

# 地熱資源開発の現状と課題

## — 探査・評価の観点から —

長谷 紘 和<sup>1)</sup>

### はじめに

地球規模の環境問題を多くの人々がその規模で実体感をもってとらえるには、地球データがもっともっと一般に得易くなることが必要だが、「温暖化」については、都市で生じているヒートアイランドの問題としてすでにわれわれの肌でも感じとれる。

私は、1973年に発生した「石油危機」を契機に発足した、わが国の代替エネルギー開発プロジェクト「サンシャイン計画」の一環として、地熱資源探査に係わる研究開発プロジェクトに従事してきている。資源開発利用に関連して近い将来生じるであろう問題は地球環境問題に劣らぬ大きいものであるとの認識は今でも変わっていない。

有用地下資源をみつける仕事は人類の最も初歩的職業ではある。物質文明が進んだ、先進国といわれる国々の多くは、自国の手近な地下資源はとり尽くし、自国での探査対象は地下深部へと及んでいる。そして地下資源の探査・採取の主な場は手近な場所でそれをまだとり尽くしていない国々や、人里離れた遠隔の地、または地下深部で行われ次第に厳しい条件に至っている一方で、使用される資源量はますます増加している。

地下深部の資源を採すためには時間と資金と高い技術、それに継続的な努力が必要である。資源の存在状態は対象地域によって条件が異なるので正確な比較がしにくい。地表下1,000mから資源を採すのと2,000mから採すのでは資金的にも、技術的にも格段の相違がある。唯一の直接的探査手段である試錐掘削は、深部掘削では資金的にもぼう大になるため、先進国といえどもおそいそれと調査を推進できる状態にはないのである。地下深部ほど資源が急激に豊富になるのであれば別だが、深部ほどポテンシャルが高くなるのは地温や圧力くらいなものであろう。

わが国の地熱エネルギー開発利用のための研究開発には「石油危機」以後、予算規模の大きい、そして継続的な投資がなされており、サンシャイン計画に係る研究開

発は現在地質調査所の地下資源探査技術に関する最大の研究プロジェクトとなっている。同計画は1990年(平成2年)7月、全体計画の見直しが行われ中間報告としてのとりまとめがなされた。具体的計画内容については現在検討中であり、地熱エネルギーについては「地熱分科会」で検討が進められている。地熱分科会では地熱エネルギー技術開発全般にわたる今後の技術開発戦略を中心に検討が進められており、1992年春その結果のとりまとめがなされる予定である。検討結果は今後の地熱エネルギー技術開発の基本となるものである。本稿はこれと時期的に一部重複するが、ここでは地熱エネルギー開発利用に係わる環境問題の側面と地質調査所が分担担当している地熱資源探査・評価の立場を中心に私見的に述べる。

地熱資源開発の現状と動向については「日本地熱調査会」が把握しており本文でも多く引用させていただいた。

### 1. 地熱資源と環境問題

自然エネルギーかつ地下資源としての地熱エネルギーを開発利用する際に、自然環境との関わり合いはきわめて大きい。

開発利用について本格的な取り組みが開始された当初、自然環境への影響を懸念する声がかなり大きく、開発利用と自然環境保全を巡って活発な議論が展開された。議論の焦点は、一つには自然公園や地下水涵養域に当たる火山地域での地熱エネルギー開発に関連した環境議論である。二つには開発利用計画の性急さの指摘にあった。わが国エネルギー需要の相当量をまかなう開発を比較的短期間に行おうとする開発計画に対するものである。

地熱開発利用と自然環境保全との関わり合いは基本的には現在も変化していない。環境問題は地熱開発利用にとって大きな要素である。

1.1 “自然に優しくなければできない” 国内地熱開発  
自然景観の優れた火山地域での地熱発電所立地には環

1) 地質調査所 地殻熱部

境保全に十分な措置を講じ、地元の理解と協力を得つつ進めていくことが重要であるとして、通産省は1975年環境影響調査と環境審査制度を発足させている（昭和52年7月省議決定）。

これによれば電気事業者等は以下の発電所を設置しようとする場合、環境影響調査が必要であると定めている。

- ①出力15万kW以上の火力発電所、地熱発電所にあつては、出力1万kW以上のもの
- ②原子力発電所
- ③出力3万kW以上の水力発電所であつて、環境保全上特に必要とみとめられるもの
- ④その他環境保全上特に必要と認められる発電所

このため、「発電用地熱開発環境調査」が1977年度（昭和52年度）から実施され（資源エネルギー庁）、発電所の特性に応じ、大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下、悪臭その他環境に影響を及ぼす項目のそれぞれについて審査が行われている。

国内での地熱エネルギー開発は発電規模に較べて厳密な環境調査が実施されているといえる。調査項目も、温泉や自然噴気などの自然景観、河川水など陸水、地震、陸生生物などの項目が環境審査の対象に付け加えられる場合がある。

わが国が輸入に依存している発展途上国の地下資源の開発において、環境問題に対する当事国の配慮が、国内の地熱エネルギーの開発利用と同程度になされているとは考え難い。先進国では“自然に優しくなければ開発ができない”ことが、環境マインドを育むことにもつながっている。しかし地球の環境問題は資源の開発から最終的処理に至るまでのプロセスでとらえなければならない問題であろう。

