

■ 展望・解説 ■

高温岩体地熱エネルギーの技術開発

Research and Development on Hot Dry Rock Geothermal Energy

小林 秀 男*

Hideo Kobayashi



1. はじめに

高温岩体とは、地熱エネルギーの一つであり、文字どおり地下にねむる高温の岩盤である。高温であるにもかかわらず、天然の割れ目が少なく、天然の熱水や蒸気を蓄える地熱貯留層が発達していない。このため、高温岩体内部にまで坑井を掘削しても熱水や蒸気が噴出するようなことはない。

天然の貯留層が発達していない高温岩体を開発利用するためには、天然貯留層の代わりに、熱い高温岩体中に人工の地熱貯留層を造ればよいことになる。このアイディアは約20年程前に米国で提案され、それ以来各国で高温岩体の技術開発が進められている。

わが国でも、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)により、肘折高温岩体プロジェクトが推進されており、昭和63年の循環試験により高温の熱水および蒸気の回収が試みられた。高温岩体開発の方法、技術開発の経緯および現状等について海外の技術開発状況も併せて概説してみる。

2. 高温岩体開発システムの概要

高温岩体中に巨大な湯沸器(地表から地下に水を注入し、高温岩体中で加熱して地表に回収する)を造る手順は、基本的に図-1の様に示すことが出来る。すなわち、

- ①高温岩体に達する坑井を掘削する。
- ②その底付近に水圧で割れ目(人工貯留層となる)を造る。
- ③次に割れ目の位置を計測し、これに向けて第2の坑井を掘削する。
- ④2つの坑井が繋がったら片方の坑井から水を注

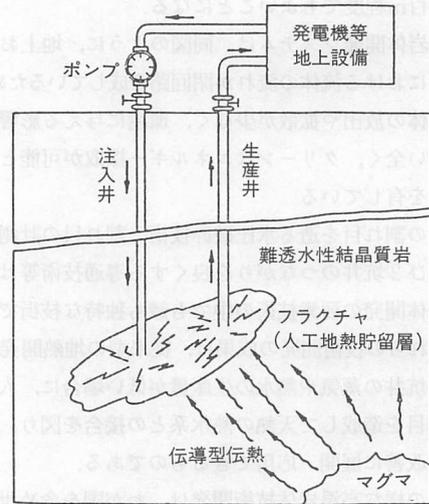


図-1 高温岩体開発システム概念図

入し、人工貯留層内で加熱し、蒸気や熱水として別の坑井から生産する。

- ⑤地上で利用したあと、再び第1の坑井から地下に注入する。

高温岩体資源として技術開発対象とされているのは、花こう岩系の岩体である。それらは、地下に塊として賦存し、比較的天然の割れ目が少ないため、循環システムをその中に造った場合に、循環流体の逃げが少ないと考えられたからである。

水圧破碎による割れ目は、高温岩体内に天然の割れ目が少ない場合には、非常に厚みが薄くサイズの大きなものができると言われてきた。しかし、比較的天然の割れ目が少なく、有望な高温岩体資源とされてきた花こう岩にも、天然の割れ目がかなり発達していることが分かってきており、各種の方法で推定された人工貯留層の形態は、天然の割れ目を押し開く様にして網目状の割れ目から成っていると考えられるようになってきている。

*新エネルギー・産業技術総合開発機構 地熱技術開発室
主任研究員

〒170 東京都豊島区東池袋3-1-1 サンシャイン60

坑井の深さは、どれぐらい必要であろうか。これは、地上で利用したい熱水や温度によっても異なるし、また坑井を掘削する地域の地温勾配によっても異なる。地表近くの知地温勾配を計測すると100mにつき1～8度程度の範囲に分布し、深さ100mあたり3℃程度が平均であるが、温泉が数多く分布している火山の周辺地域では、もっと高い地温勾配を示す。わが国の地熱地帯の例をとれば、地熱発電を目的とするような場合は、深さ1,500m～2,000m程度以上の坑井が必要になるし、100℃以下の熱水を回収しようとする場合には数百m程度でもよいことになる。

高温岩体開発システムは、同図のように、地上および地下における流体の流れが閉回路を成しているため、循環流体の放出や拡散が少なく、環境に与える影響が殆ど無い全く、クリーンなエネルギー採取が可能という特色を有している。

