

## 概要調査における熱・熱水の影響評価のための調査・解析・評価手法の提案

玉生志郎<sup>1</sup>・阪口圭一<sup>2</sup>

Shiro Tamanyu and Keiichi Sakaguchi (2008) Proposal of surveys, analyses and evaluation methods for the effects of heat and hydrothermal water on surroundings of geological repository at the stage of Preliminary Investigation. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 59 (1/2), p.123 - 134, 1 fig, 3 tables.

**Abstract:** The effects of heat and hydrothermal water on surroundings of geological repository were investigated in the past the three-year study. Considering this result, the surveys, analyses and evaluation methods for the planning of Preliminary Investigation and its following site-specific surveys are investigated. The applicable surveys/analyses/evaluation methods corresponding to the survey targets, stages and classified type areas are summarized. Survey targets are roughly subdivided into shallow and deep parts. Evaluation items for shallow part are as follows: regional surface imagery, regional geological structure, drilling and logging data, subsurface temperature distribution, fluid flow, permeability distribution, water-rock interaction. Evaluation items for deep part are as follows: estimation of deep temperature, concealed heat source/deep heat source and deep fractures. Survey stages are divided into surface survey, subsurface survey with boring survey and future estimation. Classified type areas are as follows: forearc plain, forearc mountain, Quaternary volcanic terrain, backarc plain, backarc mountain. An overall picture of surveys, analyses and evaluation methods is presented as table.

**Keywords:** survey method, analysis method, evaluation method, heat, hydrothermal water, geological repository, preliminary investigation, site specific survey

### 要 旨

これまでの原子力発電環境整備機構の委託研究「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」, 「同 (その2)」, 「同 (その3)」での研究成果を踏まえて, 概要調査計画の立案及び概要調査の実施における「熱・熱水の影響評価のための調査・解析・評価手法」を検討した。適用可能な調査手法, 解析手法, 評価手法について, 調査項目, 調査段階, 調査地域のタイプ区分に対応させて検討した。調査対象は大きく浅部と深部に区分される。浅部で考慮すべき要件は, 広域表層イメージ, 広域地質構造, 坑井掘削, 温度構造, 流体流動, 透水係数分布, 岩石水反応で, 一方, 深部で考慮すべき要件は, 地下深部温度推定, 潜頭性熱源と深部熱源, 深部断裂である。調査段階は地表調査段階, ボーリング調査段階, 将来予測段階に分けられる。広域地域のタイプ分けでは前弧側低地, 前弧側山地, 第四紀火山地域, 背弧側山地, 背弧側低地に分けられる。最終的には, 上記の考慮すべき要件に対応した調査手法, 解析手法, 評価手法を, 一覧表として取りまとめた。

### 1. 本研究で取り上げた調査・解析・評価手法の位置づけ

本研究は, 原子力発電環境整備機構の委託研究「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」(原子力発電環境整備機構, 2004), 「同 (その2)」(原子力発電環境整備機構, 2005) 及び「同 (その3)」(原子力発電環境整備機構, 2006) (以下, 本研究と言う) として実施したものの一部である。その成果に基づいて, 概要調査地区における熱・熱水の影響評価のための適切な調査・解析・評価手法について提案する。

本節では, まず, 本研究で実施した各手法が地層処分地選定プロセスのどの段階に用いられるものであるかを概観する。各手法における個別の成果や課題については手法毎の報告でまとめられているので, ここでは詳述しない。その上で, 次節で概要調査地区における熱・熱水の影響評価のための調査・解析・評価手法の提案を述べる。

廃棄物処分地選定は, 概要調査地区選定 (文献調査) - 精密調査地域選定 (概要調査) - 処分施設建設地選定 (精密調査) という手順で実施される。このうち概要調査では, 地表踏査, 物理探査等とボーリング調査が実施されることになっている。本研究で主眼としているのは, 概要調査以降の段階に適用できる調査・解析・評価手法の検討, 及びその前段階の文献調査から概要調査への移行を確実にするための解析・評価手法

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

<sup>2</sup>地質調査情報センター (AIST, Geological Survey of Japan, Geoinformation Center)

第1表 本研究で取り上げた手法の位置づけ.

Table 1 The status of methods adopted in this project.

地域スケール	評価すべき項目	本研究で採り上げた手法					対応する調査	
		震源データ解析	(広域)電磁探査法	温泉放熱量解析	放射年代測定(ESR)	流体地化学(地化学シミュレータ)解析		変質(ボーリングコア)解析
広域	深部温度構造	○	○					文献調査 概要調査
	深部熱源	○	○					
	深部断裂系							
	浅部温度構造			○		○	○	
	浅部透水構造	2・3次元可視化, 広域流動シミュレーション		○		○	○	
ローカスケール サイトスケール	温度構造	2・3次元可視化, 広域流動シミュレーション (ローカル/ サイトスケールへの改良・適用)					○	概要調査 精密調査
	透水構造				○		○	
	地下水(熱水)性状					○	○	
	鎮撫熱源・温度構造					○	○	
	熱水系(地下状態)の時間変化				○		○	

である。本研究で取り上げた各手法の位置づけをまとめたものを第1表に示した。

第1表では、対象地域のスケールによって「広域」と「ローカル及びサイトスケール」に大別した。処分地選定プロセスにおいては、前者が文献調査及び文献調査から概要調査への移行プロセスに、後者が概要調査以降の調査に対応する。

### 1.1 広域を対象とした解析・評価手法

本研究におけるテーマでは、「震源データを用いた深部構造解析手法」(楠瀬・川方, 2006), 「電磁探査による深部構造解析手法」(内田, 2006), 「温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討」(阪口, 2008)が広域の調査段階(文献調査及び概要調査への移行段階)の解析・評価手法に該当する。このうち前2者が深部(2~3 km以深)の温度構造や熱源についての情報を、後1者が浅部の温度構造や透水性構造についての情報を提供する。なお、地震(震源分布)及び温泉については、日本全国でほぼ一般的な品質の公表データが得られているか、もしくは、比較的簡単に補足データ収集を行える。一方、電磁探査データは既存測定データのある場所が限られているため、今後、多くの地域での広域調査が必要である。

