

講演要旨(第174回)*

特集 栗駒地域の地熱に関する研究成果

地熱検証調査の中途段階に立って

長谷紘和

「地熱探査技術等検証調査」がスタートして6年が経過し、宮城県鬼首地域を中心とする広域地熱地域「栗駒地域」における研究は、鬼首盆地内における地下高温域の把握を中心とする、1,500 m 級坑井検証調査の段階に至っている。

地表下 2,000 m を超え、3,000 m に達する深度に賦存する地熱資源の探査と資源評価のための技術開発を研究テーマに据えた本プロジェクトでは、計画発足時に樹てられた地熱賦存概念モデルを、その後の調査データによって見直しつつ坑井調査によって検証し、その結果を適用調査技術にフィードバックし、探査・解析精度の向上と地熱賦存モデルの高精度化とを図るという進め方をとっている。

このような過程の下にあって、「本プロジェクトが最終目標の中途段階にある現在、本研究発表会において、

1) 深部地熱賦存に関してこれまでの実証結果からみて当初の考え方を修正すべきと思われる点

2) 地熱探査技術における時間軸を入れた解析の重要性について

の2点について述べる。

1) 深部地熱資源の賦存について、本プロジェクト発足当時、われわれが設定した概念モデルは当時の既存資料をもとに構築したものであるが、今日得られている事例に基づけば、深部地熱資源ポテンシャルはわれわれが本プロジェクト発足当時に行った推定を下方的に修正するのが妥当なことを示している。すなわち、①深部地熱プロジェクトとして九州中・北部「豊肥地域」で実施中の“深部”地熱調査では、地熱エネルギーのきわめて有効な輸送を可能にすると考えられた、高温・高圧の地熱流体による“super convection”の存在は深度 2,000 m-3,000 m の間には確認されるに至らなかったこと、②東

北地方北部脊梁域「仙岩地域」で実施中の研究結果からは、上記深度で 10⁶ 年オーダーに亘り、300°C を超える高温地熱流体の本源熱源になり得るような大規模酸性マグマ溜りが存在する可能性は火砕流噴出体積を手がかりとする地質学的推定法からは否定的結論が得られつつあること、を上げることができる。

今日までに得られた地熱坑井調査結果からは、わが国の地熱流体賦存が、主に断裂系に支配された、たて長の貯留構造によって特徴づけられることが明らかにされつつある。

地熱貯留構造を地表下 2,000 m 以深にわたって的確に把握する地熱探査技術の技術課題は決して容易な研究テーマではない。このような地下深部の地熱賦存域を把握するには地熱活動の累積的な結果としての、言い換えれば地熱活動の「化石」としての変質帯、を含めた地下での広がりを対象と考えることが重要である。このことは地熱探査技術の研究開発テーマにおいて、地熱活動を状態としてのみではなく、熱史的にとらえることの重要性を示している。この熱史の時間軸はわが国の場合 10⁶ 年オーダーを超える可能性は小さく、地質学的時間尺度と比較するときわめて短いものと言える。

「地熱探査技術等検証調査」の進展により、地表下 2,000 m 以深に賦存する地熱についても実証データが蓄えられつつあるが、研究の実施に当って、国立公園内での坑井調査の実施等が自然保護の観点から制約を受けている。この制約についてはプロジェクト発足当時にある程度の予測がなされたが、現実にはこの予測を超えるものとなっている。
(地殻熱部)

栗駒地域の広域的地質構造と地熱資源分布

山田 營三

本地域の地質構造、特に断裂系およびそれらの温泉分布との関連を検討し、次の結論を得た。

(1) 第四紀火山周辺の断裂系は、いわゆる広域的応力場による断裂系と方向および性質が異なっており、これはマグマの貫入により異なった応力場が生じた為と考え

* 昭和 60 年 12 月 9 日日本所において開催の研究発表会

られる。

(2) 石巻—鳥海山構造帯(大森, 1954)においては, 第三紀から第四紀までの断裂系が東北地方に一般的に認められている N-S 方向の断裂と異なって NW-SE および NE-SW 系統のものが多い。

