

地熱水用ダウンホールポンプの開発

Development of Downhole Pump for Geothermal Water

小 泉 淳*

Tadashi Koizumi

1. ま え が き

資源量の乏しい我国にとって地熱エネルギーは貴重な純国産エネルギーであり、今後の地熱探査技術や利用技術の開発に伴い、大いにその発展が期待される。

地熱資源は一般に岩石熱エネルギー、高地圧エネルギー及び熱水エネルギーの形態で存在するが、現有技術で採取可能なものは熱水エネルギーであり、蒸気や熱水の形で地上に取出される。この場合、地熱井によっては動力を使わずに蒸気や熱水を取り出すことのできる自噴井もあるが、ポンプ揚湯を必要とする弱自噴井または非自噴井も数多くある。

これまでの地熱エネルギーの利用方法は、主に地下から自噴する蒸気を直接利用した地熱発電であり、多量に賦存する地熱水はほとんど利用されていない。そこで、この未利用資源となっている中高温熱水エネルギー（150～200℃）を積極的に有効利用するバイナリーサイクル発電の実用化のための研究開発が進められてきた。この計画が具体化するに伴い、地熱井より熱水を汲上げるためのダウンホールポンプ(DHP)の必要性が高まり、現在その研究開発が積極的に進められている。

80℃以下の低温熱水を対象にしたポンプ揚湯は温泉用として一部利用されているが、開発するDHPは、これに比べて腐食性のあるはるかに高温高圧の地熱水を取り扱わなければならない上に、狭い坑井内の地下数百メートルに設置され運転される極めて細長い大容量のポンプ・モータユニットであるなど、その開発には高度な技術が必要とする。

この中高温地熱水用DHPの開発は、通商産業省工業技術院が進めているサンシャイン計画の一環として1983年より新エネルギー総合開発機構から受託し、実施しているものである。61年度（1987年3月末）まで

に第一段階の開発目標値を満足する1号テスト機による現地試験を終了し、現在最終目標とする第二段階の研究開発を2号テスト機による工場試験及び現地試験を通して、63年度末（1989年3月末）の最終評価を目標に進めている。

そこで、これまでのDHP研究開発の経過を重点に研究開発の現状について紹介する。

2. DHP適用バイナリーサイクル発電

開発を進めているDHPは、地熱エネルギーの多目的利用を始め種々の用途に適用され得るが、最も高度なものとしては現在NEDOが開発を進めているバイナリーサイクル発電への適用である。バイナリーサイクル発電とは、DHPにより地下から汲上げられた地熱水の熱で低沸点媒体液を蒸発させ、その蒸気で媒体タービンを駆動して発電を行う方式であり、図-1にそのシステムの概要を示す。

この方式は従来の蒸気を直接利用した発電方式に比べ、低温の地熱エネルギーを活用することができることから、資源量の増大に役立つ上に、掘削リスクの低減にも寄与するものと考えられている。さらに熱水流体が閉ループで熱交換器通過後に地下へ還元されるため、環境適応性にも優れている。これらの観点から、

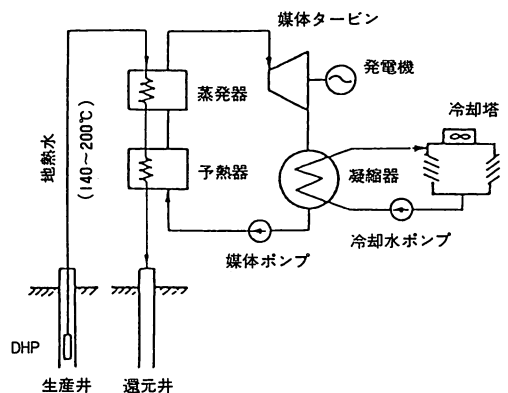


図-1 バイナリーサイクル発電

* 岡原原製作所 藤沢工場 水力機械設計部 課長

将来は地熱発電に占めるバイナリーサイクル発電の割合は50%以上になるものと期待されている。商用規模（5万kW級）におけるバイナリーサイクル発電の経済性に関する試算例によれば、地下熱水温度が200℃以下の場合には、シングルフラッシュ発電より有利になることが予想されており、このことから将来性のある発電方式と言える。

5万kW級のバイナリーサイクル発電を想定すると熱水温度が170℃の場合に必要な熱水量は2800t/h程度と算出され、地熱井1本からの熱水採取可能量を240t/hとすれば地熱水生産井は12本必要であり、その各々にDHPが設置される。このDHPは発電プラントの稼働率を左右する重要な機器であり、その開発の良否がバイナリーサイクル発電の鍵を握っているといっても過言でなく、着実かつ早急な開発が望まれているものである。

