

プレート沈み込み帯への掘削計画JUDGE

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性

森田 信男* 斎藤 清次** 佐久間 澄夫** 高橋 渉**
 吉田 恒夫*** 佐野 守宏**** 陣崎 義信*****
 中山 茂***** 鹿熊 英昭*****

MORITA Nobuo, SAITO Seiji, SAKUMA Sumio, TAKAHASHI Wataru, YOSHIDA Chikao, SANO Morihito, JINZAKI Yoshinobu, NAKAYAMA Shigeru and KAKUMA Hideaki (1997) JUDGE Project: A Continental Scientific Drilling into Subduction Zone (7) Technical development. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 48 (3/4), p. 186-243, 59figs., 30tables

7.1 総論 新しい概念としての科学掘削に向けて

ドイツKTB科学掘削井の8,000-9,000m掘削作業を再現してみよう。ドリルビット[†] ((9).3用語集参照)を変え1スタンド40mの掘削管をドリルパイプ[†]自動操作装置を使って降下する。この掘削リグ[†]は世界で一番強力で大きなリグなので見晴らしのきくコントロール室からツールプッシャー[†]の多くの計器をみながら単純な操作でパイプを換えていくことが出来る。檣のフロアーには数人のドリラー[†]が異常が起きないか見守っている。外は雪が降り寒々としているが檣の中は明るく快適である。見る間にフロアーの掘削管が減少しビットが8,000m近くに達している事を告げている。しかしこの深さになってツールプッシャー[†]が計器の異常に気が付いた。未だビット[†]は底についていないはずなのにドリルパイプを降ろそうとしてもツールプッシャーの前にあるビット荷重計が上昇する。ドリルカラー[†]が何処かで抑留しているようだ。やむをえずビットを吊りぎみにし泥水[†]の循環を始める。泥水を循環させビットをそろそろ降ろしていく。トルク計の読みが少し高い。しかし暫くビットを回転している

とトルク計の読みが下がってきた。せり出してきた坑壁部をビットとドリルカラーが通過したようだ。ほっとして掘管をドローワークス[†]で数回上下させ坑井径がビットゲージ以上に掘拡した事を確認した後またドリルパイプ自動操作装置を使ってビットを下げていく。以前掘り下げた深度より十数m程上にビットが来るとまた吊り荷重が下がりビット荷重計の針が大きくふれる。カッティング[†]の沈降による坑内の埋没である。泥水を循環させながらそろそろビットを降ろしていく。しかしトルク計が高すぎる。慌ててドローワークスでドリル管を引き上げにかかろうとする。吊り荷重の針がぐっと上がる。ビットが抑留してしまった。2-3回吊り荷重を上げて抑留したパイプをとろうとする。しかしビットは坑底近くで頑として抑留されたままである。やむをえずドリルパイプを坑底近くではずし、ドリルパイプを引き上げる。ドリルパイプ自動操作装置を使ってもパイプを全て巻き上げるのに800m/hで11時間もかかってしまった。フィッシング用の装置を付け、その上にショックを与えるジャーを取り付けドリルパイプの降管を始める。11時間程してパイプが底につく事を確かめ、またフィッシング用のオーバーショットがツールジョイントに外側から捕獲するのをトルク計で確かめ、ジャーリング[†]をしながらドリル管を引っ張る。吊り荷重計が突然下がり抑留していたビットがフリーになった事を知る。上げ速度を400m/hに設定しそろそろとビットを揚げる。20時間を費やしビットがフロアーに出てきた。今度は抑留を避ける為にジャーをつけたままビットを降下する。4,000m程は800m/hでビットを降下させたが、その後は泥水を循環させながら250m/hでビットを降下する。ビットが底につくまで28時間を要してしまっただ。ビットが底についた時、坑底温度は240°Cに上がっていた。抑留を防ぐ為に坑内に溜まったカッティングを取り除くのに泥水を数時間循環させる。

*早稲田大学理工学部 (Faculty of Science and Engineering, Waseda University; 4-1 Ookubo 3-chome, Shinjyuku-ku, Tokyo, 169 Japan)

**日本重化学工業(株) (Japan Metals and Chemicals Co. LTD; 8-4 Koamicho, Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo, 103 Japan)

***石油資源開発(株) (Japan Petroleum Exploration Co. LTD; 2-20 Higashi-Shinagawa 2-chome, Shinagawa-ku, Tokyo, 140 Japan)

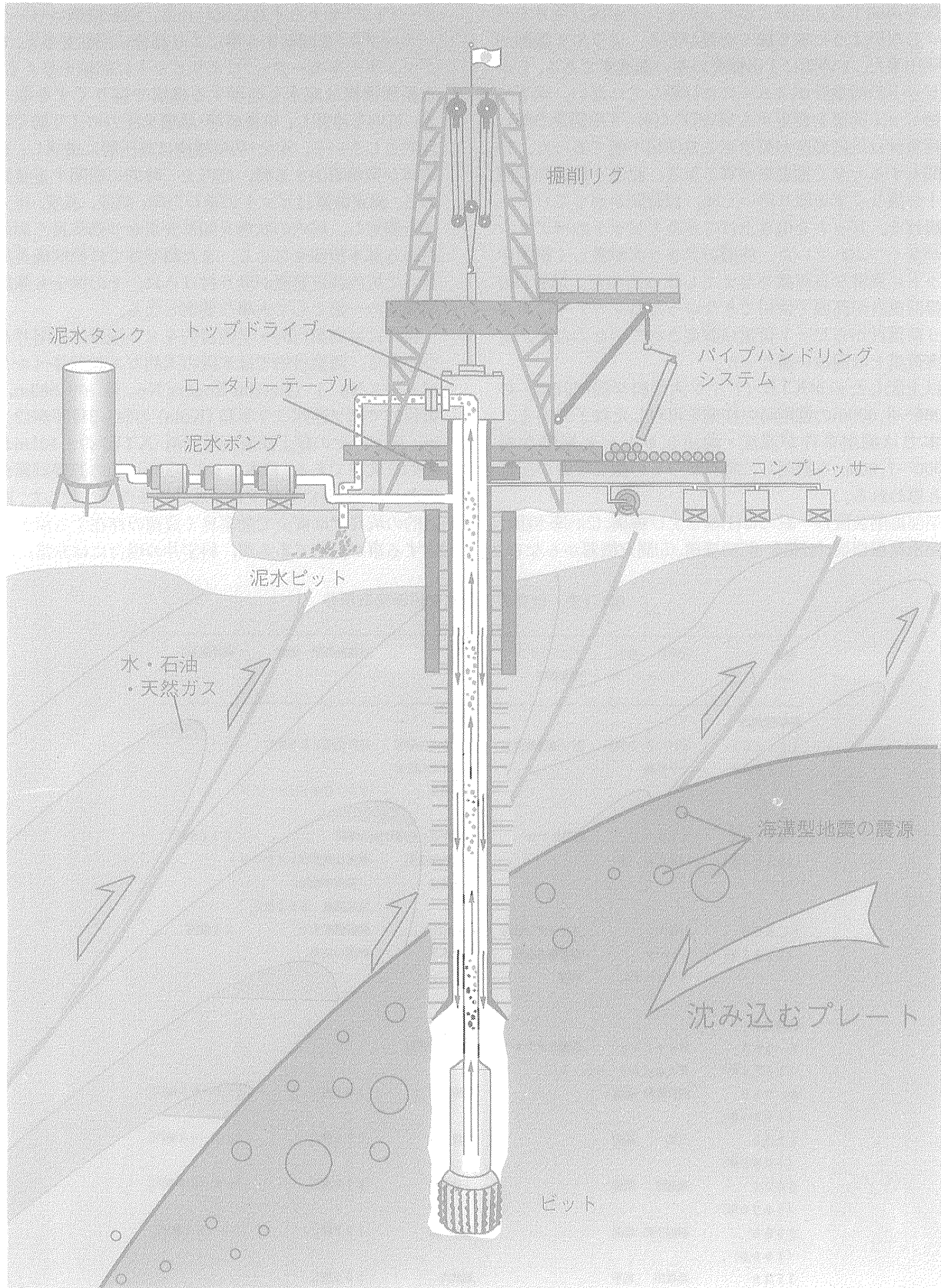
****(株)テルナイト (Telnite Co. LTD; 7-5 Hatagaya 1-chome, Shibuya-ku, Tokyo, 151 Japan)

*****シュルンベルジェ(株) (Schlumberger K.K.; 2-2-1 Fuchinobe, Sagami-hara, Kanagawa, 229 Japan)

*****(株)アカシ (Akashi Co. LTD; 3286 Ikebecho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226 Japan)

Keyword: Scientific drilling, KTB, Kola, borehole thermal simulation, mud water, logging, borehole monitoring

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)



第7-1図 超深部掘削装置全体図

8-1/2坑はある部分では坑井崩壊で数倍にも拡張しそこにカッピングがリフトされずに溜まっているからだ。掘削を再開するまでにこのカッピングが再び坑井をパックしないように取り除く必要がある。ようやく掘削が再開出来た。1時間に1m程度の遅い掘進率である。しかしビットの荷重計がスムーズに作動していない。地下で直接ビット荷重を測定するMWD[†] (9) (3用語集参照)の荷重計は坑底温度が高すぎる為使用不能であった。10時間もすると全く掘進率が零となる。泥水を数時間巡回し十分掘りくずを取り除いた後、12時間かかってビットを揚げる。ビットを引き上げてみるとビットのベアリングが全くつぶれていた。坑壁のドラッグが激しく掘削中ビットに異常な高荷重を与えてしまったのだ。MWDの直接荷重計が高温で使用できなかった為フロアーにある吊り荷重計からビット荷重は測定されていたのだが、全く実荷重とは程遠い値だった。

以上記したのがKTB (ドイツ大陸科学掘削計画) の8,000~9,000mの掘削時の作業を再現した様子である。日本では掘削条件が温度・地圧とももっと過酷な為6,000~7,000mを掘削した時点からこのような現象が起これと思われる。

深部掘削装置は一般には(1)巻き上げ機構,(2)回転機構,(3)泥水循環機構,(4)安全・防噴機構,(5)測定機器からなる。

第7-1図はこれらの装置の全貌を示す。巻き上げ機構はビットを交換する際に掘管を上げ下ろしたり、ケーシング・パイプ[†]を下ろす為に使われる。回転機構はロータリーテーブル[†]を回転する事により掘管に回転を与え、またダウンホールモーター[†]によりビットに回転を与える。泥水循環機構は泥水を循環する機構で掘りくずを取り除き、坑内を冷却し、坑壁破壊・暴噴を圧力により防ぐ事を目的としている。安全・防噴機構は高圧層に遭遇し、孔隙流体が突然噴出する時、坑内を一時的に密閉する装置である。測定装置はビットの進む方向、坑径、温度、圧力などを測定し、坑内の状態を知り安全かつ効率良く掘削を進める基本情報を与える。また科学井では掘削後長期に亘って坑内測定装置が取り付けられ、その保全も深部掘削装置の一部として大事な要素となる。

世界には商業目的・学術目的をもつ超深部掘削井が幾つかある。商業目的では米国の天然ガス試掘井ベルタロジャースNo. 1 (Bertha Rogers No. 1) が9,583m、学術目的ではソ連邦コラ半島 (Kola) のSG-3号井が12,261m、西ドイツの陸上深層掘削計画 (KTB) の9,101mが代表的な坑井である。日本でも6,000m以上の基礎試錐が3坑あり第7-1表にそれぞれの坑井の条件を比較した。商業目的の坑井では安全で効率良く資源の存在する深さに到達する事が目的であるが、科学井の場合には非常に掘削

第7-1表 世界の代表的な超深部掘削井

深度 (m)	坑井名 プロジェクト名	地名 推進機関	プロジェクト 推進機関	目的	技術的特徴・困難	概算費用
科学掘削井						
12,261 (1984年)	SG-3 コラ半島	ソ連邦	旧ソ連邦地質省	地質構造の解明 地下資源の探査 技術開発	坑底温度205度C アルミ合金ドリルパイプ	(-)
9,101 (1994年)	KTB バイエルン州	西独	KTB	地殻物理・化学状態の解明 基礎岩発達史 技術開発	異常な坑井ブレイクアウト (高水圧地圧) 坑底温度: 260度C	214億円
6,600 (1987年)	シルヤン クレータ	スウェーデン	スウェーデン政府 国営電力会社 スウェーデン 米国	無機起源 炭化水素	抑留頻度大で 財源の枯渇	24億円
商業目的						
9,583 (1974年)	Bertha Rogers No. 1	米国	オクラホマ	天然ガス試掘		
6,310 (1993年)	新竹野町	新潟		基礎試錐	197度C	(52-63億円)
6300 (1992年)	三島	新潟		基礎試錐	226度C	(52-63億円)
6004 (1990年)	東頸城	新潟		基礎試錐	212度C	(52-63億円)
6000 (1990)	新潟平野	新潟		基礎試錐	192度C	(52-63億円)
3729 (1995年)	葛根田	岩手		地熱井	500度C	

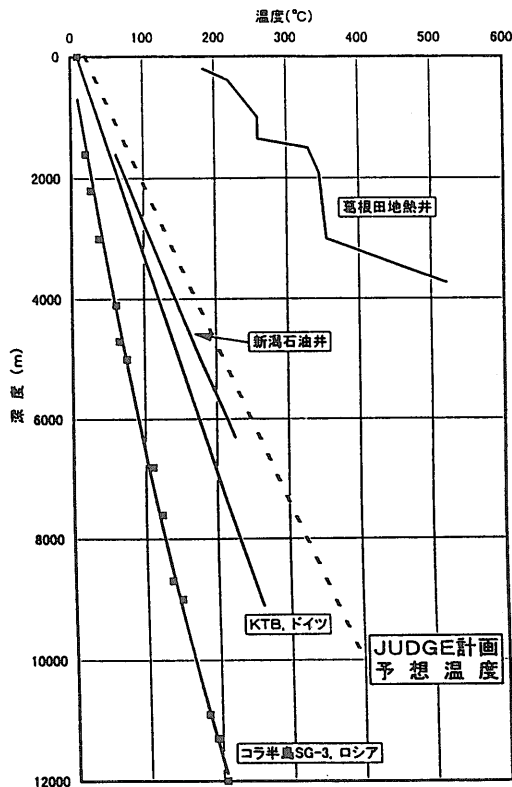
(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

速度の遅い全コア掘りが基本となる。その場合には深度が深く、したがって温度・地圧が高くなり、掘削障害因子が非常に増加する。また科学井では掘削後長期坑内測定が必要であり、毎年数cmのずれのおこるプレート沈み込み面を貫通する坑井では、坑井保全のため特殊な形状に拡張した坑井が必要となりまた長期高温に耐える冷却装置も必要となる。

超深部掘削の難易度を決定する要因は幾つかある。旧ソ連コラ半島では12km以上掘削しており、経済力・掘削目的があればあと数kmは掘削可能であると推定されるが、他の地域では地下の条件が違う為必ずしも12km掘削可能とは限らない。第7-2図に示すようにコラ半島は地層温度勾配が低くまた水平地圧に異方性が少ない為、掘削障害として掘削パイプの自重が大きなファクターとなる、比較的掘削条件としては良好の地下状態であった。しかしKTBの科学井は9.1km掘削した時点で、現在の技術では掘削の限界に達したと判断される兆候が幾つか現れている。坑井半径が第7-3図に示すように異常に不規則拡張しており、この状態ではカッティングリフトの効率が悪く、掘削作業中坑壁が連続的に崩れ、しかも坑内温度も上がりビットの方向性を維持する計測器が使用不可能である。

日本ではKTBの坑井よりかなり厳しい掘削条件が予測される。主な掘削障害を生じる項目は以下の3つである。

1. 10kmの深度で400°Cに達する坑内高温、この温



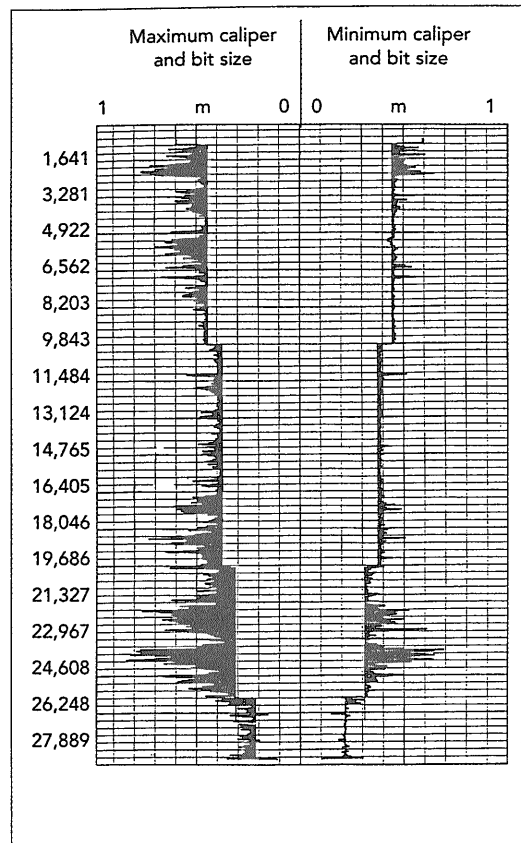
第7-2図 代表的な超深部掘削井の坑内温度

度は現在使用されている(A)掘削に必要な坑内測定装置の温度限界、(B)地震計等の掘削後の坑内測定装置の長期維持温度限界、(C)泥水の温度限界を大幅に越える。

2. 海洋プレート沈み込み面付近の2つの水平主方向地圧の上下幅が非常に大きい事。すなわち沈み込み方向の水平地圧が大きく、沈み込み面付近の折れ曲がり現象により、沈み込み面直交方向では水平地圧は小さい。

3. 莫大な掘削掘管の上下操作所要時間・坑井改修所要時間・硬岩層掘削所要時間

最初に温度について考えてみる。現在の掘削装置は200°C以下の坑底温度に合わせてデザインされており、200°Cを越す掘削作業では急速にその掘削障害を増す。ドリルビット、掘削管、ケーシング等の掘削基礎装置は金属製品の為高温でも支障は無いが、測定装置の様に非金属部品の多い機器、及びシールを必要とするモーター、測定機器は高温では支障を来す。200~300°Cでは坑内泥水循環による冷却により従来の掘削機器でも使用可能であるがそれも300~400°Cになると計器のデザインをやり直す必要がある。また掘削後の長期坑内測定装置には80°Cを越すと維持費が高つく機器が多く、長期測定では現



第7-3図 KTBメインホールのブレイクアウトによる坑径拡大状況 (左:最大坑径, 右:最小坑径, 深度: Feet, (Sperber, 1994))

在3,000m級程度の坑底に取り付けられた地震測定機器でもその保身に経費がかかり、高温に長期耐えられる坑内測定装置の早急な開発が必要となる。

次に地圧、特に水平応力の多きい点を考えてみよう。世界の地圧測定結果をみると、ある深度以上では水平地圧は垂直地圧より低いのが普通であるが、日本の様な地震地帯では、深層部でも水平地圧がひとつの垂直地圧を大幅に越える場合が多い。他の1つの水平地圧は垂直地圧の周辺値をとるのが普通である。しかし海洋プレートの沈み込み面では折れ曲がり現象が報告されている為最少水平地圧が垂直地圧よりかなり低い事が予測される。水平地圧の大きさが大きく異なる地層を掘削中には逸泥圧はこの最少地圧とほぼ同程度の大きさに下がる可能性がある。一方坑井ブレイクアウトは坑内圧の低さ、水平地圧の高さにより引き起こされ、したがって2つの水平主方向地圧が極端に違う日本の掘削は、KTBの科学井より温度ばかりでなく地圧の観点から考えても掘削条件として厳しいものとなる。実際日本の6,000m級の硬質火山岩層に到達した試錐を観察してもブレイクアウトが激しく、現在の技術ではこの深さが掘削可能限界に近い事を示している。温度が上昇すると無機性の泥水を使う必要がある。無機性の泥水は造壁作用が無いので坑壁の安定が益々悪化する。日本での掘削条件はこの様に過酷である事は予測される。しかし、実際の坑井では坑井安定の要因である自然フラクチャー・地圧・岩石強度・坑内圧等の条件は地質条件によって左右され、事前にそれらを予測する事は難しい。

