

## 九州の地熱

### 広義の地熱帯と狭義の地熱帯

林 地熱資源の利用という面からみえますと、九州では1967年に、九重火山のなかの大岳に日本で第2番目の1万KWの地熱発電所がつけられ、10年後の1977年には、やはり九重火山のなかですが、地熱発電所としては日本最大の規模をもつ5.5万KWの八丁原発電所が建設されています。そのほか九州では、九重火山周辺だけでなく、別布、阿蘇、雲仙、霧島、薩南などで、国あるいは民間の会社によって精力的に地熱調査が進められております。

では、地熱帯とは何かということからまず考えてみます。だいたい大地というのは、普通、100m掘るごとに温度が3℃上がると言われています。地熱帯は、広い意味では、この地温勾配が普通より高いところをいいます。したがって、新しい火山岩類が分布している地域は、広い意味ですべて地熱帯ということになります。しかし、地熱発電という観点から考えますと、最低200℃以上の温度がないと、現在では経済的になりたちません。そうしますと、そういう非常に活発な地熱帯とはどういう所かということが問題になります。この狭義の意味の地熱帯

というのは、これは私の定義になりますが、地下の温度が水の沸騰曲線に沿って上がるようなところということになります。

世界の地熱帯を調べてみますと、1,000m掘削すると最高300℃程度まで上昇しております。ということは、普通の地温勾配の10倍はあるということです。ところが500m程度の深さですと、最高は250℃ぐらいもあり、これは普通の地温勾配の17倍にも相当します。もっと極端なことをいいますと、100m掘った段階で180℃ぐらいの温度が得られることもあります。そうすると、これは普通の地温勾配の60倍もあることになり、普通の地温勾配と地熱帯の地下温度とを単純に比較するだけでは、地熱帯の評価をすることが難しくなってくるわけです。

### 地熱帯の活動度指数

そこで私は、地熱帯の熱的な階級を数量的に評価するために、図6・1に示すような活動度指数という考え方を提案いたしました。右端の青色の曲線は水の沸騰曲線、左端の直線は普通の地温勾配で、これは100m掘るごとに3℃上がっています。地下温度は、ほとんどの場合これら2つの間にあります。ある地熱井で、たとえば図のように1,500mの深さでTmという温度が得られたとします。その時、同じ深さでの水

の沸騰温度をTb、普通の地温勾配の温度をTgとすれば、その地熱井の熱的な評価、AI(activity index)は、図に示すように  $AI = a/b \times 100$  ないしは  $[1 - (Tb - Tm) / (Tb - Tg)] \times 100$  として表わすことができます。ですから、図に示されたTmの地熱井についていえば、1,500mで約250℃ですから、その活動度指数は70ということになります。

活動度指数の応用例を示しますと、A地点では100m掘って100℃、B地点では500m掘って200℃、C地点では1,000m掘って250℃が得られたとします。これら3つの地点のうちで、どこが一番有望であるかという問題は、活動度指数を用いれば簡単にきめられます。わずか100m掘って100℃もの高温が得られると非常に活発な地熱帯であると思われるかも知れませんが、じつはこの活動度指数では、わずか55しかありません。500mで200℃だと77、1,000mで250℃だと83ということになり、この1,000mが一番良い地点ということになります。

### 活動度指数による地熱帯の評価

次に、普通の地温勾配と水の沸騰曲線の間を活動度指数に従って5等分し、それぞれをA～Eにランキングし、活動度指数がマイナスになるところはF、沸騰曲線を超すような特殊な地帯

