

# ロスアラモス滞在記

## —フェントンヒル高温岩体研究に参加して—

伊藤久男 (地殻熱部)

Hisao Ito

### 1. はじめに

筆者は1986年2月11日から1985年7月10日までの5カ月間高温岩体研究開発プロジェクトに参加するため米国ニューメキシコ州ロスアラモス国立研究所に滞在した。

ロスアラモス国立研究所は日本(新エネルギー総合開発機構)と共同で同研究所近くのニューメキシコ州フェントンヒルにおいて高温岩体発電のための研究開発を行っており筆者は滞在中に行われたICFT(初期循環試験)中の微小地震AEの観測・解析に主としてかかわった。以下ロスアラモス国立研究所での高温岩体研究の概要を述べてみたい。

### 2. フェントンヒル計画の概要

高温岩体発電方式とは高温ではあるが熱水や蒸気を伴わない岩盤中に熱交換部となる貯留層を人工的に造成し注入井・人工貯留層・生産井からなるループに水を圧入して循環させ熱エネルギーを回収するものである。現在まで高温岩体研究は米国をはじめイギリス・日本・西独・フランスなどで行われている。

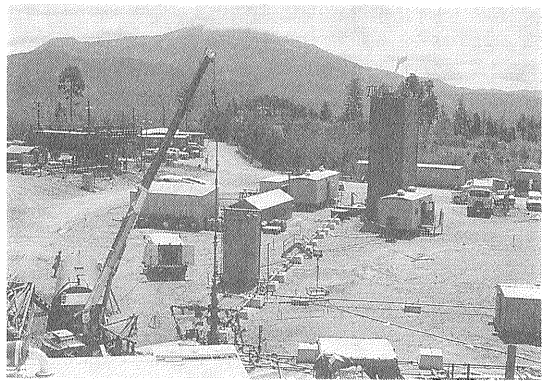
ロスアラモス国立研究所による高温岩体研究(フェントンヒル計画)はアメリカ合衆国ニューメキシコ州のバイアスカルデラの西端のフェントンヒルにおいて行われている。高温岩体発電の概念はそもそもロスアラモス国立研究所のM. Smith等によって考案され1973年より1979年までPhase Iが1980年以降Phase IIが行われている。Phase Iでは深さ3,000m 温度約200°Cの花崗岩体に人工貯留層を造成し約9カ月間にわたって熱出力3.5~5MWのエネルギー抽出に成功した。

1980年からはPhase IIとしてIEA協定に基づき日本と西独との三国協力のもとにPhase Iをスケールアップした実証実験が開始された。Phase IIでは先づEE-2, EE-3の2本の坑井(それぞれ深度4,400m, 4,000m)の2本の坑井が掘削され水圧破砕による2本の坑井間の導通が試みられた。1982年にはEE-2坑底部での一連の水圧破砕が行われたが導通には至らなかった。そこで1983年より水圧破砕の位置を浅部に移し

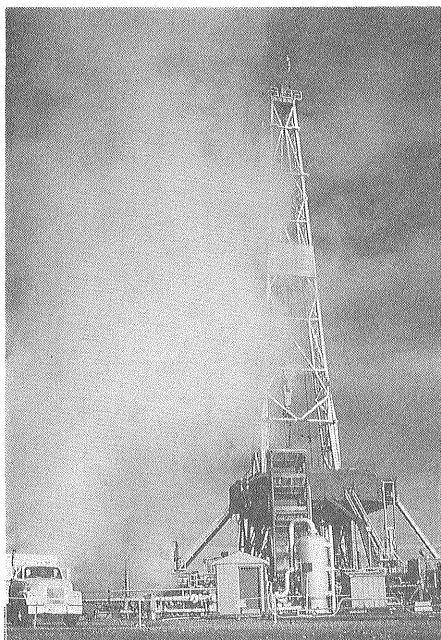
EE-2の深度約3,500mにおいて大規模水圧破砕実験(MHF: Massive Hydraulic Fracturing) Exp. 2032が行なわれた。また1984年5月にはEE-3の深度約3,500mでExp. 2032で造成された破砕帯を目標にしての迎え水圧破砕実験(Exp. 2042)が行われた。しかしExp. 2032 2042の2回の大規模水圧破砕によっても導通に至らなかったため大規模水圧破砕Exp. 2032によって形成された破砕帯を目標にしてEE-3を深度2,830mから技掘りすることとなりEE-3Aと命名された。EE-3Aの技掘りにあたってはExp. 2032の際の微小地震の震源分布が参考とされた。EE-3Aの掘削はEE-3A EE-2からの加圧を行いながら行われたがEE-2の加圧実験Exp. 2052において導通の徴候が認められ1985年5月のEE-3Aからの水圧破砕実験Exp. 2059により導通が確認された。さらにその後破砕部の拡大をめざしてExp. 2061, 2062, 2066が行われた。