「震源データを用いた深部構造解析手法」では、地震発生下限が地下の温度分布と密接な関係があるという

議論を踏まえて、気象庁一元化震源データを用いて、東北地方中央部と中国・四国地方において震源分布を解析した。また、地震波形データを用いた解析手法の文献調査を行った。震源分布解析においては、地殻内に生じる微小地震の震源分布深度の下限は、①地温が350℃程度の深さと対応すること、②非火山性の熱水地域(特に深層熱水資源分布地域)では地震活動が概して低調であることが明らかとなった。これらのデータは後述の「地球科学的特性に関する情報収集及び2次元・3次元可視化」に提供され、他の地球科学データと重合表示・比較されることで、高温地域の特徴抽出やタイプ分けに有効に利用された。気象庁一元化震源データは、全国にわたってほぼ一般的な品質のデータが公表されているのが、毎年新しいデータが追加されているので、文献調査・概要調査時に改めてデータを収集することが望ましい。

「電磁探査による深部構造解析手法」では、我が国において種々の目的のために取得されたMT法データのうち、現在でも利用できる状態で保存されているデータについて情報を収集した。また、ケーススタディとして東北地方の火山フロント外帯の2地域においてデータの再解析を行い、①測線の外側の海水の存在が解析結果に影響するので、比抵抗モデルに海水を含める必要があること、②地震データとの比較により、地表に温泉などの熱異常の兆候は見られないものの、深部で

は地震と水の活動は活発であると考えられる領域が抽出できること、などの知見を得た。解析結果は高温地域のタイプ分けや、広域流動シミュレーションのパラメータ設定に対して重要な情報を与えるものである。ただし、前述のように既存の電磁探査データは実施地域に限られるので、概要調査時に候補地域を含む広域を対象として新たに調査を実施する必要性が高い。

「温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討」では、青森・中国・四国地域を対象として、温泉放熱量の平面的分布や深度情報を加味した放熱量の検討から、非常に広域を対象とした地域間比較ではあるが、地域の地下特性（例えばその地域の地層の透水性）を捉える上での情報を提供できる見通しを得た。放熱量分布そのものは「地球科学的特性に関する情報収集及び2次元・3次元可視化」では扱われなかったが、元の温泉データは地下温度構造推定や他のデータとの比較において活用された。また「高温地域の成因の検討」での広域流動シミュレーションの参照データに用いられた。現在公表されている温泉データは、面的には全国をほぼ一様水準でカバーしているが、解析に必要なパラメータである温度・産出（ボーリング）深度・湧出量・産状が揃っているものは多くない。文献調査・概要調査においては追加の調査によって比較的簡単に補うことが可能と考えられる。

本研究ではこれらの情報及びその他の情報（地質、地下温度構造など）を、「地質・地球物理データの重合処理による熱・熱水異常地域の抽出 —東北地方と中国・四国地方の例—」（玉生ほか、2008）によって比較検討し、「地下温度分布からみた高温地域を含む広域地域のタイプ分け —東北地方と中国・四国地方の例—」（玉生、2008）として整理した。本研究では「重合処理」には直接データを提供することはなかったが、流体地化学解析（佐々木、2008）や既存ボーリング資・試料に基づくボーリングコア変質解析（茂野、2008）も広域の浅部温度・透水性構造の把握のための情報を提供する。また、非火山地域の高温暖泉として注目される近畿地方（紀伊半島及び有馬）の高温暖泉について、広域テクトニクスから見た成因と将来予測を示した（村岡、2008）。

## 1.2 ローカルスケールからサイトスケールの調査・解析・評価手法

ローカルスケールからサイトスケールの調査段階（すなわち、概要調査から精密調査）には、「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」（茂野、2008）、「放射年代測定法を用いた地熱系の長期変動解析手法（ESR）」（水垣、2008）、「流体地化学に基づく熱・熱水の影響評価手法」（佐々木、2008）が主として対応する。これらの手法は、ボーリング調査に

適用することによって、地下の3次元温度・透水性構造の解明に寄与し、まだ可能性の段階のものもあるが、熱水系ないし地下状態の時間変化（例えば温度履歴）を解析できる可能性がある。

「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」では、島嶼を含む本州・九州地域で実施されたNEDO地熱開発促進調査坑井の変質データの電子データベース化を行い、代表的な地域について温度・地質などのデータとの統合的な時空間解析を行い、数10万年前以降の変質活動の分布環境・発達史などを明らかにした。坑井変質データ解析は、概要調査地域の地下温度・透水構造や変質をもたらした熱水の性状、及びそれらの時間変動（熱水活動履歴）の情報を提供する。変質データと共に地質分布、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ことが「熱・熱水の影響評価」の対象となる近過去・現在の熱・熱水変質とより古いものとの区別に有効である。本研究で収集したデータは高温地熱系を目的とした調査のものであるが、比較的低温の地域での変質データの解析も行うことにより、概要調査地域での調査・解析でのデータ処理の方法や解析での留意点等を示した。

「放射年代測定法を用いた地熱系の長期変動解析手法」では、文献調査により、①熱水系の移動速度・再活動の検出可能性及び②低温析出鉱物のESR年代測定可能性を検討するとともに、③火山性高温熱水系による変質帯での熱水活動の時間変化等を検出するための実験、及び④温度・時間条件評価のための加熱実験を実施した。③においては、ESR年代が実際に熱水活動の終息年代を記録していると考えられること、及び加熱によりESR信号が変化していることを検出できた。④については過去の加熱実験例とは異なる温度特性を明らかにしたが、測定例が少ないため、測定事例を蓄積していくことがまず求められると判断された。ESR年代測定による解析では、各種の信号の温度特性の差に基づき過去の地熱活動の有無（年代）の検出や、温度や継続時間についての情報を得られる可能性が指摘できたが、基礎的実験や測定例の蓄積が必要である。また、上記の③の実験において断層系に支配された年代値分布が認められ、地下の透水性（断層）分布についての情報も得られる。本手法は他の手法に比べると、まだ研究段階にあるので、今後、サイトスケールの調査に適用するには多くの技術開発が必要と思われる。

「流体地化学に基づく熱・熱水の影響評価手法」では、文献調査と地化学数値モデル解析を行って、深部に賦存する地下水水質の特徴をとりまとめ、地化学数値モデル解析上の留意点を整理した。花崗岩地域と堆積岩地域に分けて、また天水起源、海水起源等の種々の流体の場合について、地下での水・岩石反応過程と



それを支配する要因及び緩衝系等についての知見を得た。本手法では、文献調査及び地表調査の段階では、地化学温度計の適用により地下水・温泉水の貯留温度が推定できる。また、湧水や河川水の水質と候補地区の岩相（全岩分析値、鉱物組み合わせ）を基に、地下水水質と鉱物種に関する深度プロファイル（本稿での反応量比に対するプロファイル）を作成し、深部環境の第一近似的な推定を行える。坑井掘削段階では、地下水水質と地下に存在する鉱物種とが明らかにされるので、地化学数値モデル解析を通じて水質形成に関わる要素反応を具体的に算出でき、地下水・熱水の性状や、（深部からの流体が検出されれば）深部の熱源や温度構造に関する情報を得ることができる。

