

流体包有物による和歌山県本宮地域の熱水活動の検討

熊本大学自然科学研究科*1, 地熱エンジニアリング(株)*2, 関西電力(株)*3

大石 朗*1*, 村松 容一*2*,
吉田 裕*2, 橋詰 良吉*3

1 現(株)ニュージェック, *2* 現東京理科大学

(平成7年4月28日受付, 平成7年6月23日受理)

Hydrothermal Activity in Hongu Area, Wakayama Pref., Based on the Fluid Inclusion Geothermometry

Akira OISHI*1*, Youichi MURAMATSU*2*,
Yutaka YOSHIDA*2, Ryokichi HASHIZUME*3

*1 Kumamoto University, *2 Geothermal Engineering CO., LTD

*3 Kansai Electric Power CO., LTD

1 Present: NEWJEC INC., *2* Present: Science University of Tokyo

Abstract

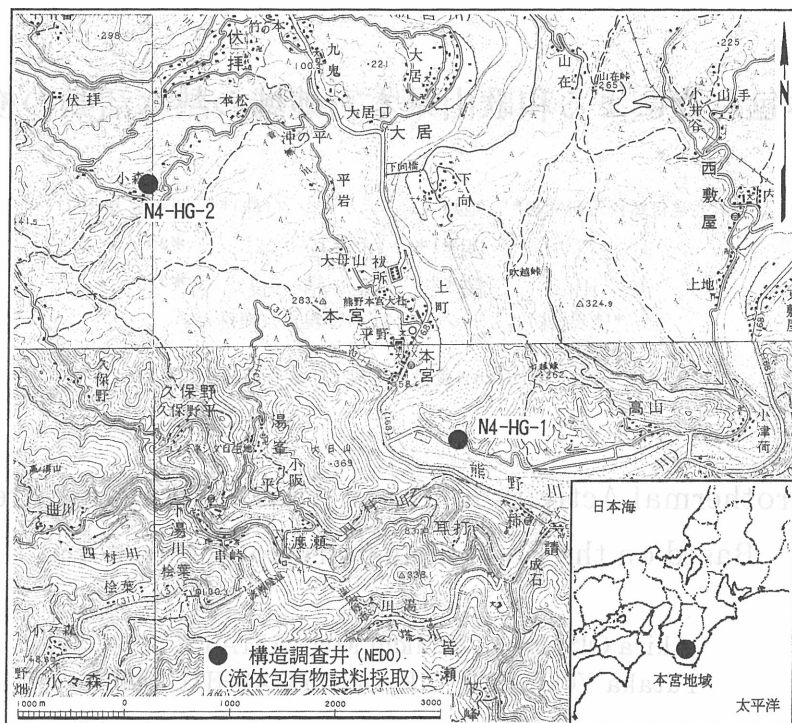
Fluid inclusion study was carried out on quartz and calcite contained in hydrothermal veins and quartz phenocrysts in quartz porphyry dikes from two boreholes (H4-HG-1 and H4-HG-2) drilled in the Hongu area, central part of Wakayama Prefecture.

The hydrothermal activity of this area was not so active in the past time. The period of hydrothermal activity occurred in this area is classified into three stages, from higher than 300°C to low temperature of around 100°C. The first stage is characterized by both of the high temperature ranges from 250 to 350°C and the mineralization of quartz, calcite and pyrrhotite. The second stage is characterized by both of intermediate temperature ranges from 150 to 250°C and the mineralization of pyrite, quartz and calcite. The third stage is characterized by low temperature ranges from 80 to 150°C.

Hydrothermal activity intermittently continues up to the present day within the area where high to intermediate temperature hydrothermal activities had occurred. Present hydrothermal activities are observed at Yunomine, Kawayu, and Watarase Hot Springs. These activities are, however, not related to the distribution of the quartz porphyry dikes.

1. ま え が き

和歌山県本宮地域は、紀伊半島南部の和歌山・奈良・三重3県の県境付近に位置し、湯峰温泉などの非火山地域での高温湧泉の分布域であり¹⁾、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)により、平成3～4年にかけて地熱開発促進調査が実施されている^{2～4)}。この調査の一環として、10坑の熱流量調査井と、紀伊半島地域では最も深い調査深度をもつ1,000m深度の構造調査井(N4-



本図は国土地理院発行の1/5万地形図「龍神」「十津川」「栗栖川」「新宮」を使用したものである。

図1 調査位置図

1HG-1およびN4-HG-2) 2坑が掘削されている⁴⁾(図1)。

その他、本地域を対象とする地熱資源調査^{5,6)}や地質調査^{7,8)}があり、南側に隣接する那智地域では金属資源調査⁹⁾も実施されている。これらの調査により、周辺地域の地質構成、分布、地質構造および温泉の利用状況については、ほぼ明らかにされている。しかしながら、周辺の地熱構造の形成史、特に、現在の高温湧泉を含めた熱水の活動史についての系統だてた検討は、ほとんどない。

岩石あるいは脈の中の鉱物に含まれる流体包有物は、形成された時期の温度条件などを反映しており¹⁰⁾、促進調査により採取されたボーリングコアの石英脈や方解石脈の脈鉱物中にも多数存在し、「本宮地域」の地熱構造の形成史を記録していることが期待される。本論文では、NEDOより提供を受けた調査井のコアに含まれる透明鉱物について、流体包有物による均質化温度を測定することにより、本地域での熱水活動史を検討する。

