

高温岩体発電における水圧破碎・循環試験の解析

○ 東京大学 正 員 澤田 昌孝
東京大学 正 員 堀井 秀之
香川大学 正 員 吉田 秀典

1. はじめに

高温岩体発電は地熱発電の一種である。まず坑井を1本掘削し、そこから高温の地下深部に高圧の水を注入して、岩盤内に亀裂を進展させ(水圧破碎という)、別の場所にも坑井を掘る。その後注入井から水を入れ、生産井と呼ばれる別の坑井から温められた水(水蒸気)を回収し、発電に利用するものである。実現のためには水圧破碎による貯留層形成の予測、水の循環の予測、発電所の供用年数の予測等の技術的課題を解決しなければならない。

本研究では、上述した課題のうち貯留層形成および水循環の予測を可能とするため、水圧破碎による亀裂進展の解析手法を確立し、さらにその解析結果を用いて水循環を予測する手法を検討する。

2. 水圧破碎の解析

高温岩体発電プロジェクトの実験場に選ばれた地点の地下深部の岩盤は、ジョイントのネットワークを有している。本研究では、水圧破碎による貯留層の形成は高圧の水によって新規の亀裂が形成されるのではなく、岩盤が有するジョイントが次々と開口し、透水性の高い領域が広がっていくものと考え¹⁾。

また、不連続性岩盤をマイクロメカニクスに基づく等価連続体理論(以下、MBC理論)を用いてモデル化する。この理論はジョイントのせん断すべり・開口を岩盤挙動の支配的メカニズムと捉え、その影響を考慮に入れた連続体モデルである。定式化にあたっては、個々のジョイントの挙動をモデル化し、その挙動に基づき平均化操作を行うことにより等価な連続体の挙動、すなわちジョイントを含む岩盤の構成式が導かれている²⁾。このモデル化を行うことにより、卓越するジョイントセットの走向・傾斜やジョイントの平均間隔等の情報を直接入力データとして解析に反映することができ、ジョイントの開口や透水係数、水圧の空間分布が得られる。

1992年に山形県の肘折実験場で水圧破碎試験が行われた。その解析を初期地圧、岩盤の物性、ジョイントの情報等を入力データとして3次元有限要素解析で行なった。注入点にあたる要素に時間ごとの流量を入力し、各地点でのジョイントの開口を得た。ジョイントの開口が起こっている領域を貯留層と考える。図2は解析結果による貯留層の形状である(左上:上から見た図、右上:東から見た図、左下:南から見た図、右下:北東上方から見た図)。また、図3は肘折における水圧破碎時のAEソースの分布を表している(図の配置は解析結果と対応している)。プロットされている部分で水圧破碎がおこったことを示している。

