

# 日本の地熱資源評価

角 清 愛(地 殻 熱 部)

## 1. はじめに

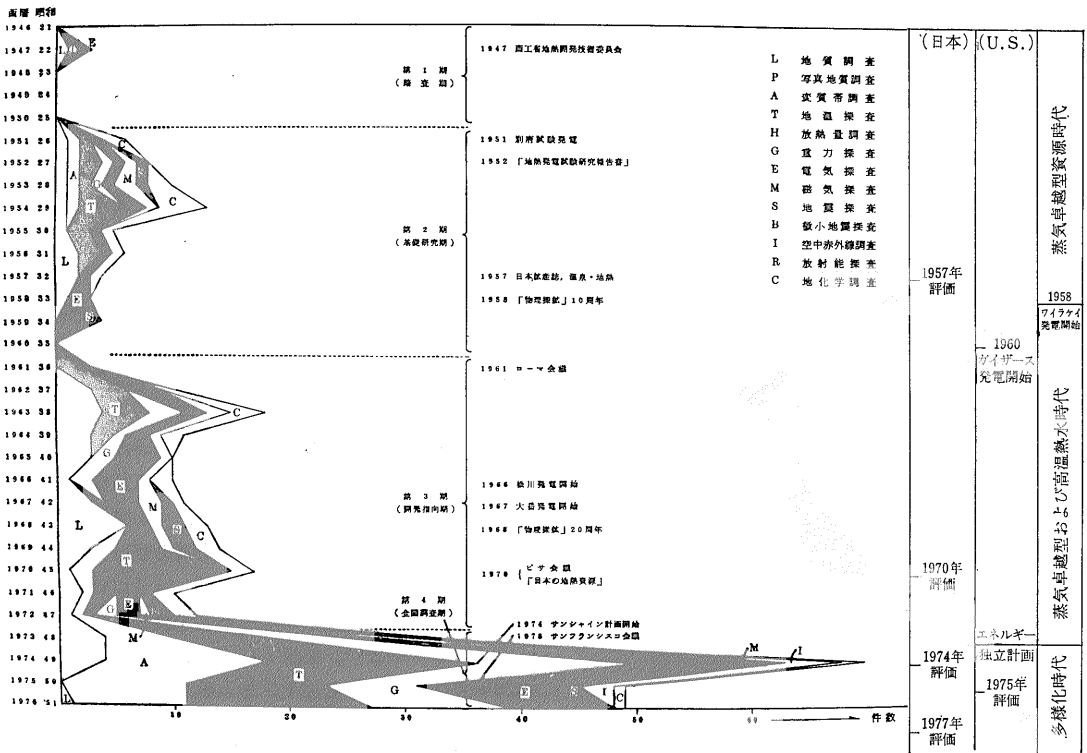
地熱がエネルギー資源として始めて活用されたのは1904年のイタリア ラルデレロにおける0.5kWの地熱発電にさかのぼる。つまり地熱には3/4世紀にわたる長い歴史があることになるが、地熱資源評価のそれとなるとこれはずっと短いもので1/10世紀程度のものにすぎない。このことは地熱がエネルギー資源として真に認識されたのが非常に新しいことを意味する。このため地熱資源の評価は他の地下資源に比較してまだ初期の段階にある。このような初期段階では地球科学の貢献が大きく要請される。その理由は温度・圧力・質量という物理量で表わされる地熱と地質情報との相関関係を明

らかにすれば、後者が他種資源に関連して大量に集積されているので、それを活用して比較的能率よく資源量の概略値が求められるからである。この両者の相関関係を求めるために各国の地質調査機関は努力を続けている。以下本文で、わが国の評価の現状を米国のそれと比較しながら概説してみよう。

## 2. 日本の地熱資源評価の経緯

日本の地熱資源評価作業は、これまで4回行われている。それは地質調査所による1957年評価、日本地熱調査会による1970年評価、産業技術審議会地熱分科会による1974年評価、および地質調査所による1977年評価であ

第1表 日本の地熱資源の探査・開発・評価の歴史





第1図 地熱資源評価に関する日米地質調査所パネルディスカッション参加者（1975年10月27日東京）  
 後列左から朝倉栄子 岸 克司 三村弘二 武居由之 茂野 博 川村政和 高島 勲 坂倉省吾（サンシャイン計画推進本部地熱担当研究開発官） 江崎弘造（サンシャイン計画推進本部総括研究開発官） 馬場健三 湯原浩三（九州大学教授） 関岡 満（防衛大学校教授） 小野晃司 藤井紀之 金原啓司 山田菅三 工藤ミチ子 前列左から角 清愛 陶山淳治（地質調査所地熱研究担当部長） 佐藤光之助（前地質調査所長） 小林 勇（地質調査所長） RICHARD S. FISKE（米国地質調査所地熱研究担当部長） PATRICK L. J. MUFFLER（米国地質調査所地熱研究調整官） ROBERT L. SMITH（米国地質調査所前野外地球化学岩石学課長） 荒牧重雄（東大教授）の各氏（職名はいずれも当時）

る。これらは最初のもとの最後のものとは20年のへだたりがあるが その間に地熱資源の概念が次第に発展拡大して来ているので 評価手法のみならず評価対象にも大きいちがいをみせている。

地熱資源の概念の変遷という立場からみると 地熱の歴史は 蒸気卓越型資源時代 蒸気卓越型および高温熱水型資源時代および多様化時代の3つの時代に分けることができる。第1の時代から第2の時代への移行は1958年のニュージーランド ワイラケイにおける熱水発電の成功が原因であり 第3の時代への移行は1973年のオイルショック による高温岩体 深層熱水等低品位資源の包含によるものである。第1表は日本における地

