

能動的地熱抽出システムの開発

Studies on the Forced Extraction System of Geothermal Energy

阿部 博之*

Hiroyuki Abé

1. 高温岩体 (HDR) 型地熱開発とは

代替エネルギー、新エネルギーを考える場合の第一の要件はCO₂などの地球環境問題であろう。高温岩体 (hot dry rock, HDR) はこの点からも有望な新エネルギーである。

地殻内に蓄えられている熱エネルギーは膨大である[†]。このエネルギーを高い確度でとり出すことができれば、エネルギー問題の解決は大幅に促進される。

在来型の地熱開発は、地殻の熱エネルギーを利用する一つのタイプではあるが、地下の天然の地熱流体を用いるために、ある規模以上の貯留層が存在するなどの恵まれた箇所に限られること、天然条件に大きく左右されること、により代替エネルギーとしての期待はかならずしも大きくない。

これに対して、天然の地熱流体を必要としないタイプにHDR型がある。その原理は、HDR中に水圧破碎によって人工き裂 (熱交換面) を作成し、2本の井戸と人工き裂を連結して、注水井—熱交換面—生産井の循環システムにより熱エネルギーを抽出するものである (図-1)。在来型とHDR型の比較を表1に示す。図-1のようなシステムを高い確度でつくることができれば、クリーンな熱エネルギー抽出が実用化されることになる。

わが国における大規模な研究開発としては、現在新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が中心になり、高温岩体発電システム技術開発 (肘折プロジェクト, 1800m級) を実施中である。

なお、文部省のエネルギー重点領域研究においては、

[†]一辺4.5kmの岩の立方体のもつ、温度100℃に相当するエネルギーは、1986年に我が国で消費したエネルギーの総量に匹敵する。

* 東北大学工学部機械工学科教授
〒980 仙台市青葉区荒巻青葉

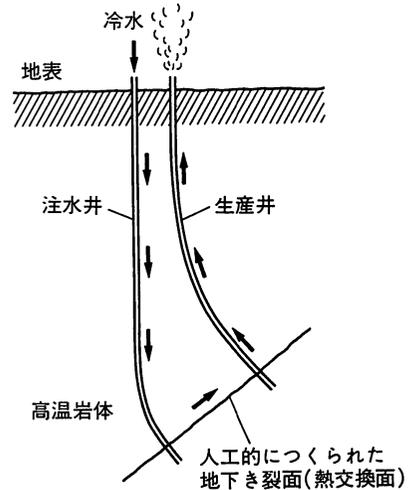


図-1 高温岩体からの熱抽出の模式図

表1 在来型とHDR型の比較

	在来型	HDR型
開発対象	天然の貯留層、浅部の恵まれた箇所	原理的には地殻内のどこでも可
地層	複雑	比較的均一な岩体を第一階段として対象可
流路	主として天然き裂、破碎帯	主として人工き裂
生産井流体	含有成分に依存	クリーン
設計対象	地下熱交換面には及ばない	システム全体
抽出方式	受動的	能動的
農業との対比 ¹⁾	自然採取型	栽培型

HDRのような人工的熱交換による方式を、能動的な地熱開発と呼んでいる。

2. HDR熱抽出システムの実用化に必要な考え方

HDRからの熱抽出の構想は、約20年前に米国ロスアラモス研究所 (現在LANLと略称) から出されたのが最初であるが、いまだに実用化に至っていない。

何故であろうか。因みに、これまでの研究開発で対象にした岩体によって内外のプロジェクトを分類してみると表2のようになる。

表2 対象岩体による分類

タイプ	対 象	プロジェクト名
A	比較的均一な岩体	東北大学Γプロジェクト (Phase II)
B	AとCの間	LANLフェントンヒル プロジェクト
C	多数のジョイントが発達したさいの目のような岩体	英国コーンウォール プロジェクト
D	在来型地熱のような複雑な地層	NEDO肘折プロジェクト

注：Aは凝灰岩，B～Dは花崗岩

地殻の内部構造は複雑である。地震の予知の方が日食の予知よりはるかに難しい大きい理由がここにある。しかし熱抽出は工学である。人知の及ぶところから具体化していくのが正しい。地下はそもそも複雑であるという、未知量の多い複雑な地層をはじめから対象にするのは、あまりにもリスクが大きい。

