

地熱調査における物理探査の現状と展望

川村 政和¹⁾

第1表 地熱3要素に対する物理探査法の役割

◎最適 ○有効 △効果

調査法	概査			精査			開発	
	水平分布			垂直分布			断裂構造	流体流動
	熱	水	構造	熱	水	構造		
重力探査	.	.	◎	.	.	◎	.	.
反射法地震探査	.	.	△	.	.	◎	○	.
屈折法地震探査	○	.	.
微小地震法	○	◎	○
磁気探査	○	.	○	△
ジュランベルジャ法	.	.	△	.	○	◎	○	.
MT法電磁探査	.	○	○	.	○	◎	○	.
SP法	.	○	.	.	△	.	.	○
地温・熱流量調査	◎	○	.	○	.	.	.	◎
熱映像調査	◎	○
坑井利用電気探査	.	◎	○
弾性波トモグラフィ	○	◎	.
VSP	○	◎	.

1. 地熱調査の考え方の変遷

1.1 地熱資源開発の変遷

わが国の地熱開発は、1966年(昭和41年)の日本重化学工業(株)による松川地熱発電所と翌1967年(昭和42年)の九州電力(株)による大岳発電所の運転開始をもって本格的な利用の歴史が始まった。当時、地熱流体はせいぜい地下の深度数100 m から1000 m 程度のポーリングによって生産されていた。1万 KW 程度の発電量ならばその程度の深度でも可能であった。しかし発電規模を更に大きくするにはより大量の地熱流体を確保する必要があり、そのため開発対象を更に広くしかも更に深くまで拡大することになった。そのような地熱資源を深部地熱資源とよぶが、これに対して前者は浅部地熱資源と称せられるようになった。開発対象の変化につれて、探査手法も変わった。浅部地熱資源が対象の場合は大掛かりな探査を行うよりも、地表の地熱徴候を目標としてすぐ掘削したほうがてっとりばやく、しかも確実であったろう。しかし深部地熱資源が対象となると、掘削地点の決定がより難しくなる上に掘削コストが大幅に上昇するため、より精度の高い地下構造の把握が要求されるようになり、必然的に物理探査の重要性が増してきた。つまり地熱探査の歴史は、浅部から深部へ、あるいはより広い範囲の地熱構造の把握を目指して進歩してきたといえる。そして地熱資源に対する開発・研究がすすむにつれて、最近では地熱流体が断層や破砕帯に滞留し、流動しているということが明らかになってきた。即ち、地熱流体の採取範囲と、その賦存構造認識が大きく変化した訳である。

1.2 地熱調査の考え方

地熱調査の目的は、地熱資源がどこにあるか、さらには、どれ程あるかを調べることである。「地下水」が「マグマ」等の地球の熱エネルギーによって

熱せられると「地熱蒸気」や「地熱水」となる。それらを総称して「地熱流体」というが、そうした地熱エネルギーが資源として有用であるためには、一定量以上の「地熱流体」を確保しなければならない。例えば1万 KW の地熱発電を行うためには、1時間当たり約100 t の地熱蒸気が必要である。即ち地熱調査では単に高温部を探すだけではなく、そこに地熱流体がどれ程あるかを把握することが重要である。「熱」・「水」・「貯留構造」を地熱資源の3要素といい、地熱資源探査の目的は、それらを把握し、開発可能性の評価を行うことである。そこにおいて物理探査のほとんどは、地熱流体の存在が期待できるような「貯留構造」の捕捉を目的として実施されることが多い。そして地熱流体の存在が確認されると、次にその賦存量の評価を目的とした探査が実施される。

現在、地熱開発に比較的多く利用されている物理

1) 地質調査所 地殻熱部

探査法について、その探査目標と地熱3要素との関連をまとめたのが第1表である。概査・精査・開発といった調査・開発の進行段階に応じて探査目標が高度になってくると、探査法もそれに依りて変わるが、「熱」・「水」探査には有効な方法の少ないことが明瞭である。また地熱資源の貯留構造が地下の断裂系破砕帯であるという考え方になると、その方法もフラクチャー分布を精度良く把握することを目的とした探査方法の開発が必要となり、弾性波トモグラフィーを中心とした新しい探査法が開発がなされつつある。

2. 地熱資源調査プロジェクトにおける物理探査

前述した1966年の地熱発電所の運転開始のかなり以前から、各地で地熱調査が行われてきていた。それらの発電所の開発についても、そのかなり以前から地熱調査が実施されており、例えば地質調査所は既に1947年には地熱開発地域選定に関する研究を開始し、1951年に大分県の地熱地帯において電気探査・地震探査や地温調査を実施している。

しかし国として組織的な地熱調査が始まったのは、オイル・ショック後の1973年からである。地熱エネルギー開発の重要性が再認識され、新エネルギー源の開発を目的としたサンシャイン計画の発足により、全国的な地熱資源の分布調査が行われるようになってきた。地質調査所はそれに先立って全国200ヶ所におよぶ地熱有望地を提示しており、以後の地熱資源分布調査に対して指針を与えた。サンシャイン計画の発足と共に、わが国の全国にわたる地熱資源量を把握するための基礎調査が1973年から開始された。それらの「全国地熱基礎調査」・「地熱開発精密調査」・「地熱開発基礎調査」が終了した後、新エネルギー総合開発機構(NEDO)が設立されると、概査の質を更に向上させた「地熱開発促進調査」や広域的に地熱資源賦存量を把握するための「全国地熱資源総合調査」が開始された。以下で各調査の概要を紹介すると共に、第2表ではそれらを基礎調査・促進調査・広域調査に分類して調査内容についての簡単な比較をしている。

『全国地熱基礎調査』(1973～75年：30地域)

本調査は、わが国の地熱資源量の見積もりと開発
1992年9月号

第2表 地熱調査の内容比較

- A) 地熱資源基礎調査(1973—1979)
- B) 地熱開発促進調査(1980—1992)
- C) 広域熱水流動系調査(1984—1990)

調 査	A	B	C
目 的	基礎データの収集	地熱貯留層の確認	広域地熱系の把握
期 間	2年	3年	3年
面 積	10 km ²	50～70 km ²	500 km ²
構 造 試 錐	500 m × 1	1500 m × 7	1000 m × 1
熱流量調査	10～20 m × 20	400 m × 3	50 m × 20 200 m × 8
調 査 内 容	変質帯 地化学 放熱量 重力 シュランベルジャ法	地表地質 地化学 熱流量 重力 シュランベルジャ法 ダイポールマッピング法 SP法 流電位法 MT法 AFMT法 ELF-MT法 TDEM法 微小地震 噴気テスト	火山岩年代 流体地化学 放熱量 精密重力 MT法 AMT法 CSAMT法

