

DENCHUKEN REVIEW

未利用地熱資源の開発に向けて - 高温岩体発電への取り組み -

電中研レビュー No.49 2003.3



財団法人 電力中央研究所

編集担当 我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 海江田秀志
 我孫子研究所 地圏環境部 主任研究員 伊藤 久敏

巻頭言	東北大学前総長 阿部 博之	2
「高温岩体発電研究」のあゆみ		4
はじめに	電力中央研究所 理事長 佐藤 太英	6
第1章 地熱資源開発の現状		7
1-1 従来型地熱発電と高温岩体発電		8
1-2 地熱利用のあゆみ		10
1-3 高温岩体発電から見た日本の地熱		12
コラム1：ガイザース地熱発電所の取り組み		14
コラム2：温泉と高温岩体発電		14
コラム3：地中熱利用ヒートポンプ		15
第2章 高温岩体発電の開発		17
2-1 高温岩体発電とは		19
2-2 高温岩体発電に必要な技術		20
2-3 コスト試算		22
第3章 世界の高温岩体発電実験と当所の係わり		25
3-1 フェントンヒル実験		27
3-2 ソルツ実験		27
3-3 オーストラリア高温岩体発電実験		28
3-4 肘折実験		29
第4章 雄勝高温岩体発電実験		31
4-1 雄勝高温岩体発電実験の概要		33
コラム4：雄勝実験場		36
第5章 高温岩体探査技術		37
5-1 はじめに		39

5-2	地震探査反射法	39
5-3	CSAMT 法.....	40
5-4	総合評価	42
	コラム5：空中から地下を探る.....	44
第6章	貯留層造成技術	47
6-1	概要	49
6-2	電中研式多段貯留層造成法	49
6-3	適用例	50
6-4	今後の課題	51
第7章	検層技術	53
7-1	水みちを温度変化で探る	55
7-2	水みちを見る	57
第8章	貯留層評価技術	61
8-1	地化学調査	62
8-2	トレーサテスト	67
8-3	地圧測定	72
8-4	透水性評価	74
8-5	シミュレーション	77
8-6	AE 計測	78
8-7	流電・自然電位計測	80
第9章	まとめと今後の課題	83
	コラム6：マグマ発電.....	86
	コラム7：ジオサーモピア構想.....	87
おわりに	===== 理事 我孫子研究所長 加藤 正進	88
	引用文献・資料等	89

表紙絵：高温岩体発電雄勝実験場

雄勝プロジェクトの成果の新たな展開に期待して



温室効果ガスの大幅抑制を含む、再生可能エネルギーとしての地熱の長所については、これまで多くの解説があり、ここでの重複は最小限にとどめたい。

その中で、地下に存在する天然の熱水をかならずしも対象にしなければ、地下の岩体の持つ熱エネルギーは膨大であり、それを利活用することは、人類と地球の未来にとって極めて魅力的であることを、改めて強調しておきたい。

そのため、高温岩体（HDR: Hot Dry Rock）の熱利用の研究開発は、米国をはじめとする数力国

で鋭意進められてきた。

しかしながら、わが国においては、発電も目標にした開発プロジェクトである、電力中央研究所の雄勝とNEDOの^{おがち}肘折の^{ひじおり}両現場実験プロジェクトが02年度までに一応の終止符を打つことになった。大変残念なことである。

この原因は、産学官のいずれにもあるように思う。それらの一つについて、復習をかねて以下にのべてみる。

設計工学の立場からみれば、単純化による第一次的近似から、より複雑さを考慮したものに、段階的に研究開発を進めていくという定石がある。未踏の分野においては、定石の手順はすでに得られているものではなく、研究開発の当事者が創り上げなければならない。

定石の手順の初期の段階において、その時点での成果を過大に評価し、実用化が近いかのような甘い期待をスポンサーに与えてしまうことがしばしばある。このことは、

細心の注意を持って厳に慎まなければならない。

米国だけでなく、肘折プロジェクトにおいても、一時期この轍を踏んでしまった。もちろん良かれと思ったからであろう。しかしこのような判断や説明行為は、健全な研究開発にブレーキをかけることになる。

筆者はここで、当時を非難するために縷々のべているわけではない。後追い型や改良型の研究開発と異なり、未踏の分野の開拓においては、一般に様々な形態の失敗はつきものであり、とくにわが国は、それらを必要な知見として評価し、利活用していくことに早く慣れるようにしなければならないのである。

いずれにしても発電を目標においたHDRの研究開発は、著しい進歩を遂げたものの、実用化までなお科学的、技術的課題を残したまま休止期間に入った。再開は、基本的には地球環境問題への政策に依存することになる。

しかしながら、地下の岩体の膨大な熱エネルギーを考えると、上記以外の利活用の方法を考える絶好の機会ともいえる。これまでも様々なアイデアが出されたが、その中で例えば、地中熱ヒートポンプ（GHP: Geothermal Heat Pump）は、欧米を中心にすでに実用化されている。さらにほかの熱抽出法の提案にも期待を寄せたい。HDRの研究開発から生まれた科学技術は、かならずや別の方式の研究開発に資するところ大であるからである。

最後に、雄勝プロジェクトを支えてこられた多くの方々に敬意を表し、そこで蓄積された技術の多彩な利活用を祈念し、この稿を終える。

東北大学前総長

阿 部 博 之

電中研「高温岩体発電研究」のあゆみ

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	日 本 の 状 況	世 界 の 状 況
1913			・イタリアのラルデレロで世界初の地熱発電開始（蒸気卓越型：出力 250kW）
1925		・太刀川平治博士が日本最初の地熱発電に成功（出力 1.12kW）	
1958			・ニュージーランドのワイラケイで世界初の熱水分離型地熱発電開始（出力 6500kW）
1960		・日本地熱調査会設立	
1966		・日本重化学工業(株)が日本で初めての松川地熱発電所（蒸気卓越型）の運転を開始（出力 9500kW）	
1967		・九州電力(株)が日本で初めての熱水分離型地熱発電所である大岳発電所の運転を開始（出力 11000kW）	
1970			・アメリカのロスアラモス国立研究所（LANL）が高温岩体発電を提唱
1973		・第一次石油ショック	・LANL がフェントヒルで世界初の高温岩体発電実験（フェーズⅠ）開始
1974		・通商産業省技術院がサンシャイン計画をスタート	
1977		・サンシャイン計画により岐阜県焼岳山麓において高温岩体発電実験開始	・ドイツ、イギリス、フランスで高温岩体発電調査開始 ・ドイツのウラハで高温岩体発電実験開始（断続的に継続中）
1978		・日本地熱学会設立	
1980		・第二次石油ショック ・「新エネルギー総合開発機構」（現「新エネルギー・産業技術総合開発機構」、NEDO）設立 ・NEDO が地熱開発促進調査開始	・LANL が 90 日間の循環実験により熱出力 9 MW 達成（60kVA の発電）
1981	・地熱探査技術に関する研究開始		・LANL が高温岩体発電実験（フェーズⅡ）開始（日本、西ドイツが参加）
1982	・LANL に研究者派遣開始	・水圧破碎と地熱エネルギーに関する第 1 回日米セミナー	
1983		・東北大学 プロジェクト開始	
1985	・ケーシングリーマ・サンドプラグ（CRSP）方式による多段貯留層造成法を考案	・NEDO が肘折地点で高温岩体発電実験開始	
1986	・秋田県秋ノ宮地点で高温岩体予備実験開始		・フランスのソルツで高温岩体発電実験開始（継続中）
1987	・NEDO からの肘折地点における地表 AE 観測と地化学調査受託研究開始		
1989	・秋田県雄勝地点で高温岩体実験開始		

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	日 本 の 状 況	世 界 の 状 況
1990	・ 注入井 (OGC-1 ; 掘進長 1,000m、 岩盤温度 230) 掘削		
1991	・ 下部貯留層造成 (深さ 990 - 1000m)		
1992	・ 上部貯留層 (深さ 711 - 719m) を CRSP 法で造成 : 1 本の坑井で複 数の貯留層の造成に成功 (世界初) ・ 生産井 (OGC-2 ; 掘進長 1100m) 掘削		・ LANL フェントンヒルでの実験終 了 ・ EGS (Enhanced Geothermal System) の検討開始
1993	・ 22 日間循環実験開始	・ 国際高温岩体フォーラム開催 (山 形)	
1994	・ 生産井の迎え破碎後、5 ヶ月間循 環実験実施		
1995	・ 注入井を 1027m まで増掘し、1 ヶ 月間循環実験実施 (回収率 25 %)	・ 肘折で 25 日間循環実験	
1996		・ 地熱発電設備 50 万 kW を達成 ・ 肘折で 31 日間循環実験	・ ソルツ地点でタウンホールポンプ を用いた 4 ヶ月間循環実験を実施 し、熱出力 11MW を達成
1997	・ 個別注水試験後、10 日間循環実験 実施、貯留層透水性状把握	・ 国際 HDR/HWR アカデミックレビ ュー開催 (仙台)	
1998	・ 雄勝国際ワークショップ開催		・ ソルツ地点で坑井を 5000m まで増 掘し、深部貯留層を造成
1999	・ 新坑井 (OGC-3 ; 掘進長 1300m) を掘削		
2000		・ 世界地熱会議を日本で開催 ・ 肘折で 2 年間長期循環実験開始	
2001	・ 3 坑井間の透水試験ほかを実施		
2002	・ 高温岩体発電技術マニュアルの作 成 ・ オーストラリアとの高温岩体共同 研究開始	・ 肘折で発電実験実施 (約 50kVA)	・ オーストラリアのクーパーベイ ズンで高温岩体発電実験開始

はじめに

電力中央研究所 理事長 佐藤 太英



我が国はエネルギー資源の多くを国外に依存しているが、地下には地熱という世界に誇るエネルギー資源が存在している。この一部は既に地熱発電として実用化され、現在の発電設備容量は55万kWに達しようとしている。しかし、これは我が国の発電設備容量の約0.2%にすぎず、また開発可能な資源量のごく僅かが利用されているにすぎない。我が国で地熱開発の進展を阻害してきた要因として、これまでの地熱開発が自然に存在する地下の蒸気や熱水のたまり場（地熱貯留層）を開発の対象としており、開発可能地域や開発規模がこの地熱貯留層に大きく依存していることがあげられる。地下数100m～3km

に存在する地熱貯留層の位置や大きさを地表からの調査で推定するのは容易ではなく、また調査のための坑井掘削や貯留層内の熱水中の化学成分対策などが発電コストの増大を招いている。

高温岩体発電は、地熱貯留層を人工的に造成し、水を媒体として地下の熱エネルギーを地表に取り出し、発電などに利用する技術である。この方法が実用化すれば、開発に伴うリスクの低減や開発規模の人為的設計が可能になるほか、地下は深くなればなるほど温度が高くなることから、坑井掘削に関する技術の発達やコストダウンにより、開発可能なエネルギー資源は増大することとなる。技術の発展と共に開発可能な資源量が増加するのである。

当所では1970年代後半の石油ショックを契機とした新エネルギー開発の一つとして、高温岩体発電を将来の地熱開発の主要な技術と位置付け、これまで秋田県雄勝地点での現場実験を中心に高温岩体発電の要素技術の開発と実証を進めてきた。この実験を通して、人工的に造成した貯留層に河川水を注入し、熱水と蒸気として取り出すことに成功した。また、これらの実証試験の中で、人工的な地熱貯留層の造成のための技術開発やその評価が可能であることを示すことができた。

本レビューは、これらの技術開発の現状および高温岩体発電の実用化に向けた課題などについて取りまとめたものである。近い将来の実用化にとって、有効な情報として活用されることを期待する。

第 1 章

1

地熱資源開発の現状



第1章 地熱資源開発の現状 目次

我孫子研究所 地圏環境部 主任研究員 伊藤 久敏
我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 海江田秀志

1 - 1 従来型地熱発電と高温岩体発電	8
1 - 2 地熱利用のあゆみ	10
1 - 3 高温岩体発電から見た日本の地熱	12
コラム1：ガイザース地熱発電所の取り組み	14
コラム2：温泉と高温岩体発電	14
コラム3：地中熱利用ヒートポンプ	15



伊藤 久敏（1988年入所）
雄勝実験では、主にボーリングコアや坑壁画像を用いた天然の割れ目性状の調査を行ったほか、地表地質調査や岩石の年代測定を行い、地質構造や地熱源の評価を行った。今後は、オーストラリア高温岩体プロジェクトに協力するほか、年代測定技術を用いた地殻の長期安定性に関する検討などを行う予定である。



海江田秀志（1982年入所）
高温岩体発電技術の貯留層造成と貯留層評価に関する研究を主として担当してきた。現在、開発した技術の他分野への転用や、オーストラリアにおける大深度高温岩体発電実験への適用に取り組んでいる。

1 - 1 従来型地熱発電と高温岩体発電

火山国日本には我々が利用可能な地熱エネルギーが豊富に存在する。地熱は水力とともに再生可能な純国産の自然エネルギーであり、また、地球温暖化の元凶とされる二酸化炭素の排出量が少ないクリーンなエネルギーである(図1-1-1)⁽¹⁾⁽²⁾。ところが、現状では、地熱による発電は認可出力が約53万kWにとどまり、日本全体の全発電電力量の0.32%に過ぎない(図1-1-2)。これは、地熱開発には坑井掘削などでのリスクが高いこと、化石燃料による発電に比べてコスト高であること、開発可能地域が国立公園などの規制のため限られること、などの問題があるためである⁽³⁾。

仮にこれらの制約が克服されたとしても、従来型地熱発電方式では、天然に局在する地熱貯留層を利用しているため、今後大規模に開発される可能性は小さい(図1-1-3)。しかし、地下は深部ほど高温であり、深度5km以浅で200℃を超える、いわゆる高温岩体は世界的にも広く存在する。火山国である日本では特に高温岩体の分布は広い。高温岩体の開発は一般には透水性の低い岩盤を対象とするため、熱を運ぶ媒体である水を用いて効率よく抽熱できるように岩盤内に割れ目を人工的に造成する必要があり、ここに高温岩体発電技術が必要となってくる。

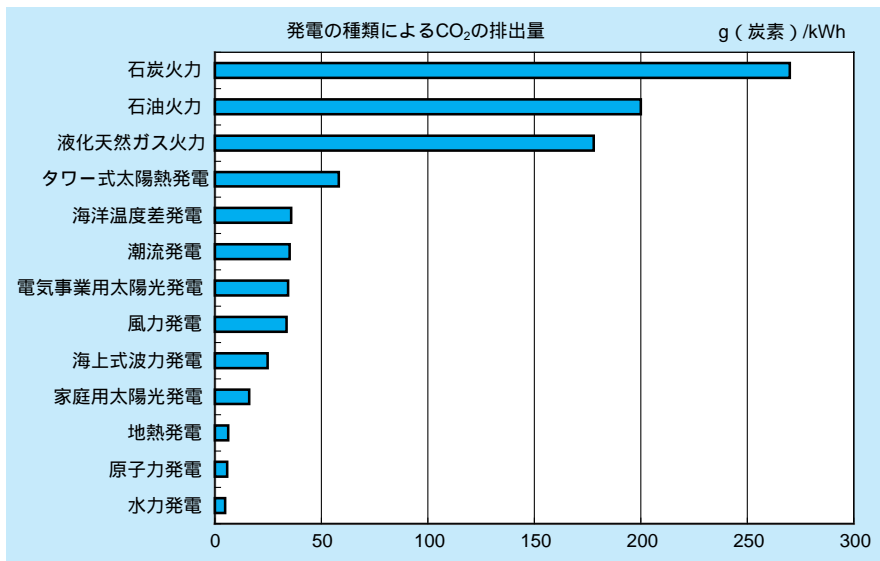


図1-1-1 発電の種類によるCO₂の排出量 (内山 (1995) による)

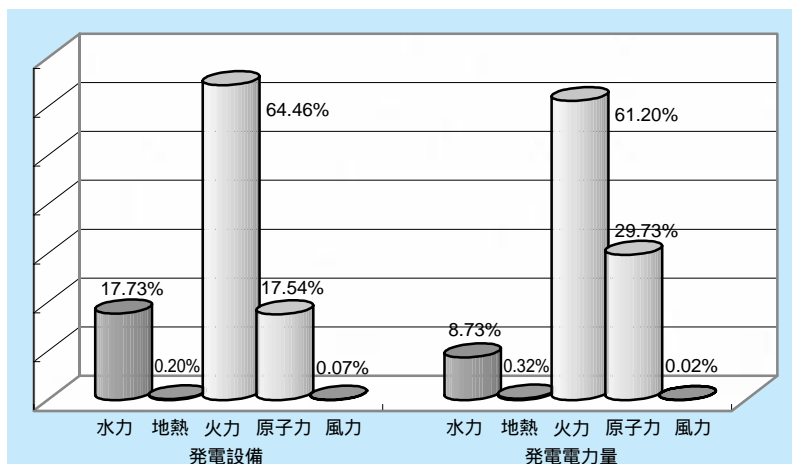


図1-1-2 電源別発電設備と発電電力量 (平成13年度) (電気事業便覧より作成)

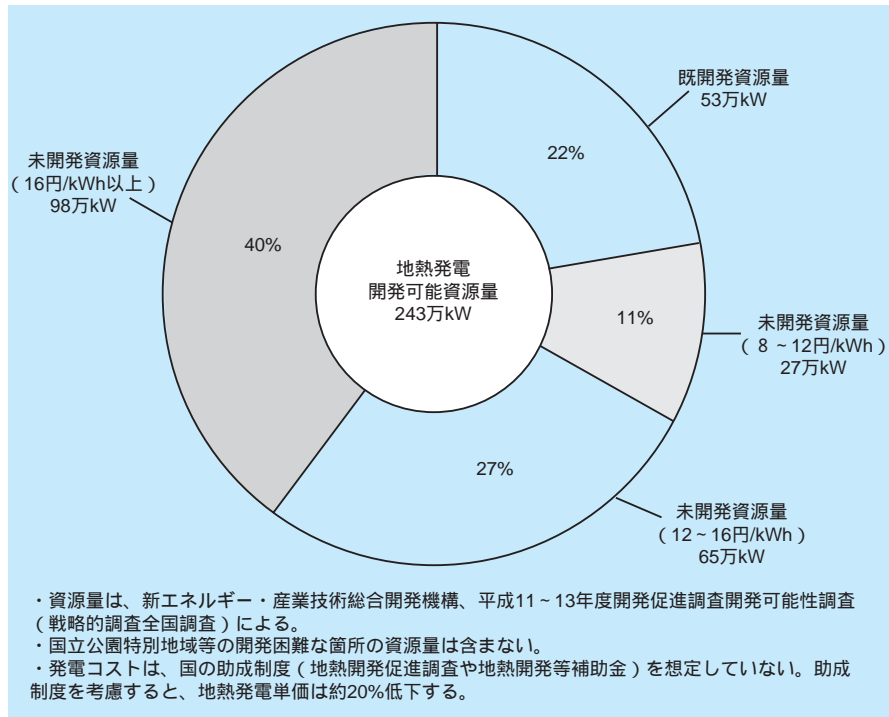


図1-1-3 わが国の地熱発電開発可能資源量（地熱エネルギー：2002による）

1 - 2 地熱利用のあゆみ

地熱は少なくともローマ帝国の時代以前から温泉浴や暖房などで利用されてきた。このような地熱の直接利用は2000年現在60ヶ国以上に及び、熱出力で合計1620万kWとされている。地熱発電は20世紀初頭にイタリアで始まり、2001年現在約20ヶ国で発電設備容量は合計827万kWである（表1-2-1）。

わが国では、1973年のオイルショックを契機に、翌年にはエネルギー問題の根本的な解決と環境問題を緩和するため、「サンシャイン計画」が発足した。この中で地熱エネルギーは主な開発目標の一つとして位置付けられた。さらに1980年には「新エネルギー総合開発機構」（後に、「新エネルギー・産業技術総合開発機構」と改称）（NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization）が設立され、地熱エネルギー開発を探索・採取、熱水利用、高温岩体、深層熱水に分け、それぞれの研究開発が行われた。

高温岩体発電は1970年にアメリカのロスアラモス国立研究所で提案され、まず、同研究所によりニューメキシコ州フェントンヒル地点で実験が行われた。その後、ヨーロ

表1-2-1 世界の地熱発電設備容量（2001年12月現在）

国名	設備容量(万kW)	国名	設備容量(万kW)
アメリカ	223	ニカラゲア	7
フィリピン	193	ケニア	5
イタリア	92	グアテマラ	3
メキシコ	89	中国	3
インドネシア	59	ロシア	2
日本	55	トルコ	2
ニュージーランド	43	ポルトガル	2
アイスランド	17	その他	2
エルサルバドル	16		
コスタリカ	14	計	827

「わが国の地熱発電の動向」（社地熱調査会：2002）より

ッパと日本を中心に実験が進められ現在に至っている（表1-2-2）。

表1-2-2 国内外におけるHDR開発の現状

国名	フィールド位置	区分	開発主体	実験期間	岩質	坑井		坑底温度	備考
						本数	最深深度		
ヨーロッパ連合	ソルツ (フランスアルザス)		EU, フランス ドイツ イギリス他	1986 ~	花崗岩	3 5,000m	3,876m 5,000m	168 200	天然の熱水系の中での循環。1993年に水圧破砕を行い生産井を掘削。1995年に6週間の循環実験で熱出力8~9MWを達成。1999年坑井を5,000mまで掘削。2000年に深部の貯留層を造成し、2002年に新たな生産井を5,000mまで掘削。
スイス	オッターバッハ (ドイツ国境近く)		スイス連邦エネ ルギー省他	1999 ~	花崗岩	2	1,535m 2,755m	4.2 /100m 4.0 /100m	5000m級での実験のための基礎データ収集が目的。2,649mから花崗岩と推定。温度勾配は4 /100m。
オーストラリア	クーバーバイズン		Geodynamics Ltd	2002 ~	花崗岩 (推定)	2	4,900m (予定)	260 (予定)	2002年度より4,900mの坑井掘削を開始し、2004年までに生産井の掘削および循環実験を実施の予定。
アメリカ合衆国	フェントンヒル (ニューメキシコ州)	第1期	ロスアラモス 国立研究所	1973~1980年	花崗閃緑岩	2	2,928m 3,064m	205	1977年に世界で初めて2坑井間の導通に成功。1980年には連続288日間の循環実験を実施し、熱出力2~5MWを達成。60kVAのバイナリー発電実施。
		第2期	同上	1979~1995年	同上	2	4,400m 4,000m	327	実験初期は日本とドイツが参加した。1983年熱出力35MW級の人工貯留層を造成。1986年~1993年にかけて断続的に抽熱実験を実施。最高熱出力9MWを達成。
イギリス	コーンウォール	第1期	ケンボン 鉱山大学	1976~1979年	花崗岩	4	300m	15 (推定)	基礎的事項を掌握し、第2期計画立案に役立てるために地圧計測、熱水流動シミュレーション手法を開発。
		第2期	同上	1979~1982年	同上	2	2,100m	80	1982年に2坑井間で初の循環テストを実施した。
		第3期	同上	1982~1991年	同上	1	2,650m 級	105	1985年から1988年までの3年間に亘り2,600m付近での循環実験を実施。回収率80%以上を達成。
ドイツ	ウラハ		連邦地質調査所 ハノーバー大学	1978~1980年 1990~1992年	片麻岩類 同上	1 1	3,334m 4,500m	140 169	1980年に水圧破砕を実施し、二重管システムで循環テストを実施。坑井コア調査、各種検層、地圧測定など基礎データの収集。
			ルール大学	1976~1984年	花崗岩	6	300m級	14	1979年および1980年に水圧破砕と循環実験を実施。
			鉱山地質調査所	1976~1980年	花崗岩	4	250m級		水圧破砕の後、3坑井間で循環テストまで実施。
フランス共和国	ル・メイ・エ・デ・モンターニュ	第1期	同上(?)	1980~1989年	同上	2	800m	約30	ゲル清と砂による水圧破砕。回収率58%。
スウェーデン王国	フジャルバッカ	第2期	地質省	1986~1992年	花崗岩	2	500m	17	100m離れて2坑井間の循環流量108 l/minで回収率50%。
肘折	山形県最上郡 大蔵村肘折	浅部	NEDO	1985~1991年	花崗閃緑岩	4	1,788m	235	1991年に深さ1,800mで90日間の連続循環実験を実施し、熱出力8.5MW。
		深部	同上	1992~2002年	同上	3	2,303m	271 (2,205m)	1995年深さ約2,300mにおいて約1ヶ月間の循環実験を実施、熱出力9MWを達成。2000年より2002年まで連続循環実験を実施、50kWの発電。
日本	秋田県雄勝郡 雄勝町秋ノ宮根木	第1期	電力中央研究所	1986~1989年	火山礫凝灰岩	2	400m級	60	電中研式水圧破砕法により深度の異なる3箇所貯留層を造成し、これらの貯留層を通じた循環実験を実施。
		第2期	同上	1989~2002年	花崗閃緑岩	3	1,303m	250	深度700m付近と1,000m付近の2カ所から貯留層を造成。生産井の水圧破砕などにより回収率の改善。1995年の1ヶ月間循環実験で回収率約25%、熱出力約1.5MW。1999年に3本目の坑井を1,303mまで掘削。2001年は新坑井と既存坑井の導通確認し、2002年度に総合評価を行った。
焼岳	岐阜県上宝村 焼岳山麓		工技院サンシャイン 計画推進本部	1977~1984年	粘板岩・砂岩	8	300~ 1,000m	60 (300m深)	わが国最初の高温岩体発電実験であり、約20m離れた2坑井間で循環実験を実施した。

1 - 3 高温岩体発電からみた日本の地熱

高温岩体発電では地温勾配の高い地域がまず有望と考えられる。地温勾配が100 /kmを超えるような地域は北海道、東北地方、九州地方などに点在する(図1-3-1)⁽⁴⁾。このような地域では既に従来型地熱発電が行われているところもあるが、高温岩体発電もまずこのような地域が候補として挙げられる。対象地域を地温勾配が50 /km(ヨーロッパやオーストラリアの高温岩体発電対象地域に相当する)にすれば、対象地域は大きく広がる。

高温岩体発電の適地としては、地温勾配が高いことの

ほかに、深度に比例して地温が上昇するいわゆる熱伝導型を示すこと、地下浅部に人工貯留層となる花崗岩質岩が分布すること、がより有利な条件となる。当所の高温岩体発電実験場である雄勝地点はこの条件を満たし、さらにカルデラの内部に位置するという特徴を有している。熱伝導型の地温勾配を示し、地下2000mでの温度が200 以上であり、基盤が花崗岩質岩である地域は8地域確認されている(図1-3-2)⁽⁵⁾。これらの地域は、高温岩体発電の候補地として特に有望と考えられる。

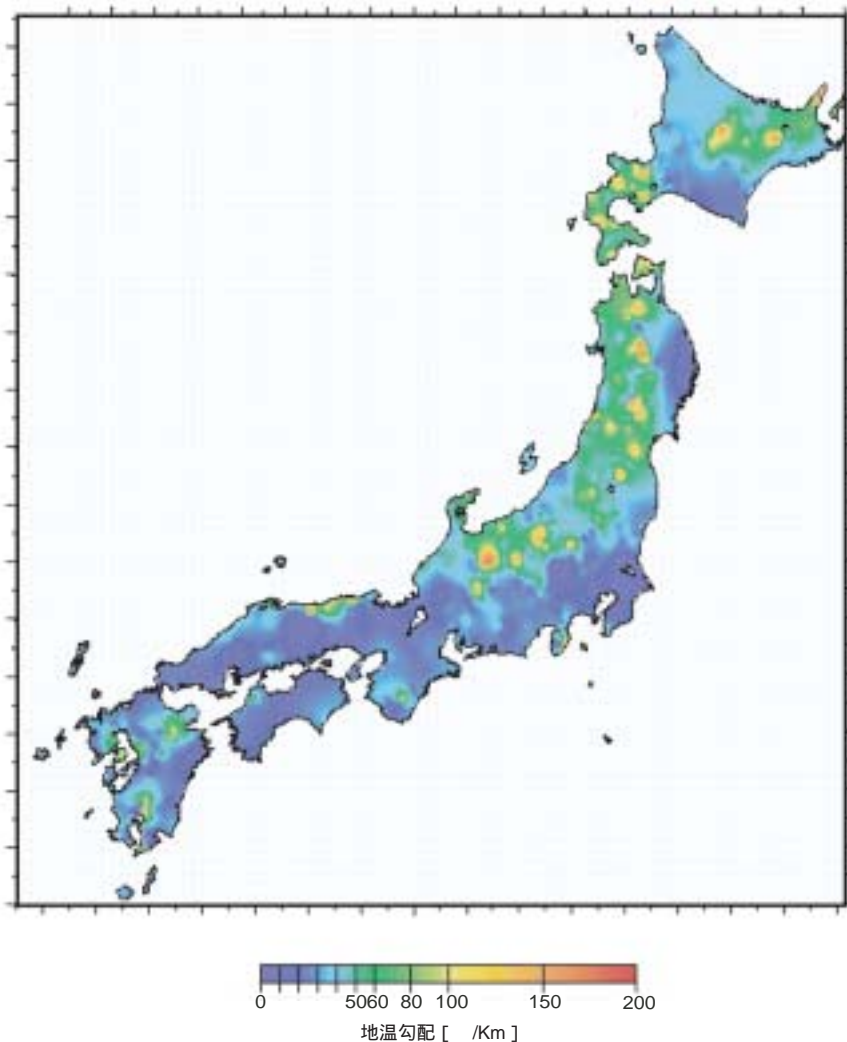


図1-3-1 日本の地温勾配分布(矢野ほか、1999)
産業技術総合研究所 承認番号 第75300-20030213-001号

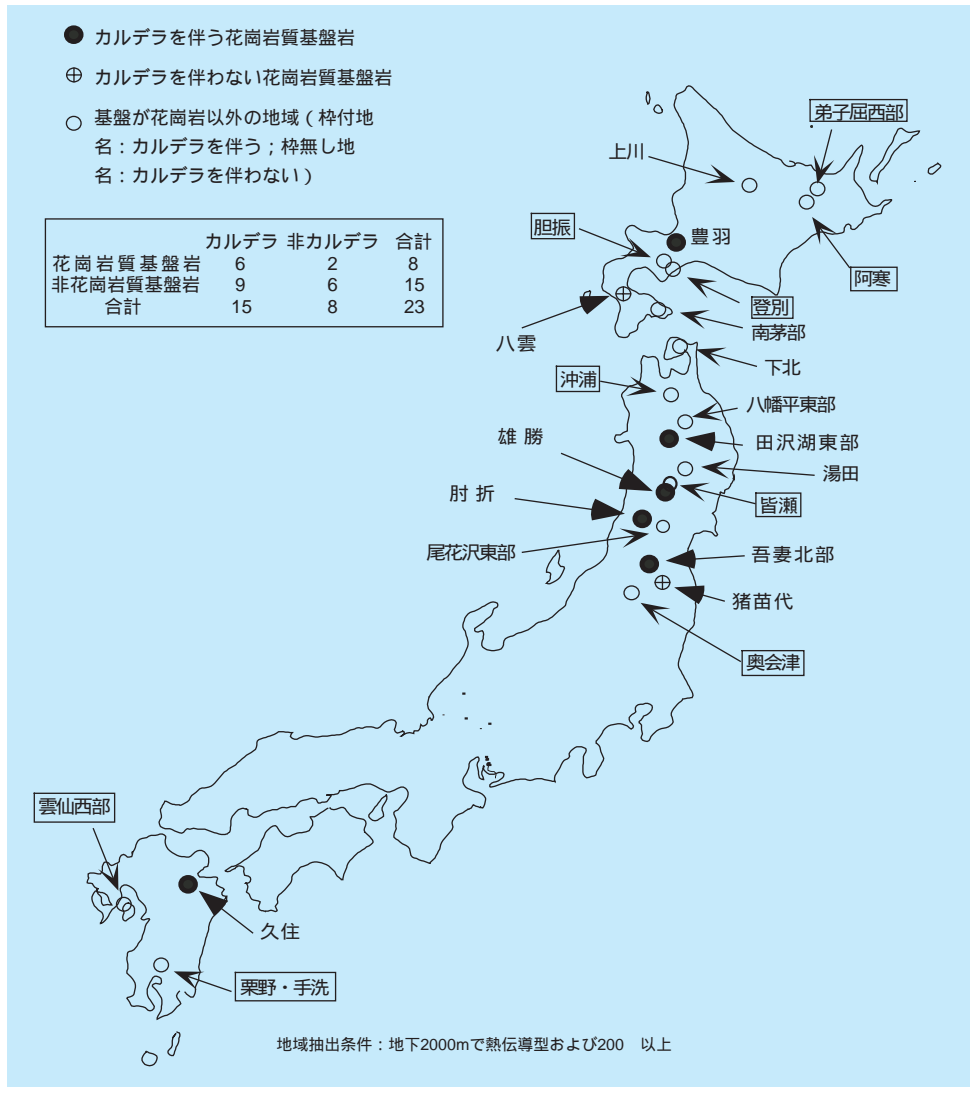


図1-3-2 日本の深部高温岩体分布 (北野ほか、2000)

