

講演要旨(第168回)*

特集 地熱探査技術等検証調査—仙岩地域における深部地熱—

地熱探査技術等検証調査の概要

長谷 紘和

サンシャイン計画の一環として実施されている「地熱探査技術検証調査」は地質調査所が新エネルギー総合開発機構(NEDO)とともに、昭和55年度から実施中の、地熱探査技術確立化のための協同研究計画である。この研究では地下深部に賦存する地熱資源の探査にも有効な技術の確立化とともに地熱資源評価技術の確立化が研究目標となっている。研究目標の達成化に向けて、地質調査所はとくに地熱資源評価技術の確立化の観点から研究を分担実施してきている。

「地熱探査技術等検証調査」では、東北地方、秋田・岩手県境に位置し、通称「仙台地域」と呼ばれる地域と、宮城県奥首地域を中心とする、通称「栗駒地域」をモデル地域として選定し、研究を実施中であるが、ここではこれら2地域のうち「仙台地域」において実施してきた研究の結果について中間的に報告を行う。

地質調査所はこれまで、「仙岩地域」において1960年代後半から今日まで継続して地熱に関する研究を実施してきている。すなわち、1960年代にはわが国初の地熱発電所である松川地熱発電所建設に関連した研究を実施し、以来石油危機の勃発に半年程先行して開始された「全国地熱基礎調査」を始めサンシャイン計画の下で「地熱地域の熱水系に関する研究」、「広域深部地熱資源賦存に関する研究」などの研究を実施してきた。これらの研究により得られた成果に基づいて、まず「仙岩地域」の広域地熱資源賦存概念モデルの作成がなされ、以後本研究では新たな調査データの入力による地熱モデルの高精度化を通じて研究目標達成を目指している。

「地熱探査技術等検証調査」の中で、地質調査所は地上調査として地質・地形調査、変質帯・地化学調査、水理・水文調査、精密重力調査等を実施するとともに、坑井調査で得られた岩芯試料の検討及びNEDOが実施し

た屈折法、電気探査、MT法調査結果の再解析を行ってきた。また、坑井を利用した水圧破壊試験(圧力試験)を実施するとともに化学的調査法として「化学検層」法を提唱しその技術開発を進めてきた。「化学検層」では坑井内流体の化学分析に関連する現状の問題点を分析し、各層流体化学分析の技術確立化のための研究を実施した。

「仙岩地域」の地熱賦存モデル化に関しては、前述した各種調査結果に基づき地質、地化学、地球物理各モデル化を行うこととし、広域的には縮尺1/10万「仙岩地域地熱地質図」編集を行った。

「仙岩地域」は従来、玉川溶結凝灰岩類などとして知られる多量の酸性火砕流堆積物が分布する地域として注目され、本地域における地熱構造の解明に当って、この酸性火砕流をもたらしたマグマ・火山活動の理解が急務であった。しかしながら、本地域内に掘削された深度2,000mのSN-1坑の結果に代表されるように、本地域地下には予想を上まわる厚い凝灰岩類の発達があることが判明した反面、この事実を十分に説明し得るマグマ・火山活動のモデル化に予想以上の時間を要した。しかし現在に至り漸くモデル化の見通しも立てられる段階になったといえる。この酸性マグマ・火山活動のモデルでは、高温の地熱流体貯留部の発達は本調査開始時に想定した概念的予測モデルと比較して相対的に深部かつ地域的にも限定されることが明らかにされつつある。

(地殻熱部)

仙岩地域の広域地熱地質構造

上村不二雄

仙岩地熱地域のうち、温泉・噴気・地熱生産井など、地熱徴候が密集している中心部には第四紀の火山岩類が分布しており、新第三系は余り露出していない。一ぼり松川・葛根田川など、地熱生産井の熱水または蒸気は、地下の新第三系のなかに貯留されており、新第三系の層序や構造を知ることは極めて重要である。10万分の1仙岩地熱地質図は、新第三系の分布や構造が一見して

* 昭和59年12月14日本所において開催の研究発表会

判るように、周辺地域を広く取入れて編集された。

この地域の新第三系は、下位から1. 大又層, 2. 下部阿仁合層, 3. 中部阿仁合層, 4. 上部阿仁合層, 5. 坂本層, 6. 小志戸前層—山津田層, 鳩ノ湯凝灰岩類, 葛根田川層, 7. 官田層, 及びこれらの相当層からなっている。これらの地層は秋田地方の門前階から上部船川階の地層に概ね対比される。これらを覆うて第四紀の玉川溶結凝灰岩類と八幡平溶岩など新期の火山岩類が広く分布している。