(3) 第四紀の火山に伴なうマグマ溜りを熱源とする高温の熱水系(山田他, 1985)の他に, これらから離れた場所にて 40°-70°C の温泉が認められ, それらは上記の2系統の深部断裂に沿って熱水が上昇することにより生じたものと考えられる。(地殻熱部)

小安周辺の三途川層と陥没構造

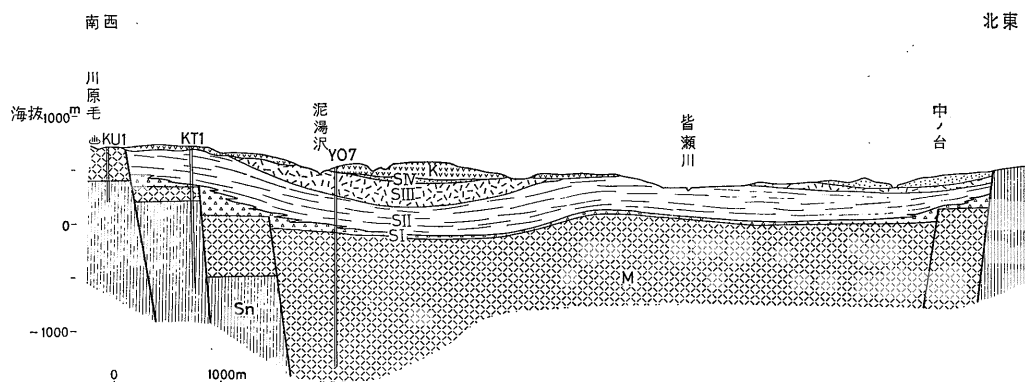
竹野直人・金原啓司

秋田県南部にある北部栗駒地熱地帯は, 活発な地熱活動が認められ, 地熱の探査・開発が進められている。この地域には, 湯沢, 秋の宮, 虎毛山, 皆瀬川を含む広域的な低重力異常域と, その中であっていちだんと低い低重力異常域が地域的にいくつか認められる。このうち皆瀬川に沿う低重力異常域は南西縁に地熱地帯が位置し, この地域の地質構造の解明が地熱の探査, 資源評価の上で重要となっている。この地域は, 三途川層と呼ばれる層理の発達した湖成堆積層が最も広くまとまって分布している。地質構造を明らかにする上で, その特徴的な岩質を利用することが有効と考えられ, 三途川層と周囲の地質の関係について調査を行った。

三途川層の下位には, 皆瀬川層と呼ばれる一部溶結した火砕流堆積物が分布する。皆瀬川層は, それより下位の山内層以下の地層と岩相, 地質構造を異にし, 不整合

関係にある。促進調査坑井のうち1本は, 深度 1800 m まで掘削して, なお皆瀬川層をぬけず, その厚さは, 1200 m 以上あり, 火砕流堆積物により埋積された陥没構造の存在を明らかにした。三途川層と皆瀬川層が一連のものであることを野外調査および坑井岩芯の検討により明らかにした。三途川層が, 周囲の山内層以下の地層に対して, 陥没形成に関連した断層または断層崖を介してアバットしていることが, 本地域北東部と南西部で確かめられた。

三途川層を下位から上位にむけて I-IV に4分した。I 層は, 角礫岩層, II 層は凝灰岩・シルト岩互層, III 層は凝灰岩層, IV 層はシルト岩および珪藻を含む細粒凝灰岩層である。各層とも岩質の変化が著しい。I 層の角礫岩層は, 泥岩, 安山岩等の角礫と凝灰岩の基質からなる部分, ほとんど火山砕屑物のみからなる部分, あるいは 1 m-十数 m の泥岩・シルト岩の岩塊を含むスランプ角礫岩からなる部分が認められる。この角礫岩層は, 周縁部で発達する傾向があるが, 周縁部から離れた所に巨礫岩塊が認められることもあり, 崖錐性のものとスランプ性のものが混在していると考えられる。この角礫岩層の中に, 下位の皆瀬川層の火砕流堆積物と同質の凝灰岩類がはさまれることがある。I 層からは, 3カ所で火山豆石が見出され, II 層の一部では多量に軽石が含まれている。したがって皆瀬川層から三途川層の下部堆積時まで一連の火山活動が推定される。これらのことから, この地域では, 火砕流堆積物からなる皆瀬川層の堆積とともに陥没が進み, 陥没をもたらした断層崖の崩壊による崖錐性およびスランプ性の角礫岩層(三途川層 I)の堆積, ついで湖成層(三途川層 II-IV)の堆積が続いたものと考えられる(第1図)。本地域北東部, 南西部では陥没を作



