

ケニア オルカリア地熱地帯

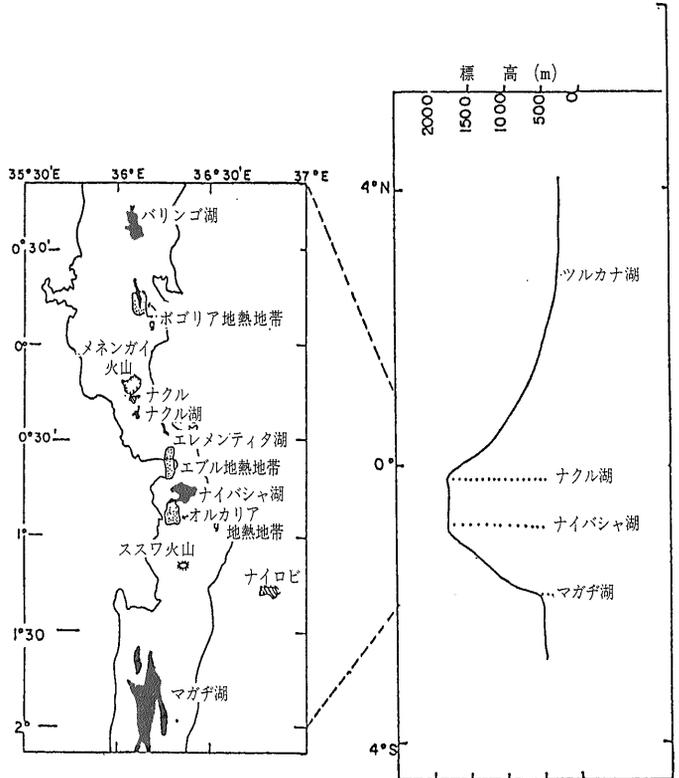
金原 啓 司 (地殻熱部)
Keiji KIMBARA

1 はじめに

東アフリカ大陸を紅海からエチオピアケニアを通してモザンビークに至るまで南北に走る地溝帯は 中央部のヴィクトリア湖周辺では東部リフトと西部リフトに分かれてはいるが 東アフリカ地溝帯 (East African Rift Valleys) もしくは大地溝帯 (Great Rift Valleys) と呼ばれて広く知られている (リフトバレーおよびケニアの地質については佐藤 (1983) によるくわしい紹介がある). ここには活火山が多いために 地熱地帯としても注目されており (第1図) ケニアでは以下述べるオルカリアで地熱開発が着々と進められており また隣国エチオピアにおいても首都アジスアベバの南 300 km の Lake District の地熱地帯内において発電を目的とした坑井調査が行われている.

アフリカ大陸赤道直下の国ケニアの首都ナイロビ (Nairobi) の北西約120km ナイバシャ (Naivasha) 湖の南10kmのリフトバレー (正確には東部リフト) 内のオルカリア (Olkaria) では アフリカ大陸では最初の地熱発電所が1981年7月に第1期分 15MWe の運転を開始した. 続いて1982年12月には第2期分 15MWe が さらに1983年度中には第3期分 15MWe が運転を開始し 最終的には 45MWe の地熱発電所になる予定とのことである. ちなみにここに設置されている発電設備は日本製であって その詳細は田原 (1982) によって紹介されている (写真1-4 第2図).

筆者は1980年~1981年と1982年の2回にわたって 国際協力事業団 (JICA) がケニア政府エネルギー省 (Ministry of Energy) と共同で オルカリア地熱地帯の北々東30kmのエブル (Eburru) 地熱地帯で進めている「リフト渓谷地熱開発計画調査」に調査団の一員として参加し その際何回かオルカリアにも訪問する機会に 恵まれた (第3図).



第1図 ケニア リフトバレーの地熱地帯と標高 (CRANE, 1981)

ケニアにおける地熱開発についてはすでにNOBLE and OJAMBO (1976) 馬場 (1979) 高木 (1979) などによって紹介されており また最近では本島 (1982) によるレポートもある. しかしながら開発に成功したオルカリアについては 必ずしも十分には紹介されているとは言い難いので ここでは訪問時に見聞した情報や入手した資料を基にしてこれに数少ない公表文献等の知識も加えて その紹介を行ってみたい. なおこの紹介記事を書くに当ってケニアへ訪問する機会を与えていただいた国際協力事業団と 現地地で資料入手等にあって便宜をいただいた 三井金属資源開発 (株) の関係者各位およびオルカリア地熱水の化学分析を行っていただいた技術部化学課阿部喜久男技官に厚くお礼申し上げます.



写真1
オルカリア地熱発電所の
全井と蒸気井群
中央に発電所冷却塔
右 黒
手に現世 Ololbutot
曜岩溶岩が見える (中央
奥の谷が Hell's Gate)