新第三系は、先第三紀の地層や花崗岩類が分布しているこの地域の周縁部から第四紀の火山岩類が分布している中心部に向かって緩い盆状の構造を示している。この盆状構造は重力異常にもよく現われており、同じ盆状の低重力異常を示している。このほかにこの盆状構造を截り、花輪盆地及び霰石盆地とその延長に南北方向に延びる低重力異常が認められる。また曲崎山と波黒沢の上流に小規模の高重力異常が認められ、構造試錐 SN-1, SN-3の結果では深部に第三紀の泥岩や安山岩起源のホルンフェルスが分布しており、第三紀花崗岩の岩体が潜在していることが予想される。

噴気や温泉などの地熱地質は、その分布を見ると次のようである。

1. 玉川溶結凝灰岩類を含む第四紀の火山岩類が分布している地域—御在所・安比・藤七・松川・網張温泉など。

2. 新第三系のうち女川階の坂本層などが露出しているかその周辺の地域—鳩ノ湯・蛇ノ湯・乳頭・滝ノ上・国見温泉など。

3. 花輪盆地の延長に当る南北方向の低重力異常を示す地域—トコロコ・銭川・澄川・後生掛・フケ湯温泉など。

また松川・葛根田川各地熱生産井はいずれも滝ノ上温泉層など女川階の堆積岩中に貯溜する蒸気採取している。女川階の地層は主に硬質泥岩と凝灰岩からなっており、硬質泥岩は所によってクラックに富み、地熱流体の貯溜、また通路として適していることによると見られる。この地域の南、国見峠に近い国見温泉はその良い例である。

第四紀の火山は、南北方向、東西方向などの火山列として分布している。これらは八幡平—大深岳火山列などいずれも高重力異常と一致している。個々の火山には火山口またはカルデラの他に、火山体を取囲む環状、或は中心部から外側に放射状の構造が認められる。一部の噴気や変質帯はこの様な構造に沿って分布しているようであり、今後検討を加える必要がある。(地殻熱部)

仙岩地域の中心部における地熱地質構造

須藤 茂

仙岩地域の中心部は主として安山岩からなり火山地形を示す新期火山、玉川溶結凝灰岩及び主に中新統からなる新第三紀堆積物からなる。

新期火山の中では岩手山、秋田駒ヶ岳及び秋田焼山のみが有史の活動記録のある火山である。須藤(1984)、TAMANYU *et al.* (1983)及び須藤(投稿中)によれば新期火山のうち松川安山岩、大深岳、八瀬森、曲崎山、秋田大白森、烏帽子岳、荷葉岳、岩手大白森、大松倉山及び小高倉山の一部の岩石の K-Ar 年代は約 1 Ma—約 3 Ma の年代を示す。また松川安山岩の一部、八幡平、番岳、大深岳溶岩の一部、曲崎山、秋田大白森、烏帽子岳、荷葉岳、岩手大白森及び小高倉山溶岩の一部の岩石は逆帯磁を示す。これらの火山の中にはなだらかな火山斜面を有するものもあるが、その年代は必ずしも新しいとは限らないことが明らかになった。正帯磁を示す火山岩は秋田駒ヶ岳及び岩手山のほかは高倉山、九森、乳頭山、嶮岨森、秋田焼山及び前森山で見い出されている。

玉川溶結凝灰岩は東西約 70 Km, 南北約 60 Km の範囲に分布するが、特に秋田焼山と荷葉岳の間の約 10 Km 四方内では厚く分布しまた全てのユニットが揃っている。それらは下位から流紋岩溶結凝灰岩 I, II, III, IV (以下 R1, R2, R3, R4) 及びデイサイト溶結凝灰岩(D)の 5 ユニットである。流紋岩溶結凝灰岩の岩質はほぼ一様で石英及び斜長石の巨斑晶を多量含む普通角閃石含有斜方輝石流紋岩からなる。石英及び斜長石の量はモードで計約 40% である。斑晶の粒径ではユニット毎に差があり、R1 と R4 はほぼ同じであるが R2 はそれと比べて小さい。D は単斜輝石斜方輝石デイサイトであり、斑晶量はモードで約 10% である。玉川溶結凝灰岩の K-Ar 年代は約 1 Ma—2Ma であり、R1, R4 及び D は逆帯磁、R2 は正帯磁を示す。遠方にまで分布していることが確認されているのは R4 と D である。

