

外94-18

早稲田大学大学院理工学研究科

## 博 士 論 文 概 要

### 論 文 題 目

深部地熱井掘削技術の研究

申 請 者

斎 藤 清 次

S E I J I S A I T O

1994 年 10 月

地熱発電は再生可能でクリーンな国産エネルギーと言われている。しかし、現状では地熱発電は、我が国総発電設備容量の僅か約0.1%を占めるにすぎない。この理由の1つは、現状では1つの地熱発電所の発電出力が5万kW程度と小さいことが指摘できる。限られた地熱開発地域で発電出力を増大させるためには、1坑井からより高エンタルピーの蒸気を多量に生産する事が重要となる。そこで従来から開発されている、浅部貯留層下位の深部貯留層に賦存する、高エンタルピー地熱流体の開発が注目されている。しかし、深部貯留層の開発には、(a)高温度での泥水や掘削ツールスの耐熱性の問題、(b)大深度に関してはケーシングセメンティングでセメントスラリーが地表まで回帰しない問題、(c)酸性热水によるケーシングの腐食など、解決すべき問題が多数ある。そこで本研究では、これらの問題要素のうち高温度に関しては、①泥水管理方法、②坑内泥水温度の解明、③ダウンホールモーターの耐熱性の解明、④MWDの耐熱性の解明、および⑤ビットシール材の耐熱性の解明、をとりあげ、大深度に関しては、⑥ケーシングセメンティングの間隙処理方法について取り上げた。研究地域は、世界で最も高温度の地熱地帯の一つである、岩手県葛根田に掘削された地層温度350℃以上、深度3,000m級の深部井5坑井の掘削実績を使用した。

本論文は以上の研究をまとめたもので、次の10章から構成されている。各章の概要は以下のとおりである。

第1章は緒言で、本研究の背景および目的を述べた。現状では、我が国の地熱発電出力は全発電設備容量の0.1%にすぎないが、出力を増大させるためには、1坑井からより高エンタルピーの蒸気を、多量に生産できる深部貯留層の開発が重要である。しかし、深部開発の為には様々な技術研究が必要とされる。本研究では深部地熱井掘削に必要な、高温度に関する5研究項目と深部掘削に関する1研究項目を取りあげた。

第2章では地熱開発の現状を紹介するため、最初に発電のしくみ、開発の動向、次に地熱井の掘削方法、地熱井の分類、地熱井の掘削実績、最後に葛根田地域の貯留層と掘削について述べた。現在、我が国では10の発電所が稼働し、さらに8カ所で開発中である。これらの地域で掘削された地熱井は約470坑井、延べ掘削長は約600kmに達する。坑井の掘削深度は増大する傾向が顕著で、それにともない地層温度が上昇している。深部井では浅部井に比べ厳しい坑井計画が要求される。葛根田では深度1,000~1,500mの浅部貯留層と深度2,400~3,000mの深部貯留層に区分され、前者は地層温度250~280℃、後者は350℃以上である。現状では深部貯留層は浅部貯留層に比べ高圧で、しかも坑井あたり平均約2~3倍の蒸気が生産されている。地質は浅部貯留層が第三系、深部貯留層は先第三系と新規花崗岩から構成されている。

第3章は深部地熱井掘削に関する問題点を述べた。深部井の掘削および維持を困難にしている要素には、高温度、大深度および酸性热水がある。現在頻繁に使

用される掘削ツールスは、一部がゴム製品やエレクトロニクスなどの耐熱性の低い部品で製作されている。このため、高温度での作業に障害となっている。大深度ではケーシングセメンティングに失敗するケースが増大するが、失敗後の処理で決め手となる方法がなかった。酸性热水は生産時にケーシングの腐食対策が必要になる。本論文ではこれらの問題点のうち高温度に関する、泥水管理、坑内泥水温度、ダウンホールモーターの耐熱性、MWDの耐熱性、ビットシール材の耐熱性、および大深度に関するケーシングセメンティングの後処理方法について研究した。

第4章は葛根田地域での深部井掘削について、掘削実績、掘削作業例、および泥水管理について述べた。葛根田では現在までに5本の深部井が掘削された。これらの経験から、深部井の掘削では、①従来から使用しているシングルショットでは、ツールフェイスの設定が困難でステアリングツールスやMWDを使用する必要性がある、②傾斜掘りに欠かせないダウンホールモーターが高温度のため、使用不可能になる、③岩石の磁気強度が $1,500 \times 10^{-6}$ emu/g以上になると、磁石を使用した方位測定方法に障害がある、事が判明した。また、深度3,000m、地層温度350℃程度の地熱井ではベントナイト分を4%以下に保ち高温度用分散剤を使用し、かつ泥水冷却装置とソリッドコントロール装置を使用すれば掘削可能である事を実証した。

