

世界の深部地熱開発の事例

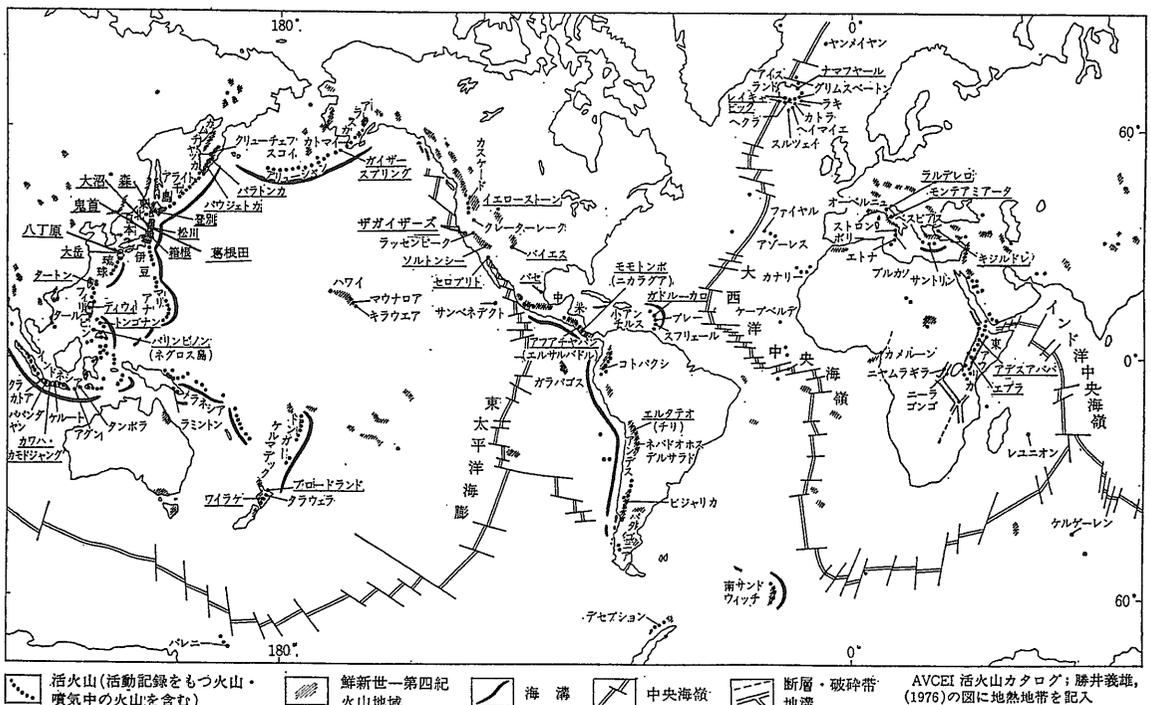
—特に新期花崗岩に着目して—

玉生志郎¹⁾

1. はじめに

ここで用いる“新期花崗岩”とは Neo-Granite の和訳で、第四紀に貫入した花崗岩と同義である。このような若い花崗岩が地表に露出している事例は、日本の丹沢山地と北アルプスで報告されているのみで、世界的に見ても極めて稀なことである (Harayama, 1992)。しかしながら、世界のいくつかの地熱開発地域では、坑井掘削によって、その新期花崗岩の存在が確認されたり、かなりの確度で予測された

りするようになってきている (角, 1990; 村岡, 1993)。日本においても、岩手県葛根田地熱地域で 3,000 m 級坑井の掘削によって新期花崗岩が確認された (加藤ほか, 1993; 土井ほか, 1993)。これらの状況を考えると、今後の深部地熱開発において、新期花崗岩は最も重要なキーワードになるとと思われる。そこで新期花崗岩関連の深部地熱資源の研究課題についてまずまとめてみた。次に、米国ザガイザーズ、フィリピンのトンゴナン、イタリアのラルデレロの具体的事例について、文献調査を行った。そ



第1図 世界の火山分布と有力な地熱地域分布 (酒井・大木, 1978)

1) 地質調査所 地殻熱部

キーワード: 地熱, 深部地熱開発, 地熱モデル, ザガイザーズ, ラルデレロ, トンゴナン, 葛根田, 新期花崗岩

第 1 表 深部地熱資源調査課題

深部地熱資源賦存状況把握の課題

- どこに(新期花崗岩体周辺部, 新期花崗岩体内, 先第三系基盤岩内など)
- どんな性状の(中性熱水, 酸性熱水, 高塩濃度塩水など)
- どの位の量の(浅部と同程度, 大容量)
- 流体起源は(天水, 高塩濃度塩水, 火山ガス起源など)
- 再生可能性の度合いは(地熱系への熱, 水の付加の程度)
- 葛根田地域以外に, どの地域に期待されるか(国外, 国内事例)