玉川溶結凝灰岩と新期火山岩の上下関係が確認できる露頭は多くないが、何か所かでの観察によれば両者は大局的には指交関係にある。したがって仙岩地域中心部では流紋岩及びデイサイトからなる玉川溶結凝灰岩と主として安山岩からなる新期火山が交互に噴出していたと考えられ、この約 1Ma—約 3Ma は bimodal VD tcanism の時代として特徴づけられる。

仙岩地熱地域の中心部では先達川、葛根田川、北ノ又

川及び大深沢の上流域に主に中新統からなる新第三紀堆積物が分布する。その年代は一部が貝化石から推定されているのみなので、今後火山岩の絶対年代測定が望まれる。

仙岩地域中心部の西半では深度2,000mまでの多くの試錐がなされた。その結果中心部の地下は最大約1,900mまで多斑晶の流紋岩凝灰岩からなることが明らかになった。この流紋岩凝灰岩は上記の玉川溶結凝灰岩より斑晶量が多く、斑晶の粒径が大きい。また強溶結及び変質を受けており密度は2.5-2.6と大きい。全体は2つかあるいはそれ以上のユニットに区分されるが、各ユニットの層厚は極めて厚い。岩片は多くなくまたその粒径も小さい。特に最下部に岩片が濃集することもない。このような特徴はLIPMAN(1984)が示したintra caldera welded tuffとよく一致する。この凝灰岩の年代は必ずしも明らかには示されていない。すなわちK-Ar法では全て約2Maの値が算出されるが、同じコア中の新第三系の火山岩の年代も同じ程度の値となり、真の噴出年代を見積もることが困難となっている。Intra caldera welded tuffは大量の大規模火砕流(outflow)の噴出によってできた陥没地に堆積したものである。仙台地熱地域ではこのoutflowに対応する可能性のある凝灰岩として約3Ma-約10Maのいくつかのユニットがあるが、まだそれらのどれかを特定できない。またこの高密度凝灰岩は上記の玉川溶結凝灰岩の下盤である。したがって玉川溶結凝灰岩の底が見えていることになるが、現在までに玉川溶結凝灰岩噴出に伴う陥没構造すなわちカルデラは見い出されていない。(地殻熱部)

また本地域で行った重力調査によれば、仙岩地域を中心部は相対的に高重力異常を示す。これは前記の高密度

凝灰岩が浅部に分布することによるものと思われる。したがって今後重力データにより深部の密度モデルを考察するためには新たな解析法が必要となる。

今までに得られたデータを基にした仙岩地域中心部の模式地質断面を第1回に示す (地殻熱部)

仙岩地域の熱源評価

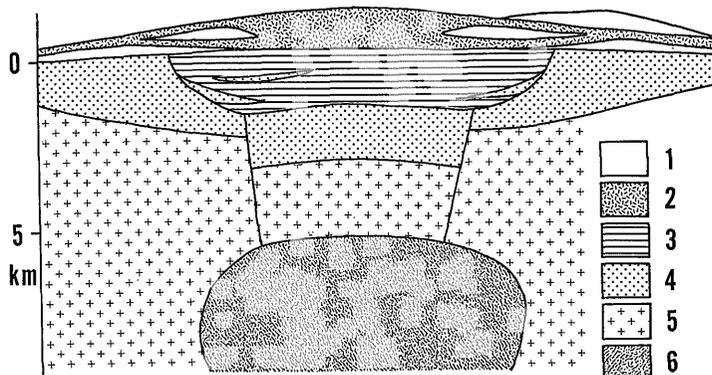
玉生志郎

仙岩地域において実施されている地熱探査技術等検証調査では多数の地熱調査井が掘削された。それらの岩芯の地質層序を検討した結果、当該調査地域内には玉川溶結凝灰岩類の噴出に伴ったカルデラ構造が存在することが明らかになった。以下、その特徴を列記する。

1) カルデラは東西約10km, 南北10kmのほぼ四角形をしたものと推定される。カルデラ西縁部と東縁部にはカルデラ壁の崩壊に伴う崖錐堆積物(層厚100-230m)が堆積している。カルデラ北縁部と南縁部は各々焼山溶岩と荷葉岳火山噴出物におおわれているため、カルデラ境界部は明確でない。