のための基礎データを得ることを目的として、1973～75年の3年間にわたり上述した約200ヶ所の地熱地域の内から第1図に示している30地域を対象として実施した。調査項目は変質帯調査・放熱量調査・地化学調査および地下構造探査である。地下構造探査としては重力探査または電気探査を実施した。地質調査所が実施した放熱量調査は10 m 深地温分布調査や温泉・噴気等による対象地域からの熱エネルギー放出量を見積もる目的からなされた。電気探査はシュランベルジャ法による直流法垂直電気探査が適用された。その他、地域の状況に応じて地震探査と磁気探査および空中熱映像調査が実施された。

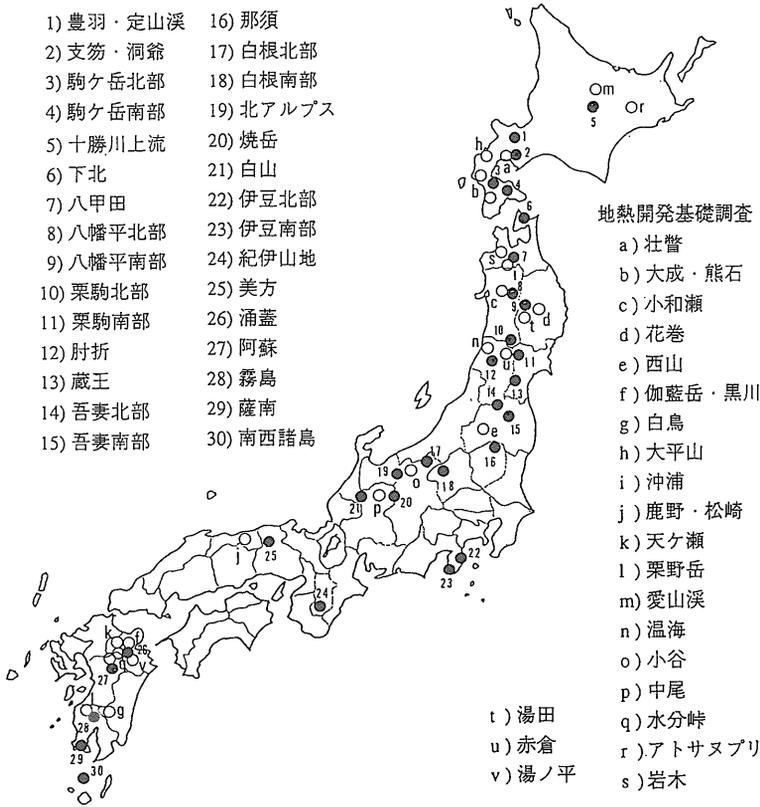
『地熱開発精密調査』(1974～77年：19地域)

「全国地熱基礎調査」の終了した地域の内、可能性の高い19地域について、さらに地熱貯留層の確認を目指すべく、500 m 級の構造試錐を主体とし、補足的にシュランベルジャ法電気探査を含む「地

- 全国地熱基礎調査 (1973 - 1976)
- 地熱開発基礎調査 (1977 - 1979)

全国地熱基礎調査

- 1) 豊羽・定山溪
- 2) 支笏・洞爺
- 3) 駒ヶ岳北部
- 4) 駒ヶ岳南部
- 5) 十勝川上流
- 6) 下北
- 7) 八甲田
- 8) 八幡平北部
- 9) 八幡平南部
- 10) 栗駒北部
- 11) 栗駒南部
- 12) 肘折
- 13) 蔵王
- 14) 吾妻北部
- 15) 吾妻南部
- 16) 那須
- 17) 白根北部
- 18) 白根南部
- 19) 北アルプス
- 20) 焼岳
- 21) 白山
- 22) 伊豆北部
- 23) 伊豆南部
- 24) 紀伊山地
- 25) 美方
- 26) 涌蓋
- 27) 阿蘇
- 28) 霧島
- 29) 薩南
- 30) 南西諸島



第1図 地熱資源基礎調査地位置図

熱開発精密調査」を実施した。

『地熱開発基礎調査』(1976~79年：22地域)

上記の調査の終了に伴い、引き続き全国の地熱有望地域を対象とし、「全国地熱基礎調査」と「地熱開発精密調査」とを合わせた性格の第2次基礎調査として「地熱開発基礎調査」が開始され、1976~79年にわたり全国22地域(第1図)で実施された。調査項目は第1次とほぼ同じで、放熱量調査・重力調査・地震探査・電気探査・変質帯調査・地化学調査および500m級の構造試錐である。電気探査についてはやはりシュランベルジャー法による直流法垂直電気探査が適用された。「全国地熱基礎調査」に比べて地震探査の適用が大幅に増加したが、その方法としては微小地震探査法が多用されている。

『地熱開発促進調査』(1980~92年：1期分38地域；

6地域継続中)

本調査は、有望であるにもかかわらず開発が進んでいない地熱地域について、国が先導的調査を施すことにより探査リスクを軽減し、民間企業を誘導して地熱発電所開発の促進をはかるようとするものである。調査の進め方(第2図)は、1年次で高温部を把握し、2年次で地熱貯留層を捕捉、更に3年次目で地熱流体を確認するという流れで構成されており、各年次毎の評価をしながら3年間にわたって実施するというものである。1地域当たりの標準的調査内容は1000~1700m深構造試錐等8本と400m深熱流量調査に物理探査・地質調査・地化学調査および環境調査からなっている。物理探査としては重力探査の他、各地域の状況に応じて種々の電気探査法を使い分けている。尚、本調査は全国38地域に及

調査内容	1年目	2年目	3年目
I. 熱資源賦存状況調査			
1. 地表調査			
a) 地表地質調査			
b) 地化学調査			
c) 物理探査			
2. 坑井調査			
a) 熱流量調査 (400m級 3本)			
b) 構造ボーリング (1000m級 3本)			
c) 精密構造ボーリング (1500m級 3本)			
d) 環境ボーリング (1500m級 2本)			
II. 環境調査			
気象・大気・水質・動植物・景観			
騒音・地盤・温泉・微小地震 等			
III. 総合評価			
調査目的	高温域 の把握	地熱貯留部 の把握	地熱流体 の確認