### 3. ICFT 実験

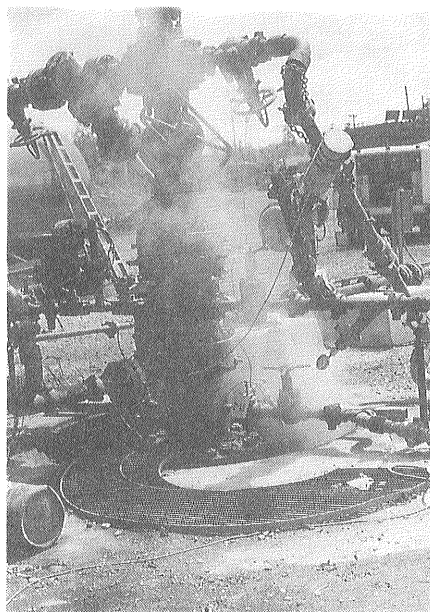
筆者のロスアラモス滞在中のハイライトは1986年5月より6月にかけて30日間行われたICFT(Initial Closed-loop Flow Test, 初期循環試験)である。水圧破砕実験Exp. 2059とExp. 2062によって注入井EE-3Aと



第1図 EE-3テーブル面からみたフェントンヒルの地上設備  
手前にEE-2の坑口が見える 赤い吹流しのある設備はEF-1(ここに3軸ジオフォングが設置された)の地上部である



第2図 フェントンヒルによる ICFT の様子



第3図 EE-2 井の地上部 多数のセンサーが設置されている

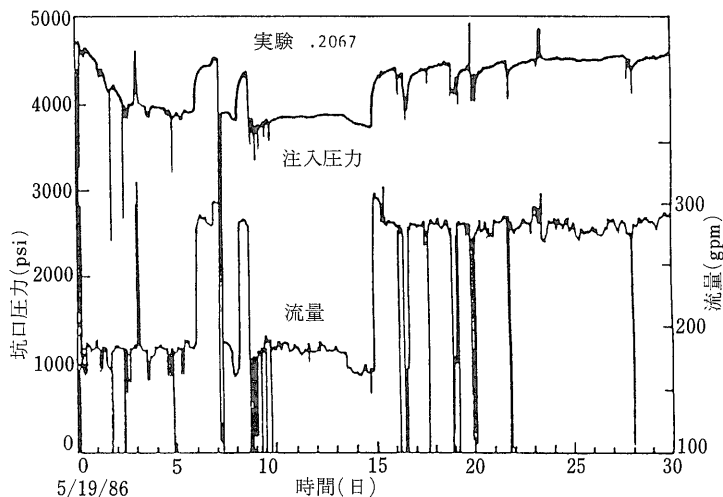
生産井 EE-2 を導通することができたが Phase II の貯留層の熱抽出能力の評価 将来の LTFT (Long Term Flow Test) 用ループ設計に必要な貯留層の各パラメーターの決定を主目的として ICFT が実施された。

ICFT では EE-3A を注入井に EE-2を生産井に 1986年5月19日午後4時より6月18日まで行われた(第1図 第2図 第3図)。流量は ICFT の前半は約11リットル/秒 後半は約19リットル/秒であり 途中何回か高流量も行われた。注入圧力と流量の経過を第3図

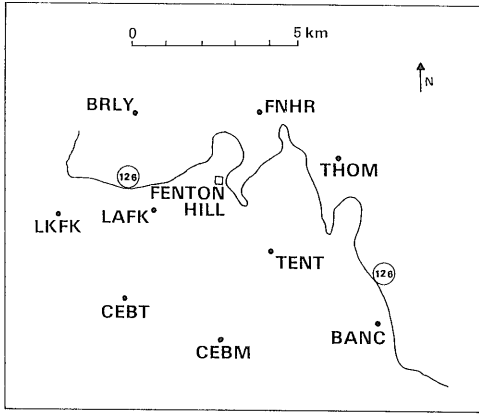
に示す。

EE-2 からはポンピング開始後約2時間半後に熱水が生産され始め その温度は最終的に190℃以上に達した。なお貯留層の岩盤温度は235℃前後と推定されている。EE-2 坑から流出した熱水は 地上の循環ループを経て熱交換器により冷却された。熱交換器の入口と出口の温度差と流量から抽出した熱量が計算された。

