

米国での大陸学術掘削計画(CSDP)

—とくにマグマ-熱水系について—

笹田 政 克 (地殻熱部)

Masakatsu SASADA

1. はじめに

現在 米国の地球科学分野で 大陸学術掘削計画 (Continental Scientific Drilling Program 略して CSDP) という壮大な研究が動き出している。これは大陸地域での深部掘削を通して エネルギー・鉱物資源 火山噴火・地震等の災害 さらに地球の進化といった問題についての研究を進めようとする計画であり エネルギー省 (エネルギー研究局) 米国科学財団 (NSF) 内務省 (米国地質調査所) および米国科学アカデミー (大陸学術掘削委員会) の4機関が その推進母体となっている。

この掘削計画には 米国内の各大学 エネルギー省 (DOE) 傘下の国立研究所 それに米国地質調査所 (USGS) から数多くの研究者が参加している。CSDP では現在 DOE 関係のマグマ-熱水系に関するプログラムが先行して実行に移されておりすでに ロングバレーのイニョー火山列 (Inyo Volcanic Chain) バイエス・カルデラ (Valles Caldera) ソルトンシー (Salton Sea) で掘削が始まっている。

この報文では CSDP のこれまでの経緯 および上記3地域でのマグマ-熱水系の研究の進行状況について紹介したい。なお 筆者は1983年9月から2年間 JICA の長期研修員として USGS (レストン) に留学しており ちょうどそのころ始動しつつあった CSDP に関連したいくつかの会合に出席する機会に恵まれた。また 1985年12月には CSDP のバイエス・カルデラのシンポジウムに出席するため 再度渡米しているので これらの会合で見聞きした内容もおりまぜて紹介できたらと思っている。

2. 10年の準備期間

マントルにまで届く穴をあけようとしたモホール計画が挫折して何年になるであろうか。海洋では グローマーチャレンジャー号を擁した深海底掘削計画 (DSDP) が 1970年代にはいつから目ざましい成果を次々



第1図 マグマ-熱水系の掘削に関連して評価作業の行われた米国西部の5つの地熱地域 (Goff and Waters 1980)

にあげていた。そんな中で1974年に大陸地域の深部掘削についてのワークショップがカーネギー地球物理学研究所の主催でもたれた。その後同様のワークショップは米国科学アカデミーの主催により1978年にロスアラモスでももたれ それらの議論を踏まえて1979年に米国ジオダイナミクス委員会が「大陸学術掘削計画 (CSDP)」という小冊子をまとめている。そして米国科学アカデミー内に大陸学術掘削委員会が設置されることになる。

さて このジオダイナミクス委員会による「CSDP」にいち早く反応を示したのは DOE の基礎エネルギー科学局であった。小冊子「CSDP」の中でマグマ-熱水系を研究するための深部坑井の必要性が強調されているのを受けて 同局は早速そのターゲットをさぐる第一段階として ロスアラモス サンディア ローレンス・バークレー ローレンス・リバーモアの4国立研究所に共同研究として米国内のマグマ-熱水系についての評価作業を依頼した。この作業では ザ・ガイザースークリアレイク ロングバレー バイエス・カルデラ (リオグランデ・リフト) ソルトン・トラフ それにルーズベルトの5つの地熱地域 (第1図) が評価された。この評価作業の結果は 1980年に Goff と Waters の編集に

第1表 5つのマグマ-熱水系の熱エネルギー

	マグマ-熱水系の 熱エネルギー (10^{18} J)	熱水系の 熱エネルギー (10^{18} J)	珪長質火山岩類の 体積 (km^3)
クリアレイク地域	3610	100*	75
ロングバレー	5780	78	≈ 200
ルーズベェルト	710	32	15
ソルトン・トラフ	480	230**	< 2
バイエス・カルデラ	8425	87	≈ 500

(Goff and Waters, 1980)

* ザ・ガイザースのみ

** セロプリエートは含まれない

データは USGS, Circulars No. 726, 790 にもとづく。

より 「大陸学術掘削計画 マグマ-熱水系 (thermal regimes)*: 5つのマグマ-熱水系の比較評価」という出版物にまとめられている。以下はその概要である。

ここでとりあげた5つのマグマ-熱水系の地質には多くの共通点があるとともに また対照的な点もある。共通点としては ①この5つのシステムは すべて米国西部の熱流量が ≥ 2 HFU のところに位置している。②1 Ma より若い珪長質の火山活動を伴っている。③珪長質メルトを活性化する熱を供給する玄武岩質マグマが上昇できるような 深部にいたる断裂の発達する引張テクトニクス場に存在している。④現在温泉活動があり 地表付近に温度上昇を示す地熱徴候が認められる。⑤企業により系統的に探査が進められている高品位の地熱系である。

一方相違点としては ①それぞれの系の規模の違いがあげられる (第1表)。②火山活動に違いがある。全熱エネルギーの大きなロングバレーとバイエスは ともに多量の火砕流を噴出させた珪長質カルデラである。一方 他の3つのシステムは 主としてドームおよび溶岩流の噴出で特徴づけられる。③テクトニクスが異なる ロングバレー ルーズベェルト バイエスの3者は 正断層の発達するベイズン・アンド・レンジ地域およびリオグランデ・リフトに存在するが 他の2つの系は サンアンドレアス・トランスフォーム断層帯に関連している。しかし 前述したように引張テクトニクスであるという点では すべて共通している。④そこに発達している熱水系が異なる。全てのシステムに 熱水に卓越するリザーバーが存在するが それらの規模は様々である。2つのカルデラにはそれほど大きくない熱水

卓越型のリザーバーと小規模な噴気帯がある。一方 ソルトン・トラフにはその体積・温度・化学組成が様々な熱水卓越型のリザーバーが いくつか存在している。また ザ・ガイザース-クリアレイク地域には 蒸気卓越型のリザーバーと複数の小さな熱水リザーバーが存在する。

