

# 地熱探査の目的は3要素の解明か？

野田 徹 郎<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

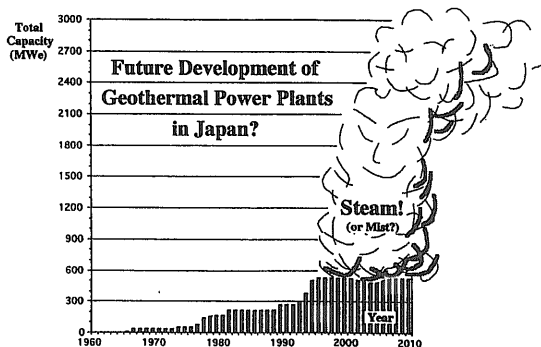
1941年に開始された我が国の地熱発電は、国のサンシャイン計画で新エネルギーとしてもはやされた時期や、原油価格が安く推移したことによる開発低迷期を経てようやく出力500MWeに到達した(第1図)。発電量こそ全発電量の1%にも満たないが、我が国に豊富に存在する環境にやさしいエネルギーであるという位置付けは不変である。国でも、21世紀のエネルギー事情を見越して、2000年に600MWe、2010年に2800MWeの目標を置いて取り組んでいるところであるが、阻害要因も多く、第1図のようにこの先は雲が立ち込めている状態にある。阻害要因のうち、関係する科学者の責任に帰すべきものもいくつかあるが、とりわけ、発電の適地を見つけるために、どこに地熱貯留層があるか、貯留層の地熱流体は発電に適しているか、発電の規模はどれくらいが適当か、を見定める、いわゆる地熱探査の技術が十分でないことは、開発の関係者からよく聞く不満である。このことは、開発のための地熱系モデルが調査結果からうまく描けていないという指摘にも言い換えられる。探査技術の不十分さは甘受するとして、一方、地熱探査の考え方、取り組み方にも問題がありそうな気がする。

## 2. 地熱の3要素

地熱を語る時、よく3要素という言葉が引き合いに出される。何に対する、また何を意味する3要素かは、語る人によって多少ニュアンスが違ったりあいまいだったりする。一般的な受け止め方は、地熱資源が形成される条件である、(1)貯留構造、

(2)流体、(3)熱、を指すとするのが間違いのないところであろう。小川(1987)はこの3要素について分かりやすく紹介している。

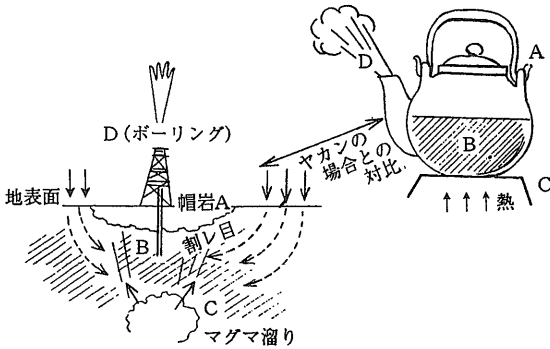
3要素論がはやり出すきっかけとなったのは、恐らく早川正巳が「地熱-第四のエネルギー」(NHKブックス)(1970)に示した地熱資源の形成を表すヤカンを用いた絵説き(第2図)によるところが大きいであろう。この早川の著書は、絶妙のタイトルからもうかがえるように、地熱エネルギーの何たるかを分かりやすく説いた嚆矢となる優れた啓蒙書である。第2図の意味はこうである。マグマ溜り(C、熱源)から割れ目に沿って上昇してきた高温のガス、蒸気等により、外部(地表面)から地下にしみ込んだ水が暖められ蒸気、または熱水の貯留層(B)ができる。このとき、この貯めた熱水や蒸気を外へ逃



第1図 我が国の地熱発電出力の推移(平成9年3月6日開催のエネルギー研究総合推進会議-第2回地熱分科会「50万kWe達成以降の新たな地熱技術開発課題」講演要旨表紙の茂野 博氏作のカット)。1997年以降の出力は、立ち昇る蒸気と同じ形に上昇するのであろうか。それともミストの背後には何もないのであろうか。

