

地熱井変質データベースの構築と事例6地域のモデル化による多様な変質環境の検討

茂野 博¹

Hiroshi Shigeno (2008) Various alteration environments studied through making a rock-alteration database for geothermal wells, and modeling of six case-study areas in Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 59 (1/2), p.71 - 107, 12 figs, 10 tables.

Abstract: Various alteration environments and their controlling factors have been studied, using exploration-well alteration data obtained by NEDO's Geothermal Development Promotion Survey, through (1) electronic database construction for the purpose of wide advanced utilization of rock alteration data, and (2) data processing and conceptual modeling of six case study areas.

(1) The alteration data (the depth-mineral distributions) for each of the 271 wells in the reports of 14 and 21 areas in Kyushu and Honshu, respectively, have been transferred to tables using spreadsheet software (Microsoft Excel) for the database construction. However, it will take years to make the database open to public due to the difficulty of data integration, because, in the Geothermal Development Promotion Survey, the methods and configurations of obtaining and presenting the alteration mineral data have been rather varied area to area (also the data from seventeen areas in Hokkaido and some other areas have not been edited yet). In this article, the differences of the alterations among the areas have been discussed preliminarily based on summaries in tables for wells, and in regional maps for the areas using sixteen mineral species strongly indicative for characteristics of the alteration environments.

(2) For conceptual modeling of the alteration environments, two high-temperature areas, Asosan-Seibu (Kumamoto Pref.) and Hachijojima (Tokyo Pref.) areas, and four low-temperature areas, Hishikari (Kagoshima Pref.), Hongu (Wakayama Pref.), Otaki (Nagano Pref.) and Mogami-Akakura (Yamagata Pref.) areas have been studied. For each area, detailed typical columnar figures, a parallel columnar figure, and columnar presentation on a map of the well data (temperature, geology, and alteration) have been produced using well-logging data processing programs in Digital Geoscience Map, GT-3 (Geological Survey of Japan, 2007). The results of the conceptual modeling show that various alteration zones have been developed underground even at the low-temperature areas, because of various causes including characteristics and distributions of heat sources and hydrothermal systems, inhomogeneous fluid flow structures due to distributions of topography, fracture systems and lithology, and chemical differentiation due to liquid-gas separation, and others. Rock alteration survey could be one of the powerful methods for understanding subsurface environments of non-volcanic areas.

The above study has been conducted as a part of the Study on Assessment Methods for Thermal and Hydrothermal Effects (FY 2003-2005) concerning geologic storage of nuclear wastes (HLW). In surveying potential storage areas, rock alteration survey is important for the purpose of understanding and assessing the past-present-future thermal and hydrothermal environments, and the above results could be effectively utilized as one of the basic information. Also, information on rock alterations is very important for various subjects in geoscience and engineering fields, i.e. resources development, environmental protection, hazard mitigation, underground space utilization, and others. Hence, future construction of electronic database integrating not only hydrothermal alterations, but also thermal, diagenetic, weathering, and other alterations, as one of the fundamental earth-science information, and its easy, wide and advanced applications will be expected.

Keywords: alteration, geothermal, well, database, integrated map presentation, Geothermal Development Promotion Survey

要 旨

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の

地熱開発促進調査で掘削された調査坑井の変質データについて、(1) 幅広く高度な利用に資する電子データベース化を試みるとともに、(2) 事例6地域について各

¹地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment)

種の図表化処理を行い、概念的モデル化を通じて変質環境の多様性とその原因を検討した。

(1) 坑井変質データのデータベース化では、九州14地域、本州21地域の各報告書について、表計算ソフト(Microsoft社のExcel)を用いて坑井(合計271本)毎の深度-変質鉱物分布データを電子表に整理した。しかし、地熱開発促進調査では変質鉱物の分析・表示の方法・仕様が調査地域によって大きく異なっているためデータの総合的な整理が難しく、また北海道17地域などについては未作業のため、データベースの一般公開化には今後かなりの年月を要する。本報告では、環境特性の指示性が高い変質鉱物16種について、坑井毎の存在度を一覧表に整理するとともに、地域毎の存在度を広域地図上に比較表示して、変質の地域間比較検討を予察的に行った。

(2) 事例地域の変質環境の概念モデル化では、高温2地域として「阿蘇山西部」(熊本県)、「八丈島」(東京都)、また比較的低温の4地域として「菱刈」(鹿児島県)、「本宮」(和歌山県)、「王滝」(長野県)、「最上赤倉」(山形県)を対象とした。地域毎に坑井検層(温度・地質・変質)データについて、代表的な坑井の個別柱状表示図、横並び柱状表示図、地図上柱状表示図を、地質調査総合センター(2007)の数値地質図GT-3の坑井検層データ処理用プログラム群を使用して作図した。これらの図に基づく6地域の概念モデル化の結果は、様々な原因(地域的な熱源や熱水系の分布・特性、地形・断裂系・岩質分布に規定された不均一な透水構造、気液分離現象に伴う化学的な分化過程など)によって、低温でも多様な変質帯が分布しており、変質調査が非火山性地域の地下環境の把握についても有力な手段となることを示している。

上記の作業と検討は、放射性廃棄物地層処分に係わる「熱・熱水の影響評価手法に関する研究(2003-2005年度)」の一環として実施したものである。地層処分可能性地域の調査において、変質調査は過去-現在-未来の熱・熱水環境の解明・評価などの目的で重要であり、上記の検討結果は基礎的な情報としての有効利用が期待される。また、変質情報は様々な地圏分野(資源開発、環境保全、災害防止、地下空間利用など)で重要であり、基礎的な地球科学情報の一つとして、熱水変質のみならず、熱変質(変成)、続成変質、風化変質などに関する総合的な電子データベースが今後整備されて、容易に幅広くまた高度に利用可能となることが望まれる。

1. はじめに

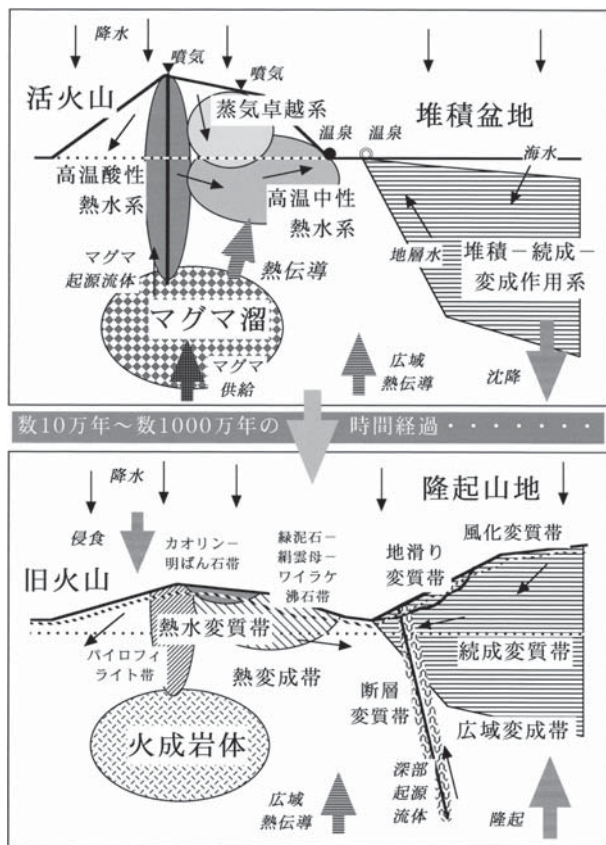
岩石変質(rock alteration)は、変質岩自身が資源(品位的・量的に開発可能な場合、粘土、珪石、沸石な

ど)として多面的に利用されるとともに、各種地下資源(金属・非金属・燃料・地熱などの鉱床)の探査(例えば、比抵抗調査・磁気調査)の有力な指標となるが、一方災害(地滑り、崩壊など)の要因ともなっている。このような変質の特性・分布は過去~現在の地表・地下環境(温度、化学、流体流動など)の時空間変化を反映して多様であり、様々な調査・研究が行われてきた(例えば、歌田, 1995; 吉村 編, 2001)。

しかしながら、変質についてはこれまでの調査・分析データ(位置、規模、鉱物組合せ・量比、生成年代、母岩、付随流体・温度異常など)が体系的には電子化整理・編集されていない。今後、国土の基盤的な情報の一環として、空間情報(平面的に2次元、深度を加えて3次元、更に時間情報を加えて4次元)に関連付けられた変質データが、他の様々な情報と重層的・統合的に処理し易い形で電子データベース化されて公開されることが望まれる。これによって、変質データを様々な目的でより広くより高度により簡単に利用することが可能になると期待される。すなわち、電気探査、電磁気探査、重力調査、磁気調査、弾性波調査などのデータ解析に資するとともに、地下の環境・履歴のモデル化にも大きく寄与するであろう。

この地質調査研究報告の特集号で成果が取りまとめられている原子力発電環境整備機構(以下、NUMOと略記)の委託研究「熱・熱水の影響評価手法の検討(2003~2005年度)」では、その一環として「岩石変質データベース構築に関する検討及びデータベース化」が行われた(茂野, 2004b, 2005a, 2006)。これは、当初「坑井岩石変質のデータベース化と時空間解析」のテーマで提案・実施されたものである。この中で、特に重要な情報源として新エネルギー・産業技術総合開発機構(旧名は新エネルギー総合開発機構; 以下、NEDOと略記)が全国各地で実施してきた地熱開発促進調査の坑井調査岩石変質データについて、(1) 試行的~体系的に電子データベース化を進めるとともに、(2) 事例6地域の坑井変質分布の簡易的・重層的図化を通じて、多様な変質環境の概念モデル化が行われた。

残念ながらいくつかの原因によって、(1) 電子データベース化については2003~2004年度の2年間の作業後に休止状態となっており、本報告では以下の2.~3.にその概要と簡単な整理・検討結果を紹介するに留める。今回は、2003~2005年度に行った(2) 代表的な地域(特に2005年度に中間取りまとめとして検討した相対的に低温環境の事例4地域を中心に)の坑井変質分布の図化・概念モデル化を以下の4.~5.で報告する。なお、(2)のデータ処理については、筆者らが独自に進めてきた「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価(アセスメント)の研究」(茂野・阪口, 2002; 茂野, 2004a; 地質調査総合センター, 2007)の手法を



第1図 岩石変質(特に熱水変質)の多様な成因と分布の概要図。
Fig. 1 Outline of various origins and distributions of rock alterations (especially of hydrothermal alterations).

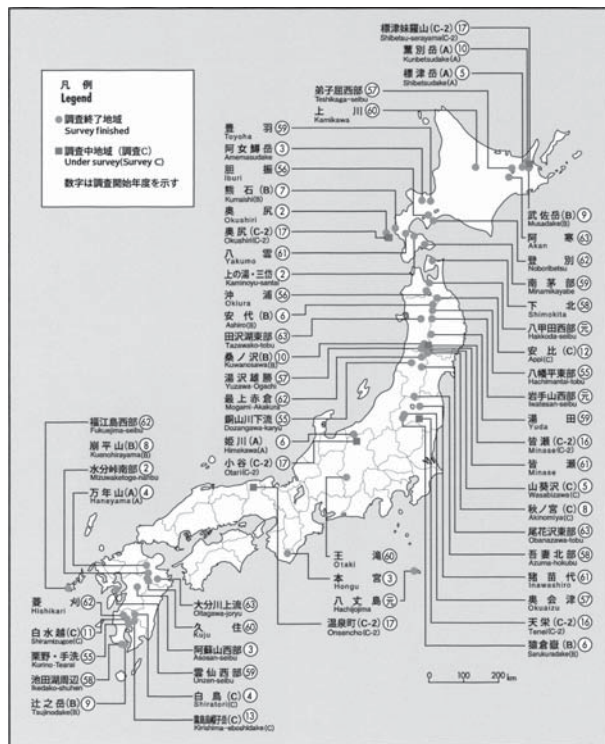
利用した。第1図には、基礎的な参考として多様な岩石変質分布についての概要図を示す。

2. 全国的な地熱井変質データベースの作成計画と現状

2.1 地熱開発促進調査

地熱資源の調査・開発の目的で、日本では1960年代以降政府関係機関・民間企業などによって深度数100 m～4,000 m級の多数の坑井が掘削されており(例えば、火力原子力発電技術協会, 2006), その多くについて岩石変質分析を含む坑井検層・柱状データが得られている。その中で、上記の委託研究(2003～2004年度)で特にデータベース化の対象としたのは、NEDOによって全国各地で実施されてきた地熱開発促進調査の坑井変質データである。第2図には、地熱開発促進調査の地域一覧図(NEDO, 2006)を示す。

地熱開発促進調査は、地熱発電開発の促進の目的で1980年度から国の支援によって行われているもので、現在までに全国で61地域(九州地方15地域、近畿・中部・関東地方6地域、東北地方23地域、北海道地方17地域)で調査が実施されており、概略深度400～2,000



第2図 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による地熱開発促進調査地域の一覧図(NEDO, 2006)。

Fig. 2 Location map of the areas of the Geothermal Development Promotion Survey by NEDO (NEDO, 2006).

mの坑井が約400本掘削されている(NEDO, 2006)。従来、多くの調査地域では概略的に3年度計画で、1) 地表地質・変質帯調査, 流体地球化学調査, 物理探査, 2) 調査坑井掘削・検層, 3) 環境影響調査, 4) 総合解析・資源評価などが行われてきた(なお、時期・地域によって期間・規模・内容などは若干変化している)。

地熱開発促進調査の結果については、地域毎の取りまとめ報告書が作成・公開化されており、インターネット・WWW上のNEDOのホームページ(<http://www.nedo.go.jp/>)からのダウンロードによって、各報告書の全文(PDFファイル・イメージファイル)の閲覧が可能となっている。また、概略2003年度までの地域毎の調査の成果概要が、エネルギー財団発行の「地熱エネルギー」誌(休刊中)に報文として紹介されている。

2.2 データベースの作成法

2003～2004年度の委託研究の変質データベース作成では、基本的に茂野(2004a)が「豊肥地域」を事例に検討を行った「地熱井の温度・地質・変質データの簡易データベース化と地図上統合表示」の手法を基礎とした。この方法は、体系的・拡張性・公開性など

第1表 今回の作業に使用したNEDO地熱開発促進調査の報告書一覧表

Table 1 List of reports of NEDO's Geothermal Development Promotion Survey used in this study.

九州地方 (14地域; 配列順序は第2表と同一で北方から南方へとになっている。)	
NEDO (1996)	地熱開発促進調査報告書, no. A-1 万年山地域, 723p.
NEDO (1994)	地熱開発促進調査報告書, no. 35 水分峠南部地域, 1281p.
NEDO (1999)	地熱開発促進調査報告書, no. B-4 崩平山地域, 491p.
NEDO (1991)	地熱開発促進調査報告書, no. 29 大分川上流地域, 967p.
NEDO (1989)	地熱開発促進調査報告書, no. 18 久住地域, 768p.
NEDO (1995)	地熱開発促進調査報告書, no. 38 阿蘇山西部地域, 1508p.
NEDO (1988)	地熱開発促進調査報告書, no. 15 雲仙西部地域, 1060p.
NEDO (1990)	地熱開発促進調査報告書, no. 24 福江島西部地域, 599p.
NEDO (1991)	地熱開発促進調査報告書, no. 25 菱刈地域, 982p.
NEDO (1997)	地熱開発促進調査報告書, no. C-1 白鳥地域, 379p. #
NEDO (1983)	地熱開発促進調査報告書, no. 3 栗野・手洗地域, 621p.
NEDO (2003)	地熱開発促進調査報告書, no. C-4 白水越地域 資源調査 (第3次), 311p. #
NEDO (1986)	地熱開発促進調査報告書, no. 11 池田湖周辺地域, 685p.
NEDO (2001)	地熱開発促進調査報告書, no. B-6 辻之岳地域, 878p.
本州地方 (21地域; 配列順序は第3表と同一で北方から南方へとになっている。)	
NEDO (1986)	地熱開発促進調査報告書, no. 9 下北地域, 688p.
NEDO (1993)	地熱開発促進調査報告書, no. 30 八甲田西部地域, 934p.
NEDO (1983)	地熱開発促進調査報告書, no. 5 沖浦地域, 586p.
NEDO (1999)	地熱開発促進調査報告書, no. B-2 安代地域, 729p.
NEDO (1983)	地熱開発促進調査報告書, no. 1 八幡平東部地域, 614p.
NEDO (1993)	地熱開発促進調査報告書, no. 31 岩手山西部地域, 1289p.
NEDO (1992)	地熱開発促進調査報告書, no. 27 田沢湖東部地域, 1021p.
NEDO (1988)	地熱開発促進調査報告書, no. 14 湯田地域, 855p.
NEDO (1990)	地熱開発促進調査報告書, no. 20 皆瀬地域, 1281p.
NEDO (1985)	地熱開発促進調査報告書, no. 7 湯沢雄勝地域, 814p.
NEDO (1990)	地熱開発促進調査報告書, no. 23 最上赤倉地域, 808p.
NEDO (1991)	地熱開発促進調査報告書, no. 28 尾花沢東部地域, 733p.
NEDO (1983)	地熱開発促進調査報告書, no. 2 銅山川下流地域, 474p.
NEDO (1987)	地熱開発促進調査報告書, no. 10 吾妻北部地域, 846p.
NEDO (1990)	地熱開発促進調査報告書, no. 21 猪苗代地域, 1012p.
NEDO (1985)	地熱開発促進調査報告書, no. 8 奥会津地域, 811p.
NEDO (1997)	地熱開発促進調査報告書, no. B-1 猿倉嶽地域, 347p.
NEDO (1993)	地熱開発促進調査報告書, no. 32 八丈島地域, 1202p.
NEDO (1999)	地熱開発促進調査報告書, no. A-3 姫川地域, 643p.
NEDO (1988)	地熱開発促進調査報告書, no. 17 玉滝地域, 953p.
NEDO (1994)	地熱開発促進調査報告書, no. 37 本宮地域, 885p.

備考: NEDOは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1988年10月以前は、新エネルギー総合開発機構; 2003年10月以降は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) を略記した。#では、各種の別冊資料集中に、坑井検層・柱状データが含まれる。

が高く、同時に簡易的で取り扱いが比較的容易であり、限られた時間・予算でも作業を可能とするものである。

地熱開発促進調査では、坑井調査で得られた数万個のコア (岩芯)・カッティングス (掘削岩片) 試料について、粉末 X 線回折分析法によって各種変質鉱物 (地域によって10~30鉱物種程度) の存在度が半定量的に検討されている (多くは全岩試料が分析対象であるが、地域によっては水ヒ・薬品処理試料を含む)。これらの分析データは、各地域報告書に坑井毎に岩石変質分析結果の一覧表 (縦軸を深度、横軸を変質鉱物種として、各鉱物の半定量的な存在度を数値・記号で表示 (多くの場合は5段階程度であるが、より詳細な場合もある)) としてまとめられている。

2003~2004年度の委託研究では、まず地域及び坑井の一覧表を、表計算ソフト (Microsoft社のExcel) を用いて電子文字・数値ファイル化した。次に、各地域報告書に坑井毎にまとめられている上記の岩石変質分析結果の一覧表を、表計算ソフト (同上) を用いて電

子文字・数値ファイル化した。この作業では、原報告書の坑井毎の各表を、可能な限りそのままの形で電子化した。

作業は、2003年度に九州地方、2004年度に本州地方 (近畿・中部・関東地方及び東北地方) について行われた。九州地方では、14地域の坑井掘削調査 (98坑井) による坑井岩石変質データ (約5,000試料) の整理及び電子文字・数値化を実施した。本州地方では、21地域の坑井掘削調査 (173坑井) による坑井岩石変質データ (約6,300試料) の整理及び電子文字・数値化を実施した。第1表に、今回の作業に使用した地熱開発促進調査の地域取りまとめ報告書類を一覧表にして示す。なお、作業量の問題などにより、九州地方・本州地方の一部の地域については作業は未実施となっている。主要な作業は、両年度とも西日本技術開発株式会社に外注して実施した。

2.3 現状と問題点・課題

上記2.2の作業による地熱開発促進調査の坑井変質データのデータベース化については様々な問題があり、現状では電子公開が可能な状況には達していない。そのため本説では、2003~2004年度の取りまとめに基づいて簡易的に整理した3種類合計9枚の図表を紹介し、それらに基づいて以下の3.に坑井変質分布について若干の考察を加えるに留めることとする。

ここでは、地熱開発促進調査の坑井変質データのデータベース化とその公開化に向けて、以下に2つの問題点・課題を述べる。

(1) 坑井変質データの整理の方法

地熱開発促進調査の報告書の坑井調査変質データは、調査実施企業、地域特性などによって、試料の採取・前処理・分析方法、データの整理方法 (鉱物名・配列順序、存在度の表示法など)、データの精度・信頼性などがかなり大きく異なっている (茂野 (2004b) を参照)。このような不統一性は、データの整理には大きな問題となり処理作業に大きな労力を要して、統合的なデータベースの構築を非常に難しくしている。

これに対する対処法の第1番目は、地域毎に原報告書に沿った坑井変質データ表群を取りまとめて、一応のデータベースとする方法である。しかし、データの利用者には、この方法では地域横断的な坑井変質データの処理が非常に難しい。

対応法の第2番目は、地域を横断した基準に基づいて、坑井変質データ表群を再整理する方法である。例えば金原 (1982a, 1982b) などは、処理法の規格化・標準化・共通化の参考となり得る。

上述したように現状では、九州地方・本州地方で行われた地熱開発促進調査の大部分の地域について、上記第1番目の形式で坑井変質データ表群が電子表化整理

第2表 NEDO地熱開発促進調査(九州地方, 14地域)の坑井調査変質分析による特徴的出現鉱物(第4表, 16種)の総括表(暫定版, 1/2)(データは該当地域の報告書(第1表)により, 鉱物の存在度は暫定的に5段階区分).

Table 2 List of characteristic alteration minerals (sixteen species in Table 4) reported by well sample analysis in NEDO's Geothermal Development Promotion Survey (Kyushu District, 14 areas) (temporal version, 1/2) (data are after corresponding survey-area reports in Table 1; abundance of minerals is temporally classified into five levels).

仮の 坑井 番号	調査地域名	所在都 道府県	調査 年度	坑井名	坑井 深度 (m)	最高 温度 (°C)	変質 分析 個数	L	W	C	E	S	K	C	D	G	A	K	A	P	D	S	Z	
								a	u	i	l	i	r	e	l	l	p	h	o	u	r	a	l	n
1	万年山	大分	92-94	HN-T-1	400	40	27																	
2				HN-T-2	400	45	26																	
3				HN-T-3	600	57	40																	
4				HN-T-4	600	28	39																	
5				HN-T-5	400	36	28																	
6				HN-T-6	910	64	66	4																
7				N6-HN-1	1,600	140	92	1	1	4														
8				N6-HN-2	1,400	126	91																	
9	水分峠南部	大分	90-92	N2-MW-1	1,000	162	139	4	3	3	1	2	1											
10				N2-MW-2	1,000	199	165																	
11				N2-MW-3	1,300	82	165																	
12				N3-MW-4	1,000	45	94																	
13				N3-MW-5	1,700	167	171	4	1	5	5	2												
14				N3-MW-6	1,500	204	175	4	5	1	5	2												
15				N3-MW-7	1,200	166	126	4	5	5	2	2												
16				N4-MW-8	1,500	168	188	4	2	5	1	5	2											
17				N4-MW-9	2,000	243	231	4	5	1	5	2												
18	崩平山	大分	96-97	N9-KH-1	2,220	78	49	1	1	1	1	1	1											
19	大分川上流	大分	88-89	N63-OI-1	1,000	84	24																	
20				N63-OI-2	860	73	21																	
21				N1-OI-3	1,700	104	84	4																
22				NI-OI-4	1,500	103	74																	
23				OI-T-1	400	19	18																	
24				OI-T-2	400	37	18																	
25				OI-T-3	400	42	18																	
26	久住	大分	85-87	N60-KJ-1	910	67	25																	
27				N60-KJ-2	1,000	76	27																	
28				N61-KJ-3	840	71	21																	
29				N61-KJ-4	1,330	106	43																	
30				N61-KJ-5	1,700	192	49	5																
31				N62-KJ-6	1,000	70	25																	
32				N62-KJ-7	1,700	207	57																	
33				T-1	400	56	22																	
34				T-2	400	49	18																	
35				T-3	400	25	24																	
36	阿蘇山西部	熊本	91-93	N3-AS-1	1,000	77	49																	
37				N3-AS-2	1,200	108	63																	
38				N4-AS-3	1,800	155	51																	
39				N4-AS-4	1,200	86	44																	
40				N4-AS-5	1,200	78	43																	
41				N5-AS-6	1,700	217	36																	
42				N5-AS-7	1,700	203	34																	
43				AS-T-1	400	18	18																	
44				AS-T-2	400	41	18																	
45				AS-T-3	400	16	18																	
46	雲仙西部	長崎	84-86	N59-UZ-1	1,000	248	50																	
47				N59-UZ-2	1,500	97	75																	
48				N68-UZ-3	1,500	230	38																	
49				N60-UZ-4	1,500	142	36	3																
50				N60-UZ-5	1,240	76	30																	
51				N61-UZ-6	1,010	68	24																	
52				N61-UZ-7	1,500	243	39																	
53				T-1	400	27	18																	
54				T-2	400	173	18																	
55				T-3	400	44	18																	

されている。今後、第2番目の規格化・標準化・共通化された基準を作成し、これに基づいて統合的な電子データベースを構築するという作業が必要である。

(2) 北海道地方及びその他一部の地域の坑井変質データの整理

上述したように2003~2004年度の委託研究の作業に

よって、地熱開発促進調査の中で坑井変質データが電子文字・数値化された地域は約60パーセント(35/61)であり、特に北海道地方については作業は未着手である。これらは、全国的な地熱開発促進調査坑井変質データの電子データベース構築の目的では大きな空白域であり、今後労力を要する作業が必要となる。更に、

第2表 つづき (暫定版, 2/2).

Table 2 Continued (temporal version, 2/2).

