



高温岩体発電技術の現状と今後の課題

速 水 博 秀*

Present Status and Future Requirements on the Hot Dry Rock Power Generation Techniques

Hirohide HAYAMIZU

1. ま え が き

地熱エネルギーを発電に利用する方式の内、地熱エネルギーが熱水または蒸気の形で天然に産出される場合については、我が国を含めてアメリカ、イタリア、ニュージーランド、フィリピンその他の国において実用化されている。しかし熱水または蒸気が産出されない場合については、いまだ実用的な地熱エネルギー発電は実施されていない。高温岩体発電技術はこのような場合に対応する発電方式であり、現在我が国、アメリカ、西ドイツ、イギリス等において技術開発が実施されている段階である。

このように高温岩体発電技術の開発が各国で重要視されている理由は、この発電方式に適用可能な地熱エネルギーが非常に大量に存在するためである。すなわち一般に地下深さ方向の温度分布は、深さ増加 100 m 当たり平均約 3°C 上昇するといわれており、我が国の場合、深さ 2000 m で 300°C 以上に達する例も知られている。しかし、これらの地点において、熱水や蒸気の産出をともしなうのはその一部に過ぎず、他の大部分では産出されていない。したがって高温岩体発電が可能になれば、利用可能な地熱エネルギー資源は飛躍的に増大することになる。

高温岩体発電技術の開発に最初に着手したのはアメリカであり、1972 年ニューメキシコ州ロスアラモス市の郊外フェントンヒルで調査井の掘削を実施してから現在まで研究開発を継続している。我が国においては、工業技術院のサンシャイン計画として研究開発を実施中であるが、その概要を示すと次のとおりである。まず昭和 49 年より昭和 52 年まで、薩摩硫黄島においてフィージビリティースタディーが実施され、昭和 50 年からは公

害資源研究所による基礎的研究が、昭和 53 年からは地熱技術開発(株)、三井金属鉱業(株)、石油資源開発(株)に研究委託が行われ、焼岳山ろくにおける小規模フィールド試験が開始された。なお昭和 56 年より昭和 60 年の間、我が国は新エネルギー総合開発機構を担当者として、西ドイツと共にアメリカと研究協力協定を締結し、前記フェントンヒルの開発プロジェクトに参加、多数の我が国研究者を現地における研究開発に従事させた。また国内における焼岳山ろくのフィールド試験は、昭和 59 年から規模を拡大するため山形県肘折地区にフィールドを移し、さらに昭和 60 年からは委託先を新エネルギー総合開発機構に変更して継続実施されている。

その他の高温岩体発電技術の開発研究としては、国内では東北大学におけるガンマ計画、イギリスではコンウォールプロジェクト、西ドイツではウラハプロジェクト、ファルケンベルグプロジェクトなどが実施されているが、本文ではフェントンヒルにおける共同研究の成果、公害資源研究所における基礎研究結果、肘折フィールドでの実験結果を中心にして、高温岩体発電技術の現状と今後の問題点についての解説を行いたいと考える。

2. 高温岩体発電における地熱エネルギー抽出方式

高温岩体発電技術を大別すると、地上における発電方式に対するものと、地下からエネルギーを人工的に抽出する技術に関する分野があるが、現在まで研究が実施されてきたのは主として後者についてである。そしてエネルギー抽出方式として、環境への影響を最小に抑えること、技術の実用化が容易であることを考慮すると、高温岩体中に水の循環系統を造成し、高温岩体の熱により加熱して熱水または蒸気としてエネルギー抽出するのが最

昭和 62 年 3 月 25 日受付 (Received Mar. 25, 1987) (依頼解説)

* 工業技術院公害資源研究所 資源第 4 部第 2 課課長 工博 (Second Division, Mining and Safety Department, National Research Institute for Pollution and Resources, Agency of Industrial Science and Technology, 16-3 Onogawa Yatabe-cho Tsukuba-gun Ibaraki pref. 305)

Key words : geothermal power generation ; geothermal well ; hot dry rock ; heat exchange ; underground storage ; artificial fracture ; well drilling ; hydraulic fracturing ; well completion tool ; AE inspection.

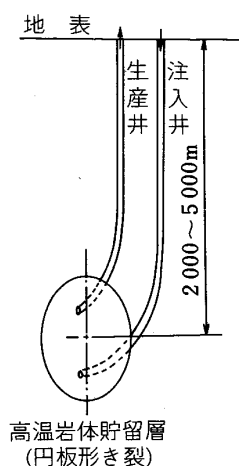


図1 高温岩体エネルギー抽出方式の概念図

適であると考えられている。

図1はこのエネルギー抽出方式の概要を示したものである。一般に発電に利用可能な高温岩体は大体2000m以深にあるので、図示された坑井の長さも2000m以上になる。また2本の坑井を結ぶ人工貯留層は、坑井底部に加えた水圧により高温岩体中に形成された破碎帯（フラクチャー）である。低温水はポンプにより坑井を通して高温岩体中の人工貯留層に注入され、ここで高温岩体から熱エネルギーの供給を受け、熱水または蒸気化されて地上に産出するものである。なお図示した坑井は2本であるが、実際にはさらに多数の坑井が使用される。人工貯留層も同図に示したような円板形クラック（半径200～600m、厚さ2～10mm程度）を数枚並べて人工貯留層とすることも計画されている¹⁾。さらにクラックが複雑に入り組んで構成された体積形フラクチャーを用いることもできる。