CSDP は マグマ-熱水系についての研究を促進させるまたとはない機会といえる。リオグランデ・リフトを除き これら5つのシステムの地質図は大部分できてはいるが これらのマグマ-熱水系の進化および同地域の造構作用について理解するにはさらに多くの研究が必要である。また熱水系についてみた場合 どのシステムにも十分な熱があるにもかかわらず なぜある熱水系は広域的となり ある熱水系は小規模なのであろうか。どのようにして蒸気卓越型は形成され 進化するのであろうか。深部掘削 (5-8 km 深) は これらの問題を解明する助けとなるであろう。

この評価作業の結果に基づき 上述した4国立研究所は 1983年に DOE に対して ロングバレーのイニョー火山列 バイエス・カルデラ それにソルトンシーでの具体的な掘削計画を提案した。これらの掘削計画は CSDP の他の計画に先行する形で それぞれすでに始められている。この3つのプロジェクトについては現在の状況も含めて 後半で紹介することにした。

3. 関係3機関の調整作業

DOE 関連の掘削計画が実行に移されようとしているとき 米国内のいくつかの大学および USGS では マ

*DOE 関連のマグマ-熱水系を対象とした掘削計画についての文書には thermal regimes という言葉がよく使われている。ここで regime という言葉は 本来学術用語ではなく 適切な訳語が見当たらないので Fraser Goff の助言に従い 意識となるが本文中では「マグマ-熱水系」と表現させていただくことにする。

グマ-熱水系以外のテーマでも CSDP へ参加しようとする機運が次第に高まってきていた。また一方 大学および USGS のかなりの数の研究者がすでに DOE 関連の掘削計画に参加しているという状況もあった。このような中で 今後 CSDP が効率的に運営されるための調整作業が DOE, 米国科学財団 (NSF), USGS の間で行われ それぞれの機関の役割分担を明らかにし 計画に重複がないように調整を行うことを旨とした合意文書が 1984年4月に作成された。

大陸学術掘削についてのエネルギー省 (エネルギー研究局) 内務省 (米国地質調査所) および米国科学財団間の合意
1984年4月2日

I. 目的

これら連邦政府機関 (参加機関) の各々は 法令に基づく職務に従って 学術的および工学的研究のための大陸の掘削にこれまで直接的に関与してきており また現在も関与し続けている。

参加機関は この合意により 大陸学術掘削にかかわる 現在進行中あるいは将来の 数多くの連邦政府の学術活動におけるそれぞれの関心事が 適切に調整されることを意図している。

この文書に述べられている大陸学術掘削の調整された活動とは大陸性地殻の化学的および物理的特徴および構造の進化をもたらした過程を より根本的に理解するために向けられている連邦政府による学術的な努力に 望ましからざる重複や空白のすることを避けることである。これらの活動の目標は エネルギー・水・鉱物資源の供給を確実なものにすること 廃棄物の安全な隔離 地震・火山噴火に対する防災 国防といった国家的な重要課題の解決に直接的に貢献することにある。

II. 参加機関の主な関心事および基本的な任務

a. エネルギー省 (以下 DOE と略す)

DOE の大陸学術掘削における関心事は 地殻のマグマ-熱水系 (thermal regimes) の基礎研究 安全かつ環境上問題のない方法での地熱 化石燃料および原子力エネルギー資源の利用の強化 および国家安全上の責務の履行にある。

DOE の関心事は エネルギー資源の形成およびその利用 地熱エネルギー-化石燃料 および原子力エネルギーからの廃棄物の安全処理 核実験の抑制に必要な地震波の信頼おける利用といった問題に関連した地殻中の熱的プロセスにある。DOE はまた地殻内に存在しているマグマとその上部に発達している熱水循環系を橋わたしするゾーンについての学術研究の重要性はよく理解している。DOE の重要な任務に関連した関心事および DOE 関連の研究 所こでの専門的技術をかんがみると DOE の大陸学術掘削活動への貢献は マグマ-熱水系での掘削およびそれに関連する R & D への支援によってなされるであろう。

b. 内務省米国地質調査所 (以下調査所と略す)

大陸学術掘削への調査所の関心事は 地質学分野における学術的および技術的活動の全領域を遂行することにより 国の地質に関する基礎知識を多面的に追求するその任務に由来している。調査所の関心事はまた 国土 エネルギー 鉱物および

水の各資源の最適利用およびその管理 地質的災害を軽減するための国家政策を決める際の 調査所の学術的 技術的役割に関係している。

大陸学術掘削活動への調査所の参加は 「鉱物・エネルギー資源プログラム」 および火山・地震活動に関連する「地球災害プログラム」を直接的に支援して それらの目的を達成するためにある。個々の目標としては 鉱化作用をうけている過去および現在の熱水系の深部掘削 大陸性地殻を 変形させた過去および現在のエネルギーを理解するための掘削 大陸性地殻および上部マントルの構成および組成をさらに理解するための掘削があげられており これらの目標は 大陸性地殻の深部を理解するための総合的な試みの中に位置づけられている。

c. 米国科学財団 (以下 NSF と略す)

NSF の大陸学術掘削活動への関心事は 基礎的な学術研究を支援し 学術の広い分野での研究のポテンシャルを高めるといふ NSF のもつ役割に由来している。掘削は 地殻の学術的探究において とりわけ重要な手段である。大陸学術掘削は海洋掘削および大陸性地殻の地質学的 地球物理学的 地球化学的研究における NSF の現在の活動を補完するであろう。

大陸学術掘削における NSF の役割は ①とくに 坑井内機器にかかわる基礎的研究および NSF あるいは他の機関からの予算で掘削された坑井を利用したコアの研究を支援すること ②大陸性地殻の構造および進化についての根本的な問題の解明を助ける坑井の掘削 あるいは増掘を 適切な時点で支援すること ③たとえば 会議 ワークショップ 管理施設への支援を通して この計画を適切に遂行 調整していくために 関連機関と協力することである。(以下省略)