人工の割れ目を造る水圧破碎技術、割れ目の計測技術および2坑井のつながりを良くする導通技術等は、高温岩体開発の要素技術の中でも最も独特な技術である。これらの技術開発の成果は、従来型の地熱開発に於て、坑井の蒸気や熱水の生産量が低い場合に、人工の割れ目を造成して天熱の熱水系との接合を図り、生産量の改善に展開・応用できるものである。

上記の様な高温岩体技術開発は、わが国を含め世界の6カ国で進められている。日本および米国は、発電を目的として行われており、英国、西独、フランス等のヨーロッパ諸国は、平均の地温勾配がそれほど高くないこともあり、今のところ比較的低温の熱水回収を目的としている。国内的には、NEDOが実施している肘折プロジェクトのほか、東北大学および電力中央研究所が独自の研究を進めている。

3. 肘折高温岩体プロジェクト

わが国における高温岩体研究開発は、通商産業省のサンシャイン計画の一環として、昭和53年度より岐阜県焼岳北西部山麓で基礎的な技術開発が始められた。ここでは昭和58年度までに、深さ300m、温度60℃の堆積岩を対象に複数の坑井間を水圧破碎の割れ目でつなぎ、循環試験を実施するとともに、浅部で低温の岩盤に対する検層機器開発、水圧破碎技術およびフラクチャマッピング技術についての成果を得た。

次の段階として、より高温高圧条件での高温岩体開発技術の確立、およびわが国の地質構造に合致した技術開発を目指し、昭和60年度より山形県肘折に現場を

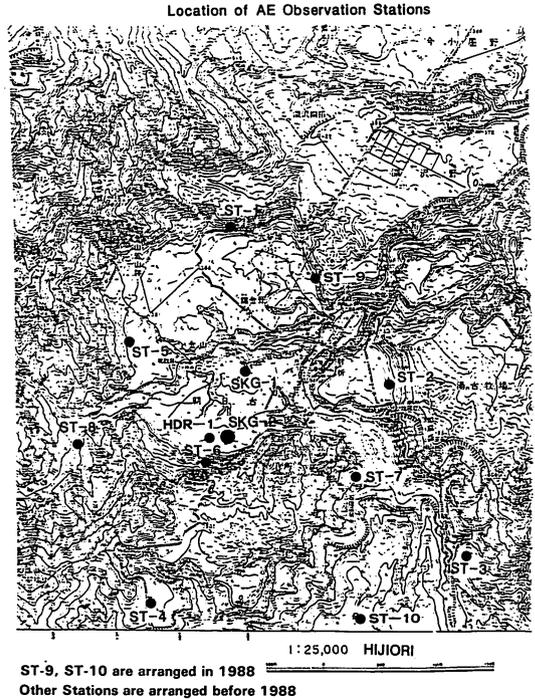


図-2 肘折実験場の坑井及びAE観測ステーション配置

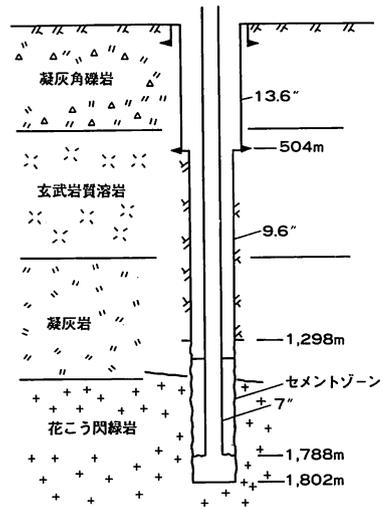


図-3 SKG-2坑井周辺の地質及びケーシングプログラム

移し、要素技術開発研究が進められている。肘折プロジェクトには、NEDOが日本側の実施主体として協定に参加し、米国ロスアラモス研究所において昭和55年から61年まで行われたIEA共同研究（米国、西独、日本）の成果も取り込まれている。

肘折は山形県新庄市の南西に位置し、肘折盆地は比較的新しい火山活動で形成されたもので、直径は約3-

4 km, 盆地の標高は約400mである(図-2参照)。この地域は、これまで国および企業の手で地熱探査が実施され、盆地内には2本の地熱調査井, SKG-1, SKG-2が掘削された。調査坑井坑底部の岩盤温度は高かったものの、生憎、蒸気や熱水が自噴しなかったため、高温岩体技術開発の適地として選定された。