2) カルデラの陥没量は北部で約1km, 南部で約2kmである。カルデラ内には下位から下部溶結凝灰岩(層厚約700m), 水中堆積岩(層厚100-300m), 上部溶結凝灰岩(層厚900-1,100m)が堆積している。これらの層序区分を佐藤ほか(1981)に対比すると、水中堆積岩は大倉沢火山角礫岩部層に、上部溶結凝灰岩は湯ノ又沢凝灰岩部層、五十曲凝灰岩部層、倉沢山凝灰岩部層に相当する。

3) 水中堆積岩はカルデラ縁辺部においては泥質礫岩お



第1図 仙岩地熱地域中心部の模式的地質断面図

1: 新期火山岩 (主として安山岩), 2: 玉川溶結凝灰岩 (流紋岩及びデイサイト), 3: カルデラ内高密度溶結凝灰岩, 4: 新第三系 (主として中新統), 5: 先新第三系, 6: マグマ溜り

よび安山岩溶岩を主体とする崖錐堆積物様の岩相を示すが、カルデラ中央部ではシルト・パッチを多量に含む泥質凝灰岩よりなる。これは本層堆積時にカルデラ周辺部で安山岩火山活動とカルデラ壁の崩壊が生じていたことを意味している。

4) 玉川溶結凝灰岩およびこれと同時に噴出した安山岩溶岩(松川安山岩など)およびそれに降る噴出した新期火山岩類は、いずれも Sr 同位体の初生値が 0.704 前後である。これは玉川溶結凝灰岩がマントル起源のマグマの結晶分化によって生じたこと、およびこれらの火山活動はすべて同源マグマに由来する可能性が高いこと等を示唆している。

以上のような火山活動史に基づいて、当地域の地熱熱源評価を試みた。当初この地域の熱源としては玉川溶結凝灰岩類をもたらした浅所へい入大規模酸性マグマ溜が想定されたが、今回の掘削調査によりこの熱源は現在では冷却してしまったことが明らかとなった。そこで当地域のカルデラ周辺部には存在する地熱地域の熱源をどのように考えるかが課題となった。筆者はその熱源として①新期火山岩類をもたらしたマグマ溜と②深部からの高温火山ガス、を想定した。①のようなマグマ溜は20-30万年もすると冷却してしまうので、松川、葛根田、大沼地熱地域などの地熱熱源としては、②のような熱源がより重要であると思われる。②のような高温ガスは貫入岩体の周辺部の破碎帯を通して上昇していると思われるので、今後は地下深部での貫入岩体の分布や形状を把握することが重要な課題とむらう。最後に当地域の地熱熱源

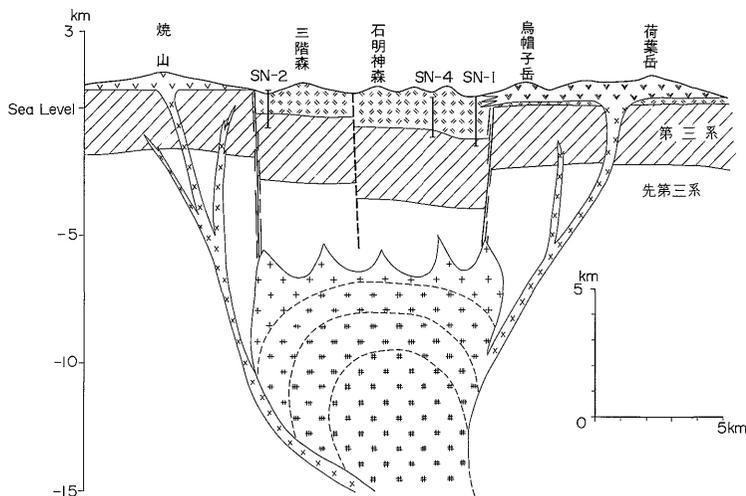
モデルを第1図として示しておく。(地殻熱部)

仙岩地域の地熱変質帯

金原啓司・竹野直人

仙岩広域地熱地域は鮮新—更新世に噴出した玉川溶結凝灰岩類と焼山、八幡平、岩手山、秋田駒ヶ岳などの新期火山岩類により広くおおわれている。この地域には地熱活動に関連して生成した広大な酸性変質帯(パイロフィライト帯、明ばん石帯、カオリナイト帯)およびアルカリ性変質帯(緑泥石帯)が発達していることから、変質帯調査は本地域での非常に重要な地熱探査手段となっている。