4. ニューヨークでの国際シンポジウム

同年5月 ニューヨーク郊外の欧風で清礎なたたずまいの Terrytown において 「掘削による大陸性地殻の研究」というテーマでの国際シンポジウムが 6日間にわたり開催された。このシンポジウムは ラモント-ドハティ地質研究所 大陸学術掘削委員会 “リソスフェア” ユニオン間の大陸掘削に関する調整委員会の3者の共催で開かれたもので 米国のほかドイツ フランス ベルギー 日本 スウェーデン キプロス アイスランド イギリス オーストラリアの国々から それぞれ深部掘削についての報告があった。しかしこのシンポジウムでは国際的といえる内容は初日の午前中および3日目の午後に集中しており その他のセッションはこの時点で始まりつつあった米国内の大陸学術掘削計画に その焦点があわせられていたようであった。つまり 米国として 大陸掘削の面で各国と協力をはかりながら 自国のプロジェクトを推進していきたいという考えの下での会合であったといえる。

このシンポジウムでは 各国からの報告のほかマグマ-熱水系 (thermal regimes) 地球化学 岩石学 鉱物資源 坑井内測定 掘削・検層技術の進歩 学術掘削の最

近の成果 大陸の深部構造 学術掘削と堆積盆の起源の各セッションがもたれ ポスターを含め50を越える発表が行われた。発表の内容は多岐にわたっていたが これらのうち約半数は これまでになされた掘削についての総括的な話であり 残り半分が今後 CSDP 等で計画している あるいは希望している学術掘削についての話題であった。それらの中でカリフォルニア大学リバーサイド校の Elders の話は CSDP の今後を占う上で興味深かった。「何故モホール計画が失敗に終り DSDP が成功したか CSDP を始めるにあたりおさらいしてみる必要があるだろう。掘削という巨額の資金を必要とするプロジェクトは 科学者の知りたいという願望だけでは成功するものではなく 現在の技術水準からみて どの程度のことまで可能か見きわめるとともに どのような社会的要請があるか 十分理解する必要があるだろう。」彼は 後述するようにソルトンシーで 3000 m の坑井を現在掘削中である (86年4月完了予定)。このシンポジウムの開かれていた時点では 彼はそのプロジェクトの進め方をめぐって DOE の関係者や議会筋と折衝を重ねている最中であった。いかにも現実的に見える彼の発言は 現在の米国の科学者のおかれている状況の一面をよく物語っているように思えた。

5. ターゲットを求めてのシンポジウム

私が参加したこの年に開かれた大きな学会では 必ずと言ってよいほど CSDP に関する話題がとりあげられていた。しかし そのハイライトは 何といても12月に開かれた 米国地球物理学連合 (AGU) 秋季大会における ターゲットを求めてのシンポジウムであろう。

ここでは CSDP のターゲットに関する 26 の講演が



写真1 CSDP のターゲットについてのシンポジウムが催されたサンフランシスコのシビックセンター。AGU の秋季大会は ここ数年この会場で開催されている。

1986年5月号

あった。この時点ですでに掘削の成果が上がりつつあるプロジェクトでは ロングバレーのイニョー火山列についてサンディア国立研究所の Eichelberger がパイエスについてはロスアラモス国立研究所の Goff がそれぞれの掘削結果について講演した。また軌道に乗りつつあるプロジェクトとしては 地震予知に関連したカリフォルニアの Cajon Pass での掘削計画について スタンフォード大学の Zoback が コロラド州 Creede 鉱床の形成に関連した化石熱水系の掘削計画について USGS の Bethke が またアパラチアでの超深度掘削計画について サウスカロライナ大学の Hatcher が それぞれ話題提供を行った。これのほか 地点および対象についての提案が17件 坑井内測定等の手法についての講演が3件と 盛り沢山のシンポジウムであった (Eos, Vol. 65, No. 45)。

6. 米国議会による CSDP の促進決議

年が明け 1985年はじめにサウスダコタの消印のある大きな封筒が USGS の私の郵便受けにはいついた。全く心あたりのない差出人の名に戸惑いながら封を切ると CSDP に関する米国議会での決議文が同封されていた。差出人は Larry Pressler 上院議員で どうやらニューヨークでのシンポジウムの参加者リストを見て 私宛にも送られてきたものらしい。この決議文は 1984年9月に米国議会に上程されたもので 10月に上下両院を通過後12月にレーガン大統領により署名されている。

米国の大陸学術掘削計画を支援する決議

大陸学術掘削計画は 地球の進化および資源の経済価値を理解するのに欠くことのできない重要な国家的 学術的試みである。

大陸学術掘削計画において その潜在的な力が最も効果的かつ効率的に実現できる手段は エネルギー省 米国科学財団および米国地質調査所の協力を通してであろう。

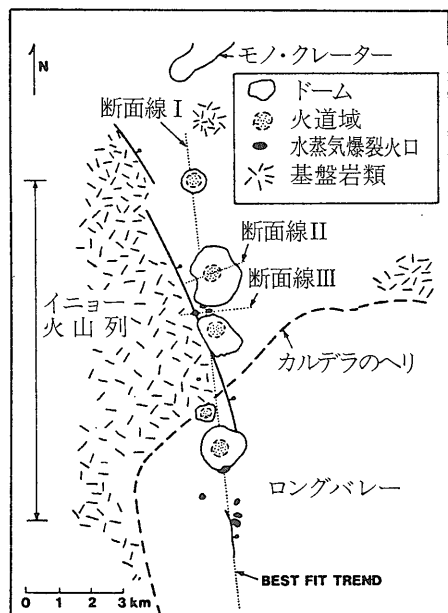
数多くの重要な学術的および商業上の進展が大陸学術掘削計画からもたらされるであろう。また 諸外国でもこの計画に匹敵する深部掘削計画が進められており それらとの協力および調整は 米国の努力に対して有益となるであろう。

