

ケニア共和国
リフト溪谷
地熱開発計画調査報告書

概 要

昭和55年7月

国際協力事業団

JICA LIBRARY



1075613(8)

19434

ケニア共和国
リフト溪谷
地熱開発計画調査報告書

概 要

昭和55年7月

国際協力事業団

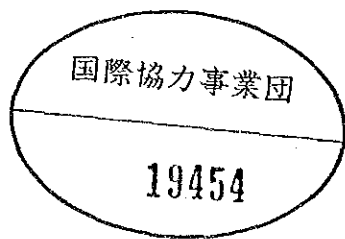
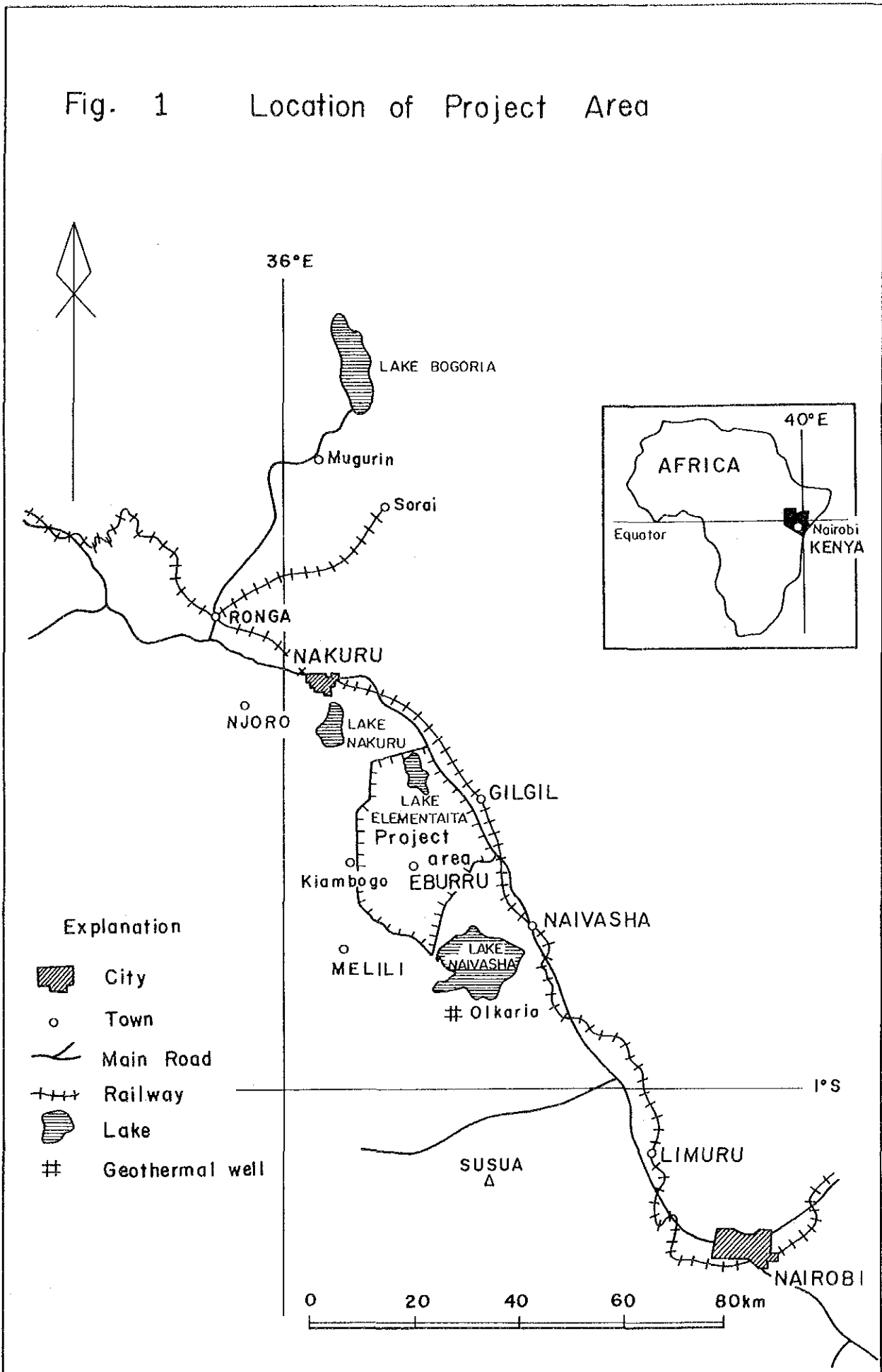


