

地熱エネルギー研究開発への取り組み

—深部・高温地熱環境への挑戦—

長谷 紘 和¹⁾

はじめに

近い将来わが国の発電設備容量が倍増することが期待されているが、西暦2000年の時点での期待量100万KWの目標達成には相当な努力が必要で、目標達成に向けて最大限の努力と即効的な手段が求められている。

これを受けた研究開発の立場からは先ず地下の断裂を把握する技術の重要性から現在「断裂型貯留層探査技術開発」に関する研究を進めているが、更に今後を展望すれば次の点が重要である。

地熱エネルギーの開発利用は立地上の制約から開発域が大きな制約を受けることから、地熱流体採取深度は未開発空間である地下深部へとむかいつつあり、また火山性の過酷な地熱環境への遭遇の機会も増している。したがってこのような地熱環境を把握し掘削する技術の必要性が一段と高まっている。

この技術課題の克服は容易なものではなく、世界的な研究協力によって少しでも早期に目標への到達を図ることが必要となっている。

地熱を代替可能エネルギーとしてとらえ、浴用や低温の地熱利用をも含め末永く利用することが求められている。鍵は何か。その回答は地下深部あるいは火山からの熱供給構造の理解を通して得られるであろう。

本稿は去る6月12日に行われた地質調査所研究講演会「21世紀のエネルギー：地熱」の原稿に加筆修正したものである。

1. 熱的にきわめて優勢な日本列島

改めて言うまでもなく、自然エネルギーの中で太陽エネルギーは膨大であり、地球—大気圏で生じる

諸々の物理現象のほとんど全ては太陽エネルギーによるものである。地球大気圏外縁で地球が受け止める太陽エネルギーは太陽常数として知られ、太陽エネルギーが平均的に地球表面に降りそそいだとみなすと年間約263 klyとなる。この量を単位として他の自然エネルギーを比較したものが気候学の教科書に示されている(第1, 2表)。

単位時間当たりの比較では太陽エネルギーに較べて地殻の平均伝導熱流量から算出される地殻熱エネルギーはきわめて小さい。地殻伝導熱流量は地殻中の放射性物質の崩壊の際の発熱によるものの他、わが国のような変動帯においては地殻下部のマントルからの熱寄与がこれに上乘せされている。日本列島が、広域にわたってマントルからの熱構造の盛り上

第1表 大規模なエネルギー源の比較 (Sellersによる)

年間地球にふり注ぐ太陽放射エネルギーを単位として 1(263 kly/y)	
地殻熱流量	18×10^{-5}
満月からの赤外放射	3×10^{-5}
月からの反射による太陽放射	1×10^{-5}
雷による放出エネルギー	6×10^{-7}
磁気嵐によって放出されるエネルギー	2×10^{-7}
星からの全放射エネルギー	4×10^{-8}

第2表 1日に地球にふり注ぐ太陽エネルギーを単位とした場合のエネルギー量の比較(出典 表1と同じ)

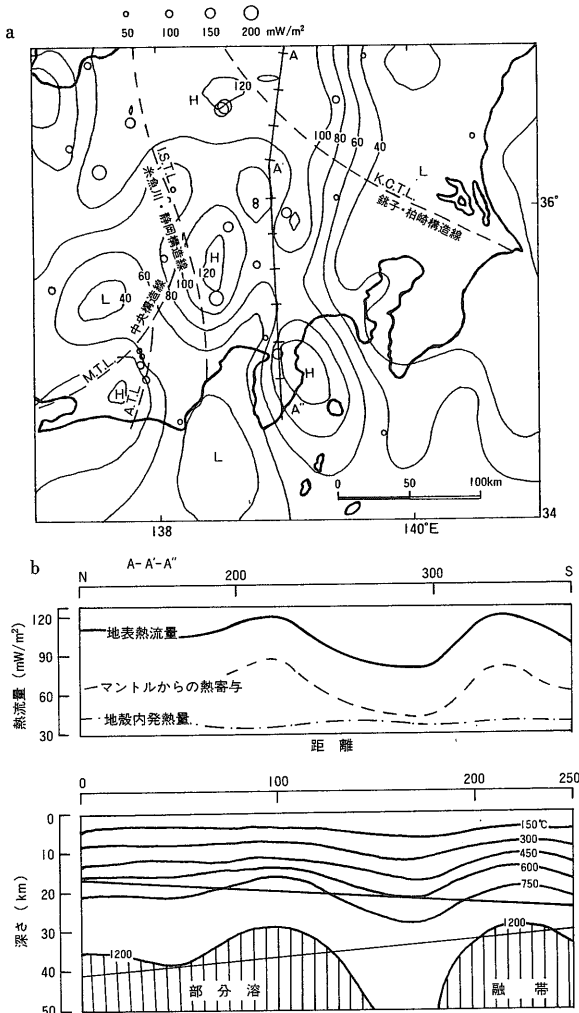
1日の太陽エネルギー量	1
普通の地震—強い地震	$10^{-8}—10^{-2}$
平均的熱帯低気圧の保有エネルギー	$10^{-3}—10^{-4}$
1883年クラカトア島の噴火	10^{-5}
平均的磁気嵐の保有するエネルギー	10^{-7}
平均的夏の雷が保有するエネルギー	10^{-8}
7000トンの石炭燃焼エネルギー	10^{-8}
平均的竜巻が保有するエネルギー	10^{-11}

1) 地質調査所 地殻熱部

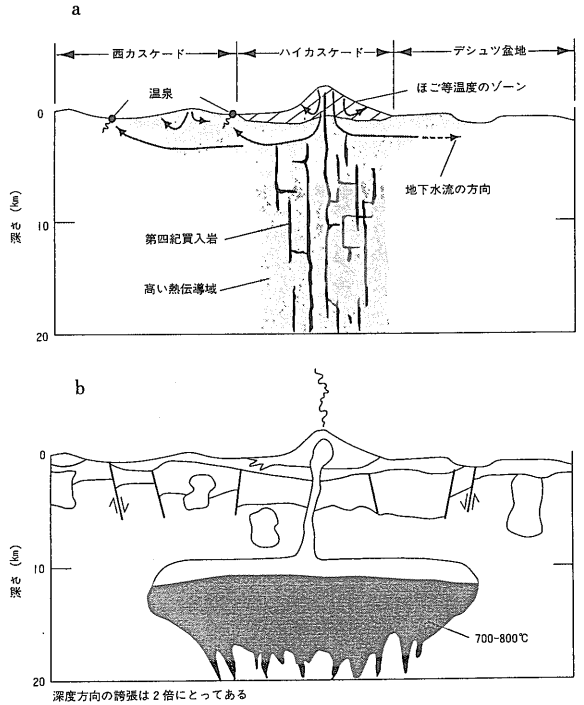
キーワード：熱水系ダイナミクス, マグマ, 深部地熱資源調査, ホワイト島計画の現状