仮の 坑井 番号	調査地域名	所在都 道府県	調査 年度	坑井名	坑井 深度 (m)	最高 温度 (°C)	変質 分析 個数	L	W	C	E	S	K	C	D	G	A	K	A	P	D	S	Z
								a	a	h	p	e	f	a	o	y	n	a	l	y	i	u	u
56	福江島西部	長崎	87-88	N62-FS-1	1,000	65	25			4	3	4	4							3			
57				N62-FS-2	1,000	42	25			4	4	4	4							2			
58				N63-FS-3	1,500	82	38			4	3	4	4							3			
59				N63-FS-4	1,300	63	34			3	3	4	4										
60				T-1	400	26	18			4	4	3	3										
61				T-2	400	36	18			4	4	4	4							2			
62				T-3	400	45	18			3	3	5	5							3			
63	菱刈	鹿児島	87-89	N62-HK-1	1,000	73	26			3	3	4	4										
64				N62-HK-2	1,000	99	27			5	3	5	5							5			
65				N63-HK-3	1,000	67	30			5	4	5	5							2			
66				N63-HK-4	1,500	114	44			5	4	5	5		4					5			
67				N63-HK-5	1,200	102	37	5		4	4	5	5							4			
68				NI-HK-6	1,500	118	34	2		4	4	4	4										
69				NI-HK-7	1,500	107	33			4	4	5	5										
70				HK-T-1	400	42	26													5			
71				HK-T-2	400	30	20																
72				HK-T-3	400	50	24	5		4	3	4	4							3			
73	白鳥	宮崎	92-95	N4-ST-1	2,000	201	142	2	2	1	1	1	3			3	1	2					
74				N4-ST-2	2,000	203	122	1	1	1	1	1	2		2	2	2	1	2				2
75				N5-ST-3	1,200	195	89	1	1	1	1	1	1		1								
76				N7-ST-6	1,400	216	43			1			1		2	1							
77	栗野・手洗	鹿児島	93-94	N55-KT-1	1,500	191	75	2		1	1		2		1	1							
78				N55-KT-2	1,200	88	60			1			2		1	1	2						
79				N55-KT-3	1,200	87	60								1								
80				N55-KT-4	1,320	185	66	2		1			2		3								
81				N55-KT-5	1,200	282	60		2	1	1		1		2								
82				N55-KT-6	500	208	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83				N56-KT-7	1,000	217	50	2		1	1	2	2										
84				N56-KT-8	1,000	298	51	2	1	1	1	1	1		1	3	1	2					2
85	白水越	鹿児島	99-02	N12-SZ-1	1,500	286	30	1	2	1	2	1	1			2	1						
86				N12-SZ-2	2,080	261	30		1	1	1	1	1			2	1	1					
87				N12-SZ-3	1,800	229	26		1	1	1	1	1										
88				N12-SZ-4	2,000	252	40			1	1	1	1			2	1						
89				N13-SZ-5	1,800	243	36		1	1	1	1	1			1							
90	池田湖周辺	鹿児島	83-84	N58-ID-1	1,500	116	75		3	4	3	3	3		3	2	5	5	5	4	4		
91				N58-ID-2	1,000	44	46			3	3	3	2	3									
92				N58-ID-3	1,500	147	77	3	3	3	3	4	3			2	5	4	4	4			
93				N58-ID-4	1,000	79	50			3	3	3	3										
94				N59-ID-5	1,700	141	88			4	3	4	3	3	3	5	5	5	4	4	3		
95				N59-ID-6	1,500	123	50			3	4	3	3			3	5	4	5	3			
96	辻之岳	鹿児島	97-99	N10-TD-1	1,700	135	41			1	1	1	2	1	1	2	1						
97				N11-TD-2	2,000	217	42			1	1	1	1	1	1	1	2						
98				N11-TD-3	1,800	176	39			1	1	1	1	1	1	1							

最終的な電子データベースの公開化の段階では、全体及び各部分についてのデータの再チェックが必要となり、これに要する作業量も小さくないと予想される。

以上の2点の問題点・課題の克服については大きな労力を要するものであり、現在時間を懸けて今後の計画を検討中である。

3. 地熱開発促進調査(九州・本州)における概略の変質鉱物分布

3.1 暫定的な取りまとめ図表

上述したように、地熱開発促進調査の坑井変質データのデータベース化については、現状では電子公開が可能な状況には達していない。そのため、ここでは地

域・坑井を単位とした簡略化した形で、上記2003～2004年度の取りまとめ(茂野, 2004b, 2005a)に基づいて以下の図表として紹介する。

(1) 第2表(1)～(2)と第3表(1)～(3)の各左側部分には、九州地方(2003年度処理)と本州地方(2004年度処理)に分けて、データベース化した地域と坑井の一覧表を示す。

(2) 第4表には、特に高温熱水系における多様な変質環境(温度・化学)を指示する特徴的な16種類の変質鉱物を取り上げて、そのマトリックス表を示した。これは、以下の(3)・(4)の凡例となるものである。

(3) 上述した第2表(九州地方)と第3表(本州地方)の各右側部分には、上記(2)の特徴的な16鉱物種について、坑井毎の出現の有無・半定量的な存在度の一覧

第3表 NEDO地熱開発促進調査(本州地方, 21地域)の坑井調査変質分析による特徴的出現鉱物(第4表, 16種)の総括表(暫定版, 1/3)(データは該当地域の報告書(第1表)により, 鉱物の存在度は暫定的に5段階区分).

Table 3 List of characteristic alteration minerals (sixteen species in Table 4) reported by well sample analysis in NEDO's Geothermal Development Promotion Survey (Honshu District, 21 areas) (temporal version, 1/3) (data are after corresponding survey-area reports in Table 1; abundance of minerals is temporally classified into five levels).

仮の坑井番号	調査地域名	所在都道府県	調査年度	坑井名	坑井深度(m)	最高温度(°C)	変質分析個数	L	W	C	E	S	K	C	D	G	A	K	A	P	D	S	Z
								a	a	h	p	e	f	a	o	y	n	a	l	y	i	u	u
								u	i	l	i	r	e	l	l	p	h	o	u	r	a	i	n
1	下北	青森	83-84	N58-SK-1	1,500	205	52				3		3	-	4	4			1	4			
2				N58-SK-2	1,494	112	74	4			3		3	-	3	4			3		3		
3				N58-SK-3	1,000	89	52				2		3	-		4			4	4	3		
4				N58-SK-4	1,500	149	82	3			4		4	-	4	4			4	3	1		
5				N59-SK-5	1,200	121	58	2			3		2	-	3								
6				N59-SK-6	1,700	229	42	4	4		3		2	-	5	5			5	4			
7				N59-SK-7	400	121	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	八甲田西部	青森	89-91	N1-HD-1	1,001	106	45				3		3	-	3	5							
9				N1-HD-2	1,003	111	55				3		3	-	2	4							
10				N1-HD-3	1,002	126	55	2			4		3	-	5								
11				N2-HD-4	1,003	122	52				3		3	-	5	5				4			
12				N2-HD-5	1,501	176	79	4			4		3	-	5	4			5	3			
13				N2-HD-6	1,564	236	85	3			5	3	3	-	5	4				4			
14				N3-HD-7	1,501	193	51	2			3		2	-	5	3			4				
15				N3-HD-8	1,503	220	39	2			3	3	2	-	3	3			2	2			
16	沖浦	青森	81-82	N56-OU-1	500	57	34				3		2	-	4	3							
17				N56-OU-2	500	52	26							-	2	4							
18				N56-OU-3	1,200	141	64	3			3	1	3	-	3				1				
19				N56-OU-4	700	149	37	4			2	1	3	-	4								
20				N56-OU-5	1,500	167	82	3			3	2	2	-	4				3				
21				N57-OU-6	1,200	98	63	2	4		2	2	2	-	4				2	1			
22				N57-OU-7	1,000	91	56	2			2	2	2	-	2				3				
23				N57-OU-8	1,500	167	53	3	1		3	1	3	-	4								
24				N57-OU-9	1,000	144	30	3			3	1	2	-	3								
25	安代	岩手	94-95	N7-AR-1	1,781	293	39	3	3	4	3	3	-	3					3	2		4	
26				N7-AR-2	1,738	286	39	3	1	3	3	2	-	3						2			
27	八幡平東部	岩手	80-81	N55-HT-1	800	186	40				3	4		4	-	2			3	4	3	3	
28				N55-HT-2	1,200	213	61	5	4	4	3	4	-	3									
29				N55-HT-3	1,500	218	68				4	3		3	-	2				3			
30				N55-HT-4	1,350	152	67				4	4		5	-	3			4				
31				N55-HT-5	500	93	26				3		2	-	1								
32				N55-HT-6	1,000	135	50	4	4	4		3	-	3	2				2				
33				N56-HT-7	700	121	14	2	2	3		1	-	4									
34				N56-HT-8	400	86	11	2			3		1	-	4								
35				N56-HT-9	1,000	144	23	4			4		1	-	4								
36	岩手山西部	岩手	89-91	N1-IT-1	1,004	135	47				2		1	-	1	4	1		4				
37				N1-IT-2	1,003	223	50				2		1	-	3	5	1		4	2			
38				N1-IT-3	1,005	114	49				1			-	3	2			1				
39				N2-IT-4	1,202	180	58				2		2	-	4	3	1						
40				N2-IT-5	1,202	284	58				3		3	-	4				2	5	3	1	3
41				N2-IT-6	1,203	125	58				4	4		1	-	4	3			3			
42				N3-IT-7	1,505	301	47				4	3		2	-	4	4		5				
43				N3-IT-8	1,705	317	61				1	4		3	-	3	4		5	2			
44	田沢湖東部	秋田	88-90	N63-TZ-1	1,002	91	28	3			4		4	-	2								
45				N63-TZ-2	1,002	95	25				4	1	4	-	4								
46				N63-TZ-3	1,002	63	25				4	1	1	-	2								
47				N1-TZ-4	1,502	289	36	1	1		4		2	-	5	3			3				
48				N1-TZ-5	1,501	144	73				1	3		3	-	4	4		2				
49				N1-TZ-6	1,501	129	74	2	2	5	3	3	-	4	3	3	4		1				
50				N2-TZ-7	1,501	147	26				1	3		3	-	1			3				
51				N2-TZ-8	1,501	141	14	1	1		3		3	-	2								
52	湯田	岩手	84-86	N59-YD-1	1,000	95	50				3		1	-	3				4				
53				N59-YD-2	1,500	159	77	2			1	1	1	-	3				3				
54				N60-YD-3	1,500	134	37	4			4	4	3	-	4				4				
55				N60-YD-4	1,000	81	25	4			4	4	4	-	4								
56				N60-YD-5	1,500	137	39	4			4	4	3	-	4	2			4				
57				N61-YD-6	1,500	121	37	4			3	3	2	-	4				4				
58				T-1	400	44	20				1		1	-									
59				T-2	400	39	20				2	2	1	-	2								
60				T-3	400	50	19				1		1	-	1								

表(暫定版;上記2.3参照)としてまとめた。なお, 変質鉱物の多く(特に, カリウム長石)は, 第四紀の変質ではなく, 原岩に初生鉱物として含まれていた場合や先第四紀の異なった場での変質作用によって生成した場合があると考えられ, その取り扱いには今後の検

討を必要としている。

(4) 更に上記(3)に基づいて, 第3図(1)~(3)には, 九州地方, 近畿・中部・関東地方, 東北地方の3図に分けて, 地域毎の出現変質鉱物の概略的な総合表示図(暫定版;上記2.3参照)としてまとめた。その背景

第3表 つづき (暫定版, 2/3).

Table 3 Continued (temporal version, 2/3).

仮の 坑井 番号	調査地域名	所在都 道府県	調査 年度	坑井名	坑井 深度 (m)	最高 温度 (°C)	変質 分析 個数	L	W	C	E	S	K	C	D	G	A	K	A	P	D	S	Z
								a	a	h	p	e	f	a	o	y	n	a	l	y	u	u	
								u	i	l	i	r	e	l	l	p	h	o	u	r	a	i	n
61	皆瀬	秋田	86-88	N61-MS-1	1,000	77	24	4	3	3	1	1	-	4									
62				N61-MS-2	1,200	160	31	3	1	3	1	-	3										
63				N62-MS-3	1,500	268	39	4	2	1	1	-	3										
64				N62-MS-4	1,000	207	26	2	2	2	1	1	-	2									
65				N62-MS-5	1,500	187	38	4	2	2	2	1	-	4									
66				N63-MS-6	1,500	290	13	2	1	2	2	1	-	2									
67				N63-MS-7	1,500	194	38	2	2	2	3	2	-	4			2	2					
68				N63-MS-8	700	136	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69				T-1	400	37	18	2	3					2									
70				T-2	400	28	18	4	3	3	1	-	4										
71				T-3	400	74	19	1	2	2	1	-	4										
72	湯沢雄勝	秋田	82-83	N57-YO-1	1,000	92	41	2		2	1	-	4										
73				N57-YO-2	1,500	228	62	2		3	1	2	-	2									
74				N57-YO-3	1,200	274	64	3	2	4	1	2	-	4		4	2	2					
75				N57-YO-4	1,000	196	41			4	2	2	-	2				3	2				
76				N57-YO-5	1,030	193	47	2		4	1	2	-	4	3			2					
77				N57-YO-6	350	75	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78				N58-YO-7	1,800	291	44	4	3	3	2	-	4										
79				N58-YO-8	1,500	122	35	3		3	2	-	4					2					
80				N58-YO-9	500	108	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
81	最上赤倉	山形	87-88	N62-MA-1	1,002	61	26			4	2	-											
82				N62-MA-2	1,002	47	23			3	2	-											
83				N63-MA-3	1,501	97	34	4		4	2	3	-				2	1					
84				N63-MA-4	1,304	76	33			4	3	2	-	3			4						
85				T-1	403	31	18			4	4	-	2					1					
86				T-2	402	45	18			4	3	-	1										
87				T-3	403	45	18			5	4	-	1										
88	尾花沢東部	山形	88-89	N63-OB-1	1,003	110	24			3	2	-	4	3	1	1							
89				N1-OB-2	1,703	142	84	1		4	1	3	-	5	5	5	4						
90				N1-OB-3	1,360	97	67	1		5	5	-	5	1	3								
91				OB-T-1	402	36	15			2		-	3										
92				OB-T-2	402	39	19			3	2	-	3										
93				OB-T-3	402	39	19	1	2	3	1	-	3	1									
94				OB-T-4	401	40	19			1	1	-	4										
95				OB-T-5	402	44	19			1	1	-	4	2									
96				OB-T-6	402	38	19			2	1	-	4	2									
97				OB-T-7	402	44	16			1	1	-	4										
98	銅山川下流	山形	80-81	N55-DZ-1	1,500	134	75			4	2	3	-	4	4	4	2						
99				N55-DZ-2	1,200	130	60	2		4	3	-	2	4									
100				N55-DZ-3	1,000	110	50			4	3	-	4	4									
101				N55-DZ-4	1,000	94	50			3	3	-	4	4									
102				N55-DZ-5	1,600	187	80			4	3	-	4	3									
103				N56-DZ-6	1,800	248	44	2		3	1	2	-	4	3	1	4						
104	吾妻北部	山形	83-84	N58-AZ-1	1,502	164	98			3	3	3	-	4									
105				N58-AZ-2	1,303	182	59	2		4	3	-	4										
106				N58-AZ-3	1,004	73	55			3	3	1	3	-	4	4	3						
107				N58-AZ-4	603	67	31			3	1	2	-	2									
108				N59-AZ-5	1,150	160	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
109				N59-AZ-6	1,473	185	50	3	2	3	3	3	-	3									
110				N59-AZ-7	1,289	263	73			2	2	2	2	-	3					2			
111				T-1	400	94	9			3	1	-	3							1			
112				T-2	400	54	8			1	1	-								1			
113				T-3	400	51	9			1	1	-	3							1			
114				T-4	400	49	8			1	1	-	1							1			
115				T-5	400	34	8			1	1	-	1										

には、参考として地質図(地質調査所, 1995)を示した。

3.2 地域的な坑井変質鉱物の分布の特徴とその原因

第2表・第3表の上記16鉱物の出現の総括表では、緑泥石、セリサイト、方解石が最も普遍的に出現する3鉱物(坑井の90%以上)で、濁沸石、ワイラケ沸石、緑れん石、苦灰石、石膏、硬石膏、カオリナイトの7鉱物がこれらに続いている(坑井の40~15%)。明ばん石、パイロフィライト、ダイアスポア、自然硫黄、ズニ石の6鉱物の出現は、非常に少ない(坑井の6~0%)。なお、3.1(3)で問題点を述べたカリ長石は除外した。

この結果は、全体的に九州地方と本州地方でほぼ同様である。しかし、概略的に本州地方の方が九州地方に比較して、緑泥石、セリサイト、方解石とともに濁沸石、緑れん石(アクチノ閃石を含む)、苦灰石の出現率が高く、逆に石膏、硬石膏、カオリナイト、明ばん石、パイロフィライト、ダイアスポア、自然硫黄の出現率が低い傾向が認められる。

これについては、地熱開発促進調査の対象地域(多くは火山性地域)については、第四紀に平均的により速い隆起場一より圧縮的な応力場にある本州地方の方が、九州地方に比較して続成一変成作用が進んだ新第

第3表 つづき (暫定版, 3/3).

Table 3 Continued (temporal version, 3/3).

仮の 坑井 番号	調査地域名	所在都 道府県	調査 年度	坑井名	坑井 深度 (m)	最高 温度 (°C)	変質 分析 個数	L a u i	W a i r	C a r b	E p i r	S i l i c	K a l f	C h l o r	D i a t	G r a n i t	A m o n	A p a t	P h o s	D i s s	S o l u	Z o n	
116	猪苗代	福島	86-88	N61-IN-1	1,000	167	28				3	2	-	4									
117				N61-IN-2	1,000	132	32				2	1	-	4				4	2			2	
118				N62-IN-3	1,500	227	42	2			2	2	-	4				1					
119				N62-IN-4	1,300	179	46				4	4	-	4			2	4					
120				N62-IN-5	1,000	124	37				4	4	-	4		1	2						
121				N63-IN-6	1,500	206	12	2			4	2	-	2									
122				N63-IN-7	1,500	182	14	3			2	3	-	4									
123				T-1	400	45	21				4	2	-	2									
124				T-2	400	61	21				4	3	-	4		1							
125				T-3	400	41	21				2	2	-	2									
126	奥会津	福島	82-83	N57-OA-1	1,005	136	40				4	3	-	4				1					
127				N57-OA-2	1,004	104	48				4	3	-	4	4			1					
128				N57-OA-3	1,500	156	72				4	4	-	4	3			3					
129				N57-OA-4	1,305	267	52				4	4	-	4				4					
130				N57-OA-5	1,007	121	45				4	4	-					1					
131				N58-OA-6	1,500	286	25				3	3	-	3			4						
132				N58-OA-7	1,005	202	25				3	2	-	3	2		4	2					
133				T-1	290	56	7						-	1									
134				T-2	490	55	7					1	-										
135				T-3	380	47	7				2		-	2	4							3	
136				T-4	450	51	7				1	1	-									2	
137				T-5	430	109	7				2	2	-		4							2	
138				T-6	360	60	7	4			1	1	-	4									
139	猿倉嶽	福島	94-95	N6-SR-1	2,000	245	34	3			3	1	-	3		1	3						
140				N6-SR-2	1,800	194	43	3			3	3	-	3			3						
141	八丈島	東京	89-91	N1-HJ-1	1,000	57	49				1		-	4		1							
142				N1-HJ-2	1,300	157	65	1			3		-	4	3			1					
143				N1-HJ-3	1,000	69	50				1		-	1	3								
144				N2-HJ-4	1,500	182	71			1	3	3	-			4	5	4	4	3			
145				N2-HJ-5	511	251	23	4	3				-	3				3	3	4			
146				N2-HJ-6	1,000	81	50				1		-	4			5						
147				N3-HJ-7	1,500	317	74			4	3	3	1	-	4		1	3		2			
148				N3-HJ-8	1,200	305	65	3	3	3		3	-	5		1	5						
149	姫川	新潟・ 長野	94-96	HM-T-1	906	121	30				5	4	-	5	4		3						
150				HM-T-2	805	74	30				4	3	-	4									
151				HM-T-3	603	104	20				3	3	-	5	5			5					
152				N8-HM-1	1,537	171	9				4	1	-	3	1								
153				N8-HM-2	807	102	8				3	3	-	4	3			1					
154	王滝	長野	85-86	N60-OT-1	1,293	64	30	2			2	3	-	4									
155				N60-OT-2	1,203	48	32				3	2	-	4									
156				N61-OT-3	1,203	55	32				4	3	-	3	1								
157				N61-OT-4	1,003	51	26				3	3	-	2									
158				N61-OT-5	502	21	13				3	2	-	2	2								
159				T-1	402	24	21	2			2	2	-	2									
160				T-2	400	20	19				2	2	-	2	1								
161				T-3	401	21	19				2	2	-	2									
162	本宮	和歌山	91-92	N4-HG-1	1,002	57	51				3	4	-	4			1	3					
163				N4-HG-2	1,002	105	54	4			3	3	-	5				3					
164				HG-T-1	401	24	25				3	3	-	4									
165				HG-T-2	401	45	21				3	3	-	4									
166				HG-T-3	402	65	20				3	3	-	4									
167				HG-T-4	201	26	10				3	3	-	3									
168				HG-T-5	201	22	10				3	3	-	4									
169				HG-T-6	202	23	11				3	3	-	3									
170				HG-T-7	202	25	10				3	3	-	3									
171				HG-T-8	202	20	11				4	3	-	3									
172				HG-T-9	203	20	10				3	3	-	5									
173				HG-T-10	201	17	10				4	3	-	3									

三系の下部～先新第三系が平均的に地下浅部から分布しており、また地下浅部へのマグマ起源流体～火山ガスの上昇が局所的(火山火口周辺など)でその寄与が限定されることに起因している可能性が指摘される。しかし、この問題については、調査地域の選択、変質鉱物の分析精度などの基準が系統的に異なっている可能性も考えられ、今後の検討課題としたい。

調査地域別には、概括的に以下のような傾向が指摘される(坑井数の少ない地域は除外)。第3図(1)の九州地方について、1)一部の地域(「大分川上流」,「久

住」,「福江島西部」など)では、高温変質鉱物としては緑泥石、セリサイト、方解石などに種類が限られている。これに対して、2)他の一部の地域(「池田湖西部」,「白鳥」,「水分峠南部」など)では、これらに加えてパイロフィライト、ダイアスポア、自然硫黄など、より幅広いものが出現する。同様に、第1図(2)・(3)の本州地方についても、1)一部の地域(「湯田」,「最上赤倉」,「王滝」,「本宮」)では、高温変質鉱物としては濁沸石、緑泥石、セリサイト、方解石などに種類が限られている。これに対して、2)他の地域(「八幡平

第4表 特徴的な高温熱水変質鉱物の一覧表 (16種, 生成環境によるマトリックス化整理).

Table 4 List of characteristic alteration minerals for high-temperature hydrothermal (geothermal) environments (sixteen species; matrix arrangement for the formation environments).

指示環境	酸性の高温熱水系で生成		中・アルカリ性の高温熱水系で生成		指示環境
火山ガス 関連系	ズニ石 ----- 18 Zun Zunyite 珪酸塩鉱物 F, Cl, Al	自然硫黄 ----- 8 Sul Native Sulfur 元素鉱物 S	濁沸石 ----- 1 Lau Laumontite 珪酸塩鉱物(沸) Ca, Al	ワイラケ沸石 ----- 11 Wai Wairakite 珪酸塩鉱物(沸) Ca, Al	低CO3- 低SO4 熱水系
	深部酸性 熱水系	パイロフィライト ----- 7 Pyr Pyrophyllite 珪酸塩鉱物(粘) Al	緑泥石 ----- 2 Chl Chlorite 珪酸塩鉱物(粘) Fe, Mg, Al	緑れん石 # ----- 12 Epi Epidote 珪酸塩鉱物 Ca, Fe, Al	
浅部酸性 熱水系	明ばん石 ----- 16 Alu Alunite 硫酸塩鉱物 K, Al, SO4	カオリナイト ----- 6 Kao Kaolinite 珪酸塩鉱物(粘) Al	セリサイト ----- 3 Ser Sericite 珪酸塩鉱物(粘) K, Al	カリウム長石 # ----- 13 Kfe K-Feldspar 珪酸塩鉱物 K, Al	珪長質岩 熱水系
高SO4 熱水系	硬石膏 ----- 15 Anh Anhydrite 硫酸塩鉱物 Ca, SO4	石膏 ----- 5 Gyp Gypsum 硫酸塩鉱物 Ca, SO4	方解石 ----- 4 Cal Calcite 炭酸塩鉱物 Ca, CO3	苦灰石 ----- 14 Dol Dolomite 炭酸塩鉱物 Ca, Mg, CO3	高CO3 熱水系

高温熱水系に出現する主要な鉱物について、和名・英名(金原, 1982a), 鉱物の種類(粘は粘土鉱物, 沸は沸石鉱物), 特徴的な化学成分をまとめた。番号と略号は今回暫定的に使用したものである。この外にも重要な変質鉱物(例えば、石英などのシリカ鉱物)があるが、本表では便宜的に省略した。

指示環境(左端列・右端列)は概略の参考で、様々な環境で各種条件によって生成する場合がある。また、表記の各鉱物は中・低温環境においても生成する場合があるので、注意を要する。

本州地方については 12 緑れん石に、アクチノ閃石(Actinolite, 珪酸塩鉱物, Ca, Fe, Mg)を含めた。また、13 カリウム長石は初生鉱物の場合が多いため、暫定的に処理・表示の対象外とした。

東部」, 「岩手山西部」, 「八丈島」など) では、これらに加えて明ばん石, パイロフィライト, 自然硫黄など, より幅広いものが出現する。

上記の1) については、基本的に比較的単純に降水起源の地下水が伝導的に加熱される中性~弱アルカリ性熱水系(相対的に低温傾向)を生成環境としていると推測される。一方, 2) については、より幅広く多様にマグマ起源の高温流体(火山ガスを含む)が関与する酸性熱水系(相対的に高温傾向)などを含めて、生成環境としていると考えられる(第1図を参照)。