コラム1：ガイザース地熱発電所の取り組み

これまで従来型地熱開発においては、一般に生産井から蒸気と共に噴出してくる熱水や発電後の熱水を、冷却した後に貯留層に注入すると、貯留層の温度が低下することがあり、貯留層への熱水などの注入は避けられてきた。

ところが最近、生産量が減少してきた貯留層へ熱水や水を注入し、生産量の回復に成功した例が発表され、まさに従来型地熱開発においても高温岩体方式による水の注入と生産が同じ貯留層において行われる可能性がでてきた。

米国カリフォルニア州にあるガイザース地熱発電所は、1945年から本格的に地熱発電所の建設が開始され、1987年には最高出力160.5万kW（設備容量202.3万kW）となり、世界最大の地熱発電所となった。ところがその後、蒸気生産量が毎年10%程度も減少するという事態に陥った。この原因として、貯留層内の蒸気量の減少による効果が大きいと評価された。そこで、この改善策として貯留層に水を注入し、貯留層内の蒸気量を増加させ、出力の増大を図る計画が米国エネルギー省（DOE）などの協力を得て進められた。

1997年ガイザース発電所近くのクリアーレイクから発電所まで約46kmのパイプラインを設置し、1日に約3万トンの水を注入するシステムを完成させた。これにより、蒸気生産の減衰傾向が改善

されたことから、さらに大規模な貯留層への水の供給計画が進められている。この計画では、2002年末までにサンタローザの町から貯留層まで約64kmのパイプラインを設置し、1日に約4万トンの水を30年間にわたり供給する計画で、都市排水の処理と地熱貯留層の涵養の一石二鳥を狙っている。貯留層の数値シミュレーションなどによれば、この都市排水の供給により、地熱発電量が8.5万kW向上するものと期待されている⁽¹⁾。

イタリアではラルデレロ地熱発電所において、1970年代に入ってから蒸気生産量が低下したことから、1980年代はじめより発電後の凝縮水の注入が試みられた。これにより約3万kWの発電量の増加に繋がったとされている。そして、貯留層の深部には高温の岩盤が有り、これに水圧破碎により水を注入し、貯留層の能力を向上させる計画もある⁽²⁾。

日本においても、従来型地熱発電所における生産蒸気量の減少は問題となってきており、これまでの自然に存在する貯留層からの蒸気生産（受動的）だけでなく、人工的に貯留層を改善し（能動的）、蒸気安定生産もしくは出力の増加につなげようとする計画が検討されている。このような、能動的な地熱開発において、高温岩体発電技術が活用されることを期待したい。

コラム2：温泉と高温岩体発電

高温岩体発電方式の地熱開発は、地下浅所に存在する高温の岩体からの熱抽出を目的とし、基本的には地下水などの水が流れていないところを開発の対象としている。この方式では、高温の岩盤に人工的に圧入した水を使って高温岩体のもつ熱エネルギーを抽出することから、温泉などへの影響は少ないと考えられる。むしろ、自然の状態では何千年にもわたって徐々に放出される熱エネルギーを人工的に抽出し、人類のエネルギー資源として活用する方法である。現在の技術では地下5km以浅程度からの熱抽出がコスト的に開発の限度

と思われるが、半径約6,400kmの地球の大きさから見れば表面をほんの少し引っ掻いたものにすぎない。しかし、場所によってはこれだけでその地域のエネルギーが賄えるほどの資源となるのである。さらに、石油や石炭のように人類の使いすぎにより枯渇する資源ではなく、ある地域の熱を取りすぎたため永遠にその地域から熱エネルギーがなくなるということはなく、数十年あるいは数百年のオーダーで見れば熱は回復する。地下に眠る膨大な熱エネルギーをできるだけ人類のエネルギー資源として活用して行きたいものである。

コラム3：地中熱利用ヒートポンプ

地下の熱を利用するシステムとして、最近注目されているものに地中熱利用ヒートポンプ（GeoHPもしくはGHP）がある。これは深さ50～100m程度の安定した地温（10～15℃）を利用するもので、坑井に熱交換パイプを設置し、夏は冷房、冬は暖房を行うシステムである（図）。空気熱源ヒートポンプ（いわゆるエアコン）に比べ、省エネルギーのシステムであり、エアコンでは利用できない寒冷地（外気温 -15℃以下）での利用が可能である。また、都会では地表の熱を地下に貯

蔵することになるため、夏のヒートアイランド現象を緩和する役目もはたせる。世界的には米国を筆頭に普及が進んでおり、ブッシュ大統領のテキサス州の自宅にも地中熱利用ヒートポンプが設置されているとのことである⁽¹⁾。日本では、坑井掘削などの初期コストが高いことなどのために普及が進んでいないのが現状であるが、環境にやさしいシステムであること、ランニングコストが安く、結局は低コストであることなどから普及を促進すべきシステムである⁽²⁾。

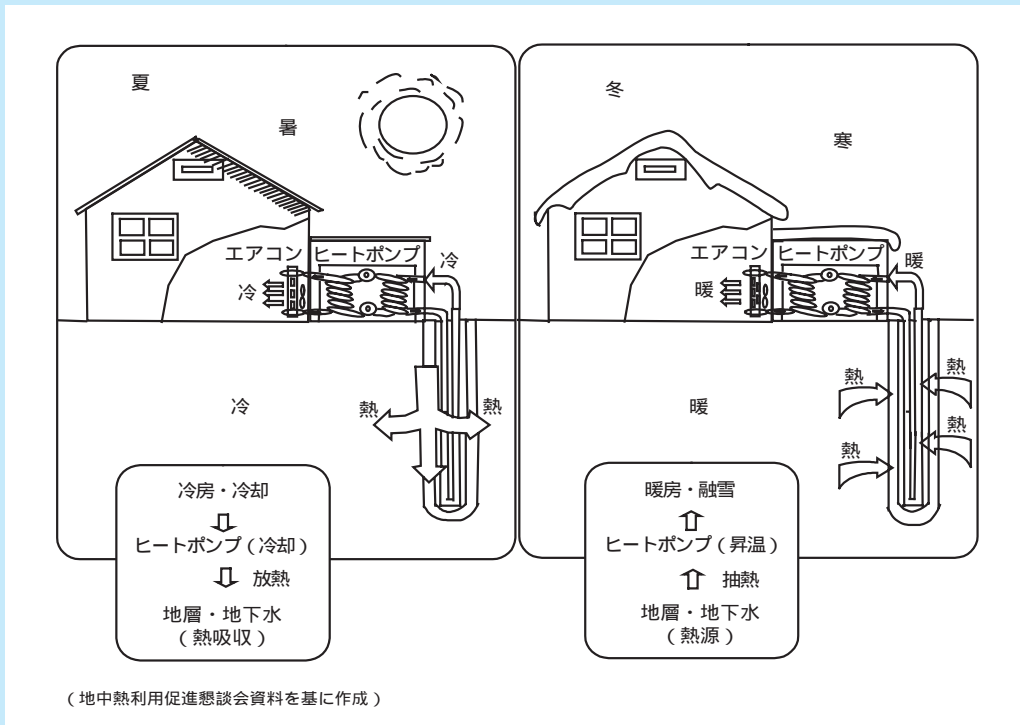


図 地中熱利用ヒートポンプ

第 2 章

2

高温岩体発電の開発



第2章 高温岩体発電の開発 目次

我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 海江田秀志
我孫子研究所 OB 堀 義直

2 - 1	高温岩体発電とは	19
2 - 2	高温岩体発電に必要な技術	20
2 - 3	コスト試算	22

海江田秀志（8ページに掲載）



堀 義直（1959年入所、2001年退職）
アーチダム、地下発電所、原子力発電所など電力会社が建設する発電構造物の基礎の地質調査を担当してきた。1981年に地熱発電の研究を開始し、1990年からは雄勝実験場での高温岩体発電の研究リーダーとして研究を推進する。
2001年、電中研 名誉研究顧問

2 - 1 高温岩体発電とは

高温岩体発電では、図2-1-1に示すように地下の高温の岩盤に坑井（注入井）を掘削し、この坑井に地表から高圧の水（例えば河川水など）を押し込むことにより、岩盤の中に新たな割れ目を造る。注入された水は割れ目を通る間に岩盤の熱により加熱され、熱水や蒸気となるため、この人工の割れ目は「人工の（地熱）貯留層」となる。そして、この人工貯留層をめがけて別の坑井（生産井）を掘削すると、岩盤内の熱水や蒸気は地上に噴き出してくる（これは“焼け石に水”にたとえられる）。この熱水や蒸気は、地上で発電などに用いた後、注入井を通してまた貯留層へ送り込む。これにより、注入井と

生産井を通して地表と地下の人工貯留層との間で水を媒体とした循環系ができ、地下の岩盤の熱を地上に取り出すことができる。

この熱抽出方法によれば、貯留層の大きさの設計や循環する水の人為的な管理が可能となる。地下は深くなればなるほど温度は高くなり、深い坑井が掘削できれば、開発可能な資源量も増加することになる。例えば、1km³の大きさの岩盤が250 から150 まで温度が下がる場合、その4分の1のエネルギーが電気エネルギーに変換されたとすると、100MW（すなわち10万kW）の発電30年分に相当する。

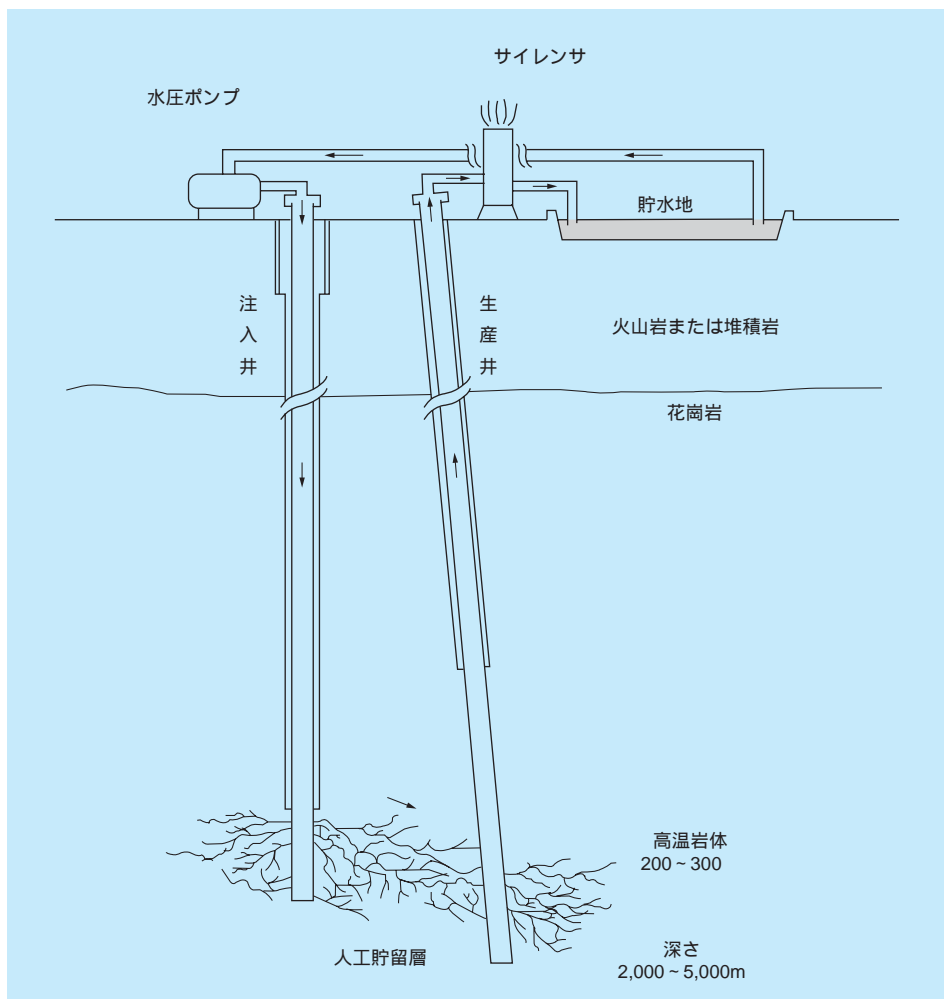


図2-1-1 高温岩体方式地熱抽出の概念図

2 - 2 高温岩体発電に必要な技術

高温岩体発電の開発は、概略以下の手順に従い行われることになるとと思われる（図2-2-1）。まず、高温岩体が開発可能な深さに存在する場所を選定するための、立地計画の策定が必要である。開発候補地が選定されると、高温岩体の深さ、広がり、温度分布、岩盤物性値などの評価のための地点評価が必要となる。そして、地点評価結果を基に概念設計および発電コスト試算を行い、開発を進めるかどうかの判断を行う。開発することになると

以下の作業により、人工貯留層の造成および水の循環による熱抽出システムの造成を行う。①地下の高温の岩盤（高温岩体）内に坑井を掘削し、この坑井を利用して水圧で岩盤内に亀裂を伸展させ人工地熱貯留層を造成する。②人工貯留層をめがけて複数の坑井を掘削する。③ある坑井から水を貯留層に送り込み、貯留層内で岩盤の熱により加熱された水（熱水や蒸気）を別の坑井から地表に取り出す水の循環システムを造成する。④地表に取り出

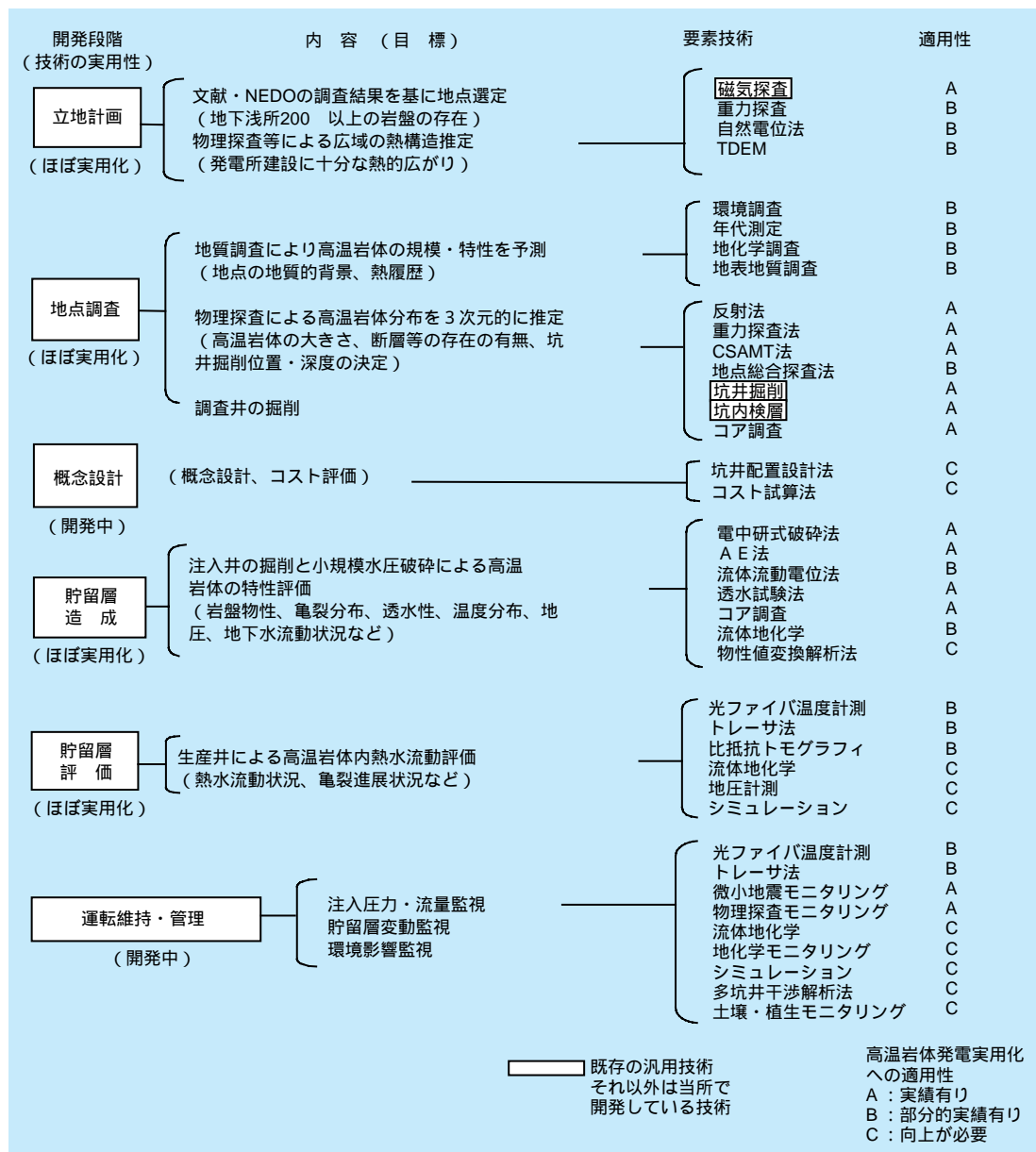


図2-2-1 各開発段階における要素技術の対応

された熱水や蒸気は、発電などに利用した後、再び地下の貯留層へ送る。これにより、水を媒体として地下の岩盤の熱を地表に取り出すことができ、発電などに利用できるシステムができることになる。発電所建設後は、従来型地熱開発と同様に運転管理が必要で、貯留層の変動や環境調査を行うことになる⁽¹⁾。

2-2-1 立地計画

この段階では、技術的には既存資料などにより高温岩体として開発可能な地域の選定や、広域の調査結果から開発に適切な地域を抽出する。一方、社会的にはアクセス道路などのインフラの条件や開発に係わる法的規制、および地元の開発受け入れなどの調査が必要である。

高温岩体発電の候補地点としては、需要地に近いところが望ましいが、現実には人里離れた山間部になることが多いと思われる。また、地下に大量の水を圧入することから、大量の水が確保できることも必要である一方、活断層や透水性の高い断層などからは離れた場所が望ましい。高温岩体の岩盤としては、経済的に掘削可能な深度（3,000～4,000 m）に十分な広がり（数 MW の発電に対し少なくとも半径 500 m 以上）を持つ高温の岩盤で、比較的新しい時代に貫入した花崗岩もしくは近くの熱源により加熱された花崗岩になると思われる。また、貯留層と地表の間での水の循環を行うため、高温岩体内には天然の割れ目が少ない方が、岩盤内への水の逸散が少なく、設計施工が比較的容易になると思われる。高温岩体としての岩盤の温度については、発電コストを考慮すると 200～250 は必要と思われる。

立地計画の段階での地点調査としては、開発予定地点の地質や地下構造に関する文献調査から始まるが、我が国においては新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）などにより、国内の主要な地熱地域において地下構造や熱構造に関する基礎的な調査が行われており、その結果が利用できる場合が多い。しかし、既存の調査が不十分な地域や、国の調査対象となっていない地域の場合は、いわゆる広域地質調査や物理探査による概査を行い、開発予定地の選定を行う。開発予定地選定の範囲としては、半径 10 km 程度の範囲の調査により、半径 1～2 km 程度の範囲を選定することになると思われる。

2-2-2 地点調査

この段階では、高温岩体の広がり、温度分布、透水性などを精度良く評価し、人工貯留層の設計および発電システムの概念設計に必要な情報を得る。

そのためには、坑井掘削位置を決める程度（数十 m の精度）の地下構造の詳細な調査が必要となる。この調査では、開発地点の半径 1～2 km の範囲での地下構造を推定する必要があり、そのための物理探査として、地震探査反射法や CSAMT 法（第 5 章参照）などが行われる。ただし、これらの評価は地下の物性値を仮定した構造の評価であるため、地下深部に行くほど精度が悪い。したがって、物性値の把握や探査精度の確認のため調査井の掘削は欠かせない。また、地下の温度分布については地表からの探査では推定が難しく、調査井により確認する必要がある。

調査井としては通常掘削費の関係から、最終坑径が 100 mm 程度の坑井が掘削される場合が多い。調査井を利用した調査としては、掘削時に得られる岩盤の細かい破片（スライム）や掘削コア（ボーリングコア）などの分析による地質柱状図の作成、坑内検層による坑井周辺岩盤の物性値（温度、電気比抵抗、弾性波速度、密度、自然電位など）の深さ分布をはじめ、超音波を利用した坑壁の画像調査などが必要で、この調査結果により天然の割れ目の性状・発達状況、岩盤の物性値・透水性・間隙率、地圧などを評価し、貯留層を構成する亀裂の伸展を予測する。

2-2-3 概念設計

この段階では、地点調査で予測した貯留層の伸展状況に基づき、数値シミュレーション等により、注入井に圧入する水の流量・圧力の条件に応じた生産井から得られる熱水の流量・圧力・温度を推定する。この推定を基に、熱抽出の将来予測や注入井、生産井の数や配置、発電システムなどの設計を行い、最終的に発電コストを試算し、開発を行うかどうかの判断を行う。

2-2-4 貯留層造成・評価

この段階では、地点調査および概念設計に基づき、人工貯留層とこれを介した地表と地下の水の循環システムを造成する。

まず、注入井を用いて水圧で岩盤を破碎し、貯留層造成を行う。これまでの国内外での実績に基づく、裸坑パッカー¹が利用できれば効率的に貯留層造成が可能であるが、裸坑パッカーの適用は材質の耐熱の問題など現状では課題が多く⁽²⁾、高温岩体および地熱開発での適用は難しい。そこで、注入井の坑底近くまでケーシング²を設置して、これをセメントで固定した後、坑井全体を加圧する方式（全坑加圧方式）によりケーシング末端と坑底との間の裸坑部を破碎するのが、簡単で確実な方法と思われる。この水圧破碎のみでも大規模な貯留層の造成は可能であるが、貯留層の領域を大きくし、熱抽出領域を大きく取るには、異なる深度での多段貯留層造成が必要である。この方法として、当所で開発した多段水圧破碎法（Casing Reamer and Sand Plug Method, CRSP法；第6章参照）が有効である。この方法により比較的簡便で確実に深部から浅部へ多段の貯留層が造成できる。造成された貯留層の大きさ、伸展方向については亀裂の

破壊する際に発生する破壊音（AE：Acoustic Emission）の観測が有効であり、その震源分布より推定する。なお、天然の割れ目が大きく発達したところや、岩盤の透水性が高いところでは、AEの発生が少ない場合があり、このようなところでは平面的には評価に留まるが、流電電位法や自然電位法³などによる補完も必要である。さらに、地化学調査やトレーサテストなどは、圧入した水の流動状況の評価や将来のスケール問題などの事前調査として重要である（第8章参照）。

貯留層の造成が終わり、その伸展方向・広がりなどが推定されれば、貯留層を貫くように生産井を掘削する。

その後、注入井との間で水の循環試験を行う。この際、注入井と生産井の間の透水性を高め、循環における水の回収率を高める必要がある。水の回収率は、水の確保や環境への影響などの問題から、少なくとも80%以上は必要と考えられる。一生産井当たりの回収率が低ければ、生産井を何本も必要とすることになるため、発電コストを大きく左右する可能性がある。当所では、我が国では深度が浅く天然の割れ目が発達している箇所での高温岩体発電開発が行われる可能性が高いことから、一つの注入井に対し、4本の実産井を配置するモデルを考案した⁽³⁾。

2 - 3 コスト試算

当所では現状の技術でどの程度の発電所建設が可能で、その建設費および発電コストがどの程度になるかを試算し、高温岩体発電による実用化の可能性について検討した⁽³⁾。

2-3-1 75MW 発電コスト（昭和61年度）

昭和61年度に実施した高温岩体発電の経済性については、まず資源量評価を行い、地温勾配により発電所建設候補地を3つのランクに分け、発電所の建設が可能な、

深さ1kmあたり90℃以上の地温勾配が期待される地域10箇所を選定した。そして、各地域においてどの程度の発電出力が期待できるかを評価し、75MW（75万kW）の発電出力を基準とし、この発電所がいくつ建設可能かを評価した。その結果、抽出した10地域で200箇所程度の建設が可能とした。ただし、この地域の抽出の過程で、国立公園の指定や地元の詳細などは考慮していない。

以上の資源量評価の後、75MWの発電所建設に係わ

1 坑井内に設置する栓のこと。パッカーにはゴム、テフロン、メタル製などがある。

2 坑壁を保護するために坑井に設置する鉄管のこと。

3 流電電位法は坑井のケーシング（鉄管）を電極として電流を流し、地上等に配置した多数の電極との間で電位変化を測定するもので、自然電位法は自然の水の流れ自体で発生する電位変化を測定するもの。これらにより、地下の水の流れを推定する（第8章参照）。

る経費を算出した。まず、発電所建設の前提条件として以下を仮定した。①出力は75MW程度、②循環に使用する水の注入井での坑口圧力は10MPa（約100気圧に相当）で流量は毎時2,000～2,400ton、③坑井は注入井が4本で生産井は9本、④熱抽出の範囲は深さ2,000m～3,000mで平面的には1,200m×1,800m、⑤熱抽出範囲の岩盤の平均温度は300℃、⑥熱抽出時の出力の減衰を補うため、5年毎に注入井1本と生産井2本を追加する。⑦利子年6%、人件費などの上昇率2%、である。これらの条件で計算された建設費の主なものは、①坑井掘削費が130億円、②水圧破碎による貯留層造成費が38億円、③発電機器が130億円、④輸送管などの費用が40億円などであり、建設費の合計は483億円となった。この結果から、建設コストは64.4万円/kWで、発電コストは初年度が25.8円で、その後安くなり、15年間の平均では18.0円/kWとなった。

2-3-2 240MW 発電コスト（平成元年）

上記の検討の後、出力を増大させることにより、より発電コストの低下が期待できるとのことから、平成元年度に大容量高温岩体発電のコスト試算を行った（表2-3-1）。

この試算においても、NEDOなどにより新たに調査された地熱地域の評価も踏まえ、資源量の再評価を行っ

た。その結果、調査井などが掘削され、より確度の高い高温岩体発電可能性地域として16地域を抽出し、これらの地域の合計で38,400MWの発電が可能と評価した。なお、この地域選定においても国立公園などの指定や地元の発電所建設についての了解などは考慮していない。

次に、2-3-1の発電コストを出力240MWに増大させた場合の前提条件を以下のように設定した。①出力は240MW程度、②循環に使用する水の注入井での坑口圧力は10MPaで流量は循環中20%損失が生じるものとし、毎時6,250ton、③坑井は注入井が5本で生産井は11本、④熱抽出の範囲は深さ2,000m～4,000mで平面的には1,200m×1,800m、⑤熱抽出範囲の岩盤の平均温度は300℃、⑥熱抽出時の出力の減衰を補うため、5年毎に注入井1本と生産井2本を追加する。⑦利子年6%、人件費などの上昇率4%、である。これらの条件で計算された建設費の主なものは、①坑井掘削費が382.5億円、②水圧破碎による貯留層造成費が137.6億円、③発電機器等が330億円、④輸送管などの費用が100億円などであり、建設費の合計は1,282.2億円となった。この結果から、建設コストは53.4万円/kWで、発電コストは15年間の平均では12.7円/kWとなった。

2-3-3 最近の見直し（平成14年度）

高温岩体発電コストを試算した昭和61年度および平

表2-3-1 建設費および発電コストの試算例（240MW発電所の場合）

1990年のコスト試算（億円）			坑井掘削費3割減	
地下部	調査費	60.0	調査井30億円、その他30億円	51.0
	土地購入費	6.0	200万m ² ×300円/m ²	6.0
	坑井費	382.5	注入井5坑×24.8億円/坑、生産井11坑×23.5億円/坑	267.5
	水圧破碎費	137.6	5坑×27.52億円/坑 計測費を含む	137.6
	輸送管	100.0		100.0
	小計	686.1		562.1
地上部	建物	12.0	土木工事一式を含む	12.0
	発電プラント	330.0		330.0
	注入ポンプ	20.0		20.0
	水路・貯水池	20.0		20.0
	建中利子	159.8		79.8
	その他	54.3	管理費：8.5百万円×150人・年、その他	54.3
小計	596.1		516.1	
合計	1282.2		1078.2	
建設単価	53.4万円/kW 発電端単価（239.9MW）		44.9	
発電単価 （15年平均）	12.7円/kWh 現在価値換算収支等価計算法による		9.0円/kWh	

成元年度の時点では、上述した発電コストでも十分水力発電などと競合できると想定したが、その後の経済変動などにより、他の発電コストが値下がりしていることから、コスト試算を見直すことにした（表2-3-1）。

近年の坑井掘削技術の進歩により、掘削コストは現在では約3割減が期待できるようである。そこで、既存の計算に基づき240MWの発電所建設における掘削費が3割安くなるとすると、約124億円削減されることになり、

これによる発電コストは11.3円/kWhになる。また、最近の金利の変動を基に以前6%と仮定した金利を3%にすると、約80億円削減が図られ、掘削コストの低減も含めた場合、発電コストは9.0円/kWhまで低下する可能性があることが判った。

ただし、我が国のように地下構造の変化の大きい地域で、240MWの発電所建設が可能かどうか、高温岩体資源に関する全国規模の調査が望まれる。

第 3 章

3

世界の高温岩体発電実験
と当所の係わり



第3章 世界の高温岩体発電実験と当所の係わり 目次

	我孫子研究所	地圏環境部	上席研究員	海江田秀志	
我孫子研究所	高レベル廃棄物処分研究プロジェクト	兼	地圏環境部	上席研究員	木方 建造
	我孫子研究所	地盤耐震部	上席研究員	佐々木俊二	
	我孫子研究所	地圏環境部	主任研究員	伊藤 久敏	

