

東北の地熱地帯の熱源岩の研究

日本重化学工業(株)地熱事業部

角 清 愛

Review of Researches on the Heat Source Rocks of Geothermal Fields in Tohoku, Japan

Kiyoshi SUMI

Geothermal Development Department, Japan Metals and Chemicals Co. Ltd.

1. はじめに

地熱地帯の概念モデルに画かれている熱源岩の形態は侵食によって地上に露出した化石熱源岩の観察結果が多くとり入れられている。化石熱源岩は10~100 Ma位の古いものが多く、一定の大きさ(約100 km²)以上のものはバソリス(底盤)と呼ばれ、それ自身、かつて熔融していたことを示し、またまわりの岩石に低圧高温の熱変成(接触変成)を与え、それが長時間、十分高温であったことを示している。

近年、地熱ボーリングの高温掘削技術が進歩し、3 km級の掘削が行われるようになり、生きた熱源岩にふれることが出来るようになった。一方年代測定技術も進歩し、熱源岩それ自身およびそれと同時代のカルデラが確認されるようになり、地熱地帯の熱源モデルの理解は一層進歩しつつある。ここではこれらのことを東北を中心に、諸外国の例もとり入れながら紹介したい。

2. 従来の研究

地熱・温泉の熱源の理論的研究としては福富(1964), NOGUCHI (1970), SMITH and SHAW (1975)等が著名であり、とくに最後のものはSMITH・SHAWダイアグラムとして熱源評価に広く用いられている(例えばTAMANYU, 1988)。火山を熱源とみてこれと地熱温泉との分布を論じた研究は古来多くなされており、筆者はこれをレビューし、かつ筆者自身の意見も述べた(角, 1980)。酸性深成岩(花崗岩)を熱源とみて研究した例としては、杉山の総括論文(杉山, 1990), 笹田(1978, 1980), SAMMEL, E. A. (1979)などがある。この中で杉山や笹田は熱の伝ばんを単なる伝導問題でなく、構造地質学的なフラクチャーの問題にも言及しているのが注目される。

3. 熱源岩が確認された地域

深いボーリングによって、大規模貫入岩が、葛根田、ザ・ガイサース(アメリカ)およびトンゴ

ナン(フィリピン)の3地熱地帯で確認された。葛根田では1~2 km 深の所に低圧高温生成の接触変成鉱物が広く分布し、しかもその分布が傾斜が20°を超えないことから、深部に大規模貫入岩の存在が予想されていた(DOI et al, 1988, 図1)。1990年に至り、約2.8 kmで、この変成作用と関係があるとみられる花崗閃緑岩に到達した(土井ほか, 1990)。

ザ・ガイサーズでは、これまで重力、P波速度のおくれ、熱流量などのデータから、熱源岩またはマグマ岩体の伏在が予想されていた(STOCKTON et al, 1981)。最近、ここでボーリングによって1.5~2.5 kmの深度に接触変成鉱物を伴う大規模酸性貫入岩(フェルサイト)の存在が確認された(THOMPSON, 1989, 図2; THOMPSON and GUNDERSON, 1989)。貫入岩の水平的ひろがりは少なくとも80 km²あり、上面の傾斜は10~40°と緩く、大きさ・形状ともいわゆるバソリスのカテゴリーに入る。その年代は1.2~2.4 Maとされている。

トンゴナンでは約2 kmの深度に面積2×6 kmの広がりを持つ閃緑岩の貫入岩が知られている(LOVELOCK et al, 1982, 図3)。トンゴナンの接触変成帯の広がりには明らかではないが、少なくともスカルン鉱物が報告されている(BIRD et al, 1984)。