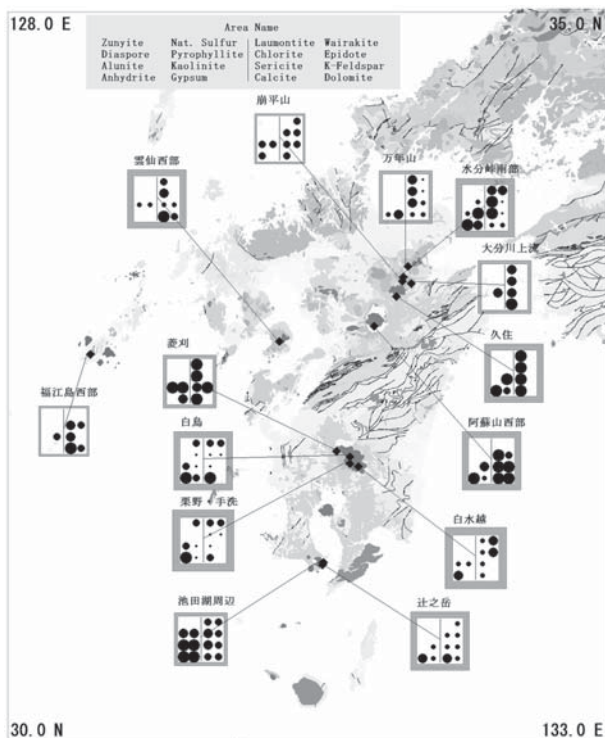
なお, 上記の予察的な結果については、NEDOによる各地域毎の地熱開発促進調査報告書を中心に、その他の各種の地表・地下調査データを含めた総合的な再検討によって、多様な変質の生成環境などを今後より体系的に明らかにする必要がある。また、検討の注意点として、1) 各地域の坑井掘削は、社会的・環境的な制約などによって、必ずしも高温・活発な熱水系発達 の最有望地点で実施されていないこと, 2) 調査地域が先新第三紀の各種岩石で構成される場合は、古い続成~変成作用の影響が強く保持されている場合があること, 3) 新第三紀以降の各種岩石で構成される場合も、これらの変質は必ずしも現在の地下環境に対応(平衡化)している訳ではないことなどが挙げられる。

4. 事例6地域の紹介と地熱井変質データ処理の方法・結果

4.1 事例6地域の紹介

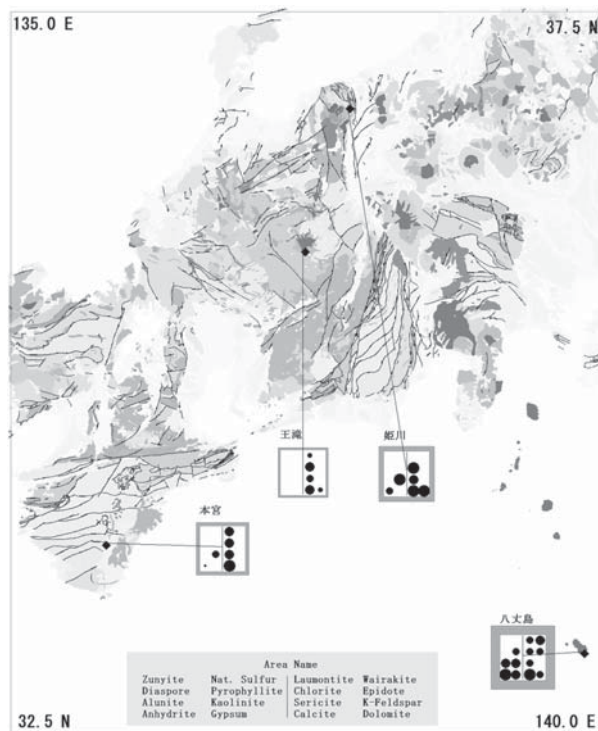
2003~2005年度の委託研究で、特に事例として地熱開発促進調査の坑井変質データを処理した6地域(第4図)は、相対的に高温環境(概略200℃以上)の(1)「阿蘇山西部」(熊本県)・(2)「八丈島」(東京都)の2地域及び低温環境(概略100℃以下)の(3)「菱刈」(鹿児島県)・(4)「本宮」(和歌山県)・(5)「王滝」(長野県)・(6)「最上赤倉」(山形県)の4地域に区分される。前2者は2003~2004年度に、後4者は2005年度にデータ処理されたが、今回両者をまとめて再処理・検討を行った。第5表に、今回事例6地域について作成した様々な図表について、一覧表に整理した。

事例6地域の概要を紹介する目的で、各地域についてそれぞれ3種類の広域図を同一縮尺で、第5図(1)~第10図(1)に示す。各図の上図は地形と温泉分布(温度・pH)、中図は地質と第四紀火山、下図はブーゲー重力異常(假定岩石密度, $\rho = 2.30 \text{ g/cm}^3$)と地温勾配を示している。これらの図の作成は、地質調査所(2000b)が提供する統一仕様の地形・地質・ブーゲー重力異常の電子画像データを基図に、温泉(地質調査総合センター, 2005)、第四紀火山(地質調査所, 2000a)、地温勾配(地質調査総合センター, 2004)の



第3図(1) NEDO地熱開発促進調査・坑井変質調査による地域毎の主要出現鉱物の総括表示図(九州地方, 14地域, 暫定版). 凡例の変質鉱物は第4表を参照. 各地域の正方形の数は, 最高坑井温度に対応する(50℃未満の1個から50℃毎に1個ずつ増加). 背景の地質図は地質調査所(1995)の数値地質図データに基づく.

Fig. 3 (1) Summary map of major minerals reported by well alteration survey in NEDO's Geothermal Development Promotion Survey for fourteen areas in the Kyushu District (temporal version). Refer to Table 4 for the alteration minerals in the legend. The number of squares of each area corresponds to the highest well temperature there (the number increases one every 50 °C beginning from one for 50 °C >). Background geologic map is based on GSJ (1995).



第3図(2) NEDO地熱開発促進調査・坑井変質調査による地域毎の主要出現鉱物の総括表示図(近畿・中部・関東地方, 4地域, 暫定版). 凡例の変質鉱物は第4表を参照. 各地域の正方形の数は, 最高坑井温度に対応する(50℃未満の1個から50℃毎に1個ずつ増加). 背景の地質図は地質調査所(1995)の数値地質図データに基づく.

Fig. 3 (2) Summary map of major minerals reported by well alteration survey in NEDO's Geothermal Development Promotion Survey for four areas in the Kinki, Chubu and Kanto Districts (temporal version). Refer to Table 4 for the alteration minerals in the legend. The number of squares of each area corresponds to the highest well temperature there (the number increases one every 50 °C beginning from one for 50 °C >). Background geologic map is based on GSJ (1995).

テキストデータファイルを用いて, 茂野(2005b)及び地質調査総合センター(2007)の方法によって行われた.

第6表には, 多様な地表・地下環境に置かれている事例6地域の位置, 地勢, 近傍の火山・温泉・地質分布, 地熱開発促進調査によって掘削された調査井本数などの概要を整理して示す. なお, NEDOによって地熱開発促進調査に設定された各地域の調査範囲は, 地表の社会環境によって複雑な形状をしており, 上記第5図(1)~第10図(1)の矩形範囲とは異なることを付記する.

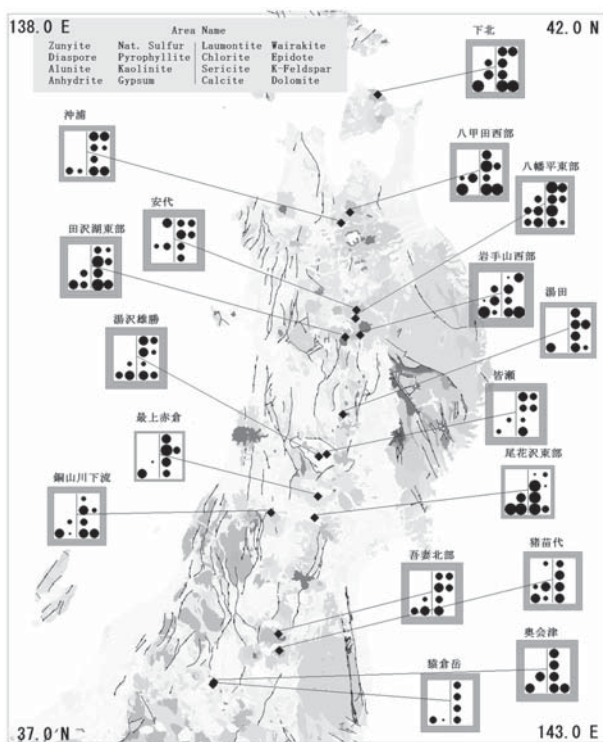
4.2 事例6地域の坑井検層・柱状データの処理方法

上記事例6地域の地熱開発促進調査の結果については, NEDO(1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990 ;

上記6地域順)に詳しく報告されている. 事例6地域のデータ処理は, 上記2.~3.の処理とは分離して, これらの報告書のデータを用いて直接著者によって行われた.

事例6地域のデータ処理・表示では, 基本的に茂野(2004a)が「豊肥地域」を事例に検討を行った「地熱井の温度・地質・変質データの簡易データベース化と地図上統合表示」の一連の手法を利用した. 茂野(2004a)で開発された処理プログラム群や試験データなどについては, 地質調査総合センター(2007)によってソースコードを含めて電子公開化されている.

第7表には, 事例6地域の合計52本(深度200 m~1,800 m)の坑井情報を示す(坑井位置には旧日本測地系を使用). なお, 「阿蘇山西部」地域では, 深度500 m以浅の坑井3本は省略されている. 第7表の坑井について, 深度50 m間隔で温度・地質・変質データを簡易デー



第3図(3) NEDO地熱開発促進調査・坑井変質調査による地域毎の主要出現鉱物の総括表示図(東北地方, 17地域, 暫定版)。凡例の変質鉱物は第4表を参照。各地域の正方形の数は, 最高坑井温度に対応する(50℃未満の1個から50℃毎に1個ずつ増加)。背景の地質図は地質調査所(1995)の数値地質図データに基づく。

Fig. 3 (3) Summary map of major minerals reported by well alteration survey in NEDO's Geothermal Development Promotion Survey for seventeen areas in the Tohoku District (temporal version). Refer to Table 4 for the alteration minerals in the legend. The number of squares of each area corresponds to the highest well temperature there (the number increases one every 50℃ beginning from one for 50℃>). Background geologic map is based on GSJ (1995).

データベース化(表計算ソフト(Microsoft社のExcel)を使用した。原報告書に従って, 温度・地質・変質データの各一部は欠損値(コード)となっている。

検層温度については, 各地域の各坑井について繰り返し実施された検層データの中で, 全体として最も温度が高い(坑井内への送水停止後の経過時間(S.T.)が長い)場合の数値化実測データを使用した。これらの温度データは, 実際の地下平衡温度よりは若干低いと考えられる。

第8表には, 事例6地域の簡易化した地質単位とそのコードの表を示す。これらは, 上記の報告文献に基づく地域毎の暫定版(茂野, 2004b, 2005a, 2006)を結合化したものである。

第9表には, 比較的高頻度で出現するとともに温度・化学環境の指示性が高い変質鉱物を選び, コード化し

て示す。これらは, 地域毎に独自のもの(茂野, 2004b, 2005a, 2006)が暫定的に結合化されたもので, 特に比較的低温環境の事例4地域については共通となっている。なお, 2.2で述べたように変質については, 地域毎に分析(同定)の対象鉱物の種類, 精度, 結果表示法などは大きく異なっており, 出現の報告がない場合でも実際は鉱物が分布している場合がある可能性に留意する必要がある。

なお, 地図上データ表示(第5図(4)~第10図(4))では, 背景図の作成に国土地理院(1997a, 1997b)の数値地図50mメッシュ(標高)データ, 地質調査総合センター(2005)の温泉データを, 地質調査総合センター(2007)の方法で処理した。

4.3 事例6地域の坑井検層・柱状データの処理結果

今回の事例6地域の各種の図表表示については, 組み合わせが多いために前述したように第5表に一覧表として整理した。なお, 以下の第5図(2)~第10図(4)を通して変質鉱物の丸印の大きさは, 各調査地域の報告書に坑井毎の分析結果としてまとめられている定性的~半定量的な存在度に, 概略的に対応している。

まず, 第5図(2)~第10図(2)に, 事例6地域について代表的な個別坑井各2本の検層・柱状データ(温度・地質・変質)の作図処理例を示す。

次に, 第5図(3)~第10図(3)に, 事例6地域について地域毎に坑井の検層・柱状データ(温度・地質・変質)を圧縮化した横並び表示図を示す。本図では左から右への坑井の配列は, 地域特性によって西部→東部あるいは北部→南部の順となっており, 縦方向は標高によって揃えられている。なお, 「菱刈」地域(第7図(3))については, 例外的な配列となっている。

更に, 第5図(4)~第10図(4)に, 事例6地域について地域毎の地図上統合表示として, 坑井の検層・柱状データ(温度・地質・変質)を背景の簡易的な地形・温泉分布と重合化して示す。各図の横軸は経度15'(緯度30°~40°の範囲では, 約24.1~21.3 km), 縦軸は緯度10'(約18.5 km)である(旧日本測地系を使用)。なお, 第5図(4)~第10図(4)では, 坑井データに関する凡例・スケールは省略(地質柱状の模様も一部簡略化)されているため, 必要に応じて対応する第5図(2)~第10図(3)を参照されたい。

以上の図表表示結果に基づいて, 地域間比較する形で第10表に事例6地域の地形・地質・地熱環境の概要, 坑井調査による変質分布の特徴, 及び推定される現在の熱水系賦存環境を整理した。更に, 第11図には事例6地域の概念的モデル断面図(地下深度~2.0 km程度までの地質・変質・熱水系分布の推定図)を比較し易い形で示した。

5. 考察

ここでは、上記4.で表示した図表に基づいて、まず5.1で事例6地域毎に地域、坑井温度分布、坑井変質分布の概要を述べ、変質分布を生成した環境について考察を加える。今回の考察では、事例6地域について文献としては、基本的に前述したNEDO (1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990) (6地域順) 及び吉岡・村井 (1996), 石川 (1994), 加藤 (1992), 原田・木戸 (1995), 薦田 (1990), 加藤 (1991) (同順) を使用した。

次に5.2では、事例6地域の坑井岩石変質についてのまとめと若干の考察を行う。最後に5.3では、熱・熱水の影響評価における変質調査についての若干の考察を加える (茂野 (2006) を参照)。

5.1 事例6地域の坑井温度・変質分布の検討

5.1.1 阿蘇山西部地域

ここでは、基本的にNEDO (1995) 及び吉岡・村井 (1996) に基づいて整理を行い、考察を加える。

[地域概要]

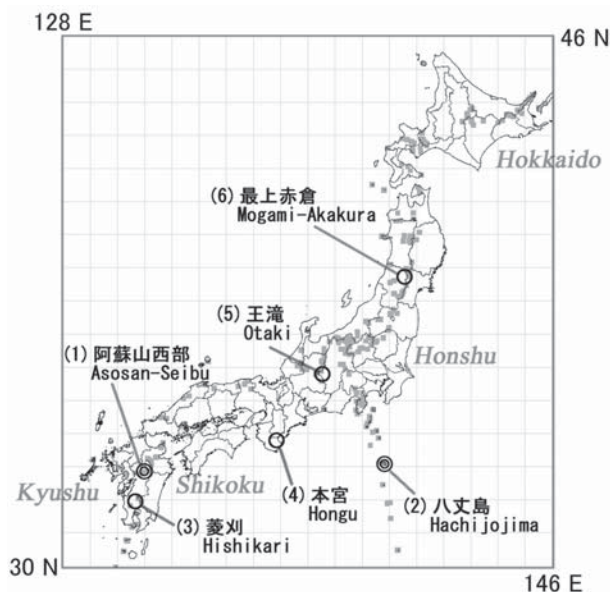
熊本県北東部の「阿蘇山西部」地域は、九州中央部をENE-WSW方向に伸びる大規模な火山性地溝帯の中にあり、活動的火山である阿蘇火山中央火口丘群 (最高標高1,593 m) の西山麓に位置して、阿蘇カルデラの外輪山域にまで広がっている (第5図 (1) 参照)。基盤岩類は周辺にも分布する先第三紀の変成岩類・火成岩類で、その上に第四紀の火山岩類—堆積岩類が1,500 m以上の厚さで分布している。阿蘇火山の中央部には大規模な中岳火口があり、火口底では高温の噴気活動が活発 (数年間隔の小規模噴火を伴う) である。「阿蘇山西部」地域では東方に隣接して最高92℃・中性—酸性・低塩濃度・含S-Na-SO₄ (H₂S) 型の垂玉温泉などがN-S方向に配列分布しているほか、その西方のカルデラ底—壁域にも低温の温泉が分布している。

[坑井温度分布]

本調査地域では第5図 (2)・(3)・(4) に示すように、東部の坑井 (AS-7井・AS-6井) の深部の温度が200℃に近く、また地温勾配が低くなっており、高温熱水系の分布を指示している。坑井の温度プロファイルは、浅部にもやや温度の高い部分があり (特に、AS-3井で顕著)、地下浅部に地形・広域地質構造・温泉分布に調和的なE→W方向の熱水の水平的な流動 (～流下) が存在することを示している (第5図 (4) 参照)。一方、西部のカルデラ内壁—外輪山 (侵食谷) 域 (AS-4井・AS-5井) では、坑底部の最高温度が80℃程度で、地温勾配は直線的で相対的に低い傾向にあり、広域熱伝導が卓越していると考えられる。

[坑井変質分布と地下環境推定]

「阿蘇山西部」地域の坑井調査結果は、第5図 (2)・



第4図 NEDO地熱開発促進調査「阿蘇山西部」, 「八丈島」, 「菱刈」, 「本宮」, 「王滝」, 「最上赤倉」地域の索引図。背景に第四紀火山の分布 (地質調査所, 2000a) を示した。

Fig. 4 Index map for the Asosan-Seibu, Hachijojima, Hishikari, Hongu, Otaki and Mogami-Akakura areas of NEDO's Geothermal Development Promotion Survey. Distribution of Quaternary volcanoes (GSJ, 2000a) is also shown on the map.

第5表 事例6地域の処理・検討結果の図表一覧表。

Table 5 Reference list to the figures and tables showing the results of data processing and analysis for the six case study areas.

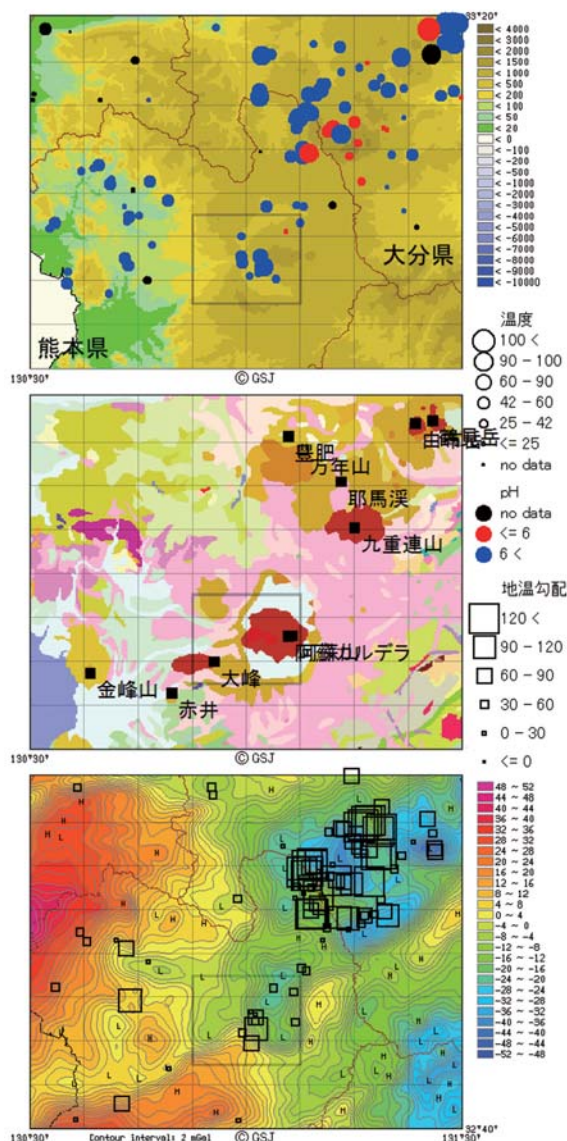
地熱開発促進調査地域名	広域*1 概要図	柱状図*2*3			概念モデル 断面図	地域*3		
		個別	横並び	地図上		概要表	地質	地質
阿蘇山西部	第5図	(1)	(2)	(3)	(4)	第11図	第6表	第10表
八丈島	第6図	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(1)	(1)
菱刈	第7図	(1)	(2)	(3)	(4)	(3)	(3)	(3)
本宮	第8図	(1)	(2)	(3)	(4)	(4)	(4)	(4)
王滝	第9図	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(5)	(5)
最上赤倉	第10図	(1)	(2)	(3)	(4)	(6)	(6)	(6)

*1 地域の索引は第4図を参照。広域概要図の標高・地質・重力の分布は、地質調査所 (2000b) の該当地域の画像データを使用した。温泉・火山・地温勾配の分布については、地質調査総合センター (2005), 地質調査所 (2000a), 地質調査総合センター (2004) の各該当テキストデータを用いて、地質調査総合センター (2007) の方法によって重畳地図化した。

*2 柱状図については、各地域の地熱開発促進調査の坑井データ (NEDO, 1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990; 上記6地域順) を電子表化し、茂野 (2004a)・地質調査総合センター (2007) の方法によって作図した。なお、地図上表示図については、国土地理院 (1997a, 1997b) の標高50 mメッシュデータおよび地質調査総合センター (2005) の温泉データを用いて、地質調査総合センター (2007) の方法によって背景図を作成した。

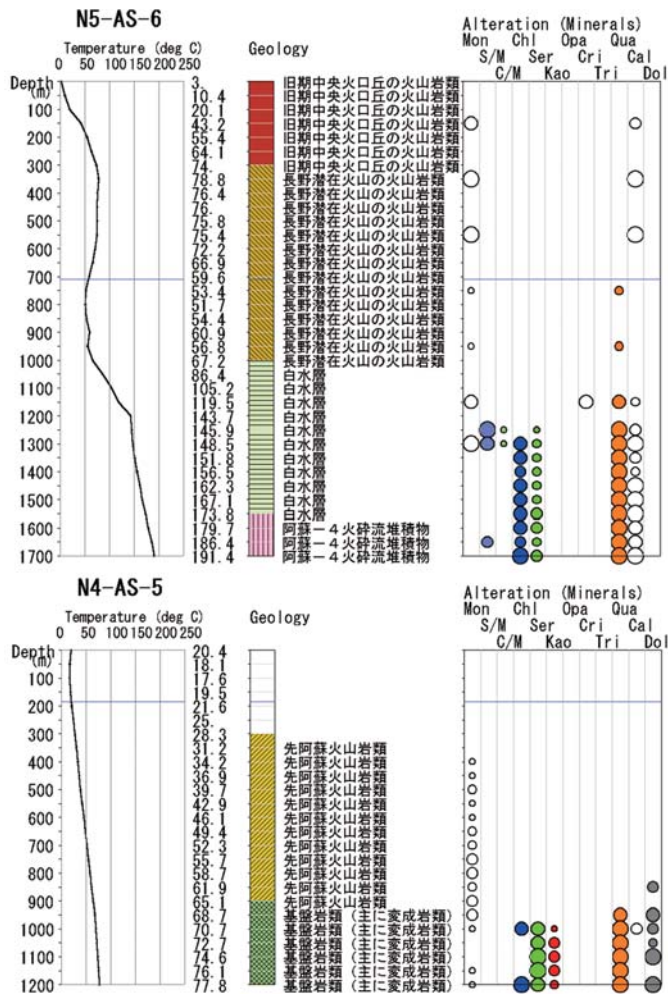
*3 各地域の坑井情報については第7表を、地質順序とコードについては第8表を、変質鉱物とコードについては第9表を参照。

(3)・(4) に示すように、東部～中央部 (特に、AS-6井・AS-7井) の深部 (深度約1,200 m以深; 第四紀の堆積岩類・火山岩類が分布) では、主要な変質鉱物は緑泥石、セリサイト、石英、方解石で、現在中性の高温熱水系が分布する環境であることを示している。なお、中央部のAS-3井とAS-2井では、深部 (一部浅部) に緑泥石、セリサイト、石英 (一部、緑れん石、硬石膏な



第5図(1) 「阿蘇山西部」地域の広域概要図。20万分の1地勢図「熊本」東半部と「大分」西半部の地球科学情報と第5図(4)の範囲を示す。上図は地形(標高・水深, m)と温泉(温度(°C)・pH), 中図は地質と第四紀火山(■), 下図はブーゲー重力異常(mGal)と地温勾配(°C/km)の各分布を示す。地質調査所(2000a, 2000b), 地質調査総合センター(2004, 2005)の電子データを用いて地質調査総合センター(2007)の方法により作成した。地質図の凡例は地質調査所(1995)を参照。

Fig. 5 (1) Regional outlines of the Asosan-Seibu area. This figure shows earth-sciences information in and around the area (Fig. 5 (4)). The top, middle and bottom parts show topography (elevation-sea bottom depth, m) and hot-springs (temperature (°C) and pH), geology and Quaternary volcanoes (solid square), and Bouguer gravity anomaly (mGal) and thermal gradient (°C/km), respectively (GSJ, 2000a, 2000b, 2004, 2005, 2007). Refer to GSJ (1995) for legend of geology.

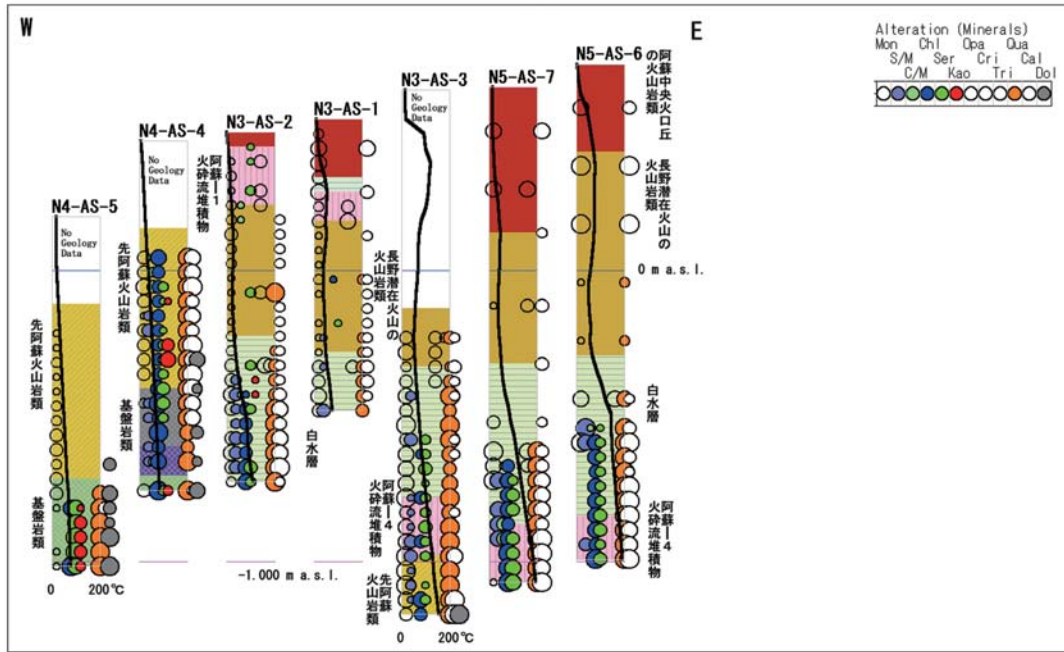


第5図(2) 「阿蘇山西部」地域の個別坑井の検層・柱状データ(温度・地質・変質)の表示例。他の坑井の検層・柱状データについては、第5図(3)・(4)を参照。坑井データはNEDO (1995), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による。地質単元・変質鉱物については、第8表・第9表を参照。

Fig. 5 (2) Examples of single well logging and column data (temperature, geology and alteration) for the Asosan-Seibu area. See Fig. 5 (3) and (4) for the logging and column data of other wells. Refer to NEDO (1995) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software. Refer to Tables 8 and 9 for the geologic units and alteration minerals.