第 2 表 新期花崗岩の浅所貫入環境

新期花崗岩の浅所貫入環境

- 深度(0-4 km 以深)
- 温度(350-400°C前後)
- 圧力(岩圧~静水圧)
- 年代(≤1.8 Ma)
- 貫入様式(ゾーンメルティングまたは固体貫入)
- 地形変動(マグマ貫入に伴う隆起, 沈降, 削剝量)
- 破碎帯(貫入岩周辺部, 冷却破碎, 既存破碎帯, ネオテクトニクスに伴う破碎帯)
- 熱ポテンシャル(花崗岩残熱, 新期花崗岩体の貫入後の熱付与)
- 脆性-塑性変形境界(微小地震震源分布)

それぞれの地熱地域の位置は, 世界の火山分布と有力な地熱地帯分布図(第 1 図)に示す通りである。

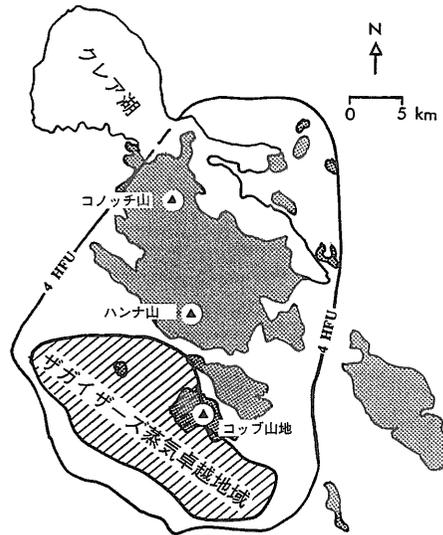
2. 新期花崗岩に係わる深部地熱資源の研究課題

標記の研究課題を検討するにあたり, まず資源調査課題と地熱学的研究課題とに大別した。前者は資源賦存状況把握と資源調査・探査・掘削・利用技術に分けることができる。今回は資源賦存状況把握だけを検討し, 第 1 表のようにまとめてみた。一方, 後者は新期花崗岩の浅所貫入環境, 地熱形成史, 各種調査・探査データの解釈などに区分して考えることができる。そして浅所貫入環境は第 2 表のように, また地熱形成史は第 3 表のようにまとめることができる。これらの資源調査課題と地熱学的研究課題とは相互に表裏一体の関係にあるもので, 両者は相互に関連しあいながら研究開発されていくものと思われる。

第 3 表 地熱形成史

地熱形成史

- 貫入(熱変成)→ネオテクトニクス(フラクチャー形成)→熱水系形成(熱水変質)
- 熱変遷史(高温乾燥→低温湿潤)
- 圧力変遷史(高圧力(岩圧)→低圧力(静水圧))
- 熱水の性状の変化(高塩濃度塩水→中性熱水)



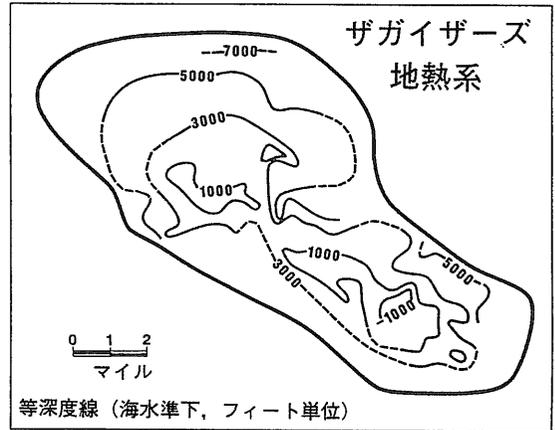
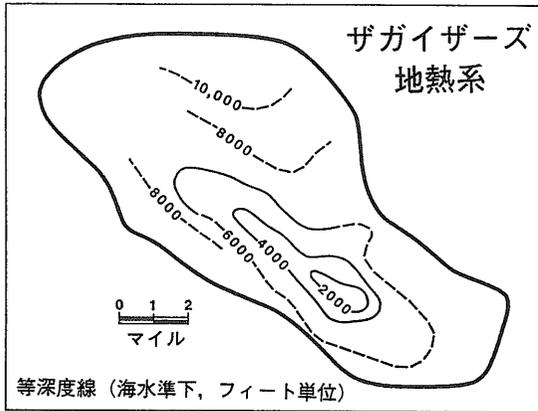
第 2 図 ザガイザーズ蒸気卓越地域とザガイザーズ=クレアレイク火山地域 (Walters and Combs, 1992).