肘折盆地の南縁に本プロジェクトの実験対象となったSKG-2坑井が位置している。坑井は深さ1800m, 坑底付近の温度250°Cで、坑井周辺の地質構造は、1460m以深が花こう閃緑岩となっている。図-3にSKG-2坑井周辺の地質およびケーシングプログラムを示す。この坑井は、元々1300m以下が裸坑となっていたが、坑底部において水圧破砕を行うため、昭和60年に7吋の鋼管(ケーシングパイプ)を坑底部の14mを残して図の様に設置した。

昭和61年10月、同坑井を用いて高温の岩体中に割れ目を造る水圧破砕実験を行った。実験には、6台の高圧ポンプを用い、SKG-2坑井から、注入流量、2, 4, 6 m³/minで合計約1080m³の水を注入した。最大の坑口注入圧力は約160kg/cm²である。注入終了後、坑口を開放すると、地下に注入された水は地表に噴出した。戻り水の温度は、時間の経過とともに上昇し、最高105°Cを示し、積算の戻り水量は約370m³に達した。これは、注入量の約35%に相当する。試験的ではあるが、地上から注入した水が地下の高温岩体で加熱され、わが国では初めて100°C以上の熱水として人工的に回収された。

水圧破砕実験に際して、図-2に示した観測システムにより、水圧破砕で発生する岩盤の微小な音(AE)の観測を行い、その震源分布から形成されたフラクチャの位置や形状の推定を試みた。2つの計測システム、すなわち、水圧破砕坑井の周囲を半径2~3kmの距離で取り囲む地上多点観測網(昭和61年時点では、ST-1~ST-6の6観測点が設置されていた)と、水圧破砕坑井から650m離れた別の坑井、SKG-1内に設置した3軸ジオフォンを用いた。図-4は地表観測網によるAE発生位置を示し、震源は水圧破砕坑井の南側上方に集中している。3軸ジオフォンによる結果も、ほぼ同様な傾向が見られたが、坑井の北側下方にもわずかにAE震源の広がりが観測された。

また、SKG-2坑井坑底部の坑壁をボアホールテレビア-観察したところ、坑井を横切るフラクチャ(走行はN159度、傾斜60度)と、坑井軸に沿ってほぼ東西に伸びているフラクチャが存在することが確認さ

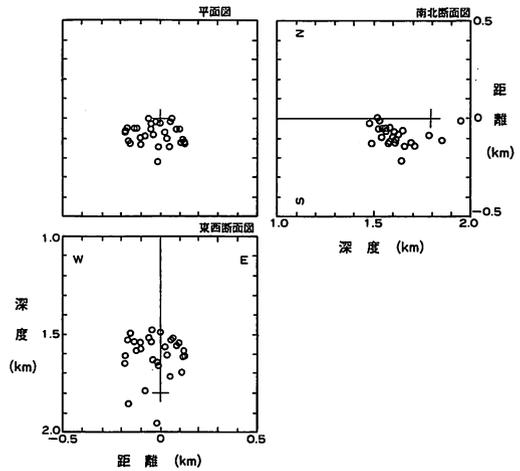


図-4 水圧破砕実験(昭和61年)におけるAEの震源分布図(地表多点観測網による)

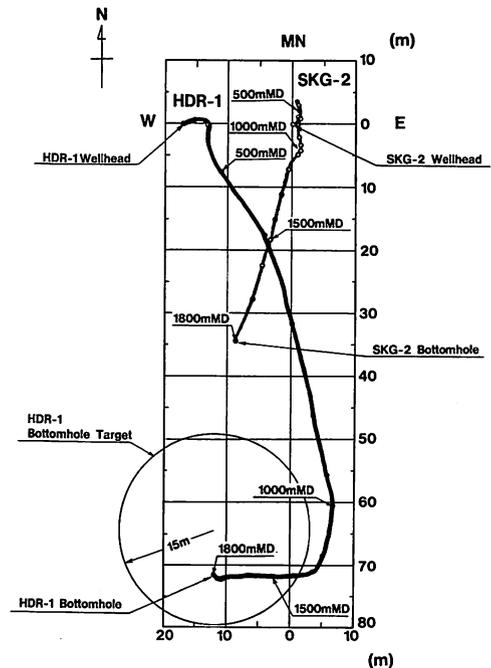


図-5 SKG-2及びHDR-1坑井の坑跡(平面図)