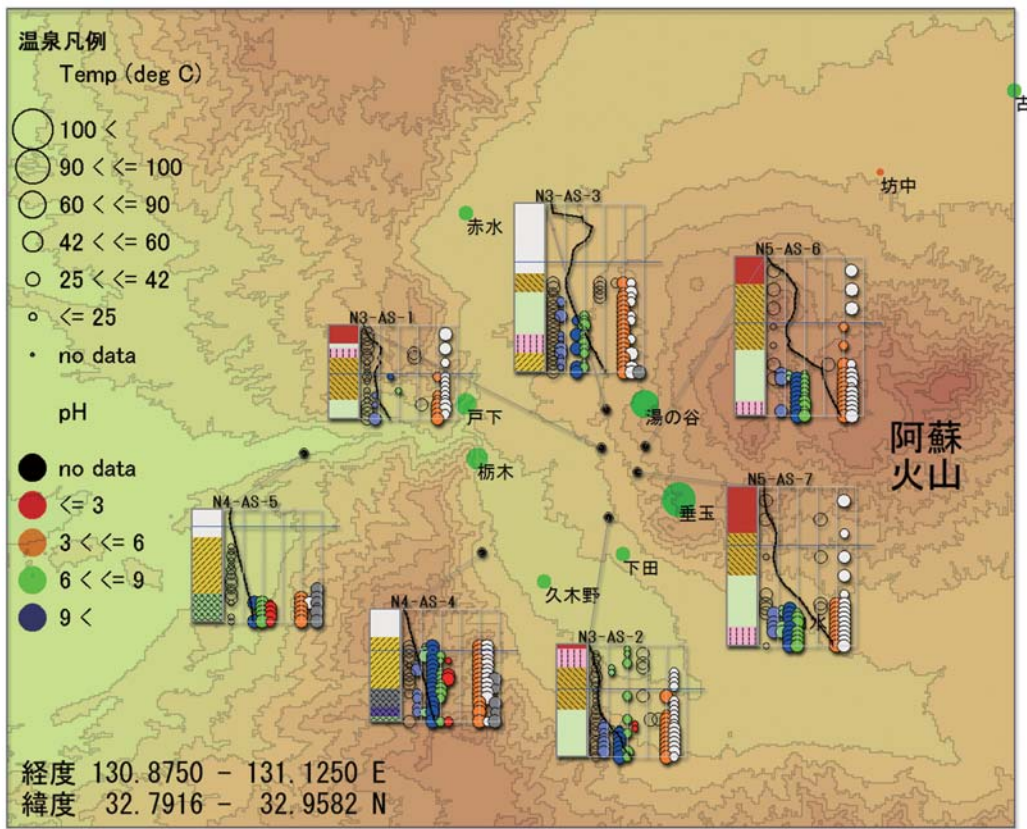
どを含む)とともにモンモリロナイトが出現しており、前者は過去の高温熱水系発達時の残留物で、後者が現在のより低温の温度環境(120°C程度以下)で生成した可能性が指摘されている。

これらに対して、西部のAS-5井(外輪山城)の浅部(先阿蘇火山岩類)は変質鉱物に乏しく、過去に中・高温の熱水系環境を経過しなかったことを示している。その深部の基盤岩類(変成岩類が卓越)の主要な変質鉱物はセリサイト、カオリナイト、石英、苦灰石で、第四紀以前にこれらの岩石が複雑な温度・化学環境を経過したことを反映していると考えられる。カルデラ内壁部に位置するAS-4井では、最西部のAS-5井とは異



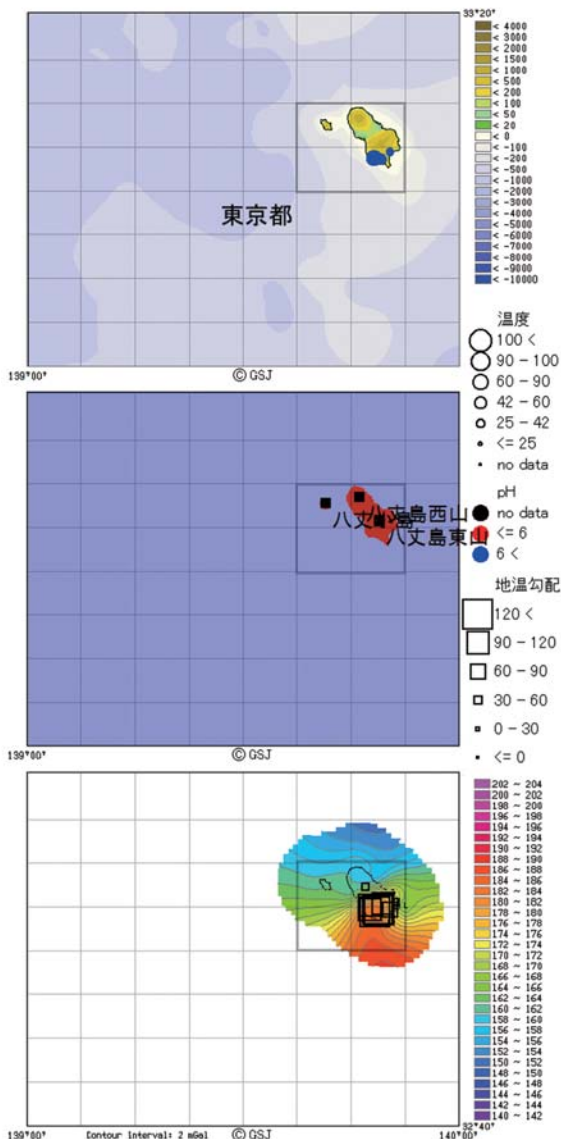
第5図(3) 「阿蘇山西部」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の圧縮化した横並び表示. 坑井配列は左から右へ概略地域の西部→東部の順である(第5図(4)を参照). 坑井データはNEDO(1995), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による.

Fig. 5 (3) Compressed parallel display of well logging and column data for the Asosan-Seibu area. The wells are shown west to east (left to right; refer to Fig. 5 (4)). Refer to NEDO (1995) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software.



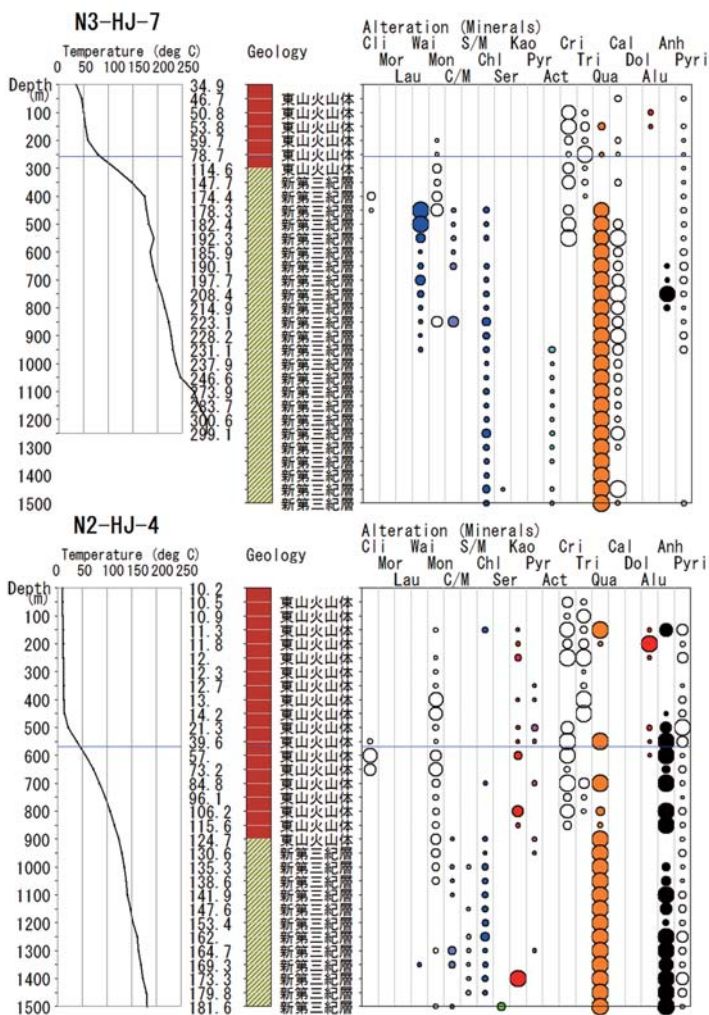
第5図(4) 「阿蘇山西部」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の地図上統合表示. 地域概要は第5図(1)を, 詳細は第5図(3)及び本文を参照.

Fig. 5 (4) Integrated map of well logging and column data for the Asosan-Seibu area. Refer to Fig. 5 (1) for the outline of the area, and Fig. 5 (3) and main text for details.



第6図(1) 「八丈島」地域の広域概要図。20万分の1地勢図「八丈島」の地球科学情報と第6図(4)の範囲を示す。上図は地形(標高・水深, m)と温泉(温度(°C)・pH)、中図は地質と第四紀火山(■), 下図はブーゲー重力異常(mGal)と地温勾配(°C/km)の各分布を示す。地質調査所(2000a, 2000b), 地質調査総合センター(2004, 2005)の電子データを用いて地質調査総合センター(2007)の方法により作成した。地質図の凡例は地質調査所(1995)を参照。

Fig. 6(1) Regional outlines of the Hachijojima area. This figure shows earth-sciences information in and around the area (Fig. 6(4)). The top, middle and bottom parts show topography (elevation-sea bottom depth, m) and hot-springs (temperature, (°C) and pH), geology and Quaternary volcanoes (solid square), and Bouguer gravity anomaly (mGal) and thermal gradient (°C/km), respectively (GSJ, 2000a, 2000b, 2004, 2005, 2007). Refer to GSJ (1995) for legend of geology.

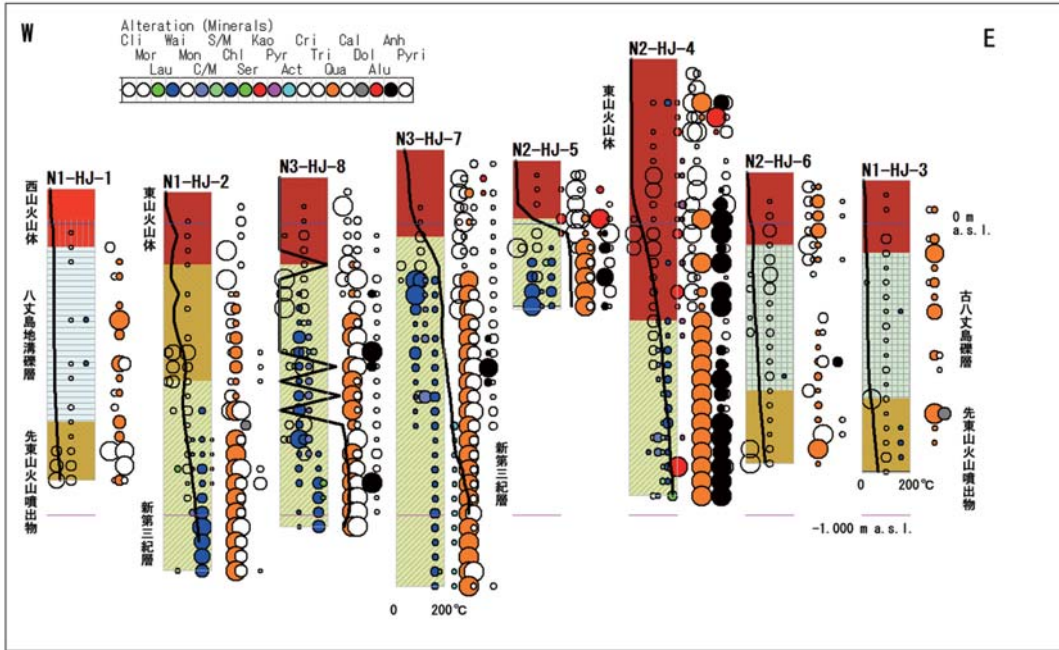


第6図(2) 「八丈島」地域の個別坑井の検層・柱状データ(温度・地質・変質)の表示例。他の坑井の検層・柱状データについては、第6図(3)・(4)を参照。坑井データはNEDO(1993), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による。地質単元・変質鉱物については、第8表・第9表を参照。

Fig. 6(2) Examples of single well logging and column data (temperature, geology and alteration) for the Hachijojima area. See Fig. 6(3) and (4) for the logging and column data of other wells. Refer to NEDO (1993) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software. Refer to Tables 8 and 9 for the geologic units and alteration minerals.

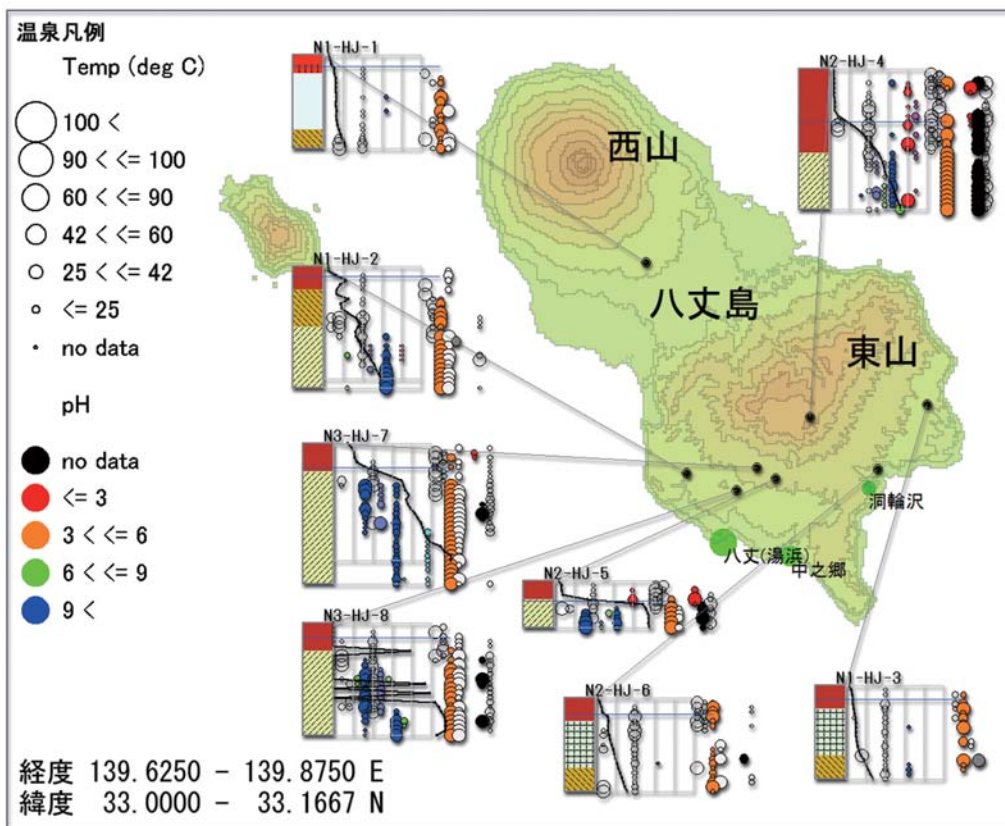
なって先阿蘇火山岩類中にも緑泥石、セリサイト、石英、方解石とともに苦灰石、カオリナイト(一部、硬石膏などを含む)が出現し、過去(第四紀前半?)に多様な熱水系活動が生じたことを示している。

なお、本地域の地表調査では、地域東部の垂玉温泉・湯の谷温泉の周辺に広く明ばん石・カオリナイト(一部石英(珪化))を含む変質帯の分布が報告されており、マグマ起源流体(火山ガス)の寄与を示している。また、それらを中心にモンモリロナイトなどに富む変質帯が西方の3方向へ広がっており、斜面に沿った地下浅部の温泉水の流動が継続してきたことを示している。



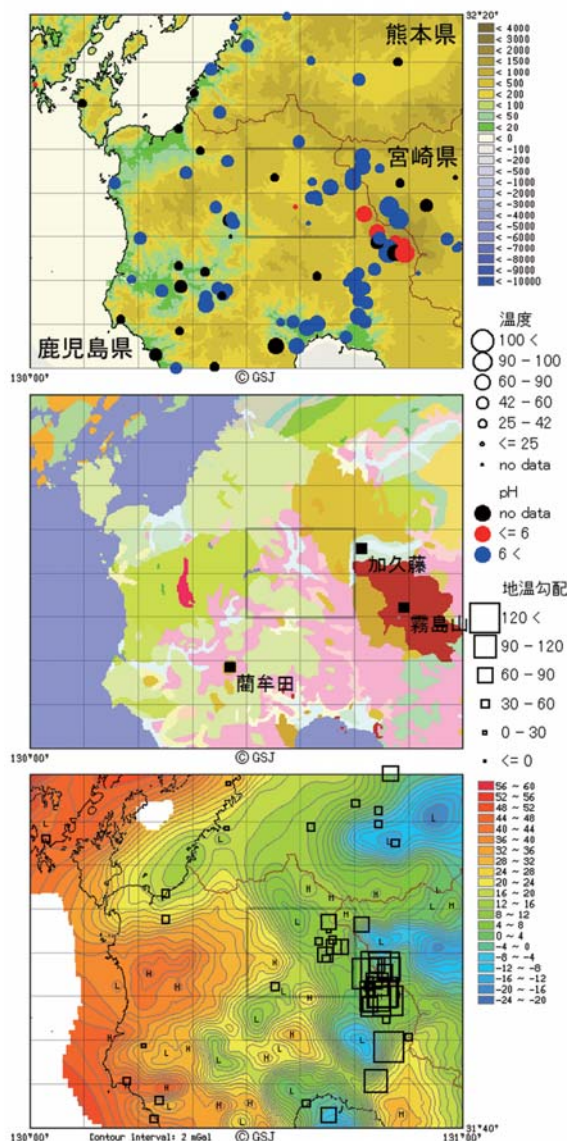
第6図(3) 「八丈島」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の圧縮化した横並び表示, 坑井配列は左から右へ地域の西部→東部の順である(第6図(4)を参照), 坑井データはNEDO(1993), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による. HJ-8井については, 温度測定欠損値を0°Cで表示した.

Fig. 6 (3) Compressed parallel display of well logging and column data for the Hachijojima area. The wells are shown west to east (left to right; refer to Fig. 6 (4)). Refer to NEDO (1993) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software. Deficit temperature data of the well HJ-8 are shown with 0 °C.



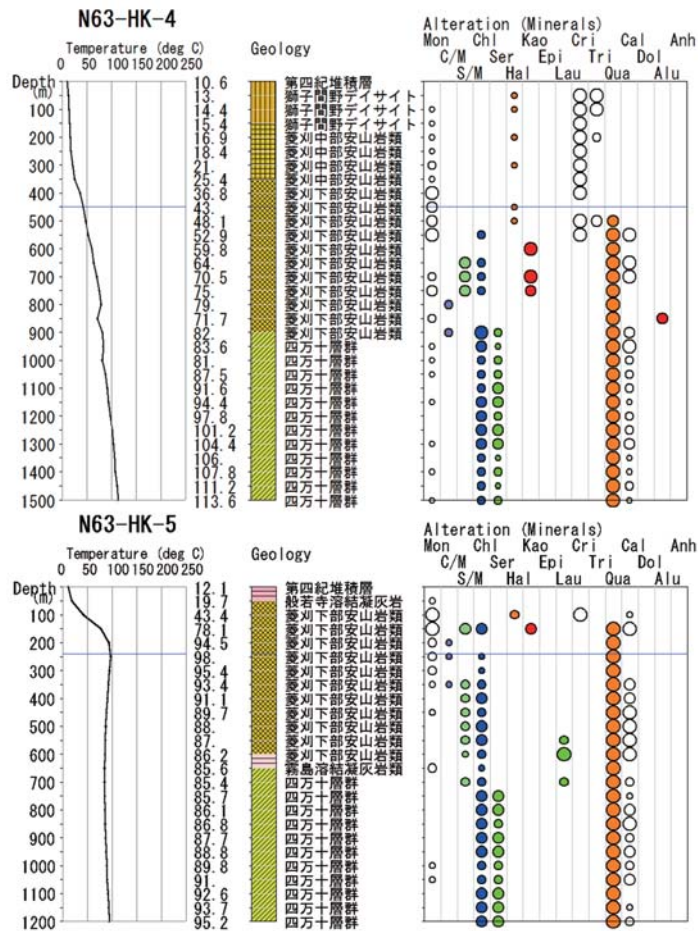
第6図(4) 「八丈島」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の地図上統合表示, 地域概要は第6図(1)を, 詳細は第6図(3)及び本文を参照.

Fig. 6 (4) Integrated map of well logging and column data for the Hachijojima area. Refer to Fig. 6 (1) for the outline of the area, and Fig. 6 (3) and main text for details.



第7図(1) 「菱刈」地域の広域概要図。20万分の1地勢図「八代」南半部と「鹿児島」北半部の地球科学情報と第7図(4)の範囲を示す。上図は地形(標高・水深, m)と温泉(温度(°C)・pH), 中図は地質と第四紀火山(■), 下図はブーゲー重力異常(mGal)と地温勾配(°C/km)の各分布を示す。地質調査所(2000a, 2000b), 地質調査総合センター(2004, 2005)の電子データを用いて地質調査総合センター(2007)の方法により作成した。地質図の凡例は地質調査所(1995)を参照。

Fig. 7 (1) Regional outlines of the Hishikari area. This figure shows earth-sciences information in and around the area (Fig. 7 (4)). The top, middle and bottom parts show topography (elevation-sea bottom depth, m) and hot-springs (temperature, (°C) and pH), geology and Quaternary volcanoes (solid square), and Bouguer gravity anomaly (mGal) and thermal gradient (°C/km), respectively (GSJ, 2000a, 2000b, 2004, 2005, 2007). Refer to GSJ (1995) for legend of geology.



第7図(2) 「菱刈」地域の個別坑井の検層・柱状データ(温度・地質・変質)の表示例。他の坑井の検層・柱状データについては、第7図(3)・(4)を参照。坑井データはNEDO (1991), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による。地質単元・変質鉱物については、第8表・第9表を参照。

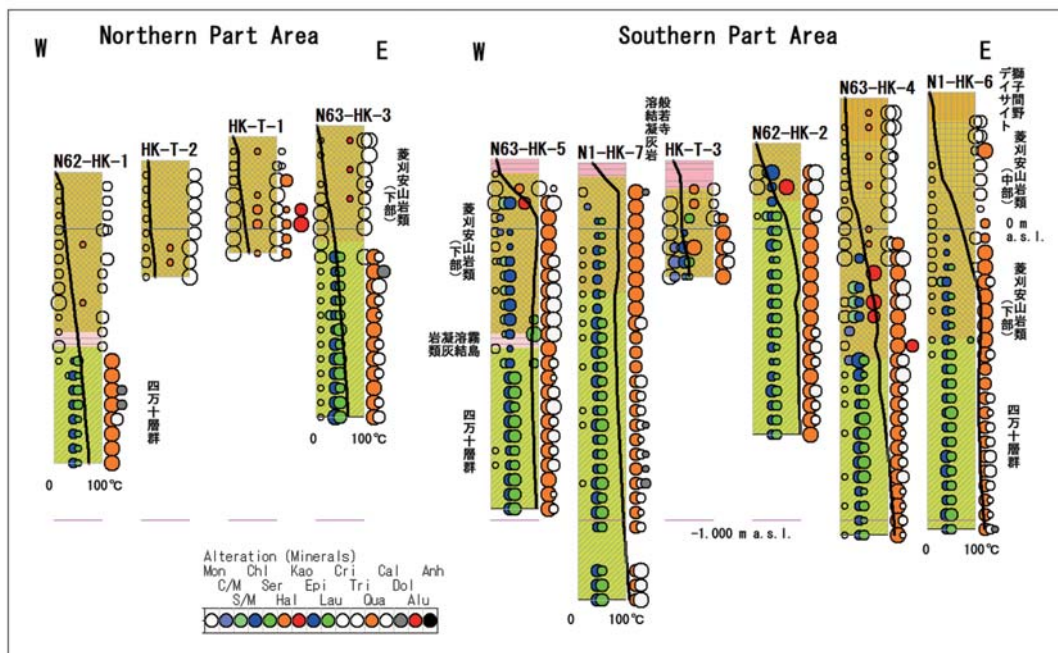
Fig. 7 (2) Examples of single well logging and column data (temperature, geology and alteration) for the Hishikari area. See Fig. 7 (3) and (4) for the logging and column data of other wells. Refer to NEDO (1991) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software. Refer to Tables 8 and 9 for the geologic units and alteration minerals.