最後に、各種作業所要時間の増大について検討する。オールコア掘りを基本とする10km科学井では掘削掘管の上下操作所要時間が膨大である為パイプ交換の自動化、多段繋ぎパイプの使用、連続コア回収装置の開発は掘削

年月の短縮につながる。KTBの開発したドリルパイプ自動操作装置はよくできており日本の超深度掘削にも同じ方法が採用可能であるが、揚降管時間は直接プロジェクトの短縮に繋がるので改良点があれば改良する必要がある。また坑内のブレイクアウトがひどくなると掘削管が抑留し掘進不可能になる。それに対する坑井改修時間も莫大であるので、坑井安定技術の改善は効率よい掘削には大事な要素となる。また超深度掘削では掘削管の自荷重が大きい為、坑井を垂直に保つ必要がある。この為の坑井偏距補正には正確な坑井角度を常に計測する必要があり高温での坑井角度測定装置の開発はぜひ必要である。

なお掘削櫓・ドローワークスは日本でも7.5km程度掘削出来る物が存在しておりこれを10kmにデザインする事は技術的にも可能である。

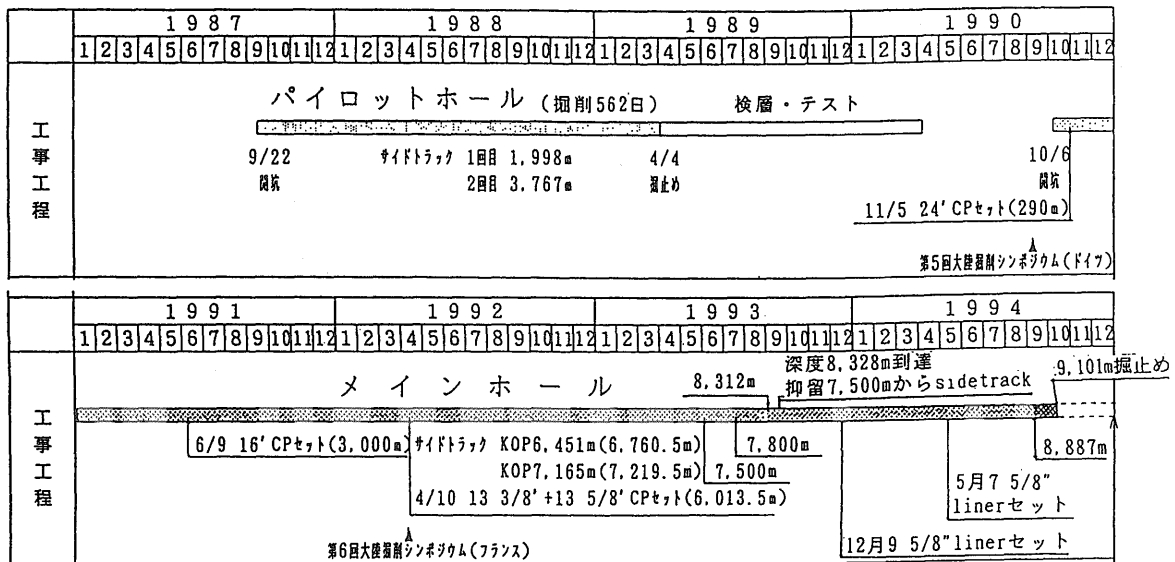
超深部掘削には現在の技術を深く知り使用可能な技術はJUDGE計画でなるべく多く取り込む必要がある。そのためJUDGE計画に一番近いKTBプロジェクトの掘削技術について詳細を説明する。それと比較してロシアのSG-3、高温対策として日本の地熱井を代表する葛根田、石油坑井の技術、の概要を述べる。しかし日本での超深度科学掘削には温度、異常地圧が掘削障害の筆頭にあげられるのでこの2点、および掘削では常に要求される時間・経費の削減に絞って現在の技術の限界と将来の技術開発の展望を述べる。なお、本章は地質調査所(1996)の技術フィジビリティ調査結果を多く引用して書かれている。

7.2 世界の超深部・超高温掘削技術の現状

7.2.1 KTB科学掘削井プロジェクト

年度実績

ドイツにおける超深度掘削は1977年に German Research Foundation (DFG)によって初めて提唱され



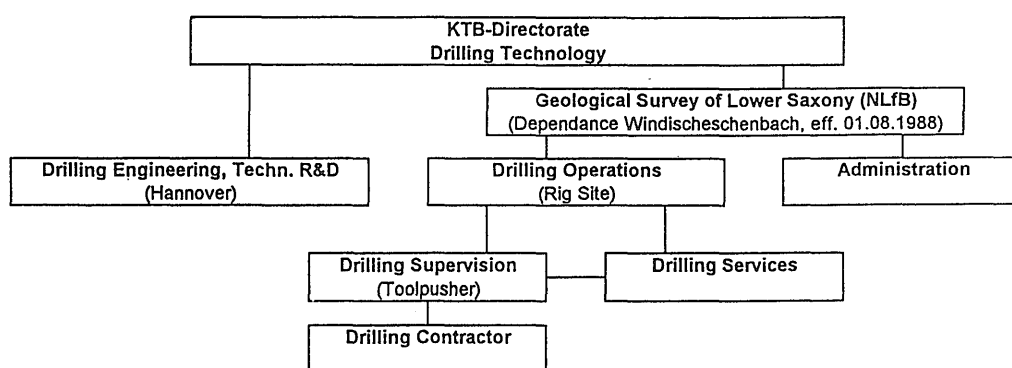
第7-4図 KTBドイツ大陸科学掘削計画の坑井掘削工程実績

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

た。その後のKTBプロジェクトは3つのPhaseから構成される。すなわち、Phase-1の準備期間は1981~1986年で、この時期には、フィージビリティスタデー、地域選定調査井掘削、地域選定、および研究計画・エンジニアリング計画等の策定が実施された。1981年には4ヶ所の候補地点が4ヶ所に絞られ、1983年には2ヶ所に絞られた。また、ローワーサクソニー州地質調査所(NLfB)が1984年にKTB実施の母体組織に選ばれ、1985年にKTB計画をFederal Ministry of Research and Development (BMFT)が正式に承認し、1986年に掘削地点が決定されている。Phase-2の実施期間は1987~1994年で、この期間にパイロットホールとメインホールが掘削された。KTBの組織はPhase-2終了と同時に解体されGFZに移管され、2本の坑井を利用して科学研究を継続するPhase-3

へと移行した。Phase-2の内容をやや詳しく第7-4図に示した。

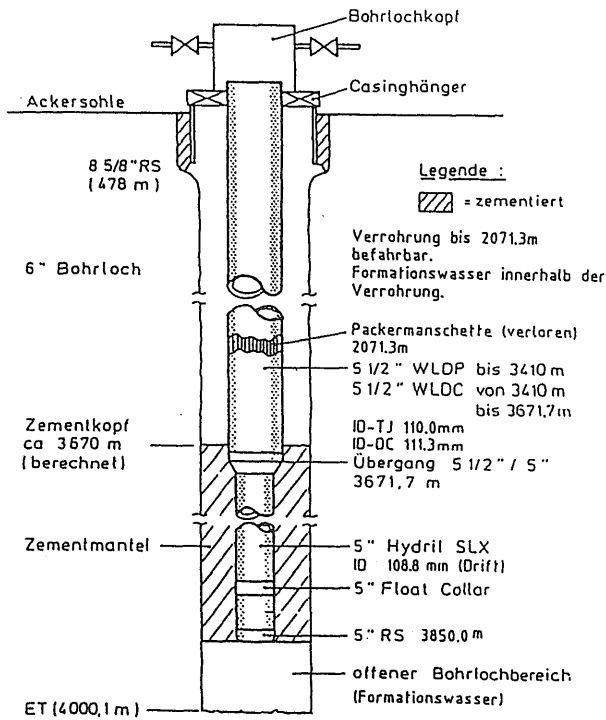
KTBの推進体制は、パイロットホール掘削時に組織され、その後メインホール掘削時点で下部組織の一部が修正されている。KTBの予算はBMFTから拠出され、科学研究費はDFGを通じて大学、研究所、個人研究者に分配され、掘削費・技術開発費・運営費等はKTBの運営母体のローワーサクソニー州地質調査所(NLfB)に配分されている。DFGの下には、DFG/KTB-Priority Program (DFG/KTB-PP)があり、この指揮下に9つのワーキンググループと現場研究所がある。NLfBの中には地球科学部、坑井地質部および掘削技術部の3部門から構成されるKTB-Project-Management Group (KTB-PMG)とNLfB管理部が置かれている。



第7-5図 掘削関連組織図

第7-2表 KTBの部門ごとの人員の変遷

Personnel Involved (averaged)	Preparation Phase						Realization Phase								Final Phase							
	Pre-Investigation			Planning Phase			Pilot Hole Phase			Main Hole Phase					Disb.	Crust Lab Phase						
	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000		
DFG	number of participants unknown						number of participants varied, average approx. 300								number of participants unknown							
Scientific	number of participants unknown						number of participants unknown								number of participants unknown							
Administrative	number of participants unknown						number of participants unknown								number of participants unknown							
Field Laboratory							31	31	31	31	31	31	31	31	31	to 0						
KTB-PM-Group													1	1	1	1	1	1	GFZ became responsible for rig site and all activities			
Project Manager													1	1	1	1	1	1				
Scientific							13	13	13	13	15	15	15	15	15	1						
Technical							5	5	5	5	9	9	9	9	9	3						
Controlling													3	3	3	3	3	1				
Administrative							15	15	15	15	22	22	22	22	22	6						
Public Relations							1	1	1	1	2	2	2	2	2	1						
Miscellaneous							8	8	8	8	10	10	10	10	10	3						
KTB-PM-Group, total							42	42	42	42	62	62	62	62	62	16						
Drill Rig, Services																						
Drilling Supervision							1	1	1	2	2	2	2	2								
Rig Personnel							23	23	23	26	26	26	26	26								
Services							6	6	6	10	10	10	10	10								
Drill Rig, Services, total							30	30	30	38	38	38	38	38								
Remarks:							KTB-Project Management Group was established								KTB-Project Management Group was dissolved							

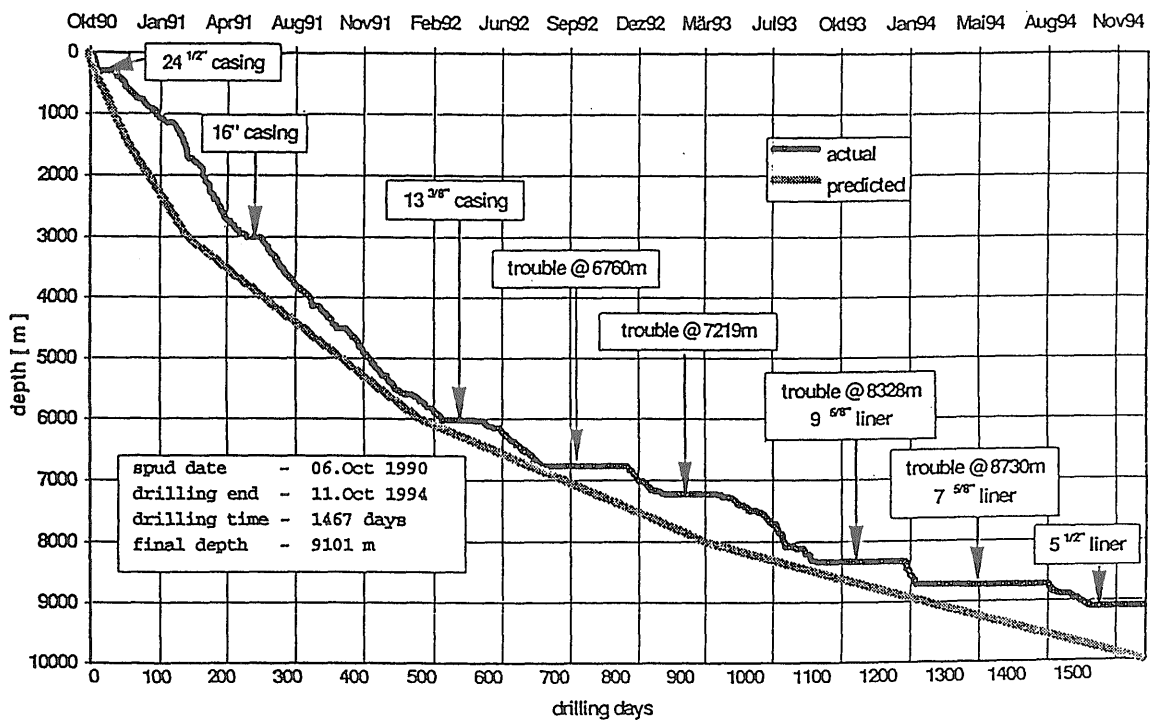


第7-6図 KTBパイロットホール1990年4月以降の坑井状況図

掘削関連組織を第7-5図に示した。掘削部門はKTB-Directorateの一部門として位置づけられ、エンジニアリング・技術研究開発部門はHannoverに、掘削作業部門は現地に置かれている。資材購入は掘削部門とは別に掘削現場に置かれた管理部門が行う。掘削作業部門の下にはドリリングコントラクターに直接指示するSupervisorと泥水管理、Mud-log、掘管検査を実施する人員が置かれている。

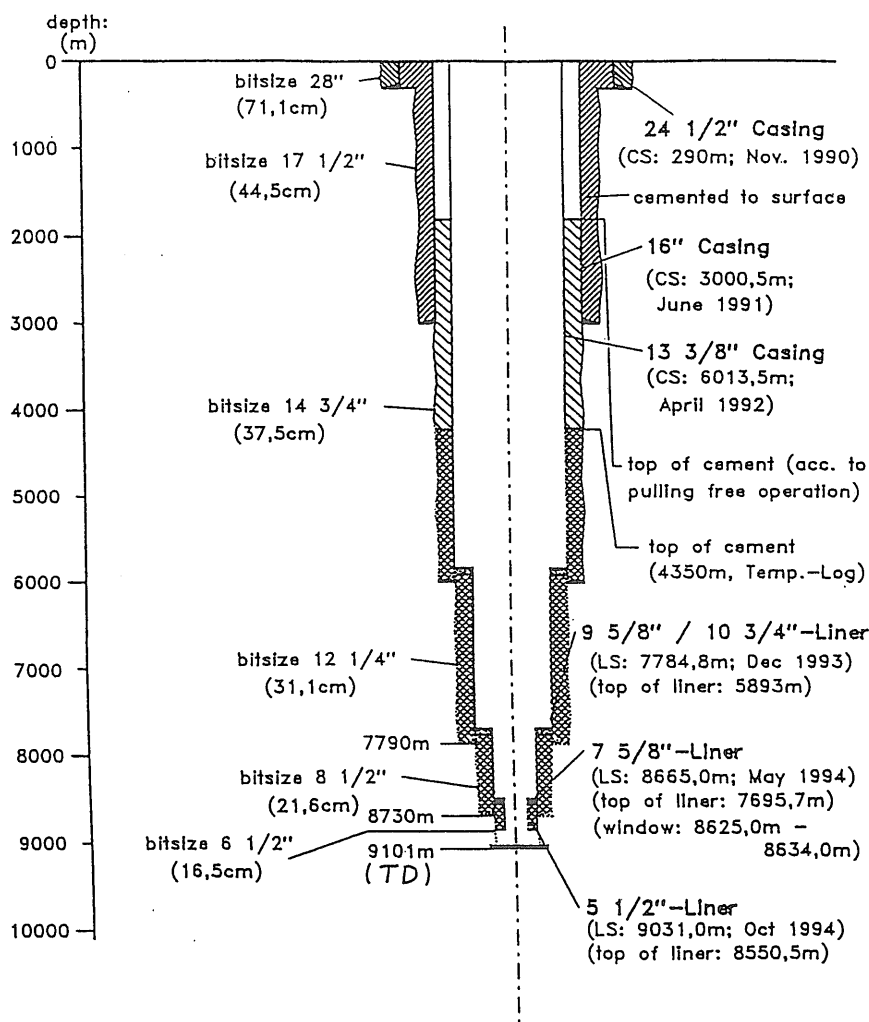
第7-2表にKTBの構成人員の概数を年度ごとに示した。この表から掘削技術者はパイロットホール掘削時は5名、メインホール掘削時は9名となっている。また、Supervisor、Service-manは、それぞれパイロットホール掘削時で1名、6名、メインホール掘削時には、それぞれ2名、10名に増員されている。

KTBでは掘削候補地を1984年にOberpfalz地方とSchwarzwald地方の2地点に絞り、2地域で300-400mの調査井を掘削した。調査井は最終坑径4インチ以上のワイヤーライン・オールコア方式で掘削され、主に岩石の物性、坑井の熱流量、温度等が調査された。この結果を元に地温が低いと予想されたOberpfalz地方に決定された。第7-6図にOberpfalz地方に掘削された調査井の仕様と掘削地点を示した。パイロットホール掘削の主目的は地表付近からコア掘り、カッティング採取、泥水分析および検層を行い、メインホール掘削時に浅部での調査を最小限にする事であった。これらの地球科学情報に加え、地層の掘削しやすさ、地層傾斜、逸泥・溢泥深度、推定地層温度の確認等の掘削に関するデータはメインホール掘



第7-7図 メインホールのドリリングチャート (Wohlgemuth et al., 1996)

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)



第7-8図 KTBメインホール坑井実績図

削計画に非常に重要であると判断された。このため、パイロットホールは深度5 km, 坑径6インチが要求された。坑井は8-5/8インチケーシング挿入後、7インチの仮ケーシングをセットし、坑内状況が良ければ最終深度まで6インチ坑を掘削し、坑内状況が悪い時は7インチケーシングを適当な深度までセットして、6インチ坑を掘り下げる方式で計画された。掘削は1987年9月22日に開始され、562日後に深度4,000.1mで掘り止めされた。掘り止めの理由は坑井傾斜が増大し掘削困難になったためである。掘削は10-5/8インチ坑はロータリー工法で実施し、6インチ坑はワイヤーライン工法で実施された。全掘削長の90%の深度でコア掘りが実施され、90%のコア採取率であった。掘削の結果、地層が大きく褶曲していること、断層帯が存在し鉱物やガス・塩水が存在すること、および地層温度が予想より高い温度であること等が判明した。現在の坑井は深度3,850mまで鉄管が挿入されている(第7-6図)。

メインホールは1990年10月6日に開坑し、4年後の1994年10月10日に深度9,101mで掘り止めとなった(第7-7図)。掘削開始前のケーシングプログラムは予想地質を

元に計画され、最終坑径8-1/2インチで深度12kmまで掘削する予定であったが、実際には最終坑径6-1/2インチで深度9,101mまで掘削したにとどまった(第7-8図)。掘削を困難にした原因として、深度7,000m付近から地層の崩壊が激しくなり、また地層温度が当初の予想より高温で掘削機器が効率的に作動しなくなったことが指摘できる。しかし、超深部井を掘削するために重要な垂直掘削装置の開発に成功し、深度7,200m付近まで利用できたため、この深度までは坑跡を極めて垂直に保つ事に成功している。しかし、垂直掘削装置の使用を断念した深部では坑井傾斜が大きくなり、坑底での偏距は約320mとなった。メインホールの掘削は当初の計画通りには進捗しなかったが、掘削困難な地層を、英知を結集して掘削機器開発を行いつつ掘削を行ったことは偉大な成果と評価できる。

