

地球環境と地熱資源

—地熱は地球環境問題に応えることができるか—

宮崎 芳徳¹⁾

1. はじめに

今年六月にブラジルで開催された地球サミット(「環境と開発に関する国連会議」)での地球温暖化防止条約(「気候変動に関する枠組み条約」)に端を發して、我々の身の回りは環境問題・エコロジィーで埋め尽くされている。

特に化石燃料の使用による二酸化炭素発生量の増加に伴う「地球温暖化問題」では、省エネルギーと共に再生可能自然エネルギーの利用拡大の聲がその対策として高まりつつある。地熱エネルギーは、太陽光/熱、風力、波力、潮汐力、バイオマス、海洋温度差などと並んで、将来の石油代替エネルギーとなりえるかも知れないソフトエネルギーである。

振り返ってみれば、1973年に發した「石油危機」を契機に發足した石油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、我が国の地熱エネルギー開発利用促進は、すでに着手されいくつかでは着々と成果を出しつつある。この時の目的は、どちらかという輸入石油の中近東依存度を抑え、エネルギーセキュリティーを確保するのが目的であった。現在の地球環境問題はこの時の「石油危機」とは本質的に異なり、全く別の側面から地熱エネルギーの価値が見直されているのである。

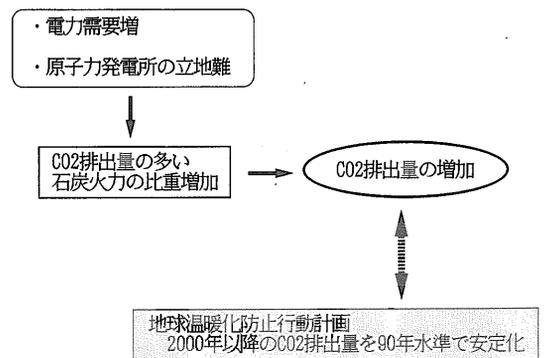
グローバルな問題となってしまった「環境問題」に対して、我が国の地熱エネルギーはあるいは地球上の地熱エネルギーはどれほど応えることができるのであろうか。地熱資源量、二酸化炭素排出、立地、経済性、多目的利用、自然破壊、などの点について地熱資源を再評価する時期に来ているのではないだろうか。また、今まで推進してきたサンシャイン計画の一環としての、石油代替のための大規模発電エネルギーとしての地熱開発という取り組み方、スタンスには改める必要はないのであろうか。地球

環境という視点にたった場合の現状における開発・調査体制、税制、法制度などの問題についても考えてみて、21世紀へ向けての地熱開発促進への課題について検討することも重要であろう。

2. 環境問題

地球環境問題は、温暖化、酸性雨、オゾン層の破壊、熱帯林の減少、有害廃棄物の越境移動、海洋汚染、野生生物種の減少など問題は多岐にわたっている。特に温室効果ガスの二酸化炭素は地球温暖化に寄与する割合は5割を越え、化石燃料の燃焼による二酸化炭素の排出は人間活動を維持・向上させていくうえで不可避であることから、大きな問題となっている。二酸化炭素の排出状況では、我が国は世界の約4%を占めており、絶対量では5番目である。

政府が昨年定めた地球温暖化防止行動計画では、2000年以降の一人あたりの二酸化炭素排出量を1990年水準で安定化させることを目標としている。しかしながら今年4月に電力各社がまとめた施設計画では、電力需要増や原子力発電所の立地難か



第1図 今後10年間の電力施設計画ではCO₂は増加

キーワード：地熱資源、地球環境、資源量、二酸化炭素

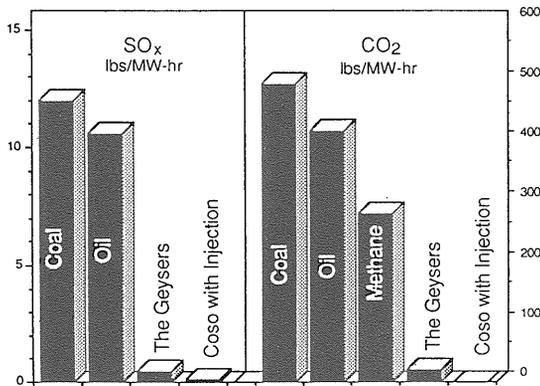
1) 地質調査所 国際協力室

ら、二酸化炭素排出量の最も多い石炭火力の比重が高まることが要因で、向こう十年間で2000年度には1990年度水準から比べて二酸化炭素排出量が24%も増加する見通しとなっている(第1図)。これは石炭火力を現在の3倍までに増やすことにより、2000年度に二酸化炭素排出量が計1億500万トン(炭素換算)に達し、90年度実績の8500万トンの24%増に達する計算からである。通商産業省としては、国際的に公約したこの行動計画の達成のために、二酸化炭素抑制のため新エネルギーの開発継続、コージェネレーション(熱電併給)システムの導入などの省エネ対策の強化などに取り組む方針であ

る。我が国の場合、電力業界が排出する二酸化炭素は国内排出量の27%を占め、一つの産業としては最大である。

一般に石油・石炭等の発電設備の環境に及ぼす影響は、排出される全量のイオウ酸化物(酸性雨の原因)の70%、窒素酸化物(地上の光化学スモッグの原因)の33%、温室効果に関連した温室ガスの20%といわれている(Moskovitz, 1990)。地熱発電では、地下より取り出した蒸気や熱水を利用して発電を行なうので、炭化水素資源の燃焼とは違って、放出される二酸化炭素量も単位発電量あたり1-10%くらいである。一般に100万KWの発電所を1年間運転すると、石炭では約600万トン、石油では約500万トン、天然ガスでは約300万トンもの二酸化炭素を発生する。地熱発電のイオウ排出も数%くらい、窒素酸化物においてもずっと少ないので、地熱エネルギーを利用した発電形態は、SOx、CO2、NOxなどが非常に低レベルであり地球規模の環境問題に対して大変好ましい。

第2図は、石炭、石油、天然ガス、地熱の各発電所からのイオウ酸化物、二酸化炭素の排出を示したものである。ガイザーは地熱の蒸気発電、コソは地熱のバイナリ型発電である。同じく第3図は、我が国の地熱発電所のkWhあたりの二酸化炭素排