ICFT 期間中抽出熱量は増加を続け 最終的には9 MWt 以上に達した。注入量と生産量の差から求めた

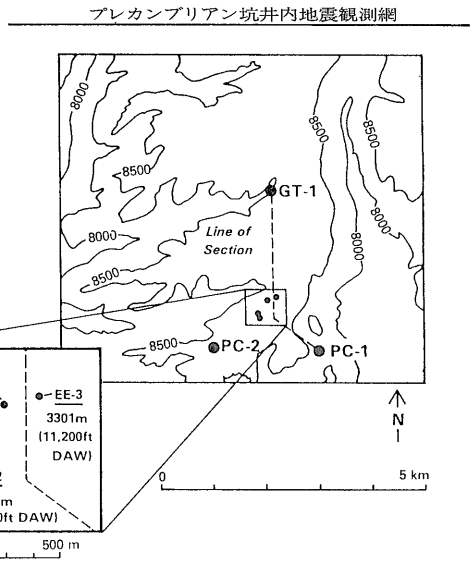


第4図 ICFT の注入圧と流量



地表地震観測網

第5図(a) Surface Stations 位置図



第5図(b) Precambrian Stations 位置図

逸水率は循環時間の経過とともに減少し 最終的には30%以下になった。

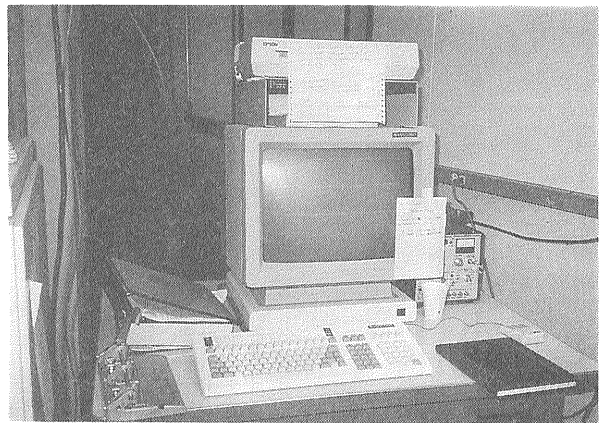
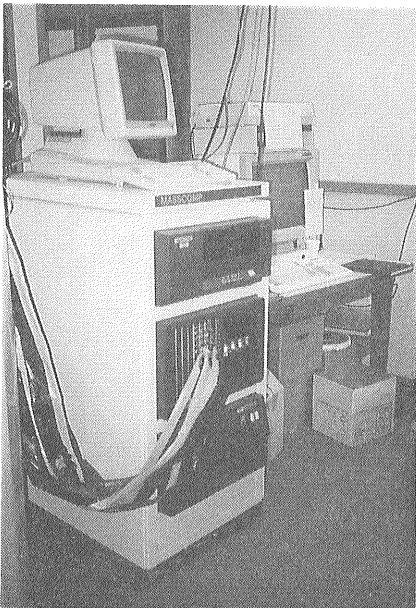
また ICFT 期間中 流体中の溶存ガスや化学成分の分析 トレーサー試験による貯留層容積の推定 N<sub>2</sub> ガスの注入によるフローインピーダンス低減の試み 生産井 (EE-2) 側の背圧を上げることによるフローインピーダンス低減の試み等がなされた (松永他 1987)。

#### 4. ICFT 期間中の微小地震 AE 観測

ICFT 期間中 貯留層の進展のモニターと環境監視を目的として微小地震 AE の観測が行なわれ 筆者もこれに参加した。

##### 4.1 観測点

観測点は 9 カ所の 地表観測点 (Surface Seismic Net



第6図

フェントンヒルの DAT (Data Acquisition Trailer) で稼働中のデータ集録装置 黄色のケーブルにより 3 台の A/D 変換器に信号が入力される データ集録を行いながら グラフィックディスプレイに波形を表示し 読取り等の処理を行うことができる

表1 データ集録条件

Digitizer	Digitizing rate (samples/sec./ch)	Input channels
a	50,000	EE-1 (3成分)
b	5,000	プレカンプリアンネット (PC-1, PC-2, GT-1, EE-1 vertical)
c	500	地上観測点 (FNHR, BRLY, CEBM, CEBT, BANC, LAFK, THOM, TENT, LKFK)

work; FNHR BRLY CEBM CEBT BANC LAFK THOM TENT LKFK) と4カ所の坑井内観測点 (Precambrian Borehole Stations; PC-1, PC-2, GT-1, EE-1) から構成されている (第4図)。EE-1 以外はすべて上下動1成分のみであり 無線によりフェントンヒルの DAT (Data Acquisition Trailer) にテレメーターされる。