工学的立場からみれば、火力発電であれ、原子力発電であれ、獲得した技術の総合によってはじめて設計、製作を行っており、だからこそ確実に予定の出力を得ることができる。技術の獲得にあたっては、より単純で好条件のものから出発し、より複雑で過酷な条件のものに、一段ずつ階段を登るようにチャレンジしていくのが常道である。

在来型地熱開発は、多くの不確かさや未知の上に立って、諸先輩の努力により発電まで漕ぎつけてきた。工学の常道からはずれていたわけであるが、歴史的経緯を考えると在来型の開発方法は正しかったし、敬意を表さなければならない。しかしここに来て発想の転換が必要である。とくにHDR型において、その成功は工学の常道に戻ることにかかっているとしよう。

以下、工学的立場から、熱抽出システムの設計方法を提案、実証したΓ計画（Γプロジェクト）について簡単にのべておこう。

3. Γ計画の概要

Γ計画は、文部省科学研究費特別推進研究（研究代表者：筆者、昭58-63）による学術研究である^{2),3)}。

Γ計画の説明に先立ち、LANLが第2期計画の実験において、如何に苦労したかに触れておこう。

HDR開発の関門の一つに、人工き裂と二本目の井

戸との連結がある。三次元的にみて、井戸をかなり正確に掘削することは現在の技術でも可能である。したがって、き裂の三次元的な位置、形状、サイズを知ることができれば、二本目の井戸を連結されることは可能である。しかしこのようなき裂の正確な同定ができなかったため、LANLのグループは連結に失敗した（1982年）。

人工き裂は水圧破砕によって作成する。水をき裂内に注入することによってき裂を成長させる。人工き裂の三次元評価のために

- (A) 注水によるき裂進展方向の予測
 - (B) 作成されたき裂のマッピングによる評価
- を実施し、これらを総合的に検討して
- (C) き裂の三次元特性の総合評価

を行う必要がある。

一般に、(A)または(B)のみによってき裂の三次元特性を定めるのは困難である。したがって両者のデータに基づく総合評価が必要となる。

(A)のき裂進展方向を支配する主要な因子は、筆者らの研究^{2),4)}によれば、

- (a) 岩体に作用している応力（三次元地殻応力）
- (b) 岩体のき裂進展抵抗
- (c) 天然の破砕帯や弱面（ジョイントなど）の存在

である。(a)～(c)の把握自体が当時の未知の研究課題であった。Γ計画では、(c)の天然き裂が卓越していない地層を選び、主として(a)、(b)によってき裂の進展方向を予測した。(B)のマッピングについては、弾性波や電流による地下き裂計測法の進歩によるところが大きい⁵⁾。

1986年9月、このようにして評価した人工き裂をめがけて2本目の井戸を掘削し、連結に成功した。設計通りに循環システムを作成することができたのである²⁾。その後Γ計画で提案した人工き裂の評価方法が正確であったことを確認している⁶⁾。

LANLがき裂進展の予測を誤ったのは、き裂が鉛直上方に進展すると期待したこと、上記(a)～(c)の因子に注目しなかったことによる。

Γ計画に先立ち、1981年3月LANLにおいて、き裂進展方向の予測を骨子とする設計法研究の必要性を、筆者は主張したが入れられなかった。LANLでは、この第2期計画に先立ち、小規模ではあるが成功裡に終了した第1期計画において、き裂が偶々鉛直方向に成長した。それを発展させて予算要求した大規模計画が第2期計画であった。したがって仮りに筆者の主張に

