

最近の米国における地熱研究

山田 營三 (地 殻 熱 部)

1 ま え が き

地熱資源開発に関する日米共同研究のための予備調査のため 昭和52年4月1日から同5月26日まで米国のロスアラモス科学研究所 (Los Alamos Scientific Laboratory) および合衆国地質調査所 (United States Geological Survey) を中心に 米国エネルギー研究開発局 (Energy Research and Development Administration) および若干の大学などを訪問し 米国における地熱研究の現状を知る機会を与えられた。地熱の研究は 環境を保護しながら地熱資源を探索し 開発・採取し利用するためのすべての基礎研究から技術開発までを含むもので 米国では数多くの研究所 民間会社 大学などがこれに参加しており その研究内容も多彩であり すべてを紹介するわけにはいかない。ここでは筆者が見聞した範囲で 重要と思われることを中心に 最近の米国における地熱研究について紹介したい。

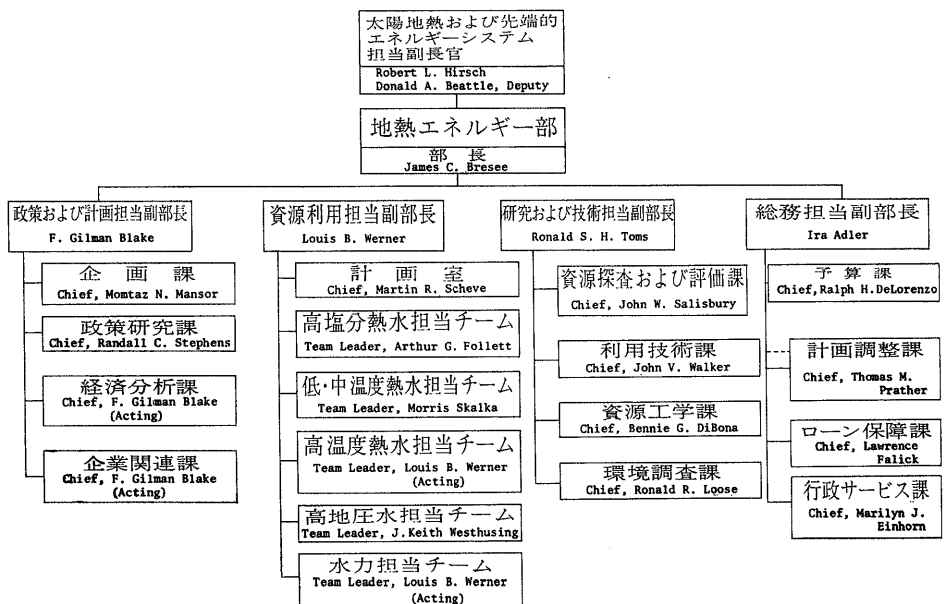
2 米国の地熱資源研究開発政策

米国の地熱資源研究開発政策を担当しているのは エネルギー研究開発局の地熱エネルギー部 (Division of

Geothermal Energy) である。エネルギー研究開発局は主都ワシントンにあり 文字通り原子力を含むすべてのエネルギー研究開発を統率する機関 (Lead agency) である (写真1)。地熱エネルギー部は第1図に示したような組織になっており James C. BRESEE (Director) 以下数10人が仕事している。

1976会計年度 (1975年7月~1976年6月) のエネルギー研究開発局の地熱予算はUS\$31.2百万であり その他に内務省に属する米国地質調査所の地熱予算が約US\$9.1百万 さらに連邦科学財団 (National Science Foundation) の地熱予算が 約US\$3百万である。1977会計年度 (1976年10月~1977年9月) のエネルギー研究開発局の地熱予算は約US\$49.0百万に達する見込みであり (第1表) さらに米国地質調査所の地熱予算多分28億円程度を加えると これは我が国の昭和52年度 (1977年4月~1978年3月) 地熱予算総計約29.6億円の約5.6倍である。なお連邦科学財団の地熱研究は1976会計年度で終了したらしい。

1976会計年度のくわしい予算配分先と各研究テーマの概要などはエネルギー研究開発局で発行した “地熱プロ

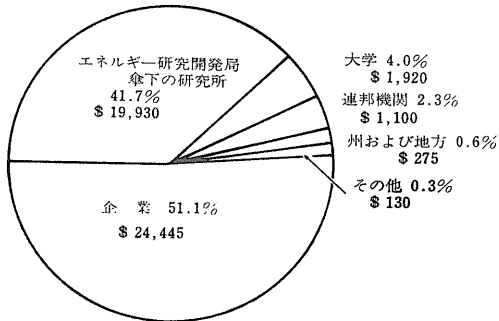


第1図 エネルギー研究開発局の地熱エネルギー部の組織 (Organization of the Division of Geothermal Energy, the Energy Research and Development Administration)