網目部; 噴出岩分布地域, 斜線部; 蒸気卓越地熱地域, 4HFU の実線; 熱流量が 4HFU (168 mW/m²) 以上の地域を取り囲む線

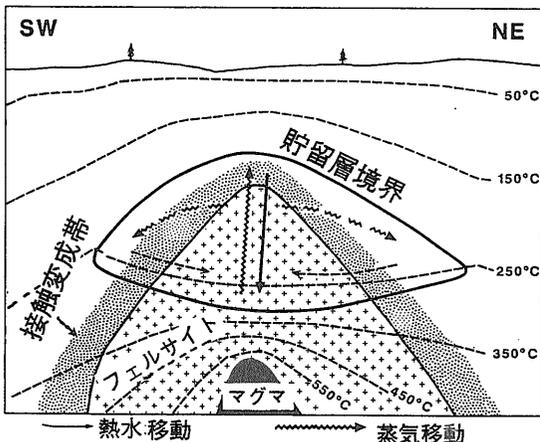
3. 世界の深部地熱開発の事例

3.1 米国ザガイザーズ地熱地域

ザガイザーズ蒸気卓越地熱地域は, 複雑な地質に関連した地熱系であり, その面積は 300 km² を越える。しかしながら, 熱流量 4HFU (=168mW/m²) 以上の熱異常地域はザガイザーズのみならず, 北方のクレアレイク火山岩分布域までもほとんど取り囲む, 極めて広範(約 1,000 km²) なものである(第 2 図)。ザガイザーズ蒸気卓越地熱地域は人間の足跡のような形をしているので, foot print と呼ばれている。その中で坑井掘削により明らかにされたフェルサイト(珪長岩)と貯留層の上面の形状は, 極めて似通っている(第 3 図)。これは, 貯留層がフェルサイト上部付近に形成されていることを示すもの



第3図 フェルサイト貫入岩の上面深度と貯留層上面深度の比較(Williamson, 1992)
 左図; フェルサイト貫入岩の上面深度
 右図; 貯留層上面深度 (両図とも等深度線は海水準下で単位はフィート)



第4図 ザガイゼース地熱地域の開発以前の貯留層モデル(Gunderson, 1992)

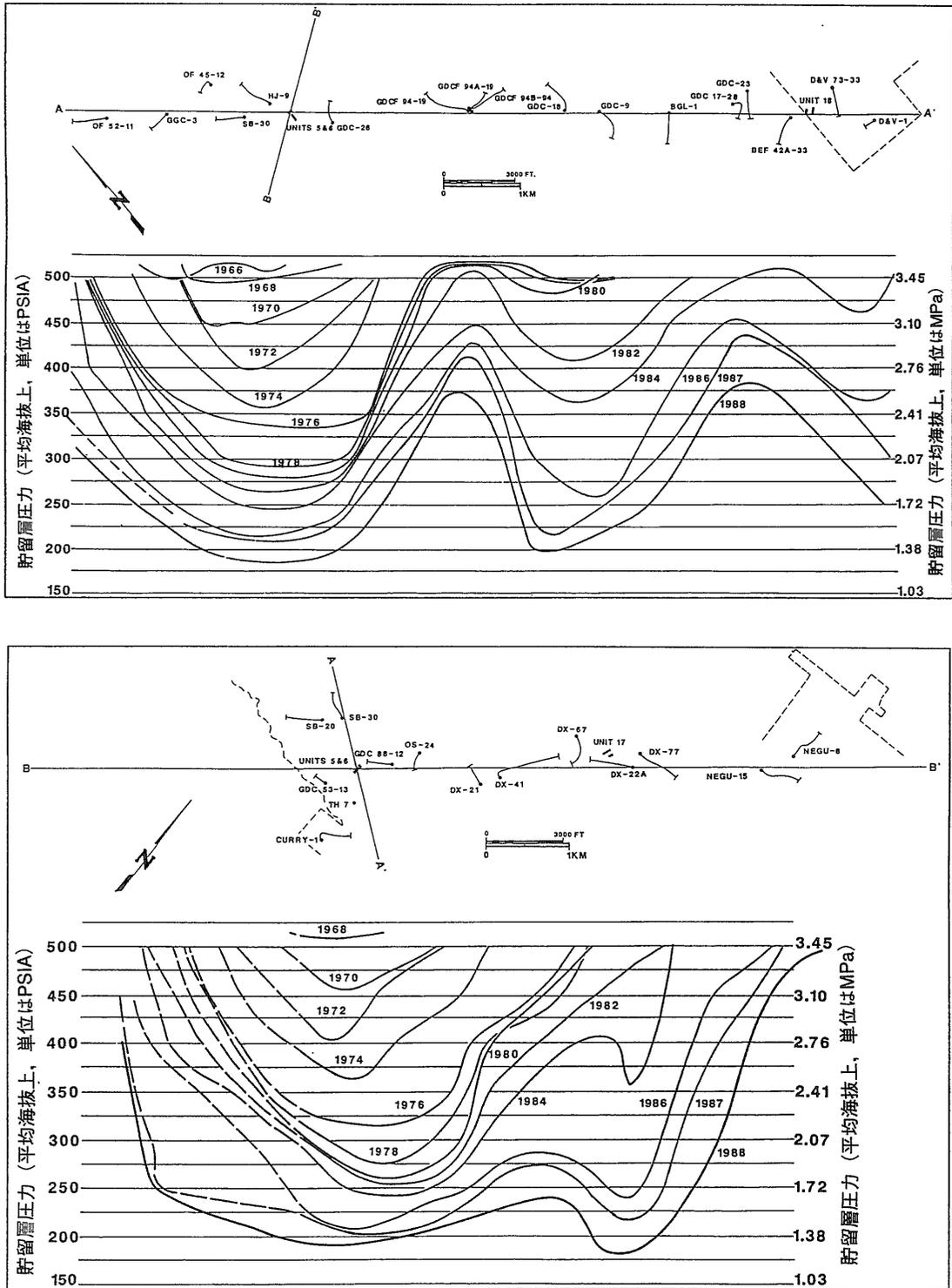
である(第4図)。貯留層圧力は過去数年の間に、過剰生産により1/2から1/3に減衰したが、温度は一定のままである(第5図)。