5.1.2 八丈島地域

ここでは、基本的にNEDO (1993) 及び石川 (1994) に基づいて整理を行い、考察を加える。

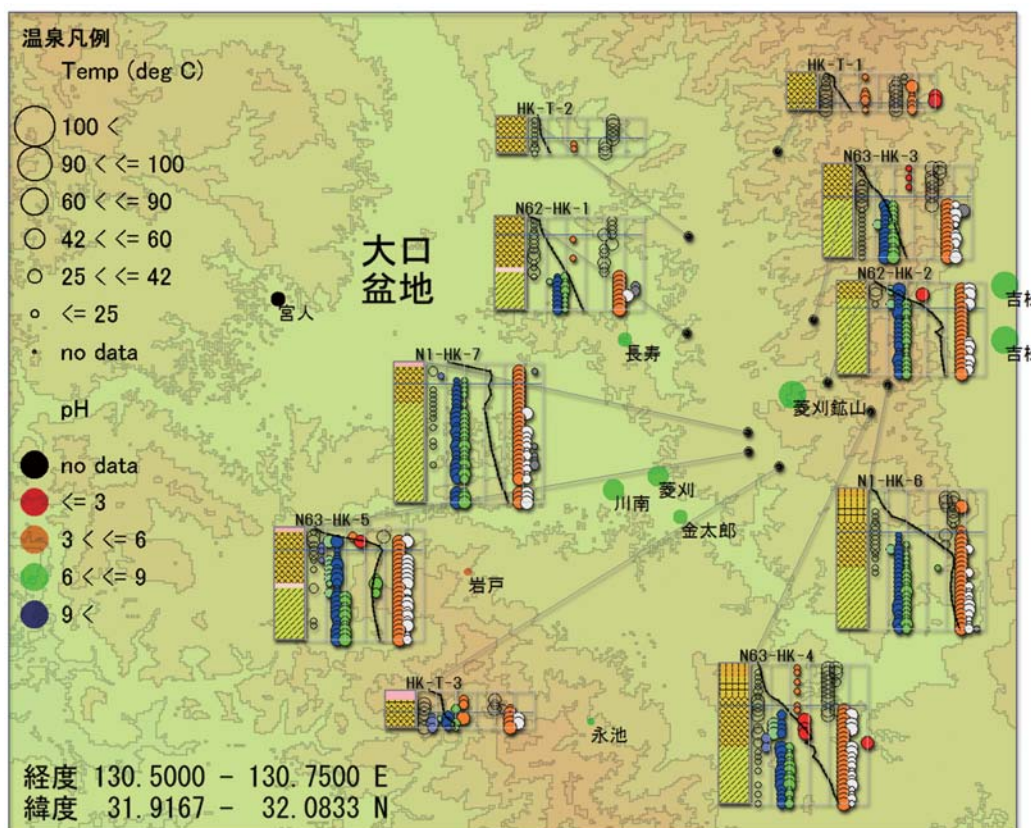
[地域概要]

東京都の八丈島は、伊豆一小笠原弧上に位置するNW-SE方向に伸びた火山島で、新第三紀の火山岩類を基盤として、北西部に西山、南東部に東山の2つの第四紀後期の火山が分布している(第6図(1)参照)。西山(標高854 m)は円錐形の玄武岩質の成層火山で、埋没カルデラの存在などが指摘されている。東山(標高701 m)はやや侵食の進んだ玄武岩質~デイサイト質の複成火山で、山頂~南西部にカルデラ、寄生火山などを伴う。八丈島南部の海岸には、最高69°C・中性・中塩濃度・Na-Cl型の湯浜などの温泉が分布している。



第7図(3) 「菱刈」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の圧縮化した横並び表示. 坑井配列は北部と南部に分けて, 各々左から右へ地域の西部→東部の順である(第7図(4)を参照). 坑井データはNEDO(1991), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による.

Fig. 7(3) Compressed parallel display of well logging and column data for the Hishikari area. The wells are shown west to east (left to right) for the northern and southern parts of the area (refer to Fig. 7(4)). Refer to NEDO(1991) for the well data, and GSJ(2007) for the drawing software.



第7図(4) 「菱刈」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の地図上統合表示. 地域概要は第7図(1)を, 詳細は第7図(3)及び本文を参照.

Fig. 7(4) Integrated map of well logging and column data for the Hishikari area. Refer to Fig. 7(1) for the outline of the area, and Fig. 7(3) and main text for details.

[坑井温度分布]

「八丈島」地域の地熱開発促進調査では、第6図(4)に示すように当初比較的広く散点的に坑井が配置された(HJ-1井~HJ-6井)が、東山の南西部の地下に高温熱水系の分布が捉えられて坑井調査が集中することとなった(HJ-5井, HJ-7井, HJ-8井)。第6図(3)に示すように、深度500~1,500 mの8坑井の中で、上記3坑井が200℃以上、その東西近傍のHJ-2井, HJ-4井が100~200℃、北方及び東方に離れたHJ-1井, HJ-3井, HJ-6井が100℃未満の最高温度となっている。東山の南西部ではその後東京電力株式会社によって調査が継続され、発電容量3.3 MWeの地熱発電所が建設されて1999年から稼働している(斉田ほか, 1996; 松山ほか, 1999)。

[坑井変質分布と地下環境推定]

第6図(2)・(3)・(4)に示したHJ-7井(最高約300℃)の変質は、本地域の中性~弱アルカリ性の高温熱水系環境を代表的に示している。深度約300 mに東山火山体の火山岩類と新第三系との境界部があり、その周辺にはモンモリロナイト、クリストバル石などが分布して変質岩が帽岩を形成している(地温勾配が急上昇)と考えられる。深度400 m以深は高温熱水系となっており(地温勾配が緩やか)、ワイラケ沸石、緑泥石、石英、方解石のほかアクチノ閃石が分布し(セリサイト、カリ長石などには乏しい)、苦鉄質岩石中に発達する中性~弱アルカリ性の高温熱水系の特徴を表していると考えられる。HJ-5井, HJ-8井及びHJ-2井の変質鉱物の分布も、HJ-7井に類似性を持っている。

これらに対して、HJ-4井の変質は、現在の温度分布はより低温(最高約180℃)であるが、過去に存在した酸性の高温熱水系環境(恐らく200℃よりもかなり高い)を示していると考えられる。HJ-4井に特徴的な鉱物としては、カオリナイト、パイロフィライト、明ばん石、硬石膏、黄鉄鉱などが挙げられる(ワイラケ沸石、方解石に欠け、カリウムに富んだ鉱物種に乏しい傾向にある)。HJ-4井は東山火山の中心部に位置(第6図(4)参照; 山頂部近くで火山岩類が厚い)しており、これらの鉱物の生成にはマグマ起源の高温流体~火山ガスの寄与が推定される。HJ-4井の現在の地温勾配は、深度500 m程度(海水準近傍)まで極端に低い。これは、上記の高温鉱物の分布上限よりも明瞭に深部に達しており、近過去~現在の降水起源地下水の下降流が過去の高温領域の広がりを縮小化したことを示している。

一方、北方及び東方に離れたHJ-1井, HJ-3井, HJ-6井(最高温度が100℃以下)では、変質鉱物は斜ブチロ沸石、モルデン沸石、モンモリロナイト、クリストバライト、石英、方解石などに限られており(第6図(3)・(4)参照)、過去~現在に高温熱水系が分布した

経歴がないことを示している。なお、これらの坑井には新・旧の礫岩層が厚く(500 m以上)分布してその地温勾配は低く、降水起源地下水層の発達による冷却の影響が大きいと考えられる。

なお、本地域の地表調査では、東山の山頂部の数カ所で明ばん石とカオリナイトを含む変質帯の分布が報告されており(他に変質帯の分布は少なく)、上記に調和的である。

5.1.3 菱刈地域

ここでは、基本的にNEDO(1991)及び加藤(1992)に基づいて整理を行い、考察を加える。

[地域概要]

鹿児島県北西部の「菱刈」地域は、広域的にN-S~NW-SE方向に伸びる地溝域内の丘陵~盆地境界域にあたり、加久藤カルデラの西に隣接して霧島火山の北西方向に位置している(第7図(1)参照)。基盤岩類は周辺にも分布する四万十層群(主に白亜系)で、第四紀の火山岩類(安山岩類、デイサイト類、溶結凝灰岩類)が400~800 m程度の厚さで分布している。断層・断層系では、NE-SW方向のものが多く発達している。「菱刈」地域では最高72℃・中性・低塩濃度・含As-Na-Cl-HCO₃型の吉松温泉などが湧出しており、調査地域の南部には日本で最大規模の浅熱水性鉍脈型鉍床である菱刈金鉍床(例えば、茨城・鈴木, 1990; Shikazono et al ed., 1993)が分布し、温泉水を湧出している。

[坑井温度分布]

本調査地域では、第7図(2)・(3)・(4)に示すように南部に熱水系(HK-6井で最高測定温度118℃)が分布しており、その主部は四万十層群中に賦存していると考えられる。坑井の温度プロフィールには概略的に2種類あり、深度とともに比較的直線的に上昇するもの(北部の坑井群及び南部のHK-4井, T-3井)と地下浅部で急激に上昇し(地下深度数100 mで約100℃)一度若干下降して更に緩やかに上昇するもの(特にHK-7井・HK-5井)とに区分される。後者は、熱水の地下浅部(主に第四紀火山岩類中)の水平的な流動を反映したものと推定され、地形・断層系・温泉分布に調和的なNE→SW方向の流動(HK-6井→HK-2井→菱刈鉍山→HK-7井・HK-5井→谷地の温泉群)が認められる。

[坑井変質分布と地下環境推定]

「菱刈」地域の坑井調査結果では、第7図(2)・(3)・(4)に示すように浅部の低温域でモンモリロナイト、クリストバル石、鱗珪石などが出現している。相対的な高温域の一般的な変質鉱物は、緑泥石、セリサイト、石英、方解石である。更に、一部には濁沸石が分布しており、本報告では図表化していない変質鉱物としてカリ長石も報告されている(HK-5井, HK-6井, HK-7井)。また、石英脈・方解石脈が多数分布している。これらの高温変質鉱物の多くは、本地域がより高温の中

性～弱アルカリ性熱水系環境（流体包有物の均質化最高温度は300℃以上）にあった過去の時期に生成したと推測される。

本地域で注目される点は、カオリナイト（及び明ばん石、ハロイサイト）が地下浅部～中部に広く出現することである。これらの鉱物は緑泥石、セリサイトとは共存しない傾向を持つ。その生成機構としては、熱水貯留層上部で蒸気・ガスの分離・滞在があり、CO₂、H₂S（酸化されてH₂SO₄化）の寄与によって酸性流体が生成して岩石の溶脱が進み、これらの変質鉱物が生成した可能性が高いと考えられる。特に南部で温度が直線的に上昇するHK-4井では、この酸性白色変質帯が深度800 mまで厚く発達し（第7図（2）参照）、恐らく深部からの蒸気・ガスの分離・滞在が長期間継続したことを示している。厚く発達する白色粘土化変質帯は、セルフシーリング帯を形成して地熱流体の上昇を規制する帽岩となり、その深度—温度プロフィールが直線的（熱伝導型）となることが知られているが、上述した坑井群についても同様の環境にあった（現在も一部継続中）と考えられる。上記の大規模な気液分離（沸騰）と酸性変質帯の発達は、近接する菱刈金鉱床の生成との関連が興味深い。

なお、本地域の地表調査では、NE-SW方向及びN-S方向に配列する傾向の多数の変質帯の分布が報告されている。特に、菱刈鉱山周辺には強粘土化変質（カオリナイトを含む）がNE-SW方向に広く分布するほか、北部のT-1井の東方には硅化変質帯を伴って強粘土化変質帯が広く分布している。

5.1.4 本宮地域

ここでは、基本的にNEDO（1994）及び原田・木戸（1995）に基づいて整理を行い、考察を加える。

[地域概要]

紀伊半島の南部、和歌山県南東部の「本宮」地域では、周辺の山地に囲まれて標高1,000 m以下の山地—渓谷が複雑に分布している（第8図（1）参照）。本地域には広く四万十層群（古第三系の音無川層）が厚く分布するが、その東方には中新世の熊野層群及び大峰—熊野酸性岩類が分布している。本地域にも岩脈類が分布するほか、坑井掘削によって同年代（～14 Ma）の石英斑岩が発見されている。本地域の断裂系分布では、NW-SE方向とNE-SW方向のものが卓越している。紀伊半島には第四紀火山は分布していないが、「本宮」地域の中央部には最高93℃・中性・低塩濃度・含S-Na-HCO₃-Cl型の湯の峰温泉などが湧出しており、非火山性の高温温泉—地熱地域（周辺の白浜、勝浦地域などを含めて）としてその起源に興味を持たれてきた。

本地域に隣接して北東方向には紀州鉱山、南東方向には妙法鉱山などがあり、大峰—熊野酸性岩類と概略同時期（～14 Ma）に生成したと考えられる銅などの

熱水性鉱脈系が広く分布している。「本宮」地域の地表調査によれば、各種の変質帯（珪化を含む）・石英脈帯の広域的・散点的な分布が認められており、特に湯の峰温泉（CO₂、H₂S濃度が高い）周辺などでは白色粘土化帯（カオリナイトに富む）の分布が報告されている。「本宮」地域の各坑井地質についても、普遍的に弱い珪化変質（炭酸塩化・鉱化を伴うが、温度異常は伴わない）が記述されている。

[坑井温度分布]

「本宮」地域では深度1,000 m級の坑井掘削は2本に限られている。第8図（2）・（3）・（4）に示すように、本地域ではNW-SE方向に配列する湯の峰～川湯温泉の北方の坑井（T-2井、HG-2井、T-3井、HG-1井）で、相対的に高い地温勾配が観測されている（HG-2井で最高測定温度105℃）。

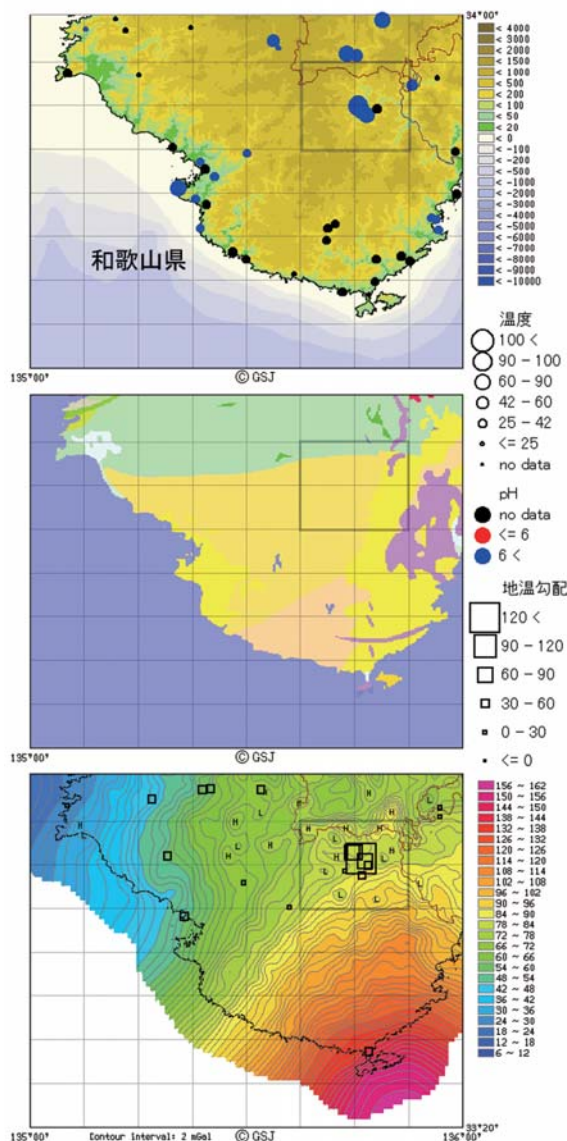
[坑井変質分布と地下環境推定]

「本宮」地域の地質構成は単調（大部分が古第三紀の音無川層の砂岩泥岩互層）で、分析・報告されている変質鉱物は非常に限定されている。第8図（2）・（3）・（4）に示すように、本地域で普遍的に分布する変質鉱物は緑泥石、セリサイト、方解石である（石英については省略されている）。また、深度1,000 m級の坑井では、一部にカオリナイト、濁沸石、硬石膏の存在も報告されている。

本地域の熱水系活動については、大峰—熊野酸性岩類の火成活動以降（～14 Ma）長期間継続しており、現在はその末期の低温化した段階にあたるという可能性がある。大石ほか（1995）は、上記坑井コア中に分布する細い鉱物脈中の流体包有物の均質化温度（分散が大きく最高350℃に達する）などから、この考え方を支持している。この場合、熱・熱水系活動の温度・熱流量の低下と変質の進行に伴う透水性の低下などによって、熱水系—温泉の分布は地域移動を経て局地限定化した可能性が高いと考えられる。これには、更に本地域の隆起—侵食（～14 Ma以降恐らく厚さ数km）による、深部高温変質—鉱化部の露出・冷却の効果を考慮する必要がある。

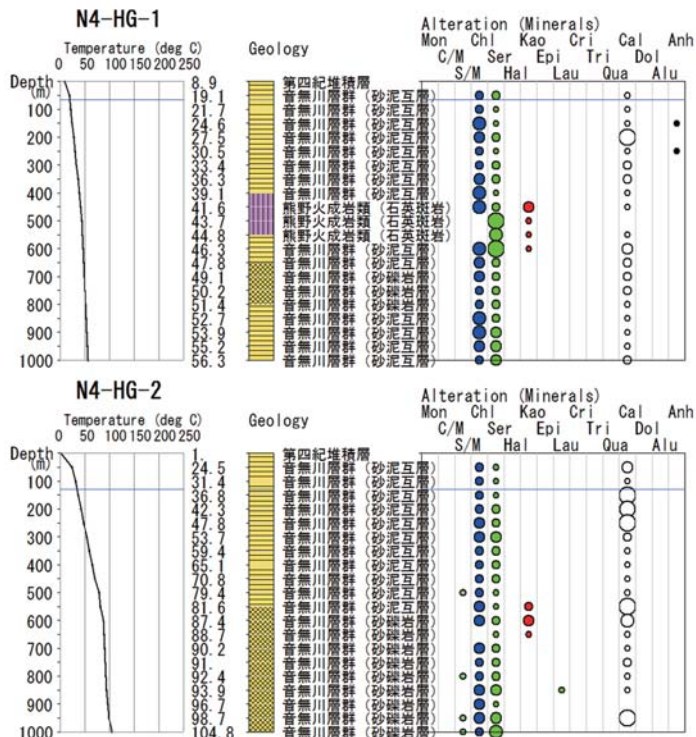
一方、本地域の現在の温泉の生成に係わる熱水系活動は、上記の長期的な活動（火成活動が熱源としてかなり古い）とは起源—生成機構が異なる新しいものであるという可能性もある。しかし、新しい熱水系—岩石変質の分布が、古い熱水系—岩石変質の分布に調和的に発達する場合、特に両者が低温～中温・中性・低塩濃度の熱水系の場合には、両者の区別は必ずしも容易ではない。したがって、本説では本地域の熱水系活動の起源—履歴については、これ以上の考察は加えない。

上記の坑井変質の中で新たに特に注目されるのは、カオリナイトの分布である。カオリナイトは、砂岩泥岩互層が卓越する音無川層の中に一部分布する砂礫岩



第8図(1) 「本宮」地域の広域概要図。20万分の1地勢図「田辺」の地球科学情報と第8図(4)の範囲を示す。上図は地形(標高・水深, m)と温泉(温度(°C)・pH), 中図は地質と第四紀火山(■), 下図はブーゲー重力異常(mGal)と地温勾配(°C/km)の各分布を示す。地質調査所(2000a, 2000b), 地質調査総合センター(2004, 2005)の電子データを用いて地質調査総合センター(2007)の方法により作成した。地質図の凡例は地質調査所(1995)を参照。

Fig. 8 (1) Regional outlines of the Hongu area. This figure shows earth-sciences information in and around the area (Fig. 8 (4)). The top, middle and bottom parts show topography (elevation-sea bottom depth, m) and hot-springs (temperature, (°C) and pH), geology and Quaternary volcanoes (solid square), and Bouguer gravity anomaly (mGal) and thermal gradient (°C/km), respectively (GSJ, 2000a, 2000b, 2004, 2005, 2007). Refer to GSJ (1995) for legend of geology.



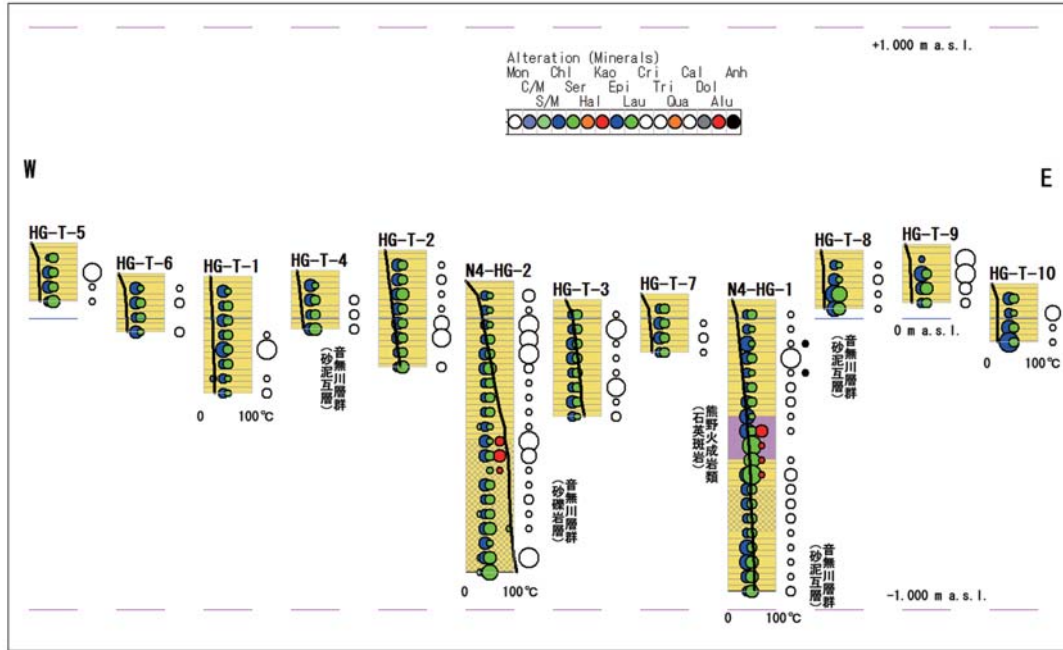
第8図(2) 「本宮」地域の個別坑井の検層・柱状データ(温度・地質・変質)の表示例。他の坑井の検層・柱状データについては、第8図(3)・(4)を参照。坑井データはNEDO(1994), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による。地質単元・変質鉱物については、第8表・第9表を参照。

Fig. 8 (2) Examples of single well logging and column data (temperature, geology and alteration) for the Hongu area. See Fig. 8 (3) and (4) for the logging and column data of other wells. Refer to NEDO (1994) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software. Refer to Tables 8 and 9 for the geologic units and alteration minerals.

層及び石英斑岩岩脈(大峰-熊野酸性岩類の貫入)の上部に分布している。同時に、そこは現在の地温勾配の変化部(浅部の急勾配から深部の緩勾配へ)にあたる(第8図(2))。この地温勾配の変化は、現在浅部が帽岩的で、深部が熱水貯留層的となっている環境に対応していると考えられる。

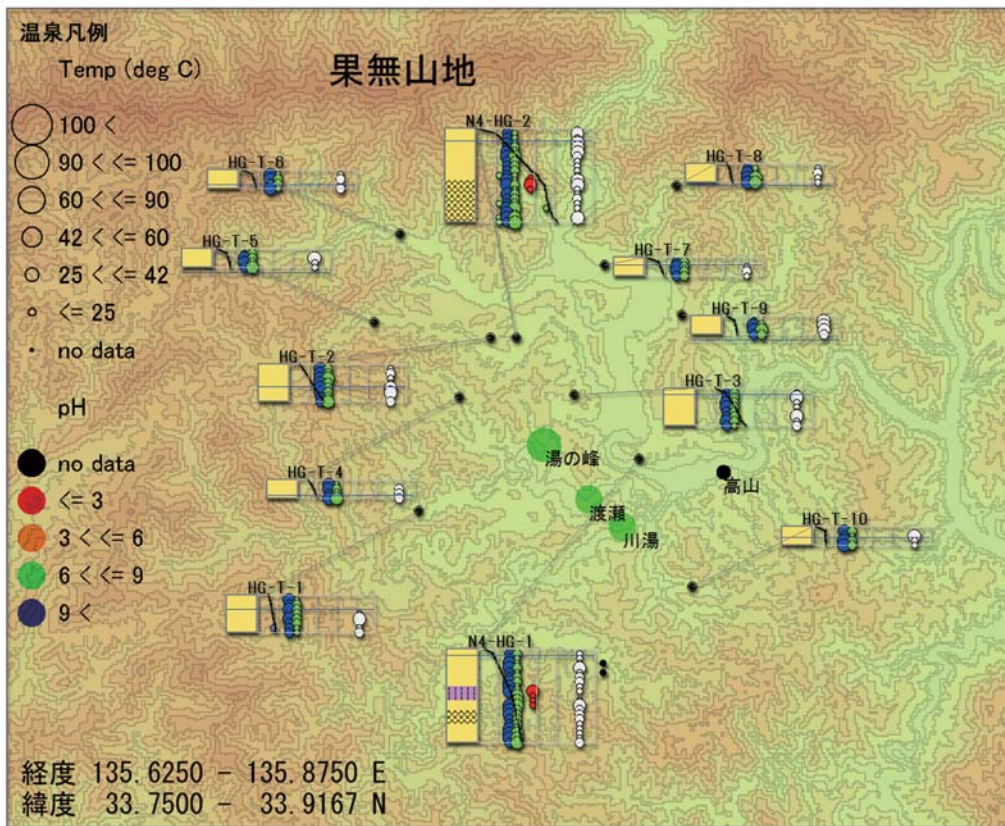
したがって、上記のカオリナイトの生成機構については、以下の可能性が高いと考えられる。すなわち、上記の場合では、深部から上昇する熱水が停滞し、熱水からのガス(CO₂・H₂Sガス)の分離-濃集-滞在-酸化が発生して酸性環境となり、岩石の溶脱が進んでカオリナイトを生成している。これによって正のフィードバックが働き、更に帽岩が成長し熱水の流動を妨げて、カオリナイトの生成を促進している。

前述したように「菱刈」地域において、カオリナイト変質帯の厚い発達セルフシーリング帯を形成している可能性を述べた。「本宮」地域においても熱水系の上部に発達するカオリナイト変質帯の分布が、地下の



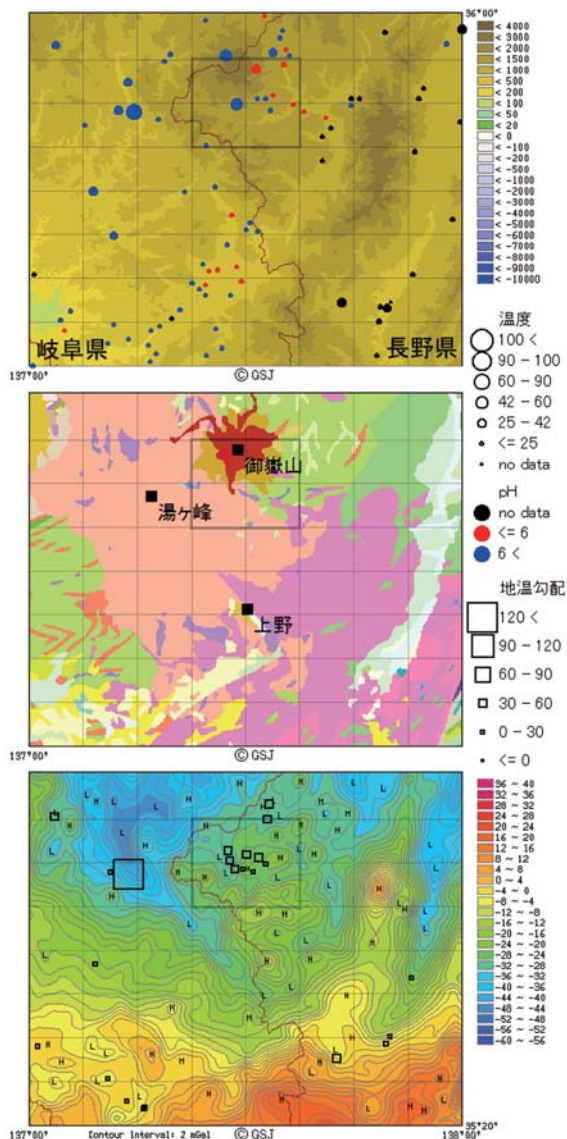
第8図(3) 「本宮」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の圧縮化した横並び表示. 坑井配列は左から右へ地域の西部→東部の順である(第8図(4)を参照). 坑井データはNEDO(1994), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による.