このような構想のもとに、高温岩体中にエネルギー抽出システムを造成する際必要とされる技術についてみると、深さ2000～5000m、温度300°C程度の岩盤中に坑井を掘削する技術、掘削された坑井の底部に水圧を加えて高温岩体中に人工貯留層を造成する技術、2本目の坑井を掘削してこの人工貯留層と結合させる技術、および人工貯留層から抽出される熱エネルギーの評価技術が主要なものであり、これら各技術についてそれぞれ研究開発が必要とされている。

3. 坑井掘削技術

坑井掘削技術としては、従来石油井掘削技術が高度に発達しているので、地熱抽出用の坑井掘削にもこの技術が転用され、必要に応じた改良がなされている。その主なものを記すと次のようになる。すなわち石油井掘削技術によれば、普通深さ数千mまで掘削可能であるが、岩盤温度は最大の場合でも200°C程度にしかならない。しかし高温岩体中に坑井を掘削する場合の岩盤温度は

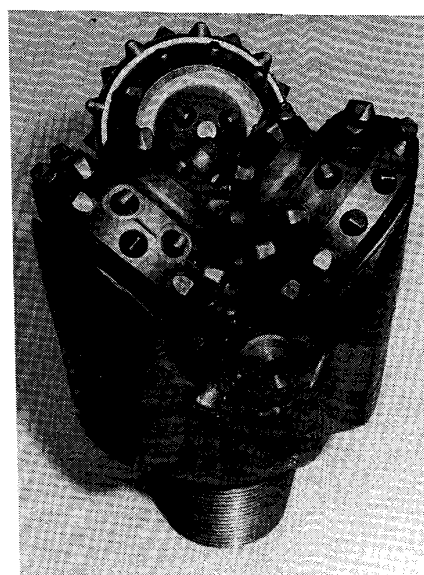


写真1 ローラーカッタービット

300°C、あるいはさらに高温を目標としなければならない。このため岩盤の高温化に対する技術改良が必要とされる。次に石油井を掘削する場合の対象岩石は一般に軟質の堆積岩であるのに対し、高温岩体は普通硬質の花こう岩類であるので、対象岩石の硬質化に対応した技術改良を実施しなければならない。さらに坑井を完成させるには、坑井内に鋼管（ケーシングパイプ）を挿入し、セメントにより坑井内に固定しなければならないので、ケーシングパイプ、セメントなどに対する高温化対策も実施しなければならない。

これら各改良項目については、工業技術院サンシャイン計画により研究開発が実施されそれぞれ所定の成果をあげてきた²⁾。またフェントンヒルプロジェクトにおいても同様の研究開発を実施し、温度320°Cの高温岩体に対し、1979年深さ4669mのEE-2坑井の、1980年深さ4255mのEE-3坑井の掘削を完了した³⁾。

以下ここでは掘削に直接関係する工具としてのローラーカッタービットの改良と坑井内温度制御技術について紹介する。坑井掘削工具として石油井掘削に使用されている代表的な工具はローラーカッタービットであるが、その形状は写真1に示すようにビット本体とカッターエレメントにより構成されている。ローラーカッタービットは掘り管と呼ばれる鋼管の先端に取り付けられ、地上に設置された坑井掘削装置（掘削リグ）から掘り管を介して回転力と推進力を供給される。このときカッターエレメントの刃先が坑底の岩石を圧砕し坑井を掘り進むようになっている。岩盤の硬質化に対する対策としては、カッターエレメント刃先の硬質化であり、このためタングステンカーバイドのチップが用いられている。またビットの直径（ゲージ）の摩耗による減少を極力防止するため、ビット本体側面にもタングステンカー

バイドのチップを装着し耐摩耗性の改良を行つている。一方岩盤の高温化に対する対策としては、カッターエレメントとビット本体に固定されている回転軸との間にある潤滑剤の流出を防止するシール機構およびシール材の改良が行われた。さらにカッターエレメントに取り付けたタングステンカーバイドチップの脱落防止技術が開発された。

サンシャイン計画ではこれらの改良を目的とした研究を民間企業に委託し⁴⁾、試作品に対する性能試験を公害資源研究所が担当した⁵⁾。その結果昭和 58 年には坑井内温度 250°C のエア掘削試験において優秀な成績を示し、昭和 59 年度には坑井内温度 150°C の泥水掘削試験において優秀な成績を示すローラーカッタービットが完成した。なおこのローラーカッタービットが温度 300°C 程度の高温岩体でも使用できる理由は、坑井掘削に際し発生する岩石切粉を坑井外に排除するために、坑井アニュラス部（坑井壁面と掘り管外面との間の円筒状部分）に泥水または圧縮空気を流しており、ローラーカッタービット周辺の坑井内温度を岩盤温度より低くできるためである。

このことから坑井内温度をできるだけ低く制御することは、ローラーカッタービットの耐熱性能を改良するのと同等の効果を示すと考えることができる。このため公害資源研究所では泥水の坑口における流入、流出温度から、ローラーカッタービットの存在する坑底温度を推定するための電子計算機プログラムを開発し、坑底温度を所定温度に保持するに必要な泥水流量の決定などを可能にした。計算結果の 1 例を図 2 に示す⁶⁾。

坑井内で使用される機器としてダウホール掘削機がある。これは坑井を曲げ掘りする際に使用するもので、ローラーカッタービットに直結し、坑底で直接ローラーカッタービットに回転力を与える機器である。これも石油掘削用に開発された機器であるので、高温岩体を使用するには、耐熱性が十分ではない。今後さらに耐熱特性を向上する必要があることはいふまでもない。

