

地熱地帯における深部坑井掘削の現状

金原 啓 司 (地殻熱部)
Keiji KIMBARA

1. はじめに

Larderello Wairakei 松川など初期に開発がなされた地熱地帯の開発深度はいずれもせいぜい1000m前後であったが 最近では掘削技術の進歩もあってか 世界的に深度2000m前後の地熱井が数多く掘削されるようになってきている。地熱地帯においてより地下深部の情報を入手することは その地域の地熱系生成メカニズムを解明する上で重要なことは勿論のこと 既開発地域の蒸気生産量を増大させたり また将来にわたって生産量を保障したりするためにも いわゆる浅部地熱資源の下部に賦存が期待される深部地熱資源の実態やその開発可能性について検討を行なう上で重要なことであろう。このためここでは世界における2000m以深の深部地熱坑井掘削の現状と それから得られている深部地熱の実態について 最近公表された文献等から紹介を行なってみたい。

本文を書くに当たっては多くの文献を引用することに心掛けたが 引用にもれがあったり また内容誤解があったりして 必ずしも十分な紹介になっていないことが懸念される。末尾に引用文献を載せておいたので 必要があれば原文を参照していただければ幸いである。なお文献入手に当たっては地質調査所地殻熱部伊藤久男 玉生志郎両技官にお世話になったので ここに謝意を表したい。

2. 深部地熱とは

大沼 松川 葛根田 鬼首 大岳 八丁原などの既開発地熱発電所における調査井および生産井の掘削深度は深いものでも1700m 平均すれば1500m以浅のものがほとんどである。国が進めている各種地熱開発プロジェクトではこの程度の深度に賦存する資源を浅部地熱と呼び それ以深 (通常は2000m以深) の資源を深部地熱と呼んで区別しているようであるが この両者に厳密な科学的定義が与えられているわけではない。メキシコの Cerro Prieto やフィリピンなど最近急速に大規模な開発がなされてきた地熱地帯の開発深度は3000m前後に及んでおり 上述の区分に基づけばこれらは立派な深

部地熱ということになる。林 (1982) は浅部の温度データから算出する活動度指数に基づいて 330°C の最高品位を有する深部高温貯留層の深度予測法を提案しているが それによれば活動度指数により深部高温貯留層の深度が決まることになる。

以上述べたように 深度によって単純に「深部地熱」を定義するほかに 成因的な意味を持たせた定義も可能であろう。すなわち 大沼 松川などの既確認の「浅部」地熱系に対して地熱流体を供給するより本源的な高温の地熱系が存在するとすれば そのような地熱系はより地下深部に賦存することが期待されるので これを「深部」地熱系と呼ぶことができるかもしれない。しかしながらこのような「深部」地熱系の実態については残念ながら日本ではよくわかっていないのが現状であろう。

最近 Larderello Wairakei などの既開発地において現在の地熱貯留層の下部の開発可能性を確認するために2000mを越す深部坑井の掘削がなされている。以下ここでは地熱地帯における2000m以深の坑井掘削例を紹介し あわせて「深部地熱」について一体どのような情報が得られてきているのかについて概観してみたい。

3. 各国における深部地熱坑井掘削の現状

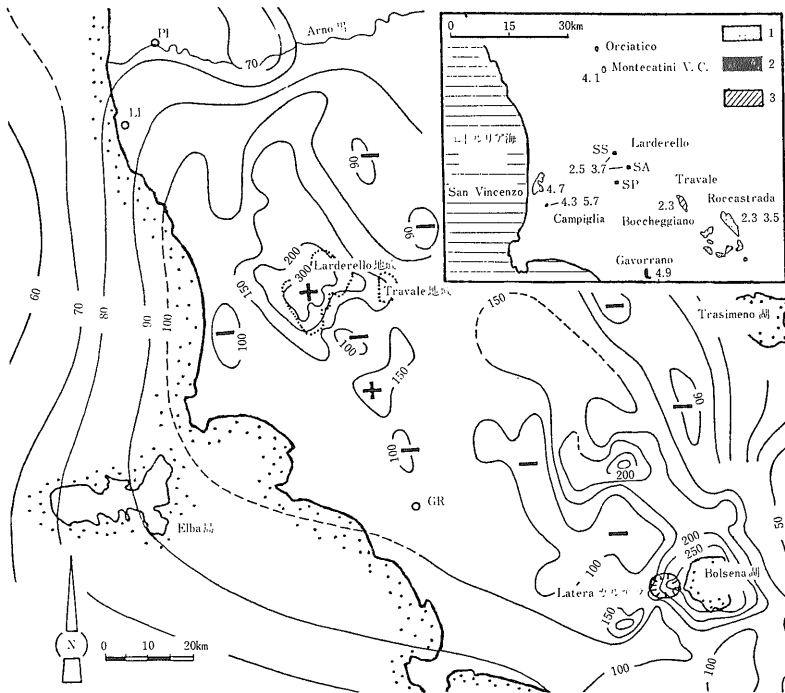
3.1 イタリア

世界で最初の商業用地熱発電所を建設したイタリアは 最近では深部地熱坑井掘削を積極的に進めているように見える。CIGNI (1980) によればイタリアでは「深部」とは 3000~5000mの深度に対して用いられているようである。1978~1979年 Larderello において 当時としては世界最深長 (4092m) の地熱坑井 (Sasso 22) が EEC より財政援助を受けて掘削された (BERTINI et al., 1980) (第1図参照)。

この坑井掘削の目的は

①現在の蒸気生産層の下部に技術的に可能な深度から工業的に開発可能な地熱流体が回収できるかどうかを確認すること

②1974年の反射法調査によって確認された古生代変成



第1図 Larderello-Travale-Latera 地熱地帯位置図. (Italian working group, 1983).

この図には地表面2000mにおける等温線(°C)が表現されている。右上の地図には“Late Alpine”火山岩類の分布・年代(Ma)と坑井位置が示されている (DEL MORE et al, 1982).

- 1 : 第四紀~新第三紀火山岩類
- 2 : 新第三紀貫入岩類
- 3 : 古生代基盤岩類
- SA : Sasso 22
- SP : San Pompeo 2
- SS : Serrazzano

岩基盤岩中の深部反射層 (3.5~7km) の特徴を明らかにすること

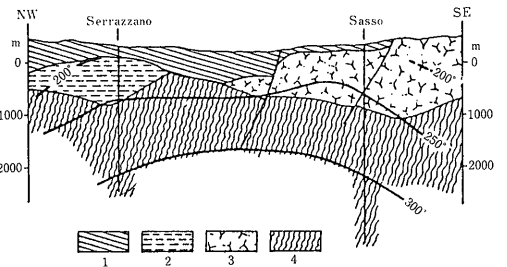
③深度5 kmまでの地熱ポテンシャル (Resource と Reserve) の評価

④資源の合理的開発のために Larderello の水理地質学的モデルの改良

などである (BERTINI et al., 1980 ; CIGNI, 1980)

この坑井は 3970m で 380°C の高温に達し また 2500~3800m には広範囲 かつ著しく破碎された基盤岩 (特にこれまで坑井では研究されたことのない片麻岩層) が存在し その温度 (300~380°C) から判断して この破碎層には開発可能な高温流体が含まれるであろうことが推測されたが 残念なことに掘削上のトラブルのために深部地熱流体の噴出には至らなかったようである。しかしながら Sasso 22 の結果は この地域の深部基盤地質について多くの情報を与えるとともに (第2図参照) 変質鉱物研究の結果はこの地域に複雑な熱史があったことを示唆し かつ深度 3~4 km の未開発基盤岩中にも流体循環が存在することを示しているなどの成果が得られている。また基盤岩中の変成鉱物 (白雲母 黒雲母 角閃石) の Rb-Sr および K-Ar 年代測定結果から この地域では約 3.7Ma 前に約 8 km の深さのところまで貫入した花崗岩体 (パソリス) の残存熱が現在の熱源になっており これは Larderello の地熱活動が異常に長いことを物語っているものと説明されている (第1図参照)

1985年1月号



第2図 Larderello 地熱地域の Sasso-Serrazzano 間の地質・温度断面 (CAVARRETTA et al., 1982).

