

インペリアル・ヴァレーの地熱地帯を訪ねて

笹田 政 克 (地殻熱部)
Masakatsu SASADA

1. はじめに

1984年2月24日から26日まで SEG (ソサエティ・エコノミック・ジオロジスト) の主催するカリフォルニア州のモハベ砂漠からインペリアル・ヴァレーにかけての野外巡検が行われ JICA 長期研修員として ヴァージニア州レストンの米国地質調査所に留学中の筆者はこれに参加する機会を得た。巡検は大型バス2台に80名の参加者が分乗し カリフォルニア大学リヴァーサイドの ELDERS 教授 米国地質調査所 WHITE 博士ほか4名の方に案内していただいた。

2. モハベ砂漠からインペリアル・ヴァレーへ

ロスアンゼルス街から北に向かい山を1つ越えるとそこはもうモハベ砂漠である。巡検では砂漠の中にあるボロン鉱床 Calico の銀鉱床 モハベ砂漠を南へ下だったところにある Eagle Mountain の鉄のスカルン鉱床 そしてインペリアル・ヴァレー東部の Mesquite で最近発見された金鉱床を見学し 2日目の夜遅くインペリアル・ヴァレーの Brawley に到着した。

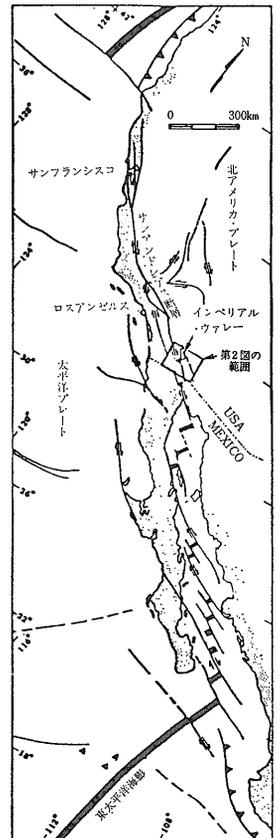
Eagle Mountain は つい最近閉山になったばかりの露天掘りの大きな鉄鉱山で 人気のない街には鉱石の運搬に使われていたトラックやディーゼル機関車が生々しい姿で 放置されていた。鉱山をひと回りしてバスに乗ろうとしたとき ELDERS 教授に呼びとめられた。

「この鉱山は日本に鉄鉱石を輸出していたのですが 最近オーストラリアの鉱石に価格競争で敗れ 閉山に追いこまれてしまったのです。そしてオーストラリアの鉄でつくられた日本の自動車も カリフォルニアにどんどんはいつてくる。これが現実なのです。」ロスアンゼルスホテルでは 日本のテレビ番組を楽しみ 多くの日本人観光客の姿を見かけ カリフォルニアと日本の距離の近さを感じたが 少し内陸にはいったところにあるこの鉄鉱山も 経済的には日本と至近距離にあった。

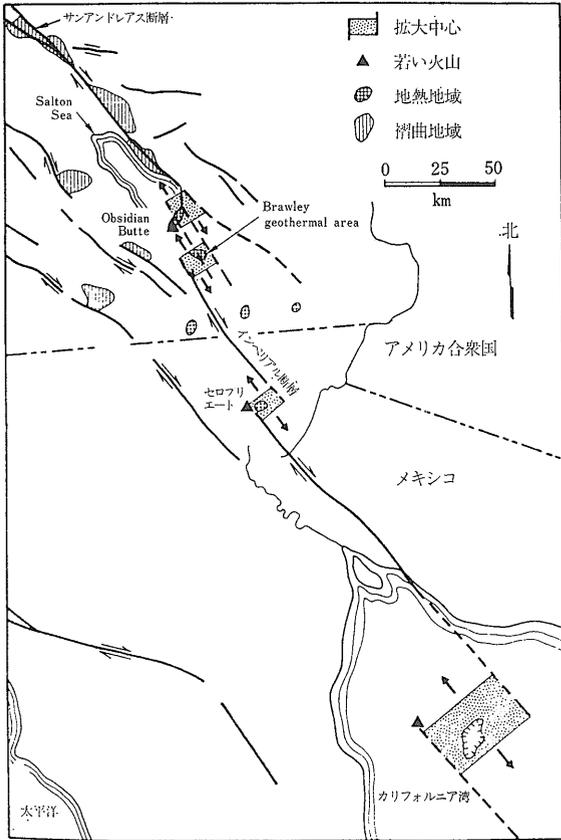
3. インペリアル・ヴァレーのテクトニクス

サンフランシスコからロスアンゼルス東を通り カリフォルニアを縦断するサンアンドレアス断層は メキシコに近づくにつれて次第に地形的判別がつかなくなる。そこはサンアンドレアス方向に伸びた海水準下の沈降域となっており そこに世界でも有数の地熱地帯インペリアル・ヴァレーがある (第1図)。

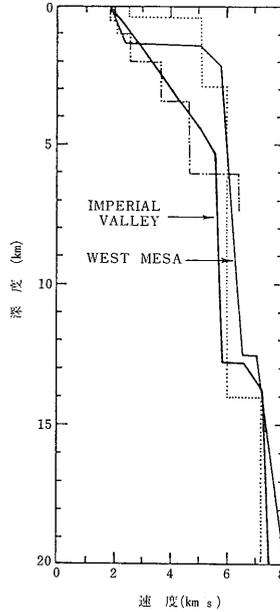
プレート・テクトニクスによれば インペリアル・ヴァレーは 太平洋プレートと北アメリカプレートの境界に位置し 東太平洋海膨の伸張テクトニクスとサンアンドレアス断層のトランスフォーム・テクトニクスの遷移的部分にあたる。ここには サンアンドレアス断層



第1図
アメリカ西海岸
のテクトニクス
(ELDERS et
al., 1972)



第2図 インペリアル・ヴァレーのテクトニクスと地熱地帯 (ELDERS et al.,1972).

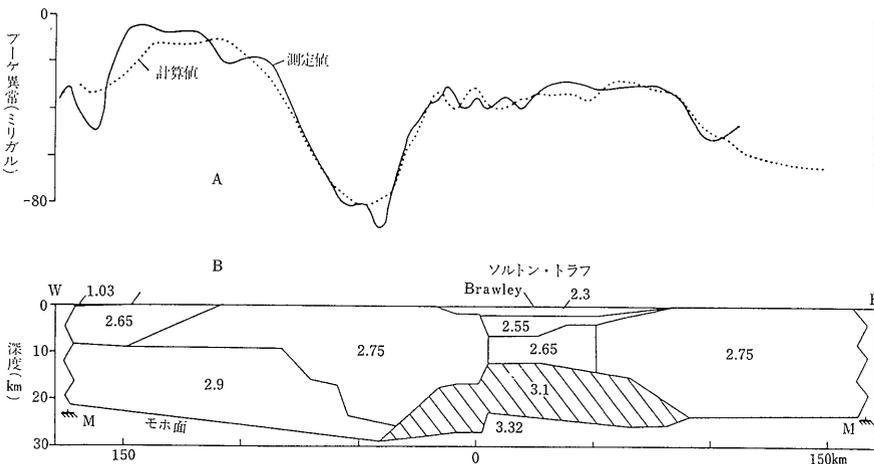


第3図 ソルトン・トラフの地震波速度分布 (FUIS et al.,1982).