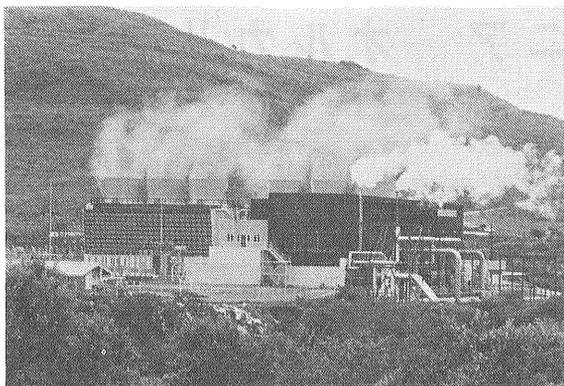
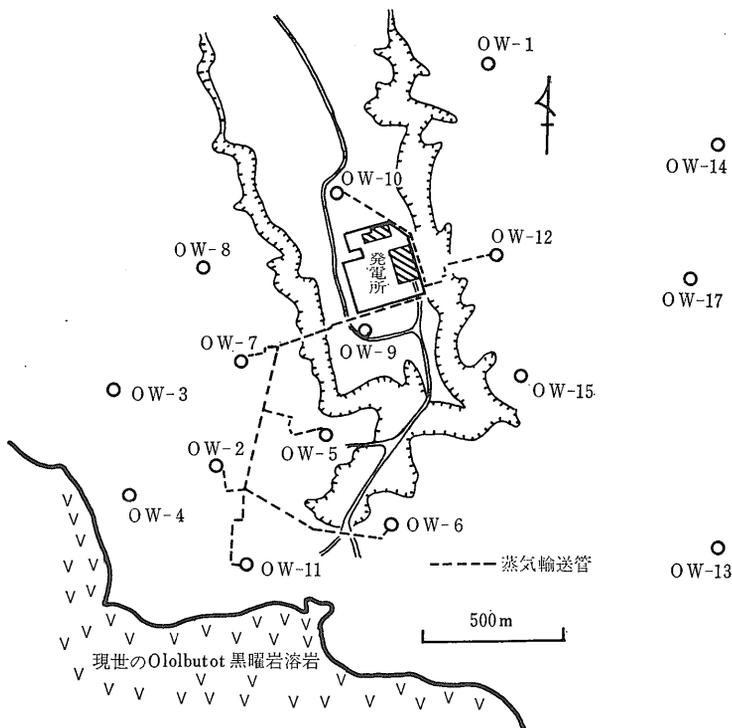


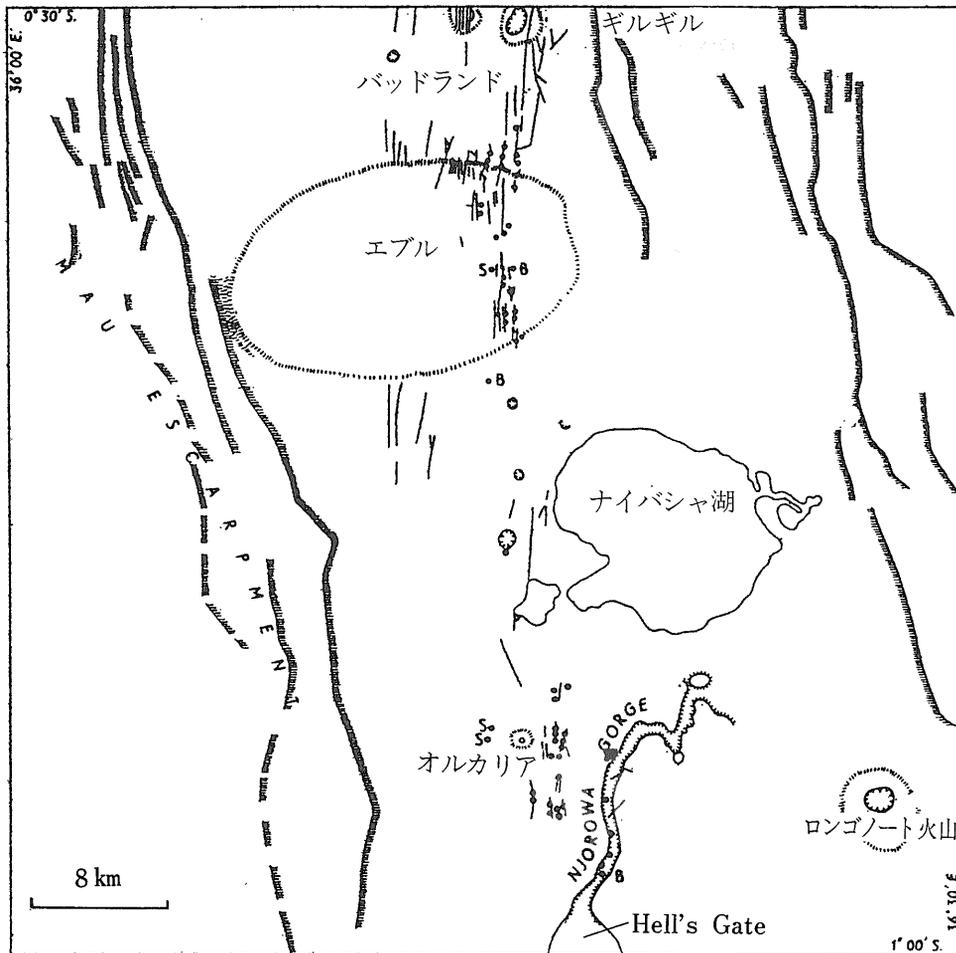
写真2 稼働中のオルカリア地熱発電所 (1982年12月)



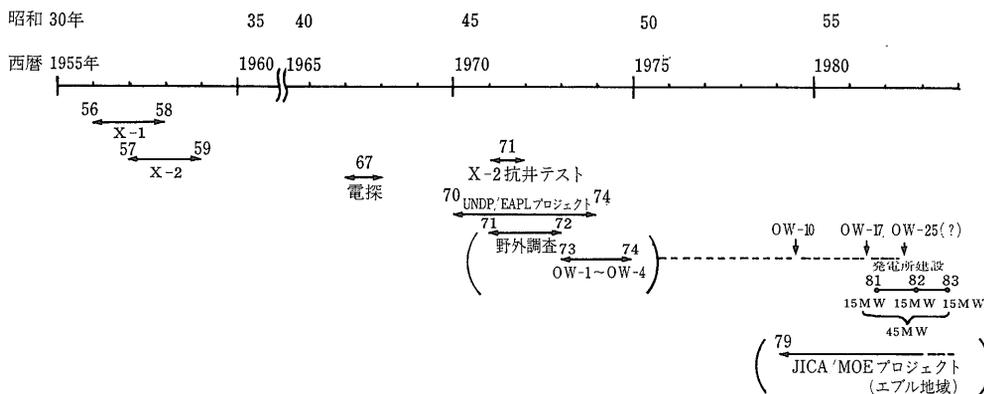
第2図 オルカリア地熱発電所の施設配置図

2 オルカリアの開発経緯

オルカリアでの地熱開発は 第4図に示すように実質的には1956年のX-1号井の掘削開始でスタートしている。すなわち1956年～58年にかけて深度502mまで掘削されたX-1号井は370mで120°Cの温度を得たが最終的にはこの坑井は放棄された。続いて1957年～59年に深度942mまで掘削されたX-2号井は坑底温度が220～240°C 地下水位が342mで エアーリフトによる噴出試験が行われたが 結局失敗に終わっている。