3. DHP 開発計画の概要

3.1 開発目標値の設定

これまでの坑井調査を基に、実用段階におけるDHPの使用条件を推定すると、熱水温度は140～200℃、ポンプ設置深度は300～600m程度と考えられる。さらにその使用目的から次の点に留意したDHPでなければならない。

(1) 発電システムとの適合性

発電設備の稼働率を上げるために、信頼性の高い、メンテナンス性に優れたものでなければならない。

(2) 坑井との適合性

限られた狭い坑井内で安全に運転ができ、曲った井

表1 DHPの開発目標値

目標項目	目標段階	1号テスト機	2号テスト機	実用機
井戸径公称	インチ	9½	→	13½
井戸実内径	mm	224	→	317
熱水流量	t/h	50	100	300
全揚程		300	340	400
熱水温度目標値	℃	140～170	200	200
設置深度	m	400	→	500
電動機出力	kW	100	200	500

戸内においても運転できるものでなければならない。坑井内の水面深度は井戸により異なり、汲上げ熱水量によっても変る。したがってDHPの適切な設計要目と設置深度を決めることが重要になる。

(3) 地熱水中における長期安全性

対象となる140～200℃の地熱水にはH₂SやCO₂などのガスと、炭酸カルシウムやシリカなどの固形物が溶解しており、土砂も含まれている。pHは中性から弱アルカリ性が多いが、まれにはpH 4程度の酸性の場合もある。このような腐食性のある高温高圧地熱水中においても長期にわたり安定した運転の可能なDHPでなければならない。

以上のことを考慮して、実用段階におけるDHP(実用機)に先立ち研究開発を進めるためのテスト機の開発目標値を表1のごとく定めた。この開発にはかなりの技術的困難が伴うと考えられるため、2段階(1号テスト機、2号テスト機)の目標値を設定した。

DHPを駆動方式別に分類すると表2に示す4方式が考えられるが、前記の使用条件を考慮すると坑井内

表2 駆動方式別比較表

	方式の概要	特徴
坑井内モーター 駆動方式	ポンプとモーターが一体のユニットを吐出管にて坑井内に吊下げ、長い動力ケーブルでモーターへ電力を供給し、ポンプを駆動する。	高効率で取扱いが容易であり、井戸の曲りにも有利であるが、モーターが地熱水中にあるため絶縁信頼性に関しては不利になるので、この面での開発が必要である。
ラインシャフト方式	モーターのみ地上部に設置し、長い回転軸にて坑井内に設置されたポンプを駆動する。	高効率であるが取扱いが困難で、井戸の曲りを許容できない。更に回転軸が長くなるため深い井戸には使用できない。
坑井内水タービン 駆動方式	ポンプと水タービンが一体のユニットを高圧管にて坑井内に吊下げ、高圧水を水タービンに供給してポンプを駆動する。	取扱いは容易であるが、実績が少く経済的でない。
坑井内蒸気タービン 駆動方式	ポンプと蒸気タービンが一体のユニットを高圧蒸気管と排気管にて吊下げ、高圧蒸気を供給してポンプを駆動する。	実績が少く技術的に困難である。

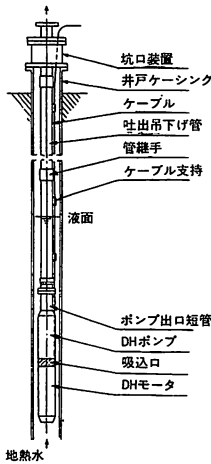


図-2 全体構成

モーター駆動方式によるDHPが最も適しており、この方式のDHPを開発することにした。図-2はこの方式のDHPを用いて地熱水を汲上げる場合の基本的な全体構成を示している。