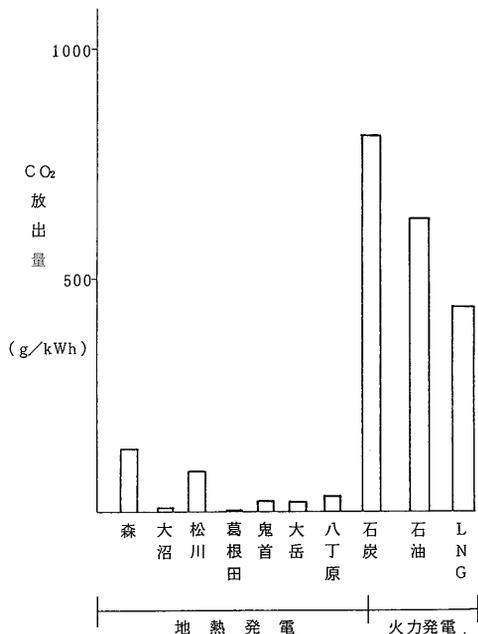


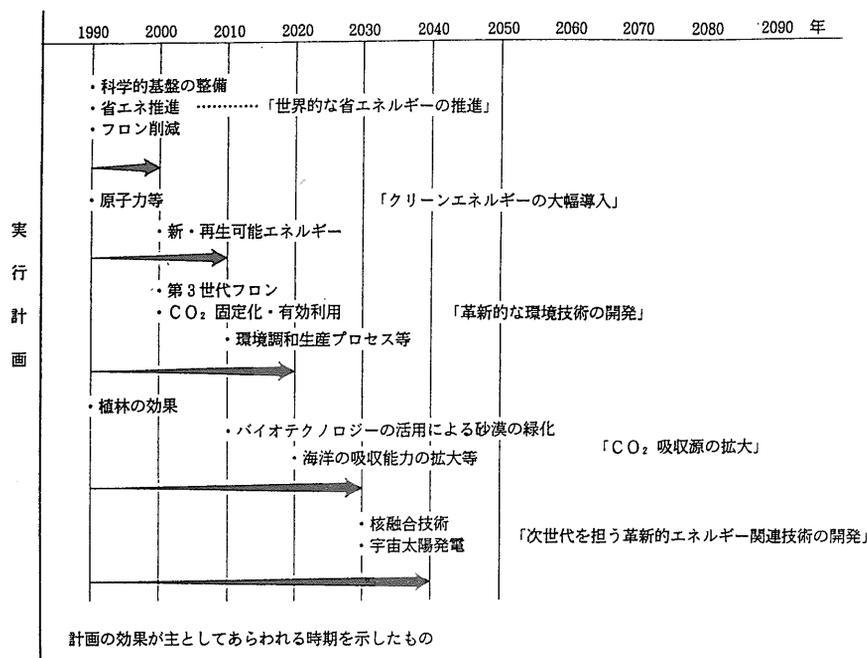
第2図 発電所からのイオウ酸化物、二酸化炭素の排出 (Goddard et al., 1989)

地熱発電所別二酸化炭素放出量

地熱発電所	kWh 当り二酸化炭素排出量
森	1.46 (g/kWh)
大沼	6
松川	9.0
葛根田	4
鬼首	2.8
大岳	2.8
八丁原	3.7

第3図 我が国の地熱発電所のkwhあたり二酸化炭素排出量の比較 (NEDO, 1990)

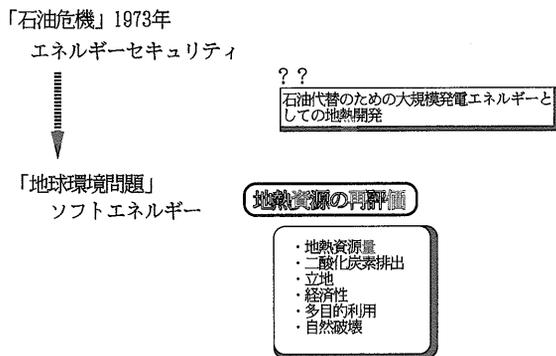




第4図 「地球再生企画」の概念(通産省)

出量を石炭、石油、LNGの火力発電所と比較したものである。地熱発電所においていくぶん差はあるものの、他の火力発電と比べると圧倒的に二酸化炭素排出量が小さいことがわかる。第4図は、通産省で立案されている「地球再生計画」の概念を示したものであるが、省エネルギー対策はここ10年で実行・達成のテーマであり、地熱資源を含む新・再生可能エネルギー利用の「クリーンエネルギーの大幅導入」は今後20年間のスパンで考え、実行していくテーマとして位置づけている。地熱開発の場合、発電所運開までのリードタイムが長いので、20年間のスパンといえども決してゆとりのあるものではなく、計画性のある堅実で着実な開発スケジュールが望まれる。その背景として、地熱資源量評価をはじめとする基礎資料の信頼度がしっかりしていなくてはならない。

1973年に発した「石油危機」を契機に沸き起こったエネルギーセキュリティの考えでは、石油代替のための大規模発電エネルギーとして地熱資源をとらえていた。しかしながら、近年の「地球環境問題」では、地熱資源に対してソフトエネルギーとしての側面を重視しつつあり、その意味で地熱資源の再評価が問われていると考えられる。発電目的のみでなく、中低温熱水の熱利用まで含めた地熱資源量評



第5図 地熱資源の再評価

価、二酸化炭素排出、太陽・風力発電と比べての立地性、経済性、多目的利用、自然破壊、などの側面における地熱資源の再評価が重要であろう(第5図)。

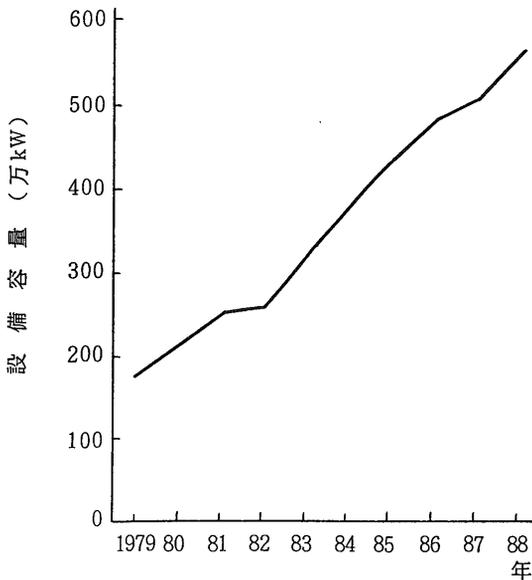
3. 地熱資源量

地熱エネルギーは地球に存在する自然の熱を利用するが、広範囲にわたって拡散しているためにそれを利用できるのは限られた体積の中にそれが集中している地域しか利用できない。地球全体の深さ10 km までの地殻中の熱は約 10^{24} BTU と推定され、これは1975年の世界のエネルギー消費量の約400万