第3図 エブルおよびオルカリア地熱地帯 (THOMPSON and DODSON, 1963)



第4図 オルカリア地熱地域の開発史

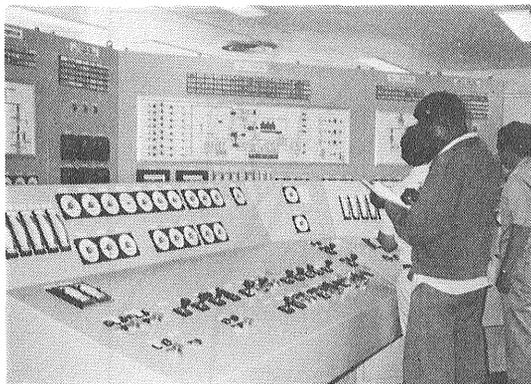


写真3 オルカリア地熱発電所のコントロールルーム

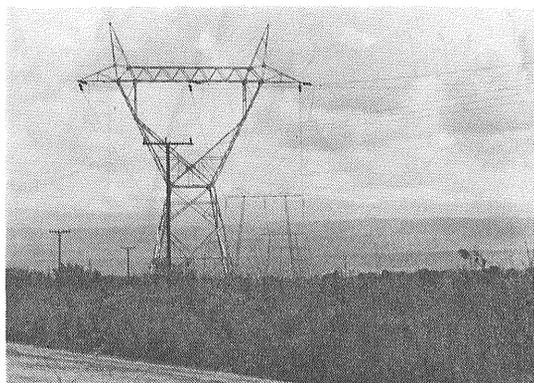


写真4 オルカリア地熱発電所の送電線鉄塔
この送電線（延長22km）によって後方（東側）のナイバシャのサブステーションに送り込まれている（後方にはリフトバレーの東側の断層崖が見える）

1960年代に入ると地熱開発に対する関心は低くなったが（1967年には電気探査が行われている）1960年代末になると再び地熱開発に対する関心は高まってきた。そして1969年にはケニア政府は国連に対して地熱開発のための援助要請を行い 1970年～74年にかけて国連（UNDP）とケニア側の窓口である EAPL (East African Power and Lighting Co.) との共同プロジェクトとして オルカリアを初めとしてエブル ハニングトン (Hannington) 湖（現ボゴリア (Bogoria) 湖）の三地熱地域で地熱開発調査がなされ その結果オルカリアが開発最優先地域に選定された。

UNDPの調査内容は地質・地化学調査および電気・重力・微小地震・赤外線熱映像などの各種物理探査と既存坑 (X-1 X-2号井) の坑井テストなどからなっていた。これらの調査結果に基づいて深度1000mを越す4本の坑井 (OW-1～OW-4) が掘削され その成功が現在の地熱発電所建設への足がかりとなっている。

3 オルカリアの地熱地質

ナイバシャ湖（湖面標高1,884m）の南約10kmに位置するオルカリア地域の地質については THOMPSON and DODSON (1963) により 1:125,000のナイバシャ地域の図幅中に記載されている。これによれば本地域の地質は主に更新世以降から現世にかけて リフトバレー内に噴出した粗面岩類 フォノライト類 コメンダイト類などのアルカリ岩類と黒曜岩類 玄武岩類などの大量の火山噴出物と低地帯を埋める湖成堆積物よりなっている。

その後上述の UNDP/EAPL 共同プロジェクトに基づいて NAYLORがこの地域の地質を詳細に調べ上げているが 残念ながらこのプロジェクトの報告書類はすべて未公表扱いとなっている。しかしながら BHOGAL (1980) および NDOMBI (1981) などの論文によって NAYLORが調べた地質の一端を知ることができる（第5, 6図）。

NAYLORはオルカリア地域に鮮新世に生じた約 13×9 kmの楕円状カルデラの存在を想定している。すなわち鮮新世に入ってオルカリア地域に粗面岩の活動がありその後環状の割れ目から大量のイグニブレイトが噴出しカルデラが形成された。更新世に入るとこのカルデラはコメンダイト質の堆積物 凝灰岩 溶岩により埋められ 完新世（過去1000年間）になるとこのカルデラの西側を横断して 南北方向に平行に発達する巾約1 kmの2本の軸に沿って火成活動が集中した。火口 流紋岩ドーム 噴気地帯などの地熱徴候（赤外線熱映像調査では第6図に示すような137ヶ所の高温度帯が検出されている）はほぼこの軸に沿って配列している。最も新しい活動は400年前に溢流した Ololbutot 黒曜岩溶岩であり これは地熱発電所のすぐ裏手（南側）に 植生もまだない生々しい状態で見ることができる（写真1参照）。オルカリア地域の高温度帯の広がりはおよそ50km²であり 以上述べてきたように現在もその地下には優勢な熱源が存在しているであろうことは容易に想像がつく。

標高1,950m前後のオルカリアは キリン シマウマなどの野生動物の生活するサバンナ地帯のなかにある。この西には標高2,400mを越す Elkariani 山があるものの年間平均降水量はわずか600mm前後しかないために普段は川とか沢には水の流れは全くない。そのようなわけで日本の地熱地帯のように温泉と呼ばれるものはほとんどなく ここでは地熱徴候とは噴気を伴う高温度帯のことであり 多くの場合その岩石はこの噴気活動によって変質している（写真5）。