以上は普通に坑井を掘削するために必要な改良であるが、坑井を掘削することにより岩盤中に存在する天然ク

ラックの状態、岩盤に作用している地圧の大きさ、方向などを知らうとすると、掘削中に、岩石コアと呼ばれる試片の採取が必要となる。しかも採取前、試片がどのような方向を向いて存在していたかを知ることが重要となる。従来の掘削技術では岩石コアが存在した深さは知ることができても、方向を知るのは困難であつたので、今後の改良が必要となることは明らかである。

4. 水圧破碎技術

高温岩体中に人工貯留層となるフラクチャーを作る技術の水圧破碎技術と呼ぶ。水圧破碎技術は最初石油生産に関連して石油井で用いられていた技術なので、これを高温岩体中でフラクチャーを造成するために転用する場合、耐熱性、加える水圧の高圧化などに対する機器の改良が必要なのはもちろん、坑井に水圧を加えることによりどのようにフラクチャーが発生拡大するかを解明することも重要である。さらに実際に発生したフラクチャーの領域を判定するための手法や測定機器の開発が必要なことはいふまでもない。

これらの改良、開発研究の内、最初に示した水圧破碎に直接使用する機器の改良については、主として日本、アメリカ、西ドイツの研究協力によるフェントンヒルプロジェクトにおいて実施された⁷⁾。水圧破碎により発生したフラクチャーの領域判定技術についてはフェントンヒルプロジェクト及びサンシャイン計画による焼岳山ろくフィールド試験により開発された⁸⁾。また、フラクチャー発生、拡大機構については公害資源研究所が基礎的研究を実施した⁹⁾。

4.1 水圧破碎用パッカー

水圧破碎を実施する場合、地上設備としては高圧送水ポンプが主体をなすが、坑井内使用機器としてはパッカーやセメントプラグなどが存在する。パッカーはフラクチャーを坑井の所定深さにおいて発生させるために使用されるものであるが、大別するとケーシングパッカーと裸孔パッカーの 2 種がある。

ケーシングパッカーの概念図を図 3 に示す。図から明らかなようにこのパッカーはケーシングパイプ内にセットされるもので、パッキング部分は普通合成ゴムにより作られている。ケーシングパッカーはフラクストリングス（水圧破碎用送水パイプ）の先端に取り付けられ、所定の位置まで降下させた後パッキング部を膨張させ、パッカー本体とケーシングパイプの間のアニュラス部を密閉する。パッキングを膨張させる方式には水圧によるものと機械的締め付けによるものがあるが、一般に密閉を解除することによりパッカーを取り去ることができるようになっている。

パッキングによりアニュラス部が密閉されると、フラクストリングスを通して供給される水はパッカーより下部の坑井壁面にのみ圧力を与えることになるので、この部

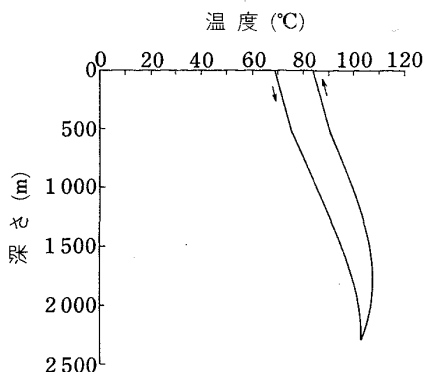


図 2 掘削中における坑井内温度分布計算例

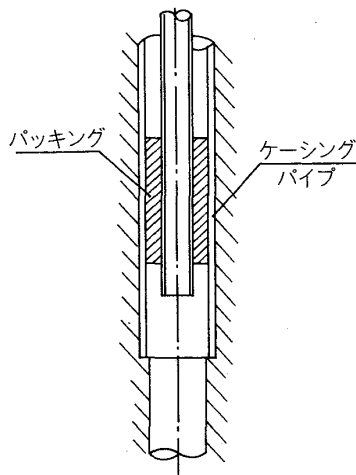


図3 ケーシングパッカー概念図

分からフラクチャーが発生することになる。

我が国においては高温岩体を対象としてケーシングパッカーを用いたことはまだないが、フェントンヒルプロジェクトにおいては、実験番号 2018, 2020, 2032, 2042, 2052 などにおいて使用されている¹⁰⁾。

実験番号 2018 ではオーチス社製のケーシングパッカーが EE-2 坑井の深さ 3475 m にセットされ、深さ 3676 m から坑底までは砂を充てんして、加圧部の長さを 147 m とした。この実験でパッカー上下に作用した差圧は約 350 kgf/cm^2 、送水総量約 900 m^3 、送水時間約 10 h であったが、実験終了後パッカーを回収したところ、パッキング部分に一部破損を生じているのが認められた。

実験番号 2019 ではフラクストリングスにき裂が発生したので実験は中止された。実験番号 2020 では最初ベーカー社製のケーシングパッカーを使用する予定であったが、パッカーにフラクストリングスを結合することができなかつたので中止し、再びオーチス社製のものを使用することとし、EE-2 坑井の深さ 3433 m にセットした。水圧破碎時におけるパッカー上下の差圧は約 350 kgf/cm^2 で約 3200 m^3 送水したところでフラクストリングスに破損を生じたので実験を中止した。

実験番号 2032 はいわゆる大規模水圧破碎実験 (MHF) であり、この実験でもオーチス社製のケーシングパッカーが使用された。パッカーは EE-2 坑井のケーシングパイプ下端直上の位置にセットされ、坑底における砂充てん部の長さを増加して、加圧部の長さを 23 m とした。水圧破碎実施中におけるパッカー上下の差圧は約 350 kgf/cm^2 を示し、送水時間約 60 h、送水総量約 21300 m^3 に達した時フラクストリングス上端にあるフランジの固定ねじが破損したため実験を中止した。なおこの水圧破碎の間、パッカーは平均温度 230°C の状態に置かれたと推定されている。