な影響を与えている世界でも数少ない地域の1つである (ELDERS and COHEN, 1983).

インペリアル・ヴァレー (地質構造上この地域はソルトン・トラフと呼ばれる) の地殻構造は地震波のデータから沈降域の中央部と両サイドでやや異った構造をもっていることがわかってきた (第3図). 中央部では地表付近のデルタ堆積物は 1.8km/s の速度を示し 5.8km と 13km の深さで速度が急変する. その速度からみて 5.8—13km の間が変堆積岩 13km 以深はマフィック貫入岩類と推定される. 一方 ソルトン・トラフの西側 3分の1 (第3図では West Mesa と示されている) では表層はデルタ堆積物で 中央部の表層と同じ速度であるが 1.4 km の深さで 5.9km/s の層が現われる. ここ

に平行する数本のトランスフォーム断層が走り それぞれの断層間にある高熱流量部にプレートの拡大中心があると考えられている (第2図). そしてここは伸張テクトニクスにあるプレートの境界が大陸性地殻に大き

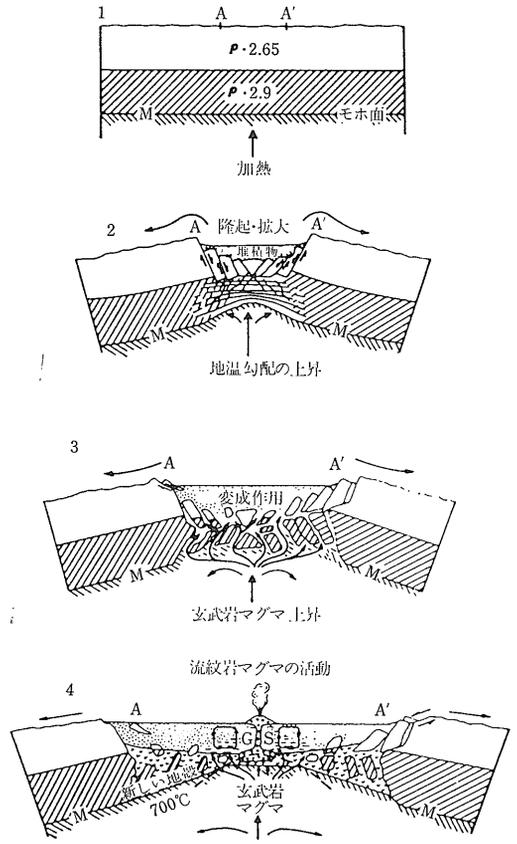


第4図 ソルトン・トラフのフリーゲ異常(A)とモデル断面図(B) (FUIS et al., 1982).

では 1.4 km から 12.4 km までが その速度から見て結晶質の花崗岩類と考えられ 12.4 km 以深は中央部の深部に連続するマフィック貫入岩類とみられている (FUIS et al.,1982).

ソルトン・トラフの地質構造断面は また重力の2次元解析の結果からも描かれている。第4図は Brawley を通る東西断面であるが ソルトン・トラフの中軸部に大きな正のブーグ異常が認められる。これは 地表付近の低密度のデルタ堆積物から算出される負異常を補償してもなお余りある高密度の物質が地殻中に存在することを示しており それは大きなマフィック貫入岩体と推定されている (FUIS et al.,1982).

このソルトン・トラフの構造発達史について ELDERS 教授ほかは1972年に第5図に示すダイナミックなモデルを提案しており その後地熱探査の進展に伴い得られた数多くのデータもこのモデルの妥当性を依然として支持しているようにみえる。このモデルでは 第1段階として 拡大前の大陸性地殻が示されている。第2段階では マントルの上昇流により地殻は伸張テクトニクスの場におかれ 上昇流の両側の地殻は側方へと引張られ 地殻は次第に薄くなっていく。地殻上部のブリットルな部分には伸張断裂が生じ 中軸部はそれに伴い沈降する。そして沈降する中軸部には 同時に堆積物が厚くたまっていく。第3段階になると 上部マントルで生じた玄武岩マグマが地殻下部に貫入する。そして このマグマの貫入は既存の岩石を熱変成させる。大陸性地殻はさらに側方へと引張られていくので 中軸部では ブロック化した大陸性地殻の断片は傾動し 沈降していく。大陸性地殻および新しい堆積物中に貫入した玄武岩は 次第に大きな体積を占めるようになり ソルトン・トラフ中軸部の地殻下部は より海洋性地殻



第5図 ソルトン・トラフにおけるリフトおよびマグマ形成のモデル (ELDERS, 1972)。

的なものへと変っていく。そして第4段階では 700°C の等温線が地殻中にまで上昇し 花崗岩質の基盤は部分溶融をはじめ。またマントル中には流紋岩質マグマが生じ 玄武岩・花崗岩・変堆積岩のゼノリスをとりこんで 地表に噴出する。これが彼らのモデルのアウトラインである。

ここで第5図では第2段階以降 トラフ内が堆積物により 漸次満たされてきた様子が示されているが この膨大な量の碎屑物は どのようにして供給されたのだろうか。

4. コロラド川のデルタ堆積物

ELDERS 教授(写真1)は「ソルトン・トラフは 堆積物で満たされたリフト・ヴァレーである」といわれたが この地域では堆積作用がテクトニクスに歩調をあわせて進行してきており その堆積物の供給源は コロラド川に求められる。

コロラド川は コロラド・ユタ・アリゾナの3州に広

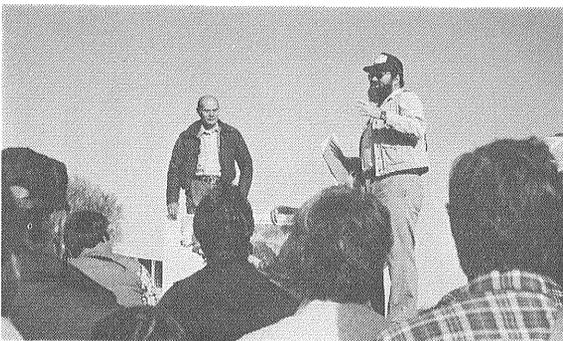


写真1 はじめの見学地 Brawley 南方の断層崖でソルトン・トラフのテクトニクスについて解説するカリフォルニア大学リヴァーサイドの ELDERS 教授(右)。左は同じく巡検案内者の MORTON 氏。