第1図 北部栗駒地熱地帯(川原毛—泥湯—皆瀬川)の模式地質断面図
Su: 山内層以下の地層, M: 皆瀬川層, SI-SIV: 三途川層(I-IV は本文参照), K: 兎山層
(デイサイト溶結凝灰岩)

る断層に沿って貫入岩体が認められる。以上の過程は、カルデラの形成として理解することができるが、三途川層の分布とカルデラの広がりについてまだ問題が残されている。三途川層と呼ばれる地層は本地域に最もまとまって分布するものの、隣接地域にも点々と分布しており、それらとの関係が不明である。この点に関して、冒頭に記したような、広域的な低重力異常域との関係、あるいはその中のいくつかの地域的低重力異常域相互の関係が今後明らかにされる必要がある。(地殻熱部)

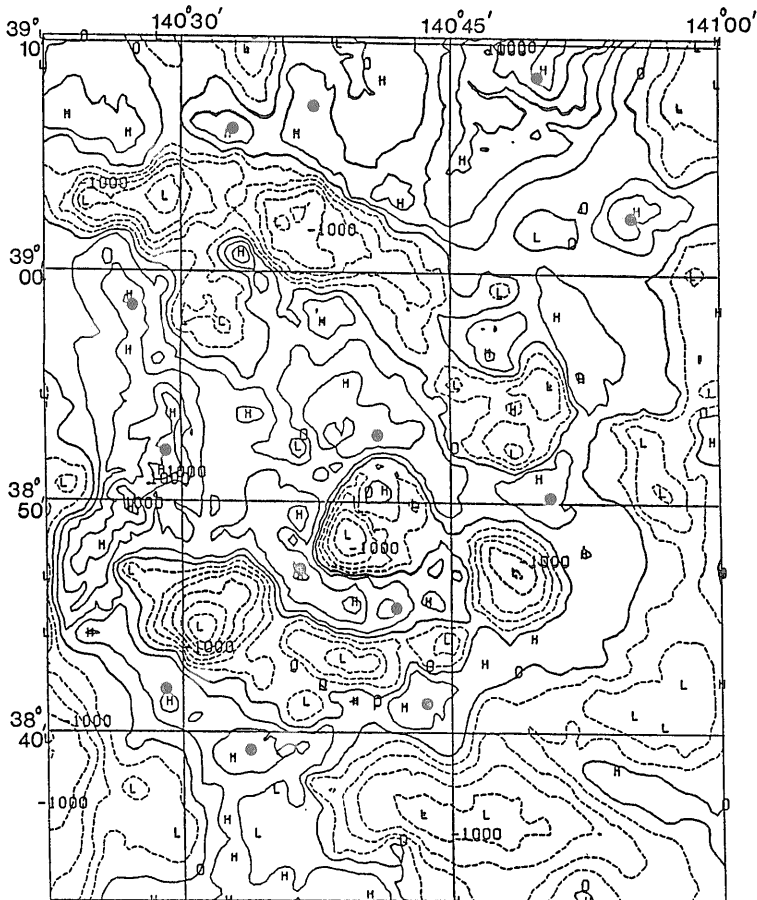
栗駒地域の重力分布について

駒澤正夫

栗駒地熱地域地質図(昭和61年3月発行予定)について、G-H 相関を検討し地形との相関の少ない仮定密度

$\rho=2.3\text{ g/cm}^3$ の編集重力図を作成した。定性的に考察すると、低重力異常域が栗駒南部・鬼首地域においては円形状に、栗駒北部・小安地域においては北西-南東に伸びた長円形状にそれぞれ見られる。鬼首低重力異常域は鬼首カルデラの環状構造に対応し、小安低重力異常域は北西-南東に方向性をもつ2本の構造線に画された地溝構造と考えられる。鬼首地域について、推定地質断面モデルの各地質層序に密度を仮定して重力異常と整合性をもつか2次元解析を行って検証した。その結果、モデルでは山王森周辺の基盤の隆起域が過度に推定されているために10mgal以上の誤差を生じ地質モデルの修正を要することが判った。

重力の3次元解析については、対象とする構造より深い構造による広域的な地域異常は、ローカットフィルターにより除き、対象とする深度の残差重力図を作成し、均質二層モデルにより計算を行った。密度差を $\Delta\rho=0.4$



第1図 栗駒地熱地域の重力基盤標高図 ($\Delta\rho=0.4\text{ g/cm}^3$)
(黒丸印: 基盤露頭のコントロールポイント)