4 地下地質

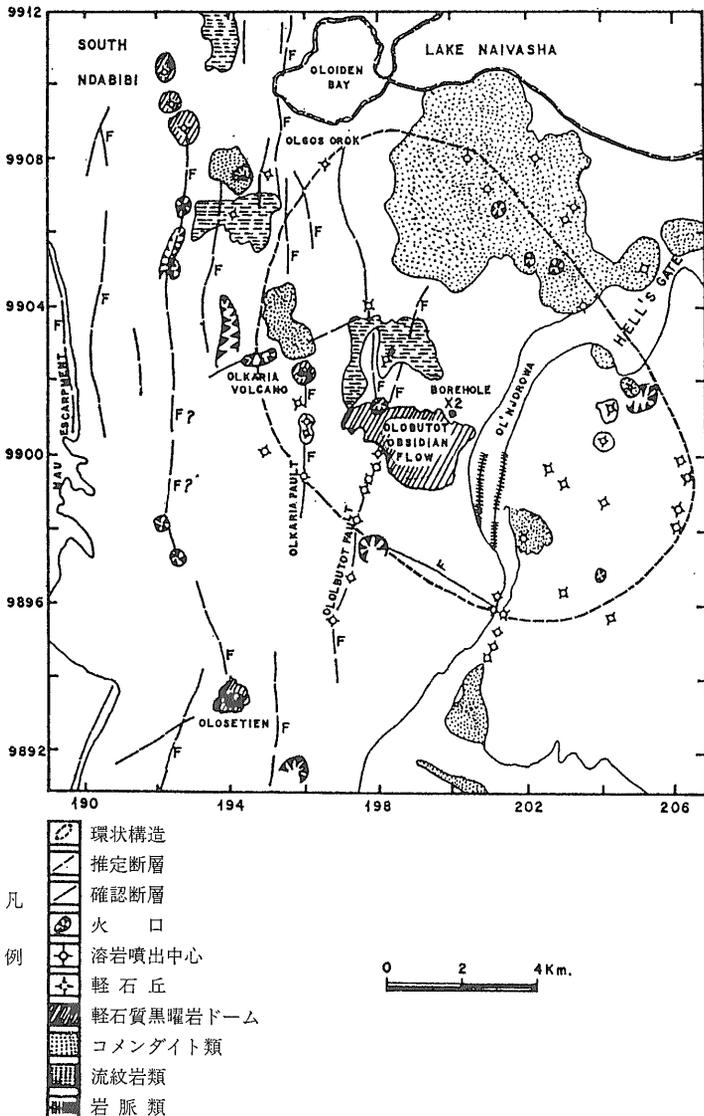
NDOMBI(1981)によれば HAMILTON らは NAYLOR の地質図を参考にしながら 地震波速度構造からオルカリア地区の地下地質を上位より流紋岩類 粗面岩類 フォノライト類 基盤岩類の4層に分類している(第1表)。ちなみにすでに述べた X-2 号井の地質を大まかに見ると 430m まではアルカリ流紋岩の一種であるコメンダイト類が続き 430m から坑底(942m)までは粗面岩類となっている(THOMPSON and DODSON, 1963)。X-2 号井以降25本近い坑井(オルカリア発電所のパンフレットによれば最深は OW-19 の2,500m であるが 本数についての情報は不正確)が掘削されているにもかかわらず 得られる地質試料がカッティングのみであるため 地下の地質はよくわかっていないのが現状のようである。

5 比抵抗・重力構造

オルカリアでは UNDP/EAPL 共同プロジェクトで米国の Group Seven 社によるダイポール法と これを補足するためのシュランベルジャー法(最大 $\frac{AB}{2} = 2,700m$) および電磁(EM)法の電気探査が行われている(第7図)。

これによればオルカリア地区には南北に細長く延びる比抵抗構造が認められ 特に現世の Oloibutot 黒曜岩溶岩分布地域を含む 地域に最大規模(約12 km²)の 20・Ωm 以下の低比抵抗帯が発達しており 結果的にはここが当面の開発地域となっている。

一方 UNDP/EAPL 共同プロジェクトによって作成された オルカリア地区のブーグ異常図(第8図)を見ると リフトバレーの広域的变化に対応して西側で重力値が規則的に減少している。 NOBLE and OJIAMBO (1976) はオルカリア地域では地質とブーグ異常の間には特別な関係は認められないとしている。しかしながら NDOMBI (1981) は局所的な重力異常を説明するために 第1表に示す HAMILTON らの P 波速度から岩石密度を推定し重力の二次元モデルを作成し 地質との関係を議論し