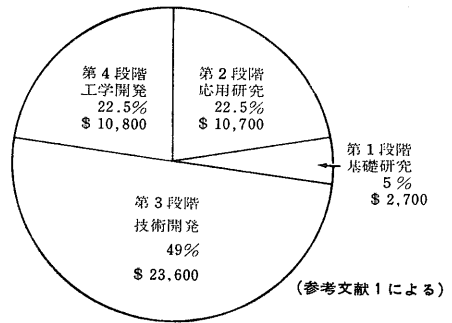
第1表 米国エネルギー研究開発局 1978会計年度 地熱エネルギー開発費予副 (支出額: 単位千ドル)

会計年度		1976 (実行)	過渡四半期 (実行)	1977 (予測)	1978 (予測)
運 営 費	技術研究開発	\$ 8,666	\$ 4,702	\$ 12,500	\$ 13,600
	資源探査評価	4,188	2,092	8,600	15,800
	熱水技術応用	9,724	2,323	10,800	15,700
	先端技術応用	4,376	2,080	11,100	10,100
	利用実験	0	0	0	3,500
	環境保全・制度研究	2,607	1,652	4,800	7,100
合計		29,561	12,849	47,800	65,800
資 本 設 備	技術研究開発	167	55	300	700
	資源探査評価	43	0	250	400
	熱水技術応用	138	28	300	600
	先端技術応用	218	27	250	400
	利用実験				
	環境保全・制度研究	20	8	100	100
合計		586	118	1,200	2,200
地熱エネルギー研究開発費総計		\$ 30,147	\$ 12,967	\$ 49,000	\$ 68,000

機関の種類ごとの配分



研究開発および実証段階ごとの配分



第2図 エネルギー研究開発局の1977会計年度の地熱エネルギー研究開発および実証予算の配分 (単位: 1000ドル) (Allocation of Funds-Geothermal Energy RD & D, the Energy Research and Development Administration) (In Thousands of Dollars)

プロジェクト概要集” (Geothermal Project Summaries) に出ている。1977会計年度の予算の配分先の大略は第2図に示したようになっており、いぜんかなりの予算がエネルギー研究開発局傘下の研究所で使用されているが最近第2表に示した初期の計画目標を達成するため地熱産業の育成を早急に行なわねばならず 民間への予算投入を増す傾向のようである。

エネルギー研究開発局の地熱エネルギー部は 地熱資源の探査評価から 利用技術の開発・環境調査・ローンの保障に至るまで 地熱に関するすべての研究開発および実証・支援政策を担当しているが ここでは特に地質に関連の深い地熱資源探査および評価の研究開発政策の



写真1 米国エネルギー研究開発局

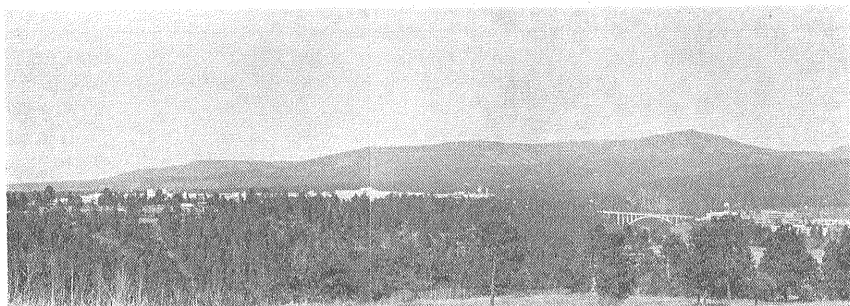


写真2
ロスアラモス科学研究所中心
部。地球科学部は中心部か
らかなりはずれた場所にある

方向について 資源探査および評価課 (Resource Exploration and Assessment Branch)の John W. SALISBURY (Chief) の話の概要を述べるにとどめる。

要するに現在は高温岩体資源 (Hot dry rock Geothermal resources) の利用技術の開発のような先端的技術 (Advanced technology) の開発に多額の予算が計上されているが これでは1985年までに少なくとも 3000MWe を地熱発電でまかなうという目標の達成は出来ない。むしろ これからは一番簡単に開発出来る (高温)熱水資源の開発に力を入れ 除々に高度の技術を要する資源である高圧地熱水 (Geopressured Geothermal resource) さらに高温岩体資源の開発へと技術開発を進めていくべきであると考えているのである。

そして 1985年までの目標を達成するに十分な高温地熱水資源を開発するには 実は非常に多数の探査試錐を掘さくし資源を確認していくことが当面必要とされている。このため 先商業開発試錐計画 (Pre-commercial drilling program) によって企業が興味を示さないが有望と考えられる場所に試錐その他の探査を行ない企業の興味を引きつけたり 企業提携計画 (Industry coupled program) によって企業が興味を示しているが 高いリスクのため商業探査を躊躇しているような場所で企業を援助して探査を行ない 資源を確認して行こうと考えているようである。その他に地方自治体などと協力して