仙岩地域には熱水のアルカリ比温度($T_{Na-K-Ca}$)および坑井温度から、北部の八幡平・焼山地域と南部の松川・葛根田・乳頭地域に貯留層温度150°C以上の高温熱水系が分布していると推定される。変質帯分布からみると、このような高温熱水系は酸性変質帯の発達する新期火山岩類分布地帯に位置するのに対して、アルカリ性変質帯の発達する玉川溶結凝灰岩類分布地帯は90-150°Cの中温熱水系分布地域となっている。このことは新期火山岩類をもたらした火山活動が本地域の高温熱水系の究極的熱源と密接な関係のあることを示していると言える。また葛根田(熱水卓越型地熱系)はアルカリ性変質帯(緑泥石帯)が卓越しているのに対して、松川(蒸気卓越型地熱系)は地表では酸性変質帯カオリナイト・明ばん石・パ



第1図 仙岩地域の地熱熱源モデル

イロフィライト帯により、また地下では緑泥石帯を切るパイロフィライト、セリサイト、スドー石などのアルミニウム質粘土鉱物の卓越する変質帯によって特徴づけられている。このことは変質帯と地熱系タイプが仙岩地域では密接な関係を持っていることを示しているものと言える。

藤七、松川、葛根田を含む仙岩地域東側の新期火山岩地帯は岩石中の微量元素(Hg, As, F, Cl, B, Na, K)の濃度異常が、西側の玉川溶結凝灰岩類分布地域に比較して著しく高く、かつ変質作用との関係が深い。このうちHgは現在の地熱徴候地周辺で特に濃度が高いことから、良好な温度指示元素になっているものと考えられる。また葛根田などに見られるKの濃集域はセリサイト-セリサイト/モンモリロナイト混合層鉱物分布域に対応しており、混合層鉱物の累帯構造から、熱水の上昇域を示すものと考えられる。さらにFは松川で濃集し、逆に葛根田で減少していることから、熱水系タイプ判別に有効な指示元素であることが推測される。(地殻熱部)

地球化学調査データから見た仙岩地域の 熱水系モデル

茂野 博*・阿部喜久男**・比留川貴*

サンシャイン計画の一環として岩手・秋田県境の仙岩地域において進められている地熱探査技術等検証調査では、地熱流体化学調査、土壤ガス・揮発成分化学調査などが地球化学調査として行われてきた。今回、主に地熱流体化学調査の結果に基づき同地域の熱水系について概念的な生成・分布モデルを作成することを試みた。

仙岩地域においては、中心部の地形的高所となっている第四紀の主に安山岩質の成層火山のごく周囲に、60℃以上の酸性-中性で化学組成の変化に富む地熱流体を湧出・噴出する温泉・噴気地が多数存在している。これに対して、周辺部の地形的低所となっている鮮新世-更新世の玉川溶結凝灰岩類および新第三系の分布地域には、大部分が60℃以下の中性で化学組成の変化に乏しい温泉水を湧出する温泉地が散点的に存在している(仙台地熱地域地質図編集グループ, 1985)。

仙岩地域の温泉水・熱水、pH および卓越する溶存陰イオンにより次の6つの型に分類される。

- 第1型：酸性 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ 型、玉川・大釜温泉水
- 第2型：酸性 SO_4^{2-} 型、後生掛・藤七・松川温泉水等
- 第3型：中性 Cl^- 型、大沼・葛根田熱水、銭川温泉水等

第4型：中性 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ 型、鳩ノ湯・鶴ノ湯温泉水等

第5型：中性 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ 型、湯瀬・打当・繫温泉水等

第6型：中性 HCO_3^- 型、国見・孫六温泉水等

このような6つの型の温泉水・熱水の化学的特徴・湧出分布およびこれに地球化学的溫度計手法・B-Cl天然トレーサー手法等を適用した結果に基づいて、仙台地域を次の4つのタイプの地域に区分し、その地下に存在する可能性の高い熱水系のタイプを予測した。

第Iタイプ：主に第四紀の安山岩質の成層火山が分布する中心部地域にあたり、第1・2・3・4型の温泉水・熱水が湧出するとともに噴気活動が活発である。その地下には火山性の蒸気卓越系-高温熱水卓越系の存在が期待できる。最も新しい安山岩質の成層火山の中心部などでは、地下深部から酸性の原因となる高温の火山ガスが供給されていると考えられる。

第IIタイプ：第Iタイプと第IVタイプの間の主に玉川溶結凝灰岩類および第四紀の火山砕屑物が分布する地域にあたり、第3・4・6型の温泉水が湧出する。その地下には主に火山性の高温熱水系の周辺相となっている中・低温の熱水卓越系の存在が期待できる。