第5章では坑内泥水温度の研究について述べた。これまで掘削中の坑内泥水温度の解析は実施されていない。本研究では地上での泥水温度、留点温度計による坑内温度、MWD温度計による坑内泥水循環温度、および温度検層によるポンプ停止後の坑内温度結果から坑内泥水温度の解析を実施した。この結果、①地層温度が350℃以上でも坑内泥水循環温度は100℃以下であること、②坑内泥水循環温度はポンプ量に大きく影響される、など実際の掘削時に活用できる貴重な研究結果が得られた。また、この結果は実際に使用したツールスの耐熱限界温度の推定にも活用できることが判明した。

第6章では2坑井で使用したダウンホールモーターのステーターの破損状況と坑内温度の関係を研究した。この結果、破損したダウンホールモーターは坑内に降下した時の坑内温度と関連し、150℃以上で破損する事が判明した。この結果は、メーカーの耐熱温度とほぼ一致する。しかし、ダウンホールモーターは高温度に曝されても瞬時に破損するのではなく、使用中に徐々に破損が進行し、地上で変化が認識できるまで10~20時間程度かかる。また、大きなサイズのダウンホールモーターは、使用時のポンプ吐出量が大きいので冷却効果が優れているため、耐熱性が良い可能性がある。

第7章では高温度地熱井でのリトリーバブル式MWDの耐熱性研究を実施した。この結果、3坑井の深部地熱井での使用実績から、リトリーバブル式のMWDが高温度地熱井でも、かなり深い深度まで使用できる見通しがつき、より効率的な

掘削が可能になった。ただし、使用時は泥水冷却塔などを使用して泥水温度を極力下げ、MWD降下前に坑内冷却を実施する事が重要である。使用実績では、地層温度が300～350°C程度の12 1/4in.坑では深度2,200m以浅、8 1/2in.坑では深度1,800m程度までは通常の冷却で使用可能である。8 1/2in.坑の深度2,200m以深では、坑内冷却不十分で耐熱温度以上になり使用できなかつたが、更に冷却すれば耐熱以下になり使用できる可能性がある。また、リトリーバブル式のMWDを使用する前に、留点温度計でおよその坑内泥水循環温度を確認すれば使用可能か否かの判断に役立つ。今後、更に信頼性を向上させるためには、バッテリ関連部品の改善が望まれる。

第8章では8 1/2in.坑で使用したビットのシール材の耐熱性について研究を行った。ビットシール材の耐熱性は、留点温度計で測定した温度を温度指標に検討すると、オーリングおよびダイヤフラムの破損温度は、研究対象とした2坑井とも約140～150°Cと推定できる。また、ジャーナル径の摩耗量の調査から、破損したシールの時期がほぼ推定できることが判明した。この結果、留点温度が150°C付近ではビット降下時にはシールは破損していないが、カッターの回転による摩擦熱や衝撃等によって、約20～30時間使用後に破損したと考察される。これに対し、留点温度が180°C以上では坑内降下後、早い時期にシールが破損したと思われる。これらの結果を推定地層温度に当てはめると、現状では8 1/2in.坑のロータリー掘削では、シールドジャーナルベアリングのシールの寿命は地層温度300°C程度で30～40時間、350°C程度で20～30時間、400°C以上では10時間以下と推定される。ダウンホールモーターで使用したビットは、浅い深度にもかかわらず、全てのビットでオーリングが破損したが、ダイヤフラムは破損していない。これはダウンホールモーターの回転数がロータリー掘削の2～3倍大きいため、回転による摩擦熱の発生が大きい事を示している。

第9章ではケーシングセメンチングの間隙処理の新工法について研究を行った。今回開発した新工法は、坑内に蒸気を循環し、間隙部を加熱して間隙部の水を完全に蒸発させる。このため、セメンチング時は、間隙部にウォーター・ポケットができず、蒸気生産時にケーシングの圧潰がない工法であることが実証された。また、新工法はセメント頭部が浅い時でも、地表から数100mの位置にあっても施工可能で、圧縮強度の大きなセメントで間隙部全区間を固化できるため、従来の間隙処理工法に比べ大きなメリットがある。本工法をセメンチング計画時から取り入れ、より圧縮強度の大きなセメントでケーシング浅部をセメンチングすることが可能である。

第10章は総括で要約と工学的成果について述べ、本論文を締めくくる。