図6・1 - 地熱帯の活動度指数

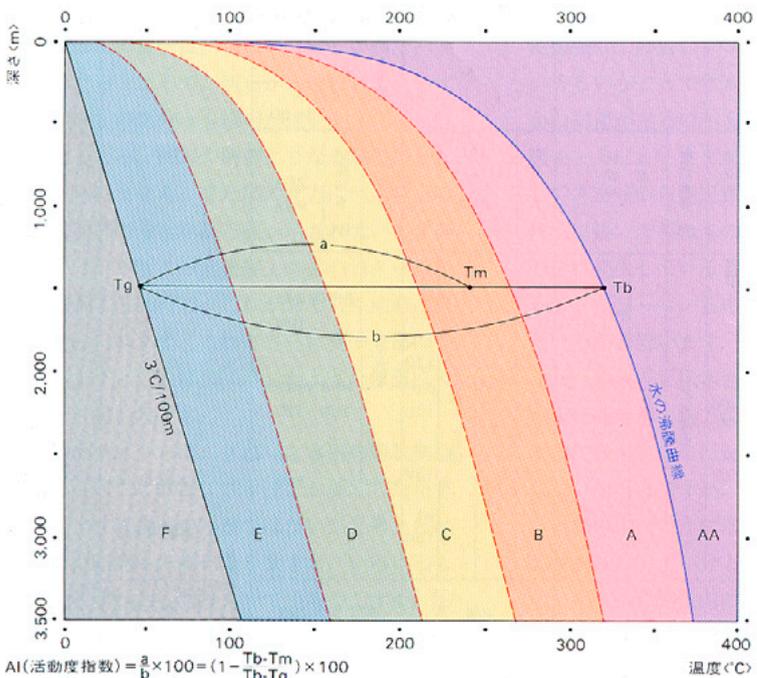
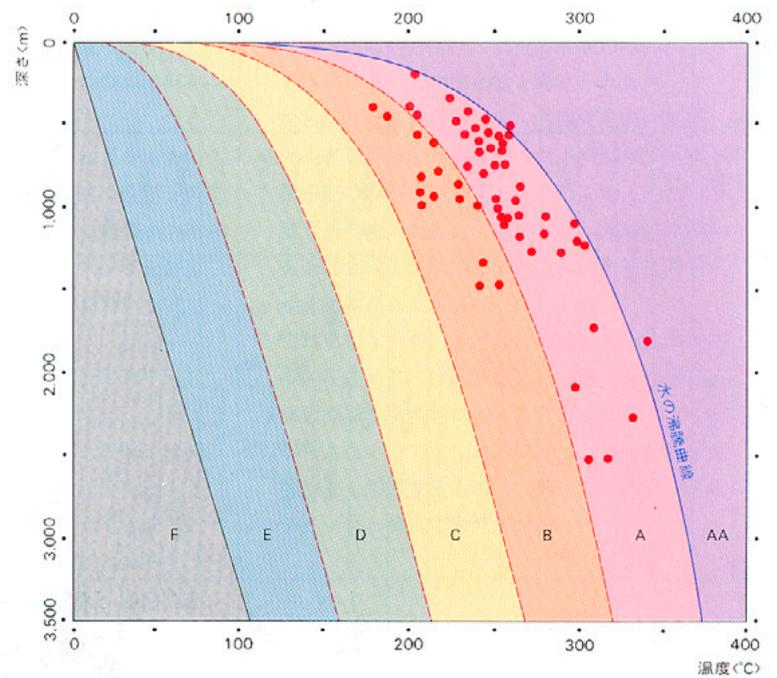


図6・2 - 世界の地熱井の活動度タイプ



はAAとします。これを適用して、地熱発電に使われている世界の地熱井を評価してみますと、図6・2にあるように大部分がAタイプで、一部Bタイプも認められます。AAというのも1例ありますが、この地熱水は特に塩分に富んでいる特殊例です。このように、活発な地熱生産井というのはほとんどAタイプであって、一部Bタイプが含まれるということになります。

九重地域の地熱帯についてみますと、図6・3に示すように大岳の生産井も八丁原の生産井も、ともにAタイプです。大岳発電所の生産井は、世界で最も温度の低い生産井といわれていますが、それは深さが300m~400m程度と浅いからで、活動度数は平均90を越す非常に活発なタイプです。それから九重の北西にある岳ノ湯は、熊本県などが地熱調査をしていますが、これはBランクになりそうです。また湯布院町の西側にある野矢も調査されましたが、ここは、いまのところCタイプの地熱帯と評価されます。Cタイプだと、経済的な地熱発電が可能かどうか疑わしいところです。