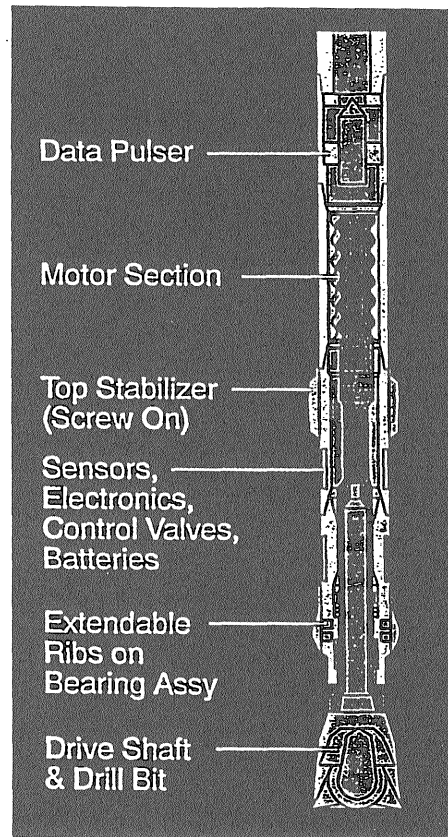
超深度への対応・掘削効率

掘削用ビットは一般的に数10時間使用すると寿命になる。このため、超深度掘削では数1,000m分のパイプを揚管し、新しいビットを取り付けて坑底まで降管する作業

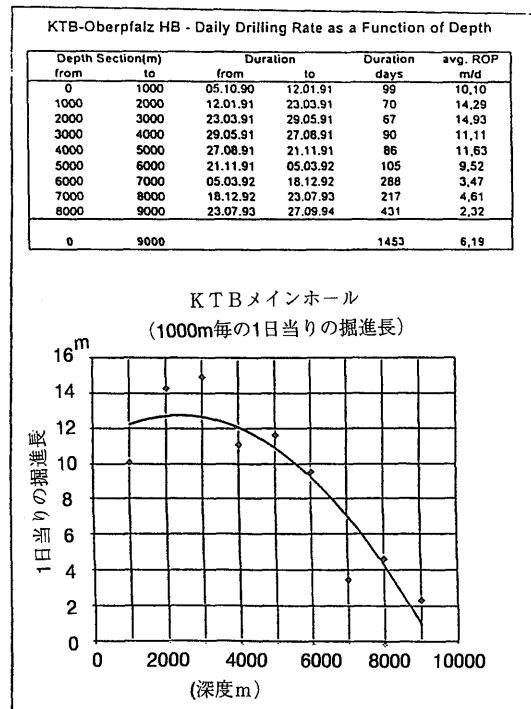
が繰り返す必要になる。また、ケーシングのセット深度が深くなるため、掘削装置は大きな吊り下げ荷重を支えるよう製作されなければならない。KTBの調査では、10kmの坑井を1本掘削するのに、600回の揚降管作業が必要とされ、その仕事量は深度6,000mの坑井30坑分に相当する事が判明した。このため、揚降管作業を効率的に実施する目的で、高さ約83m、最大吊り下げ荷重約800tonの世界最大のリグをメインホール掘削用に設計製作している。このリグでは、通常使用されている27mドリルパイプ(DP)スタンドの代わりに40mDPスタンドが使用され、またDPスタンドの揚降管作業はコンピュータ制御のパイプハンドリング装置で実施され、手作業を極力省いている。これらの装置で、揚降管時間が約30%短縮されると試算されている。

掘削リグ能力とは別に、DPの引張り強度との関連で、超深度井では坑井をいかに垂直に掘削するかが決定的な要素となる。坑井が傾斜するとDPと地層の摩擦のために揚管時の荷重が大きくなり、DPの引っ張り強度以上になったり、DPを回転する時の回転トルクが大きくなり、掘削作業の続行が不可能になるためである。このため、KTBでは世界で最初に垂直掘削システム (VDS: Vertical Drilling System) を開発した。VDSは坑井の傾斜を測定するセンサー、電子機器、4個のスタビライザーリブ、およびリブの開閉を制御する電磁バルブから構成される (第7-9図)。システムの一部にはシャフトと連結して、ビットを回転させるダウンホールモーター[†] (PDM) が組み込まれ、掘削は地上からDPを回転すること無く、地上からポンプされた泥水の方でビットを回転して地層を掘削する。このシステムでは、センサーが絶えず坑井の傾斜を監視していて、坑井が傾斜していると認識した時は、坑井を垂直に戻すように、対応するリブの開閉が自動的に調節される仕組みになっている。このVDSが極めて順調に作動したため、深度6,700mまでの掘削では、坑井傾斜はほぼ1°以下に保たれ、この時点での坑井偏距は僅か5mであった (Chur and Oppelt, 1993)。この結果、深度7,000mでの余分な揚げ荷重は15ton程度であった。なお、メインホール掘削ではDPを回転すると、ツールジョイント部 (DPのネジ接続部) でケーシングが削られるため、極力PDMを使用しDPを回転しない方法で掘削が行われた。

また別の問題として、坑井掘削に要する日数がある。掘削では一般的に深部掘削ほど一日で掘進する掘削長が低下する。これは、深部ほどビットサイズが小さく、また地層温度が高くなるためビットの寿命が短く、掘削編成の揚降管時間が長くなるためである。それに加えて深部層ほど坑井内事故のリスクが高まり、かつ坑井内事故対策時間も長時間かかる。これらの理由でKTBのメインホールでは深度4,000~5,000m、6,000~7,000m、および8,000~9,000mの各1,000mを掘削するのに、それぞれ86日、288日、431日の日数を要している (第7-10図)。このため、深度8,000~9,000mの区間では1日当たりの平均掘進長は2.3mであった。また、各ビット径ごとの1日当



第7-9図 KTBメインホールでの垂直掘削システム (ZBE, VDS) (Sperber, 1994)



第7-10図 KTBメインホールの深度1,000mごとの1日当たりの平均掘進長

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

第7-3表 KTBメインホールのビットサイズごとの1日当たりの平均掘削長とコア採取記録

Phase	Unit	I	II	III	IV	V	VI	Total
Diameter	inch	17 1/2" (28")*	17 1/2"	14 3/4"	12 1/4"	8 1/2"	6 1/2"	
Depth Section (from-to)	m	6,0	290,5	3000,5	6013,5	7784,8	8625,2	6,0
to	m	305,0	3003,0	6018,0	8328,2	8729,7	9101,0	9101,0
Distance	m	299,0	2712,5	3017,5	2314,7	944,9	475,8	9095,0
Duration	d	32	220	310	602	158	146	1468
average ROP (Section)	m/d	9,34	12,33	9,73	3,85	5,98	3,26	6,20
cored	m	0,0	0,0	153,1	46,5	0,0	0,0	199,6
cored	%	0,0	0,0	5,1	2,0	0,0	0,0	2,2
Core Runs	number	0	0	25	14	0	1	40
average Core Run Length	m/run	0,00	0,00	6,12	3,32	0,00	0,00	4,99
Core recovered	m	0,00	0,00	54,79	28,63	0,00	0,00	83,42

* 28" OH - 292,0 m

第7-4表 KTBメインホールのサイドトラック時間を除外したビットサイズごとの1日当たりの平均掘進長

Section No.	Drilling Phase No.	Diameter	Start Depth m	Final Depth m	Distance		Start Date	Final Date	Duration		ROP	
					per Phase m	per Diam. total m			per Phase d	per Diam. d	average per Diam. m/d	per Diam. m/d
1	I a	17 1/2"	6,0*	305,0	299,0		06.10.90	10.10.90	5		59,80	
2	I b	28"-hole opening	6,0*	292,0	286,0	286,0	21.10.90	02.11.90	13	13	22,00	22,00
3	II	17 1/2"	292,0	3003,0	2711,0	3010,0	07.11.90	01.06.91	207	212	13,10	14,20
4	III a	14 3/4"	3003,0	5595,5	2592,5		16.06.91	13.01.92	212		12,23	
5	III b	14 3/4"	5525,0	6018,0	493,0	3085,5	17.01.92	10.03.92	54	266	9,13	11,60
6	IV a	12 1/4"	6018,0	6760,5	742,5		21.04.92	29.07.92	100		7,43	
7	IV b	12 1/4"	6461,5	7219,5	758,0		15.09.92	24.01.93	132		5,74	
8	IV c	12 1/4"	7144,0	8328,2	1184,2		23.03.93	07.09.93	169		7,01	
9	IV d	12 1/4"	7390,0	7790,0	400,0	3084,7	19.10.93	05.12.93	48	449	8,33	6,87
10	V	8 1/2"	7790,0	8729,7	939,7	939,7	26.12.93	04.04.94	100	100	9,40	9,40
11	VI	6 1/2"	8629,0	9101,0	472,0	472,0	05.07.94	10.10.94	98	98	4,82	4,82
Total					10877,9				1138		9,56	

* drilled out of the 32"-conductor pipe

第7-5表 KTBメインホールのコア掘削とノンコア掘削の平均掘進比較

Average effective ROP while Drilling and Coring (bit on bottom)		Time spent		ROP averaged	
		days	hours	m/d	m/h
Cored totally	199,6 m	10,2	244	19,63	0,82
Drilled totally	10678,3 m	336,0	8063	31,78	1,32

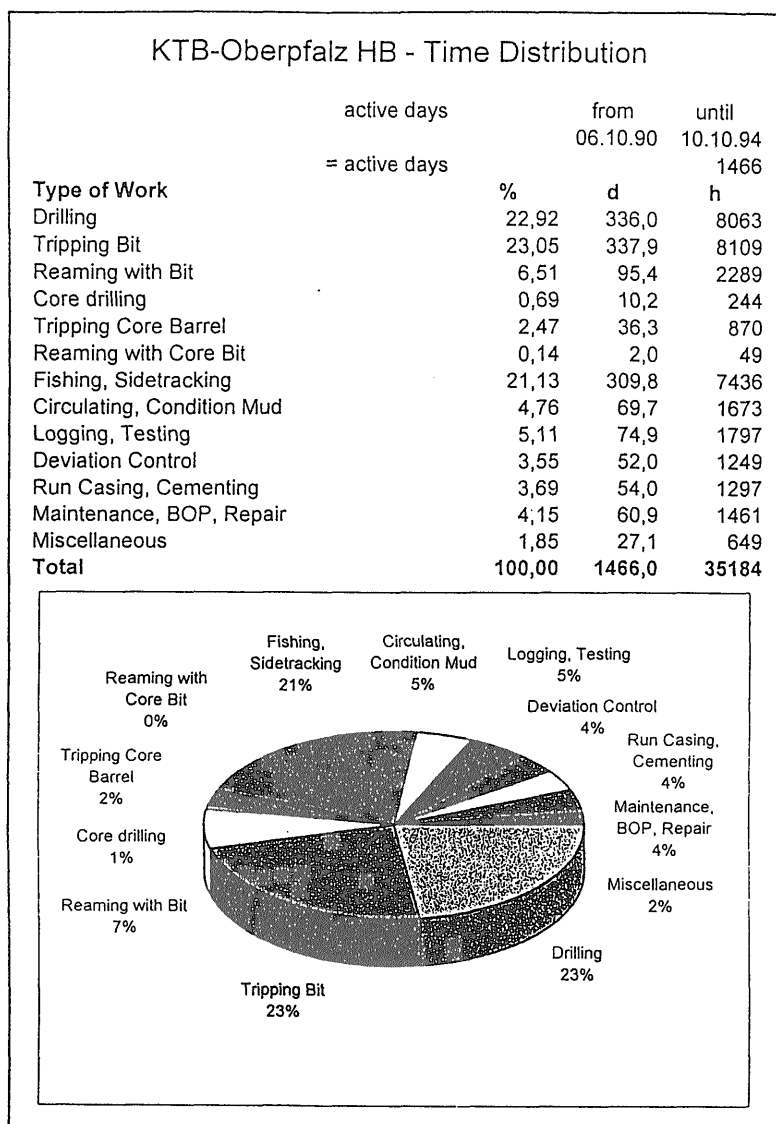
たり平均掘進長は、17-1/2インチ坑が最良で12.3m/day、6-1/2インチ坑が最悪で3.3m/dayとなっている(第7-3表)。なお、サイドトラック期間を除いた各ビット径ごとの1日あたり平均掘進長は、深度300m以深では17-1/2インチ坑が最良で13.1m/day、6-1/2インチ坑が最悪で4.8m/dayとなっている(第7-4表)。また、メインホールでコア掘りされた全長は199.6mで掘削深度の2.2%に当りコア回収率は83.4%であった(第7-4表)。コア掘削とノンコア掘削の平均掘進率比較では、前者が0.82m/hで後者が1.32m/hとなっている(第7-5表)。なお第7-6表にメインホール掘削のそれぞれの作業の時間配分を示した。

地層温度

地下の増温率は地域によって異なるが、特異地域を除けば約3°C/100mの割合で温度が上昇する。このため、地層温度は深度5,000mでは150°C、深度10,000mでは300°C

に達すると予想される。一方、坑内に降下される掘削用ツールの一部は、ゴム製品(PDMのステーター、シール材など)やエレクトロニクス(坑井の傾斜方位などを測定するMWD装置や検層機器など)で製作されている。これらの耐熱性は現状では200°C以下であるが、超深度井の掘削では、これらのツールが極めて重要な役割を担っている。このため、KTBではメインホール掘削地点として地下増温率の低い地域を選定条件の1つにしたが、深度4,000mのパイロット井掘削時点で地下増温率が約2.9°C/100mと当初の予想よりも高いと思われた(後で誤りと分った)ため、当初掘削目標深度であった12,000mを推定地層温度300°Cの深度10,000mに変更している。実際の掘削では、エレクトロニクスを組み込んだMWDやVDS装置は深度7,000m付近で使用を断念し、ダウンホールモータは6-1/2インチ坑の深度8,800m付近で断念している。このため、深度7,000m以深では坑井傾斜が急激

第7-6表 KTBメインホールの掘削の作業別時間割合



に増加し、深度8,600mでは21°に達した。なお、高温度地層の掘削では、掘削泥水のゲル化の問題も日本の葛根田の地熱井のように克服しなければならない大きな問題となる。

坑壁の不安定性

地下の地層には、大きな応力が加わっている。このため、一旦地層中に坑井が掘削されると、その時点から坑壁が崩れる危険性をはらんでいる。そこで、坑井掘削作業では、掘削泥水比重を上昇したり、適当な深度でケーシングを挿入し、地層の崩壊を防止しつつ、より深部へ掘削される。この方法を繰り返せば、どんなに不安定な地層でも、いくらかでも深く掘削できるように思われるが、ケーシングを挿入するたびに坑径が小さくなるので、ツールのサイズが小さくなり、強度が低下する。このため、現状ではケーシング挿入回数は最大5～6回に制限される。KTBのメインホールでは、12-1/4インチ坑の深度7,000

m付近から地層の崩壊（ブレイクアウト）が激しくなり、坑径が3倍以上に拡大した（第7-3図、Sperber, 1994）。この結果、カッチングの効率的な除去に支障をきたした。また、深度8,700m付近では地下応力が大きく、かつ異方性のため坑井が楕円形に変形し、新しいビットを降下しても坑底から150m上部でつかえるため、坑径濠いを余儀なくされ、2カ月間で坑底に達したのはわずか1回であった。これらの理由で、深度6,000m到達時には深度10,000mまで12-1/4インチ坑で掘削の予定であったが、実際には2回多くケーシングを挿入せざるを得なくなり、最終坑径が6-1/2インチ坑になった。しかし、KTBでは深度6,000mまでは坑井を極めて垂直に掘削できたため、クリアランスの小さいケーシング計画（Slim Clearance Casing）を実行できた。このため、通常の掘削計画に比べ、ケーシング挿入回数を2回多くする事に成功している。

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

第7-7表 全経費とパイロット・メインホール経費内訳 (1982-1994年)

Cost distribution KTB Years 1982 - 1994		
	DM x 1000	Percent
Feasibility-Studies, Site-Investigations	16.100	3,05%
Research (Universities), Field Lab Personnel	70.800	13,41%
Project Management Group (Personnel, consumables, hardware, buildings)	64.900	12,30%
Research & Development (Drilling, Logging)	26.000	4,93%
Logging, Data Management, Geological Investigation	53.500	10,14%
Drilling Operations *	296.500	56,18%
KTB total	527.800	100,00%
* incl. rig time for final experiments in main hole		
Cost Distribution Drilling Operations Pilot Hole KTB-Oberpfalz VB, 1987 - 1989		
	DM x 1000	Percent
Site Preparation	2221	8,38%
Drilling Rig (Mob/Demob, Rig Up/Down, Day Rate)	10228	38,57%
Drilling/Coring (Service, Consumables)	6782	25,58%
Drilling Mud/Disposal	1703	6,42%
Casing, Cementation	371	1,40%
Directional Drilling, Side Tracking	2071	7,81%
Mud Logging, Sampling	3139	11,84%
Pilot Hole total	26.515	100,00%
Cost Drilling Operations Main Hole (KTB-Oberpfalz HB, 1990 - 1994)		
	DM x 1000	Percent
Site Preparation	5508	2,06%
Drilling Rig (Mob/Demob, Rig Up/Down, Day Rate)	122165	45,76%
Drilling/Coring (Service, Consumables)	96829	36,27%
Drilling Mud/Disposal	20938	7,84%
Casing, Cementation	9745	3,65%
Directional Drilling, Side Tracking	5152	1,93%
Mud Logging, Sampling	6611	2,48%
Main Hole total **	266.948	100,00%
** without rig time for final experiments in main hole		

ガス層, 蒸気層

幸いKTBの掘削では問題が発生しなかったが、坑井掘削中に高圧の天然ガス層や火山性の有毒ガス層に遭遇する可能性がある。この場合、泥水比重を上昇してガス層の圧力と坑井内の泥水圧力をバランスする方法で掘削を継続する。しかし、高圧層の下位に低圧層が存在する場合があります、低圧層を掘り抜いた時点で高比重の泥水が低圧層に流失し、高圧ガスが噴出する危険性がある。この場合には、ケーシングで高圧層を隠す必要がある。また、地層温度が高い坑井では蒸気層あるいは坑内泥水の沸騰による暴噴対策も考慮する必要がある。

科学者の要求

科学掘削では、いかに科学者の要求を満足しつつ、目的深度に到達するかが重要であるが、一般的に科学者の要求は掘削作業をより困難にする要素を多く含む。そこで、要求に応えるための技術開発や戦略が必要になる。KTBの掘削ではカッティングス、地層水、および地層中のガス成分分析を、より正確に実施するため、当初は泥水の添加剤を無機質に限定し、種類も2種以下に制限した。また、地質をより詳細に観察する目的で、9-1/4インチの大坑径コアシステムや、坑壁から三角錐状のコアを切りとるコアライサーが開発され成果をあげた。深度6,000mではケーシング挿入前に、約2カ月間の検層と、地下応力測定のためのフラクチャリング実験が実施された。一般の科学井では、地層をより詳細に検討するため連続してコア