- 1 : 新第三紀堆積物 (粘土質 砂質堆積物) 異地性フリッシュ層
- 2 : くさび状異地性外来岩体
- 3 : Tuscan ナップ (三疊紀~漸新世の炭酸塩岩 硬石膏層で主要貯留層とリチャージ域を形成)
- 4 : 古生代変成岩類 (千枚岩 珪岩 雲母片岩 片麻岩 角閃岩)

Sasso 22 の地質 (BERTINI et al., 1980)

0~190m : Ligurian ナップ (粘土質 砂質堆積物よりなるフリッシュ (始新世))

190~1325m : Tuscan ナップ
 (190~270m : アルコーズ砂岩 (漸新世)
 (270~600m : 炭酸塩岩層 (三疊~ジュラ紀)
 (600~1325m : 炭酸塩岩 硬石膏 (三疊紀))

1325~1440m : 弱変成砂岩 礫岩 (三疊紀)

1440~2315m : 千枚岩 珪岩など (古生代)

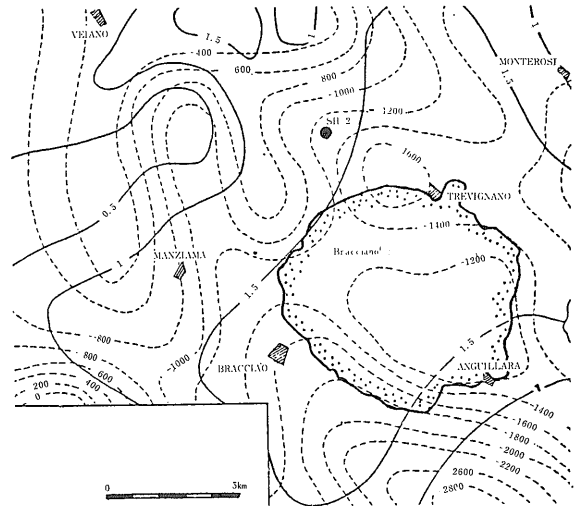
2315~2375m : 雲母片岩 (古生代~先カンブリア紀?)

2375~4092m : 片麻岩 角閃岩 (古生代~先カンブリア紀?)

(DEL MORE et al., 1982).

その後 Sasso 22 のデータを総合的に解析し 地震探査によって判明したアノマリーに相当する基盤岩中の深部層に商業的に開発可能な流体が存在するかどうかをさらに実証するために Larderello 地熱地帯の南部において San Pompeo 2 (2966m) が掘削された(第1図参照). 本坑井は 0~40m 新第三紀の礫岩 40~160m フリッシュ層(白亜紀) 160~620m Tuscan ナッベ(三畳~ジュラ紀の石灰岩) 620~1140m 砕屑堆積物(三畳紀)そして1140m 以深が古生代~先カンブリア紀の變成岩類(千枚岩 變成グレイワック 雲母片岩 角閃岩)よりなっている. 坑井テストの結果 865~2300mにわたって破碎層(1500mでの貯留層圧力 30kg/cm²でこの値は既開発の蒸気卓越型貯留層と同じ)が発見された. 2300~2930m間には破碎帯は発見されなかったが 2930mにおいて 浅部貯留層と連続していない深部透水層に遭遇し 温度 400°C以上 貯留層圧力 245kg/cm²以上の地熱流体の存在が示唆されたものの 高温・高圧のために流体採取には成功しなかった(BATINI et al., 1983). ちなみに本坑井より得られたガスの組成は CH₄ 5% H₂ 10%で浅部のものに比較して最も高い値を示している.

一方1979~1980年にはナポリの西の San Vito 地域のカルデラ内において これまでよくわからなかったこの地域の地質層序を明らかにし 貯留層および地熱流体の熱・化学的性質を研究する目的で深度3046mの地熱井が掘削された(第4図参照). ここでの地質は坑底まで熱水変質を受けた凝灰岩 溶岩などの火山岩類よりなっており 419°C以上の高温(地熱井としては世界最高記録)で 圧力約300kg/cm²の流体に遭遇したが 技術的なトラブルのために生産性に関する十分なデータは得ら

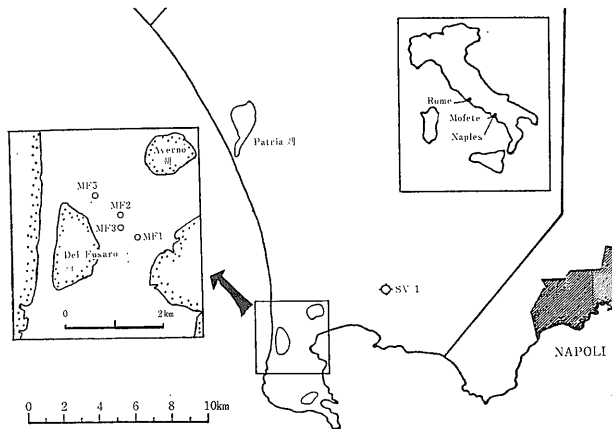


第3図 Sabatini 地熱地域 (CALAMAI et al.,1983).

破線: 炭酸塩岩層の上限深度(海拔m)
 実線: 10m当りの等温度勾配線(°C)
 黒丸: 坑井位置

れなかった. しかしもし適当な装置が1984年中に入手できれば 長時間のテストを行なうことができることである(BRUNI et al.,1983).

ローマの北 Sabatini 地域(第3図参照)では 深部における層序 構造および熱の状態を調べる目的で1982~1983年にかけて小口径の SH*-2(深度2498.7m 2484mでの温度290°C)が掘削された. この坑井は 0~460m 第四紀火山岩類 460~1140m 不透水性の異地性フリッシュ層(白亜紀~漸新世)そして1140~2498.7mは強く熱変成を受けたフリッシュ層および炭酸塩岩層(中生代)



第4図 Mofete (MF) San Vito (SV) 地熱地域坑井位置図 (GUGLIELMINETTI and TORE,1983).

* Slim Hole の意味

よりなっている (CALAMAI et al., 1983). ここでは二次的な鉱化作用を強く受けている部分は貯留層としてのポテンシャルも減少している。

また Latera 地熱地域 (第1図参照) においては 地表調査の結果を検証し かつ Latera カルデラ内の深部に地熱流体が存在するかどうかを確認するために1978年カルデラ内北部において L1 (2800m) が掘削され345°Cの高温を得たものの 生産可能とはならなかった (CALAMAI and FERRARA, 1980). この坑井は 当初深度2500mで計画されたが 透水層に遭遇しなかったため最終的には2800mまで増掘された. 本坑井の地質は地表より1280mまでがカルデラを埋める第四紀湖成堆積物 火砕岩類であり 以下1280~1380m 異地性フリッシュ相 (白亜紀~暁新世) 1380~1720m Tuscan 統の炭酸塩岩類 1720~1940m 閃長岩質シル (0.5Ma) 1940~2750m 閃長岩質岩脈を伴う熱変成堆積岩類よりなっている. その後カルデラ中央部において掘削された L3 (2500m* 300°C*) も十分な破砕層に遭遇しなかったが 他の坑井 (L2** L3D L4) は生産可能であり 主に深度500~1600mの炭酸塩岩中のフラクチャーが良好な貯留層を形成している (BARELLI et al., 1983).

ナポリ市西方の第四紀火山地帯に位置する Mofete 地熱地域 (第4図参照) では最低10MWの発電をめざし その地熱評価のために3本の深い坑井 (MF1 2 5) が掘削された. このうち MF5 は温度350°C以上の炭酸塩岩貯留層に到達することをねらって (CIOPPI et al., 1980) 深度2700mまで掘られたが 結局これには到達しなかったようである (CHIERICI et al., 1983). ちなみに MF-5 に先がけ 1978~79年に深度1989mまで掘削された MF-2*** (坑底温度337°C 圧力155kg/cm²) は 同時期に掘削された MF-1 (深度1606m 坑底温度は1450mで295°C) よりも性能が良く坑井テストの結果 口元圧 5 kg/cm² で総流量92.6t/h 蒸気量40.5t/h であり (最大口元圧 57kg/cm²) 4.5 MW の発電能力が確認されている (CHIERICI et al., 1983; GUGLIELMINETTI and TORE, 1983). ここでは二つの貯留層があり 1つは透水性の低いプロピライト質層 (厚さ718m) であり 他はこの下に位置する透水性の高い変成岩層 (厚さ200m) である (CHIERICI et al., 1983).