がりの上に位置しており、熱的にはきわめてポテンシャルの高い地域になっていることが最近早川正巳教授等によって刊行された教科書に示されている(Tuezov 他) (第1図)。

現在発電等の対象としてまとまった形で利用の対象としている地熱エネルギーは、天然熱水系とよばれ、地下水を担体として地熱エネルギーを取り出すもののうち地殻の比較的浅部にまとまって存在するものに限られる。この存在状態は、「地熱貯留層」あるいは「地熱レザバー」と呼んでいるが個々の「地熱貯留層」については稼働中の地熱発電所のそれを



第1図 わが国の熱ポテンシャルの高さを示す図 (Tuezov, Yapaneshnikov, 早川による)。
a 関東を中心とする地域の熱流量分布図(簡略化して示した)
b A-A'-A' 側線に沿う熱構造断面図



第2図 地殻下部熱構造推定に当たった際の違った違いの例
a: Ingebritsen のモデル
b: Blackwell のモデル

除いて詳しいことは分かっていない。

残念ながら地下深部の熱構造、流体挙動については実証データがほとんど欠けているため、専門家の概念においてすら大きな違いがある。第2図は米国ハイカスケードの火山性地熱地域の地下熱構造推定例である。第2a図では地表データとして流体化学データに、第2b図では物理的データに重点を置いたモデルが示されているが、同一地域を対象にしてもかかわらず地下深部の熱構造の概念は際立った違いを示しているのが良くわかる。

2. 地熱流体挙動の鍵を握る熱水系ダイナミクスの研究

マグマに起因する高温の熱注入が地下の比較的浅部になされ、高温地下水の貯留部を伴って「地熱貯留層」の形成がなされる場合の持続期間は数万年程度になり得ることが数値解析によって示されている。天然熱水系では数千年から数万年の年月にわたって貯留構造が形成・維持されるとみなされる。一

般には一度形成された「地熱貯留層」は以後冷却過程にあるとして取り扱われるか、或いは定常的温度場の下で取り扱われることが多い。しかし火山国のわが国では実際に頻繁な熱供給の繰り返しがあると見てよい。地質調査所が編集した日本の火山(第2版, 1981)によれば、わが国の更新世以降の火山は245が数えられている。これはマクロには7-8千年に一つ、溶岩や火砕物を噴出させた相当規模の火山活動があったことを示している。245という数は一つの火山(群)について可能な限り細分して扱われている。しかし「熱水貯留層」との関連から見るとこの数はもっともっと多いものと推定される。例えば九州の九重火山、豊肥火山はそれぞれ一つの火山として扱われているがこの二つの火山の噴出中心の数は少なくとも10ヶ以上ある。地表に噴出口を持たない貫入岩のような熱注入形態の存在をも考えると、浅部地殻内で火山活動に起因して形成される熱源の数は更に多く、それらのうち形成年代の古いもの、そして新しいものでも小規模のものはもう冷却してしまっているとしても、数万年程度より若い時代に浅部地殻内に供給され、地熱資源の熱源となり得るものの数はもっと多いはずである。

平成3年度から地質調査所が開始した「熱水系ダイナミクスに関する基礎的研究」は、断裂に支配された「地熱貯留層」の生産変動予測を可能にするための研究として開始した研究である。熱水系ダイナミクスの研究ではまず現存する「地熱貯留層」が加熱状態にあるのか、定常状態、あるいは衰退状態にあるのか、といった発達過程を明らかにし、地熱発電所における生産、還元に伴う地熱流体の強制的な流動に伴う熱水系の変動を予測する研究を目指している(研究グループ長: 石戸恒雄)。

本研究は更には地熱を再生可能エネルギーとして永続的に利用していくための研究へと進めていくことが期待される。手法的には近年技術進展がとくに著しい火山岩年代測定技術や流体包有物の分析技術、同位体分析技術、重力、自然地震、自然電位等の精密測定解析技術等を適用して研究を進めることになる。

天然熱水系地熱資源利用では熱の問題と併せてエネルギー担体としての地下水挙動が重要であり、その把握の上に立って賢明な利用を考えていくことは21世紀へ向けた大きな課題である。

3. マグマへの具体的取り組みに向けて

3.1 始まっているマグマへの挑戦

地熱エネルギーの本源的熱源としてのマグマへの具体的な働きかけが既に開始されている。それは活動的な火山に積極的に掘削を行いマグマ近傍の熱構造を含む火山性流体の実態を実証的に明らかにしようという試みや、溶融した溶岩の中からエネルギーを抽出しようという試み等として行われている。

このような研究の先端を走っているのはやはり米国である。同国サンディア国立研究所のH. Hardee博士をリーダーとする研究チームが、1975年から1982年にかけてエネルギー省(DOE)基礎エネルギー科学局の予算の下にハワイのキラウエア・イキで溶融した溶岩からの熱抽出を行った実験研究は知る人ぞ知る画期的な出来事と言えよう。

この研究では特製のジェット噴流水冷却掘削方式でビット部分を冷却することにより250°Cの温度条件で掘削を行い、最高温度1,650°Cの溶岩湖を最深70 mまで掘削、同時に21 m長のコア(原状では溶融状態の溶岩)採取にも成功した。博士によって示された坑井を上から覗いた写真では坑内が赤熱して赤くなっており、しばらく放っておけば溶融状溶岩で塞がってしまうのであろう。この坑井に注水し熱交換器を用いて一週間の連続抽熱実験を行った結果では、実験後半ほど熱抽出量が増加する傾向で実験を終了した。この間半定常的な状態で熱抽出が行われ最高で180 kw/m²の抽熱に成功したのである。