g/cm³ とし、コントロールポイントは基盤岩類の露頭を採用して計算を行い、その結果を第 1 図に示す。解析結果と掘削結果を比較すると、重力基盤は栗駒北部地域では花崗岩基盤と対応している範囲が広いが、栗駒南部地域では KR-1 号井が 1213 m で花崗岩の基盤に達したが本解析の重力基盤は約 200 m 浅く解析されており、また、花崗岩に達していない他の坑井についても数 100 m 浅く解析されていると考えられる。それは、鬼首地域では重力基盤が、かならずしも花崗岩基盤を表わしている訳ではなく、密度的には基盤と考えられる蟹沢層下部・グリーンタフ層に対応していると解釈できるためである。

(新エネルギー総合開発機構)

熱水等の化学及び放熱量の分布

比留川貴

栗駒広域地熱地域 (N 38°32' - N 39°10', E 140°25' - E 141°0') には多数の熱水及び噴気兆候などが分布するとともに、検証調査などによる坑井の掘削が続けられている。

本地域の地熱兆候は、その分布、産状及び地熱流体(熱水及びガス)の化学的特徴などにより①荒湯一女釜男釜、②鳴子温泉及び③小安一川原毛の 3 地域に分けられる。また、地熱流体の地域ごとの化学的性質の概要は、次のようである。

荒湯一女釜男釜地域の中心部から湧出する熱水は 98°C 以上の高温を示し、地獄地域では酸性の H-SO₄ 型、周辺部に向けて順次 Na-Cl 型組成となっている。また、トリチウム (3H) 濃度の測定結果によれば、地獄地域の酸性低塩分熱水はその値が高く、周辺の中温熱水は低い値が求められている。噴気ガスの 98% 以上は水蒸気で占められ、残余の主要成分は H₂S、CO₂ 及び SO₂ 等の酸性ガスである。荒湯地獄の東に掘削された KR-1 号井の噴出過程から考察すれば、これらの酸性ガスが熱水を噴出させる役目をしているようである。

鳴子温泉地域の熱水は、中心部においては高温・中性の Na-SO₄ 型、周辺部に向けて順次中温・中性、Na-HCO₃ 型に変化し、現在では噴気活動は認められない。

小安一川原毛地域の熱水は、中心部においては高温・酸性の H-Cl 及び H-SO₄ 型、周辺部に向けて中温・中性の Na-Cl 型に変化している。噴気ガスの性質は、荒湯一女釜男釜地域のそれに類似している。

鬼首盆地内 9.156 km² の地域における放熱量は、熱伝導、河川、温泉及び噴気地に分けて測定され、総量は約

7440 kcal/sec であり、その約 70% は河川によるものである。地域ごと単位時間・面積当りの放熱量は、最高が荒湯 (209.3 × 10⁻⁸ cal/sec・cm²、以下同単位)、片山 (123.7)、吹上沢一轟 (59.25)、女釜男釜 (40.54) の順となり、全地域の平均値は 81.27 である。(地殻熱部)