#### 火山の年令と地熱帯の活動度

次に、各タイプの地熱帯と火山の年令との間には、どのような関係があるかを考えてみます。図6・4は、松本先生による九重火山の地質図を

図6・4 - 九重地域の火山活動と地熱帯のタイプ

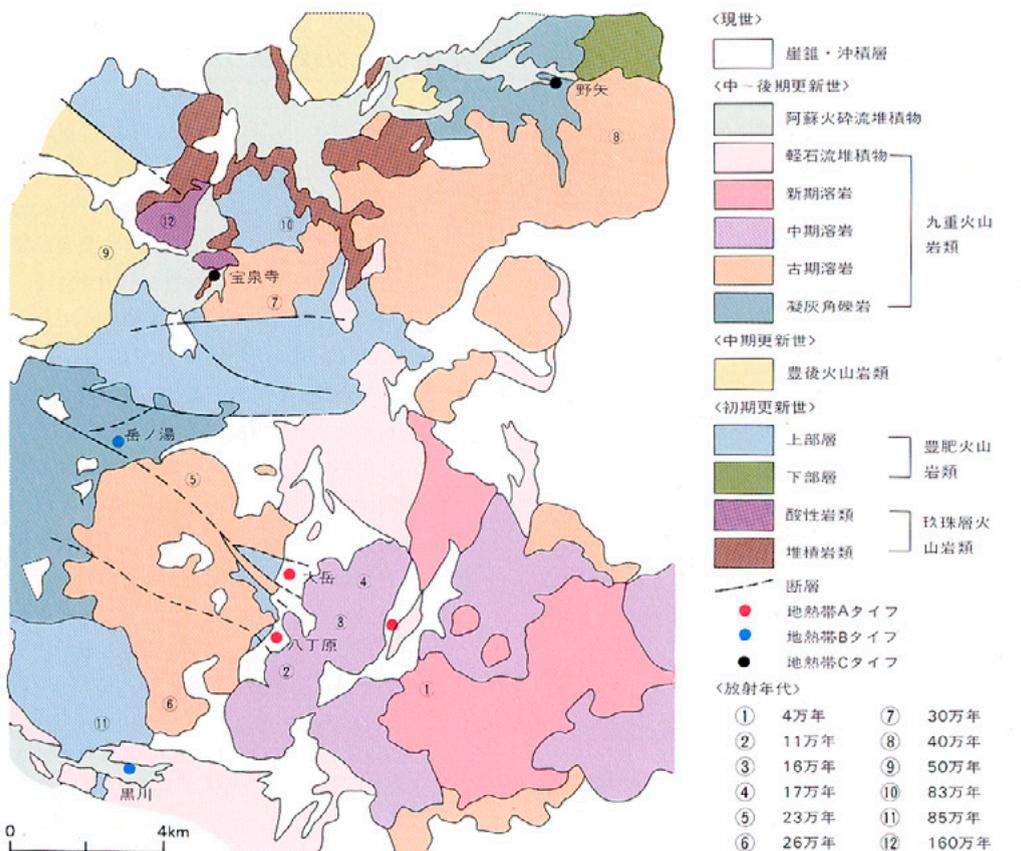


図6・3 - 九重地域における地熱帯の活動度タイプ

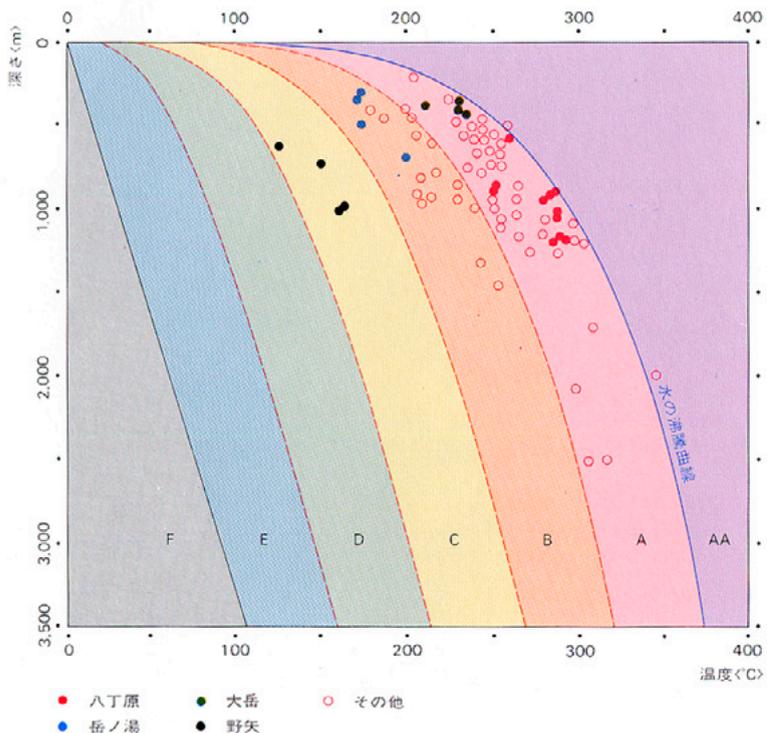
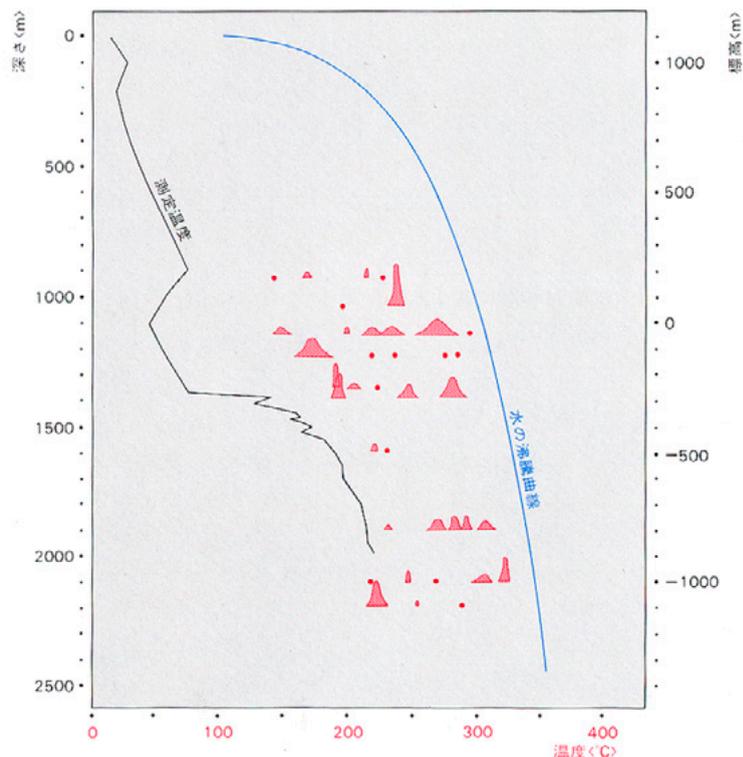