第2図 地熱開発促進調査における調査内容の年次展開

全国地熱資源総合調査 (1980 - 1983)

■ 第1次(1980 - 1983) 全国

■ 第2次(1984 - 1986) 4地域

□ 第3次(1987 - 1992) 6地域

■ (1. ニセコ 2. 八甲田 3. 南会津 4. 国分)

□ (5. 十勝 6. 那須 7. 鶴見岳)

□ (8. 秋田駒 9. 磐梯 10. 阿蘇)

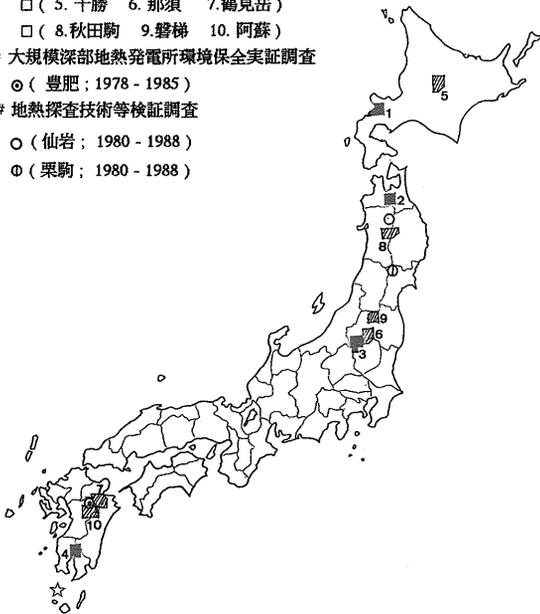
大規模深部地熱発電所環境保全実証調査

◎ (豊田; 1978 - 1985)

地熱探査技術等検証調査

○ (仙岩; 1980 - 1988)

⊙ (栗駒; 1980 - 1988)



第3図 地熱探査技術プロジェクト位置図

ぶ第1期調査を終了し、1992年度(平成4年度)から内容を改めた第2期調査を開始することになっている。

『全国地熱資源総合調査—広域熱水流動系調査』

(1980~90年)

以上の個別地域に対する調査とは別な観点から、日本列島における地熱資源の賦存状況の広域的な把握を目的とした調査が実施された。まず第1次調査では日本列島全体を対象として、レーダー映像法・キューリー点法などのリモートセンシングを駆使した調査や重力法調査等による地熱資源賦存調査が実施され、全列島の地熱資源評価を行った。そこから抽出された有望地域の内、下記の合計10地域(第3図)について、以後の第2次および第3次調査が実施され、そこでは熱水流動系に注目した広域調査が行われた。

第1次調査(1980~83年：日本列島)

第2次調査(1984~86年：ニセコ・八甲田・

南会津・国分地域)

第3次調査(1987~90年：十勝・秋田駒・磐梯・

那須・鶴見岳・阿蘇地域)

第2次・第3次調査では、火山岩分布年代調査・流体地化学調査・精密重力調査・比抵抗調査・P波速度構造調査および放熱量調査が実施された。比抵抗調査は主にMT法であり、国分地域のみで行われたP波速度構造調査の内容は微小地震観測である。

3. 地熱調査・開発における物理探査活動

3.1 物理探査法利用の現状

一方地質調査所では、わが国における各方面における前年の物理探査・調査活動の状況をまとめて、「物理探査・調査研究一覧」という報告書を毎年発行している。そこでは、「金属及び非金属」とか「地下水」といった9種類の調査対象別の活動の分類について、重力・地震・電気といった10種類の調査方法別の分類がなされている。地熱資源に対する探査・調査活動については“地熱及び温泉”に分類されている。このデータを利用して地熱に対する探査・調査活動がどのような状況にあるかを考察する。

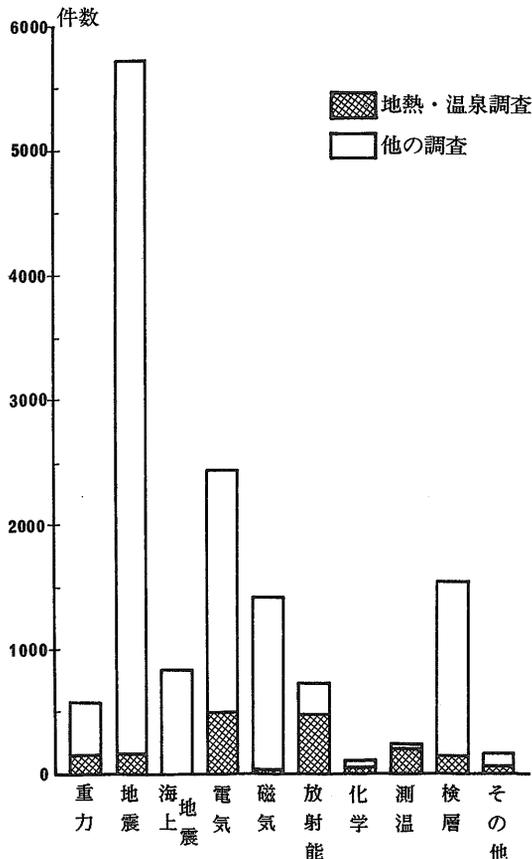
まず調査対象別の分類に従って、サンシャイン計

画が発足し国による本格的な地熱調査が開始された1974年以降、90年(以下、特に年号を付さない限り1900年代を示す)に至るまでの17年間にわたる調査・探査活動の統計をとった。その結果(第4図)から、全体としては地震探査が最も多く5700件以上におよび、年間300件程度の活動がある。坑井の掘削本数に依存する検層を別格とすると、以下電気が2500件程度、磁気が1400件程度と続く。これに対し“地熱及び温泉”は電気と放射能がいずれも500件以上あり、測温・地震・重力の3種がほぼ200~150件程度で並んでいる。全体と比較すると、地震はそれほど多くはなく、磁気は極めて少ない。また逆に、放射能と測温の全体に占める割合がかなり大きいといった点が特徴である。海上地震が全く無いのはうなずけるとしても、磁気が少なく放射能の多い点が特に際立っている。