Hardee博士は1991年2月、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO, 以下同様)の招きによって来日しNEDO、地質調査所で特別講演を行ったが、人類の究極的課題であるマグマ熱エネルギーの利用に向け積極果敢に取り組んだ実験研究結果の講演に参加者は深い敬服の念と感動を覚えたものである。

わが国では九州大学の江原幸雄教授らによるマグマからの熱エネルギー抽出を目指した基礎的研究が九州の九重火山硫黄山地域を対象として開始され(江原・茂木, 1990)1991年には高温地域での基礎的掘削が行われた。本計画は今年も継続して行われる予定である。

3.2 熱源にせまれるか「地熱熱源に関する基礎的研究」

マグマへの取り組みはサンシャイン計画の中でも研究の必要性について位置づけが次第に明確にされてきている。

産業技術審議会新エネルギー開発部会は「サンシャイン計画の今後のありかたについて」(中間報告：1990年(平成2年)7月)による、長期的新エネルギー技術開発戦略上の位置づけ、の中で、長期的課題としての「マグマ発電」(西暦2020年頃)と、そのための研究開発の必要性についてふれている。これを受けて同部会地熱分科会では、1991年(平成3年)8月、「地熱エネルギー技術開発のあり方について(中間報告)を行い、その中で長期的な視点等から行う技術開発の一環として、「マグマについては国際的な視点も踏まえ調査及び基礎的な研究開発をすすめる」としている。同分科会では更に詳細な検討を行うため、技術開発体制検討小委員会を設置し、引続き検討を進め、1992年(平成4年)3月、結果のとりまとめを行った。この報告の中では、NEDOが計画している「深部地熱資源調査」に関連して、「今後も、例えば、深部地熱資源開発に関連した知見が得られ、高温地熱環境下での掘削技術の進展にとって重要と考えられるマグマ近傍掘削プロジェクト等国際的な共同プロジェクトが想定される。このような国際的な共同プロジェクトについては計画段階から海外の関連機関と意見交換を行うことが重要である」としている。

地質調査所でもマグマに係わる課題の研究に、まだ基礎的段階ではあるが着手した(研究グループ長：村岡洋文)。

マグマそれ自体が持つエネルギーの把握と制御、利用に関する課題は人類の究極目標の一つであり、そのような課題を技術課題として設定できるようになるまでは基礎段階にかなり長期間の年月が必要である。しかし一歩々具体的にアプローチしなければ目標への到達は一向に望めないことは明らかである。

マグマが保有する熱エネルギーがいかに膨大なものであるのか。わが国のようなマグマに本源を持つ地熱国の地下10 km 深から上部の地熱エネルギーを見積もった一つの試算結果によれば、ストック量だけで電力換算9億 kW×30年を超える発電量に

なり、これは現在のわが国の全発電設備容量1.6億 kw の規模で発電を行った場合200年近くまかなえる計算になる。

マグマ熱エネルギーの直接的利用はまだ先の課題であるとしても、マグマ近傍における火山性地熱流体に係わる問題は今日の地熱掘削調査でもしばしば経験する現実問題である。温度、地熱環境等技術的に到達可能な目標をたてつつ難度の高い目標に向けて一歩々技術的な課題を克服していくことは現状に照らしても重要な意味合いを持っている。

4. 地熱研究で明らかにされた成果

4.1 注目すべき成果の例

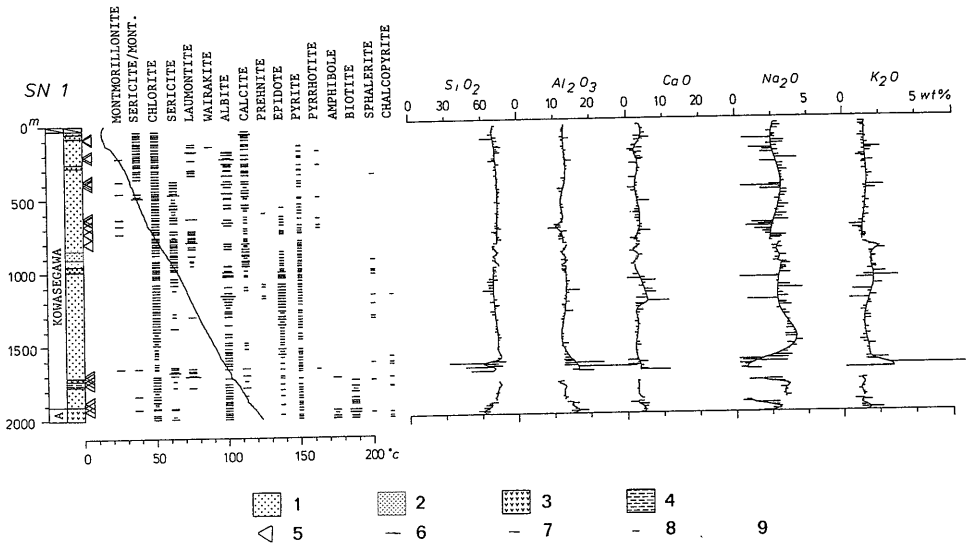
地熱エネルギー利用に関するプロジェクトを通して得られた科学的成果の中でもっとも大きいものは何であろうか。何といたっても素晴らしいことは、地下地熱構造、流体挙動、物性等が坑井データにより実証的なデータとして明らかにされつつあることである(例えば矢野、1992)。

これらをもとに地熱に関連する研究の中から貴重な成果がいくつかではじめている。私見では、山地の地下水挙動についての理解が格段に進んだことが地球科学的に大きな成果ではないかと感じている。

山地の地下水挙動、とくにレコ水としてのそれについては学生時代、酒井軍次郎先生から集中講義を受けたことがあり、自分では不可知論的な受けとめ方をした記憶がある。

地下水の流動は非常に緩慢であるが地熱地域ではこの動きがはるかに捉え易くなっている。人工的に熱水の生産・還元が行われている地熱発電所では流動が相対的に迅速であり、そこでは断裂に支配された水流動も既に技術的対象として扱われている。また坑井試料の分析によってかなり広域にわたる地下水挙動の実態が明らかにされつつある。一例として仙岩地域でなされた研究例を簡単に紹介する。