3.2 ニュージーランド

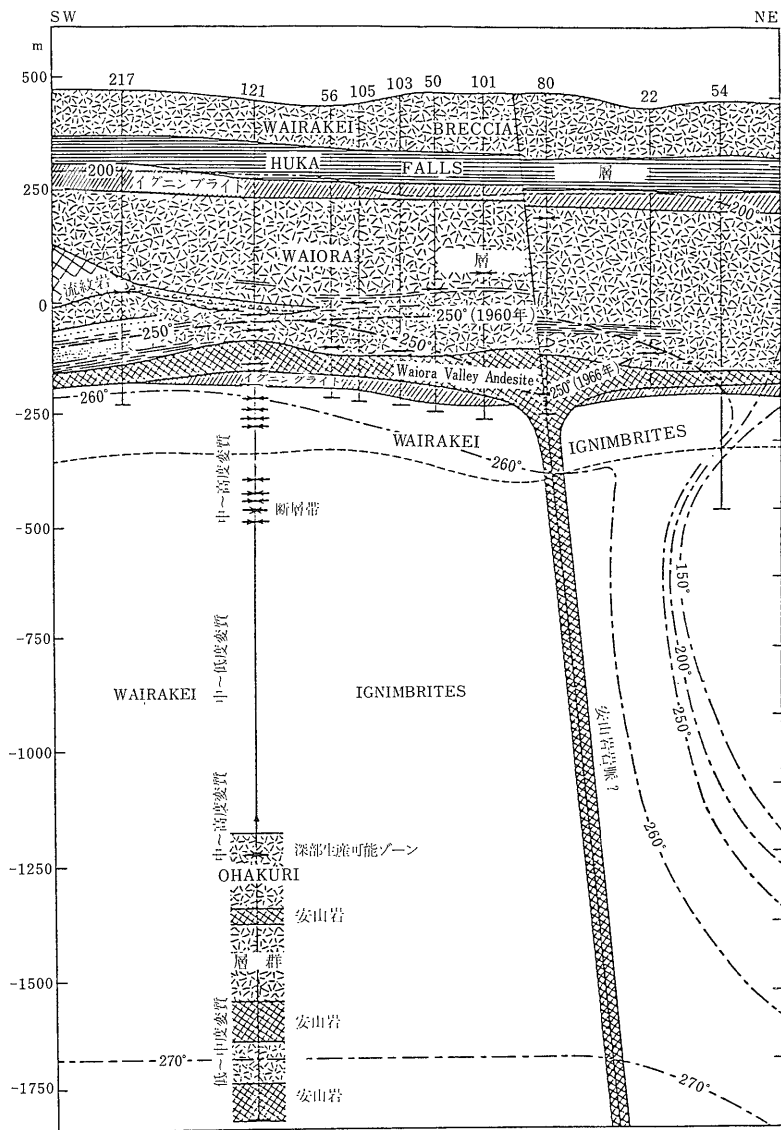
Wairakei では 現在 Huka Falls 層を帽岩として主に深度600~800m の Waiora 層より蒸気が採取されている. しかし今後の生産量を維持するためにもより深部での地熱ポテンシャルを把握しておく必要があるとのことから Wairakei の中心部において深度2250mの坑井 (W121) が掘削された. その結果第5図に示すように Waiora 層の下部には厚さ1000mにも及ぶ不透水性の Wairakei Ignimbrites が存在し さらにその下部には Waiora Valley Andesite に類似した安山岩を3枚はさむ軽石質火砕岩と堆積物よりなる厚さ650mの Ohakuri 層群が確認された. 坑底で275°Cを記録したものの この坑井は生産的な井戸ではなかった. このように ここでは透水性の低いイグニンプライトが厚いために深部での温度上昇率が低く 結局深部開発の対象とならないことがわかった. W121の北約1.2kmに位置する坑井 W219 では斑晶含有量から3シートに分けられている Wairakei Ignimbrites のうち上部シートしか見られないので この両坑井間に伏在すると予想されるカルデラ縁もしくは N-W 性交差断層などの主要な構造線が今後の深部 (2.5~3km) 調査井のターゲットになるであろうと言われている (GRINDLEY, 1982). また Huka Falls 層中には含まれる下位の Wairakei Ignimbrites の破片をとりこんだ「熱水爆発角礫岩」(Hydrothermal eruption breccia) が最も厚い地域 (W121の北西に位置し 爆発地点を考えられる) と Wairakei Ignimbrites 上に熱源と関係があると考えられている流紋岩が厚くおおっている地域 (W121の南) も深部調査井のターゲットになるであろうと考えられている.

Broadlands 地熱地帯では深度400~600mでの熱水還元を研究する目的で 蒸気生産域の外側の比抵抗境界付近において掘削された坑井 (BR34) が その後この地域のより深部での透水性を研究するために 深さ2580mまで増掘された (第6図参照). その結果最高温度306°C 流量80t/h (0.5kg/cm²) が得られている (DENTON 1980). さらに話しはやや古くなるが 1982年9月に工業技術院サンシャイン計画の招へい研究者として来日した Auckland 大学の BROWNE 博士によれば Ngawha 地熱地域においても2本の深部試錐が予定されているとのことである.

* 表からの読み取りのため値は不正確

** 深度約1500mの坑井で 500t/hのガス 熱水 蒸気混合物 (温度190°C 圧力15kg/cm²) が噴出している (噴出物の化学組成: Na 3000 K 490 NH₄ 47 As 100 Cl 3750 SO₄ 450 H₂BO₃ 2050 SiO₂ 460 TDS 11500 ppm)

*** 噴出物化学組成 Na 3584.0 K 834.0 Li 9.6 Ca 340.0 Mg 0.36 Ba 0.29 Sr 10.0 As 7.5 B 99.7 SiO₂ 317 Cl 7157 SO₄ 4.3 HCO₃ 28.8 TDS 12808.0 (ppm)



第5図 Wairakei の地質断面 (GRINDLEY, 1982).

Wairakei Breccia : 軽石凝灰岩
 火山礫凝灰岩(上部更新世) Huka Falls 層 : 泥岩 (湖成堆積物で帽岩の役割を果している) Waiora 層 : 軽石質火砕岩 (貯留層になっている) Wairakei Ignimbrites : 緻密な溶結凝灰岩 (以上下部更新世) Ohakuri 層群 : 火砕岩をはさむ軽石質堆積物 (鮮新〜更新世)

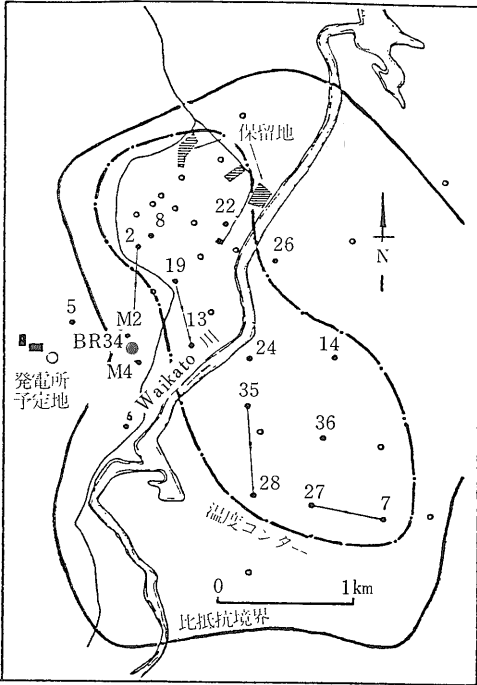
3.3 アメリカ

アメリカにおいて地熱を目的とした最深の坑井は高温岩体 (HDR) プロジェクトの一環としてニューメキシコ州のバイエスカルデラの西 Fenton Hill において先カンブリア紀の花崗閃緑岩中を長さ 4661m (深度4398 m) まで掘削したEE-2 (Energy Extraction Well No. 2) であろう (坑底温度は315°C) (BRITTENHAM et al.,1982). なおここでは EE-2 と隣接して長さ4247m (深度3977m) まで掘削された EE-3 との間で水圧破砕法による人工地