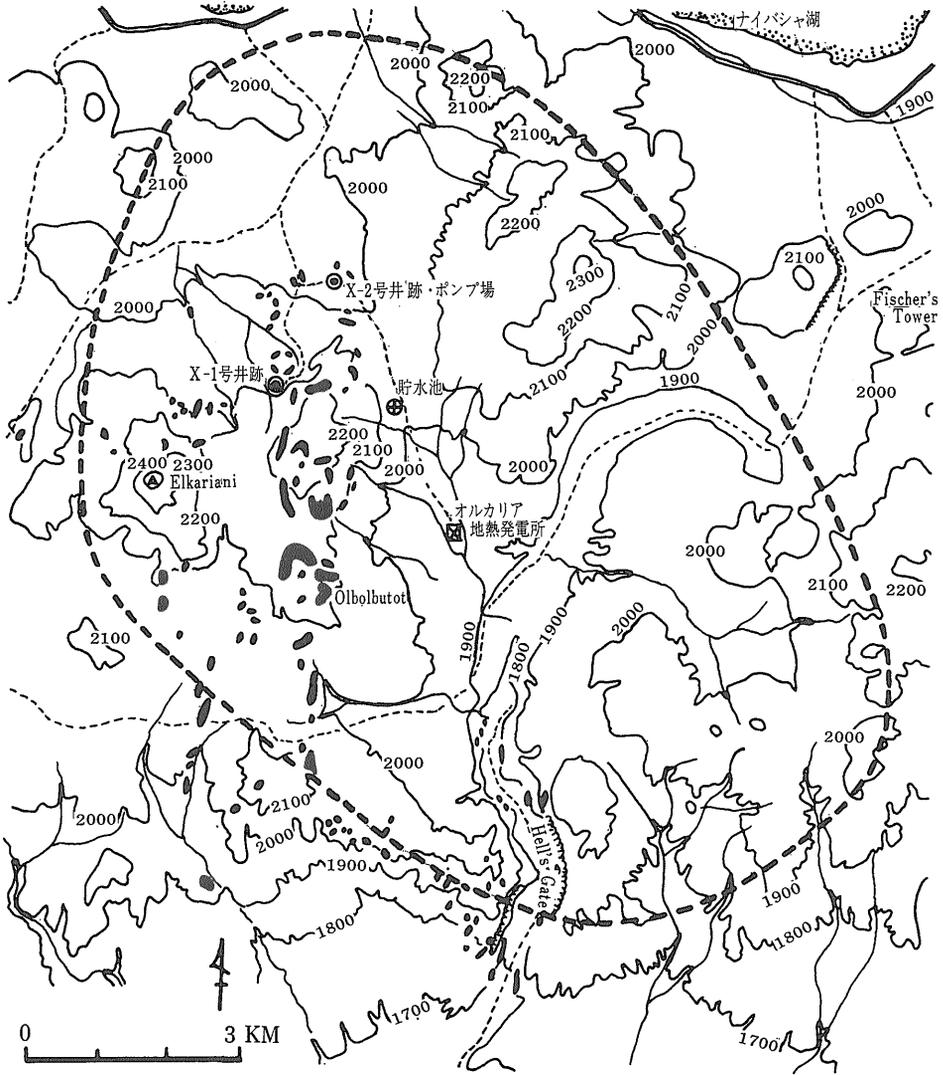


第5図 オルカリア地熱地帯の概要 (NDOMBI, 1981)

ている。

6 地熱貯留構造

1957年~59年にかけて掘削された X-2 号井は UNDP/EAPL 共同プロジェクトによって 1972年に坑井テストが実施されたが 継続した噴気を得るに至らなかったため 貯留層に関する情報は得られなかったようである。その後1973年~74年にかけて同プロジェクトにより 1,000m を越す調査井が4坑(OW-1~OW-4)掘削され その結果オルカリアでは 600m までは帽岩となっていて



第6図 オルカリア地熱地帯周辺の地形
 破線は第5図に示された環状構造のおよその位置を示し 黒色部分は NOBLE and OJIAMBO (1976) による高温地帯を示す (等高線は 100 m 間隔)

第1表 オルカリア地熱地帯の地下地質

深 (m)	度	P波速度 (km/sec)	推定密度 (g/cm ³)	地 質
0~ 400		3.22	1.70	流紋岩類
400~1,680		3.88	1.85	粗面岩類
1,680~3,500		5.00	2.25	フォノライト類
3,500~		6.38	2.67	基盤岩類 (先カンブリア紀)

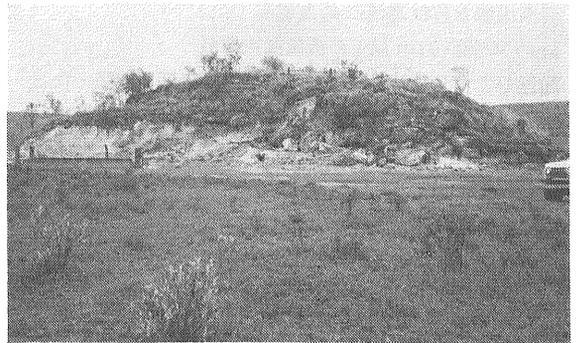
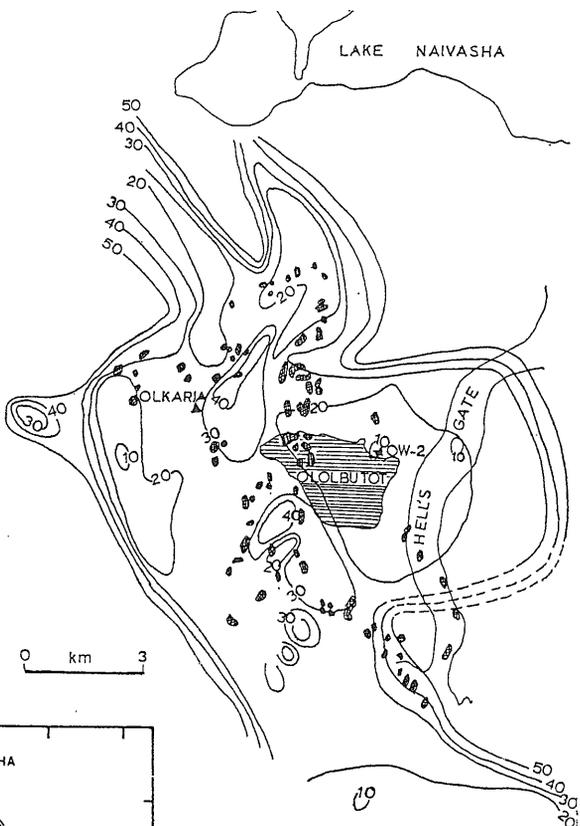