秋田、岩手両県にまたがる仙岩地域はわが国でも代表的な広域地熱地域として知られ、調査のため多くの坑井が掘削されている。これらの坑井のうち深度1,200 m -2,000 m にわたる9坑井から得られた岩芯試料543試料を用いて、ICP 発光分析法及び湿式分析法とによって全岩化学分析とX線回折法による変質鉱物の分析がなされた(竹野・野田、



第3図 仙岩地域 SN-1 坑の変質鉱物分布と全岩化学組成の変動例 (竹野, 野田1987より)

化学組成図中の縦の曲線は本文中に述べる方法で化学組成を平滑化したもの。温度検層データは120時間放置後。1: 流紋岩凝灰岩(一部溶結), 2: デイサイト凝灰岩(一部溶結), 3: 安山岩, 4: シルト岩, 5: 逸水層, 6: 大量, 7: 中量, 8: 少量, 9: 微量, A: 阿仁合層。

1987). 分析はとくに地熱流体の挙動が顕著とみなせる熱水変質を受けた部分を中心に行われたものであるが、熱水流動があったところでは熱水変質に伴い分子・元素レベルでの組成に変化が見られる。この地域で玉川溶結凝灰岩と呼ばれる、塊状で割れ目の発達しない火砕堆積物の部分でほとんど組成変化が見られないところがあることである(第3図)。玉川溶結凝灰岩は約200万年ほど前の流紋岩質火砕流で強度の溶結相を示す。地熱地域は水文地質学的には浸食・堆積条件の変化が大きく、かつ地下水が流動し易い場がある。しかしながら、200万年にわたってほとんど地下水が流動しない地下条件が形成されているということはきわめて興味のある事実と言えよう。

4.2 成果公表は今のままでよいか

地質調査所では、第2次大戦後間も無い頃から地熱の調査研究を行ってきた先輩諸氏の研究基盤の上に立ってサンシャイン計画発足以後、地熱探査技術の研究開発分野を担当、これまでNEDOと共同研究体制のもとでプロジェクト研究としての「地熱探査技術等検証調査」及び「国土地熱資源評価技術に関する研究」ならびにシーズ的研究としての「深部地熱探査技術に関する研究」を分担してきてい

る。プロジェクト研究の成果についてはとりまとめ逐次公表してきたところであり(第3表)、地図や邦文報告成果をもってわれわれは社会的な役割を基本的には果たしてきたものと考えていた。

しかし最近、世界の地熱界がわが国の地熱動向及び研究成果に強い関心と期待を寄せていることを肌で感じ、国内向けの成果公表のみで良しとしてられないことを実感している。

「石油危機」以降、各国は石油代替エネルギーの開発に力を入れてきたが、世界の他の国々とともにわれわれは先進諸国の中でとりわけ米国の地球科学分野における卓抜した見解及び技術開発分野における先導性に相当程度依存してきた点は否めない。米国の地熱に関する地球科学的成果は学会、シンポジウム等での発表や研究論文として容易に接することができた。

ここ数年来米国の代替エネルギー関連予算が大幅に削減される中で、地熱分野における米国の活動は今までどおりにはいなくなつた。現在わが国は、地熱エネルギー開発利用及び研究開発に関して世界でもっとも大きな国費の投入国となっている。各国がわが国の地熱動向に注目し、成果に関心が集まるのも当然のことであろう。しかし、彼等の側から見

第3表 サンシャイン計画のもとでなされた調査研究結果の公表例(1992年6月現在 地質調査所)

研究報告書		
豊肥地熱地域における研究	1985	地質調査所報告 No. 264
地熱情報データベース・システムの研究	1986	地質調査所報告 No. 265
仙岩地熱地域における研究	1987	地質調査所報告 No. 266
栗駒地熱地域における研究	1988	地質調査所報告 No. 268
日本の主要地熱地域の地質と温泉・変質帯分布	1989	地質調査所報告 No. 270
日本の地熱調査における坑井データ, その1	1989	地質調査所報告 No. 271
γ測定データ—物性, 地質層序, 年代, 化学組成—		
日本の地熱調査における坑井データ, その2	1991	地質調査所報告 No. 273
検層データおよび地質柱状図データ		
日本の地熱資源評価に関する研究	1991	地質調査所報告 No. 275
図面類		
豊肥地熱地質図1:100000及び説明書	1982	特殊地質図21-1
仙岩地熱地域地質図1:100000及び説明書	1985	特殊地質図21-2
栗駒地熱地域地質図1:100000及び説明書	1986	特殊地質図21-3
八甲田地熱地域地質図1:100000及び説明書	1988	特殊地質図21-4
仙岩地域中心部地熱地質図1:50000及び説明書	1982	特殊地質図21-5
1/50万地熱資源図「新潟」及び説明書		印刷中
1/50万地熱資源図「秋田」及び説明書		編集中
1/50万地熱資源図「青森」及び説明書		編集中
その他		
研究資料集等		

るとわが国からの研究成果を通じての貢献は少なすぎると映っているようである。今様に言えば「情報発信基地の立場として不十分である」とみなされているようである。研究内容を理解するためには論文がもっとも重要であるが、彼らにとって邦文の成果報告はほとんど参考にできないのが現実である。国内の地熱の学会に参加した外国人から、聴衆が全て日本人であること、発表が全て日本語で行われることの奇異感を告げられ、むしろ反対に驚きすら感じたことがある。われわれは国内学会であるからそれ

は至極当然なこととして受け止め、なんら不思議を感じないのであるが、世界はそのようなわれわれの認識以上に動いているとも言える。もちろん研究成果のみが原因でないことは承知であるが、国際性のある言語で成果を公にしていく必要性が増している。世にいわれるグローバル化に対応するための自己努力は容易ではないが、努力を継続して行かなければならないことを認識する必要がある。