2. 本地域の地質

本宮地域は、西南日本外帯の四万十帯に位置し、北側を御坊-萩構造線、南側を本宮断層に区切られた新生代古第三紀始新世無川層群の砂岩・泥岩・砂岩泥岩互層の分布域に位置している⁸⁾。また、本地域の西側には、四万十層群を不整合に覆って新第三紀中新世熊野層群(礫岩・砂岩・泥岩・砂岩泥岩互層)が分布しており、さらに熊野酸性火成岩類に関連する岩脈類が貫入している(図2)。

本地域には、泉温51~92℃の自然湧出泉である湯峰温泉をはじめ、渡瀬温泉(47~70℃、揚湯)、

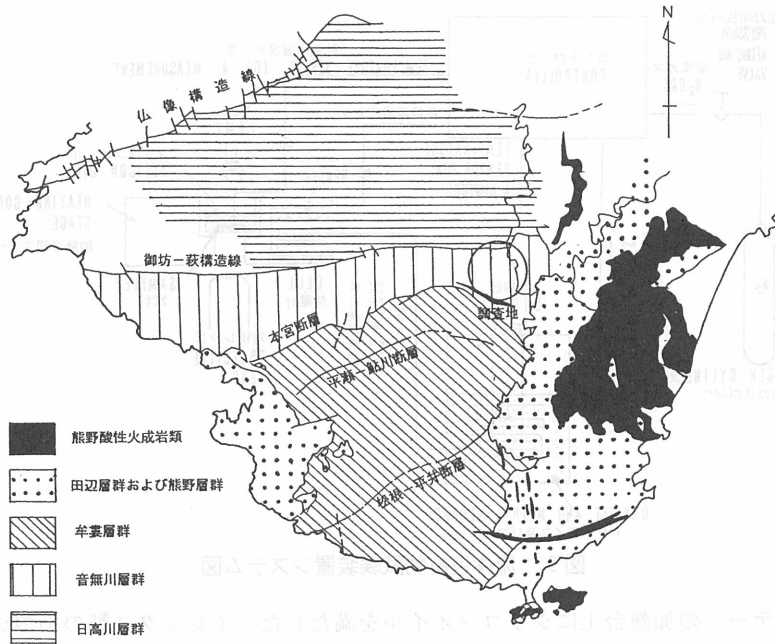


図2 周辺地質図(徳岡ほか(1981)に修正加筆)

川湯温泉(26~74℃, 揚湯および自然湧出)などの比較的高温の中性~弱アルカリ性HCO₃型の温泉湧出がある。これらの温泉はいずれも岩脈(石英斑岩)に近接して湧出している。しかしながら、この岩脈のK-Ar年代測定値は、おおよそ13Ma⁴⁾で、また、熊野酸性岩類も14Ma前後に形成されたもの¹¹⁾とされており、すでに冷却していると判断され、酸性火成岩類が現在の温泉活動の熱源を形成しているとは考えにくい。つまり、四万十層群の変形に伴って形成された断裂の発達部から地下水が浸入し、広域熱源からの熱伝導により加熱され、他方の断裂の発達部から熱水が上昇する機構によって、これらの温泉が湧出しているものと推察され、プレートの沈み込みなどに伴う広域的な熱源と、四万十層群による大局的なキャップロックの存在、過去に形成された断裂に沿って貫入した岩脈類による断裂の閉塞を防ぐ役割、による地熱構造と考えられる。

3. 測定方法

図3に流体包有物試験装置のシステム図を示す。

装置は、地熱エンジニアリング株式会社所有の装置で、ステージ、コントローラー、クーラーから構成されている。ステージは加熱・冷却両用であり、オリンパス(株)製倒立型培養顕微鏡(Model IMT)に装着している。通常、接眼レンズに10倍と20倍、また対物レンズには10倍と20倍に加えてオリンパス(株)製超長作動距離レンズ(LW40×)が用いられている。流体包有物の存在確認は接眼レンズ10倍、対物レンズ10倍で実施、均質化温度の測定は接眼レンズ10倍ないし20倍、対物レンズ20倍で実施している。本装置は熱電対にアルメル・クロメルを用いている、また、熱媒体にシリコンオイルを用いて、試料片周辺の温度勾配を小さくすることにより、測定誤差を±1℃まで精度を高めている。

測定対象とする脈状の方解石・石英、および石英斑岩中の石英斑晶を約1mm程度の大きさに砕き、そのなかから透明で測定に向く碎片をピンセットで選択し、流体包有物試験試料とした。