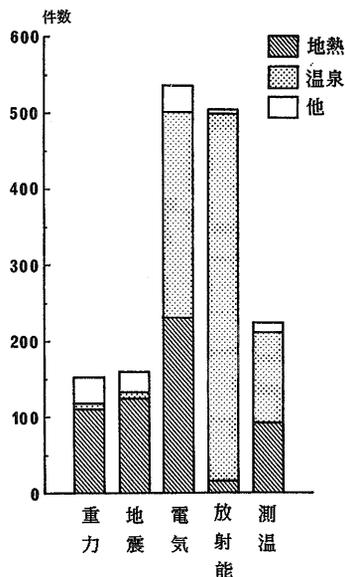
次に、“地熱及び温泉”で多い重力・地震・電気・放射能・測温の5種類について、さらにその内容を“地熱”と“温泉”に分けて詳細な検討を試みた。その結果を第5図に示しているが、放射能の96%と電気・測温のはぼ50%を温泉調査が占めている。これに対して重力・地震の70%以上は“地熱”による活動であることが明らかとなった。即ち、地熱調査については重力・地震・電気・測温の4種類の探査法の利用頻度の高いことが判明した。

3.2 物理探査活動の経年変動

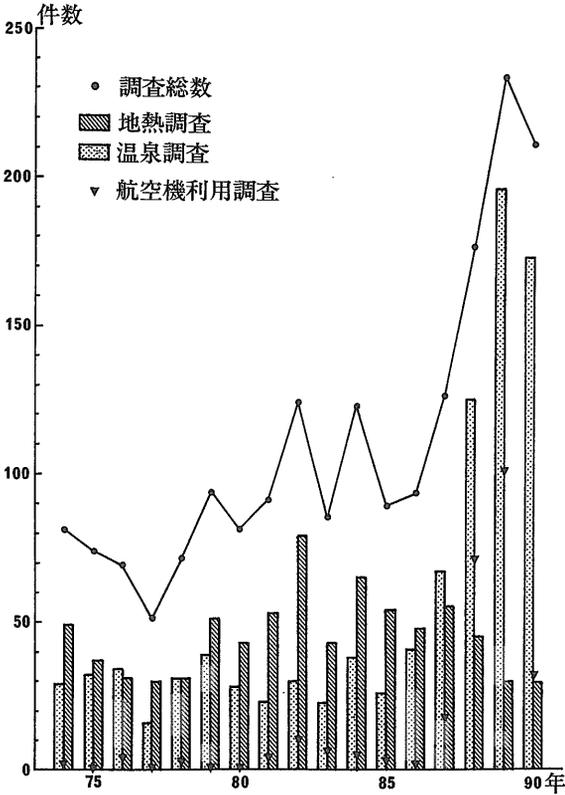
次にそれらの探査活動が経年的にどのような変動(第6図)をしているかといった観点から検討を加えた。図中の横軸は西暦1900年代を示している。“地熱及び温泉”の総調査件数は、1977年を底として増加傾向にあったが、86年からは更に顕著に増加し、89年にピークを示している。90年にやや減少しているのは、集計上の遅れも関係していると思われる。この内訳を“地熱”と“温泉”に分けてみると、温泉調査件数は85年まではほぼ一定の状態にあったが、それ以降は上昇を始めて、全体と全く同様な傾向となっているのに対し、地熱調査件数は82年をピークに逆に低下傾向となり、最近では77年頃の最低線にまで下がってしまっている。これらの点から知られることは、“地熱及び温泉”全体の1986年以降の総調査件数の急激な上昇は“温泉”に依存していたことが明白である。また、それらの調査の中で航空機(主にヘリコプター)を利用した探



第4図 主要物理探査法別地熱・温泉関連探査件数(1974~90)



第5図 主要物理探査法の地熱・温泉各探査活動件数(1974~90)



第6図 地熱・温泉別探査件数の経年変動(1974~90)

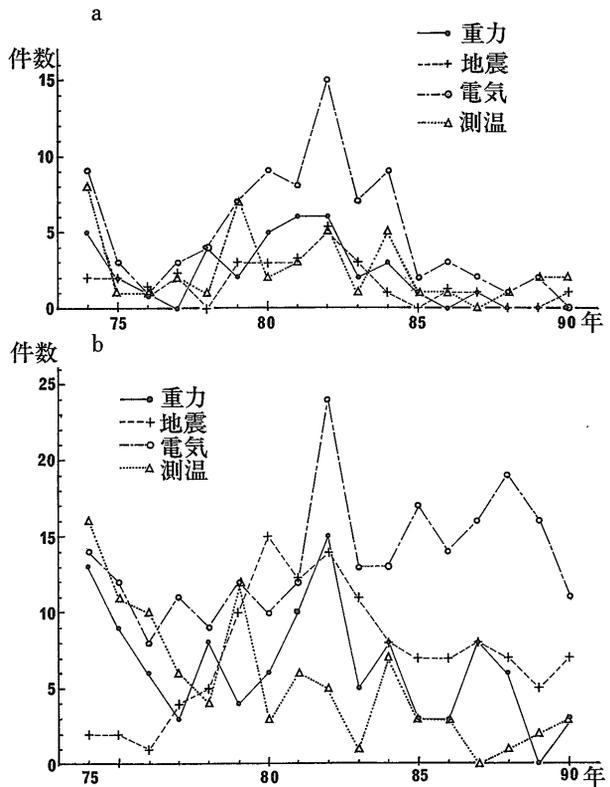
査件数を▼印で示している。この変動傾向も“温泉”と同じであるので、主としてその方面で利用されていることを証明している。このことは、ヘリボン探査が比較の利用しやすくなったことを意味しており、今後の地熱調査への波及が窺われる。

そのような増減は、景気の変動とか他の要因との関連もあろうから、別な観点からの解釈も可能であろう。しかし以下では、そのようなこととは別な物理探査法自身の要因について検討するため、前節で知られた、地熱調査で多用されている重力・地震・電気・測温の探査法別の経年変動(第7b図)を求めた。重力・地震は1977年以降は似かよった傾向を示し、82年頃にピークを示す。測温については全般にわたり減少傾向にある。これらに対して電気はかなり異なっていて、一貫して増加傾向にある。特に、全体が低下傾向に入る83年以後も、他の減少傾向とは異なって増加している。この原因として考えられるのは、1982年以降は地熱調査においてMT法電磁探査が本格的に利用され始めた時期に