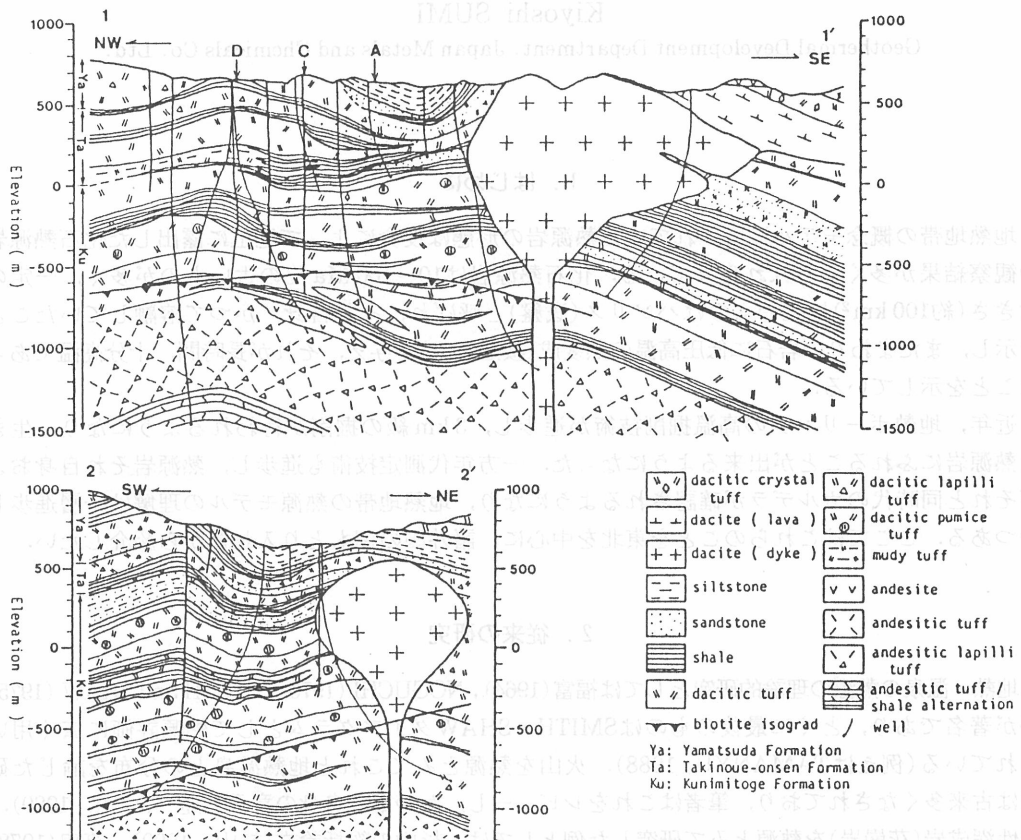


図1 葛根田地熱地帯断面図(DOI et al, 1988)。“biotite isograd”: 接触変成鉱物の黒雲母分布の上限。上図左端Dの深部2.77kmで花崗閃緑岩に到達した(土井ほか, 1990)。

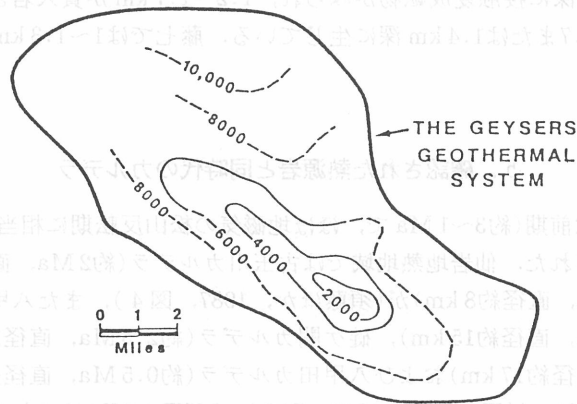


図2 ザ・ガイゼース地熱地帯の熱源岩の分布(THOMPSON, 1989).
 コンターは貫入フェルサイトの上限の海面下の標高(フィート).