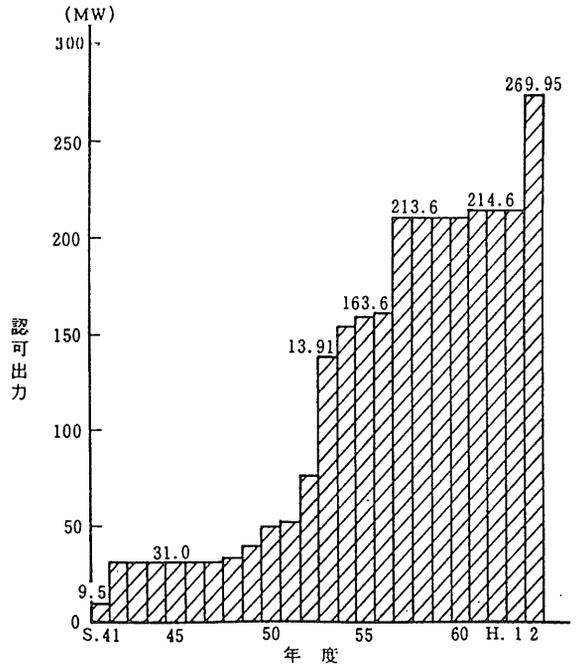
世界における地熱発電 約600万KW

1. 米国 284万KW
2. フィリピン 89万KW
3. メキシコ 70万KW
4. イタリア 57万KW
5. ニュージーランド 28万KW
6. 日本 27万KW

第6図 世界における地熱発電



第7図 世界の地熱開発状況推移(NEDO, 1990)



第8図 我が国の地熱発電所認可出力の推移(日本地熱調査会, 1991)

倍に相当する。

世界における地熱発電の合計発電設備容量は、約600万KW(第6図)であり、多い順に米国284万KW、フィリピン89万KW、メキシコ70万KW、イタリア57万KW、ニュージーランド28万KW、そして日本27万KWと、我が国は世界第6位である(日本地熱調査会, 1991)。第7図は世界の地熱開発状況の推移を示しており、着実に地熱発電設備容量が増え続けていることがわかる。第8図は我が国の地熱発電所の推移を示すもので、石油危機を契機に急激に増加しているのがわかる。我が国の電源構成をみると、1990年度(平成2年度)末で総計17,507万KW中、地熱は0.1%にしか満たない。1990年6月に出された「総合エネルギー調査会」

の長期エネルギー需給見通しでは西暦2000年で地熱エネルギーを100万KW(0.3%)、西暦2010年には350万KW(0.9%)まで増産させる開発目標を持っている(第1表)。しかしながら現時点では、今世紀までに連開予定の地熱発電所は約27万KWほどしか予定されておらず、総計50数万KWにしか到達せず目標の約半分しか達成しそうにない(第9図)。従って、もっと制度面、政策面からの積極的支援が望まれる。

地質調査所においては、「全国規模地熱資源評価の研究」において、地熱資源の評価を実施している(宮崎ほか, 1986, 1991)。地熱資源量評価の対象としたのは熱水対流型資源と呼ばれるもので、この地熱資源は温度により高温熱水系(>150℃)、中温熱水系(90℃~150℃)、低温熱水系(<90℃)の3分類に区分される。地熱発電(蒸気フラッシュ発電、バイナリ発電)を主目的とした地熱資源の対象は、熱水対流型資源のうち高温熱水系のみであり、この資源量に限っては電気換算の発電量まで算出を行ない、中温・低温熱水系資源については熱量の算出を実施した。ここでは容積法を用いて地熱資源量評価がなされた。この手法は、もっとも有用でオーソド

第1表 総合エネルギー調査会長期エネルギー需給見通し(1990年6月)

年 度	1988年度(実績)		2000年度		2010年度	
	実 数	構成比(%)	実 数	構成比(%)	実 数	構成比(%)
新エネルギー等	620万 kJ	1.3	1740万 kJ	2.9	3460万 kJ	5.2
水 力	2030万 kW	4.6	2270万 kW	3.7	2620万 kW	3.7
地 熱	40万 kJ (18万 kW)*	0.1	180万 kJ (100万 kW)*	0.3	600万 kJ (350万 kW)*	0.9
原 子 力	2890万 kW	9.0	5050万 kW	13.2	7250万 kW	16.7
天 然 ガ ス	4610万 kJ	9.6	6500万 kJ	10.9	8000万 kJ	12.0
石 炭	1億1460万 t	18.1	1億4200万 t	17.4	1億4200万 t	15.5
石 油 (うちLPG)	2.76億 kJ (1740万 t)	57.3	3.08億 kJ (2200万 t)	51.6	3.06億 kJ (2300万 t)	46.0
合 計	4.82億 kJ	100.0	5.97億 kJ	100.0	6.66億 kJ	100.0
省 エ ネ 目 標	—		6.0%		11.2%	

注) * ; 電気事業審議会需給部会中間報告(平成2年6月)による開発目標で、電気事業用のみである。

地熱エネルギー開発の目標

1992	27万KW
2000	100万KW
2010	350万KW

(総合エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し)

第9図 地熱エネルギーの長期見通し

ックスな評価法とされているもので、異なった地域や異なった地質条件間の対比ができ(Muffler and Cataldi, 1978), 採取可能総資源量の決定にはもっとも良い方法である。この手法のなかにもいろいろバリエーションがあるが、根本的には地熱貯留層の体積、温度をそれぞれの地熱系に対して推定し、貯留エネルギーを算出するものである。実際例としては、Brook et al. (1979), 角(1982), 金原ほか(1984, 1985), Macdonald and Muffler (1972)などがある。

3.1 世界における地熱資源評価

米国における全土的レベルの最初の地熱資源評価は White and Williams (1975)であり、次の4つの資源について評価を実施している。(1) 広域伝導卓越型地熱資源、(2) 地圧水型地熱資源、(3) 火成岩関与型地熱資源、(4) 90°C以上の熱水対流系地熱

資源。この中で、地熱利用および発電を目的とした現実的な探査・開発対象は4番目の90°C以上の熱水対流系地熱資源である。Renner et al. (1975)は、容積法を用いて、高温熱水系(>150°C)資源量と、中温熱水系(90-150°C)資源量を算出している。ここで貯留層の上面深度は、坑井データから推測もしくは1.5 km とし、下面深度は3 km と仮定、貯留層面積は地質データ、地球物理学的データ、坑井データより推測、貯留層温度は坑井による検層データおよび地化学温度計を用いて推測している。回収率25%を採用し、最終的に米国における高温熱水系の資源量を1520×10¹⁸J、これより可能な発電量を153,000 MWe×30年と評価した。中温熱水系の資源量については、1450×10¹⁸Jなる評価結果を得た。