第7-8表 KTBメインホールの年度ごとの項目別掘削経費

KTB-Oberpfalz HB Cost Distribution Analysis		1990	1991	1992	1993	1994	Total
Item		kDM	kDM	kDM	kDM	kDM	kDM
1	Rig Site and Drilling Rig						
1.1	Rig Site	4877	5	613	4	9	5508
1.2	Drilling Rig Activity	5808	23951	23876	24850	23781	102266
1.3	electrical Energy	415	2119	1881	1834	1479	7728
1.4	Engineering, Rig Up, Miscellaneous	11314	123	267	357	110	12171
	Total 1	22414	26198	26637	27045	25379	127673
	avg. Cost per m [kDM/m]	19,19	5,65	13,63	13,84	21,79	11,74
	avg. Cost per day [kDM/d]	257,63	71,78	72,78	74,10	76,91	84,38
2	Drilling and Coring						
2.1	Drilling Supervision (Service)	172	826	720	737	748	3203
2.2	Roller-Cone Drilling Tools	611	2364	1749	1195	897	6816
2.3	Diamond Drilling Tools	0	0	131	117	23	271
2.4	Downhole Motors	504	2335	4456	6776	4744	18815
2.5	Vertical Drilling Systems (incl. MSS)	1346	15664	12358	5556	0	34924
2.6	Core Barrels (Coring Systems)	0	70	1920	2454	1567	6011
2.7	Stabilizer and Reamer	242	1355	1088	1135	1201	5021
2.8	Drilling Jars	107	602	571	767	722	2769
2.9	Shock Subs	117	574	378	660	391	2120
2.10	nonmagnetic Drillstring-Components	44	193	164	94	0	495
2.11	Drillpipe	763	2187	1874	4888	3804	13516
2.12	Drillcollars and Thickwall-Drillpipe	103	550	93	100	170	1016
2.13	X-Os and Saver Subs	51	179	107	68	94	499
2.14	Handling Tools	204	63	54	51	274	646
2.15	Blow out-Preventer and Spare Parts	0	2	704	1	0	707
	Total 2	4264	26964	26367	24599	14635	96829
	avg. Cost per m [kDM/m]	3,65	5,82	13,49	12,59	12,57	8,90
	avg. Cost per day [kDM/d]	49,01	73,87	72,04	67,39	44,35	64,00
3	Drill Mud, Solids Control, Disposal						
3.1	Drill Mud (Material and Service)	404	2326	3047	4443	3816	14036
3.2	Solids Control and Water Treatment	1008	1084	798	866	673	4429
3.3	Disposal (incl. Transport)	6	258	136	952	1121	2473
	Total 3	1418	3668	3981	6261	5610	20938
	avg. Cost per m [kDM/m]	1,21	0,79	2,04	3,20	4,82	1,92
	avg. Cost per day [kDM/d]	16,30	10,05	10,88	17,15	17,00	13,84
4	Casing and Cementing						
4.1	Tubulars	262	1883	2258	846	334	5583
4.2	Tubular Accessories	30	51	27	0	100	208
4.3	Tubular Service	33	253	426	387	378	1477
4.4	Well Head	196	135	174	2	0	507
4.5	Cementation (Material and Service)	131	285	561	485	508	1970
	Total 4	652	2607	3446	1720	1320	9745
	avg. Cost per m [kDM/m]	0,56	0,56	1,76	0,88	1,13	0,90
	avg. Cost per day [kDM/d]	7,49	7,14	9,42	4,71	4,00	6,44
5	Fishing and Sidetracking						
5.1	Fishing	11	72	1941	736	128	2888
5.2	Sidetracking	18	0	191	833	1222	2264
	Total 5	29	72	2132	1569	1350	5152
	avg. Cost per m [kDM/m]	0,02	0,02	1,09	0,80	1,16	0,47
	avg. Cost per day [kDM/d]	0,33	0,20	5,83	4,30	4,09	3,41
6	Mud Logging and Sampling						
6.1	Mud Logging	1348	774	643	639	343	3747
6.2	Sampling	221	1232	704	542	165	2864
	Total 6	1569	2006	1347	1181	508	6611
	avg. Cost per m [kDM/m]	1,34	0,43	0,69	0,60	0,44	0,61
	avg. Cost per day [kDM/d]	18,03	5,50	3,68	3,24	1,54	4,37
	Total Drilling-Related Costs [kDM]	30524	61603	64011	62474	48896	267509

を採取するオールコア掘りが要望される。しかし、現時点ではオールコア掘りはスポットコアに比べ時間と経費がかかり、技術的により困難であるといえる。

経費

KTBプロジェクトで使われた経費について、メインホールの掘削を主体に述べる。なお、全ての原資料はドイツマルク (DM) になっている。1981年から1995年のドイツマルクと円の月ごとの平均換算レートは、60円～107円に変動したが、この全期間の平均換算レートは約81円で、メインホールの掘削が実施された1990～1994年の平均換算レートは79円であるため、本報告書では円換算する場合は80円を適用した。

KTB計画は当初約450百万マルクで開始した (浦辺、

1989) が、約2割オーバーの528百万マルク (約420億円) の経費を13年間に投入して終了した (Emmermann, 1996)。このうち掘削費は全経費の約56%を占め、次に科学研究費、KTB人件費・設備費がそれぞれ約13%、12%となっている (第7-7表)。また、検層・データ解析・地質調査には約10%、掘削と検層機器の研究開発費に約5%の経費が支払われている。

メインホールの掘削費はパイロットホールの10倍の経費がかかり、深度9.1kmのメインホール1本の経費で深度4kmのオールコア井10本が掘れる計算になる。メインホールの経費はKTB全体経費の約1/2の約267百万マルク (約214億円) を占めている。第7-8図にKTBメインホール経費の項目別内訳比率を示した。

パイロットホールの掘削はリグアップからリグダウン

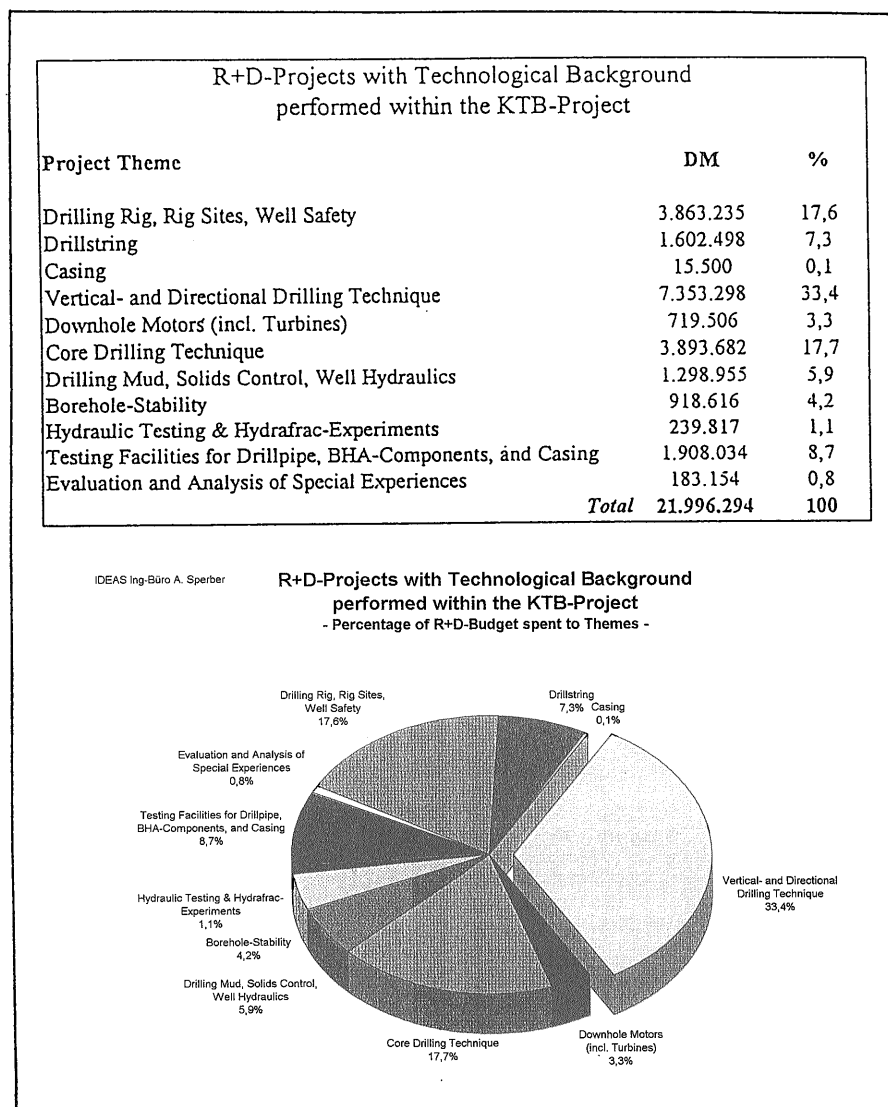
(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

第7-9表 KTBメインホールの年度ごとの坑井深度と掘削経費実績

KTB-Oberpfalz HB Cost Analysis and Benchmarks	1990	1991	1992	1993	1994	Total *
active days from	06.10.90	01.01.91	01.01.92	01.01.93	01.01.94	06.10.90
to	31.12.90	31.12.91	31.12.92	31.12.93	26.11.94	26.11.94
= active days	87	365	366	365	330	1513
drilled from m	6	874,9	5511,1	7096,4	8037	6
to m	874,9	5511,1	7096,4	8037	9101	9101
progress = m	868,9	4636,2	1585,3	940,6	1064	9095
+ hole opening = m	286					286
+ sidetracking = m	13	0	369,5	1013,7	100,7	1496,9
total drilled m	1167,9	4636,2	1954,8	1954,3	1164,7	10877,9
Benchmarks						
yearly averaged ROP [m/d]	13,42	12,70	5,34	5,35	3,53	7,19
Costs (various)	kDM	kDM	kDM	kDM	kDM	kDM
Total Drilling-Related Costs [kDM]	30524	61603	64011	62474	48896	267509
yearly averaged Daily Cost [DM/d]	350847	168775	174895	171163	148169	176807
av. Meter-Cost (on progress) [DM/m]	35129	13287	40378	66420	45955	29413
av. Meter-Cost (on total m) [DM/m]	26136	13287	32746	31968	41982	24592

* without final experiments

第7-10表 KTB計画での掘削技術関連R&D項目と経費実績割合



を含めて562日で、その経費は総額約26.5百万マルク(約21億円)であった。ただし、経費の中にはKTBの技術者の費用と研究開発費は含まれていない。単純計算で1日約380万円の経費となる。リグのデーレートは単純計算で約140万円となっている。坑井の傾斜を減角するための傾斜掘りとサイドトラックに費やした時間は全体の約10%で、その経費は約8%に相当する。

メインホールの掘削はリグアップから掘削終了まで1,466日で、その経費は総額約267百万マルク(約214億円)であった(第7-9表)。ただし、経費の中にはKTBの技術者の費用と研究開発費は含まれていない。単純計算で1日の経費は約1,400万円で、このうちリグのデーレートは約540万円となっている。また、経費割合では掘削リグ関係と掘削機器レンタル・サービスがそれぞれ46%、36%を占めている。機器レンタル・サービス関連ではダウンホールモータ、垂直掘削装置およびドリルパイプだけでメインホール掘削全経費の25%に達している。メインホールの到達深度は約9.1kmであるが、サイドトラックを含め

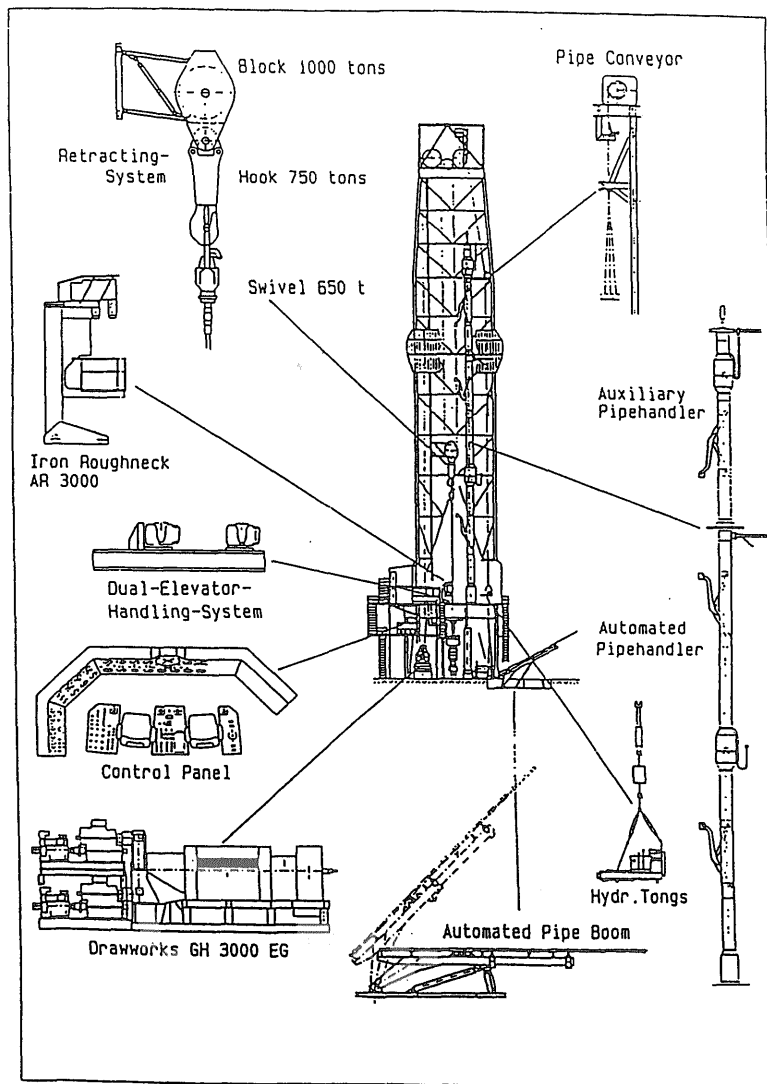
た全掘削進長は約10.9kmに達する。掘削深度と全掘削進長に対する掘削メートル単価は、それぞれ約230万円/mと約197万円/mとなる。ドリリングコントラクターに支払われたデーレートは、1年ごとに前年の実績と今後の工事計画を考慮して決定されるため変動したが、約540万円であった。この内訳は1994年実績で概ね第7-9表の通りである。

KTBでは11の技術分野で合計69のテーマについて研究開発が実施され、経費は約22百万マルク(約18億円)であった(第7-10表)。このうち垂直掘削関連で33%、コア掘削とリグ関連が、それぞれ18%を占めている。

メインホール関係技術

(A) 敷地と掘削リグ

メインホールとパイロットホールの坑口は、同一敷地内で約200m離れた場所に位置している。敷地面積は約56,800m²で、この敷地内にKTBの掘削技術者の事務所と科学者用研究室、岩石サンプル保管庫(コアライブラリ



第7-11図 KTBメインホールの主要掘削機器概念図

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

第7-11表 KTBメインホール主要掘削機器一覧表

1. Bohrturm Fabrikat Basis Freie Höhe Einsicherung Hakenausnahmelast Kronenausnahmelast Abstellkapazität	NOELL 11,50 x 11,50 m 63 m 10 - 16 8.500 kN 10.550 kN 12.000 m DP + DC	1. Derrick Manufacturer Base Clear Height Number of Lines Max. Hook Load Nominal Gross Capacity Racking Capacity
2. Unterbau Fabrikat Arbeitsbühne Höhe Freie Höhe Max. Tragkraft	DEILMANN 13 m x 13 m 11,75 m 9,50 m 12.000 kN	2. Substructure Manufacturer Rig Floor Height Clear Height Load Capacity
3. Hebewerk Fabrikat Max. Leistungsaufnahme Betriebsart Max. Zugkraft Max. Seilgeschwindigkeit Anzahl der Gänge Seildurchmesser Nachlaufvorrichtung	WIRTH 2.200 kW 4 - Quadrant / DC 750 kN 20 m/s 4 1 3/4" 0 - 30 m/h	3. Drawworks Manufacturer Max. Input Operating Method Max. Line Pull Max. Line Speed Number of Speeds Drill Line Diameter Feed-off-control
4. Spülpumpen Fabrikat Anzahl Max. Eingangsleistung Fabrikat Anzahl Max. Eingangsleistung	WIRTH 2 1.240 kW, each LTV CONEMSCO 1 620 kW	4. Mud Pumps Manufacturer Number of Units Max. Input Manufacturer Number of Units Max. Input
5. Antriebssystem Fabrikat Art Netzspeisung Anzahl der Antriebsmotoren Fabrikat Max. Leistung	AEG SCR System 2 x 20 kV / 7.000 kVA 9 x DC SIEMENS 740 kW, each	5. Drive System Manufacturer Type Mains Number of Drive Motors Manufacturer Max. Output
6. Pipehandling Pipehandler - Fabrikat - Höhe - Kapazität - Zuglänge Doppel-Elevator-System Retraktor Verschraubeneinrichtung Gestängeschwenkvorrichtung Gestängelörderer	HITEC / VARCO 53 m 150 kN max. 40 m VARCO VARCO VARCO DEILMANN DEILMANN	6. Pipehandling Pipehandler - Manufacturer - Height - Capacity - DP Stand Dual Elevator System Retractor Iron Roughneck Pipe Boom Pipe Conveyor
7. Preventer Fabrikat Anzahl Freier Durchgang Druckstufe	SHAFFER 4 x Ram + 1 x Annular 18 3/4" 700 bar	7. Preventers Manufacturer Number of Units Opening Rating
8. Tankanlage Fabrikat Aktivtank-Volumen Reservetank-Volumen	ITAG 150 cbm 300 cbm	8. Mud Tank System Manufacturer Active Tank Volume Reserve Tank Volume

第7-12表 KTBメインホールで使用したケーシング一覧表

No.	Drilling Phase		Casing Section		Grade & Weight		Casing Dimensions (nominal)					Connection Type and Dimensions		Pressure Rating		Cementation (Top of Cement)		
	from	to	from	to	Grade	Nominal Weight	Diameter		Drift	Wall	Type	Diameter	Burst	Collaps	actual	planned		
	[m]	[m]	[mm]	[inch]		[lbs/ft]	OD	ID	[mm]	[mm]		OD	ID	[bar]	[bar]	[m]		
			0,0	5,7	Conductor Pipe	32	812,8	787,4		12,70								
I	0	305,0	711,2	28	2 1/2" Casing 0 - 290,0 m	140	24 1/2	622,3	595,3	591,00	13,50	B-OMG	647,7	595,3			to surface	to surface
II	290,0	3003,0	444,5	17 1/2	16" Casing 0 - 3000,5 m												to surface	to surface
			0,0	710,0	C-90	84	16	406,4	381,3	376,48	12,57	H-521	412,9	379,4	336,0	102,0		
			710,0	2484,5	N-80	84	16	406,4	381,3	376,48	12,57	H-521	412,9	379,4	299,0	102,0		
			2484,5	3000,5	K-55	84	16	406,4	381,3	376,48	12,57	H-521	412,9	379,4	205,0	97,0		
III	3000,5	6018,0	374,65	14 1/2	13 3/4" / 13 1/2" Casing 0 - 6013,5 m												4350 m	2850 m
			0,0	551,3	V-150	88,2	13 3/4	346,1	314,3	312,00	15,88	MO-XSC	352,4	312,8	830,5	343,3		
			551,3	1062,0	Q-125	88,2	13 3/4	346,1	314,3	312,00	15,88	MO-XSC	352,4	312,8	692,1	331,3		
			1062,0	2805,6	P-110	88,2	13 3/4	346,1	314,3	312,00	15,88	MO-XSC	352,4	312,8	609,0	315,5		
			2805,6	5386,6	Q-125	72	13 3/4	339,7	313,6	312,00	13,06	MO-XSC	345,5	312,8	579,8	198,9		
			5386,6	6013,5	Q-125 HC	72	13 3/4	339,7	313,6	312,00	13,06	MO-XSC	345,5	312,8	579,8	237,4		
IV	6013,5	7790,0	311,15	12 1/2	9 7/8" / 10 1/2" Liner 5893,0 - 7784,8 m												top of liner	top of liner
			5893,0	7457,1	Q-125	47	9 7/8	244,5	220,5	216,50	11,99	H-SLX	248,5	218,5	740,0	388,0		
			7457,1	7718,8	L-80	109	10 1/8	273,1	220,6	216,50	26,24	MUST	280	218,5	927,0	958,0		
			7718,8	7784,8	Q-125	47	9 7/8	244,5	220,5	216,50	11,99	H-SLX	248,5	218,5	740,0	388,0		
V	7784,8	8729,7	215,9	8 1/2	7 7/8" Liner 7695,7 - 8665,0 m												top of liner	top of liner
			7695,7	8665,0	P-110	39	7 7/8	193,7	168,3	165,10	12,70	H-SLX	197,5	166,2	870,0	763,0		
VI	8625,2	9101,0	165,1	6 1/2	5 1/2" Liner 8550,5 - 9031,0 m												top of liner	top of liner
			8550,5	9031,0	U-160	17	5 1/2	139,7	124,3	121,10	7,72	H-SLX	142,2	122,2	1066,8	574,3		