## 1.2 地熱に特有な環境問題

国連が1970年（昭和45年）に開催した第1回シンポジウム（ピサ）では地熱エネルギー利用に関わる環境問題は取り上げられなかった。しかし、1975年（昭和50年）開催の第2回地熱シンポジウムでは独立した項目を設けてこの問題を取り上げている。国内でも「日本地熱調査会」、「新エネルギー財団」を中心に環境問題についての検討が行われている（地熱環境研究会、1978、興良、1982、1984 a、1984 b、1985、1986など）。

地熱エネルギー利用に際して生じる環境問題は

- ①坑井掘削及び施設建設段階で生じるもの
- ②利用に伴って生じるもの
- ③利用が継続することによって発生進行するもの
- ④長期的観点から観て影響が考えられるもの

に分けられる。

地熱に特有な環境影響項目として、地熱流体を地下か  
1992年1月号

ら採取し利用することによる、地下水系の挙動変化に関わるものがある。熱水が卓越するわが国の地熱流体は発電使用後地下還元される。この処理方式は国連の報告でも、貯留層保護及び自然環境保全の観点から優れた方式とみなされている。ただし、地下での影響を長期的かつ詳細に評価することは地球科学の現状からいってもまだまだ未解決の問題が残されている。還元熱水による地熱貯留層の冷却は企業としても大きな問題であるが、その他浅層地下水系への影響、地表変化、地震発生などとの関連については不明の点が多い。

ニュージーランドのワイラケイは熱水が卓越する地熱地域で、発電使用後の熱水は地下還元されず河川に放出する方式が取られているが、ここでは地盤沈下、噴気の消滅・生成などの景観変化や河川及びそこに生息する生態系への影響が明らかにされ、地熱開発に伴う環境問題を考える上で貴重な例となっている（Axtmann, 1975）。

地熱開発における地下への働きかけを通じて得られる地下応答についての事実認識は、地下環境を評価する上でも貴重である。この知識・経験は地球環境問題を考える上で活かされる。大気汚染については、主なものは発電所の冷却塔から排出される硫化水素が問題とされることがある。「地球温暖化」問題として大きく取り上げられている二酸化炭素による大気問題については、排出の問題が全く無いわけではないが、わが国の地熱発電所から排出される使用済み地熱蒸気中には石炭・石油等の化石燃料と比較して排出量は単位発電量当たりごく小さい。

## 2. 地球環境問題への取り組みとして

石油代替エネルギー開発は、「石油危機」以降先進国がこぞって取り組んできた研究開発課題で、クリーンなエネルギー開発が目標となっている。わが国ではサンシャイン計画として、その研究開発のための取り組みが開始された当初から、「海外諸国とも密接な協力を保ちながら官・学・産の総力を結集してナショナル・プロジェクトとして強力に推進する必要がある」ことが強調されている（坂倉・三島、1974）。

### 2.1 代替エネルギー技術開発

「石油危機」を契機に先進諸国は大きな意気込みをもって石油代替エネルギーの開発に取り組んだ。しかしその後の道は決して平坦ではなく、世界のエネルギー構造の中のゆらぎに大きく揺さぶられてきた。例えばOPEC諸国は代替エネルギー開発のペースに注目して、石油増産によって価格を低く抑え、開発ペースを抑制する等の動きもあった。このような動きの中で代替エネルギー開発の取り組みが尻切れトンボになっている国もある。わ

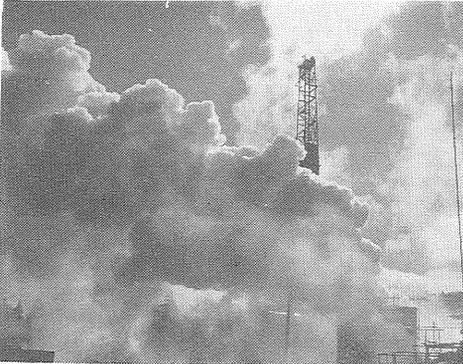


写真 1 仙岩地域 S N-7D の噴気 (石戸恒雄技官撮影, 1989年秋). サンシャイン計画で掘削された深部坑井 (深度 2,486m) で, 深度 2,325m 付近の貫入岩中の割れ目を中心に総流量最大 443.5t/h (蒸気量 146.7t/h, 熱水量 296.8t/h, 温度推定 300°C 以上) の多量の地熱流体が得られ, 深部地熱資源の観点から注目されている.

が国の場合, この努力は重点的継続的になされており, 同様に代替エネルギーの開発利用増大を目指す先進諸国からは高く評価されている. “のどもとすぎれば熱さを忘れる” という例えが通例だが, わが国は “なお熱さを忘れず” に対処している. 輸入石油依存度の高い, きわめて脆弱なエネルギー構造を持つわが国においては当然のことであろう. 脱石油への努力, 省エネルギー努力と合わせて, クリーンなエネルギーの開発努力を継続しているわが国は地球環境問題への対処模範国であるとみなされている.

自由経済社会の牽引車である米国はエネルギー危機に端を発し, カーター大統領時代「エネルギー独立」を提唱し, 地熱エネルギーの開発利用にも重点的研究投資を行った. 卓抜した地球観, 高い技術力, 優れた地球科学的知識の蓄積によって我々を先導してきたが, しかしここ数年間は代替エネルギー研究予算の落ちこみが激しい.