次に述べる事からは議会の意向である。

(1) 大陸学術掘削計画は 米国エネルギー省 米国科学財団および米国地質調査所の協力を通して 熱心に遂行されるべき米国による重要な国家的 学術的な試みである。

(2) 民間セクタが 大陸学術掘削計画を支援するのは奨励されるべきであり また 参加機関は この計画に 適当な民間セクタが参加するよう要請すべきである。

(3) 米国政府は この重要な学術的かつ技術的活動を 発展させるに際し 国際社会と 実行可能な範囲で 協力すべきである。



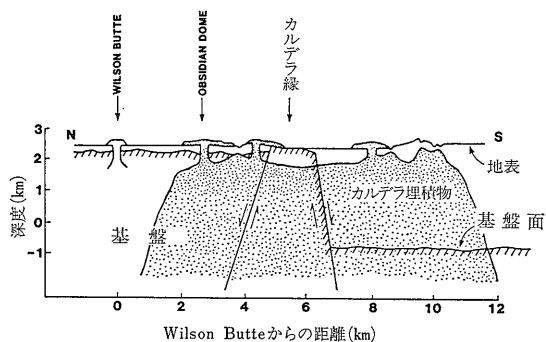
第2図 イニョー火山列の地質 (Eichelberger et al., 1984)

このように現在 CSDP は国家的事業の1つとして位置づけられている。それでは次に CSDP の掘削計画のうち 現在先行している DOE 関連の3つのプロジェクトについて それらの内容を紹介することにした。

7. イニョー火山列

85年の春 サンディヤ国立研究所の John Eichelberger は 電話帳ほどもある厚い報告書をかかえて DOE に向う途中ワシントン DC の郊外にある USGS の庁舎を訪れた。彼は1983年から始まったロングバレーのイニョー火山列での掘削計画のリーダーである。セミナーで彼は黒曜石溶岩流をもたらしたマグマの通路(岩脈)を予想通り貫くことができた傾斜掘りの結果についての講演を行った。用意された会場は 立錐の余地もないほどの盛況であった。

カリフォルニア州ロングバレー・カルデラ北西縁からその北のモノ・クレーターにかけて 南北に8km 伸びる火山列があり これはイニョー火山列と呼ばれている(第2図)。この火山列での最も新しい活動は600年ほど前とのことである。この火山列が CSDP のターゲットの1つとなったのは 次の理由による。①火山の地下ではマグマの通路は岩脈状になっていると いろいろな地域で考えられているが 実際にはこの地域のように 地表の火山列から岩脈の位置が推定できる若い火山活動はきわめて例が少ない。②米国西部における最も



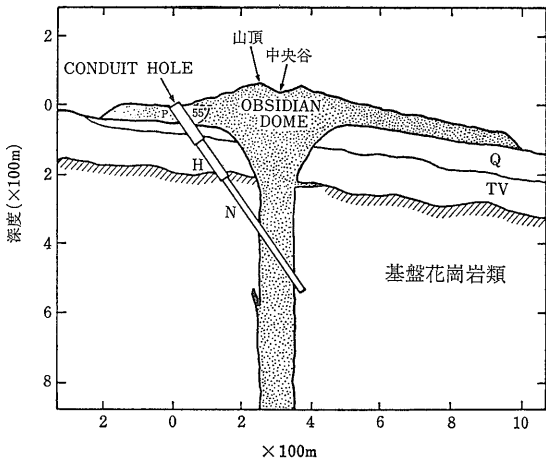
第3図 イニョー火山列に沿う南北断面 (Eichelberger et al., 1984)。

断面線の位置は第2図参照(断面線 I)

新しい流紋岩質マグマの活動であるので 貫入部は熱的平衡に到達しておらず また貫入部のガラスは水和していないであろう。③イニョー火山列は ロングバレー・カルデラの縁を横切っており 岩脈は2つの対照的な地質環境に貫入している。1つは カルデラ埋積物で代表される厚く多孔質で透水性がよく 水に飽和した火山性堆積物であり 他の1つは シェラの花崗岩類で代表される 珪長質の結晶質基盤である(第3図)。④岩脈は ロングバレー・カルデラを含むマグマ系から 最も新しい時期にもたらされたものであり 現在地震活動が盛んなカルデラ南西部のモートおよび再生ドームの地下深所で形成されつつあるかもしれない貫入岩類について類推するのに役立つ (Eichelberger et al., 1984)。

このイニョー火山列では CSDP によりこれまで3本の研究用坑井が掘削されている。最初のもは152mの垂直掘りで Inyo Dome で83年10月に掘削された。この坑井は ドームを構成している黒曜石溶岩 その下位の非溶結の Bishop Tuff を貫き 坑底で先カルデラ安山岩に到達している。この掘削では ドームから90%という高率でコアが回収されており 多孔質部の存在から 溶岩流の脱ガスについての貴重なデータが得られている。

その後 1984年には Obsidian Dome で ドームを形成したマグマの通路にあてる傾斜掘りの坑井 (Conduit Hole) および引続き Glass Creek で イニョー火山列の地下に予想される岩脈にあてる傾斜掘りの坑井 (Dike Hole) が それぞれ成功裏に掘削された これらの結果は85年春にボルティモアで開かれた AGU 春季大会でのシンポジウムで報告された。Conduit Hole (第4図) は55°の傾斜で掘られており Obsidian Dome を構成する溶岩を64m深で貫いた後 降下火砕堆積物 モレー



第4図 Obsidian Dome の地下構造および Conduit hole の計画 (Eichelberger et al., 1984).
断面線の位置は第2図参照 (断面線Ⅱ).