れ、水圧破砕前後の坑井内流量検層の比較により、後者の縦亀裂是水圧破砕により形成されたことがわかった。

人工的に造成したフラクチャの位置を確認するため、昭和62年に新たなHDR-1坑井を、SKG-2坑井の南側に掘削した。2つの坑井の坑底部付近の距離が約30mとなるように坑井のターゲットを決め、方向・傾斜

を制御しながら掘削した。HDR-1 坑井は、ほぼ計画どおりターゲットの円内に掘削され、2 坑井の坑底部の距離は35mであった。図-5はSKG-2およびHDR-1 坑井の坑跡を平面上に投影したもので、HDR-1 坑井の掘削ターゲットは円で示した。HDR-1 坑井は、深度1500m～坑底までの300mが裸坑となっている。

このHDR-1 坑井が水圧破砕で形成されたフラクチャを貫通しているかどうかを確かめるため、SKG-2 坑井から水を注入する短時間の導通確認試験を実施したところHDR-1 坑井の水位上昇が認められた。HDR-1 坑井の温度検層を行ったところ、深度1743mと1786mに温度異常が示され、この2点で岩盤から流体が流入していることが確かめられた。

坑井の温度検層、坑井壁面の割れ目状況を観察するボアホールテレビュア観察、および2 坑井間の導通確認試験等により、弱いながらも2 坑井の導通およびフラクチャと坑井の交差位置が確認された。

昭和63年7月には、2 坑井間の導通促進を図るため、形成されているフラクチャに対し、SKG-2 坑井から2,000m³を注水する加圧試験を実施した。流量は2～6 m³/minである。2000m³注水終了時にも顕著な湧出の増加は見られなかったが、注水終了後、SKG-2の坑口を開放しベントを開始したにもかかわらず、HDR-1 からの湧出は継続して微増した。湧出温度が100℃弱に達した時点で、熱水及び蒸気が脈動して噴出し始め、その直後、湧出が活発になり、最大流量は100m³/hを越え、温度は170℃を上回った。この大量噴出は約30分間継続した。その後、断続的な噴出を繰り返し、ほぼ2日間にわたりHDR-1 からの噴出が

続いた。但し、SKG-2からの戻りは、坑口開放後約1日で停止した。噴出が断続的であり、注水が停止した後もHDR-1の湧出が続いた事など、予測とは異なった噴出状況を示した。

加圧試験において地表観測網により観測されたAEは100個を越え、このうち4観測点以上ではほぼ同時観測され、震源決定された信号は約70個である。得られたAEの震源分布を図-6に示す。AEの震央は、SKG-2よりやや南側で東西に伸びたように分布し、その長さはおおよそ400mである。これに対し、深さ方向に関しては、大半のAEは深度1,600～1,800mで加圧区間より浅い位置に震源が決まっている。震源集中域をフラクチャと仮定すれば、フラクチャは東北東-西南西方向であり、その広がり、水平方向約400m、深さ方向約200m、幅約100mのほぼ縦型である。

昭和63年度における地表多点用観測システムでの震源決定精度の誤差は、水平方向では約50m、深度方向では約100m程度とされ、深さ方向の決定精度は良いとは言えない。しかし、8観測点以上で観測されたP