第IIIタイプ：第Iタイプ・第IIタイプの地域のうち、N-S方向に温泉が配列する銭川-大沼-湯ノ又地域および浄法寺-七時雨地域では、B/Clモル比が1に近い非常に高い値を持つ第3・4型の温泉水・熱水が湧出しており、高一中・低温の熱水卓越系が主に中・古生界の海成堆積岩類により構成される基盤岩類中にまで深く発達していると推定される(SHIGENO and ABE, 1983)。

第IVタイプ：主に新第三系が分布する周辺部地域にあたり、第5型の温泉水が湧出する。その地下には化石海水の寄与が予想される主に非火山性の中・低温熱水系が存在していると考えられる。

仙岩地域において現在最も火山-熱水系活動が活発である第Iタイプの地域について、その地下に分布する熱水系の生成機構を豊田地域の場合(茂野・阿部, 1984)と比較する形で予想的に考察した。有史以降噴火活動の記録があり、現在山頂部に高温の噴気活動が存在する最も新しい主に安山岩質の成層火山である岩手山・秋田焼山・秋田駒ヶ岳では、現在の東北日本弧の広域応力場の最大水平圧縮主応力軸方向に一致するほぼE-W方向に山頂部から噴気・温泉地が配列する傾向が認められる。これに対して、地下の熱水系の活動が非常に活発で現在すでに地熱発電開発が行われている松川・葛根田・大沼などの地域は、上記の3火山からやや離れて、山頂部に高

温の噴気活動が存在しない八幡平・三ツ石山・乳頭山などのやや古いと考えられる第四紀の安山岩質の成層火山に取り囲まれるような位置に存在しており、大沼・葛根田地域の深部ではN-S方向の大規模な断裂系が地熱流体の移動・貯留に大きく寄与しているようである。前者の熱水系では地下深部のマグマからの熱流体吹き込み型の加熱機構の寄与が、後者の熱水系では地下深部のマグマ-高温火成岩体からの熱伝導加熱機構の寄与がそれぞれ卓越していると推測される。

文 献

仙岩地熱地域地質図編集グループ(1985) 10万分の1仙岩地熱地域地質図および同説明書. 特殊地質図(21-2), 地質調査所, 23 p.

SHIGENO, H. and ABE, K. (1983) B-Cl geochemistry applied to geothermal fluids in Japan, especially as an indicator for deep-rooted hydrothermal systems. Extended Abstracts of 4th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction, Misasa 1983, p. 437-440.

茂野 博・阿部喜久男(1984) 別府一小浜地溝帯における火山性噴気・温泉地分布の規則性と熱水系モデル. 日本地熱学会昭和59年度学術講演会講演要旨集, p. 24.

(*地殻熱部, **技術部)

仙岩地域の坑井化学調査

野田徹郎*・竹野直人*・阿部喜久男**

坑井化学調査(化学検層)は坑井から得られる地下深部の物質を直接手にとる確実な調査である点が、他の手法にない長所として見逃すことができない。地下の地熱資源の有無、地熱流体のタイプや化学的性状、地下平衡温度などが化学検層の適用の結果知られることが期待される。

今回、化学検層を実施した坑井は、SN-1(深度2,000 m), SN-2,3,4(以上1,500m), H-9,14(以上200m), H-10,15(以上250m), H-16,17(以上400m)の各坑井であり、これらは仙岩地域の西半に位置している。

坑井からは liquid, solid, gas の三態の試料が得られる。liquid は坑井内の滞留水であり、そこにはその地域の熱水や蒸気系の影響がある程度及んでいる。この坑内水を採取し、化学分析値の解析により坑内水を構成する混合水系を判別し、関わりある熱水・蒸気の性質を知

り、その寄与を見積もる。推定される周囲や更に深部の熱水の化学組成から、高温熱水層の深部における分布を知ることができる。solid は、掘削時に得られたコアである。地熱環境下では、岩石は熱水と接しているうちに反応し、お互いに組成を規制している。熱水中の成分濃度と相互比、コア中の成分の濃集と溶脱の程度を調べたり、コア中の濃度と熱水中の濃度との比較を行うことにより、地熱流体の生成条件、熱水の流動方向や広がりについての知見を得ることができる。gas としては裸孔部を通じて坑内に流入してくる各種ガスおよび揮発性の気体水銀がある。測定された各種気体の相互比は化学温度計として使える見解が出されており、また揮発性水銀の多寡は地下の地熱アクティビティを反映している。