5. 「深部地熱資源調査」の開始

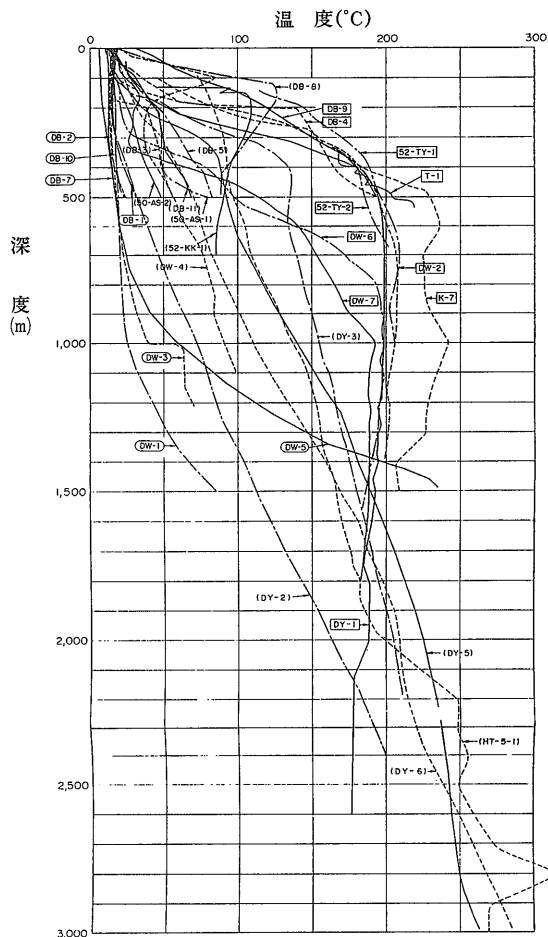
地下1.5 km 深程度までの実証的な坑井データはこれまでの地熱坑井調査によってかなりの数になった。それらを通してわれわれは、地下物性に関する幾つかの普遍的な事実を知りつつある。例えば地下温度の垂直分布は多様だが(例えば第4図)次のいくつかの型に区分できることが知られてきた。1) 地下深部に向けて直線的に温度上昇を示す伝導的溫度上昇型 2) 地表からある深度までは温度の上昇がほとんど見られず地表からの地下水の流入の影響が卓越する下降流型 3) 地下深部から地表または地下浅部まで高温で温度変化があまりない上昇流型 4) 以上の複合した不規則型。

また坑井掘削結果から示される岩石の孔隙率の深度分布からみて地下2 km 程度以深では有効孔隙として期待できるのは断層によるものに限定されること(第5図)等である。

しかしさらに深部についてはどうであろうか。高い温度傾度で直線的に地下温度が上昇する伝導卓越地域では地下深部までその傾向が連続するのだろうか。あるいは地下浅部から深部にかけて多段的に熱水貯留部が発達するような地域が数多くあるのだろうか。それらの疑問に答えるにはデータが少なすぎる。

仙岩地域では、サンシャイン計画の一環として基盤への貫入岩中に掘削されたSN-7-D と呼ばれる深部坑井から深度2,325 m 付近の貫入岩中の割れ目を中心に、総流量最大443.5 t/h(蒸気量146.7 t/h, 熱水量296.8 t/h, 温度300°C以上)の多量の地熱流体が得られ注目されている。また、現在稼働中の地熱発電所でも深部掘削坑井から優勢な地熱流体の噴出を見る例が報告されてきている。

このような事実を踏まえて地質調査所ではわが国

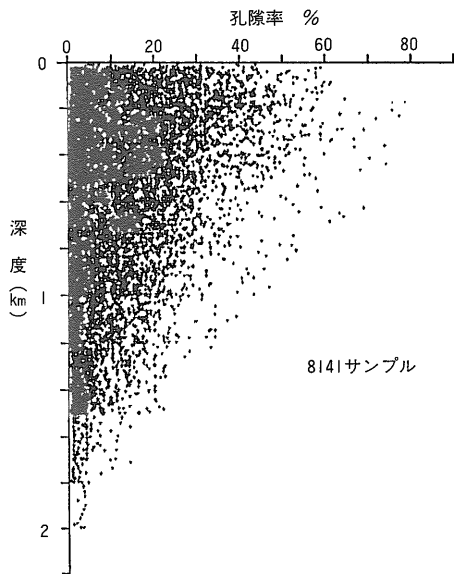


第4図 地熱地域における地下温度例(通商産業省, 1987)

の地熱資源量評価を行った際、「地熱貯留層」を形成する第三紀以降の堆積物の下位に位置する基盤内厚さ1 kmの部分について、「容積法」によって評価を行った(宮崎, 1991)。基盤が陥没した地域も含めて基盤内の地熱資源量評価を行ったのはこれが最初であるが、深部地熱資源量についてはまだ試算の域を超えていないと言うべきであろう。

地熱開発初期の頃、地熱流体の温度は世界的に240°C程度までのところが多かった。しかし近年では最高温度250°C以上の地域も増えてきている(第4表)。またわが国の地熱エネルギー利用の深度が次第に地下深部におよびつつあるのは事実である(第6図)。地熱坑井の高温化と深部化は世界的な傾向といつてよい。

わが国の地熱界では、従来開発されてきた「地熱



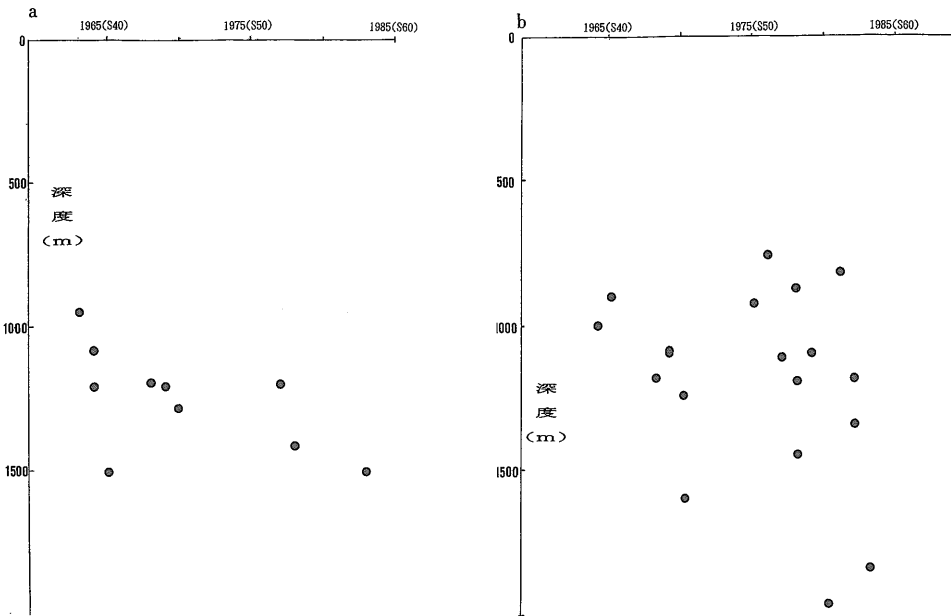
第5図 わが国の坑井掘削結果による深度分布(矢野 未公表資料)