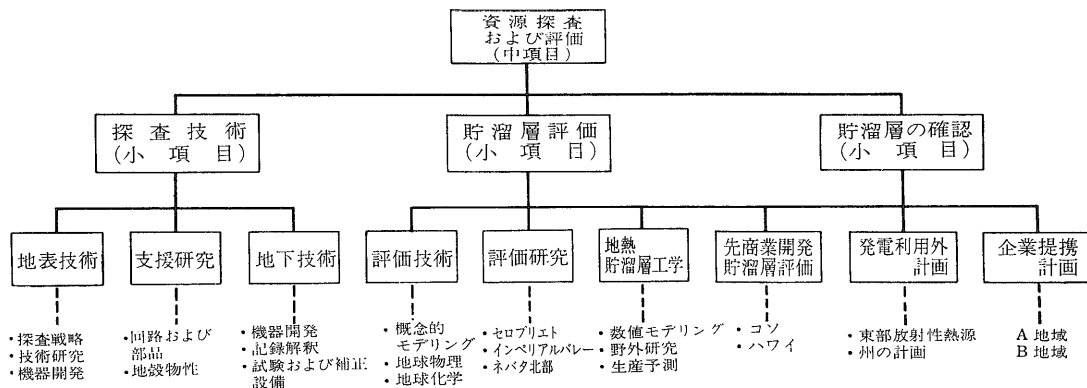
多目的利用計画なども進められていく予定である。地熱資源探査評価研究計画の概要を第3図に示した。

3 高温岩体地熱計画 (Hot Dry Rock Geothermal Project)

ここで考えられている高温岩体地熱資源とは 地下の高温であるが 透水係数 (Permeability) の極めて低い岩体のことであり そのような岩体では 透水係数が低い ため 天然熱水資源におけるように 単に試錐により地下に包蔵されている熱水又は蒸気を採取し 利用するわけにはいかない。そこで ロスアラモス科学研究所の Morton C. SMITH らによって そのような岩体に人工的に熱水系をつくり熱エネルギーを取り出す方式が提案され 現在実験が進められている。

ロスアラモス科学研究所は ニューメキシコ州のロスアラモスにある (写真2)。ロスアラモスは第2次大戦中に世界で始めて原子爆弾がつくられた所であり 原子力委員会 (Atomic Energy Commission) のもとで原子力の研究を行ない原子力都市 (The Atomic City) とよばれていた。近年エネルギー研究開発局の発足にともない現在では原子力 太陽熱 地熱などすべてのエネルギーの研究開発に取り組んでいる。

ロスアラモス科学研究所の高温岩体の研究は 1970年ころから始められ 現在は 地球科学部 (Geoscience-



第3図 エネルギー研究開発局の地熱エネルギー資源探査および評価中項目の概要 (Geothermal Resource Exploration and Assessment Subprogram Summary, the Energy Research and Development Administration)

地球 科学 部	G-DO (6人) Secretary (秘書)
	G-DOT(8人) Special Technical Investigations (特別技術調査グループ)
	G-2 (12人) Seismology (地震グループ)
	G-3 (10人) Geothermal Technology (地熱技術グループ)
	G-4 (19人) Geothermal Operations (地熱事業グループ)
	G-5 (13人) Geochemical Applications (地化学応用グループ)
	G-6 (23人) Geological Research (地質研究グループ)

第4図 ロスアラモス科学研究所地球科学部の組織 (Organization of G-Division, the Los Alamos Scientific Laboratory)

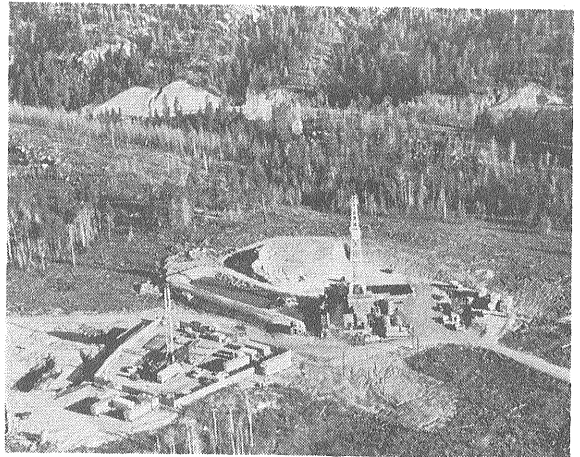


写真3 フェントンヒル (Fenton Hill) における高温岩体地熱計画の実験場 (昭和50年2月)。左側がGT-2号井で右側がEE-1号井。(ロスアラモス科学研究所提供)