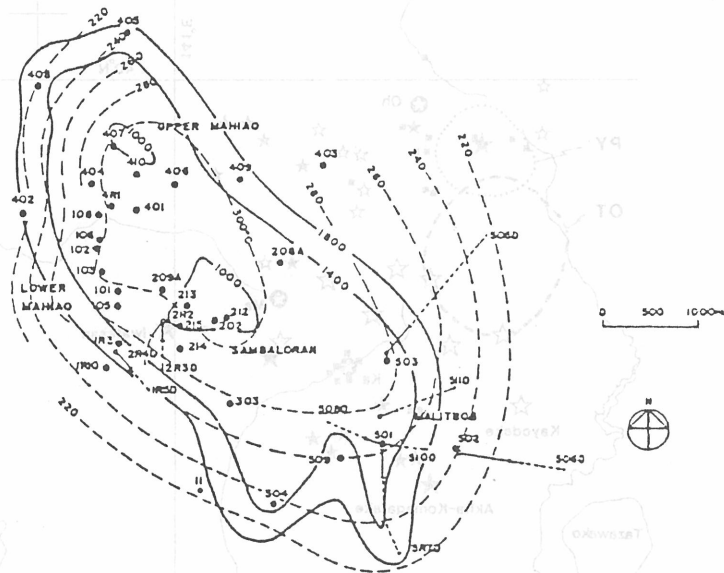


図3 トンゴナン地熱地帯の熱源岩の分布(LOVELOCK et al, 1982). 実線は貫入閃緑岩の上限の海面下の標高(m), 破線は海面下900mにおける等温線(°C).

4. 熱源岩に近い将来確認されるであろう地域

大規模な貫入岩には到達していないが、接触変成帯およびそれに伴う小規模貫入岩の存在によって、深部にそれが期待される地域としては、澄川、小和瀬および藤七(竹野・野田, 1987), ラルデロ(BATINI et al, 1985), Salton Sea および Cerro Prieto (BIRD et al, 1984) などがある。

ラルデロでは約2.5 kmの深度で1.3~3.5 Maの年代の熱変成鉱物・酸性岩脈が発見されている。ここでは熱変成鉱物がヘルシニアン(285±11 Ma)の古い変形したものと、新しい割れ目に生成した新しいものが注意深く区別されている。因みにここの2.6 km 深の温度は394°Cである。

澄川では0.8~1 km 深に接触変成鉱物がみられ、1.2~1.7 km が貫入岩となっている。小和瀬では接触変成鉱物が1.7または1.4 km 深に生じている。藤七では1~1.3 km の深度にスカルン鉱物が生成している。

5. 確認された熱源岩と同時代のカルデラ

鮮新世後期—更新世前期(約3~1 Ma で、ほぼ地磁気の松山反転期に相当する)のカルデラが東北の地熱地帯で特定された。仙岩地熱地域では古玉川カルデラ(約2 Ma, 直径約10 km)および先焼山カルデラ(約1 Ma, 直径約8 km)が(須藤ほか, 1987, 図4), また八甲田地熱地域では湯ノ沢カルデラ(約3.5 Ma, 直径約15 km), 碓ヶ関カルデラ(約2.5 Ma, 直径約8~12 km)。沖浦カルデラ(約1.5 Ma, 直径約17 km)および八甲田カルデラ(約0.5 Ma, 直径約9~13 km)が特定された(MURAOKA, 1989; 村岡・高倉, 1988, 図5)。MURAOKAはこれら4つのカルデラが、年齢が若くなるにしたがって地熱の活動度が高くなることを示した。