実験番号 2042 は、EE-3 坑井での水圧破碎実験で、深さ 3328 m より 3482 m の間に設けられたセメントプラグのケーシング内にオーチス社製のケーシングパッカーをセットして行われた。パッカー上下の差圧は約 330 kgf/cm^2 で送水総量約 7570 m^3 を送水して実験を終了した。

実験番号 2052 は、大規模水圧破碎実験で造成されたフラクチャーの再加圧実験であり、EE-2 坑井にケーシングパッカーをセットして行われたが、加えた水圧が他の実験における値の $1/3$ 程度なので、パッカー使用上なんらの問題も発生しなかつた。

以上を総括すると高温岩体の水圧破碎において、パッカーセット箇所の温度 230°C の場合数十時間の連続使用に十分耐えることが示された。

パッカーの他の形式である裸孔パッカーはケーシングパッカーと異なり、ケーシングが施されていない坑井裸孔部で使用されるものである。その構造はケーシングパッカーとはほぼ同様であるが、ケーシングパイプ内で使用するにはパッキングの膨張がほぼ一様になるのに対し、裸孔の場合は非常に不規則になるので、パッキング部の破損が発生しやすく高温岩体の水圧破碎に適したものが容易に開発されなかつた。

我が国では高温岩体の水圧破碎用として、裸孔パッカーを用いた実験はケーシングパッカーの場合と同様いまだ実施されていない。しかしフェントンヒルプロジェクトでは 1982 年当時から裸孔パッカーによる水圧破碎実験が開始されており、1985 年に実施された実験番号 2059, 2061, 2062 の水圧破碎において実用に耐えることが確認された¹¹⁾。これら三つの実験は、前記大規模水圧破碎実験により造成されたフラクチャーと EE-3 坑井を連結するため EE-3 坑井からの枝掘り坑井 EE-3A おいて実施されたもので、すべてライズ社製の裸孔パッカーが用いられた。実験番号 2059 では、パッカーは深さ 3519 m にセットされ約 20 h、送水総量約 1600 m^3 において実験を終了した。この間坑口圧力の最大値は約 420 kgf/cm^2 となつた。

実験番号 2061 では、パッカーは最初深さ 3838 m にセットされ水圧破碎が実施されたが、パッカー上方への漏えいが認められたので実験を中止し、深さ 3831 m に再セットして送水を開始し、約 60 h 送水して実験を終了した。この間における送水総量は約 5200 m^3 、坑口における最大圧力は約 490 kgf/cm^2 であった。

実験番号 2062 ではパッカーは深さ 3653 m にセットされ、坑底から深さ 3837 m までは砂が充てんされた。この実験は 84 h 継続され、送水総量は 5772 m^3 、坑口における最大圧力は約 490 kgf/cm^2 であった。

以上から裸孔パッカーは高温岩体の水圧破碎において坑口最大圧力 500 kgf/cm^2 程度で数十時間の使用に耐えることが明らかであるが、パッカーをセットする箇所に

おける坑井断面が正規の坑井断面と著しく相異している場合には使用不能となることも示された。

4.2 セメントプラグ

裸孔パッカーの実用上における最大の弱点は不規則な断面形状の坑井壁面に合成ゴム製のパッキングを密着させなければならないことである。これはパッキングの弾性変形に限界があるため、合成ゴムの変形性を改善して解決する必要があるのはもちろんであるが、全く別の方式による坑井密閉技術の開発も必要である。セメントプラグによる密閉方式は裸孔パッカーと同様に使用できるばかりでなく、密閉区間が裸孔パッカーに比して著しく長くなるので、むしろ水圧破碎の実施に対し優れていると考えられる。

セメントプラグについても我が国で高温岩体の水圧破碎に使用した実績はない。しかしフェントンヒルプロジェクトでは 1982 年以来開発研究が行われており、実験番号 2011, 2012, 2016, 2025 における水圧破碎実験に使用されている¹²⁾。セメントプラグは図 4 に示すように鋼管をセメントにより坑井に固定して坑井密閉を行うものである。セメントプラグは坑井から取り外すことができないので、鋼管上端に PBR と称される接続装置を取り付け、フラクストリングスはここに着脱可能な方式で接続される。

実験番号 2011 では、EE-2 坑井の深さ 4 260 m の位置に長さ約 90 m のセメントプラグが固定され、フラクストリングスとして 3 1/2" のドリルパイプが用いられた。約 15 h にわたって総量約 500 m³ の送水が行われ、その間坑口における最大送水圧力は 490 kgf/cm² を示した。ついで実験番号 2012 が実施されたが、フラクストリングスのみ 4 1/2" のケーシングパイプに換えただけである。この実験では送水時間約 17 h, 送水総量約 3 000 m³ であつた。この間における最大坑口圧力は約 460 kgf/cm² を示した。なおセメントプラグ上下における差

圧は約 350 kgf/cm² であつた。実験番号 2016 も全く同一のセメントプラグを用いて実施され、総量約 5 000 m³ の水を 25 h かけて送水した。この間における最大坑口圧力、セメントプラグ上下における差圧など前者とほぼ同一であつた。