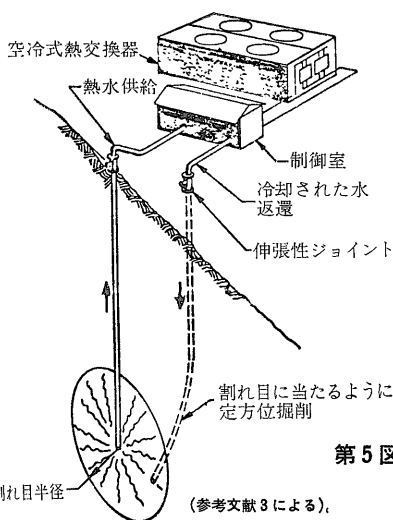
Division) を中心に行なわれている。地球科学部は第4図に示したように特別技術調査 (G-DOT-Special Technical Investigation) 地震 (G-2-Seismology) 地熱技術 (G-3-Geothermal Technology) 地熱事業 (G-4-Geothermal Operations) 地化学応用 (G-5-Geochemical Applications) 地質研究 (G-6-Geological Research) などのグループからなる。総人数は100名に近く 実に多彩な専門家の集まりである。1977会計年度の地熱予算は エネルギー研究開発局からの研究費約US\$5百万である。

ロスアラモス科学研究所で現在実験している高温岩体資源の開発方式は極めて単純で 第5図に示したように地下の高温で透水係数の低い岩体に試錐孔を掘削し 地表から水圧をかけて岩石に割れ目を作り もう一つの試錐孔をその割れ目に当るように掘削する。そして一方の試錐孔から水を注入し 高温岩体中に作った割れ目中

を通り 熱せられた水を他方の試錐孔より取り出し その熱エネルギーを電力に変換しようというものである。

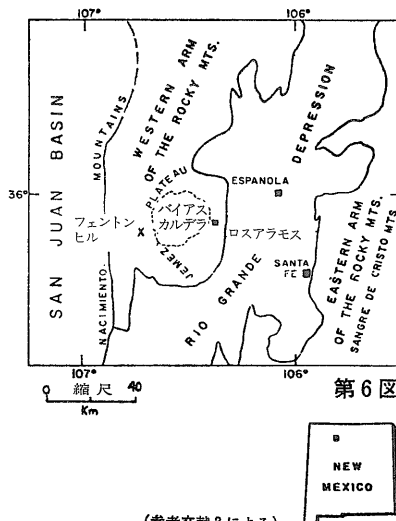
現在この実験はロスアラモスの西方約32kmのフェントンヒル (Fenton Hill) の実験場で行なわれている (写真3)。この地点は約100万年前に生じたバイアスカルデラ (Valles Caldera) の西縁から約1.5km外側に位置している (第6図)。この地点は熱流量 (Heat Flow) が比較的高く (5 HFU 程度) 断層なども比較的少なく 浅部 (730m 程度) に透水係数の低い先カンブリア紀の花崗岩質岩石が分布している などの地学的条件も考慮し選ばれたようである。

すでに GT-1 (785m) の試錐孔での予備実験を終了し GT-2 (2932m) (第7図) の試錐孔で水圧破砕実験



第5図

(参考文献3による)

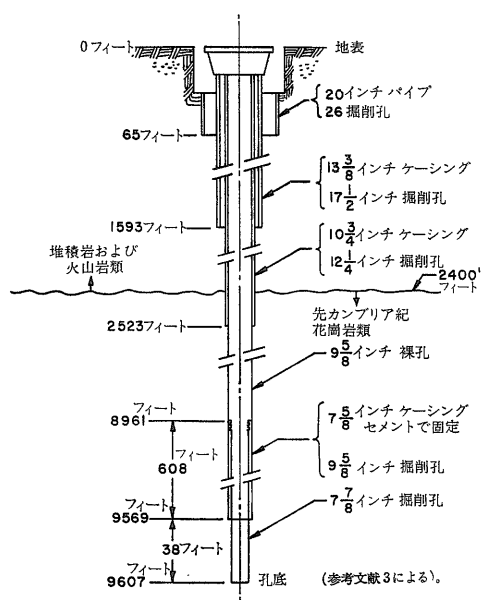


第6図

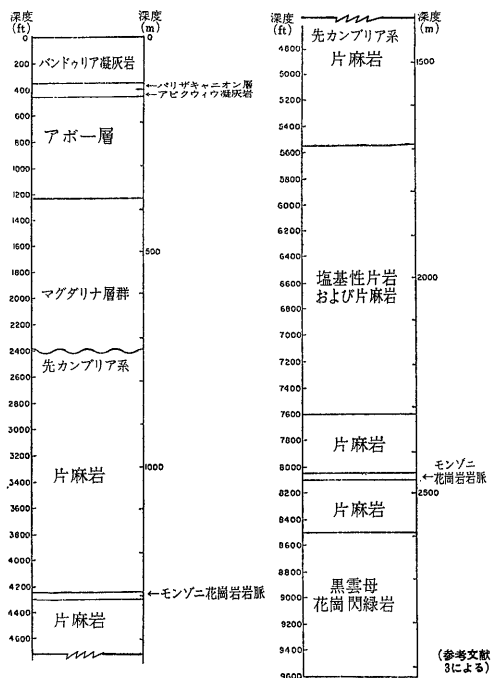
(参考文献3による)

第5図(左)
ロスアラモス科学研究所における人工的地熱抽出システムの概念図 (Conceptual diagram of manmade geothermal heat extraction system, the Los Alamos Scientific Laboratory.)

