
 会 長 講 演

最近の地熱探査の動向

日本温泉科学会会長 中 村 久 由

Recent Geothermal Exploration

Hisayoshi NAKAMURA

Japan Metals & Chemicals Co., Ltd.

1. 地 熱 系

地熱資源は岩石や地層の中に貯えられている高温の流体もしくは岩体自身もつ熱の2つに大別できる。後者の高温岩体 (hot dry rock) から熱を抽出する研究がアメリカを中心として現在行われているが、まだ実用化の域に達していない。

前者の高温の流体を含む地殻の一部は地熱系 (geothermal system) と呼ばれる。米国地質調査所の Dr. White によれば (White, 1973), 地熱系 (図-1) は、天水の滲透地域 (recharge area), 水の滲透通路 (channel), 熱源 (heat source), 加熱された地熱流体の貯溜層 (reservoir), 貯溜層からの地熱流体の湧出地域 (discharge area) で構成される。

地熱系の中で高温の流体を含む岩石, 地層は地熱貯溜層と呼ばれるが、一般に地熱地域は堅い第四紀の火山岩類, 第三紀もしくは先第三紀の岩石, 地層で構成されているため, 高温の流体が貯溜され, かつ容易に流動できるのはこれら堅い岩石, 地層中に発達する割れ目 (fracture) の卓越部分でしかない。すなわち, 地熱井を掘さくし, 蒸気, 熱水が採取できる箇所は, この割れ目の卓越部分であり, この割れ目の卓越部分の拡がり地熱貯溜層ということになる。

従って, 地熱探査の意味を一口でいうと, 地熱貯溜層の輪かく (地熱貯溜層のモデルとってよい) を捕え, 蒸気の生産, 熱水の還元に直接かかわりの深い割れ目の存在を追跡することにあるといえる。

2. 地熱発電に必要な地熱流体の温度

さて, 地熱資源をとり出し, 発電に利用しようとする場合, 貯溜層の中の地熱流体の温度が何度以上必要かという問題が生じる。

透水性の大きな貯溜層の中に掘られた坑井からは, 全噴出量の70~90%が熱水として噴出する。全噴出量に対し, 分離した蒸気が占める重量比は坑井の口元での減圧の度合いと地下の地熱流体の温度とに関係がある。図-2は, 坑口で3.5kg/cm²Gの圧力で蒸気と熱水を分離した時, 全噴出量に対する蒸気の重量比と地下の地熱流体の温度との関係を示したものである (Muffler, 1972)。この

図によると、例えば300℃の場合には33%、200℃の場合には11%の蒸気を分離するが150℃ではほとんど蒸気が分離しない。

一般に地熱発電の場合、全噴出量に対する蒸気の重量比は少なくとも10%以上は必要であるといわれているので、図-2から蒸気の重量比10%の時の地熱流体の温度を求めると約180℃である。いいかえると、貯溜層の中の地熱流体が180℃以上、できれば200℃以上の温度がなければ、発電に使うことが難しいということになる。

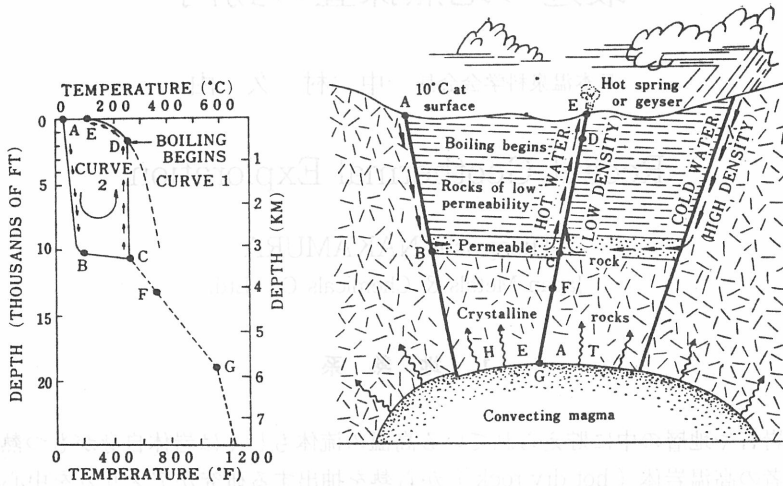


図1 地熱系のモデル (Muffler and Whit, 1973)