Fig. 1 Location of Project Area



Explanation







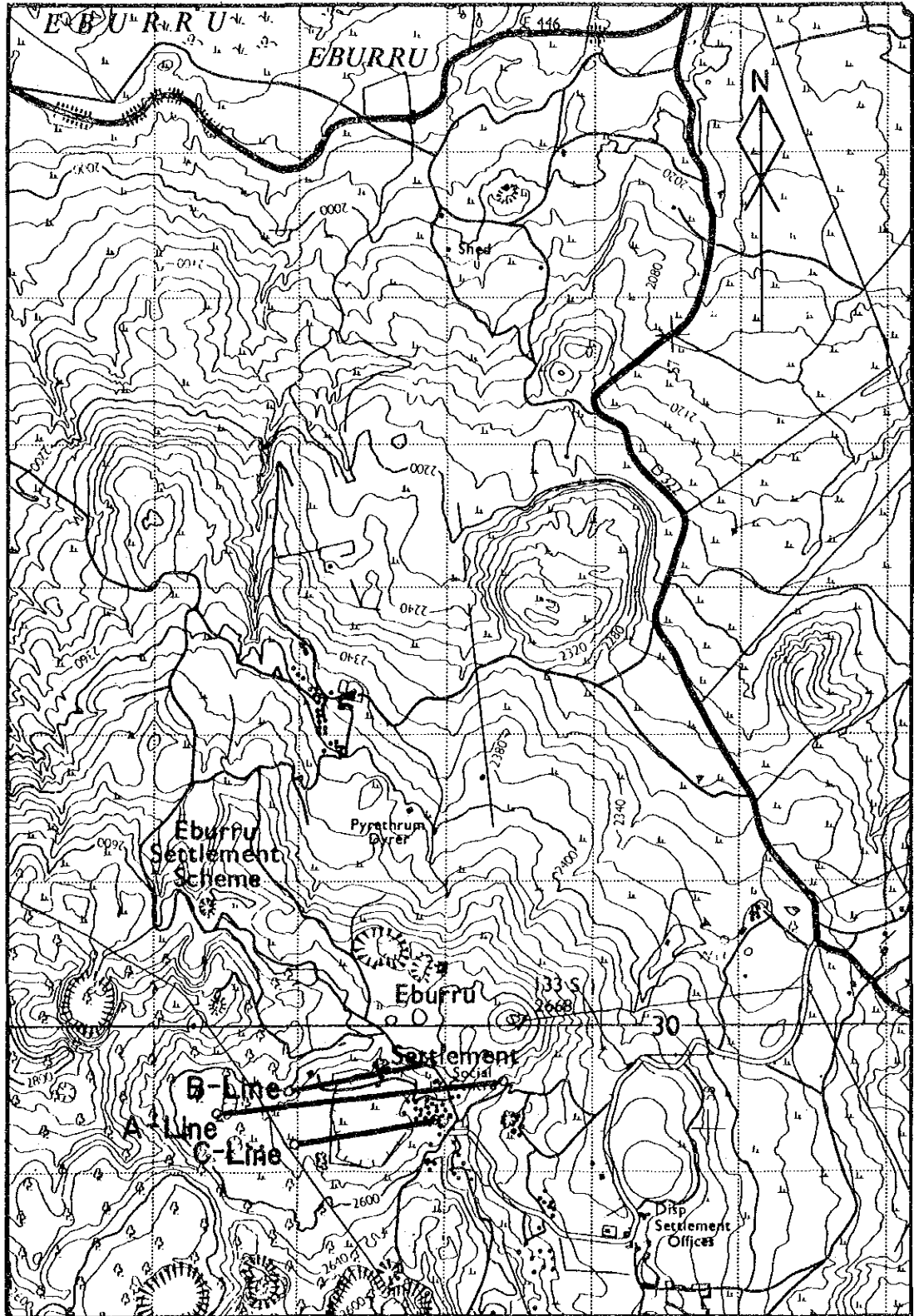
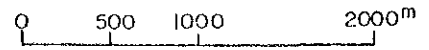
-  City
-  Town
-  Main Road
-  Railway
-  Lake
-  Geothermal well