第6図(右)
ロスアラモス科学研究所の高温岩体地熱計画実験場 (フェントンヒル) 位置図 (Location of test site Fenton Hill) for the Hot Dry Rock Geothermal Project of the Los Alamos Scientific Laboratory.)



第7図 ロスアラモス科学研究所のGT-2号井の坑井断面図 (Cross section of GT-2 well, the Los Alamos Scientific Laboratory.)



第8図 ロスアラモス科学研究所のGT-2号井の地質柱状図 (Lithologic log of GT-2 well, the Los Alamos Scientific Laboratory.)

がくり返され さらにその水圧破碎割れ目に当てるべく GT-2 から N14°E 方向に 75m 離れた地点から EE-1 (3064m) の試錐孔が掘削された。そして GT-2 から水を注入し EE-1 から熱水を回収する実験が行なわれたが GT-2 より作った割れ目に EE-1 がうまく当たってないため EE-1 から回収される熱水は 30 bar/liter/sec 程度であった。これらの結果は「ロスアラモス科学研究所の高温岩体地熱プロジェクト—1975年7月～1976年6月」(LASL Hot Dry Rock Geothermal Project. July 1, 1975—June 30, 1976) にくわしく書かれている。筆者の滞在中は そこで GT-2 の深度 2000m 付近をセメ

ントで固め そこからダイナドリルにより側方掘削し EE-1 より作った割れ目に当てようと試みられていたが岩石が硬いため難行していた (写真 4 および 5)。

GT-2 の試錐孔の 孔底温度は 197°C で地質柱状は第 8 図に示したとおりである。732m から先カンブリア紀の硬い岩石中を処々で試錐岩芯を取りながら 2195m も掘削することはあまり例のないことで 掘削中に種々の

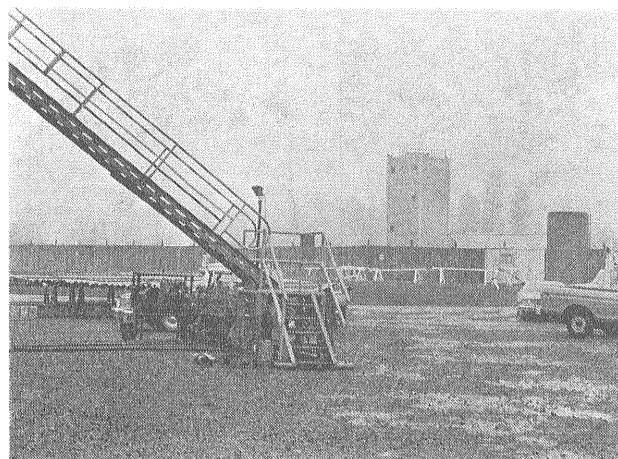


写真4 GT-2号井(手前)よりEE-1号井(LASLの印のある建物の下)の方向を望む(昭和52年4月)

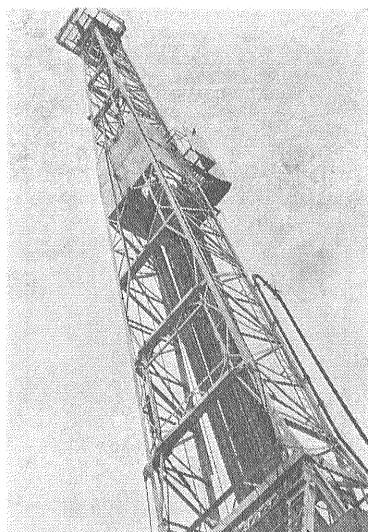
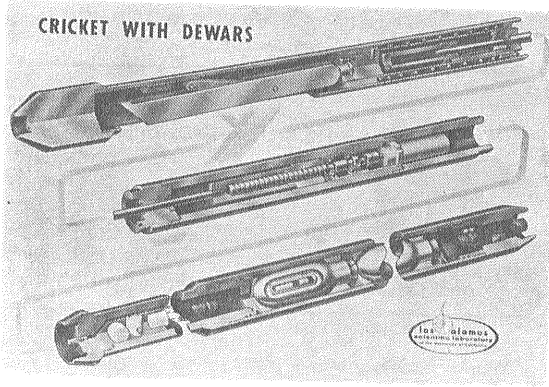


写真5 GT-2号井の深度2000m付近から側方掘削試錐中(昭和52年4月)



第9図 孔壁固定型高温用ジオフォーンゾンデ (Geophone sonde with cricket and dewars.)

