

地熱開発のための調査および坑井掘削

Exploration for Geothermal Resources and Drilling of Geothermal Wells

かた ぎり くに お* あん どう しげ ゆき
片 桐 邦 雄* 安 藤 重 幸**

1. ま え が き

我が国における最初の企業の規模の地熱発電所である松川地熱発電所が営業運転を開始してから20年が経過した。その後の地熱開発の進展は、必ずしも急速ではないが、着実な歩みをみせており、現在運転中の発電所9箇所、総認可出力21.4 MWに達し、世界で第5位の地位を占めている。

地熱の開発に係る技術、特に探査技術と掘削技術は、当初他の地下資源の開発に関連してきたものの応用として使われてきた。しかし、昭和48年に国による地熱調査が開始されるとともに、地熱開発に適した技術の研究・開発が積極的になされるようになってきた。

このような国の地熱開発政策の進展とともに、民間企業による地熱開発も進み、大きな成果をあげつつある。

本論文では、これらの成果を踏まえ、地熱資源の探査・掘削技術の現状を紹介する。なお、個々の要素技術の詳細は、紙数に限られているため割愛し、特徴的な事項について触れていく。

2. 地熱資源の探査

地熱資源の探査・開発には、他の地下資源の場合と同様に、各種の地上探査（地質調査、地化学探査、物理探査）が重要な役割を担っている。しかし、地熱資源が地下深所の主として断層系に規制された貯留層に貯えられている高温の流体であるということから、探査で明らかにすべき課題は、次の3項目に要約される。

- ① 熱源の位置・規模を含む地下の温度分布
- ② 地下での流体の存在
- ③ 地熱流体の貯留に適した断層系を含む地質構造

これらの課題を解決するため、予察調査から地上概査、そして精査に至る探査

の各段階で、その進展状況に応じた各種の探査手法が用いられる。表一1に探査課題と、各探査段階で用いられる探査手法を示した。

探査の各段階が終了すると、獲得されたデータの量・質に応じて地熱構造のモデル化がなされ、次段階の探査へ進むべきか否か、あるいは次段階で実施される探査対象地域・探査手法が決定される。

また、地上探査により獲得されたデータの坑井資料に基づく再解析は、面的な広がりを持つ地上探査資料と、点としての性格を有する坑井資料の結合による、立体的な地熱構造モデルの作成に極めて重要な役割を果たす。

しかし、地熱開発の歴史が浅いこともあり、石油探査における反射法地震探査のような決定的探査手法が確立されていないのが、地熱探査の現状である。

表一2に、葛根田地熱地域における地熱発電所建設に至るまでに実施された探査の状況を示す。

3. 地熱井の概念

3.1 地熱井の分類

地熱開発の初期から発電までの段階において掘削される

表一1 地熱探査の課題と各探査段階で用いられる調査手法

	熱源・温度状況	流体の貯留構造	流体の存在・性状
予察調査 (100km ² 以上)	放熱量調査 変質帯調査 流体地化学調査 土壌地化学調査 土壌ガス地化学調査	地質調査(1/50 000) 土壌地化学調査 土壌ガス地化学調査	変質帯調査 流体地化学調査
地上概査 (50~100km ²)	火山岩熱源調査 変質帯調査 流体地化学調査 土壌ガス地化学調査	重力探査 地質調査(1/25 000) 土壌ガス地化学調査	比抵抗調査 地磁気地電流法 ダイポールマッピング法 自然電位調査 変質帯調査 流体地化学調査
精査(前半) (地上精査)	熱流量調査	地震探査 反射法地震探査 微小地震観測 地質調査(1/10 000~1/5 000)	比抵抗調査 地磁気地電流法 シュランベルジャー法
精査(後半) (構造試験)	温度検層 X線回折分析 流体包有物試験	地質柱状図作成 音波検層 BHTV検層	X線回折分析
調査井	温度検層 X線回折分析 流体包有物試験	地質柱状図作成 音波検層 BHTV検層	X線回折分析 坑内流体採取

*日本重化学工業株式会社 地熱事業部副事業部長

**日本重化学工業株式会社 地熱事業部技術部課長代理

表—2 葛根田地熱地域における探査・開発の経緯

調 査 段 階	概 査 精 査 開 発 発 電																備 考													
調 査 項 目	'58	'59	'60	'61	'62	'63	'64	'65	'66	'67	'68	'69	'70	'71	'72	'73		'74	'75	'76	'77	'78	'79	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86
地 質 概 査																														GS-JMC共同研究
流 体 地 化 学 調 査																														#
30 m 深 地 温 調 査																														#
垂 直 法 電 気 探 査																														#
AT-1 の 掘 削																														#
GSR-2 の掘削・調査																														#
地 質 精 査																														JMC 開発調査
変 質 帯 調 査																														#
流 体 地 化 学 調 査																														#
土 壌 ガ ス 地 化 学 調 査																														#
垂 直 法 電 気 探 査																														#
10 m 深 地 温 調 査																														#
放 熱 量 調 査																														#
反 射 法 地 震 探 査																														#
調 査 井 掘 削 ・ 調 査																														#
重 力 探 査																														#
電 磁 探 査 (AFMT法)																														#
反 射 法 地 震 探 査																														#
生 産 井 ・ 還 元 井 の 掘 削																														JMC蒸気生産設備
発 電 設 備 の 工 事																														TEP
発 電 開 始																														#