### 1.3 広域対象手法のローカルスケールへの適用

本研究においては、震源データ解析や電磁探査法を広域レベルでの（既存データを用いた）解析・評価手法として検討し、例えば震源分布データ解析結果を地球科学的特徴抽出（重合処理）のデータソースの一つとして用いた。しかし、（人工震源を含む）地震データ解析や電磁探査法は、より狭い地域（より浅い深度）を対象とした資源探査等の調査で既に調査・解析手法としての実績があり、概要調査以降の段階では、調査・解析手法（物理探査手法）として調査計画に組み込まれるべきものである。重合処理（玉生ほか、2008）や流動シミュレーションの手法（中尾ほか、2008）は、ローカルスケールやサイトスケールの調査で得られたデータを用いるように改良・変更して、概要調査以降の段階での熱・熱水の影響評価に用いることが可能である。

## 2. 概要調査地区における熱・熱水の影響評価のための調査・解析・評価手法の提案

これまでの研究成果と既存調査報告（物理探査学会、1989、産業技術総合研究所地質調査総合センター、2001、火力原子力発電技術協会、2004、日本エネルギー学会、2005、核燃料サイクル開発機構、2005）などを参考にして、概要調査地区での概要調査計画の立案及び概要調査の実施における「熱・熱水の影響評価のための調査手法」を検討した。本作業においては、土木学会 原子力土木委員会地下環境部会（2006）の「精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方」を参照しつつ、その様式に準拠してとりまとめを行った。調査・解析・評価の調査フローを第1図に、評価すべき項目に対する主な調査項目を第2表に示す。

調査フローは地表調査段階、ボーリング調査段階、将来予測段階の3段階に分けて検討した。以下にその概要を記述する。

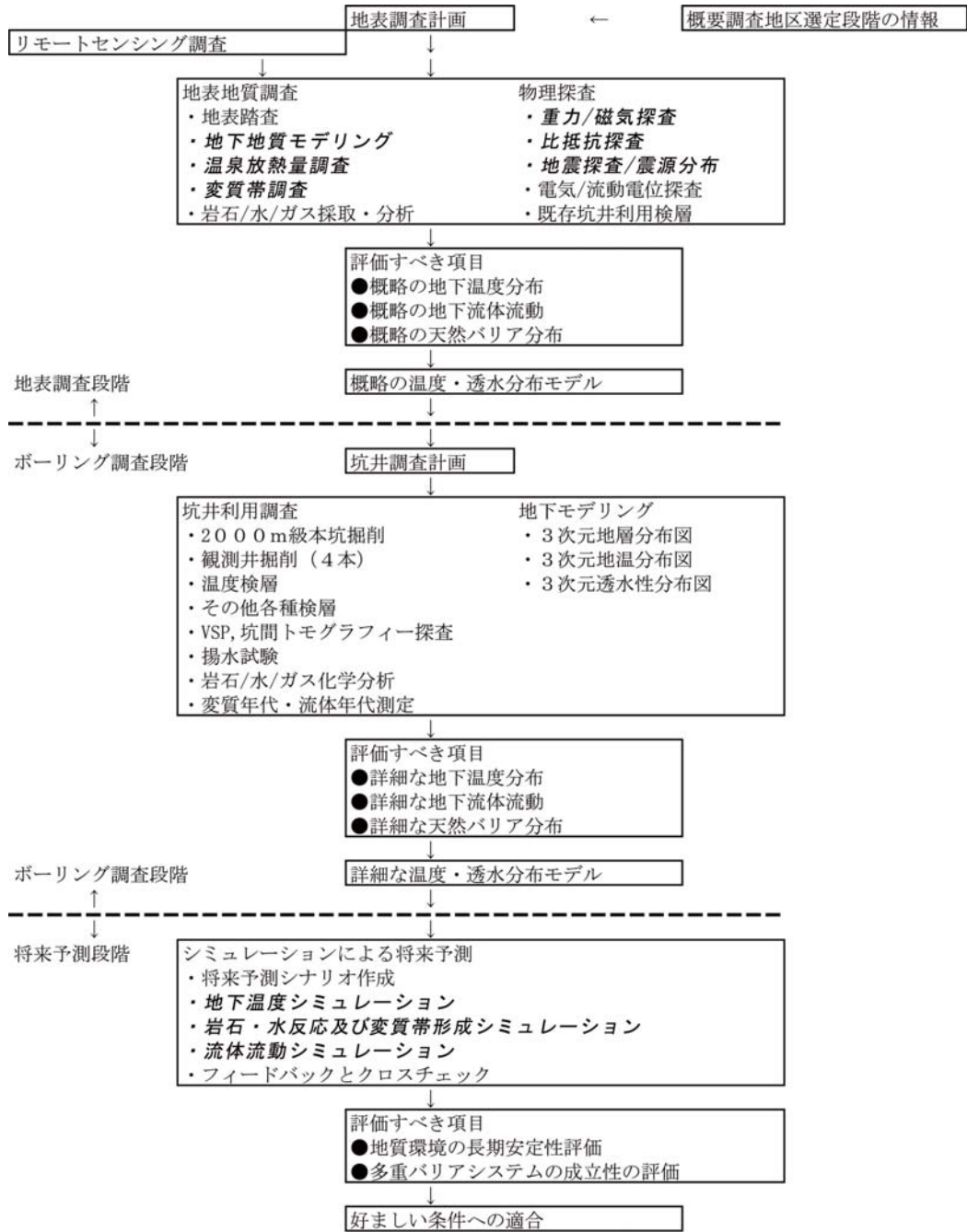
### 2.1 調査フロー（第1図）

原子力発電環境整備機構（2002）によると、概要調査地域の選定は、応募区域及びその周辺の地域を対象に文献調査によって地質環境の長期安定性の観点から行うとされている。また、この結果、選定された概要調査地区においては概要調査（ボーリング調査、地表踏査、物理探査等）を行い、最終処分を行おうとする地層及びその周辺の地層が安定していること、坑道の掘削に支障がないこと、地下水の水流等が地下施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること等の確認を行うとされている。

このような概要調査において、特に熱・熱水の影響評価の調査を、どのような手順で行うべきかまとめた図面が、第1図である。今回の「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」で取り上げた項目をゴシックの斜体で表記した。調査・解析・評価手法の詳細は、次節で説明するので、ここでは調査の流れについて概要を説明する。