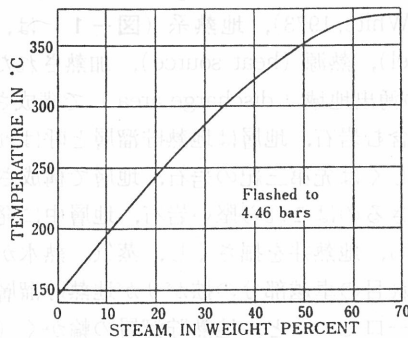


図2 タービン入口圧 3.5 kg/cm²におけるフラッシュ蒸気の重量 (Muffler, 1972)

3. 地熱開発調査の手順

図-3は、地熱探査から始まり、生産井、還元井を掘さくし、パイプライン、発電所を建設して発電するまでの地熱開発の経過をとりまとめて示したものである。当初に調査段階があり、これは概査と精査とに分けられる。この段階で開発の見通しがたてば次の開発段階に移行する。この段階でパイプライン、発電所の建設が終り、試運転を行って所期の出力が得られれば発電段階に入る。

図-4は上記の地熱開発計画の中で調査段階の手順をさらに細かく示したものである。この調査段階では、先ず文献調査等が先行するが、野外の調査としては概査から始まる。この

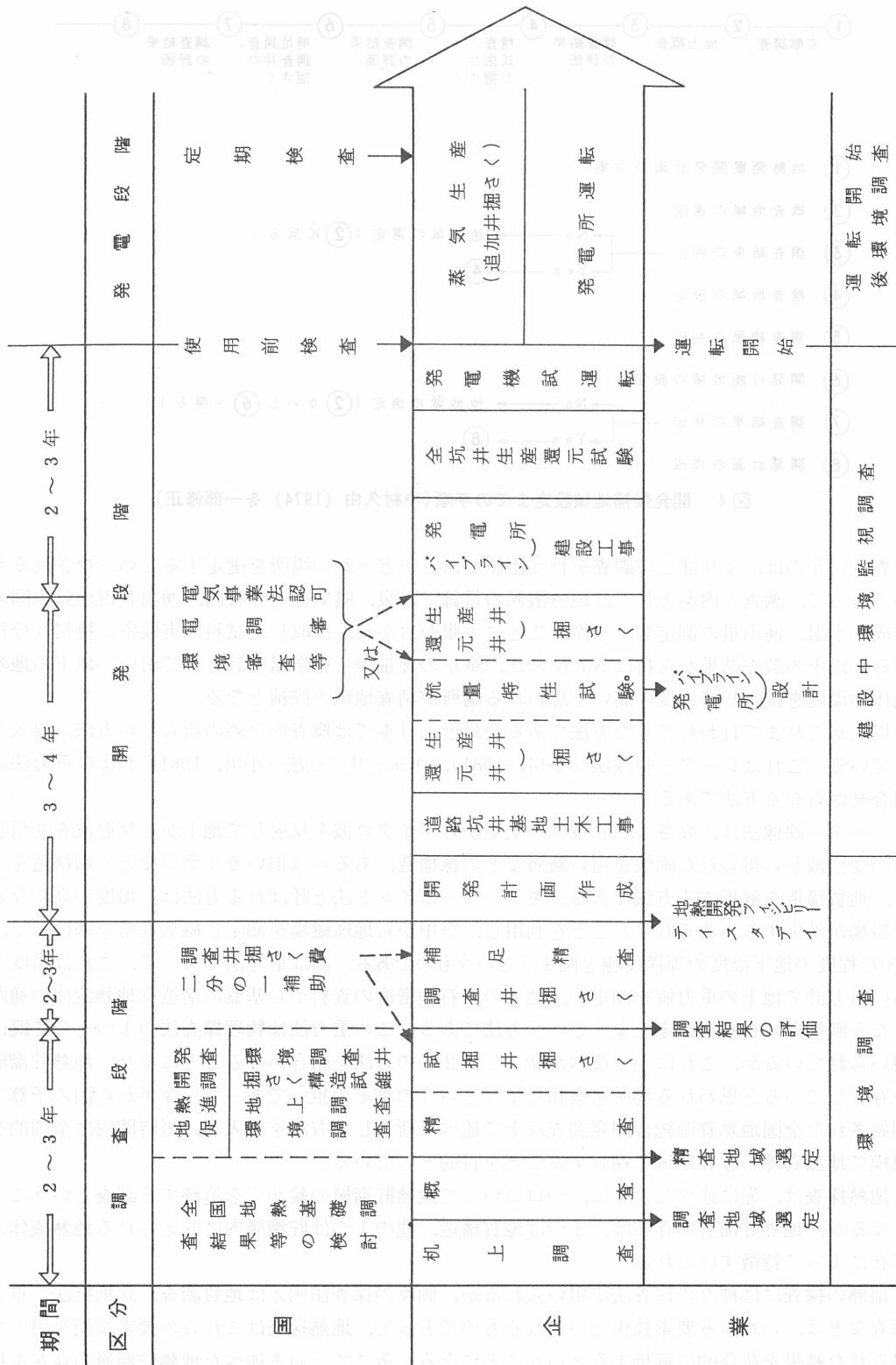


図3 地熱発電開発計画系統図

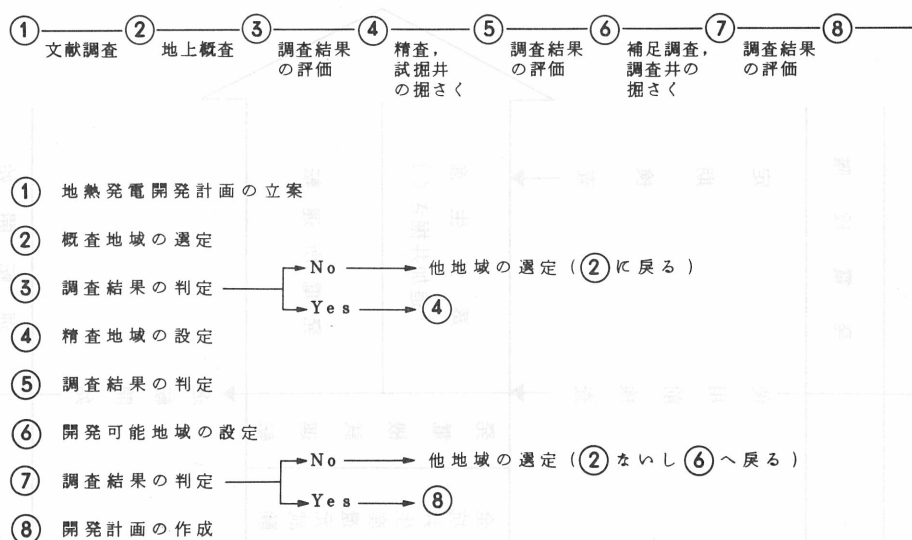


図4 開発候補地域設定までの手順(中村久由(1974)を一部修正)

概査というのは、より詳しい調査を行う価値があるかどうかの場所を選定するためになされるものであって、調査の内容としては地熱徴候の目録（温泉、噴気孔の分布図、湧出状況の見取図の作成、水温、湧出量の測定等）を作ることにより主眼がおかれ、採取した試料は実験室に持帰り分析する。以上の調査結果から特にNa/Kの比、SiO₂の含量等を化学温度計として用い、地下の地熱流体の温度を推定して温度の高いと思われる場所が精査地域の候補となる。

以上がこれまで行われてきた方法であるが最近、日本では概査のための新しい方法が導入されている。これはレーダー映像法（小川，1981）、キューリー一点法（小川，1981）および重力法の組合せからなる方法である。

レーダー映像法は、高さ1,200 m位の上空からマイクロ波を反射して地上から反射波を受信し、この受信波から得られた画像を用い断層などの線構造、あるいは旧いカルデラなどの環構造を画き、地質構造を解析する方法である。キューリーポイント法と呼ばれる方法は、温度が高くなると磁場が消失する（約560℃）ことを利用し、空中から地球磁場を測定し磁気異常を基にして、500℃程度の地下温度の等深度線を画こうというものである。次は重力法であって、これは精度の高い重力計で地上の重力値を測定し、地下の岩石の密度の資料から基盤の構造や地熱流体の通路となる断裂系の存在を推定しようという方法である。この重力法は物理探査法の1つとして既に用いられているが、これに上で述べた新しい2つの方法を組み合わせることにより、地熱貯溜層が存在していると思われる場所を察知しようというのがその狙いであって、今年から国の予算で開始された全国地熱資源総合開発調査は上で述べた新しい方法を導入し、短時間内に全国的な規模で地熱資源の存在地域を探査することを目的としている。