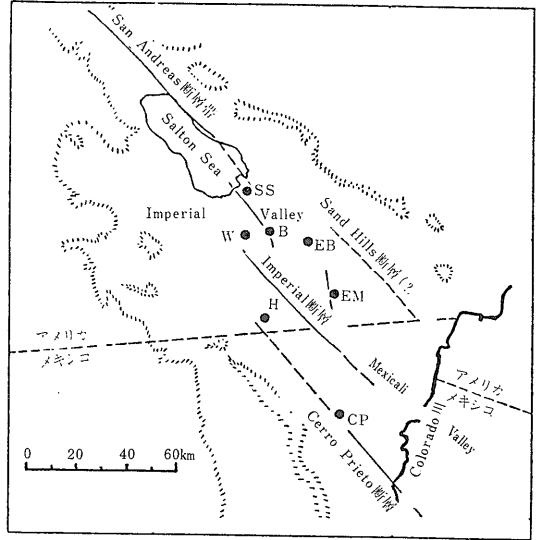
熱貯留層の造成実験が現在日・米・西独三国協力プロジェクトとして行なわれている*.

カリフォルニアの Imperial Valley からメキシコの Mexicali Valley にかけて位置する Salton Trough 地熱地帯には Salton Sea East Brawley East Mesa Heber Cerro Prieto など世界的に著名な地熱地域が多数分布している (第7図). Salton Trough 地熱地帯とりわけ Imperial Valley 地熱地帯については 本地質

* 西ドイツの Urach 地熱地域でも 1977~1978年にかけて深度3334m (坑底温度143°C) の Urach 3号井が掘削され (1604m 以深は上部より正片麻岩 準片麻岩 雲母閃長岩の基盤岩類よりなる), 3000m以深の雲母閃長岩に対して水圧破砕法による人工地熱貯留層造成実験がなされ, 坑口圧 357kg/cm² で 80l/分の小規模な循環熱水が得られている (DIETRICH et al., 1980).



第6図 Broadlands 地熱地帯の BR34井 (2580m 306°C) の位置を示す図 (DENTON, 1980).



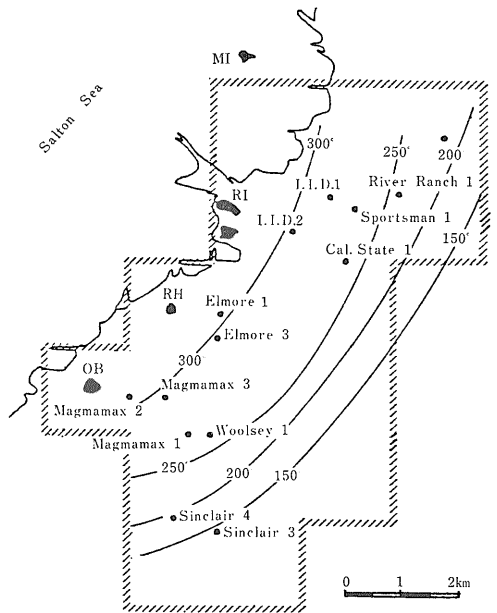
第7図 Salton Trough 地熱地帯 (BROOK and MASE, 1981).

- SS: Salton Sea W: Westmorland
- B: Brawley EB: East Brawley
- EM: East Mesa H: Heber
- CP: Cerro Prieto
- 黒丸: 地熱地帯 実線: 断層 破線: 推定断層

ニュース (笹田 1985) において詳細に紹介されているのでここでは重複した説明は極力さけて話を進めたい。Salton Trough 地熱地帯では Salton Sea と Cerro Prieto のみ地表徴候を伴っているが 他はいわゆる潜頭性 (“blind”) 地熱地帯となっており そこに見られる地熱坑井も大深度のものが多く。

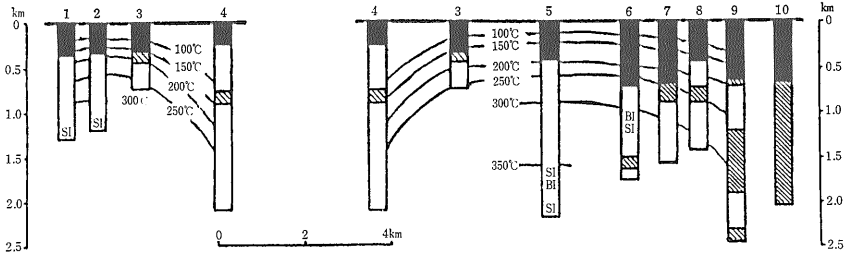
East Brawley は深度3000m を越すと200°C 以上の温度が期待できる地熱地帯である。ここでは4000m を越す坑井2本 3000m 級坑井4本が報告されている。このうち1963年に石油開発を目的として掘られた坑井 Wilson No. 1 はコロラド川のデルタ性堆積物を深度4097m まで掘削し (坑底温度260°C) 54000ppm の塩分濃度を持つ塩水に遭遇している。また4085m まで掘削された Borchard A-1 は深度 2743~4058m が生産域となっている (BROOK and MASE, 1981)。

Salton Sea 地熱地帯 (第8図) は北アメリカでは最も高温の地熱地帯であって この坑井からは高濃度の重金属を溶解した Na-Ca-K-Cl 型の塩水を産することによって有名である。Salton Sea 地熱系の熱重力磁気異常のほぼ中心で掘削された Elmore 1 (第8・9図参照) は深度2169m で361°C の高温を得ている (McDowell and ELDERS, 1980)。第9図に示すように コロラド川のデルタ性堆積物中には玄武岩類が貫入している (BIRD and 1985年1月号



第8図 Salton Sea 地熱地域の坑井位置図 (McDOWELL and ELDERS, 1980).

- 黒丸: 坑井位置
- 黒印: 流紋岩噴出物
- 実線: 深度914mでの温度 (°C)



第9図 Salton Sea 地熱地域の地質・温度断面 (BIRD and NORTON, 1981).

地熱井: 1. Magmamax No. 2 2. Magmamax No. 3 3. Woolsey No. 1 4. Sinclair No. 1 5. Elmore No. 1 6. I.I.D. No. 2 7. I.I.D. No. 1 8. Sportsman No. 1 9. River Ranch No. 1 10. Hudson No. 1

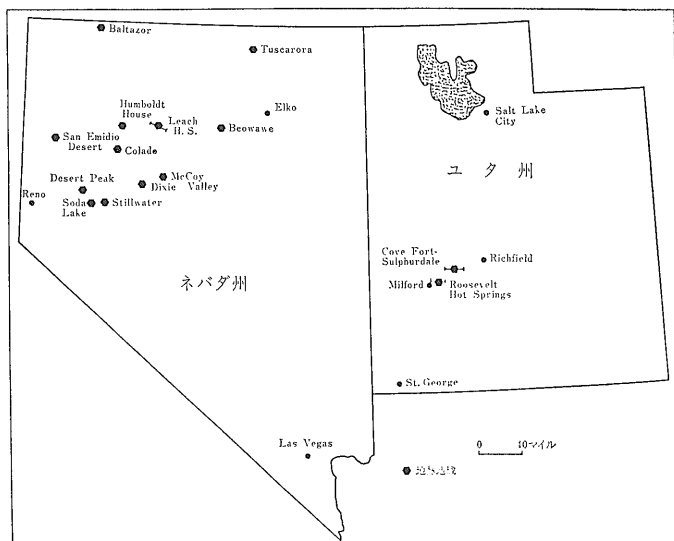
地質: 黒色<30% 斜線30-50% 白>50% (150m間隔での砂の体積パーセント)

BI 玄武岩質火成岩類 SI 珪長質火成岩類

NORTON, 1981). なお Salton Sea においては Republic Geothermal Inc. による深度 3700m の坑井を世界最深長の 5500m まで増掘して地下深部の研究を行なおうとするプロジェクト (Salton Sea Scientific Drilling Project 略称 SSSDP) が カリフォルニア大学の ELDERS 教授らを中心にして計画されている (ANDERSON, 1983).