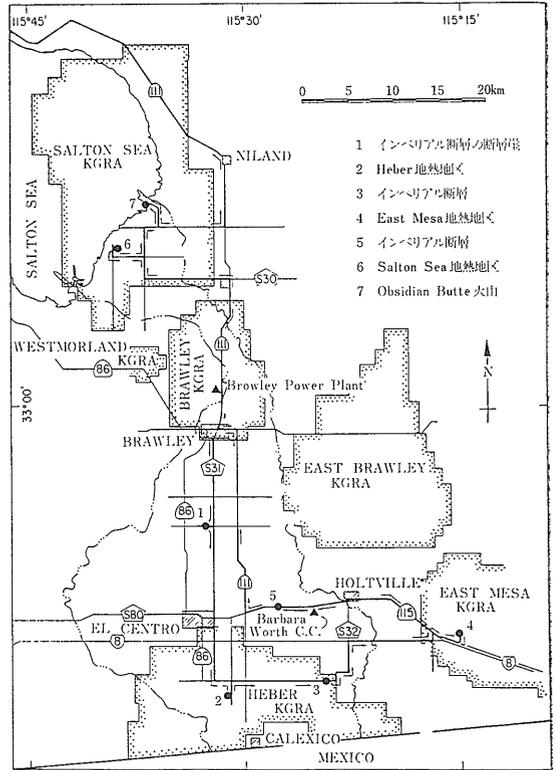
い流域面積をもち ロッキー山脈の積雪の状況次第で春に大きな洪水をしばしばもたらしてきた。現在は流域にフーパー・ダムをはじめいくつかの大きな貯水池があるため その水量はコントロールされ 豊かな水資源として流域に大きな恵みをもたらしているが それは20世紀になってからのことであり それ以前はというとカリフォルニア湾にそそぐコロラド川は 大洪水の度毎に自然堤防が崩れ 構造的な沈降域であるソルトン・トラフへと水が流入していった。そしてソルトン・トラフは大量の水を呼びよせては やがてそれを干上がらせるといふ歴史を ここ数百万年もの間繰返してきた。

現在の Salton Sea は 最後の大洪水の産物である。つまり その洪水でもたらされた膨大な量のデルタ堆積物が ソルトン・トラフを埋めているわけである。この堆積物の年代については メキシコ側のセロ・プリエートで 坑井データから 鮮新統 更新統の境界が 2,000m深にあると報告されている (INGLE, 1982)。

5. インペリアル・ヴァレーの活断層

だいぶ前置きが長くなってしまったが 我々の巡検のはじめの見学地は Brawley 南方のインペリアル断層の崖であった (6図)。インペリアル・ヴァレーには サンアンドレアス断層に平行する数条の活断層があり それらの断層に沿って地震が頻繁に起こっている。この断層 崖 (写真2) は 1979年10月15日に Mexicali 東方 10 km の地点で起きた M6.5 の地震の際にも 垂直方向に 20cm 以上 水平方向に 5—7 cm の動きが観測されたという生々しいものである。この地震では El Centro から Brawley にかけてのインペリアル断層沿いの地域で被害が大きかった。Brawley の街では崩壊したままになっている家屋が 車窓からも見られた。

インペリアル・ヴァレーからカリフォルニア湾北部にかけての地域におこる地震の震源は すべて 15km より浅く 多くは 6 km 以浅である (ELDER, 1979)。またインペリアル・ヴァレーの中だけをとると 多くの震源は 4—6 km の範囲にある (JOHNSON and HILL, 1982)。したがってここでは ほとんどすべての地震が基盤上の堆積岩が破壊されて起きているといえる。深発地震をしばしば経験する島弧—海溝系に30余年住みついていた筆者の地震観は大きく揺り動かされた。



第6図 インペリアル・ヴァレーの巡検コースと KGRA (Known Geothermal Resources Area) (ELDER, 1984)。

6. 野菜畑の中をバスは行く

Brawley から Heber へと南へ下る 道路の両側はコロラド川からのかんがい用水によりひらけた野菜畑がどこまでも続いている。たまねぎ・にんじん・さとう

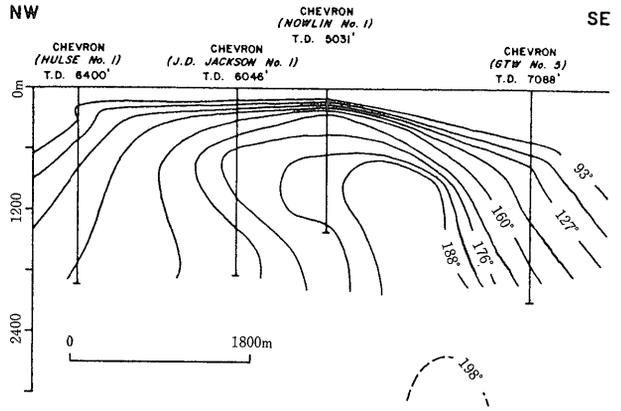


写真2 Brawley 南方のインペリアル断層の断層崖。1979年10月15日の地震およびその後のクリープで動きをみせた。

・大根 それにデージーなどの花き栽培もされている。見わたすかぎりのにんじん畑も また壮観である。

インペリアル・ヴァレーが このような肥沃な野菜畑になるまでには 自然と人間との葛藤があった。コロラド川が小さな氾濫をおこすし しばらくの間この地は 砂漠の中の牧草地となることもあり 19世紀になるとヨーロッパからの移殖者が この地の開拓をはじめようになる。やがてコロラド川からかんがい用水を引く計画がつくられ そのための技術者も外国から招へいされた。そして20世紀にはいり この地にはじめて運河によるコロラド川の水がもたらされ 地名もそれまでの Salton Sink から Imperial Valley という立派な名前にかえられた。しかし 1905年のコロラド川の大洪水は それまでに造られたかんがい施設をはじめ 本地域の開拓施設に全体壊滅的な打撃を与えた。そして そこには 65km×20km 深さ24m の湖が出現した。これが現在見られる Salton Sea の生い立ちである(写真3)。

当時の大統領ルーズベルトは この地の復興に助力し 110Kmの区間が破壊されたサザン・パシフィック鉄道の修復が進められた。一方湖の方も蒸発が進み 5年間で水位は 7.5m 低下した。その後の治水事業で特筆すべきものは 1934—35年に 1億6千5百万ドルの工費をかけて完成したフーパー・ダムと 1943年に落成した All-American 運河であろう。後者は コロラド川の水をインペリアル・ヴァレーの 192,500ヘクタールの土地に導き 現在のかんがい用水も この運河からの水で維持されている。そして現在インペリアル・ヴァレー



第7図 Heber 地熱地区の地下温度断面図 (SALVESON and COOPER, 1979)。

は全米第5の農業地帯となっている。

しかし この地での自然と人間との葛藤は これで終わったわけではなく 今度は地熱をめぐる競争が繰り広げられることになる。

7. Heber での地熱開発

やがてバスは アメリカ側の地熱地区では最南端の Heber へとはいる。Heber ではシェヴロン地熱会社の開発現場を訪れた。メキシコとの国境へは あと 5 km あまりであるが 開けた谷の中に続く野菜畑は 国境がどこかを全く感じさせない。野菜畑の一区画を整地し直した開発現場に 機材が置かれ リグがたてられている(写真4)。まぶしい太陽の下で ELDERS 教



写真3 Salton Sea.
930km² の広さをもち 湖面は海水準下 70m のレベルにある。流出口がないため 蒸発により塩濃度が上がっている。冬の間はカナダからの渡り鳥の棲息地となっている。