最初に概要調査地区選定段階の情報として、本プロジェクトで検討した全国規模の高温地区を含む広域地域のタイプ分け（玉生ほか、2008）を参照し、選定された概要調査地区がどのような特徴のあるタイプに属する地域であるか検討する。その後、概要調査地区に関わる既存文献調査を行い、地下の熱・熱水に関して、何が判っていて何が判っていないのか明確にさせる。その結果を踏まえて地表調査計画の立案を行う。概要調査地区によって、必要となる調査項目は若干異なってくるが、ここでは一般的に考えて必要と思われる調査項目の主要なものをリストアップする。まず、広域表層イメージを把握するために、リモートセンシング調査の衛星画像解析や空中写真判読によって、概要調査地区の地形・地質的な特徴を把握する。その後、熱・熱水の影響評価のための地表地質調査と物理探査を行う。地表地質調査としては、地表踏査、地下地質モデリング、温泉放熱量調査、変質帯調査、岩石/水/ガス採取・分析などを行う。物理探査としては重力/磁気探査、比抵抗探査、地震探査/震源分布解析、電気/流動電位探査、既存坑井利用検層などを行う。これらの結果をとりまとめて、概略の温度・透水分布モデルを作成する。

次なるボーリング調査段階では、上記の地表調査段階の結果を踏まえて、まず坑井調査計画を立案する。この段階では坑井利用調査と地下モデリングが必要となる。坑井利用調査としてはコントロール・ポイントとなる2,000 m級本坑掘削と500 m級観測井4本の掘削を行う。これに伴って温度検層、その他各種検層、VSP/坑間トモグラフィ探査、揚水試験、岩石/水/ガス化学分析、変質年代・流体年代測定などを行う。また、これらの調査結果と地表調査結果をまとめて、地



注) **ゴシック斜体**で表示された事項は本プロジェクトにて検討された項目

第1図 調査・解析・評価手法のフロー図.

Fig. 1 Flow chart of survey, analysis and evaluation methods.

下モデリングとして3次元地層分布図, 3次元地温分布図, 3次元透水性分布図を作成する. この結果, 詳細な温度・透水分布モデルを作成することとなる.

以上の結果を踏まえて, 地下の温度分布と透水分布の将来予測を行う. そのためにはまず将来予測シナリオを作成し, それに基づいて地下温度シミュレーション, 岩石・水反応及び変質帯形成シミュレーション, 流

体流動シミュレーションを行う. これらの結果を再度将来予測シナリオにフィードバックするとともに, 各種フィールド調査で得られる実データとのクロスチェックを行う. 妥当な結果が得られた時点で, 最終的な地質環境の長期安定性と多重バリアシステムの成立性の評価を行う.

第2表 概要調査における熱・熱水の影響評価の全体像。

Table 2 An overall picture of surveys, analyses and evaluation methods for the effects of heat and hydrothermal water on surroundings by geological repository during Preliminary Investigation.

浅部 / 深部	考慮すべき要件	評価すべき項目	主な調査項目	主な調査手法	解析手法	評価手法
浅部	広域表層イメージ	表層の特徴	地形 表層地質	リモートセンシング調査	衛星画像解析 空中写真判読	広域地質構造, 変質帯の抽出
	広域地質構造	温度・透水構造	地質構造	地質調査と各種物理探査 地下地質モデリング	地質マッピング 三次元モデリング	温度構造と透水 構造の概要把握
	坑井掘削	深度実情報コントロール・ ポイント情報	検層 コア物性	本坑と観測井の掘削 坑井物理検層 コア物性測定 揚水試験 モニタリング	坑井データ解析手法 (坑井データと地表探査データ比較検討 3Dモデリング技術)	コントロール・ポイントでの データ取得
	温度構造	熱・熱水の影響範囲と度合い	温度測定 温度推定	温度検層 地化学温度計算 地下温度シミュレーション	地層平衡温度解析 最適な温度計の適用 地温勾配外挿法	地下温度分布の把握
	流体流動	流体流動の範囲と度合い	流動の範囲と方向と速さ	坑内物理検層 自然電位と流動電位測定 温泉放熱量調査 震源分布データ収集 流体流動シミュレーション	調査データからの流体流動解析手法 温泉放熱量算定法 最新データ解析 境界条件等の検討	流体流動の把握
	透水係数分布	透水構造	三次元透水分布	透水層 / 不透水層分布 透水性試験 コア物性試験 流体年代測定 土壌ガス調査	調査データからの透水構造解析手法	透水構造の把握
	断裂系の透水係数分布	断裂系の透水性	断裂系分布と性状	断裂系調査 コア物性試験 浅層弾性波探査	断裂系の透水構造解析手法	断裂系の透水構造の把握
	岩石水反応	岩石の変質	変質帯の分布と性状	変質帯調査 変質年代測定 岩石水反応計算 比抵抗探査	変質帯の形成メカニズム解析	変質帯の分布と特性
	地下深部温度推定	深部温度構造	深部温度構造	温度検層データの外挿 キュリー一点深度探査 地震波減衰率解析	深部温度の推定手法	深部温度
	潜頭性熱源と深部熱源	熱源	熱源の分布と性状	貫入岩分布調査 各種物理探査 震源分布データ収集	深部熱源の解析手法	深部熱源
深部断裂	深部断裂系	深部断裂系の分布と性状	断裂系調査 モデリング解析	深部断裂の解析手法	深部断裂	

\*ゴシック・斜体で表記された事項は本プロジェクトにて検討された項目



## 2.2 調査項目(第2表)

上記の調査フローのなかで調査項目の主要なものを記載したが、ここでは調査項目を詳細に説明する。まず調査項目を検討するに当たり、浅部と深部に区分した。その理由は、浅部(地下2~3 km以浅)では基本的に熱水対流(温度の低い場合も含む)が卓越する領域であるのに対して、深部(地下2~3 km以深)では熱伝導が卓越する領域であるためである。したがって、調査手法も、浅部では熱水対流に関わるものであるのに対して、深部では熱伝導に関わるものが主体となる。具体的に述べると、考慮すべき要件は、浅部では広域表層イメージ、広域地質構造、坑井掘削(コントロール・ポイント情報)、温度構造、流体流動、透水係数分布、断裂系の透水係数を対象とするのに対して、深部では地下温度推定、潜頭性熱源と深部熱源、深部断裂を対象とする。評価すべき項目は、熱・熱水の影響範囲とその程度を明らかにさせるもので、温度構造、透水構造、熱履歴に関する事項が主となり、その他それらに関係するバックグラウンド的な事項も含まれる。調査項目は評価すべき項目を具体的な調査課題として記載した。主な調査手法、解析手法、評価手法としては、一般的に用いられる項目を列挙した。そのうち、今回の「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」(原子力発電環境整備機構, 2004, 2005, 2006)で取り上げた項目をゴシックの斜体で表記した。以下、考慮すべき要件毎に調査・解析・評価の内容を説明する。