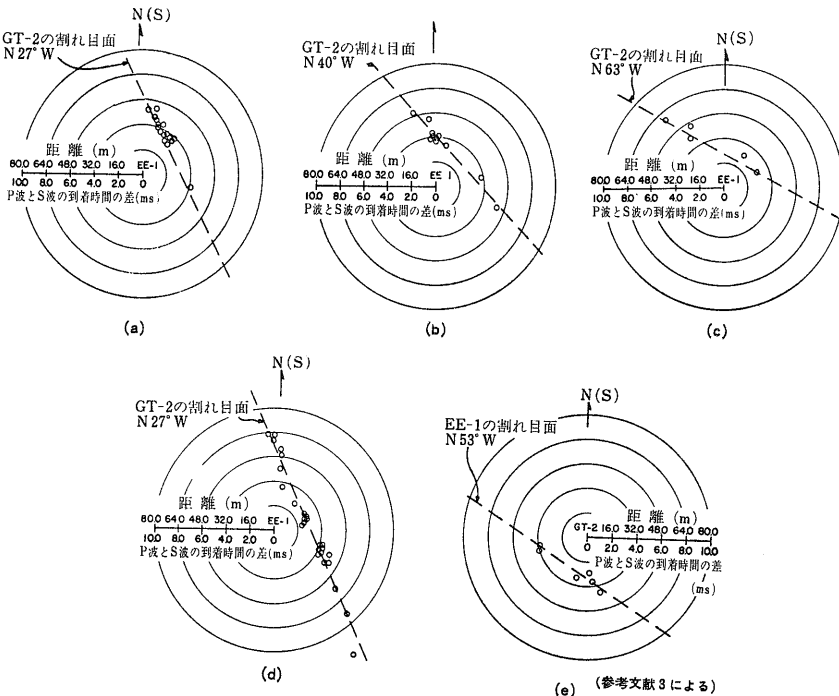
掘削技術上の思わぬ出来事が先じたようである。また水圧破碎においても 高水圧でも水もれしないようなパッカーの開発およびその掘削井中での使用に関し 技術的問題があった(写真6)。さらに水圧破碎による割れ目を作ることは成功したが その割れ目の形状・大きさなどの確認や 試錐孔の地下における正確な位置の確認などが必要であり そのための方法として高温高圧下で使用可能な坑井内ジオフォーンゾンデ (Down hole geophone sonde) (第9図) などの開発が行われた。そして それを用いて水圧破碎実験中に発生する極微小地震を他方の坑井内におろしたジオフォーンゾンデで観測し 割れ目の形状・大きさの確認をしたり (第10図)



写真6
高水圧のため破壊したパッカー (Johnson packer) (ロスアラモス科学研究所提供)

一方の坑井内で爆薬ないし機械的に極微小人工地震を発生させ 他方の坑井内にジオフォーンゾンデを設置してそれを観測し 坑井相互間の距離を測定することが行なわれた。現在 GT-2より生じた水圧破碎割れ目はポテトチップのように曲がった形状と考えられており また試錐孔の位置は 第11図に示したようになっており考えられている。

このような数多くの技術的困難を乗り越えてロスアラモス研究所の高温岩体地熱研究計画は進められつつあるが 今後に残されている問題も数多い。たとえば 一方の試錐孔から水を注入



第10図
極微小地震の震源
a) GT-2 深度2.81km 割れ目膨脹初期
b) GT-2 深度2.94km 割れ目膨脹中
c) GT-2 深度3.00km 割れ目膨脹中
d) GT-2 深度2.81km 割れ目膨脹後閉塞中
e) EE-1 深度2.94km
Foci of microseismic events recorded at
a) GT-2 2.81km during the initial period of inflation
b) GT-2 2.94km during inflation
c) GT-2 3.00km during inflation
d) GT-2 2.81km during shut-in after inflation, and
e) EE-1 2.94km

(参考文献3による)

し他方の試錐孔から熱水を回収する間の水の流れに対する抵抗がかなり大きく 相当高压で注水しないと十分な量の熱水の回収が出来ない可能性があり また 割れ目を十分に開いた状態に保つには相当の水圧を加えておく必要がある。 さらに実際の割れ目は理論計算に用いられたような平滑で様な いわゆるペニー型ではないので 水を循環させた場合 割れ目中を一様に計算通りには流れず特定の流路に沿って流れ 岩石との熱交換率が計算より著しく低くなる可能性がある。 今後高温岩体地熱資源が経済的に他のエネルギー資源と打ち合えるようになるまでには さらに数多くの技術的問題が解決されねばならない。 また このような高温岩体地熱資源の分布および量についても未確認である。 しかしながら このような先端的技術研究開発は 高温熱水資源の開発など 他の地熱資源の開発にも応用出来る波及効果は非常に大きいものと考えられる。