1) 地質調査所 環境地質部

キーワード: 地熱探査, 地熱の3要素, 地熱資源, 分布・性状・規模, 地熱探査技術の評価

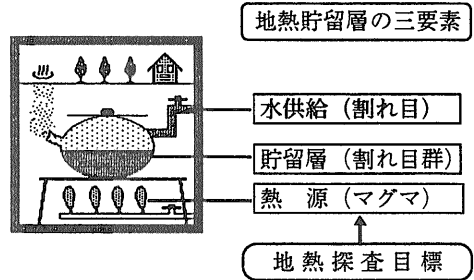


第2図 地熱貯留層の生成メカニズム(早川, 1970). 地熱貯留層の生成メカニズムが沸騰するヤカンに例えられている。

がさないように、すぐその上に緻密な岩石の層(A, 帽岩)がある。これはちょうどヤカンの中に水を入れ、下から熱しているようなもので、ヤカンの蓋が帽岩、ヤカンの中味が貯留層、下からの熱がつまりマグマ溜りからの熱ということになる。貯留層の熱水や蒸気はボーリング(D)によって地表に取り出す。

分かりやすい簡単な説明を心掛けてあるため、省略された部分や簡単に言い切った部分もある。例えば伝熱はマグマ溜りからの熱水や蒸気のほかに伝導熱もあろうし、ヤカンの中味は正しくは貯留層に貯えられた流体であろう。しかし、基本的にはなかなかまい説明となっている。つまり、地熱資源が形成される条件を、(1)貯留構造(ふたを含めたヤカン、つまり入れ物)、(2)流体(ヤカンの中の水)、(3)熱(ヤカンの水を暖めるコンロの炎)、とそれぞれの確に言い換えた説明であり、これが後に3要素として表現されたものと思われる。

その後、明確に3要素として示された例を小川のテキスト(1987)に見ることができる。小川は地熱貯留層の3要素(形成条件)を第3図のようにまとめている。第3図でもやはりヤカンが持ち出されており、貯留構造、流体、熱、に相当するものとして、貯留層(割れ目群)、水供給(割れ目)、熱源(マグマ)、が示されている。注目すべきは、3要素が地熱貯留層の形成条件であると同時に地熱探査の目標とされていることである。なぜ3要素が地熱探査の目標となるかは、明らかになった3要素を総合的に解析・評価することにより、地熱資源のありようがはっきりするという理屈による。この3要素を地熱



第3図 地熱貯留層の形成条件(小川, 1987). 地熱貯留層の形成条件が地熱貯留層の3要素として、早川(1970)と同じくヤカンで示されている。

探査の目標(目的と同義)とする考え方は、広く世間にも受け入れられているように見える。果たしてそれでよいのであろうか。

### 3. 地熱探査の目的は何か

地熱探査について述べる前に、混乱しがちな「探査」と「調査」の実際の用法を明らかにしておこう。辞書には、

「探査」: さぐりしらべること。

「調査」: ある事項を明確にするためにしらべること。

とある。これからも分かるように探査には、「さぐる」という意味が含まれている。したがって資源探査は、資源(のありかやありよう)を探り調べるものである。調査は意味が広く、資源調査と言え、資源にまつわる種々の事項(資源がどうしてできたかなども含めて)を明確にするために調べるものである。ところが、探査を内容としても調査と称されることがある。一般には地熱調査と言え、地熱探査を内容することがむしろ多い。例えば国の行っている地熱開発促進調査は、地熱開発につながる資源のありかやありようを調べる探査を内容とする。標題の地熱探査は、地熱資源の探査を内容とするこのような「調査」を含めて指すものとする。

地熱開発を企てる上で、地熱資源に関し知っておかねばならない要件は、一言で言うと地熱資源の特性の把握である。特性とは、かみ砕くと、熱エネルギーを有するフィジブルな流体が(性状)、どれくらいの量(規模)、どこに貯留されているか(分布)、である。地熱開発の最も進んだ形である地熱