図6・5 - 霧島地熱帯KT-5号井の流体包有物温度



もにつくったもので、ここでは九重火山岩類は、古期・中期・新期に分けられ、その中にいま述べた地熱帯の位置が示されています。そうしますと、Aタイプの地熱帯は20万年より若い火山、Bタイプの地熱帯は20万～30万年前の火山、そしてCタイプの地熱帯は40万～50万年前の火山の分布と一致していることがわかります。つまり、地熱帯の活動度と火山活動の年令との間には、密接な関係があることがわかります。図6・5は霧島地熱帯の1例で、現在および過去の温度条件を流体包有物法によって詳しく調べたものです。得られた包有物温度は赤色の正規分布曲線で示してありますが、非常に幅広いのが特徴です。黒の折れ線が現在の温度、青色の点線は水の沸騰曲線です。そうしますと、包有物温度の一番低い側は現在の温度とほぼ一致し、高い方は沸騰曲線に沿っていることがわかります。これらのことは、この地点が過去にはAタイプの非常に活発な地帯であったが、現在はすでに冷えてしまって、Cタイプになっているこ

とを示しているわけです。このようにして、現在あまり活発でない地熱帯というもののほとんどは、冷却の結果であることがわかってきました。

では、その活発であった時期はいつ頃であろうか。火山岩の年代を測る方法の一つにフィッシュトラック法というのがありますが、年代測定とは別に、フィッシュトラックの長さが加熱によって収縮し短くなる性質を利用すれば、過去の最高温度の時代も推定することができます。たとえば、図6・5の地熱帯では、過去には地下2,000mで約320の高温状態にありましたが、現在では220程度にまで冷却しています。仮りに地温が時代とともに直線的に冷却するものと仮定すれば、フィッシュトラックの収縮率から逆算しますと、過去の非常に活発な時代は約1万年前であることがわかりました。

図6・6は、こうした方法により九重のそれぞれの地熱帯について、最も活発な時期を推定してみたものです。大岳や八丁原などのAタイプの

地熱帯は、火山活動の年代ともよく一致し20万年前より若そうです。Bタイプの岳ノ湯は30万年程度の古さで、Cタイプの野矢は40万年前かそれよりも古い地熱帯だということがわかります。このように、活発な地熱帯は若くて、やや不活発な地熱帯は古い。人間の年令にたとえれば、九重の場合は、20才ぐらいまでは非常に活発であるが、30才になるとやや衰え、40才になると殆んど衰えてしまう(笑)。

松本 50才になるといよいよだめや(爆笑)。林 地熱帯の冷却の速度について、九重火山と霧島火山とを比較しますと、九重では数10万年というオーダーが、霧島では1万年ぐらいですから、確実に1ケタ違います。その理由を私なりに考えてみますと、霧島火山の方が、九重よりも塩基性のマグマに富んでいるからではないかと思えます。塩基性のマグマは、規模が小さいので速く冷却すると考えられます。しかし霧島火山でも、中心部のえびの高原では現在も活発な噴気帯があり、最近、その少し南側で国が