鬼首地域の変質と熱水系

高島 勲

地熱発電所が建設されている鬼首片山周辺は通常の地熱地域と異なり、浅部に沸石を主とする中性-アルカリ性の変質、深部にパイロフィライトを含む高温酸性の変質が存在するという特異な構造を持つことで知られている。深部の酸性変質帯は基本的に火山性物質の寄与が大きないわゆる狭義の火山性地熱(高島・本多、印刷中-秋田大学地下資源研究施設報告 No. 51)が存在するものと考えられ、片山付近では地下 600 m 付近に存在する強力な不透水層(安山岩質溶岩)のため深部熱水が直接上昇しなかったことにより中性-アルカリ性変質が生じたものと思われる。地表及びボーリングによる立体的変質帯分布から、深部の酸性熱水は片山の東北東約 1 km の荒湯付近では浅部まで上昇して来ており、その酸性熱水が側方流動により中性化したもの及び直下の熱により加熱された天水が片山の中性-アルカリ性地熱貯留層を形成したものと思われる。

多くのボーリング坑の変質データから、前述の狭義の火山性地熱は高日向山を中心として径 2-3 km の範囲に広がっており、その全部が現在まで続く活動であるとすれば相当大きな熱源を想定することができる。

(秋田大学鉱山学部)

断裂型熱水系での熱水流動の数値実験

杉原光彦・石戸経士

鬼首地熱地域をはじめ各地の地熱地域で各種調査がなされるにつれて、熱水を供給する垂直性断裂の存在が地熱系の形成に支配的な役割を果たしているという描像が定着しつつある。そこで断裂型熱水系での熱輸送過程を定量的に把握する目的で垂直断裂を陽に含むモデルをたてて数値実験を行なった。

垂直断裂面を通して周囲の岩体と熱交換をする場合の垂直断裂内の対流発生条件について線型安定論からは次のことがわかっている (H. D. MURPHY; 1979). : 自然対

流は発生しにくいが一生成されると安定に存在し、しかも深さ方向に細長い対流が存在しうる。特に最後の点は深部からの効率よい熱輸送過程の存在を示唆している興味深い。我々はまず、岩体中の垂直断裂単体について数値実験を行ない、線型安定論と同様の結果を得た。また鬼首地域での放熱量調査結果と比較して同地域の地表近くの熱輸送過程が垂直断裂中の熱水循環で説明できることを示した。

次に地熱系全体の熱史を考察するために、熱源と地熱貯留層をも含むモデルについて数値実験を行なった。モデル作成にあたっては観測事実の情報量と精度に見合うこと、及び計算量を考慮して単純化を心掛けた。解析領域としては、岩体の上に透水層があり、断裂が岩体を垂直に切って透水層と接しているという形状を三つの直方体の組合せで構成し、各々の系の外側は適当な対称境界条件を課した。断裂内、透水層内では厚さ方向に平均化した2次元領域として熱水循環を考えることにした。以上の単純化にもかかわらず、各々の系間の熱交換、及び断裂と透水層の間の熱水の出入りを考慮したため、このモデルはかなり広範な現象の考察に適用できる。また透水層内の冷水が断裂内を下降し断裂内下部で周囲の岩体により暖められ熱水となり上昇して透水層に流入する、というように熱水貯留層への流入流出はモデルの中に取り込んであるため計算結果の任意性の幅が小さいこともこのモデルの特長の一つである。計算では岩体下部に熱源が与えられた時、それが岩体内熱伝導と断裂内熱水循環により、どのように透水層に熱輸送され熱水貯留層が形成されるかをシミュレートした。

熱源が極度に大きくない限り熱伝導だけでは拡散するだけなので断裂内対流により、いかに集中した熱輸送が実現されるかが有効な熱水貯留層が形成されるかどうかのポイントになる。数値実験の結果、次の二点が明らかになった。

