling Engineer
Drilling Engineer
Drilling Engineer

Abdullah GÜLGÖR
Ali CANPOLAT
Dmre BABÜR
Mustafa BAŞIKARA

The JICA Team and the MTA Team thank to the following high ranking officials for their supports to realize the study.

General Manager
Deputy Manager
Head of Energy Dept.
(Assoc. Prof.)
Coordinator of Energy Dept.
Head of Geophysical
Survey Dept.
Coordinator of Geophysical
Survey Dept.
Coordinator of Geophysical
Survey Dept.
Head of Drilling Dept.
Head of Planning Dept.
Coordinator of Planning Dept.
District Manager (Aegean)

M. Sıtkı SANCAR
Askın VOLKAN
Güner ÜNALAN
Vedat YÜKSEL
Ferit ERDEN
Tuncer ÜNAY
Günay YALDIZ
Necdet AKBAŞLI
Teoman ÖZGÜVEN
Engin ÇUBUKÇU
Özer ÖLÇER

1.5 調査日程

3段階調査の工程はS/Wに沿って第3次調査まで計画され、完了した。

段階	項目	1986		1987	
		6	12	6	12
	年度	←60年度→ ←61年度→		←62年度→	
第1次調査 (1000km ²)	事前準備・関連資料収集・検討 ランドサット画像解析 空中写真解析 地質概査 地化学概査 報告書原稿作成	5/30 □ 6/23 7/21 9/24 ■ 8/2			
第2次調査 (274km ²)	岩石調査 熱水変質帯調査 地化学・水文調査 重力探査 報告書原稿作成	8/25 ■ 10/4		11/14 ■ 11/18 ■ 8/25 ■ 9/22 ■ 12/8 ■ 12/10 □ 12/22 □	
第3次調査 (42km ²)	地質精査 CSAMT法探査 流電電位法探査 熱流量調査 報告書原稿作成		1/6 ■ 2/15 3/15 3/26 ■ 5/25 7/24 5/25 ■ 8/8 9/8 5/25 ■ 7/18 8/2	10/30 □ 11/30 □ 10/1 □ 11/13 □	
	現地報告書提出 Progress Report I Progress Report II Draft Final Report Final Report	7/19 ▽ 8/23 ▽	10/2 ▽ 11/2 ▽ 1/8 ▽	2/13 ▽ 3/24 ▽ 7/16 ▽ 8/6 ▽	11/8 ▽ 12/10 ▽

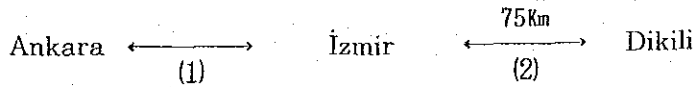
■ 外業

□ 内業

▽ 報告書提出

I. 6 調査地概要

調査対象地域は、トルコ共和国西 Anatoria 地域の İzmir より北へ直線距離にして75kmにある Bergama と、その西方25kmにあるエーゲ海沿いの小都市 Dikili を結ぶ範囲である。トルコ側の実施機関である MTA が Dikili に準備した調査用キャンプ（民家の長期借用）までの交通は次のとおりである。



- | | |
|-------------|-----|
| (1) 国内幹線航空便 | 50分 |
| (2) 自動車 | 1時間 |

調査対象地域は、現在 Bakir 川が形成する沖積低平地と、その両岸を形成する丘陵～山地に分けられるが、この低平地と山地の形成は、上下方向の地質構造運動に起因するとされ、現在 Bakir 川沿いの低平地は Dikili 地溝帯と呼ばれている。Dikili 地溝帯をさらに詳細にみると、東西方向にのびる低平地が Dikili-Bergama の中間地点で分岐し、北西方向へは Dikili へ至る低平地、南西方向へは Çandarlı へ至る低平地に分かれるが、この2方向に沿って地溝帯が分岐している。したがって Dikili と Bergama の中間地点では3方向の地溝帯の結合部になっており、この構造特性が地熱賦存に大きく関与していると考えられている。

Dikili-Bergama 間の地溝帯に沿って分布する地熱徴候としては、温泉、ホットプール、石灰華マウンド、これに変質帯が上げられる。噴気活動はないが、これは現在開発中の Kızıldere, Germencik についても同様である。

Dikili 付近では Kaynarca, Dikili 温泉群の2地点に温泉徴候が顕著であるが、東の Bergama 周辺では相対的に徴候は少ない。

Kaynarca では現在未利用草地となっている平坦部にいくつかの温泉湧出地点があり、湧出量のもっとも多い地点では直径50～60m、深さ2m以浅程度のホットプールができています。

1.7 調査の実施作業量

第3次調査までに実施した作業量は次に示すとおりである。

	項 目	作 業 量
第 1 次	広域地質構造解析	
	ランドサット画像分析	8 0 0 0 0 km ²
	空中写真地質構造解析	1 5 0 0 km ²
	地 質 調 査	
	地質調査(概査)	2 2 0 0 km ²
	地 化 学 概 査	
	温泉水(化学分析・同位体分析)	化学分析 1 8 個 同位体 1 0 個
	地表水(同位体分析)	1 8 個
	土 壌 分 析	3 0 個
	ガ ス 分 析	3 0 個
第 2 次	地 質 調 査	
	地 質 調 査	2 7 4 km ²
	岩 石 調 査	
	顕 微 鏡 観 察	2 4 試料
	X 線 分 析	2 4 試料
	物 性 試 験	2 4 試料
	年 代 測 定	1 0 試料
	熱水変質帯調査	
	X 線 分 析	5 9 試料
	岩石化学成分分析	2 0 試料
	地化学・水文調査	
	温泉水(化学分析・同位体分析)	化学分析 2 6 個 同位体 2 4 個
	地表水(同位体分析)	2 6 個
	土壤ガス(水銀, CO ₂ , Rn)	3 0 2 点
	土 壌 (水銀)	3 0 2 点
	1 m 深地温	3 0 0 点
重 力 探 査		
探 査 面 積	8 1 km ²	
測 点 数	6 9 3 点	

	項 目	作 業 量
第 3 次	<u>地 質 調 査</u>	
	地 質 調 査 (精査)	4.2 km ²
	<u>熱 流 量 調 査</u>	
	熱流量調査に用いた測温孔 (掘削はMTAが担当)	683m×1本 200m×2本
	岩 石 調 査 (測温孔から採取したコア・カッティングス)	
	顕 微 鏡 観 察	21 試料
	X 線 分 析	65 "
	流体包有物均質化温度測定	7 "
	コア中の断裂解析	7 "
	物 性 試 験	11 "
	岩石化学成分分析	65 "
	熱 水 分 析 (測温孔から採取した熱水)	
	化 学 分 析	3 試料
	<u>CSAMT 法 探 査</u>	
	周 波 数	2 ⁻² ~2 ⁹ Hz の間で 16種類
	測 点 数	376 点
<u>流電電位法探査</u>		
電流電極の深度	0 m 200 m 500 m	
電位測定点数	188 点	

第 Ⅱ 章 各 論

第 II 章 各 論

II.1 第 1 次調査の概要

II.1.1 第 1 次調査結果の概要

第 1 次調査では既存資料の収集・検討を行い、予備知見を得たうえで、ランドサット画像解析及び空中写真判読を利用した広域地質構造の検討、地質概査、地化学概査を実施した。

1. 既存調査

既存調査として地質調査、地化学調査、重力探査、物理探査及び地温測定が実施されている。その結果、熱源は第四紀の火山活動と深部断裂に起因するものと考えられている。また、貯留層は Camoba 層や Kimk 層に属する砂岩、シルト岩、礫岩、石灰岩中の破碎帯や多孔質部とみなされている。更に帽岩は厚く広く分布している難透水性の Soma 層と考えられている。Kaynarca の温泉水の化学成分から計算された地化学温度は 160~186℃と報告されている。

2. 広域地質構造解析

(1) ランドサット画像解析

ランドサット画像 4 シーン (Path-Row ; 180-32, 180-33, 181-32, 181-33) の解析を国内及び現地で実施した。

西 Anatoria 地域には、ランドサット・イメージ解析によれば 4 本の明瞭な構造線が存在し、NE 系のリニアメントが卓越している (Fig. II. 1.1)。Dikili-Bergama 地熱地帯では Fig. II. 1.2 に示すようにリニアメントは N30-40°E 方向に発達している。特にベルガマを通る平行なりニアメントは明瞭でしかも長く連続している。このリニアメントは、部分的には小規模な地溝帯を形成している。

Dikili-Bergama 地熱地帯は第三紀から第四紀初期にかけて激しい火山活動の場であった。本地域には NE-SW 系と NW-SE 系の断層やリニアメントが発達している。Fig. II. 1.3 に示すように、このうち NE-SW 系断層に沿って火砕流堆積物を噴出した酸性火山活動が認められる。一方、NW-SE 系の断層に配列するようにしてドーム状火山が形成されている。

更に、広域地質状況を把握するために、8 地質単元に分けて地質図を作成した (Fig. II. 1.2)。

(2) 空中写真判読

1 : 35,000 の空中写真を利用して、Dikili-Bergama 周辺の地形、地質構造、地質状態についての判読を行った。Fig. II. 1.4 に示すようにリニアメントは N50°W 方向が最も卓越してお

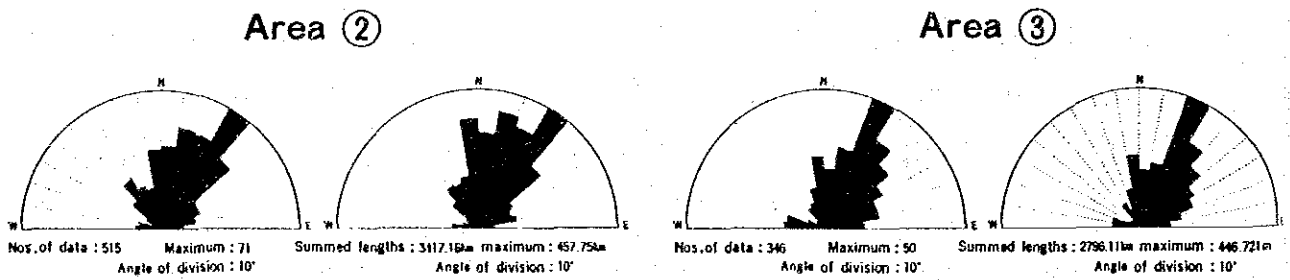
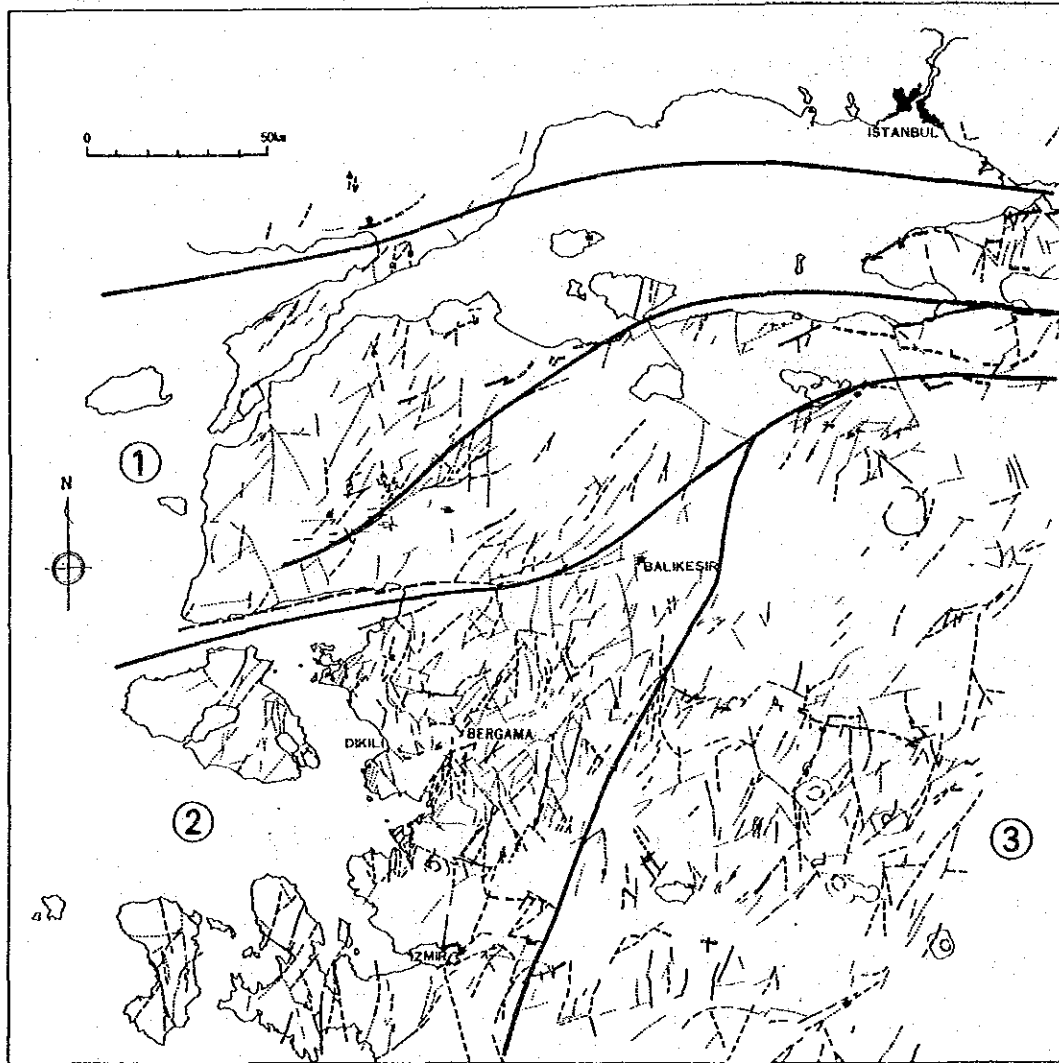
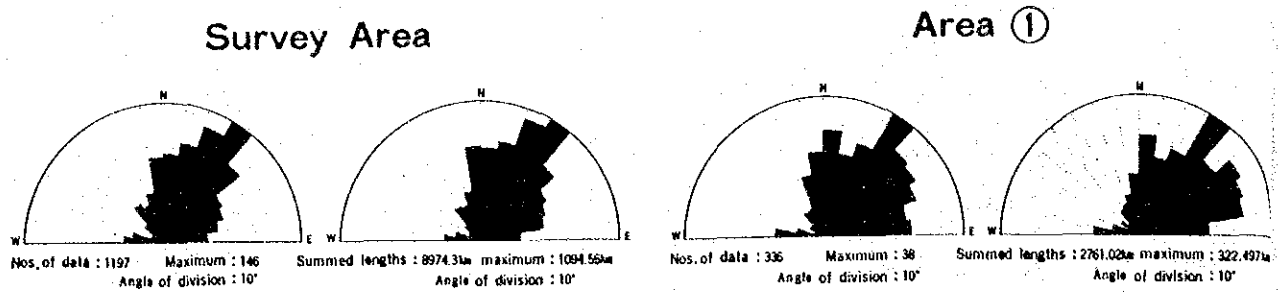


Fig. II 1.1 Main tectonic block and radial diagrams for lineament of each geological block