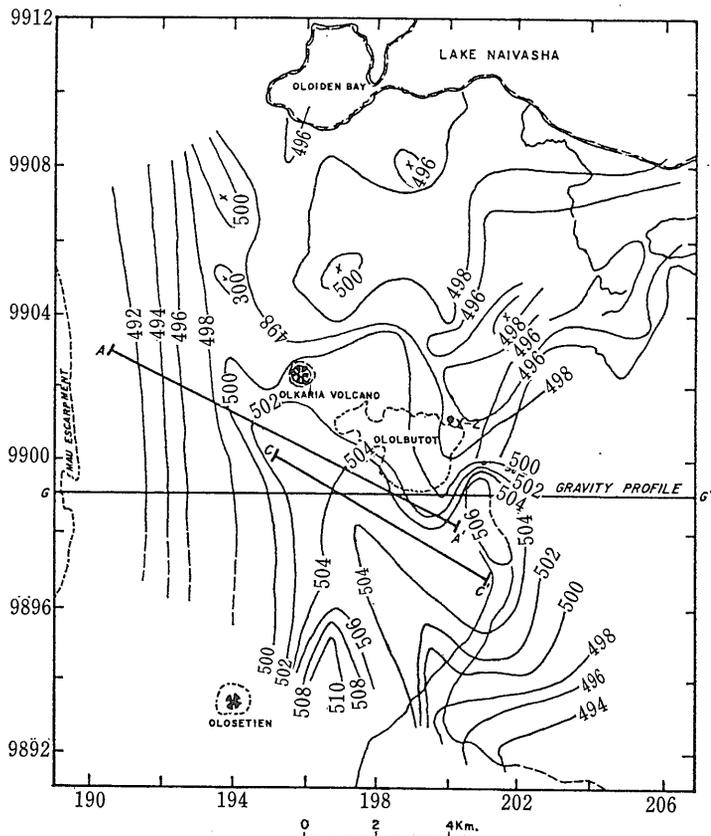
写真5 オルカリアの変質帯露頭
 写真9左のポンプ場のすぐ北に位置する露頭であって
 ここは噴気地帯 (94°C) となっており カオリナイト
 β-クリストプライトなどの変質鉱物が生じている

それ以深に貯留層の存在することが判明した (NOBLE and OJIAMBO, 1976). ちなみに開発を担当している Kenya Power Co. (KPC)より入手した OW-17 までの坑井データを見ると (第2表) 最深の坑井は OW-6 の 1,685m 最高温度はOW-4 で 304°C となっている。

最近 (1982年12月) に配布されたオルカリア地熱発電所の案内によれば ここでは二つの蒸気生産層が存在している。一つは蒸気に卓越した750~900m間の貯留層で他の一つは熱水に卓越した1,100~1,300m間の貯留層である。この下部にさらに蒸気生産層が存在するかどうかをチェックするために OW-19号井は2,500mの深部掘削がなされたとのことであるが その結果についての情報を直接得ることはできなかった。1982年12月3日にオルカリアを訪問した時 後述する GENZLの技術者はオルカリアでは浅部に比較して深部は熱水の割合が高く (1,000m以深では気水比が1.5:1とのことである) かつ温度も低くなるので当面の開発対象としては考えていないとのことを述べていた。もしそうであればオルカリアはすでに述べたように降雨量こそ少ないものの本質的には熱水卓越型の地熱系と呼ぶべきであろう。ちなみに



第7図 オルカリア地熱地帯の比抵抗分布 (BHOGAL, 1980)
単位は $\Omega \cdot m$ で●は高温地帯を示している



第8図 オルカリア地熱地帯のブーグ異常図 (NDOMBI, 1981)

第3表に示すように 現在 発電のために使用している蒸気は1坑井当りの産出量が25t/hr前後で若干少ない感じはするが その気水比はおよそ3~4:1で蒸気に卓越している。

7 熱水の化学組成

1980年12月18日 建設中のオルカリア地熱発電所を訪問した時に OW-13, 14, 15号井坑口の熱水ためより流出している地熱水を採取することができたので それらの化学分析を技術部化学課阿部喜久男技官をお願いした。分析した時期 (1982年7月) が採取日とかなり離れていたため その値には若干の問題は残るとしても 第4表はオル

第2表 オルカリア地熱地帯で掘削された坑井 (KPC による)

坑井番号	深度(m)	坑底温度(°C)	最高温度(°C)
OW- 1	1,003	126	126
OW- 2	1,350	282	282
OW- 3	1,357	256	280
OW- 4	1,661	289	304
OW- 5	910	256	264
OW- 6	1,685	224	296
OW- 7	1,303	254	254
OW- 8	1,080	174	247
OW- 9	1,181	254	259
OW-10	1,183	274	274
OW-11	1,221	248	248
OW-12	901	215	252
OW-13	1,049	230	239
OW-14	1,069	260	260
OW-15	1,301	254	263
OW-16	1,304	287	287

第3表 オルカリア地熱発電所 (第1期) の坑井データ(発電所パンフレットによる)

坑井番号	蒸気量(t/hr)	熱水量(t/hr)
OW- 2	26	8
OW- 5	31	2
OW- 6	19	6
OW- 7	14	4
OW-10	26	5.5
OW-11	15	9
OW-12	42	11
計 7坑	173(t/hr)	45.5(t/hr)

第4表 オルカリア地熱発電所熱水の溶存化学組成

坑井名	温度(°C)	pH	free CO ₂	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	T. S. M.
OW-13	81.0	9.66	—	210.00	274.59	38.35	283.68	0.46	0.01	425.00	61.25	620.0	1,990.0
OW-14	80.4	9.38	—	90.00	152.55	67.82	698.56	0.78	0.10	650.00	88.75	563.6	2,630.0
OW-15	81.7	7.61	11.17	—	70.17	15.47	893.59	1.44	0.01	612.50	125.00	730.0	2,682.0

単位: mg/l (分析者: 技術部化学課阿部喜久男技官)

第5表 オルカリア地熱発電所熱水の地球化学的温度

坑井名	Ts _i O ₂ (CONDUCTIVE) °C	Ts _i O ₂ (ADIABATIC) °C	T _{Na-K-Ca} °C
OW-13	272.8	241.5	264.0(β=1/3)
OW-14	263.5	234.3	263.9(β=1/3)
OW-15	289.5	254.1	286.1(β=1/3)

オルカリアには Geothermal Energy New Zealand Ltd. (GENZL) の掘削技術者が常駐しており その指導・監督の下にケニア人のチームが写真6, 7に示すように2台のロータリー式大型リグを使用して 年間12本程度の坑井を掘削しようとしているとのことである。