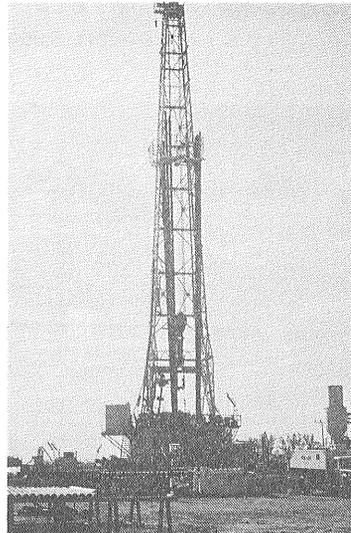


写真4 Heber 地熱地区の開発現場。

第1表 インペリアル・ヴァレーの地熱発電プラント1983年5月6日現在の状況 (Moss and RANDS による)。

地熱地区	サイズ(MW)	タイプ	現況
Salton Sea	10	フラッシュ	82-7から運転
	25-49	〃	計画中
	30	〃	〃
	49	〃	〃
		ダイレクト・ヒート	
Brawley	10	フラッシュ	80-7から運転
So. Brawley	45	〃	計画中
Heber	52	〃	85-7完成予定
	65	バイナリー	〃
		ダイレクト・ヒート	
East Mesa	12	バイナリー	80-1から運転
	19	ハイブリッド	検討中
	5	スペリー	〃
		ダイレクト・ヒート	〃

授の説明を聞くが 近くの牛の飼育場からやってきたのか あぶのような小さな虫が 巡検参加者のまわりをうるさく飛びかっていた。

Heber で1972年に試掘された坑井は 670m で最高温度 187°C を記録した。この地熱流体の塩濃度は 北部地区に比べて低く TDS (Total Dissolved Solids) が 14,000ppm である。第7図に地下の温度断面を示すが 600m 以深の 15-30% の間隙率をもつ砂岩中に貯留層がある。現在この地区では シェヴロン地熱会社とともにユニオン・オイル会社 および Heber 地熱会社が開発にあたっている。

本地区には 30年間に500-600MW 発電できる地熱エネルギーが推定されており 1985年の半ばを目標にして 65MW のバイナリー・プラントと 52MW のダブル・フラッシュ・プラントの建設が進められている(第1表)。

ここ Heber は インペリアル・ヴァレーでは Salton

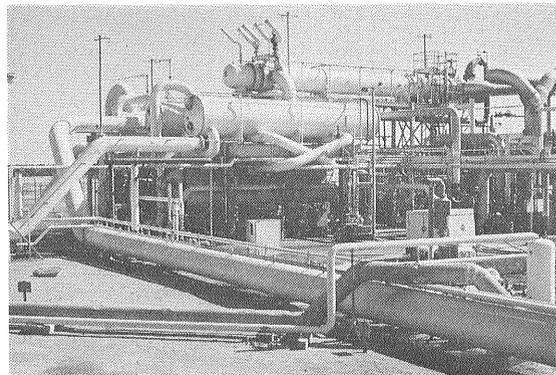


写真5 East Mesa にあるマグマ・パワー社のバイナリー・プラント。

Sea 地区に次いで2番目に発見された地熱地区であるが その経緯は 1945年に石油・天然ガスを探査するために試掘された坑井が 偶然高温異常を捉えたことによるという。ここで少し インペリアル・ヴァレーの地熱開発の歴史を ふりかえってみたい。

8. 地熱開発の歴史

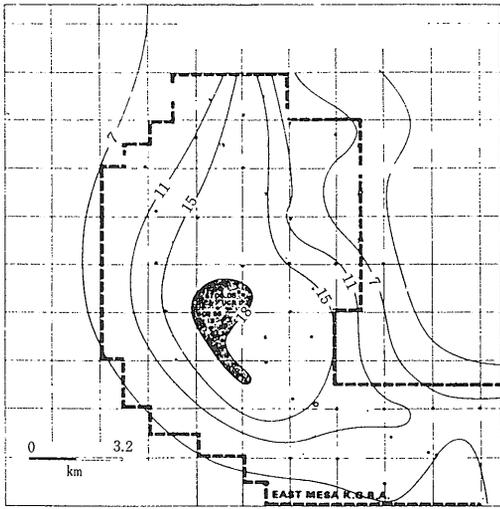
インペリアル・ヴァレーではじめて地熱開発用の坑井が試掘されたのは 1927-28年にさかのぼる。3本の坑井が地表徴候のみられた Salton Sea の Mullet 島で掘削され そのうち最も深いものは 448m あった。この3本は すべて蒸気 熱水

それに非凝縮性ガスを噴出させた。このとき蒸気は 発電を行なうのに十分な圧力をもっていなかったが 多量の炭酸ガスの存在は 大いに注目された。そしてその後は炭酸ガスを目的として 坑井が掘削され 1933-54年の間 この地区で炭酸ガスが商業生産された。炭酸ガスは60-210m という 比較的浅所から採取されていた。ここには ドライ・アイスをつくるプラントも建設されたが 1954年にはこの炭酸ガス田は捨てられることになる。それにはいくつかの理由があったが Salton Sea の水位が上昇し 井戸が水没してしまったことも要因の1つであった。

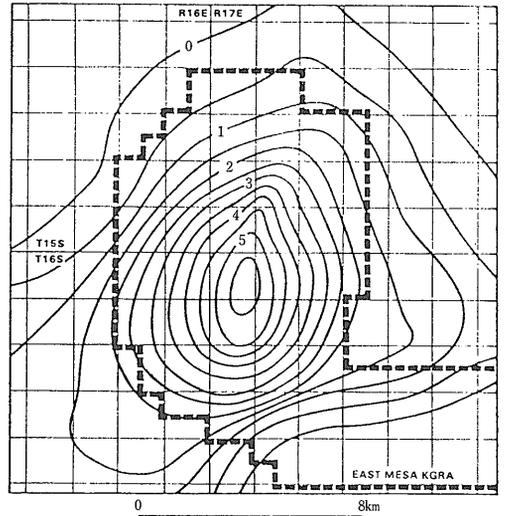
さて その後地熱井は 1957-58年になるとケント・インペリアル社 により Salton Sea 地区に 1436m の深さのものが掘削された。この井戸からは蒸気および熱水が生産され 1959年には セパレータ・コンデンサ・発電機をもつ地熱発電のパイロット・プラントが建設された。そして地表のパイプがスケールでふさがるまで 数か月の間テストが行なわれた。

その後 1961年から64年までの間には この近くに10数本の井戸が掘削され それらすべての井戸から蒸気および熱水が生産されたが 熱水に腐食性があり また多量のスケールを付着させることが 大きな問題となった。この時分析された熱水中には 300,000ppm と驚くほど多量の TDS が含まれていた。このような高濃度のブラインからの鉱物の回収も真剣に検討され Morton Salt 社とユニオン・オイル社が そのためのパイロット・プラントを作ったが 数年間のテストの結果 経済的でないことがわかり この先駆的な事業にはひとまず幕がおりた。

1965-71年の間は 深い坑井は1本も掘られなかった



第8図 East Mesa KGRA の浅所における地温勾配(COMBS, 1971).
コンターは °C/100m. 破線の範囲が KGRA.



第9図 East Mesa の重力残差図 (BIEHLER, 1971).
コンターは 0.5 ミリガル.