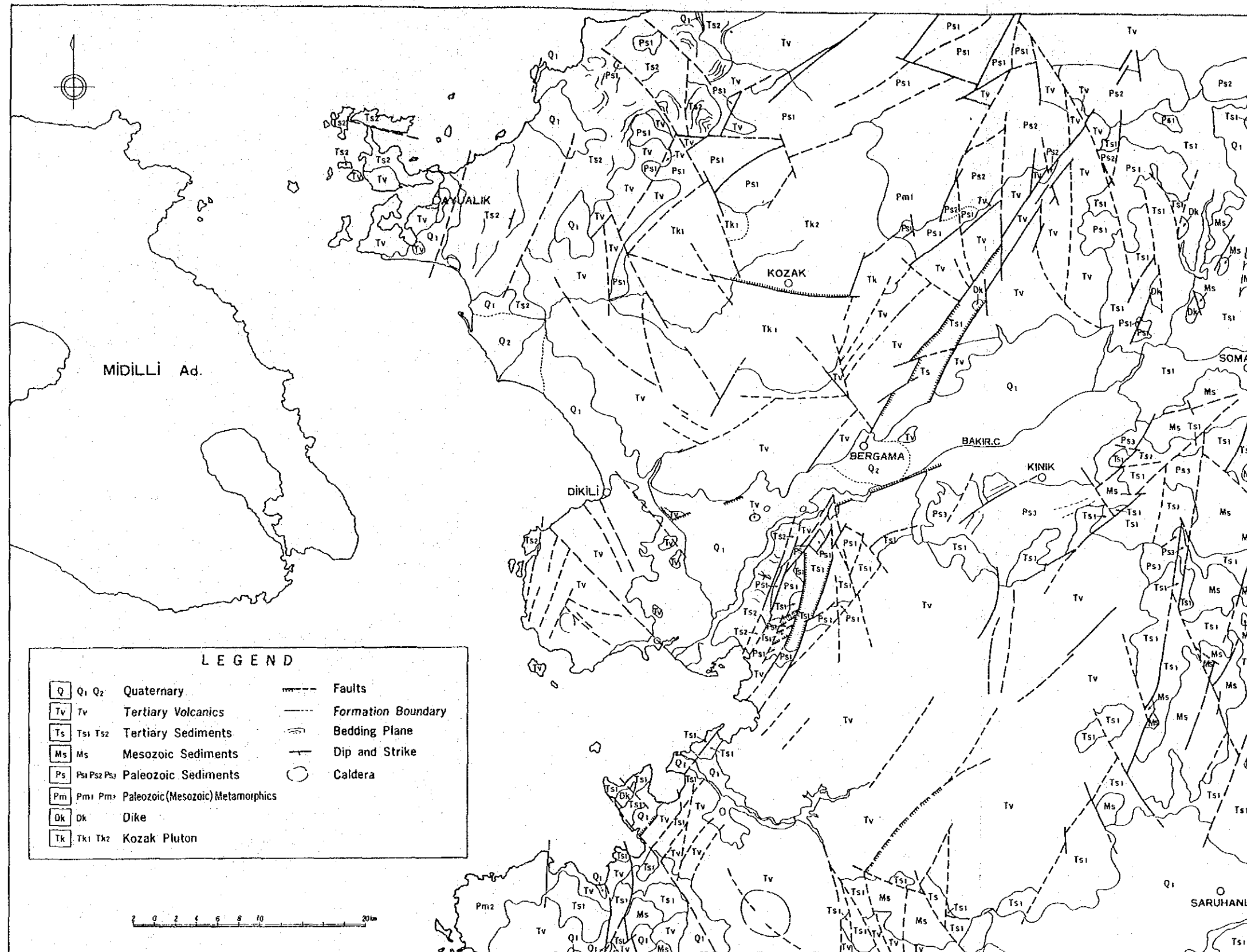


Fig. II.1.2 Geological interpretation map from Landsat image

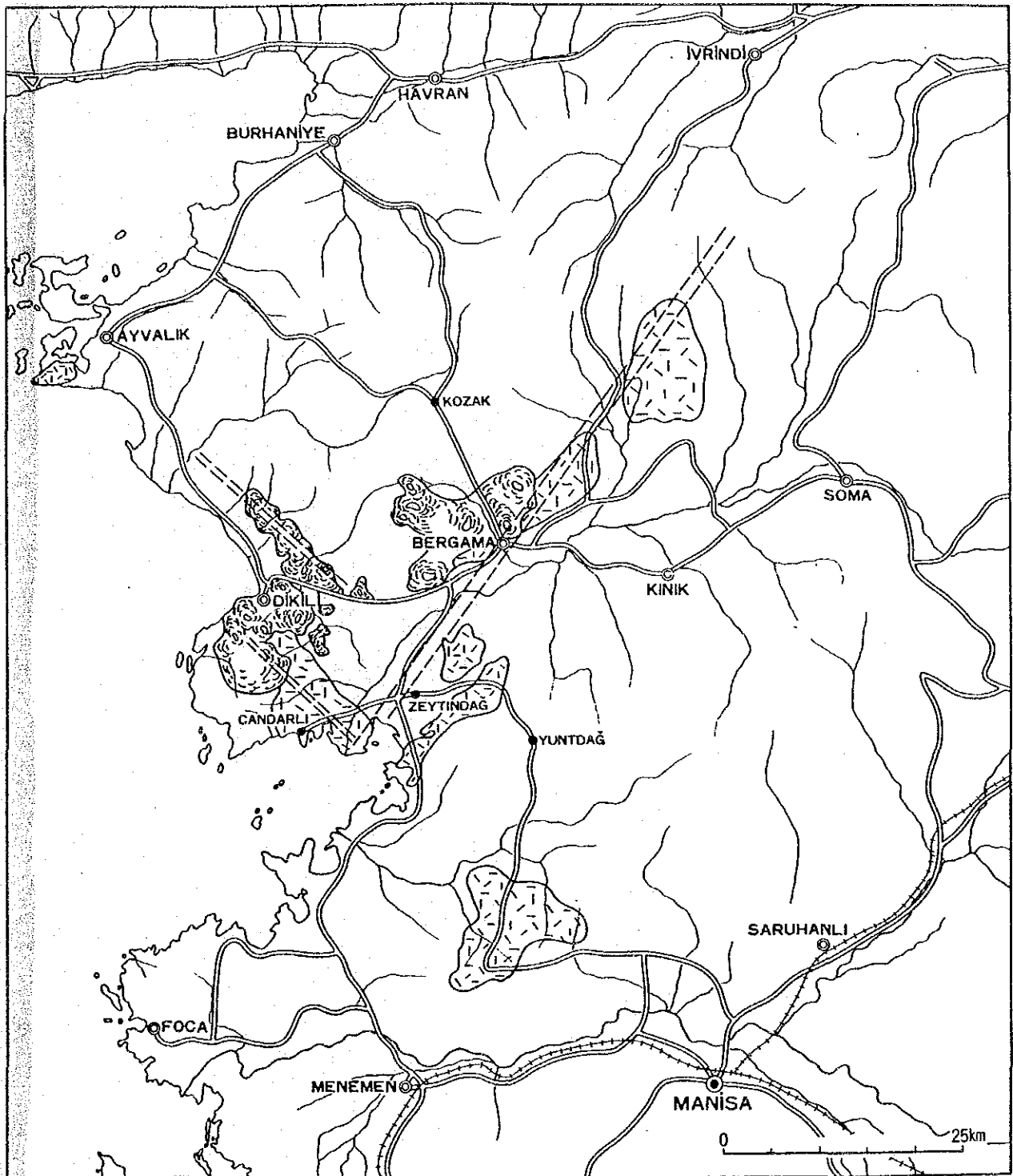





Fig. II.1.3 Distribution map of pyroclastic rocks (Tp) and youngest Yuntdağ volcanics (Tyu₃)

-  Pyroclastic rocks (Tp)
-  Youngest Yuntdağ volcanics (Tyu₃)
-  Fractured zone

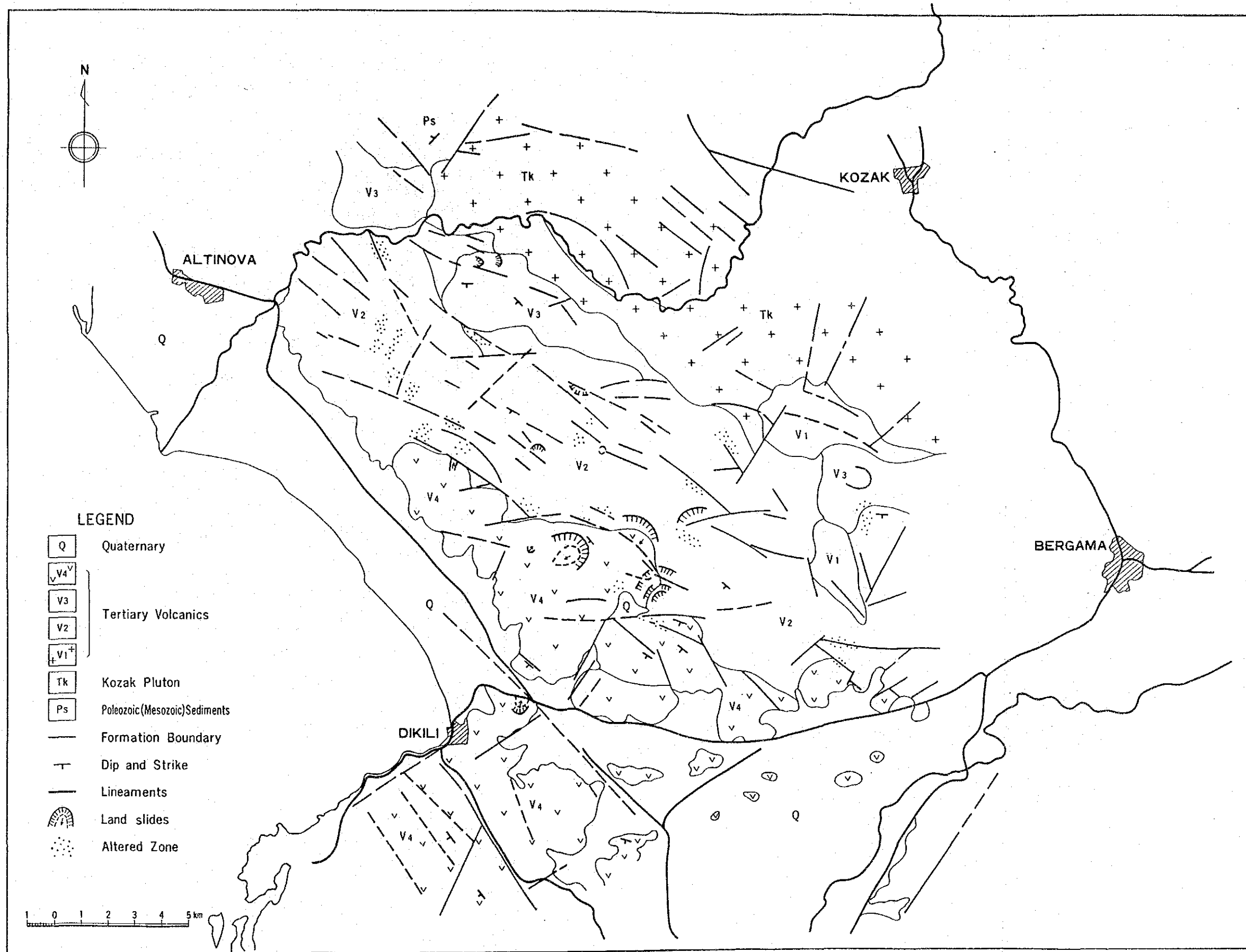


Fig. II.1.4 Geological interpretation map from aerial photographs.

り、次いでそれと直交する方向 (N30-40°E) が発達している。

Dikili-Bergama地熱地帯は7地質単元に分けられ、その分布を明らかにした。地熱微候のうち、変質帯は裸地として認められる。また、温泉は断層上に配列して分布している。

3. 地質概査

Dikili-Bergama地熱地帯の地質はTable II. 1. 1に示したように先第三紀の基盤岩類、古第三紀のKozak深成岩、新第三紀のYuntdağ火山岩類 I, Soma層、酸性火砕岩類、Yuntdağ火山岩類 II, Yuntdağ火山岩類 III, Dededağ玄武岩及び沖積層からなる。これらの火山活動は主として中新世から鮮新世にかけて活動したものと推定される。本地域の地質図をFig. II. 1. 5に示した。

先第三紀の基盤岩類はCamoba層とKınık層からなる。Camoba層は主としてよく成層したシルト岩とシルト質石灰岩で構成されている。一方、Kınık層は礫岩、砂岩、シルト岩、泥岩、石灰岩からなる。これらは調査地域の北東部及び南東部に露出している。

Kozak深成岩は調査地域の北部に分布する花崗閃緑岩体である。この岩体は第三紀の始新世と漸新世に貫入したと報告されている。

Yuntdağ火山岩類 IはKozak山の南西部に広く分布している。本火山活動は主として中～後期中新世の角閃石安山岩溶岩からなる。これらの岩石は部分的に強く変質を受けている。

Soma層は調査地域の南西部と東部に分布している。本層は砂岩、シルト岩、シルト質石灰岩と多量の凝灰質堆積岩からなる。本層の堆積時に溶結した火砕流堆積物や石英安山岩などの酸性火山岩類の噴出活動が認められる。

Yuntdağ火山岩類 IIはいわゆるYuntdağ山を構成する岩石で、輝石安山岩及び角閃石安山岩溶岩を主とする。Yuntdağ火山岩類 IIIはDikili周辺及びBergama北西部に分布するドーム状火山を形成する。この火山岩類は黒雲母-角閃石安山岩と石英安山岩からなる。

Dededağ玄武岩は、調査地域のDikili-Bergama低地に小規模に分布散在する。本岩は暗灰色堅硬緻密な輝石安山岩と玄武岩質溶岩からなる。この火山活動は第四紀初期と考えられている。

調査地域東部のBergama地域にはNE-SW方向の断層が発達している。一方、調査地域の西部Dikili地域にはNW-SE方向の断層が卓越している。

4. 地化学概査

本地域にはFig. II. 1. 6に示すように20以上の温泉が存在し、その中から化学分析のために18個の熱水を採取した (Fig. II. 1. 7)。また、同位体分析を行うため地表水を16個採取した。

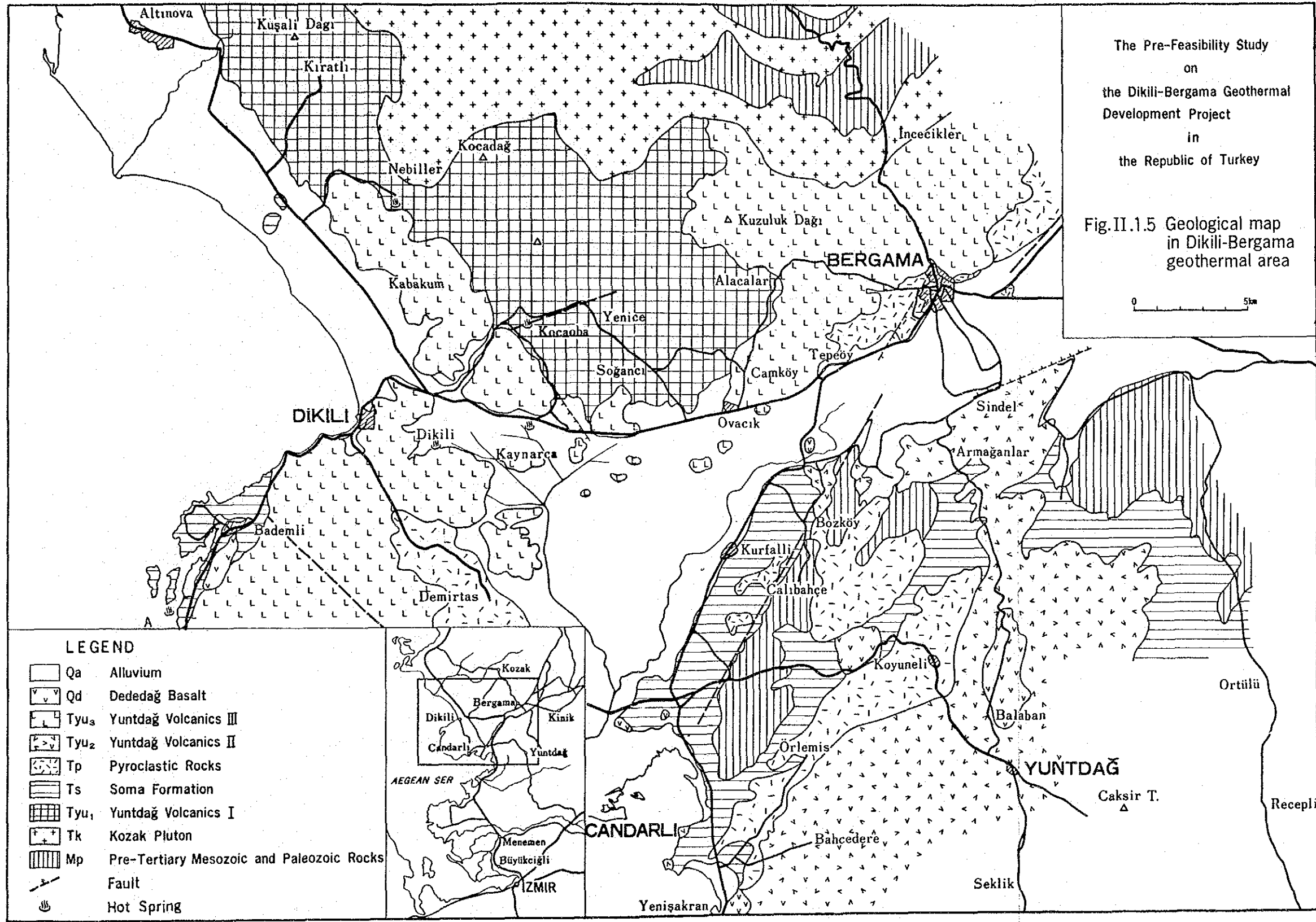
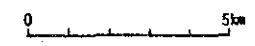
Dikili-Bergama地熱地帯では、地熱流体はYuntdağ火山岩類 I及び先第三紀石灰岩中の

Table II 1.1 Geological succession of the Dikili - Bergama geothermal area

Age		Geologic Column	Rock Name	Remarks
Quaternary	Holo-cene		Alluvium	Mud, Sand, Gravel
	Pleisto-cene		Dededag Basalt (Od)	Basalt, Pyroxene Andesite
Tertiary	Pliocene		Yuntdag Volcanics III (Tyu3)	Rhyolite
				Dacite
				Biotite - Hornblende Andesite
	Pliocene		Yuntdag Volcanics II (Tyu2)	Basalt, Pyroxene Andesite
				Hornblende Andesite, Pyroxene Andesite
	Miocene - Eocene		Pyroclastic Rocks (Tp)	Felsic Pyroclastics, Ignimbrite, Dacite lava
			Some Formation (Ts)	Limestone, Tuffaceous mudstone, Silts tone
Miocene - Eocene		Yuntdag Volcanics I (Tyu1)	Hornblende Andesite, Biotite bearing Hornblende Andesite	
		Kozak Pluton (Tk)	Granodiorite	
Pre - Tertiary		Pre - Tertiary Basement Rocks (Mp)	Camoba Formation Kinik Formation	

The Pre-Feasibility Study
on
the Dikili-Bergama Geothermal
Development Project
in
the Republic of Turkey

Fig.II.1.5 Geological map
in Dikili-Bergama
geothermal area



LEGEND

	Qa	Alluvium
	Qd	Dededağ Basalt
	Tyu ₃	Yuntdağ Volcanics III
	Tyu ₂	Yuntdağ Volcanics II
	Tp	Pyroclastic Rocks
	Ts	Soma Formation
	Tyu ₁	Yuntdağ Volcanics I
	Tk	Kozak Pluton
	Mp	Pre-Tertiary Mesozoic and Paleozoic Rocks
		Fault
		Hot Spring



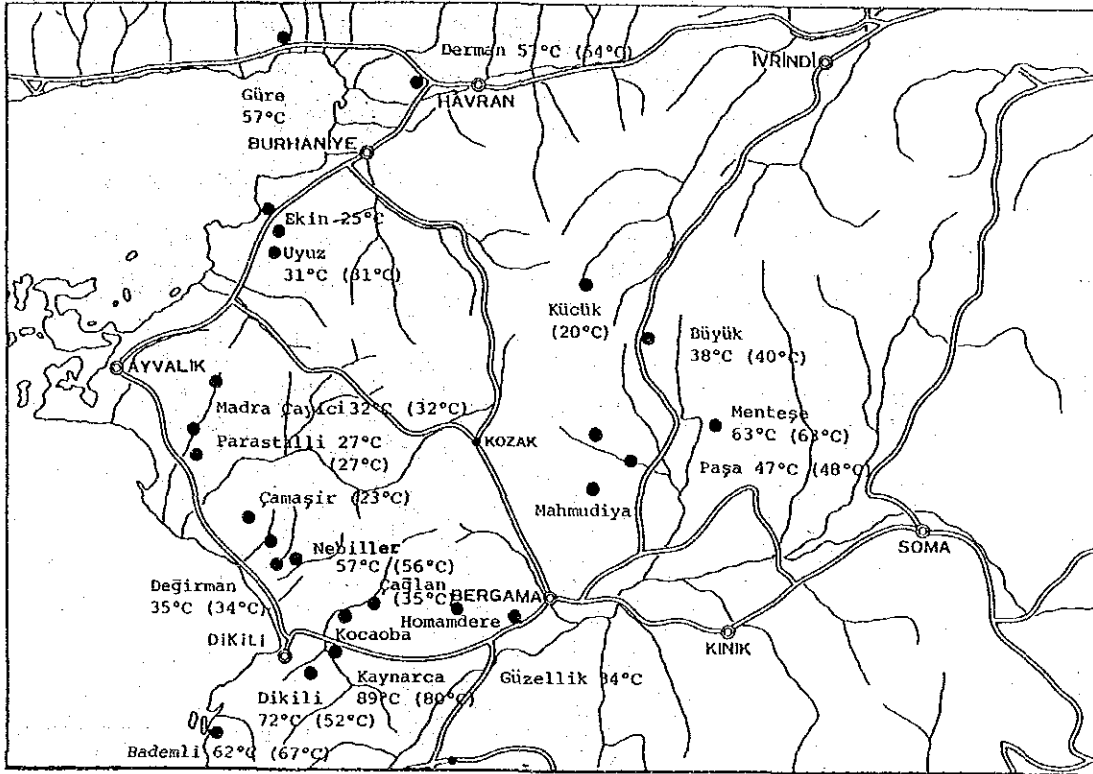


Fig. II.1.6 Location and measured temperature of hot springs in the Dikili-Bergama geothermal field (Values in parentheses are temperatures of hot springs reported by S. YILMAZER)