注) GS: 地質調査所, JMC: 日本重化学工業(株), TEP: 東北電力(株)

地熱井は、構造試錐井、調査井、生産井および還元井に分類される。

(1) 構造試錐井および調査井

調査段階で掘削される坑井で、その掘削坑径は最終で 70 mm の小坑径から、200 mm ぐらいの大坑径まで種々のものがある。小坑径の坑井はそのほとんどがスピンドル型機によるワイヤーライン工法でコアボーリングが行われるが、大坑径井では石油鉱業で用いられるロータリー型式の掘削が行われる。掘削深度は、小坑径井で 2 000 m ぐらいまでであるが、大坑径井では 3 000 m を越える例（大規模深部地熱発電所環境保全実証調査、九州豊肥地域）がある。

(2) 生産井

調査井等によって地熱賦存量と開発の可能性が確認されたのち、蒸気を採取するため大坑径で掘削される坑井である。坑井の仕様は、その掘削深度と最終坑径により決定されるが、おおむね 1 500～3 000 m の深度で、最終坑径が $8\frac{1}{2}$ ～ $10\frac{3}{4}$ インチ (216～273 mm) の範囲である。このこ

とは、前述の大坑径調査井仕様とほぼ同様である。

(3) 還元井

調査井と生産井からは、蒸気とともに熱水が多量に噴出する。この熱水を環境保全等の目的で地下に還元するための坑井で、大坑径で掘削される。

各坑井における坑井仕様を図—1 に示す。

3.2 掘削位置および目標の決定

(1) 構造試錐井および調査井

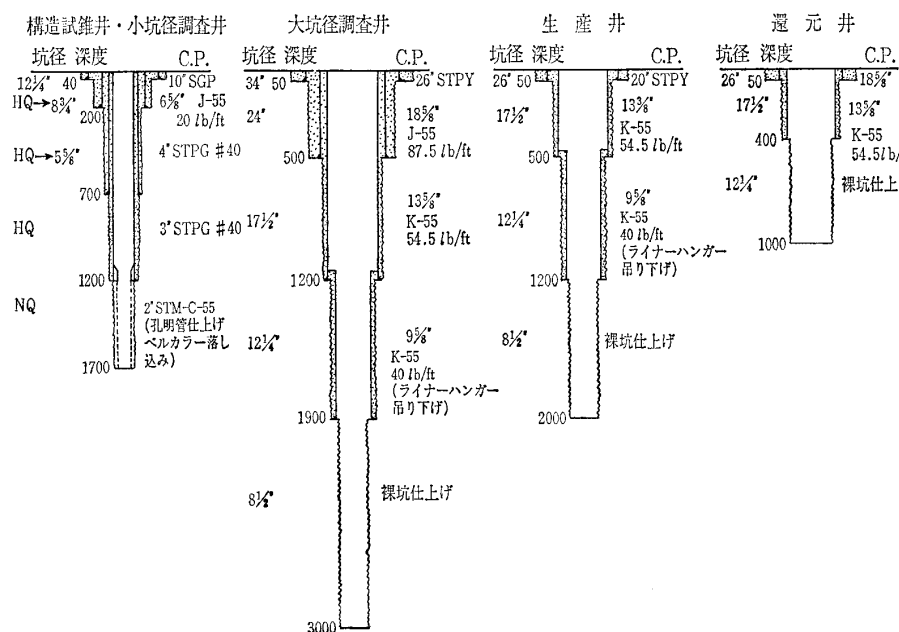
構造試錐井は、調査地域の地質構造と熱構造（熱分布）を解明するために掘削される。したがって、構造試錐の掘削位置は、前述の各種地上調査結果の総合的な解析に基づいて、地下構造調査の範囲を定めた上で、地熱活動の中心と考えられる地点を中心とし、主要な地質構造方向を考慮して、かつ地域内にある程度均一に配点されるように選定される。