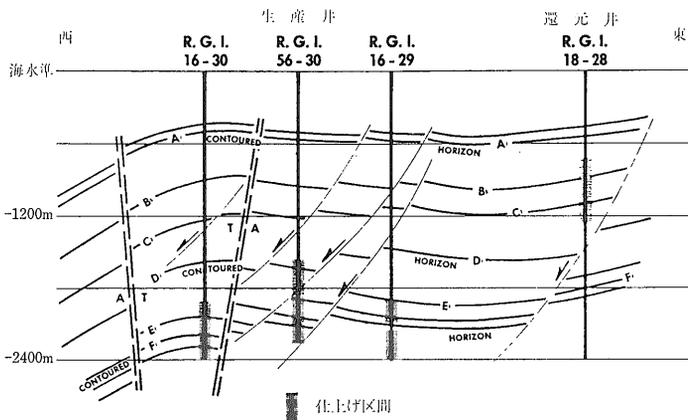
が カリフォルニア大学リヴァーサイドにより インペリアル・ヴァレーの広域的な地熱調査が行なわれた。100以上のヒート・ホールが掘られ 熱流量調査・電気探査・重力探査・地震探査が実施された。この調査では それまでに全く知られていなかった地熱異常地区がいくつか発見された。カリフォルニア大学リヴァーサイドの調査は 現在も続いている。

1972年には この調査で見出された新たな地熱異常地区も含めて 再び調査井の掘削がはじまる。これが現在へとつながる本格的な地熱開発の端緒である。

9. East Mesa のバイナリー・プラント

Heber をあとにして バスは東へと進む。やがてかんがい地区が終り 景観は一変して砂漠となる。マグマ・パワー社のバイナリー・プラントは その砂漠の広い土地を利用して建設されている(写真5)。

通常の地熱発電プラントでは 地下からの地熱流体そのものを用いて タービンを回しているが それに対してバイナリー・プラントでは 地熱流体から熱もらった低沸点の2次流体が タービンを回すシステムとなっている。したがって 設備は大きくなり プラントの建設コストはかなり割高となるが より低温の熱水が利用できることや フラッシュさせた場合に問題となるカーボネイト・スケールの問題からのがれられるなどの利点がある。



第10図 East Mesa の地質構造断面図 (SMITH, 1979).

ここのバイナリー・プラントでは 2次流体にさらに2つのサイクルがあり 第1サイクルにイソブタン 第2サイクルにプロパンが用いられている。そしてそれぞれが 10.5MW 2.2MWの発電能力をもっている。現在地下から生産されている熱水は 2,300m 深からのもので TDSが6,000ppm 温度は180°Cである。熱水の生産量は 520t/hで現在の出力は6-7 MW程度であるとのことであった。

East Mesa 地区の地熱異常は 15km × 10km の範囲に広がっており その中心部では浅所で 18°C/100m の温度勾配が得られている(第8図)。本地区の熱

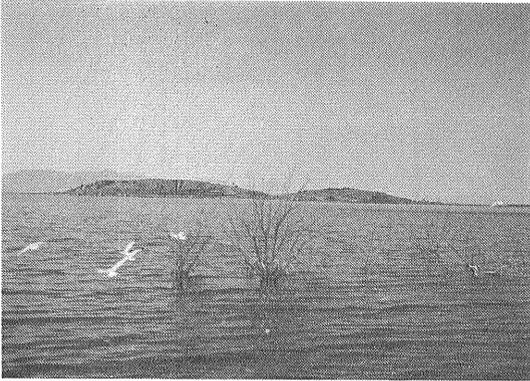


写真6 Obsidian Butte の遠景。
最近また水位が上昇したため現在は Salton Sea
の1つの島となっている。

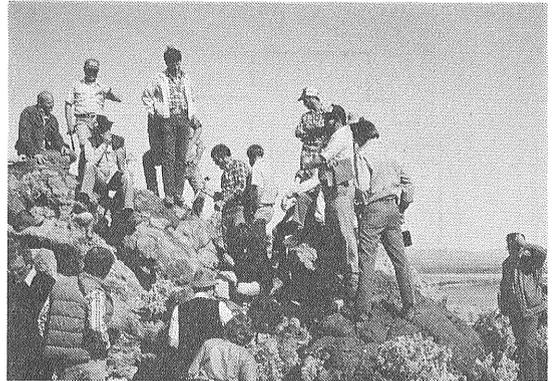


写真7 Obsidian Butt の山頂で 流紋岩中のゼノリスにつ
いて説明している ELDERS 教授(右から3人目)。
彼の指さす下にゼノリス(写真8)がある。参加者
がハンマーでたたこうとすると「大事なゼノリスだ
から とらないでほしい」とたしなめられる。

異常の分布パターンは 重力異常とよい相関を示しており(第8, 9図)。これは 高温の地層水から晶出したシリカおよびカーボネイトが地層中に累積したためであるとうと説明されている(SMITH, 1979)。

反射法のデータに坑井データをいれた地質構造断面図を第10図に示すが 地表から600mまでの間は 現世の砂層と湖成堆積物からなっており それ以深がデルタ堆積物である。そしてデルタ堆積物中の砂岩層が本地区の地熱貯留層となっている。

10. Obsidian Butte—ソルトン・トラフの火成活動—

Barbara Worth Country Club で昼食をとった後

午後の見学地である Salton Sea 地区へ向かう。途中 ELDERS 教授のマイクから「ただ今バスは 北アメリカ・プレートから太平洋プレートにはいりました」というガイドがあると 一同やんやの大歓声、「次は オーストラリア・プレートに行けますか？」などと冗談が飛びなごやかな雰囲気の中バスは Brawley を抜け Salton Sea へと向かう。Salton Sea 地区では もしかしたら その噴火をインディアンが見ていたかも知れないという新しい火山 Obsidian Butte を訪れる。

Obsidian Butte は現在は Salton Sea の中にあるが(写真6) 浅い湖に土盛りをしてつくられた道路があり 車ですぐ下まで行ける。山頂(写真7)には小さな噴気孔があり 手をかざすと熱気が肌で感じられる