ンおよび先カルデラ玄武岩を経て 484 m で結晶質流紋岩からなる貫入岩に到達した。この貫入岩は幅51mあり 坑井はこれをつき抜け 596m で基盤であるシエラの花崗岩類の中へとはいつている。そして624m まで掘削された。流紋岩の貫入部では 外側は破碎が進んでいたり 熱水性鉱物が生じており また 角礫化している部分や周辺の岩石を捕獲していたりする部分もある。しかし最も内側の部分は きれいな流紋岩からなっている (Eichelberger et al., 1984, 1985)。

2本目の傾斜掘りである Dike Hole (第5図) は Obsidian Dome と Glass Creek 溶岩の間の岩脈が地下に予想される地点に向けて 54° の傾斜で掘り始められた。この坑井は イニョー火砕堆積物 モレーン 先カルデラ玄武岩と掘り進み 297 m で基盤に到達した。基盤岩類中では 329 m 以深で 火砕物質を含む数多くの断裂に遭遇しており さらに先カルデラ溶岩流に関連するであろう 2本の玄武岩岩脈にもぶつかっている。そして 690—716m で流紋岩質の貫入岩類を貫いた。この貫入部は周縁がガラス質 内部が結晶質となっている。この岩脈の幅は7.3mであった (Eichelberger et al., 1985)。

1985年春のボルティモアでの AGU のシンポジウムでは この2本坑井に関連して 断裂 CSAMT 調査 地質学温度計 地温勾配 流紋岩の結晶化 流紋岩中の鉄の酸化状態 マグマの進化 ドームおよび岩脈の地球化学についての研究が発表されている。このイニョーでの掘削計画では 1986年には火山列南部での掘削が予定されており 最終的には 火山列の北部 (Glass Creek 1986年5月号

地域—カルデラ外) と南部 (Deadman-Inyo 地域—カルデラ内) で1本ずつ3,000mの坑井が予定されている。

8. バイエス・カルデラでの掘削計画

バイエス・カルデラは 今から約100万年前に 大規模な火砕流の噴出に伴い形成されたもので カルデラ形成後にカルデラ底が隆起し 中央に広く低い円頂丘が生じている。このようなカルデラは 再生カルデラと呼ばれている (Smith and Bailey, 1968)。このバイエス・カルデラの西縁では この10年間にホット・ドライ・ロック (HDR) からの熱抽出のための大がかりな実験が繰ひろげられてきており はじめ3000m級の坑井が2本 次いで4000m級の坑井が2本掘削され いずれも深部で水圧破碎により連結され 人工的な熱水系が作られている。また カルデラ内の Baca では 1971年からユニオン・オイル社により 地熱の探査が進められ カルデラ内の中央部に発達する熱水系が確認された。同社ではさらに DOE の補助金を得て 5万kW 級の地熱発電所を目標にした開発へと進んだが そのための蒸気量が十分確保できる見通しが立たなかったため 同プロジェクトは 1981年に中止になっている (Goldstein et al., 1982)。

このようにバイエス・カルデラでは カルデラおよび熱水系の調査・研究は かなり進んでいる状況にある。ここで さらに地下深部におけるマグマ—熱水系の姿を明確にしていくにあたって 次のような8つの個別的な目標が掲げられている。①結晶化した深成岩体とその上位の熱水系との間で熱の輸送が行われているゾーンの物理化学条件の解明 ②カルデラの陥没および再生のメカニズムの解明 ③バイエス深成岩体の成層 分化 熱輸送過程の解明 ④熱水卓越型の地熱系の水理および熱輸送の状況の把握 ⑤蒸気卓越型地域の成因および進化

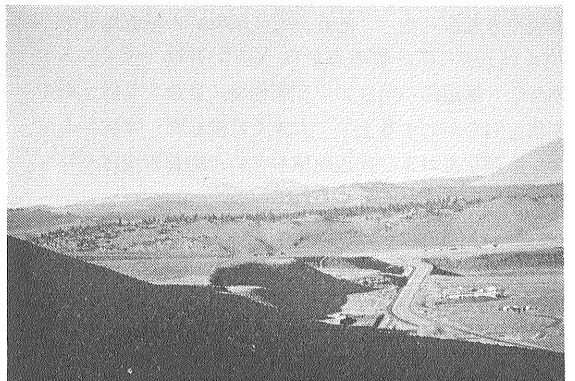
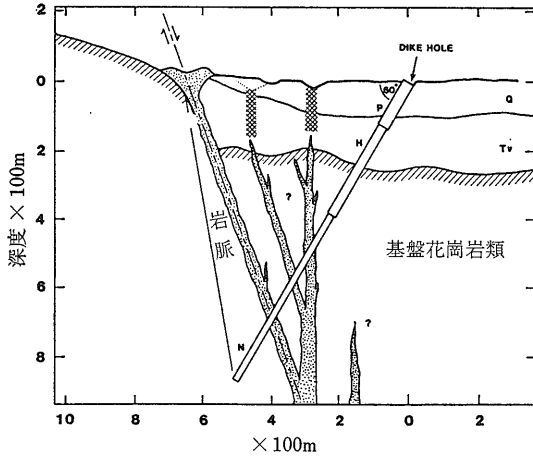
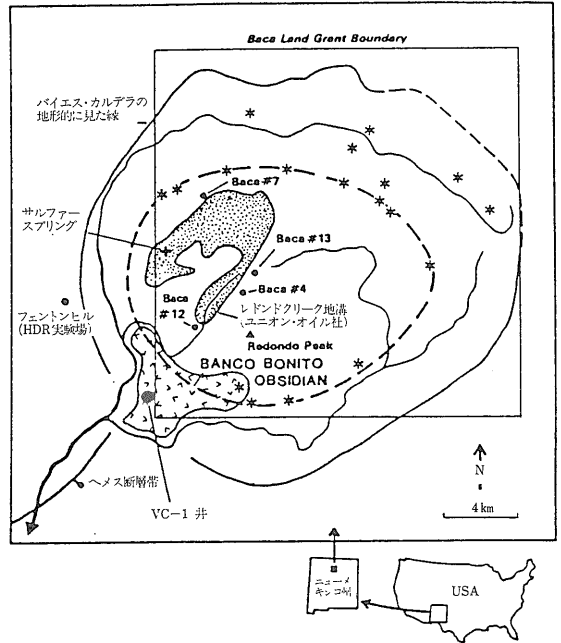


写真2 ロングバレー・カルデラの南縁からイニョー火山列を望む



第5図 Dike hole の計画 (Eichelberger et al., 1984).
断面線の位置は第2図参照 (断面線Ⅲ).