Fig. 2 Location of Project Ared
(Survey Lines)



目 次

1. 調査の経緯	1
2. 調査の目的	2
3. 調査地域の位置・交通	2
4. 調査項目	3
5. 調査団の構成及び日程	4
6. 調査の内容	5
7. 結論と勧告	9

1. 調査の経緯

ケニア共和国は水力以外、化石燃料エネルギー資源に恵まれず、火力発電用等の石油は全て輸入に頼っている。発電能力も充分ではなく、不足電力の約3万KWを隣接するウガンダ共和国より購入している。近年の原油価格の高騰により火力発電能力増強は不可能となり、タナ川(Tana River)流域における水力発電及びその他新しいエネルギー資源に目を向ける必要が生じていた。

ケニア共和国のリフト溪谷は、世界的に知られた東アフリカ大地溝帯に属し、活発で若い火山帯であると共に優勢な地熱地帯である。

これらの背景に基き、ケニア政府は1950年代から地熱の予備調査を開始し、1956年～58年にはリフト溪谷のOlkaria地区で2本の調査井を掘削したが、十分な蒸気が得られなかった。1970年～74年には国連開発計画(UNDP)による地熱調査(地質調査、物理探査、地化学調査、調査井掘削等)がリフト溪谷特にその南部地域一帯にかけて行なわれた。

この間、1972年に国連開発計画に基づく派遣技術団により主要地熱地帯の評価が行なわれ、Olkaria, Eburru, Lake Bogoria(当時はLake Hanningtonと呼称された)の3地区が開発有望地域と選定された。

上記3地区のうち、開発上最優先されたOlkaria地区においては、動力通信省(Ministry of Power and Telecommunication)の下でKenyan Power Co.(KPC)が統轄し、East African Power and Lighting Co.(EAPL)が第2世界銀行の協力を得て生産井の掘削および地熱発電所を建設中である。地熱発電所建設第1期工事(15MW)は1981年完成予定で、日本の三菱重工業株式会社の手で進められている。なお第2期工事(15MW)は、1983年完成予定である。

一方、Eburru, Lake Bogoriaの2地区は、概査の結果きわめて有望視されながらも、各種精密調査を実施し、有望な地熱資源を確認するための資金および技術員の不足から、国連開発計画調査以降開発調査は行われなかった。

天然資源省鉱山地質局(Mines and Geology Department, Ministry of Natural Resources)は、地熱開発調査を行うにあたり、技術者の訓練

を含み地熱探査の実施を日本政府に要請して来た。

1979年11月ケニア共和国内において内閣改組が行われ、新たにエネルギー省 (Ministry of Energy) が設立された。地熱エネルギーの調査・開発全般にわたリエネルギー省の管轄になるとともに、発電・配電関係のKPCや EAPL も組織的にその指導下に含まれ、地熱エネルギーについては一本化された。

上記要請に基づき日本政府は、昭和54年2月1日から2月23日に至る23日間に事前調査団 (団長 山崎達雄氏) を現地派遣して、今回の地熱調査計画およびこれにともなう技術援助計画の策定を行った。

ケニア共和国は、リフト溪谷内の地熱エネルギーポテンシャルの調査として、5年間で Eburru と Lake Bogoria の2地区の精査と、リフト溪谷全域の広域地熱資源概査を希望していたが、この事前調査の結果、3年間で Eburru 地域の地熱資源精査を行うことが最適と決定された。

2. 調査の目的

この計画調査は、ケニア共和国エネルギー省が計画しているリフト溪谷地熱開発計画に関し、過去に実施された調査資料を考慮して、当面次期開発区域である Eburru 地区の地熱地帯開発の可能性を、その地熱エネルギー埋蔵量の面から調査するとともに、ケニア人技術者の教育訓練を含むものである。