発電においては、これらの要件は、地熱発電所をどこに立地し、生産井と還元井をそれぞれどこにどれくらいの深度で何本ぐらい掘らねばならないか、発電所の規模(出力)をどれくらいにしたらいいか、発電はどのような方式がよいか、発電設備を維持する上で障害となる腐食やスケール発生にどのような対策が必要か、環境を保全するためにどのような対策が必要か、といった地熱発電所を建設し維持管理するために不可欠な情報である。したがって、これらの地熱資源の性状、規模、分布といった要件を探り調べることが、地熱探査の究極の目的と言える。

英語は日本語に比べるとあいまいさが少なく直截的である。会話で疑問が呈される時にも、尋ねたい様態がWやHで始まる疑問代名詞や疑問副詞により文頭で問われる。事実を簡潔かつ的確に示すことが要求される報道関係では、英語と同じセンスで、Who(だれが)、What(何を)、When(いつ)、Where(どこで)、How(どのように)、Why(なぜ)、の5つのWと1つのHを明らかにすることが基本とされる。

石井(1988)は、その著書の中で、資源に必要な3つの要素として、(1)十分に濃縮されているか、(2)十分な量があるか、(3)どこに存在するか、を挙げており、これらの条件をすべて満たすものを資源というべき、としている。鉱物資源で言えば、(1)はある品位の鉱種、(2)は資源量、(3)は鉱床賦存位置、をそれぞれ指す。上にならって表現すれば、(1)はWhat(何が)、(2)はHow Much(どれくらい)、(3)はWhere(どこに)、のW2つとHM、つまりW2HMとなり、これらが資源の基本要素だということになる。

地熱探査の究極の目的をこれにならって表現すればやはりW2HMである。地熱資源では、Whatは、地熱資源の種類(熱水型、蒸気型)、貯留温度・圧力、化学的性状、How Muchは、地熱資源の貯留量、望むらくは動的な回収可能量、Whereは、3次元的な地熱資源の貯留位置、貯留形態(層状、断裂型)である。地熱資源はもちろん資源の一種であるから、基本要素(=探査の究極目的)の一致は当然のことである。

一方、先に述べた地熱の3要素とされた、貯留

構造、流体、熱、もしくは、貯留層(割れ目群)、水供給(割れ目)、熱源(マグマ)、は、地熱資源を形成するための条件である。仮にこれらを英語流の疑問詞(上記のW2HM)で置き換えようとしてもうまくいかない。このことは、3要素それ自体は地熱発電を企てる上で要求されるものと一致しないことを意味する。つまりこれらの3要素は、地熱資源がどうやってできたかを理解するには、もちろん基本的に重要なことであるが、それらが明らかになったとしても地熱探査の目的は満足しておらず、発電所を造る側からは不満の声が聞かれるのである。理屈の上では3要素の重なった部分に地熱資源が賦存するし、実際にそうであろう。つまり、3要素の解明がうまくいったときに明らかになるのは、地熱資源の分布(Where)という究極目的の一面である。ところが、3要素それぞれが地下の見えないところを扱う難しい解明課題であるため、非常におぼろげにしか結果が出ず、そのおぼろげな3種類の結果の重ね合わせはますますおぼろげとなり、地熱資源がどこにあるのか判然としないのである。これに拍車をかけるのが、探査実施の際に、それが地熱資源の探査だという意識が欠けがちだということである。その表れを探査(調査)の報告書に見ることができる。分厚い報告書の大半は、探査の生データと解析結果、データを取るための苦労話、データを解析するための手練手管、が長々と述べられているが、肝心のいったい地熱資源について何が分かったかという点については、最後に数行あるかないかということがよくある。

このように、これまでの地熱探査では、とすれば、究極のターゲットであるべきW2HMに今一歩たどりついていない。その大きな原因は、地熱資源の形成条件である3要素が、そのまま探査の目標と考えられたことによるのではなからうか。我々が知りたい姿に対し、それを3枚のスクリーンを通して見ようとしているのでシルエットは非常にぼやけている。しかも3枚のスクリーンを製作するのに一所懸命で、スクリーンが後ろに立つ姿を見ようとするものだとの意識が乏しい。うまくいって明らかになるのは知りたい姿の3分の1である。これでは、後ろのシルエットが何者かを当てることはできそうにない。