図6・6 - 九重地域の地熱帯の熱史

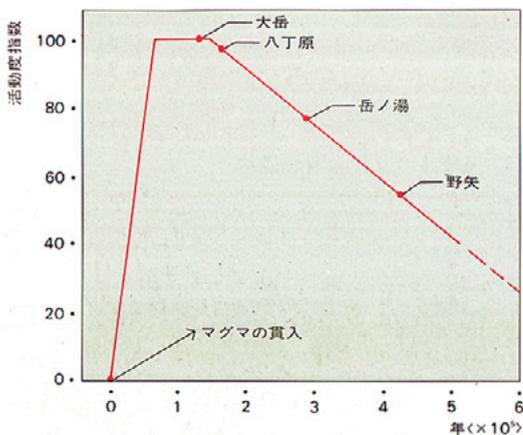


図6・8 - 八丁原地熱帯HT-4号井の断裂系

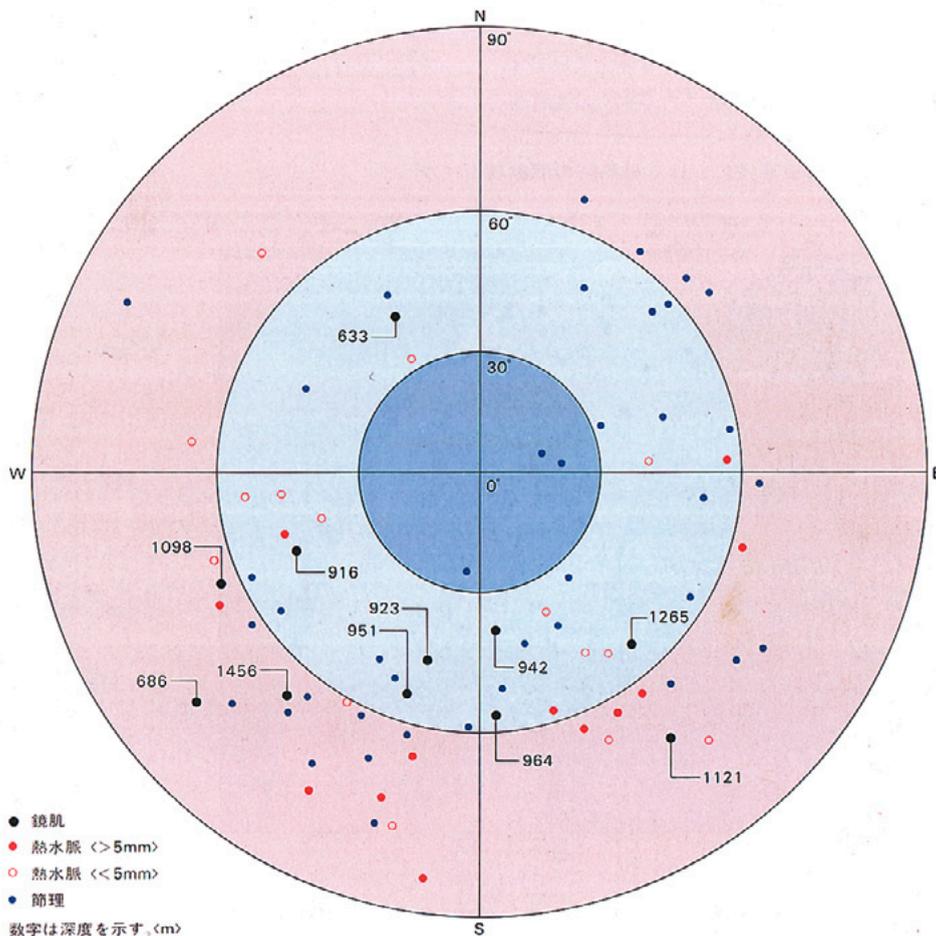
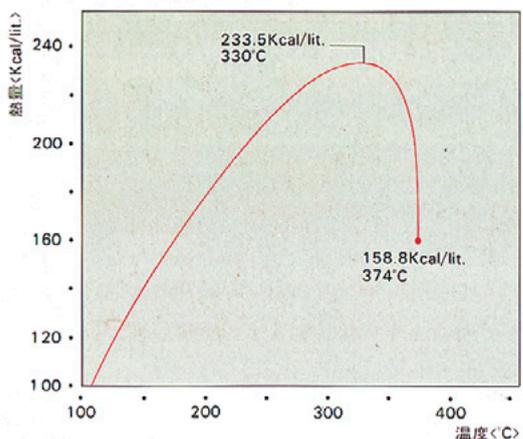


図6・7 - 1 中の飽和水に含まれる熱量



地熱井を掘り、1,500mで280 という非常な高温が得られました。恐らく、近い将来地熱発電所ができるものと期待しておりますが、ただ霧島では、冷却の速度が非常に速そうだということに留意する必要があるかと思えます。

大規模深部地熱貯留層の深度

現在、サンシャイン計画の一環として中部九州の豊肥地区で、深部の大規模地熱貯留層の探査がすすめられています。これは、地下3 kmから5 kmの深さのところ、350 ないしそれ以上の地熱貯留層を見つけて、1ヵ所で25万KW程度の発電所をつくらうとするもので、5年前から約100億円といわれる巨費が投じられ、地熱調査が精力的に進められているものです。ただ私の考えでは、地熱鉱床の品位という観点でみると、地熱貯留層というのは、一定容積に対してどれくらいの熱量が水の中に蓄えられるかによって、品位がきまってくると思うのです。それで、一定体積中の飽和水の熱量と温度との関連をみますと、常温から300 までは、温度

が上がるに従って一定体積中に蓄えられる熱量は比例的に大きくなりますが、350 以上になりますと、密度が小さくなるため蓄えられる熱量が急激に少くなるのです。図6・7は、その関係を示したもので、縦軸に1 中の熱量、横軸に温度をとってその関係を示したものです。そうしますと、330 の地熱貯留層が一定体積中に最も多くの熱量を蓄えることができ、最高品位を有することがわかります。330 を超えると、熱を蓄える能力が急に小さくなってしまいますので、私は330 の貯留層を探査すべきだと主張してきました。ただし、この点については議論のあるところですが、

それで、さきほどの図6・1をみていただきます。非常に活発な地熱帯というのは、水の沸騰曲線に沿って温度が上昇しますから、もし、330 の地熱貯留層があるとすれば、最も浅い場合では1,750mのところにあるはずですが、やや不活発な地熱帯はだんだんと深くなり、たとえば活動度指数が80のところでは3,500mぐらいと推