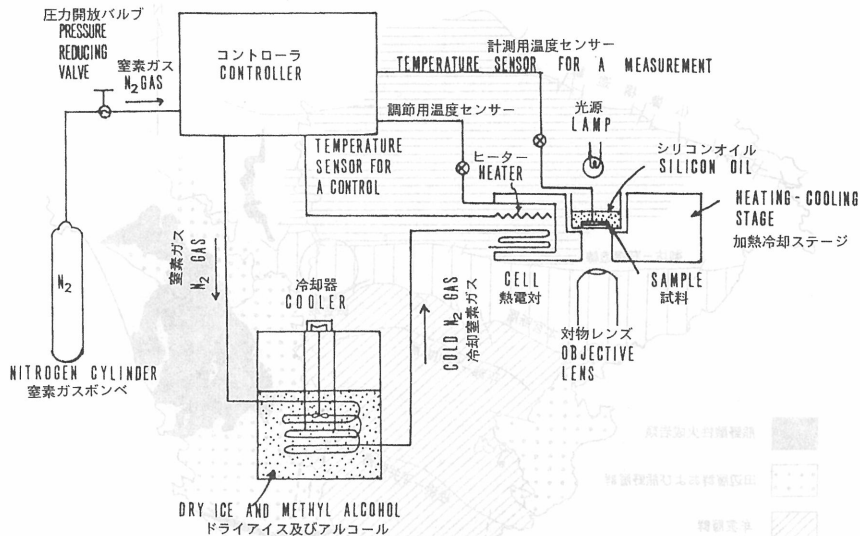


図3 流体包有物試験装置システム図

加熱冷却ステージの加熱台上にシリコンオイルを満たしたパイレックス製の小型シャーレを置き、碎片を浸し、ふたをかぶせ、これを顕微鏡のステージ上に乗せ、流体包有物が存在するかどうかを確認した。測定可能と判断された包有物について鏡下で見ながら加熱し、気泡の均質化温度を測定した。測定は気相の大きさから推定される均質化温度に近づいた時点で温度上昇率を下げて加熱させ、均質化温度を測定した。均質化温度付近における温度上昇率は約 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ である。1 試料について可能な限り多くの流体包有物の均質化温度を測定した。なお、測定温度の補正はインジウム・スズ・ビスマス・鉛の融点を利用して行った。

4. 試料と産状

N4-HG-1およびN4-HG-2の1,000m構造調査井のコア試料から、肉眼観察によって流体包有物試験に向く透明度の良い石英や方解石などの熱水性鉱物15個を採取した。さらに、試料として石英斑岩2個を追加し、合計17個の試料について流体包有物の均質化温度を測定した。試料の概要を以下に記述する。また、図4および図5に、それぞれの坑井での促進調査による地質柱状図を逸泥、温度回復試験結果(S.T.: 120時間)⁴⁾および各採取位置での流体包有物の均質化温度測定分布とともに示す。なお、欄外の数字は均質化温度の最低値と最高値をそれぞれ示している。

柱状図に示すように、N4-HG-1の深度453.0~573.2mにかけての石英斑岩を除き、地質はすべて音無川層群の砂岩および砂岩泥岩互層である。

(1) N4-HG-1ボーリング試料

①93.50m試料

音無川層群羽六累層下部の灰色を呈する堅硬な砂岩泥岩互層中の細粒砂岩部に発達する1~2mm幅の網状方解石細脈から採取した。白濁ないし透明を呈し、一部には劈開の発達が良好である。ほかの鉱物と共生せず単独で存在する。