3 - 1	フェントンヒル実験	27
3 - 2	ソルツ実験	27
3 - 3	オーストラリア高温岩体発電実験	28
3 - 4	肘折実験	29

海江田秀志（8ページに掲載）



木方 建造（1976年入所）

これまでに、主に地化学的手法を用いた高温岩体発電の地熱貯留層の特性評価、特に規模評価手法に関する研究に取り組み、日本のHDR実験場である雄勝や肘折地点に適用してきた。最近では、高レベル廃棄物処分に関する地質特性調査技術や評価手法の研究開発に従事している。



佐々木俊二（1976年入所）

平成13年4月から（財）地震予知総合研究振興会に出向。AEのような微小な振動からM7クラスの強地震動まで、振動・波動の研究に取り組んできた。内燃火力発電所の振動障害調査、震源域近傍における強震動特性、礫質地盤の地盤構造を考慮した安定性評価、高温岩体発電システムの技術開発、地層処分施設の地震影響評価などの研究に従事。

伊藤 久敏（8ページに掲載）

アメリカ合衆国では自然エネルギーの資源量の評価に当たり、地熱資源として深さ10kmまでを対象とし、この範囲の熱エネルギーを計算した。地温勾配は平均25 /km、岩盤の熱容量は $2.2 \times 10^{15} \text{J}/\text{km}^3$ 、150 が使える最低温度として、全国土の面積936万 km^2 における熱エネルギーは、1000万quads (1quad= $3,345 \times 10^4 \text{MW} \cdot \text{year}$)となる。この内約2%の地域180万 km^2

では地温勾配が45 /kmと高く、これらの地域のみで熱エネルギーでさえ、65万quadsで、1982年当時の全世界のエネルギー使用量250quadsの2600年分に相当すると評価した⁽¹⁾。そして、これらの熱エネルギーの開発には高温岩体方式による熱抽出技術が必要として、その実用化に必要な要素技術の開発を開始した。

3 - 1 フェントンヒル実験

ロスアラモス国立研究所により1973年からニューメキシコ州フェントンヒル地点においてフェーズ1研究が開始された。このプロジェクトでは、深さ2,750mの坑井に水圧破碎で貯留層を造成し、これをめがけて掘削した生産井との間で、約100mの距離を隔てて合計108日間、連続では75日間の循環実験を行い、130 の熱水を毎分400~700kg生産することに成功した。

その後、IEA(国際エネルギー機関)による国際共同研究としてフェーズ2を1979年より開始した。この研究には日本とドイツが参加し、日本からはNEDOからの派遣研究員として毎年3人程度が現地実験に携わった。フェーズ2では、深さ4,400mと4,000mの2本の坑井を用いて、まず2本の坑井間の水理的導通を達成するため

の水圧破碎が行われた。しかし、水圧破碎を何度も試みただにも拘わらず、2坑井間の導通は果たせず、結局二つの坑井を掘り直すことにより坑井間の水理的導通が達成され、1986年に最初の循環実験が実施された。その後、注入圧力や循環期間を変えながら何度も循環実験が実施され、貯留層の容積が徐々に大きくなっていくことや、注入した水の生産井からの回収率が改善されていくことなどが示された⁽²⁾。

当所はこの実験にNEDOを通して研究者を派遣し、AEの観測および解析に携わり、観測されるAEの特性や貯留層評価に関する技術を習得したほか、地化学やトレーサ試験(第8章参照)に関する技術を習得し、当所の研究やNEDOの肘折地点での実験に適用した。

3 - 2 ソルツ実験

ヨーロッパでは、1970年代よりイギリスではコーンウォールで、フランスではル・メイエ・デ・モンターニュで、ドイツではウラハとファルケンベルクで、それぞれ独自にプロジェクトが進められていたが、1986年よりヨーロッパ連合(EU)のプロジェクトとして、フランスのソルツにおいて研究開発が進められている。ソルツでは、4,000m級の坑井により168 の岩盤(花崗岩)の天然の割れ目を貯留層として利用する循環システムを造成し、1995年までに熱出力8~9MWを達成した。し

かし、生産水の温度が必ずしも高くなかったことから、坑井を深さ5,000mまで掘り下げ⁽³⁾、2000年には深部の貯留層を新たに造成した。現在、新たな生産井を掘削し、2006年までに5MW程度の発電実験を予定している。

当所は、NEDO国際共同研究助成事業などを通し、ソルツの実験関係者と情報交換やデータの交換を行ってきたほか、それぞれが主催して行ったワークショップなどに研究者を派遣し、交流を図っている。

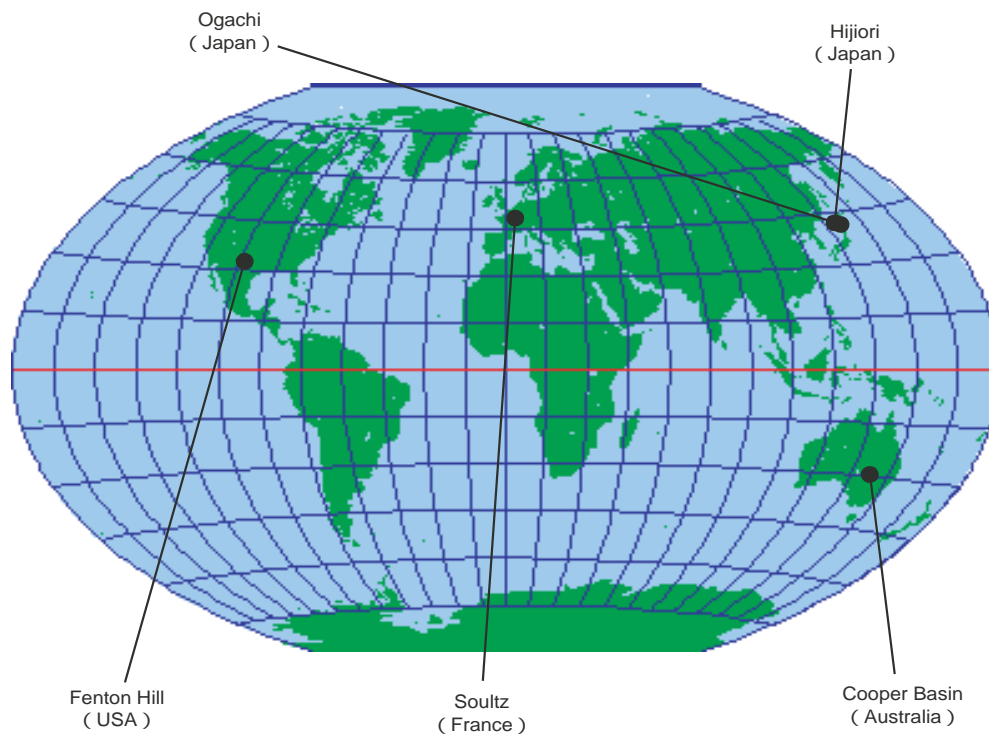


図3-2-1 世界の高温岩体発電プロジェクト

3 - 3 オーストラリア高温岩体発電実験

オーストラリアでは、地球環境問題への対応から自然エネルギー、再生可能エネルギー開発が注目され、その一つとしてオーストラリア大陸中央に位置するクーバーベイズンにおいて、2002年度より高温岩体方式による本格的な熱抽出実験が開始された。

この実験では、深さ4,900mの坑井を用いて、当所で

開発した多段貯留層造成法を応用し、複数の貯留層を造成し、複数の坑井による大容量（270MW級）の発電を目標としている。

この実験の開始に当たり、当所への研究協力の要請があり、当所は地表AE観測を主体に共同研究を通して、積極的に協力して行く予定である。

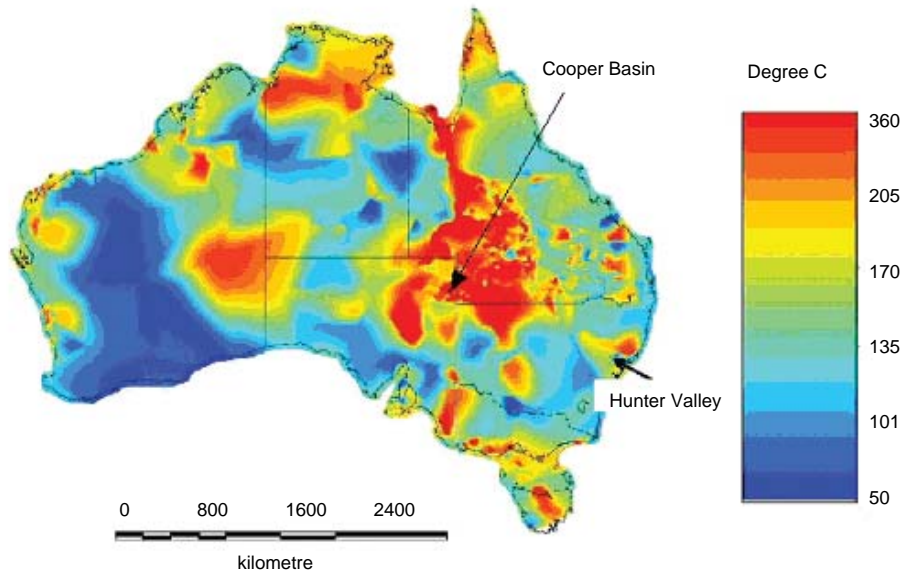


図3-3-1 オーストラリアの地下5 kmの温度分布

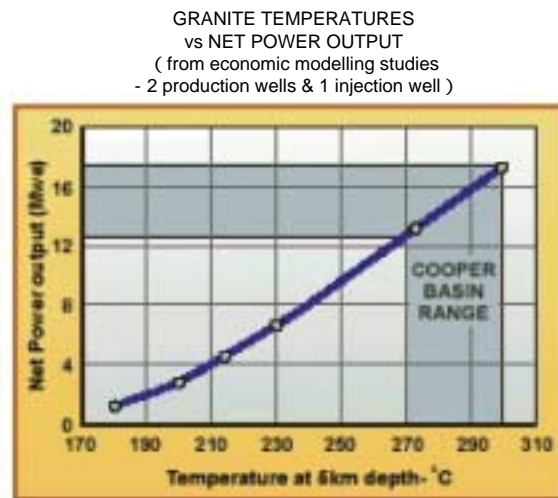


図3-3-2 クーパーベイズンの地下5kmの温度と発電量予想図

3 - 4 肘折実験

日本においては、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）により、山形県肘折地点において2,000 m級の坑井4本を用いて、深さ1,800 mと2,200 mの2箇所に貯留層を造成し、複数の貯留層と複数の坑井による循環実験が行われた。この実験では2000年11月から2002

年8月まで長期循環実験が実施され、2002年6月から約3ヶ月間約50kWの発電が実施された⁽⁴⁾。

当所は、1987年度よりNEDOからの受託研究として、地表AE観測と地化学調査を担当し、貯留層評価に貢献した。



図3-4-1 肘折および雄勝実験場の位置と現場の様子
右上の写真が肘折、他は雄勝

第

4

章

雄勝高温岩体発電実験



第4章 雄勝高温岩体発電実験 目次

我孫子研究所	地圏環境部	上席研究員	海江田秀志	
我孫子研究所	高レベル廃棄物処分研究プロジェクト 兼	地圏環境部	上席研究員	木方 建造
我孫子研究所	OB		堀 義直	
我孫子研究所	地圏環境部OB		北野 晃一	
我孫子研究所	地圏環境部OB		本島 勲	

4 - 1 雄勝高温岩体発電実験の概要	33
コラム4：雄勝実験場	36

海江田秀志（8ページに掲載）

木方 建造（26ページに掲載）

堀 義直（18ページに掲載）



北野 晃一（1965年入所、2001年退職）
電中研での前半25年間は水力発電所や原子力発電所の地質調査に、後半11年間は高温岩体発電研究に従事。高温岩体の研究では、安定同位体地熱資源調査や雄勝実験場周辺の地質踏査とともに、研究全体の計画づくりやまとめに従事。現在は、基礎地盤コンサルタンツ。



本島 勲（1956年入所、1998年退職）
入所当初、電気探査に従事しシュランベルジャ - 法による新しい電気探査装置を開発。その後、定年退職まで電力施設周辺岩盤での地下水問題に対処して水質、同位体による広域地下水調査法、正弦波圧力試験法などの岩盤地下水調査法を開発するとともに高温岩体発電技術の開発に携わり人工破碎帯の透水性の評価法の開発を担当。

当所では我が国における高温岩体発電の開発モデルとして、我が国の地質構造の特徴（変化が激しく天然の割れ目に富む）を踏まえ、ユニット方式による開発を提案した⁽¹⁾。このモデルでは、一つのユニットにおいて一つの注入井の回りに4本の生産井を配置し、注入井に圧入した水を回収率80%以上で回収する。このユニットを増設することにより大規模な地熱（高温岩体）開発を行

うことで、発電コストの低減も期待できる。このための要素技術の開発を、以下の4つのフェーズに分けて推進してきた（図4-1-1参照）。

なお、本研究の推進においては、研究フェーズの節目において、国立研究機関、大学、電力会社など外部委員による「専門的研究評価」により、研究成果の評価および計画に対する助言などを受けた。

4 - 1 雄勝高温岩体発電実験の概要

(1) フェーズ1（昭和61～63年度）

このフェーズでは、高温岩体地点選定のための探査技術、水圧破碎による貯留層造成技術、貯留層となる亀裂の分布評価技術の開発に関する基礎実験を実施した。昭和61年度から昭和63年度にかけて、深さ400m級の坑井を用いて、当所で開発した多段貯留層造成法により、深さの異なる3段の貯留層を造成し、その分布状況をAE観測や流電電位法により推定し、貯留層と導通させた2本の坑井により水の循環が可能なことを示した。また、探査技術としてCSAMT法（第5章参照）により、深さ2,000m程度までの地下比抵抗構造の推定技術を開発した⁽²⁾。

(2) フェーズ2（平成元～4年度）

このフェーズでは、実用に近い深さ1,000m級で温度200の岩盤を対象として、貯留層の造成とその分布・広がり の評価技術の開発を目的とした実験を実施した。

まず、全国各地の地熱地域における資料を基に高温岩体実験可能性地域を選定した。この中で、すでに坑井掘削により花崗閃緑岩が確認され、岩盤内の割れ目の状況や温度分布も得られており、地元のご協力も得られたことから雄勝地点が最も実験に相応しい地点と評価した。また、CSAMT法探査などを実施し、実験予定地周辺の地下比抵抗構造を推定し、地下300m付近から目的の花崗閃緑岩が分布していると推定した（第5章参照）。

平成2年度に、注入井（OGC-1）を深さ1,000mまで掘削した。この坑井は深さ約300mから花崗閃緑岩となり、坑底の温度は約230であった。また、坑井掘削中ほとんど

逸泥^{いつてい}⁴は見られず、温度が深さに比例して上昇する熱伝導型を示し、予想した実験条件を満足することを確認した⁽³⁾。

次に当所で開発した多段貯留層造成法により、OGC-1の深さ990m～1,000mに対し11日間で10,160tonの水の圧入による水圧破碎を、また深さ711m～719mに対し10日間で5,440tonの水の圧入による水圧破碎をそれぞれ実施し、上下二段の貯留層を造成した。これらの貯留層はAE観測や流電電位法結果などにより、下部貯留層はOGC-1から北北東方向へ約1,000m、上部貯留層は東方へ約800mにわたって広がり、上部と下部で異なる方向へ広がったものと推定された（第8章参照）。これらの貯留層の評価結果に基づき、両貯留層を貫くよう生産井（OGC-2）を深さ1,100mまで掘削した。OGC-2はOGC-1と深さ1,000mレベルで約80m離れるよう傾斜掘削を行い、坑口から深さ700mまではケーシングを設置し、それより深部から坑底までは裸坑仕上げとした。OGC-2の坑底の岩盤温度は240であった。OGC-2の掘削中、OGC-1の水位の変動が認められ、両坑井間に水理的導通が達成されていると推定された⁽⁴⁾。

以上により、CSAMT法などによる深さ2,000m～5,000mまでの地下の探査技術が開発され、また当所で開発した貯留層造成技術の実用性を確認し、AE法や流電電位法による貯留層分布域の推定の妥当性も確認した。そして、OGC-1とOGC-2との間で貯留層を通した水の循環による熱抽出の実証や、造成した2段の貯留層の伸展方向が深さ約300m異なっただけでほぼ90°違った原

4 地熱井の掘削では泥水を循環させながら掘削するが、注入した泥水が規模の大きな天然の割れ目などを通して逸散し、回収されない状況を逸泥という。

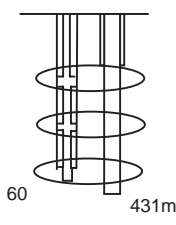
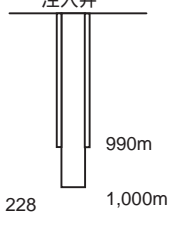
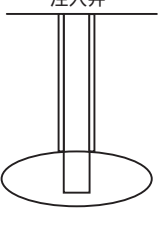
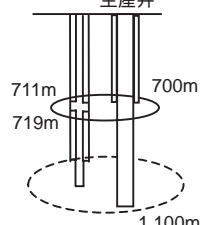
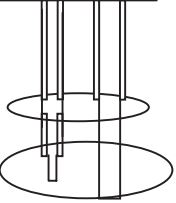
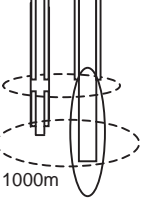
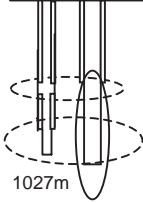
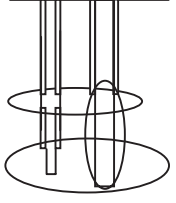
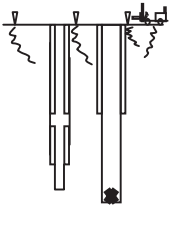
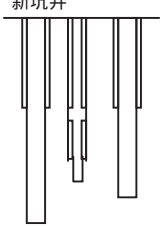
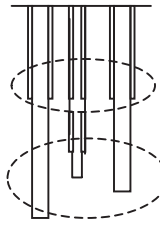
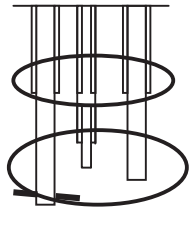
フェーズⅠ		フェーズⅡ (1989~1992)		
1986~1988年 昭和61年~63年	1989年 平成元年	1990年 平成2年	1991年 平成3年	1992年 平成4年
(多段貯留層造成法の開発) 秋の宮地点基礎実験 CRSP法による3段貯留層の造成 深さ: 400m 温度: 60 岩盤: 火山礫凝灰岩 導通試験	雄勝地点における実験開始 候補地点 (鳥取、北海道、雄勝) CSAMT、TDEM調査(雄勝地点)	(貯留層計測技術の開発) 注入井(OGC-1)の掘削 深さ: 1,000m 坑底温度: 228 岩盤: 花崗閃緑岩 注入井検層 掘削コア調査・物性試験 計測井(OGC-0)掘削 深さ: 945m TDEM法・CSAMT法探査 HTBS	下部貯留層造成 (10,000m ³ , 300気圧) 地化学調査(既存水との混合モデル) AE・流電電位計測 破碎前後の透水試験 HTBS調査 地圧測定(AE法) FT年代測定	(多段貯留層造成法の実証) 上部貯留層造成 (5,400m ³ , 300気圧) サンドプラグ(882m) リーミング(711-719m) 生産井(OGC-2)掘削 導通試験 AE用発破、地表と注入井内 TDEM探査、地化学調査 AE・流電電位計測
				
フェーズⅢ (1993~1995年)		フェーズⅣ (1996~2001年)		
1993年 平成5年	1994年 平成6年	1995年 平成7年	1996年 平成8年	1997年 平成9年
(貯留層計測技術の実証) 循環実験(22日間) 回収率 3% 光ファイバ温度検層 トレーサ試験、地化学調査 比抵抗トモグラフィー 3次元流電電位計測 AE・流電電位計測 第2回国際HDRフォーラム(山形市)	(貯留層評価技術の開発) 循環実験(5ヶ月間) 生産井迎え破碎 回収率 10~12% 生産水温度 160 3次元流電電位計測 破碎・循環前後透水試験 光ファイバ温度検層 注入井PTS検層 生産井PTS検層(注入点: 915、1000、1030、1067m) AE・流電・自然電位計測	(貯留層計測技術の確立) 循環実験(1ヶ月間) 注入井増掘(1,027m) 注入井と生産井の水圧破碎 回収率 20~25% 破碎・循環前後の透水試験 坑井間正弦波透水試験 比抵抗トモグラフィー 3次元流電電位計測 増掘部のコア調査 光ファイバ温度検層 トレーサ試験、地化学調査 AE・流電・自然電位計測	CSAMT探査(周辺構造調査) 環境モニタリング (微小地震、坑井内水位、河川水分析など)計測 GEOH3Dシミュレーション コードの改良 研究評価	個別貯留層評価 サンドプラグによる上部貯留層 層注水実験 上下部貯留層導通試験 シミュレーションによる事前 予測 AE・微小地震観測 研究評価
				
フェーズⅣ (1996~2001年)				
1998年 平成10年	1999年 平成11年	2000年 平成12年	2001年 平成13年	
地下構造・貯留層精査 地震探査反射法による地下構造・AE 速度構造調査 生産井BHTVによる割れ目・地圧評価 生産井坑内発破によるAE震源補正 コラプシング法等によるAE震源分布 補正 研究評価	新坑井(OGC-3)掘削 深さ 1,303m 坑径 21.59cm 坑井調査 坑内検層(温度、電気、音波、 FMI、UBI、ARI等) 方位角コア 3深度	導通確認試験 坑井間導通試験(注入井と新坑井) 光ファイバ温度計測による新坑井の 導通箇所特定 導通箇所とAE震源分布の対比	(貯留層評価技術の実証) 新坑井透水試験 新坑井透水試験と小規模水圧破碎 深部自然割れ目の貯留層との関連評価 地圧評価 高温岩体発電技術マニュアルの原案 作成 研究評価	
				

図4-1-1 雄勝高温岩体発電実験の経過と計画

因の解明が課題として残された。

(3) フェーズ3 (平成5～7年度)

このフェーズでは、2段貯留層とこれらと導通した2本の坑井間での水の循環により、岩盤からの熱抽出が可能なことを実証することを目的とした。

平成5年度に最初の循環実験「1993循環実験」としてOGC-1に平均毎分200kgの水を22日間連続で圧入した。その結果、OGC-2から熱水が回収され、最終的に回収された熱水の温度は120℃に達した。一つの坑井から造成した多段貯留層による熱水の生産に成功したのは世界でも初めてであった。しかし、この実験におけるOGC-1に注入した水のOGC-2からの回収割合(回収率)は3%程度で、実用化の目標とした1生産井あたり25%に比べ非常に少なかった。この回収率の低い原因としては、OGC-2周辺の透水性が悪いためと考えられた。

そこで、OGC-2周辺の透水性を高め、回収率の改善を図るため、OGC-2に毎分2tonの水を圧入する水圧破碎(迎え破碎)を実施した。その後実施した5ヶ月間循環実験「1994循環実験」では、回収率が約10%となり、生産熱水の温度は地表で160℃を越えた。これにより生産井側からの水圧破碎が効果的であることが確認された。そして、さらなる回収率の向上のため、OGC-2への圧入流量を増大(前年の約2倍)させた水圧破碎を行い、またOGC-1への注入圧力の低減を図るため、OGC-1を27m増掘し、加圧試験を実施した。その後の1ヶ月間の循環試験「1995循環実験」を実施した結果、回収率は約25%となりほぼ目標を達成することができた。

以上により、2段の貯留層を通してOGC-1とOGC-2の間で水の循環を行った結果、当初は注入した水の回収率が極めて低かったが、迎え破碎によるOGC-2周辺の透水性を改善するなどにより、回収率は25%程度まで高めることができ、注入した河川水を165℃の蒸気混じりの熱水として回収できることが実証された。しかし、貯留層内の水の流れが上部に比べ下部が4倍程度多く、流れが不均等であることや、生産井の追加により、実用化に必要とされる4本の生産井で回収率80%以上が確保される見通しを得るため、より高精度の貯留層評価が必要となった。

(4) フェーズ4 (平成8～13年度)

このフェーズでは、貯留層内の熱水の流動状況をより

精度良く評価する技術を開発し、貯留層評価技術の高度化を図ることを目的として、新たな坑井の掘削などにより、これまでの推定結果の検証や、高精度の坑井調査および複数坑井間の透水試験による透水モデルの高精度化を図ることとした。

まず、実験場の地下構造をより詳細に把握するため、実験場を中心としてCSAMT法による測点を平面的に配置し、地下の3次元比抵抗構造を求めた。また、実験場近傍を東西に横切る道路を利用した地震探査反射法や重力探査を実施し、これらの解析断面と比抵抗構造との比較検討から、実験地周辺の地質構造、特に花崗閃緑岩の上面深度分布を3次元的に推定した。これにより、実験場近傍半径500m以内には、地下に圧入した水が流出するような断層などは存在しないと想定された(第5章参照)。これらの結果を用いて、貯留層内外の熱水流動状況を評価する数値シミュレーションコードの開発と、AE震源分布を基にした透水モデルの構築を図った。

そして、これまでの調査に基づく地下構造の評価結果を検証するため、新たな坑井(OGC-3)を掘削した。この坑井は、深さ1,303mで、深さ700mまでケーシングを設置し、そこから坑底までは裸坑仕上げとした。また、裸坑部の坑径は、最新の耐熱検層器が適用できるように216mmとした。この結果、耐熱ポアホールテレビユアなどによる坑壁の鮮明な画像が得られ、光ファイバ温度計測によるOGC-1との導通箇所の特長結果(第7章参照)と併せて、坑井内外の水の流動と割れ目の状況が精度良く把握された。さらに、OGC-3の深さ1,137mには規模の大きな天然の割れ目が認められ⁽⁵⁾、この割れ目より深部にはAE震源がほとんど無いことから、この割れ目により深部への亀裂の伸展が抑制されているものと想定された。

さらに、実験場内の3本の坑井を用いて、それぞれ個別に注水しながら他の2坑井の水位および坑口の締め切り圧力を計測し、各坑井周辺と各坑井間の透水係数の分布を測定し、数値シミュレーションで用いた貯留層内外の透水係数分布の妥当性を確認した(第8章参照)。

以上により、OGC-3掘削前までの地下構造および熱水流動状況の推定結果が検証され、当所で開発した透水モデル構築法の有効性、および数値シミュレーションによる貯留層評価技術の高度化が図れた。これにより、地点探査、貯留層造成、貯留層評価に関する要素技術はほぼ確立したと思われる。

コラム4：雄勝実験場

当所では、高温岩体発電の要素技術の中で最も重要な貯留層造成と評価に関し、まず秋ノ宮地点において凝灰岩を対象として貯留層造成に関する基礎的な実験を行った。この結果、深さ300mの坑井で、深さの異なる3つの貯留層が造成されたことから、本手法の有効性を確認し、本格的な実験を実施することとした。

実験地の選定においては、国や新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）等の調査結果を参考にし、文献調査結果として鳥取県鹿野、秋田県雄勝、北海道熊石の3地域を抽出した。そして、実際に現地を訪問し、地元の受け入れ状況や実験実施に関する必要事項などを調査した結果、最も地温勾配が高く、実験予定地のすぐそばでNEDOの調査による高温岩体の存在が確認されていることなどから雄勝を最終的に選定した。深さ1,000mで岩盤の温度が230にもなる地域は我が国においても珍しく、諸外国の高温岩体発電実験場が岩盤温度200を得るために、深さ4,000m～5,000mもの坑井掘削を必要とすることから考えれば非常に温度条件に恵まれた地点である。しかし、地下浅所で温度が高いため、高温用の検層機器の開発や適用に多額の費用を要したり、高温岩体と見なしている岩盤に自然の割れ目が多く、貯留層の造成や水の循環による熱抽出において自然割れ目の影響が大きく及んでいることが判った。ただし、このような条件は今後我が国において、高温岩体発電開発を行う上では、一般的に見られる状況と思われる。

実験開始当時は、実験場の脇を通る道路も舗装

されておらず、雨が降ると道路が川となり雨水が流れる状況で、四輪駆動の車でも国道から実験場までの4kmの道のりに30分も要した。しかし、現在ではこの道路も舗装が施され、秋ノ宮温泉郷から川原毛地獄、泥湯温泉、上の岱地熱発電所^{うえのたい}を通して小安温泉郷へ抜ける観光道路となっている。雄勝実験場からは、遠く鳥海山が望めるほか、周辺は一部の杉の植林を除けばブナの木原生林で、春や秋は山菜やキノコが豊富で、冬には積雪が3mを越えるなど年間を通して自然の勢いが感じられるところである。また、近くの沢では天然のイワナが捕れるほか、野生のカモシカや狐などが出没し、ある年の晩秋には熊と道路で出会ったこともあった。さらに、マムシも多く、当所の実験場の一角には長年マムシとヤマカガシの一家が住んでいるようである。

したがって、実験の実施においても自然環境の保護には注意を払い、実験場の設備以外の設備等（例えばAE観測点やケーブルの設置箇所）は、一般の方にはほとんど目立たないように工夫したほか、毎年実験の前後で河川水・地下水の分析調査や地震観測を継続して行い、実験による影響がないことを確認している。

また、実験の実施に関しては地元の方の多大なご協力を頂いていることから、実験実施中は見学会を開催し、地元の方はじめ一般の方々にも実験の状況を見学して頂いた。この見学会の様子は地元テレビはじめ新聞などマスコミにも多く取り上げられている。



第 5 章

5

高温岩体探查技術



我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 鈴木 浩一
 我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 楠 建一郎
 我孫子研究所 地圏環境部OB 藤光 康宏

5 - 1 はじめに 39
 5 - 2 地震探査反射法 39
 5 - 3 CSAMT 法 40
 5 - 4 総合評価 42
 コラム5：空中から地下を探る 44



鈴木 浩一（1984年入所）
 雄勝実験場では、物理探査法による実験場周辺の地熱源調査法の開発や、複数の物理探査・検層データを組み合わせて透水性や力学強度など地盤物性値を評価する研究を実施してきた。現在は、この研究成果をベースに、産業廃棄物地層処分場となる埋立て地盤や深部地下空洞周辺岩盤の物理特性分布の調査法を実用化する研究に取り組んでいる。



楠 建一郎（1977年入所）
 HDR研究の中で、各種物理探査法の開発研究を実施してきた。特にCSAMT法は国産初のシステムを開発し、全国で活用されるに至った。現在は、この研究で得た貴重なノウハウを基に、地中送配電建設に関連して、推進工法での掘削位置の測量や既設管路の位置を判定できる電磁波式管路位置測量装置の実用化研究に従事している。



藤光 康宏（1989年入所、1994年退職）
 電中研在職中は、通常の業務では物理探査による地下可視化に関わった。高温岩体発電プロジェクトは雄勝実験場における実験から参加し、貯留層評価、CSAMT法による地下構造探査、光ファイバ温度計による温度検層、コスト試算、流電・自然電位計測に関わった。

5 - 1 はじめに

地表から高温岩体の分布を探查する場合、まず、高温岩体の対象である花崗岩（基盤岩）の分布を探查することが重要である。地下に伏在する花崗岩は、上載する地層（火山岩や堆積岩）に比べ、一般に岩盤の密度、弾性波速度、電気比抵抗が大きい。雄勝地点では、花崗岩

（白亜紀花崗閃緑岩）とそれを覆う新第三紀火山岩類の上記物性値に明瞭な差があると考え、地震探查反射法、重力探查法、CSAMT 法等を適用し、実験場周辺の大局的な基盤構造および断層のおおよその位置を把握した。ここでは地震探查反射法と CSAMT 法について紹介する⁽¹⁾。