最近, 再び地熱エネルギーの利用拡大を訴える主張がなされている (Wright, 1991). 論調では石油輸入依存を強めつつある米国の立場に警告を發し, 未利用代替エネルギーとしての地熱エネルギーの量的価値と環境上の利点を強調し, 技術の向上により経済的にも他のエネルギー源とも競合し得る状態に近づいてきた現状から更なる開発投資の必要を訴えている. だが, エネルギー関係の法案や予算案 (1991年2月に出された National Energy Strategy: NES) にはそれがあまり反映されていないように見える. ちなみに, 地熱エネルギーについてのエネルギー省 (DOE) 関連予算は, 1990年1,810万ドル, 1991年2,730万ドル, そして1992年予算案では2,020万ドルとなっている (NEDO, 1991).

## 2.2 国際協力と技術移転

通産省の地球環境政策に位置づけられているものは7項目ほどあり, 「新エネルギー技術等の開発導入及び海外への普及の促進」がその中に含まれる (都筑, 1990).

エネルギーの開発利用と環境問題は表裏一体の問題であり, 政治・行政が大きく関与する, 典型的な「社会・政治科学 (Socio-Political Science)」である. 1992年6月, ブラジルで全世界の首脳が一堂に会する「地球サミット (環境と開発に関する国連会議)」が開催されるが, このサミットに向け, 「国際エネルギー機関 (IEA)」, 「気候変動についての政府間パネル (IPCC)」などが活発に取り組んでいる. IEA は経済協力開発機構 (OECD) 内に, 国際エネルギープログラムの実施機関として設立された機関であるが, 1991年11月京都において, 地球環境に対処する技術視点を中心に国際会議が開催された. 会議の主な目的は

- ①各エネルギー部門における技術及び研究開発の現状分析
- ②各国政府が実行可能な柔軟なエネルギー研究開発計画の選択
- ③国際レベルでの地球規模温室効果軽減諸技術の検討
- ④新エネルギー技術及び環境技術への長期国際協力と研究開発計画の増加に伴う協力, 調整, 情報交換
- ⑤エネルギー及び環境技術に対する各国民の支援増大の訴え
- ⑥IPCC や 1992 年開催の国連会議に向けて, 相互検討結果の提供

である.

この会議では, われわれが今後の地熱研究開発上重要と考えている, 火山性地熱資源における地熱貯留層への熱及び流体供給に関する機構の解明についての国際協同研究計画がアピールされる. 本計画は, わが国は NEDO 及び地質調査所, 相手国機関としてニュージーランド DSIR (機構改革によって近々名称が変わるかもしれない) からの協同提案となっている.

世界の地熱エネルギーの利用は着実に増加しており, 地熱発電以外にも中・低温熱水の産業用への利用や室内暖房など多岐にわたっている. 地熱発電主要国では地下深部の地熱について関心が高まっており, 今後わが国の地熱開発利用を進展させる観点からも, 深部地熱エネルギー利用は先導的に取り組むべき課題であろう.

「日本地熱調査会」の調べによると, 世界の地熱発電の設備容量は, 1973年約133万kW, 1980年約241万kW, 1986年約475万kW, 1989年 (平成元年) 末には約594万kWと増加している (第1表).

世界の地熱エネルギー開発においてわが国が果たして

第1表 1989年における各国の地熱発電設備容量 (1989年12月現在)

国名 地域・発電所	設備容量 (MW)	国別計 (MW)
米国, Geysers	2,084	2,836
Coso	265	
Salton Sea	186	
Heber	92	
East Mesa	89	
Dixie Valley	50	
Honey Lake	30	
他	40	
フィリピン, Tongonan	115.5	
Tiwi	330	
Mak-Ban	330	
Palimpinon	118.5	
メキシコ, Cerro Prieto	620	700
Los Azufres	80	
イタリア, Larderello	171	547
Castelnuovo	64	
Serrazzano	47	
Lustignano	28	
Lago	33	
Radicondoli	90	
Monte Amiata	42	
他	72	
ニュージーランド, Wairakei	157.2	283.2
Ohaaki	116	
Kawerau	10	
日本	214.6	214.6
インドネシア, Kamojang	140.25	142.25
Dieng	2	
エルサルバドル, Ahuachapan	95	95
ケニア, Olkaria	45	45
アイスランド, Namafjall	3.2	46.0
Krafla	30	
Svartsengi	12	
他	0.8	
ニカラグア, Momotombo	70	70
トルコ, Kizildere	20	20
中国, Yangbajang (羊八井) 他	19.98	19.98
台湾, Chingshui 他	3.3	3.3
ソ連, Pauzhetskya	11	11
フランス, Guadeloupe	4.2	4.2
アゾレス, Pico Vermelho	3	3
ギリシャ, Milos	2	2
計		5,936.53

(出典): 日本地熱調査会の調査による

いる役割も大きいものがある。寄与の多くは発電タービン等ハードが主だが、国際協力事業団 (JICA) による技術協力ベースで見れば、発展途上国への地熱調査・探査の実績も12ヶ国にのぼる。発展途上国・地熱国では地熱エネルギー利用の利点が相対的に大きく、国の使用エネルギー量の相当量を地熱に依存している国もある。しかし経済性を重視し、発電量増大を急ぐあまり急激な開発に伴う環境上の問題も生じてきている。