この1975年評価結果を引き継いで、データ見直しと精緻化を計ったものが Muffler (1979)である。熱水対流系資源の評価(Brook et al., 1979)には、温度・体積・熱エネルギーの記述に統計的手法を付加して最終的な資源量を確率論的に表現している。なお熱水系資源の発電効率には0.4を採用している。トータル熱水対流系資源量2400×10¹⁸J、これより可能な発電量を95,000-150,000 MWe×30年なる評価結果を算出した。これらの値は、1975年評価値より20%程下方修正されている。なお、全米における215カ所の確認されている地熱資源に対する

評価では、150°C以上の高温熱水系資源については、23,000±3400 Mwe・30年の発電量、90-150°Cの中温熱水系の熱エネルギーは、42±13×10¹⁸J という結果を報告している。発電に関して言えば、1960万kw～2640万kw相当の評価結果ということになる。

イタリアにおいても、容積法を用いて資源量評価が行なわれている(Cataldi et al., 1978)。イタリア中部の面積8661 km²のエリアを地質・熱構造の均質と思われる31ゾーンに分割し、さらに各ゾーンを上部不透水層、貯留層、下部基盤層の3層に細分、最終的に93ブロックについて熱エネルギーを算出した。その結果、温度130°C以上の地熱資源量として53×10¹⁸J、これより可能な発電量として4500 Mwe・30年、130°C以下の多目的利用地熱資源として93×10¹⁸Jなる評価結果を得た。

ニュージーランドにおいては、容積法ではないが、地熱地域面積法によって主要な地熱地域の資源量が算出されている(Donaldson and Grant, 1978)。ニュージーランドで地熱貯留層が確認されているワイラケイ(最高温度260°C)とブロードランド(最高温度300°C)においては、各々単位面積あたりの発電量として、13-14 Mwe/km²、10-11 Mwe/km²が見込まれる。比抵抗データを主に活用して総面積を算出し、坑井や地化学温度計等より地下温度を推測して発電可能量を評価している。その結果、ニュージーランド北島の13カ所の地熱地帯の資源量として、1100-2500 Mweの発電が可能という評価を報告している。

3.2 我が国の地熱資源量評価

容積法による地熱資源評価では、まず貯留層熱エネルギー Q_r を算出する(小川, 1985, 1986)。

$$Q_r = \rho c \int_{Z_b}^{Z_r} \int_S \{T(x, y, z) - T_{ref}\} ds \cdot dz$$

ここで、

Q_r : 貯留層エネルギー(J)

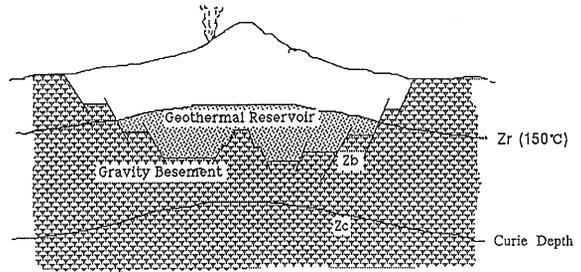
ρc : (岩石+水)の容積比熱

岩石容積比熱2.5 J/cm³/°C, 貯留層孔隙率15%仮定して2.7 J/cm³/°C

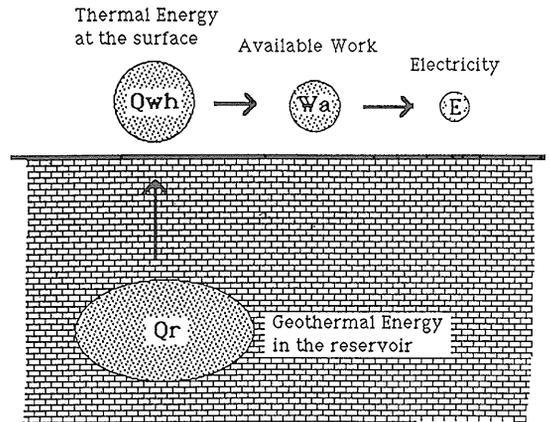
$T(x, y, z)$: 貯留層内の点(x, y, z)における温度(°C)

T_{ref} : 基準温度

S : 面積(x, y)



第10図 容積法による地熱資源量評価の概念図



第11図 容積法アルゴリズムのフロー図

Z_b : 重力基盤深度

Z_r : 温度150°Cに対応する貯留層深度

第10図, 第11図は、本研究で採用した容積法による地熱資源量評価の概念図を示したものである。地熱貯留層は、 Z_b (重力基盤深度)と Z_r (温度150°Cに対応する貯留層深度)によって深度方向に限定され、その貯留層内温度は下部の Z_c (キュリー等温面深度)によって求められる。熱水からフラッシングによって蒸気を得て発電を行なうためには、熱水温度は少なくとも150°C以上であることが必要であり、経済性を考慮に入れるならば200°C以上であることが望ましい。本研究では高温熱水系(>150°C)の定義にしたがい、地熱貯留層の上限は温度150°Cに対応する深度とした。地熱貯留層内に蓄えられた熱エネルギー Q_r が算出されると、次に地熱エネルギーの回収率 R_g を乗じて坑口での回収地熱エネルギー Q_{wh} を計算する。

$$Q_{wh} = R_g \cdot Q_r$$

R_g は、物理的および技術的制約により、すべての熱エネルギーの回収は不可能であり、Brook et

al. (1979)の容積法は、熱水卓越型の場合、25%を採用している。この値は、スリーププロセス回収(50%)の現実的な値としてとらえることもできるし、また、立場を変えて貯留層存在確率×貯留層発見確率×貯留層エネルギー回収率と見てもよいかもしれない。本研究では、アメリカ地質調査所と同じく回収率25%を使用した。なお、この25%には、貯留層内熱水を地上の坑口まで運ぶ際に生ずるわずかなエネルギー損失(数%以下)も含んでいる。

坑口まで運ばれた地熱エネルギーは、その一部を機械的エネルギー(仕事)に変換して、電気エネルギーを起こす。その際、熱力学的な制約より、機械的仕事量(Wa)と呼ばれる最大仕事量が定義される。

$$Wa = \Delta H - T\Delta S$$

基準温度としては、アメリカ地質調査所と同じく大気温度の15°Cを採用した。基準の温度としては、この他、コンデンサー温度(八丁原発電所43.5°C, 大沼発電所43.4°C, 森発電所54.6°Cなど)を採用する現実的方法もあるが各プラント毎に異なるなど問題も残るので、ここでは15°Cを基準値とした。

有効利用熱量である Wa (機械の仕事量)が求まると、実際のエネルギー変換サイクル(地熱発電所)の発電効率 η_u を乗じて電気エネルギー E が算出される。発電効率は、流体温度、発電サイクルの種類(最適シングルフラッシュ、2段フラッシュなど)によって異なるが、熱水型システムでは、 $\eta_u = 0.4$ が代表値として選ばれるので、本研究でもこれに準拠した。最終的な発電量(万 kW)は、30年間発電を行なうものとして算出した。貯留層熱エネルギー(Qr)から、電力変換可能な高温熱水系資源の電気エネルギー(E)は次式により求めることができる。

$$E = Wa \cdot \eta_u$$

Wa: 機械の仕事量

η_u : 発電効率(熱水卓越型0.4, 蒸気卓越型0.5とする)