5 - 2 地震探查反射法

(1) 探查原理

地震探查反射法とは地層の境界から反射してくる弾性波を用いるもので、人工地震の波形記録を電子計算機により情報処理し、反射波のみを強調した画像を描きだし、地下の構造を判断するものである。断層調査では特に基盤上面の落差（変位）の有無の推定に有効である。

(2) 方法

実験場の位置する林道沿いに測線を約 3.5km 設置し、発振点 20 m、受振点 10 m 間隔で測定を行った。震源には起震車（パイプロサイズ）2 台を使用した。

(3) 結果

図 5-2-1 にマイグレーション処理（反射面を空間的に正しい位置に戻す処理）および深度変換（速度分布から反射面を正確な深度に変換する処理）を行った解析断面を示す。これより、比較的連続性の良い反射面は実験場周辺では標高 300 ~ 400 m 付近（反射面：B）に見られる。また、OGC-0（計測井）より西側の区間には標高 -200 ~ -300 m（反射面：A）に認められる。さらに、その上部には標高 300m 付近に反射面 C が認められる。図 5-2-2 に反射法結果より推定した地質断面図を示す。図中の太い実線は比較的連続性の良い反射面、点線は連続性は良くないがその延長と推定される反射面を示す。ま

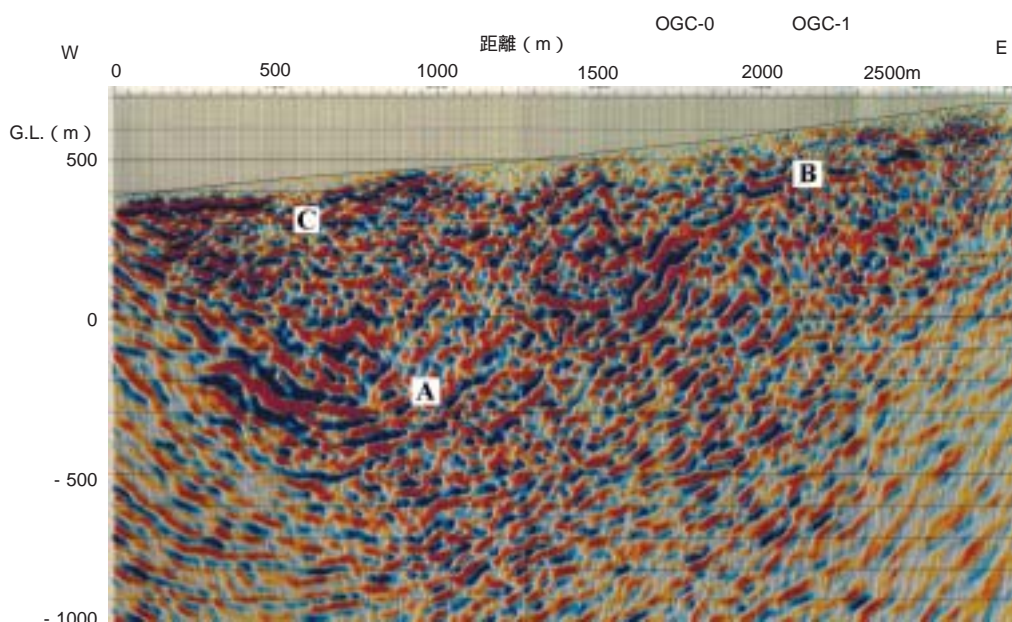


図5-2-1 地震探查反射法解析結果（マイグレーション・深度変換処理後）

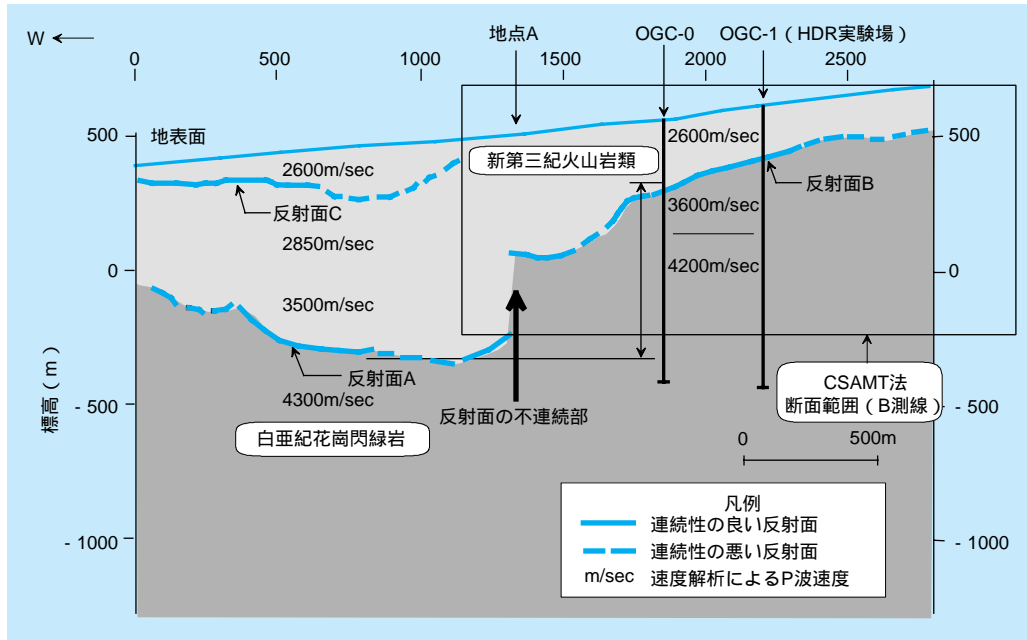


図5-2-2 地震探査反射法より推定される地質構造

た、速度解析(地層の区間速度を求める処理)による弾性波(P波)速度値を表示した。

(4) 考 察

OGC-1およびその西側約300mにあるOGC-0で確認された白亜紀花崗閃緑岩の上面は標高約300m(深度300m)であることが確認されている。一方、OGC-0よりさらに約2km西側にある坑井では標高約-1200m(深度1500m)まで掘削されたが、花崗閃緑岩は確認されていない⁽²⁾。

図5-2-1に見られた比較的連続性の良い反射面(A、B)は、白亜紀花崗閃緑岩(基盤岩)とそれを覆う新第三紀火山岩類との地質境界をとらえたものと推定できる。実

験場より西側約500mまではこの境界面は標高400mから300mと徐々に深くなり、実験場より西側約800mの位置(地点A)では標高100mとなる。この地点Aを境にさらに西側の基盤岩深度は最深部で標高-300mとなっている。地点Aにおいて反射面は不連続でその段差は約400mあり断層が存在している可能性が高い。さらに、反射面Cは第四紀火山岩類と新第三紀火山岩類との境界をとらえたものと推定される。

(5) ま と め

地震探査反射法より新第三紀火山岩類と白亜紀花崗閃緑岩類との地質境界を反射面としてとらえることができ、実験場の西側に断層の存在および基盤岩の落差が推定できた。

5 - 3 CSAMT 法

(1) 探 査 原 理

CSAMT法(Controlled Source Audio frequency Magneto-telluric Method)はMT法(地磁気地電流法)の一種で、人工の電磁波(1Hz~数kHz)により地下に誘導された地電流および地磁気を観測して比抵抗分布を調べる方法で、比抵抗値を介して地下構造を判別するも

のである。比抵抗値の異なる岩石の境界、基盤面の深度、形状などの探査に有効である。

Archie(1942)⁽³⁾は岩石の比抵抗と岩盤物性値との関係を以下の実験式で示している。

$$R = \alpha^{-m} S^{-n} W \quad (1a)$$

$$F = R / W = \alpha^{-m} \quad (1b)$$

ここに、 R は岩石の比抵抗、 W は地下水の比抵抗、 S は間隙率、 α 、 m 、 n は岩種による定数、 F は地層比抵抗係数である。

岩石の比抵抗は間隙率と飽和度が大きいほど低下する。また、地下水の比抵抗が低いほど低下する。地下水面以下の水に飽和した岩盤においては地層比抵抗係数が大きいほど比抵抗は大きくなる。火山岩や若い年代の堆積岩は間隙率が大きく比抵抗は小さいが、火成岩や古い年代の堆積岩などは間隙率が小さく比抵抗が大きくなる傾向を示す。また、堆積岩でも礫質分が多いほど高比抵抗になり、粘土分が多いほど低比抵抗となる⁽⁴⁾。

岩石比抵抗の温度依存性については以下の実験式が提案されている⁽⁵⁾。

$$T + 273 = \frac{C}{\log(R_{20}/R)} - B \quad (2)$$

ここに、 T は地下水温度(°C)、 R_{20} は20°Cにおける比抵抗、 B 、 C は岩種による定数(水は $B = -2.16$ 、 $C = 608$ 、安山岩では $B = -3.08$ 、 $C = 870$)である。

ちなみに、比抵抗が100 Ωmの安山岩が20°Cから120°C、220°Cに上昇した環境下では、比抵抗はそれぞれ13.5 Ωm、4.8 Ωmに低下する。すなわち、地温が200°Cを超える地熱地帯での岩盤の比抵抗は20°Cの環境より1/20以下まで低下する。一般的に地熱地帯において岩盤の比抵抗が極めて低く観測される要因として、①

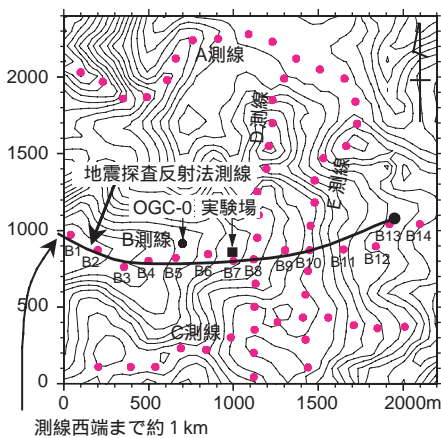
地温が高い、②熱水貯留層となる岩盤の間隙率が大きい、③地下水比抵抗が低いことが考えられる。

(2) 方法

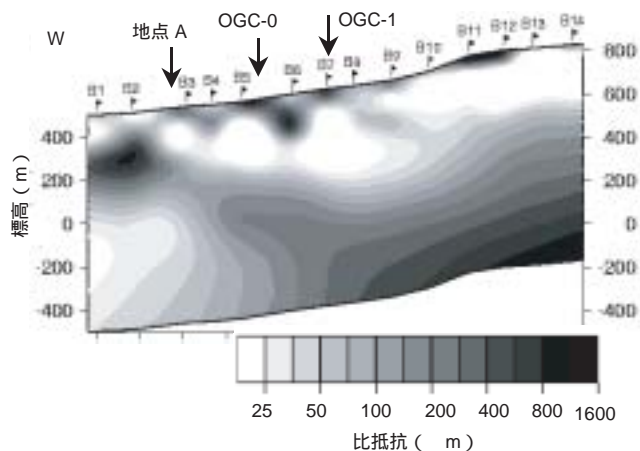
測点は実験場を中心とした2km × 2kmの範囲に約150m間隔で63点を東西方向に3測線、南北方向に2測線配置した(図5-3-1(a))。電流送信源は調査地域より南方約7kmの道沿いに東西方向に2km設置した。送信周波数は8700Hz ~ 2.1Hz間の13周波数である。受信には当所で開発した測定装置⁽⁶⁾を使用した。また、各5測線において2次元解析⁽⁷⁾を行い比抵抗の深度断面図を求めた。

(3) 結果

図5-3-1(b)に地震探査反射法の測線と一部重なる東西方向のB測線での解析断面を示す。大局的な傾向として測点B3より東側では、地表より深度100m前後までが高比抵抗層、その下部の深度300 ~ 400mまでは低比抵抗層、さらにその下に高比抵抗層が広がっている。一方、測点B1、B2では深度200 ~ 300mを中心に高比抵抗部が認められ、その下部は低比抵抗部となっている。よって、測点B3付近に比抵抗構造の境界が認められる。図5-3-2に各測線の2次元解析による比抵抗断面から3次元比抵抗構造を内挿し、標高100mごとに表示した比抵抗水平断面図を示す(実験場の標高は約600m)。標高500 ~ 300mの比抵抗水平断面は高比抵抗と低比抵抗が複雑に分布しているが、標高200m ~ 0mの水平断面図においては探査領域の南西側は低比抵抗部、北東側は高



(a) 測点位置図



(b) 比抵抗断面図(B測線)

図5-3-1 CSAMT法の測点位置図および比抵抗断面図

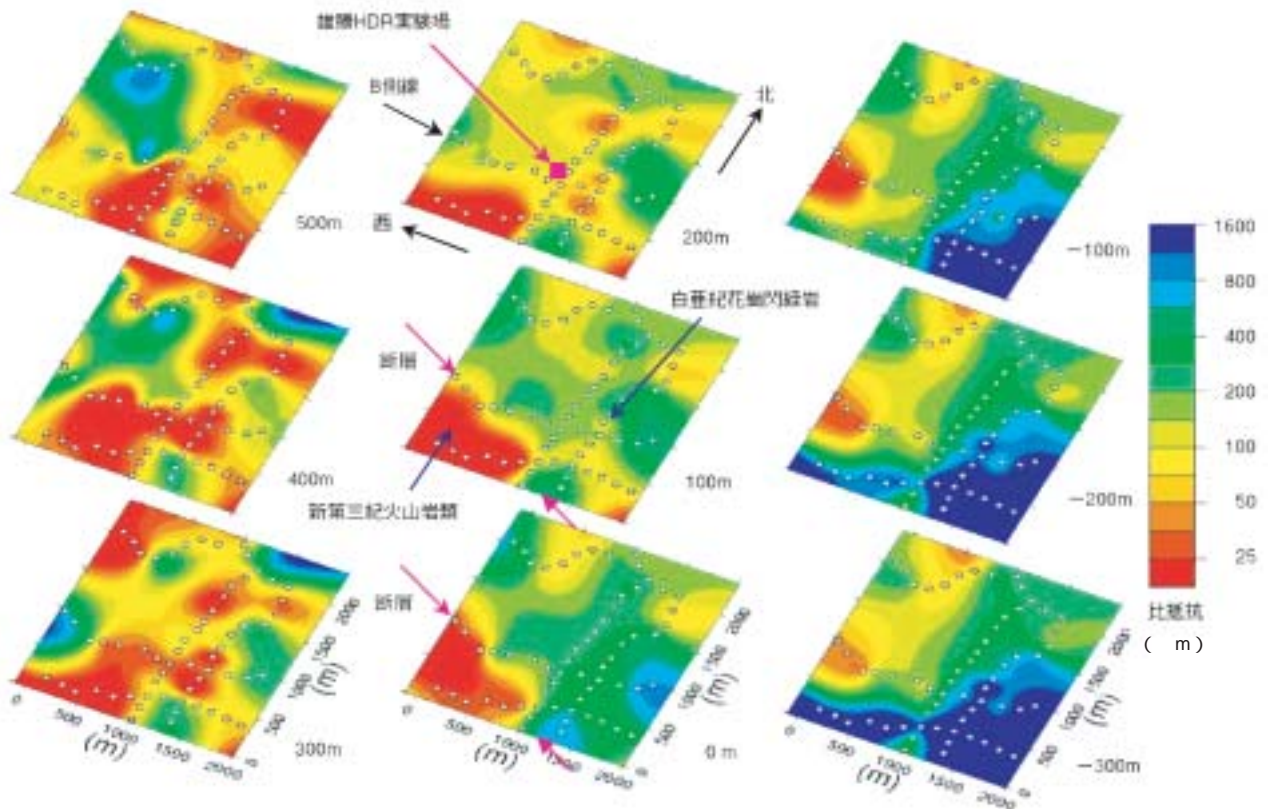


図5-3-2 CSAMT法による雄勝地点の比抵抗構造
比抵抗水平断面（標高 - 300 ~ 500m）

比抵抗部となっている。

(4) 考 察

B測線での比抵抗断面を反射断面（図5-2-1）と比較すると、反射面Bの上下に低比抵抗層（10 ~ 100 m）と高比抵抗層（100 ~ 1,000 m）が位置しており、それぞれ新第三紀火山岩類、白亜紀花崗閃緑岩に対応するものと考えられる。さらに地表下100 m前後までに見られる高比抵抗層は第四紀火山岩類に相当するものと推定され、西側の方が深くなる傾向が見られる。

測点B3より西側では花崗閃緑岩と推定される高比抵抗層は急激に深くなっており地震探査反射法結果で認め

られた反射面の不連続部（地点A）とほぼ調和的である。また、標高200m ~ 0mの比抵抗水平断面（図5-3-2）より、実験場南西方向の約500m先には新第三紀火山岩類に相当すると考えられる低比抵抗部が標高0m付近まで分布しており、花崗閃緑岩に対応する高比抵抗層との境界が北西-南東方向に存在するように見える。測点B3付近を通ると推定された断層は北西-南東方向に伸びている可能性が考えられる。

標高500 ~ 300mの比抵抗水平断面において、高比抵抗部は第四紀火山岩類が厚く堆積している領域を示していると推定される。

5 - 4 総 合 評 価

CSAMT法結果（図5-3-1(b)、図5-3-2）より新第三紀火山岩類は10 ~ 100 m、白亜紀花崗閃緑岩（基盤岩）は100 ~ 1,000 mの範囲を示すものと考えられる。ま

た、OGC-1での電気検層結果でも両地層の境界深度で比抵抗値に明瞭な差が認められる⁽⁸⁾。両地層を区分する比抵抗値の境界を100 mと仮定して、比抵抗水平断面結

果に地震探査反射法結果を加味して推定した実験場周辺の基盤岩の深度分布を図5-4-1に示す。実験場の南西側

に基盤面深度が落ち込んでいる構造が認められ、北西-南東方向の断層が存在する可能性を示している。

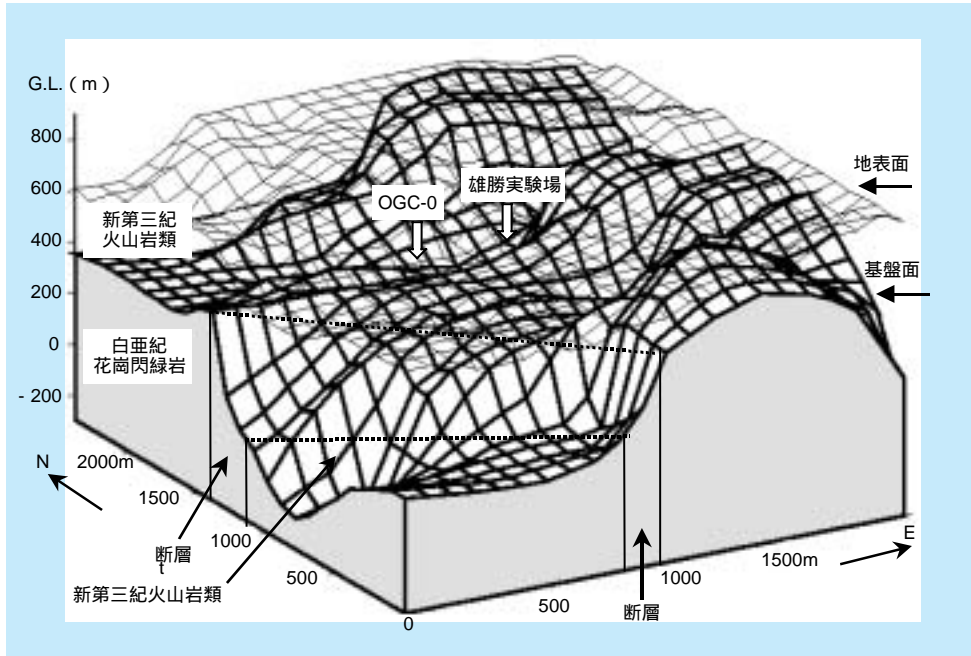


図5-4-1 CSAMT法および地震探査反射法より推定される雄勝地点の地下構造（鳥瞰図）

コラム5：空中から地下を探る

当所では第5章で述べた地表から地下深部の構造を把握するための各種物理探査法の研究を高温岩体発電等のテーマの中で進めてきた。当所による開発研究の成果は、地熱・高温岩体地域のみならず、電力各社の水力、原子力地点などでの地質調査法の一環として定着しており、電力以外の土木建設予定現場でも利用されつつある。

一方、物理探査法による適用性が認識されるに従って、利用者側からの物理探査法に対する期待も大きくなってきており、より広範囲をより迅速にしかもより安くといった要求が出てきている。また地表での物理探査法に関しては2次元探査法が一般的になっており、最近では3次元探査の研究が盛んに実施されている。その際にも、3次元のための測定データをいかに効率良く取得するかが大きな課題となっており、この点においても空中探査に期待が掛けられている。ここでは、以下に現状での空中探査についての概要を述べる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

空中探査の種類

(1) リモートセンシング

地球表面における、電磁波の反射、散乱、幅射などの物理現象を利用する探査法で光とマイクロ波を用いる方法がある。適用限界は、地表面に限られることや、光を用いる方法では雲、雪などの気象条件に左右されること、地上調査（周辺の環境、気象データ等）との対照が必要となることなどがある。利用範囲は、土地利用分類・地質構造等の調査、環境・自然現象のモニタリングなどがある。適用分野は地熱を対象とした場合には地表面の熱分布の把握である。その他の適用分野には地球物理、環境（地質構造、植生）、防災（地すべり、地震）などがある。

(2) 空中放射能探査

ウラン鉱床の探査では広い地域を対象とする初期の段階において使われ、対象地域の上空を一定間隔の測線に沿って飛行し地表からの放射線（ガンマ線）を測定する。

測定値は対地高度の変動等を補正し、ウラン/トリウム比、ウラン/カリウム比などの分布図として表示される。適用限界は、被覆層の厚さに影響されること、地上用に比べて大きな放射線計測カウンタを必要とすること、標準線源による補正を頻繁に行う必要があること等がある。適用分野として地熱、活断層調査などがある。

(3) 空中磁気探査

地球磁場を測定する磁力計には、ベクトル量である磁場の三成分（東西、南北、上下）を測定するフラックスゲート磁力計や磁場の強さのみを測定するプロトン磁力計などがある。このうち、プロトン磁力計はセンサーが多少の姿勢変動を被っても安定して測定が可能のためよく用いられている。

一般に地上での磁場測定では地表付近の人工構造物などによる影響を強くうけるため、航空機などを用いた空中測定が有利である。また、航空機を用いることから広範囲の迅速な調査が可能となるため、資源探査においては概査の手段としてよく用いられる。地熱、火山地域では広域における溶岩の分布を把握することに利用される。また、岩石のもつ磁性がなくなる深度（キュリー等温面深度といい、地温が約500～600の深度）の探査から地下深部の温度分布を調べる試みもなされている。

(4) 空中電磁探査

空中電磁法は航空機に電磁探査装置を搭載して探査を行う方法の総称である。

これまでカナダやオーストラリアなどの国々で、主に金属鉱床や石油・天然ガスなどの資源調査開発のために行われてきた。しかしながら、国外で実用化されているいずれの探査も、地下への探査可能深度（可探深度）は浅く、深部の地質構造は地表の探査結果から推定しているのが実情である。

特に、詳細なデータを取得することが可能なヘリコプターを用いた空中電磁法は、地下の可探深度が50～100m程度と浅く、最も深いところまで探査できる大型の飛行機を用いたシステムでも、可探深度が地下200m程度である。この大型航空機による空中探査は、国内では地形の起伏が激しく、また、電波法や航空法などさまざまな法律の制約から、探査実施は不可能である。

当所では、可探深度が地下300mから1kmを目標とするヘリコプターを用いた画期的な空中電磁法を考案した（図-1、写真1、2参照）⁽⁵⁾。この方法は、地表に電磁波の発信源を設置する空中電磁探査システムであり、これまで北海道大学、京都大学、九州大学等の協力を得て、阿蘇火山山麓において基礎実験をおこない、原理的な開発可能性を確認している。本方法が実用化された場合の、主な利用分野として、地熱探査、特にオーストラリア大陸のような広大な地域における高温岩体の探査の他、火山調査、地滑り、土木関係の岩盤調査等が期待できる。

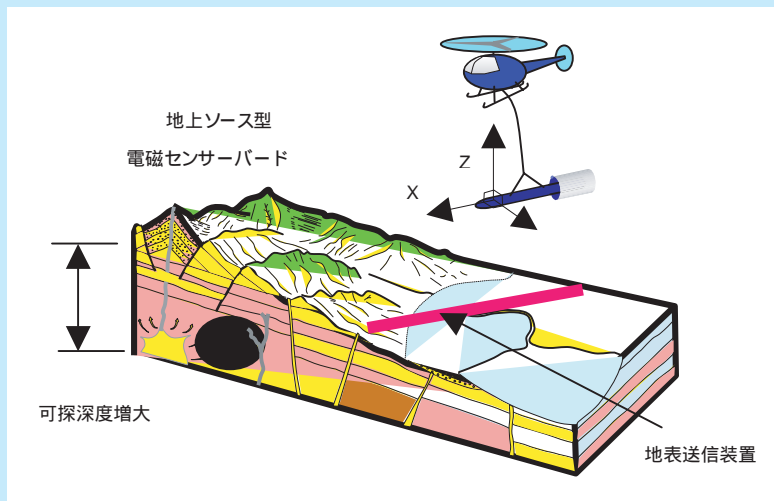


図 1 空中電磁法概念図



写真 1 空中電磁法実験風景



写真 2 空中電磁法センサーボード

第

章

6

貯留層造成技術



第6章 貯留層造成技術 目次

我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 海江田秀志
我孫子研究所 高レベル廃棄物処分研究プロジェクト 兼 地圏環境部 上席研究員 木方 建造
我孫子研究所OB 堀 義直
我孫子研究所 地圏環境部OB 本島 勲

6 - 1 概 要 49
6 - 2 電中研式多段貯留層造成法 49
6 - 3 適 用 例 50
6 - 4 今後の課題 51

海江田秀志（8ページに掲載）

木方 建造（26ページに掲載）

堀 義直（18ページに掲載）

本島 勲（32ページに掲載）

6 - 1 概 要

貯留層は注入井を利用して、水圧破碎により岩盤内に亀裂を伸展させ、この亀裂が循環する水の通路および岩盤からの熱を抽出するための熱交換面となる。注入井の坑径は水圧破碎および循環時における坑井内の水の流動抵抗などを考慮して、8インチ半(215mm)程度が望ましい。

第2章でも述べたように、これまでの国内外での実績に基づくと、裸坑パッカーが利用できれば効率的に貯留層を造成することが可能であるが、裸坑パッカーの適用

は材質の耐熱の問題など現状では課題が多く、高温岩体および地熱開発での適用は難しい。そこで、注入井の坑底近くまでケーシングを設置して、セメントで固定した後、ケーシング末端と坑底との間の裸坑部を破碎箇所として全坑加圧方式による水圧破碎を行うのが、簡単で確実な方法と思われる。この水圧破碎のみでも大規模な貯留層の造成は可能であるが、貯留層の領域を大きくし、熱抽出領域を大きく取るには、異なる深度での多段貯留層造成が必要である。

6 - 2 電中研式(CRSP方式)多段貯留層造成法

当所では、一つの坑井から深さを換えて多段に貯留層を造成する多段水圧破碎法(Casing Reamer and Sand Plug Method, CRSP法)を開発した⁽¹⁾⁽²⁾(特許第1909350号)。

この方法による貯留層の造成は図6-2-1に示すように、①注入井に坑底までケーシングパイプ(鉄管)を挿入し、坑壁とケーシングの間はセメントで固める。その後、さらに坑底部を掘り下げ、この部分は裸坑状態で仕上げる。そして、坑井全体に水圧をかける、つまり水を圧入し、坑井内の水圧を高めると、坑井内のケーシングがセメントで固定された部分では、水圧は直接岩盤には作用せず、坑底の裸坑部のみで水圧が岩盤に直接作用することになる。水圧が岩盤の強度を超えると岩盤内に亀裂が発生し、水圧により岩盤内に伸展する。これらの岩盤内の亀裂が水の通路となり、貯留層を造成する。これが1段目の貯留層の造成である。②次に、注入井の任意の深度で所定区間ケーシングパイプを切り取り(これをリーミング、もしくはミリング

という)、岩盤を露出させ新たな裸坑区間を作成する。この裸坑区間より深部の坑井内には、砂を降下させ、坑底部の亀裂(貯留層)への水の流出を妨ぐ。③そして、再び坑井内に水を圧入し、坑井内の水圧を高めると、新たな裸坑部分のみで水圧が岩盤に直接作用し、この部分から岩盤内に亀裂が伸展することになる。これにより2段目の貯留層が造成される。同様な操作を繰り返すことにより、下から順番に深さを換えて何段もの貯留層を造成することができる。④多段貯留層の造成後、注入井内に掘り管を降下させ、掘り管とケーシングパイプの間で水を循環させながら、掘り管を降下させると、注入井内に設置した砂は循環する水と共に地表に回収される。そして、貯留層の伸展方向や広がりなどを評価し(第8章参照)貯留層を貫くように生産井を掘削する。

以上により、多段貯留層が造成され、造成された貯留層全てに水が流れるようになる。

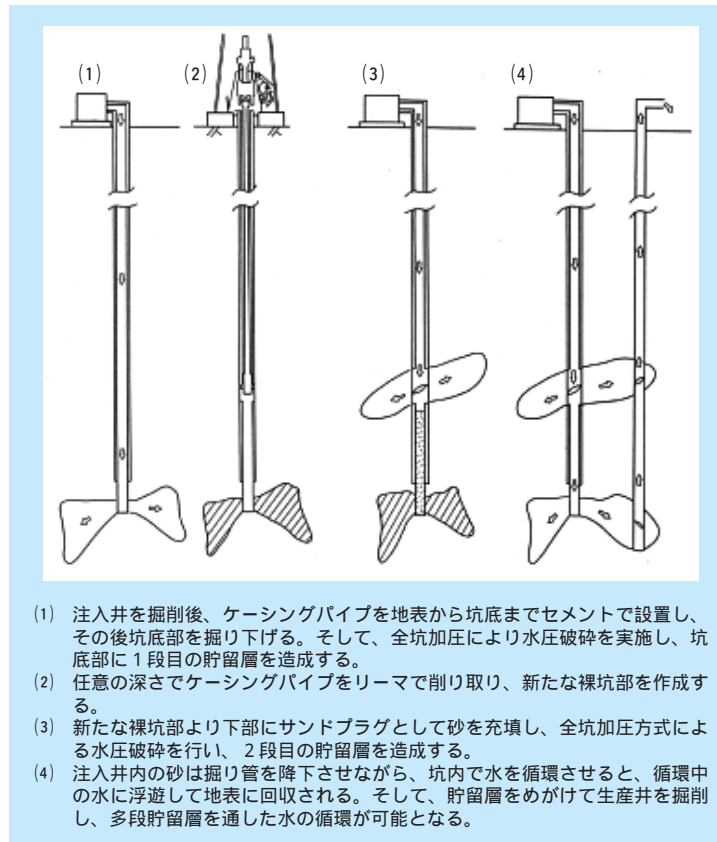


図6-2-1 電中研式（ケーシングリーマ・サンドプラグ方式）多段貯留層造成法の概念

6 - 3 適 用 例

当所では、この方法による貯留層造成を現地実験に適用し、その実用性を確認した。まず、凝灰岩中に掘削した深さ400mの坑井を掘削し（坑底温度約60℃）、この坑井の異なる3箇所からCRSP方式による貯留層の造成を行った。その結果、坑壁に新たな亀裂の発生が確認されるなど、貯留層としての亀裂が岩盤内に伸展すること