### 4. 地熱探査はいかにあるべきか

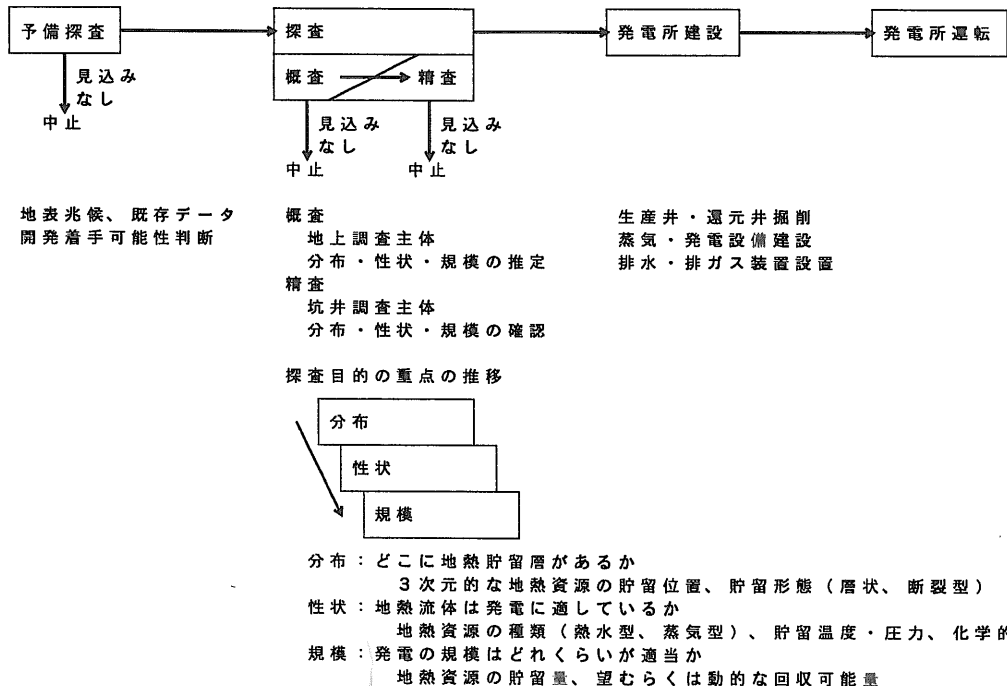
それではいったい地熱探査はいかにあるべきか、原点に立ち返って考えてみよう。地熱探査は地熱開発のために行うものであるから、当然その内容は開発サイドの要求を満たすものでなければならない。開発サイドの要求は、地熱資源の分布、性状、規模を明らかにすることである。このことは地熱探査の実施者がよくよく肝に銘じておくべきことである。

だとすれば、もっとストレートに地熱資源の特性(分布、性状、規模)を明らかにすることを探査の目的にすべきではなからうか。採用する探査技術が同じであっても、探査結果が3要素の何を明らかにできたかではなく、地熱資源の特性の何を明らかにできたかを明確にするのである。あるいは単独ではなく、別の探査のどういう情報とどう組み合わせたら、何が明らかになったかでもよい。このことにより、各探査が3要素の解明で満足して(あるいは疲れて)しまって、地熱資源になかなかとりつかない、ということがなくなるであろう。地熱資源の分布、性状、規模の解明が探査の目的としてきちんと意識されるからである。また、各探査から予想

される地熱資源の各特性ごとの解明具合の分布から、地熱資源の特性ではっきりしないのが何か分かり、それを補う探査法の組み合わせを考えることもできる。

次に探査の手順を考えてみよう。その流れは第4図のようであろう。最初の取り掛かりは、資源がありそうかどうかであろう。この段階は本格的な探査の予備段階で、探査を施すのにふさわしいかどうかの見当がつけられればよい。温泉、噴気や地熱変質帯といった地表地熱兆候の分布はまずもって第一の手掛かりである。地表兆候を伴わない地熱資源はまずないと言ってよい。大分県の滝上は地表兆候がない地熱地域と言われている。しかし、大規模な地熱変質帯や微温の温泉の存在は昔から知られていた。浅い井戸も何本か掘られていて、蒸気が噴出していた。本格的な探査に取り掛かれるだけの素地は備わっていたのである。予備探査では、地表兆候で目星を付けた地域のデータを収集し、探査を施すべきかどうかを検討する。