調査井は、地下から地熱流体を噴出させることを目的として掘削される。したがって、調査井の掘削地点は、構造

試錐井の結果を主とし、地上調査の結果を加味して、地熱流体の存在が最も期待される地点を中心に、かつ、地熱貯留層の範囲が確認できるように配置される。

(2) 生産井および還元井

地熱流体の貯留層は、断層の周辺、岩相境界、地層の境界、または貫入岩沿い等に発達する破碎帯であると考えられている。したがって、生産井の掘削目標は破碎帯に設定される。すなわち、地上調査および調査井で確認された断層、褶曲の軸部、地層境界、微小地震の震源の集中域などの破碎帯の存在が考えられる地域がまず選ばれ、地熱流体の存在の可能性の高い地



図—1 地熱井坑井仕様の例

域として低比抵抗帯や地震探査の低周波数帯が選ばれる。これらの条件が複合している地点は、特に有望である。

還元井の掘削目標も、基本的には生産井と同様な破砕帯である。しかし、還元熱水による貯留層温度の低下、すなわち生産能力の低下を防ぐため、深度、ケーシングプログラム、あるいは生産井との位置関係に配慮する必要がある。

3.3 掘削の方式

地熱井の掘削に当たっては、坑井の目的、深度、坑径、地質等の地熱井特有の条件を考慮し、更に経済的な検討も加えて最も適合性の良い掘削機が選択される。大型機、小型機とを問わず、コンパクトで性能が良く、かつ能力に余裕のあるものが望ましい。

(1) スピンドル型式

この方式の掘削機は、もともとは地質調査や探鉱のために利用されてきたものである。一般には小坑径で掘削能力が1000m程度のものであったが、最近スピンドル式掘削機にロータリーテーブルを併せて装備し、巻揚装置の吊上能力も45～50tと、ロータリー式掘削機とのギャップをせばめた機種も開発された。スピンドル型は、原動機で発生した回転運動を、伝動装置を経てスイベルヘッドに伝え、それに連結されたボーリングロッド、更にロッドの先端に取り付けられたビットに回転、給圧および進退運動を伝えて掘削するものである。この方式の利点は、ワイヤーライン工法による全深度に及ぶコア採取が可能で、装置が軽量でコンパクトであることで、地熱探査のような山間地での仕事に適している。また、掘削費も比較的低廉であり、構造試験井や小坑径調査井の掘削に活用されている。しかし、ロッドの肉厚が薄いので、高いトルクに対しては無理が利かない。

(2) ロータリー型式

この方式は、石油鉱業で用いられるものと同じであって、過去数10年来開発されてきた掘削技術や経験が基本となっている。地熱井の掘削規模は、800～2000mの範囲が多く、石油井に比べて浅い深度のものとなる。地熱井では、地質が硬質でかつ高温であるなど特有な条件のため、石油掘削の現状技術では対応しきれない分野があり、この分野への

技術改善や研究開発が期待されている。この掘削方式の特徴は、チェーン駆動でロータリーテーブルを回転させ、この回転がケリー（ドリルステム）、その下方に接続する掘管類（ドリルストリングス）に伝達される。ビットに対する給圧方式は、掘管下部に接続されたドリルカラー（荷重カラー）の自重によるもので、このカラー重量の何割かの重量をビットに与えて掘進する。一連の掘り具はワークライン（鋼ロープ）で櫓に吊られ、その一端はドローワークスのドラムに巻き取られており、ドラムの回転により掘り具を上下させる。ドローワークスは、またロータリーテーブルを回転させる役割を持つ。このテーブルの回転により、ケリーと掘管類に回転が伝えられ、先端部のビットで掘削が行われる。

掘削装置には、通常2台の泥水ポンプが備えられる。1台は掘削用に、他の1台は調泥用と補助ポンプ兼用に供される。掘削泥水は、ロータリーホースを通してポンプで圧送され、掘管先端のビットノズルから坑底に噴射される。噴射された泥水は、坑底を冷却しながら掘屑を取り込んで