ここで

$$Wa = \Delta H - T\Delta S$$

$$= m_{WH} [h_{WH} - h_0 - T_0 (S_{WH} - S_0)]$$

ただし、

H: エンタルピー

S: エントロピー

T: 温度(°K)

m_{WH} : 井戸元で生産される流体量

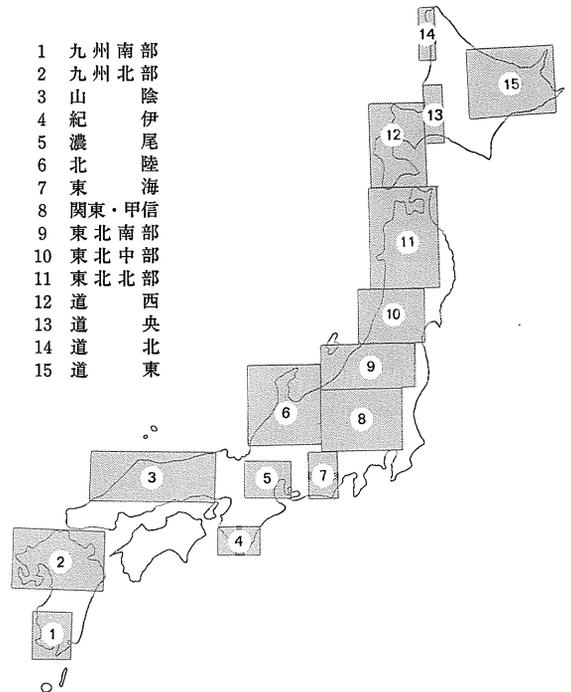
h_{WH} : 井戸元での単位流体量あたりのエンタルピー

h_0 : 最終状態(15°C)での単位流体量あたりのエンタルピー(蒸気表より求める)

S_0 : 最終状態(15°C)での単位流体量あたりのエントロピー(蒸気表より求める)

S_{WH} : 井戸元での単位流体量あたりのエントロピー(h_{WH} に相当する値を用いて蒸気表より求める)

容積法による地熱資源量評価には重力データ(写真2)、キュリー等温面深度を使用しているが、重力データは全日本をカバーしておらず、そのカバレッジが限定されるため、全日本を、第12図に示すような15ブロックに分割して評価を行なった。資源量評価結果のまとめたものを、第2表、第3表に示す。この表においては、先に述べた評価基準を満足するような対象エリアの評価対象面積(km²), その陸地面積に対する百分率(%), 重力基盤深度までの厚みを考慮して算出した貯留層体積(km³), 貯留層の総エネルギー(Qrに対応), 有効総熱量(Waに対応), そして発電量(万 kW・30年)を各ブロックごとにまとめて表している。



第12図 熱水対流資源量算出のための15ブロックの分割エリア

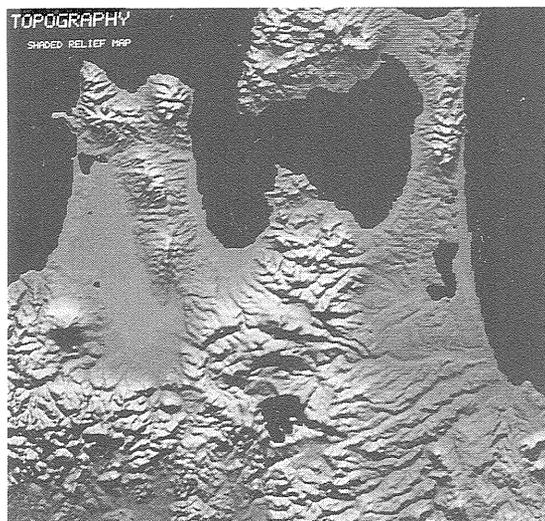


写真1 標高地形を北から照射させて作成した陰影画像

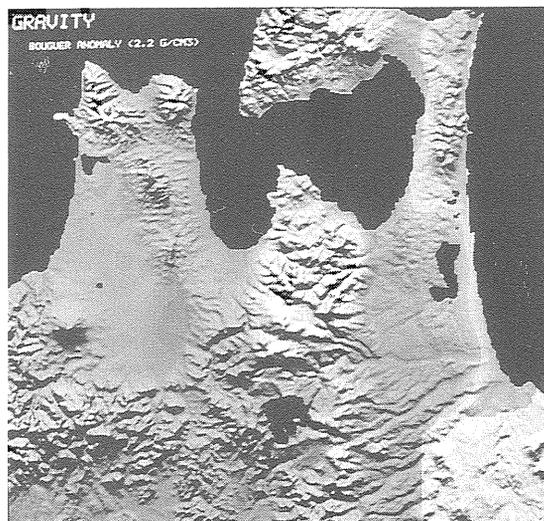


写真3 ブーゲー重力異常と標高陰影画像とを重畳させて作成した画像

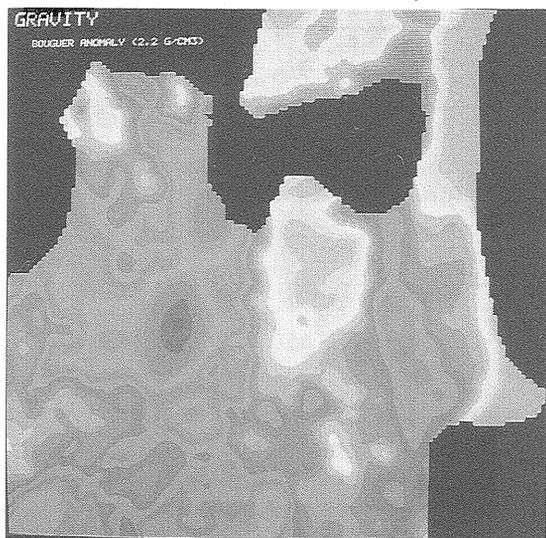


写真2 ブーゲー重力異常

15個のブロックについて、発電量を足しあわせると、総計2054万kWを得る。第13図は、15ブロックの熱水対流型資源量を各ブロック別に棒グラフで表したものである。東北北部が発電量481万kWと最も高い地熱資源量アセスメント値を示している。第14図は、評価対象となり得た9ブロックについて、各資源量の大きさに応じてブロック別表示を行なったものである。東北地方(北部・中部・南部)全域では35.1%、北海道(道東・道西)37%、関東・甲信11.5%、九州(北部・南部)は15.2%を、我が国全体の資源量に対して占めていることがわか