探査にふさわしいと認定された地域では、本格的な探査に入る。探査の初期段階では、地上調査が主体で、地熱資源の分布についてある程度の見当をつけて調査井の位置決めを行い(概査)、次の



第4図 地熱資源開発フローの中での探査の位置付けと探査の運び方・具体的目的。

段階で坑井調査により資源特性の把握の精度を高めていく(精査)という運びが一般的である。そのあと、推定された地熱資源の特性に応じた計画に基づき生産井が掘削され発電所が建設され運転されていく。地熱資源探査のターゲットはあくまで地熱資源の特性である分布、性状、規模の把握であるが、中では資源がどこにあるかを探る資源分布の

解明が、概査段階で真っ先に取り組まれることが多からう。次いで分布する資源が発電に向くかの性状、そして妥当な出力を推し量るための資源の規模の推定がなされていくが、これらが確認されるのは坑井調査を主体とする精査段階においてである。探査で、発電に向かないとか、発電しても採算が取れないことが分かった場合は、次のステップに

第1表 大規模深部地熱発電所環境保全実証調査における探査技術評価(通商産業省(1989)の年代測定・地質構造調査の部分为例)。探査技術適用性の評価が、概査、精査、貯留層探査に分けて示されている。地熱資源の特性の何の解明に有効かは十分読み取れない。

探査手法	年度	数量	得られた事象	手法の特徴	有効性と適用限界				
					数量・測点密度の適否	問題点(欠点及び改良点)	波及効果	適用性評価	貯留層探査
1 地質構造調査	53	3000km <sup>2</sup> 編図	・広域地質構造 ・主要地域の構成地層に対する知見、物性値についての予想 ・地質構造発達史 ・貯留層の構成岩相に対する予見	・地表の資料から地質学の法則により地下を推定する。	・地熱系モデリングに不可欠である。 ・一義的に決定されるものではなく、新しい知見により絶えず改良して行く性質のものである。	◎	○	-	
	54	350km <sup>2</sup> 地質平面図							
	58	7地区地質平面図(ルート長590km)							
数量・測点密度の適否		問題点(欠点及び改良点)		波及効果		適用性評価		備考	
・実施範囲は適当であるが、より精度を上げた踏査を本計画初期に実施しておくべきであった。		・地表のみのアプローチであり、どのような努力をしても埋没している地層については、確認できない。実施途中から年代測定が行われたが、FT法、K-Ar法いずれにも適用限界があり、さらにグレードアップが望まれる。		・各構成地層に対する年代測定の結果はそれぞれの地域のバックグラウンド情報として役立つ。FT法の技術進歩に多大な貢献をした。		概査 ~1000km <sup>2</sup> 精査 ~100km <sup>2</sup> 貯留層探査 ~10km <sup>2</sup>			

◎必要 ○場合によっては有効 -不要

第2表 地熱探査技術等検証調査における探査技術評価(新エネルギー・産業技術総合開発機構(1989)の地質構造調査の部分为例)。探査技術の評価が、分布、性状、規模に分けて示されている。具体的にどのように有効かは、地熱探査としての有効性の欄で読み取れるし、コストがどれくらいかも表中にある。実際の探査でどのような手法を組み合わせるとよいかを判断するのに、この表は参考になる。