熱探査の時代的変遷を示したものであるが その基礎研究期から開発指向期に移る1960年は 明らかに1958年のワイラケイ発電所の成功によるものであり 次の全国調査期への移行は1973年のオイルショックに原因がある。このような時代的すう勢の中で行われた上述の4回の資源評価は それぞれの時代的特色を持っている。

1957年評価は蒸気卓越型資源時代のもので蒸気資源だけが対象で 内容的には1951年の工業技術庁の別府における試験発電結果と地質調査所の全国踏査結果とを組合せて行われている。1970年評価になると当然高温熱水資源も評価の対象となる。そしてすでに1966年には松川 1967年には大岳と相次いで日本最初の商業的地熱発電所が開業しており これらの試験結果が大幅に取入れられている。1974年評価は多様化時代に入り 中温熱水 高温岩体およびマグマを資源として取りこんでいる。この評価は工業技術院の新エネルギー技術研究開発計画いわゆるサンシャイン計画の発足にあたって新技術開発の目標を設定するために行われたものである。1977年評価はAおよびBの2つがある。1977年評価Aは全国調査期の初期の1973—1975年の3年間に地質調査所が行った全国地熱基礎調査の結果をとりまとめたもので 内容的には1970年評価の手法をとり 蒸気卓越型および高温熱水資源を評価の対象としている。全国地熱基礎調査の最終年の1975年に後で述べる米国地質調査所の1975年評価が発表された。この年の10—11月には東京において両国の地質調査所合同の地熱資源評価に関するパネルディスカッションが開催され(第1図・第2図) 米国の1975年評価および作業途上にあった日本の1977年評価Aが討論された。この討論会において 米国が技術的に困難性の多い包蔵水量法に積極的に挑戦していることが認識され 日本の関係者への刺戟となった。このよう



第2図 地熱資源評価に関する日米地質調査所パネルディスカッション記事

第 2 表 日米両国の地熱資源評価

|  | 温度<br>°C                                    | 圧力<br>kb   | 資源ベース<br>Resource base |                      |                      |             |                      |                            |                      |                       |                      |           |                              |           |                                |
|--|---|--|------------------------|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------|------------------------------|-----------|--------------------------------|
|  |   |  | 潜在 Undiscovered        |                      |                      |             | 既知 Identified        |                            |                      |                       |                      |           |                              |           |                                |
|  |   |  | 日本                     |                      | U. S.                |             | 日本                   |                            | U. S.                |                       | 日本                   |           | U. S.                        |           |                                |
|  |   |  | 10 <sup>18</sup> cal   | 10 <sup>18</sup> cal | 10 <sup>18</sup> cal | MW・100y     | 10 <sup>18</sup> cal | MW・30y                     | 10 <sup>18</sup> cal | MW                    | 10 <sup>18</sup> cal | MW・30y    |                              |           |                                |
| 新期マグマ貫入に關係 (火山性)<br>Related to young igneous intrusion       | マグマ Magma (MG)                              | 650-1,200  | 0.2-1                  |                      |                      | 6,150 ('70) | 20,000 (Sub. '74)    | 100,000                    |                      |                       |                      |           | 13,000                       |           |                                |
|  | 高温岩体<br>Hot dry rock (HDR)                  | 300-650  | 0.1-1                  |                      |                      |             | 100,000 (Sub. '74)   |                            |                      |                       |                      |           | 12,000                       |           |                                |
|  | 熱水循環系<br>Hydrothermal convection system     | 蒸気卓越型<br>Vapor-dominated (VD)                    | >240                   | 0.05-0.2             |                      |             |                      | 150,000 Rec. + (Para. '70) | 50                   | 76,000 (Rec. + Para.) |                      |           | 4,000 ('57)<br>7,300 ('77)   | 26        | 11,700 (Rec.)                  |
|  |   | 高温熱水型<br>High temperature hot water (HW)         | >150                   | 0.05-0.4             |                      |             |                      | 100,000 (Sub. '74)         | 1,600                | 51,000 (Sub.)         |                      |           | 26,580 ('77)<br>19,380 ('77) | 370       | 11,700 (Para.)<br>3,300 (Sub.) |
|  |   | 中温熱水型<br>Intermediate temperature hot water (IW) | 90-150                 | 0.01-0.1             |                      |             |                      | 25,000 -50,000 (Para. '74) | 1,400                |                       |                      |           |                              | 345       |                                |
| 低温熱水型<br>Low temperature hot water (LW)                      | 50-90                                       | 0.001 -0.005                                     |                        |                      |                      |             |                      |                            |                      |                       |                      |           |                              |           |                                |
| 新期マグマ貫入に無關係 (非火山性)<br>Not related to young igneous intrusion | 広域熱伝導系<br>Regional conductive (RC)          | 15-450   | 0.001 -2.2             |                      |                      |             |                      |                            |                      |                       |                      |           |                              |           |                                |
|  | 深層熱水<br>Hot water in deep sedimentary basin | 静水圧型<br>Hydrostatic pressured (HP)               | 50-300                 | 0.05 -0.5            |                      | 8,000,000   |                      |                            | 8,000,000            |                       |                      | 研究中       |                              | 8,000,000 |                                |
|  |   | 岩圧水型 (GP)<br>Geo pressured                       | >200                   | 0.9-2.2              |                      |             |                      |                            |                      | >250,000 (Para.)      |                      | ('79)     |                              |           | 115,000 (Para.)                |
|  | 深部天水循環系<br>Deep meteoric circulation (MC)   | 50-250   | 0.001 -0.4             |                      |                      |             |                      |                            |                      |                       |                      |           |                              |           |                                |
| 計  |   |  |                        |                      |                      | 420,000     | 8,103,050            | >377,000                   |                      |                       | 23,000               | 8,025,741 | 131,700                      |           |                                |