Fig. 8 (3) Compressed parallel display of well logging and column data for the Hongu area. The wells are shown west to east (left to right; refer to Fig. 8 (4)). Refer to NEDO (1994) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software.



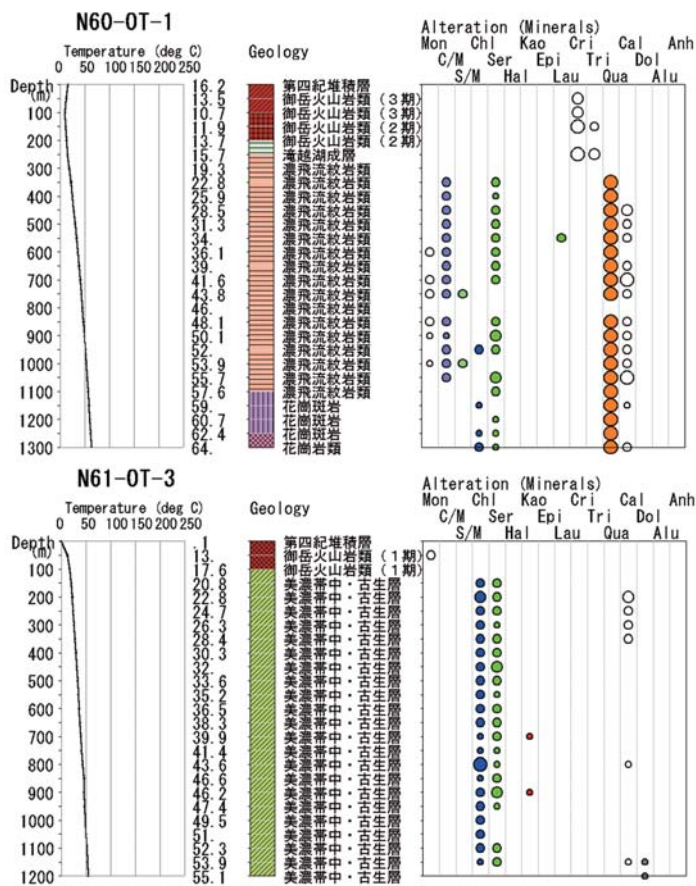
第8図(4) 「本宮」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の地図上統合表示. 地域概要は第8図(1)を, 詳細は第8図(3)及び本文を参照.

Fig. 8 (4) Integrated map of well logging and column data for the Hongu area. Refer to Fig. 8 (1) for the outline of the area, and Fig. 8 (3) and main text for details.



第9図(1) 「王滝」地域の広域概要図。20万分の1地勢図「飯田」の地球科学情報と第9図(4)の範囲を示す。上図は地形(標高・水深, m)と温泉(温度(°C)・pH), 中図は地質と第四紀火山(■), 下図はブーゲー重力異常(mGal)と地温勾配(°C/km)の各分布を示す。地質調査所(2000a, 2000b), 地質調査総合センター(2004, 2005)の電子データを用いて地質調査総合センター(2007)の方法により作成した。地質図の凡例は地質調査所(1995)を参照。

Fig. 9(1) Regional outlines of the Otaki area. This figure shows earth-sciences information in and around the area (Fig. 9(4)). The top, middle and bottom parts show topography (elevation-sea bottom depth, m) and hot-springs (temperature, (°C) and pH), geology and Quaternary volcanoes (solid square), and Bouguer gravity anomaly (mGal) and thermal gradient (°C/km), respectively (GSJ, 2000a, 2000b, 2004, 2005, 2007). Refer to GSJ (1995) for legend of geology.



第9図(2) 「王滝」地域の個別坑井の検層・柱状データ(温度・地質・変質)の表示例。他の坑井の検層・柱状データについては、第9図(3)・(4)を参照。坑井データはNEDO (1988), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による。地質単元・変質鉱物については、第8表・第9表を参照。

Fig. 9(2) Examples of single well logging and column data (temperature, geology and alteration) for the Otaki area. See Fig. 9(3) and (4) for the logging and column data of other wells. Refer to NEDO (1988) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software. Refer to Tables 8 and 9 for the geologic units and alteration minerals.

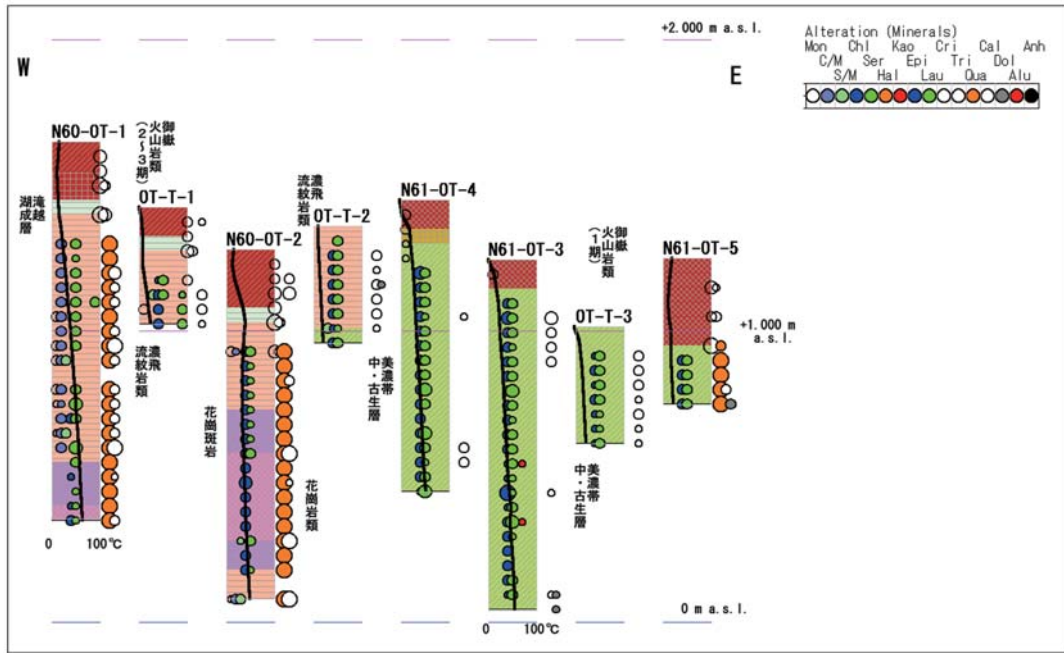
岩相, 岩脈, 断裂系の分布などに加えて現在の熱水流動系を更に規制し, 地表への熱水流出を限定化している可能性が高いと考えられる。このようなカオリナイトの分布は, HG-2井, HG-1井のみならず, 地温勾配が高い浅いT-2井, T-3井の周辺地下などにも広がっている可能性が高いと推測される。

5.1.5 王滝地域

ここでは, 基本的にNEDO (1988) 及び薦田 (1990) に基づいて整理を行い, 考察を加える。

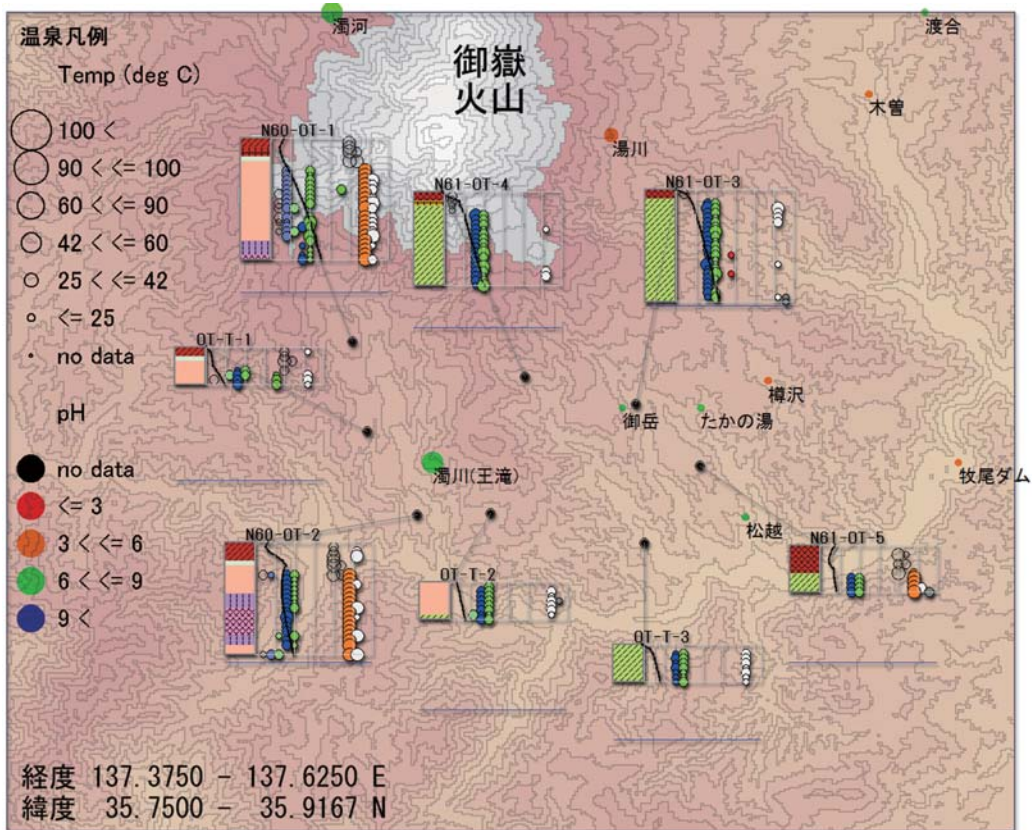
【地域概要】

「王滝」地域は, 長野県南西部, 飛騨山脈南端と美濃丘陵の境界部にあり, 木曾御嶽複成火山(標高3,068 m)の南側のW-E方向の山腹一溪谷域に位置している(第9図(1)参照)。本地域の基盤岩類は, 北東側は美濃帯の中・古生代の堆積岩類, 南西側は中生代の濃飛



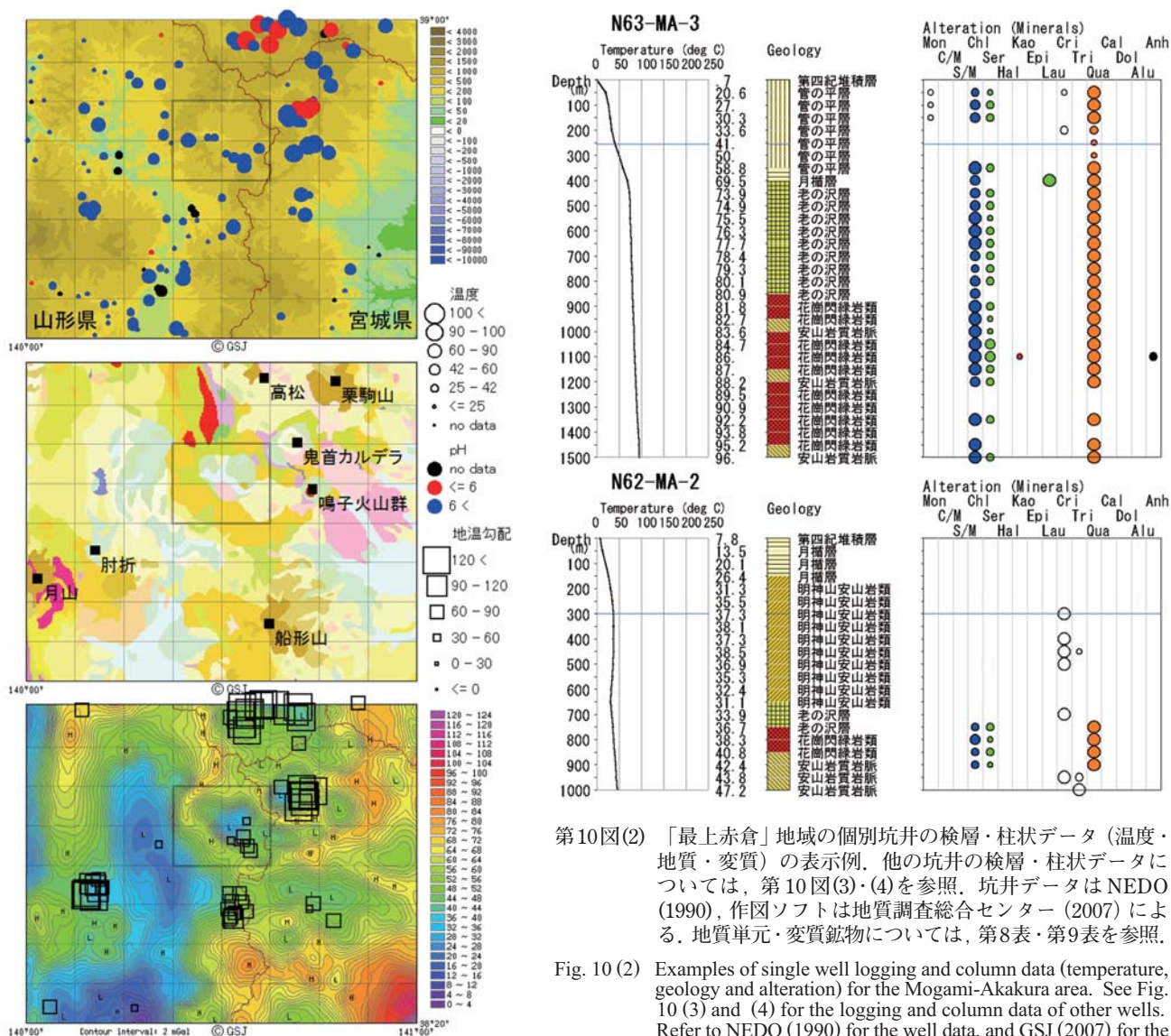
第9図(3) 「王滝」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の圧縮化した横並び表示。坑井配列は左から右へ地域の西部→東部の順である(第9図(4)を参照)。坑井データはNEDO(1988)、作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による。

Fig. 9 (3) Compressed parallel display of well logging and column data for the Otaki area. The wells are shown west to east (left to right; refer to Fig. 9 (4)). Refer to NEDO (1988) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software.



第9図(4) 「王滝」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の地図上統合表示。地域概要は第9図(1)を、詳細は第9図(3)及び本文を参照。

Fig. 9 (4) Integrated map of well logging and column data for the Otaki area. Refer to Fig. 9 (1) for the outline of the area, and Fig. 9 (3) and main text for details.



第10図(1) 「最上赤倉」地域の広域概要図。20万分の1地勢図「新庄」南半部と「仙台」北半部の地球科学情報と第10図(4)の範囲を示す。上図は地形(標高・水深, m)と温泉(温度(°C)・pH), 中図は地質と第四紀火山(■), 下図はブーゲー重力異常(mGal)と地温勾配(°C/km)の各分布を示す。地質調査所(2000a, 2000b), 地質調査総合センター(2004, 2005)の電子データを用いて地質調査総合センター(2007)の方法により作成した。地質図の凡例は地質調査所(1995)を参照。

Fig. 10 (1) Regional outlines of the Mogami-Akakura area. This figure shows earth-sciences information in and around the area (Fig. 10 (4)). The top, middle and bottom parts show topography (elevation-sea bottom depth, m) and hot-springs (temperature, (°C) and pH), geology and Quaternary volcanoes (solid square), and Bouguer gravity anomaly (mGal) and thermal gradient (°C/km), respectively (GSJ, 2000a, 2000b, 2004, 2005, 2007). Refer to GSJ (1995) for legend of geology.

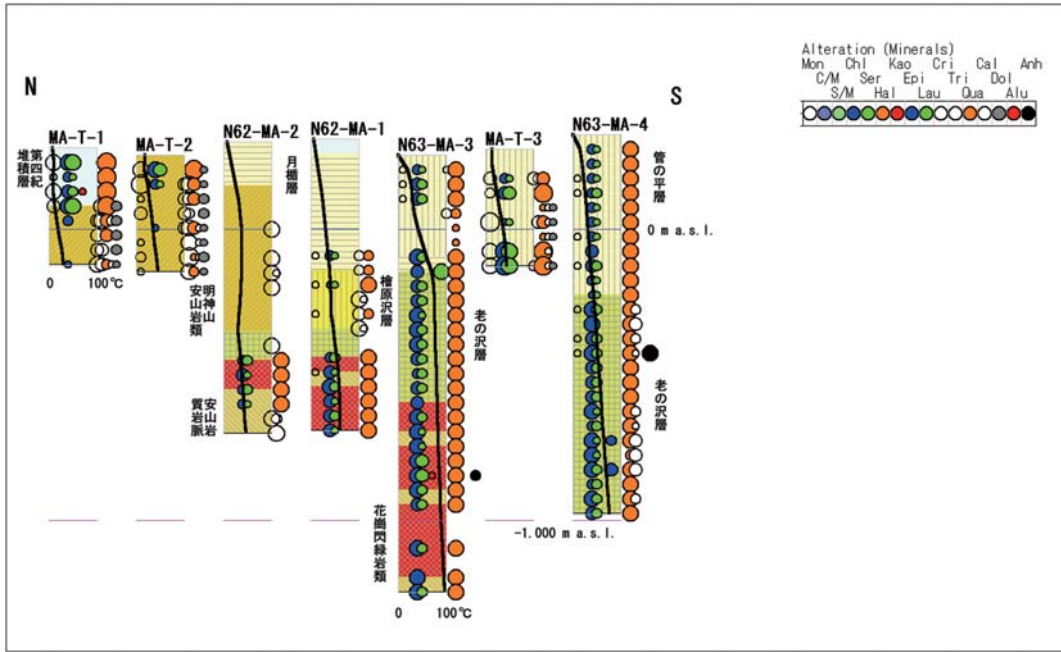
第10図(2) 「最上赤倉」地域の個別坑井の検層・柱状データ(温度・地質・変質)の表示例。他の坑井の検層・柱状データについては、第10図(3)・(4)を参照。坑井データはNEDO(1990), 作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による。地質単元・変質鉱物については、第8表・第9表を参照。

Fig. 10 (2) Examples of single well logging and column data (temperature, geology and alteration) for the Mogami-Akakura area. See Fig. 10 (3) and (4) for the logging and column data of other wells. Refer to NEDO (1990) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software. Refer to Tables 8 and 9 for the geologic units and alteration minerals.

流紋岩類～花崗岩類から構成され、両基盤岩類の境界部(NW-SE方向の濃飛岩体東縁破砕帯)を跨いで、その上に第四紀の御嶽火山岩類が分布している。御嶽火山の周辺には比較的多数の温度60°C以下の温泉が分布しており、本地域の西部～中央部では中性、東部では酸性となっている。なお、御嶽火山では1979年に山頂部近傍で爆発活動があり、また本地域周辺を震源として1984年に長野県西部地震が発生し、岩屑なだれによる被害を生じた。

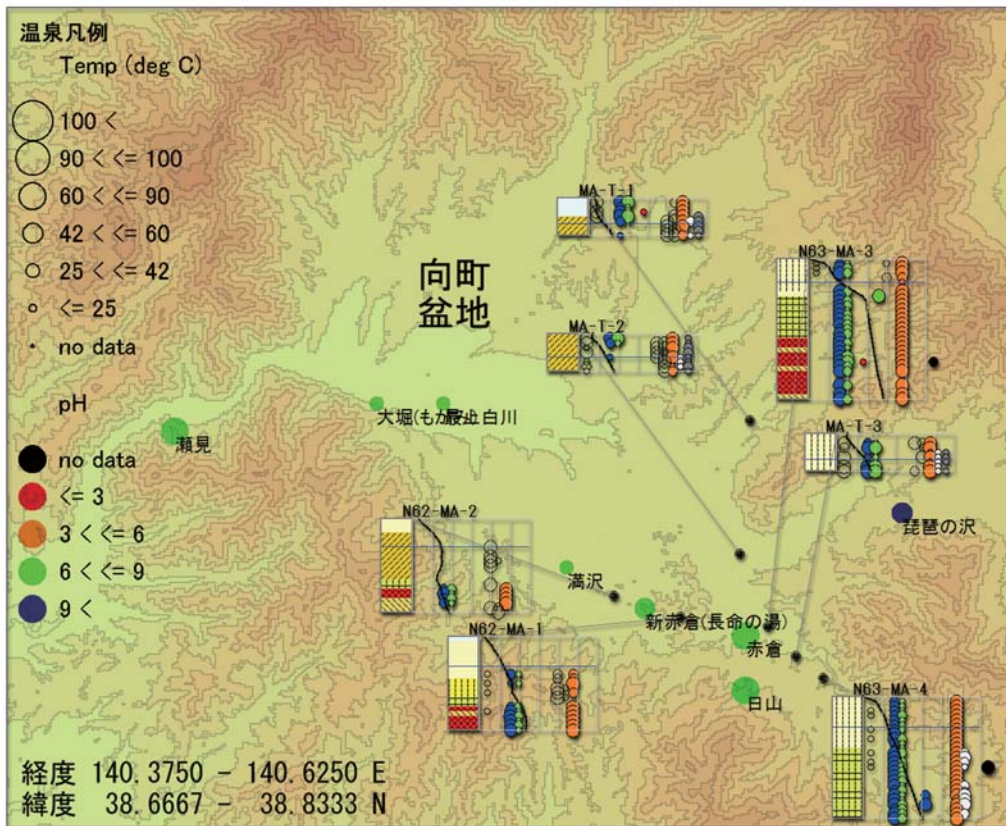
【坑井温度分布】

「王滝」地域の坑井調査では、第9図(2)・(3)・(4)に示すように地温勾配がかなり低く、最高温度は64°C(最西部のOT-1井, 深度約1,300 m)である。地温勾配は、基盤岩類中では直線的であるが、最大厚さ400 m程度の御嶽火山岩類中では屈曲が認められる。すなわ



第10図(3) 「最上赤倉」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の圧縮化した比較表示。坑井配列は左から右へ地域の北部→南部の順である(第10図(4)を参照)。坑井データはNEDO(1990)、作図ソフトは地質調査総合センター(2007)による。

Fig. 10 (3) Compressed parallel display of well logging and column data for the Mogami-Akakura area. The wells are shown north to south (left to right; refer to Fig. 10 (4)). Refer to NEDO (1990) for the well data, and GSJ (2007) for the drawing software.



第10図(4) 「最上赤倉」地域の坑井検層・柱状データ(温度・地質・変質)の地図上統合表示。地域概要は第10図(1)を、詳細は第10図(3)及び本文を参照。

Fig. 10 (4) Integrated map of well logging and column data for the Mogami-Akakura area. Refer to Fig. 10 (1) for the outline of the area, and Fig. 10 (3) and main text for details.

第6表 地熱開発促進調査「阿蘇山西部」・「八丈島」・「菱刈」・「本宮」・「王滝」・「最上赤倉」地域の概要。

Table 6 Outlines of the Asosan-Seibu, Hachijojima, Hishikari, Hongu, Otaki and Mogami-Akakura areas of NEDO's Geothermal Development Promotion Survey (data are after NEDO).