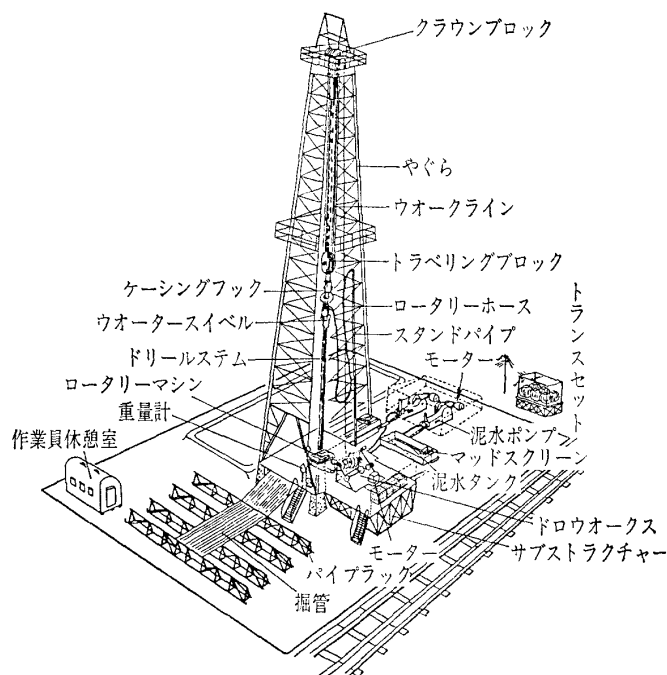


図-2 ロータリー式掘削機

表-3 地熱井深度別主要掘削装置

項目	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m
櫓の高さ	38m	38m	40.5m	43.3m	43.3m	44.8m	44.8m
ドローワークス型式	T-20	T-38	T-55	T-70	80B	T-110	1320M
ロータリーマシン	17 $\frac{1}{2}$ "	20 $\frac{1}{2}$ "	20 $\frac{1}{2}$ "	20 $\frac{1}{2}$ "	27 $\frac{1}{2}$ "	27 $\frac{1}{2}$ "	37 $\frac{1}{2}$ "
泥水ポンプ	7 $\frac{1}{4}$ "×14"	7 $\frac{1}{4}$ "×14"	7 $\frac{1}{2}$ "×16"	8"×14"	7 $\frac{3}{4}$ "×15"	*7"×12"×160SPM	*7 $\frac{1}{4}$ "×12"SPM
ドローワークス定格馬力	300	400	700	800	1000	1500	2000
クラウンブロック	30"×5車	36"×5車	42"×6車	42"×6車	45"×6車	48"×6車	50"×7車
トラベリングブロック	30"×4車	35"×4車	36"×4車	40"×5車	45"×5車	48"×5車	50"×6車
ワークライン径	26mm	28mm	28mm	32mm	32mm	32mm	34mm
ケーシングフック	150t	150t	175t	300t	300t	350t	500t
スイベル	300t×6"	300t×6"	300t×6"	300t×6"	400t×6"	400t×6"	400t×6"
ロータリーホース	3 $\frac{1}{2}$ "×55'	3 $\frac{1}{2}$ "×55'	3 $\frac{1}{2}$ "×55'	4"×55'	4"×55'	4"×55'	4"×55'
ケリー	4 $\frac{1}{4}$ "×12m	4 $\frac{1}{4}$ "×12m	4 $\frac{1}{4}$ "×12m	5 $\frac{1}{4}$ "×12m	5 $\frac{1}{4}$ "×12m	5 $\frac{1}{4}$ "×12m	5 $\frac{1}{4}$ "×12m

*Triplex Plunger Slush Pump

・ドローワークスの型式はナショナル型を例とした。

掘管類と坑壁の間隙部を上昇して地上に戻り、マッドスクリーン等で掘屑や泥質分を除去したのち、泥水タンクから再び泥水ポンプで送り出される。

装置の掘削能力は、主としてドローワークスの巻き揚げ能力と泥水ポンプの循環能力によって定まる。図-2に掘削装置の概念図を、表-3に深度別主要掘削装置を示した。

3.4 坑井掘削

(1) 掘削計画の作成

地熱井の掘削は、まず掘削計画を立てることから始まる。掘削の目的、深度、および工程が決まれば、適正な掘削装置が選定され、予想される地質構造に基づいて掘削計画が立てられる。この立案に際しては、調査井、生産井いずれの場合もケーシングプログラムの決定がまず第1になされる。

ケーシングの設置深度は、生産井の場合は調査井の資料を参考にして設定され、調査井の場合は地上調査結果に基づく予想地質断面図、貯留層の位置、および温度勾配等を参考にして設定される。これと同時に、ケーシングの仕様（寸法、グレード、ネジ等）が決められる。ケーシングプログラムの例は図-1に示されているとおりである。

ケーシングの管種は、圧潰力、内圧、および引張り強さが坑井条件に十分適合したものでなければならない。特に地熱井のケーシングは、地熱流体が直接に触れるため熱の影響、腐食、浸食などに対する配慮が必要であり、油井用継目無鋼管で、予想条件より1クラス上のグレードおよび肉厚のものを採用することが望まれる。

ケーシングプログラムが決定されると、この計画に従ってビット計画を立てられる。ケーシングパイプと坑壁との間隙部がセメントで完全に充填されていることが必要であるので、ビット径は十分な余裕をもつことが必要とされる。

構造試験井と小坑径調査井では、主としてダイヤモンドコアビットが使用され、トリコーンビットが掘削に用いられている。一方、大坑径調査井、生産井、および還元井は、主としてトリコーンビットで掘削される。深度や地質に応じて、タングステンカーバイドインサートビット、あるいはツースタイプビットが選択される。一般に地熱井は高温で、岩石も硬質であるので、ビットに対する条件が苛酷であり、ビットライフが短命である。このことが地熱井掘削コストの上昇の原因となっており、今後の開発に期待されるところが大きい。