3.2 開発計画

従来の実績を大幅に超えるDHPの開発を進めると

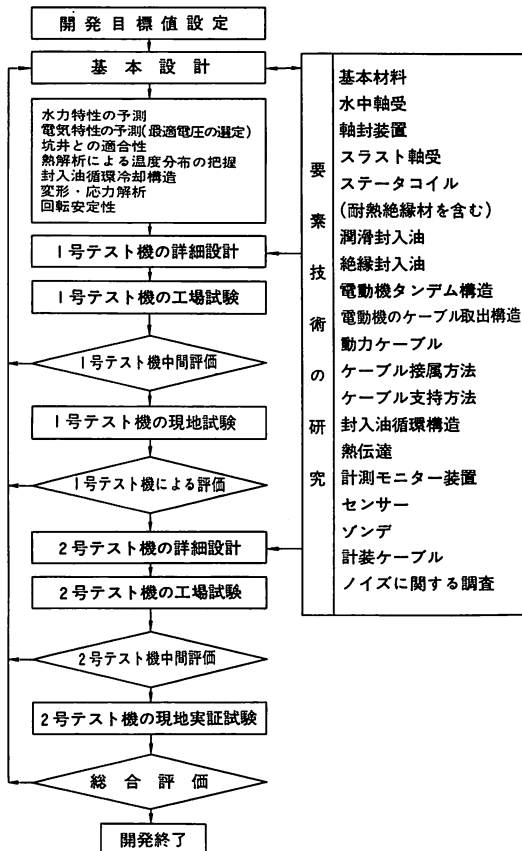


図-3 DHP開発フローチャート

めには、広範囲にわたる高度な技術を結集しなければならない。多岐にわたる要素技術の研究とそれらを効果的に組み合わせる設計手法が必要であり、システマ的な研究開発を進めなければならない。

これらを勘案して作成したDHP開発フローチャートを図-3に示す。最終的な2号テスト機の現地実証試験による総合評価に至るまでには、各種要素技術の研究や1号テスト機による運転研究の成果を反映させながら、基本設計の見直しを繰り返し行い、着実な研究開発を進めるようにした。

研究開発スケジュールは図-4に示す通りであり、58年度の調査より始め、63年度の2号テスト機の現地実証試験による総合評価までの6年間を予定している。

項目	年度	58	59	60	61	62	63
要素技術の研究		調査・試作・実験・評価					
1号テスト機				試作・試験・評価			
2号テスト機						試作・試験・評価	

図-4 研究開発スケジュール

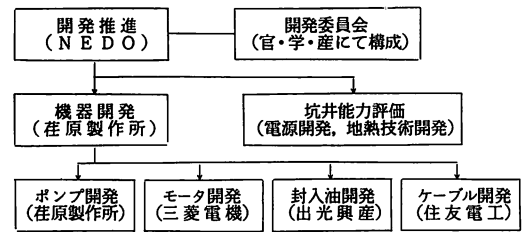


図-5 研究開発体制

またこの研究開発を進めるためには、各分野の専門知識を必要とするため、図-5に示すごとく官学産にて構成された開発委員会を設置し、組織的な開発を進めている。

4. 要素技術の研究

4.1 主な開発要素と研究内容

(1) 材料

DHPは腐食性のある高温地熱水中に長期間されるため接液部には耐熱耐食性のある材料が要求される。さらに泥土や砂の混入も考えられるため、摺動部及び高流速部には耐摩耗性も要求される。これらの厳しい条件に耐える材料の選定が必要であり、特に腐食に対しては、地熱水による確認試験が必要である。

(2) 水中軸受

井戸径による寸法制約から、必然的に段数の多い細

長形状のポンプになるため、羽根車間には軸受が必要になる。これらの軸受は構造的に油潤滑が不可能であり、熱水による自己潤滑方式を採用せざるを得ない。高温地熱水は粘度が低いため水膜が形成されにくく、ラジアル荷重の負荷能力は低い。したがって、振動解析によって形状、寸法及びすき間の適正な値を求め、また適切な材料を選定することによって、摩擦係数が小さく、砂の混入に対しても耐久性のある軸受を開発しなければならない。

(3) 軸封装置

ポンプのスラスト軸受とモータの軸受には、DHP用に開発された耐熱潤滑油が使用される。高温下における潤滑油は地熱水が混入すると劣化が促進されるため軸貫通部には密封性の高い軸封装置が要求される。そのため、この密封に使用されるメカニカルシールは信頼性の高い、砂の混入や腐食性に対しても耐久性のあるものでなければならない。

(4) スラスト軸受

ポンプスラスト軸受は耐熱潤滑油で潤滑されるよう設計されるが、潤滑油は高温時には粘度が低くなるため、低粘度でも高負荷の受けられるスラスト軸受が必要である。また井戸径による寸法制約から、コンパクトなものでなければならない。

(5) ステータコイル

モータからの発熱は高温地熱水で冷却される方式となるため、ステータコイルは200℃を越える高温になる。この高温に耐える絶縁材料の開発とそれらを有効に組み合わせたコイルの開発が必要である。

(6) 潤滑封入油

ポンプ及びモータの軸受が正常に機能するためには、高温時においても適度な粘度のある潤滑性をもった耐熱潤滑油でなければならない。しかも熱安定性に優れた油で、地熱水の混入に対しても急激な劣化が生じないものが望まれる。