本報告の地域番号 地域名 都道府県	(1) 阿蘇山西部 熊本県北東部	(2) 八丈島 東京都伊豆諸島	(3) 菱刈 鹿児島県北西部	(4) 本宮 和歌山県南東部	(5) 王滝 長野県南西部	(6) 最上赤倉 山形県北東部	
地域の地勢	九州中央部地溝内	伊豆諸島の火山島	薩摩半島北方の丘陵-盆地境界域	紀伊山地南部の複雑な山地-渓谷域	飛騨山地-美濃高原境の渓谷域	東北脊梁山地西方の山間盆地南縁	
近傍活火山との関係	阿蘇火山西部の中央火口丘-カルデラ底-外輪壁外	八丈島東山火山の中央部~南西山麓	東方に加久藤カルデラ・霧島火山	近傍に活火山なし	北方に御嶽火山	東方に鬼首カルデラ・鳴子火山	
近傍の代表的温泉#	垂玉 (92℃, pH 7.5, 酸性-含S-Na-SO4 (H2S)型)	八丈湯浜 (69℃, pH 6.5, Na-Cl型)	吉松 (72℃, pH 8.5, 含As-Na-Cl-HCO3型)	湯の峰 (93℃, pH 7.6, 含S-Na-HCO3-Cl型)	湯川 (47℃, pH 6.4, Na-Cl型)	赤倉 (74℃, pH 8.2, Na-Ca-SO4型)	
	湯の谷 (73℃, pH 7.6, 単純酸性型)	中の郷 (57℃, pH 6.5, Na-Cl型)	菱刈鉾山 (66℃, pH 6.6, Na-HCO3-Cl型)	川湯 (70℃, pH 8.0, Na-HCO3-Cl型)	湯川 (28℃, pH 5.9, Na-Ca-SO4型)	日山 (69.2℃, pH 8.3, Ca-Na-SO4型)	
浅部地質	第四紀火山岩類	第四紀火山岩類	第四紀火山岩類 (菱刈安山岩類)	熊野酸性岩類, 四万十層群	御嶽火山岩類	第四紀-新第三紀火山岩・堆積岩類	
基盤岩類	火成岩類, 中・古生代変成岩類	新第三紀層	四万十層群	四万十層群	濃飛火砕岩類, 中・古生代堆積岩類	中生代火成岩類	
調査井本数 (合計)		10	8	10	12	8	7
(0 - 250m)		0	0	0	7	0	0
(250 - 750m)		3	1	4	3	4	3
(750 - 1250m)		4	4	4	2	3	2
(1250-1750m)		3	3	3	0	1	2
坑内最高温度(℃)		217	317	118	104	64	97
文献	NEDO (1995) 吉岡ほか (1996)	NEDO (1993) 石川 (1994)	NEDO (1991) 加藤 (1992)	NEDO (1994) 原田ほか (1995)	NEDO (1988) 藤田 (1990)	NEDO (1990) 加藤 (1991)	

6地域ともに、温泉データは地質調査総合センター (2005) の一覧表による。

ち、前者は不透水性の熱伝導領域、後者は不均一で一部が透水性の高い環境となっていると考えられる。なお、両者を境する先御嶽火山岩・滝越湖成層は、温度分布特性の境界となっており、不透水性で降水起源地地下水の底岩となっていると推定される。特に、濁川温泉の南方で掘削されたOT-2井については、御嶽火山岩類中では下部に地温勾配の急上昇、濃飛流紋岩類-花崗岩類の最上部では温度一定化が認められ、御嶽火山岩類の下部を流動する温水の影響によって、基盤岩類上部の温度が影響を受けている可能性が指摘される。

[坑井変質分布と地下環境推定]

「王滝」地域の坑井調査結果では、現在流体流動の通路となっている断裂系の分布に乏しく、また高温変質鉱物の出現に乏しい。第9図 (2)・(3)・(4) に示すように、基盤岩類中の変質鉱物としては、緑泥石、セリサイト、方解石がかなり普遍的に分布しているが、これらは先第四紀の高温変質-変成環境で生成した可能性が高い。なお、OT-1井などの濃飛流紋岩類中にはモンモリロナイト、方解石の細脈が分布しており、第四紀の低温熱水変質の可能性が指摘されている。また、

濃飛流紋岩類中には一部に濁沸石が、中・古生代堆積岩類では一部にカオリナイトが検出されているが、これらの起源は明らかではない。一方、浅部の御嶽火山岩類は高温変質鉱物に乏しく、モンモリロナイト、クリストバル石、鱗珪石、方解石などが報告されている程度である。

御嶽火山周辺の中性~酸性の温泉の分布は、カルデラ構造を伴う御嶽火山の地下のマグマ-熱水系活動がその起源となっていると考えられる。しかし、上述したように「王滝」地域の坑井調査は、温度がかなり低く高温変質鉱物にも乏しい結果であった。したがって、本地域とその周辺では、恐らくいくつかの熱水系が御嶽火山の中心部~山腹域で生成しており、比較的低温の熱水が少数の限られた地下経路を地形に沿って水平的に流動 (~第四紀火山岩類中を流下) している可能性が高いと考えられる。

なお、本地域の地表調査では、西部のOT-1井とT-1井の西方に明ばん石を含む変質帯が分布しており、過去にはこの地域でも古御嶽火山-御嶽火山のマグマ-熱水系活動を起源とした酸性の熱水活動が存在したこ

第7表 地熱開発促進調査「阿蘇山西部」・「八丈島」・「菱刈」・「本宮」・「王滝」・「最上赤倉」地域の調査坑井情報一覧表(データはNEDO(1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990)などによる;旧日本測地系を使用)。

Table 7 List of survey-well information for the Asosan-Seibu, Hachijojima, Hishikari, Hongu, Otaki and Mogami-Akakura areas of NEDO's Geothermal Development Promotion Survey (data are after NEDO (1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990); Tokyo Datum is used).

番号 (暫定)	坑井名	経度 (deg E)	緯度 (deg N)	坑口 標高 (m)	掘削 深度 (m)	坑底温度 温度 (°C)	S. T. (h)	坑内最高温度 温度 (°C)	坑内最高温度 深度 (m)	S. T. (h)	傾斜 井(1)
(1) 阿蘇山西部地域 (深度500 m以上の3坑井は省略)											
1	N3-AS-1	131.0225	32.9689	520.0	1000.0	77.3	120	77.3	1000	120	0
2	N3-AS-2	131.0242	32.8547	475.0	1200.0	108.3	120	108.3	1200	120	0
3	N3-AS-3	131.0236	32.8767	620.0	1800.0	154.0	120	154.0	1800	120	0
4	N4-AS-4	130.9928	32.8475	445.0	1200.0	85.7	120	85.7	1200	120	0
5	N4-AS-5	130.9486	32.8678	185.0	1200.0	77.8	120	77.8	1200	120	0
6	N5-AS-6	131.0333	32.8692	709.0	1700.0	191.4	120	191.4	1700	120	1
7	N5-AS-7	131.0314	32.8639	630.0	1700.0	197.6	120	197.6	1700	120	1
(2) 八丈島地域											
1	N1-HJ-1	139.7836	33.1153	121.0	1000.0	56.2	120	56.2	1000	120	0
2	N1-HJ-2	139.7936	33.0725	110.0	1300.0	147.8	120	147.9	1200	120	0
3	N1-HJ-3	139.8533	33.0864	150.0	1003.0	68.9	120	68.9	1003	120	0
4	N2-HJ-4	139.8242	33.0839	567.2	1500.0	181.6	120	181.6	1500	120	0
5	N2-HJ-5	139.8158	33.0714	218.8	510.9	250.0	120	250.9	520	120	0
6	N2-HJ-6	139.8411	33.0733	178.3	1000.0	81.3	120	81.3	1000	120	0
7	N3-HJ-7	139.8111	33.0736	257.0	1500.0	299.3	120	316.6	1200	120	0
8	N3-HJ-8	139.8061	33.0689	161.4	1200.0	263.8	120	298.0	1200	120	0
(3) 菱刈地域											
1	HK-T-1	130.6908	32.0550	318.0	400.0	42.1	721	42.1	400	721	0
2	HK-T-2	130.6686	32.0378	236.0	400.0	29.5	720	29.5	400	720	0
3	HK-T-3	130.6911	31.9908	237.0	400.0	49.3	724	49.7	320	724	0
4	N62-HK-1	130.6683	32.0181	197.0	1001.5	73.0	120	73.0	1000	120	0
5	N62-HK-2	130.7031	32.0081	295.0	1002.0	99.0	409	99.0	1000	409	0
6	N63-HK-3	130.6997	32.0208	355.0	1001.5	67.0	120	67.0	1000	120	0
7	N63-HK-4	130.7139	32.0022	450.0	1501.6	113.6	120	113.6	1500	120	0
8	N63-HK-5	130.6836	31.9939	240.0	1201.0	95.2	120	99.4	220	120	0
9	N1-HK-6	130.7181	32.0075	470.0	1501.5	118.2	120	118.2	1500	120	1
10	N1-HK-7	130.6833	31.9978	228.0	1502.6	106.3	120	106.3	1500	120	0
(4) 本宮地域											
1	HG-T-1	135.7272	33.8144	145.0	400.0	23.6	720	23.6	400	720	0
2	HG-T-2	135.7450	33.8497	235.0	400.0	45.1	720	45.1	400	720	0
3	HG-T-3	135.7658	33.8381	65.0	400.0	64.8	720	64.8	400	720	0
4	HG-T-4	135.7372	33.8375	165.0	200.0	25.6	720	25.6	200	720	0
5	HG-T-5	135.7161	33.8528	260.0	200.0	22.2	720	22.2	200	720	0
6	HG-T-6	135.7225	33.8708	155.0	200.0	22.8	720	22.8	200	720	0
7	HG-T-7	135.7733	33.8644	85.0	200.0	25.0	120	25.0	200	120	0
8	HG-T-8	135.7911	33.8806	235.0	200.0	20.3	720	20.3	200	720	0
9	HG-T-9	135.7925	33.8542	255.0	200.0	19.7	720	19.7	200	720	0
10	HG-T-10	135.7950	33.7989	120.0	200.0	16.9	720	16.9	200	720	0
11	N4-HG-1	135.7819	33.8250	65.0	1002.0	56.5	120	56.5	1002	120	0
12	N4-HG-2	135.7514	33.8497	130.0	1002.0	104.8	120	104.8	1002	120	0
(5) 大滝地域											
1	OT-T-1	137.4644	35.8314	1425.0	401.5	24.3	734	24.3	401	734	0
2	OT-T-2	137.4950	35.8147	1360.0	401.0	19.5	667	19.5	401	667	0
3	OT-T-3	137.5331	35.8086	1015.0	401.1	20.9	786	20.9	401	786	0
4	N60-OT-1	137.4606	35.8497	1650.0	1293.0	64.2	1680	64.2	1293	1680	0
5	N60-OT-2	137.4767	35.8144	1280.0	1200.0	48.3	125	48.3	1204	125	0
6	N61-OT-3	137.5311	35.8369	1245.0	1203.0	55.3	7200	55.3	1202	7200	0
7	N61-OT-4	137.5036	35.8425	1450.0	1002.5	51.3	4320	51.3	1001	4320	0
8	N61-OT-5	137.5469	35.8244	1250.0	502.0	21.0	7200	21.2	2	7200	0
(6) 最上赤倉地域											
1	MA-T-1	140.5594	38.7494	280.0	403.0	30.6	720	30.6	400	720	0
2	MA-T-2	140.5569	38.7222	255.0	402.0	45.0	720	45.0	400	720	0
3	MA-T-3	140.5708	38.7014	275.0	403.0	44.7	720	44.7	400	720	0
4	N62-MA-1	140.5422	38.7094	310.0	1002.0	60.5	120	60.5	1002	120	0
5	N62-MA-2	140.5256	38.7136	300.0	1002.0	47.2	120	47.2	1000	120	0
6	N63-MA-3	140.5639	38.7075	255.0	1501.3	97.3	120	97.3	1510	120	0
7	N63-MA-4	140.5775	38.6969	325.0	1303.5	76.0	120	76.0	1306	120	0

S. T. は、坑井内への送水停止後の経過時間である。

とを示している。本地域の坑井については、流体包有物の均質化温度などは報告されていない。熱水性鉱脈型鉱床などの分布についても、本地域の周辺には報告されていない。

5.1.6 最上赤倉地域

ここでは、基本的にNEDO(1990)及び加藤(1991)に基づいて整理を行い、考察を加える。

[地域概要]

山形県北東部の「最上赤倉」地域は、奥羽脊梁山脈の西側に負のブーゲー重力異常地を形成している向町

盆地の南東縁部に位置している(第10図(1)参照)。本地域の基盤岩類は、主に中生代の花崗閃緑岩類で、新第三紀—第四紀前期の火山碎屑岩類・堆積岩類が最大厚1,000 m以上分布(調査地域最東部のMA-4井)しており、T-1井—T-2井の周辺には第四紀の明神山安山岩類が分布している。盆地の南部には、最高74℃・中性・低塩濃度・Na-Ca-SO₄型の赤倉温泉などが分布している。活動的な火山としては、東方に脊梁山脈を越えて鬼首カルデラ、鳴子火山群がある。

[坑井温度分布]

「最上赤倉」地域では調査井の温度分布は、第10図(2)・(3)・(4)に示すように赤倉温泉近傍のMA-3井などで高く、北方と西方に離れたT-1井、MA-2井で低い傾向にある。MA-3井の温度プロファイル(地域最高温度、97℃)では、第四系(管の平層、堆積岩が卓越)と新第三系(老の沢層)・基盤岩類(主に花崗閃緑岩類、多数の断層を含む)との境界に地温勾配の大きな変化が認められ、前者が帽岩的、後者が熱水系的な環境になっていると推測される。一方、中心部から西方に配列するMA-3井→MA-1井→MA-2井の温度分布の関係、特に最西部のMA-2井(明神山安山岩類中)に出現する高温分布の形状から、低温熱水の水平的な流動(赤倉温泉(高温)→新赤倉温泉→満沢温泉(低温)への方向)が推定される。

[坑井変質分布と地下環境推定]

「最上赤倉」地域の坑井調査結果では、第10図(2)・(3)・(4)に示すように新第三系～基盤岩類中に中温～高温変質鉱物として、緑泥石、セリサイト、石英、方解石がかなり普遍的に分布している。これらは、先第四紀の各種変質作用と第四紀の熱水変質作用との重複によって複雑に分布している可能性が高い。そのほか、一部に苦灰石のほか、カオリナイト、緑れん石、濁沸石、硬石膏なども散点的に分布している。

興味深い点は、調査地域北部の浅いT-1井、T-2井において、地表近傍から第四紀堆積層・明神山安山岩中に緑泥石、セリサイト、石英、方解石、苦灰石が分布していることで、過去に比較的高温の熱水系環境を経過したことを示唆している(なお、第四紀堆積層の緑泥石、セリサイトについては、礫などに含まれる異地成のものという指摘がある)。同様に、調査地域中央部～東南部のMA-3井、T-3井、MA-4井においても、やや古い第四紀(更新統下部)の菅の平層に上記の鉱物群が分布している。一方、調査地域西部のMA-2井では、深度700 m程度までの明神山安山岩類に上記の鉱物群が出現せず、高温の熱水系環境を経過していないと推測される。

上記の本地域の温度構造、温泉分布、変質分布などは、現在では赤倉温泉付近に限られた地域において深部から花崗閃緑岩類—新第三系中の断層系を通じて熱

第8表 地熱開発促進調査「阿蘇山西部」・「八丈島」・「菱刈」・「本宮」・「王滝」・「最上赤倉」地域の坑井の主要な地質単元 (NEDO (1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990) を簡略化) とその共通化コード一覧表 (暫定版).

Table 8 List of major geologic units in wells of the Asosan-Seibu, Hachijojima, Hishikari, Hongu, Otaki and Mogami-Akakura areas of NEDO's Geothermal Development Promotion Survey (simplified from NEDO (1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990)), and their commonized codes (temporal version).

地質時代	暫定コード	阿蘇山西部地域 Asosan-Seibu	暫定コード	八丈島地域 Hachijojima	暫定コード	菱刈地域 Hishikari	暫定コード	本宮地域 Hongu	暫定コード	大滝地域 Otaki	暫定コード	最上赤倉地域 Mogami-Akakura	
第四紀	420	新期中央火口丘群火山岩類	440	西山火山体	400	第四紀堆積層	400	第四紀堆積層	400	第四紀堆積層	400	第四紀堆積層	
	410	旧期中央火口丘群火山岩類	430	伊郷名マグマ	370	加久藤層群				360	御嶽火山岩類(4期)	330	明神山安山岩類
	380	久木野層など	420	東山火山体	360	菱刈上部安山岩類				350	御嶽火山岩類(3期)	320	月橋層
	370	長野潜在火山の火山岩類	410	八丈島地溝層	350	般若寺溶結凝灰岩				340	御嶽火山岩類(2期)	310	管の平層
	360	白水層			340	獅子間野デイサイト				330	滝越湖成層		
	350	阿蘇-4火砕流堆積物	320	古八丈島礫層	330	菱刈中部安山岩類				320	御嶽火山岩類(1期)		
	340	阿蘇-3火砕流堆積物	310	先東山火山噴出物	320	黒園山デイサイト				310	先御嶽火山岩類		
	330	阿蘇-2火砕流堆積物			310	菱刈下部安山岩類							
	320	阿蘇-1火砕流堆積物											
	310	先阿蘇火山岩類											
新第三紀	210	各種火山岩類	210	新第三紀層	210	霧島溶結凝灰岩類	220	大塚-熊野酸性岩類	210	熊野層群		250	黒色安山岩類
												240	奥州山層
												230	檜原沢層
												220	老の沢層
												210	安山岩質岩脈
古第三紀								140	牟田層群				
								130	音無川層群(砂礫岩層)				
								120	音無川層群(砂泥互層)				
白亜紀以前	199	火山岩類			110	四万十層群	110	日高川層群	180	濃飛流軟岩類	160	花崗閃緑岩類	
	140	カタクラサイト							170	花崗斑岩			
	130	超塩基性岩類							160	花崗岩類			
	120	花崗岩類							110	美濃帯中・古生層			
	110	変成岩類											

第9表 地熱開発促進調査「阿蘇山西部」・「八丈島」・「菱刈」・「本宮」・「王滝」・「最上赤倉」地域の坑井の主要な出現変質鉱物 (NEDO (1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990) を簡略化) とその共通化コード一覧表 (暫定版).

Table 9 List of major alteration minerals in wells of the Asosan-Seibu, Hachijojima, Hishikari, Hongu, Otaki and Mogami-Akakura areas of NEDO's Geothermal Development Promotion Survey (simplified from NEDO (1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990)), and their commonized codes (temporal version).

鉱物グループ名 鉱物名 (23種)	暫定コード	概略の生成環境			地域毎に処理対象とした変質鉱物の番号									
		温度	pH		1阿蘇	2八丈	3菱刈	4本宮	5王滝	6最上赤倉				
		低	中	高	低	中	高	山西部	島					
沸石鉱物(珪酸塩鉱物)														
斜方沸石	Cli	◎			△	△			1					
モルデン沸石	Mor	◎			△	△			2					
濁沸石	Lau	◎			△	△			3	9	9	9	9	
ワイラケ沸石	Wai		◎		△	△			4					
粘土鉱物(珪酸塩鉱物)														
モンモリロナイト	Mon	◎			△	△		1	5	1	1	1	1	
緑泥石/モンモリロナイト	Chl/Mon	◎			△	△		2	6	2	2	2	2	
セリサイト/モンモリロナイト	Ser/Mon	◎			△	△		3	7	3	3	3	3	
緑泥石	Chl	◎			△	△		4	8	4	4	4	4	
セリサイト	Ser	◎			△	△		5	9	5	5	5	5	
ハロイサイト	Hal	◎			△	△				6	6	6	6	
カオリナイト	Kao	◎			▽			6	10	7	7	7	7	
パイロフィライト	Pyr		◎		▽				11					
その他(珪酸塩鉱物)														
緑れん石	Epi		◎		△	△				8	8	8	8	
アクチノ閃石	Act		◎		△	△			12					
シリカ鉱物(珪酸塩鉱物)														
オパール	Opa	◎			△	△	△	7						
クリストバル石	Cri	◎			△	△	△	8	13	10	10	10	10	
鱗珪石	Tri	◎			△			9	14	11	11	11	11	
石英	Qua	◎	◎		△	△	△	10	15	12	12	12	12	
炭酸塩鉱物														
方解石	Cal	◎	◎		△	△		11	16	13	13	13	13	
苦灰石	Dol	◎	◎		△	△		12	17	14	14	14	14	
硫酸塩鉱物														
明ばん石	Alu	◎	◎	◎	▽				18	15	15	15	15	
硬石膏	Anh	◎	◎	◎	△	△	△		19	16	16	16	16	
硫化鉱物														
黄鉄鉱	Pyri	◎	◎	◎	△	△	△		20					

本表は、金原(1982a)を簡略化した。本報告の鉱物分析は、X線回折分析法によって半定量的に行われている。概略の温度は、低温、100℃未満;中温、100 - 200℃;高温、200℃以上。▽は、特に低pHを指示する鉱物種である。

第10表 地熱開発促進調査「阿蘇山西部」・「八丈島」・「菱刈」・「本宮」・「王滝」・「最上赤倉」地域の地形・地質・地熱・変質環境の比較(データはNEDO(1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990)による)と熱水系環境の推定.

Table 10 Comparisons of geographic, geologic, geothermal and alteration environments of the Asosan-Seibu, Hachijojima, Hishikari, Hongu, Otaki and Mogami-Akakura areas of NEDO's Geothermal Development Promotion Survey (data are after NEDO (1995, 1993, 1991, 1994, 1988, 1990)), and their estimated hydrothermal environments.

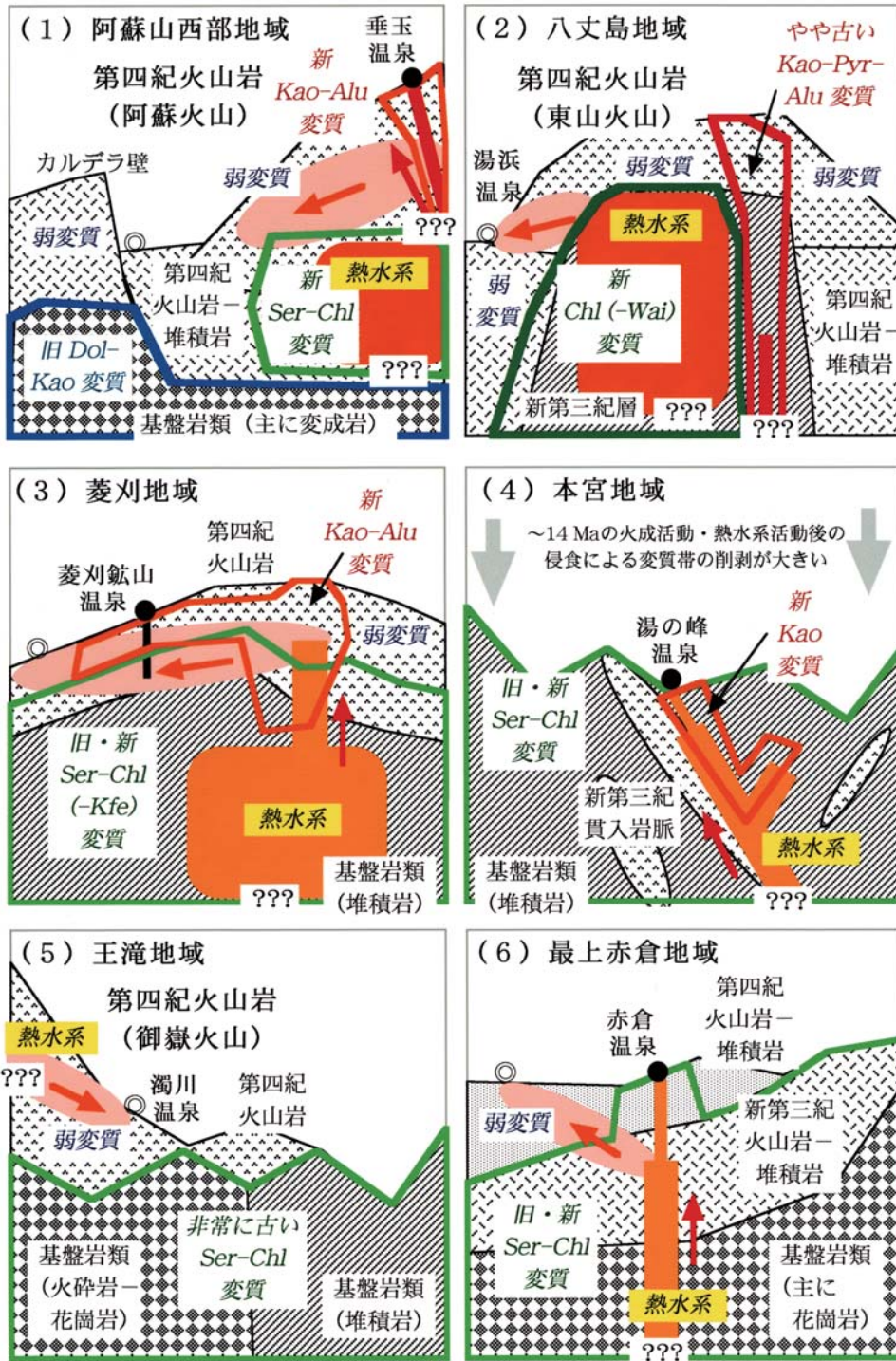
本報告の地域番号 地域名 都道府県	(1) 阿蘇山西部 熊本県北東部	(2) 八丈島 東京都伊豆諸島	(3) 菱刈 鹿児島県北西部	(4) 本宮 和歌山県南東部	(5) 王滝 長野県南西部	(6) 最上赤倉 山形県北東部
地域の地勢	九州中央部地溝内	伊豆諸島の火山島	薩摩半島北方の丘陵—盆地境界域	紀伊山地南部の複雑な山地—渓谷域	飛騨山地—美濃高原境の渓谷域	東北脊梁山地西方の山間盆地南縁
近傍活火山との関係	阿蘇山西部の中央火口丘—カルデラ底—外輪壁外	八丈島東山火山の中央部—南西山麓	東方に加久藤カルデラ・霧島火山	近傍に活火山なし	北方に御岳火山	東方に鬼首カルデラ・鳴子火山
近傍の代表的温泉	垂玉(92℃, pH 7.5, 酸性-含S-Na-SO ₄ (H ₂ S)型)	八丈湯浜(69℃, pH 6.5, Na-Cl型)	吉松(72℃, pH 8.5, 含As-Na-Cl-HCO ₃ 型)	湯の峰(93℃, pH 7.6, 含S-Na-HCO ₃ -Cl型)	濁川(47℃, pH 6.4, Na-Cl型)	赤倉(74℃, pH 8.2, Na-Ca-SO ₄ 型)
浅部地質	第四紀火山岩類	第四紀火山岩類	第四紀火山岩類(菱刈安山岩類)	熊野酸性岩類, 四万十層群	御岳火山岩類	第四紀—新第三紀火山岩・堆積岩類
基盤岩類	火成岩類, 中・古生代変成岩類	新第三紀層	四万十層群	四万十層群	濃飛火砕岩類, 中・中生代火成岩類, 古生代堆積岩類	
調査井本数(合計) (内1000 m <)	10 7	8 7	10 7	12 2	8 4	7 4
坑内最高温度(℃)	217	317	118	104	64	97
坑井変質の特徴 (石英・方解石は除外した)	●緑泥石, セリサイトが中部～深部に広く分布.	●東山火山の南西の深部に緑泥石, ワイラケ沸石, アクチノ閃石が分布.	●緑泥石, セリサイトが中部～深部に広く分布.	●緑泥石, セリサイトが全体に広く分布.	●緑泥石, セリサイトが基盤岩中に広く分布.	●緑泥石, セリサイトが新第三系・基盤岩に広く分布.
	●浅部には緑泥石, セリサイトが限定的に分布.	●東山火山の中央部にはカオリナイト, パイロフィライト, 明ばん石, 硬石膏などが出現.	●カオリナイト, 明ばん石が浅部に一部厚く分布.	●カオリナイトが, 地温勾配の凸部に特徴的に出現.	●御岳火山岩類中は緑泥石, セリサイトが出現せず.	●西方第四系では緑泥石, セリサイトに乏しい.
	●苦灰石, カオリナイトが基盤岩中に顕著.	●深部に濁沸石・カリ長石・苦灰石なども出現.	●濁沸石・硬石膏が小分布.	●濁沸石・カオリナイト・苦灰石も基盤岩中に小分布.	●北方第四系では緑泥石, セリサイトなどが出現.	
坑井温度・変質分布からの現在の熱水系についての推定 #	●中央火口丘に近い東部の深部に～高温熱水系が発達.	●東山火山の南西の深部に高温中性熱水系が発達.	●地下深部からの中温熱水が基盤岩中にも広く賦存.	●NW-SE方向の温泉配列の北方に地下高温域が分布.	●全域的に低い地温勾配で, 基盤岩中は熱伝導が卓越.	●中心部で基盤岩(断裂系)を通して中温熱水が上昇.
(本文参照)	●浅部に東部→中部の水平流動低温熱水系が分布し, 温度逆転層を形成.	●東山火山の中央深部には高温酸性熱水系が残存.	●地形～断層分布に沿った地下浅部の熱水水平流動.	●高温部は砂礫岩・石英岩で, 熱水賦存場と推測.	●薄い御岳火山岩類中は温度変化が大で不均一的.	●西方浅部へ低温熱水が水平流動し, 温度逆転層を形成.
	●基盤岩が浅い西部は熱伝導域.	●周辺地域は低温の地下水流動—広域熱伝導域.	●気液分離により浅部の酸性変質帯が厚く発達.	●酸性変質帯を熱水系上縁部のガス濃集反応域と推定.	●浅部で局所的に火山性低温熱水が流動し温度異常.	●北方の浅い坑井の変質がN-S性熱水系活動を示唆.