カリアの地熱水が基本的には Na-Cl-HCO₃ 型であることを示していると言えよう。また この化学分析値から TRUESDELL (1976) の計算式によって求めた地下の地球化学的温度が第5表である。この表のうち Ts_iO₂ (CONDUCTIVE) と T_{Na-K-Ca} 温度は良い一致を示しており また 第2表の実測温度値ともおおむね合っている。これらの事実からオルカリアの地熱貯留層温度がおよそ 270°C 前後であることが推定される。

1980年12月18日に 1,017mを掘進中の OW-17号井の現場を訪問した時 GENZL の技術者(ニュージーランド人)の話によれば ここでは 550m(多分幅岩に相当する部分)までは通常の泥水掘りを行い(イギリスのペントナイトとアメリカのワイオミングペントナイトを使用) それ以深の貯留層に相当すると思われる部分では 5~10%の石けん液(ケニア製で“地熱掘削用液体石けん”の製品名がつけられていた)を使用して泡掘りを行っていた(写真8)。なお 排出された泥水は石けんの泡とともに Hell's Gate の溪谷にそのまま放流されている。

すでに述べたように オルカリアは年平均降水量がわ

8 坑井掘削

ずか 600mm 前後しかなく また付近の川や沢にも水は全くないので 地熱開発に当っては掘削用水の確保が何よりも重要である。

ここでは写真 9, 10 に示すように ナイバシヤ湖畔の

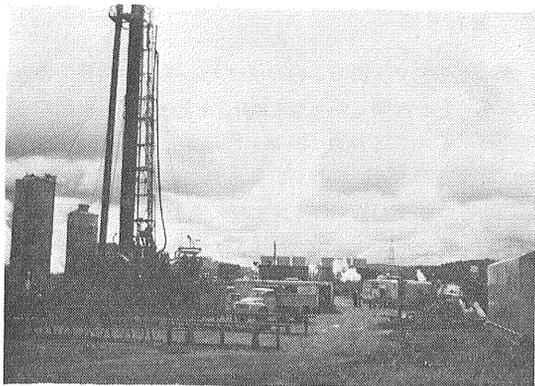


写真 6 発電所北側での生産井掘削風景
このリグで年間 6 本程度の坑井が掘削されているとのことである

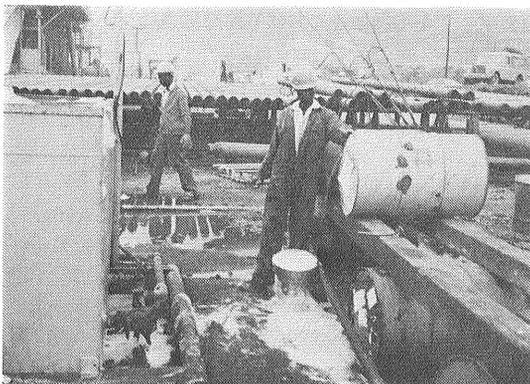


写真 8 泡掘りのための石けん液をドラムかんより取り出す (OW-17号井掘削現場)

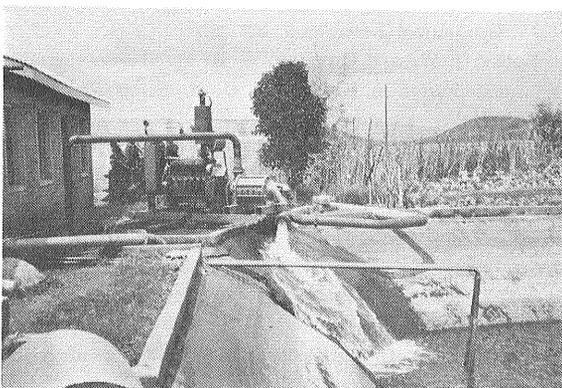


写真 9 掘削用水の送水施設 (第 6 図参照)

ナイバシヤ湖畔 (標高 1,884m) の深度 40m の井戸からくみ上げられた水は 5 km 南の写真に示すポンプ場の貯水池 (X-2 号坑跡付近) までパイプラインで運ばれる

井戸から汲み上げた水を掘削現場までポンプアップ方式によりパイプラインを通して送り届けている。

ケニアを南北に縦断するリフトバレー内にはナイバシヤ湖をはじめとして 数多くの湖が点在している。その湖面標高を見るとナイバシヤ湖 (1,884m) が最も高くこれを頂点として北側にはエブル地熱地帯を通過してエレメンティタ (Elmenteita) 湖 (1,776m) ナクル (Nakuru) 湖 (1,758m) ボゴリア (Bogoria) 湖 (963m) およびバリンゴ (Baringo) 湖 (971m) そしてツルカナ (Tsurkana) 湖 (375m) が また南側にはオルカリア地熱地帯を通過してマガヂ (Magadi) 湖 (963m) がそれぞれ位置している (第 1 図参照)。

このためオルカリア地熱地帯は水理学的には ナイバ

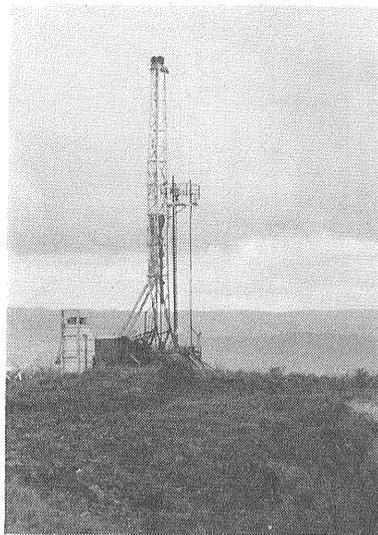
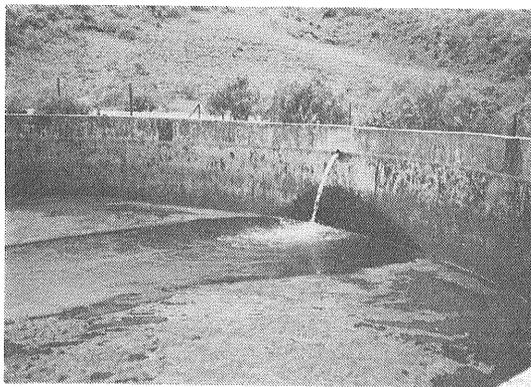