第7-13表 KTBメインホールで実施したケーシングセメンチング一覧表

	Casing-/Liner Size											
	24 1/2"		16"		13 3/8"-13 5/8"		9 5/8"-Liner		7 5/8"-Liner		5 1/2"-Liner	
Cemented from m to m	0,0	290,0	0,0	3000,5	4350,0	6013,5	4350,0	5893,0	7695,0	7695,0	8550,5	8550,5
Cement length [m]	290,0	290,0	3000,5	3000,5	6013,5	6013,5	1663,5	1663,5	7784,8	7784,8	8665,0	9031,0
Cementation Data	Volume m ³	Rate l/min	Volume m ³	Rate l/min	Volume m ³	Rate l/min	Volume m ³	Rate l/min	Volume m ³	Rate l/min	Volume m ³	Rate l/min
Spacer (Pre-Flush)	20		20		11		30		30		10	
Type	Water		HEC		HEC		weighted mud		weighted mud		water, retarded	
s.G. [kg/l]	1,00		1,01		1,01		1,50		1,50		1,01	
Lead Cement from to	60	800	176	1400	112	1000	93	500	24	1000	8	1000
s.G. [kg/l]	1,78	100	1,55	1500	1,55		1,60	1400	1,90		1,90	
Tail Cement from to			15	400	17	400	80	1500				
s.G. [kg/l]			1,90	500	1,85		1,90					
Spacer (Post-flush)			2		2		5		5		1,5	
Type			HEC		HEC		weighted mud		weighted mud		water, retarded	
s.G. [kg/l]			1,01		1,01		1,50		1,50		1,01	
Mud			1,04		1,04		1,23		1,41		1,35	
s.G. [kg/l]												
Flow Regime Cement	laminar (Plug)		laminar (Plug)		laminar		laminar		laminar		turbulent	
Max. Pressure [MPa]	4		11		22		13,5		7,8		22,5	
Final Pressure [MPa]	2,2		8,8		14,5		18,4		not visible		28,2	

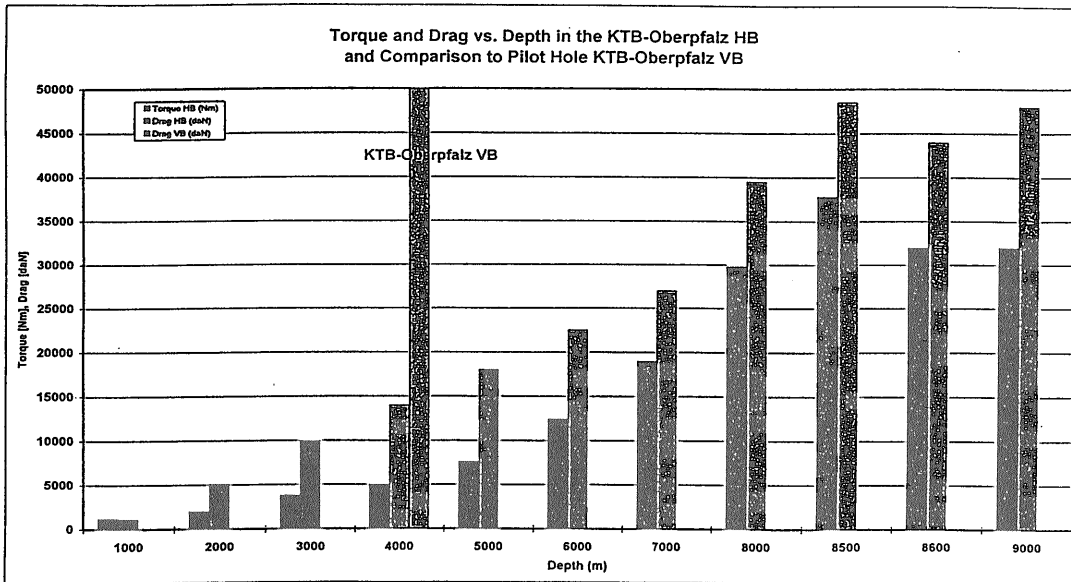
第7-14表 KTBメインホールでの垂直掘削システム (ZBE, VDS) 実績総括表

Drilling Phase	Depth Section			Runs with Vertical Drilling Systems			Performance					
	from	to	Distance	total	ZBE	VDS	Footage			average footage/run		
	inch	m	m				m	m	m	m	m/run	ZBE
17 1/2	0	3003,0	3003,0	39	24	15	1229,5	773,4	456,1	31,5	32,2	30,4
14 3/4	3000,5	6018,0	3017,5	43	-	43	1679,0	-	1679,0	39,0	-	39,0
12 1/4	6013,5	7485,3	1471,8	42	-	42	1069,7	-	1069,7	25,5	-	
Total	0	7485,3	7485,3	124	24	100	3978,2	773,4	3204,8	32,1	32,2	31,8
Best Run	77,3	261,3	184,0									184,0

第7-15表 KTBメインホールでのMotor-steering-systems 実績総括表

Drilling Phase	Depth Section			Runs	Performance		
	from	to	Distance		Footage	Hours	avg. footage/run
	inch	m	m	m	m	h	m/run
17 1/2	0	3 003,0	3 003,0	12	402,8	544,8	33,6
14 3/4	3 000,5	6 018,0	3 017,5	-	-	-	-
12 1/4	6 013,5	7 445,3	1 431,8	37	697,1	2 034,8	18,84
Total	0	7 445,3	7 445,3	49	1 099,9	2579,6	22,4
Best Run	1174,6	1242,0	67,4				67,4

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)



第7-12図 KTBメインホールのロータリートルク、揚げ荷重と深度4,000mにおけるパイロットホールの揚げ荷重

一)が完備されている。また、ドリルパイプの検査も坑井近傍で実施できるスペースが確保されている。

メインホール用の掘削装置は、この科学掘削用に設計製作され以下の特徴がある。①ドリルパイプの揚降管を効率的に行うため40mスタンドを使用。②ドリルパイプ自動ハンドリング装置等を使用し効率と安全に配慮。③深度12kmの掘削に十分な設計がなされている。④オールコア用には設計されていない。

第7-11図と第7-11表に、それぞれKTBメインホールの主要掘削機器概念図と主要機器一覧表を示した。

(B) ケーシングとセメンチング

メインホールで使用したケーシング、ケーシングセメンチング諸元、およびケーシング挿入とセメンチング作業に要した時間を、それぞれ第7-12, 13表に示した。これらの表から深度6,000mのケーシングには約18日間、深度9,031mの5-1/2インチライナーには約20日間を要している事が分かる。

(C) 垂直掘削システムとMSS

KTBでは坑井を垂直に掘削するための装置の開発を2社に依頼した。そのうち1社はVDS、他社がZBEを開発した。これらはいずれも、ビット直上に取り付けられ、4つの独立したリブの開度を調節する事で坑井の垂直性を保つもので、原理は非常に類似しており、17-1/2インチ坑では両方使用されたが、14-3/4インチ坑以深ではVDSだけが使用されるようになった。VDSはExternal-steeringとInternal-steeringの両方が開発されたが、結局External-steering方式が性能が良いと判断された(第7-14, 15表)。垂直掘削システムが降下された最終深度は7,485.3mであるが、この深度では掘削できず、掘削を行った最深深度は7,281.1mである。結局垂直掘削システム

第7-16表 代表的な掘削編成

ZBE-5 000 - Typical BHA-Configuration		
Component	Diameter (OD)	
	inch	mm
Drillstring	5	127,00
Thickwall-Drillpipe	5	127,00
Drillcollars	8 1/4	209,55
Drillcollars	9 1/2	241,30
Drilling Jar	9 1/2	241,30
Drillcollars	11 1/4	285,75
Stabilizer	17 3/64	444,10
Drillcollars	11 1/4	285,75
Stabilizer	17 3/64	444,10
Shock Sub	11 1/4	285,75
Downhole-Motor w. Stabilizer	11 1/4	285,75
ZBE-5 000 w. MWD-Pulser Sub	11 1/4	285,75
Bit	17 1/2	444,50

VDS-3 - Typical BHA-Configuration		
Component	Diameter (OD)	
	inch	mm
Drillstring	5	127,00
Thickwall-Drillpipe	5	127,00
Drillcollars	8 1/4	209,55
Drillcollars	9 1/2	241,30
Drilling Jar	9 1/2	241,30
Drillcollars	11 1/4	285,75
Shock Sub w. Stabilizer	11 1/4	285,75
MWD-Pulser Sub	11 1/4	285,75
Downhole-Motor w. 2 Stabilizer	11 1/4	285,75
VDS-3	17 3/8	441,30
Bit	17 1/2	444,50

Packed Hole Assembly - Typical BHA-Configuration		
Komponente	Durchmesser	
	Zoll	mm
Drillstring	5	127,00
Thickwall-Drillpipe	5	127,00
Drillcollars	8 1/4	209,55
Drillcollars	9 1/2	241,30
Drilling Jar	9 1/2	241,30
Drillcollars	11 1/4	285,75
Shock Sub	11 1/4	285,75
Downhole-Motor w. 2 Stabilizer	11 1/4	285,75
Stabilizer	17 3/64	444,10
MWD-Pulser Sub	11 1/4	285,75
Drillcollar w. Universal Measur. System	14	355,60
Stabilizer	17 3/64	444,10
Roller Reamer	17 1/2	444,50
Bit	17 1/2	444,50

第7-17表 KTBメインホールの各サイズごとのビット実績

Drilled (in total)							
Bit Diameter	Section drilled from - to	No. of Bits used	Performance obtained				
			Average			Maximum	
			Footage	Bit Life	ROP	Footage	Bit Life
mm (inch)	(m)	pcs.	(m)	(h)	(m/h)	(m)	(h)
444,5 (17½)	0 (6)* - 305 290,5 - 3003	23	127,12	91,45	1,39	356,5	164,8
374,7 (14¾)	3000,5 - 6018,0	49	61,26	58,52	1,05	131,8	82,0
311,2 (12¼)	6013,5 - 8328,2 (7790,0)	52	50,34	49,55	1,02	216,5	156,0
215,9 (8½)	7784,8 - 8729,7	10	92,50	49,5	1,87	128,5	59,0
165,1 (6½)	8625,2 - 9101,0	18	25,7	25,6	1,00	68,6	41,5
Totally drilled 0 (6)* - 9101m		152	65,3	55,9	1,17	356,5	164,8

* Starting Depth (out of 32"-Conductor Pipe)

第7-18表 ロシアにおける科学調査掘削一覧 (Khakhaev, et al., 1996)

Scientific Drilling in Russia and Countries of the Former USSR			
Well	Depth (m)	Years of drilling	Type of section
Tuimazinskaya	3840	1964-65	Crystalline basement
Kola*	12261	1970-94	Crystalline basement
Minnibaevskaya	5088	1973-75	Crystalline basement
Kuban	4000	1980-90	Sedimentary cover
Ural **	5350	1985-	Fold belt
Timano-Pechora	6904	1985-93	Sedimentary cover
Kolva	7057	1986-90	Sedimentary cover
Tumen	7502	1987-	Sedimentary cover
Tyrnauz	4001	1987-90	Granite massif
Novo-Elkhovskaya	5740	1989-95	Crystalline basement
Vorotilov *	5347	1989-92	Impact structure
Kazakhstan			
Aralsor	6807	1961-68	Sedimentary cover
Biikzhalskaya	6022	1967-72	Sedimentary cover
Caspian	6031	1984-89	Sedimentary cover
Ukraine			
Dniper-Donetsk	6915	1983-91	Sedimentary cover
Krivoy Rog	5700	1984-94	Crystalline basement
Uzbekistan			
Muruntan	4290	1984-91	Fold belt
Almalyk	3722	1984-90	Fold belt
Azerbaijan			
Saatly	8324	1977-90	Sedimentary cover
Total by the Program	114928		
* - Deep Geolaboratories			
** - Under Drilling			

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

は124回使用し、延べ掘進長は3,978.2m、平均掘削長は32.1mであった。坑井の傾斜修正とサイドトラックのために、Motor-steering-system (MSS)と呼ばれる1つのリブを広げた垂直掘削装置が用いられた。MSSは49回使用され、延べ掘削長は1,099.9m、平均掘削長は22.4mであった。また、第7-16表には代表的な掘削編成を示した。

(D) ドッグレグとロータリートルク、揚げ荷重

第7-12図にメインホールのロータリートルク、揚げ荷重とパイロットホールの深度4,000mでの揚げ荷重の比較を示した。この図からパイロットホールの4,000m掘削時とメインホールの9,000m掘削時の揚げ荷重がほぼ等しく、メインホールがいかにドッグレグの小さい坑井であるかが分かる。また、メインホールでは7-5/8インチライナー挿入後トルクと揚げ荷重が減少している状況が読みとれる。

(E) サイドトラック技術

パイロットホールではサイドトラック方法として、セメントプラグ後にベントサブ[†] ((9).3用語集参照)とダウンホールモータを使用する方法、および裸坑部にホイップストックをセットする方法が実施された。メインホールでは時系列的に以下の5つの方法が実施された。(1)セメント埋め立て後沿角編成で垂直にサイドトラック、(2)セメント埋め立て後垂直掘削装置で垂直にサイドトラック、(3)セメント埋め立て後MSS編成でサイドトラック、(4)セメント埋め立て後MSS+bent-sub編成でサイドトラック、(5)あらかじめ窓を開けておいたホイップストックをセットしてサイドトラック

(F) ビット記録

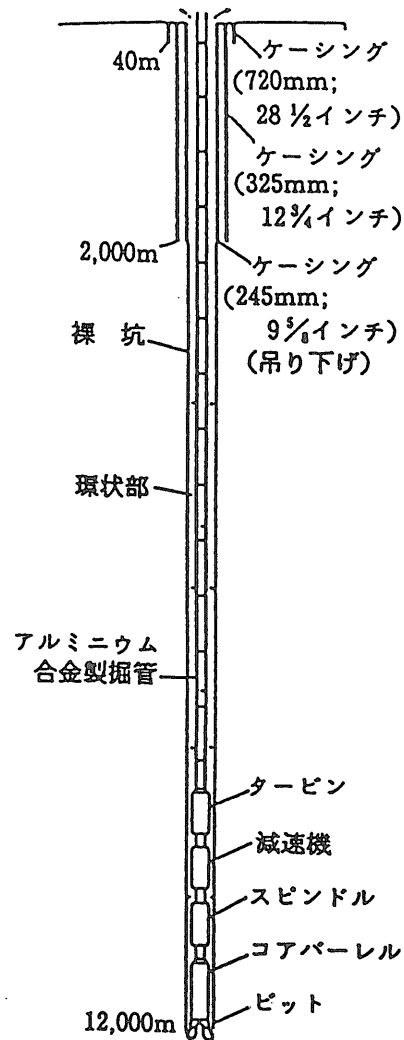
メインホールで使用した各サイズごとのビット使用実績を第7-17表に示した。この表からビットはサイズが小さくなると1丁当たりの掘進長、寿命が短くなり、最終坑径の6-1/2インチでは約25m掘削ごとに交換が必要になっている。

7.2.2 ロシアのコラ半島SG-3井 (世界最深の科学掘削)

この章ではコラ半島の科学掘削の状況を塚原(1996)らの文献を基に紹介する。旧ソ連では1970年代初頭から深層科学掘削に力を入れており、ソ連国内の11地点(第7-18表)で学術研究・技術開発を主な目的として深層掘削が実施されていた。そのうち研究の完了したもの、経済的理由から中断したもの、ロシア以外の国に属してしまったものなどあり、掘削あるいは研究が現在まだ継続されているのは、コラ、ウラル、チュメニの3坑井である。この中で、コラSG-3井は学術目的以外のものも含めて世界で最深の掘削坑である。深度は12,261mであり、掘削は終了している。

SG-3は、1970年に掘削が開始された。場所はコラ半島の北端、北極海に近いムルマンスク市から110km西方のノルウェイとの国境近くである。近くには「ニッケル」という町があり、古くからの大規模な露天掘りのニッケル

鉱山がある。極北の地に世界最深の掘削が計画されたのは、学術的立地条件以外に、このような資源とこの地域に蓄えられている掘削技術に関する高い人的・物的バックグラウンドの存在が考慮されてのことだろう。学術的な目的は、非常に古い安定大陸を構成している花崗岩質岩石が地下深部でどのように変化するのか、どのような状態で存在するかを明らかにする点にあった。1990年に12,261mまで達した。その後、さらに掘り進むべく様々な努力をしたが、掘削坑の傾きが増大し、また坑壁が崩れてしまってそれより深くは増掘できなかった。ソ連の崩壊もありこれ以上の掘削は断念し、SG-3を国際的共同利用の地球物理実験施設として、世界の研究者に共同利用を呼びかけることになった。現在、安全に使える深さは8,578mまでであり、そのうち8,270mまではケーシングが挿入され、坑壁崩壊を防いでいる。露出した地層で実験ができるのは300m間である。ケーシングの内径は24.5cmで、深部の裸坑部分は内径21.5cmである(Khakhaev *et al.*, 1996)。第7-13図にSG-3坑井図を示した(田中, 1987)。



第7-13図 Kola SG-3坑井 (@12km) (田中, 1987)

コラSG-3掘削の技術的特徴は次の3点である。

(1) アルミ合金製の掘管の開発

超深層掘削を実施するには、掘管の軽量化が一つの重要な技術開発のポイントである。引き上げ能力の小さな掘削装置でより深い掘削を可能とする点で軽量化は一般的に重要であるが、超深層掘削の場合には、それ以上にメリットが大きい。磨耗して使えなくなったドリルビットの交換のたびに掘管は全部地表に引き上げられる。深さ10kmくらいになると、この上げ下ろしの時間の方が、掘削時間よりもずっと長くなってしまふ。そのスピード化のためには掘管の軽量化が最も効果的である。そのため、ロシアでは掘管の軽量化の技術開発に力を入れ、前述のようにアルミ合金製の掘管を開発して使用している。例えば、12,000m付近の掘削時には、ドリルビットを交換するのに掘管の上げ下ろしに往復20時間かかり、ドリルビットの寿命はこの深度では平均4時間だったという (Walton, 1987)。掘進速度は2~3 m/時間なので (Walton, 1987) 一回で10m程度しか掘削できない。

(2) 坑底モーターによる掘削法

掘削をするためにはドリルビットを坑底で回転させる必要がある。現在使われている通常の掘削法は、地表から掘管を回転させ、その先に付いたビットを回転させる。超深層科学掘削のためにロシアは坑底モーターによる掘削法を開発した。地表から掘管を回転する方式では、深度が

深くなると回転トルクを坑底のドリルビットまで伝えるべく、また掘管と坑壁との摩擦で掘管が磨耗してしまうからである。坑底モーターの動力源は、地上から掘管の中を通して坑底に送られる泥水の流れである。円筒の中でタービンあるいはスパイラル状の溝のついた芯が泥水の流れにより回転する。