Rec.: 回収可能 (Recoverable), Para.: 准限界的 (Paramarginal), Sub.: 亜限界的 (Submarginal)

な状況下で準備段階にあった通産省の大規模深部地熱発電所環境保全実証調査(1978年発足)の中の資源評価作業は自然に包蔵水量指向のものとなった。こうして出来上ったのが1977年評価Bである。

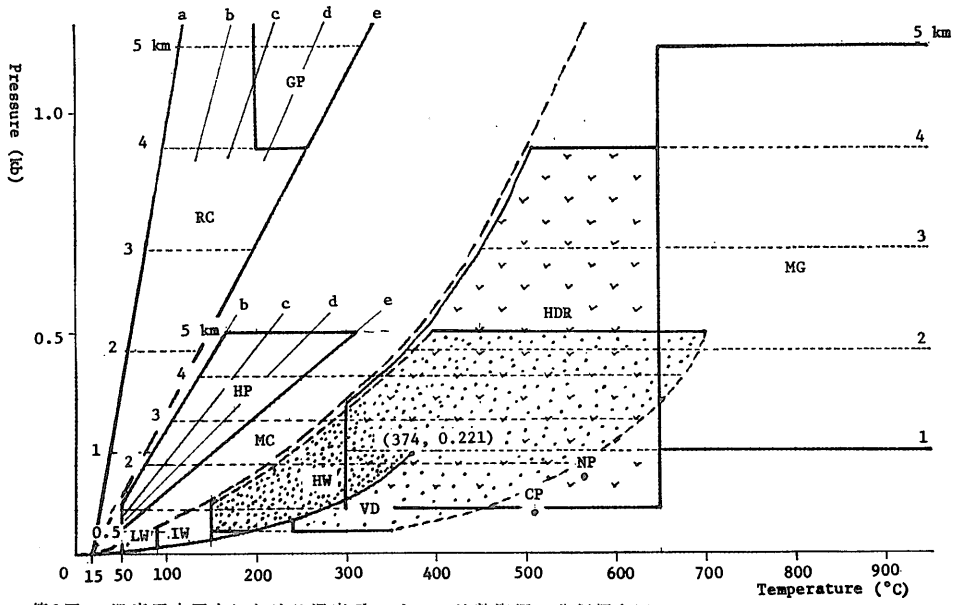
現在評価作業が進行中のものとしてはサンシャイン計画の中で行われている非火山性深層熱水評価がある。火山性中低温熱水 広域熱伝導系および非火山性深部天水循環系資源の評価についてはまだ全く手がつけられていない。

### 3. 地熱資源の分類

前述のように地熱資源は当初はそのままタービンに送りこめばよい良質の天然蒸気だけを対象としていたのが次第に低品位のものまで包含するようになって来た。

低品位とは 低温低圧の事であるが 問題を複雑にしているのは非流体すなわち固体の熱ポテンシャルまで評価の対象とされるようになって来たことである。かくして最近では地熱資源評価とは上部地殻のあらゆる形態の熱ポテンシャルを評価することになって来ている。

MUFFLER(1975)は地熱資源を構造地質学および水理学的立場から分類している。これは まず新期マグマの貫入が熱源として関係しているかないかで2大別する。これは従来日本で火山性と非火山性とに2大別されたやり方にほぼ一致する。次にそれぞれについて水理学的条件にしたがって 伝導卓越型 対流卓越型 両者の中間という風に分類して行く。ただし火山性にはマグマそのものも含む。今回は基本的にはこの分類にしたがい これの細分に他の基準を加えることとした。それ



第3図 温度圧力図上における深度5kmまでの地熱資源の分類概念図  
 (a b c d および e は 1km あたりの地温上昇率がそれぞれ 20 30 40 50 および 60°C  
 資源を表わす略号は第2表と同じ CP: 在来型火力発電所 MP: 新鋭火力発電所)

は熱水循環系のうち熱水型について これに WILLIAMS (1975) の使用している高 中および低温の温度区分を加えた。これは利用形態の差に相当すると考えてよくそれぞれフラッシュ蒸気発電 パイナリー発電および直

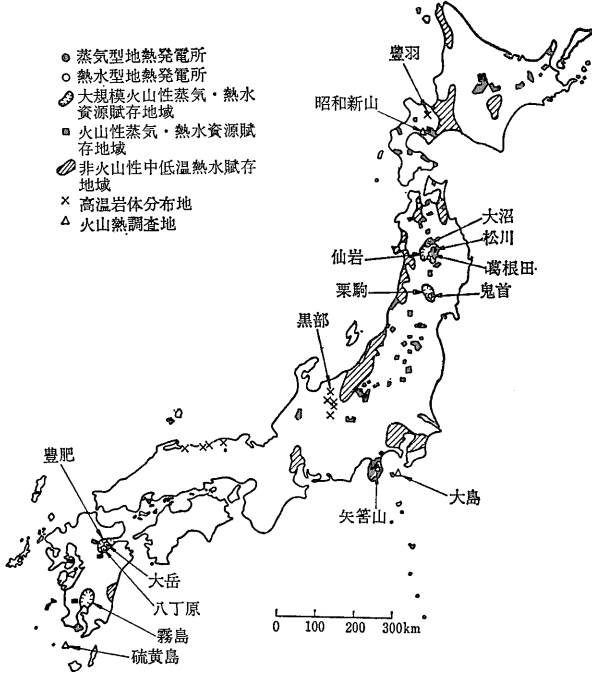
接利用に相当する。以上の分類を第2表の左側に示す。これらの資源が温度圧力的にみてどれ位のものかを第2表および第3図に示す。この分類は上述のように地質学的分類に基づくものであるから 熱水型の温度による3区分以外は温度圧力図上で明確に指示できるものではない。大よその区域を示すに過ぎない。