地熱探査は、先に述べたように、一口に地熱貯溜層の輪かくを追跡する調査ということになるが、地熱貯溜層の存在は、1つは地質構造、他の1つは貯溜層内に貯えられる地熱流体の存在によって特徴づけられる。

地熱の探査には種々の探査法が用いられるが、個々の探査法例えば地質調査、比抵抗法、重力探査などは、いわゆる要素技術といわれるものであって、地熱探査はこれらの要素技術を用いて得られた結果を総合的に解析するということになる。そこで、いま述べた地熱貯溜層の存在を特

微ずける事柄を地熱構造と貯溜層内に貯えられる地熱流体とに分け、個々の要素技術がその何れを知るために用いられているかを検討してみると、地質調査、重力、弾性波、微小地震等の物理探査及び土壌空気中のCO₂やHgを対象とする地化学探査は前者を、比抵抗法、自然電位法等の物理探査及び地下温度調査などは後者を対象とする探査法ということが出来る。

従って、これらの要素技術をいかに組合せて地熱探査を行うかということが問題になるのであるが、最近アメリカで発表されている論文の中に、この組合せと探査の手順について触れているものがあるので、これを引用しながらこの問題を説明することにしたい。

これは Ward, Ross, Hielson (1979) の共著によるものであって、先ずアメリカの地熱開発調査を行っている企業がどのようないわゆる要素技術を採用しているかを地域別に示したのが表-1である。一番左側の行は、最も多く用いられている方法を上から順に並べたもので、Thermal methodが頻度が最も高く、以下、地質図の作成、重力、電気探査……の順になっている。

これらの結果から Ward らは次のようなコメントを付している。

- (1)常に Thermal method のランクが上位にきている。
- (2)地質図の作成は一般に行われているが、必しもどこでも採用されているとは限らない。
- (3)重力探査も行われることが多い。また比抵抗法、自然電位法等の電気探査も多く用いられている。
- (4)弾性波、磁気探査、地化学探査は優先順序からやや落ちている。

そこで Ward らはこれらの結果に基づいて図-5のような地熱探査の手順を提案している。

この図の中で Box 1から4までは、文献調査及びいわゆる概査であって、この調査により幾つかの有望地点すなわち精査地域を選定する。精査地域がきまれば Box 5から9までの調査を行いその地域の地下モデルの概念を作成する。この間に行われる調査は深さ30~160mの孔を掘り、

表1 Evaluation of Regional Applicability of Exploration/Assessment Technique

Technique	Overall Regional Ranking Applicability	Ranking of Techniques According To Applicability In											
		Saltion Trough	Basin And Range	Cas-cades	Basaltic Island Region	Snake River Plain	Wasatch Front	Rio Grande Rift	Geysers	Aleutian Arc Island	Appala-chian	Eastern And SE Plutons	Geopres-sured
Thermal Method	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2
Surface Geolo-gical Mapping	2	9	2	2	1	2	2	2	2	2	3	5	9
Gravimetry	3	2	7	5	4	3	7	7	3	4	2	2	5
Electrical Methods	4	3	4	3	3	8	4	3	8	5	8	6	7
Borehole Logging	5	5	8	10	10	4	8	9	7	3	15	4	1
Seismic Methods	6	4	5	8	6	6	5	5	6	6	9	7	3
Liquid Geochemistry	7	6	3	4	5	9	3	4	5	7	6	8	4
Air Photogeology	8	7	6	7	8	5	9	8	4	9	7	9	12
Age Dating	9	10	9	6	7	7	6	6	9	8	10	10	14
Magnetics	10	8	10	9	9	10	10	10	10	11	4	3	6
Gas Geochemistry	11	11	13	13	11	13	13	13	11	12	11	12	8
Remote Sensing	12	12	12	12	13	11	11	11	12	13	12	11	10
Thermal Infra-Red	13	13	11	11	12	12	12	12	13	10	13	13	11
Other	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	13