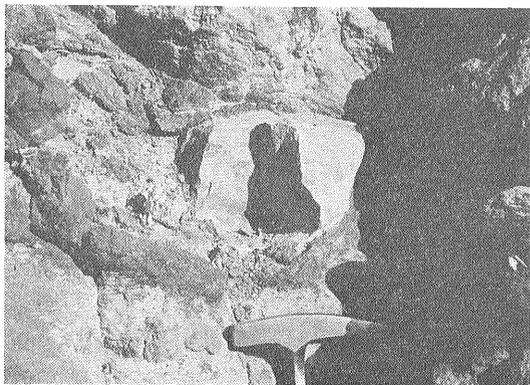


写真8 Obsidian Butte の変堆積岩のゼノリス。
緑色片岩相の鉱物組合せは 地熱活動の産物と考えら
れている。

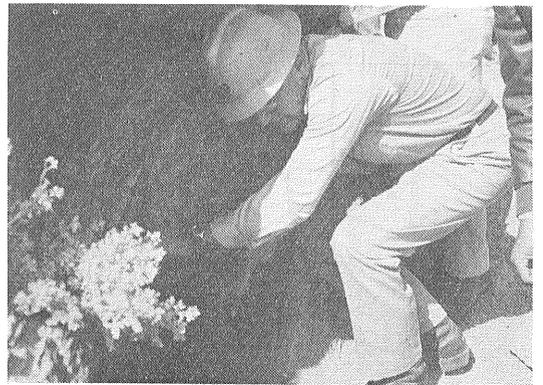


写真9 Obsidian Butte 山頂にある噴気孔。
「へびが出るぞ」と冗談をとぼしながら 巡検参加者
は うす暗い穴の入口に手をかざしていた。

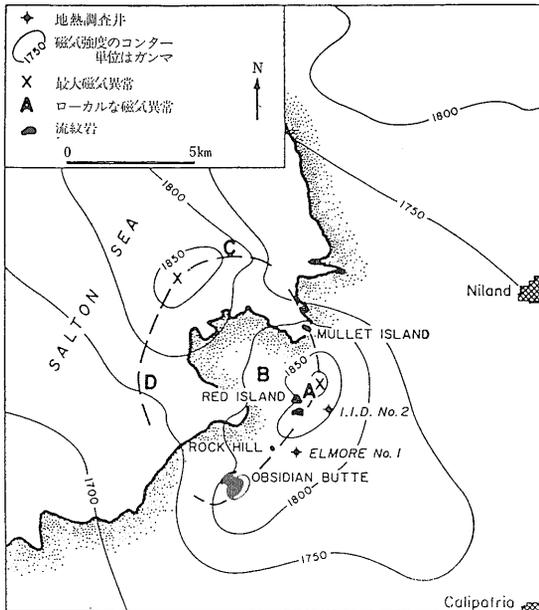
第2表 ソルトン・トラフの火山岩類の化学組成 (ELDERS et al., 1979).

	セロ・プリエート (2個の平均)	Obsidian Butte (Salton Buttes) (5個の平均)	玄武岩ゼノリス (Salton Buttes) (4個の平均)
SiO ₂	68.62	73.6	52.19
TiO ₂	0.54	0.04	1.79
Al ₂ O ₃	15.58	13.5	14.73
Fe ₂ O ₃ *	5.59	2.8	9.63
MnO	0.10	0.05	0.17
MgO	0.87	0.21	6.79
CaO	4.68	0.9	10.36
Na ₂ O	2.73	4.5	3.57
K ₂ O	1.29	4.1	0.42
Total	100.01	99.70	99.65

*全鉄を Fe₂O₃ とする。

(写真9). ここが今回の巡検で見られた唯一の地表噴火であった。インペリアル・ヴァレーではこのほか前述した Mullet 島に マッド・ポットや噴気孔があったが 現在は水面下にその姿をかくしている。

Obsidian Butte のある Salton Sea の南縁には 全部



第11図 Salton Sea 地熱地区の磁気異常 分布図 (ROBINS ON et al., 1976)

磁気異常は 流紋岩ドームの分布に対応しており それらの分布様式から 破線のような形のリング・ダイク地下に推定されている。なお Salton Seaの海岸線は 1974年当時のものであり 現在は水位の上昇により さらに南東側に前進してきている。

で5つの小さなドームがならんでいる (第11図)。これらは沖積層上に噴出したもので Obsidian Butte では16,000年の k-Ar 年代が得られている。

(MUFFLER and WHITE, 1969).

これらのドームはすべて 結晶量が 1~2%程度の Ca に乏しいアルカリ流紋岩である (第2表)。それらの化学組成は 東太平洋海膨で見出されているソーダ流紋岩とよく似ており ストロンチウムの同位体比も 両者ともよく似た低い値となっている。

玄武岩はこれらのドームにゼノリスとして産するほか同様の組成のものが 地下で岩脈 岩床あるいは溶岩流として見出されている。これらは変質している

ものを除くと カリフォルニア湾や東太平洋海膨の低カリウム・ソレイアイトとたいへんよく似ている。

以上のことは ソルトン・トラフの下でのマグマの形成が東太平洋海膨やカリフォルニア湾の下でのマグマの形成と たいへんよく似た条件でおこったことを物語っている (ELDERS, 1979)。

また これらの流紋岩のドームには 変堆積岩のゼノリス (写真8) や花崗岩類のゼノリスもはいており 花崗岩類は石英と長石の粒界に沿って部分熔融していることがある。しかしこれら花崗岩類は 化学組成を見ると SiO₂, CaO, Na₂O に富み 鉄に乏しいことから 流紋岩マグマと近縁関係にあるものとは考えにくい。

ソルトン・トラフの玄武岩と流紋岩は ともにマントルに起源が求められるもので 流紋岩マグマ中に混入した大陸地殻物質の量はわずかであったであろう。(ELDERS

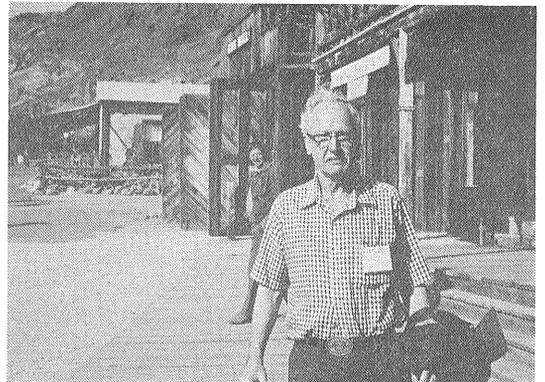


写真10 米国地質調査所 WHITE 博士。Calico のゴーストタウンにて。彼は案内者の1人として インペリアル・ヴァレーのブラインについての解説をして下さった。

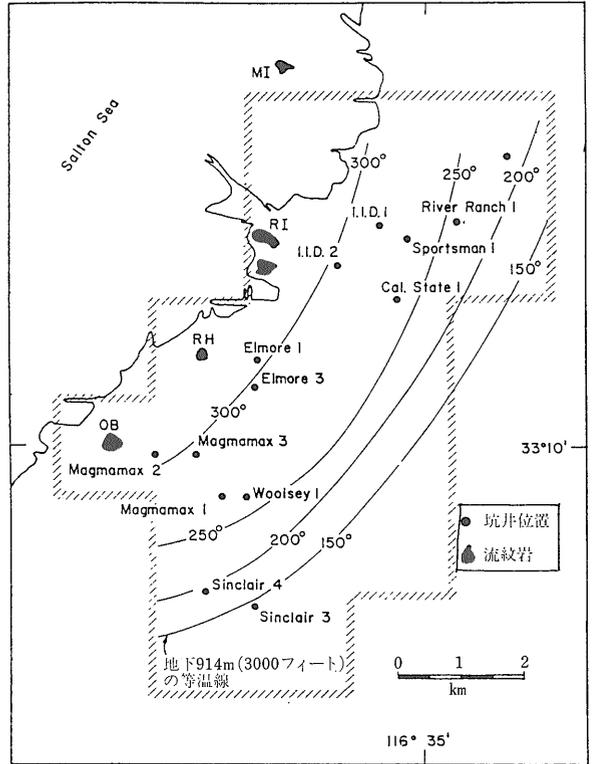
1979).