実験番号 2025 では、EE-3 坑井の深さ 3 350 m に長さ約 160 m のセメントプラグを打設した。また EE-3 坑底には砂を充てんし水圧破碎の実施する裸孔部の長さを約 110 m とした。約 580 m³ の温水 (60~65°C) を 3 h 30 min かけて圧送した時点でフラクストリングスにき裂が生じたので実験を中止している。

以上セメントプラグは高温岩体の水圧破碎に十分有効に使用できると考えられるが、PBR 部での接続にトラブルが生じたことも記録されているので、今後さらに改良を続ける必要があると考えられる。

4.3 AE 観測技術

水圧破碎により高温岩体中に水を注入するとフラクチャーが拡大する。このとき岩盤の局所的な破壊が頻りに発生する。この破壊発生に際し、その部分の弾性エネルギーが解放され、弾性波となつて高温岩体中を伝ばする。地震の震源を決定するのと同様、この弾性波を利用して弾性波の放射源すなわち破壊発生箇所を決定することができる。局所的破壊の発生するたびにその位置を求め、図示すると図 5 のようになる¹³⁾。図中の点群は上記により決定した局所的な破壊発生位置であり、フラクチャーはこの局所的破壊の集合体と考えられるので、点群の分布 (クラウド) からフラクチャーの存在領域を推定することができる。

弾性波を利用してその放射源を知る方法を AE (Acoustic Emission) 観測技術と呼んでいるが、大別して 2 種類の方法が用いられている。その一つは多点観測法と呼ばれる方法で、地震の震源決定法と同様いくつかの位置に弾性波を検出する AE センサーを設置し、各 AE センサーで記録された振動の初動時刻の差を求め、その時刻差から計算により放射源を決定するものであ

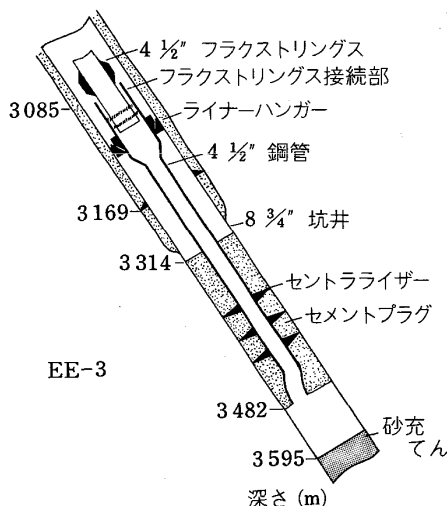


図 4 セメントプラグの設置状況

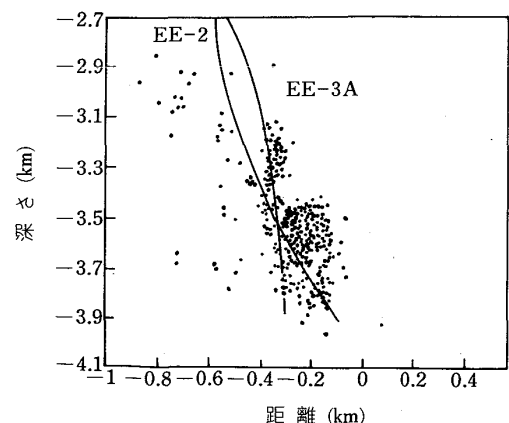


図 5 AE 観測結果

る。もし破壊発生位置と各 AE センサー設置位置の間における弾性波伝ば速度を一定と仮定すれば 4 か所に AE センサーを置くことにより放射源を決定できるが、実際には弾性波伝ば速度は一定でないので、逐次補正を行ったり、多数の観測点による測定結果を利用して最適解を求めることにより放射位置決定の精度を上げている。

他の一つは一つの測定点において AE センサーを 3 個直交方向に組み合わせた 3 軸ジオフォンにより弾性波の各軸方向の振動を記録し、これを合成して空間中における振動方向を決定し、さらに弾性波の P 波が縦波であることを利用して弾性波の到来方向を決定する。また記録結果における P 波、S 波の各初動時刻の差により、放射源までの距離を決定する。

これら AE センサーは多点観測法では地表または中深度坑井内に設置され、3 軸ジオフォンによる観測では水圧破碎深さと同程度の深さを有する坑井内に設置されることが多い。このため地表または坑井内で使用可能な各センサーの開発がサンシャイン計画、フェントンヒルプロジェクト双方において実施された。特に坑井内で使用する 3 軸ジオフォンについては、その耐熱性向上に関する改良が行われ、フェントンヒルプロジェクトにおいては 275°C の坑井内での使用実績を得ている。また我が国の肘折フィールドでは坑井深さ 800 m、温度 110°C における観測結果を得ている¹⁴⁾。なお 3 軸ジオフォンは坑井内で使用するため、全体の形状が円柱状になり、しかも坑井への固定方式によっても影響されるため、3 軸ジオフォン長手方向に配置された AE センサーの感度が、これと直交する他の 2 方向 AE センサーに比して小さくなる。このため実際の弾性波到来方向を知るには感度に対する補正が必要とされており、今後さらに改良を要するものと考えられる。

一方多点観測法は測定原理が単純なので、現在のところ 3 軸ジオフォンによる測定結果より精度が高いと考えられている。しかしこの方式の精度の良否は、弾性波放射源と AE センサー設置点の間の弾性波伝ば速度を詳細に知ることにかかっている。しかし実際上弾性波伝ば速度の分布を詳細に知ることとは不可能なので、実用的な方法として水圧破碎を実施する坑井の幾通りかの深さ（水圧破碎深さも含む）で火薬の爆発を行い、その際発生する弾性波を各 AE センサーにより記録する。この場合弾性波放射源と AE センサーの間の距離は既知なので、弾性波伝ば速度の分布を解析することができる。