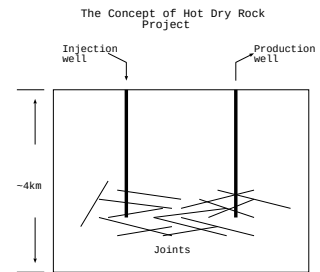


図1 高温岩体発電概念図

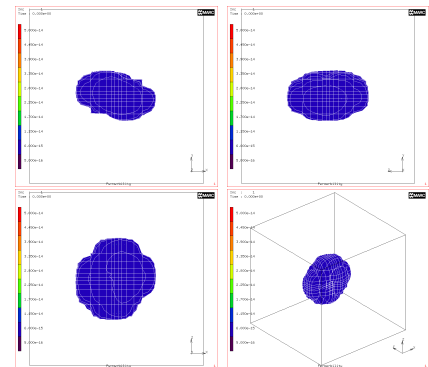


図2 解析結果、貯留層の形状:肘折

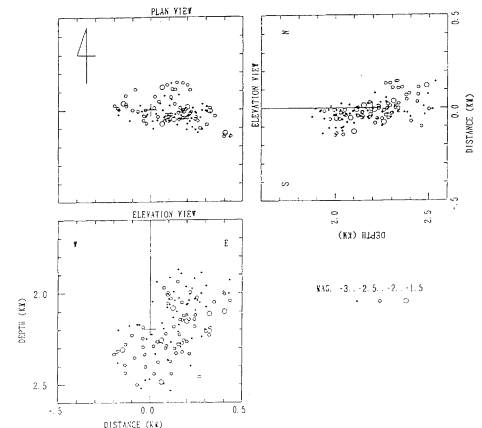


図3 AEソースの分布:肘折 1992³⁾

解析結果，AE の観測結果ともに貯留層が南北方向よりも東西方向および鉛直方向に広がっており，両者はよく一致しているといえる。

3. 循環試験の解析

高温岩体発電システムの設計では，水圧破碎の解析後，最適な坑井配置・注入流量等を決定するために循環試験の解析を行う必要がある．水圧破碎解析で得られた透水係数分布を循環試験解析で用いるためには，水圧破碎によって開口したジョイントが減圧によってどのように閉じ，再び水圧の上昇によってどのように開口するかをモデル化する必要がある．本研究では，水圧破碎時と循環試験時の水圧差によって，ジョイントの開口幅が線形に変化すると仮定し，循環試験の解析を行った．

解析対象は 1995 年に肘折で行われた循環試験であり，注入井を 1 本 (HDR-1)，生産井を 2 本 (HDR-2a,HDR-3) 用いて行われた．生産井は図 4 のように注入井から見て西方 90m と東方 130m に位置する．流量 $2m^3/min$ を注入したとき，両生産井においてそれぞれ約 $0.3m^3/min$ 回収され，流れインピーダンスは約 $2.0GPa\ s/m^3$ であった⁴⁾．

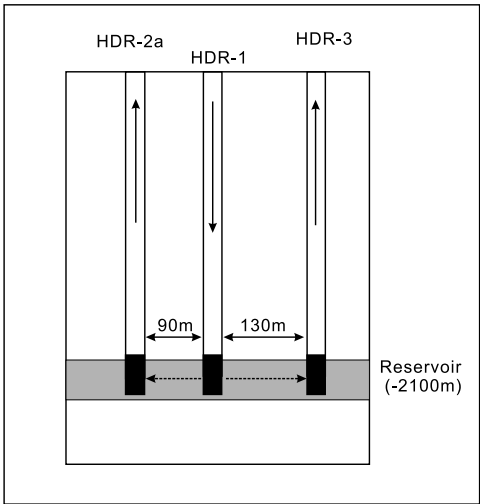


図 4 流入井と生産井の位置関係:肘折 1995

解析においては，注入点にあたる要素に流量 ($2m^3/min$) を，生産点にあたる要素に水圧を境界条件として与える．生産熱水中の水蒸気の割合によって生産点での水圧は変化するので，生産点に与える水圧の値を変えて解析を行った．解析結果を表 1 にまとめる． ΔP は注入井と生産井の水圧差， Q は生産流量， I_m は流れインピーダンス (単位は $GPa\ s/m^3$) を表す．HDR-3 井からの回収流量が少ないことを除けば解析結果と実測結果はオーダーとして合致している．

表 1 生産ポイントの水圧による循環特性の変化

生産点の水圧 (MPa)	ΔP (MPa)	$Q(2a)(m^3/min)$	$Q(3)(m^3/min)$	水回収率 (%)	$I_m(2a)$	$I_m(3)$
15	7.90	0.326	0.0896	20.8	1.46	4.93
17	6.28	0.344	0.0749	21.0	1.09	5.03
19	4.83	0.341	0.0588	20.0	0.85	5.29
現地実験	11.0	0.33	0.30	33.0	2.0	2.2

4. まとめ

本研究では不連続性岩盤に対する MBC モデルを基にして水圧破碎の解析を行い，この水圧破碎の解析結果を用いて循環試験の解析を行った．これは水圧破碎と地下の水の流れを予測する一連の手法を提示している．種々の生産井配置・注入流量に対して解析を行い結果を比較することにより，最適な循環条件を特定することが可能である．また，熱連成モデルに拡張することで，熱抽出量の経時変化を予測することが可能となる．このような総合的解析手法は高温岩体発電の実現に大きな役割を果たすものと思われる．

参考文献

1) Jiri Vychytil, Hideyuki Horii: Constitutive Modelling and Numerical Stimulation of the Hot Dry Rock Reservoir Stimulations, 修士論文, 1996.
2) 吉田, 堀井: マイクロメカニクスに基づく等価連続体理論と大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.23-41, 1996.
3) New Energy and Industrial Technology Development Organization: FY 1992 Summary of Hot Dry Rock Geothermal Power Project in Japan
4) 厨川道雄, 佐藤嘉晃, 天満則夫, 山口勉: 肘折高温岩体プロジェクトの経緯, 資源と素材 Vol.112, pp.901-906, 1996