ユタ州からネバダ州にかけての Basin and Range 地域には Roosevelt Hot Springs Dixie Valley Desert Peak などの地熱地帯が分布している (第10図). ここでは 150°C 以上の高温地熱資源の開発を加速化させるためにエネルギー省 (DOE) 地熱課が進めている “Industry Coupled Program” が展開されている.

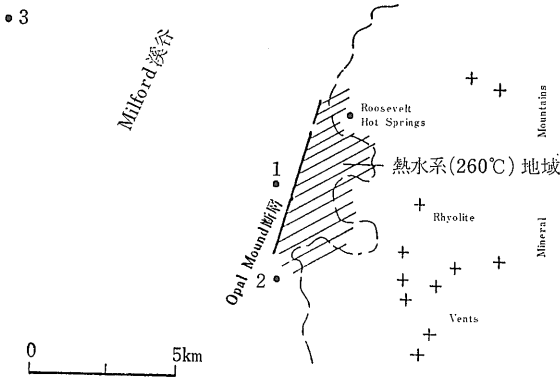
BROOK et al. (1979) により平均貯留層温度 265°C 970MWe・30年と見積られているユタ州の Roosevelt Hot Springs (第11図) では Industry Coupled Program により深度 2287m の Utah State 52-21 が Opal Mound 断層のすぐ南で掘削され 坑底温度 204°C を得たものの継続した噴気は得られなかった (FIORE, 1980). また Opal Mound 断層の西約 8 km では 1979年に MT 法によって発見された低比抵抗を検証するために Acord 1-26 (3855m) が掘削され 坑底で 230°C の温度が得られた. 検層の結果 3507~3812m の範囲に破碎帯が認められたので噴出テストを行なったが 結局ここを構成する結晶質岩 (石英モンゾナイト) には透水性のないことが判明した (EAST, 1981). このようなことから Opal Mound 断層の西および南側の地域はむしろ高温岩体 (HDR) プロジェクトの適地として最近注目されてきているようである (GOFF and DECKER, 1983). ちなみに SHANNON et al. (1983) によれば この地域の高温岩体資源は隣接する熱水対流系資源の最低 8 倍はあり Acord 1-26 の東と Well 9-1 の西が HDR 坑井の最適地であるとされている (第11図参照).



第10図 Basin and Range 地域の地熱地帯 (WARD et al., 1981).

以上のほかネバダおよびユタ州の Basin and Range 地域の地熱地帯からは Industry Coupled Program により掘削された以下の 2000m 以深の地熱坑井が報告されている (GLENN et al., 1982). Beowawe : Ginn 1-13 (3033m 149°C). Dixie Valley : Dixie Federal 45-14 (2750m 194°C) 同 66-21 (2981m 186°C) Desert Peak : B-23-1 (2937m

地質ニュース 365号



第11図 Roosevelt Hot Springs 地熱地域の概念図 (GOFF and DECKER, 1983).

黒丸：坑井位置

1. Well 9—1 (2049m, 227°C) 噴出せず
2. Utah State 52—21 (2287m, 204°C) 噴出せず
3. Acord 1—26 (3855m, 230°C) 噴出せず

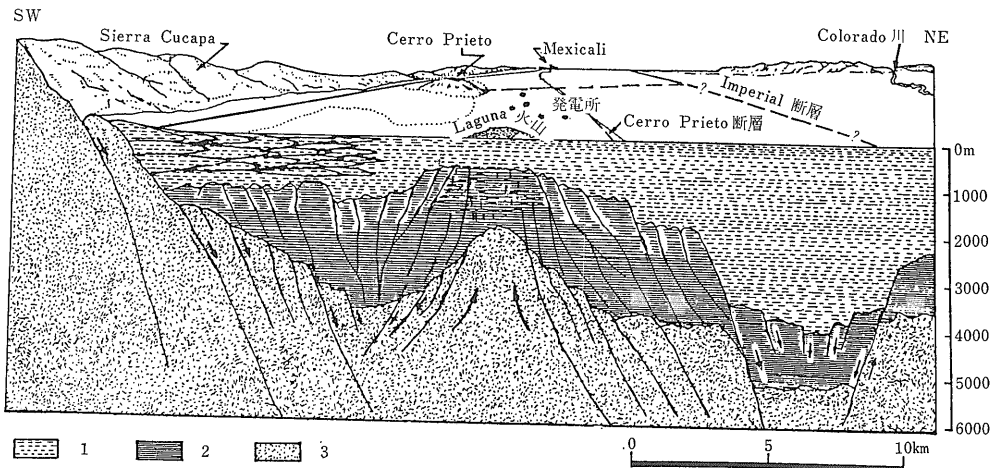
209°C) Humboldt House : Campbell E-2 (2457m 156°C) Stillwater : DeBraga 2 (2117m 169°C) R. Weishaupt No. 1 (3052m 178°C) (以上ネバタ州) Cove Fort-Sulphurdale : CFS-42-7 (2345m 169°C) (ユタ州). このように Basin and Range 地域では多数の2000mを越す深部試錐がなされているものの結果から見る限り200°Cを越える温度が得られているものは非常に少ないようである. なお, EDMISTON (1982)によれば 1974~1981年間に Basin and Range 地域で掘削された53本の Wildcat 井 (平均深度1707m)のうち177°C (350°F)以上の貯留層温度を得て成功と判断された坑井はわずか6本であるとのことである.

3.4 メキシコ

3.3で述べた Salton Trough 地熱地帯の南 Mexicali Valley に位置する Cerro Prieto 地熱地域では 1981年

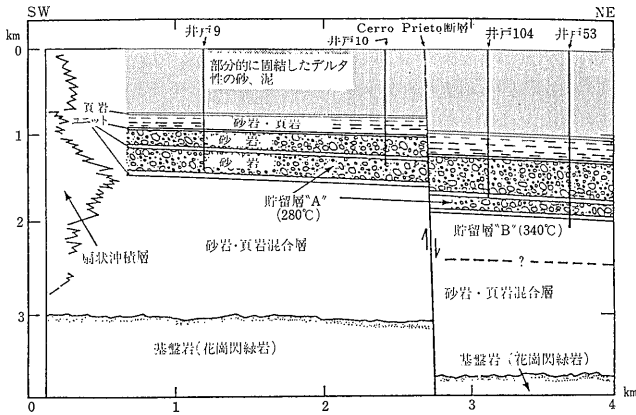
に180MWが発電中であり さらに 1984年をめざして440MWが建設中である (DIPPO, 1984) (第7・12図参照). LIPPMANN (1983)によれば ここでは浅部 (Aもしくはα)と深部 (Bもしくはβ)の二種の貯留層があり前者は深度1000~1400m 温度285°C また後者は深度1550~1800m 温度335°Cの貯留層である (第13図参照). β貯留層はE-1 (深度1996m 温度338°C)の掘削により発見された深部貯留層であり その後この深部地熱井“Eシリーズ” (平均深度1900m)は1981年までに6本 合計7本掘削され いずれも320°C以上の高温を得ている (DOMÍNGUEZ A. et al, 1981).

HOLFMAN et al. (1982)のモデル (第14図)によればこの地域の地熱流体の動きは層序と構造により規制されている. すなわち東側の頁岩層 (Unit O)の下部の砂岩層を通じて地下深部に浸透した流体は貫入岩脈群 (熱源)により加熱される. 高温化した流体は西方に向か



第12図 Cerro Prieto 地熱地域の地質断面 (PUENTE C. and DELAPEÑA L., 1979)

- 1 Unit A 未固結~半固結の粘土 砂 シルト 礫 (第四紀) 厚さ600~2215m
- 2 Unit B 固結した頁岩 シルト岩 砂岩などのデルタ性堆積物 (第三紀) 厚さ2000~2500m
- 3 Unit C 花崗岩類 変成堆積岩類 (上部白亜紀).