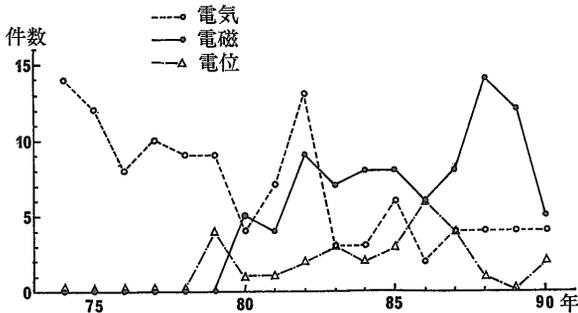
当たっており、そうした探査手法別の増減が関係しているのではないかと推察された。このため電気探査の変動内容について、更に詳細な検討を加えた。

電気探査の内、MT法やEM法等を「電磁」に、自然電位法や流電位法等を「電位」に分類した。また主たる「電気」探査法はシュランベルジャー法である。それらの探査件数の経年変動を第8図に示している。これから非常に興味深いことが知られる。シュランベルジャー法等の電気探査は1974年以降減少傾向にあるが、83年以後の利用は横這い状態にある。しかし1980年頃からそれに代わって電磁探査法が利用され始め、件数の上からみると、以前の電気探査にとって代わった様子があり、先の推定を裏付けた結果となっている。

これらの点を実際に開発に携わっている企業・ディベロッパーの動向からながめたのが第7a図に示すグラフである。即ち、既述した第7b図の内、国による調査等を省いて、民間企業自身の探査・調査活動の経年変動を表している。しかし、この図では



第7図 主要物理探査法の地熱探査件数経年変動(1974~90)



第8図 電気探査法の手法別地熱探査件数経年変動 (1974~90)

電気探査も他の探査法とほぼ同様な動向を呈しており、第7b図のような顕著な違いは見られない。つまり電気探査法全体の動向をa-b両図で比較すると、83年までは双方の変動傾向は同じであるにもかかわらず83年以降の傾向が全く異なっており、第7a図では他探査法の傾向と格別な差はみられない。これはMT法電磁探査は民間企業自身の探査ではそれほど利用されていないことを意味している。この原因としては、同探査法のコストや利用上の簡便さに関係があるのではないかと考えられる。そういった点が改善されたなら、MT法の利用はさらにのびる可能性があるといえよう。

3.3 地熱探査法の開発研究

本文の冒頭で述べたように地熱調査が始まった初期段階では、地熱微候地において主に温度の把握を主体として行われた。そして前節で紹介したような地熱資源調査においては既存の探査法を利用して実施されたが、地熱資源に対する更に高度な探査・評価法の開発が望まれた。このため例えば地質調査所ではサンシャイン計画の一環として、以下のような探査法についての基礎研究を実施した。

- ・ 広域深部地熱資源賦存に関する研究 (1975~78年)
- AFMT法・MT法・地震探査法・リモートセンシング法・赤外線熱映像法等
- ・ 深部地熱資源探査技術に関する研究 (1979~)

サイスマックエミッション法・流動電位法等尚、これらの研究成果についてはいずれも技術移転され、その後の地熱調査において利用されている。そして現在は、地熱貯留構造に大きな係わりを

もつ地下断裂系や破碎帯を精度良く把握する新探査技術の開発を目的として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)を中心に、次なるプロジェクトが進められている。

- ・ 断裂型地熱貯留層探査法の開発(1988~)
- アレイ式MT法・高精度反射法・弾性波トモグラフィ・VSP・微小地震法

4. 地熱探査技術プロジェクトにおける物理探査法の評価

前節までは種々の物理探査法がどのような利用のされ方をしているのかについて述べてきた。第3節で述べた国による地熱資源分布調査については、ある一定方針のもとにはほぼ同様な調査メニューにもとずいてなされている。つまり、全国的な比較が可能なような調査方式が行われている。そのため採用される探査法も、必ずしも対象地域の実状に合わせられない部分もあって、その結果をそのまま評価することは難しい。しかし、それらの地熱資源分布調査や地熱資源量把握調査に対して、地熱資源探査方法について開発・検討を行ったプロジェクトがある。以下ではそれらの調査目的と結果について、その概略を紹介している。

『大規模深部地熱発電所環境保全実証調査』

(豊肥地域：1977~85年)

『大規模深部地熱発電所環境保全実証調査』は、国産エネルギーの利用拡大と電源多様化の一環として、それまで開発の対象とされていなかった地下2000~4000mにおよぶ深部地熱資源の利用により地熱発電の量的拡大をはかるため、広域かつ深部にわたる地熱構造を把握するとともに環境との係わりについて調査するという、当時としては画期的なプロジェクトであり1978~85年にわたって実施された。これは大分県と熊本県の県境に位置する豊肥地域に対して全部で約20項目の調査を集中して実施するという点においても注目すべきものであり、探査法の採用についても先駆的な試みがなされた。その内で物理探査は12の方法が実施された。また個々の調査法について、その有効性の検討を行った点においても画期的であったといえ、第3表に示しているその評価内容には興味深いものがある。各探査法についてはさらに概査・精査・貯留層探査の3段階に分けての有効性の検討を行っており、精査

第3表 「大規模深部地熱発電所環境保全実証調査」
における物理探査と評価内容

探 査 法	有 効 性	問題点・ 適用限界
熱流量調査 (80~500 m)	熱水上昇流域を 検出	深部への外挿 困難
重力探査	地下構造情報が 高精度	コントロール点 必要
空中磁気探査	地熱徴候との 対比良好	地域差の考慮 必要
シュランベルジャー 法電気探査	浅部構造把握に 効果有り	深部で分解能 不良
AFMT 法調査	比抵抗分布把握 が簡便	深度解析が 不可能
MT 法調査	深部情報に信頼 性高い	浅部構造の影響 有り
自然電位法電気探査	地熱徴候地把握 が簡便	異常性の解釈 困難
ダイポールマッピング 法電気探査	比抵抗分布把握 が簡便	深部情報の把握 不良
中発破(屈折法)探査	地下4 km まで 構造提供	深部で分解能 低下
ブライトスポット (反射法)調査	可探深度が深い	複雑な地層には 不適
微小地震探査	地熱活動状況を 推定可能	構造決定が困難
(空中赤外線)熱映像 調査	広域熱異常把握 に効果的	表面的把握に 限定