なお 3 軸ジオフォンの設置位置は、多点観測法の AE センサー設置位置に対し、一般に水圧破碎実施箇所の近くにとることができるので、1 回の水圧破碎に際し観測できる弾性波の数が多く、したがって弾性波放射源も多数決定される。この全部の測定精度が多点観測結果と同様になれば、フラクチャー存在領域推定に対する寄与を

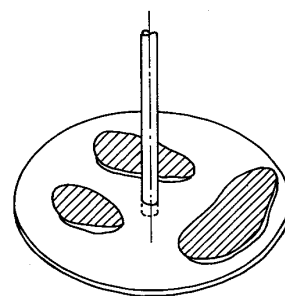


図6 円板形クラックにおける未破碎部（斜線部分）

飛躍的に増大することができる。このため両方式による観測が同時に行われている場合、同一時刻に発生した弾性波についての放射源決定結果を比較し補正することも実施されている。

4.4 フラクチャーへの坑井導通技術

前述のように AE 観測により、弾性波放射源が決定され、その分布が図5のように得られたとする。もしこの分布の中に第2の坑井が存在していて、水圧破碎を実施した坑井との導通が実現すれば理想的である。フェントンヒルプロジェクトでは EE-2, EE-3 坑井を掘削し、EE-2 坑井での水圧破碎により直接導通を実現する予定であったが実現することはできなかつた。このため EE-3 坑井からの枝掘りを行い、その枝掘り坑井（EE-3A）による導通を考えた。このように AE 観測によるクラウドが先に存在し、このクラウドを目標に坑井を掘削して導通を図ろうとする場合、一番重要なことはクラウドのどこを掘削したら導通するかを決定することである。クラウドの中を単に掘削しただけでは必ずしも導通を果たすことはできない。

これはクラウド内すべての箇所にはクラックが存在するわけではなく、例えば円板形クラックの場合でも図6に示すよう島状にクラックの存在しない領域が存在し、体積形フラクチャーの場合も同様にクラックの存在しない領域が多数存在するからである。フェントンヒルプロジェクトにおいては、EE-3A 坑井は実験番号 2032 で行つたいわゆる大規模水圧破碎で造成したフラクチャーを貫通するように掘削されたが、一定深さを掘削するごとに EE-3A 坑井における小規模な水圧破碎を実施し、大規模水圧破碎フラクチャーとの導通を計画した¹⁵⁾。

実験番号 2059, 2061, 2062 は上記計画を実行したものである。これら三つの実験における水圧破碎については前述してあるので、導通状況のみを示すことにする。実験番号 2059 は EE-3A 坑井の坑底が 3722 m まで掘削された時に実施された。前述のように EE-3A 坑井から水圧破碎を行つたところ、坑口密閉中の EE-2 坑井の圧力上昇が認められたので、坑口の開放と閉鎖を繰り返した。図7はその際における坑口温度と流出流量を示している。EE-3A 坑井への送水流量 1.59 m³/min に対し、

EE-2 坑井からの流出流量は最終的に $0.57 \text{ m}^3/\text{min}$ に達した。

実験番号 2061 は EE-3A 坑井を深さ 4021 m まで掘削した時行われた。この実験では EE-3A 坑井から水压破碎を前記のように行つたが、EE-2 への導通を果たすことはできなかった。

実験番号 2062 は前述のとおり EE-3A 坑底から深さ 3837 m まで砂を充てんして実施した。この実験における EE-3A 坑井への積算送水量、EE-2 坑井からの積算流出量を図 8 に示す。なお図中流出率は積算送水量に対する積算流出量の比である。図 9 は EE-2 坑井からの流出水の温度変化を示したもので最終的には約 150°C

に達したことがわかる。

引き続き実験番号 2064 が実施された¹⁶⁾。これは裸孔パッカーを EE-3A 坑井の深さ 3830 m に設置し坑底から深さ 3906 m まで砂を充てんして行つた導通を目的とした水压破碎であつたが、パッカーの故障により中止された。実験番号 2066 も同じく EE-3A 坑井と EE-2 坑井の導通を目的とした実験であり、裸孔パッカー設置深さを 3737 m に変更した。この実験では水による水压破碎のほか、ゲル剤による水压破碎も試みられた。しかし密閉した EE-2 坑井における圧力上昇が多少認められたのみで、導通は実現されなかつた。

4.5 水压破碎の基礎研究

前節までの説明でも明らかなように水压破碎により発生するフラクチャーの形状、存在領域を知ることは AE 観測の実施後になる。しかし、水压破碎を実施する坑井とフラクチャーとの結合状態を希望どおり実現させるために（例えば円板形クラックが発生して、フラクチャーが坑井と直交して発生すると計画したとき、坑井をどのように掘削すればよいかを決定するために）、フラクチャーの形状と寸法を予想できれば便利である。水压破碎に関する基礎研究は水压破碎によりどのようなフラクチャーが発生するかを検討するために実施された¹⁷⁾。

弾性力学的な理論結果によると、坑井を含んだ領域で、主応力の一つが坑井軸と一致しており、それが最小主応力（引張応力を正值として）の場合には、坑井軸と直交する面内にクラックが発生することになる。岩石試片を用いての実験においても大略同様な結果が生ずるが、岩石中には結晶粒界など既存クラックと考えられるものが多数存在するので、既存クラックの影響の大きい場合には、上記理論結果と一致しない結果も得られている。