このような問題を軽減する上からも、発展途上国への技術移転は不可欠だが、技術移転とともに専門家の育成も重要で、九州大学に設置された地熱研修コースが果たした役割も大きい。このコースは1970年設置され現在に到っており、研修を受けた者はそれぞれの国で中堅技術者として活躍している。

### 3. 地熱開発と調査の現状

“資源小国日本に賦存する恵まれた地下資源”—地熱資源に対する期待をこめて啓上される言葉である。

通産省では地熱エネルギー開発利用促進のため、資源エネルギー庁による開発促進調査とともに、工業技術院による技術開発研究の二つの側面から取り組みが進められてきている。本節では地熱エネルギー開発促進のための調査と、地熱発電の現状について述べる。

#### 3.1 国による地熱調査

国による地熱エネルギー開発調査の全体体系は「日本地熱調査会」の資料によってわかりやすくまとめられている (第1図)。

地質調査所は、本格的な地熱調査のさきがけとなる「全国地熱基礎調査」を担当実施し、「地熱開発基礎調査」に関与した。また、新調査技術の適用調査、調査技術の開発を目的として、「全国地熱資源総合調査」を NEDO とともに1980年度 (昭和55年度) から実施している。この調査は

- ・第一次調査1980—1983年度 (昭和55—58年度) 空中概査手法及び重力調査による全国規模網羅的調査
- ・第二次調査1984—1986年度 (昭和59—61年度) 地上概査法による4タイプ地域の調査

・第三次調査1987—1992年度(昭和62年—平成4年度)広域熱水流動系調査とコンピュータ支援による総合解析手法開発からなっている。

また、資源エネルギー庁による「大規模深部地熱発電所環境保全実証調査」1978—1980年度(昭和53—60年度)(電源開発株式会社・NEDO 担当実施)では、地質調査所は全面的な協力を行った。これは九州中・北部「豊肥」地域で実施された広域・深部にわたる地熱総合調査で、地熱調査に有効と考えられる地表調査法を総合的にとりこみ、地下深部に至る地熱構造の把握とともに、地熱流体の採取・還元とその環境への影響を調査する目的で実施された。本調査では国の地熱調査として初めて深度3,000m級の試錐調査が行われた。

**3.2 地熱発電の現状**

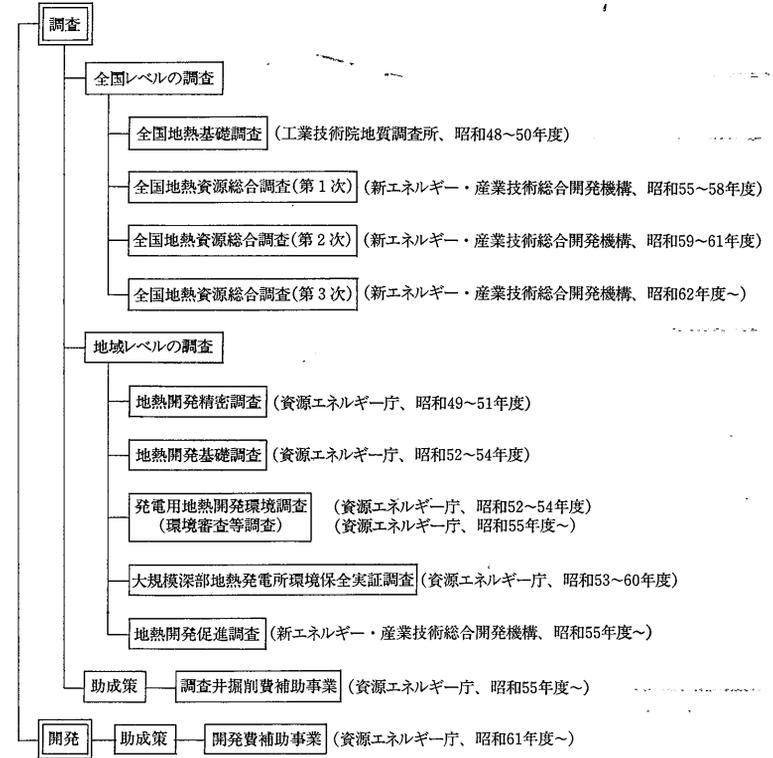
1966年(昭和41年)10月8日、わが国最初の地熱発電所、松川発電所が運転を開始してから四半世紀が経っているが、同発電所は地熱による電気を供給しつづけている。今日地熱発電の実勢は、全国12発電所、設備容量28万3,450kW(認可出力26万9,950kW)である。内訳は事業用が主で、6発電所、設備容量24万8,000kW、自家用6発電所設備容量3万5,450kWとなっている(第2図)。利用実績は着実に増加しているが、この間、低石油価格時における経済性の問題や不安定な制度面の立場など社会的要因が加わり、地熱開発に関わる人々の情熱によって支えられてきた面もある。