(7) 絶縁封入油

ステータコイル室への地熱水混入を避けるため、キャン方式のモータを採用し、絶縁油を密封する構造にした。したがって、封入する絶縁油は長期にわたり耐熱絶縁性のある油でなければならない。またステータコイルの絶縁材料との適合性も要求される。

(8) モータのタンデム構造

限られた井戸径内で出力の大きなモータを造ろうとすれば軸方向に細長い形状になってしまう。しかし設計上及び製造上の理由からその長さには限度があり、

ある限度以上になるとタンデム構造にしなければならない。したがって、この場合の電氣的・機械的接続方法を検討する必要がある。

(9) 封入油循環冷却構造

200℃の地熱水中で運転されるモータの温度は、自己発熱のため可成りの高温になることが予想される。300℃以上の高温下において長期間使用できる封入油や絶縁材料を開発することは困難なため、適切な封入油循環冷却構造を開発してこれらの使用条件を緩和し、全体としての信頼性を高める必要がある。

(10) 動力ケーブル

DHPは地下300~600mに設置されるため、モータへ電力を送るための長い動力ケーブルが必要になる。このケーブルは耐熱性と耐水性と共に、その取扱い上から可撓性も要求される。また1個所でもピンホールなどの欠陥があればシステム全体が止ってしまい、その復旧には多大な費用と時間を費すことになる。したがって、その品質は格段に高いものでなければならない。

(11) ケーブルの接続方法

モータとケーブルの接続作業は、その取扱い上現地にて実施しなければならない。したがって、耐熱絶縁性や耐水性のほかに、作業性に優れたものであることが要求される。

(12) ケーブル布設と支持方法

ケーブルの構成材料にはエラストマや軟質金属が使用されるが、これらの材料は熱膨張率が大きく高温強度も弱い。坑井内に設置されたケーブルには、運転中熱膨張のため伸びてせり出した状態になり、井戸ケーシングや吐出吊下げ管、あるいはケーブル同志が当たって外力が加わる可能性がある。この力をできるだけ小さくし、ケーブルの自重を確実に支える必要があり、ケーブル布設方法と支持方法の検討も重要なテーマになる。

4.2 要素技術の総合化

要素技術の研究は、最初は単独実験によるスクリーニングから始め、漸次各要素間の総合技術確立へと進むようにした。また常に要求事項の見直しと実験研究を繰返ししながら、互に不備な点を補い合う形で弾力的に進めた。これらの要素技術研究を総合技術として展開した代表例として、潤滑油と軸受・軸封の研究について述べる。