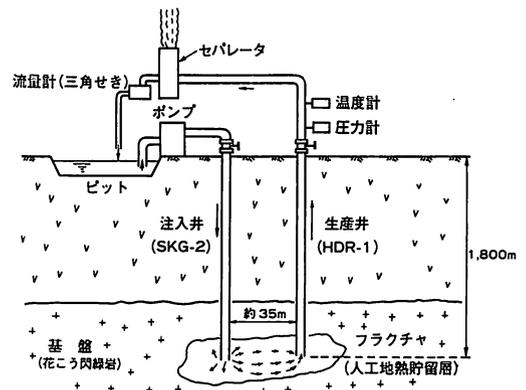


図-7 昭和63年度肘折循環試験概念図

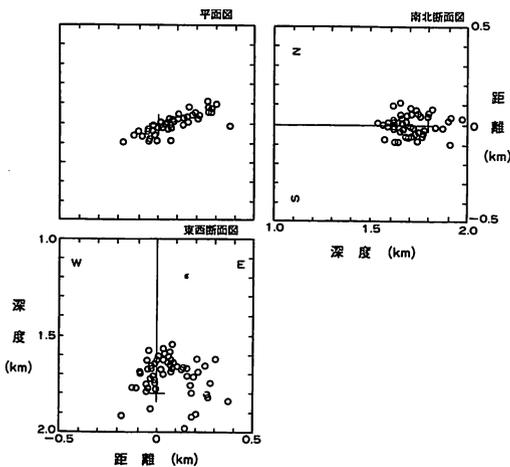


図-6 加圧試験(昭和63年)で発生したAEの震源分布図

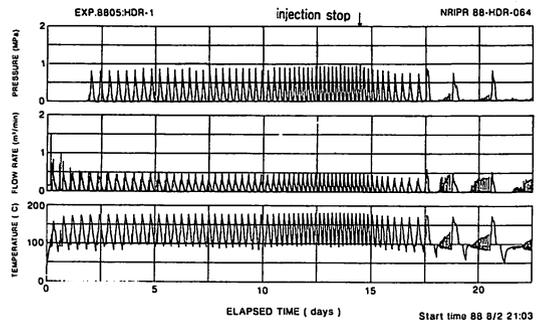


図-8 循環試験における生産井(HDR-1)坑口の圧力、温度、流量経時変化

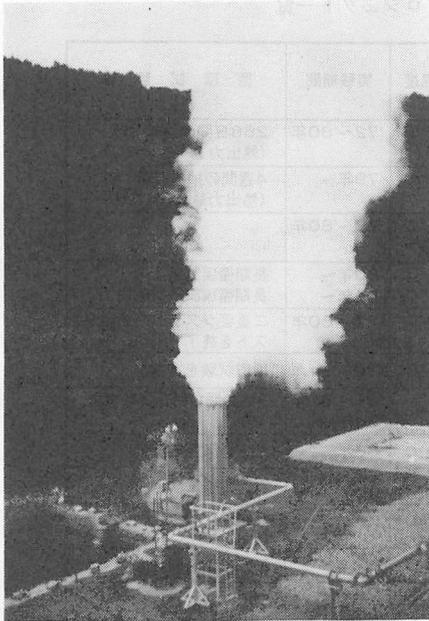


図-9 循環試験における蒸気及び熱水の生産状況

波初動のデータを用いて震源決定した場合でも、ほぼ同様の結果を得ている。

2 坑井間の導通改善が確認できたので、貯留層評価を目的に、16日間の循環試験を実施した。循環試験の概念図を図-7に示す。

SKG-2 坑井からの注入流量は、循環開始から約10間は $0.5\text{m}^3/\text{min}$ 、それ以降は $1.0\text{m}^3/\text{min}$ であり、坑口圧力はそれぞれ約30及び $60\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度であった。図-8は、循環試験期間中の生産井坑口での温度、圧力および流量の経時変化を示し、生産流出が間欠的であり、循環期間ともに1サイクルの時間が短縮する傾向が見られた。生産水温度は、循環試験期間中殆ど低下せず、このため貯留層モデルを仮定しての、有効熱交換面積および長期抽熱予測等の抽熱特性について評価することは実現していない。

循環試験においては、合計 $13,430\text{m}^3$ が注入され、推定蒸気量を含めて注入量の約35%が生産井から回収された。なお、注水停止後も生産が続いたので、その期間回収量をプラスすると、注入水の約44%が地表に戻ったことになる。図-9は、循環試験における蒸気の噴出状況を示す。

循環試験中の間欠噴出の原因を探るため、生産の1サイクル中の生産井内の流動がどのように変化するかをシミュレーションした。用いたプログラムコードは、WELBOREで、深度1,490m (PTS検層を行った深