第4表 「地熱探査技術等検証調査」(仙岩・栗駒)に
おける物理探査と評価内容

探 査 法	有 効 性	問題点・ 適用限界
熱流量調査 (200~800 m)	地下熱分布推定 に有効	掘削点設定が 不自由
放熱量調査	地熱資源量を 推定	深部情報の捕捉 困難
重力探査	地質基盤深度を 捕捉	地層密度地域差 有り
磁気探査	貫入岩の存在を 推定	局所異常の把握 困難
MT 法探査	深部低比抵抗部 を捕捉	浅部異常の影響 有り
シュランベルジャー 法電気探査	浅部構造把握に 効果的	悪地形部で解析 不良
チューベル法電気 探査	詳細な比抵抗 分布を把握	坑井位置による 規制有り
屈折法弾性波探査	大局的地質構造 を把握	中層低速度層が 影響
反射法弾性波探査	可探深度が深い	道路状況による 規制有り
微小地震探査	熱源等の位置を 推定可能	活動に地域差 有り
空中(赤外線)熱映像 調査	熱供給域把握に 効果的	傾向的把握に 限定

段階で有効とされている物理探査法としては、MT法・熱流量・微小地震法があげられている。MT法については概査から貯留層探査に至る各段階で利用度が高いとされている。

『地熱探査技術等検証調査』

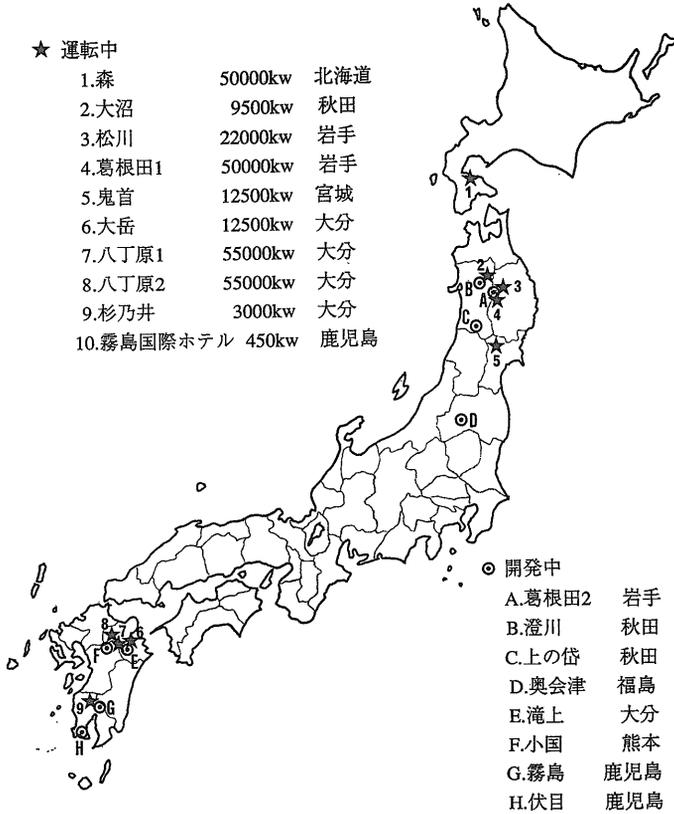
(仙岩・栗駒地域：1983~88年)

本調査は、それまでに蓄積されていた地熱探査技術を集大成して、広域にわたる大規模な深部地熱資源に対して適用可能な探査技術の確立をはかろうとするもので、堅固な帽岩層の有無による異なる2タイプの地熱構造モデルについて、深部地熱資源探査に有効と考えられる探査技術を地表から適用して、その結果を坑井調査によって検証するという目的で行われた。モデル地域としては仙岩地域と栗駒地域が対象とされた。その結果、約3000 mにおよぶ地下深部から高品位の地熱蒸気の噴出に成功している。また最後にそれら調査法についてそれぞれ有効性・コスト・問題点・適用性・問題点および改良点などの評価を行った。用いられた約10種類の物理探査法とその評価の概略内容を第4表にまとめている。シュランベルジャー法については浅部構造

の把握に効果があり、熱探査法として熱流量調査や熱映像法が、また、地熱活動状況を把握するものとして、微小地震がある。しかしこれは地域差によって左右されるようである。

5. 地熱開発現場の物理探査法評価

では、実際の地熱開発現場では物理探査法についてどのような評価がなされているであろうか。以下では文献(日本地熱調査会, 1988)に現わされた彼ら自身の評価についてまとめを試みる。対象としたのは葛根田・澄川・上の岱・奥会津・滝上・八丁原・小国・霧島・伏目の9地域(第9図)で、いずれの地域も既に発電を開始しているか、あるいはほぼそれに近い段階までにかなり開発が進行している。尚、八丁原と葛根田については既に5万KW級の発電がなされており、八丁原については同一地域内に2号機目の5.5万KW発電所も運転開始している。葛根田についてもやはり2号機の設置を目指した開発が続けられている。これらの地域では1号機の運転開始までもに多くの調査がなされていて、地下状況がかなり詳細に知られている点が他の



第 9 図 地熱発電所と開発調査地位置図

地域とは異なっている。

第 5 表には、それら各地域で適用された物理探査法毎の評価内容のコメントを要約している。ここで挙げられている探査法は彼ら自身が報告している内容に限定したため、各地域で実施された探査法の総てを網羅していない恐れもあるが、重要な役割を果たした探査について記載を省く訳もなく、また特に記述していない探査については注目すべき点が無かったためと考えられるので無視してかまわないであろう。しかし開発に直面しているディベロッパーの評価であるから、かなり本質的な要素を含んでいるものと考えられる。記載のある探査法の内、検層と貯留層評価的の調査は評価法的な役割であるためここでは除いている。また、表中ではその手法別に評価内容を示しているが、中には実施したものの特何も言及していない探査法もある。各地域の評価内容を比較すると、探査が効果的であったとしているのは断層破砕帯や断裂構造を捕捉した場合が多い。地熱流体の賦存状態がそれらに規制されていること

を窺わせる。

これらをよりわかり易い形で比較できるように整理したのが第 6 表である。複数の評価がある探査法を主体としてまとめ、1 回限りのものは下欄に参考として載せている。これにより探査法毎の評価傾向が現れていて、興味深い。即ち MT 法電磁探査や反射法地震探査の評価が高く、重力探査と坑井利用電気探査がこれに次いでいる。これらに対して磁気探査が最も評価が低く、ほとんどの地域で効果が無かったとされている。最も評価が良い MT 法については、断層破砕帯の把握に効果があったとしているところが多いことが第 5 表より明瞭である。また磁気探査については地表付近の磁性岩体の影響が大きくて、地下深部の構造を反映していないと評価されている。地温探査法も一部地域で同様な評価がなされているが、有効としている地域もいくつかあって評価が分かれている。これはその地域の水理特性等を考慮した深度で測定をすれば効果的であることを示している。また、シュランベルジャー法垂