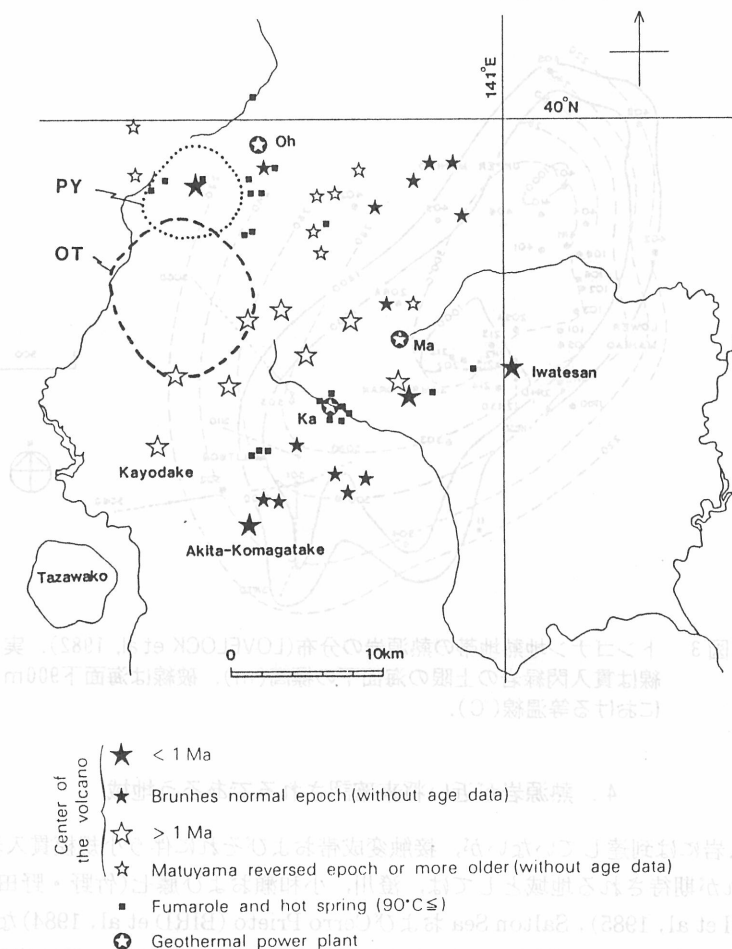


図4 仙岩地熱地域のカルデラ(須藤・向山, 1987)。OT: 古玉川カルデラ, pr: 先焼山カルデラ。Ka: 葛根田。

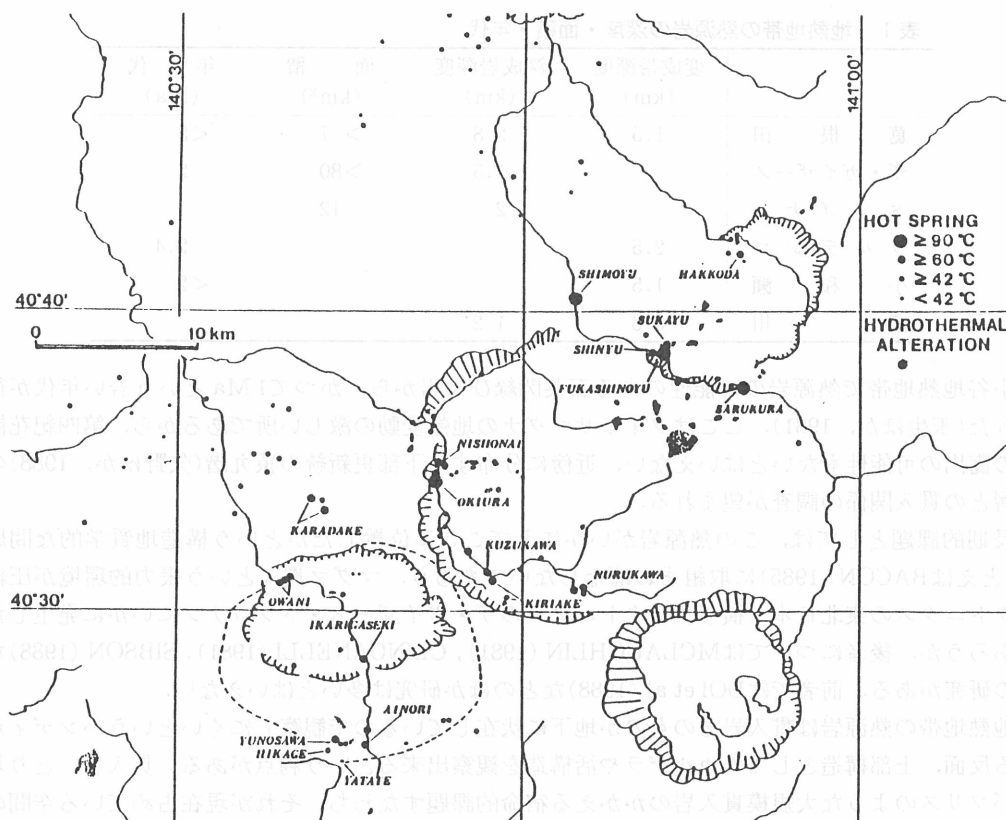


図5 八甲田地熱地域のカルデラと温泉分布(MURAOKA, 1989).