1990年(平成2年)6月22日に運転を開始した九州電力八丁原2号発電所は、わが国地熱発電所の単機容量としては最大、55,000kWの規模である。

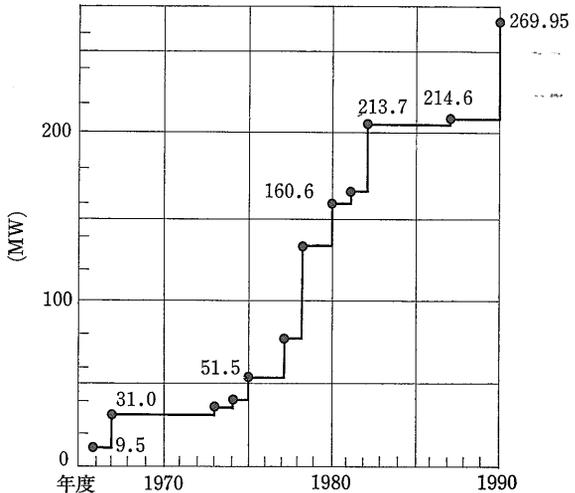
地熱開発のための調査は NEDO が発足してから加速的に行われ、今日、「地熱開発促進調査」実施地域は35地域に達している。その結果近い将来地熱発電までこぎつけられそうな地域も数地域出てきている。

**4. 地熱技術開発—資源探査・評価の観点から—**

サンシャイン計画は1974年(昭和49年)7月に発足した21世紀を見越した超長期計画であるが、1990年(平成2年)7月、新エネルギー技術開発を巡る情勢を踏まえて

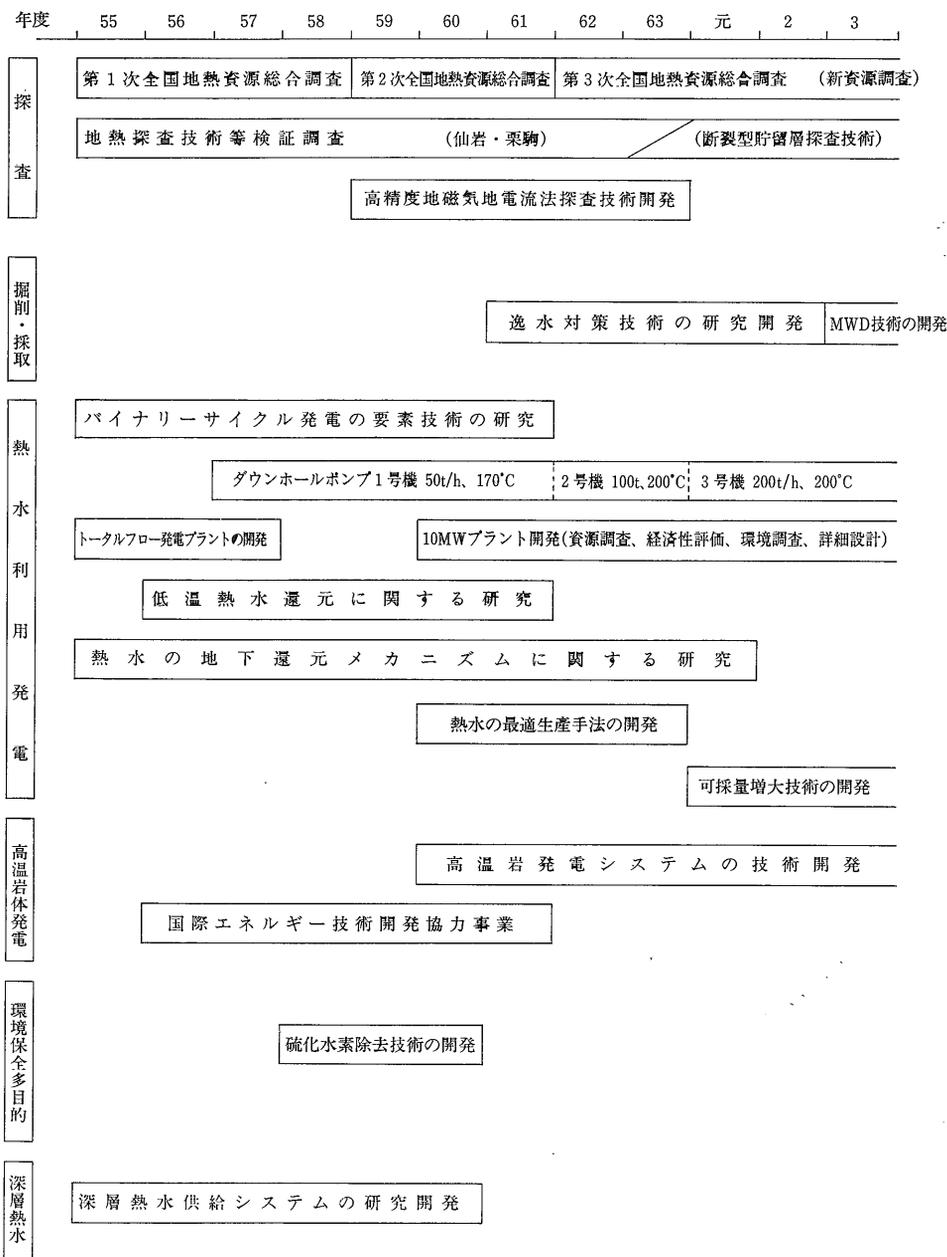


第1図 国による地熱エネルギー開発調査(日本地熱調査会:1990による)。



第2図 日本の地熱開発の推移(NEDO資料より)。

そのあり方が審議され、今後の進め方について中間報告がまとめられている(産業技術審議会新エネルギー技術開発部会1990)。報告書では、この10数年間の間に



第3図 地熱エネルギー技術開発体系線図 (サンシャイン計画推進本部資料による)。

- 1) 国民生活においてゆとりと豊かさの追求が進んでいること
- 2) 地球環境問題への取り組みが大きな課題となってきたこと
- 3) わが国の国際経済社会の中で果たすべき役割が増大していること