1. 断裂の透水性だけでなく透水層の透水性も重要である。透水層の透水性が低い場合は断裂内が対流により暖まった後は対流は減衰し、周囲の岩体に熱を拡散してゆく。透水層の透水性が良い場合は冷水が断裂に供給されるため熱対流が励起され続ける。断裂から透水層に流入した熱水は熱水貯留層を形成する。

2. 断裂が近接して存在する場合は断裂同士の干渉によって熱輸送効率は、さらに良くなる。(地殻熱部)

栗駒地域における MT 法調査について

北村英昭

NEDO 地熱調査部では、地熱探査技術等検証調査の一環として、栗駒地域において MT 法調査を実施している。56年度には地域の南部を中心として22点、59年度には北部を含む全域にわたって36点の測定を行っている。

本報告では、まず、MT 法調査により得られた比抵抗の平面的分布を明らかにするとともに、3本の測線について行った1次元解析の結果を示し、当地域の比抵抗構造を考察した。また、MT 法の1次元解析の結果について、シュランベルジャー法の断面解析の結果及び、坑井調査の電気検層結果と比較検討した。

TE モードの見掛比抵抗曲線からボスティックインバージョン解析を行って得られた、海拔0m及び-1000mでの比抵抗平面図によれば①環状の調査地域のまわりを囲むようにして高比抵抗域(数100Ωm以上)が存在する。②調査地域の南部、とくに宮沢、吹上などの温泉群及び、片山地獄付近を中心として低比抵抗(数10Ωm以下)エリアが広がっている。③調査域の北部は概ね高比抵抗である。また海拔0mと-1000mの比抵抗平面図を比較すると全体的傾向は一致するものの、-1000mでは高比抵抗の部分はより比抵抗が高くなり、低比抵抗のエリアが狭まってきて低比抵抗部と、高比抵抗部のコントラストがはっきりしてくる傾向がある。

一方、MT 法の1次元解析の結果によれば①一般的に宮沢、吹上、片山など地表徴候の活発な地域では地表から比抵抗が低く、比抵抗基盤は海拔-1000m前後と深くなっている②環状構造の北側部分ではほぼ地表付近より数100Ωm以上の高比抵抗で、比抵抗基盤はほぼ海拔-500m前後と浅い。③KR-3号井の北側から鬼首発電所及びKR-2号井付近にかけては比抵抗の不連続線がいくつか存在し、かなり比抵抗構造が複雑に変化している可能性がある。

MT 法の1次元解析結果とシュランベルジャー法の断面解析結果を、調査域を東西に横切る測線で比較すると、基本的には西側、東側で比抵抗高く、中央部で低いというパターンは類似している。しかし、全体的に比抵抗基盤の深度はMT法ではシュランベルジャー法にくらべて深く表示され、従って、低比抵抗層の層厚はMT法でより厚く示される傾向にある。また、シュランベルジャー法の解析結果に現れる浅部(地表下100-200m)の

10 Ωm の低比抵抗が解析されたが、それ以深のデータについては質が悪く、基盤構造等の議論ができない。荒湯以東では、轟温泉以西と同じ構造になる。一方、MT法のデータについては、同じ測線について解析上の問題点を考察しつつ、2次元解析を行なった。3次元構造における2次元解析の有効性、表層の局所的な不均質の影響、地形の影響を考慮した。また、電気探査の200m以浅の浅部構造と、駒沢・山田(1985)の重力基盤深度を比抵抗構造のコントロール・データとした。以下の結果を得た。花崗岩(1000 Ωm)を基盤とするカルデラ構造が解析された。カルデラ堆積物は、数10-100 Ωmであり、湖成堆積物や変質安山岩から成る。この比抵抗値は横山ほか(1983)の実験値と矛盾しない。荒湯・片山の浅部には10 Ωm程度の低比抵抗部がある。また、地下数kmまでの構造としては、片山西方を中心とした低比抵抗体が顕著であり、基盤内の亀裂に熱水が貯留されていることに