第4表 世界の高地熱温度掘削例(250°C以上)(Bjornsson & Bodvarsson, 1990)

国名	地熱地域名	高温域温度範囲(°C)
ギリシャ	Molos	<320
グアテマラ	Zunil	265-285
アイスランド	Krafla	300-350
	Nesjavellier	300-400
イタリア	Mofete	<350
ケニア	Olkaria	300
メキシコ	Cerro Prieto	280-340
	Los Azufres	<270
ニュージーランド	Broadlands	270
	Mokai	300
フィリピン	Mac Ban	300-320
	Palinpinon	300-320
	Tongonan	300-320
米国	Baca	270
	Salton Sea	<350

貯留層」の下部に賦存している可能性が考えられる深部地熱資源は早期に開発利用の実現性が高い地熱資源として期待が高まっている。NEDOは地熱地域の地下4,000 m程度の掘削を行う「深部地熱資源調査」を今年度から発足させることとしている。

本調査では、深度2,000 m以深の深部地熱貯留部に対して地下更に深部から供給される熱の供給構



第 6 図 松川(a)及び八丁原(b)における生産井の掘削年次と深度の変化
(日本地熱調査会, 1985に基づき作成). 年次は掘削終了時点の年次を示す.

造, 基盤内断裂発達状態, 天然熱水系を形成する地下水循環等について貴重なデータが得られることが期待される. 調査計画では深部坑井掘削は1本である. 探査技術の観点では掘削結果をもとに「深部地熱資源」について一段と確度の高い賦存概念を確立しそのような難対象の探査の手法について展望を得ることが大きな課題と言えるだろう.

「深部地熱資源調査」のように未踏領域への挑戦を含む技術課題を据えての調査は基礎調査的性格が強いものである. しかし他面予算規模が大きくなると, 予測される成果への期待が過大に設定されるきらいがある. 調査計画が科学的性格に欠けるものであってはなるまい.

米国地質調査所(USGS)の地熱研究プログラムは, 科学的認識の重要性の基礎の上に立ったきわめて正統なものとして組まれている. すなわち, より正確な地球科学的基礎事実の理解に基づく, 1) 資源評価にかかわる研究 2) 地下深部の理解に関する研究 3) 探査及び評価に関する研究, を柱としている. 資源評価では同国において地熱資源評価上議論が盛んな米国太平洋岸カスケード地域のそれが当面の研究課題であり, 広域地質, 地球物理, 水理の研究や, 同位体化学・貯留層工学的な手法による熱水系ダイナミクスに関する研究とともに, 若い火

山及び熱水系の下底部におけるマグマ/地熱流体相互関係把握のための研究等がテーマとして上げられている.

6. ホワイト島科学掘削計画と現状

6.1 国際共同研究に向けて

もう4年近く前になるが, ニュージーランド北島プレンティ湾の沖合約50 km に位置する活動的火山, ホワイト島を対象に, マグマ-熱水系研究のための科学掘削が提案され世界の関連機関に対し研究参加の呼びかけがなされた(EOS, 1989). この研究主提案者である Hedenquist 博士(現当所職員)と Giggenbach 博士が1989年秋地質調査所を訪れ提案趣旨説明と計画参加の呼びかけを行ったのが本計画への参画の発端である. 地質調査所では具体化を検討することとしたが, わが国とニュージーランドとの間には二国間の科学技術協定がなされていないことから, 掘削を含む共同研究の実施には両国関係機関相互の研究協力の位置付けが必要であった. 研究協力に関する覚書は, 1990年7月, ニュージーランドのパーマー首相来日を機に同行した同国科学研究省(以下 DSIR)のコリンズ長官と石原舜三所長(当時 現院長)との間で「地球科学分野の協力に関

する覚書」として取り交わされた。DSIR での研究の実施主体は同省傘下においてわが国の地質調査所と類似機関である Geology & Geophysics であり以後両機関は組織的な協力体制のもとで相互検討を進めてきている。DSIR は機構再編のさ中であり1992年7月から同省傘下の研究所は12のCRI (Crown Research Institute) に再編され、Geology & Geophysics は核科学部門を統合し IGNS (Institute of Geological and Nuclear Sciences; 以下 IGNS) と名称も変更された。ただし組織的には従来同様わが国の地質調査所と類似性が強い機関となっている。

同島の科学掘削計画そのものについては、本誌にも紹介されており(Giggenbach 他, 1991, 玉生, 1991)説明はそちらにゆずる。

最近 Giggenbach によって1991年時点のモデルに圧力分布を想定したモデルが示されている。このモデルではガス相、あるいはガスと塩水からなる領域では圧力は温度に支配され岩圧にはよらないとの考えが示され、地下浅所はガス平衡状態にあり高压ガスに遭遇することは無いとの考えに立っている(第7図)。しかしポケット状の高压部の存在を否定することはできない、との意見もあることも付け加えておく。