②202.50m試料

①と同じ地層の堅硬な砂岩泥岩互層中の細粒砂岩を切る傾斜50度の1~2mm幅の方解石細脈

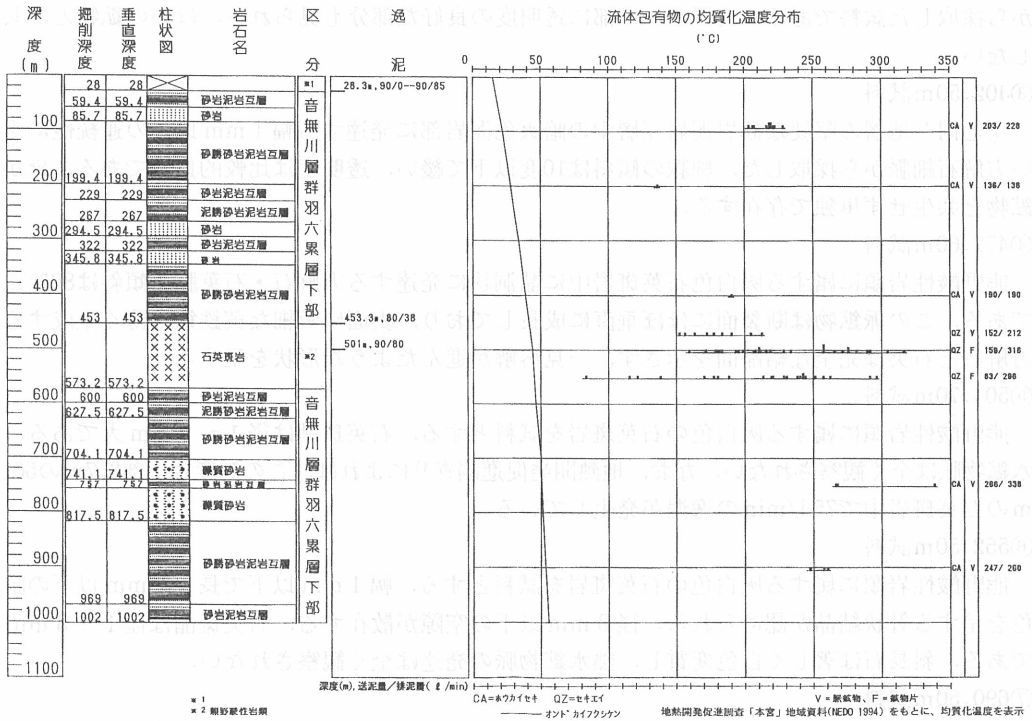


図4 N4-HG-1均質化温度分布図

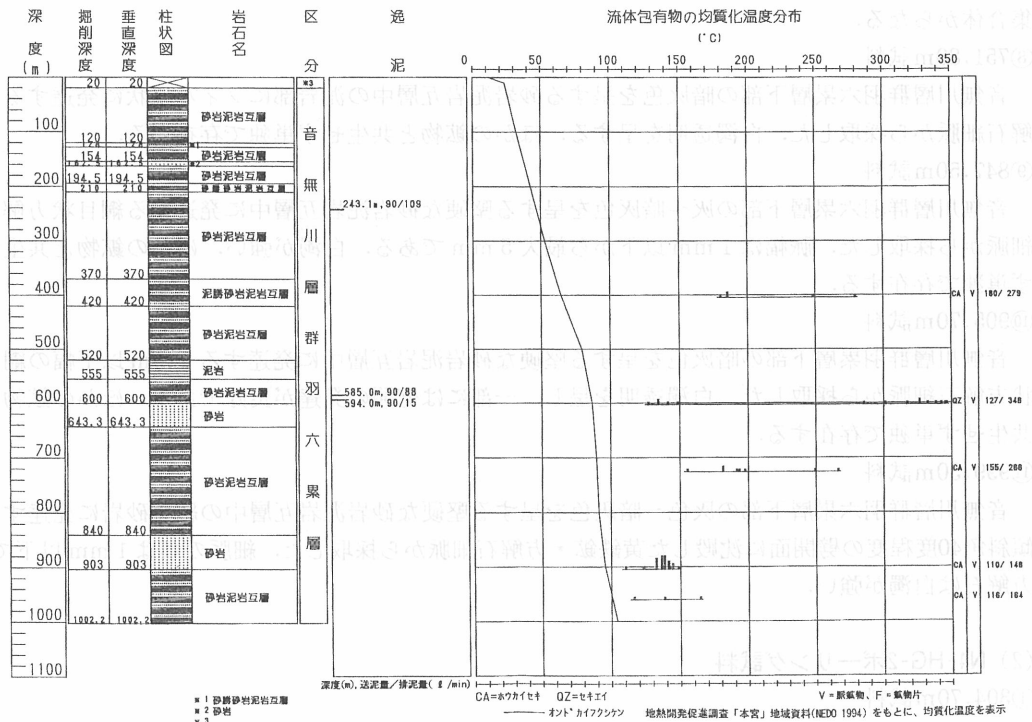


図5 N4-HG-2均質化温度分布図

から採取した試料である。白濁し、一部に透明度の良好な部分も見られる。ほかの鉱物とは共生しない。

③402.50m 試料

①と同じ地層の堅硬な砂岩泥岩互層中の暗灰色泥岩部に発達する幅 1 mm 以下の連続性に乏しい方解石細脈から採取した。細脈の傾斜は10度以下で緩い。透明度は比較的良好である。ほかの鉱物と共生せず単独で存在する。

④472.60m 試料

熊野酸性岩類に属する灰白色石英斑岩中に晶洞状に発達する方解石・石英脈で傾斜は80度以上である。この脈鉱物は断裂面にほぼ垂直に成長しており、表面に微細な黄鉄鉱が薄く生成する。方解石と石英は完全な結晶面を示さず、一見溶解が進んだような形状を呈する。

⑤504.70m 試料

熊野酸性岩類に属する灰白色の石英斑岩を試料とする。石英斑晶は径 1～4 mm 大である。熱水鉱物脈は全く観察されない。なお、地熱開発促進調査⁴⁾によれば、この深度の上部3.7mの501.0 mの石英斑岩中で75 l/minの逸泥が発生している。

⑥552.50m 試料

熊野酸性岩類に属する灰白色の石英斑岩を試料とする。幅 1 mm 以下で長さ 3 mm 以下の暗緑色を呈する針状結晶が認められる。径 3 mm 以下の空隙が散在する。石英斑晶は径 1～3 mm 大である。斜長石は著しく白色変質し、熱水鉱物脈の発達は全く観察されない。

⑦690.50m 試料

音無川層群羽六累層下部の堅硬な砂岩泥岩互層中の暗灰色泥岩部に約70度の高傾斜角をもった断裂にフィルム状に発達する方解石・黄鉄鉱細脈から採取した。方解石、黄鉄鉱とも微小結晶の集合体からなる。

⑧751.80m 試料

音無川層群羽六累層下部の暗灰色を呈する砂岩泥岩互層中の泥岩部にフィルム状に発達する方解石細脈から採取した。白濁透明を呈する。ほかの鉱物と共生せず単独で存在する。

⑨847.50m 試料

音無川層群羽六累層下部の灰～暗灰色を呈する堅硬な砂岩泥岩互層中に発達する網目状方解石細脈から採取した。脈幅は 1 mm 以下から最大 5 mm である。白濁が強い。ほかの鉱物と共生せず単独で存在する。

⑩905.70m 試料

音無川層群羽六累層下部の暗灰色を呈する堅硬な砂岩泥岩互層中に発達する 1 mm 以下幅の網目状方解石細脈から採取した。白濁透明を呈し、一部には劈開の発達が良好である。ほかの鉱物と共生せず単独で存在する。

⑪999.30m 試料

音無川層群羽六累層下部の灰色～暗灰色を呈する堅硬な砂岩泥岩互層中の細粒砂岩に発達する傾斜角40度程度の劈開面に沈殿した黄鉄鉱・方解石細脈から採取した。細脈の幅は 1 mm 以下で、方解石は白濁が強い。

(2) N4-HG-2ボーリング試料

①304.70m 試料

音無川層群羽六累層の灰色～暗灰色を呈する堅硬な砂岩泥岩互層をほぼ垂直に切る幅 2 mm 以下の連続性に乏しい方解石細脈で、一部には空洞が認められる。方解石は透明度が良好で、ほか

の鉱物と共生せず単独で存在する。

②404.80m試料

擾乱の認められる音無川層群羽六累層の暗灰色を呈する堅硬な砂岩泥岩互層中に発達する方解石細脈から採取した。方解石脈は、連続性の乏しい50度程度の傾斜を有する断裂に沿って成長しており、径1mm以下の薄板状の結晶形態を呈する透明度の極めて良好な方解石細脈である。全体に白濁透明を呈し、一部には劈開の発達が良好である。ほかの鉱物と共生せず単独で存在する。