3. 調査地域の位置・交通

ケニア共和国は、アフリカ大陸の東部インド洋に面した国で、全国土面積は、 $582,646 \text{ km}^2$ を有し日本の約1.5倍あり、全人口は14,856,000人で日本の約7分の1である。その位置は、東経 $33^{\circ} 55'$ から $41^{\circ} 53'$ 、北緯 $5^{\circ} 1'$ から南

緯 $4^{\circ} 40'$ に至る赤道直下の範囲にある。首都は Nairobi であり、主要都市としては、東アフリカ諸国の貿易の中心地 Mombasa がある。

調査地域 (Eburru 地域) は、南緯 $0^{\circ} 39'$ 、東経 $36^{\circ} 17'$ 付近を中央として、東西 25 km、南北 30 km に及ぶ範囲を占め、行政的には Rift Valley 州に所属している。

本地域の南方には、リフト溪谷唯一の淡水湖である Naivasha 湖があり、更にその南方約 20 km に現在地熱発電所を建設中の Olkaria が位置する。一方本地域の北方には、Elementaita 湖及び、Gilgil, Nakuru の町がある。

首都 Nairobi から調査地に至る交通路としては、Nairobi-Naivasha 間は、ウガンダ共和国への主要交通路である国道 A 104 号線が利用される。次いで、Naivasha から調査地間は、上記国道から西方に向い支線砂利道約 20 km によって調査地に達する。

この経路を利用すると Nairobi から距離約 150 km、2 時間程の自動車旅行で調査地に到達する。

4. 調査項目

今回の調査は、地質調査、地化学調査、物理探査より成る。各調査手法別の調査内容は下記のとおりである。

(a) 地質調査

地質概査

赤外線温度計による地熱微候地における地表温度 9 点

(b) 地化学調査

土壌空気中の水銀濃度測定 7 2 点

土壌空気中の CO_2 濃度測定 7 2 点

1 m 深地温測定 7 2 点

土壌サンプル採取 7 2 個

凝縮水採取 8 個

気温及び気圧測定

(c) 物理探査

シュランベルジャー電極配置による垂直電気探査

測線長 4 km

測点数 7 点

5. 調査団の構成及び日程

本調査団の編成は次の通りである。

団長	本島 公 司	工業技術院地質調査所
地質担当	馬場 健 三	工業技術院地質調査所
物探担当	大屋 峻	三井金属エンジニアリング株式会社
物探担当	水口 忠 夫	三井金属エンジニアリング株式会社
地化探担当	広渡 和 緒	三井金属エンジニアリング株式会社
業務調整	竹本 節 生	国際協力事業団鉱工業計画調査部

本調査団の現地における調査日程は次の通りである。ただし本調査団団長本島
公司は、本調査に引続き国際協力事業団派遣専門家として昭和58年までの予定
で、ケニア共和国に駐在している。

	1979 年			1980 年		
	10月	11月	12月	1月	2月	3月
予 察 調 査	22	5				
資料検討調査準備			3	19		
現地野外調査			19		4	
報告書作成 総合検討					5	10

6. 調査の内容

6-1 地質調査

(i) 一般的な地質

ケニアの地熱地帯は、いずれもリフト溪谷（東アフリカ地溝とも呼ばれる）に位置し、Eburru地域もその例外ではない。

アフリカ大陸東部の台地状高地の中央部を、ほぼ南北方向に連なる凹地地形のリフト溪谷は、北はエチオピア北部ジブティの Afar 凹地において紅海およびアデン湾の地溝と交わっている。南はモザンビークを経てインド洋に達する延長 4,000 km に及ぶ大地溝である。その幅は平均 30~50 km で、広いところでは 100 km にも達している。

この大地溝帯は、Victoria 湖付近においては、それを挟むように東西 2 つの地溝に分岐し、それぞれ東部地溝、西部地溝とよばれるが、Nyasa 湖の北端で両び合流する、複雑な様相を呈している。Eburru を含むケニアの地熱地帯は、Victoria 湖東方の東部地溝に位置している。