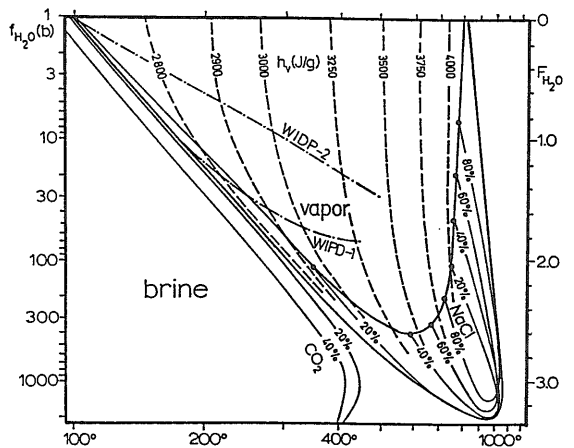
掘削予測では浅部坑井(WIDP-1)が地表から沸騰曲線にほぼ沿う条件からややガス相に入るような温度条件下でなされ、深部坑井(WIDP-2)がほぼガス相下で掘削されることを示している(第8図)。この予測設定が正しければ、流体採取は浅部坑井が興味深いことになる。現場では地表で沸点以上の高温を示す地点は噴気・硫気孔に限定され、少なくとも地表付近の温度はさして高くないので、掘削に入る際には現在地質調査所が検討している物理モデルも併せて詳細な検討が必要であろう。

6.2 ホワイト島掘削計画の現状

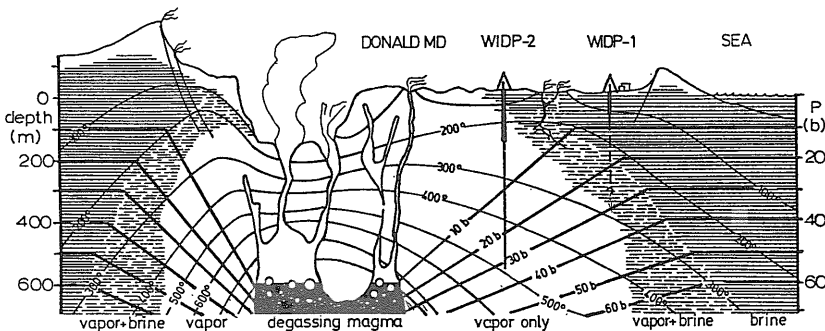
全体計画ではこれまでの調査データの蓄積に加えて2年間補足的な地表調査を行ってより詳細な同島のモデルを作成しそれをもとに掘削計画に入る計画となっている。IGNS では同国の1991年度(1991年7月-1992年6月)及び1992年度予算にかけて火山層序・岩石、火山岩年代、温泉・変質、リモートセンシング、重・磁力、自然電位・比抵抗等の調査解析を行う計画で現在調査を実施中である。

地質調査所は1991年度(平成3年度)及び1992年度(平成4年度)にかけて科学技術庁の個別重要国際共同研究予算によりホワイト島における地球物理モデリングに関する研究を行うこととしており、IGNS と共同で自然地震観測と解析研究を分担実施中である。1991年度については現地での観測を既に実施し(写真1)、現在その結果の解析を実施中である。

NEDO は地質調査所と同様 IGNS と協力関係にあり、サンシャイン計画の中で1992年度に実施す



第8図 坑井掘削地点(WIDP-1; 図では WIDP-1 となっている)及び WIDP-2)の流体相予測(第7図と同様)。



第7図 ホワイト島の地下温度・圧力モデル(Giggenbach 未公表資料)。

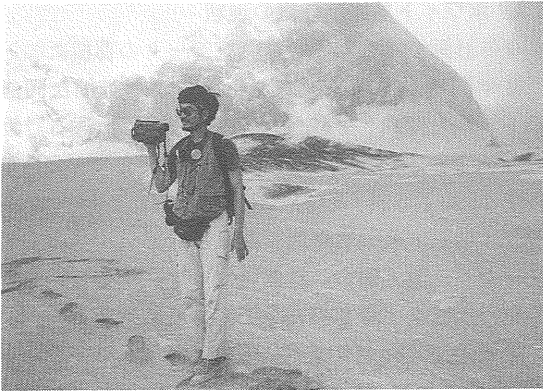


写真1 ホワイト島で自然地震観測中の西祐司技官
月面を思わせる火山灰、防御ガス防御用マスクが
ものものしい。(1992年3月3日撮影)。

る調査手法検討の一環として、わが国が1992年2月に打ち上げた資源衛星 JERS-1 の光学センサを用いた熱水変質帯の識別と区分のための調査を行い、技術評価と手法の検討を IGNS とともに計画している。このためホワイト島を含むニュージーランド北島タウポ広域地熱地域をモデル地域として選り計画を進めている。

本掘削計画によって期待される科学的成果は地球科学の広い分野から生命科学に至るまで、世界的にも期待が大きい、それらのうち火山性流体の挙動や高温地熱環境の実態把握及びそのような環境下における高温掘削、検層の経験は今後のわが国の地熱エネルギー開発利用にとってもきわめて寄与が大きいと推定される。地質調査所と NEDO は掘削計画についてサンシャイン計画の中で実現を図るべく工業技術院と検討を続けている。

しかし、地表調査に続く掘削計画については、IGNS の予算面での制約から掘削費用はほとんど期待出来ないことが明らかになり、また、ニュージーランド及びわが国双方とも活動的火山近傍の地下浅部で400°Cを超えるような高温が予想される地点での掘削(深度200 m-600 m)経験がないことから、計画の具体化に問題が生じていたのである。

6.3 ホワイト島掘削ワークショップ

1992年6月18日から21日にかけて米国カリフォルニア大学リバーサイド校において標記のワークショップが開催された。

米国はこれまで本計画には参加していなかったが、研究パートナーとして是非参加したいとの声が

同国内で強まっている。このため米国の科学掘削計画に参与するエネルギー省(DOE)、内務省地質調査所(USGS)、大学科学掘削コンソーシアム(DOSECC)、サンディア国立研究所等の関係者を集め、それに日本、ニュージーランド、フィリピンから関係者が参加してワークショップが開催された。世話人代表はカリフォルニア大学リバーサイド校の W. Elders 教授である。

ワークショップは開催期間は短かったもののその後に行われたソルトンシー及びメキシコへの地熱地域巡検の間も含めて熱心な議論と意見交換が続けられ、中身の濃いものであった。会議を締め括るにあたって、米国にとっての最大の結論は、同国が後発ではあるが国際研究協力の一員として 1) 科学的調査研究にアド・オンの的に参加すること、2) 高温酸性地熱環境下での掘削、検層、試料採取に参加し同国が開発した技術の適用試験を行うこと、3) 掘削費用の部分負担を行うべく同国政府機関へ働きかけること、の諸点について統一的な結論を得たことである。