る。

中温熱水系(90°C~150°C)と、低温熱水系(42°C~90°C)の場合には、直接利用が主となる。前述した容積法による手法で、可採深度を3kmまでとした場合の、地下に賦存する低温・中温熱水資源量を算出した。有効熱エネルギーまでの評価方法は、USGS基準(Brook et al., 1979)に準拠し、空隙率は15%、熱水比熱は4.2 J/gk、基準の温度は15°Cとした。ただし、体積盆中の化石熱水という考え方により、熱量の算出に当たっては、岩石の熱量は除外し、取り出せる熱水の熱量のみを評価対象とした。その結果、第4表に示すとおり、中温熱水系(90°C~150°C)地熱資源の貯留層熱エネルギーは、約 800×10^{18} J、有効熱エネルギーは 48×10^{18} Jなる資源量を算出した。低温熱水系(42°C~90°C)地熱資源は、貯留層熱エネルギーが 1370×10^{18} J、その有効熱エネルギーが 82×10^{18} Jという評価を得た(第5表)。共に有効熱エネルギーは、地下の貯留層熱エネルギー量の約6%位に相当する。

前述の高温熱水系(>150°C)地熱資源量の評価値、2054万kWは、重力基盤深度をもとに貯留層の広がりや深さを規定して評価したものである。このうち、温度200°C以上の主に蒸気発電を対象とする資源量が582万kW、温度150°C~200°Cの主にバイナリー発電に適する資源量が1472万kWである。

近年、深部地熱坑井の掘削が進み、様々なケース

第2表 高温熱水対流型資源量(>150°C)評価結果

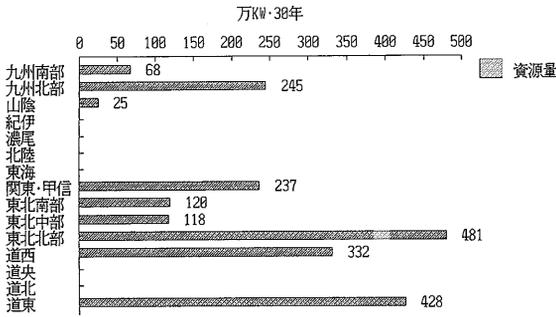
ブロック番号	ブロック名称	陸地面積 (km ²)	評価対象面積 (km ²)	対象エリア (%)	貯留層総体積 (km ³)	貯留層総エネルギー (10 ¹⁸ J)	有効総熱量 (10 ¹⁸ J)	発電量 (万 kW・30年)
1	九州南部	7755	132	1.7	73	31.5	1.6	68
2	九州北部	16220	460	2.8	246	110.1	5.8	245
3	山陰	8232	57	0.7	25	11.2	0.6	25
4	紀伊	2948	0	0	0	0	0	0
5	濃尾	5861	0	0	0	0	0	0
6	北陸	14463	0	0	0	0	0	0
7	東海	10803	0	0	0	0	0	0
8	関東・甲信	28559	752	2.6	271	112.9	5.6	237
9	東北南部	18800	518	2.8	147	58.8	2.8	120
10	東北中部	15910	233	1.5	123	53.9	2.8	118
11	東北北部	22427	668	3.0	479	216.1	11.4	481
12	道西	14697	547	3.7	326	147.8	7.8	332
13	道央	6831	0	0	0	0	0	0
14	道北	1481	0	0	0	0	0	0
15	道東	11092	868	7.8	412	187.8	10.1	428

第3表 我が国の熱水対流型資源量の概算

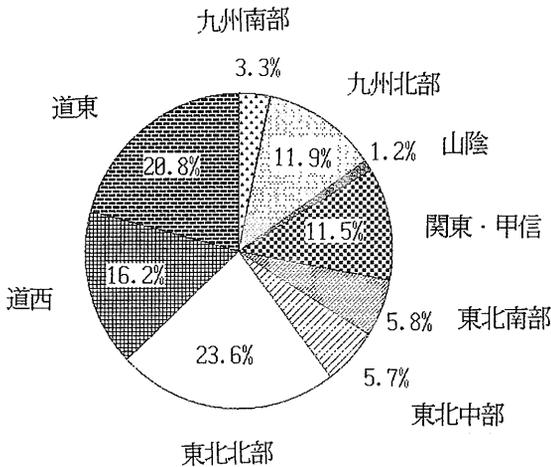
ブロック番号	ブロック名称	資源量 NW・30年	主な地域名
1	九州南部	680	阿多・始良・霧島・蘭牟田・薩南
2	九州北部	2450	豊肥・雲仙
3	山陰	250	大山
4	紀伊	0	
5	濃尾	0	
6	北陸	0	
7	東海	0	
8	関東・甲信	2370	草津白根・浅間・日光・八ヶ岳・赤城・榛名
9	東北南部	1200	磐梯・吾妻・安達太良・那須
10	東北中部	1180	鳥海・月山・肘折・栗駒・船形・蔵王
11	東北北部	4810	八甲田・十和田・七時雨・八幡平・焼山・岩木山
12	道西	3320	駒ヶ岳・濁川・八雲・登別・いぶり・雷電ニセコ
13	道央	0	
14	道北	0	
15	道東	4280	斜里・摩周・屈斜路・阿寒・喜登牛
合計		20540	

ヒストリが増えてきており、地下深部の地熱貯留層形態のモデルも塗り替えられようとしている。その中で、注目すべきことは、先第三紀基盤内に達しても、優勢な地熱流体の存在の確認を見たことである。この事実、従来型のポーラス型地熱貯留層に替わって、フラクチャ型深部地熱貯留層のスタディを加速させて行かねばならない事を示唆している。

試みに、深部地熱系の資源量の概算を把握するために、容積法により重力基盤深度以深の基盤岩石の基盤内1 kmの岩石熱量を回収率25%を採用して計算してみた。基盤1 kmの岩石熱までを考慮すると、浅部地熱系2054万 kWの資源量を含んで、6396万 kWなる資源量を算出した。これは、浅部地熱系2054万 kW、深部地熱系4342万 kWということに



第13図 我が国熱水対流型資源量の概算



第14図 我が国熱水対流型資源量のブロック別表示

なり、深部地熱資源は、浅部地熱系の約2倍強の資源量が見込まれるということを示している。

以上の地熱資源量の結果をまとめると、第15図のようになる。現実の地熱発電規模と資源評価量との大きな乖離には、様々な要因、問題が考えられ、たとえば地熱発電のための経済コスト、技術的ネック、制度の問題、開発リスクなど様々であろう。これらの諸問題が解決し、場が整った時には、我が国の地熱エネルギー開発も大きな進展が望めるものと期待される。