写真 7 高温地帯 (噴気地帯) 直上での掘削風景
場所は X-1 号坑跡付近で 1980 年 12 月末に購入した新しいリグを使用している



揚水ポンプによってさらに南々東 2 km の写真に示す峠の貯水池 (標高 2,040m) まで運ばれ ここから南東 2 km の現場 (標高 1,950m) までは自然導入される

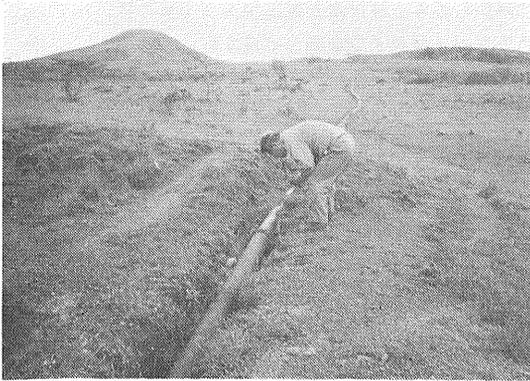


写真10 写真7の掘削現場まで水を運ぶパイプライン

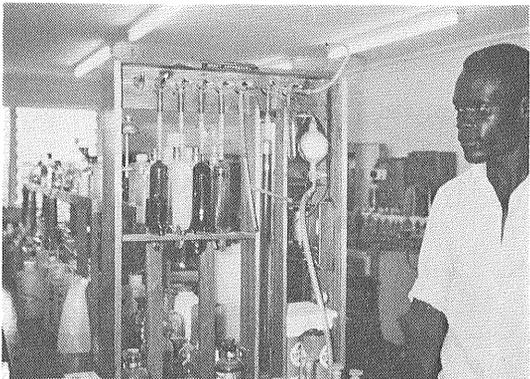


写真11 オルカリア地熱発電所の地熱研究室にある地化学実験室
5名のスタッフで運営されており 室内には原子吸光分光装置 天秤 ドラフトなどが設置され通常の化学分析ができるようになっていた (オルザットガス分析器の前に立っているのは案内してくれた実験助手の WANJALA 君)

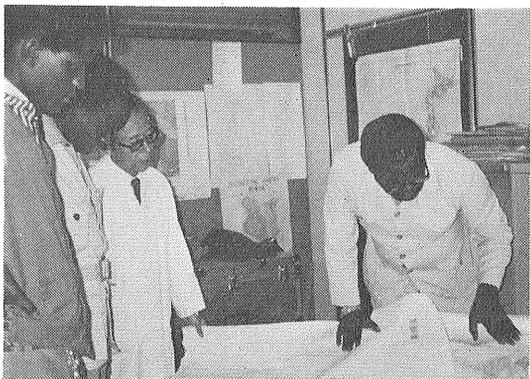


写真12 日本・ケニア共同プロジェクトで得られたエブル地熱地帯の調査結果についてのディスカッション風景 (エネルギー省において)
右から本報告の引用文献でしばしば名前の出てくる OJIAMBO, S. B. (Kenya Power Co. の地熱監督) 本島公司 (当時のプロジェクトリーダー) ODONGO, M. (KPC の技術者) NDOLO, J. M. (エネルギー省地質助手)

シャ湖から南へ流れる地下水の上に位置していると考えるのは自然な事であり そのような観点からオルカリアの地熱系を考える必要がある。

9 おわりに

オルカリアでは新旧2台のリグで 現在の開発地のみならず その西側(X-1号坑跡付近を含む)でも年間12本程度のペースで精力的に掘削を行っており 1982年末ですでに合計25本近い坑井が掘削されているとのことである。その結果OW-18号井までの蒸気量は34MWeに達し 今後オルカリアでは最少でも316MWe・25年間の発電量が見込まれているとのことである。また発電所構内には地熱研究室(写真11)も設置され 地熱開発に対する本格的な体制を整えつつあるように思えた。このように地熱資源は 石油・石炭・鉱物などの地下資源に恵まれない開発途上国ケニアにとっては貴重な資源となりつつある。そのような意味で現在日本と共同で進めているエブル地熱地帯における開発調査についてもその成功を祈る次第である(写真12)。

文 献

- 馬場健三 (1979) ケニアの地熱開発. 地質ニュース, 302, 54-60
- BHOGAL, B. S. (1980) Electrical resistivity investigations at the Olkaria geothermal field, Kenya. Geothermal Resources Council, Transtaction 4, 9-12
- CRANE, K. (1981) Thermal variations in the Gregory rift of southern Kenya. Tectonophysics, 74, 239-262
- 本島公司 (1982) ケニアの地熱こぼれ話. 地熱, 19, 91-94
- NDOMBI, J. M. (1981) The structure of the shallow crust beneath Olkaria geothermal field, Kenya, deduced from gravity studies. Jour. Volcanology Geothermal Research, 9, 237-251
- NOBLE, J. W. and OJIAMBO, S. B. (1976) Geothermal exploration in Kenya. 2nd U. N. Symp. Dev. Use Geother. Resour., 1, 199-204
- 佐藤博之 (1983) ケニア リフトバレー. 地質ニュース, 344, 32-45
- 田原 護 (1982) 最近の小型地熱発電プラント (アソーレス 杉乃井 プローリおよびケニア). 地熱エネルギー, 19, 76-92
- 高木慎一郎 (1979) ケニア共和国の地熱開発. 地熱エネルギー, 11, 65-70
- THOMPSON, A. O. and Dodson, R. G. (1963) Geology of the Naivasha area. Geol. Surv. Kenya
- TRUESDELL, A. H. (1976) Summary of section III: Geochemical techniques in exploration. 2nd U. N. Symp. Dev. Use Geother. Resour., 1, Iiii-Ixxix