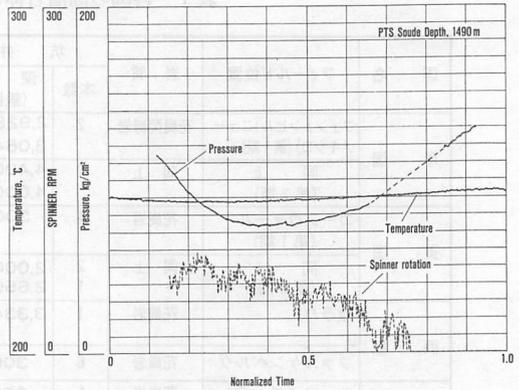


図-10 生産井の深度1490mにおける温度、圧力及び流量の変化

度)から坑口の間で常に質量保存則、運動量保存則およびエネルギー保存則が成立するものとして差分法により解析した。

その結果、①深度1,490mでの流量は、サイクルの中期にわずかなピークが見られるものの、坑口における流量変化に比較してきわめて安定している、②坑井内フラッシングレベルは、噴出に伴い次第に低下し、サイクルの中期には最大深度1,100m程度に達すること等が推定された。これは、貯留層内ではなく坑井内フラッシングにより間欠噴出が生じたことを示している。

循環試験における間欠自噴はかなり規則正しいので、この周期を基準にして測定時期の異なる生産井坑口のデータを標準化すると、各サイクルの噴出の初期に急激な噴出流量の増加が見られ、その後暫減してサイクルの終期には噴出の停止期間がある。これに対し、生産井 HDR-1 の深度1,490mでの温度、圧力及び流量の測定結果は図-10のようになる。温度はほぼ 145°C で一定であり、このことは、前述の坑井内流動シミュレーションの結果と同様、フラッシングがこの深度以深では生じていないことを示している。圧力はサイクルの中期において最も低くなっており、フラッシングポイントはこの時期に最も深くなっていることを示している。

循環試験中における PTS 検層により、深度1,530m, 1,625m, 1,742m, 1,762m, 1,788m, 1,800mに温度アノマリが認められ、これら6カ所は岩盤から HDR-1 坑井への流入箇所と考えられる。坑井内の流量分布から、全生産流量の内、1,530m層で15%、それ以深から1,788m層までの区間で30%、1,788m~1,800m

表1 各国の高温岩体研究開発プロジェクト一覧

国名	フィールド位置	岩質	坑井		坑底温度	実験期間	循環試験等
			本数	深度 (垂直)			
米 国	フェントンヒル(ニューメキシコ)(第1期)	花崗閃緑岩	2	2,928m 3,064m	205°C	'72~'80年	288日間の連続抽熱 (熱出力2~3MWt)
	同上 (第2期)	同上	2	4,400m 4,000m	327°C	'79年~	4週間の抽熱循環 (熱出力最大9MWt)
英 国	コーンウォール (第1期)	花崗岩	4	300m	15°C (推定)	'76~'80年	
	同上 (第2期)	同上	2 1	2,000m級 2,650m	80°C 105°C	'80年~ '84年~	長期循環試験実施 長期循環試験実施中
西 独	ウラハ	花崗岩	1	3,334m	140°C	'77~'80年	二重管システムで循環テ ストを終了
	ファルケンベルグ	花崗岩	6	300m級	14°C	'79~'81年	循環試験を実施
フランス	ル・メイエ・デ・ モンターニュ	花崗岩	4	250m級 700m級	—	'81~'82年 '84年~	3坑井間で循環試験実施
EC,西独,仏 共同	ソルツ	花崗岩	1	2,000m級	140°C	'86年~	地下岩盤評価試験
スウェーデン	フジャルバカ	花崗岩	2	500m級	17°C	'84年~	導通循環試験実施
日 本	焼岳	砂岩 粘板岩	7	300m級	60°C	'78~'83年	循環系作成
	肘折	花崗閃緑岩	2	1,800m級	253°C	'84年~	短期循環試験実施
	東八幡平	凝灰岩	2	400m級	60°C	'83年~	循環系作成
	秋の宮	凝灰岩	1	400m級	60°C	'87年~	多重フラクチャ造成

で55%が流入していると見積られた。

肘折プロジェクトは、高温岩体発電システムの要素技術開発を、実規模に近い温度、深度条件で進めており、今後、より深部に大規模の人工貯留層を造成し、将来的に長期の循環抽熱試験が計画されている。これらを通して、人工貯留層からの熱採取量(出力、寿命)、貯留層内の流動抵抗軽減、水回収量増大、経済性評価等に関する検討が必要である。