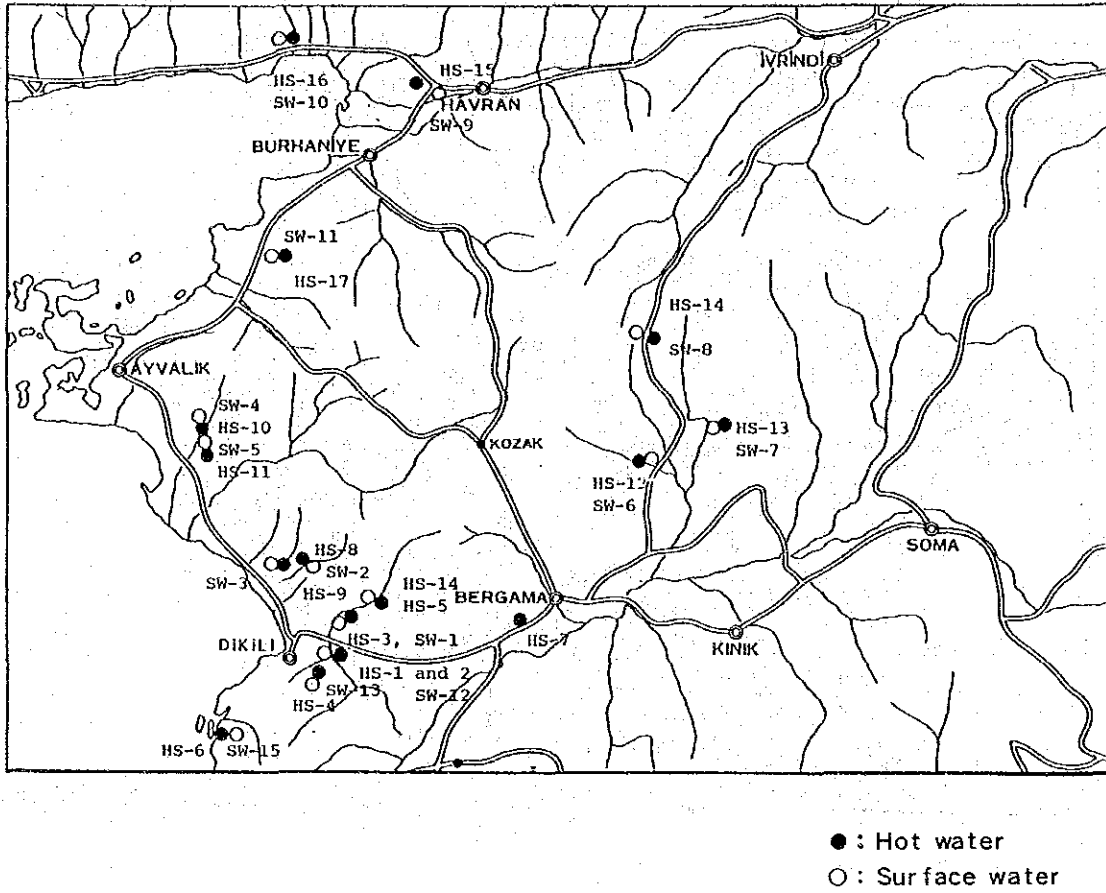


Fig. II.1.7. Sampling sites of hot spring waters in the Dikili-Bergama geothermal field.

割れ目に貯留されている可能性が大きい。

温泉の起源が海岸線に分布する Bademli 温泉のものを除いてすべて天水であることを示している。ほとんどの温泉は中性～弱アルカリ性の Na-HCO₃ 型から SO₄ 型である (Fig. II. 1. 8)。

Kaynarca 温泉の熱水成分から計算された地化学温度 (Tsio₂) は 186°C であった。Fig. II. 1. 9 に示すように Dikili 温泉と Kaynarca 温泉の HCO₃ と SO₄ 型熱水は、貯留層岩石と相互作用していることから、より深部に高温の地熱流体が存在する可能性を示唆した。また Fig. II. 1. 10 に示すように Kaynarca 温泉の地下流体の温度が最も高いと推定された。

II. 1. 2 広域地質構造と地熱活動

Anatoria 半島の南西部は鮮新世から更新世にかけて NNE-SSW 方向の引っ張り応力場、E-W 方向の圧縮応力場、そして再び NNE-SSW 方向の引っ張り応力場に変わり、多くの E-W 系の地溝を形成した。

本調査地域においても重力異常分布から、Bergama から Dikili にかけて地溝帯が存在することが推定された。更に地質概査の結果、E-W 方向と NW-SE 方向に地溝帯が存在することが明らかになった。その他、ランドサット画像解析によって、NE-SW 系の細長く伸びた地溝帯がベルガマの北東部に認められる。

Dikili-Bergama 地熱地帯は第三紀から第四紀初期にかけて激しい火山活動の場であった。調査地域で比較的新しい火山活動によって形成されたドーム状 Yuntdağ 火山 III は NW-SE 系断層に沿って配列する傾向があり、これらの火山の周辺に温泉が分布している。したがって本地域の地熱活動の熱源はドーム状火山の後火山作用に起因するものと推定される。但し、Kozak 山体の周辺の低温温泉の熱源として、Kozak 花崗閃緑岩の貫入活動、放射能壊変なども可能性がある。温泉は Kozak 深成岩体の周辺で、特に南西と南東部に多く分布する。また前述のように温泉のうち 60°C 以上のものは Yuntdağ 火山岩類 III がつくるドーム火山の周囲に認められる。調査地域で最も高温の Kaynarca 温泉 (89°C) は Yuntdağ 火山 III に挟まれた盆地内にあり、また重力異常分布から推定された E-W 断層沿いに位置する。この他、主な温泉としては Dikili (72°C)、Kocaoba (62°C)、Nebiller (57°C) 及び Menteşe (63°C) などである。

Dikili の南 5 km にある Bademli 温泉は Yuntdağ 火山岩類 I の溶岩の割れ目から熱水が湧出している。この事実は熱水が溶岩中の破碎帯内に貯留されていることを示唆している。

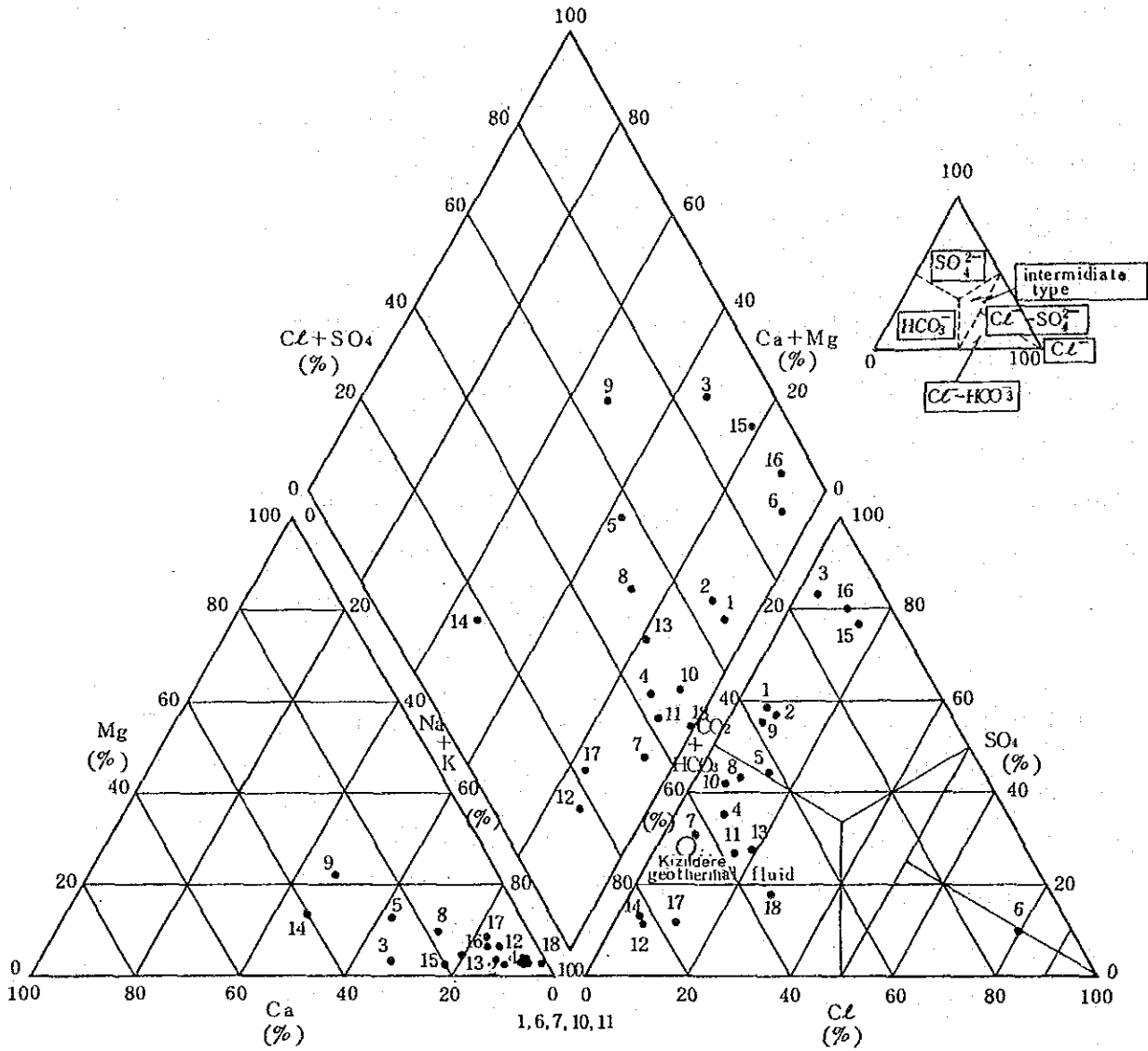


Fig. II.1.8 Piper tri-linear plots of hot springs in the Dikili-Bergama geothermal field

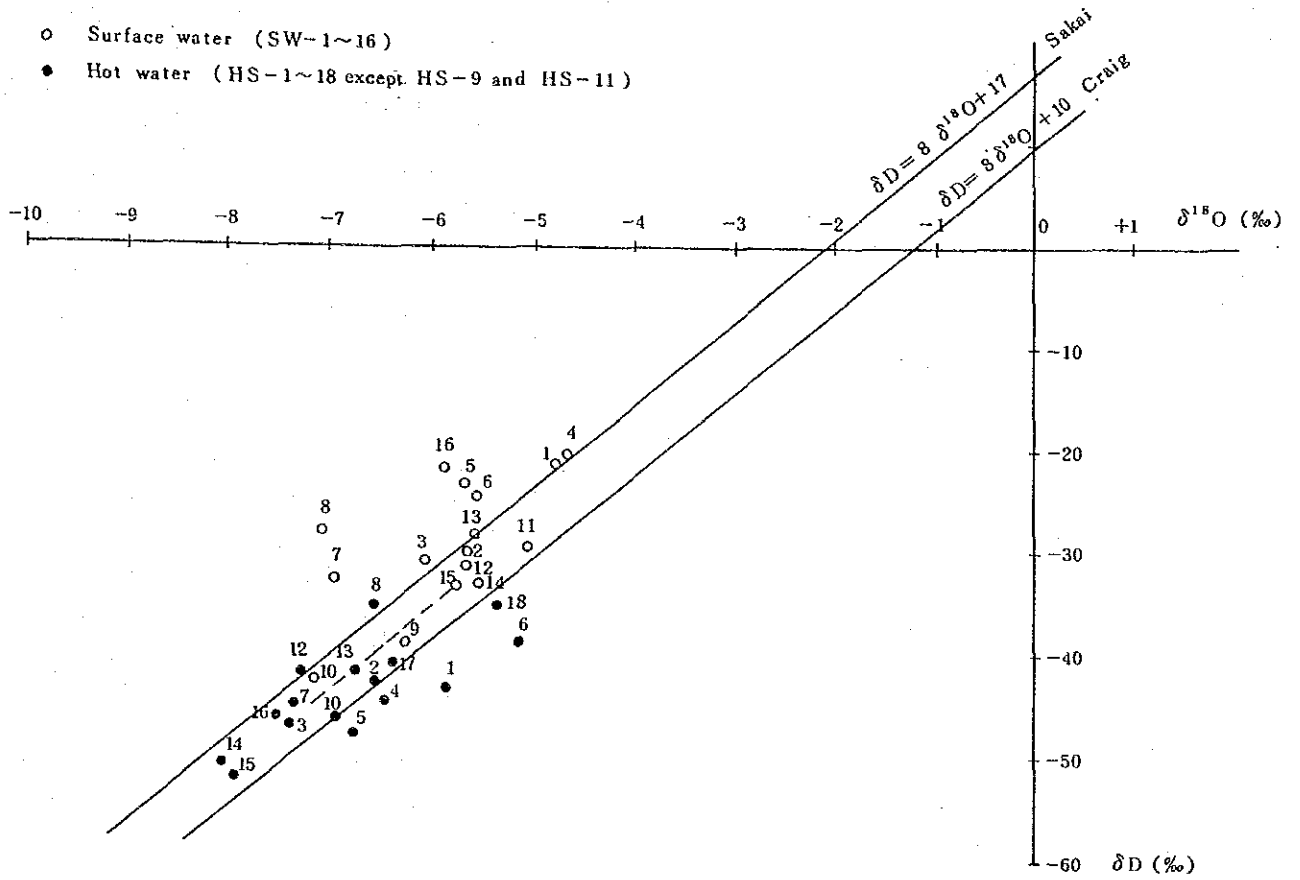


Fig. II.1.9 Deuterium and oxygen-18 isotope ratios of hot spring and cold water (surface water) in the Dikili-Bergama geothermal field.

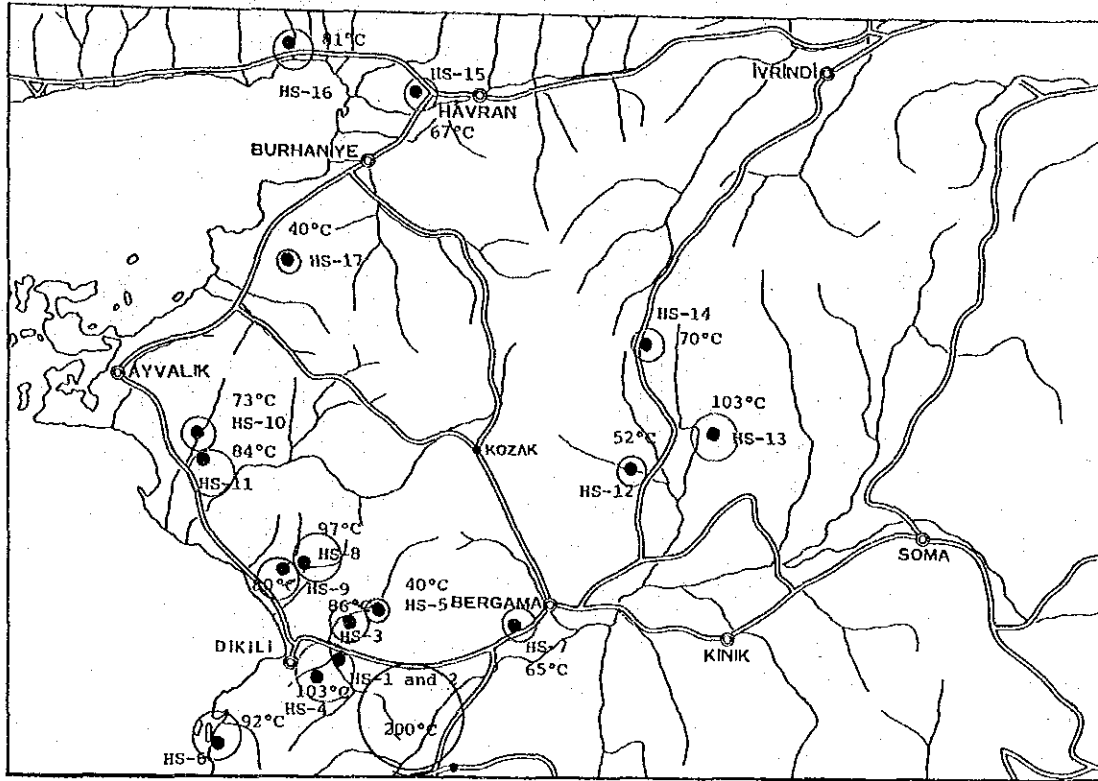


Fig. II.1.10 Reservoir temperature calculated by using silica thermometer in the Dikili-Bergama geothermal field.