ザガイゼースの坑井からは断層系に賦存している蒸気のみが生産され、熱水は周囲の岩石の孔隙中に賦存している。貯留岩中の蒸気の分布は二つの主要な貯留岩の構造に支配されている。一つは、フランスカン層中の低角断層で、もう一つは下位のフェルサイト貫入岩体中の垂直断層である。フランスカン層のグレイワッケ中の蒸気流入点となっている破碎帯の方向は、いろいろな方向を持つものに対して、フェルサイト中の断層は北北西-南南東から北西-南東方向に卓越している。この断層方向は地質

学的に若い時代のテクトニクスを反映したもので、サンアンドレアス断層系の横ずれ断層に関連している。また、深度が増すにつれ、蒸気流入点数は減少する。これは岩石の変質の度合いが深度とともに増加して、熱水を賦存しうる空隙が減少しているためと考えられる。

本地熱系の北部地域には、上部地熱貯留層(蒸気卓越型)の下位に下部地熱貯留層(熱水卓越型)がある。それは350°Cに達する高温貯留層で、非凝縮性ガスの含有率が高く、腐食性HCl蒸気を含むなどの特徴を有している。この高温熱水卓越貯留層はフェルサイト岩体周辺のホルンフェルス中に発達している。また、変質鉱物や流体包有物の研究から、この地域の蒸気卓越型貯留層はかつて熱水卓越地熱系であったと推定されている。その故、高温の熱水卓越地熱系の形成はフェルサイト岩体の貫入と密接に係わって形成され、その後、多くは現在の蒸気卓越地熱系へと変化したものと思われる。