が確認された⁽³⁾。

その後、雄勝地点において深さ1,000m（坑底の岩盤温度約230℃）の坑井を掘削し、坑底部と深さ711m～719mの8m区間について、この順で水圧破碎を適用し、いずれも半径400m以上の広がりを持つ大規模な貯留層を造成したことを確認した⁽²⁾。

6 - 4 今後の課題

CRSP方式により深さを換えて何段も貯留層を造成することが可能なことが確認された。しかし、この方法の適用のためには、坑井の仕上げおよび貯留層造成後の砂の回収など坑井内での作業が多い。また、坑井の一部を部分的に拡大させるため、坑内検層などにおいて、坑壁が拡大した部分に検層器がトラップされ、検層器の昇降の際にトラブルを伴う場合がある。さらに、一つの坑井

にいくつもの貯留層がある場合、貯留層から坑井への水の流れが必ずしも一様とはならず、流れの不均一が生じ、流動抵抗の少ない部分のみの水の流れが加速され、岩盤からの効率的熱抽出に望ましくない場合が生じる。そのため、今後このような多段貯留層における水の流れの均一化を図る手段について新たな技術開発が望まれる。

第 7 章

檢層技術



第7章 検層技術 目次

我孫子研究所 地圏環境部 主任研究員 未永 弘
我孫子研究所 地圏環境部 主任研究員 伊藤 久敏

7 - 1 水みちを温度変化で探る	55
7 - 2 水みちを見る	57



未永 弘 (1996年入所)

貯留層内の透水性に関する調査・試験、および地下水流動解析を担当した。透水性に関する試験では、坑井および坑井間の透水性を評価するための注水試験、および地下水の通り道である水みちを検出するため光ファイバによる温度測定などを行った。現在はエネルギー地下貯蔵、CO₂地下貯留、高レベル放射性廃棄物処分等に伴う地下水流動評価に関する研究に取り組んでいる。

伊藤 久敏 (8ページに掲載)

7-1 水みちを温度変化で探る

7-1-1 はじめに

貯留層を造成したのち、そこにどの位の量の水を送ることができ、また回収することができるかを調べるためには、どの深度に何箇所水の通り道(水みち)があるかを把握することが重要である。ここでは、坑井内の温度変化を探ることから水みちを検知する技術と、その適用方法について紹介する。

7-1-2 光ファイバによる温度測定

光ファイバによる温度測定原理について、以下に述べる。光ファイバの一端からレーザー光をパルス状に入射すると、光ファイバの各通過位置で散乱光が生じる(図7-1-1)。この散乱光にはRaman散乱光と呼ばれるものがあり、Raman散乱光は、Stokes光とAnti-Stokes光に

よって構成され、両者の強度比は、絶対温度のみに依存する。したがって、ある位置において、レーザー光の入射方向に対して逆方向に散乱したRaman後方散乱光の強度を入射位置にて測定すると、光ファイバ中の光速度からこの位置までの距離が算出されるため、温度・深度の情報が得られ、ボーリング孔内の連続的な温度分布が描かれる。

水みちを検知するためには、坑井内に光ファイバを挿入し、注水により坑井内を一旦冷却して、その後の温度回復を測定する。すると、水みちにおいては熱水が流れ込んでいるために、他よりも回復が早いことから、温度プロファイルで特異点となり、水みちの検知が可能となる(図7-1-2)。

7-1-3 水みち検知結果

OGC-3井(新坑井)の孔内を地表水により冷却した後、

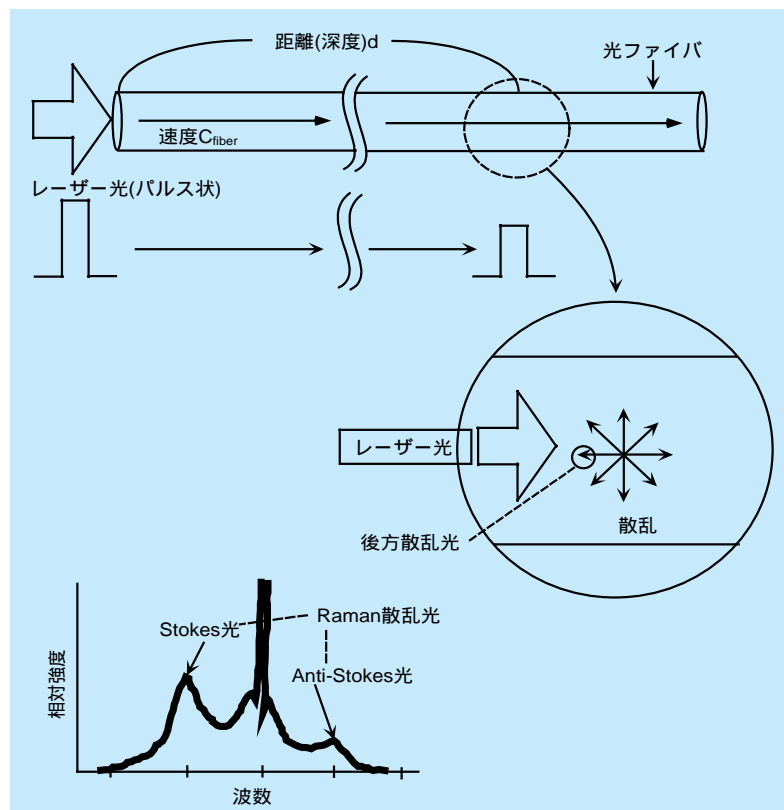


図7-1-1 光ファイバによる温度測定原理

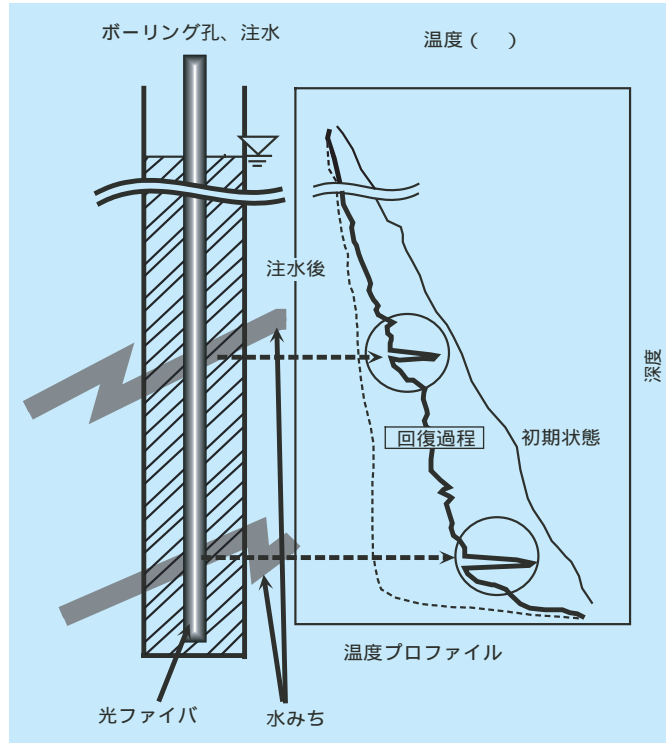


図7-1-2 光ファイバ温度測定による水みち検知原理

OGC-1井（注入井）より注水し、OGC-3井における温度回復をモニタリングした（図7-1-3）。OGC-3井の孔内冷却およびOGC-1井への注水をそれぞれ2回ずつ行った結果、得られた温度プロファイルにおいて、他より

も温度回復の早い深度と遅い深度が互いに一致していることが明らかとなり、これらは水が流動している水みち箇所と推定される。

顕著な水みちのうち、OGC-1井からの注水で早く温度

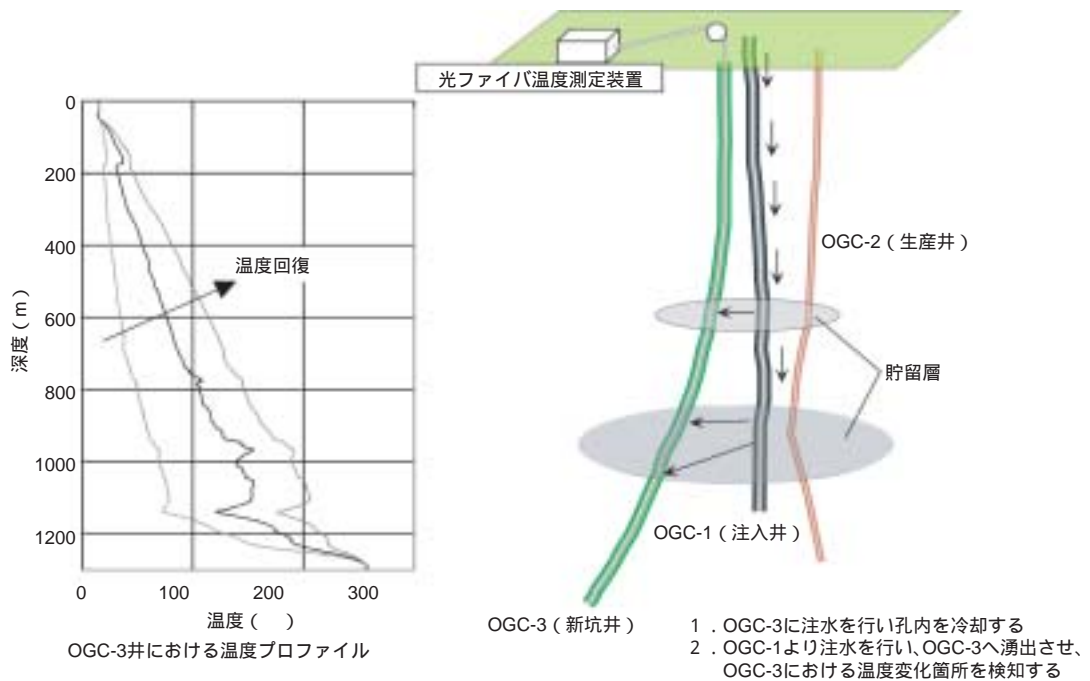


図7-1-3 水みち検知結果

回復するものは、OGC-1井とOGC-3井間の導通箇所と考えられ、回復が遅い深度1137m付近は大きな透水性自然割れ目が存在し、この深度では地下水が流動すると考えられる。導通箇所の深度と導通の程度を正確に特定するため、OGC-3井の温度勾配を直線近似し、各温度デ

ータに対するこの直線からの温度差分を計算した。この結果、温度差分の大きさから、水みちとして推定した深度945m、965m付近が最も可能性の高い導通箇所、深度770m、780m付近が次に可能性の高い導通箇所と判断される⁽¹⁾。

7-2 水みちを見る

7-2-1 はじめに

光ファイバーを用いて温度変化箇所を検知することで水みち箇所の特定ができたが、この方法では、水を流しているものの実体がわからない。おそらく大きな割れ目があることが想像されるが、どのような割れ目がどの方向に伸びているかといった具体的な情報を得ることで貯留層構造がより明確になる。そこで坑井壁面を画像化する検層を適用した。

7-2-2 坑壁画像化装置

坑井壁面を画像化する装置は主に光学カメラを使うもの、超音波を使うもの、比抵抗を画像化するもの、の3種類がある。このうち、光学カメラを使うものは、土木分野ではよく用いられているが、耐熱性の問題とボーリング坑内に溜まっている水が濁っていると坑壁が見えないことから、地熱井ではごく限られた条件でしか使えない。後の二つは地熱井で近年良く用いられている方法であり、雄勝地点でもこれらを適用した。それらの仕様を表7-2-1に示す。

FMI (Formation MicroImager) 検層は、坑井壁面の微小な比抵抗の変化を壁面に当てた多数の電極から読み取り画像化するものである。UBI (Ultrasonic Borehole Imager) とBHTV (BoreHole TeleViewer) はともに坑壁に超音波を当てて得られる反射波の強度と時間のそれぞれについて画像化したもので、前者で岩盤の硬さの程度が、後者で割れ目の開口性が評価できる⁽²⁾。FMIとUBIは大口径の坑井にのみ適用可能であり、OGC-3井に適用した。OGC-1、OGC-2井にはより小口径の坑井に適

用可能なBHTVを適用した⁽³⁾。

7-2-3 適用結果

光ファイバーによる温度測定で検知した温度変化箇所周辺の坑壁画像を詳細に観察した結果、それぞれに水みちの可能性の高い開口性の割れ目が存在したことから、これらを水みち割れ目と判断した。図7-2-1には検知された温度変化箇所のうち深度949m付近と969m付近の割れ目を示した。得られる画像は坑壁の展開画像であり、割れ目はサインカーブとして示される。深度949m付近に矢印で示した水みち割れ目はUBI反射時間の画像から開口幅が5cm程度であることが読み取れ、また、サインカーブ状の割れ目の底部(凹部)での方位が西を示すことから、南北走向で西に傾斜した割れ目であることが読み取れる。また、画像のスケールの縦横比が1:1であることから、この割れ目の傾斜角は概ね30°であることも読み取れる。

次に、坑壁画像化検層により得られた雄勝実験場3坑井の深度毎の割れ目方位分布を図7-2-2に示す。この図は割れ目の方位をステレオ投影図(下半球投影)に示したもので、コンターの密な箇所に割れ目が多いことを示す。例えば、図中のAで示した箇所に割れ目が集中しているが、この箇所は北東-南西走向で約60°南東側に傾斜した割れ目が多いことを示している。雄勝実験場で造成した貯留層は上部で東に、下部で北北東に伸展したが、下部に相当する深度900m以深では北北東-南南西走向の割れ目が多い(特に図中のB)。このことから、特に下部では天然の割れ目方向に人工亀裂が伸展し、この方向に圧入した水が流れたと推定した⁽²⁾⁽³⁾。

表7-2-1 ボーリング坑壁の画像化検層器仕様比較

装置名	FMI (Schlumberger社)	UBI (Schlumberger社)	BHTV (DMT社)
測定項目	比抵抗	反射波強度・反射時間	反射波強度・反射時間
検層器長さ	8.0m	6.3m	4.0m
重量	211kg	155kg	70kg
外径	127mm	118mm	60mm
耐圧	1426kgf/cm ²	1426kgf/cm ²	1440kgf/cm ²
耐熱	175	175	120
解像度	5mm	5mm	5mm

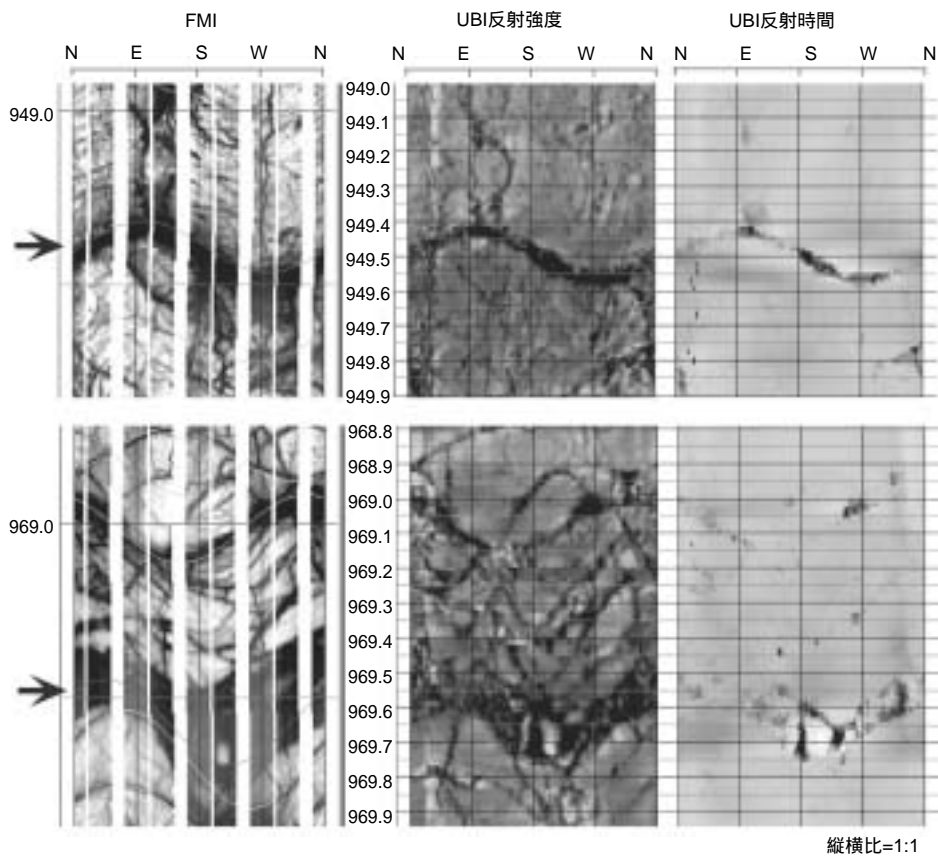


図7-2-1 水みち候補の割れ目 (上: 深度949m付近、下: 深度969m付近)

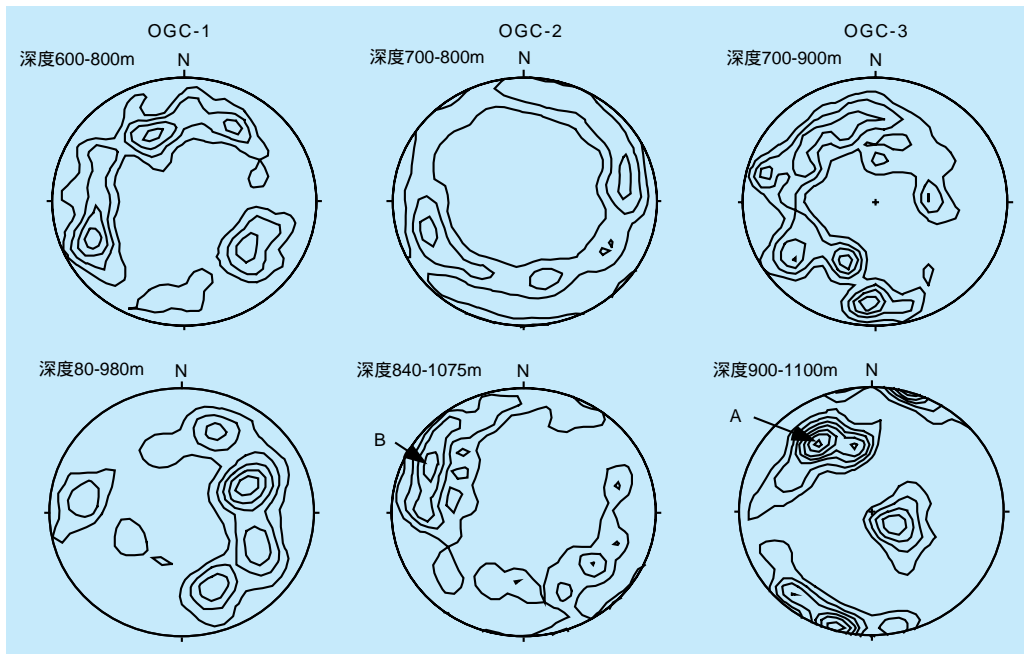


図7-2-2 坑壁画像化検層により抽出された割れ目の深度別方位分布

第

章

8

貯留層評価技術



我孫子研究所	高レベル廃棄物処分研究プロジェクト 兼	地圏環境部	上席研究員	木方 建造
我孫子研究所		地圏環境部	上席研究員	海江田秀志
我孫子研究所		流体科学部	上席研究員	江口 謙
我孫子研究所	高レベル廃棄物処分研究プロジェクト 兼	材料構造部	主任研究員	山本 武志
我孫子研究所		地圏環境部	主任研究員	伊藤 久敏
我孫子研究所		地盤耐震部	上席研究員	佐々木俊二
我孫子研究所		地圏環境部	主任研究員	末永 弘
我孫子研究所		地圏環境部	上席研究員	鈴木 浩一
我孫子研究所		地圏環境部	上席研究員	新 孝一
我孫子研究所		地圏環境部OB		本島 勲

8 - 1	地化学調査	62
8 - 2	トレーサテスト	67
8 - 3	地圧測定	72
8 - 4	透水性評価	74
8 - 5	シミュレーション	77
8 - 6	AE計測	78
8 - 7	流電・自然電位計測	80

木方 建造 (26 ページに掲載)

海江田秀志 (8 ページに掲載)



江口 謙 (1987 年入所)

これまで高速増殖炉の熱流動現象の評価、空気抵抗が小さい新型送電線の研究、熱流動解析コードの開発などに携わってきた。HDR 関係では主に貯留層内の地下水流動解析を担当した。現在は、これまで開発してきた熱流動解析コードを一般の乱流問題に汎用的に適用できるように高度化するとともに、洋上風力発電装置の考案などにも着手している。

伊藤 久敏 (8 ページに掲載)

佐々木俊二 (26 ページに掲載)

末永 弘 (54 ページに掲載)



山本 武志 (1993 年入所)

HDR の研究では坑内温度分布、注入水および回収水の流量温度等各種データの取得を行ない、それらを基に貯留層モデルの構築および熱水回収シミュレーションを行なった。その後フライアッシュ(石炭灰)とセメントおよび骨材との間で生じる各種反応の評価、そして地下環境下で長期間使用するコンクリートの耐久性評価の研究に従事している。

鈴木 浩一 (38 ページに掲載)

本島 勲 (32 ページに掲載)



新 孝一 (1983 年入所)

岩盤の破壊の力学や岩盤物性の計測と評価手法の研究に従事してきた。また、従来型の地下利用である揚水発電所調査設計や、将来技術である HDR 開発などにおける岩盤の評価に携わる。特に、岩盤応力の評価をその手法の開発とともにやってきた。現在では高レベル放射性廃棄物の地下処分に関する岩盤の長期の特性の解明などに取り組んでいる。

8 - 1 地化学調査

8-1-1 目的

水圧破碎や循環時に注入水や戻り水、生産水を採取、分析する地化学調査により、貯留層内での流体の挙動を評価すると共に、貯留層の規模評価を行うことにより、造成された貯留層の特性を地化学的な観点から評価する。

8-1-2 方法・原理

水圧破碎および抽熱・循環実験に際して地下に注入された水は、大きくは以下の二つの過程を経ることにより化学的に変化し、戻り水や生産水として地上に湧出すると想定できる（図8-1-1）。

【地層水や間隙水との混合】：高温岩体の貯留層の母岩は、比較的割れ目のない塊状な岩盤であるものの、割れ目や岩石の空隙の中には、地下水がマグマからの供給や高温高圧下での岩石との反応により化学的には高濃度になって、熱水（地層水や間隙水など）として地下に賦存する。一方、実験に用いる注入水は、河川水であることが一般的であり、化学的には低濃度である。化学的に低濃度である注入水は、地下貯留層内において高濃度の熱水と混合することにより、化学成分濃度が一般的には上昇し、地表に湧出する。

【水 - 岩石反応】：地下に注入された水は、高温の岩盤と接触することにより熱を抽出する。この岩盤との接触面、すなわち割れ目は母岩を構成する造岩鉱物や、

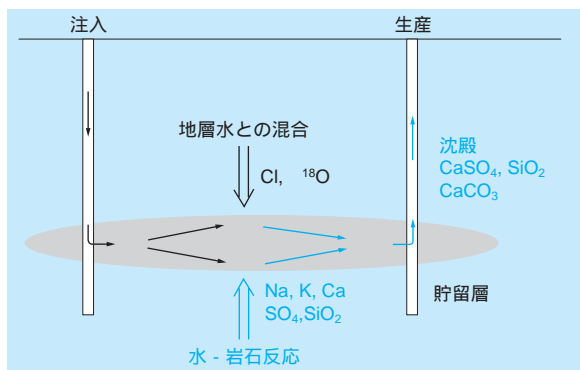


図8-1-1 地下貯留層内での流体の挙動モデル

割れ目に充填された熱水鉱物等から構成される。注入された水は、地下の高温、高圧条件において水 - 岩石反応により、主として岩石から各種の化学成分が注入水に溶出し、その結果として化学的に高濃度になる。

地下に圧入された注入水は、主として上述の二つの過程を経て、さらに条件によっては、地表に湧出する際に温度、圧力の低下に伴うスケール⁵の沈殿という過程を経て地表に湧出する。この様に、地表に湧出した流体は地下での種々の過程に関する情報を含んでいる。

以上のような観点から1991年、1992年の水圧破碎試験、1993、1994、1995年の循環試験時に地下貯留層内での流体の挙動を理解し、貯留層の規模評価のためのデータを取得する目的で流体の採取、分析による地化学調査を実施した。また、スケール対策の一環としてスケールモニタリングを1994、1995年に実施した。

8-1-3 水圧破碎時の地化学調査

1991、1992年にそれぞれ注入井の深度約1000mおよび700mで水圧破碎により人工貯留層が造成された。水圧破碎時の注入水および破碎後の戻り水を採取、分析することにより、貯留層内での水圧破碎時の流体の挙動を以下のように推定した⁽¹⁾。

(1) 戻り水の化学成分濃度の経時変化は、地下の人工貯留層内での二つの現象を示唆している。すなわち非反応性成分であり、地下に普遍的に存在すると考えられる塩素（Cl）を指標にすると、時間とともにCl濃度が上昇しているため、地下で注入水と地層水（既存の地下の熱水）が混合していることが想定できる。一方反応性成分であり、割れ目に熱水鉱物として充填している石膏や硬石膏の構成元素であるカルシウム（Ca）およびSO₄を指標にすると、時間とともにこれらの成分の濃度が上がっているため、地下では割れ目沿いの熱水鉱物と注入水が反応していることも想定できる（図8-1-2）。

⁵ スケール：熱水中に溶け込んでいる成分が不溶性となって配管などに析出・沈殿・付着したもの。

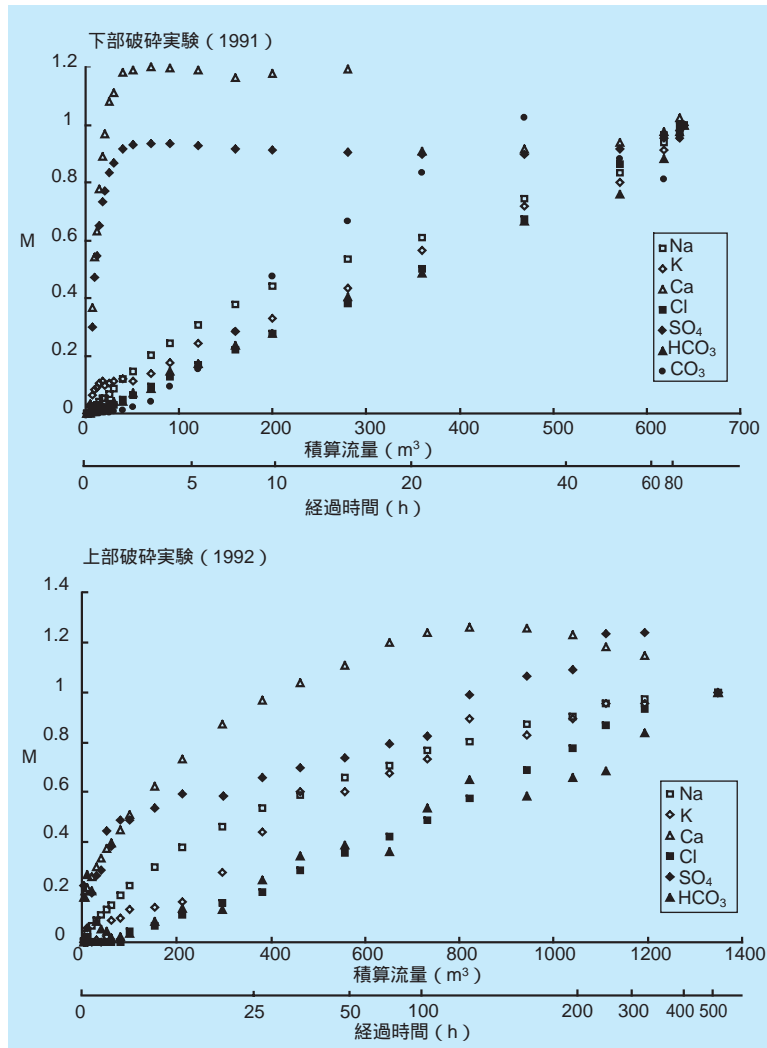


図8-1-2 水圧破碎時の標準化した化学成分の挙動

- (2) 最終の戻り水のCl濃度は下部貯留層で63ppm、上部貯留層では8.8ppmであり、下部が上部に比べて1オーダー高い値を示している。このことから、下部においてはCl濃度の高い地層水をより多く混合していると想定できる。
- (3) 下部貯留層の戻り水のCaとSO₄は両者共に初期にその濃度が急激に上昇するという特徴的な挙動を示しているのに対し、上部のそれにはこのような顕著な挙動が認められない(図8-1-2)。このことは、下部貯留層造成時には上部に比べて、注入水と石膏や硬石膏との反応が顕著であったことを示唆している。
- (4) 水圧破碎により上部貯留層は東西に、下部貯留層はほぼ南北に伸展しており、ボーリングコアで認められ

た天然の割れ目は、上部、下部区間共に伸展方向の割れ目が卓越すること⁶、下部のコアの多くは硬石膏を狭在することから、水圧破碎による亀裂は天然の割れ目に沿って伸展していると想定できる。

- (5) 戻り水のCl濃度の比較、さらに戻り水流量測定の結果からは、下部貯留層では注入水がより多く逸散していると想定される。下部貯留層は周辺にその存在が推定される破碎帯に繋がっている可能性が高い。

8-1-4 循環試験時の地化学調査

⁶ 上部については、図7-2-2に示すように東西方向の割れ目が必ずしも卓越する訳ではないが規模の大きな割れ目は東西方向が卓越する(近藤, 1994)。

各循環試験時の溶存成分の経時的な挙動をまとめると以下の通りである。

- (1) 各成分とも循環初期は坑内水(河川水によって置換)の影響により低濃度であるがその後急激に上昇する。急激な上昇は高濃度の地層水との混合に起因すると考えられる。
 - (2) 混合の指標となるClは各年度共に、急激な増加の後、徐々にその濃度が減少する。
 - (3) 地下における水 - 岩石反応の指標となるNa、Kは急激な増加の後、その値をほぼ維持している。
 - (4) CaはNaやKとは異なった挙動を示す。このことは、Caの起源となる鉱物が主として割れ目に限定して充填した硬石膏や方解石であること、さらにスケールの形成に参与することに関係していると想定される。
- これら成分のうち、ここでは水 - 岩石反応により付加されたNaおよびKを評価する目的でNa-Cl (図8-1-3)

およびK-Cl (図8-1-4) の関係について考察する。

1993および1994年度のNa-Clプロットは共に左端の数点(注入水濃度を示す)を除けばほぼ直線で回帰できる。また右側のプロットは循環初期のもので徐々に左に移行する。すなわちこれらプロットの挙動は右端の端成分(地層水)と左端の端成分(注入水)の混合によって説明できる。この直線の傾きは一方の端成分である地層水のNa:Cl比を示しており、さらにy切片は地下貯留層における岩石 - 水反応によって付加されたNa量を示している。各実験の直線のy切片は、1993年が225ppm、1994年が218ppmとほぼ同様の値を示す。