11. 熱源は何か

インペリアル・ヴァレーの地熱系は大きく2つに分類される。1つは Heber, East Mesa のように2 km 深で 200°C 以下の中温熱水系であり もう1つは Brawley East Brawley, Salton Sea それにメキシコ側のセロ・プリエートのような 2 km の深さで 300°C 以上となる高温系である。いままでに報告されている最高温度は Salton Sea で 365°C セロ・プリエートで 370°C である。

中温地熱系では 岩脈や岩床が坑井中に見られるものの 熱源となりうるような大きな貫入岩体は見つかっていない。ここでは多分 断層に支配されて 地表水が深所まで循環し 熱水系が形成されているものと考えられる。

一方 Salton Sea およびセロ・プリエートの優勢な地熱地帯には 小規模ではあるが地表に第四紀の火山がみられる。またこの2つの地域では ともに重力・磁気の大きな異常が存在している。これらのことから 両地域の地下に まだ熱い貫入岩体が存在していることが予想されている(第11, 12図)。

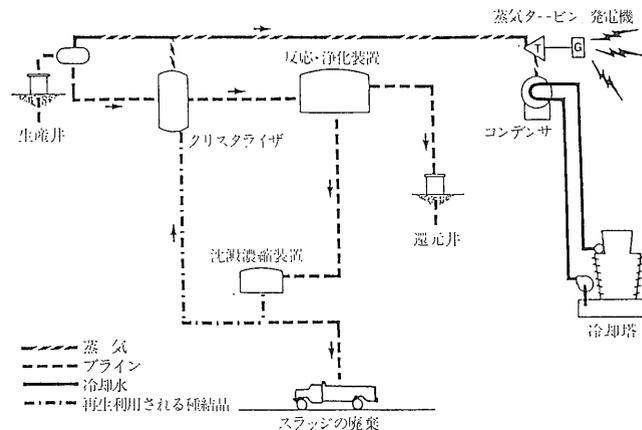


第12図 Salton Sea 地熱地区の914m (3,000ft) 深における温度分布 (MCDOWELL and ELDERS, 1980).

12. Salton Sea 地区の実験プラント

最後の見学地は 湖からほど遠くないところに建てられているユニオン・オイル社のダブル・フラッシュの地熱発電実験プラントであった(写真11)。ユニオン・オイルからは 若い女性のジオロジストが 我々を案内してくれた。彼女は見学者の質問にてきぱきと答えていた

が 話が地質からはなれると「私は大学で地質のディグリーをとり その後この地域の探査にあたっているジオロジストですから 地質関連分野のことについてはお答えできますが あなたの御質問のような……」と自分の領域にははっきりと線を引いて責任のもてる範囲を明確にしていた。



第13図 Salton Sea 10MW のパイロット・プラントにおけるブラインの処理工程 (Union Oil Geothermal Division 原図).

さて「ソルトン・トラフでは 地下の温度が高く 地熱の有望なところでは プラインの塩濃度も高くなっており それが一番困ったことなのです。」という ELDERS 教授の言葉のように ここ Salton Sea 地区は 前述したように温度が高く また高温の領域も広いが 一方第3表に示すように 塩濃度もきわめて高い。そこでこの実験プラントには スケールの原因となる熱水中に溶解している成分の除去のために クリスタライザがとりつけられている(第13図)。このクリスタライザで取り除かれたスラッジは 黒っぽい色をしていたが それは微粒の硫化物によるため 主成分はシリカであるとのことであった。なお この実験プラントは 1982年の7月に運転を始めたもので

第3表-1 Salton Sea のブラインの化学組成.

	I. I. D. No. 1		I. I. D. No. 2	State of Calif.	Woolsey No. 1	Magmamax Palmer (1975) †
	Skinner et al (1967)*	White(1968)*	Helgeson (1968)*	No. 1 Helgeson (1968)*	Palmer (1975) (maximum ppm values from Magma Power Co.) †	
Zn	790	540	500	500	—	—
Pb	84	102	80	80	—	—
Cu	8	8	3	2	—	—
Ag	0.8	1.4	2	<1	—	—
Fe	2,090	2,290	2,000	1,200	244	93
Mn	1,560	1,400	1,370	950	488	200
Na	50,400	50,400	53,000	47,800	49,729	52,500
Ca	28,000	28,000	27,800	21,200	12,658	25,000
K	17,500	17,500	16,500	14,000	6,510	5,000
Li	215	215	210	180	90	—
Cl	155,000	155,000	155,000	127,000	83.183	—
SO ₄	5	5.4	30 (Total S)	—	—	—
Sulfides S	16	16	—	30	—	—
Silica	400	400	400	—	181	500
pH	5.2	5.2	4.64	—	6.25	6.65
TDS	258,360.	~250,000	258,769	219,500	151,237	>100,000
S. G.	—	—	—	—	1.106	1.022
BHT	316°C	340°C	332°C	305°C	238°C	265°C

とくに明記されているもの以外は、すべての組成は ppm で表示されている。また、必ずしも分析されたすべての成分が表示されていない。
 * 蒸気の散逸に対する補正がなされている。 S. G. 20—25°Cにおける比重
 † 蒸気の散逸に対する補正がなされているかど BHT 坑底温度
 うか不明 ——— 報告なし

第3表-2

	Magmamax No. 1	Woolsey No. 1	Sportsman No. 1 Palmer (1975) †	Sinclair No. 4
	Needham et al (1980) (Average of Jan. 1977 tests)	Needham et al (1980) (Average chemical analyses Feb. 1977)		Palmer (1975) †
Zn	290**	—	—	600
Pb	44	—	—	60
Cu	0.5	—	—	3
Ag	0.8	—	—	1
Fe	280	235	4,200	1,300
Mn	635	—	—	1,700
Na	38,300	40,000	70,000	78,000
Ca	21,100	16,700	34,470	37,735
K	10,400	9,100	24,000	20,690
Li	150 to 200**	140	150	400
Cl	128,700	99,000	201,757	210,700
SO ₄	—	—	34	75
Sulfide S	—	—	—	—
Silica	239**	—	5	625
pH	5.5	5.44	4.82 to 6.10	5.0
TDS	>200,000	>150,000	334,987	387,500
S. G.	—	—	1.207	—
BHT	—	200°C	310°C	260°C

**1976年の試料の濃度

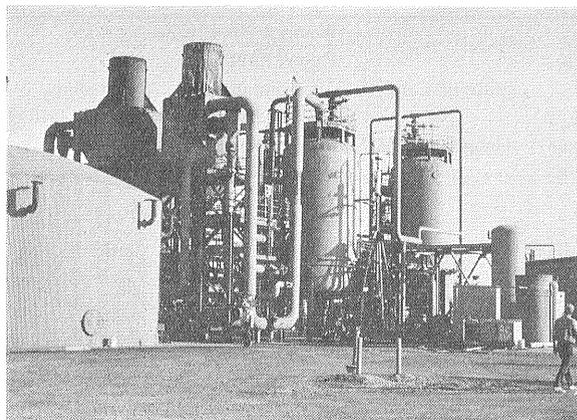


写真11 Satton Sea 地区のユニオン・オイル社のパイロットプラント。

10MW の出力をもっている。

13. ブラインの起源

ソルトン・トラフの深部起源の熱水は すべて塩濃度の高いブラインである (第3表)。この腐食性が強く多量のスケールをもたらすブラインは どこからやってきたものであろうか。