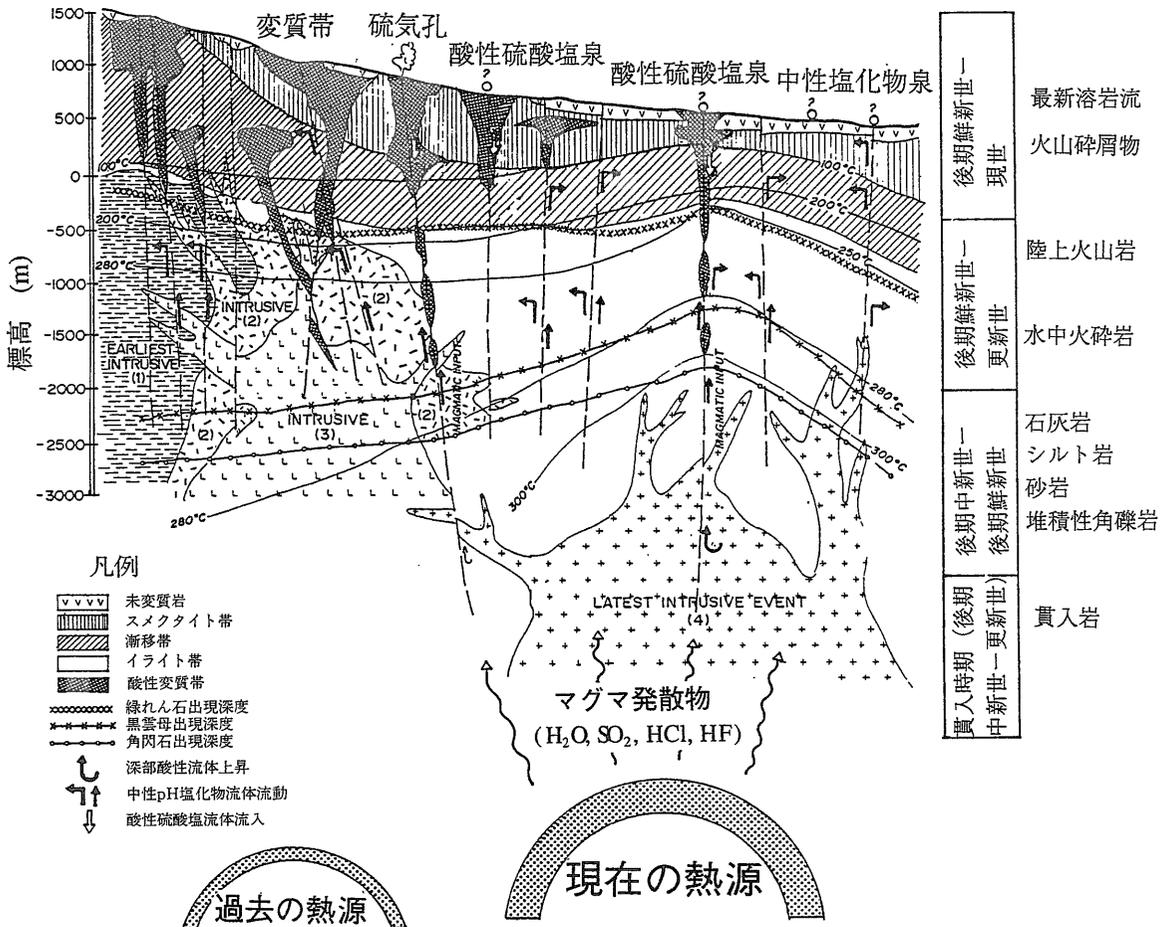
Hulen and Nielson (1993)はフェルサイト岩体を1)黒雲母流紋岩質斑岩, 2)斜方輝石黒雲母花崗岩, 3)角閃石黒雲母花崗閃緑岩に区分している。そのうち前二者は地表のクレアレイク火山地域の流紋岩質噴出岩と地化学的に類似するものであるが、地質年代的には噴出岩より古い年代値となっている(>1.3 vs 1.07Ma)。一方、花崗閃緑岩は地表のデイサイトと地化学的にも時代的(約1 Ma)にも一致する。その故、花崗閃緑岩と地表のデイサイトは同一マグマ起源と考えられる。



第5図 ザガイザーズ地熱地域の過去数年の貯留層圧力の減衰(Barker et al., 1992)

上図；北西-南東方向の断面での1966年から1989年までの圧力減衰。

下図；北東-南西方向の断面での1968年から1989年までの圧力減衰。



第6図 フィリピン地熱系の典型的な地質モデル，変質パターンおよび地質層序(Reys,1990)．水平方向は約2-15 km.

フェルサイト最上部およびその上位層に発達する熱水変質・鉍化帯(電気石，石英，正長石，曹長石に富む)はザガイザーズの北西部および南東部に集中する．これらの変質・鉍化帯は，蒸気供給路として有望な熱水性角礫岩の分布と密接に関連している．

3.2 フィリピン国トンゴナン地熱地域

Reyes(1990)はフィリピンの地熱系の一般的な特徴(地質モデル，熱水変質パターン，層序学的特徴など)を第6図のようにまとめている．フィリピンの地熱地帯は一般に安山岩質火山群の山麓に位置している．そして，それらの火山の活動は第三紀末から完新世まで断続的に続いていることが多い．また，地熱活動の中心がある方向に移動していることが多い．トンゴナンの場合は南東から北西方向へ移動し

ている．地熱地域の一般的な層序は以下に述べる通りである．鮮新統下部から完新統にかけては海成層および陸成層で，安山岩質溶岩，凝灰角礫岩，水中火砕岩および僅かなデイサイト，玄武岩よりなる．一方，中新統上部から鮮新統下部にかけては化石に富む湖沼または浅海，深海成の石灰質シルト岩で，しばしば安山岩溶岩を挟む．これらの地層の下には貫入関係で，閃緑岩，石英モンズナイトが分布している．これらは貫入関係から中新世から更新世後期に形成されたものと判断される．熱水変質には大きく見て過去の冷却してしまっただ熱水活動によるものと，現在の熱水系と平衡関係にあるものとの二通りあり，多くの地域ではそれらが相互に重複していることが普通である．それゆえ，それらの相互の時空関係を明確にさせることが重要である．

また Arnold Watson 原著, 服部訳(1984)によればフィリピンの多くの地熱系では, 数個の大きなプルトン(深成岩体の総称)が深部において確認されているとのことである。そして, それらのプルトンは種々の岩質の岩脈によって切断されている。プルトンは一般には閃緑岩または石英モンズナイトである。これらのプルトン上面付近は, 一般には冷却節理が発達しやすいため熱水貯留層が形成されていることが多い。トンゴナンでも, このことが確認されている。