③603.40m試料

音無川層群羽六累層の灰色を呈する堅硬な粗粒砂岩中に発達する幅35mm以上で傾斜50度の磁硫鉄鉱脈中に生成する石英を試料とした。この石英は極めて透明度が良好である。なお、地熱開発促進調査⁴⁾によれば、この深度より6m上部の594.0mには75 l/minの逸泥が発生している。

④726.00m試料

音無川層群羽六累層の灰白色を呈する堅硬な粗粒砂岩中に発達する傾斜40度、幅1mm前後から5mm程度の網目状細脈から採取した方解石で、磁硫鉄鉱・黄鉄鉱のほかには径2mm程度の閃亜鉛鉱を微量伴っている。方解石は白濁しているものの、一部に透明な箇所も認められる。

⑤904.80m試料

音無川層群羽六累層の灰白色を呈する堅硬な砂岩泥岩互層中の泥岩部に発達する幅5mm程度の脈方解石から採取した。方解石には劈開が発達し、透明度は良好である。ほかの鉱物と共生せず単独で存在する。

⑥960.80m試料

音無川層群羽六累層の砂岩部に発達する石英・黄鉄鉱・方解石網目状細脈から採取した。この細脈は、測定に供した試料のなかではもっとも白色変質が著しく、45~50度の傾斜角を有する。方解石には劈開が発達し、透明度は良好である。

5. 均質化温度測定結果

前述の17試料について流体包有物の均質化温度を測定した。測定できた試料片はN4-HG-1で8深度、N4-HG-2で5深度であり、測定結果を表1に示す。なお、地熱開発促進調査による回復温度(S.T.:120時間)⁴⁾をあわせて示した。

以下に、試験に供した17試料片について、包有物の有無、形状、均質化温度の特徴を述べる。

(1) N4-HG-1ボーリング試料

①93.50m試料

脈方解石には長径10~30 μm の長柱状を呈する初生包有物が認められる。11個の包有物で測定した均質化温度は203~228 $^{\circ}\text{C}$ の狭い温度範囲(平均216 $^{\circ}\text{C}$)に集中している。

②202.50m試料

脈方解石は白濁が強いため流体包有物の確認が困難で、観察された1個の液体包有物は長柱状の二次生で、その大きさは長径13 μm である。均質化温度は136 $^{\circ}\text{C}$ を示す。

③402.50m試料

脈方解石は透明であるものの、流体包有物は1個のみが確認された。包有物は長柱状を呈し、その大きさは長径20 μm の初生の液体包有物で、均質化温度は、190 $^{\circ}\text{C}$ を示す。

④472.60m試料

石英斑岩を切る脈石英は方解石と共生し、初生包有物と二次生包有物が観察される。このうち、

表1 流体包有物の均質化温度測定結果一覧表

調査坑	測定深度 (m)	鉱物名	包有物型	測定試料		均質化温度		回復温度 (°C)	包有物の形状
				鉱物粒子数	流体包有物個数	範囲 (°C)	平均値 (°C)		
N4 HG 1 孔	93.50	方解石	初生	1	11	203~228	216	22	長柱状 長径10~30 μ m
	202.50	方解石	二次生	1	1	136	—	28	長柱状 長径13 μ m
	402.50	方解石	初生	1	1	190	—	39	長柱状 長径20 μ m
	472.60	石英	初生	2	7	156~212	184	43	長柱状 長径6~15 μ m
			二次生	1	2	156~163	160	43	不規則形 長径7~40 μ m
	504.70	石英	二次生	4	30	159~316	230	44	長柱状, 負結晶形 長径3~30 μ m
	552.50	石英	二次生	3	22	83~296	209	45	不規則形 長径5~35 μ m
	751.80	方解石	初生	1	3	266~338	290	51	不規則形, 長柱状 長径8~20 μ m
905.70	方解石	初生	2	3	247~260	255	54	長柱状 長径20 μ m	
N4 HG 2 孔	404.80	方解石	初生	1	1	279	—	65	長柱状 長径8 μ m
			二次生	1	4	180~248	200	65	不規則形 長径7~47 μ m
	603.40	石英	初生	2	10	285~346	326	87	不規則形 長径4~35 μ m
			二次生	2	5	127~148	137	87	不規則形 長径4~35 μ m
	726.00	方解石	初生	1	2	249~266	258	90	長柱状 長径7~30 μ m
			二次生	2	6	155~197	183	90	不規則形 長径4~45 μ m
	904.80	方解石	二次生	4	24	110~148	136	96	不規則形 長径17~70 μ m
	960.80	方解石	二次生	1	3	116~164	139	101	不規則形 長径15~35 μ m

7個の初生包有物は長柱状で長径6~15 μ mの大きさを有し、156~212°Cの均質化温度を示す。一方、2個の二次生包有物は不規則形で長径7~40 μ mの大きさを有し、均質化温度は156~163°Cで初生包有物の均質化温度の最低値付近にある。

⑤504.70m試料

石英斑岩を構成する石英斑晶には多数の二次生包有物が観察される。大きさは最大径30 μ mの大きさを有するものがあり、その他の多くは最大径10 μ m以下である。形状は長柱状や負結晶形など多様である。30個の二次生包有物の均質化温度は159~316°Cと150°C以上の広い温度幅を示している。これらの包有物は温度値からみて、472.60m深で採取した脈方解石を沈殿させた流体をトラップしたものと考えられる。