泥水計画は、ケーシングプログラムの検討時に想定される温度勾配、逸泥層、崩壊層、および生産層に対処するため、どのような種類の泥水が適合するかを考慮して、必要とされる調泥剤が選択される。地熱井の掘削において重要視されるのは、高温下において安定した性状を示す泥水でなければならないことである。現在、地熱用泥水としては、BH泥水が主体であるが、高温用泥水としてセピオライト系泥水も採用されている。表-4に泥水材料の分類表を、

表-4 泥水材料の分類表

(参考までに商品名も記す)

加重剤	—バライト—テルパー
粘土類	—ベントナイト—クニゲルV ₁ , VS, テルゲル —アタパルジャイト —アスベスト—スーパースペストス, HPO —セピオライト—サーモゲル
ポリマー類 (脱水減少, 増粘, 保護コロイド剤)	—C M C—テルセルローズLP, HP, TL, TM —ポリアニオニック—テルポリマーL, H, ドリスパックス —セルローズポリマー— —バイオポリマー—XCポリマー —粉—テルデキスト, デキストリッド
分散解膠剤	—複合リン酸塩 —フミン酸誘導体—テルナイトB, BMナイト, BMナイトK, テルナイトBH —リグニンスルホン酸—テルリグ, テルナイトFBL, リグネート, リグネートK, リボナイト —タンニン誘導体—テルコン, デスコ, テルナイトSMQ —特殊分散安定剤—テルフロー, ハイフロー, SS (高温用特殊添加剤) MA, G20LL, アクタフローS
界面活性剤	—テルDD (湿潤洗浄剤), スピーダーP (湿潤潤滑剤), スピーダーX (浸透, 湿潤潤滑剤), テルクリーン (水溶性潤滑剤), アステックス (潤滑, 裸坑壁保護強化剤)
逸水防止剤	—テルストップ (綿実しぼり滓), テルプラグ (クルミ殻), テルマイカ (雲母片), テルシール (ひる石粉砕物), パナチップ (フィルム裁断物), シークレー (アスベストス), マッドシール (パルプ加工品), ソリッドシール (高脱水スラリー用珪藻土系物質)
一般薬品	—NaOH, KOH, KCl, Ca(OH) ₂ , NaHCO ₃ , Na ₂ CO ₃ , CaCl ₂ , CaBr ₂
消泡剤	—デホーマー15, アルミニウムステアレート

表-5 BH-特殊ポリマー泥水の標準組成⁶⁾

泥水材料	常温～200℃までの坑井の場合	200℃以上の坑井の場合
清水	100	100
クニゲル VS	3～4	0～2
スーパーアスベストまたはHPO	1～2	0～2
サーモゲル	—	2～4
テルナイト BH	2～3	1～2
テルフロ —	0.5～1	—
ハイフロ — 25	—	0.5～1
テルナイト SMQ	—	0.5～1
苛性ソーダ	0.3～0.5	0.3～0.5

注) 清水 100 に対する添加重量比。

また表-5に泥水の標準組成を示した。泥水計画の作成に当たっては、ハイドロリクス計画も含めて考える必要がある。

掘削用循環流体には、泥水系のほか、空気混合泥水や圧縮空気がある。圧縮空気を用いた空気掘削は、アメリカのガイザーズ地区で最初に用いられ、日本でも松川や葛根田での使用実績がある。また、空気混合泥水掘削は、泥水に空気を混入することにより泥水の見掛け比重を低下させて掘削する工法で、国内でも鬼首（宮城県）、滝上（大分県）、伏目（鹿児島県）で大きな成果を挙げている。これらの工法は、逸泥対策が不要であり、かつ冷却による生産障害が少ないという利点を有する。

傾斜井の場合には、目的坑底位置に合わせて、増角率や減角率の程度、最大許容傾斜角度、傾斜掘削開始点(KOP)

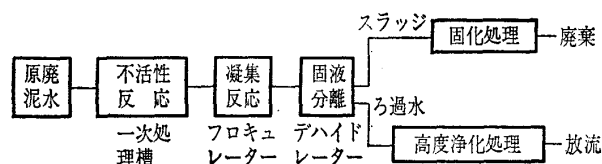


図-3 廃泥処理システムフローシート

深度が決定され、傾斜掘削計画が立てられる。

その他の計画としては、検層、コア採取、噴気試験などがあり、これらを含めてその坑井のドリリングチャートが作成される。

松川地域（岩手県松尾村）において最近掘削された生産井のドリリングチャートを図-4に示す。

(2) 傾斜井の掘削

傾斜井は、なんらかの理由で目的位置直上の地表に坑口が設置できず、他の地点から坑井の方位・傾斜を制御しながら目的位置に達するために掘削されるほか、坑芯が逸脱した場合の矯正や、ドリルストリングスの抑留、坑内の遺留品によって掘進継続が不可能な場合の枝掘（サイドトラック）等で掘削される。また、地熱井では環境上あるいは経済的なメリットから基地掘削が行われている。さらに地熱貯留層をなす断裂系が縦方向に発達する地域では、坑井の成功率を高めるためにも傾斜掘削が活用されており、地熱井には欠かせない掘削法である。