本地域における火山活動としては、新第三紀及び第四紀の時代における活動で地溝帯内又は、その周辺に集中する。

この大地溝帯は、海嶺中央部凹地形に類似する活動帯であり、一般的には地熱資源開発上きわめて有望な場所といえる。しかし、東アフリカのリフト溪谷におけるプレートが移動する速度は、海嶺に比較し小さく、同じ様なプレート湧き出し地域であるカリフォルニア湾や、紅海アデン湾に比べても小さく、東アフリカ地溝帯の活動は微弱であると考えられている。しかし、活動度の弱い地溝帯内が、地熱資源開発上不利か否かは、簡単に判断し難い。

ケニアにおけるリフト溪谷の基盤岩類は、主にケニアの西・中央部に、リフト溪谷を挟むように分布している先カンブリア系の変成岩類と考えられている。構成岩石は主に片麻岩、片岩、珪岩、結晶質石灰岩などより成る。

Eburru 付近における基盤岩の深度については、今のところ不明であるが、Ojany and Ogendo の Kenya: A Study in Physical and Human Geography によるケニア全土の中新世下部層をはぎとった場合の基盤

面の深度分布図によると、海拔700m~900mと予想している。

Eburru地区はすべて第四紀更新世の下部から現世までの火山噴出物によって覆われている。下部には先述の基盤岩を不整合に覆って、新第三系の火山岩類があるものと予想されている。火山噴出物は火砕岩類、黒曜岩、コメンダイト、流紋岩などよりなる。新第三系火山岩類を含め、火山岩類の厚さは大略2,000m程度はありと考えられる。

火山噴出物は、ほぼ南北方向の数多くの断層によって切られている。この発達した断層群が地下深部よりの地熱流体の、よい通路となっていると予想される。地表の地熱徴候は随所に見られ、概ねカオリン化変質をうけている。現在稼行されているものはないが、カオリン採掘跡も調査地域内に数箇所存在している。さらに調査地域内には旧火口も多く認められる。

(ii) 地熱徴候

Eburru地区の地表地熱徴候地の分布については、国連開発計画による地熱報告書、1972年、*Chemical Characteristics of Water and Steam Discharges in the Rift Valley of Kenya*, by Glover R. B. 中に示されている。この報告書の第5図 *Ground Temperatures and Locations of Warm Ground at Eburru* がそれで、赤外線写真調査の結果が利用されている。

Gloverの記載によれば、Eburru地域のうち約44km²の範囲に170箇所のWarm Groundが存在する。地表の地熱徴候の数はきわめて多く、優勢な地熱地域と見ることが出来る。調査地東部は全域にわたり植生は豊かでないが、特にWarm Groundとされているところは、植生の少ない所が多い。このような所では、岩石の変質も見られる。

地表地熱徴候を、噴気孔・噴気地（噴気が、明らかな孔からでなく、どこからともなく広い範囲から噴出しているところ）・温泉・湯沼・坊主地獄などにわけて考えると、大きな放熱量を伴う噴気孔が存在する所はきわめて少なくむしろ噴気地と呼ぶべきところが多い。比較的浅部の地下水の存在によっても

たらされると考えられる温泉や湯沼は殆んど見当らない。Eburru地域では、浅い地下水が少ないので、その様な地熱徴候をもたらすに至っていないものと思われる。

Eburru地域の西部は、広大な森林地帯がある。前述の Warm Ground 分布図には、この森林の中に Warm Ground が殆んど記入されていないが、赤外線写真では、地表の Warm Ground が樹木で覆われ識別され得なかった可能性もある。この森林地帯は植生が密で、道路が開かれておらず、猛獣類も棲息し危険なので、今回の調査では踏査しなかった。

今回踏査した地熱徴候地で、多くの噴気孔は 90°C 以上とこの地域における水の沸点付近の温度を示し、噴気地も 80°C 前後を示すものが多い。本調査地域の多くの噴気孔・噴気地では、深さ数フィート程度の井戸があり、この井戸から採取した蒸気で、除虫菊の乾燥を行ったり、長いパイプの中で空冷し、生活用水に利用している。Eburruの森林地帯に隣接した噴気地・噴気孔では、他地点に比べ多量の噴気を出しているものもあり、その西方の Eburru 森林内に地熱地帯が延びていることを予想させる。