そしてさらに純技術的な確点から資源ベースおよび狭義の資源の2つの概念がある。資源ベースは地殻中に存在するあらゆる熱であり そのうちの探掘深度 深部の温度・比熱・孔隙率・流体の相 利用技術などから利用可能なものを狭義の資源 (Geothermal reserves) と呼んでいる (MUFFLER, 1973)。そして 狭義の資源が探査の程度によって潜在 (Undiscovered) および既知 (Identified) に分けられるのである。

一方 資源とは生活や生産へ利用できる天然物をいうのであるから必然的に経済性がからんで来る。米国地質調査所では資源の経済性分類の基準が以前から作られており WILLIAMS (1975) はこれを地熱資源に適用して

- (1) 亜限界的 (Submarginal),
- (2) 准限界的 (Paramarginal), および
- (3) 回収可能 (Recoverabl)

に分けている。(1)は 競合エネルギーの現在の値段の



第4図 日本の地熱資源分布図(角 1978a)

2倍以上でのみ採取出来るもの (2)は 1~2倍で採取できるものそして(3)は 競合できるものとなっている。

以上のように 地熱資源は種類 経済性および技術面によって分類されるので 本格的には資源の種類毎に経済性と技術性を縦軸にしてマトリックスを作らねばならない。しかし本文では簡略化して種別と技術性とでマトリックスを作り 経済性は注記とした(第2表)。

このような各種の地熱資源の代表的なものの日本における分布図を第4図に示しておく。

#### 4. 日本の地熱資源評価

日本の地熱資源評価は前述のように 1957年 1970年 1974年および1977年の4回の評価があるが 全国を包含したものは 1970年および1974年評価であるのでそれを以下に概説してみる。

1970年評価はマグマ溜りの残存熱量法 自然放熱量法 地熱地域面積法 包蔵水量法及び循環水量法によって行われている。マグマ溜りの残存熱量法では日本の第四紀火山 200 が過去10万年の間に平均的に誕生したものととして 500年毎に一つずつマグマ溜りが生成したものととする。マグマ溜りは半径 5km 厚さ 5km の円筒形で深さ 10km のところにあり 生成当時は 1200°C 7万年後に 900°C となって固結するものとする。この前提に立って求めた現在の残存熱量  $6.15 \times 10^{21}$  cal を 5000年間に12%の熱効率で発電に利用すると 2000万kWとなる。

自然放熱量法は 温泉・噴気などの形で自然に発散している熱量は日本全体で  $16 \times 10^{10}$  cal/min と推定されるので これに既開発地での開発前放熱量と開発熱量との比(ワイラケイ アイランドで 4~5 ラルデレロで10 松川で30 ガイザースで170) をかける。上記熱量は 400万kW に相当するのでこれを数十倍すると1億kW となる。

地熱地域面積法は既開発の松川と大岳における単位面積当たりの発電量を求め これと開発可能面積との積によって総発電可能量を求めようとするものである。松川では顕著な変質帯  $2.1\text{km}^2$  を開発可能面積とし 現在の  $0.1\text{km}^2$  当り 5700kW の係数をかけて12万kW 発電を見込む。大岳では電気探査と地形から  $1.3\text{km}^2$  を開発可能面積とする。大岳の生産井間隔は 平均150m であるから  $1.3\text{km}^2$  に65本の掘削ができる。生産井1本の平均出力は3000kWであるから  $3000\text{kW} \times 65 = 18\text{万kW}$  の出力が見込まれ これは  $0.1\text{km}^2$  当り 1万3800kW となる。

包蔵水量法は熱量とは 独立に熱の運搬媒体である地

下の水の包蔵量から逆に地熱を評価するものである。

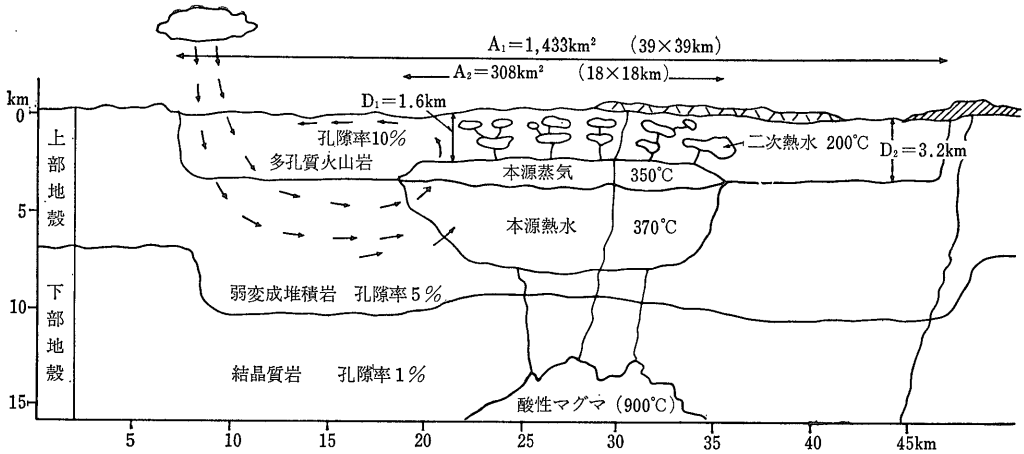
日本の地熱地帯の総面積を 2万6000 $\text{km}^2$  と見積り 深さ  $1.5\text{km}^2$  即ち 3万9000 $\text{km}^3$  の貯溜層が10%の有効孔隙率をもつものとして 包蔵水量は  $3.8 \times 10^{12}$  t となる。