この簡単な基礎実験からも明らかなように水压破碎により高温岩体中に発生するフラクチャーは、地圧と既存クラックの影響を受けることになり、水压破碎前にフラクチャーの形状や寸法を推定するには、地圧の主方向及びその大きさ、さらに既存クラックの状況を知る必要がある。水压破碎を実施する高温岩体についてすでにこれらのデータが得られている場合はそれが利用できるが、全くデータが明らかでない場合には、坑井掘削に際し岩石コアと称する試片を採取して材料試験を実施し、主応力の方向とその大きさを推定することが試みられている。ただしこの推定を行うには、採取された岩石コアが高温岩体中でどのような方向を向いていたかを、コア採取の際明らかにすることが必要で、この目的を満たすコア採取技術が開発されつつある。一方高温岩体中に存在する既存クラックについては、もしそれが岩石コア中に存在すれば、その方向を知ることができるが、掘削された坑井の壁面に現れるクラックを坑井内テレビジョンまたはテレビューにより観察する方法によつても知ることができるので、これら機器の開発が行われて

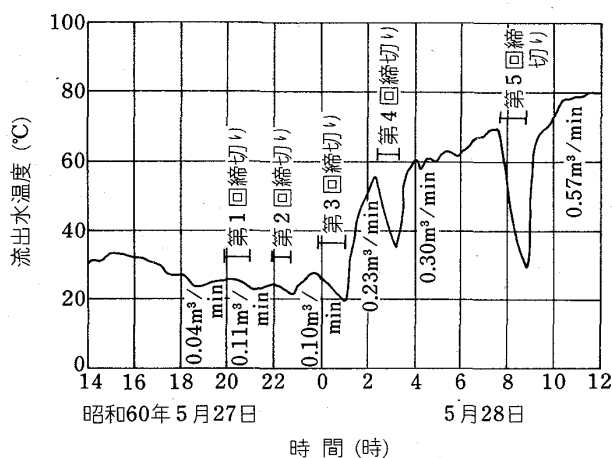


図7 EE-2 坑井流出水温度、流量

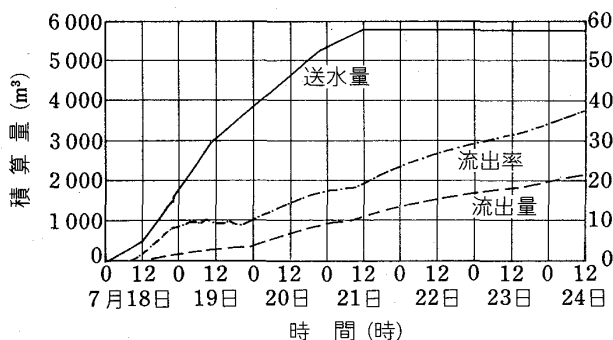


図8 EE-3A 坑井への積算送水量と EE-2 坑井からの積算流出量

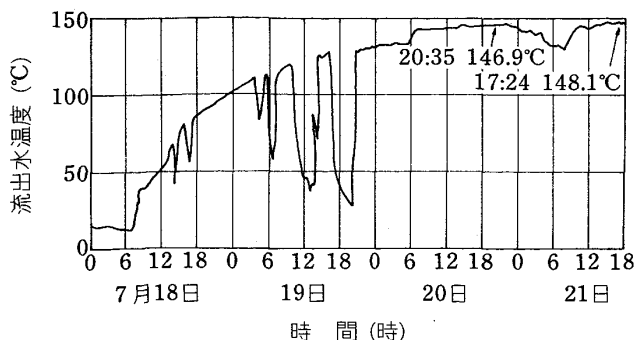


図9 EE-2 坑井からの流出水温度

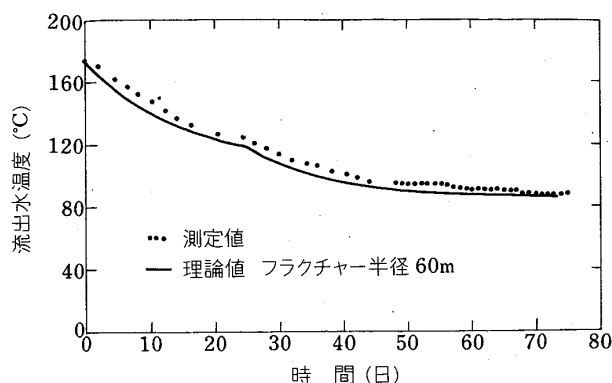


図 10 フェントンヒルプロジェクト第 1 期計画での熱抽出実験結果の 1 例

いる。

次に水圧破碎により円板形クラックが発生するか体積形フラクチャーが発生するかの判断であるが、岩石中に既存クラックがなく、ポンプ送水流量が大で坑井内の圧力が高い場合には円板形クラックが発生しやすく、既存クラックが多数存在し、坑井内の圧力が低い時には、体積形フラクチャーが発生しやすいことが基礎実験により確かめられている。しかし、まだこれらの限界条件等は明らかにされていない¹⁸⁾。

基礎研究で重要なもう一つの分野として、造成されるフラクチャーの大きさの予測がある。フラクチャーの大きさの予測値としては水圧破碎実施中におけるもの、AE 観測によりある程度フラクチャー存在領域が明確にされている時のもの、2 本の坑井がフラクチャーと導通して循環可能な状態になっている時のものなどがあり相違した値を示す。とくに最初の二つの予測値により、さらに水圧破碎を継続するか、坑井とフラクチャーの結合箇所を変更するかなどいろいろと判定しなければならない。予測方法は水圧破碎実施中における場合などでは理論的な方法もあるが、それ以後での評価はすべて電子計算機による数値解析が必要なので、これら解析プログラムの作成が行われている。