賛成であっても、そのような基礎研究に後戻りできなかったのではないかと推測している。巨大科学の難しさを物語っているように思われる。

4. 抽熱システム基本設計とは

図-2に井戸と人工貯留層を結合して循環系をつくり上げるためのプロセスを示す。

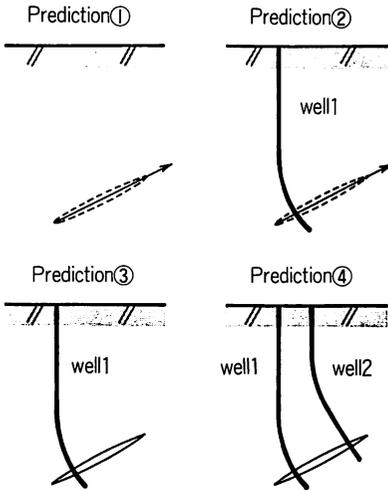


図-2 循環システム作成のプロセス

Prediction①：水圧破碎箇所を選択ならびに人工貯留層の特性の予測と井戸1の設計を、地表（ないし計測井）のデータに基づいて行う。

Prediction②：井戸1を掘削した後に行う検層によるPrediction ①の修正と水圧破碎設計

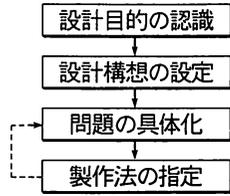
Prediction③：作成された人工貯留層のマッピングによるPrediction②の修正

Prediction④：井戸2をPrediction③の人工貯留層をめがけて掘削する。井戸2の検層により、Prediction③を修正し、長期保持のデータとして用いる。

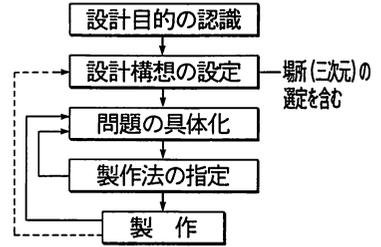
上記のように、Prediction③が直接結合の根拠になるわけであるが、地下条件によっては貯留層として複数の幾何学的可能性をもつことがあるので、セレンディブ的な能力の養成も肝要である。

いずれにしても、設計を製作の過程の中で追求していく点に、すなわち設計の中に製作が大きくとりこまれている点に、地下熱交換面の設計の特色がある。

一般の機械設計と比較して、地下抽熱システムの設計がどのように異なるかを示したのが図-3である。機械の設計においても製作方法を十分に念頭において



(a) 機械設計一般



(b) 地下抽熱システムの設計

図-3 工学的設計のプロセス (----->は状況に応じて戻る。問題の具体化には、設計対象の部分わけ、各部分の詳細設計、材料の選択、仕様の決定と図面化が含まれる)

いるが、製作過程をつねに反映させながら設計を進めていくのが地下抽熱システムの設計である。

一般の機械（システムを含む）設計においては、制約条件が著しく明確であり、制御変数の精度も高い。これに対して地下抽熱システムの場合は、制約条件にある範囲の不確かさがつねに存在している。この不確かさの広がりや地下からの情報を得るための費用と時間に依存する。制御変数の精度もこの制約条件の不確かさの程度に大きく依存する。したがって図-4に示すように、製作段階での情報の還元を行いながら、制約

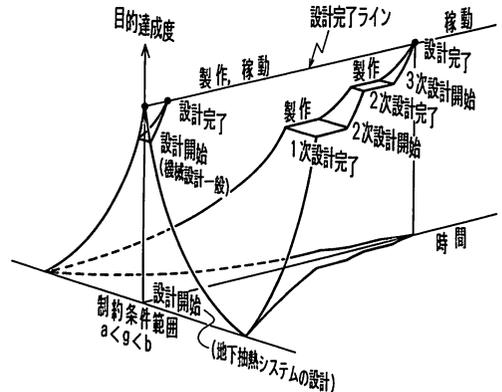


図-4 設計における目的達成度からみた比較 (途中で製作工程を二つ含む場合)

条件の範囲の変動を確認し、そのステップ各に設計を修正していく必要がある⁷⁾。

5. 能動的地熱開発における新しいプロジェクト研究

その一つは、文部省重点領域研究「エネルギー変換と高効率利用」(代表: 西川禎一京都大学教授) の一環として設けられた、「能動的地熱抽出システムの開発」(1990年から3ケ年) である。初年度は11の課題に分かれ、全体のとりまとめは京都大学佐々宏一教授である。

地殻内岩体は高温ではあるが、一般に天然のき裂が発達している。比較的均一な岩体を対象にした Γ 計画の研究を一步進め、比較的単純な天然のき裂ないし破碎帯が存在する岩体をも対象にした学術的研究が、この重点領域研究である(表3)。