4.2 データ集録

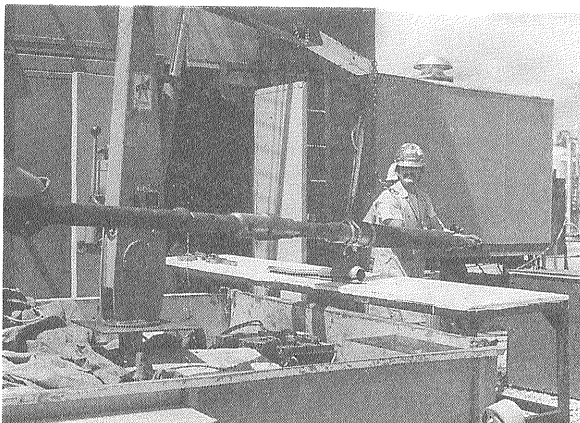
ICFT では前回の Exp. 2066 に引き続き Masscomp システムが使われた。Masscomp システムは Exp. 2066で始めてデータ取得に使われた。バックアップとしてアナログデータレコーダーが使われた。Masscomp システムとは Masscomp 社の16ビットミニコン MC-500 に A/D 変換器を備えたものである。ロスアラモス国立研究所のシステムは3台の A/D 変換器 474 MB の固定ディスク カラーグラフィックディスプレイ MT 装置 フロッピディスク装置を備えている (第5図)。さらに A/D 変換器 大容量ディスクを除いたものをもう1セット所有している。このシステムは多チャンネルアナログ地震データに対して 地震判別 (トリガー)。A/D 変換 波形データのグラフィックディス

プレイへの表示・ディスクへの転送・MT への出力を行うことができる。各 A/D 変換器はそれぞれ16チャンネルの入力が可能であり 第1表のような設定でデータ集録を行った。

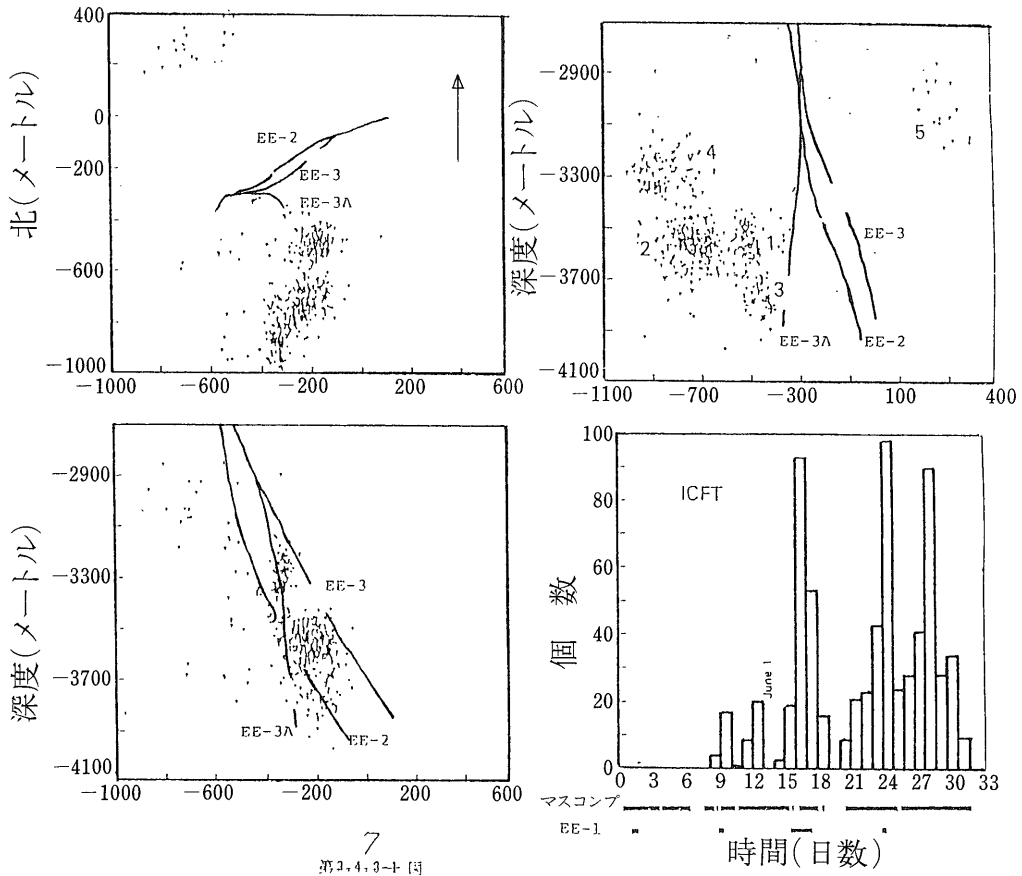
EE-1 の3軸ジオフォン (第6図) の波形データは digitizer a, bによって A/D 変換される。digitizer b による4チャンネルの波形データは一度にグラフィックディスプレイに表示してマウスにより P, S 到達時刻を読みとって震源決定することができる。この作業はデータ集録と同時に進行することができる。イベントトリガーは信号の STA (Short Time Average) と LTA (Long Time Average) を求め その比が一定値を超えた場合に地震と見なす方式をとっている。