⑥552.50m試料

504.70mの試料と同様に、石英斑岩を構成する石英斑晶に含まれる二次生包有物の均質化温度を測定した。鏡下では多数の不規則な形状の二次生包有物が観察される。大きさは長径5~35 μm 程度である。22個の包有物で測定した均質化温度は83~296 $^{\circ}\text{C}$ と200 $^{\circ}\text{C}$ 以上の広い温度幅を持っており、当岩体付近には岩体が貫入した後、300 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温から100 $^{\circ}\text{C}$ 以下の低温に至る種々の地熱流体が関与したことを示している。

⑦690.50m試料

脈方解石からは、流体包有物を見いだせない。

⑧751.80m試料

脈方解石から、3個の流体包有物を確認した。流体包有物は初生包有物で、大きさは長径8~20 μm 程度である。均質化温度は266~338 $^{\circ}\text{C}$ の範囲を示す。

⑨847.50m試料

脈方解石からは、流体包有物を見いだせない。

⑩905.70m試料

脈方解石から、3個の液体包有物を確認した。流体包有物は初生包有物からなり、最大径20 μm 程度の大きさで長柱状を呈する。均質化温度は247~260 $^{\circ}\text{C}$ と狭い範囲に集中する傾向がみられる。

⑪999.30m試料

脈方解石からは、流体包有物を見いだせない。

(2) N4-HG-2ボーリング試料

①304.70m試料

脈方解石には気相を全く含まない液相のみからなる包有物は多数観察されるものの、気相/液相からなる流体包有物は認められず、均質化温度の測定はできなかった。

②404.80m試料

測定鉱物である脈方解石には1個の初生包有物と4個の二次生包有物があり、初生包有物は長柱状で長径8 μm の大きさを持ち、均質化温度は279 $^{\circ}\text{C}$ である。一方、二次生包有物是不規則形をなし長径7~47 μm であり、均質化温度は180~248 $^{\circ}\text{C}$ を示す。

③603.40m試料

脈石英には初生包有物と二次生包有物が存在し、その大きさはいずれも35 μm 以下である。10個の初生包有物是不規則形で、均質化温度は285~346 $^{\circ}\text{C}$ (平均326 $^{\circ}\text{C}$)の範囲を示す。二次生包有物5個の形状は初生包有物と類似し、均質化温度は初生包有物に比べてかなり低く、127~148 $^{\circ}\text{C}$ (平均137 $^{\circ}\text{C}$)である。前者は石英の生成温度を、また後者は石英が生成した後に流動した流体の温度を示している。

④726.00m試料

脈方解石には初生包有物と二次生包有物が存在する。そのうち、初生包有物は長径30 μm 以下の大きさで長柱状を呈し、均質化温度として249~266 $^{\circ}\text{C}$ が得られた。二次生包有物是不規則形で長径最大45 μm の大きさを取り、均質化温度は155~197 $^{\circ}\text{C}$ である。

⑤904.80m試料

透明な脈方解石には24個の液体包有物が観察される。不規則な形状を呈する二次生包有物からなり、その大きさは長径70 μm 以下である。測定した24個の均質化温度は110~148 $^{\circ}\text{C}$ に集中し、136 $^{\circ}\text{C}$ の平均値を示す。

⑥960.80m試料

脈方解石中に、3個の流体包有物を確認した。いずれの流体包有物も不規則形を呈する二次生包有物であり、長径15~35 μm 程度の大きさである。均質化温度は116~164 $^{\circ}\text{C}$ とばらつく傾向にある。

6. 熱水活動史

均質化温度測定鉱物と鉱石鉱物の共生関係および検層温度⁴⁾を加味すると、本地域の熱水活動は、図6に示すように、高温熱水活動期・中温熱水活動期・低温熱水活動期および流体包有物は生成させていないものの、現在の温泉活動に対応する現熱水活動期の4ステージに区分することができる。

なお、継続した熱水活動をトラップしている石英斑岩の石英斑晶に生成された二次生包有物の均質化温度は、83 $^{\circ}\text{C}$ から316 $^{\circ}\text{C}$ まで連続して分布しており、熱水の活動が徐々に温度を低下させながらも、ほぼ連続して継続していたことを示している。したがって、後述するように、磁硫鉄鉱物、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱と共生している石英、方解石中の包有物や、初生包有物による均質化温度を考慮して、熱水温度を推定している。