### 2.2.1 浅部

#### 2.2.1.1 広域表層イメージ

概要調査地域とその周辺域の全体的な地形や表層付近の特徴を把握するには、リモートセンシング調査が適している。人工衛星や航空機などに搭載したセンサーを利用して、地表面の地形を探查する方法である。航空写真判読と同様に、この地形面からリニアメントやスペクトル解析で広域地質構造や変質帯などの広域表層イメージを探查することができる。安価に広域的な調査を行えるので、探查の初期段階に適用される場合が多い。

#### 2.2.1.2 広域地質構造

地下の温度構造や透水構造は地質構造に支配されている。特に帽岩や透水層の広がり、先第三系基盤岩の深度は重要な情報である。そのため、広域的な地質調査を行って地質断面図を作成するような地下地質モデリングが必要である。この場合、できるかぎり多くの物理探查データを参照することが重要である。また、ボーリング調査がなされていれば、それをコントロール・ポイントとして、より精緻な地質構造を復元させることが可能となる。本プロジェクトでは地質・地球物理データの重合処理による熱・熱水異常地域の抽出(玉生ほか, 2008)として、その手法の有用性が検討さ

れた。

#### 2.2.1.3 坑井掘削(コントロール・ポイント情報)

地下の地質構造、温度構造、透水構造などを調査するためには、調査地域中心部にコントロール・ポイントとして深度約2 km程度の本坑掘削を行うことが必要である。また、本坑の周辺地点(約5~10 km離れた地点)に深度1 km程度の観測井を掘削することも必要であると考えられる。観測井は、調査地域の地質構造にもよるが、本坑を取り囲むように4坑を配置することが望ましい。これらの坑井掘削にあたっては、地層のコア採取を前提とする。ここで提案している坑井掘削の本数と深度は、保守的な条件(より安全サイドに立った条件)下で、そこで理想的な調査を行うために十分な条件として想定した。したがって、地域によっては、概要調査段階では1,000 m級本坑1本だけで、精密調査段階で観測井を追加することで十分な地域もありうると想定される。ここでは保守的な条件を前提として、議論をすすめる。

コア・データは調査地域の地質層序と地質構造を明らかにさせるための基本的データである。また掘削地点選定にあたっては、各種検層が十分実施できる広さと掘削後できるだけ長期間のモニタリングが保証されることを借地条件とすべきと考える。できれば地層処分事業が終了後もモニタリング井として利用できることが望ましい。検層項目としては、各種物理検層(温度、密度、電気、速度、中性子、核磁気共鳴など)、コア解析(岩層、層序、年代、変質、速度、密度、磁性、透水係数、空隙率、フラクチャーなど)、揚水試験(流量、圧力、温度、水質など)などがある。また、掘削中と掘削後に掘削影響モニタリング調査を行うために、観測井と既存坑井(温泉や地下水)及び地表兆候(湧水など)の流量、圧力(水位)、温度、水質などのモニタリングを月1回程度実施する必要があると考える。

#### 2.2.1.4 温度構造

地下の温度分布を把握するために、坑井の温度検層を実施する。地層の平衡温度を求めるために最低でもスタンディングタイム120時間程度以上の測定を行う必要がある。また、既存坑井(温泉や地下水)の温度測定を行うとともに、これらの坑井から採取した流体を化学分析し、地化学温度計で温泉貯留層の流体温度を推定する。以上のデータを用いて、地下温度の三次元分布のシミュレーションを行う必要がある。本プロジェクトでは地質・地球物理データの重合処理による熱・熱水異常地域の抽出(玉生ほか, 2008)と、熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動の数値シミュレーション(中尾ほか, 2008)で、これらの手法の有用性が検討された。

#### 2.2.1.5 流体流動

地下2~3 kmまでの流体流動を把握するために、地

下の透水係数の分布を実測する。坑井検層によって得られた各層準の透水係数を三次元的に拡張して、地下全体の透水係数分布を求める。また、上記の温度分布と統合させて、三次元流体流動シミュレーションを行う必要があると考える。流体流動を直接探査する方法としては、自然電位・流動電位探査、電気探査、微小地震探査などがある。本プロジェクトでは熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動の数値シミュレーション(中尾ほか, 2008)、温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討(阪口, 2008)、震源データを用いた深部構造解析手法(楠瀬・川方, 2006)で、これらの手法の有用性が検討された。

#### 2.2.1.6 透水係数分布

概要調査規模で地下の透水係数分布を把握するためには、まずコントロール・ポイントとしての坑井掘削地点での実測データを取得する。これを基本データにして、地下の地質構造を参照しながら透水係数を三次元的に外挿する。平野部での帽岩の広がりに関しても、同様に外挿して求める。坑井地点では、検層とコア解析によって、透水係数を実測できるが、広域的な透水係数は坑井周りだけの測定では難しいので、モニタリング・データやトレーサー試験結果を踏まえて総合的に判断する必要がある。長期間の広域の透水係数は流体の酸素・水素同位体、He同位体、<sup>14</sup>C年代、<sup>36</sup>Cl年代などを用いて検討する必要があると考えられる。また、地表までのガスの放出量を把握するために、土壌ガスの調査も必要と考える。

#### 2.2.1.7 断裂系の透水係数分布

断裂系は透水性が高い場合と低い場合がある。前者の場合は断層破碎によって透水性が向上し、その結果、流体の通路となる。一方、後者の場合は断層粘土の発達によって難透水性となり対流系を隔離させるゾーンとなる。特に透水性の高い深部まで続く断層は、深部からの流体の上昇路となり得るため、詳細な地質調査や物理探査を行う必要があると考える。

#### 2.2.1.8 岩石水反応

天然バリアの性能評価のために、上記の透水性分布の他に、岩石・水反応の種類と反応速度の検討が必要である。そのために変質帯の分布と性状及び変質年代を検討する必要があると考える。変質帯の広がりや性状は坑井掘削に基づくコア分析が最も有効であるが、間接的には地表地質調査や電気探査、比抵抗探査などでも探査可能である。変質鉱物の同定にはX線回折分析や化学分析を行わねばならない。変質年代測定法としてはESR法、サーモルミネッセンス法、フィッシュン・トラック法、水利法などの方法がある。それぞれの測定法は測定に適した年代幅や測定試料があることから、最も適した手法を適用する事が重要である。変質帯の形成メカニズムは起源水と母岩との化学反応を

