

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。

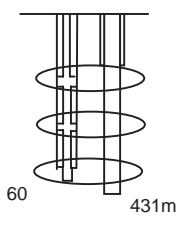
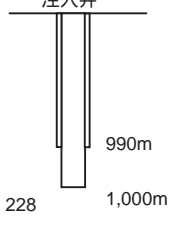
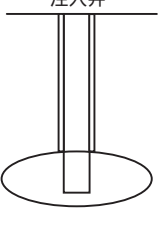
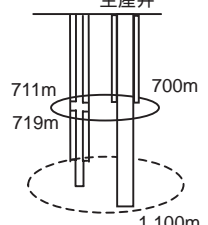
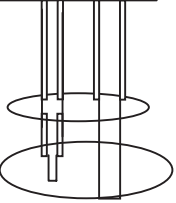
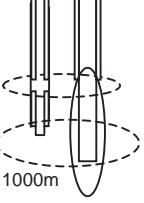
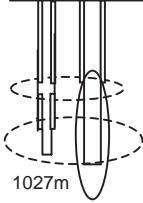
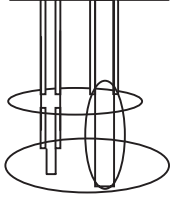
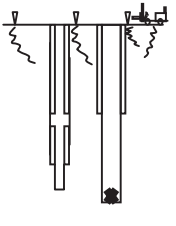
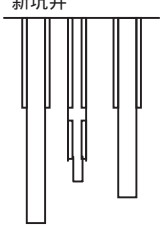
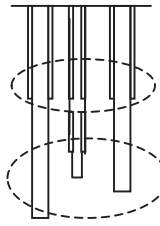
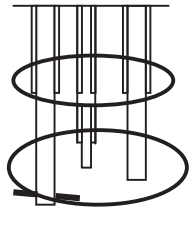
フェーズⅠ		フェーズⅡ (1989~1992)		
1986~1988年 昭和61年~63年	1989年 平成元年	1990年 平成2年	1991年 平成3年	1992年 平成4年
(多段貯留層造成法の開発) 秋の宮地点基礎実験 CRSP法による3段貯留層の造成 深さ: 400m 温度: 60 岩盤: 火山礫凝灰岩 導通試験	雄勝地点における実験開始 候補地点 (鳥取、北海道、雄勝) CSAMT、TDEM調査(雄勝地点)	(貯留層計測技術の開発) 注入井(OGC-1)の掘削 深さ: 1,000m 坑底温度: 228 岩盤: 花崗閃緑岩 注入井検層 掘削コア調査・物性試験 計測井(OGC-0)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) 定方位コア 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ものである。

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。