第13図
Cerro Prieto 地熱地域の初期に開発され部分の地質断面モデル (HARR and PUENTE C.,1979).

って移動した後 断層に沿いに上昇する. この流体は再び Unit O の下部を西側に向かって移動し続け Unit O が連続していない部分をぬって上昇する. その後 頁岩層 (Unit N) の下部に沿って温度を低下させながらさらに西側に移動し その一部は断層に沿って地表にまで湧出している.

Cerro Prieto において最高温度を記録した坑井はM-117 (2495m) の 360°Cである. また最深の坑井は北東端で掘削された H-2 の 3535m (288°C) であり ここでは2500m以深が貫入岩となっている (DOMÍNGUEZ A. et al., 1981).

3.5 アイスランド

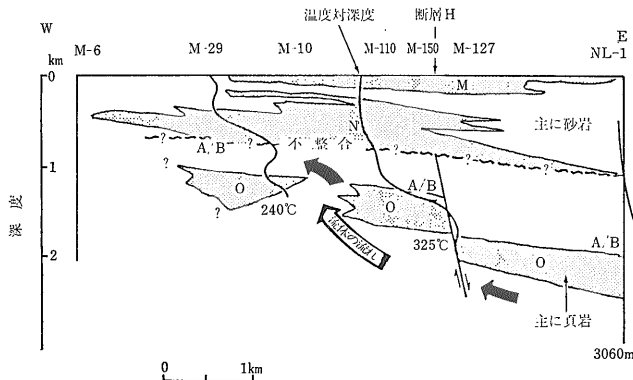
Reykjavik 市では地域暖房のために150°C以下の低温熱水が利用されている. このために Laugarnes では1958年以来深度1000mを越す試錐がなされており ここでの主要な貯留層は深度1250m 温度135°Cである. また最深の坑井 (2200m) で約145°Cの深部生産層に遭遇している. この地域の熱水は溶存成分 (TDS) が 350 ppm と低く Cl 濃度は35 ppmである. その後1979年

には可能な限り深部の地熱流体を開発する目的で2587m と3085mの深部ボーリングが行なわれ 155°Cの流体採取に成功しているが Cl濃度は200 ppmと高くなっている (PÁLMASSON et al.,1983)

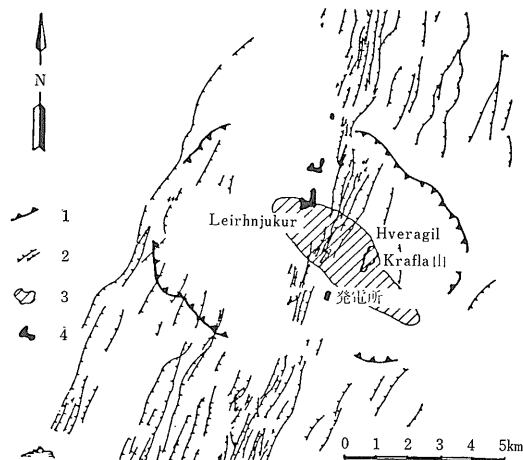
アイスランド北東の新时期火山帯のカルデラ(8×10km)内に位置する Krafla 地熱地域は1974年に開発がスタートし 現在20MWの発電が行なわれている (第15図). ここは貯留層温度が300~350°Cの高温地熱地帯であるが 第16図に示すように不透水層をはさんで浅部低温貯留層と深部高温貯留層の2種類の貯留層が存在している. 後者の貯留層はこの地域で掘削した最深の坑井 (2200m) よりも深い部分にまで及んでおり ここではその下部に存在するマグマから火山性ガス (SO₂ H₂ CO₂) が供給されている (STEFÁNSSON, 1981 ; BODVARSSON et al.,1981).

3.6 フィリピン

アメリカに次いで世界第2位の地熱発電国 (1983年現在の総出力593.5MW(DIPIPO, 1984))に躍進したフィリピンでは深度2000mを越す深い地熱井が数多く掘削されている (フィリピンの地熱開発の現状については山崎・田中(1981)



第14図
Cerro Prieto 地熱地域の流体の動きを示す概念モデル (HOLFMAN et al.,1982). 岩質的にはM, N, O (アミ目の部分) は頁岩層他は砂岩層を示す A/Bは Unit A, B の境界を示す.



第15図 アイランド Krafla 地熱地域 (STEFÁNSSON, 1981).

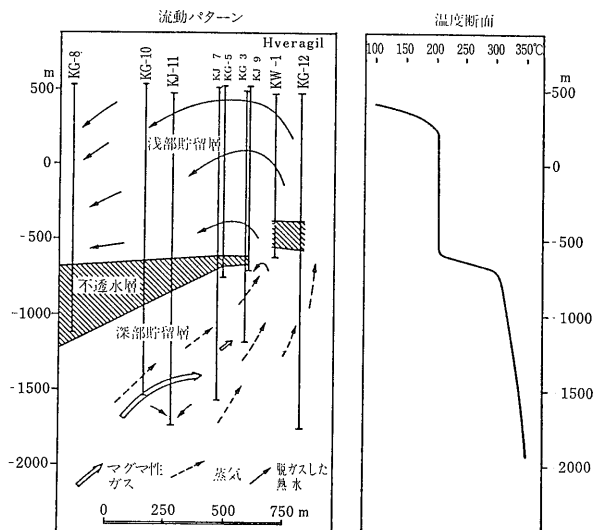
1. カルデラ縁
2. 断層もしくはオープンフィッシャー
3. 地熱地域
4. 1975～77年噴火の地点

に詳しく述べられている). Tongonan (レイテ島 出力40.5MW) Tiwi(ルソン島 出力330MW) Mak-Ban(ルソン島 220MW)に次いで 1980年に 3.0MW が運開した Negros 島 Palimpinon (Okoy) 地熱地域では 1978～1979年に掘削された OK 1 (1978. 1m 190°C) OK 2 (1164. 4m 243°C) OK 3 (1521. 8m 224°C) OK 4 (2130. 0m 299°C) OK 5 (1975. 2m 310°C) の噴出テストの結果 この程度の深度に良好な Permeability が期待できないことがわかった (主要生産ゾーンはOK 2 深度939～950m OK 3 575～700m OK 4 980～1065m OK 5 (総流量115 t/h 9.9M We 相当) 1450～1700mである). その結果 さらに良好な Permeability を求めて Okoy 川上流に2500mを越す深部地熱井 OK 6 (2770. 8m 283°C) OK 7 (2882. 8m 303°C) OK 8 (2981. 8m) が掘削された (坑井位置については前出の山崎・田中 (1981) を参照されたい). その結果主要な生産ゾーンはOK 6 (総流量292t/h 11MWe 相当) で深度2300～2700m OK 7 (総流量 216t/h 10MWe 相当) では2700～2882mの深部に及んでいることがわかってきた (WARD 1980). 以上述べてきた坑井調査の結果に基づいて ここでは第17図に示すような 透水性の低い地層をはさんでおよそ深度1800mより浅い貯留層と それより深い貯留層 (250～303°C) がモデルとして提唱されている (SMITH, 1980).

3.7 日本

我が国の既存の地熱発電所の開発深度はその多くが 1500m以浅であることは 最初に述べた通りである.

1985年 1月号



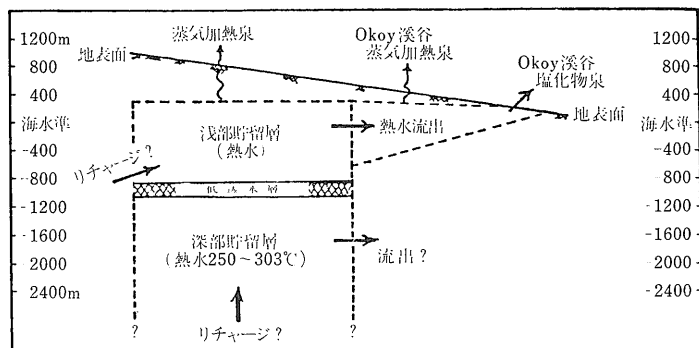
第16図 Krafla 地熱地域のモデル (STEFÁNSSON, 1981).