など基本的な社会変化の中で「地球環境時代の新エネルギー技術開発戦略」として計画の見直しがなされた。サンシャイン計画における地熱エネルギー技術開発体系の様子は図のとおりである (第3図)。

4.1 地熱資源量評価

1991年3月、地質調査所はわが国の地熱資源評価の結果を「日本の地熱資源評価に関する研究」として取りまとめた(玉生他, 1991)。この中で「全国地熱資源総合調査

(第1次)」によって得られた調査データと既存資料を用いた、「容積法」による全国規模の資源量算定結果が報告されている(宮崎他, 1991)。利用できる坑井データは数が少ないため、算定結果は従来どおり事前評価(アセスメント)に止まっている。ただしこれまでの取り組みとの大きな違いは、算定の基本となる重力データ、キュリー点深度解析として利用された空中磁気データ等、深度方向のデータが利用できるようになったことであろう。算定は全国を15のブロックに分けて行われ、重力基盤の上位に貯留する地熱資源量が算定された。その結果高温熱水対流系資源として全国で2,054万kW<sub>e</sub>X30年(電力量換算で発電期間30年として算定)が得られた。このうち熱水の温度領域が200℃以上のものが582万kW<sub>e</sub>X30年、150—200℃のものが1,472万kW<sub>e</sub>X30年、と言う結果となっている。

また、本報告では重力基盤内に存在する“深部地熱系資源”についても初めて試算を行っている。これは「地熱探査技術等検証調査調査」などの経験から断裂系に支配された“深部地熱系資源”が基盤内にも発達する事実を採り入れ、試算的ではあるが評価の対象にしたものである。

NEDOは全国204地域の地熱資源賦存地域を抽出し、これらの地域のうち自然公園に含まれる地域の面積を算定した。対象地域について、一種のスコア法によって地熱ポテンシャルの高い順にA, B, Cに3区分し、それぞれの地域で公園内に含まれる地域面積を算定したものである。これによればAに区分される地域の60.6%が公園内に含まれるという結果となっている(NEDO, 1989)。

#### 4.2 地熱探査技術

地質調査所はこれまで NEDO とともに、東北脊梁部の2地域「仙岩」及び「栗駒」地域において、「地熱探査技術等検証調査調査」1980—1988年度(昭和55—63年度)を実施した。ここでは、資源賦存タイプが典型的に異なる地熱地域として選定された両地域で、地表調査結果の解析による地下構造解析と試錐による検証により、地熱構造モデルの作成と探査精度の向上を目指した手法確立を目標として調査を行ったものである。この調査では前述のように基盤岩中の断裂から優勢な地熱流体の流出を確認し、“深部地熱系資源”への取り組みの重要さが示された。現在「地熱探査技術等検証調査」では引き続き「断裂型貯留層」の探査技術開発が進められている。

“地熱貯留層”は石油のレザバーや火山熱水性金属鉱床と較べていづれとも異なった特徴がある。一般には地熱資源を構成する要素として、貯留構造、熱源・温度、水があり、この3要素が探査の主眼となっている。地熱探査における断裂の重要性が明らかになってきたことか

ら、NEDOでは「断裂型貯留層探査法開発」として、①電磁波利用探査、②弾性波利用探査、③微小地震利用探査が取り上げられ、開発が進められている。弾性波利用探査では、石油探鉱技術が導入され、地熱フィールドへの適用化のための技術開発が現在の主課題である。それらには、高精度反射法、VSP、弾性波トモグラフィーがある。NEDOではこれまでに静岡県丹那盆地で、盆地を縦断する丹那断層の垂直的把握を通じてVSP、弾性波トモグラフィーなどの事前適用実験を実施し、1991年7月から地熱フィールドとして九州の「豊肥」地域湯坪地区で本格的実験のための坑井掘削にはいった。坑井内では高温が予想されることから、NEDOは高温用測定機器開発も同時に進めている。

地熱地域は一般に火山地域に特有の険しい地形のため、適用機器は小型・軽量化が求められる。険しい地形と柔らかい表層堆積物からなる現場で信頼性の高いデータを取得することは、技術そのものとはいえないかもしれないが重要な要素である。技術的には取得データの解析法の高度化が重要であろう。火山・地熱地域での高精度の地下構造解析法にはまだ多くの技術開発要素が残されている。

サンシャイン計画では他に「掘削・採取技術」、「熱水利用発電技術」、「高温岩体発電技術」の技術開発が進められており、探査技術開発とも関連の深い項目もあるが、これらについては省略させていただく。

## 5. 今後の課題

エネルギー需要は今後とも増加が予想されている。しかしそれに応えるために使用されるであろう石油・石炭などの化石燃料資源や原子力、水力、地熱、新エネルギーなどのエネルギー源は、皆それぞれに「源」として問題点をかかえている。

地熱については、調査・開発時のリスク、経済性が問題として上げられ、さらに自然環境との関係から今後の開発に制約があると分析されている(総合エネルギー調査会, 1990)。