6. 熱源岩と火山活動との関係

伊藤ほか(1989)は東北日本の中新世後期以降のカルデラを7~5, 5~2および<2 Maの3期に分類している. このように7 Maにまでさかのぼってカルデラの分布が明らかになると, ここに述べたボーリング結果による確認熱源岩との関係を論ずることが可能になってくる. 1~3 Maの松山地磁気反転期の頃の火成活動が地熱活動に有効らしいことは上に述べた分布上の相関から推定される. このことを側面的に支持するデータが会津南部から報告されている. この地域の駒止峠層といわれる大規模火砕流は従来鮮新世末のものとされていたが, この分布域には顕著な地熱活動は見られない. 山口(1989)は駒止峠層が6~7 Maで中新世後期のものであることを明らかにした. 一方柳津町の奥会津地熱地域では従来中新世後期と考えられていた酸性火山岩が0.2~0.6 Maと更新世のものであることがわかったのである(新田ほか, 1987).

これらのことから地熱地帯の概念モデルとして, 年齢1~3 Maの酸性パソリスが, 面積数10 km², 頂部深度2~3 kmで伏在しているモデルはかなりたしからしいといえるのである(表1).

7. 今後の問題

年代測定技術と深部高温掘削技術の進歩によって, 地熱地帯の熱源岩の実態が, 年代的にかつ空間的に明らかになりつつある. 今後その実態を正確に記載することが当面の課題である. 長野

表1 地熱地帯の熱源岩の深度・面積・年代

	変成帯深度 (km)	深成岩深度 (km)	面 積 (km ²)	年 代 (Ma)
葛 根 田	1.5	2.8	> 7	<5
ザ・ガイザース		1.5	>80	2
トンゴナン		2	12	
ラルデレロ	2.5			2.4
小 和 瀬	1.5			<2
澄 川	0.8	1.2		

県小谷地熱地帯で熱源岩の可能性のある石英閃緑ひん岩から、かつて1 Maという若い年代が得られた(玉生ほか, 1981). ここはフォッサマグナの地殻変動の激しい所であるから、第四紀花崗岩の露出の可能性もないとはいえない、近傍に分布する下部更新統の猿丸階(矢野ほか, 1988)の地層との貫入関係の調査が望まれる。

長期的課題としては、この熱源岩がいかんにしてここに位置したかという構造地質学的な問題(たとえばBACON, 1985)に取組まねばならないであろう。マグマ貫入という張力の環境が圧縮テクトニクスの東北日本、横ずれテクトニクスのザ・ガイザース・トンゴナンにいかんして発生したであろうか。後者についてはMCLAUGHLIN (1981), CLINCANELLI (1981), SIBSON (1988)などの研究がある。前者ではDOI et al (1988)などのほか研究は多いとはいえない。

地熱地帯の熱源岩は貫入岩そのものが地下に伏在しているので観察しにくいというハンディがある反面、上部構造としてのカルデラや活構造を観察出来るという利点がある。貫入岩、とりわけパソリスのような大規模貫入岩のかかえる宿命的課題すなわち、それが現在占めている空間の成因の解明にもつながれば、地熱・温泉の探査はもちろん、地球科学そのものへの大きい貢献となる。

謝 辞

本稿を講演・執筆する機会を与えられた岩手大学後藤達夫教授、日本重化学工業(株)地熱事業部小島 斉副事業部長、文献等でお世話になった地質調査所玉生志郎・村岡洋文、日本重化学工業(株)土井宣夫の各氏に深謝致します。

参考文献

- BACON, C.R. (1985) Implications of silicic vent patterns for the presence of large crustal magma chambers. *Jour. Geophysical Res.*, vol.90, no.B13, p.11, 243-11, 252.
- BATINI, F., BERTINI, G., GIANELLI, G., PANDELI, E., PUXEDDU, M. and VILLA, I.M. (1985) Deep structure, age and evolution of the Larderello-Travale geothermal field. *GRC Trans.*, vol.9, pt.1, p.253-259.
- BIRD, D.K., SCHIFFMAN, P., ELDERS, W.A. and WILLIAMS, A.E. (1984) Calcsilicate mineralization in active geothermal systems. *Econ. Geol.*, vol.79, p.671-695. 紹介, 日本鉱業会誌, vol.101, no.1173, p.57, 1985.
- CIANCANELLI, E.V. (1981) Faulting and ore controls at the Culver-Bear Mine, Sonoma County, California.