表3 エネルギー重点領域研究(地熱)の位置付け

	Γ 計画 (特別推進研究)	能動的地熱開発 (重点領域研究)
岩体	比較的均一な岩体を対象	単純な天然のき裂、破碎帯を有する岩体をも対象
研究方法	モデル実験、シミュレーションに加え、フィールド実証試験による	モデル実験、シミュレーションが主体
研究主体	東北大学	全国の数大学

人工き裂に加え、熱交換面としての天然のき裂や破碎帯に焦点をあて、その内部の流体の挙動、き裂の進展挙動、抽熱等の力学的、化学的あるいは地質学的特性を明らかにすることがこの研究の目的である。1991年3月に、初年度の成果報告書⁸⁾が刊行されている。

次に、他の一つのプロジェクト研究について紹介する。

わが国の地温勾配は高く、深さ2~3kmの浅部で高温の岩体を見つけることは容易であるが、それらの多くはHDRと不十分ではあるが熱水を含む岩の混在である。このような地層に導入された人工き裂の役割は、すでにのべたHDRにおける熱交換面としての役割のほかに、天然の熱水の流路としての役割が新たに加わる。

Γ 計画の目的は均一な岩体を対象にした抽熱システムの設計方法の構築とその提案であった。これに対し、この新しいプロジェクト研究の目的は、わが国の地下構造にみられるような、より複雑な岩体に適した抽熱

システムの設計法を構築しようとするものである。

米国LANLのフェントンヒル、英国のコーンウォール、さらにNEDOの肘折の各プロジェクトは花崗岩を対象にしているが、この新プロジェクトは、 Γ 計画のPhase II実験(地下抽熱システムの実証実験)と同様に、主として堆積岩(凝灰岩等)を対象にしている。き裂進展の主たる方向が安定しているためである(表4)。

表4 プロジェクトと対象岩種

	Γ (Phase II), 八幡平東部(仮称)各プロジェクト	LANL, コーンウォール, 肘折各プロジェクト
岩種	堆積岩(凝灰岩等)	花崗岩
き裂進展方向の概略	主き裂の進展は一方	直角三方向(さいの目のようになる)

このような主旨に基づくプロジェクト研究として、工業技術院サンシャイン計画によるNEDOプロジェクト「可採量増大技術の開発」(5ケ年)と、文部省民間等との共同研究による「人工き裂を用いた最適地熱エネルギー抽出法に関する研究」(代表: 高橋秀明東北大学教授, 5ケ年)がある。これら二つのプロジェクト研究は1989年を初年度とし、密接な連携のもとに併行して遂行されている。NEDOは現在岩手県岩手郡の湯の森地区において1500m級の井戸を掘削している。表4には簡単のため、これら二つのプロジェクトをまとめて八幡平東部プロジェクト(仮称)と記している。

6. 岩石破壊力学の構築とその導入

熱交換面の作成と長年月にわたる保持は、岩体内のき裂の性質を如何に把握し、如何に利用するかにかかっている。いわば岩のき裂の科学であり、筆者らは破壊力学をその中心にすえるのが適切であると主張してきた。その第1報は1975年米国ノースウェスタン大学において行った仕事に遡る⁹⁾。

HDRを含め、岩石に破壊力学を導入することについては、その後多くの反対意見をいただいた。しかし、東北大学地熱工学グループの関連研究者のその後の成果と、HDR以外の地下利用のための内外の研究の進歩によって、岩石破壊力学についてはほぼ市民権が得られたものと判断している。

Γ 計画のPhase IIIは高温高圧下における岩石の諸特性を得るための基礎研究である。地下環境を模擬した「地殻深部環境強度試験装置」(文部省特別設備, 昭和

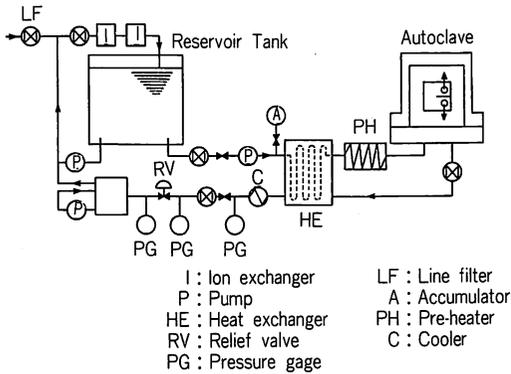


図-5 地下環境を模擬したき裂進展挙動試験のフローダイアグラム

58, 59年度設置)を用いての地下き裂設計のためのデータベースの収集・整備をはかる長期構想の実験研究³⁾で、現在も継続中である。この研究に係わる基本課題を列記すると