4.3 データ解析

震源決定は 従来は3軸ジオフォンの波形記録からホドグラム法により行われて来たが ICFT では Precambrian Stations のデータからトラベルタイム法によって行った。EE-1 3軸ジオフォンの動作中は EE-1 との P と S 波到達時間および PC-1 と PC-2 の P 波到達時間から EE-1 3軸ジオフォンが動作していない場合



第7図  
EE-1 井に設置直前の3軸ジオフォンボンデ



第8図 ICFT 期間中の震源分布

は PC-1 の S 波到達時間も使って震源決定を行った。PC-1 の S 波は他のフェイズの混入のため読み取りが困難であった。EE-1 3 軸ジオフォンがある場合とない場合とで震源決定を比較したが その結果水平方向に 10 m 深さ方向に 20m 程度のわずかな差であることがわかった。

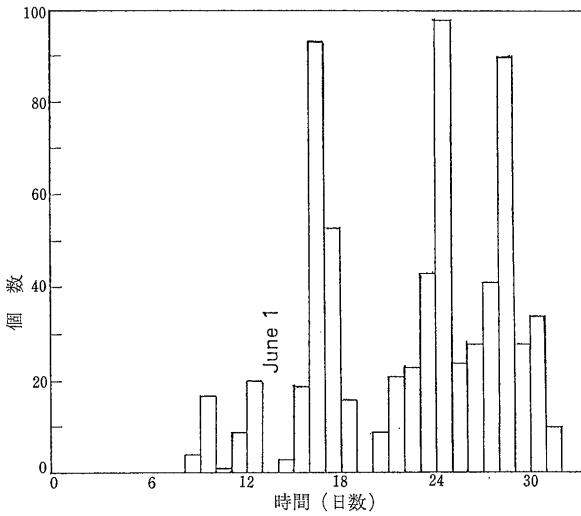
ICFT 期間中 684 個について震源決定ができ このうち 611 個が quality a, b の良好な精度をもつ。第 7 図に ICFT 期間中の震源分布を示す。左上は平面図 左下は東西方向の断面図 右上は南北方向の断面図であり それぞれ坑井も重ねて示した。さらに右下には 1 日毎の発生個数を示した。EE-1 Masscomp と表示したバーはそれぞれ EE-1 3 軸ジオフォン Masscomp システムが動作していた期間を示す。

震源域は以前観測された領域 (例えば Exp. 2032 の震源域) と似通っている。しかしながら ICFT の震源域は少数の活動を除いて Exp. 2032 (MHF) の震源域の南側にのみ存在する。この理由としては例えば a) 注水 生産による間隙圧分布が北側では低く A E

を発生させるためのしきい値以下である。 b) EE-2 のプロダクションインターバルから進展しているフラクチャーの形状・性質により流体移動は EE-3 A より EE-2 に向かい 結果的に反対側の北の方向には流体移動が起こらない。 といったことが考えられる。