K-Clの関係についてもNa-Clとほぼ同様の結果が得られた。実験時の直線のy切片は1993年が18.3ppm、1994年が19.2ppmであった。

なお、1995年度は、Cl濃度が低く、明瞭な相関が認められないため、検討から除外した。

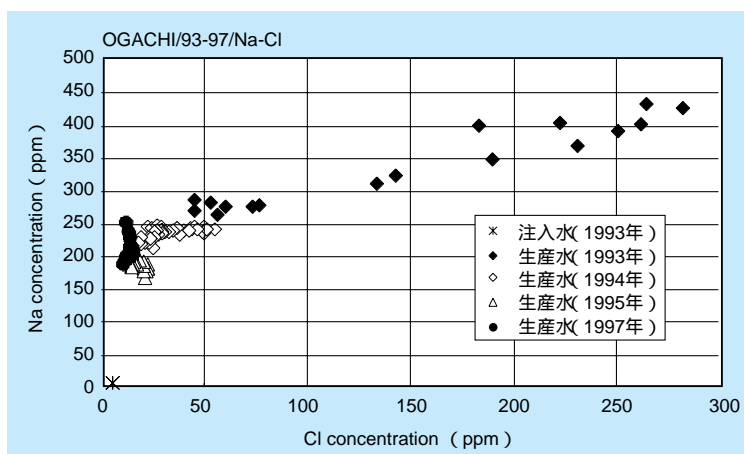


図8-1-3 Na-Clクロスプロット

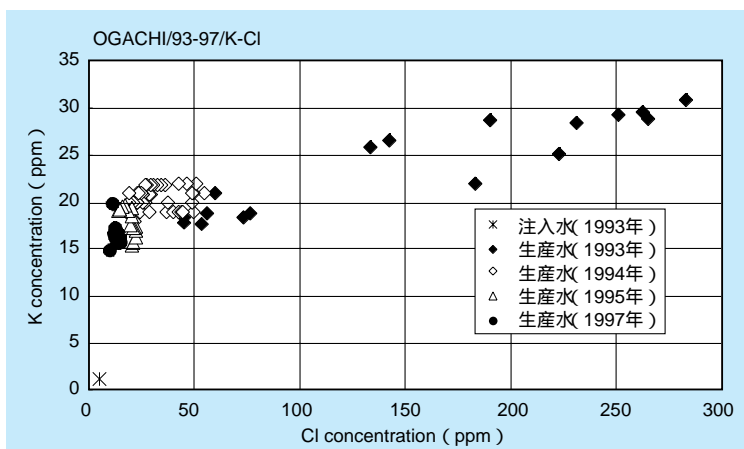


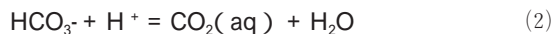
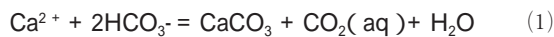
図8-1-4 K-Clクロスプロット

8-1-5 スケールモニタリング

在来地熱の流体と比較して、高温岩体発電の生産熱水中の全溶存成分量は小さいため、スケールの付着の可能性は小さいと考えられていた。しかしながら、1994年の循環試験中に地表配管内にスケールの付着が認められ、これが炭酸カルシウム (CaCO₃) と判明した。ここでは、雄勝地点におけるスケールの付着状況を明らかにするためのモニタリング結果について報告する。

1. 炭酸塩スケールの概要

炭酸カルシウムのスケールは以下に示す(1)の反応により形成され、これは水中での方解石の溶解と逆の反応である。また熱水の圧力低下により生じる沸騰に伴うCO₂ロスにより熱水中のpHが増加する ((2)式)。



元々方解石の飽和に近い状態の熱水にとって、沸騰した場合、CO₂の分圧の減少に伴いpHが増加し、これは過飽和な状態をもたらす、炭酸塩カルシウムの沈殿を促進させる。

2. スケールモニタリング結果

雄勝地点の地表配管の方解石スケール付着状況を理解するため生産水のpH、Ca、全CO₂、Na、SO₄、Clの挙動について検討した (図8-1-5)。

坑口温度は生産流量が25m³前後で100℃に到達し、沸騰によるCO₂ロスにより、生産水のpHが上昇する。Caは河川水の値である0.2mMから最大2mMまで上昇し、その後100m³で減少し始め、1000m³前後で注入水の値に戻る。

全CO₂は生産開始後8m³までの間に0から14mMまで急激に上昇する。10m³から20m³の間に6mMまで減少し70m³までは一定の値を保ち、その後1000m³前後にかけて約4mMまで減少する。この全CO₂の2回目の減少はCaの減少とその時間が一致している。Caが河川水の値に戻った後も、全CO₂は約4.2mMの一定した量が付加されている。

以上から、方解石スケールの沈殿は生産流量で100から1000m³、経過時間で100から500時間の間に生じ、その後地下からCaの供給がなくなったと想定された。

この結果を受け、1995年はスケールの付着について検討するため、熱水の沸騰 (フラッシュ) 前後でCaのモニタリングを実施した (図8-1-6)。

(1) 地化学モニタリングの結果から、Caは生産流量4m³ (坑井体積) で急激に増加し、約20m³で2.5mMの値

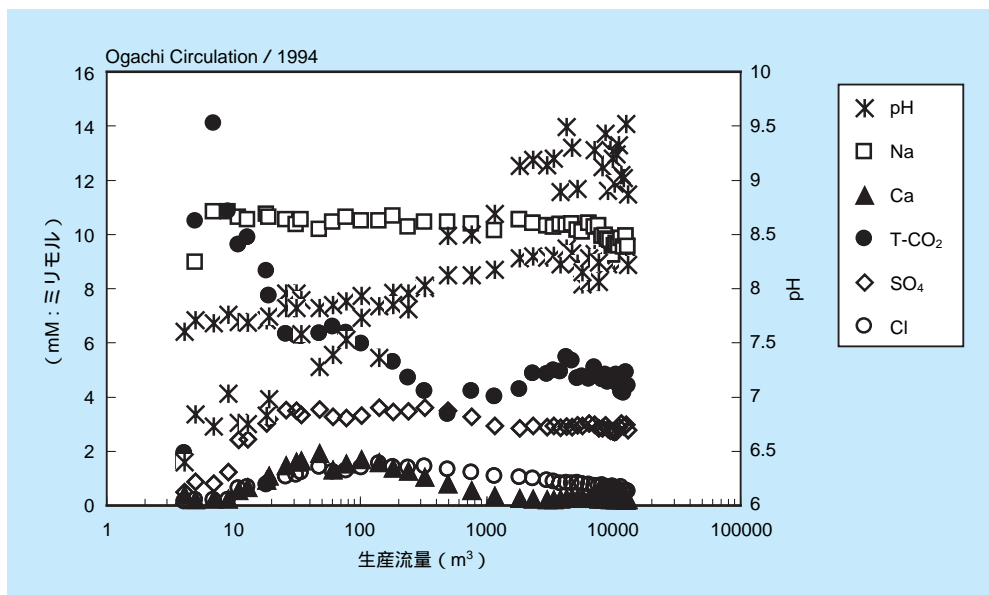


図8-1-5 生産水の化学成分挙動 (1994年循環)

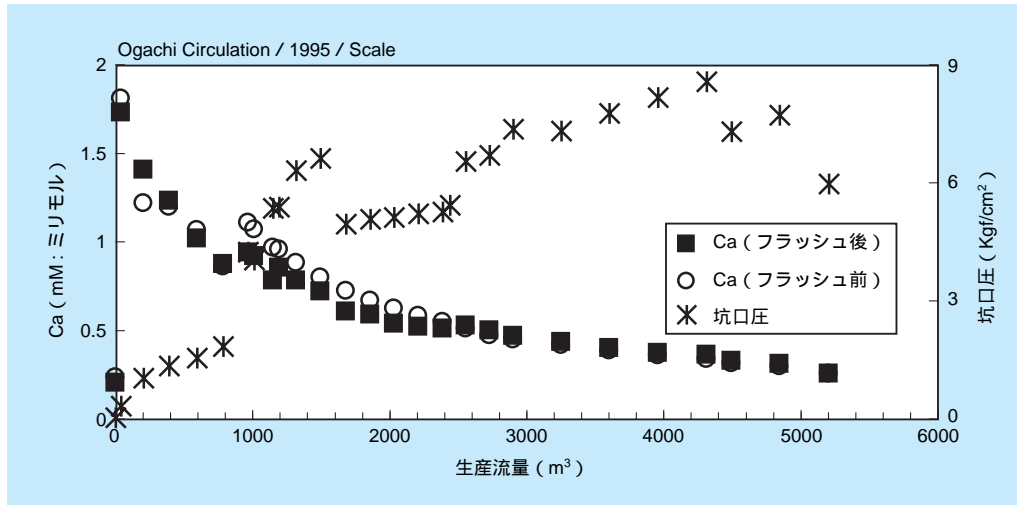


図8-1-6 生産水のスケールモニタリング (1995年循環)

を示した後徐々に減少する。

- (2) フラッシュ前後のCaモニタリングの結果から、生産流量が1000から2500m³の間はフラッシュ前のCa濃度がフラッシュ後のそれに比べて高く、その後はほぼ同じであることが読み取れ、1000から2500m³の間、

炭酸カルシウムスケールの沈殿が生じたと想定できる。

- (3) 1000m³以前はフラッシュ前後のCa濃度の関係は一樣でない。この期間は坑口圧が低く、坑井内でフラッシュしていたことが観測されており、坑井内でスケールが沈殿している可能性が考えられる。

8 - 2 トレーサテスト

8-2-1 はじめに

高温岩体発電の実用化に向けて解明すべき課題の1つとして、人工的に造成された貯留層の特性、特に規模評価があげられる。注入井から生産井に至る流体の通過する空隙の総体積、さらに流体が接する岩体の表面積は、貯留層からの抽熱量や貯留層の余寿命を予想するうえで重要な指標である。人工貯留層の体積を評価する目的で、循環時にトレーサ⁷テストを実施した。

ここでは、各循環試験時に実施したトレーサテストの結果について述べると共に、上下部2層の貯留層を介して得られたトレーサ応答カーブを数値解析により個々の貯留層に対応する応答カーブに分離し、それぞれの応答カーブの統計学的な解析から得られた貯留層の規模特性

とその経時変化について解説する。

8-2-2 トレーサテストによる貯留層評価の原理

流体の空間的、時間的な挙動を調べる目的で、トレーサを用いた調査が実施されている。例えば、降水、貯水、かんがい水の浸透、伏流水の挙動、地下水の経路、地下での滞留時間さらに流量を求める目的でトレーサによる調査が実施されている。また、反応炉などの容器の中での流体の挙動を評価するためにもトレーサが利用されている。

人工貯留層内での流体の流れの評価には、Danckwerts (1953)⁽²⁾が考案した、反応炉などの容器の中での流れを評価する方法としての滞留時間分布 (Residence Time Distribution : 以下RTDと呼ぶ) という概念を参考にした。このRTDカーブ (図8-2-1) を用いて、以下のよう

7 トレーサ：流体の流動経路を明らかにするために、その流体中に投入する物質。

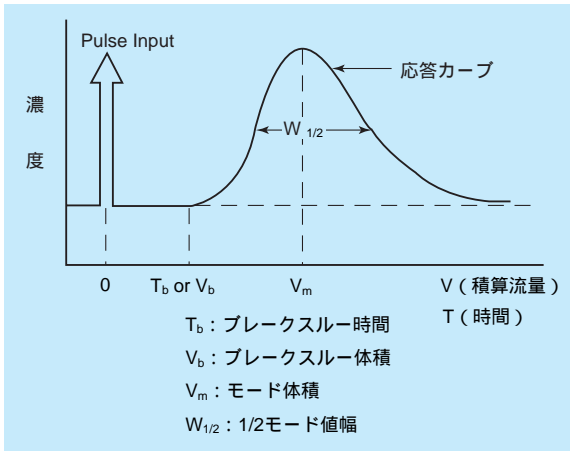


図8-2-1 トレーサ応答カーブによる貯留層特性評価法

な方法で貯留層の各種特性を評価した⁽³⁾⁽⁴⁾。

[モード体積：V_m]

RTDカーブが最大値を示す際の積算流量値。貯留層を介した流れの中で、モード体積は入り口から出口に向かって流体が最も優勢に流れる比較的透水性の高い場の総体積としてとらえることができる。

[1/2モード幅（半値幅）：W_{1/2}]

RTDカーブのピークすなわちモード値の半分の高さにおけるカーブの幅。主な流路を通る流体の分散を計測するパラメーターとして用いる。この値自身は不確かであり、物理的な固有の意味合いを持たないものの、違うシステムの相対的な分散や同じシステムの分散の経時変化を評価する手法として利用できる。

[ブレークスルー時間（体積）：T_b（V_b）]

トレーサが投入されてから、応答カーブが立ち上がるまでの時間（積算流量）。トレーサ物質が投入されてからフ

ィードポイント⁸に初めて到達するまでの時間もしくは積算流量で、貯留層内での最短パスに関する情報が得られる。

8-2-3 トレーサテストの実施概要

雄勝地点における循環実験時のトレーサテストに用いるトレーサ物質は、①可溶性物質で、流体の流動に追従する、②岩石や鉱物に吸着しない、③熱に反応しない、④取扱が容易である、⑤環境に対して安全である、⑥値段が安価である、⑦低濃度でも分析が可能である、ことなどを考慮して、ナトリウムフルオレセイン（NaFl）およびヨウ化カリウム（KI）を選択した。

トレーサは各循環実験時に、注入圧力、流量および生産流量がほぼ安定した時点で、注入井にパルスインプットとして投入した（表8-2-1）。トレーサ投入後、生産水を採取、分析した。現地において採取された水試料の分析は、実験室において実施した。分析項目および分析方法は以下の様である。

NaFl：分光蛍光光度計（励起波長：491nm、吸光波長：513nm）を用いた吸光光度分析法

I（ヨウ素）：イオンクロマトグラフィー法

8-2-4 トレーサテスト結果

各循環実験時の貯留層体積を評価する目的で、表8-2-1に示した実験時にトレーサテストを実施した。各回の

8 フィードポイント：孔井内への流体の流入が認められる位置。坑井内での水みち箇所に対応し、地熱井では貯留層とのつながりを意味する。

表8-2-1 トレーサ投入の諸元

年度	実験名	トレーサ物質	重量	投入方法	投入時期 (実験開始後)	トレーサテスト時		
						注力圧力 (Mpa)	注力流量 (l/min)	生産流量 (l/min)
1993	22日間 循環実験	KI	20kg	パルス インプット	11日目	19	1200	39
1994	5ヶ月循環実験 (その1)	NaFl	150g	パルス インプット	60日目	16	750	60
1994	5ヶ月循環実験 (その2)	NaFl	400g	パルス インプット	135日目	16	750	63
1995	1ヶ月 循環実験	NaFl KI	500g 40kg	パルス インプット	12日目	6.5	500	125
1997	10日間 循環実験	NaFl KI	500g 40kg	パルス インプット	2日目	13	500	75

トレーサテストによって得られた応答カーブを図8-2-2に示す。

トレーサテストを行った循環実験は、全て上下2層の貯留層を介して実施しており、このためトレーサの応答カーブはこれら2層の貯留層の特性を表していると考えられる。実際に、1994年のトレーサテストの応答カーブは二つのモードを有し、これは上・下部貯留層に対応するものと容易に推察できる。このため、以降に実施する上・下部貯留層の特性評価を行うために、得られたトレーサ応答カーブを福田ほか(1992)⁽⁵⁾を参考にして、数値解析により各貯留層に対応する応答カーブへの分離を試みた(図8-2-3)。

8-2-5 貯留層の特性評価

ここでは各トレーサテストによって得られた応答カーブ(図8-2-2)さらに数値解析によって分離した上・下部貯留層に対応する応答カーブ(図8-2-3)を用いて、テスト実施時の貯留層の各特性について評価する(表8-2-2)。

1) ブレークスルー時間

トレーサ投入から各応答カーブの濃度の立ち上がり時

間より推定される各フィードポイントにおけるトレーサ要素の最初の到達時間をブレークスルー時間と認識した。上部貯留層の1994年1回目、2回目および1995年の各ブレークスルー時間は94、100、170分、下部貯留層のそれは各々517、816、124分と読み取れる。同様に応答カーブの濃度立ち上がり時間から推定できる、各フィードポイントに最初のトレーサ要素が到達するまでに流れた流体の総量(ブレークスルー体積)は、上部貯留層で0.8、0.9、2.1m³、下部貯留層で26.4、43.7、14.0m³と読み取れる。

ブレークスルー時間、体積ともに上部貯留層に比べて下部貯留層が総じて大きな値を示す。これらの値の経時変化については、上部貯留層ではわずかながら増加の傾向にあるが、下部貯留層では1995年度に急激に減少する。

2) モード体積

上部貯留層の1994年1回目、2回目、1995年のモード体積はそれぞれ8.4、11.7、6.6m³、下部貯留層のそれはそれぞれ289、236、117m³と読み取れる。下部貯留層のモード体積が上部貯留層のそれに比べておよそ20倍大きな値を示す。これらの経時変化は上部貯留層ではほぼ同じ値を示すが、若干増加の傾向を示す。これに対し下部貯留層では減少の傾向が認められ、特に1995年に

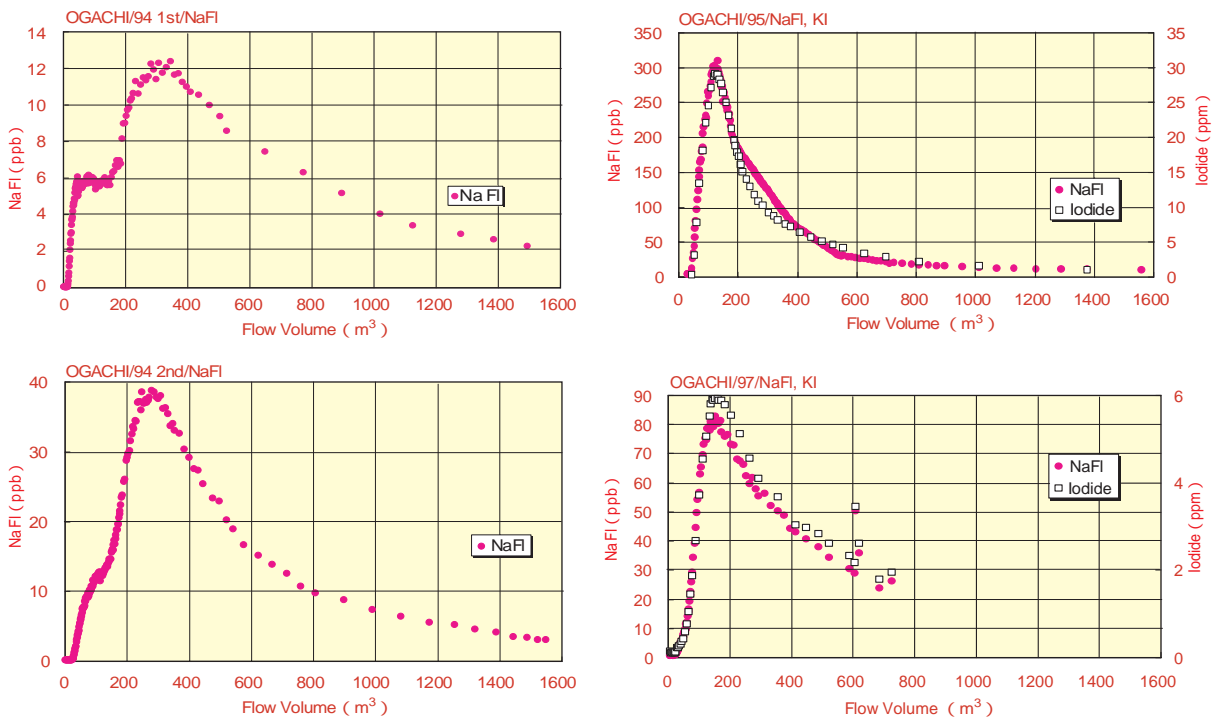


図8-2-2 トレーサテストにより得られた応答カーブ(左上:1994年1回目、左下1994年2回目、右上:1995年、右下:1997年)

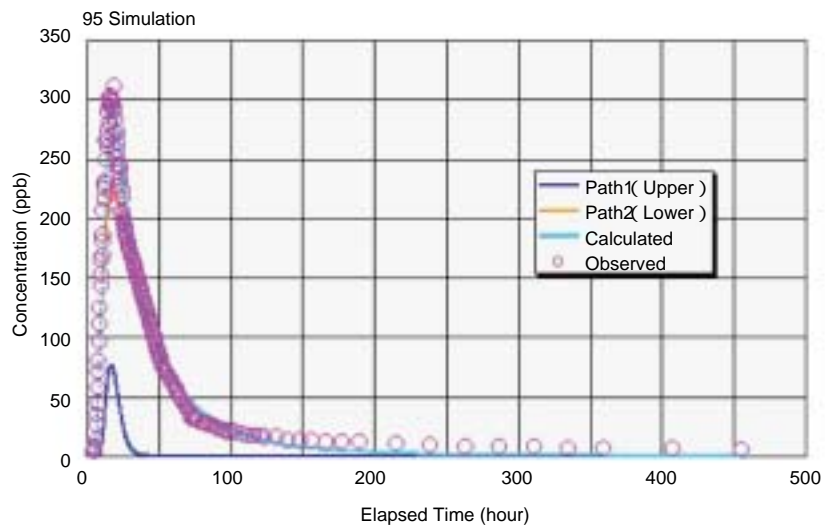
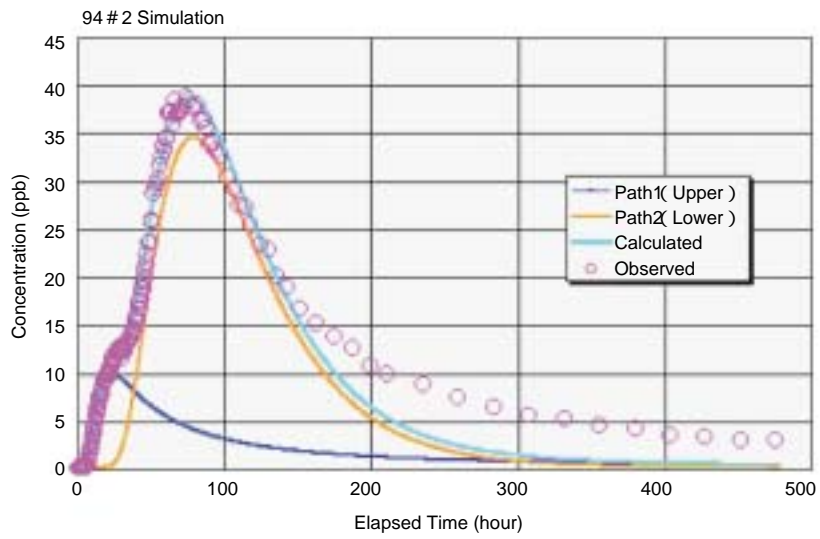
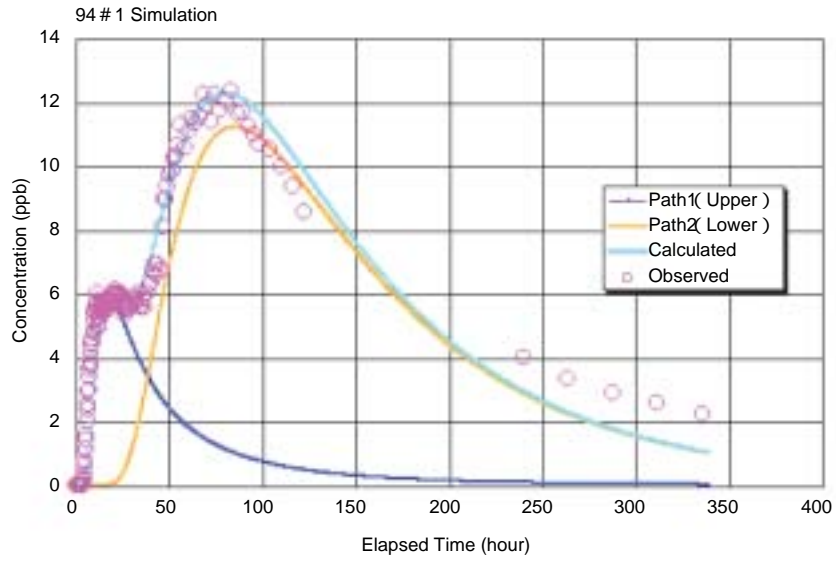


図8-2-3 最良推定モデルによる計算濃度
(上：1994年1回目、中：1994年2回目、下：1995年)

表8-2-2 トレーサテストにより求められた雄勝貯留層特性一覧

評価項目	実験年次	テスト名	上部貯留層	下部貯留層	上・下部貯留層
ブレークスルー時間： Tb (min)	1994	1st test	94	517	-
		2nd test	100	816	-
	1995		170	124	-
ブレークスルー体積： Vb (m ³)	1994	2nd test	0.8	26.4	-
			0.9	43.7	-
	1995		2.1	14	-
モード体積： Vm (m ³)	1994	1st test	8.4	289	-
		2nd test	11.7	236	-
	1995		6.6	117	(135)
1/2モード値幅： W1/2 (m ³)	1994	1st test	18	407	-
		2nd test	32	288	-
	1995		35	177	(183)
	1997		-	-	(324)

急激に減少する。

1995年と1997年の結果について上・下部貯留層を合わせた応答カーブでモード体積を評価した場合、1995年135m³、1997年138m³と読み取れる。1995年の結果からはこの値は下部貯留層のモード体積に強く影響されていること、1995年から1997年にかけては貯留層全体としてのモード体積に変化はないことが明らかになった。

3) 1/2モード値幅(半値幅)

上部貯留層の1994年1回目、2回目、1995年の1/2モード値幅はそれぞれ18、32、35m³、下部貯留層のそれはそれぞれ407、288、177m³と読み取れる。下部貯留層は経時的に減少の傾向が認められる。上・下部貯留層一括で検討した場合、1995年は183m³、1997年は324m³とそれまでの減少傾向とは逆に増加している。

8-2-6 まとめ

雄勝高温岩体発電実験場で行われた抽熱循環実験時に貯留層の特性を評価する目的でトレーサテストを実施した。トレーサテストは1994年に2回、1995年に1回、1997年に1回実施した。得られたトレーサの応答カーブを数値解析により上部・下部貯留層の二つのパスに対応した応答カーブに分離し貯留層の特性を評価した。

① 2本のパスを仮定した数値解析は、応答カーブの立

ち上がりや、モードの高さ、その時間等について概ねよい一致を見た。

- ② 貯留層の最も優勢な流れ場の体積を示すモード体積は、上部貯留層がおおよそ7～12m³であるのに対し、下部貯留層は1994年の1回目では289m³、2回目236m³、1995年では117m³と減少傾向にあり、下部貯留層内で徐々に流路の短絡が生じていることが明らかになった。1995年および1997年の上・下部合わせたモード体積は135m³、138m³とほぼ同様な値を示し変化がない。
- ③ 実験開始から1994年にかけては循環試験をすることにより徐々にではあるが流路の短絡が生じ、その後1995年の下部貯留層の改善により急激に流路の短絡が生じたものと推察できる。これに対し、1995年から1997年にかけてはモード体積に変化はない。
- ④ 分散の定性的な評価の指標となる1/2モード値幅は1994～1995年にかけては上・下部をあわせると徐々に減少の傾向にあり、総じて分散が小さくなることを示しているのに対し、1997年は逆に増加する。モード体積が変化しないにも関わらず、1/2モード値幅が増加する原因としては、1997年循環実験前の各種実験の影響と考えられる。すなわち、上部と下部を分離して実験を実施するために注入井下部区間に投入したサンドプラグの割れ目への挟在、下部区間への大量の水の圧入による下部貯留層での沈殿鉱物の生成等の可能性が考えられる。

8-3 地圧測定

高温岩体発電の開発において地圧を知ることが以下の二つの観点から重要となる。すなわち、まず第一に水圧破碎によって造成される貯留層の形状・方向に影響を与えると考えられること、第二に熱抽出の媒体となる亀裂内を流れる地下水の流動に対して、亀裂を閉じようとする地圧が影響を与えると考えられること、である。

そこで、どのようにして地圧を測定するのか、その一般的な方法や雄勝の研究で解明されたことについて述べる。

8-3-1 地圧とは

地圧は地盤や岩盤の内部に作用している圧力である。流体の圧力と異なる点は、方向によって異なる圧力が作用することである。地圧を完全に表現するには、直交する3つの方向に作用するそれぞれの圧力を知る必要がある。

地圧の発生する要因は、まず第一に地盤や岩盤の自重による鉛直方向の圧力、そして海洋プレートの沈み込みの際に生じる水平方向の圧力が挙げられる。従って、プレートの寸法に匹敵する程度の広域的には地圧の方向性はプレート運動の方向性と一致すると考えられる。地圧に影響を与える他の要因として、地質構造や残留応力なども挙げられ、これらが影響してある地域の実際の地圧状態が実現している。

8-3-2 地圧の測定方法

上述のような地圧を測定する方法としては、さまざまな原理のものが提案・開発されてきている。図8-3-1にはそれらを能動的方法、受動的方法、その他に分けて示す。能動的方法とは地圧を測定するために行なわれる試験法であり、受動的方法とは地圧に起因する地震や岩の破壊現象があったときにその現象から地圧を知ろうとする方法である。また、その他の方法とは地圧に関する有用な情報を提供するが単独では地圧を知ることができないものである。図に挙げた方法のうち、能動的方法である応力解放法は、用いる計器の耐熱性や耐圧性の限界から地熱地帯の深部では現在のところ適用することができない。また水圧破碎法も天然の割れ目が多い場合や高温の場合には適用が困難となる。このようなことから、地熱地帯で深部岩盤の地圧を求めようとする場合には、ボーリングコアを用いる方法、地震波の情報をを用いる方法、地圧に起因する破壊現象を用いる方法、が地圧を知るための主な情報源となる。

図中に示した方法のうち、雄勝地点で用いた幾つかの方法の原理を模式的に示したものが図8-3-2①～③である。①の室内AE法では、岩石などに応力を加えていくと地圧を越えてからAEが発生するカイザー効果を基本的な原理とし、様々な方向の試料で試験を行うことによって地圧