5. 熱抽出評価技術

フェントンヒルプロジェクトの EE-2, EE-3A 坑井と大規模水圧破碎により造成された熱水貯留層による循環試験、熱抽出試験の結果は間もなく発表されると考えられる。しかし、現時点では高温岩体からの熱抽出結果は、我が国が西ドイツと共に共同研究に参加する以前に、アメリカ 1 国で行ったフェントンヒルプロジェクトの第 1 期計画におけるものがあるのみである。図 10 にその結果を示す¹⁹⁾。図から明らかなように高温岩体のエネルギー抽出システムにより得られる熱水の温度は日時の経過と共に減少している。これは岩石の熱伝導率が小さく、高温岩体の熱抽出にともないその部分の温度が局所的に

低下するためである。

このように高温岩体の人工熱水系の熱水温度や熱出力は変化するので、この変化が長期にわたってどのように発生するかを知ることは実用上重要となる。熱抽出能力評価はこの目的をもつて行われるもので、公害資源研究所では模型実験、電子計算機シミュレーションなどにより検討を行っている²⁰⁾。

模型実験では小型化した熱水貯留層をモルタルブロックの中に作り、モルタルブロック全体を電気炉で一定温度に加熱した後、熱抽出試験を行い、熱出力変化、温度変化などを測定する。模型実験の特徴は実際のフィールド試験に比して上記各データの変化速度が大きく、短期間で実験を終了できることである。しかし短所はこの実験結果から直ちにフィールド試験の結果を予測できないことであり、いろいろの補正を行わなければならない。電子計算機シミュレーションはこの補正を行い、フィールド試験の結果を予測及び評価するために用いられるので、これらのシミュレーションプログラムの作成が重要な基礎研究として実施されている。

6. む す び

以上の説明から明らかなように、高温岩体に対する掘削技術はほぼ確立されたと見ることができ、岩石コア採取技術でまだ改善の余地が存在する。水圧破碎技術についてはケーシングパッカー、セメントプラグ技術等は今後多少の改良を必要とするが、ほぼ実用性があると判断される。これに対し裸孔パッカーはその設置箇所の状況により破損の可能性が高く、今後その性能を改善すると同時に設置技術についても改良の余地が大きい。水圧破碎により発生したフラクチャーの形状や存在領域の評価には AE 観測技術が用いられているが、3 軸ジオフォンについては感度の均一化が今後の課題であり、弾性波放射源を知るために必要とされる弾性波伝ば速度分布の測定についてもさらに精度のある手法を開発する必要がある。なお弾性波放射源の分布が測定されその分布部分を貫く坑井を掘削しても、必ずしもフラクチャーと結合できないことから、弾性波放射源とフラクチャー存在領域との関係について今後十分に検討する必要がある。また、このフラクチャーと掘削坑井を結合するための水圧破碎技術についても十分改良を加え、必ず導通が発生するようにしなければならない。

高温岩体のエネルギー抽出システムにおける循環動力の大小は、高温岩体発電の効率に大きな影響を及ぼすと考えられるので今後循環試験は十分に実施し、循環動力を小さくする手法を開発しなければならない。

最後に熱抽出試験については模型実験のみならずフィールド試験のデータを集積し、電子計算機シミュレーションの精度向上のためのデータとする必要がある。

文 献

- 1) Hot Dry Rock Geothermal Energy Development Program Annual Report, Fiscal Year 1980 (1981), p. 80 [Los Alamos National Laboratory]
- 2) 昭和 55 年度サンシャイン計画成果報告書概要集 (1981), p. 25, p. 34 [工業技術院サンシャイン計画推進本部]
- 3) 文献 1), p. 83, p. 86
- 4) 昭和 57 年度サンシャイン計画成果報告書概要集 (1983), p. 44 [工業技術院サンシャイン計画推進本部]
- 5) 三澤茂夫, 唐澤廣和, 盛田耕二, 速水博秀: 採鉱と保安, **32** (1986), p. 57
- 6) 盛田耕二, 唐澤廣和: 採鉱と保安, **32** (1986), p. 79
- 7) 高温岩体開発技術 (1987), p. 222 [新エネルギー総合開発機構]
- 8) 昭和 58 年度サンシャイン計画成果報告書概要集 (1984), p. 66 [工業技術院サンシャイン計画推進本部]
- 9) 小杉昌幸, 小林秀男, 速水博秀: 採鉱と保安, **32** (1986), p. 117
- 10) 厨川道雄, 日比谷啓介: 採鉱と保安, **29** (1983), p. 358
- 11) 山口 勉, 瀬尾邦夫: 採鉱と保安, **32** (1986), p. 137
- 12) 文献 7), p. 300
- 13) 小林秀男, 松永 烈: 採鉱と保安, **30** (1984), p. 353
- 14) 昭和 59 年度サンシャイン計画成果報告書概要集 (1985), p. 72 [工業技術院サンシャイン計画推進本部]
- 15) 文献 11), p. 137
- 16) 厨川道雄: 採鉱と保安, **33** (1987), p. 68
- 17) 速水博秀: 採鉱と保安, **31** (1985), p. 299
- 18) 文献 8), p. 66
- 19) Hot Dry Rock Geothermal Energy Development Program Annual Report, Fiscal Year 1978 (1979), p. 15 [Los Alamos National Laboratory]
- 20) 山口 勉, 厨川道雄, 松本 烈, 速水博秀: 採鉱と保安, **28** (1982), p. 9