探査手法	年度	実施機関	実施内容	探査目的	解明事項(目的達成度)	
					分布	性状
年代測定・地質構造調査	57(検)	NEDO	[仙岩] ESR年代測定11試料	・広域地熱貯留構造の解明 ・広域地質構造の解明 ・地質構造発達史の解明 ・100万年以降の火山活動に伴う火山岩分布の把握(絶対年代測定)。	・広域の地質構造が解明され、構造発達史が明らかになった。 ・また岩石の絶対年代測定から現在の地熱熱源となる火山地域が抽出された。	
	55(検)	地質調査所	地質構造調査			
	56	地質調査所	K-Ar法(53試料)			
	56~59(検)	地質調査所	FT法(63試料)			
	49	地質調査所	[栗駒] C <sup>14</sup> 、FT法年代測定			
55~57(検)	地質調査所	地質構造調査 断層系他				
地熱探査としての有効性		コスト(千円)	問題点	適用性評価		今後の改良点
・地熱系モデルの作成に不可欠。 ・地域の熱構造や流体流動、貯留構造を解釈する上で有効である。 ・地下深部に対しては概念モデル作成として有効である。		ESR 5,400 NEDO その他 地調 55年 39,000 56年 84,000 ----- 55年 48,000 56年 43,000 57年 43,000	・地質調査法では、探査の目的や精度に合った調査の計画立案や調査範囲の検討が必要(特に仙岩)。 ・年代測定法では変質による若返りがあるため鉱物の形成時代を示すものとは限らない。	◎	○	坑井調査を含めた場合に定量的評価が可能 ・調査結果の整理・解析における機械化(コンピュータ化)が必要 ・システマティックな調査計画の立案と実施 ・絶対年代測定法では変質による若返りの温度との関連の解明および適正な試料および数量の選択が必要。

(注) コストについて NEDO実施分は事業費 調査実施分は研究経費の概算  
 適用性評価について ◎: 有効である(有意な定量的評価ができる)  
 ○: ◎に次いで有効である(有意な定量的評価ができる)  
 △: 参考になる(何らかの関連した情報をもたらす)  
 -: 有効性に乏しい(その件に関しては全く関係ないか、不明)

進まない判断がされる。

探査では、地熱資源の特性である分布、性状、規模を明らかにする探査技術がバランスよく組み合わせられなければならない。そのための拠所となる探査技術の体系的評価が、国のプロジェクトでこれまでに二回なされている。まずはじめは、大規模深部地熱発電所環境保全実証調査における評価（通商産業省、1987）で、第1表のような形にまとめられている。適用性の評価が、概査、精査、貯留層探査に分けて、3つのランクに分かりやすく示されているが、地熱資源の特性の何の解明に有効かは、得られた事象として書かれた内容からは十分読み取れない。次に、地熱探査技術等検証調査（新エネルギー・産業技術総合開発機構、1989）では、第2表のように評価された。この評価では、地熱資源の特性である分布、性状、規模に分けて、適用性が4つのランクで示されている。また、具体的にどのように有効かは、地熱探査としての有効性の欄で読み取れるし、コストがどれくらいかも表中にある。実際の探査でどのような手法を組み合わせるとよいかを判断するのに、この表は参考になる。

地熱探査技術等検証調査（新エネルギー・産業技術総合開発機構、1989）では、有効な探査手法の組み合わせに関し次のようにまとめられている。

「ここでの（探査法評価に表れた）特徴は、第一に地熱資源の定量的な評価が可能な探査手法は非常に限定されていることである。このことは、現状の地熱資源探査における技術レベルがいまだ未熟であることを端的に示しており、確実さという点ではまだボーリングに勝る探査法はまだない。第二の特徴は、地熱資源の分布の解明には、性状、規模のそれに比べ多種の探査法が集中するということである（つまり地熱資源分布については探査の確度がかかなり高いことを示す）。第三の特徴は、探査法のいくつかは、分布、性状、規模のいずれか一つに有効というのではなく、二つあるいは三つに軽重の差はあれ有効性を持っているということである。

完ぺきなものがない現在の探査技術レベルを考えると、少しでも有効な、ありとあらゆる探査法を組み合わせることが望ましい。しかしながら、限られた予算の中で数多くある探査法の中からいくつ

かを選択しなければならない場合には、目的や精度に合った探査法を選択することが基本的に重要であるし、（効率的な探査の組み合わせを考えるとときには）より適用項目の多いものを選択するという視点も重要となるであろう。」