数値シミュレーションして、採取した流体の化学性状と比較検討する事が、有用な手法と思われる。以上の方法は本プロジェクトでは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(茂野, 2008)、電磁探査による深部構造解析手法(内田, 2006)、放射年代測定法を用いた地熱系の長期変動解析手法(水垣, 2008)、流体地化学に基づく熱・熱水の影響評価手法(佐々木, 2008)で、これらの手法の有用性が検討された。

### 2.2.2 深部

#### 2.2.2.1 地下深部温度推定法

地下2~3 km以深の深部の温度を推定するには、坑井掘削によって得られた温度曲線から平均地温勾配を求めて、その勾配で下方に外挿する方法(例えば玉生ほか, 1995, 1996)が用いられる。しかしながら、地下深部まで地温勾配が一定であるという仮定には問題があることや、利用可能な坑井温度検層データが地点的に限られていることから、キュリー点等温面深度等のデータを参照して、深部の温度を推定している。また、間接的な地下温度測定法としては、地殻の溶融部分(マグマなど)を地震波速度減衰(Q値)の大きい地域(例えば長谷川ほか, 1991)、比抵抗値の低い地域で自然地震の起らない領域など(例えば Mitsuhata, et al., 2001)として抽出して、そこをマグマ溶融温度と見なす方法がある。マグマ温度は岩石化学組成や輝石地質温度計などを用いて推定する。本プロジェクトでは地質・地球物理データの重ね処理による熱・熱水異常地域の抽出(玉生ほか, 2008)で、温度検層データの外挿、キュリー点等深度面、P波地震波減衰率などの手法の有用性が検討された。

#### 2.2.2.2 潜頭性熱源と深部熱源

地表に火山噴出物がなくても、地下浅所(地下2~5 km付近)に貫入岩があると、それが熱源となって地表に高温の温泉をもたらす場合がある。この場合、貫入深度が浅いほど、また貫入時期が若いほど、顕著な熱異常をもたらすと考えられる。また、貫入岩そのものは古いものであっても、熱伝導率が高いと深部からの良好な熱伝導体となり、それなりの熱源となり得る。このような潜在している熱源を調査するためには、貫入岩の物理探査や地質モデリングを行わねばならない。磁気探査、重力探査、精密比抵抗探査、地震波速度構造探査、トモグラフィ解析処理等の手法が考えられる。

一方、地下5~10 kmに及ぶような深部での熱源の推定も、長期予測の観点から重要である。第四紀火山の下部に推定されるマグマ溜りは、地震波速度の減衰、低比抵抗、震源分布の欠如などの特徴を有している。これと似たような特徴を示す領域が非火山地域の深部(深度約10 km程度)でも観測されている。これらの領域の実態を把握するために、より精度の高い観測が継続される必要が有る。本プロジェクトでは和歌山県本



宮温泉地域の中新世貫入岩類(村岡, 2008), 電磁探査による深部構造解析手法(内田, 2006), 震源データを用いた深部構造解析手法(楠瀬・川方, 2006)で, それらの手法の有用性が検討された。

### 2.2.2.3 深部断裂

地下温度は深部になるほど高温となる。したがって, 地下深部から流体が地表に上昇し得るような通路(深部断裂)が存在すれば, 地表に温泉が湧出する。このような深部断裂が存在するのか否かを明らかにさせるために, 断裂系調査に基づいたモデリング解析が必要であると考えられる。

## 3. 高温地区を含む広域地域のタイプ分けと調査手法・解析手法・評価手法との関連(第2表)

玉生(2008)が記述している通り, 島弧規模で見ると高温地区を含む広域地域は, 第四紀火山地域, 背弧側山地, 背弧側低地, 前弧側山地, 前弧側低地の5タイプに区分される。それぞれのタイプの特徴から判断して, それぞれのタイプに対応した熱・熱水の影響評価のための調査手法・解析手法・評価手法が考えられる。既に記述したとおり, 熱・熱水の影響評価のためには基本的に地下の温度構造と透水構造を調査・解析・評価することが必要である。そのため, 現在広く用いられている調査・解析・評価手法を第2表に網羅的にリストアップした。これらの項目は基本的オプションに相当するものである。これに対して, 各タイプの特徴に応じて補強すべき項目を追加オプションと考えて, 第3表にリストアップした。以下に, 各タイプのオプションについて説明する。

### 3.1 第四紀火山地域の追加オプション調査項目

第四紀火山地域は表層を第四紀火山岩に覆われ, 第四紀火成活動に起因する高温の熱・熱水異常域が多数分布する。また地震活動も活発で, 活断層も多数分布する。したがって, このタイプの地域では基本オプションの調査のほかに, 以下の追加オプションの調査が必要となると考える。

#### 3.1.1 観測井の追加(4本)

顕著な熱・熱水の異常を把握するために, 基本オプションの観測井4本に加えて, 4本の追加の観測井を追加することが望ましい。これにより, より詳細な温度構造と透水構造を把握することが可能となる。

#### 3.1.2 微小地震観測

顕著な熱・熱水の異常を把握するために, 基本オプションの調査に加えて, 微小地震観測を追加することが望ましい。これにより, 高温流体の流動を把握することが可能となる。実際に多くの地熱地帯では, 微小地震観測により流体流動を詳細に把握している。

#### 3.1.3 断層水理テスト

顕著な熱・熱水の異常を把握するために, 基本オプションの調査に加えて, 断層水理テストを追加することが望ましい。これにより, 断層の透水性を把握することが可能となる。

#### 3.1.4 火山岩分布/年代調査

顕著な熱・熱水の異常を把握するために, 基本オプションの調査に加えて, 火山岩分布/年代調査を追加することが望ましい。これにより, 火山岩の噴出量と年代値に基づいた第四紀火山活動の熱源であるマグマのポテンシャル評価を行うことが可能となる。

#### 3.1.5 火山ガス調査

顕著な熱・熱水の異常を把握するために, 基本オプションの調査に加えて, 火山ガス調査を追加することが望ましい。これにより, マグマや熱水中に含まれるガス成分を把握するとともに, 岩石水反応へのガスの寄与を評価することが可能となる。

### 3.2 背弧側山地の追加オプション調査項目

背弧側山地では先第三系基盤岩が地表に露出しているか地下浅部に分布している。また背弧側では中高温の熱・熱水異常域が広く分布し, 地震活動もやや活発で, 活断層も多数分布する。したがって, このタイプの地域では基本オプションの調査のほかに, 以下の追加オプションの調査が必要となると考えられる。