図6・9 - 八丁原地熱帯の断層と地熱井

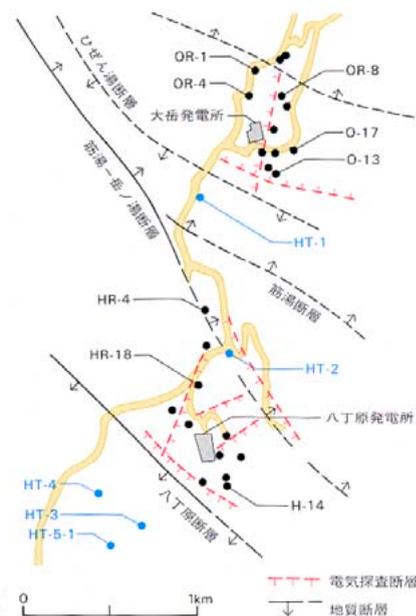
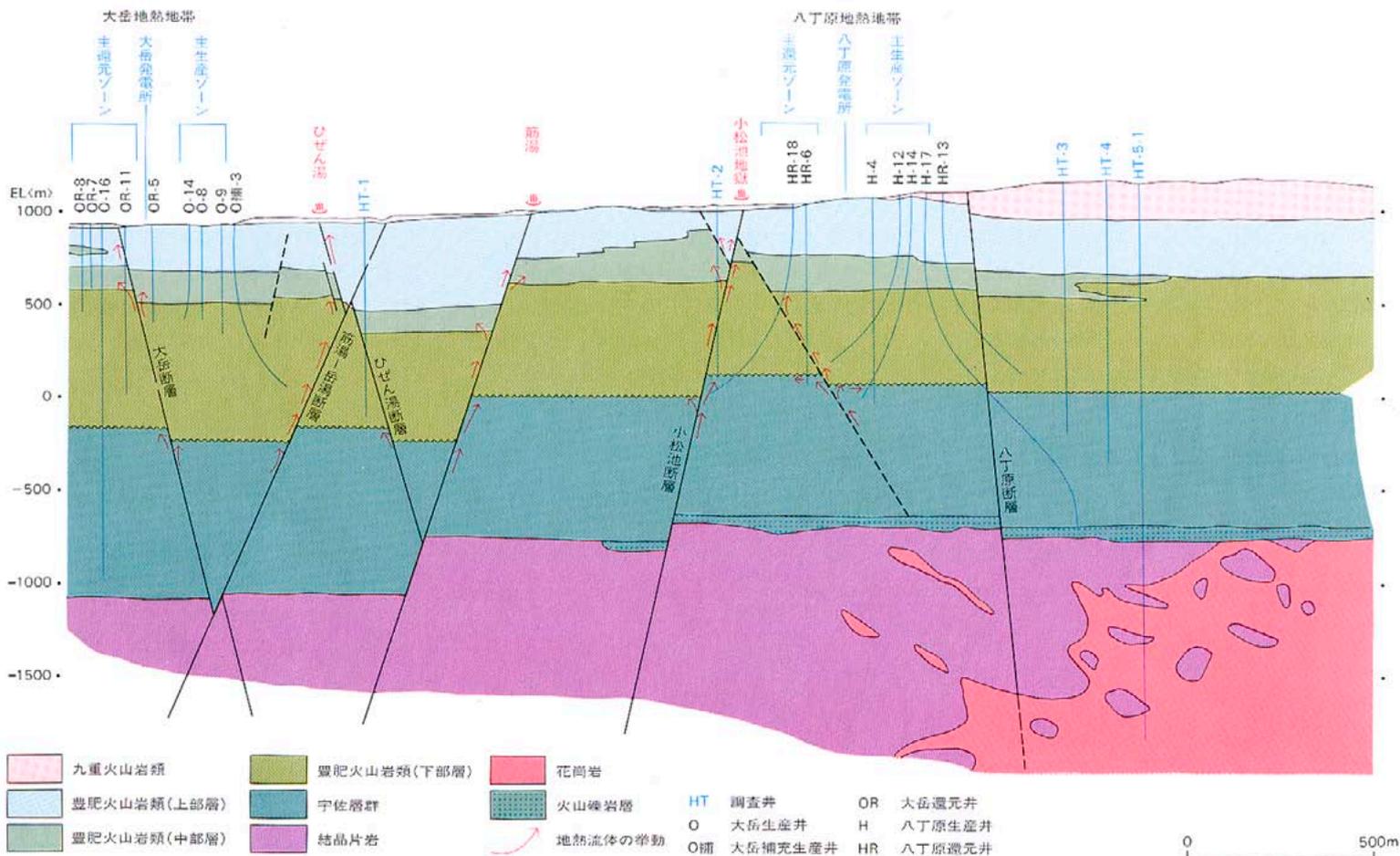


図6・10 - 大岳・八丁原地熱帯の地質断面図



定されます。このように、ある一定温度の貯留層というのは、活動度指数が少し小さくなれば急激に深くなります。たとえばCタイプの地熱帯で330の地熱貯留層を見出そうとすると、とてつもなく深くなって経済的になりたない。以上のことを考慮しますと、大規模深部地熱開発というのは、非常に活発なAタイプの地熱帯において、深度2,000~3,000mの貯留層をねらうのが一番経済的だと思われるのです。その程度の深さのところに最高品位の地熱貯留層があれば、最も経済的であるということになります。地熱断層を求めて