II.1.3 地熱構造概念モデル

Dikili-Bergama地熱地帯では、E-Wに伸びる盆地は地質構造上は地溝帯とみなすことができる。またDikiliではFig. II.1.11に示すようにNW-SE系の地溝帯がYuntdağ火山岩類Ⅲの噴出前に形成されている。

地熱貯留層は先第三紀堆積岩類とYuntdağ火山岩類Ⅰの破碎部に期待される。この貯留層は凝灰質堆積岩からなるSoma層が帽岩によって低温の浅層貯留層から隔てられている。貯留層中の熱水の起源は大部分が天水でKozakı山体の南西麓で流入したものと考えられる。

貯留層中の熱水はE-W系あるいはNW-SE系の地溝を形成した断層に沿って上昇し、Kaynarca温泉、Dikili温泉及びKocaoba温泉などを形成したと想定される。

貯留層熱水は中性～弱アルカリ性の HCO_3^- ($-\text{SO}_4$)型で、貯留層温度は約 180°C 以上が期待される。

II.1.4 有望地域の選定

第1次調査結果に基づいてNebiller, Kocaoba, Dikili, Kaynarcaの温泉が分布する 274km^2 の範囲を有望地域として選定した (Fig. II.1.2)。この地域において、深部地質構造、火山及び地熱活動史、貯留層流体の温度、化学特性等を知るために第2次調査を実施した。

II.2 第2次調査の概要

II.2.1 第2次調査結果の概要

第1次調査の結果によって選定された 274km^2 の有望地域で、岩石調査、熱水変質帯調査、地化学・水文調査及び重力探査を実施した。

1. 岩石調査

調査地域の代表的な地質单元から採取された試料を利用して、岩石の種類、岩石物性、岩石年代を決定した。

それぞれの岩石物性値間の関係は以下のとおりである。即ち、

- 空隙率と密度は強い負の相関がある。
- 空隙率が高くなると、熱伝導率、帯磁率が低下する。
- 熱伝導率、帯磁率及び電気抵抗の間には弱い正の相関がある。
- 帯磁率は、火山岩が塩基性になる程高くなる。

また、これらの物性値の特徴から、本地域に分布する地層の地熱構造上の役割は以下のように推定される。

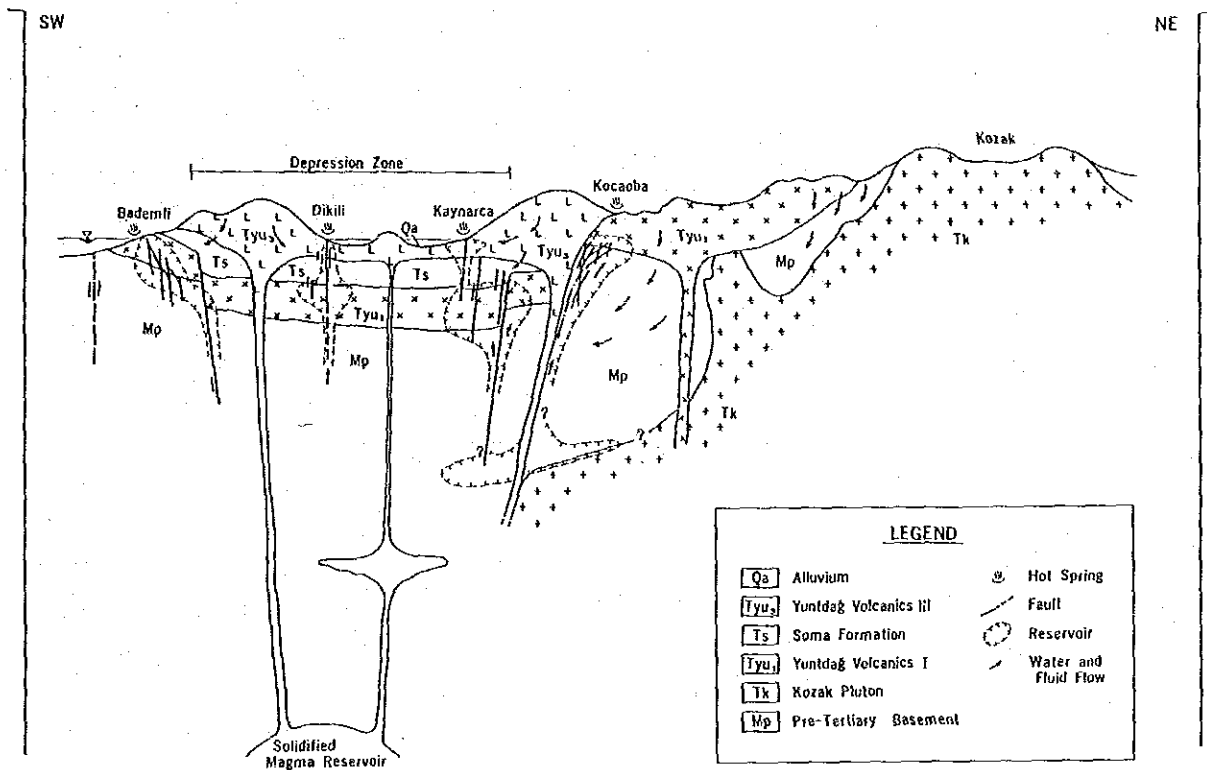


Fig. II.1.11 Conceptual model of Dikili-Bergama geothermal area

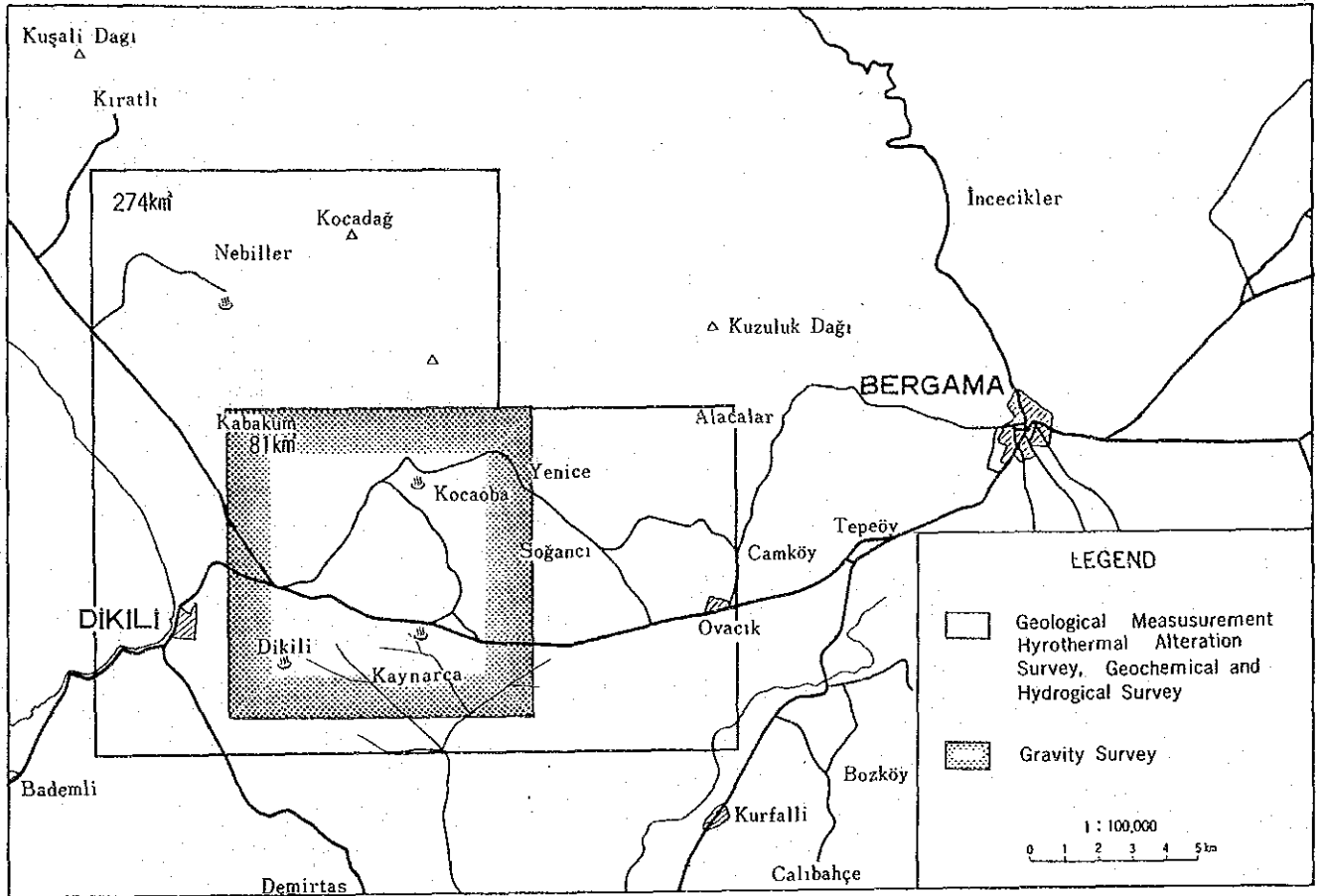


Fig. II.1.12 Survey area for second stage exploration.

(1) 先第三紀基盤岩, Kozak深成岩体及びYuntdağ火山岩類

これらの岩石はそれ自身透水性は大きくないけれども, 深部に及ぶ断層に沿って発達する破砕帯は熱水の通路や貯留層となっていると推定される。

(2) Soma層と火山碎屑岩類

本層は空隙率は30%以上と高いものの, 裂かちは少なく, 難透水性層としての特徴を持っているものと考えられる。したがって, 本地域の地熱帯では本層は, 帽岩としての役割を果たすものと予想される。

また, 年代測定の結果, 本地域の火山岩類は第四紀更新世に活動したものはないため, これらの火山活動が現在の地熱活動に直接関係があるとは考えられない。

2. 熱水変質帯調査

採取された59個の変質岩や変質粘土のすべてに対して, X線分析を実施し, 20個分について化学分析を行った。以上のデータをもとに変質帯をシリカ鉱物タイプ, 明ばん石タイプ, カオリン-パイロフィライトタイプ, アルミノ粘土タイプ及び沸石-アルカリ長石タイプの5種類に分帯した。

これらの変質帯の成因や分布の特徴から変質作用と地質構造との関係, 変質作用と地熱活動の関係について検討した。

また, Kaynarca東方2kmのBayram小丘の大規模な熱水鉱物脈中の方解石を使って流体包有物の均質化温度を測定した。

Fig. II. 2.1の変質分帯図に示すように, 主として次の5ヶ所の変質帯が分布している。

- (1) Salihler-Gökceğül地区
- (2) Kocaoba 地区
- (3) Sağancı-Ovacık 地区
- (4) Kaynarca 地区
- (5) Dikili Ilıcasi地区

これらの変質帯の総面積は18.5km²である。温泉は変質帯内に分布する。

変質鉱物は, (1)シリカ鉱物; トリディマイト, クリストバライト, オパール及び石英, (2)粘土鉱物; カリオン, モンモリロナイト, 混合層鉱物及び緑泥石, (3)その他の鉱物; 明ばん石, 石膏, 方解石及び黄鉄鉱からなる。

変質帯のほとんどは, Yuntdağ火山岩類Iの分布域に限られることから, 変質作用の時期は

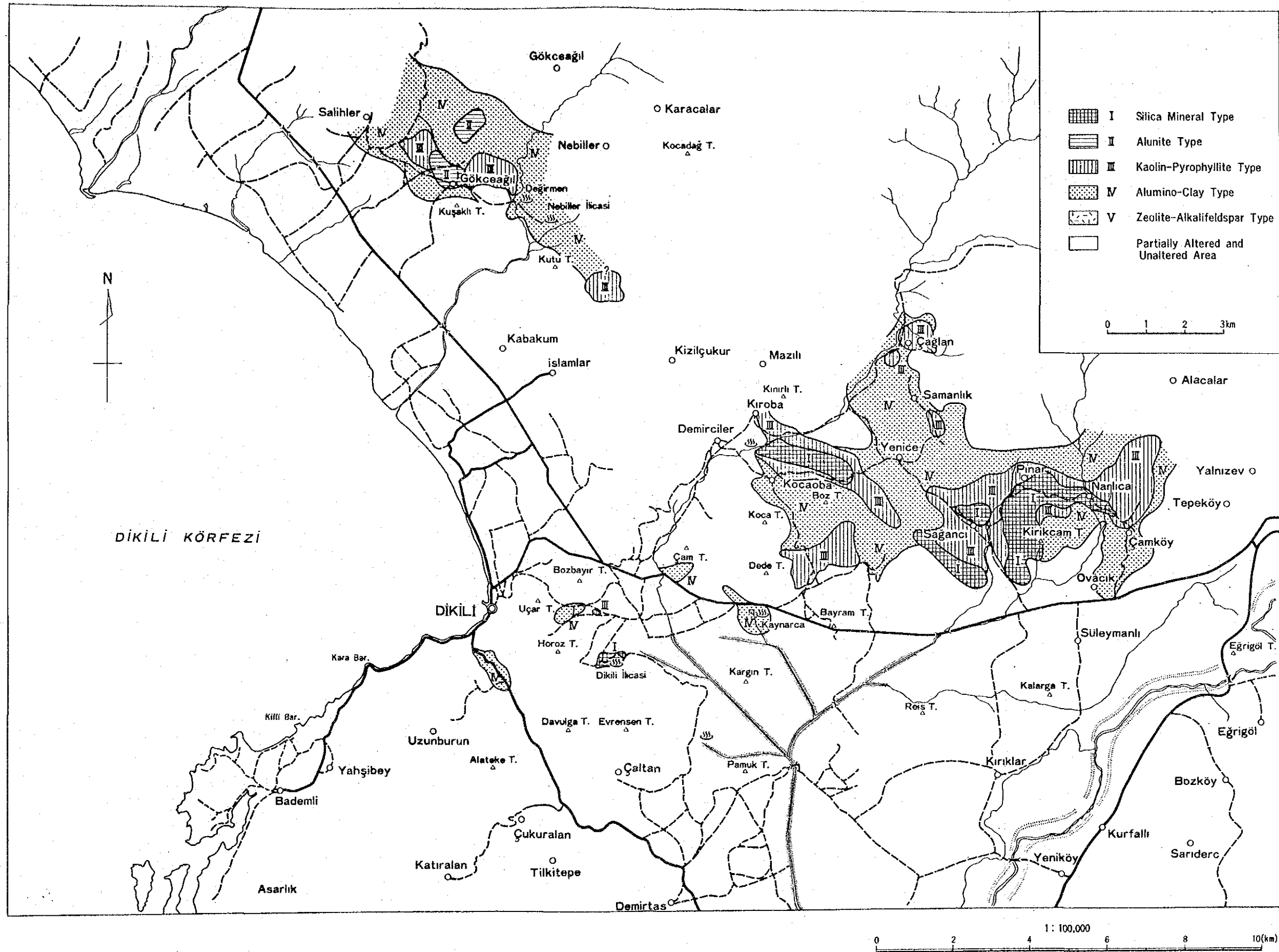


Fig. II.2.1 Alteration zone map

現在の地熱活動よりも古いものと推定される。調査地域内で最も活発な地熱帯であるKaynarca温泉では、変質鉱物として石英、方解石、モンモリロナイト、混合層鉱物からなり、現在の熱水活動によって生成したことを示唆している。

変質岩の化学組成は、熱水変質作用によってMgO、CaO及びNa₂Oが減少し、K₂O、Sが増加する傾向がある。

調査地域の北部及び北東部ではNW-SE方向に伸びるように変質帯が分布している。特に珪化帯や石英・方解石脈はNW-SE系の断層に沿って発達している。したがって、これら断層は、かつて高温熱水の上昇通路であったことを示している。

変質帯の時期は次の3段階に大別される。

- (1) Soma層の堆積前；150°C以上の中～酸性熱水活動
- (2) Yuntdağ II 火山活動前；100～150°Cの硫酸酸性熱水活動
- (3) Yuntdağ III 火山活動中及び活動後；150°C以上の熱水活動及び現在の地熱活動、中性で中～低温熱水

3. 流体地化学調査及び地化学探査

KaynarcaからDikili温泉地熱地区に湧出する温泉の化学分析(22個)、同位体分析(温泉水10個、地表水24個)及び土壌・土壌ガスの化学分析(302個)を実施し、地熱々水系のタイプ、地熱流体の化学性状、貯留層温度、流体の循環、熱水貯留ゾーン等について、推定、評価した。

- (1) 温泉の化学組成から、地下に貯留される流体は、熱水卓越型と考えられ、主にHCO₃(-SO₄)型の熱水から成ると考えられる。
- (2) 地熱々水に含まれるClイオンは、海水もしくは深部熱水を起源とし、地下ではHCO₃(-SO₄)型熱水とCl含有量の高い熱水との混合がおこっているものと推定される。HCO₃濃度の高い熱水は、堆積岩起源のCO₂を大量に含有し、貯留層内の炭酸ガス分圧(Pco₂)が高くなっていると考えられる。
- (3) 地下における流体の加熱は、主に岩石の熱伝導によるものと推定されるが、温泉付随ガス中に含まれるヘリウム同位体比からマグマ活動に関連した熱源と推定される。
- (4) 熱水貯留層の温度は化学温度計を用いてKaynarca温泉で180～200°C、Dikili温泉で110～160°Cと推定された。
- (5) 貯留層のPco₂が高いため、推定された200°Cの貯留層の分布深度は、他のPco₂の低い場合に比べてかなり深くなると考えられる。
- (6) 水の水素同位体比分布から、Kaynarca温泉に湧出している熱水は、Fig. II. 2. 2 に示すよう

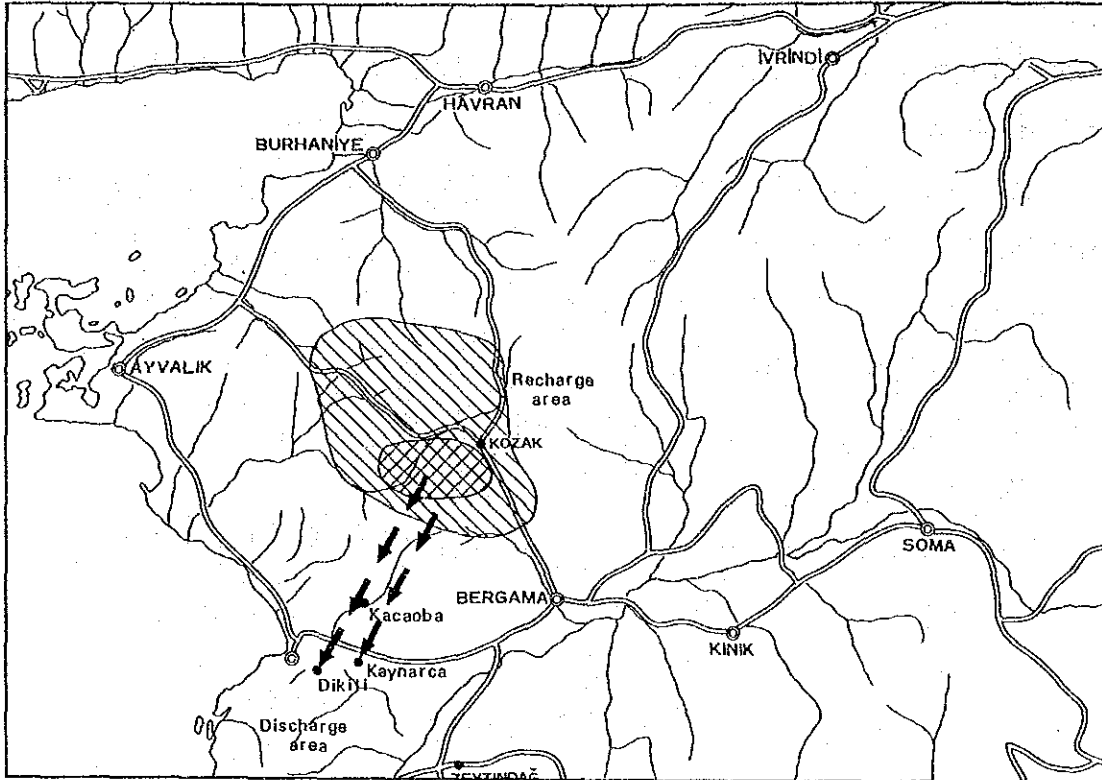
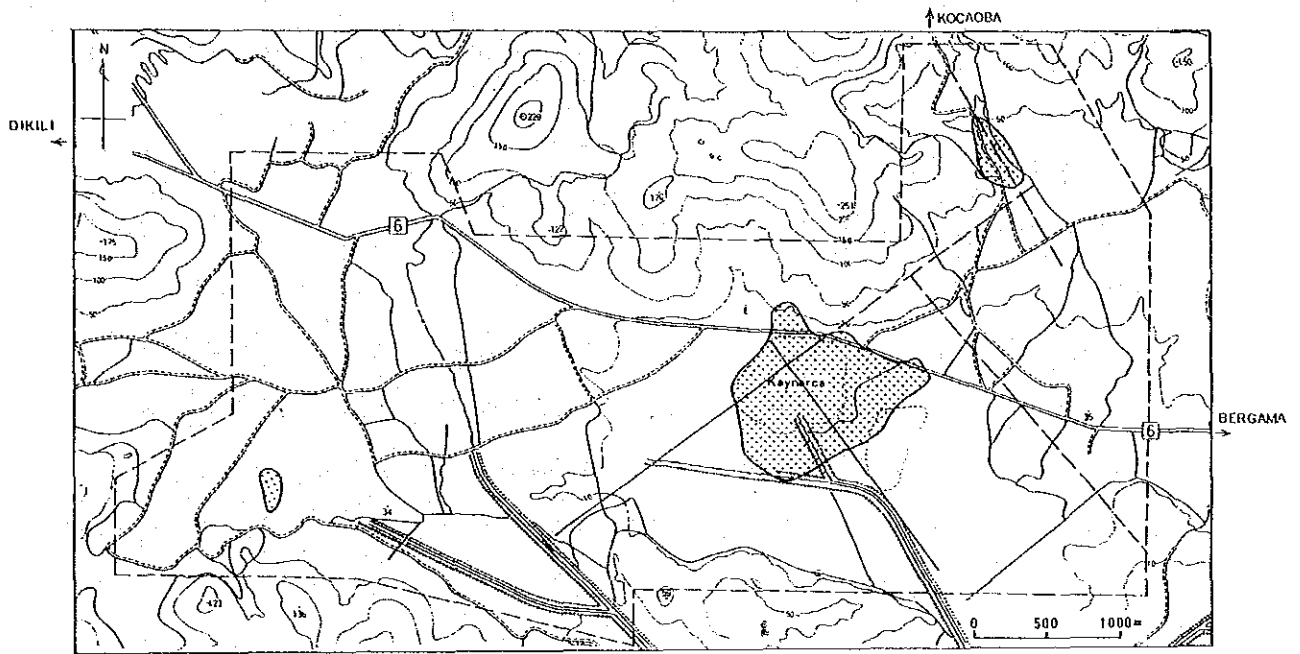