#### 3.2.1 観測井の追加(2本)

やや顕著な熱・熱水の異常を把握するために, 基本オプションの観測井4本に加えて, 2本の追加の観測井を追加することが望ましい。これにより, より詳細な温度構造と透水構造を把握することが可能となる。

#### 3.2.2 微小地震観測

やや顕著な熱・熱水の異常を把握するために, 基本オプションの調査に加えて, 微小地震観測を追加することが望ましい。これにより, 高温流体の流動を把握することが可能となる。実際に多くの地熱地帯では, 微小地震観測により流体流動を詳細に把握している。

#### 3.2.3 断層水理テスト

やや顕著な熱・熱水の異常を把握するために, 基本オプションの調査に加えて, 断層水理テストを追加することが望ましい。これにより, 断層の透水性を把握することが可能となる。

### 3.3 背弧側低地の追加オプション調査項目

背弧側低地では鮮新世後期から更新性前期の湖水堆積物が広く分布し, 透水構造において帽岩の役割を果たしている。また背弧側では中高温の熱・熱水異常域が広く分布し, 地震活動は局所的である。したがって, このタイプの地域では基本オプションの調査のほかに, 以下の追加オプションの調査が必要となると考える。

第3表 タイプ地域毎の標準及び追加オプション調査・解析・評価手法、

Table 3 Standard and optional surveys/analyses/evaluation methods for classified type areas to be adopted.

	第四紀火山地域	背弧側山地	背弧側低地	前弧側低地	前弧側山地
タイプの特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>第四紀火山岩が表層を被う</li> <li>高温の熱異常域が多い</li> <li>地震活動が活発である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>先第三系基盤が浅い</li> <li>やや高温の熱異常域がある</li> <li>地震活動がやや活発である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>帽岩が存在する</li> <li>やや高温の熱異常域がある</li> <li>地震活動は局所的である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>帽岩が存在する</li> <li>高温の熱異常域がない</li> <li>地震活動は局所的である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>先第三系基盤が浅い</li> <li>高温の熱異常域がない</li> <li>地震活動は局所的である</li> </ul>
追加オプションの必要性	第四紀火成活動に関わる熱水対流、熱源、構造運動の性状を把握するため	中・高温の熱異常の性状を把握するため	中・高温の深層熱水の性状を把握するため	中・低温の深層熱水の性状を把握するため	基本オプションの調査で充足される
追加オプション	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測井の追加 (4本)</li> <li>微小地震観測</li> <li>断層水理テスト</li> <li>火山岩分布/年代調査</li> <li>火山ガス調査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測井の追加 (2本)</li> <li>微小地震観測</li> <li>断層水理テスト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測井の追加 (2本)</li> <li>トレーサー希釈試験</li> <li>圧力応答試験</li> <li>透水係数実測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>トレーサー希釈試験</li> <li>圧力応答試験</li> <li>透水係数実測</li> </ul>	追加オプションなし
基本オプション	(浅部) 広域表層調査 (リモートセンシング調査) 広域地質調査 (地質調査と各種物理探査, 地下地質モデリング) 坑井掘削調査 (本坑と観測井の掘削, 坑井物理検層, コア物性試験, 揚水試験, モニタリング) 温度構造調査 (温度検層, 地化学温度計算, 地下温度シミュレーション) 流体流動調査 (坑内物理検層, 自然電位と流動電位測定, 温泉放熱量調査, 震源分布データ収集, 流体流動シミュレーション) 透水係数分布調査 (透水層/不透水層分布, 透水性試験, コア物性試験, 流体年代測定, 土壌ガス調査) 断層系透水係数調査 (断層系調査, コア物性試験, 浅層弾性波探査)	断層系透水係数調査 (断層系調査, コア物性試験, 浅層弾性波探査) 岩石水反応調査 (変質帯調査, 変質年代測定, 岩石水反応計算, 比抵抗探査)	断層系透水係数調査 (断層系調査, コア物性試験, 浅層弾性波探査) 岩石水反応調査 (変質帯調査, 変質年代測定, 岩石水反応計算, 比抵抗探査)	断層系透水係数調査 (断層系調査, コア物性試験, 浅層弾性波探査) 岩石水反応調査 (変質帯調査, 変質年代測定, 岩石水反応計算, 比抵抗探査)	断層系透水係数調査 (断層系調査, コア物性試験, 浅層弾性波探査) 岩石水反応調査 (変質帯調査, 変質年代測定, 岩石水反応計算, 比抵抗探査)
	(深部) 地下深部温度推定 (温度検層データの外挿, キュリ一点震度探査, 地震波減衰率解析) 潜頭性熱源と深部熱源調査 (貫入岩分布調査, 各種物理探査, 震源分布観測) 深部断層調査 (断層系調査, モデリング解析)				

### 3.3.1 観測井の追加(2本)

やや顕著な熱・熱水の異常を把握するために、基本オプションの観測井4本に加えて、2本の追加の観測井を追加することが望ましい。これにより、より詳細な温度構造と透水構造を把握することが可能となる。

### 3.3.2 トレーサー希釈試験

やや顕著な熱・熱水の異常を把握するために、基本オプションの調査に加えて、トレーサー希釈試験を追加することが望ましい。これにより、流体流動の速度を把握することが可能となる。

### 3.3.3 圧力応答試験

やや顕著な熱・熱水の異常を把握するために、基本オプションの調査に加えて、圧力応答試験を追加することが望ましい。これにより、流体流動の卓越方向を把握することが可能となる。

### 3.3.4 透水係数実測

やや顕著な熱・熱水の異常を把握するために、基本オプションの調査に加えて、透水係数実測を追加することが望ましい。これにより、現地での流体流動を把握することが可能となる。

## 3.4 前弧側低地の追加オプション調査項目

前弧側低地では鮮新世後期から更新世前期の湖水堆積物が広く分布し、透水構造において帽岩の役割を果たしている。前弧側では高温の熱・熱水異常域は無いものの、中低温の流体流動が想定される。地震活動は局所的である。したがって、このタイプの地域では基本オプションの調査のほかに、以下の追加オプションの調査が必要となると考えられる。

### 3.4.1 トレーサー希釈試験

中低温の流体流動を把握するために、基本オプションの調査に加えて、トレーサー希釈試験を追加することが望ましい。これにより、流体流動の速度を把握することが可能となる。

### 3.4.2 圧力応答試験

中低温の流体流動を把握するために、基本オプションの調査に加えて、圧力応答試験を追加することが望ましい。これにより、流体流動の卓越方向を把握することが可能となる。

### 3.4.3 透水係数実測

中低温の流体流動を把握するために、基本オプションの調査に加えて、透水係数実測を追加する。これによって、現地での流体流動を把握することが可能となる。

## 3.5 前弧側山地の追加オプション調査項目

前弧側山地では先第三系基盤岩が地表に露出しているか地下浅部に分布している。また高温の熱・熱水異常域は無い。地震活動も局所的である。したがって、このタイプの地域では基本オプションの調査で十分で、