浅部(上部)貯留層: 深度200m～1,100m 平均温度205°C
 深部(下部)貯留層: 1100～1300m～2200m (最深坑井) 以
 深温度300～350°C

しかしながら最近では掘削技術の進歩もあって 探査深度は次第に増加しており 2000mを越す地熱試錐もそれ程めづらしいことではなくなってきている.

1982年に運開した北海道森地熱発電所 (50MW) の生産井は 1例を除いて すべて 2000m よりも深い (最深は2464m) (道南地熱エネルギー, 1983). また1981～1982年に大分県八丁原では地熱井としては日本最深の 3000m井 (HT-5-1) が掘削され 2800m で313°Cの高温が得られている. この坑井は噴出流量こそ十分ではなかったものの 1914mで花崗岩・変成岩類よりなる基盤岩類に到達するなど この地域の深部地熱構造解明に大きな情報を与えている (田中・江島, 1982). 同じ大分県の滝上地区では出光地熱 (株) により深度 3000m の調査井が掘削されており 1984年 3月 8日付の日刊工業新聞によれば蒸気15t/h 熱水80～90t/hの噴出に成功している.

一方国のプロジェクトによって2000m以深の地熱井が掘削された例としては 工業技術院がサンシャイン計画の一環として深部地熱資源探査に適用可能な探査技術の確立を図ることを目的として進めている「地熱探査技術等検証調査」において 秋田・岩手両県にまたがる仙岩地熱地域の SN-1号井 (2002m) がある. この坑井は 1982～1983年にスピンドル方式で秋田県仙北郡田沢湖町小和瀬川上流の大沢出合い地点において 新エネルギー総合開発機構 (NEDO) により掘削されたが 坑底温度は



第17図 フィリピン Negros 島 Palim-pinon (Okoy) 地熱地域の概念モデル (SMITH, 1980).
浅部(上部)貯留層: 海拔300~-1000m (深度約500~1800m)
深部(下部)貯留層: 海拔-1000m以深 (深度約1800~2000m以深) 温度250~303°C

123.8°C とやや低かった。しかしながら地表から深度1709mまでは厚い結晶質凝灰岩(〜1048m: 玉川溶結凝灰岩類(鮮新〜更新世)。1048~1709m: 未区分凝灰岩)が続く。かつ1709~2002mの新第三系(頁岩 安山岩 結晶質凝灰岩)はホルンフェルス化しているなど 今まで全く不明であったこの地域の深部地熱構造について本坑井から多くの情報が得られている(高木, 1984)。また資源エネルギー庁が昭和53年度以来 大分・熊本両県にまたがる豊肥地熱地域で展開している「大規模深部地熱発電所環境保全実証調査」は3000~4000mの地下深部を対象とした本格的な深部地熱の調査であって 3000m級の調査井としてこれまでにDY-1 (2618m) DY-2 (2401m) およびDY-3 (2303m) の3坑が掘削された。このうちDY-2 およびDY-3 はそれぞれ深度1880m および1460m で基盤岩類(花崗岩類 変成岩類)に到達したが 基盤岩内には十分な逸水層が存在せず 噴気には至らなかった。これに対して DY-1 は坑底まで基盤岩に到達せず かつ2000m および2600m 付近の先致球変質安山岩類(鮮新〜更新世?)に大規模な逸水層があり 噴気テストの結果蒸気28t/h 熱水176t/h が噴出した(資源エネルギー庁 1983)。

4. Continental Scientific Drilling Program

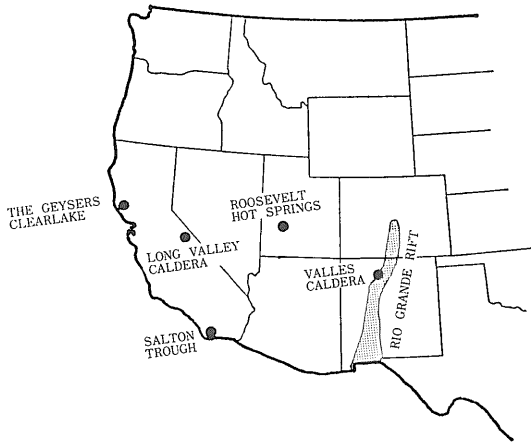
1979年にアメリカの Geodynamics Committee が出した“Continental Scientific Drilling Program (CSDP)”は

- ① Basement Structure
- ② Deep Continental basins
- ③ Thermal regimes, Mineral resources
- ④ Earthquakes

の4分野における科学的目的をかかげ このために Magma-hydrothermal system の深部陸上掘削 (deep continental drilling) の必要性を強調している。このうち③ Thermal regimes について エネルギー省 (DOE) が興味を持ち ロスアラモスなどのDOE傘下の4研究所*によって Magma-hydrothermal system のターゲットとなる5つの地域について 深部掘削(5~8km)によって解明されるであろう重要な科学的問題(換言すれば研究テーマ)について地質 地化学 地球物理学的な検討がなされた(GOFF and WATERS, 1980; WHITE, 1980; KASAMEYER, 1980)。5地域とは 第18図に示す The Gysers-Clear Lake Long Valley Salton Trough Roosevelt Hot Springs Rio Grande Rift (Valles Caldera) であり Salton Trough (Salton Sea) においては カリフォルニア大学の ELDERS 教授を中心としたグループにより 科学的目的のための深部掘削計画 (SSSDP) が進められつつあることはすでに述べた通りである。

1984年5月20~25日アメリカのニューヨークにおいて科学的目的のための陸上掘削に関して各国の研究者が集まり “International Symposium on Observation of the Continental Crust through Drilling” が開催された。ここで ELDERS 教授は Salton Sea 地熱地域において蒸気採取の目的で掘削される深度3.7kmの地熱井からの岩石・水試料を研究するための費用が NSF (全米科学財団) より許可されるであろうこと さらに DOE は1984年度に世界最深の地熱井をめざして科学的目的のために井戸を5.5kmまで深くする予算(590万ドル 約15億円)を確保していることなどが紹介された。ちなみにこの井戸の坑底温度は 最終的には400~500°Cに達するであろうことが述べられている (ELDERS, 1984)。

*Los Alamos, Lawrence Berkeley, Lawrence Livermore, Sandia の各国立研究所。



第18図 選定された Magma-hydrothermal system の位置図
(GOFF and WATERS, 1980).

これら5地域は ①平均地殻熱流量が2 HFU 以上 ②1 Ma より若い珪質火成活動に関連している ③伸張テクトニクス場であり深部断裂に沿って上昇してきた玄武岩質マグマの熱が珪質溶融体を活活化させている ④地表近くでの温度上昇を示唆する活発な温泉と地熱徴候がある ⑤私企業による組織的な調査がなされている有望な地域 などの共通的特徴を有している。

これに関連してBechtel National Inc. は Niland 市の南西7.2km地点での掘削計画を DOE に提案している (Continental Scientific Drilling Committee が出している Drilling Early Warning (DEW) ニュースターNo.10 (1984) による)。

Valles Caldera では DOE と Union が共同でカルデラ内のRedondo Creek 地域で Baca 地熱プロジェクトを進めてきたが カルデラ内を埋める異常に厚い(約1800m) 透水性の低い Bandelier Tuff の存在などのために 開発に対して否定的な結果を与えることになった (GOLDSTEIN and TSANG, 1984)。しかしながら同プロジェクトの結果は Valles Caldera での CSDP の可能性に対して貴重な情報を与えることとなり その意義も議論されている (GOLDSTEIN and TSANG, 1984)。

また Valles Caldera の南方 (Fenton Hill の南東約7 km) のカルデラ環状裂かたと Jemez 断層帯の交点では DOE 予算により深度650m のコアボーリングが 1984年中に予定されており ロスアラモスなどの DOE 傘下の4研究所が Magma-hydrothermal system に関する基礎的研究を行なおうとしている (DEW ニュースターNo.11 (1984) による)。