4. 環境問題を考えたときの地熱開発

現在の地球環境問題を想定したとき、化石燃料と異なり地熱資源の有効性、クリーン性は述べるまでもないが、その開発を妨げている要因について考えてみたい。まずその経済性であり、地熱発電の発電原価が13-16円/kWhと石油火力の約11円/kWhよ

第4表 我が国の中温熱水系地熱資源量の概算(温度90-150°C)

ブロック番号	ブロック名称	貯留層総エネルギー量 (10 ¹⁸ J)
1	九州南部	23.2
2	九州北部	77.8
3	山陰	4.9
4	紀伊	0.0
5	濃尾	0.1
6	北陸	0.8
7	東海	4.0
8	関東・甲信	207.5
9	東北南部	113.7
10	東北中部	52.2
11	東北北部	106.1
12	道西	72.2
13	道央	3.8
14	道北	4.8
15	道東	127.8
合計		798.9

第5表 我が国の低温熱水系地熱資源量の概算(温度42-90°C)

ブロック番号	ブロック名称	貯留層総エネルギー量 (10 ¹⁸ J)
1	九州南部	39.8
2	九州北部	136.0
3	山陰	15.0
4	紀伊	3.4
5	濃尾	14.6
6	北陸	34.0
7	東海	20.0
8	関東・甲信	335.1
9	東北南部	183.1
10	東北中部	90.5
11	東北北部	187.6
12	道西	104.7
13	道央	21.0
14	道北	20.6
15	道東	164.4
合計		1369.8

り若干高いレベルにある(第16図)。ちなみに、水力13円/kWh、燃料電池35-46円/kWh、太陽光71円/kWhといわれている。Hubbard (1991)によれば、石油をはじめ他のエネルギーコストは必ずしも実勢コストを反映しておらず、彼の試算ではペルシ

我が国の地熱資源量

高温熱水対流型地熱資源 (150°C以上)	2000万KW
基盤の岩石熱まで考慮	6400万KW

中温熱水系地熱資源 (90-150°C)	800x10 ¹⁸ J
低温熱水系地熱資源 (42-90°C)	1370x10 ¹⁸ J

第15図 我が国の地熱資源量

ア湾の石油を守るための軍事費を少なく見積って考慮しても23.5ドルもコストが上昇するとしている。将来、仮に環境税、炭素税なるものが導入され、二酸化炭素の排出源である石油、石炭などに課税された場合、地熱などの環境エネルギーの利用拡大が経済性の面からも推進されるかもしれない。

米国のPURPA法(Public Utility Regulatory Policies Act)などは、小規模発電・コージェネレーション・省エネ・再生可能エネルギー利用を推進し、大きな成果を制度面より上げている。第17図は、米国における地熱発電容量の推移を示したものであるが、PURPA法がどれほど貢献しているかを如実に示している。もちろん、このPURPA法の効果は評価せねばならないが、「安定で質の高い電力の供給」という側面をも含めた総合的な検討も必要かも知れない(第18図)。

イギリスの物理学者エモリー・ロビンズにより1976年に提唱された「ソフトエネルギーパス」の

地熱エネルギーの経済性

- 地熱 13-16円/kwh
- 水力 13円/kwh
- 石油火力 11円/kwh
- LNG火力 10円/kwh

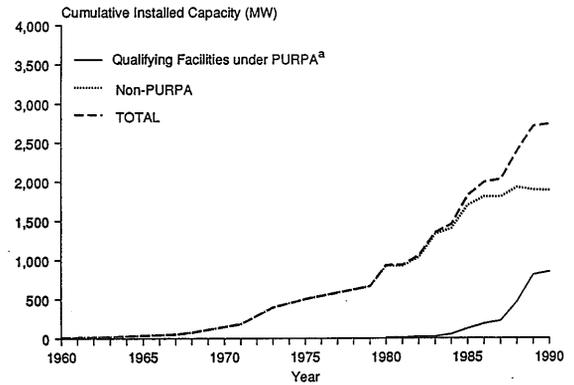
- 燃料電池 35-46円/kwh
- 太陽光 71円/kwh

仮に環境税、炭素税が導入され、CO2の排出源である石炭・石油などに課税された場合、地熱エネルギーの利用拡大が推進、加速される。

第16図 地熱エネルギーの経済性

考えは、エネルギー需要の質と量を検討し、その最終用途での利用効率を高めるようなエネルギー供給体形を目指している(第19図)。地熱・太陽・風力などの自然エネルギーを基軸とする小規模分散型エネルギーシステムへのアプローチが「ソフトエネルギーパス」であり、また環境に対しても穏やかである。今後は、大規模発電を目指すのみでなく、中小地熱発電(NEDOですでに実施・研究中)や地熱の排熱水を利用した熱水総合利用等の推進を図っていく必要がある(第20図)。このためのインフラ整備も法律・手続き面で必要で(第21図)、温泉法・自然公園法・国有林野法等の再評価、電源開発調整審議会等の手続きの見直しなど、時代に即した環境政策・エネルギー政策があつてしかるべきであろう。また自然エネルギー利用促進を加速させるような、税制・補助金・財政投融资等のソフトエネルギーに対する財政的優遇支援も考えていく必要がある。

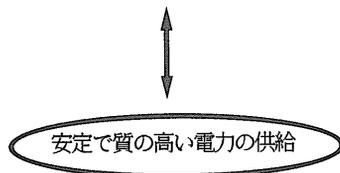
我が国の場合、地熱有望地域の半分以上は自然公園内に含まれており、どうしても開発と自然環境保



第17図 米国における地熱発電容量の推移(DOE, 1991)

PURPA法(Public Utility Regulatory Policies Act)

小規模発電・再生可能エネルギー・コージェネレーション・省エネを推進し、大きな成果を制度面より上げている。



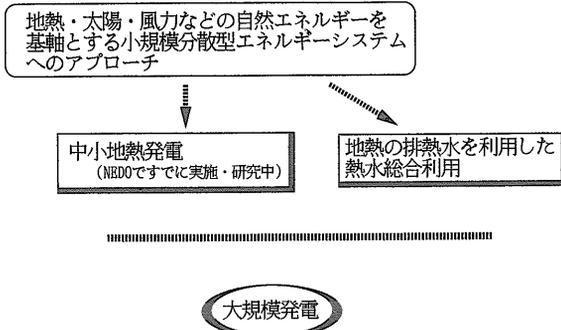
第18図 PURPA法

「ソフトエネルギーパス」

(エモリー・ロビンズ, 1976)