4. 海外における高温岩体技術開発研究の現状

米国ロスアラモス研究所は、昭和53年フェントンヒル実験場において、坑底温度185°C、深度3,000m級の坑井を用いた人工の循環系による史上初の熱抽出に成功した。昭和55年には完成した循環系により約10ヶ月にわたり、出力3,000~5000Kwtの熱出力循環認試が実施された。その成果を踏まえて、深度4,500m、温度320°Cの、高温岩体から2~5万Kwtエネルギーを採取するシステムを造成し、長期にわたる循環試験によりその実用性を実証することを目的として第2期計画が実施されている。昭和58年12月の大規模水圧破碎実験により人工貯留層を造成し、60年5月には30日間にわたり約1万Kwtの抽熱実験が行われた。本プロジェクトは、深度、温度とも世界で最も過酷な条件での高温岩体開発を目指したもので、水圧破碎の実施、2坑井の導通およびフラクチャの評定などに幾多の困難に

見舞われたが、それらを克服するとともに、高温用検層機器およびAE観測用3軸ジオフォン等、高温岩体開発に必要な成果を得ている。現在、高温岩体開発の経済性評価を目的とした約1年間の長期循環抽熱実験の準備を進めている。

ヨーロッパ各国の高温岩体の温度条件は、それほど恵まれているとは言えない。

例えば英国ケンボーン鉱山大学によるコーンウォールプロジェクトでは、坑井深度2,650mに対し坑底温度105°Cと、米国や日本の半分以下の地温勾配である。また、対象となっている花こう岩は天然き裂がかなり発達しており、閉ループの循環系を造成するには、循環系からの逸水が予測され、困難な条件にあると考えられる。それにもかかわらず、英国は1987年以来長期の循環試験を継続するとともに、爆薬による循環系の流体抵抗の軽減、粘性流体による水圧破碎、フラクチャマッピング精度の向上、天然き裂の発達した岩盤内のフラクチャ挙動予測計算等、個々の要素技術の研究開発を精力的に推進している。ヨーロッパにおいては、暖房、給湯システムが発達している都市構造もあって、高温岩体からの採取熱の直接利用を意図して技術開発が行われていると思われるが、すでに英国では、これまでの成果に基づき、坑底温度約200°C、深度6,000~8,000m規模の坑井による発電を目的として循環システム造成の計画に着手している。

西独およびフランスは、低温、浅部の花こう岩に対して、独自の高温岩体プロジェクトを推進してきたが、現在、西独、フランスおよび EC の共同で、フランスのアルザス地方、ソルツにおいて、2000m級坑井による高温岩体開発の共同研究を行っている。ソルツ一帯は、ヨーロッパにあっては比較的高温の花こう岩の賦存が確認されており、発電の可能性が検討されることになっている。

そのほか、スウェーデンでは花こう岩中に循環システムを形成し、得られる低温の熱からヒートポンプにより地域暖房に十分な温水を得ようとする試みが成されている。地熱発電発祥の国イタリアでは、開発に際しての空井戸を有効に活用するため、これらの坑井を用いて高温岩体システムへの展開を検討している。以上を含め、表1に各国のプロジェクトでこれまで形成された人工の循環系の概要およびそれらによる循環試験の結果を示す。

5. おわりに

高温岩体は、通常の地熱エネルギーと比較し、人工貯留層を地下に形成することによって開発・利用が可能になる。それだけに手間がかかるが、高温岩体技術開発によって従来開発が困難であった地域での地熱開発が期待できるし、個々の要素技術は従来地熱開発への波及効果も少なくない。商業的利用に到るにはもう少し時間がかかろうが、すでに高温岩体から人工的に熱エネルギーを採取する循環抽熱実験を行うところまでできている。高温岩体資源の温度、深度、地下岩盤条件など、各国のおかれた立場は異なっても、共通の技術課題は多く、昨年、わが国において高温岩体技術開発についての初めての国際ワークショップが開催され、引き続き本年6月には、英国での国際会議が予定されている。高温岩体に係わる関係者の協力により高温岩体開発・利用の早期実現を期待したい。