同国では高温地熱環境下での科学掘削計画としてアラスカにある活動的火山であるカトマイ火山火口での掘削計画が検討されている。このため DOE 予算の下でサンディア国立研究所が中心となって高温下での検層技術の開発が進められており、わが国より更に進んだ技術開発の実態を垣間見ることができた。

ワークショップは米国における高温地熱環境の科学、測定技術開発及び掘削に豊富な経験を有する第一人者が集まったことから討議は具体性があり触発されることが多かった。その結果次に述べるように今後の同計画の実現に向けて具体的な総意が得られたことで意義の大きい集会であった。

すなわち、地下数100 mの深度で最高温度400°C程度以上の強酸性地熱環境下にある火山島ホワイト島掘削計画(深度200 m 1地点、深度600 m 1地点)について

- 1) 既存の掘削リグを用いて妥当な掘削条件下で掘削を行うことは技術的に可能であり、掘削リグの運搬設置等の観点を入れると、連続して両地点の掘削を行うのがもっとも経済的である。
- 2) マグマから分化した火山性流体、岩芯試料を掘削に伴うコンタミネーションを避けて採取すること

は可能であり、そのための最も経済的な掘削方法は空気掘りによる流体採取坑井掘削と泥水掘りによる岩芯採取坑井掘削とを1地点2坑井掘削することである。

3) 掘削坑井を利用した検層や掘削後の流体採取等科学調査に必要なダウンホール・メモリ式の坑内測定機器がいくつか開発・開発中であり、温度400°C-450°C程度以上の地熱環境を把握することが可能である。

4) 掘削計画の実施には工事を含めた調査の安全性の確保が大きな要件となるが安全実施規則が既できており、これを準用することが可能である。

5) 掘削・測定等に係る主として技術的な問題に関して米国サンディア国立研究所の担当者が全面的に協力する。また現地環境アセスメント、許認可等の問題に関してニュージーランドの掘削関連国家的機関である Works Geothermal の担当者が全面的に協力する。

おわりに

地下深部の地熱の実態を明らかにするための技術的課題、マグマが保有するエネルギーを利用するための技術的課題は山積しており、高温、高圧、酸性地熱環境という、極限環境下でなされるそれらへの取り組みは、技術をもって問題を克服しようとする人類の前に大ききくちはだかる自然の巨大な壁への取り組みにも似ている。この取り組みは人類の可能性と知的興味への挑戦として、将来的にはきわめて大きな果実を約束するに違いない。しかしこのような困難な課題への取り組みはいかに先進国といえども単独では成就しがたくなってきているのもまた事実である。このために先進国が協力し合ってその克服に努めることがきわめて重要であるとの認識、また得られた科学的成果が先進国のみによって占有されるべきものでないとの共通認識が科学者の間に強まってきている。

現在世界は対立から協調の時代に入っている。協調の精神を助長しつつ具体的に地球科学の困難な課題の克服に努める姿勢が求められている。高温未踏領域にある地球科学の情報は地球資源の開発利用と地球環境の両面から見てきわめて重要なデータである。

参考文献

- Allis, R. G. and Hase, H. (1991): Volcano-hydro-thermal energy research at White Island, New Zealand, IEA International Conf. Technology Responses to Global Environment Challenges, 6-8th Nov., 1991, Kyoto, Proc., pp. 276-283.
- Blackwell, D. D. et al (1989): Heat flow in the Oregon Cascade Range and its correlation with regional gravity, magnetic and geologic patterns, USGS Open-file Report 89-178, pp. 142-170.
- Bjornsson, G. and Bodvarsson, G (1990): A survey of geothermal reservoir properties, Geothermics, v. 19, n. 1, pp. 17-27.
- 江原幸雄, 茂木 透(1990): 火山下の熱構造と熱エネルギー抽出—九重火山の例—, 日本地熱学会平成2年度学術講演会, 演旨集, D 1.
- EOS, Feb. 14 (1989): Research drilling into the volcanic hydrothermal system on White Island New Zealand, pp. 98-100, p. 108.
- Giggenbach, W. F., 佐藤興平, and Hedenquist, J. W. (1991): ニュージーランド White Island のマグマ-熱水系, 地質ニュース, N. 438, n. 2, pp. 1-4. (口絵グラビア).
- Giggenbach, W. F. (未公表資料)
- Ingebritsen, S. E., Sherrod, D. R., and Mariner, R. H. (1989): Heat flow and hydrothermal calculation in the Cascade Range, north central Oregon, USGS Open-file Report 89-178, pp. 122-141.
- 日本地熱調査会(1985): わが国の地熱発電所設備要覧, 137p.
- 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.
- 産業技術審議会新エネルギー技術開発部会 地熱分科会(1991): 地熱エネルギー技術開発のあり方について(中間報告), 19p.
- 産業技術審議会新エネルギー技術開発部会 地熱分科会技術開発体制検討小委員会(1992): 技術開発体制検討小委員会の検討結果について, 17p.
- Sellers, W. D. (1967): Physical Climatology, Univ. Chicago Press, 272p.
- 竹野直人, 野田徹郎(1987): 仙岩地域における地熱調査井岩芯の変質—変質鉱物及び全岩化学組成の変動—, 地質調査所報告, No. 266, pp. 223-249.
- 玉生志郎(1991): ニュージーランド ホワイト島の火山活動と科学掘削計画について, 地質ニュース, N. 438, n. 2, pp. 52-56.
- 玉生志郎, 宮崎芳徳(1991): ニュージーランド, ホワイト火山島における火山・地熱系解明のための科学掘削計画について, 地熱 v. 28, n. 1, pp. 52-60.
- 通商産業省(1987): 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), 117p.
- Tuevov, I. K., Yapaneshnikov, V. D., and Hayakawa, M. (1992): Geothermy, Tokai Univ. Press, 304p.
- 矢野雄策(1992): 坑井の検層・コアデータに基づいた日本の地熱地域の温度・物性の統計的分布, 平成2年度サンシャイン計画研究開発中間報告書, 「国土地熱資源評価技術に関する研究」 pp. 31-48.

HASE Hirokazu (1992): Geothermal Energy R & D: today and tomorrow.

<受付: 1992年7月10日>