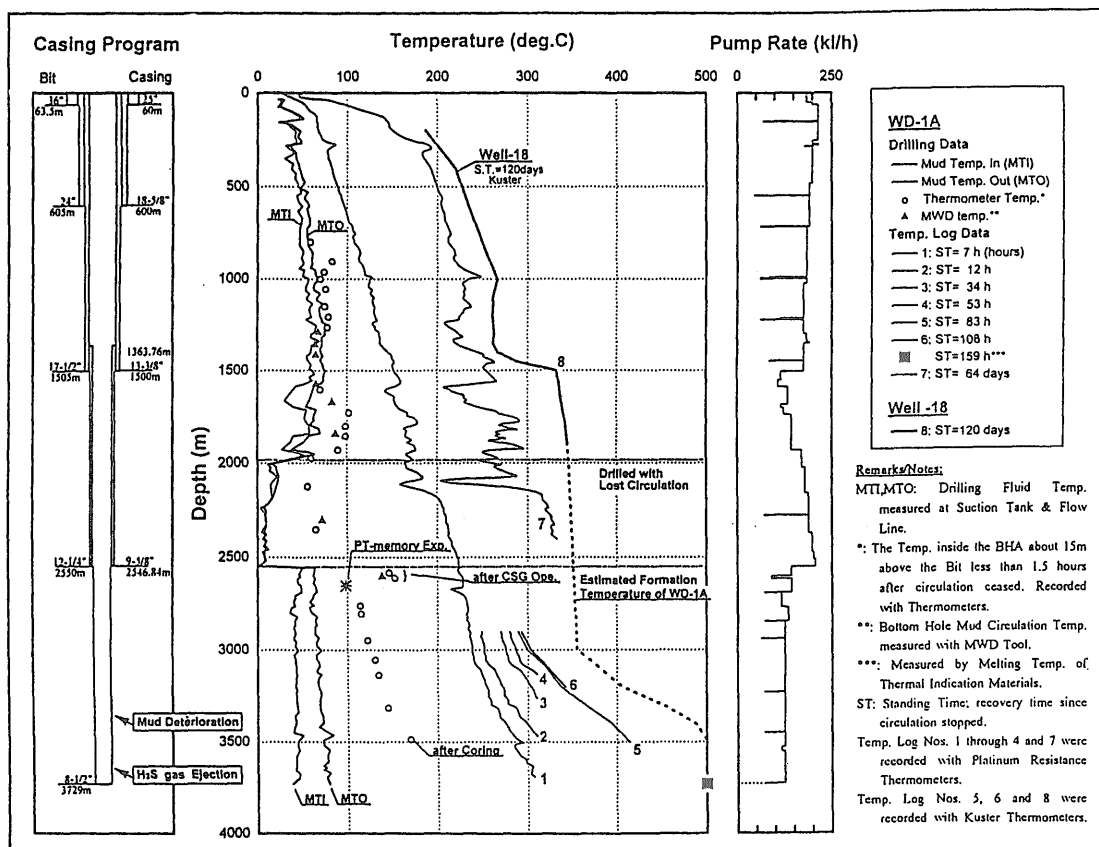
(3) オールコア掘削法の採用

世界の深層掘削のほとんどはところどころの深度でコアをほんの少し採取するだけである。SG-3ではオールコア掘削法を採用して全深度のコアを100%採取する努力を重ねた。それでも実際は、平均40%のコア回収率であった。この回収率は深さによらず、岩質に左右されている (Kozlovsky, 1984)。

7.3 日本の超高温・超深部掘削の現状

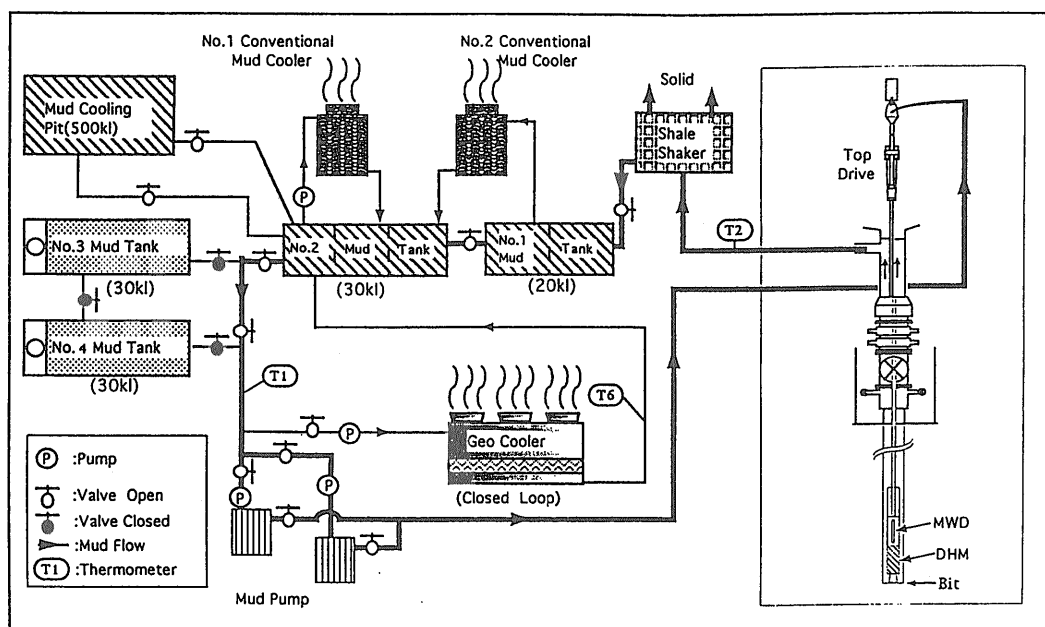
7.3.1 岩手県葛根田地熱地域WD-1A (世界で最も高温層の深部掘削)

この章では葛根田での高温掘削を塚原ら(1996)の文献を基にして紹介する。雫石町葛根田地域では1978年から地熱発電が開始されている。地下には若い花崗岩がまだ冷え切らずに横たわっており、これまでに地層中から高温蒸気を生産する掘削が多数なされている。1994年から新エネルギー・産業技術総合開発機構によって、深部地熱調査のためとしては日本で最も深い4,000mをめざし



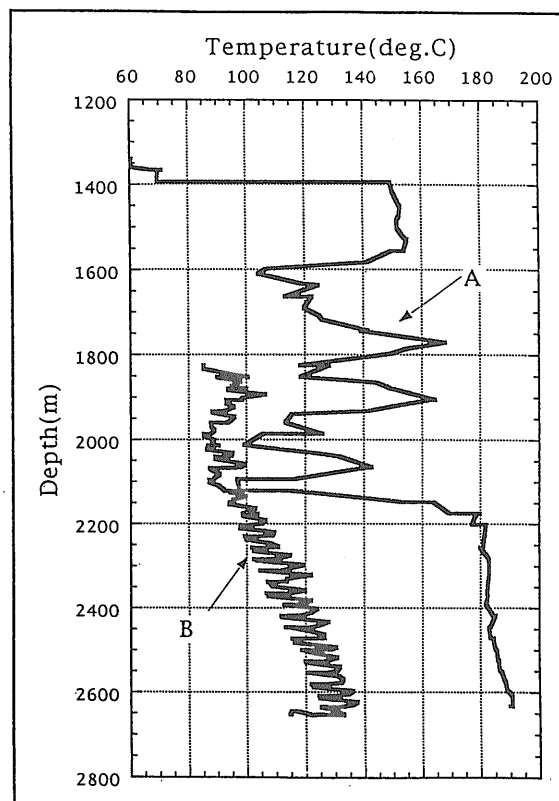
第7-14図 葛根田WD-1A掘削中の温度と掘削終了後の坑井内温度検層結果 (Saito et al., 1996a)

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

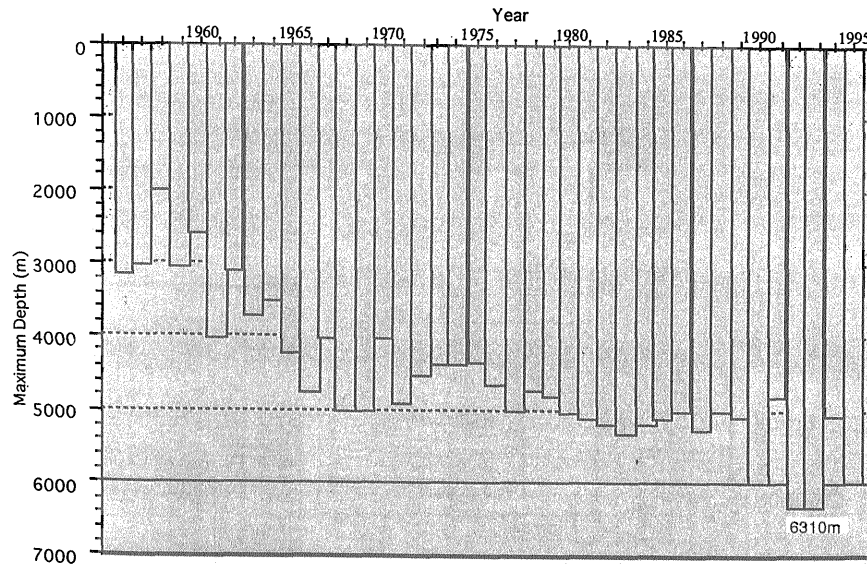


第7-15図 葛根田WD-1A掘削システム図 (Saito et al., 1996b)

た掘削が開始された。1995年6月深度3,729mに達し掘削を終了した(第7-14図, Saito *et al.*, 1996a)。第四紀の花崗岩は掘削深度2,860mから出現した。この掘削坑の地層温度は深度3,500mで500°Cであった(特殊な金属の融点により測定)ので坑底の3,729mでは500°Cを越えているはずである(第7-14図)。マグマ掘削等の浅い坑井を除けば、世界で最高温度の地層を掘削したことになった。掘削は地表から掘管を回転させる従来の掘削法によった。現状では、ドリルビットやその周辺機器の一部、例えば、ビットのシール材、掘進状況検出・データ搬送装置(MWD)の電子部品、などは耐熱性が150~175°C程度である。このため、これらの装置を坑内に降下する時、高温度にさらされることが問題になっていた。この掘削では、トップドライブを採用して、ビットと掘削ツールを坑井内に降下中でも冷却が可能になるよう工夫がなされた。また、掘削泥水を冷却するための装置も使用された(第7-15図)。この結果、温度が500°Cの地層でも、掘削中のドリルビットの先は170°C以下に冷却することができた。なお、この掘削では通常の掘削作業では知り得ない坑井内のダイナミックな温度状況を、メモリーゲージと検層器を使用して2.5日間測定している。温度測定中第7-16図に示すような高温掘削に必要なデータが得られた。コアは連続的には採取されていないが、坑底を含む10数箇所から採取されている。このうち、3個はコアの方位が特定できる定方位コアである。2,546mまで径24.1cmのケーシングが挿入されており、その下は裸坑のままであったが、2,400mまで埋め立て、今後深度2,300m付近から枝坑を掘り、3,000mまで掘削が実施される事になっている。3,729mまでの測定としては温度検層、泥水柱からの孔隙圧、3,500mまでのコアなどがある。



第7-16図 掘削編成降管中に泥水循環した場合Bとしない場合Aの坑井温度比較 (Saito et al., 1996b)



第7-17図 我が国の石油・ガス井の掘削深度実績 (Yoshida, 1996)

第7-19表 通商産業省の陸上石油基礎試錐 (第5, 6及び7次計画) の坑井 (田中, 1994)

坑井名	地域	掘削期間		掘削深度, m	坑底付近の地質
		開坑	掘止		
黒松内	北海道	1981.09.23	1981.12.11	3,310	中新世訓縫層
豊頃	北海道	1983.01.14	1983.03.16	3,305	中新世オコッベ沢層
富山	富山	1984.10.20	1985.01.11	3,020	中新世岩橋層
留萌	北海道	1985.07.24	1986.06.02	5,023	白亜紀隈尻層群
高田平野	新潟	1986.10.20	1987.10.29	5,240.5	中新世火打山層
仁賀保	秋田	1987.10.01	1988.05.05	5,000	中新世八塩沢川層
相良	静岡	1988.12.10	1989.03.26	3,230	中新世/漸新世
新潟平野	新潟	1989.10.17	1990.05.27	6,000	中新世七谷層
東頸城	新潟	1989.09.15	1990.09.27	6,004	中新世七谷層
新米山	新潟	1990.11.19	1991.09.16	4,800	中新世七谷層
三島	新潟	1991.09.01	1992.07.31	6,300	中新世七谷層
新竹野町	新潟	1992.10.14	1993.05.09	6,310	中新世七谷層
天北	北海道	1993.10.01	1994.06.27	5,050	白亜紀上部蝦夷層群

第7-20表 通商産業省の陸上石油基礎試錐 (第5, 6及び7次計画) の坑井の坑底付近の状況 (田中, 1994)

坑井名	坑底付近の掘削		坑底の状況			最深ケーシング		最深コア掘	
	ビット径, inch	泥水比重	最高温度, °C	偏距, m	傾斜度, 斜分	管径, inch	設置深度, m	深度, m	採取率, %
黒松内	8-1/2	1.24	184	128	2.18	9-5/8	1,600	3,310	92
豊頃	8-1/2	1.18	91	161	6.10	9-5/8	1,606	3,305	100
富山	8-1/2	1.36	137	20	0.06	9-5/8	2,000	3,007	95.6
留萌	8-1/2	1.69	159	79	2.50	9-5/8	4,490	5,023	100
高田平野	8-1/2	1.70	180	347	17.18	9-5/8	4,254	5,104.5	90
仁賀保	8-1/2	1.78	193.5	391	14.24	5-1/2(L)	4,995.4	4,972	100
相良	8-1/2	1.84	94	228	11.12	7(L)	3,051	3,210	100
新潟平野	8-1/2	1.80	192	104	3.30	9-5/8	4,783	5,975.5	99
東頸城	8-1/2	1.64	212.2	673	15.42	9-5/8	5,000	5,983.3	100
新米山	8-1/2	1.35	177	345	7.48	9-5/8	3,715	4,763	100
三島	6	1.91	226.2	174	20	5(L)	6,300	6,279	92
新竹野町	8-1/2	1.82	197	216	6.30	9-5/8	5,006	6,285	100
天北	8-1/2	1.86	156.8	182	8.42	9-5/8	4,640	5,029	98

注 温度には測定値とそれにより Horner 法により補正した値とがある。
 (L)はライナーを示す。
 「三島」の深部のケーシングとしては 9-5/8 inch × 6,004 m, 7 inch (L) × 5,997 m がある。

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

第7-21表 主要掘削ツールズ、機材および薬剤等の耐熱温度一覧表

項 目		耐熱 (°C)
掘 削 ツールズ 機 材	ビット	
	トリコーンビット(シール材, 潤滑油)	150~190
	ダイヤモンドビット	400以上
	ダウンホールモーター	
	PDM	150~175
	タービン	350
	垂直掘削装置 (K T B使用)	175
	MWDツールズ	
	ノンリトリーバブルタイプ	175
	リトリーバブルタイプ	150
機 材	シングルショット (坑芯測定用)	250 (4 hours)
	ドリリングジャー	260
	ショックサブ	175
	ライナーハンガー用シール類	230
機 材	ケーシングセメンチング機材	
	フローティング機材類	200 (8 hours)
	ステージカラー	260
薬 剤	セメンチングプラグ類	200 (3 hours)
	泥水 (ウォーターベース)	
	重泥水(weighted mud)	250
	非重泥水(unweighted mud)	300
	増粘剤	370
	脱水調整剤	230
	分散剤	260
	潤滑剤	260
	坑壁増強剤	260
	泥水 (オイルベース)	
	重泥水(weighted mud)	260
	非重泥水(unweighted mud)	300
	セメント	
	シリカ系セメント (坑底循環温度)	260
	シリカ系セメント (硬化後温度)	400
	セメント添加剤	
	遅硬剤	260
脱水調整剤	260	
分散剤	260	
バックオフツール用火薬	220	

(1996.7調査)

7.3.2 我が国における深部井掘削状況 (石油・ガス井)

日本における深部井掘削は石油・ガスの探査や開発の分野で実施されている。その深度は1956年に深度3,000 m, 1961年に深度4,000m, 1968年に深度5,000m, 1990年に深度6,000mに達した(第7-17図, 第7-19表)。現在最も深い坑井は新潟県で掘削された深度6,310mの石油探査井である。我が国の石油・ガス井の地層温度の最高値は225°Cでその坑井の深度は6,300mを記録している(第7-20表)。また、深度6,000mの坑井掘削に要した日数は280-360日で、費用は45~55百万US\$とされている。なお、現在我が国に存在する最大の掘削機能力は、カタログ値

で深度7,500mとされている。

国際化と共に日本の石油会社は日本だけではなく世界のあらゆる地域で掘削を行っており、また先端技術を取り入れてきた。したがって技術的にも経験でも世界と同レベルと見てよい。しかし掘削技術の発展は、主に石油・ガス開発の分野でなされてきた。石油・ガス井の地層温度は一部の高温井を除けば、地層温度は200°C以下である。この為日本の石油企業の掘削技術者は世界の掘削技術者と同様200°C以下の作業に非常に精通しており、それ以外の条件の坑井掘削にあまり関心を示さないのが通例であった。またメーカーにとっても、掘削ツールズや泥水

添加剤等の耐熱性を向上させる技術開発は需要が少なく、技術開発は主に、より効率的な掘削技術、正確な傾斜掘削技術の分野で実施されてきた。このため、メーカーは主要掘削ツール、機材および薬剤等の耐熱性を向上させる研究に資金を投入してこなかったのが現状と言える。

第7-21表に主要掘削ツール、機材および薬剤等の耐熱温度一覧表を示した。掘削用ビットには3つのコーンが回転するトリコーンビットとダイヤモンドビットに代表されるソリッドタイプのビットがある。トリコーンビットは、ベアリングを潤滑する潤滑油とシール材が必要のため、耐熱温度は150~190°Cである。ソリッドタイプはベアリングがないため耐熱温度は400°C以上で、地層条件が良ければ効率的な掘削が可能で、近年石油井で盛んに使用されている。しかし、JUDGE計画掘削地点の地層がソリッドビットに適しているかは現状では不明である。ちなみに、KTBのメインホールではソリッドビットが地層条件に合わないためトライコーンビットを使用している。

ダウンホールモータにはモータータイプ(PDM: Positive Displacement Motor)とタービンタイプがあり、耐熱温度は前者が150~175°C、後者が350°Cである。タービンは回転数が大きすぎるためトリコーンビットには不向きで、KTBでは減速機付きタービンの開発を実施したが実際の掘削には使用されず、PDMを使用した。坑跡の垂直性を保つためにKTBで開発した垂直掘削装置の耐熱は175°C、また坑跡測定用のMWDツールは150~175°Cである。

掘削編成が坑内で抑留された時に使用されるドリリングジャーと掘削時の振動を軽減するショックサブの耐熱は、それぞれ260°C、175°Cとなっている。また、ケーシングセメンチング機材の耐熱は200°Cで、セメンチング作業が終了するまでこの温度以下に保つ必要がある。泥水にはウォータースペースとオイルベースの2種類あるが、ガス層抑圧や坑壁崩壊防止に使用される重泥水(weighted mud)は前者が250°C、後者が260°Cで、非重泥水(unweighted mud)ではいずれも300°Cが耐熱温度になっている。

セメントスラリー性状を向上させるためのセメント添加剤の耐熱温度は260°C、セメントは400°C以上で強度が極端に低下する。掘削編成が坑内で抑留され掘管のネジを戻すバックオフ作業に使用される火薬の耐熱は220°C程度とされている。

以上述べたように日本の掘削技術はレベルが高くまた経験も豊富なので日本のように掘削条件が厳しい地域であっても6,000m級の坑井であれば既存の技術で効率よく掘削可能である。

次に、日本で初めて6,000m級の坑井の掘削に挑戦した基礎試錐「東頸城」(新潟県)について、掘削状況の概要を示す。本井は、1989年から1990年にかけて、全作業日数396日、掘止め迄の日数378日をかけて、石油資源開発(株)が、日本最高級の重掘削機“1626-DE”リグにて、深度6,004mまで掘削した垂直井である。

(1) 30インチケーシング・セット(401m)まで:

ベントナイト泥水を使用して、17-1/2インチ坑パイロットホール掘削。26インチ坑拡掘、36インチ坑拡掘。入念なワイパートリップ、深い作業を実施した後、30インチケーシング降下し、5インチインナーストリングによるセメンチング。

(2) 20インチケーシング・セット(1,491m)まで:

KCLポリマー泥水に入れ替え後、12-1/4インチ坑パイロットホールをMWD使用して掘削。980m付近より、MGベース上昇、崩壊。上昇の為、泥水比重を徐々にSG1.29まで増加。また、坑井傾斜も増加気味で5°Cを越えた。