ごく最近の私信によると GT-2 からの側方掘削に成功したが まだ水の流れに対する抵抗が高いので もう一度さらに下部をねらって側方掘削を行ない 水の流れに対する抵抗をかなり低下させることに成功した。 現在は十分な水量を注入出来るようになったので 熱交換試験のための地表設備を整えており 9月までには完成させる見通しだそうである。

4 地熱資源の評価および探査

米国の地熱資源の評価およびそれに関連する技術の開発などは 合衆国地質調査所で势力的になされている。

合衆国地質調査所は バージニア州のレストン (Reston) に本部があり カリフォルニア州のメンロパーク

第2表 連邦の実施計画が十分実行された場合の商業地熱利用ポテンシャルの目標

	1985年	2000年	2020年
発電容量 (千キロワット)	3,000—4,000	20,000—40,000	70,000—140,000
発電利用の化石燃料 換算 (クウォード/年)	0.2—0.3	1.5—3.0	5—10
発電外利用 (クウォード/年)	0.1	1	8
合計エネルギー (クウォード/年)	0.3—0.4	2.5—4.0	13—18

注：1クウォード=石油約1億7000万バレル (参考文献1による)

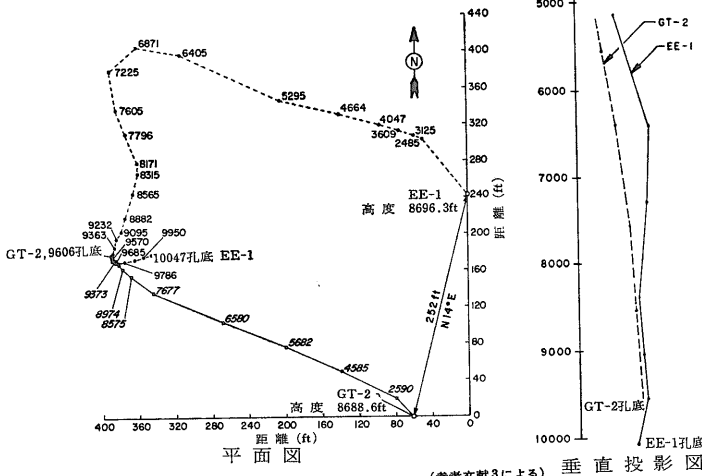
(Menlo Park) とコロラド州のデンバー (Denver) に支所がある。 地熱資源の研究には これらの本部および支所の地質総部 (Geologic Division) と 水資源総部 (Hydrologic Resource Division) の研究者がおもに携わっている。

合衆国の地熱資源の評価については すでに1975年に “合衆国の地熱資源評価—1975年” (Assessment of Geothermal Resources of the United States—1975) が米国地質調査所によって出版されている。 現在さらに正確な評価をなすべく調査研究が続けられている。

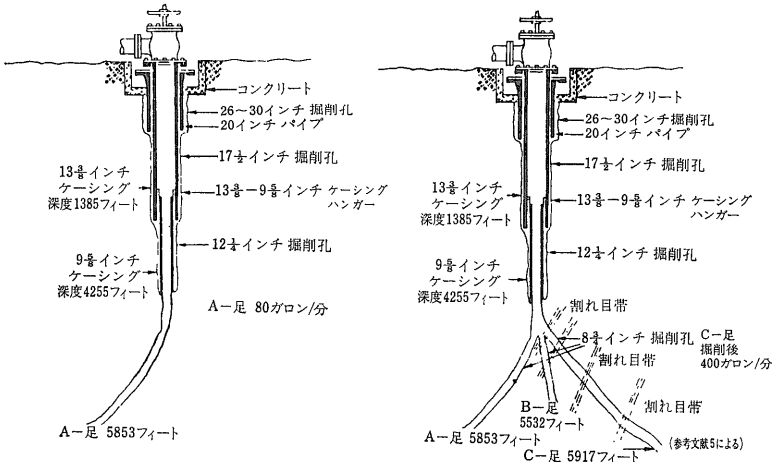
検層機器や電磁探査機器の開発などは デンバー支所でもに行なわれており 200°C~250°C 310気圧下で使用可能な音波による坑井内テレビューワー (Borehole Televiwer) などすでに実用化されていた。

それぞれの地熱地域での調査研究および探査も積極的に行なわれており カリフォルニアのコソ (Coso) 地熱地帯では 地質図の作成およびその他の探査も終了し エネルギー研究開発局により すでに1本試錐孔(410m) が掘られ 2本目の試錐孔 (6000 feet) がこれから掘られるところであった。 カリフォルニア州