Fig. II.2.2 Fluid flow pattern of the Dikili – Kaynarca system



- : Overlapped area of high Hg contents in soil and soil-gas
- : Tectonic line estimated from Hg distributions in soil and soil-gas
- - : Tectonic lines estimated from Hg distribution in soil

Fig II 2.3 Tectonic lines in relation to geothermal activity

に、主に Kozak 西部から浸透した天水起源水が流動して来たものと推定される。循環時間はトリチウム濃度から75年以上と計算された。

(7) 土壤中及び土壤ガス中のHg, CO₂, Rn調査結果から、Kaynarca温泉周辺に地熱活動と関連があると推定される線構造及び地熱流体の流出域 (Discharge area) が推定された (Fig. II.2.3)。

4. 重力探査

調査地域約81km²内で、200m間隔の格子点で重力測定を行い、ブーゲー異常図、重力残差図、断面解析などを実施した。Fig. II.2.4のブーゲー異常図及びFig. II.2.5の重力残差図に示すように、調査地域においては2ヶ所の低異常と2ヶ所の高異常の計4ヶ所の異常域が認められた。高異常域は調査地域の北東部及び南東部に分布し、特に南東部では等重力線が密で、周辺地域との地質もしくは地質構造の違いを示唆している。低異常地域は調査地域の北西部及び南東部に広がっている。南東部の低異常域は、西北西-東南東の方向に細長く明瞭な形状を示している。これはあたかもWNW-ESE系の断層によって形成された地溝を反映しているものと考えられる。一方、北西部の低異常域は、等重力線が疎で広く分布している。この低異常はSoma層や酸状火山岩類の分布域とほぼ一致しており、これらの地層の分布を示しているものと解釈される。

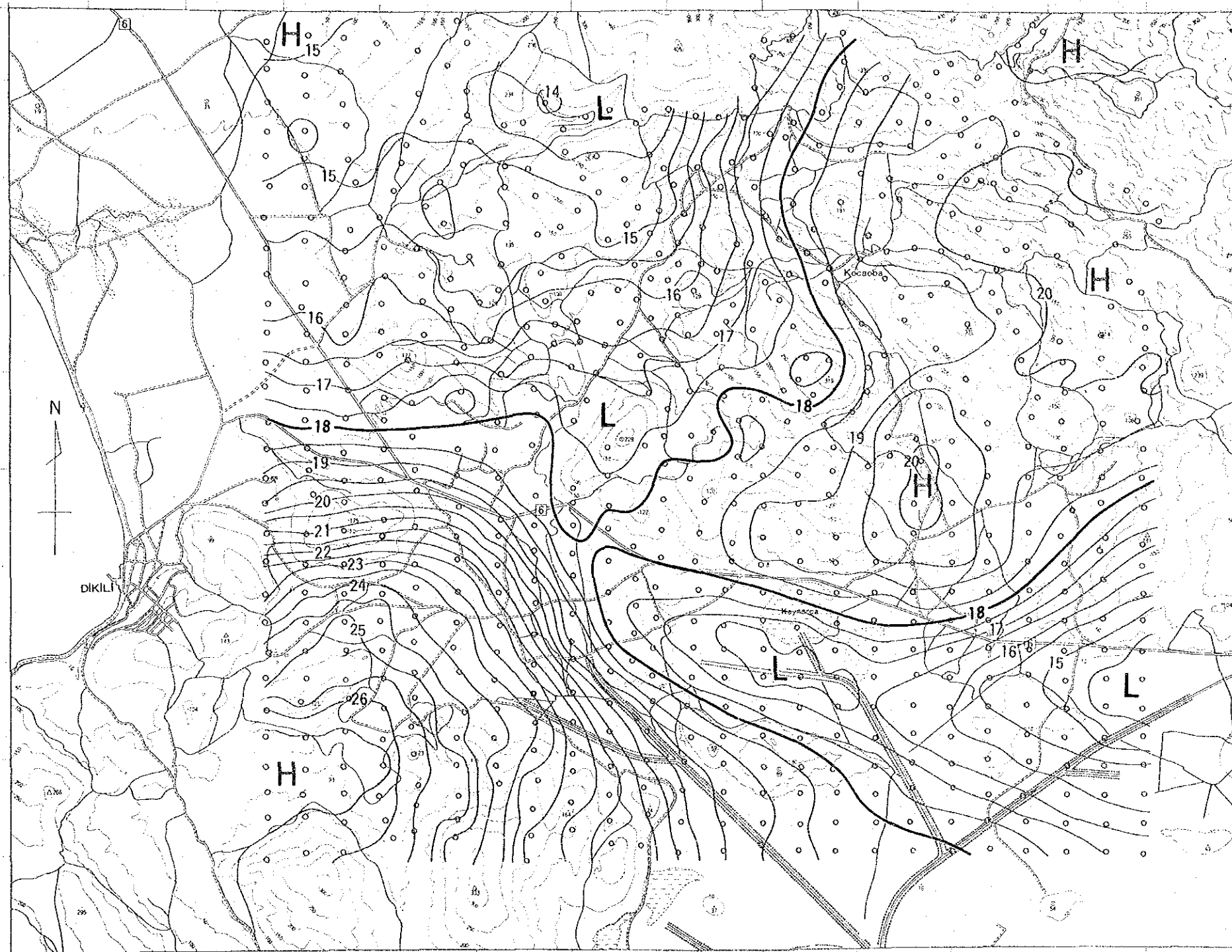
重力異常は、最末期の火山活動によるYuntdağ火山岩類Ⅲの分布との間に明瞭な関係は認められない。

重力断面解析の結果、Kaynarca温泉南方では沖積層と思われる地層が200~300mの厚さで堆積していると考えられる。

II.2.2 深部地質構造

調査地域北東隣接部には、先第三紀堆積岩類とKozak深成岩体が露出しているため、本地域の地下深部においても分布するものと考えられる。Fig. II.2.6及びFig. II.2.7の地質図及び地質断面図に示すようにNW-SE系の断層が発達している。これらの断層のうち、Kocaoba温泉とSağancıを通る断層は連続性もよく、珪化帯や熱水鉱物脈を伴うことから、地下深所に及んでいるものと推定される。この断層とDikili温泉を通るNW-SE系断層に挟まれた地域は小規模な地溝を形成していると思われる。更に、Kaynarca温泉付近にはE-W系の南落ちの断層が推定され、これとDikili温泉を通る断層に挟まれた地帯もまた地溝を形成していると思われる。この地溝はFig. II.2.4及びFig. II.2.5に示すように、明瞭は負異常となって表現されている。

一方、DikiliからDemirtasにかけての一部で中新世に噴出したYuntdağ火山岩類Ⅰが露出することから、この地域は地壘状になっている可能性が大きい。この地域は等重力線が密に分布する高

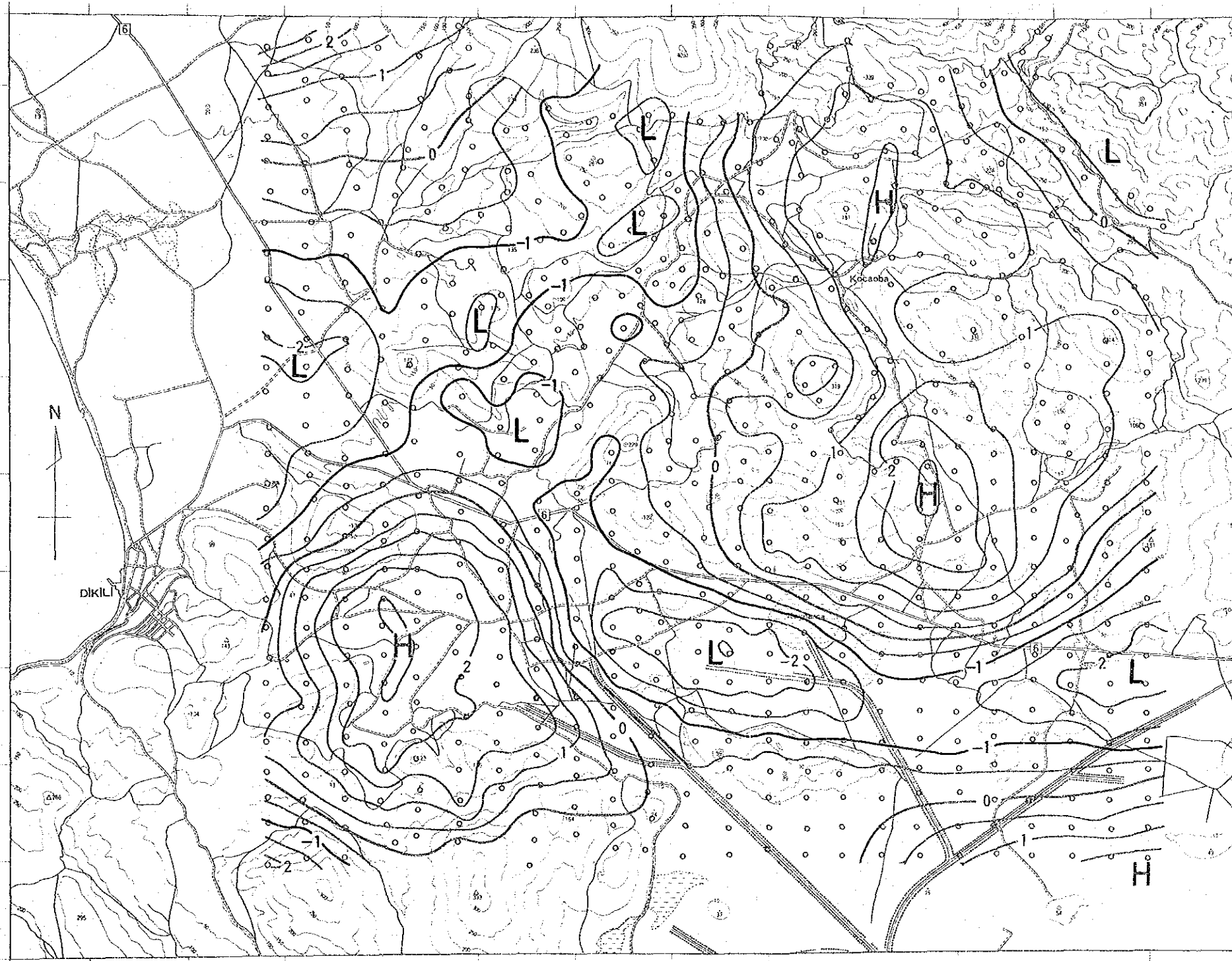


JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY — GENERAL DIRECTORATE OF MINERAL RESEARCH AND EXPLORATION

GEOHERMAL DEVELOPMENT PROJECT
IN
DIKILI-BERGAMA FIELD

0 1 2 3 (km)

Fig. II.2.4
Detailed bouguer anomaly map
($\rho=2.4$)



JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY — GENERAL DIRECTORATE OF MINERAL RESEARCH AND EXPLORATION

GEOHERMAL DEVELOPMENT PROJECT
IN
DIKILI-BERGAMA FIELD

0 1 2 3 (km)

Fig. II.2.5
Detailed residual gravity map
($\rho=2.4$)

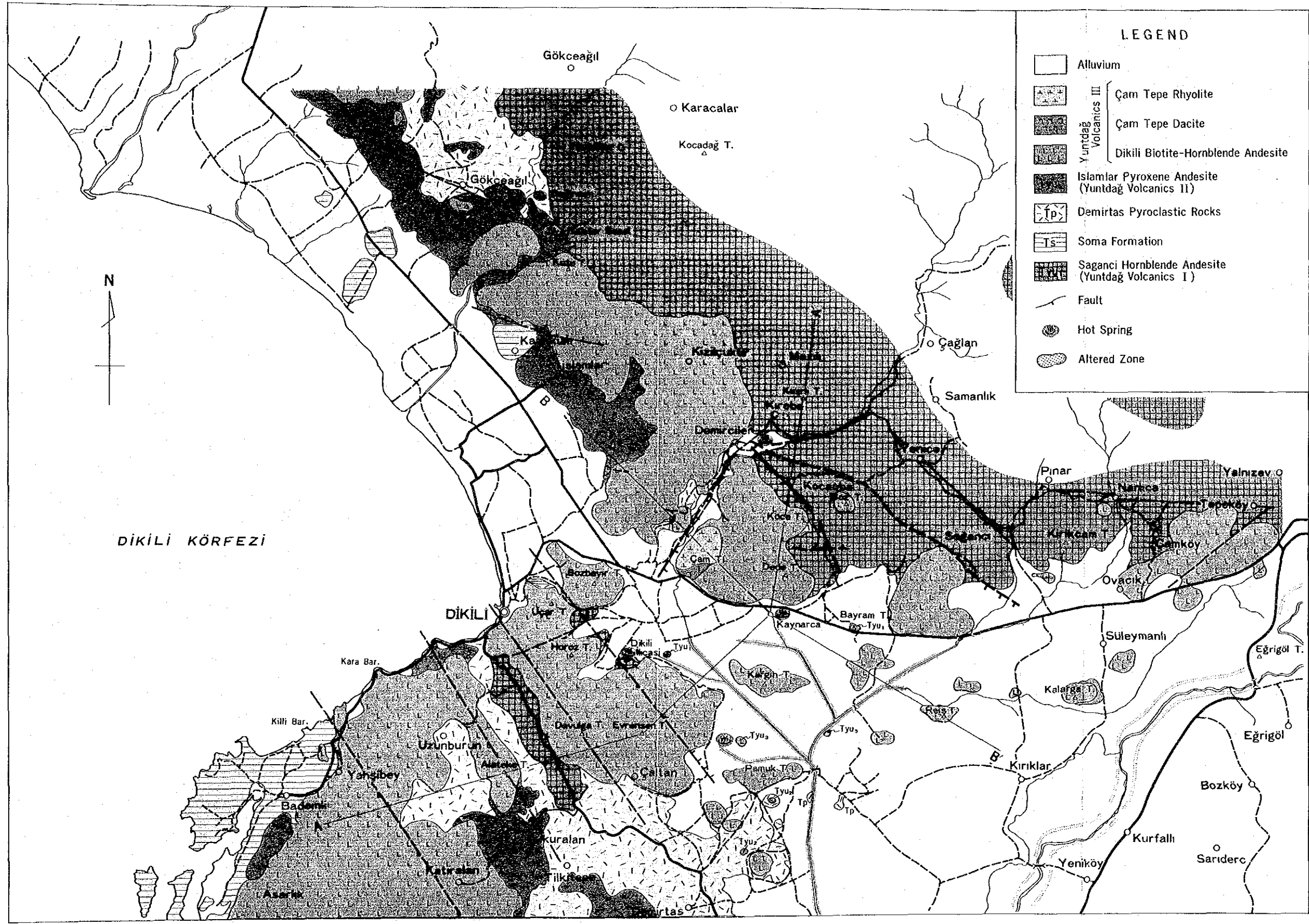


Fig. II.2.6 Geological map of Dikili-Ovacik area

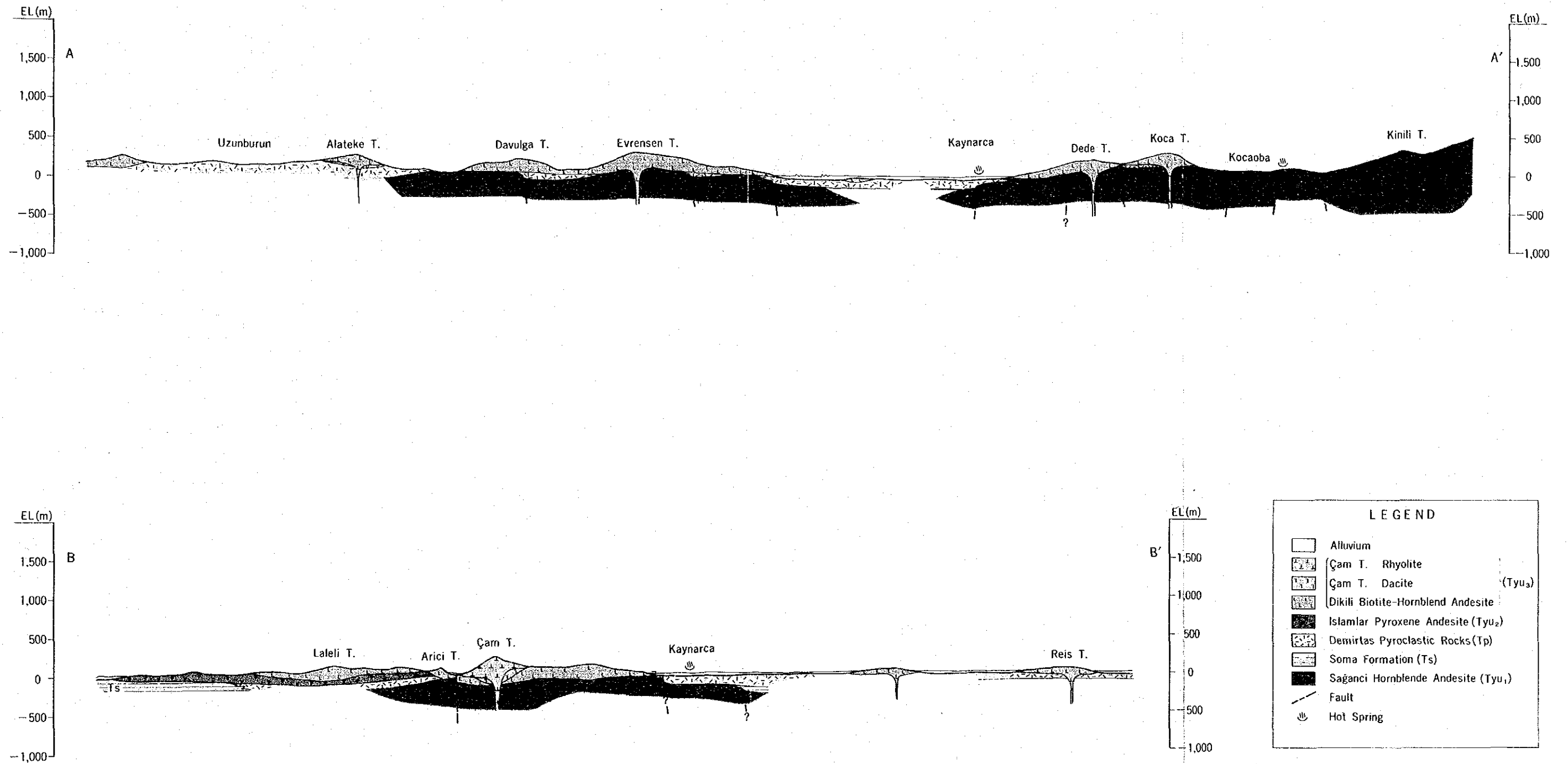


Fig. II.2.7 Geological cross section of Dikili-Ovacik area.