17-1/2インチ坑拡掘。26インチ坑拡掘。途中、崩壊のため深い困難、落ち込み等もありSG1.38まで増加。20インチケーシング降下し、インナーストリングによるセメンチング。

(3) 13-3/8インチケーシング・セット(3,583m)まで:

MWD使用して、12-1/4インチ坑パイロットホール掘進。坑井傾斜が増加傾向にあり、低ビット荷重で掘進、低掘進率に悩まされる。この対策として、PDCビットを使用し、掘進率の向上、増角の防止に効果を上げたが、2,900m付近から地層が硬くなって掘進率の大幅な向上はなかった。泥水はKCLリグネート泥水を使用した。MGの上昇及び長い裸坑部の崩壊によりSG1.59まで増加。坑径拡大部へのカッティングの停滞も発生し深い日時を要した。

17-1/2インチ坑拡掘では、2,900m以深の硬質泥岩中で大きなトルクがかかり、ビットHOPの摩擦も激しく掘削不渉であったが、スイープマッド多用、硬岩用HOPの採用等で対処した。ワイパートリップ中8インチDC切断し採揚作業。13-3/8インチケーシング降下し、2ステージ・セメンチング。

(4) 9-5/8インチケーシング・セット(5,000m)まで:

12-1/4インチ坑掘進。硬質泥岩対策として、ダイヤモンドビットとダウンホール・モーター(タービン)の組合せで掘進。4,000mを越えた処で、若干の逸泥がありLCMスポットにて逸泥対策。引き続きダイヤモンド・ビットとタービンによる掘進中、抑留。ジャールスによる打上げ、オイルスポットにて離脱を試みるも不渉の為、バックオフ後、サイドトラック。8-1/2インチダイヤモンドビット×PDM×MWDにてキックオフ、遺留頭部を通過する迄8-1/2インチ坑掘進し、その後12-1/4インチ坑掘進・掘進。4,100mを越えた処で、火山岩が出現し比較的順調に掘進。4,700mを越えた処で、浅部のCSGがプロテクターに著しい破損が認められ、13-3/8インチケーシング磨耗が懸念された為、予定より200m浅い深度で12-1/4インチ坑掘進中止とすることになる。4,900m付近より、高温対策の為、KCLリグネート泥水からKCLリグナイト泥水に変換した。9-5/8インチケーシング降下後、MSCリークの為、セカンドステージ・セメンチングを先に実施し、9-5/8インチケーシング・シュー付近の補修セメンチングを実施。

(5) 8-1/2インチ坑掘止め(6,004m)まで

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

第7-22表 坑井内温度シミュレーションに入力した項目

ケーシング	各ケーシングの内径・外径・シュー尻深度・セメントの高さ
坑跡	方位・傾斜・深度
掘削実績とパラメータ	1日の掘削到達深度・1日当たりのトータル冷却時間・泥水流入温度・泥水流量
地層平衡温度	地層温度・深度
岩石特性	岩石密度・岩石比熱・岩石熱伝導率
泥水特性	比重・粘性・イーロード値
掘管	掘管の内径・掘管の外径・掘管の長さ
掘具編成	ドリルカラー仕様・各ドリルカラーの内径・外径・長さ・ビット仕様・ビット口径・ビットノズルの大きさ

第7-23表 シミュレーションの前提条件と実際の掘削条件の相違点

項目	シミュレーション	実際の掘削
掘削履歴入力開始時期	13-3/8" CSGを4000mまでセット後から	深度0m掘削開始から
掘削日数	掘進率, ビット寿命, 揚降管時間, CSGセットを考慮し推定	循環, 坑径違い, 坑内事故等も考慮する必要あり
揚降管中のポンプ循環	考慮せず	必要に応じて行う
掘削中のポンプ運転	連続運転	中断あり
入泥水温度	30, 50, 70°Cのいずれかで一定	連続的に変動
泥水循環量	1100, 2600, 5200l/minのいずれかで一定	作業内容, 坑内状況によって変動

第7-24表 掘削坑径と適正泥水循環量

深度 (km)	ビット径 (inch)	ビット寿命 (h)	掘進率 (m/h)	掘進長 (m)	揚降管速度 (m/h)	ビット取替時間 (h)
4~7	12-1/4	50	1.5	75	800*	3
7~10	8-1/2	45	1.5	67.5	800*	3

* トップドライブを使用して循環しながら降管した場合の降管速度は250m/h

第7-25表 シミュレーションに使用したビットパフォーマンス揚降管条件

深度 (km)	坑径 (inch)	適正泥水循環量 (l/min)			
		ビットロリクスを考慮最大	最小	PDM使用時	コア採取時
4~7	12-1/4	2500	1800	1500~3500	1000
7~10	8-1/2	1300	600	1100~2600	1000
9~10	6-1/2	900	600	400~950	500

- ・適正ハイドロリクスはPV=20, YV=12, SG=1.4で計算した。
- ・PDM: モータータイプのダウンホールモーター
- ・スポットコアはBHI社コア器参照

硬岩用ロックビットにて8-1/2インチ坑掘進。5,600m付近より、地層はより硬質となり、ビットが異常磨耗しビット寿命が短く、揚降管時間が増加。5,800m以深では、硬質泥岩の崩壊も加わって浚い作業が増加し、1日当たりの平均掘進率が大幅に低下。崩壊対策として、泥水比重もSG1.64まで増加。コアリングを実施後、8-1/2インチ坑掘止める。

7.4 超深部・超高温掘削技術の展望

7.4.1 JUDGE坑井掘削時の坑内温度予測

坑井内温度シミュレーションの目的と実施項目

日本での超深部掘削で、三大掘削障害は高温、水平地圧異方性、掘削時間・効率であるが、超深部地層の高温はその中でも掘削深度限界を決定する最も重要な因子である。本節ではJUDGE計画が目指す掘削地層温度が現状の掘削ツールではどの深度まで可能か、将来どの程度まで掘削ツールの耐熱性を向上させる必要があるか、あるいは新しいコンセプトの掘削方法の開発が必要なのか、等の課題を詳細に検討する。坑内温度シミュレーションでは以下の6項目について検討する：(1)泥水循環による坑井内冷却効果、(2)泥水循環停止後の坑井内温度回復、(3)各深度掘削中の坑底部温度、(4)ビット交換中の坑井内温度上昇、(5)回帰泥水温度、(6)泥水循環をしながら掘削編成を降下した時の冷却効果。

解析手法と入力データ

(1) 入力データ

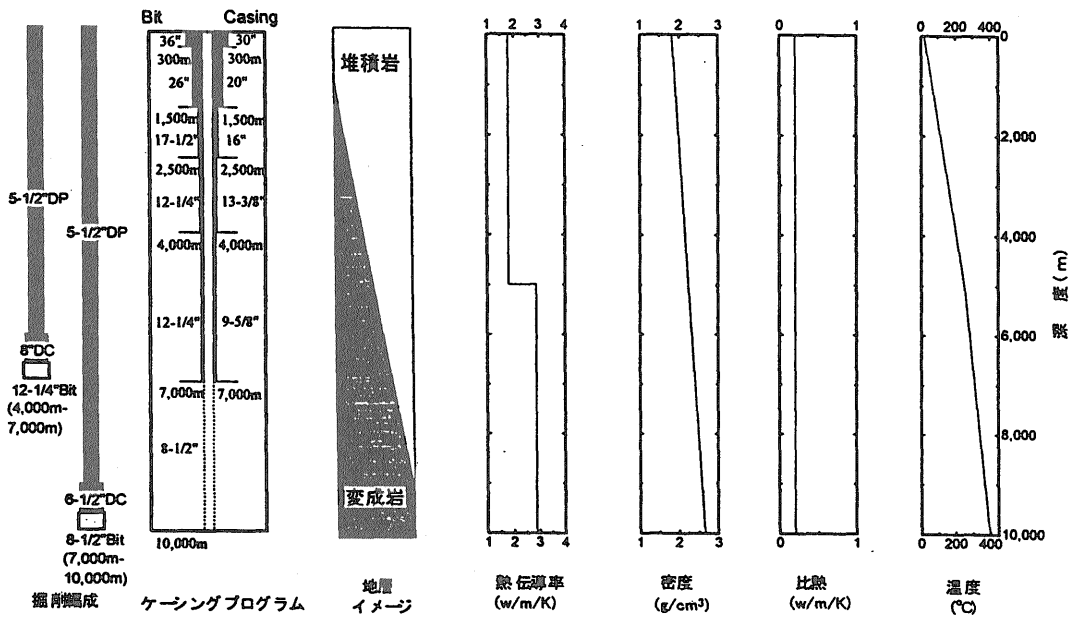
①シミュレーションに入力した項目：本シミュレーションに入力した項目を第7-22表に示す。各項目の詳細は②以下で述べる。

②シミュレーションの実施条件：坑内シミュレーションにおいて実施した条件と実際の掘削条件の相違点を第7-23表に示した。本シミュレーションは、地層温度が約170°Cに達する深度4,000m以深の掘削を対象に実施した。掘削はビット径ごとに一定の掘進長を割り当て、ビット降管後は一定区間連続して掘削したものと仮定する。また、坑径違い、坑内事故は考慮しない。地上からポンプする泥水温度(入泥水温度)は常に一定とし、30, 50, 70°Cの3種類について検討した。泥水ポンプ流量は坑径、泥水性状等からハイドロリクスを考慮して一定の制限が与えられ、ダウンホールモータ(DHM)やコアバレルの仕様からも規制される(第7-24表)が、ここでは1,100, 2,600および5,600 l/minの3流量について検討した。これらの流量は、以下に示した適正量で、現状では1,100 l/minと2,600 l/minが現実的な意味を有する。

*1,100 l/min：8-1/2坑でのハイドロリクス適正流量。コアバレルの適正流量。

*2,600 l/min：12-1/4インチ坑でハイドロリクスほぼ適正流量。8-1/2インチ坑用DHMの最大流量。

*5,200 l/min：12-1/4, 8-1/2坑ともハイドロリクスの的に不適切で坑壁の崩壊、washout等の危険性大を招く



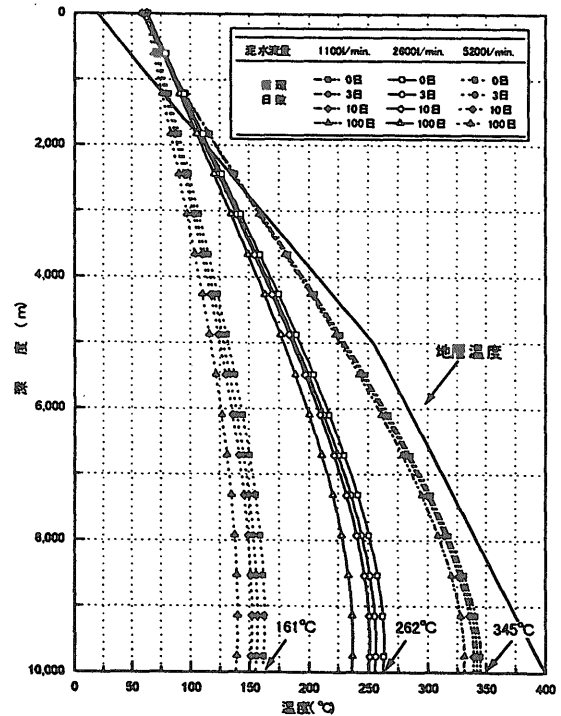
第7-18図 坑井内温度シミュレーションに入力したケーシングプログラム、地層特性および掘削編成一覧

ので現状では非現実的。流量増大による坑井内冷却効果を試算した。

以上の仮定に基づきシミュレーションを実施したが、これらの仮定は実際の掘削作業時の温度を検討するのに大きな支障はない。KTBのメインホールでは掘削時の泥水循環量は12-1/4、8-1/2インチ坑でそれぞれ2,000、1,600 l/min程度であった。

③シミュレーションの掘削履歴・ケーシングプログラム・ビット条件：ケーシングプログラムは、Yoshida (1996)を参考に最大坑径36、最小坑径8-1/2インチとし6段掘りとした。しかし、深部掘削温度を考慮する時、浅部掘削の影響は無視できることから、シミュレーションは、深度4,000~7,000mの12-1/4インチ坑、深度7,000~10,000mの8-1/2インチ坑掘削について実施した。また、12-1/4、8-1/2インチビット寿命をそれぞれ、50、45時間とし、掘進率はいずれも1.5m/hrを適用した。ビット交換のための掘管の揚降管速度は、通常が800m/hr、トップドライブを使用して循環しながら降管する場合は250m/hrとした。揚管終了後、次の掘削編成降管開始までのビット取替時間等として3時間を割り当てた(第7-25表)。

④地層特性等のシミュレーション入力値：岩石密度、岩石比熱、岩石熱伝導率などの地層特性値は、掘削する地層上部を海洋性堆積物、10kmの坑底を変成岩と仮定し、それらの平均的な値をClauser and Huenges (1995)から引用した。岩石密度は、上端の堆積物を1.8g/cm³、下端の変成岩を2.7g/cm³程度とし、その間の深度についてはシミュレータ内で補間され計算に用いられている(第7-18図)。岩石比熱は、一般的にシミュレーションで用いられている0.2Kcal/Kg・°Cを用いた。岩石熱伝導率は、深



第7-19図 泥水循環日数と流量の変化に対する坑井内冷却効果の比較 (10km掘削後)

度0~5,000mを堆積岩の値1.8W/(m必)、深度5,000~10,000mを変成岩の値2.91.8W/(m必)に設定した。また、地層温度は、地表を20°C、10kmで400°Cと仮定した。温度勾配は岩石熱伝導率を考慮し、深度5,000mで変化させ、深度5,000mまでが4.7°C/100m、5,000m以深が2.9°C/100mとした。坑井は垂直井としケーシング

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

プログラム、掘削編成は第7-18図に示した。また掘削泥水
の特性は比重1.40, プラスチック粘性20cp, およびイー
ルド値0.2lb/100ft²を用いた。

解析手法

解析には、坑内温度シミュレータ GEOTEMP2
(Mondy and Duda, 1984)を独自に改良した
GEOTEMP3を用いた。GEOTEMP2は、地熱井の掘削お
よび生産等に適用するために、米国サンディア研究所に
よって開発されたシミュレータである。この
GEOTEMP2は、坑井への流体注水、坑井からの流体生
産、坑井掘削する際、坑内で泥水あるいは空気を循環する
問題に対して計算可能で、実際の坑井に使用されている
ケーシング仕様、時間とともに変化する泥水流量、泥水流
入温度等の実データを入力する。GEOTEMP3はそれ
に加え、逸水層のデータ、透水性の高い地層中の対流現象を
考慮できるように改良されたもので、深部地熱調査井で
使用される。GEOTEMP2は、座標系に円筒座標系を用
い、フーリエの伝熱伝導速度式を用いてセル間の水平方
向の熱エネルギーの移動・変化を考慮している。熱エネ
ルギーの移動の計算には、坑内の流体、地層、流体と地層間
のケーシングとセメントの3つの部分について考え、特
に坑内の流体については水平方向(地層、ケーシング)か
らの熱エネルギーの移動・変化だけでなく、坑内流体の流
れによる垂直方向の熱エネルギーの移動・変化、流体と掘
削管の摩擦エネルギー等も考慮している。垂直方向の熱エ
ネルギー移動は、温度・圧力によるエンタルピーの変化、

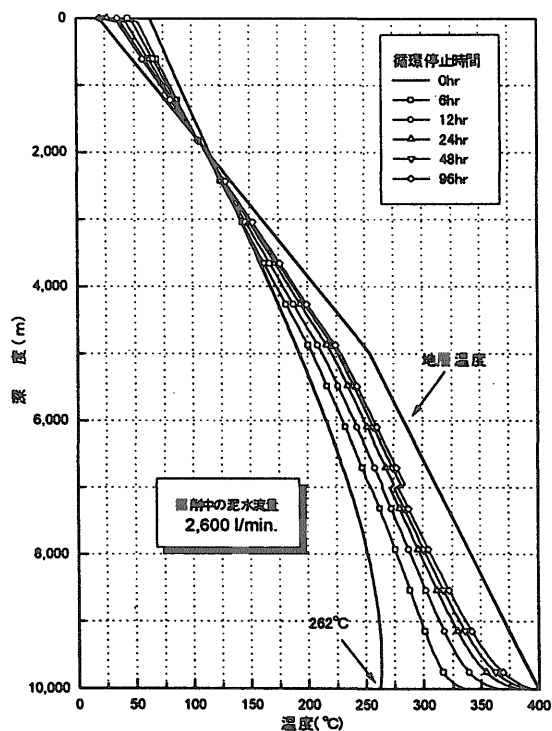
流体のポテンシャル・エネルギー変化、および流体の運動
エネルギーの合計を考慮している。また、地層については
水平方向と垂直方向の熱エネルギー移動およびケーシ
ングとセメントについては水平方向の熱エネルギー移動・
変化のみを考慮している。これらの熱エネルギー移動差
分式をGauss-Seidel反復法を用いて、坑内、地層内温度
を解析している。

シミュレーション結果

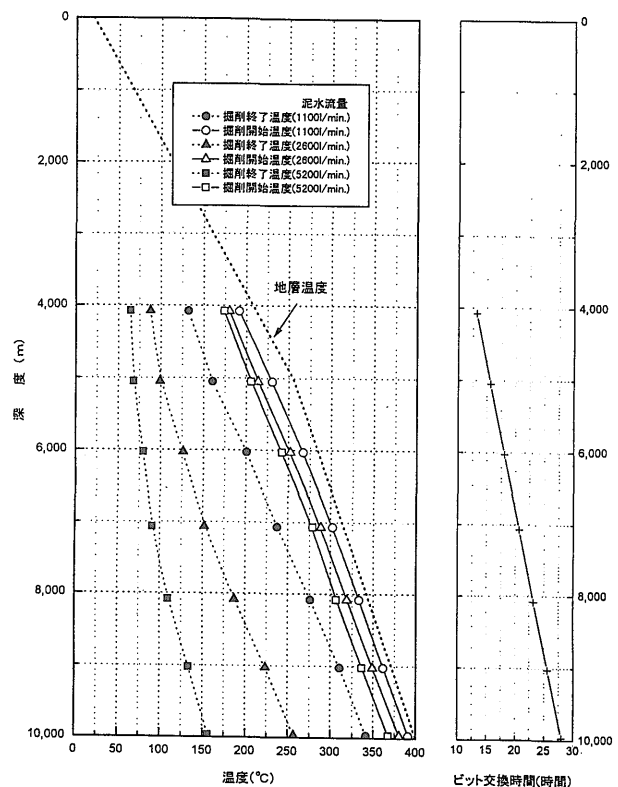
実施した6項目のシミュレーションについて、目的、計
算条件、結果と考察を以下に示す。なお、全ての坑内温度
結果は掘削編成内の温度ではなく、アニュラス部の温度
を意味する。すべてのシミュレーションで注釈のない限り
掘削時および降管中の泥水流量は、1,100, 2,600,
5,200 l/min, 入泥水温度は掘削中50°Cで一定とした。