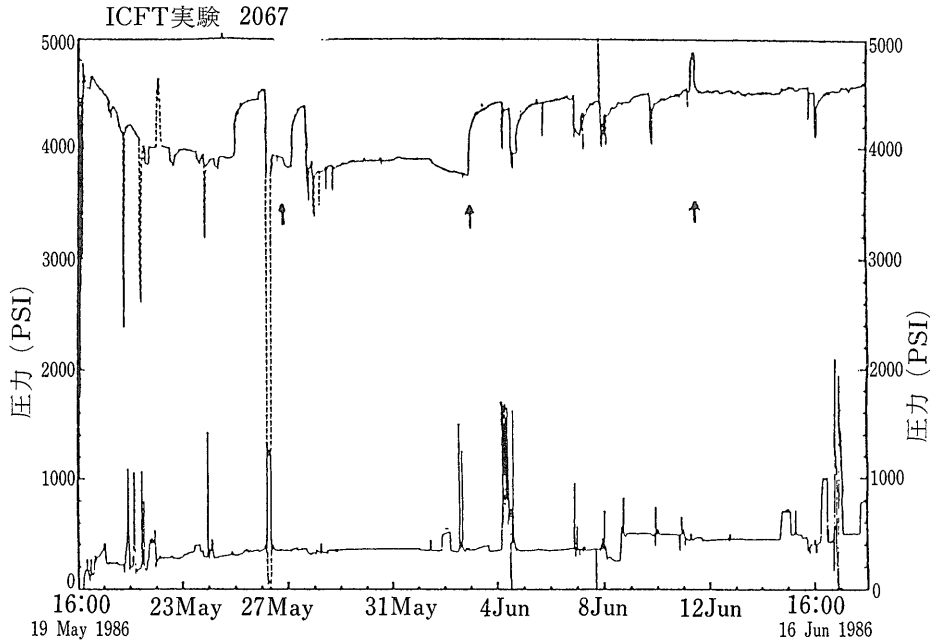
ICFT の震源はまた MHF の平板状の震源域の東側の縁に位置する傾向がある。この傾向は最初からあり貯留層の拡大を示すと考えられる。さらに ICFT の中期から終了時にかけて 浅部と深部の活動が増した。浅部の震源域は MHF の震源域をはるかに超えてさらに浅部にのびている。

第 7 図中特に 南北断面図 (右上) で明らかなように 微小地震活動はいくつかのクラスターにわかれる。これらのクラスターを図中 1, 2, 3, 4, 5 と示した。地震個数の時間変化を ICFT の圧力記録とともに第 8 図に示した。代表的な流量増加の時期を矢印で示してある。また EE-1 3 軸ジオフォン Masscomp の動作期間も示してある。震源決定できた最初の微小地