第5表 地熱開発地域で適用された物理探査法の評価内容

地域	物理探査項目と評価内容	地域	物理探査項目と評価内容
A	1. 重力探査……………貫入岩体・大規模フラクチャ	F	1. 浅層反射法(ミニソーシー法)…1000 m 深までの断裂構造線の把握に効果
	2. 反射法弾性波探査…断層・貫入岩体・基盤岩・透水性破砕帯捕捉に効果		2. シュランベルジャ法電気探査…地熱水貯留域の拡がり把握に効果, 噴気成功に寄与
B	3. AE 法マッピング…逸泥方向把握に効果, フラクチャの大きさの判断に有効	G	3. TDEM 法電気探査……………地下構造を反映せず, 無効
	4. MT 法電磁探査…比抵抗分布とフラクチャ方向・断層構造と相関有り		4. CSAMT 法電気探査
C	5. Tubel 法電気探査…比抵抗分布とフラクチャ方向・断層構造と相関有り	H	5. 流電位法電気探査……………地熱流体上昇域の把握に効果
	1. 重力探査…深部裂か存在示唆, 基盤深度と高温貯留層域の把握に有効		6. 地温分布調査 (500~700 m) …500 m 深までの地温構造から, 以深の温度分布推定に効果有り
D	2. 反射法地震探査……………地層の境界面を捕捉	I	7. 放熱量調査……………環境モニタリングと流体流動シミュレーションに有用
	3. 地上磁気探査…地表付近磁性岩体の影響大きく, 地下熱構造を反映せず		1. MT 法探査…断層・破砕帯の把握に有効, 調査井の掘削点決定に寄与
E	4. 空中磁気探査……………広域的な熱源位置を示唆	I	2. CSAMT 法探査……………MT 法との併用で, 断層・破砕帯把握に効果
	5. シュランベルジャ法電気探査……………高温貯留層の分布域を示唆		3. 流電位法…調査法の特性に注意が必要だが, 調査井掘削地点決定に利用可能
E	6. MT 法電磁探査……………地熱貯留層境界の推定に効果	I	1. 重力探査……………主要な地質構造線の推定に効果
	7. SP 法電気探査		2. 地上磁気探査……………浅部地質の影響大きく深部情報得られず, 無効
E	8. 地温・熱流量調査(10/80 m) …帽岩層厚く地下深部の熱構造を反映せず	I	3. シュランベルジャ法電気探査…断裂貯留層沿難透水性帽岩層把握に効果
	1. 重力探査……………断層等地下構造の推定に極めて有効		4. バイポール・ダイポール法電気探査……………難透水性帽岩層の把握に効果
E	2. 地上磁気探査……………深部構造を反映せず, 無効	I	5. MT-AFMT 法電磁探査…断裂貯留層沿い難透水性帽岩層の把握に効果
	3. 垂直法電気探査……………断裂帯を捕捉		6. 坑井利用(流電位法) 電気探査……………難透水性帽岩層の把握に効果
E	4. 平均3極法水平電気探査……………浅部の影響大, 潜在変質帯を検出できず	I	7. 自然電位法電気探査
	5. 地温調査 (50 m) ……150 m 深の高温異常帯を捕捉		8. 放熱量調査 (10/30 m) …地下断裂系形態の捕捉に効果, 但し徴候地付近のみに限られる
E	1. QMT(ELF-MT)法比抵抗マッピング探査…信号が不安定, 地形・地質の影響大	I	1. 重力探査……………局所的陥没構造を検出, 地熱貯留層の存在を示唆
	2. TDEM 法比抵抗探査……………地熱貯留層の断層破砕帯の延長方向を推定		2. 反射法地震探査…地層不連続面・破砕帯を確認, 貯留層形態推定に効果
E	3. 熱流量調査……………高熱流量域は開発域に対応	I	3. 空中磁気探査
	1. 重力探査		4. シュランベルジャ法電気探査……………深部情報を十分に得られず
E	2. 微小地震探査	I	5. MT 法探査……………深部高温異常域に良い相関, 熱水対流域を把握
	3. シュランベルジャ法電気探査		6. Tubel 法電気探査……………MT 法より詳細な貯留層分布を把握
E	4. MT 法電磁探査……………深部地熱貯留層の把握に効果, 信頼性良好	I	7. 地温分布調査 (20/50 m) …深部高温域に相関ある浅部高温異常域検出に効果有り
	5. 流電位法電気探査		8. 微小地震観測
E	6. 熱流量調査 (150 m)	I	
	7. 自然放射能探査		
E	8. 自然地震モニタリング	I	

第 6 表 地熱開発地域における物理探査法の評価

○有効 ×無効 +実施 -未実施 ・無

調 査 法	A	B	C	D	E	F	G	H	I
重力探査	+	○	○	-	+	-	-	○	+
反射法地震探査	○	+	-	-	-	○	-	-	○
微小地震法	-	-	-	-	+	-	-	-	+
磁気探査	-	×	×	-	-	-	-	×	+
シュランベルジャ法	-	+	+	-	+	○	-	○	+
MT 法電磁探査	+	○	-	-	○	-	○	+	○
TDEM 法	-	-	-	+	-	×	-	-	-
坑井利用電気探査	+	-	-	-	+	○	+	○	○
SP 法	-	+	-	-	-	-	-	+	-
地熱・熱流量調査	-	×	+	+	+	○	-	+	○
(○)	AEM	・	・	・	・	・	・	・	・
その他探査 (×)	・	・	3 極法	QMT	・	・	・	・	・
(+)	・	・	・	・	放射能	CSA	CSMT	BP-DP	・

直電気探査は利用頻度が高い割には評価はそれほど高くない。恐らく MT 法との比較上の評価となっているからであろう。

物理探査法についてはそれぞれの方法により特徴があるので、その特徴を生かすような使い方をしていたかどうかとか、さらには解析方法によっても結果が大きく左右されるので、それらの点を十分に検討せずに第 6 表の結果をもって一概に探査方法の優劣に結びつけるのは危険である。それらの評価が普遍的なものであるかどうか、今後更に検討の余地はあるだろう。しかし、各探査法がどのような現象の把握に効果を上げているかを知ることができて、利用する上で参考になる。