5. おわりに

以上紹介してきたように 各国とも地熱地帯において深部の坑井掘削を最近積極的に進めようとしている。その目的はイタリアおよびニュージーランドにおいて顕著に見られるように 既開発(換言すれば浅部か)の地熱貯留層の下部が一体どようになっているのか そして その開発可能性はどうかを知らうとするもの Salton Trough のように地熱貯留構造が深いことから必然的に

深部の開発を行なっているもの また最近のフィリピンに見られるように 深部に至る大規模な開発を一気に押し進めているもの さらには CSDPに見られるような純科学的な目的のために大深度掘削を意図しているものまで様々であるように思える。

日本の地熱地帯においても温度400°~500°Cを想定した深度5~6 km 程度の深部坑井掘削が技術的に可能かどうか またその費用は一体どの程度なのかなどを判断する能力を筆者は現在持っていない。

しかしながら 以上述べてきたような背景から深部坑井掘削によりもたらされるであろう地熱地帯地下深部の各種情報は 今後の地熱開発をより効率的に進めて行く上で益々重要なものになってくるものと考えられる。

参考文献

- ANDERSON, D. N. (1983) : Geothermal Resources Council Bull. (以下 G. R. C. B. と略す) Sept./Oct. 17-18.
- BARELLI, A., CORSI, R., DIOFFIZI, S., LOVARI, F., MANETTI, G. and ROSSI, U. (1983) : European Geothermal Update, Extended Summaries (3rd International Seminar : } Results of EC Research and Demonstration projects in the field of geothermal energy, 以下同じ), 313-323.
- BATINI, F., BERTINI, G., BOTTAI, A., BURGASSI, P. D., CAPPETTI, G., GIANELLI, G. and PUXEDDU, M. (1983) : European Geothermal Update, Extended Summaries, 341-353.
- BERTINI, G., GIOVANNONI, A. and STEFANI, G. C. (1980) : Advances in European Geothermal Research (Proc. 2nd International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy Research) (edited by STRUB and UNGEMACH), Reidel Publishing Co. (以下 Advances in European Geothermal Research と呼ぶ), 303-311.
- BIRD, D. K. and NORTON, D. L. (1981) : Geochim. Cosmo-

- chim. Acta, 45, 1479-1493.
- BODVARSSON, G. S., BENSON, S., SIGURDSSON, S., HALLDORSSON, G. K. and STEFANSSON, V. (1981) : Proc. 7th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, 71-76.
- BRITTENHAM, T. L., NEUDECKER, J. W., ROWLEY, J. C. and WILLIAMS (1982) : Jour. Petroleum Technology, 1421-1430.
- BROOK, C. A., MARINER, R. H., MABEY, D. R., SWANSON, J. R., GUFFANTI, M. and MUFFLER, L. J. P. (1979) Geological Survey Circular 790, 18-85.
- BROOK, C. A. and MASE, C. W. (1981) : Geothermal Resources Council, Transactions (以下G. R. C. T. と略す), 5, 157-160.
- BRUNI, P., CHELINI, W., SBRANA, A. and VERDIANI, G. (1983) : European Geothermal Update, Extended Summaries, 451-454.
- CALAMAI, A., FIORELLO, A., PANDELI, E. and VALENTI, P. (1983) : European Geothermal Update, Extended Summaries, 457-466.
- CALAMAI, A. and FERRARA, G. C. (1980) : Advances in European Geothermal Research, 267-276.
- CAVARRETTA, G., GIANELLI, G. and PUXEDDU, M. (1982) : Econ. Geol., 77, 1071-1084.
- CHIERICI, G. L., GIANNONE, G. and SCLOCCHI, G. (1983) : European Geothermal Update, Extended Summaries, 514-524.
- CIGNI, U. (1980) : U. S. DOE Rep. (LBL-11555), 189-204.
- CIOPI, D., GHELARDONI, R., SOMMARUGA, C. and VERDIANI, G. (1980) : Advances in European Geothermal Research, 291-302.
- DEL MORE, A., PUXEDDU, M., RADICATI DI BROZOLO, F. and VILLA, I. M. (1982) : Contr. Mineral. Petrol. 81, 340-349.
- DENTON, B. N. (1980) : G. R. C. T., 4, 455-458.
- DIETRICH, H. G., HÄNEL, R., NETH, G., SCHÄDEL, K. and ZOTH, H. (1980) : Advances in European Geothermal Research, 253-266.
- DIPPO, R. (1984) : G. R. C. B., Jan., 4-16.
- EDMISTON, R. C. (1982) : G. R. C. T., 6, 11-14.
- DOMINGUEZ A. B., LIPPMANN, M. J. and BERMEJO M., F. (1981) : U. S. DOE Rep. (LBL-13635), 1-6.
- 道南地熱エネルギー (1983) : 地熱開発の概要—北海道森町濁川地域—18p.
- EAST, J. (1981) : U. S. DOE Rep. (LA-8751-HDR), 1-45.
- ELDERS, W. A. (1984) : International Symposium on Observation of the Continental Crust through Drilling, 6.
- FIORE, J. N. (1980) : G. R. C. T., 4, 201-204.
- GLENN, W. E., ROSS, H. P. and ATWOOD, J. W. (1982) : Jour. Petroleum Technology, 1104-1118.
- GOFF, F. and WATERS, A. C. (1980) : U. S. DOE Rep. (LA-8550-OBES), 1-100.
- GOFF, F. and DECKER, E. R. (1983) : Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 15, 187-221.
- GOLDSTEIN, N. E. and TSANG, C. F. (1984) : G. R. C. B., Jun., 7-12.
- GRINDLEY, G. W. (1982) : Proc. 4th New Zealand Geothermal Workshop, 69-74.
- GUGLIELMINETTI, M. and TORE, G. (1983) : European Geothermal Update, Extended Summaries, 495-500.
- HARR, S. V. and PUENTE, C. I. (1979) : G. R. C. T., 3, 761-764.
- HOLFMAN, S. E., LIPPMANN, M. J., ZELWER, R. and HOWARD, J. H. (1982) : G. R. C. T., 6, 265-268.
- 林 正雄 (1982) : 地熱学会誌, 4, 81-90.
- Italian working group (1983) : European Geothermal Update, Extended Summaries, 42-51.
- KASAMEYER, P. (1980) : U. S. DOE Rep. (UCRL-52980), 52p.
- LIPPMANN, M. J. (1983) : Geothermics, 12, 265-289.
- McDOWELL, S. D. and ELDERS, W. A. (1980) : Contrib. Mineral. Petrol., 74, 293-310.
- PALMASON, G., STEFÁNSSON, V., THÓRHALLSON, S. and THORSTEINSSON, T. (1983) : Proc. 9th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, 1-15.
- PUENTE C., I. and DELAPEÑA L., A. (1979) : Geothermics, 8, 155-175.
- 笹田政克 (1985) : 地質ニュース, 365, 39-51.
- SHANNON, Jr., S. S., GOFF, F., ROWLEY, J. C., PETTITT, R. A. and Vuataz, F. D. (1983) : G. R. C. T., 7, 541-544.
- 資源エネルギー庁 (1983) : 地熱エネルギー, 8, 288-294.
- SMITH, E. W. (1980) : Proc. 6th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, 69-75.
- STEFÁNSSON, V. (1981) : Geothermal Systems: Principles and case histories (edited by RYBACH and MUFFLER), John Wiley & Sons, 273-294.
- 高木慎一郎 (1984) : 地熱技術, 9, 22-40.
- 田中耕基・江島康彦 (1982) : 地熱エネルギー, 19, 93-103.
- WARD, C. W. (1980) : Proc. 2nd New Zealand Geothermal Workshop, 105-108.
- WARD, S. H., ROSS, H. P. and NIELSON, D. L. (1981) : A. A. P. G. Bull., 65, 86-102.
- WHITE, A. F. (1980) : U. S. DOE Rep. (LBL-11410), 72p.
- 山崎達雄・田中耕基 (1981) : 地熱, 18, 239-258.