エネルギー需要の質と量を検討し、
その最終用途での利用効率を高める
ようなエネルギー供給体型

第19図 ソフトエネルギーパス



第20図 将来の地熱エネルギーの方向

時代に即した環境政策・エネルギー政策

法律・手続き面によるインフラ整備

- ・温泉法
- ・自然公園法
- ・国有林野法 等の再評価
- ・電源開発調整審議会等の手続きの見直し

自然エネルギー利用促進の加速

- ・税制
- ・補助金
- ・財政融資などの再評価

第21図 地熱開発促進のための方策

課題

地熱開発と自然環境保全との調整

我が国の場合、地熱有望地域の半分以上は
自然公園内に含まれる。

地熱開発側の技術開発への努力

発展途上国での地熱エネルギー推進

グローバルな視野・人口増大

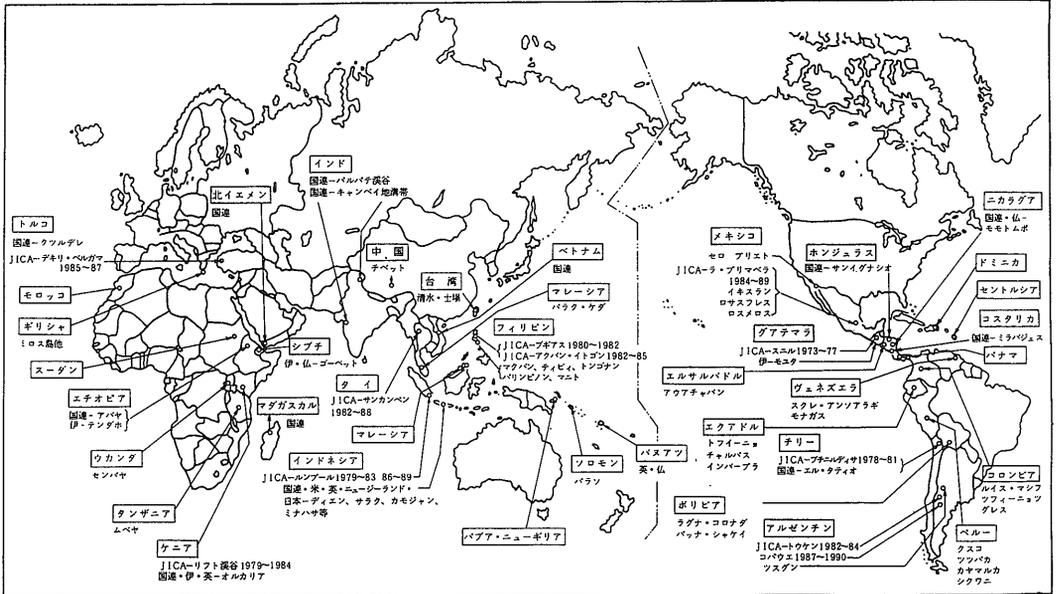
第22図 地熱開発における主な課題

全との調整が不可欠である。また、地熱開発における開発側の技術開発、テクノロジー追及の努力も決して疎かにしてはいけないことは言うまでもないことである(第22図)。

地球環境問題というグローバルな視点に立った場合、我が国の国内のみにおける地熱開発促進という近視眼にならずに、世界の発展途上国でのクリーンな地熱エネルギー推進を積極的に援助していく姿勢も非常に重要である。第23図は、発展途上国の地熱調査の一覧を示したものであるが、非常に多くの地熱開発可能性地域が全世界に広がっていることがわかる。21世紀に向けてエネルギー消費が必ずや増加し、人口増大が予想されるこれら発展途上国においてこそ、そのソフトエネルギー開発への貢献はゆくゆくは地球規模の環境問題解決の糸口となるはずである。

参考文献

- Brook, C. A., R. H. Mariner, D. R. Mabey, J. R. Swanson, M. Guffanti and L. J. P. Muffler (1979): Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures $\geq 90^{\circ}\text{C}$, Assessment of geothermal resources of United States - 1978, U. S. Geological Survey Circular 790, p. 18-85.
- Cataldi, R., A. Lazzarorro, P. Muffler, P. Suarici, and G. Stefani (1978): Assessment of geothermal potential of central and southern Tuscany, Geothermics, vol. 7, no. 2-4, p. 91-131.
- DOE (1991): Geothermal Energy in the Western U. S. and Hawaii, p. 70
- Donaldson, I. G. and M. A. Grant (1978): An estimate of the resource potential of New Zealand geothermal fields for power generation, Geothermics, vol. 7, no. 2-4, p. 243-252.
- Goddard, W. B., Goddard, C. B. and McClain, D. W. (1989): Future air quality maintenance and improvements through the expanded use of geothermal energy, GRC Transac., 13, 27
- Hubbard (1991): H. M., Scientific American, 234, 4, 36
- 金原啓司 他(1984): サンシャイン計画研究開発成果中間報告書, 117
- 金原啓司 他(1985): サンシャイン計画研究開発成果中間報告書, 287
- Moskovitz, D. H. (1990): Annual Review of Energy, 15, 399
- 宮崎芳徳 他(1986): サンシャイン計画研究開発成果中間報告書, 285
- 宮崎芳徳 他(1991): 地質調査所報告, 275, 17
- Muffler, L. J. P. and R. Cataldi (1978): Methods for regional assessment of geothermal resources, Geothermics, vol. 7, p. 53-89.
- 日本地熱調査会(1991): 我が国の地熱発電の動向, p. 74
- 日本地熱調査会(1970): 地熱, 3, 1
- NEDO (1990): 期待される地熱開発, p. 35
- NEDO (1989): 地熱資源量に関する調査



第23図 発展途上国の地熱調査一覧図(NEF, 1990)

小川克郎(1985): 物理探査プロジェクトの紹介「全国地熱資源総合調査」および「全国地熱資源基本図の作成に関する研究」, 物理探査, vol. 38, no. 2, p. 24-40.

小川克郎(1986): 日本の地熱資源の評価, 地質ニュース, no. 377, p. 8-17.

Renner, J. L., D. E. White and D. L. Williams (1975): 'Hydrothermal convection systems' In Assessment of geothermal resources of the United States - 1975, U. S. Geological Survey Circular 726, p. 5-57.

角 清愛(1979): 日本の地熱資源評価, 地質ニュース, No. 295, p. 1-9.

角 清愛(1982): 日本の熱水対流系地熱資源の評価, 新エネルギー

- 財団昭和56年度地熱開発技術講習会テキスト, p. 1-41.

通産省サンシャイン計画推進本部(1977): 全国地熱基礎調査報告書, p. 209, 日本産業技術振興協会

White, D. E. and D. L. Williams (1975): Assessment of geothermal resources of the United States - 1975, U. S. Geological Survey Circular 726, 155pp.

MIYAZAKI Yoshinori (1992): Geothermal resources and Global change.

<受付: 1992年7月6日>