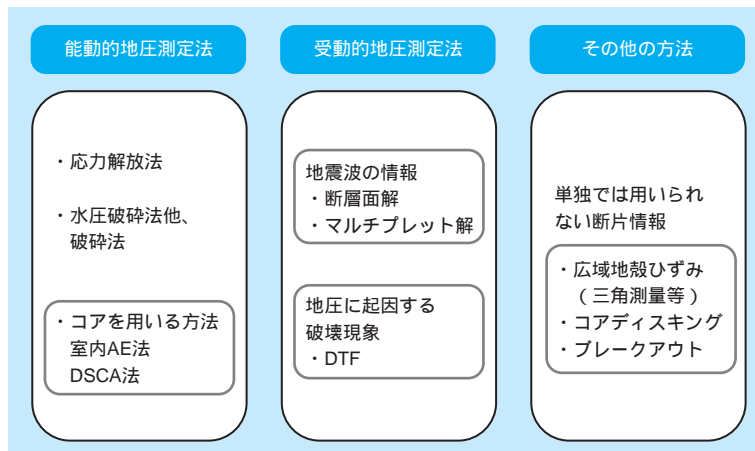


図 8-3-1 地圧測定法の種類

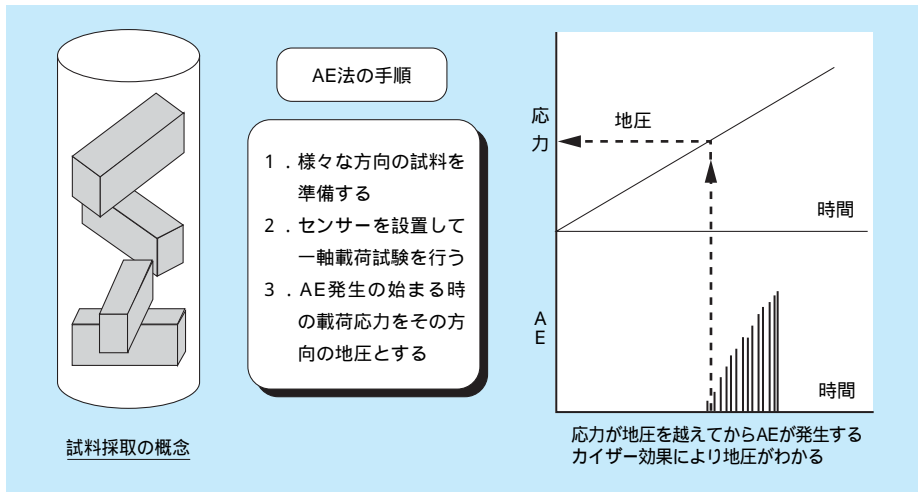


図 8-3-2 室内AE法の概念

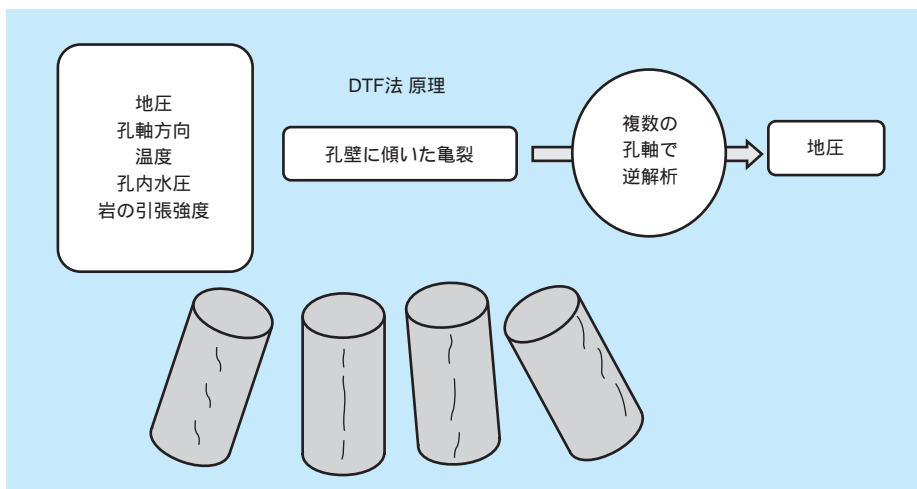


図 8-3-2② DTF法の概念

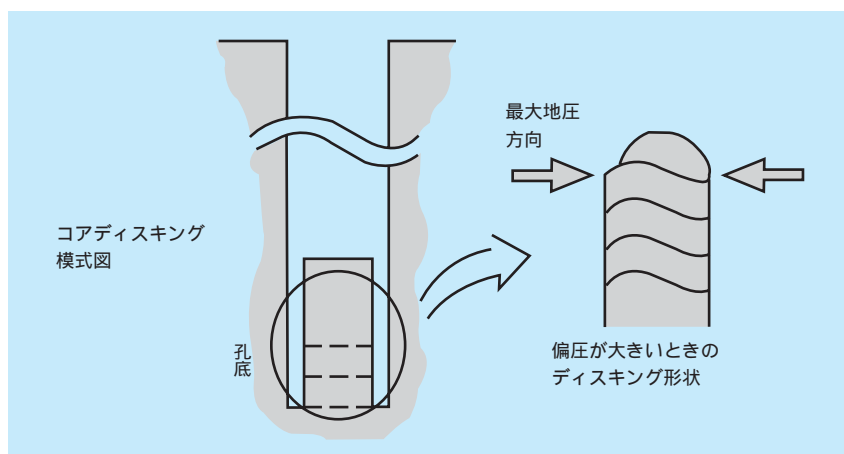


図 8-3-2③ コアディスクング法の概念

を測定する。②のDTF (Drilling-induced Tensile Fracture) 法では、掘削時の水圧、温度分布、地圧の作用により孔壁に生じる引張破壊亀裂の方向と傾きから地圧を求める。③のコアディスクキングは、水平地圧が大きい場合にコアが円盤状に割れる現象であり、孔軸に垂直な最大圧縮地圧方向に軸を持つようなポテトチップス状の形状になることから地圧方向については確かな情報を与える。地圧方向の確かな情報としては、他にボアホールブレイクアウト⁹などの地圧に起因する破壊現象がある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

8-3-3 雄勝の研究で解明されたこと

雄勝地点での地圧測定により、以下の結果が得られた。

- 1) 雄勝の位置する東北地方は、広域的にはおよそ東西方向の応力が作用していると考えられている。雄勝実験場付近の南部ではこれと一致する方向性が見られた。一方、北部では北東 - 南西の方向性が見られた。また、中央部では水圧破碎亀裂の伸展方向の違いから深度によって地圧方向の異なる可能性も示唆された (図 8-3-3)。地圧の大きさは、水平面内最大地圧が鉛直方向の 1.5 ~ 2 倍程度であった。
- 2) 熱履歴を受けていたことのために適用性に疑問のあったコアを用いる方法も、他の方法と整合的な良好な結果を与えた。すなわち、230 程度の熱履歴を受けた花崗岩でもコアを用いる方法により適切に地圧を測定できることがわかった。

9 ボアホールブレイクアウト：坑井の掘削により生じる応力集中のために生じる坑壁の破壊現象で、ほぼDTFと直交する方向に生じる。

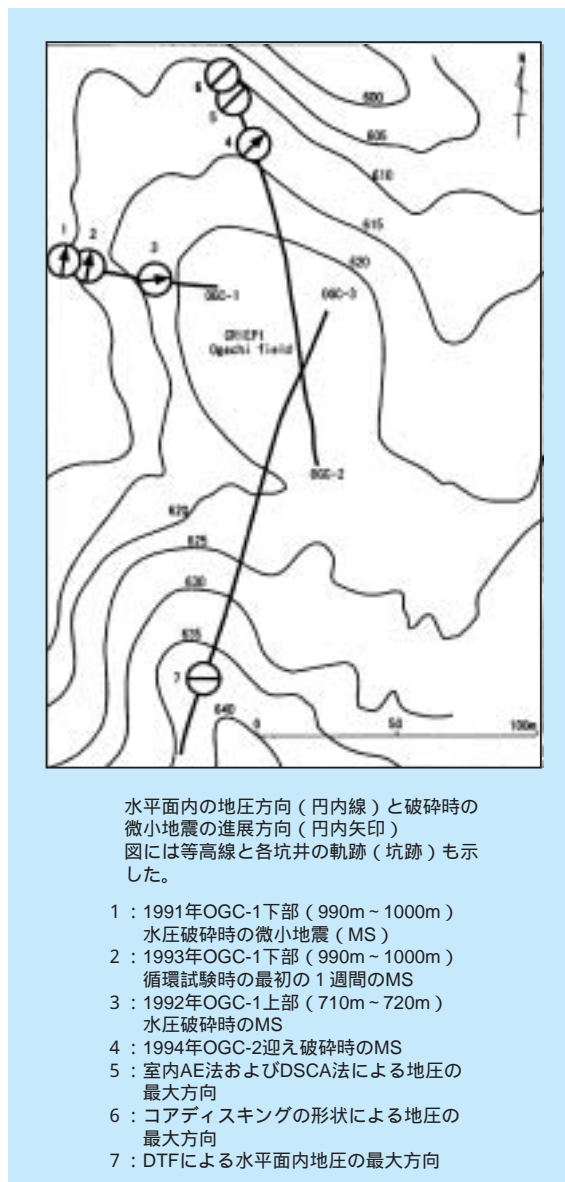


図8-3-3 雄勝地点で得られた地圧測定結果

8 - 4 透水性評価

8-4-1 はじめに

貯留層を評価する技術のうち、その貯留層がどの程度水を通しやすいか (透水性) また、どの程度水を蓄えることができるか (貯留性) を評価するものとして、注水試験がある。ここでは、OGC-1、2、3の各坑井に対し

で行った注水試験の測定データを用いて、実験場の貯留層における透水性・貯留性を評価した結果について紹介する。

8-4-1 注水試験

注水試験とは、坑口から水を注入し、坑口における水

圧、流量を測定することにより、この坑井の周辺における水の通りやすさを表す物性値である透水係数を求めるものである。また、水を注入している坑井とは別の坑井の口における水圧、流量を測定することで、両者の間の透水係数、および貯留層の保水性を表す物性値である間隙率を求めることができる。

図8-4-1に示したものはOGC-2より注水を行った時の、OGC-1～OGC-3での水圧・流量変化を表す。これらの測定データを用いて、以下の方法により透水係数・間隙率を求めた。

(1) 単一坑井周辺の透水係数

坑井周辺の透水係数を算出する方法を以下に示す。ある坑井に流量 Q (m^3/sec) で注水を行い、定常状態における坑口圧力が P (Pa) であったとき、試験区間 L (m) 全体の透水係数 k (m/sec) は次式により算出される。

$$k = \frac{Q \cdot 1n \frac{L}{r}}{2\pi \left(\frac{P}{\rho g} + H \right) L} \quad (1)$$

ここで、 r (m) は坑径、 ρ (kg/m^3) は水の密度、 g (m/sec^2) は重力加速度、 H (m) は坑口から試験区間中点までの水頭を表す。

(2) 複数坑井間の透水係数・間隙率

ある坑井において流量 Q (m^3/sec) で注水している場合、距離 R (m) だけ離れた坑井における時間 t (sec) 経過後の水位 h (m) は次式で表現される。

$$h = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{R^2 S} \quad (2)$$

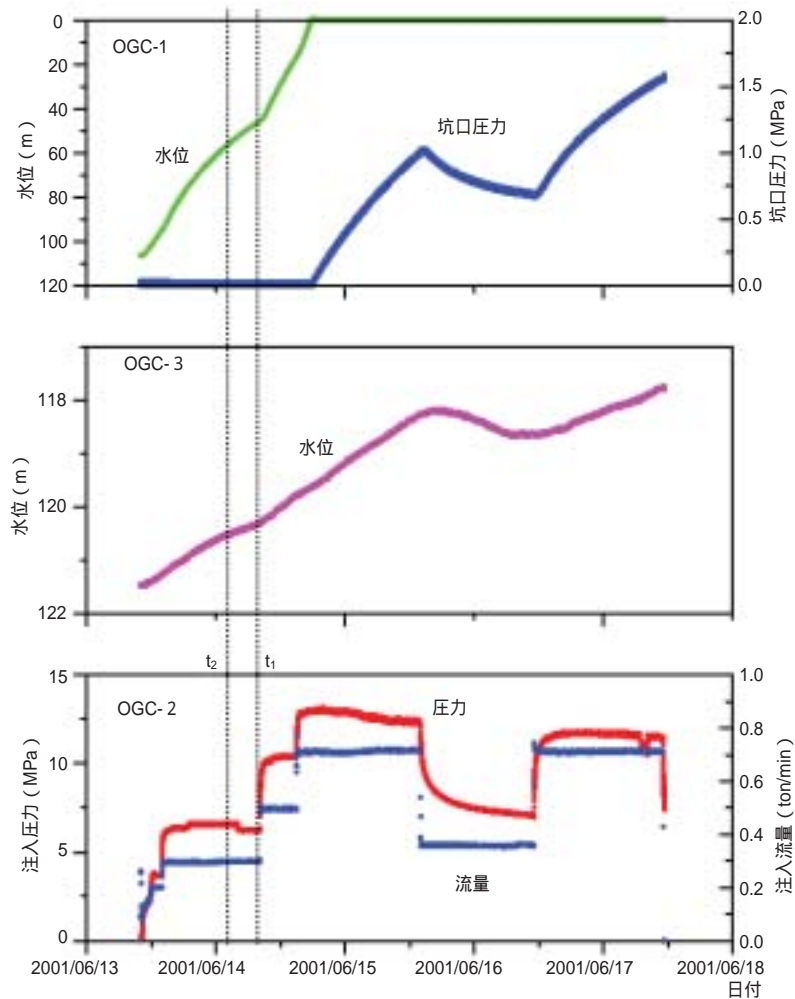


図8-4-1 OGC-2への水の圧入時(透水試験2)におけるOGC-1、3の水位および坑口圧力の変化

ここで、 T (m^2/sec) は透水量係数、 S (-) は貯留係数である。水位と経過時間の関係から、時刻-水位データの内2点を用いると、式(2)は以下のように簡略化できる(図8-4-2)。

$$h_1 - h_2 = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{t_1}{t_2} \quad (3)$$

時刻 t_1 、 t_2 における水位 h_1 、 h_2 から、透水量係数 T を算出する。

次に算出された透水量係数を式(2)に代入し、時刻 t_1 における水位 h_1 を用いて貯留係数 S を算出する。貯留係数は貯留層の層圧 k (m)、岩盤の圧縮率 β_{rock} (m^2/N)、間隙率、水の圧縮率 β_{water} (m^2/N) を用いて以下のように表現される。

$$S = b \cdot \rho g (\beta_{rock} + \phi \beta_{water}) \quad (4)$$

ここで層圧が試験区間と対応するように定めることにより、岩盤の間隙率が算出される。透水量係数は、透水量係数と層圧を用いて以下より算出される。

$$k = \frac{T}{b} \quad (5)$$

8-4-3 透水性・貯留性評価

注水試験により評価された OGC-1 ~ OGC-3 の各坑井

周辺および坑井間の透水量係数・間隙率をまとめて図8-4-3に示す。これによると、OGC-1とOGC-3の坑井近傍は透水量係数がほぼ同程度で $0.6 \sim 1 \times 10^{-7} m/sec$ であるのに対し、OGC-2はほぼ1オーダー小さい値となっている。

各坑井間の透水量係数は、OGC-1とOGC-2の間がやや小さく ($10^{-7} m/sec$ オーダー)、その他は1オーダー程度大きいことが明らかとなった。また、間隙率は概ね数~十数パーセントとなった⁽⁸⁾。

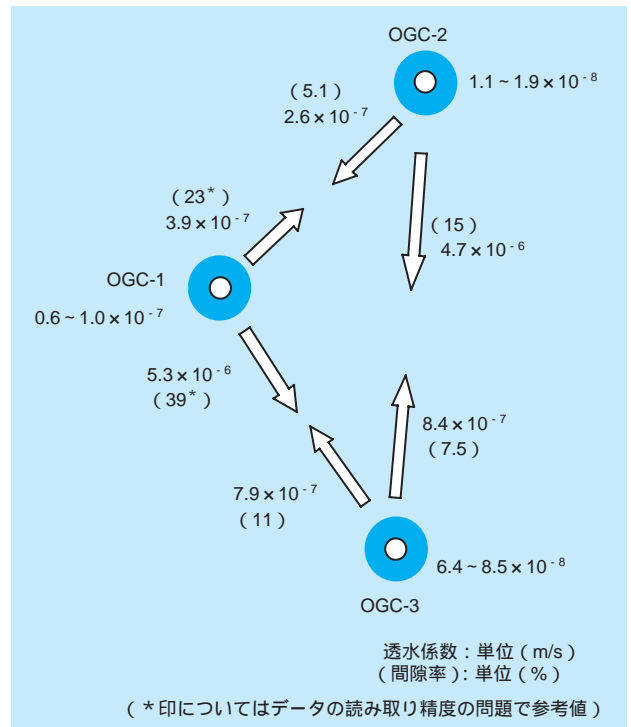


図8-4-3 坑井間透水試験による各坑井周辺および各坑井間の透水量係数および間隙率の分布

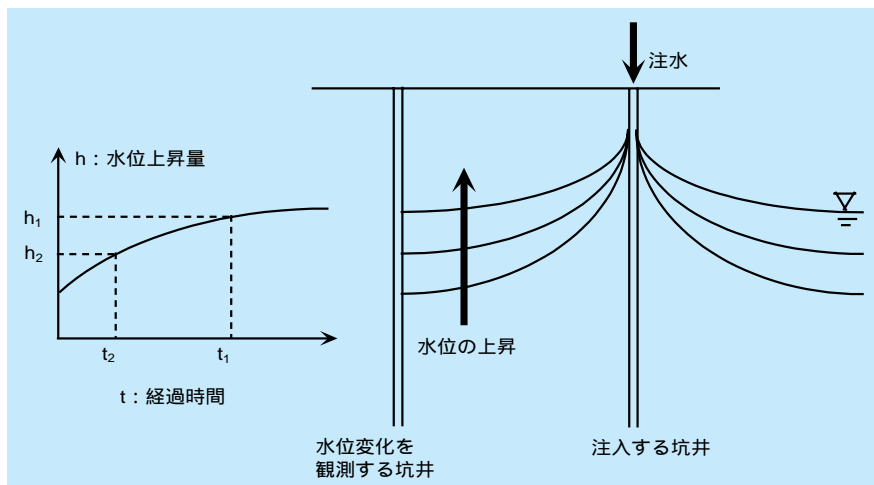


図8-4-2 複数坑井間の透水量係数を算出する概念図

8-5 シミュレーション

8-5-1 はじめに

当所では、高温岩体発電における貯留層の熱水流動に関する定量的な評価を目的として、解析コード GEOTH3Dを開発した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ここでは、開発されたシミュレーションコードの概要、シミュレーションに用いたモデル、およびシミュレーションを適用した結果について述べる。

8-5-2 シミュレーションコード GEOTH 3D の概要

GEOTH3Dは、岩盤内における流体の流動を、質量保存、運動量保存、エネルギー保存の各法則に基づいて有限差分法により解く解析コードである。初期のコードは、貯留層内の状態が熱水と蒸気の2相として計算するものであったが、実際的高温岩体試験場では、世界的にも、貯留層内の温度・圧力条件から考えると熱水の単相のみであると考えられることから、貯留層内を熱水のみ状態として計算するように改良を行った⁽¹¹⁾。また、解析を行う上で必要となる、解析する領域の周囲に関する条件（境界条件）について、当初は坑井内における流量で与えていたものを、圧力で与えるように修正した。これにより、計算時間が短縮され、収束性が向上した⁽¹¹⁾。この、GEOTH3Dを用いて、雄勝実験場における、水が通る場所（器）である岩盤の透水性（＝水の通りやすさ）・貯留性（＝保水性）に関するモデルを構築し、熱水の流動を評価した。

8-5-3 モデルの構築

従来、地熱貯留層の器となるモデルは、比抵抗分布や

弾性波速度分布などの物理探査結果、地質構造、坑井調査結果に基づき構築されてきた。しかしながらこれらの結果から得られるモデルの規模としては、物理探査からは数十mオーダー、坑井調査からは数十cmオーダーであるのに対して、実際シミュレーションで用いるメッシュの大きさは数m～十m程度と、現実的な評価が難しかった。このことから、貯留層造成や循環実験などにおいて多数観測されているAEを利用して、貯留層のモデルを、解析を行うメッシュサイズに合わせて構築した⁽¹⁰⁾。これは、AEの震源が多い箇所では透水性が高いことに基づいて、AEの震源分布に対応させて透水係数・間隙率を割り当てるものである。このAEの震源分布により構築されたモデルを図8-5-1(1)に示す。

新坑井であるOGC-3が掘削された後、深度1150m付近にAEの震源となっていない大きな水みちが発見され、従来のモデル（図8-5-1(1)）では、坑井間の注水試験（8-4 透水性評価を参照）をうまく再現できないことが判明した。そこで、当該深度に透水性の大きい割れ目を想定し、モデルを更新した（図8-5-1(2)）⁽¹²⁾。

8-5-4 シミュレーション適用結果

更新したモデル（図8-5-1(2)）を用いた、坑井間の注水試験のシミュレーション結果を図8-5-2に示す。この図から、シミュレーションによって実際の注水試験時に貯留層内で起こった現象をよく再現していることが分かる。したがって、貯留層のモデルを適切に評価し、シミュレーションを行うことにより、貯留層内の熱水流動が再現できる手法を確立したものと考える。また、この手法を用いることにより、貯留層をどのように造成したときに、どの程度の回収率改善が見込まれるかを予想することが可能となる。

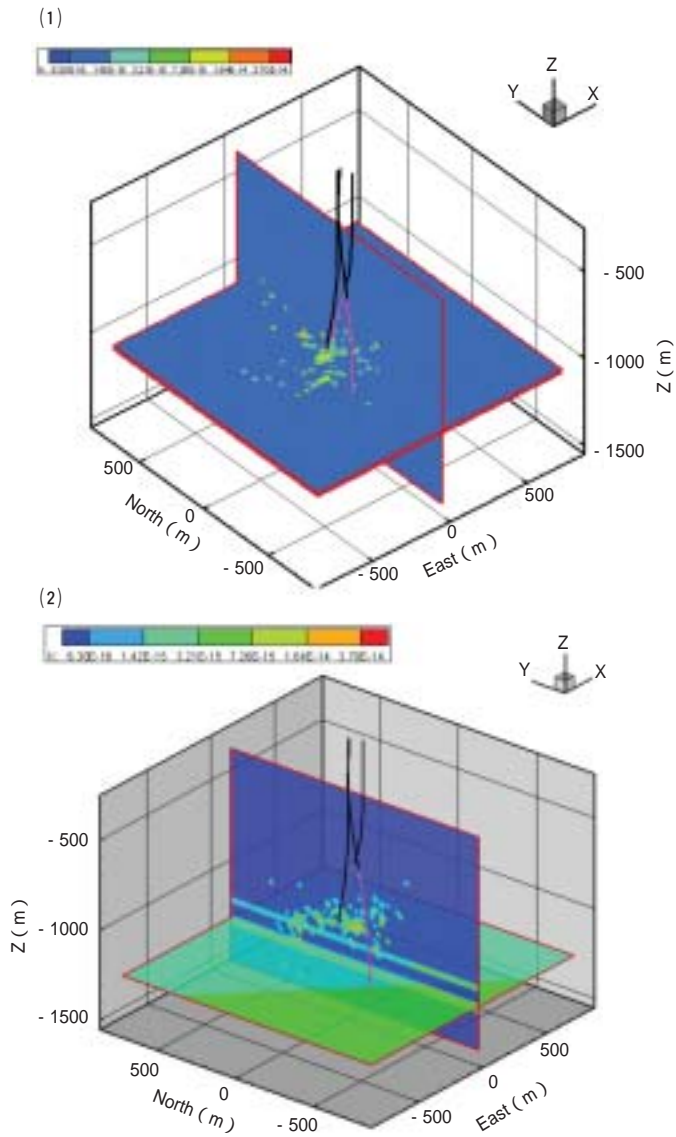


図8-5-1 透水係数分布モデルの例
(1)改良前、(2)改良後

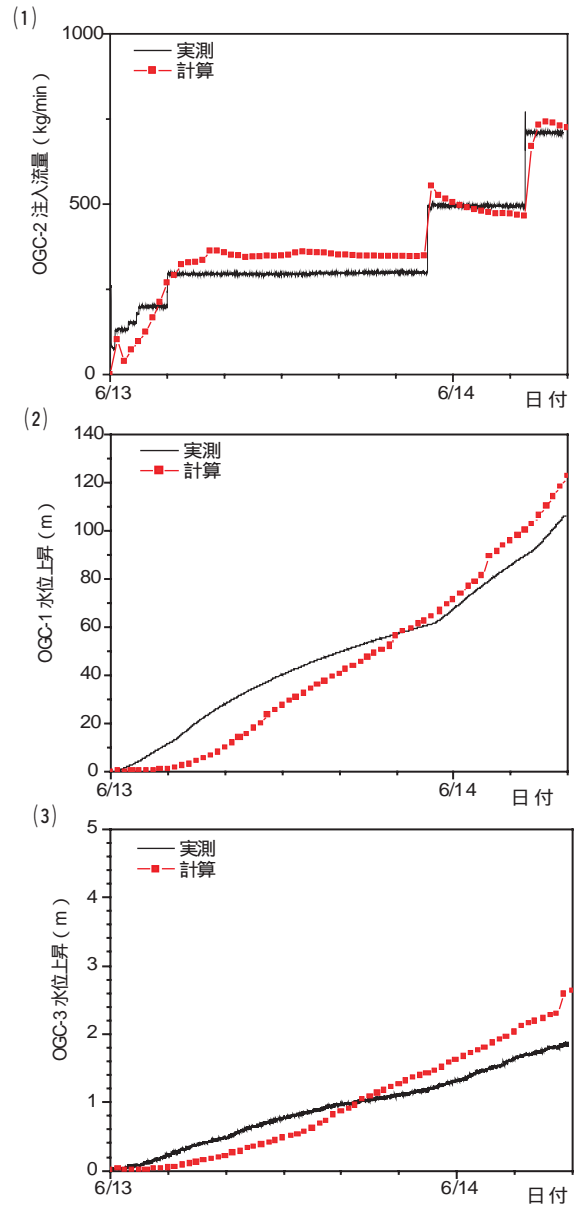


図8-5-2 改良モデルによるシミュレーション結果
(1)OGC-2への水の注入流量、(2)OGC-1
の水位変化、(3)OGC-3の水位変化

8 - 6 AE 計測

(1) 概 要

人工的に造成した貯留層をめがけて生産井を掘削するため、貯留層の位置や広がりを推定する方法としてAEの観測を行っている。AEは貯留層となる岩盤内の亀裂の伸展に伴って発生する弾性波で、高感度の地震計を用いて観測される。

雄勝地点では注入井から半径500～800mの範囲の9箇所（深度50mに8箇所、深度480mに1箇所）に地震

計を設置し、貯留層造成や循環実験などの実験中およびその前後にAEの計測を行った。地震計からの信号は、各観測点の地表においてプレアンプにより100倍増幅し、6芯シールドケーブルで実験地内の計測室に伝送した。計測室ではフィルター付きメインアンプでさらに100倍増幅し、またバンドパスフィルターにより30～1kHzの周波数の弾性波を収録した。その後、サンプリング周波数2kHzでA/D変換し、パソコンによる波形の確認、

各観測点へのP波初動の到達時間差の読み取り、および震源位置の計算を行った。また、バックアップ用にアナログデータレコーダにも収録するとともに、4チャンネル分の信号についてはペンレコーダに連続出力している⁽¹³⁾。

(2) 観測結果

観測されたAEの頻度は、1段目・2段目貯留層の造成時には1時間当たり20～30個であり、1993年の循環実験においてもほぼ同様な頻度で観測された。しかし、1994年の循環実験では頻度が少なくなり1日あたりに20～30個となり、1995年度の循環実験では1ヶ月間でわずかに10個程度であった。また、AEの波形の振幅を用いた地震学的マグニチュードは高々-1で、ほとんどがそれ以下であった。

図8-6-1に、これまで雄勝地点で観測されたAEの震源分布を示す。図の青丸は1段目（下段）の貯留層造成時に観測されたAEの震源で、注入井から北側に約800m、南側に約200mで、深さ方向には深度800m～1,200mの範囲に分布しており、この方向に亀裂が伸展したものと推定された。図の赤丸は2段目（上段）の貯留層造成時に観測されたAEの震源分布で、注入井から東側へ約800m広がっており、深さ方向には1段目同様であるが、平面的な伸展方向は1段目とは異なる方向であることが認められる。図の緑丸は1993年の循環実験におけるAEの震源分布である。これによると、循環実験開始直後のAEの震源は1段目亀裂の伸展方向（北側）と同様で、水の多くは1段目亀裂へ流れ込んだものと推定された。しかし、その後の震源は1段目貯留層の範囲よりさらに西側へも広がっており、新たな亀裂がこの方向に伸展したものであると思われる。実際、この循環実験では、注入井に圧入した水のわずか2～3%しか生産井から回収されず、注入した水の多くが新たな亀裂の伸展に要されたことが推定される。図の紫丸は、1994年に循環実験における水の回収率を高めるため、生産井に対し水圧破碎を行い、その後実施した循環実験において観測されたAEの震源分布である。これによると、AEは生産井から北東方向へ分布し、この方向への新たな亀裂の伸展が予想された。この循環実験では、注入水の回収率は十数%と前回に比べ上昇した。図のオレンジ丸は、1995年に注入井を増掘した後に水圧破碎を行ったとき、そ

の後、再度生産井の水圧破碎を行ったときに観測されたAEの震源分布で、注入井の坑底近傍にAEの震源が集中し、この付近の岩盤に新たな亀裂が伸展し、透水性の改善につながっていることが予想された。これらの分布から、はじめは偏って伸展した亀裂分布が、徐々に他の方へも広がり、最終的には注入井を中心に南を除く東西方向と、北側にほぼ同程度広がっていると推定される⁽¹³⁾。

これらのAEの震源分布を用いて、貯留層内の亀裂構造の抽出を試みた。適用した方法は、Jones and Stewart (1997)⁽¹⁴⁾により開発された“Collapsing (コラプシング)”法と呼ばれる手法で、震源位置の計算誤差を基に震源位置を移動させる方法で、これにより、貯留層内に北北東及び北東に延びる直線上の構造が認められ、この方向は天然割れ目の走向と調和的であることから、貯留層内の卓越した亀裂構造と見なせることが判った⁽¹³⁾。

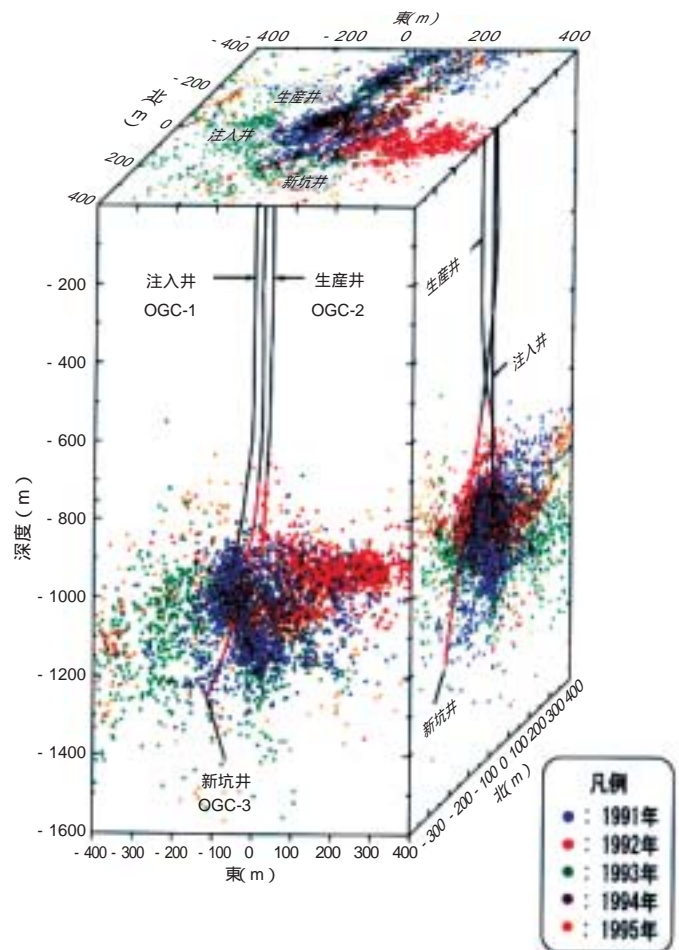


図8-6-1 雄勝地点の実験により観測されたAEの震源分布
実験の年度により凡例に示す色分けで震源位置を表示した。

8 - 7 流電・自然電位計測

(1) 概要

流電電位法は、坑井に設置したケーシングパイプを電流電極の一つとして用い、地下深部まで電流を流し、地表に多点の電位電極を設け、くり返し測定することにより地下での比抵抗構造の経時的変化を推定する方法である。