異常帯があり、地下深所に貫入岩体が存在する可能性もある。

以上のように本地域では地下深部の基盤岩及びYuntdağ火山岩類Ⅰは、NW-SE系又はE-W系の断層によって巾2~5kmの小規模な地塁、地溝を形成しているものと推定される。

本地域の主な温泉は地溝をつくる断層上に位置している。

II.2.3 火山及び地熱活動史

Dikili-Bergama地熱地帯では、古第三紀のKozak花崗岩マグマの貫入後、中新世に入って安山岩質マグマが激しく噴出した。火山活動は中新世から鮮新世へと次第に強くなっていった。即ち、これらの活動によって本地域では下位よりYuntdağ火山岩類Ⅰ、Demirtas火山碎屑岩類、Yunt-dağ火山岩類Ⅱ及びYuntdağ火山岩類Ⅲが分布する。

安山岩火山活動は、Kozak山体の南西麓で角閃石安山岩を噴出した。本層は最大層厚が約1500mに及んでいる。本岩の絶対年代測定の結果、Yuntdağ火山岩類Ⅰは1500~1600万年前に噴出したと考えられる。

これに引き続いて酸性火山活動はSoma層の堆積中の末期にDemirtas火山碎屑岩類の溶結凝灰岩や石英安山岩を噴出した。この火山活動の中心はDemirtas付近と考えられ、ここでは本層は非常に厚く堆積、分布している。本岩の絶対年代は1300~1500万年前に活動したことを示唆している。この地域は、火山活動が始まると同時に上昇し始めている。

その後、塩基性火山活動が始まり、玄武岩や輝石安山岩質マグマを溢出している。本岩類は従来第四紀のDededag玄武岩とされていたが、野外調査の結果、中新世~鮮新世のYuntdağ火山岩類Ⅲに直接覆われている。したがって、Dededag玄武岩とされていた岩石は中新世~鮮新世の塩基性火山活動による産物で、Yuntdağ火山岩類Ⅱに属する。

最末期の石英安山岩質火山活動は、Dikili-Bergama地熱地帯ではしばしばYuntdağ火山岩類Ⅲからなるドーム状火山を形成している。これらの火山はNW-SE方向、ENE-WSW方向に配列している。地熱活動はドーム状火山周辺に分布していることから、この石英安山岩質火山活動が現在の地熱活動の熱源となっている可能性は大きい。しかし、これらの岩石の絶対年代値は1400~1600万年を示しこの火山活動はそれ程新しくない。

調査地域の地熱活動はKocaoba, KaynarcaそしてDikili,などの温泉が主なものである。これらの温泉はいつでも60℃以上の熱水を湧出し、特にKaynarca温泉は沸騰泉である。

過去の地熱活動を示す熱水変質帯は主として中新世から鮮新世にかけて噴出又は堆積したYunt-dağ火山岩類ⅠやSoma層中に分布している。したがって、熱水変質作用の大部分はYuntdağⅡの火山活動以前に終わったものと推定される。この過去の活発な地熱活動はKocaobaからSağancı-Ova-

ckにかけて150°C以上の高温地熱貯留層を形成していたと思われ、しかもこの貯留層は、NW-SE系の断層に沿って分布していたものと考えられる。更に、Ovacık や Bayram小丘に発達する石英脈、方解石脈は高温熱水貯留層もしくはその通路であったことを示す。

Yuntdağ III 火山活動以前の地熱活動は、調査地域のSalihler-Gökceğil 地区で活発であった。この活動は珪長質火山活動に起因すると思われ、熱水は低温で強酸性を示しており、地表付近で変質帯を形成したものと想定される。

Yuntdağ III 火山活動の終了後形成されたKaynarca温泉周辺の中性の弱変質帯は、Kocaoba, Kaynarca及びDikili温泉などの現在の地熱活動と密接に関係していると解釈される。即ち現在の地熱活動はYuntdağ IIIの後火山作用が熱源となっている可能性が大きい。

II.2.4 貯留層流体の温度、化学特性

KaynarcaからDikili温泉地域の熱水系の地熱流体の化学特性、温度及びその広がり地化学調査により評価された。

熱水の化学・同位体調査結果から、Dikili温泉からKaynarca温泉に広がる熱水系が最も活発であると推定される。

温泉水に含有される化学成分の特徴からこの熱水系の流体は熱水卓越型と判断される。

温泉水溶存化学成分の統計的データ処理からDikili-Kaynarca地熱水系の流体は、 HCO_3 ($-\text{SO}_4$)型熱水とCl濃度の比較的高い HCO_3 ($-\text{SO}_4$)型熱水の混合流体と推定された。Kaynarca温泉に湧出している熱水は、Dikili温泉に湧出しているものに比べて、Clを含有する HCO_3 型熱水の混合割合が小さいと考えられる。Kaynarca温泉とDikili温泉は、同一の熱水系に属している可能性がある。Cl/B比から熱水系は火山岩及び堆積岩中に広がっていると推定される。

温泉に湧出している熱水が HCO_3 ($-\text{SO}_4$)型であること及び温泉付随ガスの主成分は CO_2 であることから、貯留層内流体の CO_2 分圧は高く、そのため開発に適した温度をもつ流体の貯留深度は一般的な CO_2 分圧をもつ地熱地帯のそれより深いと考えられる。

酸素同位体比の地表水からのシフトやトリチウム濃度から考えて、Dikili-Kaynarca熱水系の HCO_3 型熱水の賦存量は定性的に大きいと評価される。

Kaynarca温泉に熱水を供給している貯留層の温度は化学温度計から180~200°C、Dikili温泉に熱水を供給している貯留層は110~160°Cと推定される。一方、同位体温度計では220~230°Cと計算され、これは深部の温度を示している可能性がある。

水素同位体比分布から、Dikili-Kaynarca熱水系の流入域 (Recharge area) は北東のKozakの

西側地域と推定される。

Clを含有する熱水が深部高温熱水を起源としていると仮定すれば、深部にはシーリング層（不透水層）が存在し、その下部にCl濃度の高い熱水が貯留されていると推定されるが、Clイオンの起源については含有Cl濃度レベルが低いために第2次調査段階では明らかに出来なかった。ただし、たとえCl濃度の高い熱水が存在するとしても、高濃度にHCO₃を含有し、Cl-エンタルピーが反比例の関係にあることから、一般の火山岩地域の活発な熱水系とは性質が異なると考えられる。

流体の循環時間はトリチウム濃度から75年以上と計算され、流体の循環中に深部の熱源からの熱伝導により流体は加熱されていると推定される。一方、ヘリウム同位体比は熱源がマグマ活動と関連があることを示唆している。

流体の流動、貯留層構造を理解しやすくするために便宜的に作成した化学的に見た地熱モデルをFig. II. 2. 8に示す。

土壌ガス中の水銀分布 (Fig. II. 2. 9), 土壌中の水銀分布 (Fig. II. 2.10) 及び、土壌ガス中のCO₂, Rn分布, さらに1 m 深地温分布をコンパイルして、地熱々水の上昇している地域及び地熱々水の流動や分布等の地熱活動と関連すると考えられる線構造 (Fig. II. 2. 3) を推定した。流体が深部から上昇している地域は、Kaynarca温泉とその周辺及びDikili温泉周辺に限られる。

Kaynarca周辺では、地熱活動と関連すると考えられるNW-SE方向の線構造が推定される。これらの線構造は断層沿いの破砕帯に対応している可能性がある。

また、Langelier指数を用いたCaCO₃スケール生成の予測計算により、Kaynarca温泉熱水は若干スケール析出傾向にあることが判明した。

Kaynarca温泉の地熱流体の地下推定温度、化学特性から見て、この温泉の深部には中性~弱アルカリ性の若干塩濃度の低い180~200°Cの地熱流体が期待出来るが、開発に際しては深い貯留深度及び炭酸カルシウム系スケールの析出の可能性（蒸気発生設備のコスト増大）や、高い不凝結ガス濃度（発電効率の悪化）等の問題が生じると考えられる。

II.2.5 地熱構造モデル（流体の流動モデル）

第1次及び第2次調査に基づいて、Kaynarca周辺の地熱構造概念モデルを作成した。このモデルでは、第1次で作成したモデルに比べて、地下貯留層の化学的特徴、地熱系について詳細に検討した。

Dikili温泉からKocaobaを通してKaynarca温泉にかけての地下構造はNW-SE系とWNW-ESE系断層で規制されている。WNW-ESE系の断層は、重力異常帯が示すようにKaynarcaとKargin山の間接地溝を形成しているものと推定される。

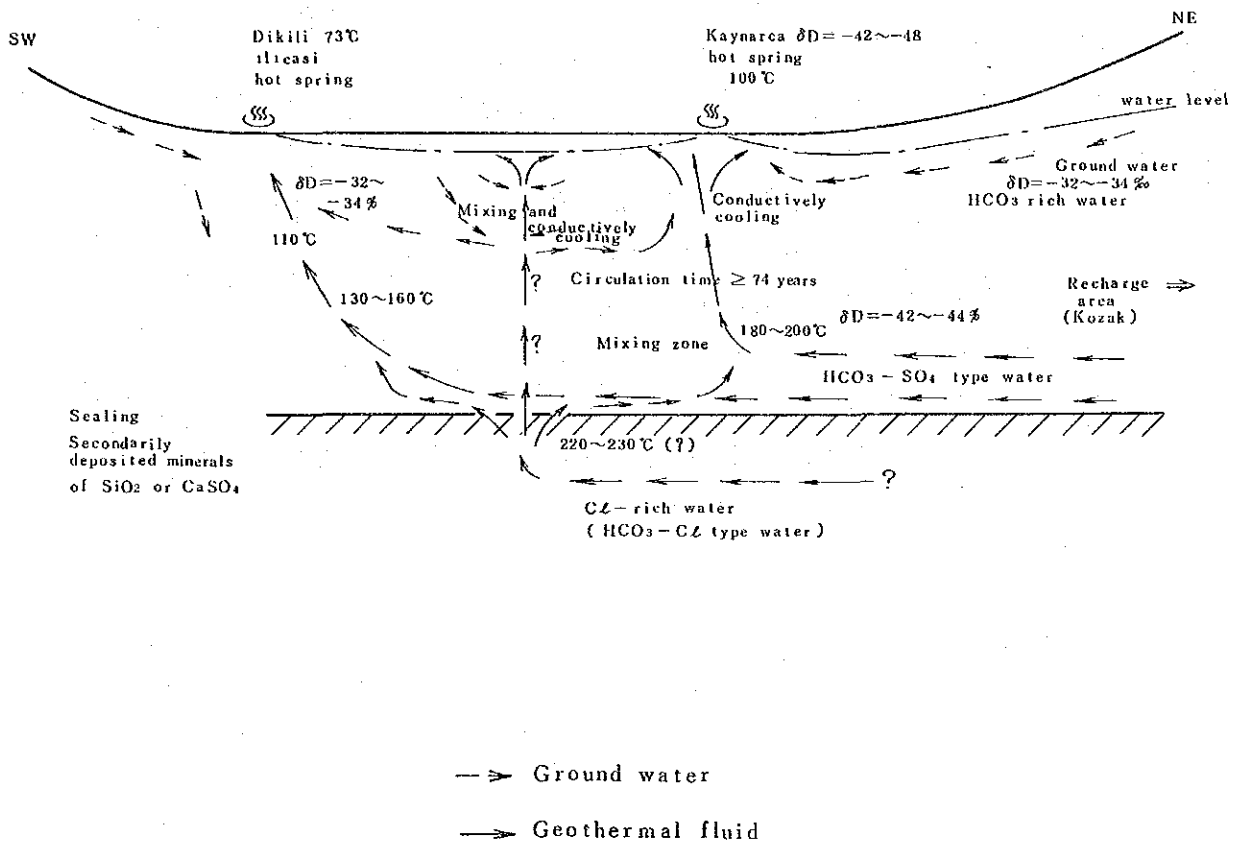


Fig. II.2.8 Hydrogeochemical model of the Dikili-Kaynarca system in the Dikili-Bergama geothermal field

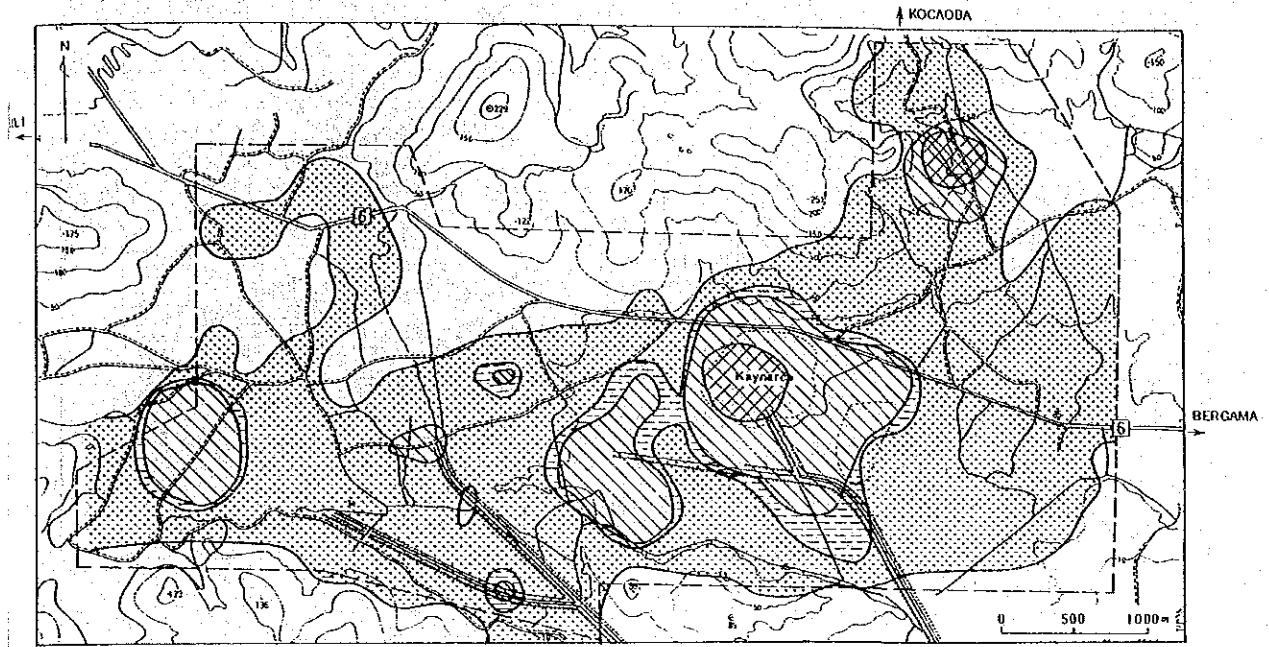


Fig. II 2.9 Smoothed iso-concentration contour map of Hg in soil gas

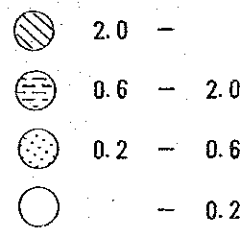
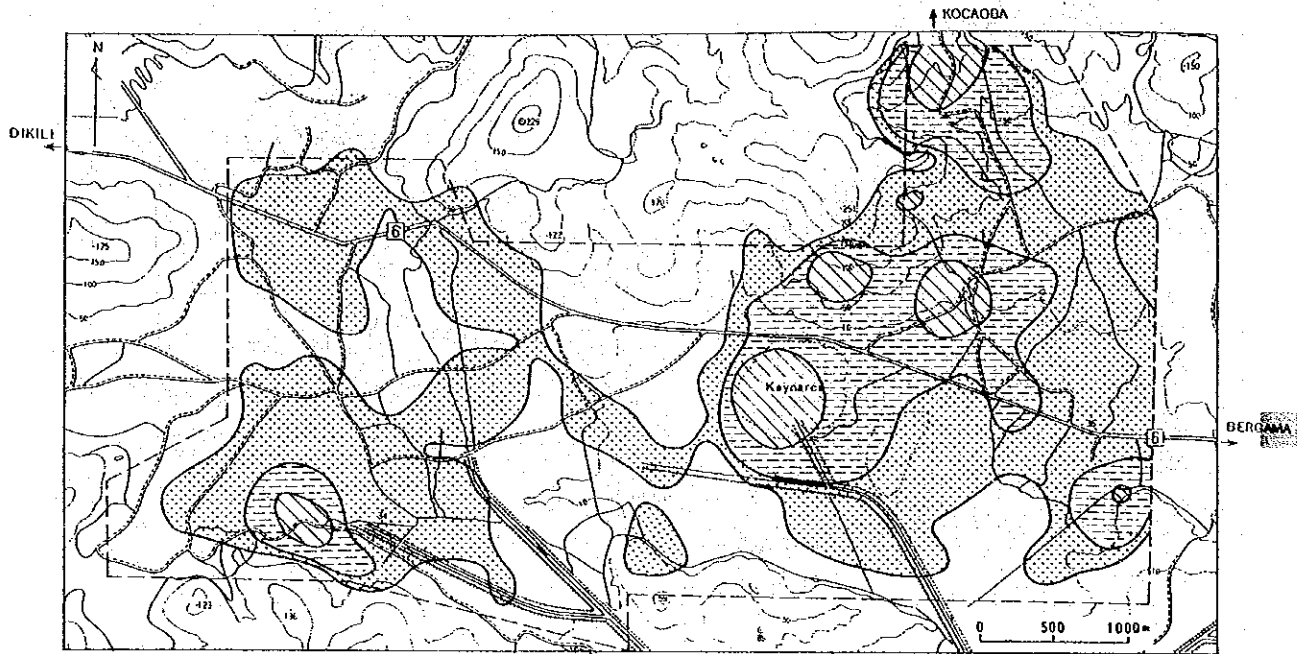