第6図 VC-1 井およびパイエス・カルデラの位置図 (Goff et al., 1985).

の研究 ⑥カルデラでの鉱床生成機構の解明 ⑦高温下での掘削の技術開発 ⑧高温下での物理検層のテストおよび技術開発。

さて パイエスでの CSDP の最初の坑井 VC-1 はカルデラの南西縁に 1984年の夏から秋にかけて掘削された (第5図)。パイエスでは これまでに Baca の地熱プロジェクトで総計42,000mを越える掘削がなされているが 残念ながらコアは全くといってよいほど採取されていない。そこで研究用として掘削されるこの坑井の目的の1つは カルデラの地質構造を把握するため 高い回収率でコアを採取することでもあった。また地質学的見地からの VC-1 井の当初の狙いは カルデラ南西縁の Banca Bonito 黒曜石溶岩類の火道をあてその付近の熱水系を調査することにあつたが 残念なことに当初掘削を予定していた場所が ユニオン・オイル社が Baca Land and Cattle 会社から借地しているところにあつたため 用地折衝にもかかわらず そこでの掘削は実現できなかった。それでも 856mの垂直掘りで95%以上のコアが回収された VC-1 井は パイエス・カルデラ縁辺部の構造および同地域に発達する熱水系の産状を明らかにする上で 大きく貢献した。本坑井の温度 水理状況および周辺地域も含めた地質構造については 第7, 8図にまとめられている。

この VC-1 井は5年間 研究用に供され その間検層等の坑井内での研究が続けられる予定である。またコアおよび坑井内で採取された流体試料は 参加研究者の要望に基づき配分される。なお コアの保管はコロラド州 Grand Junction に設けられた DOE/CSDP のコア倉庫で行われ このための職員もおかれている。予

算的に見ると 坑井の掘削・管理等はリーダーであるロスアラモスで国立研究所の Fraser Goff の下で行われており 個別的な研究については 掘削予算とは別にそれぞれが申請した研究予算の下で行われるシステムとなっている。この計画に参加している研究者は ロスアラモス ローレンス・パークレー等の国立研究所 いくつかの大学 および USGS に所属しており それぞれ DOE NSF USGS から研究費が出されている。

さてVC-1 井の研究成果については 1985年12月にサンフランシスコで開かれた AGU 秋季大会でのシンポ

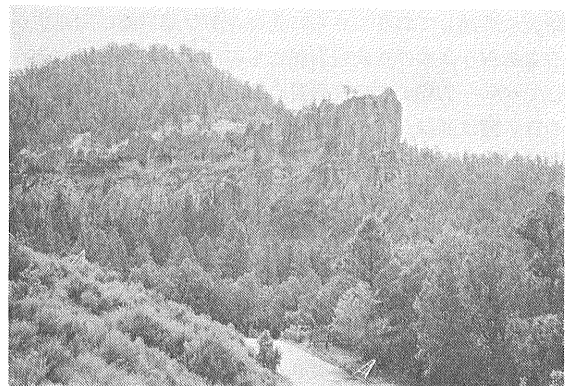


写真3 パイエス・カルデラの Battleship Rock. この近くで CSDP の VC-1井が掘削された。

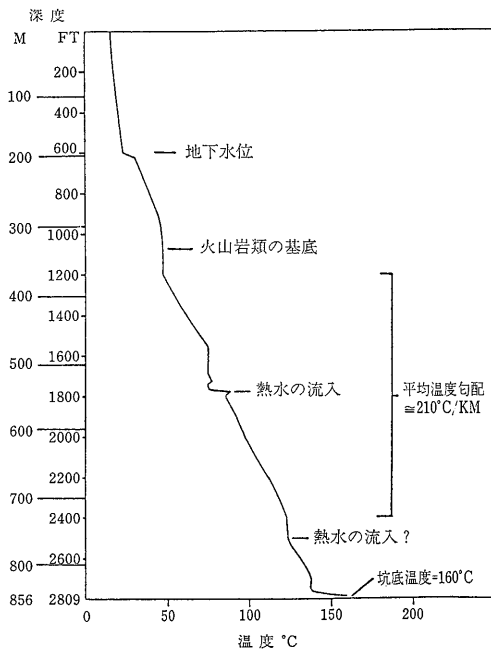
ジウムで討論された。このシンポジウムには15篇の論文が提出され 地質構造 火山岩 熱水系 物理検層についての それぞれの研究室での成果がつかあわされた形となった。私は USGS に滞在中この計画に参加していた関係で 流体包有物から見た熱水系の進化について話題提供をした。

今後の予定についてみると 1986年は蒸気卓越型の地域に坑井が掘削され 蒸気卓越型地熱資源の形成条件等を研究する予定となっている。その後数本の深部掘削の計画があり その中には既存井を5,500 mまで増掘して (VC-3) バイエスの地下でできたばかりの深成岩体に到達させる計画も含まれている (第9図)。