いままでお話ししましたように、活動指数を利用することにより、ある地熱帯ではどれくらいの深さにどの程度の温度の貯留層が期待できそうだとわかってきましたので、次の課題は、地熱流体の通路となるような断層を見つけることです。ところが、これが非常にむずかしい。というのは、ボーリングで得られた地熱井のコアを調べてみると、ところどころに鏡肌や断層が見出されますが、ボーリングコアの現位置での方位がわからないので、そのままではその走向を知ることができません。

しかし幸いにも、大岳、八丁原地熱帯では若い火山岩が大部分なので、コアの磁性を測り、北を指す方向が現在の北極に向いていただろうと仮定して、断層系の方向を推定してみました。たとえば、写真1（扉カラー写真1）は条線が斜めについており、写真2（扉カラー写真2）は条線がほぼ水平についています。すなわち、条線が斜めについているのは、ほぼ正断層的応力が働いたことを示しており、条線がほぼ水平についているものは、横ずれ断層的な応力が働

いたことがわかります。ですから、その断層系の方向さえわかれば、いろいろの情報が得られるわけです。写真3（扉カラー写真3）なども共役的な断層だろうと推定できるわけです。図6・8は、こうして得られた情報をもとにして作成した八丁原HT-4号井のデータを、ウルフネットの上半球に投影したもので、黒丸が鏡肌、赤丸が熱水脈、青点が節理です。そうしますと、あまり明瞭ではありませんが、2種類の断層系が見出されました。1つは走向NWで南落ち、もう1つは走向NEで南落ちです。じつは私は、南落ちない北落ちの両方の断層系を通して熱水が上がってくるのではなかろうかと予想していたのですが、この図によれば、鏡肌とか熱水が上がってくる熱水脈は、主要なものは1つの断層面、つまり共役的な2つの断層のうち一方の面にかたよることが明らかになりました。

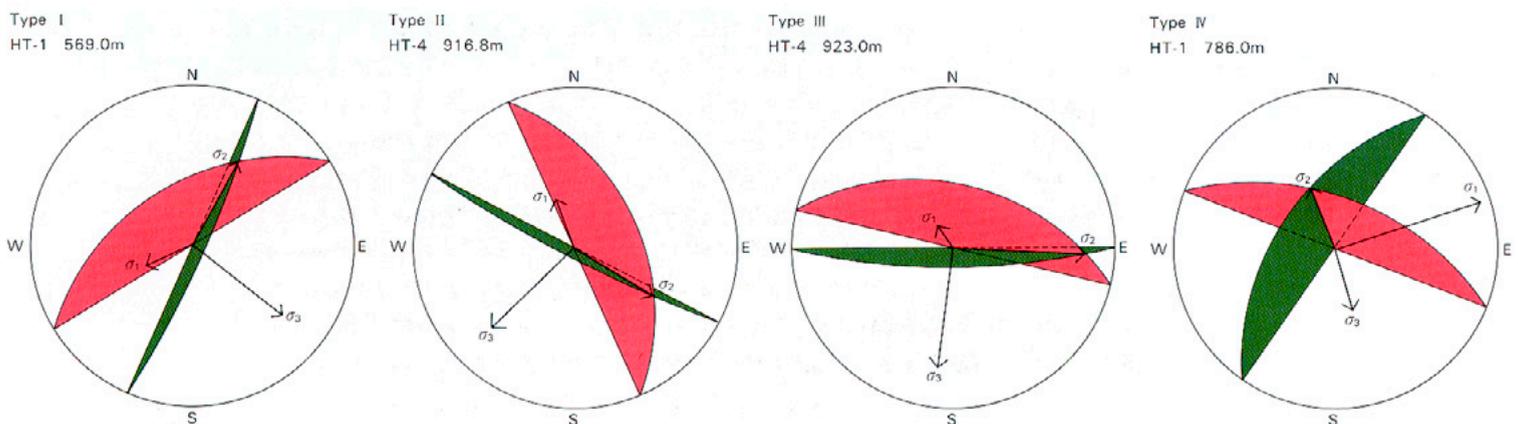
この方法を使えば、断層の方向と傾斜角もわかりますし、共役的な2つの断層の中でどちらの方を熱水（地熱流体）が上がってくるかということもわかります。従って、地質学的にどの位置をどの深さまで掘削すれば、目的の断層面に当たるだろうということが予想できるようになりました。また、どの深さにどれ位の温度の地熱貯留層が期待できるかということは、さきほどの活動度指数を用いて推定できますから、この両方を組み合わせることにより地熱探査のむずかしさが軽減されると思います。

#### 深浅による応力場の相異

図6・9は、大岳・八丁原地熱帯の地熱井の位置と断層を示したもので、図6・10はその地質断面図です。図6・9の実線は、松本先生等の地質調査によって明らかにされた断層で、すべてNW方