1万kWの発電には 100t/時 ( $8.8 \times 10^6$  t/年) の蒸気が必要なので 上記の包蔵水を 1000年で消費するとすれば  $(3.8 \times 10^{12}) \div (8.8 \times 10^6 \times 10^3) \doteq 4000$  即ち 4000万kW の発電容量が見込まれることとなる。

循環水量法は地表から浸透する水量を採取しようという考え方である。世界の地熱地帯の湧出水量は 全降雨量の10~33%であるという事実から 上記2万6000 $\text{km}^2$  の年間降雨量を1600mmとして その10%を取得可能とすると それは  $4 \times 10^9$  t/年となり これが総て蒸気であり 100t/時で1万kW 発電するとして 発電可能量は 4000万kW となる。循環水量法による取得可能量  $4 \times 10^9$  t/年は包蔵水量法の  $3.8 \times 10^{12}$  t の約1000分の1に相当する。このことは循環水量法による毎年の取得量  $4 \times 10^9$  t という値は 浸透してから熱交換して湧出するまでの時間が1000年であってよいことになる。

1974年評価は天然蒸気及び火山性高温熱水の評価を主とする1970年評価(5000万~1億kW)に 技術開発によって新たに利用可能になるとみられる中低温熱水 超深度熱流体 高温岩体及び火山熱を評価・加算したものである。中低温熱水は 1万kW発電に必要な蒸気100t/時の3倍の産出があるものとし 1gの水から40calを抽出し 10%の効率で発電するとして 天然蒸気発電の約 $\frac{1}{8}$ の発電を見込む。現実には天然蒸気を伴わない熱水性地熱地域があるから それが前者の3倍はあるとして上記 $\frac{1}{8}$ の数字は $\frac{1}{8} \times (3+1) = \frac{1}{2}$  となる。超深度地熱流体は現在の開発対象  $1.5\text{km}$  を2倍以上とし 従って在来資源とほぼ同程度の量とする。高温岩体はアメリカのヘメス山の試算方式によって1億kWとし 火山熱は2000万kWとした。こうして合計は3億7000万kWとなる。

以上の1970年および1974年評価の結果は第2表の一覧表に示されているが 表に示す通りこの結果は技術的観点からいえば潜在資源のカテゴリーに入るものである。既知資源としての資源保有量は個々の地熱系についての評価の積上げが必要である。この作業は1973年—1975年の3か年計画で実施した全国地熱基礎調査が終了した1976年以来徐々に行われている。1977年評価は全国をカバーしたものではないが 基本的にはこの積上げ方式をとっており その結果は第2表の既知資源の欄に記入されている。



第5図 1977年評価Bの広域地熱循環系モデル構造図

1977年評価は 方法的には1970年の自然放熱量法および地熱地域面積法をとった1977年評価Aと 包蔵水量法をとった1977年評価Bとに分けられる。自然放熱量法によるものは全国30地域の放熱量調査から 2,658万kWを推定し 地熱地域面積法は全国26地域の変質帯調査から 730万kWを見積り 包蔵水量法は全国6つの広域地熱地域から 1,938万kWを見積った。資源の種別からみると変質帯調査によるものは蒸気卓越型のみ 他の2者は蒸気卓越型および高温熱水型を対象としたものである。

1977年評価Bは 広域地熱地として胆振・後志 渡島 仙岩 栗駒 豊肥および霧島・薩南の6つの広域地熱地について包蔵水量法のうちの化石水量法にもとづくもので 平均的モデル構造は第5図のようなものである。このモデルから 350°C および 200°C の流体をそれぞれ  $152 \times 10^9$  および  $178 \times 10^9$  トンを見積り それぞれから 1,735万kW および 203万kW を発電量と試算したものである。