この制約を克服するための課題のうち、とくに探査・評価に係わるものについて考えてみたい。

### 5.1 調査リスクと社会的課題

1990年6月に outcomes 「総合エネルギー調査会」によるわが国の長期エネルギー需給見通しによれば、西暦2000年の時点で地熱エネルギーに対し、100万kW(石油換算180万kl)のエネルギー生産が期待されている。これは相当に高い目標である。経済性を重視しつつ目標を達成するためには、自然公園内での新たな開発を考えざる

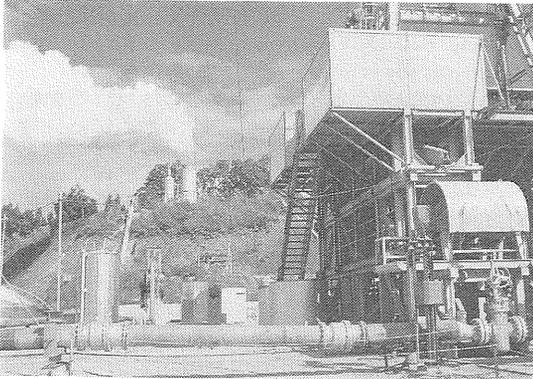


写真 2 地熱調査が進む福島県奥会津地域(石戸恒雄技官撮影, 1990年10月)。猪苗代湖の西約 30km の地に位置する本地域は1974年に本格的調査開始以来鋭意調査が継続され, 近い将来新たな地熱発電所の建設が期待されている。

を得ないのではないか。

調査・開発時のリスクは, 資源存在の確度がまだ低いことによる技術的要因が主であることは事実だが, 別の側面も見逃ごせない。金属資源など地下資源開発分野では, 探査リスクは対象を探しあてたときの高い報酬によって相殺され, 後者は開発意欲への原動力になっているという(ハイ・リスク/ハイ・リターン)。石油代替エネルギーとして一定の役割を負った地熱開発では探査リスクが高く, 開発に向けて調査段階での投資額が大きく, かつ開発までのリードタイムが長いことが経済性を圧迫しているといわれる。開発までのリードタイムの長さの原因には, 品位(温度, 流体組成), 産出規模, 存在する地下位置など, 探査の不確かさによる技術的要素もあるが, それらの評価をめぐる資源開発側と発電側とのコンセンサスが十分でないことや立地に関わる自然公園や地元との調整などが加わり, 発電にかかるまでの時間が長引いているのが実態である。これらについては施策面での対応が鋭意図られつつある。そしてこれらは技術課題とは区別されるべきものであろう。

自然環境に対する価値観は, 都会と地方では異なることを私自身も地域調査に従事して実感したことがある。都会では日頃の都市生活の疲れを癒すため, 人々は自然公園保全への希望が強いが, 自然に恵まれた地域の人々はむしろ地域振興につながる形での自然公園の存在を求めている。

「石油危機」以降, 結果的には低価格エネルギーの輸入が可能な間はそれを甘受し, 地熱発電を含め石油代替エネルギーは経済性に劣るとして問題視されてきた。今後とも輸入エネルギーに頼れそうな間は自国の自然環境保全の道を最優先とするのか, あるいは立地や国際間の

問題を踏まえて地熱エネルギーの利用増加への道を選択するのか, 国際世論に意思を示すべき時期にきている。選択議論には石油・天然ガスなど化石燃料資源の確認埋蔵量減少の事実を踏まえ, それを補うエネルギー資源のあり方と地球環境を念頭に入れたエネルギー構造のあり方議論とを是非とも期待したい。

## 5.2 探査技術の課題

今後わが国の地熱資源探査の対象が深部, あるいは火山性のより本源に近い地熱存在場所へと進むことに異論はないであろう。このことを科学・技術課題としてとらえるならば, 一つには“深部地熱系資源”をどう評価し, それを調べる調査手法をいかに開発していくか, 二つには火山性で高温の流体の制御にかかわる問題に技術的にどう対処し克服していくかが重要であろう。このため具体的には以下の課題が上げられる。

- 1) 火山性地熱資源における現在利用中の地熱貯留層への熱及び流体供給に関する機構の解明に関する基礎調査の実施

現在開発が行われている地熱高ポテンシャル地域の地下深部には, これまでの調査では基盤中にも断裂が発達し, より高温の地熱流体が存在することが実証されている。しかしそれを資源としてとらえ, 評価するためには, 地熱流体のひろがりや性状, 断裂系発達の程度などについてモデル化し, 探査する手法の開発へつなげて行く必要がある。しかし地下 3,000m 以深の地熱構造についての知識・経験は現在あまりにも乏しすぎる。とくに下方からの熱・流体供給を技術課題として把握するという観点では経験が皆無なため, “深部地熱系資源”探査手法の提案ができかねている。この発展を促す観点から, 深部基礎調査や火山性地熱流体の実態把握への取り組みに着手することが欠かせない要件となっている。

- 2) “地熱構造解釈”の質的変革

“深部地熱系資源”探査は, 腕つき警部のように粘り強い調査と, 名探偵のように注意深い推察とがともに不可欠で, 地表調査の意義は決しておろそかにされてはならない。またそれを地下深部地熱構造解釈につなげていくための鍵として, 既存坑井データが十分に解析されているであろうか。