ポンプとモータに封入される潤滑油は、耐熱性と同時に軸封装置やスラスト軸受に合った潤滑性と材料適

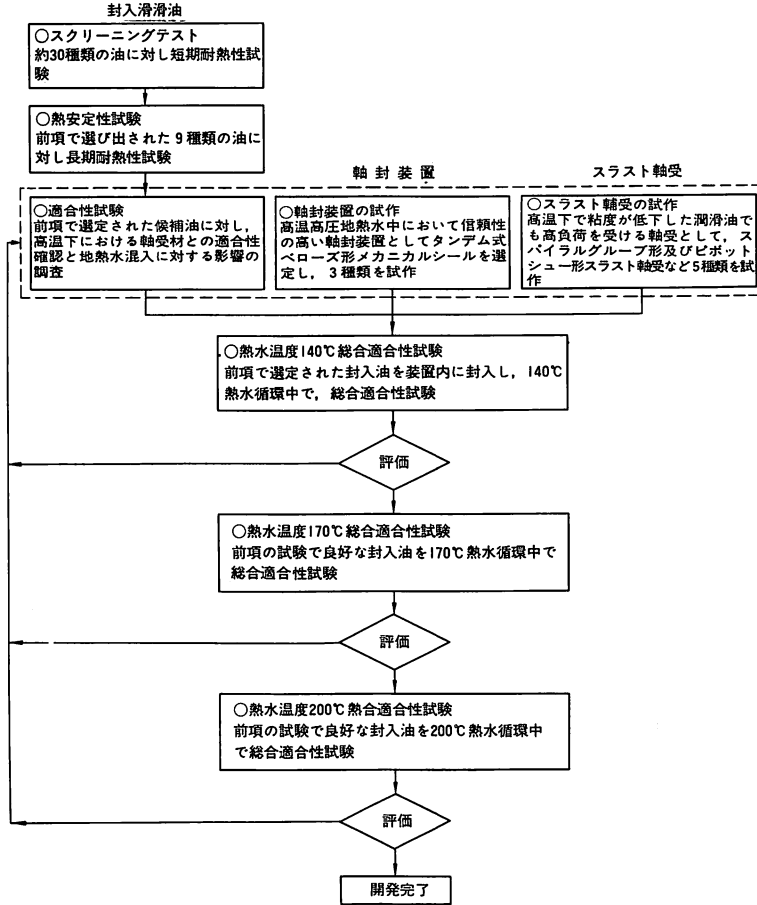


図-6 潤滑油と軸受・軸封の開発フローチャート

合性が要求される。したがってそれらを組合せたときに最大の特性が発揮できるように、研究開発を進める過程で途中結果を評価しながら、互いの要求事項を見直して修正していった。その開発フローチャートを図-6に示す。まず候補油を選び出すためのスクリーニングテストより始め、軸受・軸封試験の結果を参考にしながら、最終的には実使用条件に近い運転状態での軸封装置やスラスト軸受との総合適合性試験を実施した。この試験によって、熱水の混入に対する影響や局所的な温度上昇に対する安全の確認、油循環の妥当性、高剪断力下における潤滑油の耐久性など、潤滑油単独の研究では予測しがたい項目に対して、実機への適用上の問題を解決した。

以上のように、潤滑油と軸受・軸封を組合せた総合技術として研究を進め、最終的に200℃の熱水循環中でDHPに適用できることを確認した。このほかにも絶縁油とステータコイルの適合性・ケーブル構造とモータへの接続方法、ポンプとモータへの潤滑油封入方

法など、互に関係ある要素技術は常に連絡をとりながら開発を進めた。

5. テスト機的设计

5.1 仕様

3項にて述べたごとく、開発するDHPを坑井内モータ駆動式のポンプとしてテスト機的设计を行った。1号テスト機と2号テスト機の主な設計要目は表3の通りである。

5.2 構造

テスト機は公称9 $\frac{1}{8}$ インチ井戸(実内径224mm)に設置可能なように設計され、その寸法は最大外径がポンプ側210mm、モータ側200mm、ポンプとモータを合せた全長が8~10mと極めて細長い形状となった。その構造要目を表4に、また1号テスト機の全体写真を図-7に示している。

5.3 設計上の検討項目

- (1) 坑井特性と水力特性

表3 テスト機の設計要目

項目	開発機	1号テスト機	2号テスト機
井戸径公称		9%	9%
使用液		地熱水	地熱水
熱水温度		170°C	200°C
熱水流量		50t/h	100t/h
全揚程		300m	340m
回転数		2850rpm	3450rpm
ポンプ軸動力		70.5kW	164kW
段数		24段	24段
モータ定格出力		100kW	200kW
極数		2極	2極
電圧		1500V	1500V
周波数		50Hz	60Hz

表4 テスト機の構造要目

ポンプ	ポンプ形式	立軸多段斜流ポンプ
	羽根連形式	斜流クロズド形
	ディフューザ形式	多翼ガイドベーン式
	段間軸受形式	水中スリーブ軸受
	スラスト軸受形式	油潤滑式スパイラルグループ形
	軸封形式	メカニカルシール
モータ	軸継手形式	油潤滑式スプライン軸継手
	モータ形式	かご形三相誘導電動機 (油封式キャンドタイプサブ マージブル形)
	スラスト軸受形式	油潤滑式ピボットシュー形
	ラジアル軸受形式	油潤滑式スリーブ軸受
	電力供給方式	金属シー式耐熱ケーブル

坑井からの熱水採取可能量はポンプ特性と坑井に特有なガスアイソレーション深度との相互関係によって決まる。地熱水には多量の炭酸ガスが溶け込んでおり、圧力が低くなるとガスとなって放出される。ポンプ部におけるガスの発生を抑えるためには、ポンプ設置深度をガスアイソレーション深度より深くする必要がある。一方ポンプは少なくとも地表面まで熱水状態で汲上げなければならないからそれ以上の揚程をもつ必要がある。例えば図-8の場合、ポンプ設置深度を300mに深にすれば、最大汲上げ熱水量は50t/hになる。

(2) 潤滑油循環油量と封入油最高温度

モータは高温地熱水中で運転されるため、その温度分布を的確に把握することが、絶縁材料や封入油の耐熱性を評価する上で、又、熱変形による強度上の問題を評価する上で重要になる。