### 5. 米国地質調査所の1975年評価との比較

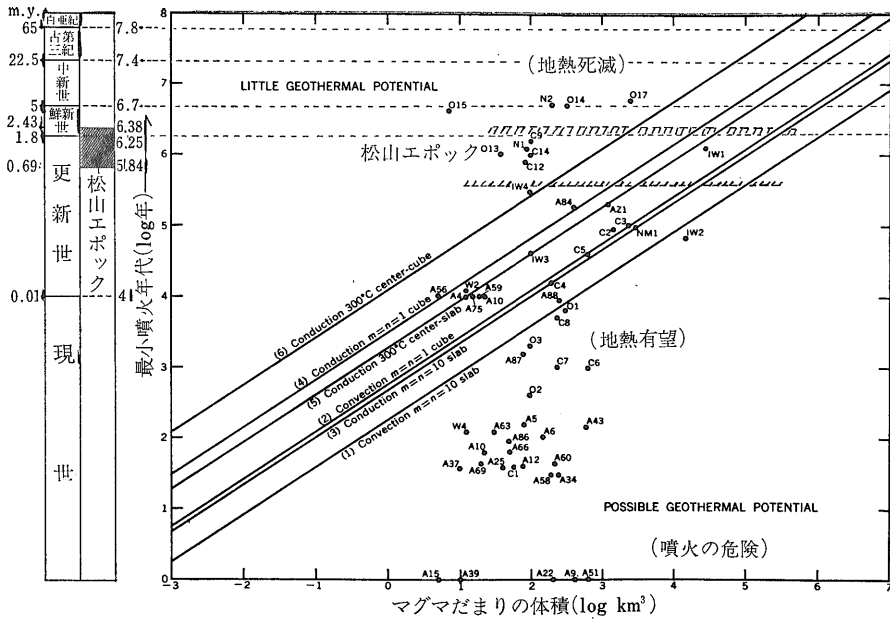
米国の地熱資源評価は 従来断片的な報告が出されていたが 1975年にこれらを体系づけた報告が米国地質調査所から出版された。(United States Geological Survey, 1975)。この年に日米両国でこの評価を一つのテーマとして討論会が開催されたことは上に述べた通りである。

この1975年評価では第2表に示すように マグマ 高温岩体 熱水循環系(低温熱水型を除く) および非火山性資源について包蔵熱量を計算し そのうち高温流体を含む3つのタイプすなわち蒸気卓越型 高温熱水型および岩圧水型資源について発電可能量を示している。

包蔵熱量の総計  $8,103,050 \times 10^{18}$  cal のうちの火山性および非火山性資源の内訳はそれぞれ1.27および 98.73%である。しかし後者については岩圧水型を除いては現在の技術では電力に変換できない。また火山性の1.27%のうちでも 現在の技術で発電できる蒸気卓越型および高温熱水型は0.02%で残りの1.25%は現在技術では発電できない。このようにして発電可能量として 潜在埋蔵量 3億7,700万kW・30年以上 既知埋蔵量として1億3,170万kW・30年を出している。更にこのうちの経済的に引合う(准限界的および回収可能)分は潜在埋蔵量として 7,600万kW・30年 既知埋蔵量として 2,340万kW・30年を算出している。

米国の1975年評価を日本の評価と比較してみると 米国のものは 日本でいう包蔵水量方式をとっている。地表面熱徴候をすべて地下貯溜層のパラメータに換算して評価するものである。日本および米国以外の外国で行われている地表面熱徴候と開発量の相関を示す経験式は使われていない。つまりこのことは地下貯溜層のモデル化への努力が米国の方が進んでいることにはほかならない。モデル化といえば日本では 1970年評価の中の野口モデルがマグマ・高温岩体の評価として非常にユニークなものであったが 米国ではさらに精緻なスミス・ショウモデルを1975年評価において提出して来ている。このモデルは今後日本でも利用されると思われるので以下にその概要を述べよう。

SMITH and SHAW (1975) は 大陸地殻の上部10km位の大規模貫入岩はその年代がいつであろうとも大い珪長質であることに注目し 浅所の熱水循環系に対して十



第6図 非定常モデル (スミス・ショウモデル) によるマグマ・高温岩体評価 (SMITH and SHAW 1975に一部加筆)

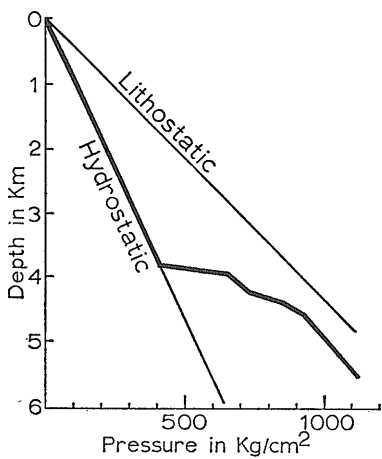
分な熱を供給し得るのは 充分若くかつ充分に大きいサイズの珪長質貫入岩であろうと考えた。そして年令と体積からその貫入岩に関連する地熱資源のマグニチュードを推定した。第6図はこれに使用するダイアグラムで 縦軸に年令 横軸に体積がいずれも対数目盛で示されている。斜めの直線はマグマの理論的冷却時間を示すもので 冷却系の境界条件を変えて6本の線が示されている。この図で地熱のポテンシャルの大きい貫入岩は右下すなわち若くて大きいものといえる。反対に左上すなわち古くて小さいものは死滅地熱系で探査の対象にはならない。右下の部分でも最下部はポテンシャルが余りに大きくて 噴火の危険もあり 新技術の開発が必要である。この方法に必要な基礎データは

日本では典型的なものは知られていないので 余り話題になっていないが 将来を考えれば研究が必要と思われる。岩圧水型資源はメキシコ湾岸の油田地帯にあり データはほとんど石油井から得られたものである。メキシコ湾岸は新生代初期から現在まで連続して大堆積盆地で 堆積速度は平均 1.2m/年 最大堆積厚は 15km と見積られている。この堆積はロッキー山脈を中心とする北方後背地からの碎屑物の供給によって行われ デルタ状の環境の中で堆積が続いた。このため堆積物の中で差別的沈降と堆積が起こり 堆積物は海岸線に平行な多くの断層で いくつものブロックに断ち切られている。結果として 不透水性の頁岩に三次元的にとり囲まれた