対応する。ここに熱源があると、山田・栗山(1985)の温度分布のコンターと調和する。また下部地殻に低比抵抗層が解析された。(物理探査部)

栗駒地域における坑井調査について

高木慎一郎

新エネルギー総合開発機構では、宮城県鬼首地熱地域を対象とし、地熱構造のモデル化、探査結果の検証等を目的とした坑井調査を実施している。この調査は、1500m級6坑、3000m級1坑により深部地熱構造の解明と探査技術の向上を図ることとしている。現在1500m級坑井3坑を終了した段階であるがこれまでの調査結果は次の通りである。

1500m級坑井調査の内容

	項目	内容	調査目的	
掘削工事	掘削深度 掘削工法 掘削方向 最終坑径 コア採取	1500 m ワイヤーライン工法 鉛直 101 mm (Φ) オールコアリング	地熱帯位の確認	
	コア調査	岩質、岩相、変質、 耐れ目等の肉眼調査 1/500 地質柱状図作成	地質、変質状況の把握	
資料・資料	坑井地層	電気検層 (R, SF) 温度検層 坑径検層 音波検層 密度・中性子検層	比抵抗による地層の対比 岩質の検討 地温分布・温度勾配 フラクチャーの検出 地層孔隙率の決定	
	コア調査	地質・変質	顕微鏡調査 X線回折分析	岩石の鑑定 変質鉱物の同定
		物性	密度、弾性率、弾性波速度 熱伝導率、化学分析、 流体包埋物均質化温度、 残留ガス	物理探査データの解析 地温の推定
	注水試験	自然注水、加圧法	地層透水性の検証	
	流体調査	地層別採水、 化学分析 (17成分)	地熱流体の特性	
	温度回復試験	ST= 4b-120b 測定	平衡地温推定	

(1) N56-KR-1号井(56年度)

片山地獄の東北東約2kmの荒湯地区において1360mの掘削を行った。地質は下位に向かい鬼首盆地堆積物の第四系宮沢層及び赤沢層、新第三系蟹沢層、基盤をなす先第三系花崗閃緑岩よりなる。変質は緑泥石、セリサイ等中性ないし弱アルカリ性熱水環境下の生成鉱物で特徴付けられ、これにパイロフィライト、カオリナイト等の酸性変質鉱物が重複し、これら鉱物の生成温度条件は全体的に高いといえる。本坑井は1214mで基盤に達し、1360m付近で全量逸水を伴う破碎帯に達し、硫化水素ガスを伴う熱水の噴出事故を発生したため深部の測定は不可能となったが、掘削中の温度測定値は1320m深で210°C(S.T 30分)であった。

(2) N58-KR-2号井及び3号井(58年度)

鬼首カルデラの南東部の高日向山南麓及び片山地区の北方において1500m級2坑を掘削し各種の調査・解析を実施した。掘削深度は2号井1222m、3号井は1500mであり結果は次の通りにまとめられる。(1)坑井地質及び変質は略前記の通りで2,3号井では何れも新第三系蟹

沢層、神室山層の途中で終り基盤には達しなかった。(2)地温は何れも500m-700mより急激な上昇を示し、2号井では185°C(掘削中温度)3号井では263°C(平衡温度)の坑底温度が得られた。また3号井は1300m付近をピークとして温度勾配の低下傾向を示すことや1360m付近にある全量逸水層で強度の高温熱水変質による鉱物の生成が認められることから、この深度において高温熱水の存在が推定された。またコアによる流体包有物試験による均質化温度では各坑井とも最高300°Cを越す高温が得られた。

以上3本の坑井は、当地域で最も新しい火山活動である高日向山を中心とした地熱微候分布地域及びに地磁気地電流法(MT法)調査の結果により明らかにされたカルデラ南部全域に広がる低比抵抗帯に焦点を合わせて地点選定をしたもので、調査の結果何れも高温地熱流体の存在が確認され、当地域の地熱資源の規模、拡がり等の推定が可能となった。

(新エネルギー総合開発機構)