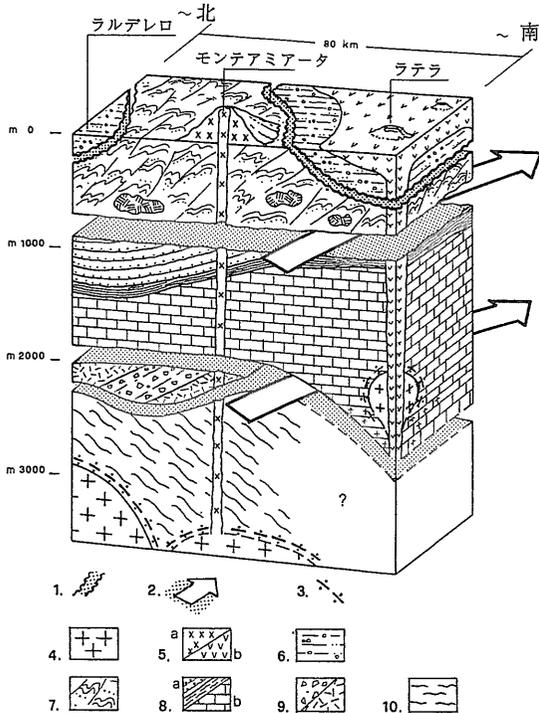
3.3 イタリア国ラルデレロ地熱地域

ラルデレロ地熱発電所を含む広範なトスカナ地熱地帯においては, 各種探査と坑井掘削が進んだために深部地熱系に係わる熱源について検討することが可能となってきた。その検討結果を, 主に Baldi et al. (1993)に基づいて, 以下に紹介する。イタリアの西側中央部およびチレニア海では, 平均地殻熱流量が 150 mW/m^2 以上と高い。チレニア海の場合は正の重力異常帯に対応し, イタリア西部中央部の場合は重力異常の正から負への漸移帯に対応する。一般的な解釈では, これらは地殻およびリソスフェアの厚さが $25\text{--}30 \text{ km}$ 以下および 50 km 以下とそれぞれ薄くなっているためとされている。しかし, 地熱

地帯で認められる 200 mW/m^2 を越える熱流量は, それだけでは説明できない。

イタリアのピサからローマにかけて発達する地熱地帯は, その地熱系の特徴からトスカニ地熱地帯とラティウム地熱地帯に大別することが出来る。各種の地熱調査データから, トスカニ地熱地帯では深部に大規模なマグマ溜りが予想されるのに対して, ラティウム地熱地帯ではより浅部に小規模のマグマ溜りが予想されている(第7図)。このトスカニ地熱地帯で予想されるマグマは酸性の再生マグマで, 生成年代は大変新しいものと考えられる。一方, ラティウム地熱地帯は基本的に火山性陥没構造に関連した地熱系で, トスカニ地熱系と比べると個々独立した相対的に小規模のものである。この熱源はシリカに不飽和なアルカリ岩をもたらししたマグマの残液と考えられている。ここではトスカナ地熱地帯で予想されている大規模な再生マグマに注目する。

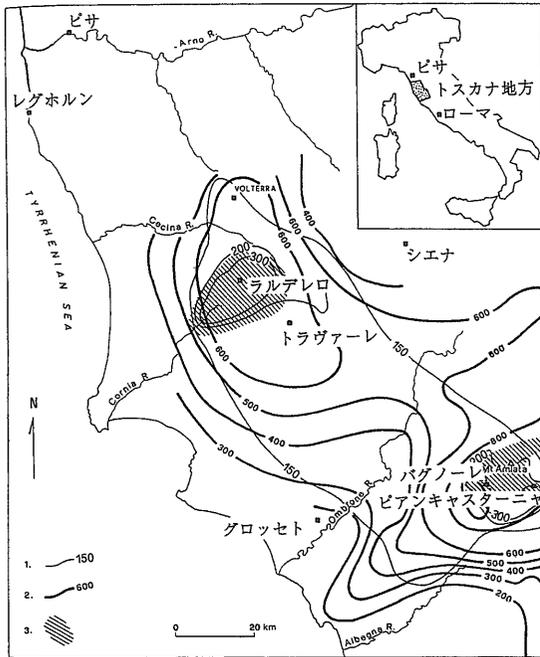
トスカニ地熱地域の熱流量および地下構造は第8図に示す通りである。熱流量はラルデレロからアミアータ山までの広範な地域で 150 mW/m^2 以上となり, 北端のラルデレロと南端のアミアータ山では 300 mW/m^2 以上となる。これと調和的な地下構造は, 隆起構造である。最も若い海成層の出現高度は



第7図

イタリアのトスカナ地熱地域およびラティウム地熱地域における地質複合体の相互の構造関係を示したブロックダイアグラム (Battaglia et al., 1991)