LEGEND 1 = Most Applicable to 14 = Least Applicable

(After Mitre Corp., 1978)

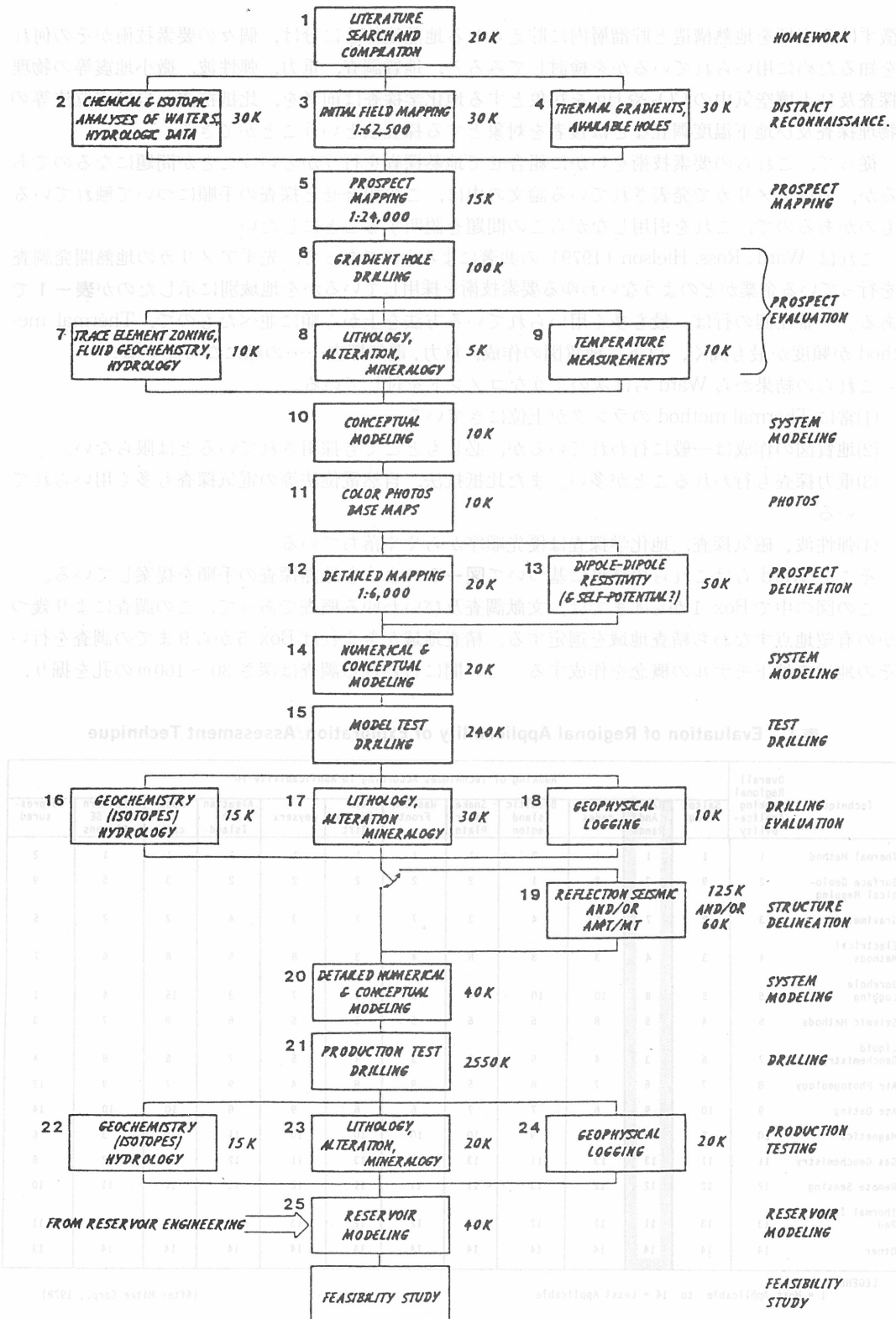


図5 高温熱水系地域における地熱探査の手順

孔内の温度測定、コアの分析等を行う。このあと、さらに比抵抗法による電気探査を行い(Box 13)、作成したモデルをチェックする意味で500~800mの調査用の坑井を掘さくする(Box 15)。坑井内の物理検層を行う一方、地上調査としては弾性波あるいは地磁気、地電流調査を行い、モデルを見直す。