このまとめに加えて、言うまでもないが、探査法の適用により解明できたことの価値が、要した経費に見合うものかどうか、常に気を付けていなければならない点である。

## 5. まとめ

これまでいわゆる地熱の3要素の解明が、地熱探査の目的としてはふさわしくないという観点で述べてきた。しかし、誤解のないようにしておきたいのだが、決して3要素の解明が無意味だと言っているわけではない。地熱開発につながるという実用的目的にはふさわしくないと言っているのである。3要素は地熱資源の形成条件なので、それを明らかにする学術的価値は高い。これは疑問詞に置き換えると、なぜ地熱資源が形成されたか、のWhyに当たる。また、When（いつ）地熱資源が形成されたかを探る、地熱系発達史の解明もこれと並んで重要な課題である。しかし、WhyやWhenは、地熱探査の直接の目的ではなく、そのためのフィールドワークは、それぞれ調査であって探査とは次元が違うものである。

3要素の解明のために採用されている調査手法にも、考え方次第で探査手法となり得るものはいくらでもある。ただし、3要素の解明ができたことをもって一人前の手法というのではない。3要素の解明は地熱探査においては中間成果なのである。それが地熱資源の何とどう結び付くかというのが成果として表し得たとき、はじめて一人前の探査手法と呼ばれるべきなのである。そうでない手法は、まだ探査法として採用するに至らない未熟な手法なのである。低比抵抗ゾーンが地熱流体とどう関係するか、熱源の温度と履歴・規模は地熱資源にどう結びつくか、地質構造と地熱資源貯留位置の関係はどうか等々、探査の結果が基礎情報にとどまり肝心のターゲットに結びついていないことも多い。実は低比抵抗ゾーンの分布うんぬんは中間成果であり、本当に重要なのはそれが地熱資源とどう結び

つくかである。地熱探査技術で大事なものは、探査データが地熱資源のありかやありようにどう結びつくかを明確にしていくことである。

未熟な探査手法を一人前の手法に育て上げたり、新しい探査手法を考案するのは、地熱探査に携わる研究者に課せられた大きい課題であり、これには探査とは別の独自の研究及び調査として努力を傾注しなければならない。ただ、このときも探査法の開発・向上を目指すという目的のはっきりした研究、つまり中谷宇吉郎(1988)の言うところの犯人に目星を付けた「警視庁型の研究」でなければならない。役に立つかどうか分からないが、学問的興味で新種を探すような「アマゾン型の研究」であってはいけない。

探査技術の開発・向上のための努力は惜しまないにしても、これからすごい新しい探査法が出現する可能性はそう大きいとは言えない。基本的な姿勢としては、数ある探査法を整理し、どういう場合にどの方法が何を解明するのに有効かを厳密に明らかにし、他分野の探査法と融合させて探査体系を組み立てることが重要であろう。その上で新しい手法を加えながら体系をリバイスさせていくのが現実的ではなかろうか。

実際に地熱開発を実施している企業体にとっては、地熱探査に関し筆者が抱いた心配は不要かもしれない。効率性や採算を優先的に考える企業論

理からは、述べた点は当然含めて淘汰されるであろうからである。筆者はむしろ、国の実施する探査的調査がそうでなければよいがと思っている。国の使命としてのリスクな先導的探査は当然のことであるが、実施内容は企業なみに厳格な査定がないといけない。作業量が増え、実施内容が定型的になっているときは、よくよくこの点に気を付けなければならない。本稿は、これから地熱開発が順調に進展することを願って書いた。他意があつてのものではないことをご理解願いたい。

#### 参 考 文 献

- 早川正巳(1970)：NHKブックス117 地熱 第四のエネルギー。日本放送出版協会、東京、213p。  
 石井吉徳(1959)：1-2-1 地殻の利用。“地殻の物理学”，東大出版会、東京、11-13。  
 中谷宇吉郎(1988)：比較科学論。樋口敬二編“中谷宇吉郎随筆集”(1988)、岩波書店、東京、276-294。  
 小川克郎(1987)：地熱資源調査概要。新エネルギー財団“昭和61年度地熱開発技術者講習会テキスト”，18p。  
 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1989)：4 各探査手法の評価結果のまとめ。“地熱探査技術等検証調査深部探査技術総合解析報告書”，360-384。  
 通商産業省(1987)：今後の深部地熱開発の課題。“大規模深部地熱発電所環境保全実証調査総合評価報告書(豊肥地域)”，101-115。

---

NODA Tetsuro (1997) : Does geothermal prospecting aim to clarify so-called three geothermal genetic factors?

---

< 受付：1997年4月14日 >