1. 海進面
2. 押しかぶせ断層面
3. 接触変成帯
4. マグマ体(第四紀)
5. a) トスカナマグマ区の流紋石英安山岩と粗面安山岩(第四紀)
b) ローマン同源マグマ区のKに富むアルカリ火山岩(第四紀)
6. 新原地性岩体(上部中新統-鮮新統)
7. 異地性フリッシュ岩体“リグリス”(下部白亜系-始新統)
8. トスカンナッペ岩体: a) 陸源層(白亜系-下部中新統), b) 炭酸塩層(上部三畳系-上部ジュラ系)
9. テクトニックウェッジ岩体(古生層-上部三畳系)
10. 変成岩基盤岩(古生層)



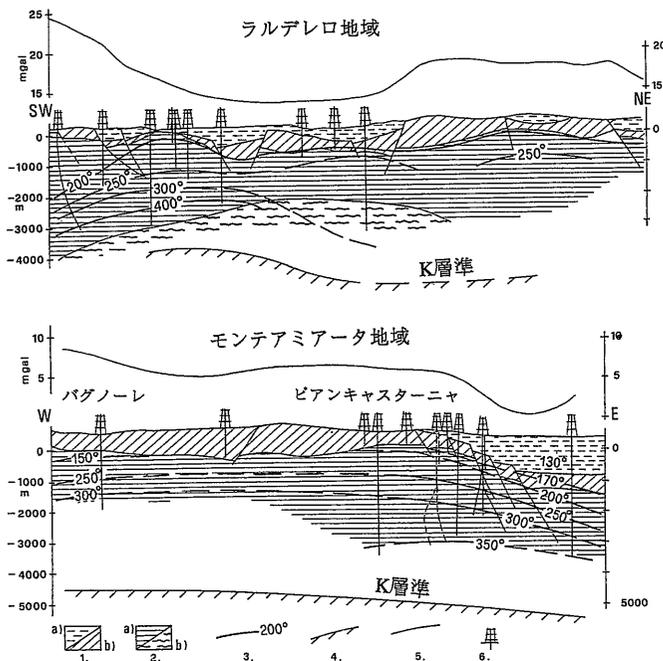
第8図 南西トスカナ地方の熱流量，基盤高度分布図 (Baldi et al., 1993)

1. 等熱流量線 (mW/m²)
2. 新原地性堆積物の高度 (海拔 m)
3. 深度5,000 m 以浅に深部地震反射層準(K Horizon)の認められる地域

トスカニ地熱地域全体として見ると標高300 m 以上であるのに対して，ラルデレロとアミアータ山では600 m 以上と非常に高くなっている．また，この両地区では地下5,000 m 以浅で，K層準とよばれている顕著な地震反射面が認められる．これは上部地殻と下部地殻の境界に相当し，弾性/塑性変形の境界となっていると考えられている．また，この境界は大規模な再生マグマの頭部に相当している可能性もあると指摘されている．それぞれの地区の地熱構造断面図は第9図に示す通りである．

4. 各国の深部地熱系の比較・検討

米国のザガイザーズ，イタリアのラルデレロ，フィリピンのトンゴナン，日本の葛根田では，地熱開発が浅部から深部にむけて進行する中で，深部地熱系がかなり明らかにされつつある．現時点ではこれらの4地域が，世界で最も良く解明されている地域とすることができる．そこで，賦存位置，賦存層準，貯留層，帽岩，流体性状，圧力，熱源の観点から，4地域を比較・検討してみた(第4表)．その結果，熱源としては新期マグマがいずれの地域でも想定されていることが明らかとなった．また，深部貯留層として新期花崗岩頂部ないしその上位層が，重



第9図

ラルデレロおよびモンテアミアータ地熱地域の地質断面図 (Baldi et al., 1993)

1. 帽岩，a) 新原地性堆積物(上部中新統-鮮新統)，b) フリッシュ相岩体“リグリズ”(白亜系-始新統)
2. 貯留層，a) トスカンナッペの炭酸塩層(上部三畳系-白亜系)とテクトニックウェッジの苦灰岩，硬石膏，珪岩，千枚岩(古生層-上部三畳系)，b) 片麻岩基盤岩(先カンブリア系-古生層)
3. 等温線(°C)
4. 地震的K層準
5. プーゲ等重力線(mgal)
6. 地熱井