- (1) き裂進展挙動に及ぼす高温高压水環境の影響
- (2) 高温高压下の応力腐食割れ挙動
- (3) 岩石-熱水相互利用(岩石の溶解と沈積)

である。

同装置の一部であるが、(1)に関する部分のフローダイアグラムを図-5に例示する。き裂進展抵抗は環境の影響を大きく受けるが、そのような量的変化はもちろんのこと、進展のメカニズムも変化することも明らかになった。

岩石破壊力学はもちろん機械、構造物の破壊力学と原理を共通にするが、岩石特有の性質と地下特有の環境のために、機械、構造物の破壊力学の常識と異なる点も少なくない¹⁰⁾。

岩石破壊力学は新しい学問である。多くの未知の分野の解明が急がれている。

7. おわりに

紙面の都合上説明を省略した研究課題が多数あるが、そのうちの一つを補足しておこう。

入水量がすべて生産井を介して地表に回収されるのが理想であるが、貯留層であるき裂の容積は熱抽出と共に変化するので、理論上回収率100%というわけにはいかない。しかしき裂からの漏水は極力押えなければならぬのは当然の要求である。

とくに花崗岩の貯留層はさいの目のようなき裂状態になるので、回収率を心配する声の一部がある。一方では、このような岩体に対しても、長時間の使用によ

り回収率が安定化すると理論的予測もある¹¹⁾。花崗岩を用いないで、例えばき裂の進展方向がより安定している堆積岩を対象にするなど、岩の性質に合わせた設計も考えられている。

HDRを基本にした能動的地熱開発の産業化には、なお多くの学術的ならびに技術的ブレークスルーが必要であり、本報ではその骨子について説明した。

学術的研究以外にも、すでにのべたNEDOを中心とするプロジェクト、電力中央研究所のプロジェクトがあり、とくに要素技術についてはわが国の産業界ならではの水準にある。産官学それぞれの特質を生かした連携プレーの推進が切に望まれる。

最後に、原稿の作成にあたり助力をいただいた庄子孝夫技官に感謝の意を表する。

文 献

- 1) 新妻弘明; 次世代地熱開発, 日本機械学会誌, 94巻866号(1991), 86~90.
- 2) 阿部博之; 地下の中にはどのようなエネルギーがあるのか, メカライフ, 8号(1987), 10~13.
- 3) 高橋秀明; 高温岩体地熱開発における地下人工き裂面設計技術と岩石破壊力学, 日本地熱学会誌, 10巻4号(1988), 281~304.
- 4) 林 一夫; 深部地殻における三次元地殻応力計測法の岩石破壊力学的研究, 学術月報, 43巻4号(1990), 363~368.
- 5) 新妻弘明; 未来の地熱開発と電気計測, 電子通信学会誌, 69巻9号(1986), 945~947.
- 6) 斉藤玄敏, 新妻弘明; 主成分分析を用いた三軸シェアシャドウ法によるき裂方向の評価, 物理探査学会第82回学術講演会講演論文集(1990), 204~207.
- 7) 阿部博之; 地殻熱エネルギー抽出の基本設計, 日本機械学会第67期通常総会講演会資料集D(1990), 22~26.
- 8) 橋本健治(代表); 多様なエネルギー資源の利用, 文部省科研費重点領域研究, エネルギー変換と高効率利用, 平成2年度研究成果報告書B(1991), 175~236.
- 9) Abé, H., et al.; Growth of a Penny-Shaped Crack in Hydraulic Fracturing of Rocks, Journal of Geophysical Research, Vol. 81, No. 29 (1976), 5335~5340.
- 10) 日本機械学会編; 岩石破壊力学とその応用(1989), コロナ社.
- 11) Hayashi, K., et al.; Behavior of an Artificial Reservoir Created in a Formation with a Natural Fracture Network for HDR Geothermal Heat Extraction, Geothermal Resources Council, Trans., Vol. 12 (1988), 469~474.