Fig. II 2.10 Smoothed iso-concentration contour map of Hg in soil

Dikili温泉はこの地溝帯の南側境界となっているENE-WSW系断層上に位置し、一方、Kaynarca温泉は地溝帯の北側境界の同系列の断層上にある。また、Kocaoba温泉は、珪化変質帯を伴うNW-SE系断層とNE-SW系断層の交叉する場所に存在する。従って、これらの地区での熱水は上述の断層に沿って発達する破碎帯を通過して上昇しているものと推定される。

先第三紀基盤岩はDikili温泉付近NW-SE系の地塁を形成し、Dikili温泉とKaynarca間では地溝帯を呈している可能性が高い。更にKaynarcaの北方のDede火山付近では、この基盤岩は隆起しているものと考えられる。

現在の地熱活動の熱源はYuntdağ III火山の最末期の火山活動の後火山作用と考えられる。但し年代測定の結果、これらの火山はすべて中新世から鮮新世にかけて活動したもので、この活動は現在の地熱活動の熱源としてはやや古い。したがって、地下深所には現在確認されていないマグマ活動が存在し、それが熱源となっている可能性もある。

地熱貯留層は浅所のみでなく、Yuntdağ火山岩類Iの溶岩中にも存在し、Yuntdağ火山岩類I中の凝灰角礫岩はその帽岩となっているものと考えられる。

地熱貯留層は浅所のみでなく、Yuntdağ火山岩類Iの溶岩中にも存在し、Yuntdağ火山岩類I中の凝灰角礫岩はその帽岩となっているものと考えられる。

II.2.6 最有望地域の選定

第1次調査結果及び第2次調査結果に基づいて、Kaynarca温泉を中心として約42km²の範囲を最も有望な範囲として選定した。この範囲において貯留層の深度、広がり、熱構造の解明、地熱ポテンシャルの評価のために第3次調査を実施した。

II.3 第3次調査の概要

II.3.1 第3次調査結果の概要

第2次調査の結果によって選定されたKaynarcaを中心とする42km²の最有望地域で地質精査、CSAMT法探査、流電電位法探査、熱流量調査を実施した。

1. 地質精査

本調査では調査地域の地質構造、層序、構成岩石などを明らかにし、詳細な地質図を作成した。また現地調査では同時に断裂系調査を行い、本地域の断裂と地質構造との関係を検討した。更にこれらの地質状況と地熱活動の関連性についても考察した。

調査結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 調査地域の地質層序はTable II. 3. 1の層序表に示したように下位からYuntdağ火山岩類I、

Table II 3.1 Geological succession of the Kaynarca geothermal area

Age	Geologic column		Rock name	Geothermal activity
Holocene		Alluvium		
Neogene	Pliocene	Yuntdağ volcanics III (Tyu3)	Sulu Kaya biotite-hornblende andesite	Hornblende- biotite andesite
			Koca Tepe biotite-hornblende andesite	Hornblende - biotite andesite
			Çam Tepe rhyolite	Rhyolite
			Çam Tepe dacite	Biotite dacite
			Dikili biotite-hornblende andesite	Hornblende-biotite andesite
			Koca Ağıl hornblende andesite	Hornblende andesite, Pyroxene-hornblende andesite
	Miocene	İslamlar Pyroxene andesite (Yuntdağ volcanics II) (Tyu 2)	Basalt, Pyroxene andesite, Hornblende-pyroxene andesite	
		Demirtas pyroclastic rocks (Tp)	Felsic pyroclastic rocks, dacite, ignimbrite	
	Soğancı hornblende andesite (Yuntdağ volcanics I) (Tyu 1)	Hornblende andesite biotite-hornblende andesite, altered andesite		

Yuntdağ volcanism I

Felsic volcanism

Yuntdağ volcanism III

GEOHERMAL DEVELOPMENT PROJECT IN DIKILI-BERGAMA FIELD

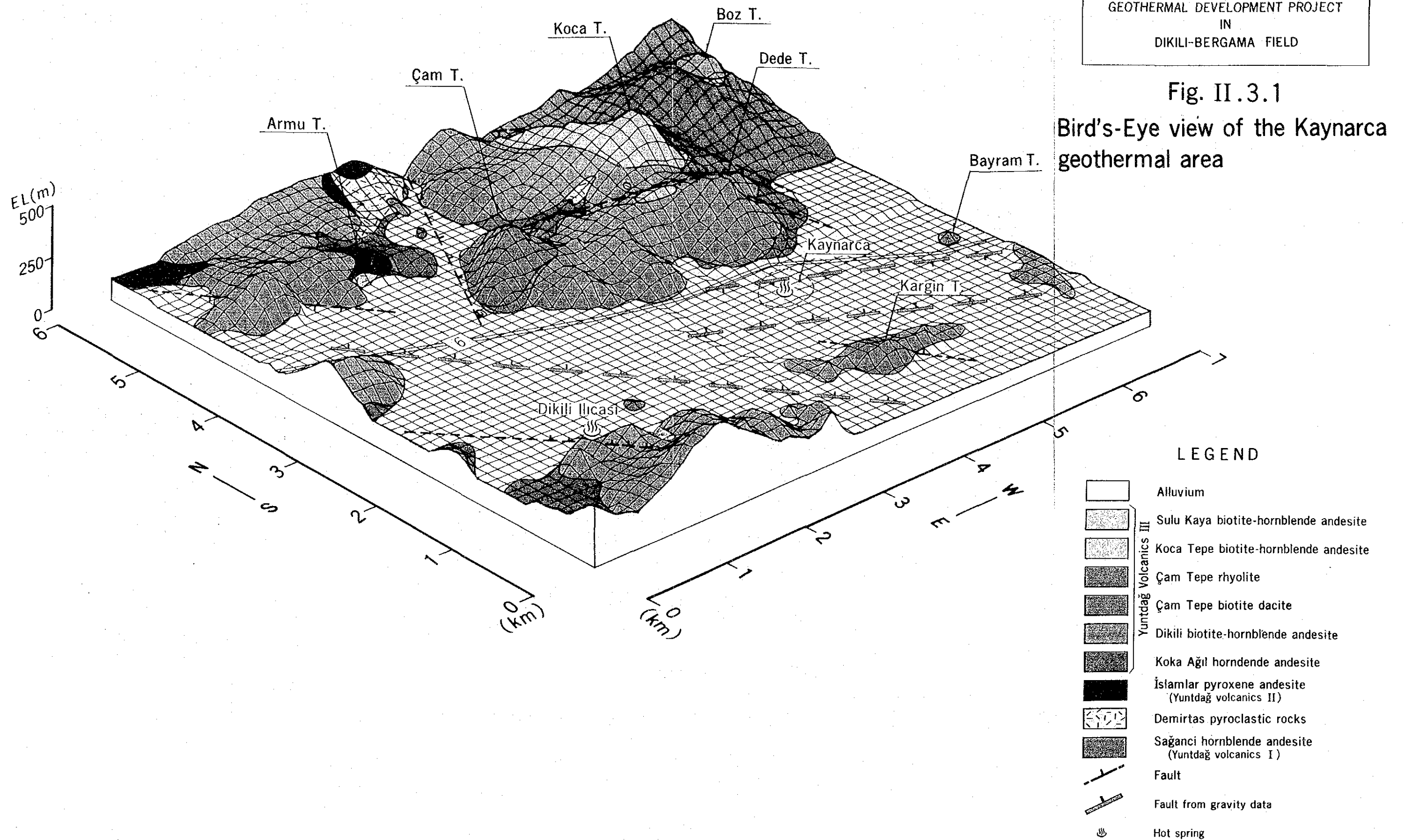


Fig. II.3.1

Bird's-Eye view of the Kaynarca geothermal area

LEGEND

- Alluvium
- Sulu Kaya biotite-hornblende andesite
- Koca Tepe biotite-hornblende andesite
- Çam Tepe rhyolite
- Çam Tepe biotite dacite
- Dikili biotite-hornblende andesite
- Koca Ağıl hornblende andesite
- İslamlar pyroxene andesite (Yuntdağ volcanics II)
- Demirtas pyroclastic rocks
- Sağanci hornblende andesite (Yuntdağ volcanics I)
- Fault
- Fault from gravity data
- Hot spring

Demirtas火山碎屑岩類, Yuntdağ火山岩類Ⅱ, Ⅲおよび沖積層からなる。更に調査地域の地表には露出していないが地下にはSoma層, 先第三紀層及びKozak花崗岩類が存在していると考えられる。本地域の鳥かん図をFig. Ⅱ. 3. 1 に示した。

- (2) 本地域で認められる火山活動は中新世のYuntdag火山活動Ⅰ, Demirtas火山活動, Yunt-dağ火山活動Ⅱ及び中新世から鮮新世にかけてのYuntdağ火山活動Ⅲである。

Yuntdağ火山活動ⅠはKozak岩体の南西山麓を中心に活動し, 大量の角閃石安山岩を噴出することにより広大な溶岩台地が形成した。さらにこの台地を覆うようにDemirtas火山活動による珪長質の火山碎屑岩が堆積した。この火山活動の中心はDikili南方のDemirtas周辺と思われる。Demirtas火山活動に続き, ほぼ同じ活動場で, Yuntdağ火山活動Ⅱが始まった。この活動はやや苦鉄質で, 玄武岩や輝石安山岩溶岩が噴出している。その後Yuntdağ火山活動Ⅲにより多数のドーム状火山が形成され, 現在のKaynarca周辺の地形の原形が作られた。Yuntdağ火山活動Ⅲの後期には, Çam Tepe周辺で石英安山岩がNE系の割れ目に沿って噴出し, 次いで流紋岩溶岩が流出した。その後, 活動はやや東に移り, Kaynarca北方の2つの地域Koca Tepe, Sulu Kayaで黒雲母・角閃石安山岩からなる溶岩ドームが形成されている。これらの溶岩ドームの形成は, 調査地域で最も新しい火山活動と考えられる。

- (3) 本地域はFig. Ⅱ. 3. 2地質図に示したようにNW系の断層によって切られた地質ブロックが調査地域の中央部に向って段階的に落ちこんでいる地溝帯構造で特徴づけられる。このNW系の断層運動はYuntdağ火山岩類Ⅰの噴出後(中新世中期)に始まり, 地溝帯の形成に係わる主要な活動はYuntdağ火山岩類Ⅲの噴出前にはほぼ終了したと考えられる。その後, この断層運動によって生じた陥没部を, Demirtas火山碎屑岩やSoma層あるいはYuntdağ火山活動Ⅱの噴出物が埋めていったと思われる。しかしYuntdağ火山岩類Ⅲ中に, NW系の割れ目や熱水脈が多くみられることから, このNW系の断層運動はYuntdağ火山岩類Ⅲ噴出後も, 継続したと推定される。

- (4) 本調査では137の露頭において558個の割れ目を測定し, 地区毎の割れ目の分布をFig. Ⅱ. 3. 3に示した。割れ目の測定にあたっては, 熱水脈を伴う割れ目や連続性のある割れ目のみを選んだ。割れ目の分布をみると, 本地域ではNW-SE方向が卓越しているとともに, Fig. Ⅱ. 3. 4でみられるように同方向に大きな熱水脈も集中している。一方, Çam Tepe周辺では局地的に, NE-SW系の割れ目が認められる。

また, これらの割れ目の分布をもとに応力場解析を行なった結果, Fig. Ⅱ. 3. 5に示したように大部分の割れ目がNE-SW方向の張力場で形成されたことが明らかになった。

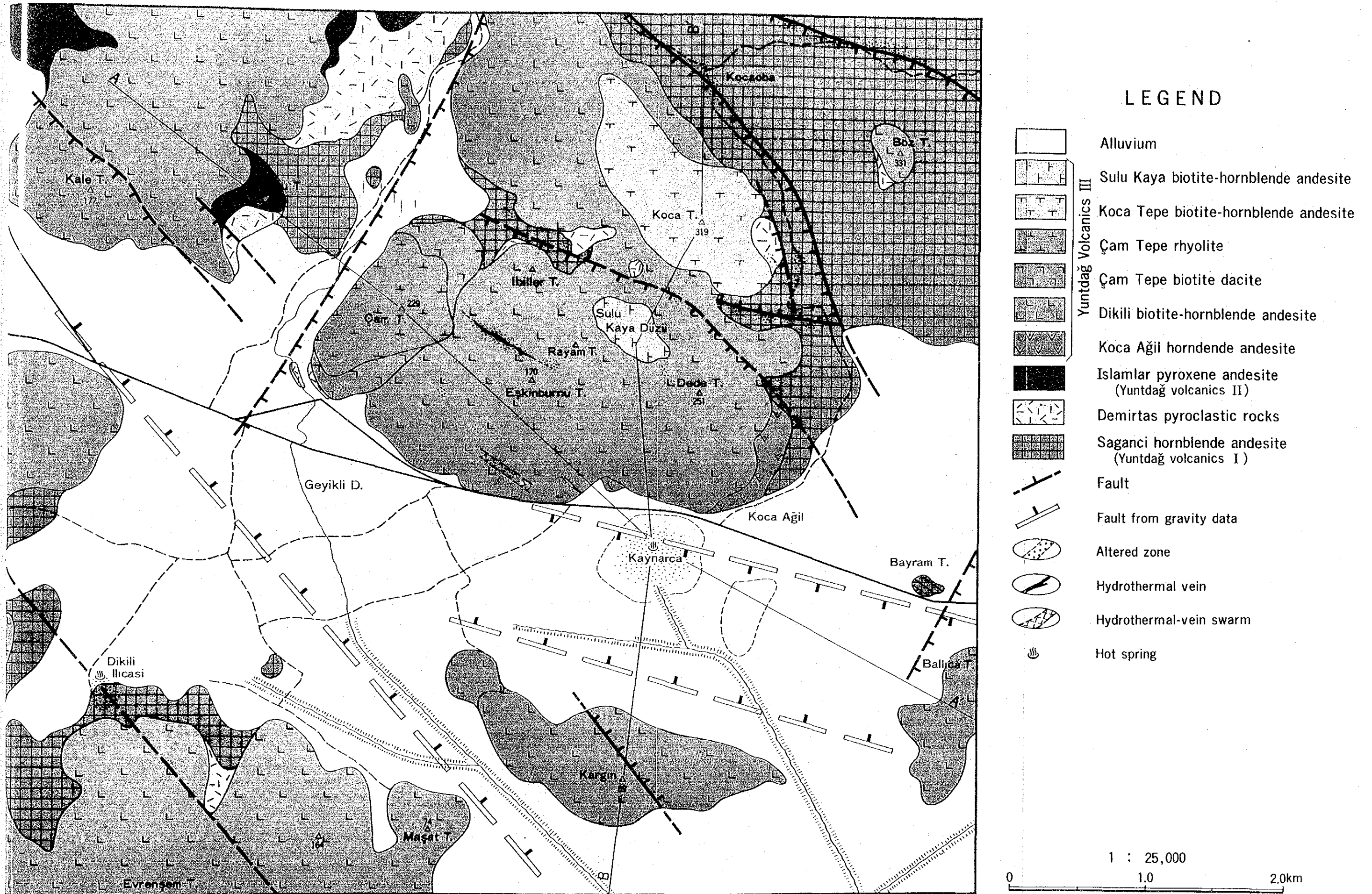


Fig. II .3.2 Geological map of the Kaynarca geothermal area

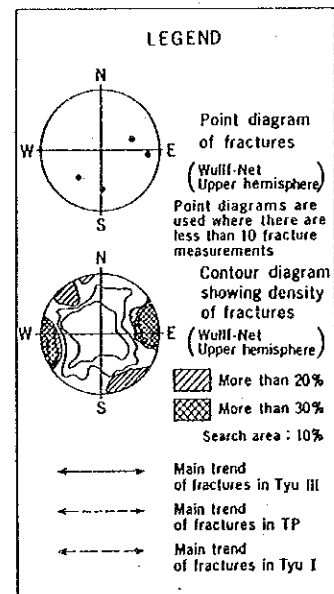
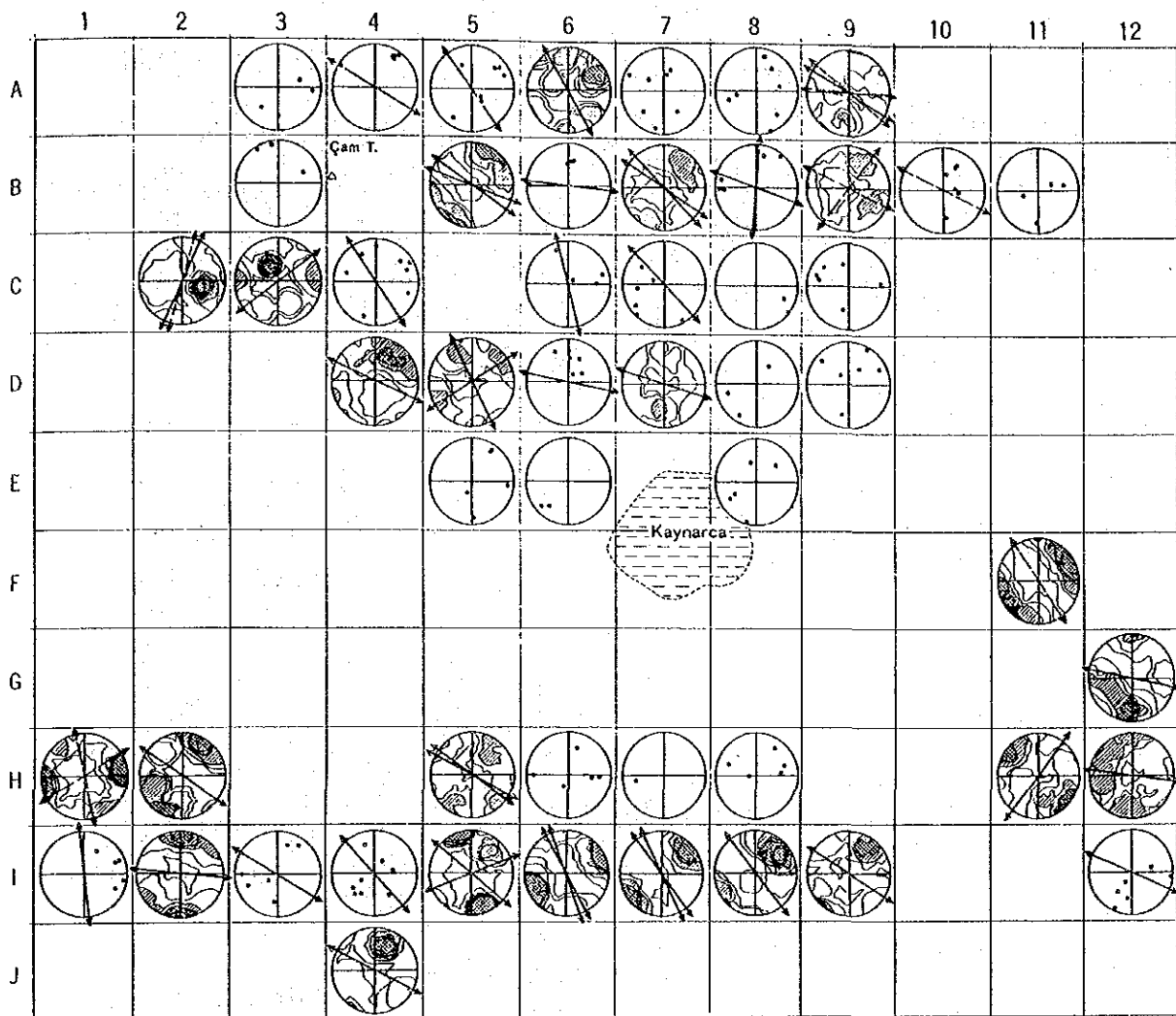
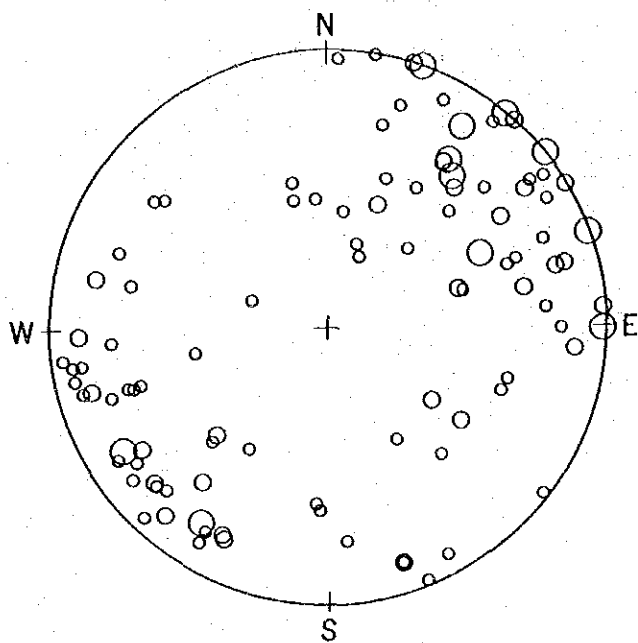