追加オプションの調査項目は必要ないと判断される。

## 4. 今後の課題

今回、概要調査地区での熱・熱水の影響評価のための調査・解析・評価手法についてとりまとめた。この結果をより実現可能なものにするためには、以下の検討が必要であると考えられる。

### 4.1 得られるデータの信頼性評価

上述した調査・解析・評価手法において、どれだけ信頼性のあるデータを取得できるか、その検討を行う必要がある。具体的には各関連機関で実施された調査データと追加の補完的な現地調査データに基づいて、異なる調査手法で得られた結果との矛盾や整合性を検討することである。このような検討結果から、実際のデータ取得に当たってデータの信頼性を向上のための注意事項を取りまとめることが可能となる。

### 4.2 将来予測シナリオの詳細検討

将来予測を行うために、まずシナリオの作成が必要となる。温度構造の将来予測をするためには、熱源の発生、移動、消滅を推定する必要がある。また地殻熱流量の変動も推定する必要がある。一方、透水構造の将来予測をするためには、動水勾配の変化に関わる海水準面の変動、隆起量・侵食量の変動を予測するとともに、地層の透水係数の変動などを予測する必要がある。これらの変動予測のシナリオが妥当であることを示すためには、概要調査地区において過去100万年程度の熱・熱水の活動史を詳細に検討して、異常の発生確率を明らかにする必要があると考える。

### 4.3 費用対効果の検討

今回の調査・解析・評価手法の取りまとめに当たっては、技術的な側面から検討したもので費用については考慮されていない。実際に調査を行うためには、(4.1)で述べた信頼性を考慮するほかに費用対効果を考慮する必要がある。したがって、実際の調査コストを算定する必要があると考える。

### 4.4 地元住民への説明資料作成

概要調査地区が決まった場合、地元住民に概要調査内容を説明して納得してもらう必要がある。そのためには、説明資料や想定問答集を作成した上で、地元説明会を何度も開催して住民の疑問に答えていくことが重要である。そのための説明資料や想定問答集を作成する必要がある。この場合、坂本・神田(2002)などにより指摘されているとおり、透明性が高く、論理的で偏りがなく、社会の問題意識を十分に反映した意思



決定がなされるように配慮する必要があると考える。

**謝辞:** 原子力発電環境整備機構の土 宏之, 瀬尾俊弘, 後藤淳一, 大東秀光の諸氏からは, 研究管理担当者として本研究に対して詳細なコメントを頂きました。産業技術総合研究所の菊地恒夫氏は本論文を読んで, 適切な指摘をして下さいました。以上の方々ここに深謝の意を表します。

## 文 献

物理探査学会 (1989) 図解 物理探査. 239p.  
 土木学会原子力土木委員会地下環境部会 (2006) 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方. 144p.  
 原子力発電環境整備機構 (2002) 概要調査地区選定上の考慮事項. 23p.  
 原子力発電環境整備機構 (2004) 熱・熱水の影響評価手法に関する検討. (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 149p.  
 原子力発電環境整備機構 (2005) 熱・熱水の影響評価手法に関する検討(その2). (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 184p.  
 原子力発電環境整備機構 (2006) 熱・熱水の影響評価手法に関する検討(その3). (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, 246p.  
 長谷川昭・趙 大鵬・山本 明・堀内茂木 (1991) 地震波からみた東北地方の火山の深部構造と内陸地震の発生機構. 火山, **36**, 197-210.  
 核燃料サイクル開発機構 (2005) 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 —平成17年取りまとめ—, 一分冊1 深地層の科学的研究—. JNC TN1400 2500-014.  
 火力原子力発電技術協会 (2004) 特集 地熱発電. 火力原子力発電, 577, 1170p.  
 楠瀬勤一郎・川方裕則 (2006) 震源データを用いた深部構造解析手法. 熱・熱水の影響評価手法に関する検討(その3), 原子力発電環境整備機構, 145-164.  
 Mitsuhashi, Y., Ogawa, Y., Mishina, M., Kono, T., Yokokura, T. and Uchida, T. (2001) Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, north-

eastern Japan. *Geophysical Research Letter*, **28**, 4371-4374.  
 水垣桂子 (2008) 電子スピン共鳴法による熱・熱水の影響評価. 地調研報, **59**, 109-116.  
 村岡洋文 (2008) 和歌山県本宮温泉地域の中世貫入岩類のK-Ar年代と化学組成. 地調研報, **59**, 27-43.  
 中尾信典・菊地恒夫・玉生志郎 (2008) 熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動の数値シミュレーション. 地調研報, **59**, 53-64.  
 日本エネルギー学会編 (2005) エネルギー便覧 プロセス編. 838p.  
 阪口圭一 (2008) 温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討. 地調研報, **59**, 65-69.  
 坂本修一・神田啓治 (2002) 高レベル放射性廃棄物処分地の社会的受容性を高めるための課題に関する考察. 日本原子力学会和文論文誌, **1**, 270-281.  
 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2001) 地質学ハンドブック. 朝倉書店, 696p.  
 佐々木宗建 (2008) 地下水水質の形成過程の基礎的数値解析. 地調研報, **59**, 117-122.  
 茂野 博 (2008) 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. 地調研報, **59**, 71-107.  
 玉生志郎 (2008) 地下温度分布から見た高温地区を含む広域地域のタイプ分け—東北地方と中国・四国地方の例—. 地調研報, **59**, 45-52.  
 玉生志郎・野村拳一・吉沢正夫 (1996) 坑井温度データから推定される地下深部温度分布: 国内主要地熱地域(14地域)について. 地調月報, **47**, 485-548.  
 玉生志郎・阪口圭一・佐藤龍也・加藤雅士 (2008) 地質・地球物理データの重ね処理による熱・熱水異常地域の抽出—東北地方と中国・四国地方の例—. 地調研報, **59**, 7-26.  
 玉生志郎・吉沢正夫・野村拳一 (1995) 坑井温度データから推定される地下深部温度分布: 九州, 豊肥地熱地域での適用例. 地調月報, **46**, 313-331.  
 内田利弘 (2006) 電磁探査による深部構造解析手法. 熱・熱水の影響評価手法に関する検討(その3), 原子力発電環境整備機構, 134-144.

(受付: 2008年1月25日; 受理: 2008年2月7日)