国内の地熱井では、昭和45年に松川地域のM-7号井において初めて傾斜掘削が採用された。この時の実績は、最大傾斜角 12° 、掘削深度1280m、垂直深度1264m、偏距179mといった程度であった。しかし、現在では最大傾斜 $30\sim 40^{\circ}$ 、掘削深度2000m以上、偏距500m以上の傾斜掘削が行われている。

傾斜掘削の偏距具としては、現在大部分の坑井で坑底駆動モーター（ターボドリル、ダイナドリル、ナビドリル）が使用されている。坑底駆動モーターは、ドリルストリン

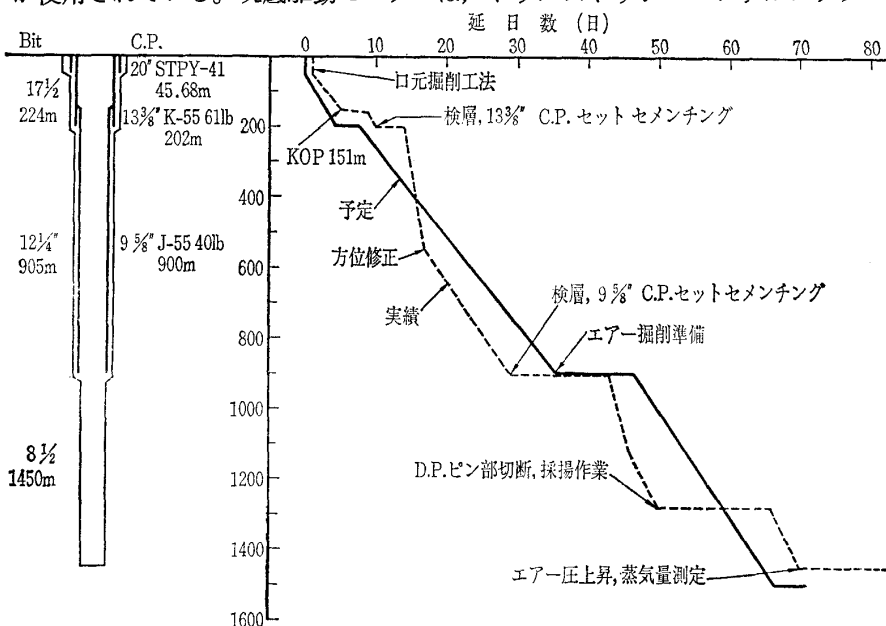


図-4 松川地域M-11号井ドリリングチャート

グスを回転させずに、ビットにのみ回転運動を与えるために用いられる。これらの使用により、坑井の方位・傾斜角が計画した値に近づくと、坑底駆動モーターの使用を中止し、コントロール掘進に移る。これは、掘削機編成中のスタビライザーの位置・個数・外径や、ビット荷重・回転速度等を調節して坑井の方位・傾斜角を制御しようとするもので、増角・沿角・減角などの編成種類がある。

(3) 廃泥処理

掘削作業の進行に伴い、多量の廃泥水や掘屑類が排出されるが、これらが環境汚染を起こさないような処理計画も重要である。

廃泥水は、無機コロイド粘土鉱物、有機分散剤、有機親水ポリマー、界面活性剤、油分などを含む複雑な組成となっている。また、地層中の粘土、シルト、砂分その他の岩石類が泥水中に混在するなど、一般の工業廃水や土木業界での廃水と異なったものである。廃泥処理プロセスの1例として、テルナイト方式を図-3に示す。

3.5 坑井掘削の実施例

この坑井は、松川地熱発電所で蒸気補充井として掘削された深度1450mの坑井である。掘削機はナショナルT-70型、主力ポンプにはG-700型が使用され、傾斜掘削が行われた。

ケーシングプログラムは、コンダクターパイプ（深度50mまで、20インチ（約50.8cm）STPY）、サーフェスケーシング（深度150mまで、 $13\frac{3}{8}$ インチ K-55, 61 lb/ft）、プロダクションケーシング（深度900mまで、 $9\frac{5}{8}$ インチ N-80, 40 lb/ft）で、生産層は裸坑仕上げである。なお、コンダクターパイプの設置までは、経済性と能率を考慮して、土木機械による26インチ坑の掘削と20インチケーシングを短時間に行える口元掘削工法を採用した。