例えば, 地下浅部では火山性地層のために坑井記録でも逸水や岩芯の欠如部が多く, 地域的な差異は検出できないようにも見える。地下空隙が主として断裂に支配されるようになる深度で比較した場合, 応力場と空隙との関係, それと断裂密度との関係, あるいは地下温度分布との関係, などを有意な特徴として見いだすことができれば“深部地熱系資源”探査の進展に結び付けることができる。この課題の主題ともなる, 地表断裂情報の地下

構造解釈へのルール発見の重要性については林教授も既に指摘しておられるところである(林, 1988)。また、各種精密物理探査から得られる高精度データや新たな技術開発の結果得られる深部高精度探査データと既存坑井データとの組み合わせによる地熱構造解釈の進展が今後の課題である。

地熱適用技術として現在開発中の地表探査技術は石油探査技術として発展した技術が中心であるが、今後それらが地熱調査・探査の中で生き残っていくための大きな課題はコストである。地下深部探査をハード的な技術だけで補おうとする場合、非常に高価なものにつくことは想像に難くない。必要で不可欠な深部探査技術を的確に選択し、調査・探査活動をリードできる“深部地熱系資源”解釈のできる専門家の存在は、この問題解決への最良の決め手となる。したがってそのような人材の養成は重要課題である。

## おわりに

地球が人間活動によって汚染され、その影響に脅かされようとしている。これは長い地球の時間尺度の中で、地球の営力によって濃集・蓄積された物質をきわめて短時間に拡散しつつある行為に他ならない。

しかしこの行為があつてこそ、また人類の発展があつたのであって、次世代或いは次々世代のエネルギー源の見通しがつくまでは、石油の消費をできるだけ抑える省エネルギー努力とともに、石油代替エネルギー開発への努力はきわめて重要な課題であると信じる。地下深部の調査は現在技術では幾何級数的にコストがかかるから、深部の有用物質が幾何級数的に価値を増加するのだから経済的な観点からは厳しいものがある。しかし反面、エネルギー濃集部として“深部地熱系資源”の存在が確認されてきており、地熱開発利用という観点からも地下深部への技術開発努力は続けて行かねばなるまい。

地下深部の探査努力は地球を「広く」そして「深く」理解するための努力と言い換えることができる。そこには地球相手の難しさもありまた魅力もある。そのような地球への取り組みを通して地球はまた、地球への本当の優しさが何であるかを教えてくれるのである。

## 参考文献

- Axtmann, R. C. (1975): Environmental impact of a geothermal power plant, *Science* **187**, 795-803.
- 地熱環境研究委員会 (1978): 地熱開発における環境への影響要素. *地熱*, **15**, 27-32.
- 福永健文 (1991): 国内支部及び海外駐在員だより. NEDOニュース, **11**, no. 119, 33-44.
- 林 正雄 (1988): 地熱地質学の将来. *地熱*, **24**, 52-53.
- Houghton, R. A. and Woodwell, G. M. (1989): Global climatic change. *Scientific American* **260** **4**, 18-26.
- 伊賀秀雄・馬場健三 (1981): 1980年度の地熱開発の動向, *地熱*, **18**. 118-121.
- 宮崎芳徳・他5 (1991): 全国規模地熱資源評価の研究. 地質調査所報告, **275**, 17-43.
- 日本地熱調査会 (1987): わが国の地熱発電の動向. 1987年版. 36p.
- 日本地熱調査会 (1988): わが国の地熱開発・現状と展望. *地熱* **100号**記念特集. *地熱*, **24**, 216p.
- 日本地熱調査会 (1990): わが国の地熱発電の動向. 1990年版. 72p.
- 坂倉省吾・三島 進 (1974): サンシャイン計画における地熱エネルギー技術開発. *地熱*, **11**, no. 3, 9-17.
- 産業技術審議会新エネルギー技術開発部会 (1990): サンシャイン計画の今後のあり方について, 中間報告. 71p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1989): 地熱資源量の評価に関する調査報告書. 52p.
- 総合エネルギー調査会 (1990): 長期エネルギー需給見通し.
- 玉生志郎編集 (1991): 日本の地熱資源評価に関する研究. 地質調査所報告, **275**, 352p.
- 都筑秀明 (1990): エネルギー対策と環境問題. *地熱エネルギー*, **15**, 4-20.
- Wilson, B. G., Goddard C. B. and McClain, D. W. (1990): Global warming and geothermal energy. *Geothermal Resources Council Bull.*, 15-18.
- Wright, P. M. (1991): Advocacy for geothermal energy—a critical need. *Geothermal Resources Council Bull.* **2-7**.
- 與良三男 (1982): 地熱開発の環境問題シリーズⅦ地熱蒸気, その1 蒸気放出の影響と規制. *地熱エネルギー*, **7**, 128-133.
- 與良三男 (1984 a): 同上(続), *地熱エネルギー*, **9**, 578-584.
- 與良三男 (1984 b): その3 硫化水素の減衰. *地熱エネルギー*, **9**, 785-792.
- 與良三男 (1985): その4 硫化水素の除去. *地熱エネルギー*, **10**, 212-224.
- 與良三男 (1986): その5 硫黄のサイクル. *地熱エネルギー*, **11**, 183-187.

---

HASE Hirokazu (1992): Geothermal energy development —Some views from geothermal resources—.

<受付: 1991年8月16日>