自噴井(仙岩ではH-15,16)以外の坑井から坑内水を採取する際、泥水が残存することに注意しなければならない。泥水の影響を排除し坑井本来の地層水を採取するには、結局、それらの異質の水の影響がなくなるまで、徹底して坑内水を汲上げるしかない。このようにして得られた地層水は、いくつかの異なった水系が混合したものだと思えることができる。水分析データに多変量解析と混合方程式を併せて適用することにより、起源水系の数と組成を求めることができる。この解析の結果、調査地域には、4起源水系(1)NaCa-Cl-SO₄型、(2)うすいNaCa-SO₄型、(3)うすいCa・Mg-SO₄・HCO₃型、(4)Na-HCO₃型の存在が推定された。これらの水の起源はそれぞれ(1)この地域の本質的なNaCl型熱水、(2)二次的に加熱された(1)の上層にある熱水、(3)変質帯を通過することにより成分を得た浅層水、(4)地熱貯留層を起源とするCO₂の供給を受けて生成したNa-HCO₃型の水、と考えられる。興味深いことは、それぞれの起源水が、コア観察により確認された地層の構成や割れ目の発達具合と非常に関連が深いことである。SN-3は阿仁合層に代表される硬質の負岩を含む新第三系が浅部まで観察されるが、ここでは(1)の水の混合比が最も大きい。ただ可採量は、同層が硬質で割れ目に乏しいため、非常に少ない。SN-1,4は玉川溶結凝灰岩が比較的深部まで堆積しており、(2)の水の混合比が最も大きい。SN-4はSN-1に比べると、透水層がよく発達しているため、包蔵水量が大きい。(3)の水は、新期溶岩のおおっている北方のH-14で、(4)の水は、熱水系の中心からはずれたCO₂ガス供給があると考えられるH-16、その比率が高い。

岩芯試料は、変質の強い所を選びながら、ほぼ等間隔になるように140個採取した。化学分析はICP法による全岩分析でSiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe(全鉄), MnO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, Zn, Cu, Sr, Li, Baの15成分につ

いて実施した。これらのうち高質により顕著な変動を示すのは CaO 、 Na_2O 、 K_2O である。変化は、浅深にかかわらず、所々部分的に認められ、透水性の悪い玉川溶結凝灰岩の特徴をよく示す。変化傾向は Na 減少、 K 増加、 Ca 減少を示す。このような所では、原岩の長石がセリサイトまたはセリサイト/モンモリロナイト混合層鉱物により交代されている。これは、高温貯留層に由来する K に富む熱水に対して岩石が緩衝作用を示したものと説明することができる。

坑井ガスは、坑内水を通ずる際の吸収効果等があるため、確実性においてやや欠けるが一応次のような結果が得られた。まず、ガス組成に関しては各井とも CO_2 と H_2 の濃度が高く、地熱活動に伴った地底からの成分供給が推定される。気体水銀に関しては、通常大気の数倍のオーダーの濃度を示した。

このように仙岩地域において、最新の機器による高精度の分析や総合的な地化学探査技術を駆使することにより、坑井を利用して地熱関連情報を得るといふ所期の目的が達成された。今後更に、現場でのサンプリングから分析、データ処理全般を通じて改良、研鑽の要があり、将来にわたり数多くの現場適用が望まれる。

(*地殻熱部, **技術部)

仙岩地域の地震波速度・比抵抗構造解析

菊地恒夫*・村田泰章**

小川康雄**・内田利弘**

仙岩地域では、地熱探査技術等検証調査の一環として新エネルギー総合開発機構により、昭和56年度より屈折法地震探査、シュランベルジャー法電気探査、MT法調査および坑井調査など種々の調査が行われている。地質調査所では、これらの調査のうち屈折法、電気探査およびMT法の再解析を行っているが、今回は主に屈折法および電気探査の再解析の結果について報告する。

屈折法の測線は、東から藤七温泉付近より番岳、五十曲を経て、榎森に至るほぼ東西方向で、測線長は約18 km である。発破地点は7地点で、発破孔は各発破地点2坑である。なお両端の発破坑は、遠隔発破に用いている。受震点は、191点であり、調査は、昭和56年度に実施されている。

電気探査は、同じく昭和56年度に実施され、測線は屈折法の測線と一致している。測点は、17点で測点間隔は1 km である。電流電極の間隔 ($AB/2$) は、10 m (最小)-6,000 m (最大) である。

屈折法の解析は、地熱データベースの会話形式屈折法地震データ解析システムと一部他の方法を併用した。電気探査の解析は、IVES (Interpretation of Vertical Electrical Sounding) を用いた。