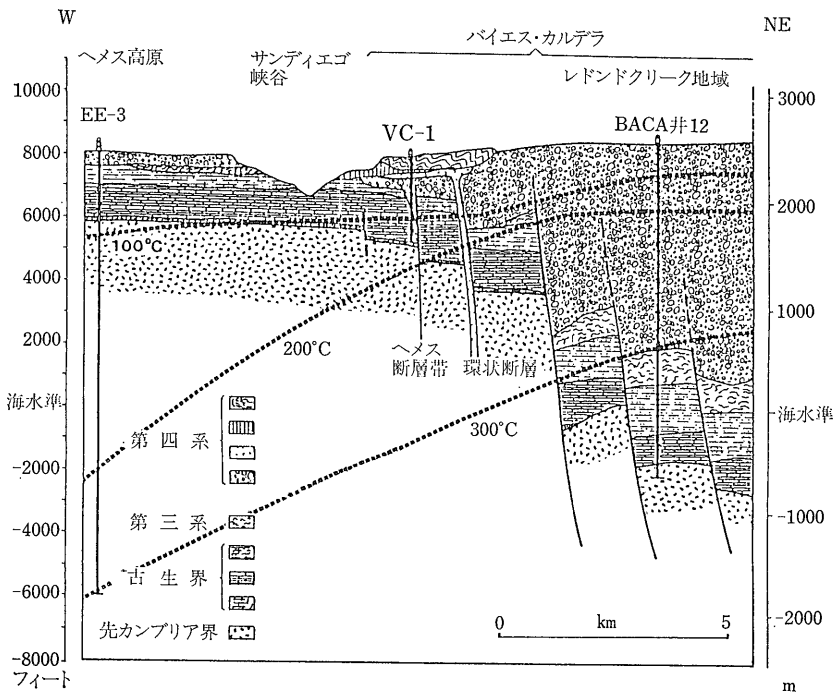
9. ソルトンシー

ソルトンシーは 東太平洋海膨の拡大中心が いくつかのトランスフォーム断層で横にずれながら カリフォルニア湾を北上し 北米大陸にはいりこんだところにある。ここはメキシコ側のセロプリエートとともに 北米大陸有数の地熱地域であるが 熱水中の塩濃度がきわめて高いため 開発には幾多の問題をかかえている。

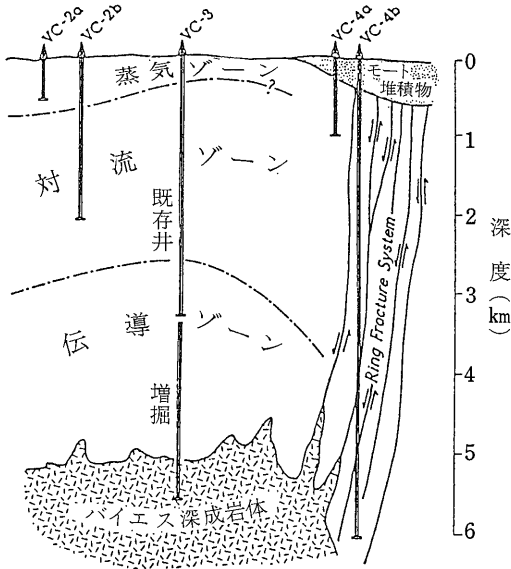
ここでの掘削計画は Salton Sea Scientific Drilling Project (略して SSSDP) と呼ばれ その目的は ずばり地熱資源の特性を明らかにすることにおかれている。このことは前述した2つの計画がより学術的色彩が強い



第7図 VC-1 井の温度および水理 (Goff et al., 1985)



第8図 VC-1 井が掘削されたバイエス・カルデラ南西縁の模式断面図 (Goff et al., 1985).

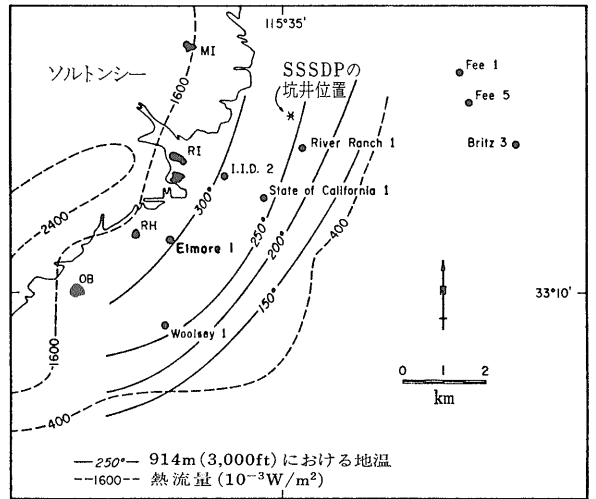


第9図 バイエス・カルデラでの今後の掘削計画 (Goff and Nielson, 1985).

のと好対照といえる。カリフォルニア大学リバーサイド校の Elders がここでの掘削計画のリーダーであり彼はこのプロジェクトの意義について掘削を通して地熱資源の実態が把握されその規模が明らかとなれば開発はより効率的に行えるであろうと述べている。

さて Elders は 1985年8月にハワイで開かれた“地熱エネルギーに関する国際シンポジウム”に SSSDP のそれまでの経緯についての論文を提出している (Elders, 1985)。彼はその論文を Geoscience ではなく Geopolitics であると呼んでいるがそこには深部掘削実現に至るまでの苦闘のあとが実によく表現されているように思える。

ソルトンシーで最も深くかつ最も温度の高い坑井というのが当初からのここでの掘削計画の目標であった。これは地熱分野での1つのフロンティアでもある。しかしそのための掘削予算確保は緊縮財政の折からかなり困難なことであったため当初はリパブリック・ジオサーマル社の計画していた3.6km深の地熱井 (Fee No. 5) を5.5kmまで増掘することにより前述の目標を達成しようとしていた。Elders はこの予算獲得のため DOE および議会を奔走し1983年に DOE から掘削計画に必要な予算を確保することができたが1984年1月になり今度はその DOE から何ら競争なしにある企業の坑井を選択し増掘するというのは DOE のルールに反するというクレームがつきこの増掘計画は座礁してしまった。その後同年3月の DOE



第10図 SSSDP の坑井の位置 (Elders, 1985).