第 4 表 4 地域の深部地熱系の比較表

	ザガイザーズ	ラルデレロ	トンゴナン	葛根田
賦存位置	サンアンドレアス断層 第四紀火山列の南西部	Tyrrhenian 隆起帯 Tuscan マグマ区	フィリピン断層沿い 火山フロント沿い	脊梁基盤隆起帯 火山フロント背後
賦存層準	グレイワッケ層準, フェルサイト頂部	Tuscan Nappe(炭酸塩岩) 基盤岩(変成岩)	鮮新統上部—更新統 貫入岩体, 中・鮮新統	新第三系 新期花崗岩頂部
貯留層	浅部貯留層(～240°C) 深部貯留層(260～315°C)	浅部(500～1,000 m 深度) 深部(1,500～2,000 m 深度)	浅部(1,000 m 深度前後) 深部(2,000 m 深度前後)	浅部(1,500 m 以浅) 深部(1,500 m 以深)
帽 岩	フランシスカン層群緑色岩 セルフシーリングゾーン	異地性フリッシュ相 新現地性粘土相	スメクタイト変質帯	山津田層など
流体性状	浅部(中性, 非腐食性) 深部(酸性, 腐食性)	浅部(蒸気卓越) 深部(蒸気卓越)	浅部(250°C前後) 深部(280°C)	浅部(中性熱水) 深部(中性—酸性)
圧 力	圧力減衰(3.45-1.03 MPa)	蒸気圧(7-0.2 MPa)	—	—
熱 源	最新フェルサイト貫入岩 —マグマ溜り	反射面(K horizon)以深 最新再生マグマ貫入	新期花崗岩質貫入岩 マグマ溜り	微小地震震源下限 新期花崗岩類

要な役割を果たしていることもわかった。今後は、それらの資源としてのポテンシャルを解明していくことが課題と思われる。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、貴重な情報および文献を提供してくれた NEDO 地熱調査部およびアメリカ地質調査所のバトリック・マフラー博士、ユタ大学研究所ジョセフ・ムア博士、地質調査所鉱物資源部ジェフリー・ヘデンクイスト博士に感謝の意を表す。

文 献

Baldi, P., Bertini, G. and Ceccarelli, A. (1993): Geothermal fields of central Italy. Proceedings of the 29th International Geological Congress 1992, Resource Geology Special Issue 16, vol.B, 69-81.

Barker, B.J., Gulati, M.S., Bryan, M.A. and Riedel, K.L. (1992): Geysers reservoir performance. In; (C. Stone, ed.) Monograph on The Geysers geothermal field: Geothermal Resources Council, Special Report 17, 167-177.

Battaglia, A., Ceccarelli, A., Frohlich, K., Panichi, C. and Ridolfi, A. (1991): Radium isotopes in geothermal fluids in Central Italy. Proceedings of an Int. Symp. on Isotope Techniques in Water Resources Development, IAEA, Vienna 1992, 363-383.

土井宣夫・加藤 修・蟹沢聡史(1993)：岩手県葛根田地熱地域の 新期花崗岩類の K-Ar 年代と熱水対流系の生成時期。日本地熱学会年會講演要旨集, P2.

Gunderson, R. P. (1992): Distribution of oxygen isotopes and non-condensable gas in steam at The Geysers. In; (C. Stone, ed.) Monograph on The Geysers geothermal field: Geothermal Resources Council, Special Report 17, 113-138.

Harayama, S. (1992): Youngest exposed granitoid pluton on

Earth: Cooling and rapid uplift of the Pliocene-Quaternary Takidani Granodiorite in the Japan Alps, central Japan. *Geology*, **20**, 657-660.

Hulen, J. B. and Nielson, D. L. (1993): Interim report on geology of the Geysers felsite, Northwestern California. *Geothermal Resources Council Transactions*, **17**, 249-258.

加藤 修・土井宣夫・村松容一(1993)：岩手県葛根田地熱地域における 新期花崗岩類と地熱貯留層。日本地熱学会誌, **15**, 41-57.

勝井義雄(1972)：世界の火山分布。科学, **42**, 386-392.

村岡洋文(1993)：マグマを視座とした将来型地熱資源像の展望。地熱, **127**, 26-52.

Reyes, A. G. (1990): Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Jour. Volc. Geotherm. Res.*, **43**, 279-309.

酒井 均・大木靖衛(1978)：日本の温泉。科学, **48**, 41-52

角 清愛(1990)：東北の地熱地域の熱源岩の研究。温泉科学, **41**, 67-74

Walters, M.A. and Combs, J. (1992): Heat flow in The Geysers-Clear Lake geothermal area of northern California, U.S.A. In; (C. Stone, ed.) Monograph on The Geysers geothermal field: Geothermal Resources Council, Special Report 17, 43-53.

Watson, A. 原著, 服部 旭 訳(1984)：フィリピン国・トンゴナン地熱フィールドの開発。地熱, **21**, 248-256.

Williamson, K.H. (1992): Development of a reservoir model for The Geysers geothermal field. In; (C. Stone, ed.) Monograph on The Geysers geothermal field: Geothermal Resources Council, Special Report 17, 179-187.

SHIRO Tamanyu (1994): Examples for the deep geothermal exploration in the world, with the special reference to the Neo-granite.

<受付：1994年1月6日>