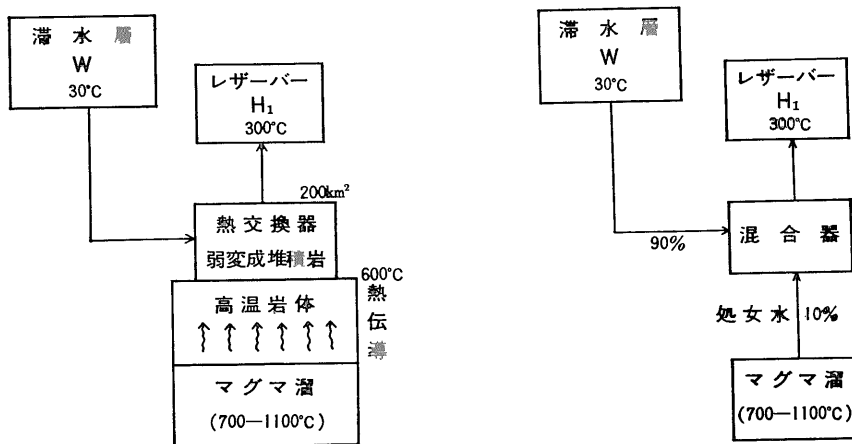
- (1) 地質調査と火山岩岩石学による体積計算,
- (2) カリウムアルゴン サーモルミネッセンス 黒旺石水和層 フィッション・トラック法等による年代測定, および
- (3) 冷却中の火成岩の数学的モデル

である。このモデルが実際に地熱探査に適用されそうな所がオレゴン州東部で見出されている (MacLEOD, WALKER and McKEE, 1975).

今一つ米国の地熱資源評価の中で特徴的なものは岩圧水型資源である。これは非火山性地熱資源のうちで電力に変換出来る唯一の資源とされており 既知の発電可能量の87%を占めるほど大なるものである。この資源は



第7図 米国ルイジアナ州沖合の岩圧水資源の深度・圧力曲線 (MUFFLER 1975)



第8図 熱水循環系のモデルの2種 左：瞬間湯わかし器モデル 右：人工温泉造成器モデル

透水性の砂岩層ができ、これが岩圧水の貯溜層となっている。その一つの大きさは面積で数10ないし数100 km<sup>2</sup>のものである。このような所では水圧は岩圧に近くなっている(第7図)。温度は200°Cを超え、最高273°Cが観測されている。この資源は地熱のみならず噴出の運動エネルギーおよび溶存ガスの燃焼熱の3種のエネルギーの合計として評価される。

### 6. 地熱資源評価と地球科学研究との関係

冒頭にも述べたように、地熱資源評価にあたっては温度・圧力・質量という地熱を現わす物理量の地質学的意味づけがなされることが先決である。換言すれば熱源・貯溜層構造および水流動形態に関する地球科学上の貢献が大きく要請される。

熱源に関しては火山地質学サイドから提起された前述のミス・ショウモデルは火山地質調査・火山年代学研究の緊要性をアピールしている。また近年の地球科学上の最大の理論であるプレートテクトニクス理論は、それがほとんどの地質現象を統一モデルで説明したことから、地熱もいづれその傘の下に入るであろうことは容易に想像できる。筆者が1971年(角 1972 p.38)に地熱

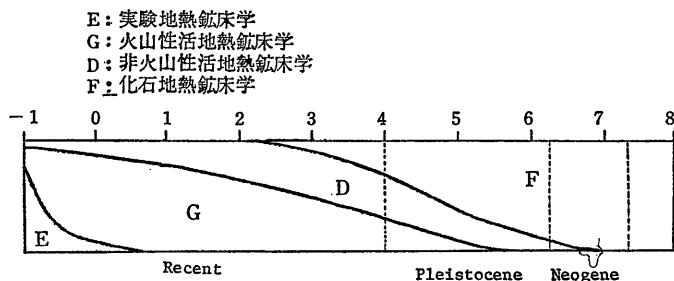
地帯の熱史研究のレビューを行った際、ネオテクトニクスに関する文献を探したがあまり見当らなかった。しかし1975年のサンフランシスコ国連シンポジウムではプレート運動に地熱を関係づけようという動きが強まっている(MUFFLER 1975)。

貯溜層構造は裂か性貯溜層の成因に関する研究が必要であるが、最近のマグマ貫入に伴う破碎の理論的研究(KOIDE and

BHATTACHARJI, 1975) や実際のフィールドにおける研究(RISK et al. 1970; GRINDLEY and BROWNE, 1975)は、従来裂かというものを構造(tectonic)応力のみによるものと考えていたのを改めさせるであろう。そしてそのことは裂か孔隙率の空間的分布の推定に貢献するであろう。

水流動形態に関しては、マグマ・高温岩体への天水の浸入の可能性が、鉱床学サイドの同位体地質学的研究から実証された(TAYLOR, 1971, FRIEDMAN, 1974, 松久 1978)ことが、地熱関係者にとっては衝撃的であった。それはかつて1960年に CRAIG らによって、地熱水の大部分は天水であるとした研究の出現にも似た事件である。このことは近年、想定されて来た瞬間湯わかし器モデルよりも温泉造成器モデル(第8図)が実体に近いように思わせる。これは地熱資源評価に大きな影響を及ぼし、利用側からみれば、資源量増大を結果するので、好ましい方向にあるといえよう。

さて上にいくつかの実例を述べたように、地球科学の基礎研究で地熱と本質的な関係のあるものが少なくない。このことは両者が学問上のフィロソフィーの点では全く同じものであることを意味している。よく地熱資源は現在資源であり、過去をうんぬんするよりも現在の物理的状態がどうなっているかが肝心であるという議論があるけれども、両者は車の両輪であって、化石資源を対象とする過去の地球科学との交流が必要であり、一方現在地球科学としての地熱鉱床学の独自性も存在するのである。では過去といい、現在という両者の接点はどの辺りにあるであろうか。このことを図解して筆をおくことにしたい。上にも述べたように、熱源に