モータからの発熱は高温の地熱水で冷却するため、

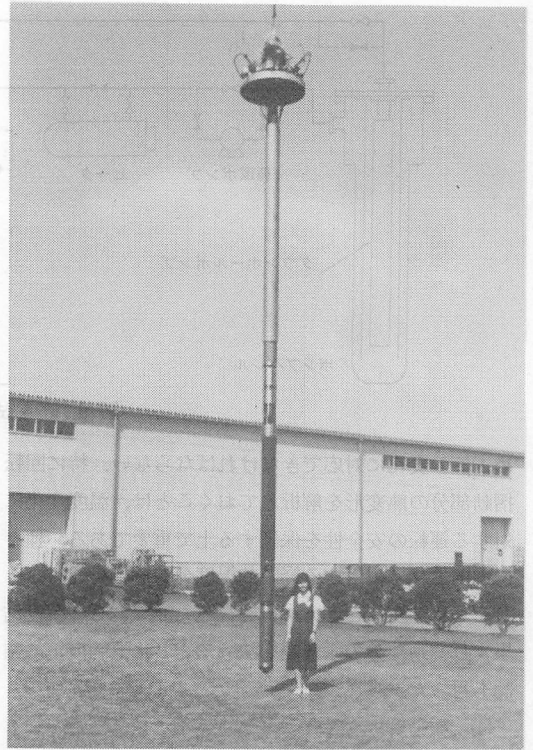


図-7 1号テスト機全体写真

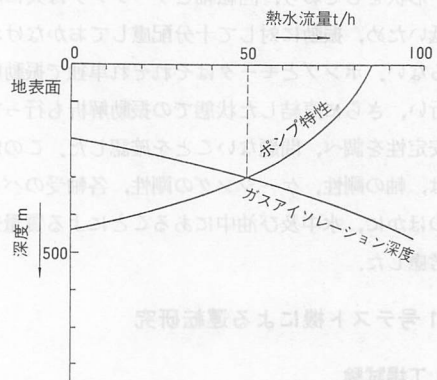


図-8 熱水採取可能量の検討

効果的な油循環冷却方式を確立し、各部の温度をできるだけ低く抑えるようにしなければならない。そのためには循環油量と温度との関係を把握しておく必要がある。封入油温度は循環油量が多くなる程低くなるが寸法上の制約からむやみに大きくできない。そこで種々の条件での温度解析を行い、適正な循環油量を決めると共に、封入油とステータコイルの最高温度を推定した。

(3) 熱水温度変化時の変形・応力解析

DHPの始動・停止時には熱水温度変化が生ずるた

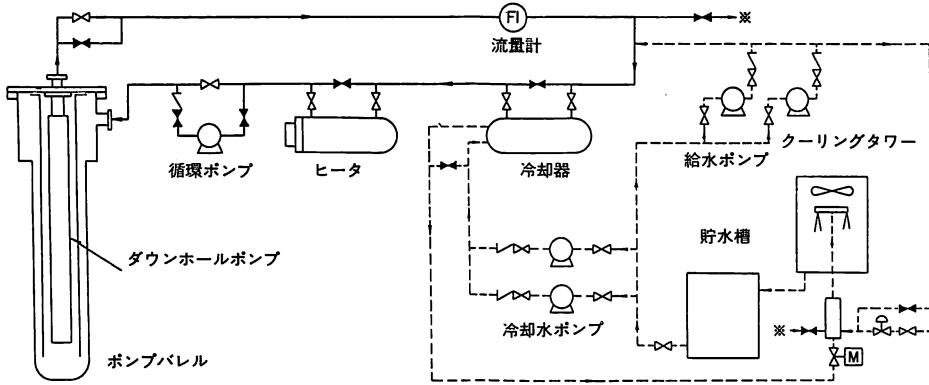


図-9 工場試験装置全体フロー

め、この変化に対応できなければならない。特に回転摺動部分の熱変形を解析しておくことは、温度変化に対する運転の安全性を保证する上で重要である。種々の温度変化率に対する経時的温度分布解析を行い、それを基に熱変形と応力解析を行った。これらの解析結果より摺動部分のすき間を決めると共に、強度上の確認も行った。

(4) 振動解析

限られた狭い坑井内に設置される DHP は、極めて細長い形状をしており、回転軸とケーシングは共に剛性が低いため、振動に対して十分配慮しておかなければならない。ポンプとモータはそれぞれ単独で振動解析を行い、さらに直結した状態での振動解析も行って回転安定性を調べ、問題ないことを確認した。この解析では、軸の剛性、ケーシングの剛性、各軸受のバネ定数のほかに、水中及び油中にあることによる質量効果も考慮した。