6-2 地化学調査

本調査地域は、プレートテクトニクス理論によるプレートの湧出する地域に相当する所と言われ、地下からの揮発性元素水銀の量が多いと考えられる。さらに気候は乾燥し、浅い地下水のある場合の地熱徴候である温泉等が見かけられない事から、浅部に地下水がほとんどなく、また地下地熱構造や地質構造の示徴となる水銀蒸気や炭酸ガスが比較的直つすぐ上昇すると考えられる事から、土壤空気中の水銀及び炭酸ガス濃度の測定を行なった。この測定と同時に土壤空気を採取する孔を利用し、地下 1 m 深の温度測定及び、その孔底における土壤試料採取を行なった。この採取された土壤試料は、ケニア共和国天然資源省鉱山地質局にて水銀分析が行なわれた。さらに噴気凝縮水試料も 8 箇所採取した。凝縮水試料も鉱山地質局にて、水銀及び砒素等の分析が行なわれた。

凝縮水試料採取以外の作業は、Eburru山（標高 2,668 m の三角点が設置された山をこゝでは Eburru山と呼ぶ）の西方 1 km にある直径 1 km 程度の

カルデラの内側及びその周辺に達する3本の測線(2km 1本及び1km 2本)に沿って、72点で行なわれた。

使用機器の主なものは下記の通りである。

土壌空気中の水銀濃度測定

Scintrex社製 HGG-3 Mercury Spectrometer

土壌空気中の炭酸ガス濃度測定

光明理化学工業製 北川式検知管

1m深地温測定

宝工業製 タカラサーミスター A-600

なお凝縮水は、採取直後に濃硝酸でPhを1以下にして、試料から水銀の揮散を防ぎ分析室に持参した。

6-3 物理探査

本調査地域では、過去に国連開発計画により、地熱開発を目的とした概査の一環とし、物理探査が行なわれている。この物理探査としては、重力測定及び、シュランベルジャー電極配置による直流垂直電気探査である。

重力探査は、岩石の密度差を利用し、地下の地層分布や、断層、貫入岩体の存在等の地質構造調査に利用されている。

電気探査は、地下の電気比抵抗分布を調査する事により、地下の地質構造を推定するものである。地熱貯溜層では、周囲と比較して温度が高くなり、周囲の地層に比べて電気比抵抗が低くなる事が多い。従って、地下の電気比抵抗分布を調べる事により、地熱貯溜層の位置を推定する電気探査法は、地熱概査にも精査にも有効な方法として広く利用されている。

電気探査法は、地下電気構造の水平分布を主として探査する水平探査法と、垂直分布を探査する垂直探査法の2つがある。今回の調査では、以前に行われた国連開発計画の調査方法と同じくシュランベルジャー(Schlumberger)電極配置による垂直電気探査を実施し、垂直方向ならびに水平方向の比抵抗分布を調査した。