ブラインの起源は この地域が長い間コロラド川の氾濫原であったことと深く関係している。ブラインはその組成からみて かつてソルトン・トラフに存在していたいくつかの塩湖から生じた岩塩が 天水の循環により溶解して生じたものと考えられている。そしてこのブラインは 高温の岩石と反応することにより 数多くの重金属を溶かし込んだり かつてこの地に存在していた湖の水や 砂漠に降った雨水とも混じりあって 現在見られるような変化に富む組成のものとなっている (REX, 1983)。

ちなみにセロ・プリエートの熱水の起源については 1970年代の前半に 塩分と水とが別の起源かもしれないことが議論された。すなわち水は その同位体比からみて 一部蒸発したコロラド川の水と考えられるが 塩分は B/Cl 比からみて 海水起源であろう (WHITE, 1970 ; REX, 1972)。

14. おわりに

メキシコ側のセロ・プリエートでは 180MW の商業運転がなされており さらに 220MW の発電プラント 2基が目下建設中である。それに比べて 技術的問題お



写真12 ユニオン・オイル社のパイロット・プラントでパイプに付着したスケールを観察する参加者たち。鉱床関係の参加者たちは 地熱よりもむしろブライン中の金属の方に興味があるらしく 観察には余念がない。誰かがスケールの中に青緑色になった部分を見つけて「銅がはいっているじゃないか」と大きな声をあげていた。

よび環境問題をかかえたインペリアル・ヴァレーの歩みは遅い。しかし この未曾有の地熱資源に魅せられた者たちは この日もさんさんと降り注ぐ陽光の下で やっかいな地熱流体と取り組んでいた。

この壮大な地熱の実験場ともいえるインペリアル・ヴァレーを後にするとき 陽はすでに西に傾いていた。バスは食料補給等のため途中 2か所に停車し ロサンゼルスダウンタウンに夜9時に到着した。翌朝カリフォルニアの青空に向かって飛びたった飛行機は スノー・ストームの後を追いかけるようなかたちで東へ向かった。ニューメキシコは雪におおわれ やがて大平原の上にさしかかると 地表はまったく雲の下にかくれてしまった。正味5時間半の空の旅で暗くなりかけた頃おりたワシントンのダレス空港は 風が強く 寒々としていた。今夜は雪かもしれない。

本文の説明で特に引用のない部分は 巡検当日の ELDERS教授の説明と彼の書かれた案内書(ELDERS, 1984)による。地殻熱部資源課 金原啓司課長には 本文に目を通していただいた。両氏に厚くお礼申し上げる次第である。

文 献

GLEHLER, S. (1971): Gravity studies in the Imperial Valley : in Cooperative geological-geophysical-geochemical

- investigations of geothermal resources in the Imperial Valley area of California, Univ. Calif., Riverside, Education Research Service, p. 29-41.
- COMBS, J. and REX, R. W. (1971): Geothermal investigations in the Imperial Valley of California (abstr). *Geol. Soc. Amer. (Cordilleran Section)*, Riverside, Cal. Program, p. 135-136.
- ELDERS, W. A. (1979): The geological background of the geothermal fields of the Salton Trough: in *Geology and geothermics of the Salton Trough. Guidebook field trip no. 7*, *Geol. Soc. Amer. 92nd annual meeting*, p. 1-19.
- ELDERS, W. A. (1984): Note on geology, geothermics and ore genesis in the Salton Trough. *Soc. Econ. Geol., Field trip*, Feb 24th-26th, 1984, 37p.
- ELDERS, W. A., REX, R. W., MEIDAV, T., ROBINSON, P. T. and BIEHLER, S. (1972): Crustal spreading in Southern California. *Science*, vol. 178, p. 15-24.
- ELDERS, W. A. and COHEN, L. H. (1983): The Salton Sea geothermal field, California, as a near-field natural analog of a radioactive waste repository in salt. Topical report to Battelle Memorial Institute/Office of nuclear waste isolation, Report no. BMI/ONWI-531, 139p.
- FUIS, G. S., MOONEY, W. D., HEALEY, J. H., MCMEECHAN, G. A. and LUTTER, W. J. (1982): Crustal Structure of the Imperial Valley. *Professional Paper 1254, U. S. Geol. Survey*, p. 25-49.
- HELGESON, H. C. (1968): Geologic and thermodynamic characteristics of the Salton Sea geothermal system. *Amer. Jour. Science*, vol. 266, p. 129-166.
- INGLE, J. (1982): Microfaunal evidence of age and depositional environments of the Cerro Prieto section (Plio-Pleistocene), Baja California, Mexico, LBL-13897, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA.
- JOHNSON, C. E. and HILL, D. P. (1982): Seismicity in the Imperial Valley. *Professional Paper, 1254, U. S. Geol. Survey*, p. 15-24.
- MCDOWELL, S. D. and ELDERS, W. A. (1980): Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore 1, Salton Sea geothermal field, California, U. S. A. *Contr. Miner. Petr.*, vol. 74, p. 293-310.
- MUFFLER, L. J. P. and WHITE, D. E. (1969): Active metamorphism of upper Cenozoic sediments in the Salton Sea geothermal field and the Salton Trough, southern California. *Geol. Soc. Amer. Bull.* vol. 80, p. 157-182.
- NEEDHAM, P. B. Jr., RILEY, W. D., CONNER, G. R. and MURPHY, A. P. (1980): Chemical analyses of brines from four Imperial Valley, California, geothermal wells. *Soc. Petroleum Engineering Jour.*, vol. 20, p. 105-112.
- PALMER, T. D. (1975): Characteristics of geothermal wells located in the Salton Sea geothermal field, Imperial County, California. UCRL-51976, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- REX, R. W. ed. (1972): Origin of the salt of the Imperial Valley and surrounding watershed area. Cooperative investigation of geothermal resources in the Imperial Valley area and their potential value for desalting of water and other purposes, final report, contact no. 14-06-300-2194, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 267p.
- REX, R. W. (1983): The origin of the brines of the Imperial Valley, California. *Geoth. Rosour. Council Trans.*, vol. 7, p. 321-324.
- ROBINSON, P. T., ELDERS, W. A. and MUFFLER, L. J. P. (1976): Quaternary volcanism in the Salton Sea geothermal field, Imperial Valley. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 87, p. 347-360.
- SALVESON, J. O. and COOPER, A. M. (1979): Exploration and development of the Heber geothermal field, Imperial Valley, California: in *Geology and geothermics of the Salton Trough. Guidebook, field trip no. 7*, *Geol. Soc. Amer. 92nd annual meeting* p. 82-85.
- SKINNER, B. J., WHITE, D. E., ROSE, H. J. and MAYS R. E. (1967): Sulfides associated with the Salton Sea geothermal brine. *Econ. Geol.*, vol. 62, p. 316-330.
- WHITE, D. E. (1968): Environments of generation of some base metal ore deposits. *Econ. Geol.*, vol. 63, p. 301-335.
- WHITE, D. E. (1970): Geochemistry applied to the discovery, evaluation and exploitation of geothermal energy resources. Proceedings of the United Nations Symposium on the development and utilization of geothermal resources (Pisa), vol. 2, part 1. *Geothermics*, special issue no. 2.