第9図

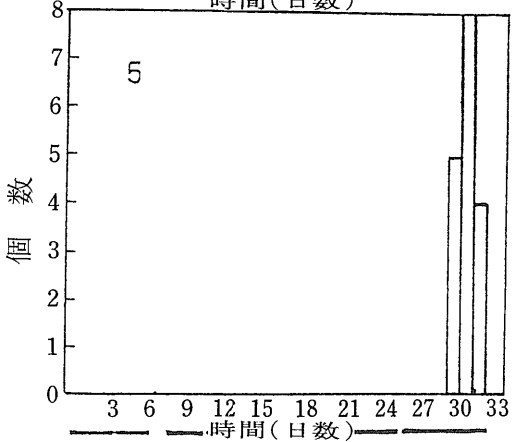
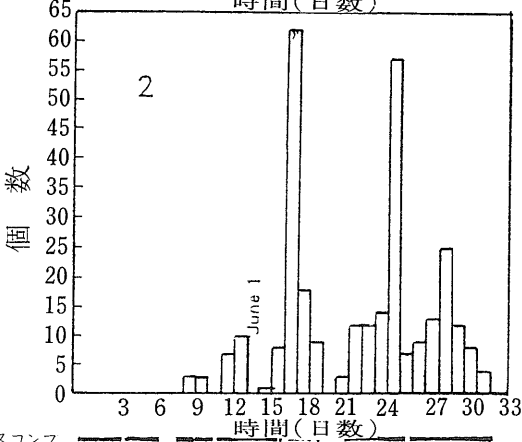
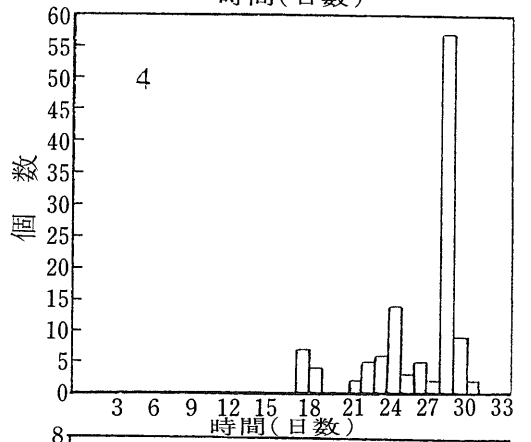
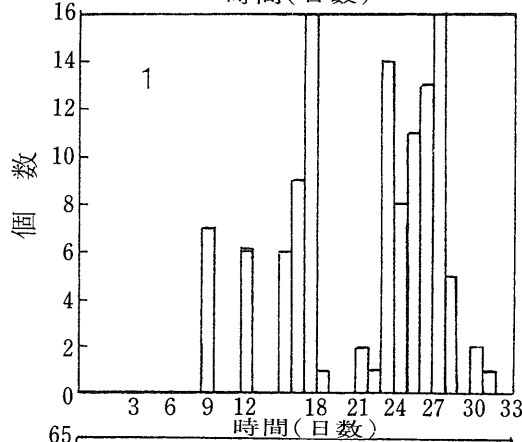
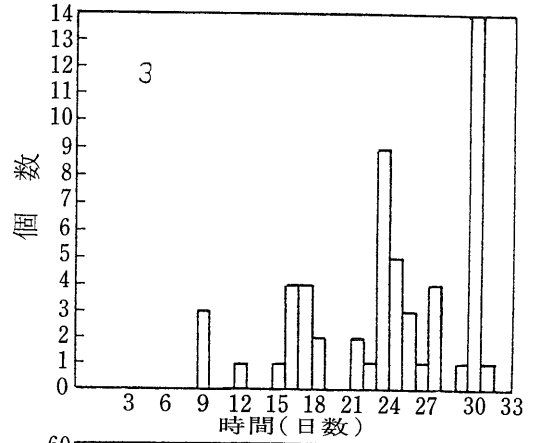
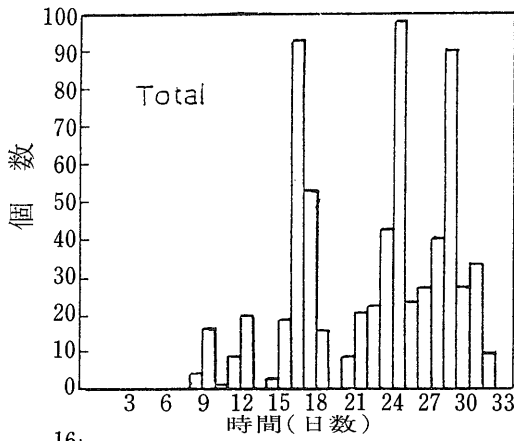
ICFT の圧力記録と微小地震の日別発生頻度



震は5月27日の夜に発生したが これは2回の高流量の期間に対応している。ほとんどの微小地震は6月4日のステップ状の流量増加以降に発生している。この日以来6月18日の最終シャットインまで 1日平均30~40個の微小地震が発生している。6月12日には 前夜からこの日早朝にかけての短期間の高流量注入実験ともなっていて この日だけで90個以上の微小地震が発生した。第3番目の群発活動が6月16日に発生した。この時はEE-1 3軸ジオフォンが設置されていなかったが それ

でも90個以上の震源決定できる微小地震が発生した。

このことより6月16日の活動は ICFT 全期間を通じて最大のものではあったと思われる。この微小地震の群発活動に対応する圧力あるいは流量の増加はない。ほとんどの微小地震は第7図のクラスター4に属し 貯留層の浅部への急激な進展を示すと考えられる。シャットイン後も 例えばクラスター5のように 北の浅い部分に若干の微小地震活動がみられる。シャットイン後は Masscomp システムはフェントンヒルから撤去され