電気探査の測定は、地化学探査に使用したEburru山西方のカルデラ内外に

設置した3本の測線を利用し、250 m間隔に7点の測定を行なった。最大電流電極間隔は1,000 mである。

使用機器は次の通りである。

送信機 : 横浜電子研究所製 L5202
受信機 : 東亜電波製 EPR-100A 記録計
発電機 : 新ダイワ工業製 2400

7. 結論と勧告

7-1 結 論

- (i) 地質概査の結果、本調査地域東部に、多くの噴気孔・噴気地は認められたが、温泉・湯沼等のような浅い地下水の存在を示唆するようなものは確認されなかった。
- (ii) 国連開発計画の調査においては、本調査地域西部の森林地帯には、あたかもWarm Groundがないように見えるが、これら森林地帯へ地熱地帯が延びている可能性を示唆するような徴候が認められた。
- (iii) 調査地域内には、噴気孔や噴気地が広く散在し、その温度も地表で90℃を越える高温のものもあった。
- (iv) 地化学探査の結果、1 m深地温が約90℃の値を示す異常に高い所が2箇所確認された。この各異常箇所は、ほぼ南北に延びていることがわかった。この1 m深地温の高い所とほぼ一致して、土壤空気中の水銀濃度が6 ng/ℓ以上、炭酸ガス濃度が20%以上と、周辺のバックグラウンド値、0.5 ng/ℓ及び0.5%前後に比し桁違いに大きくなっている。なお土壤中の水銀濃度の値も同様な傾向を示している。さらに、地表地質の観察によると、これらの南北に延びた異常帯の延長上に地質変質帯がある。
- (v) 土壤空気中の炭酸ガスは、地中に水分が多い場合吸収され、発生源の位置とあまり関係のない所に異常値が読み取られる事が多い。しかし、本地域で

は(ⅳ)で示したように、炭酸ガス濃度分布と、水銀濃度分布や1 m深地温分布が同様な傾向を示す事は、地下浅所に地下水が少ない事を示している。

- (ⅳ) 電気探査では、全ての測点で比抵抗の低い層が発見された。比抵抗値としては、多くの地熱貯溜層の比抵抗値である約 $10\Omega\cdot m$ の所もあった。
- (ⅳ) Eburruカルデラ内では、西に向い低比抵抗層が深くなっている。

7-2 勸告

本年度の調査により、本調査地域の地熱エネルギー埋蔵量は非常に大きく、地熱開発の有望地である事が判明した。さらに本年度使用した調査手法、即ち、垂直電気探査を測線に沿い連続的に行ない、土壌空気中の水銀濃度、炭酸ガス濃度及び、1 m深の地温分布調査を実施することが本地域の地熱調査に有効である事が判明した。これに基づき、Eburru地区で地熱開発を行なう具体的な地点を地質的に決定する為には、下記のような3段階に分けた調査を行なう事を勧告する。

7-2-1 広域調査

下記の手法を使い、本広域調査地域の中から、教箇所の約 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 程度の精査区域を抽出する。なおこの精査区域内での、温度勾配測定用試錐孔（深度400 m程度）約5本の位置の選定も行なう。

- (i) 地化学調査として、赤外線写真による地表Warm Ground分布図や、地表温度測定などから抽出された地熱開発有望地付近及び、その周辺部において、土壌空気中の水銀濃度分布、炭酸ガス濃度分布、1 m深地温分布調査を、少なくとも600点で実施する。
- (ii) (i)に記したと同じ地熱開発有望地付近及びその周辺部において、物理探査として、シュランベルジャー電極配置による垂直電気探査を、少なくとも測線延長15 km（測線本線5本）で、最大電流電極間隔 $3,000\text{m}(AB/2 = 1,500\text{ m})$ を実施する。
- (iii) 地質調査として、主要変質帯における変質帯分布の踏査及び、実験室内におけるX線回折分析等による鉱物学的調査を行う。さらに以上の調査を総括し、本地域の地質及び地熱構造を解明する。

7-2-2 精密調査

広域調査により抽出された精査地域において、次のような調査を実施し、広域調査により推定された本調査地域の地質及び地熱構造の概念をさらに確立し、本調査地域における地熱貯溜層の直接的な探査である深部探査の為に試錐の位置を決定する。

- (i) 深度400m程度の試錐を5本程度実施し、試錐孔内各深度での温度測定及び岩石コアの調査を行なうことにより、精査地域での温度勾配、地質構造を調査する。
- (ii) 広域調査で実施するのと同様な手法により、精査地域内をさらに詳しく調査し、地熱貯溜層に直接到達するような試錐の位置を選定する。

7-2-3 深部試錐

精査によって選ばれた最も開発に適した地点で、地熱貯溜層に到達するような試錐を実施し、深部までの地質構造を調査するとともに、貯溜層の位置、性質を調査し、出来れば噴出試験を行ない貯溜層の能力を調査する。本地域の南方で現在開発中のOlkaria地域での貯溜層の深さ及び、その標高とEburru地域との標高差、両地域の間にあるNaivasha湖の水面標高等から、本調査地域での地熱貯溜層は地表下1,000m以深にあると考えられる。従って、深部試錐は1,000m以上の深度が適当である。

JICA