(1) 高温熱水活動期

熱水温度：250~350 $^{\circ}\text{C}$

生成鉱物：磁硫鉄鉱、(黄鉄鉱)、閃亜鉛鉱、石英、方解石

高温熱水活動期の高温熱水は鉱化熱水であり、石英や方解石のほか磁硫鉄鉱、黄鉄鉱、閃亜鉛

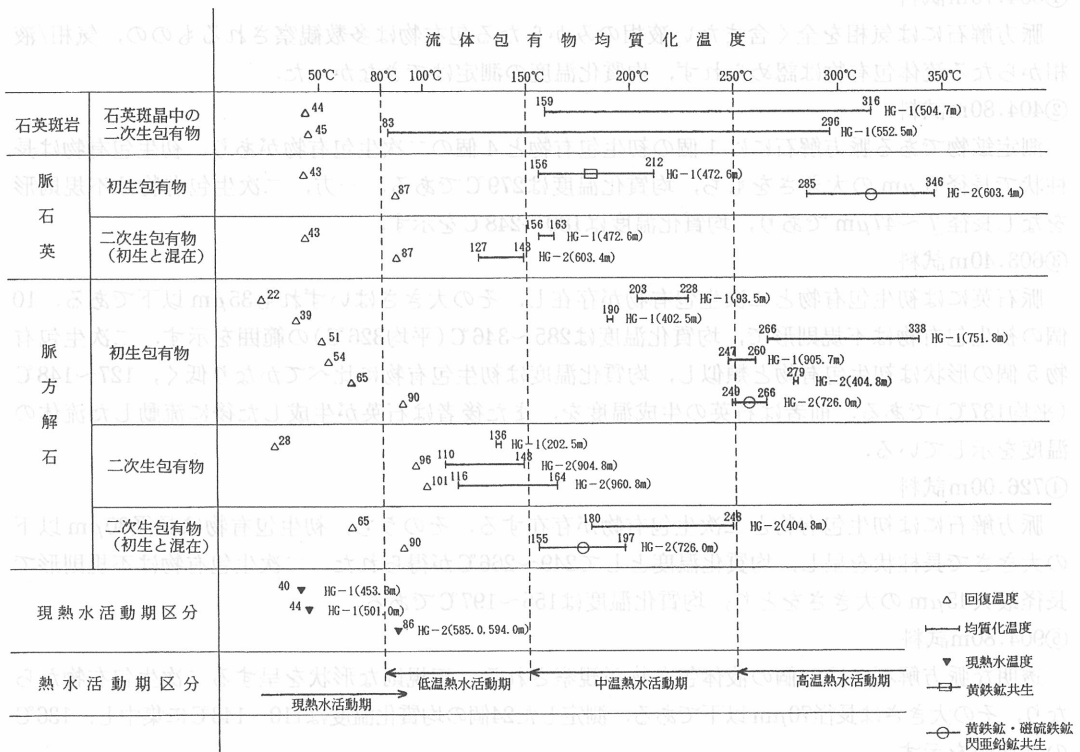


図6 流体包有物均質化温度解析図

鉱などを生成した。これらの熱水性鉱物の生成温度を推定するためには、均質化温度に圧力補正をする必要があるものの、およそその生成温度は初生包有物の均質化温度から把握できる。

脈石英に含まれる初生包有物の均質化温度はN4-HG-1の472.60mとN4-HG-2の603.40mで測定した。それらの結果から、脈石英は本活動期から後述の中温熱水活動期にわたる156~346℃の熱水から生成したと推定される。

脈方解石ではN4-HG-1の4深度(93.50m, 402.50m, 751.80m, 905.70m)およびN4-HG-1の2深度(404.80m, 726.00m)で初生包有物の均質化温度を測定しており、方解石を生成させた熱水温度は190~338℃の範囲にあり、脈石英と同様に高温から中温の熱水活動期に行われたと推定される。そして、生成温度は深部と比較して浅部の2深度で、より低温であったことがN4-HG-1の測定結果からうかがえる。

このステージは磁硫鉄鉱や閃亜鉛鉱などの鉱化期に相当する。もっとも活発な磁硫鉄鉱の鉱化作用は、N4-HG-2の603.40mのコアで観察されているほか、同坑井の726.00mにも少量ながら鉱化作用が認められる。この鉱石鉱物と共生する石英ないし方解石の初生包有物の均質化温度から、磁硫鉄鉱は249~346℃の高温熱水から生成したと推定される。閃亜鉛鉱はごく微量ではあるものの、N4-HG-2の726.00mで確認され、本ステージの末期に249~266℃の熱水から生成したと推定される。

高温熱水活動期の熱水の温度は、磁硫鉄鉱や閃亜鉛鉱が生成した時期の初生包有物の均質化温度である249~346℃前後と考えられる。

本地域の西方には、黄銅鉱と黄鉄鉱を主とする鉱脈鉱床型の紀州鉱山がある。この鉱床の鉱化作用は、Au-Ag期の水長石のK-Ar年代が 14.5 ± 0.7 Maを示すことから、ほぼ熊野酸性岩類および大峯酸性岩類の火成活動の時期と一致すると考えられている¹²⁾。本宮地域の磁硫鉄鉱や閃亜鉛鉱などの鉱化も紀州鉱床と同時期である可能性が高い。

(2) 中温熱水活動期

熱水温度：150~250℃

生成鉱物：黄鉄鉱，石英，方解石

このステージでは、黄鉄鉱，石英，方解石などの熱水性鉱物が生成した。これらの鉱物のうち、黄鉄鉱については、N4-HG-1の472.60mとN4-HG-2の726.00mで共生する石英と方解石の初生包有物の均質化温度として155~266℃の範囲が得られることから、高温熱水活動期の末期から中温熱水活動期に生成したと推定される。

中温熱水活動期の熱水温度は、閃亜鉛鉱の生成終了後、さらに黄鉄鉱の生成が終了する時期の均質化温度で示される、249~155℃前後の温度範囲と考えられる。

(3) 低温熱水活動期

熱水温度：80~150℃

熱水性鉱物の生成は中温熱水活動期で終了し、低温熱水活動期には既存鉱物の微小クラックに沿って熱水が浸透することによる二次生包有物流体が生成された。本ステージの熱水活動は、N4-HG-1の552.50m(83~296℃)およびN4-HG-2の603.40m(127~148℃)と900m以深(110~148℃, 116~164℃)に認められる。初生包有物と混在していない二次生包有物の均質化温度から判断して、低温熱水活動期の熱水温度は、83~164℃の温度範囲と考えられる。

このステージのこれらの深度の二次生包有物の最低均質化温度と回復温度の比較から、本ステージの熱水活動は現在よりも14~38℃高い時点で終息している。

(4) 現熱水活動期

熱水温度：90℃以下

現在の熱水活動期にあたり、地表では湯峰、川湯、渡瀬地域で見ることができる。流体包有物はこのステージの熱水をトラップしていない。地熱開発促進調査⁴⁾での逸泥と検層温度から、N4-HG-1の453.3mと501m付近では40~44℃、N4-HG-2の585mと594m付近では86℃程度の熱水が流動している。