(3) 菱刈, (4) 本宮, (5) 王滝, (6) 最上赤倉の各地域では, マグマ起源～火山性の高温酸性流体(～150℃以上)の寄与は小さい.

水が上昇し, 赤倉温泉付近で湧出するとともに地下浅部で一部が西方へ(～向町盆地の南壁に沿って)流動していると解釈される. しかし, 前述したように過去(第四紀)に調査地域の北部などにも比較的高温の熱水系が分布した可能性があり, 現在もN-S方向の深部断層系(～向町盆地の東壁)に沿って熱水系が賦存しているのかもしれない.

本地域の地表変質調査では, 周辺山地の地表に分布

する新第三系は緑泥石, セリサイトなどの変質に富むが, 赤倉温泉から北東方向に斜ブチロル沸石・モルデン沸石などの帯状分布が認められ, 熱水系分布との関連の可能性が指摘されている. また, 赤倉温泉から西方へはハロイサイト, クリストバル石などの変質分布が報告されている. 本地域の坑井については, 流体包有物の均質化温度などは報告されていない. なお, 本地域の南西方には, 大堀鉦山など新第三紀の熱水性鉦



第11図 NEDO地熱開発促進調査(1)「阿蘇山西部」、(2)「八丈島」、(3)「菱刈」、(4)「本宮」、(5)「王滝」、(6)「最上赤倉」地域の多様な地下環境(深度2.0 km程度までの地質・変質・熱水系)の概念的モデル断面図。

Fig. 11 Conceptual-model cross-sections for the (1) Asosan-Seibu, (2) Hachijojima, (3) Hishikari, (4) Hongu, (5) Otaki and (6) Mogami-Akakura areas of NEDO's Geothermal Development Promotion Survey. Various distributions of geology, alteration and hydrothermal systems (down to ca. 2.0 km) estimated through this study are shown.

脈型鉱床(金・銅など)が分布している。

5.2 事例6地域の坑井岩石変質(多様性と規定因子)のまとめ

前述したように第10表に、事例6地域(高温の「阿蘇山西部」・「八丈島」、低温の「菱刈」・「本宮」・「王滝」・「最上赤倉」)の地形・地質・地熱環境などに加えて、坑井変質の特徴、坑井温度・変質分布からの熱水系についての推定などを地域間比較する形で整理した。また、第11図には上記の検討に基づいて、多様な事例6地域の概念的モデル断面図(地下深度2.0 km程度までの地質・変質・熱水系分布の推定)を比較し易い形で示した。これらに基づいて考察すれば、事例6地域(特に低温環境の4地域)の地下変質について以下のようにまとめられる。

(1) 熱源や熱水系の特性・分布に規定されて、深度—温度プロフィールのみならず変質帯の特性・分布は大きな影響を受ける。高温2地域の内、特に「八丈島」地域の第四紀後期火山の山頂部～中腹部に位置する坑井は、最高約300℃の環境にあり高温環境を反映して緑泥石、セリサイト、石英、方解石などのほか、パイロフィライト、アクチノ閃石、ワイラケ沸石などが分布している。これに対して、低温4地域の坑井では現在最高温度が120℃程度であり、高温環境で生成する変質鉱物種、特に酸性のマグマ起源～火山性流体の寄与を示唆する酸性変質鉱物種には乏しいが、その中でも(4)～(7)のように地域的な多様性が認められる。

(2) 地形、断裂系、岩質などの分布によって方位・深度不均一性を持つ透水構造に規定されて、深度—温度プロフィール、変質帯の特性・分布は大きな影響を受ける。「阿蘇山西部」・「八丈島」両地域の高温の火山性熱水系では、特定の方向(・深度)に熱水流動・変質帯が発達する傾向が顕著である。相対的に低温の4地域についても、地域毎に(4)～(7)のように多様な状況が認められる。これらのうち「菱刈」・「本宮」・「最上赤倉」地域では、先第三紀の堆積岩類・花崗岩類(基盤岩類)中にも断裂系・地層の高透水性によって熱水の貯留・流動があり、第四紀(～現在)の熱水変質を生じている。

(3) 熱水系の温度、起源流体の化学的特性(pH、塩濃度、溶存組成)のみならず、気液分離現象に伴う化学的な分化過程の存在などによっても、変質帯の特性・分布は大きな影響を受ける。「菱刈」地域における厚い酸性変質帯(カオリナイトに富む)の分布は気液分離現象に伴う化学的分化に起因し、「本宮」地域についても類似の環境が推定される。このような変質帯の発達には、地下の透水性を大きく低下させ、熱・熱水系分布(頂部・壁部)にフィードバックを与えている可能性が高い。

(4) 「菱刈」地域では、現在四万十層群中に100℃程度の熱水系が広く分布しており、上昇した熱水が浅部で第四紀火山岩類中を地形・断裂系などに規制されて水平的に流動(～流下)している(特にNE→SW方向)ほか、蒸気・ガスの分離・滞りに起因した酸性変質帯(カオリナイト、明ばん石など)が広く、一部深度800 m程度まで分布している。

(5) 「本宮」地域(特に「非火山性」とされる)では、現在四万十層群中にNW-SE方向(高温温泉の配列の北側)に100℃に達する熱水系が分布している。地温勾配の急低下部にあたり透水性が高いと推定される砂礫岩層、石英斑岩類(大峰—熊野酸性岩類)の上部にカオリナイトの分布が認められ、酸性ガスの分離・濃集・酸化・反応に起因して帽岩を形成していると推定される。

(6) 「王滝」地域では、基盤岩類(中・古生代堆積岩類、濃飛流紋岩類など)中の地温勾配は直線的で低く、検出された高温変質鉱物は過去に生成したものと解釈される。現在は、高温変質を伴わない低温の火山性熱水(広域的に西部—中央部では中性、東部では酸性の傾向)が、御嶽火山岩類中を部分的に水平的に流動(～流下)している可能性が高いと推定される。

(7) 「最上赤倉」地域では、赤倉温泉付近の地温勾配の分布から基盤花崗岩類(断裂系)を通じた深部からの100℃に達する熱水の上昇が推測され、浅部では高温変質を伴わない低温熱水の西方への水平的流動が認められる。第四系中にも変質が認められ、盆地壁に沿ってN-S方向に伸びた熱水系が伏在している可能性が指摘される。

上記の比較的低温環境にある事例4地域の坑井岩石変質についての検討結果は、日本の非火山地域の地下変質環境及び熱・熱水環境の理解・評価・予測への寄与が期待される。特に「菱刈」・「本宮」地域については西南日本外帯の紀伊半島—四国・九州地方の四万十帯など、「王滝」地域については西南日本内帯の美濃—丹波帯など、「最上赤倉」地域については東北日本のグリーンタフ地域などの熱・熱水の影響評価の基盤的な参考資料となることが期待される。

5.3 熱・熱水の影響評価における変質調査についての若干の考察

ここでは、2003～2005年度の委託研究の「熱・熱水の影響評価手法の検討」の一テーマである「岩石変質データベース構築に関する検討及びデータベース化」の中間取りまとめとして考察を加えた「熱・熱水の影響評価における変質調査の役割・重要性」(茂野, 2005a)について紹介する。

地層処分候補地の地表・地下調査などにおいて、岩石変質は以下の3点について重要性が指摘される。

1) 変質は、近過去—現在(～近未来)の熱・熱水の

影響について、その分布・特性・起源などの有力な指標となる。

2) 変質は、地下の水利（透水性）環境に大きな影響を及ぼすため、現在一将来の水利状況の予測に重要な情報となる。

3) 変質は、現在潜在している（潜頭性の）熱水系の分布の推定・予測に重要な指標となる可能性がある。

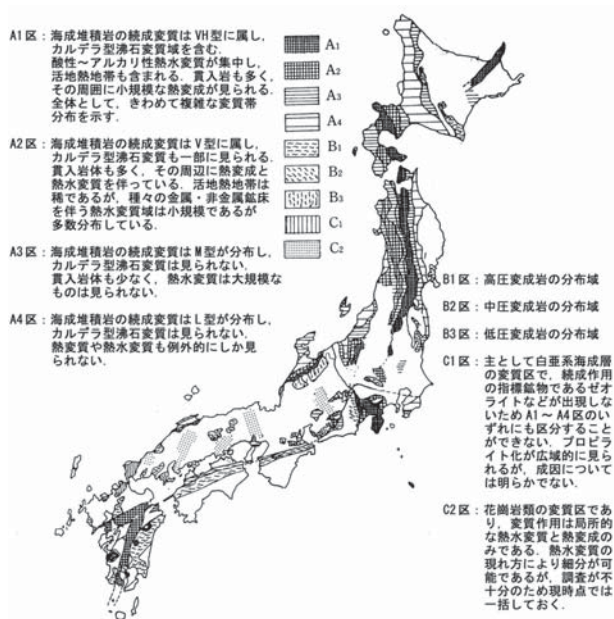
ここでは、このような変質の調査に関して重要と思われる5点について若干述べる。

(1) 岩石変質の特性・分布は、5.2で述べたように各地域の地質構成・環境・変遷史などによって大きく異なる。したがって、その把握（特に、近過去一現在一近未来の熱・熱水の影響評価の観点で）は、具体的な地層処分候補地・調査地について文献調査、地表調査、坑井調査などを通じて行う必要がある。しかし、火山、活断層、地滑り、各種鉱床（金属・非金属・燃料・地熱）などの分布に乏しい地域では、地表・地下ともに岩石変質に関する文献は少ない。このため、対象地域における地表調査、坑井調査などの実施が不可欠であろう。

(2) 岩石変質は、火成活動一熱水系活動によって生成する熱変質・熱水変質のみではなく、風化作用、続成作用、変成作用（例えば、歌田、1995）、各種の鉱化作用、断層を通じた各種流体の移動（例えば、高木・柴田、1992）などによっても生成する。また、変質は古い地質時代のもものが残留している場合、異なる地質時代のもものが重複している場合などがあり、変質の鉱物学的・化学的な検討のみではその把握・評価は難しい。したがって、「熱・熱水の影響評価」の対象となる近過去一現在の熱・熱水変質とそれらとの区別は、地質分布、温度分布との関連性をはじめ、流体化学分析、変質の各種年代測定、包有物の各種分析などを含めて総合的に行う必要がある。

なお、歌田（1995）、吉村 編（2001）などの総説は、日本の各種変質の特性・分布に関する調査・研究結果を取りまとめており貴重である。参考として、歌田（1995、図12）による日本の変質区の試案（西南日本では空白域が多いが）を第12図に示す（凡例の説明文は、歌田（1995）の本文から引用）。歌田（1995）は、地質年代別に日本の熱水変質分布の整理も試みている。また、地表の変質分布を整理した資料としては、現在の地熱地域について地質調査所（1978、1979）、金原・阪口（1989）、小松・梅田（1999）などがある。先第四紀を含めた粘土鉱床の分布を整理したものとしては、Geological Survey of Japan（1976）などがある。

(3) 同一地質単元の岩石でも不均一性が存在するが、更に変質作用によって構成鉱物の全体的～部分的な変化一消滅・生成を生じるため、岩石の各種物性値（破壊強度、空隙率、透水性、比熱、熱伝導率、イオン吸



第12図 歌田(1995)による日本の変質区の試案、歌田(1995)の図12に、同本文から凡例を編集・添付した。

Fig. 12 Rock alteration provinces of Japan proposed by Utada (1995). Fig. 12 from Utada (1995) is attached with the legend copied from its main text.

着能など）の多様性は非常に大きくなる。特に重要な岩石の透水性は、原岩とその変質岩とでは大きく異なることとなる（多くの場合に低下するが、非常に大きく増加する場合もある）。したがって、対象地域について地下3次元の変質の分布を明らかにするとともに、変質条件による岩石物性値の変化を測定・予測することが必要となる。地質、断層系、温度、電気伝導度などの分布と変質特性・分布との総合的な解析、これに基づく地下水流動・地下温度分布の数値モデル化一数値シミュレーション解析などによって、より正確な地下環境の理解、地層処分にに向けた予測・判断が進展することが期待される（上記2）を参照）。

(4) 熱・熱水の影響評価手法としての変質調査に関して、特に直接的な重要性が本説の検討からも指摘される点は、変質帯の分布による地下の熱・熱水環境の隠蔽（シーリング）である（例えば最近では、高橋、1998）。熱水系の上部（～側壁部）では、ガスの分離・滞在によって酸性環境となり不透水性の白色変質帯（カオリナイトに富む場合が多い）が生成し易い。この帽岩（直線的な高い地温勾配を持つ）によって、地下の熱水系が覆われて地表には温泉・噴気地が存在しない場合が生じ得る。前述したようにこのような環境にある「菱刈」・「本宮」地域では、熱水が一部流出して温泉が生成しているが、地下の熱水系の分布は周辺にも広がっていると考えられる。各種の条件によっては

比較的高温の熱水系が完全に隠蔽されて(潜頭性となって)、酸性変質帯のみが露出する場合(ガス放出地を伴う可能性がある)もあり得るであろう。

(5) 近年リモートセンシング技術の高度化・低費用化が著しく、市販の衛星画像についても、専用の航空機調査についても可視～赤外域のマルチバンド(スペクトル)データが得られるようになった。これらを用いることによって、地表に分布する各種の変質鉱物(特に炭酸塩鉱物、硫酸塩鉱物、粘土鉱物(上記のカオリナイトなどを含む))の分布を、高解像度で半定量的に把握することが可能になっている(例えば、物理探査学会編, 1998)。地層処分の候補地・調査地についてもリモートセンシング技術の利用による地表の変質の特性・分布の把握は、基礎的に重要であろう。残念ながら日本においては温暖湿潤気候によって厚く発達する植生、土壌などの分布の影響が大きく、従来地質リモートセンシングは難しいといわれてきたが、現在～将来の高解像度化、処理・解析技術の進歩などによって問題の克服が期待される。

6. まとめ

変質情報は、地圏の資源開発、災害防止などの様々な分野で重要であり、基盤的な地理・地球科学情報の一つとして、今後電子化整備されて容易に幅広くまた高度に利用可能となることが期待される。変質情報は、特に地熱資源の調査・探査において重要性が高く多量のデータが蓄積されるとともに、他の地理・地球科学情報との重層的・統合的な電子化処理が試みられてきた(茂野, 2004a; 地質調査総合センター, 2007)。

本説では、原子力発電環境整備機構(NUMO)の放射性廃棄物(HLW)地層処分に係わる委託研究「熱・熱水の影響評価手法の検討(2003～2005年度)」の一環として行った「岩石変質データベース構築に関する検討及びデータベース化」の結果(茂野, 2004b, 2005a, 2006)を、取りまとめて紹介した。その内容は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が全国的に実施してきた地熱開発促進調査の報告書を対象に、(1) 坑井調査岩石変質データの試行的～体系的な電子データベース化と予察的な検討結果の整理、(2) 事例6地域の坑井変質分布の簡易的・重層的な図表化処理と変質環境の概念モデル化・考察とからなる。

(1) の坑井変質データベースの構築に関しては、電子文字・数値表化した九州地方・本州地方の35地域、合計271坑井について、地熱環境特性の指示性が高い16鉱物種の存在度を一覧表、地図上総括図として示した。残念ながら、調査地域を横断するデータフォーマットの規格化・標準化・共通化作業に時間を要すること、北海道地方17地域などの地熱開発促進調査についての電

子文字・数値表化が未作業であることなどから、全国的な地熱坑井変質データベースの電子的公開化については、将来の課題となっている。

(2) では、高温の「阿蘇山西部」・「八丈島」、低温の「菱刈」・「本宮」・「王滝」・「最上赤倉」の事例6地域について、坑井変質の図化表示、変質環境の概念モデル化を行った。その結果、地域的な熱源や熱水系の特性・分布、不均一な地形、断裂系、岩質分布に規定された透水構造、気液分離現象に伴う化学的な分化過程などを要因として、低温場でもその地下環境を反映した多様な変質帯が分布することが明らかとなった。この結果は、非火山性地域の地下環境の把握について、一つの参考になると思われる。

7. おわりに

本説の5.3で述べたように、変質作用は場の環境条件によって風化変質、続成変質、熱変質(変成)、熱水変質などに分類される(例えば、歌田, 1995)。高温熱水系環境では、時空間変化の激しい温度・流体・化学環境の分布によって多様な変質帯が複雑に分布することが知られており、事例としてまた資源探査・評価を目的として調査・研究が進んでいる。本説では、熱水変質を主対象として、公的な地熱資源調査、特にNEDOによる地熱開発促進調査の大量の坑井調査データについて述べた。

本説の今後の課題としては、2.～3.で述べたように北海道地方の地熱開発促進調査の未処理坑井岩石変質データの整理・データベース化、及び今回の九州地方・本州地方のデータと合わせての電子データベース化取りまとめ～公開化が挙げられる。しかし、2.～3.で述べたように変質データについては、取得方法・報告方法について標準化などが進んでいないため、様々な問題の解決が必要である。将来的には、地熱開発促進調査によって得られたその他の貴重な坑井調査データ(温度、地質のみならず溢逸水層、比抵抗、流体包有物、岩石・変質年代など)についても、体系的な整理・電子データベース化が望まれる。しかしながら、変質データと同様に様々な問題の解決が必要と考えられる。

本説では対象外としたが、その他の起源・環境の変質について、特に続成変質については石油・天然ガスを対象とした掘削調査、鉱化変質については金属・非金属鉱床を対象とした掘削調査、また地滑り地域の変質、断層などに伴われる変質についても掘削を含む調査が実施されてきており、少なくとも公的なデータについては電子化整備が望まれるところである。しかし、データの取得方法・報告方法などについては様々であり、その処理手法には体系的な検討が必要であろう。なお、地熱変質についても、地熱開発促進調査以外に

各種の坑井調査データが存在し、様々な地域の地表調査についても結果が報告されている。

最後に変質について、特に注意を払う必要があると思われる点(5.2(3), 5.3(3)を参照)を再度指摘しておきたい。地質学的な各種の過程によって、岩石-流体相互作用が様々な温度・圧力・化学あるいは流動・破壊などの地下環境場で生じており、その結果多様な岩石の変質が発生する。変質が進行するとともに、岩石の各種の性質は原岩とは大きく異なってくる。その結果、逆に変質作用を引き起こす過程やその後の各種の過程(人工的な作用を含む)は、変質分布の影響(正・負のフィードバック)を大きく受けることとなる。したがって、現実の変質作用は、各種の現象について単純なモデル(変質作用の影響を無視した)に基づくシミュレーション計算による予想を越えた、複雑な結果を生じる可能性を持つ。

謝辞:「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」の研究委託元である原子力発電環境整備機構(NUMO)及び研究委託担当の方々には、研究予算を提供頂くとともに、3年間の研究報告書へのコメント、本報告書の発表などについて大変お世話になりました。

本説では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による地熱開発促進調査の公開成果報告書を多数利用しました。西日本技術開発株式会社・地熱部の方々、特に義山弘男氏には地熱開発促進調査の坑井調査の変質データの簡易データベース化作業に協力して頂きました。

本研究を進めるに当たっては、「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」研究グループの玉生志郎・阪口圭一両研究グループ長に様々な便宜を図って頂きました。特に玉生志郎氏には本説の原稿について各種の有益なご指摘を頂きました。

以上の方々に深く感謝します。

文 献

物理探査学会(1998)リモートセンシング。物理探査ハンドブック, 519-568。
 地質調査所(1978)日本の地熱地域の熱水変質帯の地質学的研究。地調報告, no. 259, 631p。
 地質調査所(1979)日本の熱水変質帯分布図, I. 鮮新世後期-完新世。200万分の1地質編集図, 19-1。
 地質調査所(1995)100万分の1日本地質図第3版CD-ROM版。数値地質図, G-1。
 地質調査所(2000a)日本の新生代火山岩の分布と産状 Ver. 1.0。数値地質図, G-4。
 地質調査所(2000b)日本重力 CD-ROM。数値地質図, P-2。

地質調査総合センター(2004)日本列島及びその周辺の地温勾配及び地殻熱流量データベース。数値地質図, P-5。
 地質調査総合センター(2005)日本温泉・鉱泉分布図及び一覧(第2版)(CD-ROM版)。数値地質図, GT-2。
 地質調査総合センター(2007)九州-大分-豊肥地域の地熱データ処理集「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価の研究(2001-2005年度)」のまとめと簡易統合的処理データ・プログラム集(CD-ROM)。数値地質図, GT-3。
 Geological Survey of Japan(1976)Distribution map of kaolin, pyrophyllite and sericite clay deposits of Japan. 1: 2,000,000 Map Ser., 17-1。
 原田 円・木戸 宏(1995)地熱開発促進調査の地域レポート, [37]本宮地域。地熱エネルギー, **20**, 43-50。
 茨城謙三・鈴木良一(1990)菱刈鉱山鉱床母岩の熱水変質について。鉱山地質, **40**, 97-106。
 石川潤一(1994)地熱開発促進調査の地域レポート, [32]八丈島地域。地熱エネルギー, **19**, 53-64。
 火力原子力発電技術協会(2006)地熱発電の現状と動向, 2006年。95p。
 加藤久遠(1991)地熱開発促進調査の地域レポート, [23]最上赤倉地域。地熱エネルギー, **16**, 382-387。
 加藤久遠(1992)地熱開発促進調査の地域レポート, [25]菱刈地域。地熱エネルギー, **17**, 75-80。
 金原啓司(1982a)変質帯調査。湯原浩三監修, 地熱開発総合ハンドブック, 41-52, フジテクノシステム。
 金原啓司(1982b)X線分析。湯原浩三監修, 地熱開発総合ハンドブック, 480-489, フジテクノシステム。
 金原啓司・阪口圭一(1989)日本の主要地熱地域の地質と温泉・変質帯分布。地調報告, no. 270, 482p。
 国土地理院(1997a)数値地図50 mメッシュ(標高)日本-III(CD-ROM版)。
 国土地理院(1997b)数値地図50 mメッシュ(標高)日本-II(CD-ROM版)。
 小松 亮・梅田浩司(1999)日本列島における温泉・熱水変質帯について。サイクル機構技報, no.4, 121-128。
 薦田靖志(1990)地熱開発促進調査の地域レポート, [17]王滝地域。地熱エネルギー, **15**, 266-276。
 松山一夫・成田伸哉・真島俊昭(1999)八丈島における地熱探査とそのローカルエネルギーとしての開発。資源地質, **49**, 1-14。
 大石 朗・村松容一・吉田 裕・橋詰良吉(1995)流体包有物による和歌山県本宮地域の熱水活動の検討。温泉科学, **45**, 63-75。
 齊田洋三・真島俊昭・松山一夫・成田伸哉(1996)八丈島における地熱開発の現状と計画。地熱, **33**,

- 200-212.
- Shikazono, N., Naito, K. and Izawa, E. ed. (1993) High grade epithermal gold mineralization - the Hishikari deposit -. *Resource Geology Special Issue*, no. 14, 136p.
- 茂野 博・阪口圭一 (2002) 地理情報システム (GIS) を利用した地熱資源の評価 (アセスメント) 新計画. 地質ニュース, no. 574, 24-45.
- 茂野 博 (2004a) 地熱井の温度・地質・変質データの簡易データベース化と地図上統合表示—GISを利用した地熱資源評価研究の一環として「豊肥」地域を例に. 地質ニュース, no. 595, 43-56.
- 茂野 博 (2004b) 岩石変質データベース構築に関する検討およびデータベース化. 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門, 「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」報告書, 12-36.
- 茂野 博 (2005a) 岩石変質データベース構築に関する検討およびデータベース化. 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門, 「熱・熱水の影響評価手法に関する検討 (その2)」報告書, 60-85.
- 茂野 博 (2005b) 九州地方を例とした「地球科学アトラス」の自作: 電子地球科学情報の簡易的な統合利用に向けて. 地質ニュース, no. 616, 44-57.
- 茂野 博 (2006) 岩石変質データベース構築に関する検討およびデータベース化. 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門, 「熱・熱水の影響評価手法に関する検討 (その3)」報告書, 102-133.
- 新エネルギー総合開発機構 (1988) 地熱開発促進調査報告書, no. 17 王滝地域, 953p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1990) 地熱開発促進調査報告書, no. 23 最上赤倉地域, 808p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1991) 地熱開発促進調査報告書, no. 25 菱刈地域, 982p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1993) 地熱開発促進調査報告書, no. 32 八丈島地域, 1202p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1994) 地熱開発促進調査報告書, no. 37 本宮地域, 885p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1995) 地熱開発促進調査報告書, no. 38 阿蘇山西部地域, 1508p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2006) 地熱開発の現状. 18p.
- 高木秀雄・柴田 賢 (1992) 断層ガウジのK-Ar年代測定—中央構造線における例. 地質学論集, no. 40, 31-38.
- 高橋 洋 (1998) エピサーマル鉱脈型鉱床の探査指針—細倉鉱床の化石熱水系の復元をもとに—. 資源地質, **48**, 27-34.
- 吉岡 恒・村井哲郎 (1996) 地熱開発促進調査の地域レポート, [38] 阿蘇山西部地域. 地熱エネルギー, **21**, 157-168.
- 歌田 実 (1995) 地下深部における岩石の変質. 島崎英彦・新藤静夫・吉田鎮男編, 放射性廃棄物と地質科学地層処分の現状と課題. 東大出版会, 276-308.
- 吉村尚久 編 (2001) 粘土鉱物と変質作用. 地学団体研究会, 293p.

(受付: 2008年1月25日; 受理: 2008年2月7日)