6. 1号テスト機による運転研究

6.1. 工場試験

(1) 試験方法

工場試験装置の全体フローを図-9に示す。テスト機を実際の井戸に模擬したポンプパレル内に設置し、高温高圧熱水中における運転研究が実施できるようにした。熱水循環系内圧力は給水ポンプにより高圧状態に保持され、系内温度はヒータと冷却器により一定温度にコントロールされる。

この試験装置で、高温高圧熱水状態におけるテスト機の性能試験と機能確認を行うと共に、長期間にわたる運転安全性を調査し、基礎データの収集を行った。

(2) 運転経緯と試験結果

1号テスト機の工場試験は1986年1月から同年8月

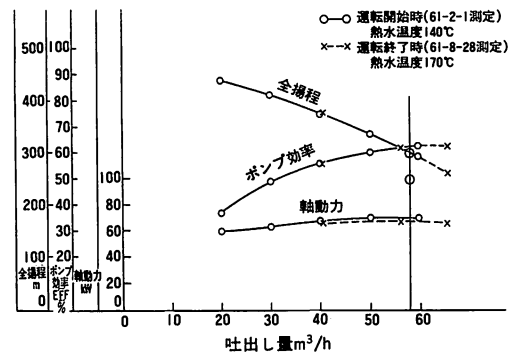


図-10 長期運転前後のポンプ性能

にかけて実施され、熱水温度 140℃において538 時間、熱水温度 170℃において2010時間の運転研究を行った。熱水温度 170℃運転における始動停止回数は7回であったが、開発機に起因した停止は1回のみであった。これはケーブルコネクタ部の耐熱強度不足による絶縁低下問題であったが、その部分の構造的補強により解決された。対策後の運転においてはすべて良好であり、所定の開発目標値を満足するものであった。

運転中には各部の温度、圧力、流量などの計測を行ったが、すべて安定した値を示しており、ほぼ予想通りの値であった。図-10には試験開始直後と試験終了直前に測定したポンプ性能を示す。長期運転前後のポンプ性能の差異は認められず良好だった。また高温高圧熱水中における運転中に計測したテスト機の振動記録は、各部温度記録と併せて良好な値を示しており、開発機が非常に細長い形状であり、さらに上側から吊下げられた柔支持構造であるにもかかわらず、安定した運転が得られることが実証された。