雄勝地点における流電電位法の計測には、当所が九州大学と共同で開発した計測・解析装置を用いた⁶⁾。電極配置は、注入井の深さ990mまで設置したケーシングパイプを電流電極の一つとし、他方の電流電極を注入井から東方約1,200mの地表に設け、この間に電流を流した。流した電流は16～25A(200V)で、周期20秒の休止付き交替直流である。この電流により生じる実験場周辺の電位分布の測定は、1991年度は注入井を中心に半径約100mの範囲に25m間隔の格子状に測点を約100点設け、

1992年度は半径400mの範囲に50から100m間隔で格子状に測点を設け、それぞれ電位電極を配置した。そして、注入井の西方約1kmの地表に設けた電位電極との電位差を測定した。これらの電位差および各電極の座標から各測点における見掛け比抵抗値を求め、破碎のため地下へ圧入した水による見掛け比抵抗の変化を調べた。

(2) 計測結果

1991年度における破碎実験前の見掛け比抵抗分布を基準にした破碎実験後の見掛け比抵抗分布の変化の例を図8-7-1に示す。これによると、注入井の東西約100m離れたところを中心に見掛け比抵抗の低下域が見られ、南側には見掛け比抵抗の上昇域が見られる。このことはモデルシミュレーションで検討すると、南側に比抵抗の低下した部分が浅く伸展し、北側には深く伸展したモデルによ

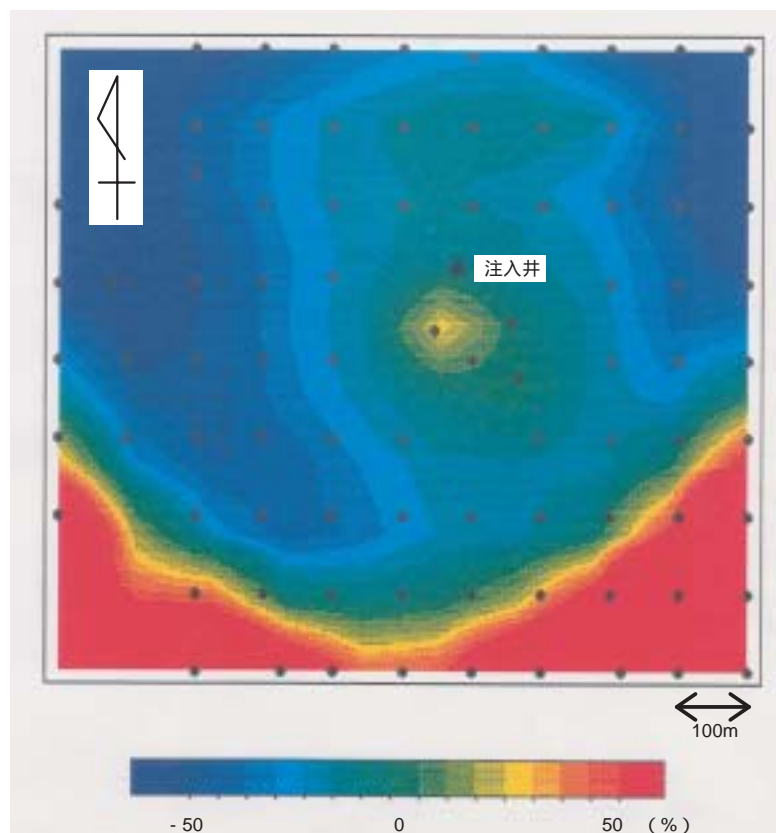


図8-7-1 流電電位法により計測された水圧破碎前後の見掛け比抵抗分布の変化図
青い領域は見掛け比抵抗が低下したところ、赤は上昇したところを示す。この解析より、低比抵抗体(水の圧入領域)は北側へ伸びたと推定される。

り説明でき、AEの観測結果による破砕面の伸展方向の推定結果と整合している¹⁶⁾。

1992年度破砕実験前は見掛比抵抗分布を基準にした破砕実験後の見掛比抵抗分布の変化では、注入井の周辺および東側に見掛比抵抗の低下域が見られ、それを南北に挟むようなかたちで見掛比抵抗の上昇域が見られた。これは、モデルシミュレーションで検討すると、注入井から東側に比抵抗の低下した部分が伸展したモデルにより説明でき、1段目同様AEの観測結果による破砕面の伸展の推定結果とも整合している¹⁶⁾。

1993年の循環実験では、実験初期に見掛比抵抗の低下域が注入井の西から北側に見られ、注入された水が1段目貯留層へ流れ込んでいることが推定された。1994年の循環実験では、見掛比抵抗の低下域が注入井の北東および南側に見られ、これらの方向に多くの水が流れていると推定された。1995年の循環実験では、循環実験

後見掛け比抵抗の低下域が南側を中心に広がり、注入井の南側に多くの水が流れ込んでいると推定された。

これらの実験で、水の流れが変わったように見えるのは、循環実験で多くの水が地下に送り込まれ、亀裂が成長していることや、生産井の刺激などにより新たな亀裂が注入井および生産井周辺で発達したためと考えられる¹⁶⁾。

また、本計測で用いた装置では、地下に電流を流さないときの電位、いわゆる自然電位の計測も可能であり、循環実験において興味ある結果が得られた。1995年の循環実験において圧入する水の流量を段階的に変化させたときの、実験場周辺での自然電位の変化では、水の圧入に伴い実験場周辺では自然電位が低下し、低下の割合の大きいところは、注入井の北東、および南から西にかけた方向であることが判った。これにより、地下に圧入された水の多くは、北東および南から西にかけた方向に流れていると推定された¹⁷⁾。

第 9 章

9

まとめと今後の課題



第9章 まとめと今後の課題 目次

我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 海江田秀志
我孫子研究所 地圏環境部 主任研究員 伊藤 久敏
我孫子研究所 地圏環境部OB 北野 晃一

コラム6：マグマ発電 86
コラム7：ジオサーモピア構想 87

海江田秀志（8ページに掲載）

伊藤 久敏（8ページに掲載）

北野 晃一（32ページに掲載）

高温岩体発電方式では、地下深部の高温の岩盤内に人工的に貯留層を造成し、地下と地表で水を循環させなければならない。これまでの現場実験においては、すべて高温岩体として花崗岩類が開発の対象とされてきたが、場所により岩盤の特性が異なり、それに応じた水の循環システムの構築が必要であることが判った。

たとえば、フェントンヒルでは岩盤が緻密なため、貯留層から外へ水が逃げにくい、注入井を通して貯留層へ水を送るのに高圧ポンプの運転が必要であった。ソルツでは岩盤内に自然の大きな割れ目があり、高圧で水を押し込むと水が周辺に逃げてしまうことから、生産井からポンプで水を汲み上げて、注入井へは低い圧力で水を送っている。これらの方法により、どちらの実験も注入井から貯留層へ送られた水は、ほぼ100%に近い割合で生産井から回収されている。我が国では、肘折地点も雄

勝地点も岩盤状態がフェントンヒルとソルツの中間的状态にあり、注入井を通して貯留層に水を送るにはある程度高い圧力が必要であるが、岩盤内の割れ目を通して水が逃げる割合が高い。そこで、生産井を複数配置することにより、循環水の回収率を高くしている。

このように、岩盤の特性評価とそれに応じた開発方法により、高温岩体方式による熱抽出が実証されているが、今後その他の地点への適用性や経済性を検証しなければならない。また、この方式による発電となると、15年程度の長期にわたる水循環の安定性や、環境への影響評価も必要である。さらに、これまで国内の地熱資源の評価は従来型の地熱開発を対象としたものであり、高温岩体発電方式が実用化すれば、開発可能な資源量が増えることが期待され、この見直しも必要であろう。

コラム6：マグマ発電

高温岩体発電は深度2～3km程度、岩盤温度200～300程度を対象としている。当所では高温岩体発電が実用化された後の未来の発電システムとしてマグマ発電技術について検討し、1995年に報告書としてまとめた⁽¹⁾。

マグマは岩石が高温で溶けたものであり、マグマの温度は650～1300の範囲にあるとされている。活火山などの地下ではマグマがマグマだまりとして、地下浅部に存在する。その深さは1～10数km、大きさは径1～数10km程度と推定されている。火山国日本におけるマグマ発電の予想賦存

量は、地下10kmまでをターゲットとして約60億kWと見積った。また、マグマ発電を実現するためには、1)地下10kmまでのマグマの探査技術、2)超高温岩体およびマグマの掘削技術、3)マグマおよび近傍岩盤からの抽熱技術、の3つを克服すべき主な技術課題とした。

図にはマグマ発電での抽熱方式の一例を示した⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。これは、坑井内同軸熱交換方式と呼ばれるもので、1本の坑井(二重管)を用い、外管に注水し、断熱された内管から蒸気を回収するものである。

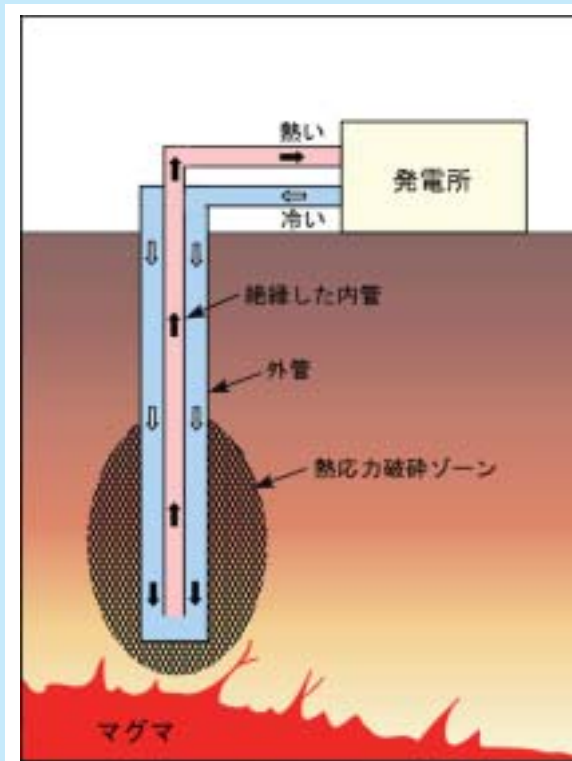


図 マグマ発電概念図

コラム7：ジオサーモピア構想

ジオサーモピアは地熱（Geothermal）を媒体とし、人と自然が共存する理想郷（Utopia）である。当所は所内の多くの分野の専門家や電力会社の関係者から構成される検討会を組織し、1992年にジオサーモピア構想を提案した。その基本理念は地熱を媒介とし、将来社会を見据えた、心の豊かさゆとりある生活、地域振興、環境保全、エネルギー・資源のリサイクル、地域と外部社会との交流などを取り入れた理想郷の創出である。この理念のもとに、日本の地域的特性を考えて、北国、南国、離島の3つの地域でそれぞれの理想郷を提案した。図に示したのは北国版理想郷である⁽¹⁾。この

モデルは、山岳地で雪の多い地域が対象で、高温岩体発電所から供給される豊富な熱水を利用した野菜工場、魚工場などの工場群の周囲に果樹園、有機農場などの農業施設を配置するとともに、スキー場、温水プール、林間学校、研究所、サテライトオフィスなどを設置したものである。

ジオサーモピアで示したメニューが経済的に成立しうるかは今後の課題であるが、以上のような基本的な理念に基づく総合的な地熱エネルギー開発プランの構想は、当時としては画期的であり、現在でも十分参考となるアイデアであろう。



101) 高温岩体発電所、201) 地殻開発研究所、204) 温泉医療研究所、205) バイオ研究所、304) 野菜工場、305) バイオ工場、308) きのこ栽培工場、317) 冷凍工場、318) 堆肥工場、409) 有機農場、410) 温室農場、500) 養魚養鶏関連施設、609) 屋内スポーツ場、610) 温泉リゾートホテル、612) スキー場、614) 山頂展望温水プール、619) ゴルフ場、620) 熱帯動植物園、622) サテライトオフィス、703) 駅、705) リニアモーターカー、706) 駐車場、709) 融雪施設設置道路、710) 全天候型ヘリポート、712) リハビリセンター、717) 全天候交通路、721) 浄水冷却プール

図 ジオサーモピア（北国版）

お わ り に

理事 我孫子研究所長 加藤 正進



最近の「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS法）」の導入、二酸化炭素排出などの環境問題への対策などから、再生可能エネルギーとしての自然エネルギーの開発が注目を集めている。地熱資源は我が国に豊富に存在する自然エネルギーで、バイナリー発電によれば再生可能エネルギーと見なされており、高温岩体発電も再生可能な地熱エネルギー開発技術の一つとして期待されている。

当所では、1970年代後半における石油ショックを契機とした新エネルギー開発において、主要な課題として

地熱開発に着目し、地熱資源開発の拡大のためには高温岩体方式による人工的な地熱抽出システムの技術開発が必要と考え、高温岩体発電に関する要素技術の開発研究を実施してきた。この研究では、秋田県雄勝地点における現場実験を中心として技術の開発と実証を行い、開発した一部の技術は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による山形県肘折地点での実験へも適用し、その汎用性についても検証した。これらの技術により、地下に人工的に地熱貯留層を造成し、地表から注入した水を熱水および蒸気として取り出す技術の基本は開発されたといえる。今後、高温岩体発電の実用化においては、開発した技術の費用対効果の評価を行い、開発コストの低減を図る必要がある。

一方、高温岩体発電研究を通して開発した技術は、地熱開発のみならず、地下深部の利用やエネルギー開発に大いに活用できるものと期待される。

そこで、これらの高温岩体発電に係わる要素技術の開発状況をレビューとしてまとめた。本レビューで紹介した技術が、電気事業者および一般の方々の地下の理解や開発にお役に立てれば幸いである。

引用文献・資料等

第1章

- (1) 日本地熱調査会のホームページ .
<http://www.jgea.or.jp/index.html>
- (2) 内山洋司、1995 . 発電システムのライフサイクル分析 .
電力中央研究所研究報告 : Y94009 .
- (3) 企画調査研究報告書、2002 . 地球環境適応型地熱開発戦略報告書、2002年5月 .
<http://www.earth.tohoku.ac.jp/geoth21/>
- (4) 矢野雄策、田中明子、高橋正明、大久保泰邦、笹田政克、梅田浩司、中司昇、1999 . 日本列島地温勾配図 (1:3,000,000) . 地質調査所、6p .
- (5) 北野晃一、堀義直、海江田秀志、木方建造、鈴木浩一、山本武志、伊藤久敏、江口譲、新孝一、楠建一郎、末永弘、藤光康宏、本島勲、2000 . 高温岩体発電の基盤技術の開発 - 実用化技術の開発と雄勝実験場での実証 - . 電力中央研究所総合報告 : U41 .

第2章

- (1) 海江田秀志、伊藤久敏、末永弘、楠建一郎、新孝一、鈴木浩一、木方建造、2002 . 高温岩体発電基盤技術の開発 - 地下施設に係わる技術マニュアル - . 電力中央研究所総合報告 : U43 .
- (2) Armstead, H. C. H. and Tester, J. W., 1987. Heat Mining. E. & F. N. Spon Ltd., 478p.
- (3) 堀義直、1990 . 大容量高温岩体発電のコスト評価と技術開発 . 地熱、27、76-86 .

第3章

- (1) Tester, J. W., Brown D. W., and Potter R. M., 1989. Hot Dry Rock Geothermal Energy - A New Energy Agenda for the 21st Century, Los Alamos National Laboratory Report LA-11514-MS.
- (2) Duchane, D., 1995. Hot Dry Rock Geothermal Energy in the USA - Moving toward practical use - . Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, 2613-2617.
- (3) Baria, R. Baumgartner, J. Gerard, A. and Garnish, J., 2000. The European HDR programme : Main targets and results of the Deepening of the Well GPK2 to 5000m, Proceedings of the World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 3643-3652.
- (4) 川崎耕一、刈城佐登志、天満則夫、菊地恒夫、2002 . 肘折高温岩体実験場における長期循環試験の概要、日本地熱学会平成14年学術講演会講演要旨集 A28 .

第4章

- (1) 堀義直、1990 . 大容量高温岩体発電のコスト評価と技術開発 . 地熱、27、76-86 .
- (2) 日比野敏、海江田秀志、堀義直、木方建造、久野春彦、宮川公雄、佐々木俊二、井上大栄、本島勲、大隅多加志、楠建一郎、本島睦、金川忠、1991 . 高温岩体発電の基盤技術の開発 - 秋の宮地点水圧破碎実験 - . 電力中央研究所総合報告 : U25 .
- (3) 近藤浩文、1994 . 高温岩体発電のための水圧破碎面の予測手法の開発 - 既存割れ目の性状評価について - . 電力中央研究所研究報告 : U93039 .
- (4) 海江田秀志、山本武志、木方建造、北野晃一、堀義直、伊藤久敏、江口譲、藤光康弘、本島勲、2000 . 高温岩体発電のための貯留層造成技術の開発 - 雄勝地点における二段貯留層の造成とその評価 - . 電力中央研究所研究報告 : U00005 .
- (5) 伊藤久敏、2001 . 高温岩体発電のための貯留層亀裂構造評価 (その3) - 坑井壁面画像解析に基づくフラクチャの分布・性状評価 - . 電力中央研究所研究報告 : U01004 .

第5章

- (1) 楠建一郎、鈴木浩一、伊藤久敏、海江田秀志、北野晃一、茂木透、藤光康宏、田中良和、西島潤、2002 . 地熱構造探査手法の研究 - 雄勝地域での各種物理探査法結果の分析と地熱構造探査手法の提案 - . 電力中央研究所研究報告 : U02003 .
- (2) 新エネルギー産業技術開発機構、1985 . 地熱開発促進調査報告書、No.7、湯沢雄勝地域、814p .
- (3) Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. A. I. M. E., 146, 54-62.
- (4) 物理探査学会、1999 . 物理探査ハンドブック、手法編 .
- (5) 横山秀吉、中塚勝人、安部司、渡部賢一、1983 . 含水岩石の比抵抗の温度依存性とその地下温度予測への応用について . 日本地熱学会誌、5、103-120 .
- (6) 茂木透、楠建一郎、鈴木浩一、川崎逸男、城森明、東義則、1990 . 複素位相検波方式CSMT探査装置の開発 . 物理探査、43、164-169 .
- (7) Uchida, T., 1993. Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, J. Geomag. Geoelectr., 45, 1063-1071.
- (8) 北野晃一、堀義直、海江田秀志、木方建造、鈴木浩一、山本武志、伊藤久敏、江口譲、新孝一、楠建一郎、末永弘、藤光康宏、本島勲、2000 . 高温岩体発電の基盤技術の開発 - 実用化技術の開発と雄勝実験場での実証 - . 電力中央研究所 総合報告 : U41 .

第6章

- (1) 海江田秀志、佐々木俊二、本島勲、澤田義博、日比野敏、堀義直、1988. 高温岩体発電のための岩盤破碎技術(その1) - ケーシングリーマー・サンドプラグ方式水圧破碎法の開発 - . 電力中央研究所研究報告: U88026 .
- (2) 海江田秀志、本島勲、木方建造、近藤浩文、金川忠、佐々木俊二、堀義直、1994. 高温岩体発電のための岩盤破碎技術(その2) - 雄勝地点における大規模亀裂の造成 - . 電力中央研究所研究報告: U93057 .
- (3) 日比野敏、海江田秀志、堀義直、木方建造、久野春彦、宮川公雄、佐々木俊二、井上大栄、本島勲、大隅多加志、楠建一郎、本島睦、金川忠、1991. 高温岩体発電の基盤技術の開発 - 秋の宮地点水圧破碎実験 - . 電力中央研究所総合報告: U25 .

第7章

- (1) 末永弘、Schreck, M.、海江田秀志、2001. 高温岩体発電のための貯留層評価技術の開発 - 光ファイバ温度測定による導通箇所の特長と透水量評価手法の提案 - . 電力中央研究所研究報告: U00052 .
- (2) 伊藤久敏、2001. 高温岩体発電のための貯留層亀裂構造評価(その3) - 坑井壁面画像解析に基づくフラクチャの分布・性状評価 - . 電力中央研究所研究報告: U01004 .
- (3) 伊藤久敏、北野晃一、1999. 高温岩体発電のための貯留層亀裂構造評価 - ボアホールテレビュアにより推定した雄勝貯留層に分布するフラクチャの方向性 - . 電力中央研究所研究報告: U98054 .

第8章

- (1) 木方建造、Mambo, V. S., 1997. 高温岩体発電のための貯留層評価技術 - 雄勝地点水圧破碎時の貯留層の地化学的特徴 - . 電力中央研究所研究報告: U96030 .
- (2) Danckwerts, P. V. (1953) Continuous flow system: Distribution of residence time. Chem. Eng. Sci., 2, 1-13.
- (3) Levenspiel, O. (1972) Geochemical Reaction Engineering. 2nd edit., John Wiley & Sons, 578p.
- (4) Tester, J. W., Bivins, R. L. and Potter, R. M. (1982) Interwell tracer analyses of a hydraulically fractured granite geothermal reservoir. Soc. Pet. Eng. J., 22, 537-554.
- (5) 福田道博・加藤恭子・糸井龍一・秋林智(1992)トレーサー試験データの解分析法. 日本地熱学会誌、14、1-12.
- (6) 新孝一、海江田秀志、伊藤久敏、及川寧己、2000. 高温岩体発電のための岩盤破碎評価技術の開発 - 地熱地域での地圧の評価 - . 電力中央研究所研究報告: U00014 .
- (7) 伊藤久敏、2001. 高温岩体発電のための貯留層亀裂構造評価(その3) - 坑井壁面画像解析に基づくフラクチャの分布・性状評価 - . 電力中央研究所研究報告:

U01004 .

- (8) 海江田秀志、末永弘、李宏、2002. 高温岩体発電のための貯留層評価技術の開発 - 雄勝貯留層透水モデルの高精度化と熱水流動評価技術の高度化 - . 電力中央研究所研究報告: U02004 .
- (9) 山本武志、北野晃一、藤光康宏、田中伸和、1998. 高温岩体発電のためのシミュレーション手法の開発(その1) - 数値解析コードGEOETH3Dの開発 - . 電力中央研究所研究報告: U97092 .
- (10) 山本武志、北野晃一、海江田秀志、藤光康宏、田中伸和、1998. 高温岩体発電のためのシミュレーション手法の開発(その2) - 数値解析コードGEOETH3Dの雄勝地点への適用 - . 電力中央研究所研究報告: U97093 .
- (11) 江口謙、山本武志、北野晃一、西原崇、1999. 高温岩体発電のためのシミュレーション手法の開発(その3) - GEOETH3Dの改良と雄勝実験場への適用 - . 電力中央研究所研究報告: U980933 .
- (12) 海江田秀志、末永弘、李宏、2002. 高温岩体発電のための貯留層評価技術の開発 - 雄勝貯留層透水モデルの高精度化と熱水流動評価技術の高度化 - . 電力中央研究所研究報告: U02004 .
- (13) 海江田秀志、佐々木俊二、1998. 高温岩体発電のための岩盤破碎評価技術の開発 - AE法による雄勝貯留層の評価 - . 電力中央研究所研究報告: U97107 .
- (14) Jones, R. H. and Stewart, R. C., 1997. A method for determining significant structures in a cloud of earthquakes. J. Geophys. Res., 102, 8245-8254.
- (15) 海江田秀志、佐々木俊二、2001. 高温岩体発電のための貯留層評価技術の開発 - AE法による雄勝貯留層亀裂構造と地圧方向の推定およびその検証 - . 電力中央研究所研究報告: U00069 .
- (16) 海江田秀志、作永貞雄、鈴木浩一、藤光康宏、東貞成、1993. 高温岩体発電のための岩盤破碎評価技術の開発 - 流電電位法計測システムの開発と雄勝水圧破碎面評価への適用 - . 電力中央研究所研究報告: U93011 .
- (17) 海江田秀志、鈴木浩一、水永秀樹、牛島恵輔、1996. 高温岩体発電のための岩盤破碎評価技術の開発 - 流電電位法と自然電位法による雄勝貯留層の評価 - . 電力中央研究所研究報告: U96022 .

コラム

コラム1

- (1) Sass, J. and Priest, S., 2002, Geothermal California, Geothermal Resources Council Bulletin, Vol. 31, 183-187.
- (2) 安川香澄訳、2001. 持続可能な地熱生産のためにラルゲレッコにおいて適用した戦略: 深深度掘削と水の注水について、ガイド・カペッティ、地熱エネルギー、26、

コラム 3

- (1) 濱田眞之、及川孝夫、2002 . 地熱エネルギーの直接利用 (3) 米国の地中熱ヒートポンプ普及への道 . 地熱、39、88-95 .
- (2) 高杉真司、2002 . 地中熱 (地熱直接) 利用の現状と将来展望 - ゼロエミッションを目指して - . 地熱エネルギー、27、435-450 .

コラム 5

- (1) 物理探鉱技術協会、1979 . 物理探査用語辞典 .
- (2) 物理探査学会、1989 . 図解物理探査 .
- (3) 地盤工学会、1997 . 物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究 . 物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究委員会報告書 .
- (4) 空中総合地熱構造探査システムの研究、1998 . 文部省科学研究成果報告書 .
- (5) 公開出願特許、1997 . 地下構造探査方法 (地上ソース型

コラム 6

- (1) 北野晃一、堀義直、楠建一郎、海江田秀志、伊藤久敏、山本武志、1995 . マグマ発電技術の展望と課題 - 夢のエネルギーの実現にむけて - . 電力中央研究所調査報告 : U95023 .
- (2) 資源エネルギー庁のマグマ発電に関するホームページ : <http://www.enecho.meti.go.jp/beforeenecho/ground/pages/page2.html>
- (3) 坑井内同軸熱交換方式を考案した産総研盛田氏のホームページ : <http://staff.aist.go.jp/k.morita/DCHE.html>

コラム 7

- (1) 北野晃一、楠建一郎、品田泰、海江田秀志、山中芳郎、1992 . ジオサーモピア構想の概念設計 - 地熱を利用した理想郷の創出をめざして - . 電力中央研究所委員会報告 : U92801 .

高温岩体発電に関する特許一覧

名 称	登録番号	登録日	公開番号	公開日	主発明者
耐熱型ボアホールテレビジョン装置	186666	平 4. 8.11 (H 8)			堀 義 直
高温岩体発電用の岩盤における透水層作成工法	1909350	平 7. 3. 9 (H 6)			堀 義 直
高耐熱深部型ボアホールスキヤナ装置	2676368	平 9. 7.25 (H 9)			堀 義 直
C S A M T 法 の た め の 受 信 装 置	2017544	平 8. 2.19 (H 8)			楠 建 一 郎
高 耐 熱 パ ッ カ - 装 置	2954675	平11. 7.16 (H11)			堀 義 直
比抵抗トモグラフィ - 法測定装置	3127088	平12.11. 2 (H12)			鈴木 浩 一
高温岩体発電用多段注水装置	3245468	平13.10.26 (H13)			堀 義 直
推進工法でのトンネル掘進路誘導装置	3285530	平14. 3. 8 (H14)			楠 建 一 郎
孔 内 流 速 測 定 装 置			平08-165878	平 8. 6.25	堀 義 直
孔 内 流 速 測 定 装 置			平08-165879	平 8. 6.25	堀 義 直
地盤の接地抵抗の低減方法			平08-241778	平 8. 9.17	楠 建 一 郎
地下構造探査方法			平09-304547	平 9.11.28	楠 建 一 郎
膨張式パッカ - 装置			平11-013378	平11. 1.19	楠 建 一 郎
掘削方法及びこれを使用する掘削装置			平11-217983	平11. 8.10	堀 義 直
透水層作成装置とこれを使用する透水層作成方法			平11-223177	平11. 8.17	堀 義 直
高温岩体発電方法及びこれを利用する高温岩体発電装置			平11-223176	平11. 8.17	堀 義 直
マ ル チ 管			平11-344187	平11.12.14	堀 義 直
岩盤の亀裂計測方法及びその装置			2002-349178	平14.12.4	新 孝 一

既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3
NO. 39 「新時代に向けた電力システム技術」2000. 6
NO. 40 「原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて」2000. 11
NO. 41 「需要家と電気事業のエネルギーをトータルで考える
需要家の特性解明と省エネ技術」2000. 11
NO. 42 「原子力発電所の人工島式海上立地」2001. 1
NO. 43 「酸性雨の総合評価」2001. 2
NO. 44 「石炭ガス化複合発電の実現に向けて
実証機開発の支援と将来への研究展開」2001. 10
NO. 45 「地球温暖化の解明と抑制」2001. 11
NO. 46 「微粉炭火力発電技術の高度化
環境性の向上と発電コストの低減」2002. 11
NO. 47 「商用周波磁界の生物影響研究」2002. 11
NO. 48 「送電設備の風荷重・風応答評価技術」2003. 2

編集後記

京都議定書で約束している地球温暖化ガスを削減するためには、省エネルギーの推進、発電効率の向上、CO₂排出量の少ない電源の積極的導入など、さまざまな対応が必要である。一方、自然エネルギーをある一定割合以上に導入することを義務づけるRPS (Renewables Portfolio Standard)制度が、平成15年4月から施行される。対象となるエネルギーは、1. 風力 2. 太陽光 3. 地熱 4. 水力（水路式の1000kW以下の水力発電） 5. バイオマスである。

本文中にもあるように、現在わが国の地熱発電の発電設備容量は55万kWであり、全発電設備容量に占める割合は0.20%に過ぎない。しかし、発電電力量に占める割合は0.32%と、数値はやや上がる。これは地熱発電がベース的に用いられているからに他ならない。自然エネル

ギーの中で、地熱エネルギーはとくに安定した特性をもつ優れたエネルギーである。

地熱エネルギーをより大規模に利用しようという「高温岩体発電」の雄勝での研究は、さまざまな成果を得て、ここで一区切りをつける形となる。今後、オーストラリアでの高温岩体発電の実証研究への参加などが決まっており、さらに期待は膨らんでいく。

地熱は地球の恵みである。エネルギー資源の多くを国外に依存しているわが国であるが、地下には「地熱」という世界に誇るエネルギー資源が眠っていることを最後にもう一度記して、編集後記に代えたい。本冊子が皆様の未利用地熱資源の開発について、ご理解いただく一助となれば、望外の喜びである。



電中研レビュー NO.49

平成15年3月20日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]
☎ (03) 3201-6601 (代表)
E-mail : www-pc-ml@criepi.denken.or.jp
<http://criepi.denken.or.jp/>
印刷・株式会社 電友社

本部 / 経済社会研究所 〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎ (03) 3201-6601 我孫子研究所 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎ (04) 7182-1181
狛江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター 横須賀研究所 〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎ (0468) 56-2121
ヒューマンファクター研究センター / 低線量放射線研究センター / 事務センター 赤城試験センター 〒371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎ (027) 283-2721
〒201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1 ☎ (03) 3480-2111 塩原実験場 〒329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎ (0287) 35-2048



この冊子は大豆インキで印刷しています



古紙配合率100%の再生紙を使用しています