屈折法の解析より得られた構造は、4層で上層から、2.3 km/sec、4.3 km/sec、4.8 km/sec および 5.9 km/sec であった。5.9 km 層は、測線西側ではほぼ平坦で、海拔-600m程度であるが、測線中央やや東側で、幅4-5 km、落差0.5-1 kmの陥没構造が推定される。さらに測線東側では、再び平坦となりその深度は、海拔-800m程度である。ここで得られた速度構造を、測線西側の五十曲付近に掘削されたSN-3号井の検層結果およびコアの物性値試験結果と比較してみた。なお測線中央部には、SN-2号井が掘削されたが、同坑井では音波検層、密度検層は、実施されておらずコアの物性値試験結果も不明であったので速度構造との比較は行えなかった。SN-3号井の音波検層によると、第3層までの速度構造とはよく一致しているが、5.9 km 層は屈折法の解析結果より、数100m深い可能性があることを示している。しかしながらコアの弾性波速度は、ほぼ屈折法の解析結果と一致している。この点については、今後検討する必要があると思われる。

電気探査の解析結果では、比抵抗基盤と思われる数千 $\Omega \cdot \text{m}$ の高比抵抗層が、測線の東側と西側に推定されるが測線中央部では、比抵抗基盤がみられず、この部分で比抵抗基盤は、落ちこんでいるか何らかの原因により比抵抗が低下しているものと推定される。また測線東側の海拔0 m以浅では、10 $\Omega \cdot \text{m}$ 以下の低比抵抗層が推定される。この解析結果と、SN-2、SN-3号井の電気検層結果は、かなりよく一致している。

ここで得られた屈折法および電気探査の解析結果から、5.9 km 層にみられる陥没部分より地熱流体が上昇し、その上部で、地熱貯留層を形成し、これが電探解析に表われた低比抵抗帯となっているような地熱貯留層モデルを推定することができる。

(*地殻熱部, **物理探査部)

仙岩地域における水圧破壊実験

伊藤久男

新エネルギー総合開発機構 (NEDO) が昭和56年度、57年度に掘削した深度250mの熱流量坑において、水圧破壊法による地殻応力測定を行った。測定は昭和56年度にH1、K2、K3、K6の4坑、昭和57年度にH10、H15

の2坑の合計6坑について行った。

水圧破壊法は、坑井内の一部に水を圧入し、新たにキ裂を発生させ、その時の圧力変化より地殻応力の絶対値を、キ裂の方位から地殻応力の方向を求めるものである。地殻応力測定法としては、他に応力解放法があり、また地震発生機構あるいは小断層解析により間接的に推定することもできるが、水圧破壊法は応力の絶対値及び方位が直接地下深部において測定可能であるという利点をもつ。

測定は各坑とも5-6カ所について行い、割れ目開口圧(reopening pressure)、シャットイン圧力(shut-in pressure)から地殻応力の値を求めた。方位は、超音波テレビュー及び型撮りパッカーにより調べた。

方位はH2坑を除く5坑で決定できたが、このうちH15坑を除き最大主応力の方向はNW-SEであり、広域的な応力場と一致する。応力値については各坑とも垂直応力<最小水平主応力<最大水平主応力の関係があり、深さとともに増加する。

得られた地殻応力値は、クーロンの破壊法則によれば、逆断層型の破壊を発生させる条件にある。一方、本

調査地より東へ約10 kmに位置する滝の上地域に発生する浅い地震(震源の深さは地表より2.5 km以浅)の予察的な発震機構は東西方向に圧縮軸をもつ横ずれ型を示す。水圧破壊法により決定された地殻応力と、浅い地震の発震機構による地殻応力とは調和的でない。その理由としては、地殻応力の状態が深さとともに逆断層型から横ずれ型へと変化する、滝の上地域の応力状態が周辺地域と異なっている等が考えられる。

いくつかの地域で、深さとともに地殻応力が逆断層型から横ずれ型へ変化的なことが、水圧破壊法による、地殻応力測定から明らかにされている。今回の測定は250 mと浅いものであり、上記の問題点を解決するためには、深部における測定が必要である。

近年地熱貯留層は、裂かにより支配されている見方が強くなって来ている。地殻応力はこのような裂かの発生を規制する重要なファクターである。今回の測定結果は、仙岩地域を支配する地殻応力場を決定するには浅すぎ、断定的な結論は得られない。しかし、地震の震源メカニズム等ともあわせ、今後研究を進めて行くべきであろう。(地殻熱部)