ケーシングセメンチングには、APIクラスGセメントにシリカフラワー30%を混合した地熱用セメントを用い、シックニングタイム調整のため遅硬化剤を添加した。なお、サーフェスケーシングのセメンチングには二栓式セメンチングを、また、プロダクションケーシングのセメンチングにはライナーセメンチングを行った。

17 $\frac{1}{2}$ インチ坑の掘削には、V3FGのビットを、12 $\frac{1}{4}$ インチ坑の掘削にはK-30、およびV3FGのビットを、8 $\frac{1}{2}$ インチ坑の掘削にはK-30、およびV3FGのビットを使用した。いずれも良好な成績であった。

掘削用循環流体としては、12 $\frac{1}{4}$ インチ坑の掘削までは水-ベントナイト系の泥水を使用した。生産層となる8 $\frac{1}{2}$ インチ坑の掘削には圧縮空気を用いて、空

No. 1703

気掘削を採用した。これは、蒸気層の泥水による冷却を防ぐとともに、隣接する坑井への干渉を防止するためである。

傾斜掘削の KOP は 151m, 坑底の方位は S 37°07' W, 最大傾斜角は 39°30', 偏距 605m で、坑底の垂直深度は 1 274m である。傾斜掘削の偏距具にはナビドリルを用いた。

坑井掘削中は、5 m 間隔でカッティングスを採取し、地質柱状図の作成に供したほか、帯磁率の測定や流体包有物の充填温度測定にも用いた。また、各段のケーシングパイプ挿入前には温度検層と電気検層を実施した。坑井掘削終了後には、特性試験を実施し、坑井の能力の評価を行った。これらの調査・測定については、第 4 章を参照されたい。

4. 坑井調査

坑井の掘削時に、地層の各部分の性質を評価するために、コアおよび掘層（カッティングス）の岩石・鉱物の同定、岩石の物理・化学的性質の測定が行われ、また、掘削終了後には、各種の物理検層が行われる。

4.1 コアおよびカッティングスの調査

(1) 地質柱状図の作成

コアあるいはカッティングスの観察に基づいて地質柱状図を作成する手順は、他のボーリングの場合と同様である。地熱井では、岩石の熱水変質の観察と、断層・破碎帯などの割れ目の観察が重要である。

岩石の熱水変質の程度は、最終的にはコア・カッティングスの X 線回折分析で決定されるが、肉眼による非変質・弱変質・強変質（粘土化変質あるいは珪化変質）の区分も重要である。

割れ目の観察は、その頻度、数、開口しているか否か、割れ目を充填している鉱物の有無・鉱物種などについて記載する。この時、掘削作業中の逸泥、掘進率の変化およびポンプ圧の変化なども割れ目の検出に有効である。

(2) 室内試験

コアやカッティングスについては、次のような室内試験が実施される。

i) コア

- 顕微鏡観察
- X 線回折分析
- 流体包有物充填温度測定
- 物性測定（密度、帯磁率、弾性波速度、熱伝導率）

ii) カッティングス

- X 線回折分析
- 流体包有物充填温度測定
- 物性測定（帯磁率）

これらの室内試験結果に基づき、地下の変質分帯がなされたり、物性断面が作成されるとともに、必要に応じて地上探査結果の再解析が行われる。

4.2 物理検層

地熱井において実施される主な物理検層の種類と、測定項目およびその目的を表 1 に示す。これらの内、特に重要なものについて、以下にその概要を説明する。

(1) 温度検層および温度回復試験

地熱井において温度検層および温度回復試験を実施する目的は次のとおりである。

- 温度回復試験からの地層平衡温度の推定
- 温度-深度曲線の異常部からの破碎帯あるいは地熱流体流入点の検出
- 温度-深度曲線のパターンからの地下での流体の動きの推定（天水の下降域、地熱流体の上昇域、あるいは流体の動きのない熱伝導域であるかの推定）
- 注水試験中の温度-深度曲線からの注水した水の流出点の推定

(2) 坑井特性試験

調査井、生産井および還元井の生産・還元能力の判定のために実施されるもので、坑口二次弁の開度を調節し、坑口の圧力を変化させながら噴気・還元し、噴気の場合には蒸気・熱水の噴出量、還元の場合には還元量の変化を測定する。

(3) プロダクション検層

噴気中あるいは還元中の坑井において、温度・圧力・流量検層を同時に行い、坑井内の地熱流体の温度、貯留層圧力、流体の流入・流出深度とその規模、フラッシング深度を測定し、坑井の生産能力もしくは還元能力を判定するために実施される。

(4) 圧力遷移テスト

1 本ないし複数の坑井を利用し、坑口主弁の全開後あるいは密閉後の坑底圧力の変化を測定し、坑井近傍の地層の透水量係数、あるいは浸透率-層厚積を算出し、また、坑井の生産能力もしくは還元能力を評価するために実施される。