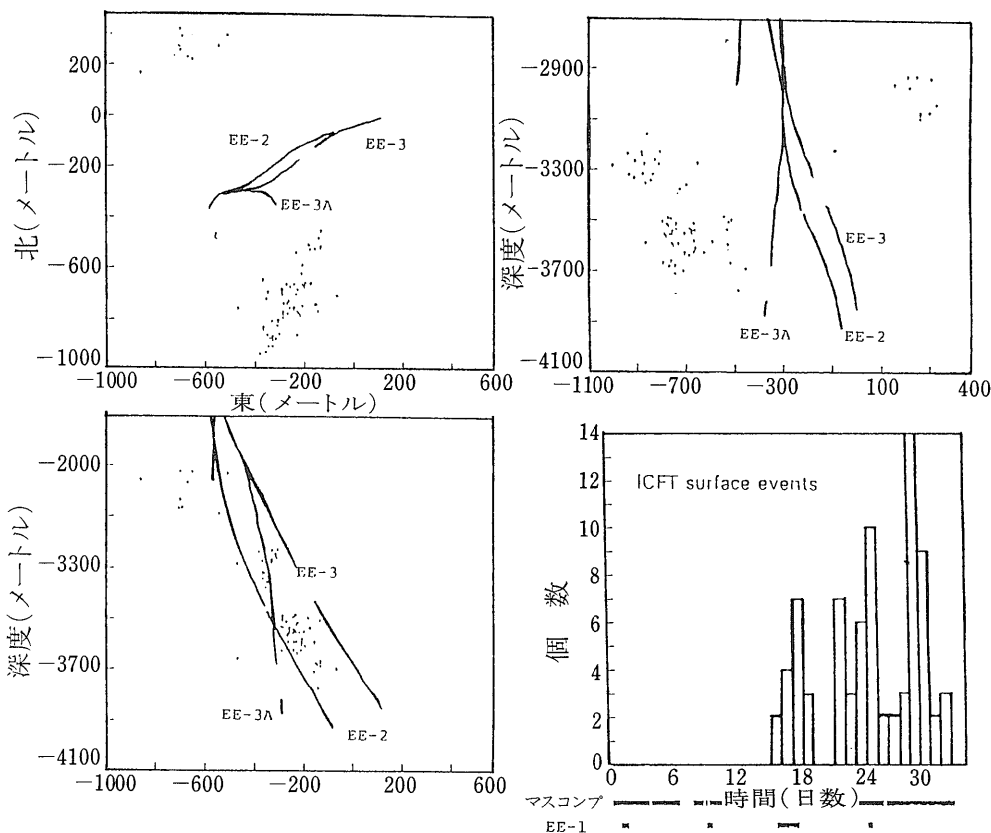
マスコンフ  
EE-1

第10図 各クラスターの日別発生頻度

だが ストリップチャートレコーダーによる Precambrian Stations の記録から判断すると ジャットイン後にも微小地震活動はわずかながら発生し その数はジャットイン時の1日あたり20個程度から7月中旬には1

日1~2個に減少した。

微小地震の震源は第7図にみられるように 大きく5つのクラスターに分かれるが 第9図に各クラスター毎の発生様式を時系列として示した。 クラスター1, 2



第11図 Surface Stations による震源決定結果

は同じような挙動を示す。最も深部に位置するクラスター3はクラスター1, 2の活動と同じ時期にも発生するが ICFT の進行とともに数が増加し ジャットイン後にも発生した。クラスター4は南側の最も浅い部分に発生するが 6月5日の流量増加後になってはじめて発生した。また6月12~13日の流量増加の後にも14個の微小地震が発生した。さらにジャットイン直前の6月16日には55個が発生したクラスター5には坑井から北側の浅い部分に発生するが 発生期間は最終ジャットイン前後に限られている。

ICFT 期間中に発生した微小地震のマグニチュードについては必ずしも正確には決定されていないが 予備的な検討によれば ICFT 以前の実験と同程度あるいはそれ以下のマグニチュードと考えられ 特に環境影響上問題になるということはないと判断された。

第10図に Surface Stations によって観測された微小地震の震源分布を示す。数は Precambrian Stations で決定できたものの約1/10である。これらは比較的大きなものと考えられるが、大多数のものは6月12日の流量増加以降になって発生している。

### 5. おわりに

高温岩体研究計画は 例えば坑井を扱うといった意味で工学的であり筆者とは派遣前まではあまりなじみのないものであった。また全く専門の違う研究者が共同してプロジェクトを進行するという点でも 経験する機会にめぐまれなかった。その意味で大変に興味深かったし 学ぶ点が多いと思う。筆者も現在地殻熱部においてサンシャイン計画にかかわっており 今後の参考になる点も多いかと思われる。

ロスアラモス滞在は筆者にとって2回目の外国居住であったが なにぶんにも不便な土地で 研究上も 生活上も援助を惜しまれなかったロスアラモス研究所の人々 公害資源研究所の厨川道雄博士をはじめとする派遣者の皆さんに厚く御礼申し上げます。

派遣にあたってはサンシャイン計画推進本部 新エネルギー総合開発機構の皆様にご支援をいただき 感謝いたします。

#### 参考文献

松永 烈 厨川道雄 金折裕司 ロスアラモス HDR プロジェクトの水圧破砕(第8報) 初期循環試験(ICFT) 採鉱と保安, vol. 33, No. 5, p. 240~249, 1987