のロングバレーカルデラ (Long Valley Caldera) ではすでにいろいろな探査研究結果が報告されているが (Journal of Geophysical Research, vol. 81, no. 5, 1976) 地質図作成もほとんど完了していた。 そして2本の試錐孔 (7000feet程度) がカルデラ東部に私企業によって掘削された。 最近オレゴン州の ニューベリーカルデラ (Newberry Caldera) や カリフォルニアのシャスタ山 (Mt. Shasta) などの地域でも 新たに調査が始められている。 その他に米国地質調査所ではかなり基礎的な研究も進められている。 またイエローストーンカルデラ (Yellowstone Caldera) のような世界有数の地熱地帯であるが国立公園として自然を残すため開発はしない地域



第11図 GT-2号井およびEE-1号井の掘削経路 Path taken during drilling of GT-2 and EE-1



第12図

ラフトリバーにおいて安い費用で熱水湧出量を増大させた多足試錐 Multiple legs in barefoot section to enhance production at minor increase in cost, at the Raft River.

スタンフォード大学(Stanford University)の貯留層工学の研究ハワイ大学(Hawaii University)のハワイ島東リフトでの地熱研究 これでは最近360°Cの熱水を湧出したとのことである。ローレンスバークレー研究所(Lawrence Berkeley Laboratory)やローレンスリバーモアー研究所(Lawrence Livermore Laboratory)など

でも注目にあたいする基礎的研究が数多くなされている。

でも基礎的な地熱の研究が行なわれている。

今回は訪問出来なかったがカリフォルニア州のインペリアルバレー(Imperial Valley)には数多くの地熱地帯が密集している。ここは高温でしかも塩類濃度が高い熱水を出す地熱地帯としてそれぞれ多くの企業や研究機関 大学などにより探査および技術試験などが行なわれている。

アイダホ州のスネークリバー(Snake River)沿いには70°C-150°C程度の低温熱水が各所から湧出する。これを発電に利用する計画がアイダホナショナルエンジニアリング研究所(Ideho National Engineering Laboratory)を中心になされておりすでに3本の試錐が掘削され150°C程度の熱水を多量に湧出している。この3本目の井戸は当初湧出量が少なかったので側方掘削を行ない第12図のような3本に枝分かれた坑井をつくり経済的に湧出量を増すことに成功した。またボイズイ(Boise)では75°C程度の熱水が古くから市のビルディングの暖房に使用されておりこれを大規模に行なう研究が始められている(写真7)。その他各地の大学では地域の地熱の研究や基礎的研究が行なわれており

5 あとがき

最近の米国における地熱研究について筆者の見聞したことを中心に書いてみたが この巨大な予算と多くの研究者の携わっている国家プロジェクト(National Project)の一端を極めて簡単に紹介出来たにすぎない。また個々の地熱地域の地質構造や研究開発状況についてもいろいろ情報を得たがこれについては又別の機会に紹介したい。我が国の地熱研究は予算においても従事している研究者・技術者の数においても米国とは比較にならないほど少ないが日本が火山国・地震国であり地熱資源に非常に恵まれているという我が国の地質構造上の特性を考えると今後地熱技術の研究開発が着実に進歩していくことを期待してやまない。最後に今回の日米共同研究のための予備調査に協力しいろいろお世話しまた説明して下さった米国の地熱関係者および我が国の関係者に心からお礼申し上げます。

参考文献

1. Energy Research and Development Administration (1977): Program Approval Document, Fiscal Year 1977. Geothermal Energy Development. 78p.
2. Energy Research and Development Administration (1976): Geothermal Project Summaries,
3. A. G. BLAIR, J. W. TESTER and J. J. MORTENSEN, Compilers (1977): LASL Hot Dry Rock Geothermal Project. July 1, 1975-June 30, 1976, 238p.
4. D. E. WHITE and D. L. WILLIAMS, Editors (1975): Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975. Geol. Survey Circular. 726. 155 p.
5. Idaho National Engineering Laboratory (1977): Idaho Geothermal Development Projects. Annual Report for 1976.

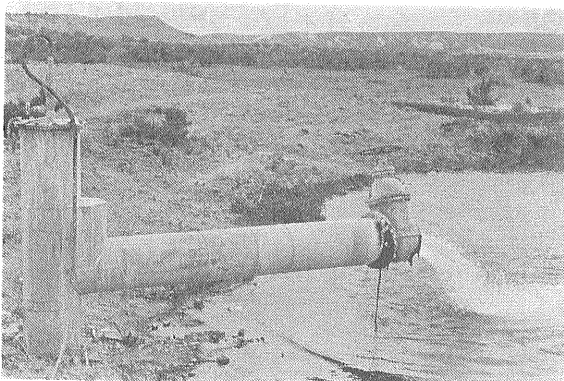


写真7 ボイズイ(Boise)における多目的利用の為の熱水(75°C程度)