(5) 坑内流体の採取

坑井内に流体サンプラーを降下し、フラッシング開始前の一相流状態の流体の化学性状を調査し、地下での地熱流体の性状を正確に把握することができる。

(6) トレーサーテスト

沃化カリ (KI) のような試薬を還元井に投入し、それが生産井あるいは地上の温泉等に再湧出するか否か、再湧出する場合には再湧出までの時間、量を追跡することにより、地熱流体の流動経路、その透水係数、還元熱水の生産流体への混入率等を明らかにし、ひいては生産井と還元井の配置やケーシングプログラム作成の資料とするために実施される。

4.3 坑井を用いた物理探査

調査井、生産井あるいは還元井を用いて地熱貯留層を三次元的に解明するための物理探査手法が提唱されている。

これらの探査の地熱井での実施例はまだ少ないが、次のようなものがある。

(1) VSP 探査 (Vertical Seismic Profiling)

坑井内に地震計を 50～100m 間隔で降下させながら、地上の発震機で起こした地震波を検出し、破碎帯の位置、広がり、卓越方向のマッピングを行うものである。

(2) チューベル法電気探査および流電電位法

電流電極としてケーシングパイプを用いる電気探査で 2 本の坑井を電流電極対 (チューベル法) として用いるか、一方を坑井、他方を地上に設置 (流電電位法) し、地下の比抵抗分布をシュランベルジャー法電気探査より深度方向の解析能力高く、しかも、マッピングしようとするものである。

5. 結 言

以上、簡単に地熱資源の探査・掘削技術について紹介してきた。

地熱エネルギーは、国産のエネルギー資源の 1 つとして重要な役割を担うものであり、その開発に大きな期待が寄せられている。

一方、地熱開発は極めてリスクの大きい事業であり、こ

のリスク低減のための技術開発が要求されている。その中でも、坑井の成功率を高めるための、探査技術の向上・開発と、地熱開発の中で最もコストの高い坑井掘削に係る掘削技術の向上・開発が急がれている。

また、これらの技術には、地熱特有のものもあるが、同時に関連諸分野との共同・協力のもとで発展する技術も多く、今後の情報交換も含めた協力体制が相互の技術発展に有効と思われる。

文 献

- 1) 湯原浩三監修：地熱開発総合ハンドブック，フジ・テクノシステム，pp.1～1109，1982.
- 2) 森 康夫・陶山淳二：地熱エネルギー読本，オーム社，pp.1～232，1980.
- 3) 石油技術協会編：石油鉱業便覧，石油技術協会，pp.1～777，1983.
- 4) 松尾圭二：地熱井掘削総論 (地熱技術者講習会テキスト)，新エネルギー財団，pp.3-1-1～3-1-101，1983.
- 5) 地熱技術開発(株)：傾斜掘概説，地熱技術，Vol.10，No.4，pp.1～52，1985.
- 6) 沖野文吉：ボーリング用泥水，技報堂出版，pp.1～398，1981.
- 7) Newson, M.M., Barnette, J.H. and Baker, L.E.: Geothermal well technology drilling and completion program plan, Sandia Laboratories Energy Report, 1978.

(原稿受理 1987.2.14)

土質工学会書籍案内

土質調査法(第2回改訂版)

定 価：7,800円、会員特価 6,000円 (送料 1 冊につき 400円)、
体 裁：A 5 判、869ページ、上製本

内 容

現場で試料土を観察・採取したり、原位置土の性質について試験したり、あるいは地盤土や地下水の基礎構造物と関連する性状を測定したりする通常行なわれる調査、特殊な測定・調査 (耐震性、砂の液状化、地盤振動などの調査・測定法、土の透気性・土中ガス・酸欠の調査法、海底地盤の調査法) までを網羅し詳細に解説。「土質試験法」とともに現場技術者必携の図書。(昭和57年12月発行)

- | | | |
|-----------------|------------------|-------------------------|
| 第1章 調査計画 | 第7章 サンプリング | 第13章 施工管理試験 |
| 第2章 地盤の構成 | 第8章 地下水調査 | 第14章 特殊な測定・調査 |
| 第3章 予備調査・地表地質調査 | 第9章 載荷試験 | A. 耐震性・砂の液状化調査 |
| 第4章 物理探査 | 第10章 基礎杭の試験 | B. 地盤振動測定 |
| 第5章 ボーリング | 第11章 土圧・間隙水圧の測定 | C. 土の透気性・土中ガス・酸欠についての調査 |
| 第6章 サウンディング | 第12章 地盤の変位・変形の測定 | D. 腐食性調査 |
| | | E. 植生工調査 |
| | | F. 海底地盤の調査 |