7. 熱水活動の規模および現在と過去の熱水活動域の関係

N4-HG-1, 2のコアには熱水性鉱物脈は少なく、あっても幅1~2mm程度の細脈であり、本地域における過去の熱水活動はあまり活発でなかったと判断される。このことは流体包有物試験での試料においても、流体包有物が多数観察されるものが少なく、ほとんどが多数の碎片のなかから数個が確認される程度であることから示される。

過去から現在にかけて熱水活動が活発な地熱地域においては、かつての高温から現在の中温までの熱水をトラップするため、均質化温度の測定を実施した各深度で均質化温度幅はかなり広くなるのが一般的である。本宮地域では、このような幅広い均質化温度分布を示す深度はN4-HG-1の深度550m付近やN4-HG-2の深度600m付近に見られるに過ぎない。

本地域における現在の熱水活動は温泉の分布する湯峰、川湯、渡瀬地域に限られている。川湯、渡瀬地域では地表に石英斑岩岩脈が分布し、岩脈および周辺に断裂が発達して温泉の通路となっていると推定される。湯峰温泉でも地下に石英斑岩が潜在する同様の温泉湧出機構が予想されることから、本地域における現在の熱水活動は石英斑岩の分布に支配されているとみることができ、N4-HG-1においても、石英斑岩の内部および上面付近で掘削中に、熱水の流動を示す逸泥が発生している³⁾。石英斑岩中の3深度での均質化温度測定結果(83~316℃)に基づけば、現在熱水活動が行われている石英斑岩分布域付近は過去の高温~中温熱水活動期を経て現熱水活動期に至っていると推定される。

また、N4-HG-2の585~594mでは掘削中に逸泥が発生しており、現在熱水が流動している³⁾。これより9m下部で測定した均質化温度分布によれば、127~346℃の幅広い温度分布を示しており、この付近の熱水活動は石英斑岩の貫入以後、現在にいたるまで断続的ではあるものの活発であると推定される。なお、この付近の地質は四万十帯音無川層群の砂岩泥岩互層からなり石英斑岩ではない。つまり、過去から現在にかけての熱水流動は必ずしも石英斑岩の分布に規制されているわけではない。

8. 結 論

本宮地域に掘削された地熱開発促進調査構造調査井N4-HG-1およびN4-HG-2から採取した熱水性鉱物脈である石英と方解石、および石英斑岩中の石英斑晶について、コア観察および流体包有物試験を実施した結果、次のような結論が得られた。

- (1) コア観察による熱水鉱物脈の発達状況および流体包有物試験結果によれば、本地域における過去の熱水活動はあまり活発でなかったと判断される。
- (2) 本地域には過去に300℃以上の高温から100℃以下の低温に至る熱水活動が行われた。均質化温度と熱水性鉱物種から、熱水活動期は高温熱水活動期・中温熱水活動期・低温熱水活動期の3ステージに分類される。これらのうち、高温熱水活動期の熱水は鉱化熱水であって250~350℃の

熱水温度と石英・方解石および磁硫鉄鉱，閃亜鉛鉱の鉱化で特徴づけられる。また，中温熱水活動期は150～250℃の熱水温度と黄鉄鉱・石英・方解石の生成，低温熱水活動期は80～150℃の熱水温度でそれぞれ特徴づけられる。

(3) 本地域の熱水活動は中温～低温熱水活動期を最後に終息に向かった。その後，高温～中温（～低温）熱水活動が行われたエリアでは，今日に至るまで断続的ではあるものの，熱水活動は継続している（現熱水活動期）。現在の活発な熱水活動は湯峰，川湯，渡瀬で見ることができる。なお，この高温～低温の熱水活動は必ずしも石英斑岩の分布に規制されない。

9. 謝 辞

本検討の実施にあたって，新エネルギー・産業技術総合開発機構から，地熱開発促進調査「本宮」地域での構造調査井ボーリングコアの提供を受けた。新エネルギー財団の関係各位には，コアの入手時に便宜をはかっていただいた。また，(株)ニュージェックの緒方正彦常務取締役には御助言を受け，粗稿を読んでいただいた。さらに，地熱エンジニアリング(株)の小松 亮氏には流体包有物の均質化温度の測定を実施していただき，資料の整理，作図等で，(株)ニュージェック仙台支店の小野弘道氏に御協力をいただいた。これらの方々には厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 地質調査所：日本温泉分布図 1975
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成3年度地熱開発促進調査地上調査報告書，No.37，本宮地域，1992
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成3年度地熱開発促進調査データ処理報告書，No.37，本宮地域(第1次)，1993
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：地熱開発促進調査本宮地域，平成5年度地熱開発成果報告会資料，p201-226，1994
- 5) 地質調査所：全国地熱基礎調査報告書，No.17，紀伊山地，1975
- 6) 日本地熱資源開発促進センター：地熱開発精密調査報告書，No. 17，紀伊山地，1976
- 7) 鈴木博之他：栗栖川地域の地質，地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)，地質調査所，1979
- 8) 徳岡隆夫他：龍神地域の地質，地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)，地質調査所，1981
- 9) 通商産業省：昭和49年度広域調査報告書，那智地域，資源エネルギー庁，1975
- 10) 村松容一：地熱井評価への流体包有物温度計適用上の留意点，地熱エネルギー，18，90-103，1993
- 11) 川井直人他：西南日本新生代火成岩類若干についての年代測定結果，地質学雑誌，73，68，1966
- 12) 石原産業株式会社：紀州鉱山における探査の展開，日本鉱山地質学会30周年記念「日本の鉱床探査」，第2巻，p113-144，1984