最後に生産試験用の深さ1500m程度の坑井を掘さくし(Box 21)、Box 22から24までの主として坑内調査を行い貯溜層の第一次モデルを完成する。

このWardらの手順と筆者が先に示した調査の手順(図-4)と比較してみると、先ず概査を行い次いで精査地域の選択を行う点は同じであって、WardらのModel test drilling (Box 15)は筆者のいう試掘井に相当するとみることができる。筆者はここで試掘井という言葉を用いたが、これは精査段階に進んだ時、精査地域が開発可能な場所であるかどうかを決定する第一義的な要素は地下の温度が180℃ないし200℃以上あるかどうかということになる。この試掘井の掘さくの結果、その地域の地熱流体の温度が180℃ないし200℃以上あることが確認されれば、その地域の開発の可能性が高くなるのでかるから、その後、その地域から50~100MWに必要な蒸気量が得られるかどうかという問題が出てくる。

これには貯溜層の拡がり、坑井からの生産量等を調査する必要があるので、数本の坑井を掘さくしその拡がりを確かめなければならない。この目的で掘さくするのが筆者のいう調査井であってWardらのProduction test drilling もほぼこれに相当するものように思われる。

ただWardらの強調する点は、調査地域地下の地熱貯溜層のモデルを作成することにあるが、これに類する例として岩手県滝ノ上地域の場合を次に示す。

図-6は同地域で実施した深さ30mの地下温度の分布図である。この図から、滝ノ上温泉一帯と葛根田川上流の通称中州付近に北西-南東方向に延びる高温帯が存在することがわかる。このような高温帯をもたらす地下の地熱流体が各々別個の通路に沿って地表に上昇しているのか、見掛上地表付近では分離しているが、地下でつながっているのかによって当地域の地下のモデルの考え方が違ってくる。このためなされたのが図-7の比抵抗法による電気探査である。この調査は両地域を結ぶA測線(図-6)上で行われたものであるが、この結果をみると、高温帯の地下は10~20Ω-mという低い比抵抗を示し、両地域に挟まれた地表浅部では2000Ω-mという高い比抵抗を示すが深さ500m程度より下になると20Ω-mという低い値をとるように