工場試験で良好な運転結果の得られた1号テスト機は、試験終了後に実施した分解点検からも問題ないことが確認された。

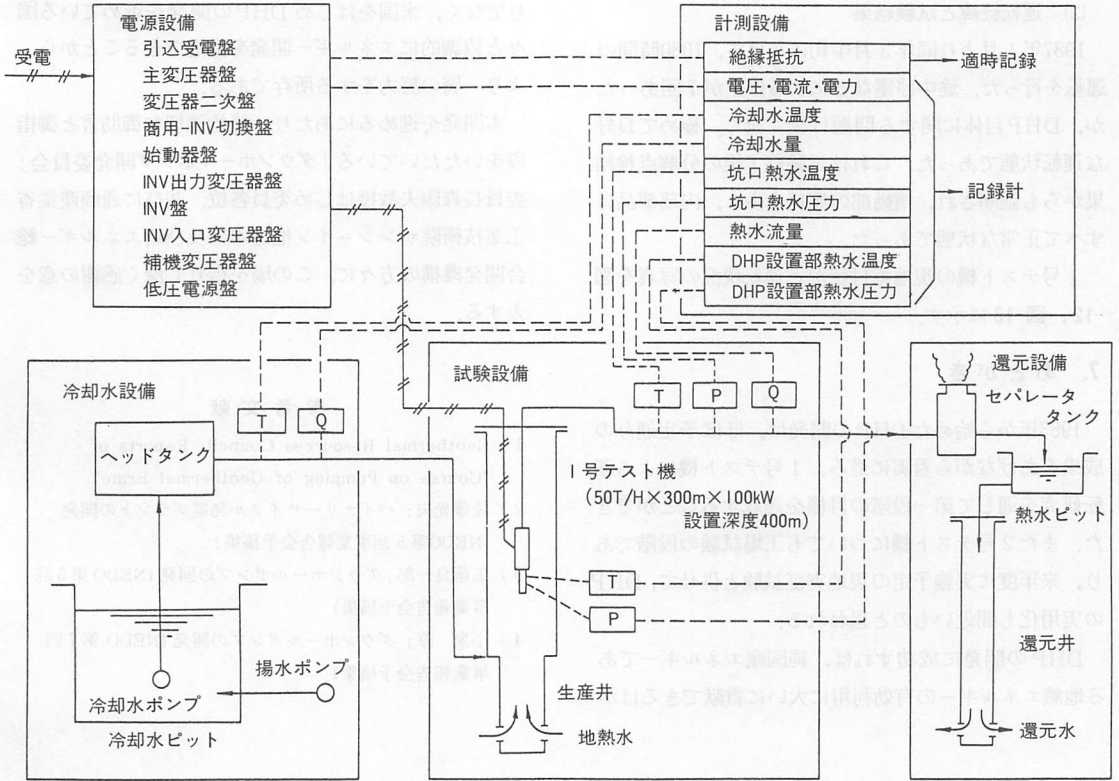


図-11 現地試験の全体フロー

6.2 現地試験

(1) 試験方法

工場試験で耐熱耐久性の確認された1号テスト機は分解整備され、再組立されて実際の地熱井内での運転確認試験に供された。

現地試験の全体フローを図-11に示す。試験に使った坑井の坑底温度は206℃であり、1号テスト機の仕様を超えるため、坑井下部へ冷却水を注入してDHP設置部温度を170℃に調整して運転を実施した。汲上げられた熱水はセパレータタンクで気水分離され、一

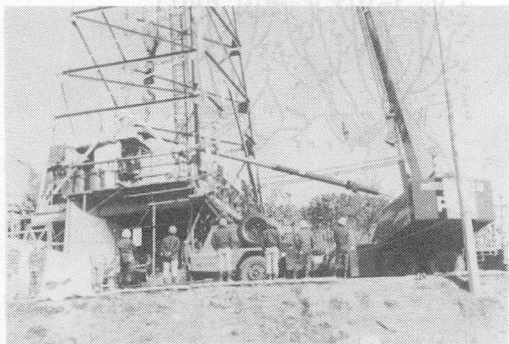


図-12 地熱井内へ据付中の1号テスト機

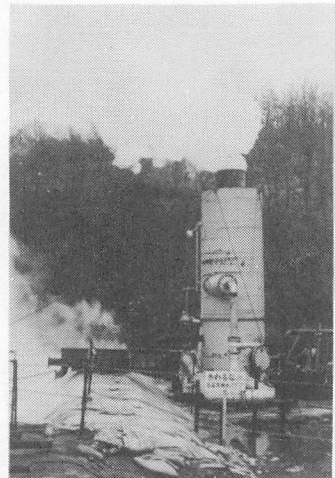


図-13 1号テスト機運転中(セパレータタンクから熱水流出)

旦熱水ピットに貯えられてから、別ポンプによって還元井に送られた。DHP運転状況の確認と基礎データの収集のため、計測した温度、圧力、流量などの記録はすべて坑井より300m離れた中央監視小屋に集められた。

(2) 運転経緯と試験結果

1987年1月より同年3月中旬にかけて、1080時間の運転を行った。途中停電などによる停止が7回あったが、DHP自体に関する問題は全く無く、極めて良好な運転状態であった。これは試験終了後の分解点検結果からも証明され、摺動部の摩耗も少く、内部部品はすべて正常な状態であった。

1号テスト機の現地据付状況と運転状況の写真を図-12、図-13に示す。

7. あとがき

1983年から始めたDHPの開発は、ほぼ予定通りの成果をあげながら着実に進み、1号テスト機による運転研究を通して第一段階の目標を達成することができた。また2号テスト機についても工場試験の段階であり、来年度に実施予定の現地実証試験と併せて、DHPの実用化も間近のものと思われる。

DHPの開発に成功すれば、純国産エネルギーである地熱エネルギーの有効利用に大いに貢献できるばか

りでなく、米国をはじめDHPの開発を進めている国々と協調的にエネルギー開発を推進できることから、より一層の努力をする所存である。

本開発を進めるにあたり、終始適切な御助言と御指導をいただいている「ダウンホールポンプ開発委員会」委員長森康夫教授はじめ委員各位、並びに通商産業省工業技術院サンシャイン推進本部及び新エネルギー総合開発機構の方々に、この場を借りて深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Geothermal Resources Council; Reports of "Course on Pumping of Geothermal Brine"
- 2) 佐藤光夫; バイナリーサイクル発電プラントの開発 (NEDO第5回事業報告会予稿集)
- 3) 工藤良一郎; ダウンホールポンプの開発 (NEDO第5回事業報告会予稿集)
- 4) 小泉 淳; ダウンホールポンプの開発 (NEDO第7回事業報告会予稿集)