- U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., no.1141, p.243-250.
- DOI, N., MURAMATSU, Y., CHIBA, Y. and TATENO, M. (1988) Geological analysis of the Kakkonda geothermal reservoir. Proc. Int. Symp. Geotherm. Energy, Kumamoto-Beppu, p.522-525.
- 土井宣夫・加藤 修・村松容一(1990) 岩手県葛根田地熱地域の新时期花崗岩類と先第三系内貯留層について. 日本地熱学会平成2年度学術講演会講演要旨集, p.6.
- 福富孝治(1964) 地熱エネルギーの保存性について. 地熱, no.5, p.15-27.
- 伊藤谷生・歌田 実・奥山俊一(1989) 東北日本脊梁地域に分布する中新世後期～鮮新世のカルデラ群について. 地質学論集, no.32, p.409-429.
- LOVELOCK, B.G., COPE, D.M. and BALTASAR, A.J. (1982) A hydrogeochemical model of the Tongonan geothermal field. Proc, 4th N. Z. Geoth. Workshop, p.259-264. 紹介, 地熱, vol.20, no.4, p.15-31, 1983.
- MCLAUGHLIN, R.J. (1981) Tectonic setting of pre-Tertiary rock and its relation to geothermal resources in the Geysers-Clear Lake area. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., no.1141, p.3-23.
- MURAOKA, H. (1989) Exploration geology of hydrothermal systems in the Hakkoda volcanic field, Japan. Proc. 11th N. Z. Geoth. Workshop, p.107-110.
- 村岡洋文・高倉伸一(1988) 八甲田地熱地域における熱源系の探査地質. 日本地熱学会誌, vol.10, no.2, p.173-174.
- 新田富也・寿賀祥五・塚越重明・安達正敏(1987) 福島県奥会津地熱地域の地熱資源について. 地熱, vol.24, no.4, p.26-56.
- NOGUCHI, T. (1970) An attempted evaluation of geothermal energy in Japan. Geothermics, Sp. Iss., vol.2, no.2, pt.1, p.474-477.
- SAMMEL, E.A. (1979) Occurrence of low-temperature geothermal waters in the United States. U.S. Geol. Surv. Circular, no.790, p.86-155.
- 笹田政克(1978) 地熱とカコウ岩. 地質ニュース, no.284, p.18-24.
- 笹田政克(1980) 温泉の花崗岩体による構造規制についての予察. 日本地熱学会誌, vol.2, no.1, p.1-11.
- SHIBSON, R.H. (1988) Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. GRC Bull., vol.17, no.1, p.3-7. 和訳, 地熱, vol.26, no.2, p.70-74, 1989.
- SMITH, R.L and SHAW, H.R. (1975) Igneous-related geothermal systems. U.S. Geol. Surv. Circular, no.726, p.58-83.
- STOCKTON, A.D., THOMAS, R.P., CAHPMAN, R.H. and DYKSTRA, H. (1981) A reservoir assessment of the Geysers geothermal field, Jour. Petroleum Tech. Calif. Dept. Conserv., Div. Oil and Gas Pub., no.TR27, 60p. 再録, Jour. Petrol. Tech., Dec, 1983, p.2137-2159. 和訳, 地熱技術, vol.12, nos.1-2, p.29-60, 1984.
- 杉山隆二(1990) 温泉の地質構造規制—温泉はどんな所に, どんな状態であるか—. 温泉科学, vol.40, p.34-41.
- 角 清愛(1980) 日本の温泉放熱量分布と第四紀火山分布との関係—日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係, 第3報. 地質調月, vol.31, no.6, p.255-266.
- 須藤 茂・向山 栄(1987) 仙岩地熱地域の古地磁気と火山活動の推移. 地質調報告, no.266, p.143-158.
- 竹野直人・野田徹郎(1987) 仙岩地熱地域における地熱調査井岩芯の変質—変質鉱物及び全岩化学組成の変動—. 地質調報告, no.266, p.223-249.
- 玉生志郎・長谷紘和・村岡洋文(1981) 長野県北安曇郡小谷温泉周辺の石英閃緑ひん岩及び石坂流紋岩のフィッシュン・トラック年代. 地質調月, vol.32, no.12, p.717-721.
- TAMANYU, S. (1988) Evaluation of geothermal heat source. Proc. Int. Symp. Geotherm. Energy,

Kumamoto-Beppu, p.253-256.