からの提案では新たに坑井を掘削するかあるいは坑底が300°Cとなっている坑井を6,000 ft (1,800m) 増掘するかを選択にせまられた。しかし時期すでに遅くりパブリック・ジオサーマル社は独自に掘削計画を進めており当初の計画を復活することは断念せざるをえなくなっていた。そして4月新たな坑井を掘削することとしてその工事請負業者として Bechtel National 会社が選定された。掘削地点としては地熱地域の中心に近い場所が選ばれた (第10図)。これまでの掘削データから見るとそこでは1,375m以浅で300°Cとなりそうである。その後計画は順調に進むかにも見たが1985年1月になり請負業者から経費が上昇し予算を

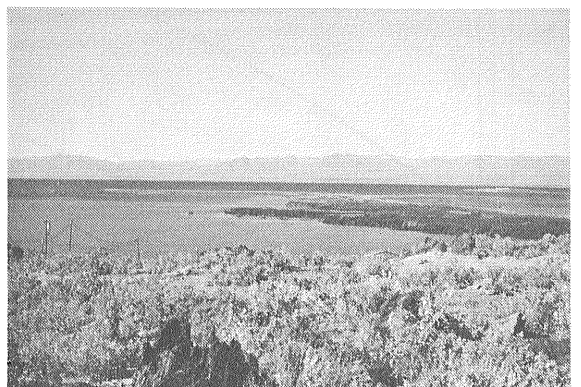
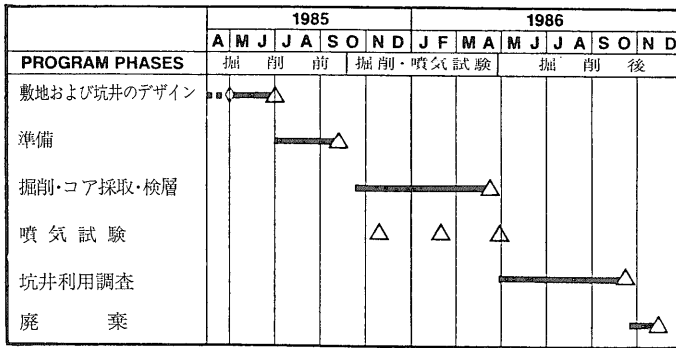


写真4 第四紀火山 Obsidian Butte からみたソルトンシー。この塩湖の南岸 (手前側) に地熱地帯が広がっている。



第11図
SSSDP の掘削スケジュール (Drilling Progress Reports, 1986 による)。

上回る旨の連絡がはいり DOE から計画の一時中断の指示が出された。これにより掘削計画全体の見直しがはかられることになり規模縮小を検討せざるをえなくなったがその際研究面にふりあてられている予算の減額は極力抑える方針がとられた。かくの如く紆余曲折を経たこの計画はようやく1985年10月に掘削が開始されることになった。坑井名は State 2-14 掘削深度は 3,000m (10,000 ft) を予定している。順調に進めば 1986年 4月に掘削は完了する予定である(第11図)。

10. おわりに

以上 CSDP のこれまでの経緯および DOE 関連の掘削計画について紹介してきたが NSF 関連では ①コロラド州の Creede 鉱床の浅熱水性鉱床をターゲットとした 3,000—4,500 m (10,000—15,000 ft) の坑井 および②カリフォルニア州 Cajon Pass で サンアンドレアス断層に沿った地域の応力を求めるための既存井の増掘が 1986年から1987年前半に始まる予定といわれておりさらに費用および掘削技術に目処がたてば 1987年から1988年にかけて アパラチア山地の南部で15,000m (50,000 ft) の坑井の掘削が大規模な衝上断層を含む地質構造の解明を目的として 始められることになるかもしれない。

これらの計画も含めて CSDP で今後さらに豊かな成果がもたらされることを期待して 筆を擱くことにしたい。拙文を草するにあたり ロスアラモス国立研究所の Fraser Goff 氏および石油資源開発 (株) の大久保進氏 (米国在住) には 貴重な資料を提供していただいた。両氏に厚くお礼申し上げる次第である。

追記

米国地質調査所メンロパーク支所に 留学中の地殻熱部茂野博氏からの 4月 7日付の手紙によると SSSDP の 3,000 m 井は計画通り掘削が終り 坑底温度は 353°C であった。地質はデルタ成砂岩及び泥岩で エピドート・ホルンフェルスとな
1986年 5月号

っているとのことである。

なお SSSDP の研究成果は 本年 9月29日—10月 1日にカリフォルニア州 Palm Springs で開催される地熱資源会議 (GRC) の特別セッションで発表される予定である。

参考文献

Eichelberger, J. C., Lysne, P. C. and Younker, L. W. (1974) : Research drilling at Inyo Domes, Long Valley Caldera, California. *Eos*, Vol. 56, No. 39, p. 721, 723-725.

Eichelberger, J. C., Lysne, P. C., Miller, C. D. and Younker, L. W. (1985) : 1984 results at Inyo Domes, California. *Eos*, Vol. 66, No. 18, p. 384.

Elders, W. A. (1985) : Continental Scientific Drilling in California : The saga of the Salton Sea Scientific Drilling Project (SSSDP). *Geothermal Resources Council Trans.* Vol. 9 Pt. 1, p. 107-111.

Goff, F. and Waters, A. C. ed. (1980) : Continental Scientific Drilling Program, Thermal Regimes : Comparative site assessment geology of five magma-hydrothermal systems. LA-8550-OBES, UC-66b, 100p., Los Alamos Scientific Laboratory.

Goff, F., Rowley, J., Gardner, J. N., Hawkins, W. Goff, S., Pisto, L. and Polk, G. (1985) : History and results of VC-1, the first CSDP corehole in Valles Caldera, New Mexico. *Geothermal Resources Council Trans.* Vol. 9, Pt. 1, p. 435-440.

Goldstein, N. E., Holman, W. R. and Molloy, M. W. ed. (1982) : Final report of the Department of Energy Reservoir Definition Review Team for the Baca Geothermal Demonstration Project. LBL-14132, UC-66b, 52p., Lawrence Berkeley Laboratory.

Smith, R. L. and Bailey, R. A., (1968) : Resurgent cauldrons. *Geol. Soc. Am. Mem.* No. 116, p. 613-662.

U. S. Geodynamic Committee (1979) : Continental Scientific Drilling Program. 192p., Office of Publications, National Academy of Sciences.

なお、CSDP に関する AGU のシンポジウムの講演要旨は *Eos*, Vol. 65, No. 45; Vol. 66, No. 18; Vol. 66, No. 46 に掲載されている。