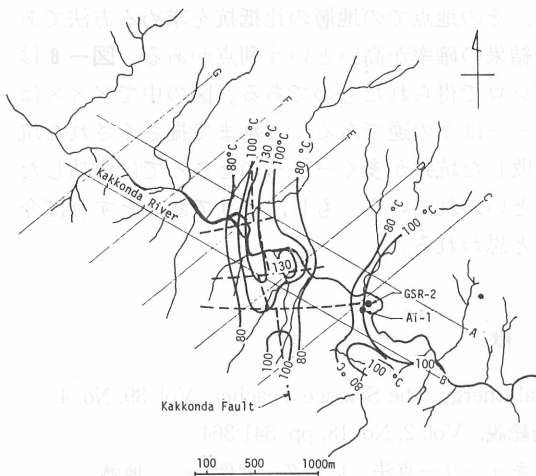


図6 滝ノ上地域30m深度地下温度分布図

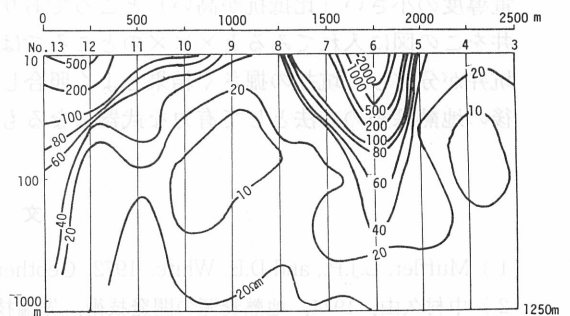


図7 A側線に沿う比抵抗断面図

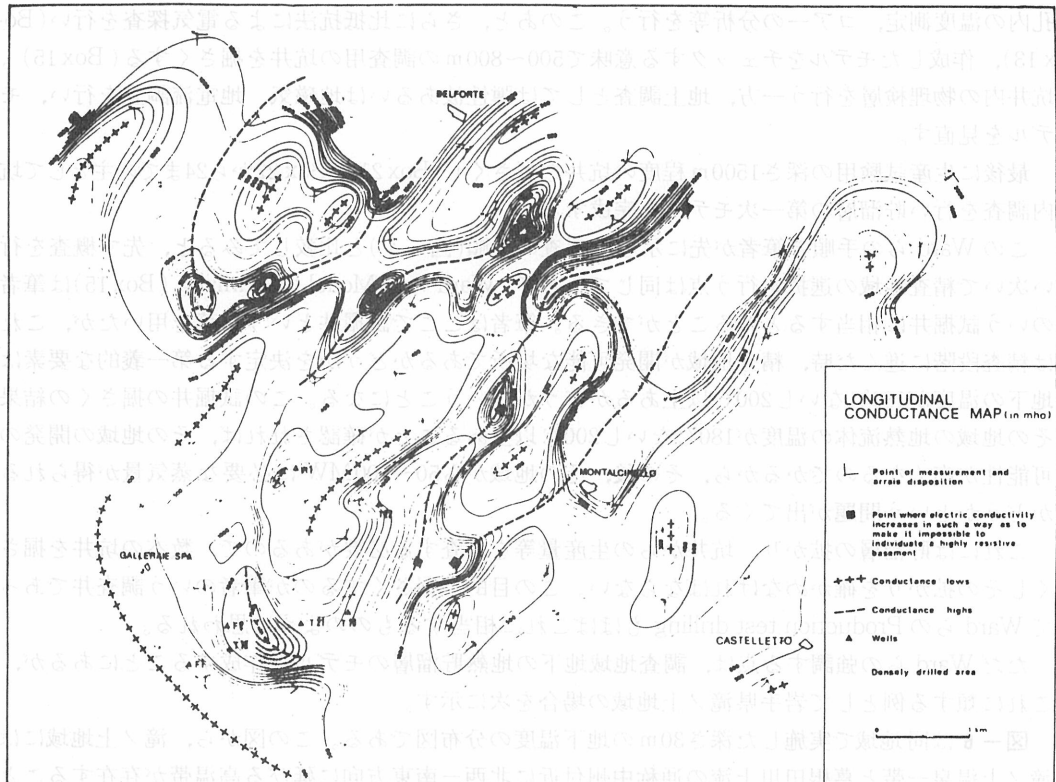


図8 ロンディテューディナル コンダクタンس マップ

なる。このような結果から、地表付近では高温帯が分離しているように見えるが、地下では地熱流体が繋がっていると判断されたのである。

Wardらの手順からも判るように、最近の傾向として、地熱貯溜層内の流体を探知するため地下温度調査法、熱流量調査法等の thermal method と比抵抗法の組合わせが多く用いられているが最近後者の比抵抗法に準ずるものとして地磁気地電流法 (AFMT) の中の MT-5法が日本にも導入されている。これは地下の電流及び磁界を測定し、その地点での地層の比抵抗を求める方法であって、従来の比抵抗法より探査深度が深く解析の結果の確率が高いという利点がある。図-8はその結果の一例であってこれはイタリアのラルデレロで得られたものである。図の中で×××は電導度の小さい(比抵抗が高い)ところであり---はその逆である。これまで掘さくされた坑井をこの図に入れてみると×××のところでは失敗した坑井が多く---のところでは成功した坑井が分布し、坑井の掘さく結果とよく照合したといわれている。もし、そうであるとすれば今後の地熱探査の方法として有力な武器になるものと思われる。

文 献

- 1) Muffler, L.J.P., and D.E. White. 1972. Geothermal Energy. the Science Teacher, Vol. 39. No. 4.
- 2) 中村久由. 1974. 地熱資源の開発技術. 先端技術総説, Vol. 2, No. 18, pp. 341-364
- 3) 小川克郎. 1981. 最近の地熱探査技術について—キューリー点法, レーダー映像法—. 地熱, Vol. 18, No. 3, pp. 205-214.