Fig. II.3.3 Composite map showing fracture pattern in the Kaynarca geothermal area

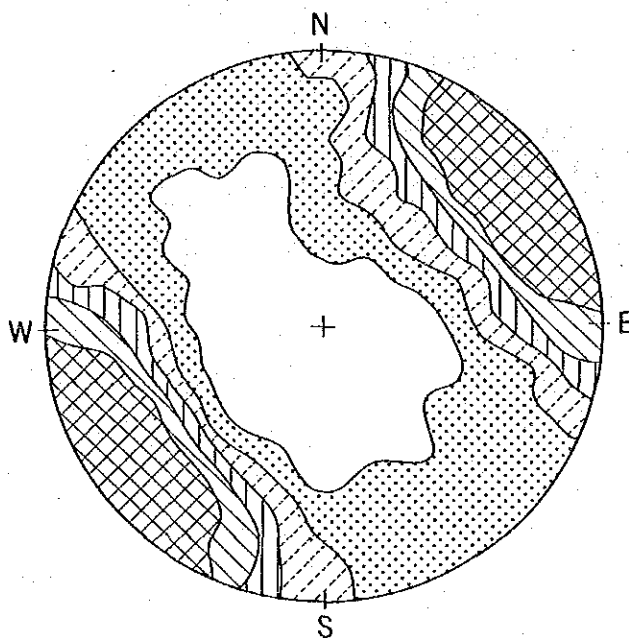


POINT DIAGRAM

Wulff-Net
(Upper hemisphere)

(Width of vein)

- More than 10cm
- 1~10cm
- Less than 1 cm



CONTOUR DIAGRAM

Wulff-Net
(Upper hemisphere)

(Density of veins)

- Less than 5 %
- ▤ 5~10%
- ▥ 10~15%
- ▧ 15~20%
- ▨ 20~25%
- ▩ More than 25%

Counting area for
contour diagram = 10%

Fig. II. 3. 4 Plot of width and orientation of hydrothermal veins in the Kaynarca geothermal area.

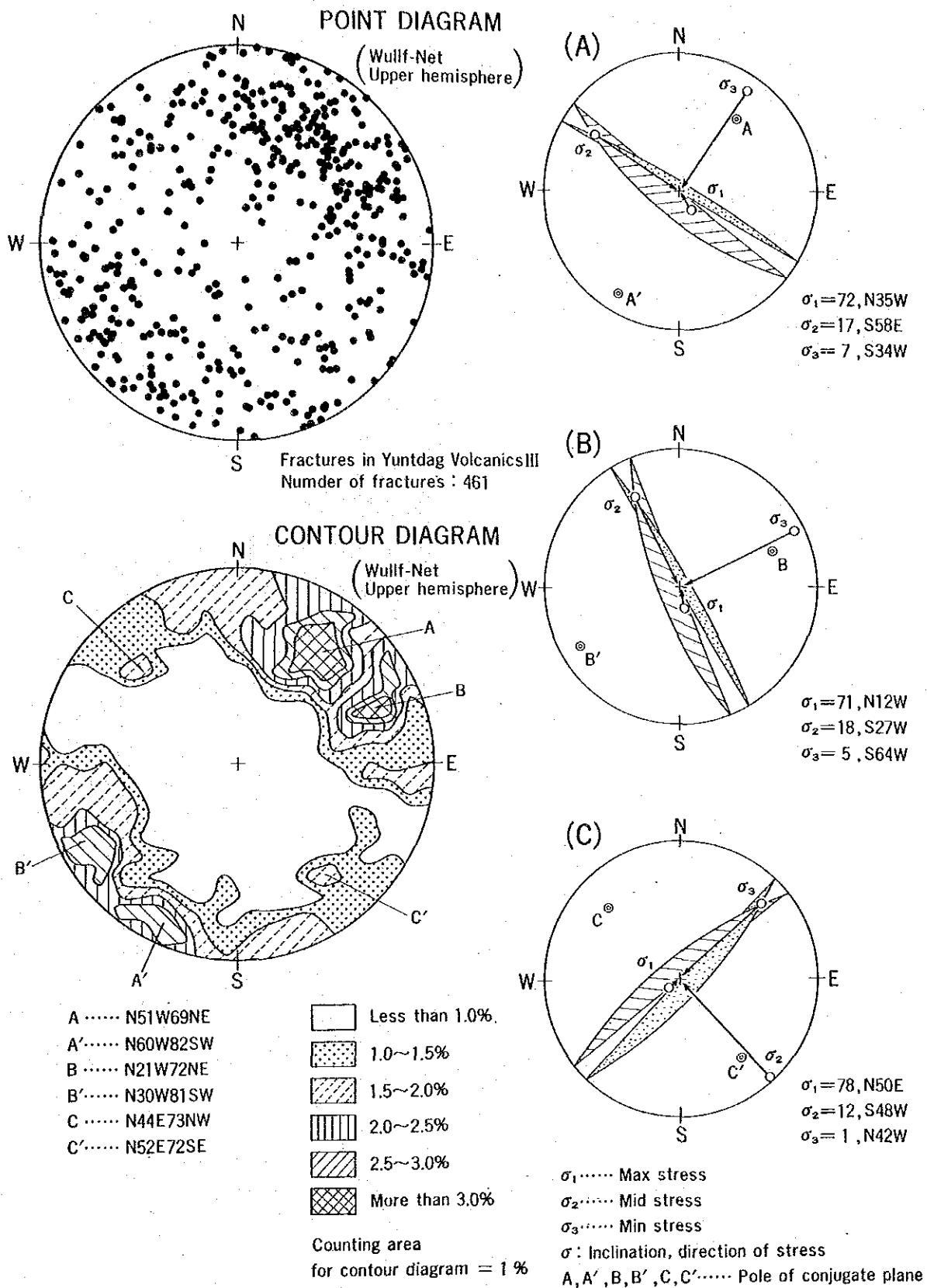


Fig. II. 3.5 Presumed stress field in the Kaynarca geothermal area

GEOTHERMAL DEVELOPMENT PROJECT IN DIKILI-BERGAMA FIELD

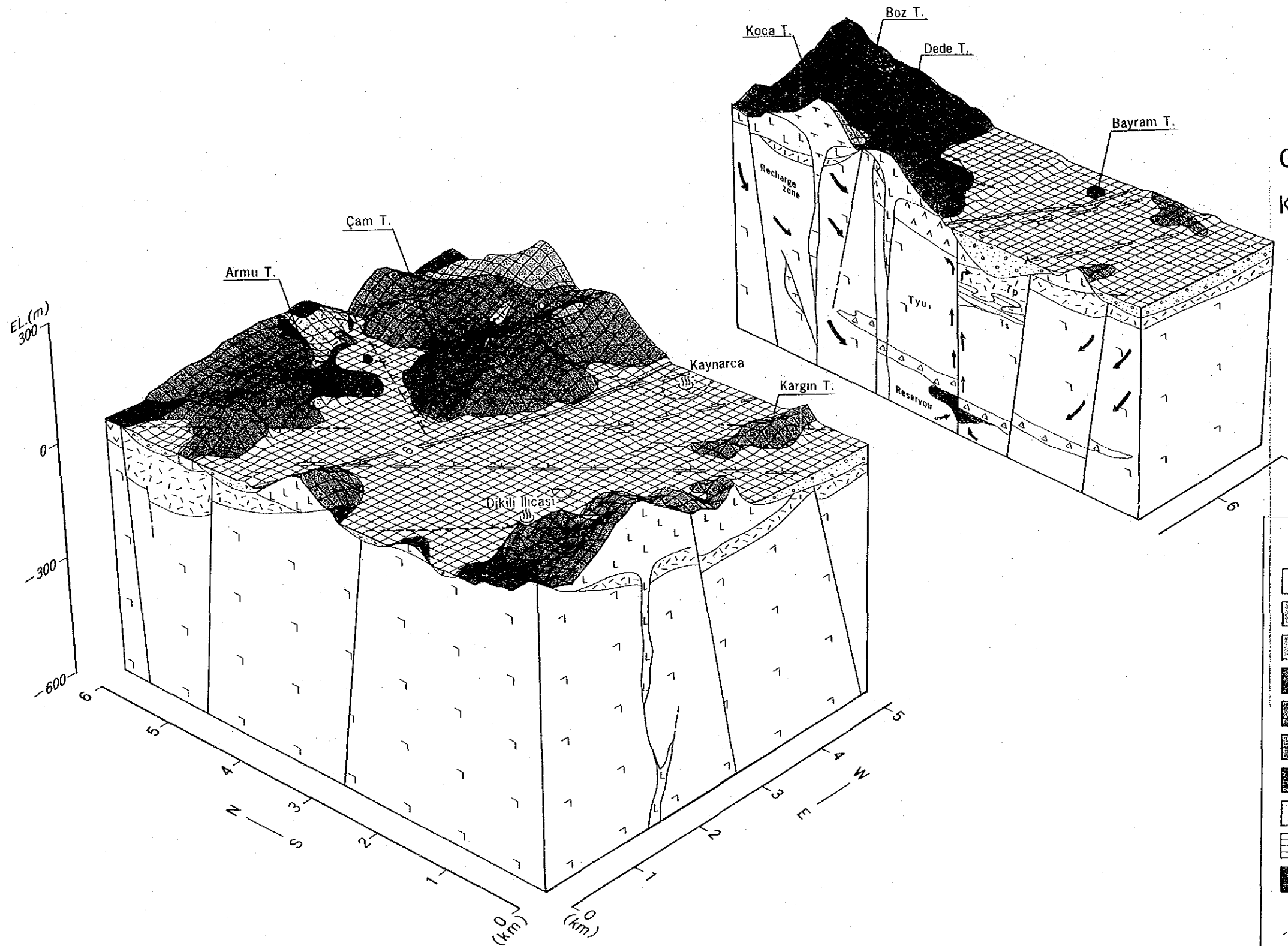


Fig. II.3.6

Geothermal structure of the Kaynarca geothermal area

LEGEND

- | | | | |
|--|---|--|---|
| | Alluvium | | Altered zone |
| | Sulu Kaya biotite-hornblende andesite | | HCO ₃ (-SO ₄) type reservoir |
| | Koca Tepe biotite-hornblende andesite | | Fault |
| | Çam Tepe rhyolite | | Upflow of thermal fluid |
| | Çam Tepe biotite dacite | | Inflow of cold water |
| | Dikili biotite-hornblende andesite | | Hot spring |
| | Koca Ağıl hornblende andesite | | |
| | İslamlar pyroxene andesite (Yuntdağ volcanics II) | | |
| | Ts : Soma Formation | | |
| | Tyu 1 : Yuntdağ Volcanics I | | |

- (5) Kaynarca地熱地帯の地熱構造図をFig. II. 3. 6に示した。本地域における最も新期の火山活動であるSulu KayaとKoca Tepeの2つの火山はKocaoba温泉とKaynarca温泉のほぼ中間に位置しており、これらの後火山作用は現在の地熱活動の熱源となっている可能性が高い。

Kozak岩体の南西麓で流入した地表水(天水)は、この熱源によって加熱され、先第三紀層からなる基盤岩の上面にそって地溝帯陥没部方向へ流動している。熱水は深部では基盤岩とYuntdağ火山岩類Iの境界付近や断層周辺の破碎帯、浅部ではYuntdağ火山岩類Iの割れ目に貯えられ、熱水貯留層を形成していると考えられる。またその際Yuntdağ火山岩類I中に挟まれた凝灰角礫岩層は帽岩の役割をしていると推定される。これらの熱水貯留層から、一部の熱水が地溝帯を形成している断層や、それに伴う割れ目に沿って上昇し、Kaynarca周辺の温泉、噴気帯を形成していると考えられる。

2. CSAMT法探査

本調査ではKaynarca地熱地帯の電氣的地下構造を把握し、熱流量調査に使用する測温孔掘削位置選定のための資料を提供した。

地域の地熱構造は次の通りである。Fig. II. 3. 7にCSAMT法探査総合集約図を示す。

- (1) 見掛比抵抗分布から主として以下の3本の線構造が推定される。

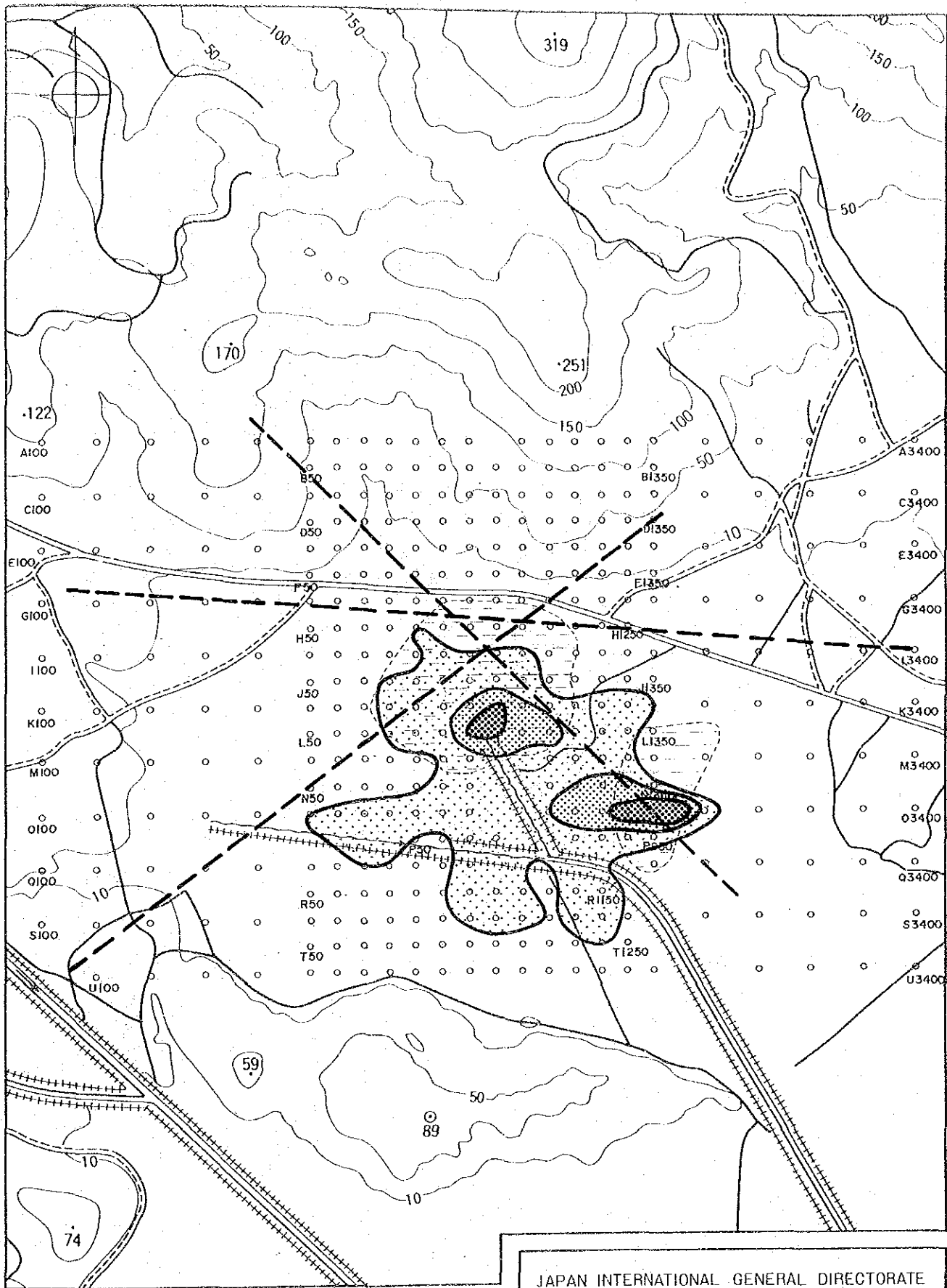
- (a) Kaynarcaのやや北側を通る、概ねEW方向に延びる線構造
- (b) Kaynarcaを通り、NW-SE方向に延びる線構造
- (c) Kaynarcaを通り、NE-SW方向に延びる線構造

ただし、本線構造は(b)の線構造の示徴に比べるとやや弱い示徴である。

- (2) 上記の(b)及び(c)の線構造に挟まれた交点及びその南部側は、高縦電導度域であり、本地域の地熱構造を理解する上で重要である。この高縦電導度域は、主としてKaynarcaを中心として認められることから、同地域の高温の温泉帯水層及び浅部に広範に分布する熱水変質帯等に関連した示徴と推定される。

- (3) 深部の比抵抗分布から、調査地域には、NW-SE方向の断裂系の存在が推定され、また、同様に、Kaynarcaから西部あるいは南西部に延びる構造の存在が推定される。ただし、それは、NW-SE方向の線構造に比較するとその示徴は弱い。

- (4) 2次元モデル計算結果から、調査地域の地熱構造は、断層構造であると推定され、上記(a)~(c)の線構造は本調査地域の地熱流体の動きを支配する重要な断層であると推定される。



Legend

- A100 station number and location
-
- high longitudinal conductance zone
- - - estimated faults

FigII.3.7

Geothermal structure
estimated from CSAMT

JAPAN INTERNATIONAL GENERAL DIRECTORATE
COOPERATION AGENCY OF MINERAL RESEARCH
AND EXPLORATION

GEOTHERMAL DEVELOPMENT PROJECT
IN
DIKILI-BERGAMA FIELD