第9図 地熱鉱床学の対象とする地質年代 (横軸は年代の年数の対数値)



つについては約300万年前(鮮新世)にさかのぼるし 非火山性の岩水資源の水は中新世のものが多いといわれる。とすると時代的にみて化石鉱床学と地熱鉱床学とは研究対象に相当の重なりがあることになる(第9図)。両者の密接な協力が望まれるゆえんである。

## 7. おわりに

以上日本の地熱資源評価について 米国のそれと比較しながら概説したが 第2表の総括表にみるようにまだ空欄が多く これを埋めなければならぬ。また算定方式そのものに両国間に大きなちががあるので単純に比較出来ない。この評価方式はしたがってまだ研究段階にある。上述のように日米両国では1975年に東京でこの問題について討論会を開いたが 米伊両国は1976—1977年にこの問題について研究協定を結び 1977年9月にはイタリアのラルデレロでその結果の公開討論会を開催した。1977年には再び米国地質調査所地熱研究担当部長 TILLING 博士を日本に招へいして討論協議が行われた。さらに1978年には日米両国間に新エネルギー技術開発に関する協定が締結されたが この中にも地熱資源評価法の研究は テーマの候補の一つとなっている。米国は1975年評価の改訂作業を1979年1月末を目標に作業を急いでいる(L.J.P. MUFFLER 博士の私信による)。この文章が印刷される頃には完成していると思われる。地熱は後発の地下資源であり その評価法の研究は緊要のことと思われる。

最後に本文執筆の機会を与え校閲の労をとられた陶山淳治地殻熱部長 本稿執筆のきっかけとなった 53年10月30日の所内討論会について お世話を頂いた粕武技官 ならびに討論していただいた地殻熱部の各位に深謝する。

## 参 考 文 献

- FRIEDMAN, I., LIPMAN, P. W., OBRADOVICH, J. D. and GLEASON, J. D. (1974): Meteoric water in magmas. *Science*, vol. 184, p. 1069-1072.
- Geological Survey of Japan (1976): Proceedings of the United States-Japan Geological Surveys panel discussions on the assessment of geothermal resources, Tokyo, Japan, October 27, 1975, 131p.
- GRINDLEY, G. W. and BROWNE, P.R.L. (1975): Structural and Hydrological factors controlling the permeabilities of some hot-water geothermal fields. *Proc. 2nd UN Symp. Development and Use of Geothermal Resources*, p.377-386.
- JONES, P. H. (1970): Geothermal resources of the northern Gulf of Mexico basin. *UN Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, Proceedings (Geothermics, spec. iss. 2), vol. 2, pt. 1, p. 14-26.*
- KOIDE, H. and BHATTACHARJ, S. (1975): Formation of fractures around magmatic intrusions and their role in ore localization. *Economic Geology*, vol. 70, p. 781-799.
- 松久幸敬 (1978): 酸素と水素の同位体地質学(その3). *地質ニュース* no. 289, p. 26-39.
- MACLEOD, N. S., WALKER, G.W. and MCKEE, E.H. (1975): Geothermal significance of eastward increase in age of Upper Cenozoic rhyolitic domes in southeastern Oregon. *Proc. 2nd UN Symp. Development and Use of Geothermal Resources*, p. 465-474.
- MUFFLER, L. J. P. (1973): Geothermal Resources. U. S. G. S. Professional Paper, no. 820, p. 251-261.
- MUFFLER, L. J. P. (1975): Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources. *Proc. 2nd UN Symp. Development and Use of Geothermal Resources*, p.499-507.
- RISK, G. F., MACDONALD, W. J. P., and DAWSON, G. S. (1970): D. C. resistivity surveys of the Broadlands geothermal region, New Zealand: *UN Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, Proceedings (Geothermics, spec. iss. 2), vol. 2, pt. 1, p. 287-294.*
- SMITH, R. L., and SHAW, H.R., (1975): Igneous-related geothermal systems, *in* White, D. E., and Williams, D. L., eds., *Assessment of geothermal resources of the United States—1975: U.S. Geol. Survey Circular 726*, p. 58-83.
- 角 清愛(1972): 熱史の化石としてみた地熱地帯の熱水変質地熱 no. 34, p. 24-39.
- 角 清愛(1976): 日本の地熱資源 *地学雑誌* vol. 85, no. 4, p. 10-26.
- 角 清愛(1978 a): 日本の地熱資源 *スチールデザイン* no. 180, p. 6-8.
- 角 清愛(1978 b): 日本における地熱探査のあゆみ *地熱エネルギー* no. 9, p. 45-57.
- TAYLOR, H.P., Jr., (1971): Oxygen isotope evidence for large-scale interaction between meteoric ground waters and Tertiary granodiorite intrusions, western Cascade Range, Oregon. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 76, no. 32, p. 7855-7874.
- 通産省サンシャイン計画推進本部・地質調査所(1977): 全国地熱基礎調査報告書(昭和48-50年度). 209 p., 日本産業技術振興協会.
- United States Geological Survey (1975): Assessment of geothermal resources of the United States—1975, *Geological Survey Circular 726*, 155p.
- WILLIAMS, D.L. (1975): Geothermal energy. *Proceedings of the United States-Japan Geological Surveys panel discussions on the assessment of geothermal resources*, p. 55-62.