6. 今後の地熱開発における物理探査の役割

6.1 地熱開発の新しい状況

これまで地熱開発における物理探査の利用状況や評価について述べてきたが、今後の物理探査の動向を考える場合は、当然のことながら地熱開発の動向を考慮しなければならない。近年の地熱開発については、いくつか新しい状況が生じてきている。まずその一つは地熱流体の賦存に関わることであって、地熱流体が断層や破碎帯に滞留し、流動しているということが明らかになってきた点である。そのため探査内容として、断層や破碎帯の捕捉が重視されるようになってきた。電気探査で例えるならば、単な

る低比抵抗部そのものではなく、それから高比抵抗部への遷移部など比抵抗分布の変化部、即ち地下構造の境界部の抽出へと興味が移っている。これらの点は、前節で述べた地熱開発現場における評価内容(第 6 表)にも現れていた。

次には、全体的に地熱開発がかなり進展しているという点である。地熱発電所は既に全国 10ヶ所所運営中であり、更に今後 10年程度の内に 8ヶ所の運転開始が予定されている(第 9 図)。そのような状況は、既開発地域について以下のような新しい状況を招来すると考えられる。つまり、

- (1) 生産井については数年毎に代替ボーリングの必要があるため、運転中のサイトでは掘削が恒常的になされている状況となる。
- (2) 既存発電所に対する 2 号機の併設方式の成功のため、既開発地の再開発が増加する。この方式は既に 2ヶ所で行われているが、大型単機設置方式よりも投下資本の早期回収という点からも合理的であると思われる。

6.2 今後の地熱探査の役割

以上より今後の物理探査法について展望する。地熱探査について到来する新しい状況は、生産井の代替ボーリングや 2 号機の増設のために、既に一応の開発が終わっている地域に対する再開発のための探査の需要が増すであろうという点である。しかし、それらの開発が既に稼働中の坑井及び貯留層に対して影響を与えるものであってはならない。即ち

共食い現象を招きかねない恐れを内在しているということである。そのようなことは逆効果であるばかりではなく無駄な経費を増やすだけであるから、営業上の大きな問題となる。そのためそうした状況を防止する技術が必要となる。即ち、今後は「水収支」や「水流動」といった、地熱地域におけるトータルな「水」のあり方と挙動を把握する技術が重要となる。本文の冒頭でも述べたように、これまでの探査は地熱3要素の内、貯留構造の把握にのみ捕らわれ過ぎていた。「水」を把握するための探査技術の開発がこれまで以上に必要となる。

そして発電規模の拡大につれて極めて多量の地熱水採取が行われるようになるため、採取スピードが熱水供給スピードを上まわる恐れが増大している。こうした状況は生産量の減少に直結するので、発電所建設後では大きな問題となる。このため建設以前の段階における精度の高い地熱貯留量の把握、また建設後は営業運転の障害とならないような探査活動、減少量の回復のための探査法、簡便で正確なモニタリング法といった点が物理探査に望まれるであろう。つまり、これまでのように、これから開発する地域に対する探査ではなく、利用中の地域に対して可能かつ営業運転に害が無くしかも有効な探査法が求められるであろう。

それと共に、従来の新規地域において開発サイトを絞り込むという方式から、既にある程度の地熱水が確認・開発されたサイトから外側への拡大型探査方式への転換が必要となっている。それは単に水平方向だけではなく、既存開発深度からさらに深部に向けての開発を目指すこともより重要となるだろう。そのため調査対象地域の状況によって、これまで以上に探査法を使い分けていくことが望まれるであろう。既に運転を開始してから10年以上経っている地域、未だ発電には到ってはいないが周辺の地下構造についてかなりわかっている地域、これから開発サイトの絞り込みをしようとする場合では、探査目的が異なるため適用する探査方法が異なって当然であろう。それらのT・P・Oに応ずるため、物理探査法の適用メニューが3分化されるだろう。以上を項目別にまとめると、今後は次のような探査方式の確立が必要となると思われる。

探査目的の上からは、

- a) 拡大型(鍾先探鉱型)探査法
 - b) 水分布・水流動把握型探査法
- 探査方法としては
- 1) 中規模エリア高密度型探査法
 - 2) 難地形対応低高度空中探査法
 - 3) 生産活動の刺激利用型探査法
 - 4) 坑井利用型探査法
 - 5) 非ダメージ型探査法

そのため先ず、既述したような各探査法についての評価内容をこれらの目的から再整理して、今後の物理探査法の開発方針を明確化することが望まれる。

参考文献

- 物理探査学会(1989):4. 地熱資源. 図解「物理探査」, p151-160
- 地質調査所(1973-75):全国地熱基礎調査報告書. (No. 1-30)
- 地質調査所(1974-90):物理探査・調査研究一覧. (No. 18-34)
- 地質調査所(1976-79):地熱開発基礎調査報告書そのI. (No. 1-22)
- 地質調査所(1985):豊肥地熱地域における研究. 地質調査所報告, 第264号
- 地質調査所(1987):仙岩地熱地域における研究. 地質調査所報告, 第266号
- 地質調査所(1989):地熱探査技術等検証調査総合評価報告書(仙岩・栗駒地域)
- 地質調査所(1991):栗駒地熱地域における研究. 地質調査所報告, 第268号
- 地質調査所(1992):日本の地熱資源評価に関する研究. 地質調査所報告, 第275号
- 日本地熱調査会(1974-75):地熱開発精密調査報告書, (昭和49-50年度)
- 日本地熱調査会(1988):わが国の地熱開発・利用の現状と展望. 地熱, 24-5
- 日本地熱資源開発促進センター(1975-77):地熱開発精密調査報告書(昭和50-52年度)
- 日本地熱資源開発促進センター(1977-79):地熱開発基礎調査報告書そのII. (No. 1-22)
- 新エネルギー総合開発機構(1980-91):地熱開発促進調査報告書. (No. 1-29)
- 新エネルギー産業技術総合開発機構(1989):地熱探査技術等検証調査総合解析報告書.
- 武居由之(1990):本邦物理探査・調査研究活動の動向. 地質ニュース, 429, p55
- 通商産業省(1987):大規模深部地熱発電所環境保全実証調査報告書.

KAWAMURA Masayori (1992): Trend of geophysical exploration use in geothermal energy development in Japan

<受付:1992年6月8日>