THOMPSON, R.C. (1989) Structural stratigraphy and intrusive rocks at the Geysers geothermal field. GRC Trans., vol.13, p.481-485.

THOMPSON, R.C. and GUNDERSON, R.P. (1989) The orientation of steam-bearing fractures at the Geysers geothermal field. GRC Trans., vol.13, p.487-490.

山口 靖(1989) 南会津地域の火山岩年代と熱源評価. 日本地熱学会平成元年度学術講演会講演要旨集, A2.

矢野孝雄・宮下 忠・木村純一(1988) 水内地域の新第三系. 中部地方 I (植村・山田編), 共立出版(株), p.75-79.

LOVBLICK, B.G., COPE, D.M. and BAITAR, A.J. (1982) A hydrogeochronological model of the Tongonan geothermal field. Proc. 4th N. A. Geol. Workshop, p.259-264. 報告, 地熱, 地熱, vol.20, no.4, p.15-21. 1983

McJANNETT, R.J. (1981) Tectonic setting of pre-Tertiary rock and its relation to geothermal resources in the Geysers-Lakeview. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., no.1141, p.3-23.

MURAKAWA, H. (1989) Exploration geology of hydrothermal systems in the Hakoda volcanic field, Japan. Proc. 11th N. A. Geol. Workshop, p.107-110.

村岡洋一・高倉伸一(1988) 八甲田地熱地帯における地熱地質学的調査. 日本地熱学会誌, vol.10, no.2, p.173-174.

新田富也・林寛一・塚本隆夫(1987) 新潟県新潟地熱地帯の地熱地質学. 地熱, 地熱, vol.24, no.4, p.28-36.

NOGUCHI, T. (1970) An attempt of evaluation of geothermal energy in Japan. Geotherm., 24, 1st, vol.2, no.2, p.174-177.

SAMMEL, E.A. (1979) Occurrence of low-temperature geothermal waters in the United States. U.S. Geol. Surv. Circular, no.790, p.88-122.

新田敏彦(1978) 地熱とマグマ岩. 地質ニュース, no.281, p.18-24.

新田敏彦(1980) 温泉の成成と地質学. 日本地熱学会誌, vol.2, no.1, p.1-11.

THOMPSON, R.C. (1988) Epidiomatic rhyolite as a mineralizing agent in hydrothermal systems. GRC Bull., vol.17, no.1, p.6-7. 報告, 地熱, 地熱, vol.25, no.2, p.50-54. 1989.

SMITH, R.L. and SHAW, H.R. (1975) Igneous related geothermal systems. U.S. Geol. Surv. Circular, no.728, p.68-82.

STOCKTON, A.D., THOMAS, R.P., CARLIAN, R.H. and HYKSTRA, H. (1981) A reservoir assessment of the Geysers geothermal field. Jour. Petroleum Tech., Calif. Dept. Cons., Oil and Gas Div., no. TR27-001. 報告, Jour. Petrol. Tech., Dec. 1988, p.2173-2176. 報告, 地熱技術, vol.12, no.1-2, p.29-60. 1984.

石山隆二(1986) 温泉の地質学. 温泉学. 温泉学, vol.10, p.34-41.

石山隆二(1980) 日本の温泉地質学. 温泉学. 温泉学, vol.10, p.34-41.

湯浅 泰・向山 栄(1987) 新潟地熱地帯の地質学. 地質学, no.265, p.143-158.

村岡洋一・新田敏彦(1987) 新潟地熱地帯の地質学. 地質学, no.265, p.223-249.

正志郎・長谷川文(1981) 長野県北安曇郡小谷温泉の地質学. 地質学, no.265, p.271-274.

TAMANYU, S. (1988) Evaluation of geothermal heat sources. Proc. Int. Symp. Geotherm. Energy.