向です。しかし電気探査では、図にみるようにNW方向もありますが、NE方向の断層も確かめられています。ききほどの結果とあわせると、NE系は古い断層なので地表地質調査にはあらわれにくいですが、NW系の断層は新しい断層なので、若い火山岩に覆われているところでも地質調査で明らかにされ易いと考えられます。さらに、NE系は別府 島原地溝の方向ですから、この地溝の発生と関係があると思われる。その後、何らかの応力場の変遷があり、NW系の正断層が発生して、それを通じて地熱流体が上がってくるようになった。じつは、さきほどの条線の方向などを使って古い応力場を復元したものが図6・11です。図では、赤いのは鏡肌で、それに対する共役系と考えられるような断層は緑色で示しております。タイプは、別府 島原地溝にほぼ平行のNE系の断層で、タイプが、地熱流体の通路となったNW系の断層です。ほぼ水平の条線がついているタイプは、どうも非常に新しそうなのです。というのは、新しく生成した変質鉱物の上にその水平の条線ができてからです。こうしてみますと、最近の応力場は、横づれをきたすような応力場になっているらしい。現在の九州は、東西方向のコンプレッション（圧縮）が働いているという意見が強いのですが、しかし、比較的地下浅所では東西コンプレッションが働いて、それにほぼ平行の割れ目ができているとしても、地下深いところでは、岩圧が勝ってきて、NE系ないしNW系の正断層型の断層系が生成するのではないかと、私は思っています。中部九州における東西性の断層というのは、多分、地下浅所だけの現象ではないだろうというのが、現在

図6・11 - 大岳 八丁原地帯の応力場



私の考えです。

編集 浅いというのはどの程度ですか。

林 500mないし1,000mより浅い。さきほどの写真にあるようなはっきりした断裂は、500mより浅いところにはほとんどないのです。また、浅いところの断裂は、面が波状になっていたり、不規則なのです。岩盤力学の圧縮試験の結果でも、封圧が小さい場合には断裂面が不規則になります。写真のようなきれいな断裂面ができるのは1,000m以深です。ですから東西性の割れ目というのは、恐らく500mより浅いところ、深くても1,000mより深くはならないと思います。

地層境界の判定のむづかしさ

編集 いま地熱関係では、九重が一番よくわかっているのですか。

林 地熱井の本数が一番多いのです。たださきほどの話にありましたように、グリンタフ活動の火山岩類は安山岩を主としています。豊肥火山活動も大部分安山岩です。そのため両者の境界がはっきりしないのが現状です。大岳発電所では、豊肥の中に貯留層を見出しているのですが、八丁原発電所では、豊肥とその下位の宇佐層群(グリンタフ火山岩)の境目にある貯留層から蒸気を得ています。

編集 図6・10の地中深くで曲がっているのは井戸ですか。

林 そうです。こういうのを傾斜掘といいます。すごく曲がっているでしょう。

編集 熱水はそこからとっているのですか。

林 いいえ、この井戸はたまたま割れ目が小さくて少量の熱水しかでていません。深い2本は大規模深部地熱の探査井です。八丁原では、深

さ1,200mから1,300mの不整合面と断層の交点付近に高温の熱水が多量に貯留されているのです。しかし図6・10の断面図でいいますと、豊肥の岩質と宇佐の岩質が非常に似ている上に、地熱流体により原岩が熱水変質をこうむっています。ですから、この断面図では色分けされてきれいに塗り分けられていますが、実際にはこの境目をきめることが実にむずかしい。これらの岩石を年代測定する場合、フィッシュトラック法を適用すると、深部では地熱によりトラックが消えてしまっているのが正しい年代が得られません。それで、岩石からジルコンを分離して含有量を比較します。たとえば豊肥火山岩だと1kg中にジルコンが10~20粒程度しか入っていないのですが、宇佐層群の岩石になりますと数100粒のオーダーで入っていますから、ジルコンの含有量でほぼ分けることはできるのです。しかし、それでもこの境界をきめることは至難のわざに近いのです。

霧島火山の地下構造と霧島地熱帯

編集 霧島地熱帯での地熱探査、あるいはその地下構造はどうなんでしょうか。

林 霧島では、現在までに30本以上の地熱探査井が掘削され、霧島火山の地下構造が次第に明らかになりつつあります。加久藤カルデラというのは、霧島火山の北東延長の京町を中心としたもので、これは1957年に有田忠雄先生によって提唱されたものです。ところが、最近の深度2,500mに及ぶ地熱探査井では、図6・12に示すような大規模な陥没が存在することが明らかとなりました。この陥没構造は、加久藤盆地をはるかにこえ、霧島火山の中心に向かってより深くなっています。現在、その規模は確認され

ただけでも半径が京町からKT-5号井に至る15kmにも及んでいます。

また火山層序の面でも貴重な試料が入手できました。たとえば、芽島火山の基盤は四万十層群の堆積岩類であることが確認され、さらにその上に厚さ300~500mの溶結凝灰岩類(霧島溶結凝灰岩と新称)が広域に堆積していることがわかりました。

さきほどお話ししましたように、霧島火山の北部の地熱帯は、現在やや冷却して地熱発電が可能かどうか微妙なところですが、西部および中央部では、Aタイプの地熱井が続々と見出されており、近い将来、霧島火山の周辺に地熱発電所が建設されるものと期待しています。

図6・12 - 霧島火山の北西 南東模式断面図

<田口, 1983>