(1) 泥水循環による坑井内冷却効果の検討

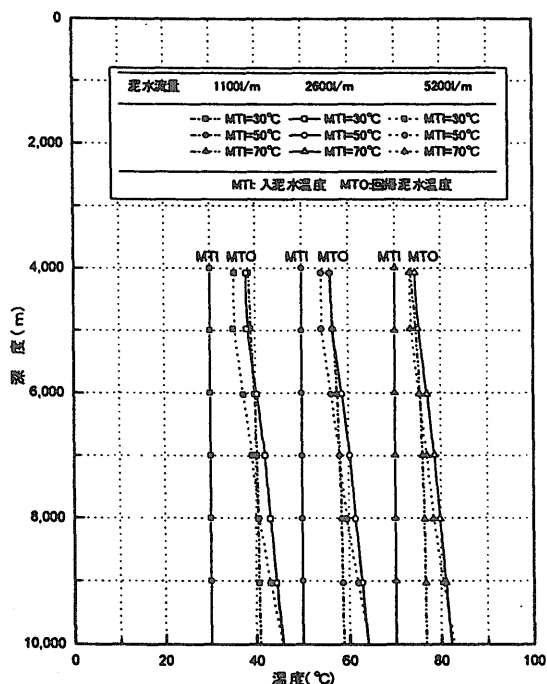
シミュレーション条件として8-1/2インチビットで深
度9,970-10,000mまで掘削後、泥水循環を100日間継続し
た時の坑井内冷却効果を解析する。第7-19図に結果を示
した。図に示すように泥水流量によって坑井内温度が大
きな影響を受ける。すなわち、10km掘削終了直後の坑底
温度は、泥水流量が1,100 l/minで345°C, 2,600 l/minで
262°C, 5,200 l/minで161°Cである。また掘削後連続的に
循環しても最大25°C程度の冷却効果しか認められない。
これは最後のビットが深度9,970~10,000mまで掘削す



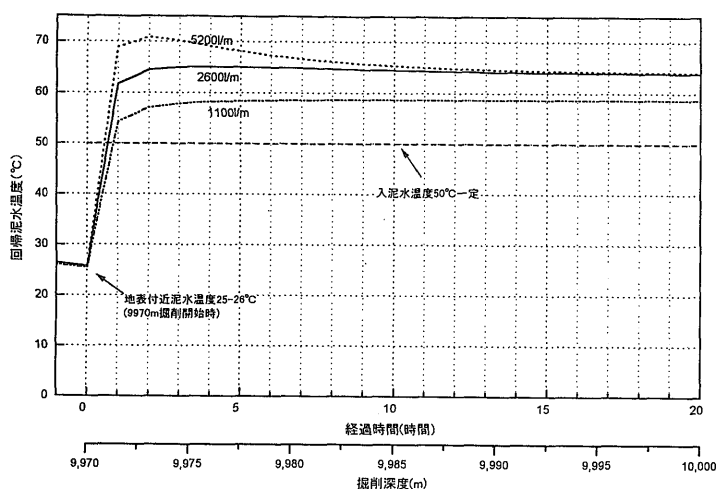
第7-20図 10km掘削後の泥水循環停止による坑井内回復温
度 (2,600 l/min)



第7-21図 各深度におけるビット交換に要する時間とその
前後での坑井内温度変化



第7-22図 各深度掘削中の泥水流量と入泥水温度の変化に対する回帰泥水温度



第7-23図 深度9,970-10,000m掘削時の回帰泥水温度経時変化

る間に坑井内がある程度冷却されているためと考えられる。

(2) 泥水循環停止後の坑井内温度回復の検討

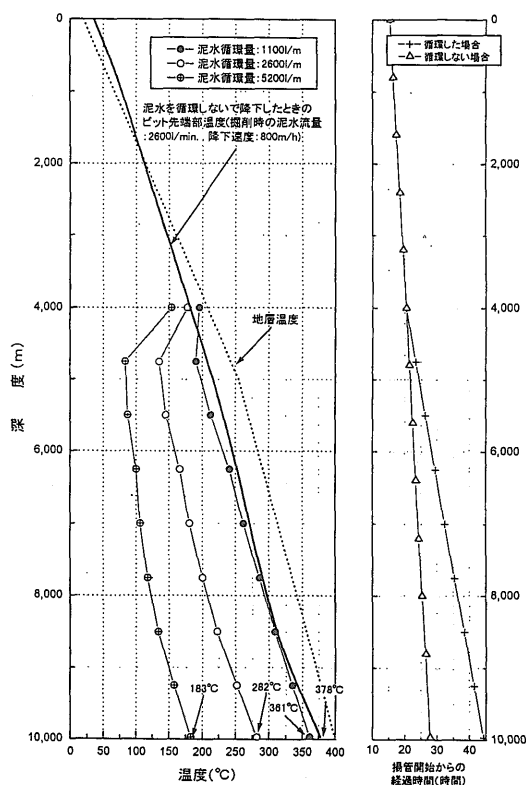
シミュレーション条件としては深度9,970~10,000m掘削後、ただちに泥水循環を停止し、96時間放置した時の坑井内回復温度について検討した。第7-20図に結果を示した。2,600 l/minで掘削後、泥水循環を停止した直後、6, 12, 24, 48, 96時間放置後の坑内温度である。これらのグラフから、泥水循環停止後急速に温度回復が認められ、6時間後の坑底部温度は、約2,600 l/minで325°Cまで回復し、また1,100 l/minでは約375°C, 5,200 l/minでは280°Cまで回復する結果が得られた。

(3) 各深度掘削中の坑底部温度の検討

シミュレーション条件としては各深度掘削中の坑底温度(ビット降下後24時間経過掘削した時点の温度)を求める。第7-21図に掘削中の坑底温度の変化について示す(各流量の掘削終了時温度)。この図から、入泥水温度を50°C, ツールの耐熱温度を175°Cと仮定すると、泥水流量2,600 l/minでは7,700m以浅, 1,100 l/minでは5,300m以浅で耐熱限界になる。しかし、実際の掘削ではツールを坑内に降下する時点がより過酷な温度条件に曝されるため、これらの深度より浅い深度で耐熱限界に達する可能性が高い。

(4) ビット交換中の坑内温度上昇の検討

現在の掘削方法では、ビット交換中には坑底部で泥水循環ができないため、坑内温度が上昇する。したがって、坑内に放置された泥水はビット交換中の上昇温度に曝される。このため、泥水の耐熱はこれ以上であることが必要となる。また泥水循環をしないで掘削編成を降下した時の掘削ツールの使用限界を知る必要がある。シミュレーション条件としては、各深度でビット交換に要する揚降管時間を算出した。また揚降管作業中は途中の深度で泥水循環を実施せず、新しいビットが坑底部に到達した時点での坑底温度を求めた。第7-21図に各深度にお



第7-24図 4,000m以深を泥水循環しながら掘削編成を降下した時のビット先端部の温度

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

るビット交換前後の坑内温度を示す。この図から、坑底回復温度は掘削中の泥水流量によらずビットが坑底到達時点までに、急速に上昇している。またウォーターベースの重泥水と非重泥水の耐熱温度は現時点では、それぞれ250°C, 300°C程度とされている。このため、泥水流量2,600 l/min以下では、前者では深度6,000m付近で、また後者でも7,400m付近で耐熱限界に達する。掘削ツールの使用限界温度を175°C、深度4,000m掘削時点でビット交換に要する時間を12時間とすると、深度4,000m付近ですでに掘削ツールの耐熱限界温度に達する。

(5) 回帰泥水温度の検討

各深度掘削中の回帰泥水温度は地表で何度泥水温度を冷却する必要があるか検討するうえに必要で、また深度10,000m付近掘削中の回帰泥水温度の経時変化は温度上昇による暴噴の危険性の有無を検討するうえに必要である。シミュレーション条件は深度4,000~10,000m掘削中の泥水流量は1,100, 2,600, 5,200 l/min, 入泥水温度は30°C, 50°C, 70°Cの3種類で、第7-22図に結果を示す。回帰泥水温度が安定した状況では、入泥水温度に対する回帰泥水温度の上昇はいずれの場合も15°C以下で、この上昇温度分を地上で泥水冷却すれば入泥水温度をほぼ一定温度に保つことができる。

またシミュレーション条件を変え、深度10,000m付近掘削中、ビット降下後から20時間掘削中の回帰泥水温度の経時変化を検討した。第7-23図に結果を示す。回帰泥水温度の経時変化では、入泥水温度が50°Cの時は泥水流量5,600 l/minでも一時的に70°Cを若干こえるだけで、温度上昇による暴噴の危険はない。また泥水流量1,100と

2,600 l/minでは回帰泥水温度が短時間で一定になる。

(6) 泥水循環をしながら掘削編成を降下した時の冷却効果の検討

掘削ツールの耐熱温度と使用可能限界深度について検討するために、シミュレーション条件として最後のビットが坑井深度9,970mまで降下される時を想定する。深度4,000mまでは泥水循環をせずに降下し、4,000m以深で(トップドライブ装置を使用して)泥水循環を行いながら降下した。降管速度は4,000mまでが800m/hrで、4,000mから9,700mまでを250m/hrとした。結果を第7-24図に示した。このシミュレーションでは深度9,700mから地上まで揚管し、地上でビット等を交換した後、再び降管した時の各深度での温度を示した。したがって、例えば深度8,000m掘削後揚管し、泥水循環しながら降管した時の温度は正確には読みとれない。しかしながら、深度9,700m以浅の深度掘削後のビット交換後の温度は第7-24図より低温である。これらの結果から以下のことが判明した。

- 掘削編成を泥水循環しながら降下する場合は、循環しない場合に比べて大きな冷却効果が得られる。

- しかし、掘削ツールの耐熱を175°Cとすると泥水流量が1,100と2,600 l/minでは、それぞれ深度4,000m付近、7,000m以深で耐熱限界になる。これは泥水循環しない場合と比較して、2,600 l/minでは3,000m以上深部まで降下可能になる。

- ハイドロリクスやダウンホールモータの仕様を無視した泥水流量の5,200 l/minでは深度9,800m付近まで降下可能になる。

- 泥水流量を1,100 l/minと2,600 l/minに限定すると、深度10,000mまで降下するためには、それぞれ361°C, 282°C以上の耐熱性のツールを開発する必要がある。

第7-26表 坑井中温度シミュレーション入力値一覧表

泥水流量 (l/min)	掘削ツール(耐熱175°C)		掘削泥水			10km掘削する為の耐熱	
	掘削管中		掘削中	重泥水耐熱 (250°C)	非重泥水耐熱 (300°C)	掘削 7-4x	泥水
	循環なし	循環					
1,100	<4,000m	約4,000m	5,300m	5,500m	7,000m	361	380
2,600	<4,000m	>7,000m	7,800m	6,000m	7,400m	282	360
* 5,200	4,000m	>9,800m	>10,000m	6,200m	7,800m	182	340

*5,200 l/minは12-1/4, 8-1/2inch坑掘削では泥水流量が大きすぎ非現実的な値。
 ◎入泥水温度は50°C一定とした。

第7-27表 現在の掘削ツールと泥水の耐熱で掘削可能な深度予測総括表

項目	JUDGE計画	KTB計画実績
坑井(目標)深度	10km	9.1km
地層(推定)温度	400°C	260°C
8-1/2inch 坑掘削に必要なツールの耐熱温度	282°C	175°C以下 深度8,580m掘削中の坑底温度156°C (Angel et al., 1996)
目的深度まで掘削するために必要な泥水の耐熱温度	360°C	260°C以下 深度7,760mで掘削ツール降下時の坑内温度193°C (Angel et al., 1996)

シミュレーション結果のまとめ

以上のシミュレーション結果をまとめて以下に示す(第7-26表)。

(1) 掘削ツールの耐熱を175°Cとすると1,100 l/minと2,600 l/minの泥水流量では、それぞれ深度5,300mと7,800m程度で耐熱限界になり、それ以深ではダウンホールモータ、MWDツール、垂直掘進装置を使用しない掘削方法に頼る必要がある。

(2) 泥水の耐熱からは重泥水を使用し、泥水流量が1,100 l/minと2,600 l/minの場合、それぞれ深度5,500m程度と6,000m程度で限界になる。

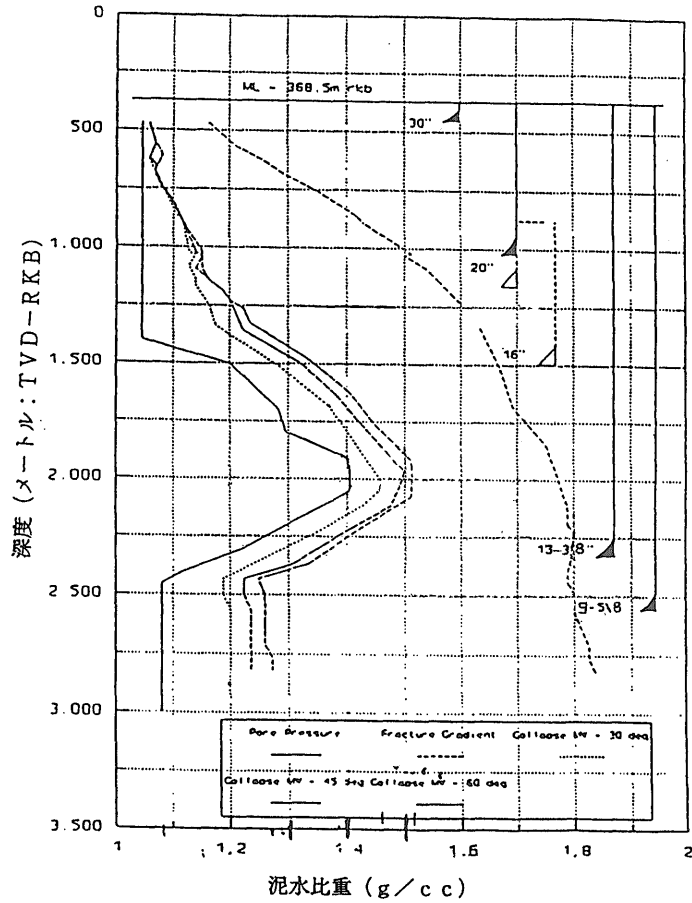
(3) 従来工法を用いて、泥水流量2,600 l/minで深度10,000mまで掘削するためには、最低でも掘削ツールの耐熱を280°C、泥水の耐熱温度を360°C以上に向上させる必要がある。これは、現在の掘削ツールと重泥水の耐熱限界を約110°C向上させることを意味する。このため、新しいコンセプトの掘削方法も検討する必要がある。

地層温度からJUDGE計画とKTBの技術的な困難度比較

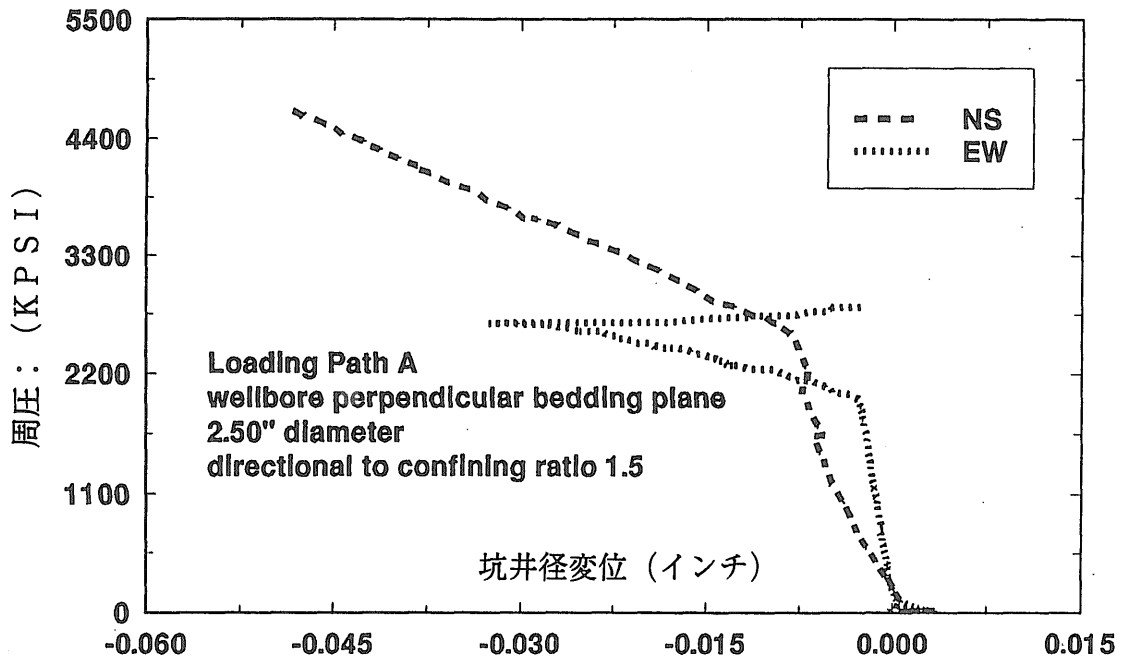
JUDGE計画とKTBの技術的困難度を、JUDGE計画で

Borehole Stability

Predicted Mud Weights



第7-25図 現場掘削に必要な坑井安定解析例



第7-26図 坑井安定解析実験

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

の深度10km地層温度400°Cと、KTBで実証された深度9.1km、地層温度260°Cという条件に絞って比較する。温度シミュレーション結果から、現時点での掘削ツールと泥水の限界深度を検討すると、最終坑径8-1/2、ポンプ流量2,600l/minで掘削した時、掘削ツールは深度7,700m、重泥水の場合は深度6,000m程度で限界になることが推定された。また、従来通りの掘削方法を使用した場合、10kmに到達するためには掘削ツールと重泥水の耐熱を、それぞれ282°C、360°C以上に向上させる必要がある(第7-27表)。これは、現状の耐熱限界から、掘削ツールと重泥水の両方も約110°C向上させる事が必要となる。他方、KTBが達成した深度9.1kmの地層温度は260°Cで掘削泥水の耐熱温度は当然260°C以下で良いことになり、また掘削ツールの耐熱も8-1/2坑では175°C程度で可能である。KTBメインホール掘削当時の泥水と掘削ツールの耐熱は、それぞれ250°C、150°C程度であったと思われる。このため、KTBでは耐熱性の向上に飛躍的な結果を期待する必要がなかった。むしろKTB計画では、その当時のツール等の耐熱限界を考慮して掘削深度を変更した経緯がある。しかしながら、JUDGE計画では現状の掘削ツールの耐熱限界を考慮せず目標を設定している。このため、ツール等の耐熱性を飛躍的に向上させるか、新しいコンセプトの掘削方法を開発しない限り計画が現実しない困難性がある。

7.4.2 坑井安定技術

坑井安定を支配する因子は幾つかある。頁岩では泥水による膨潤を筆頭として、地圧、孔隙圧、自然フラクチャー、岩石強度、坑内圧が第1次因子、弾・塑性係数、坑井周辺温度、泥壁の厚さ・緻密度が第2次因子、そして楕円坑井形状、坑径、時間、化学反応による岩石強度の劣化が第3因子となる。砂岩・火山岩では一般的に泥水による膨潤は無視出来るが、他の因子は頁岩と同順位に坑井安定に影響を及ぼす。坑井安定を支配する要因の内、一般には地圧、孔隙圧、自然フラクチャー、岩石強度、坑内圧が第1要因なので、これらを考慮した安全坑内圧(泥水比重)の上限・下限幅が第7-25図の様に各深度に対し測定・推定され、現場のケーシングデザイン、泥水荷重デザインに使用される。安全泥水比重の上限・下限は第7-25図の様に深度と共に変化する為、長い坑井ではある深度で逸泥が起り他の深度では坑井圧潰を引き起こす可能性がある。それを防ぐ為図の様に適当な深度にケーシングをセットし泥水比重を調節しながら掘進を行う。低泥水圧では坑井は地圧により押し潰され、また高泥水圧では自然フラクチャー、低地圧層に逸泥を起こす為、安全泥水圧はその下限・上限の中間に保たれる。一般に逸泥圧は推定が難しく突発的でありまた逸泥後坑内圧が低下すると坑井圧潰・キックを引き起こす場合が多いが、坑井圧潰は徐々に起り、トルク・引き上げ荷重の増加など予兆がある為、掘削中泥水荷重は常に低めにセットされ、必要に応じて加重していくのが安全である。

一般に安全泥水比重の上限・下限は第7-25図の様に幅

広いのが普通で、深度によりその上下限界が変化してもケーシングを適当な深度にセットする事により掘進可能である。KTBの様にスリム坑井デザイン方式では、多段のケーシングを使用し28インチ径の坑井からスタートし最終坑井径は6-1/2インチであった。しかも現在では拡張可能チュービングとセメントを併用して坑井破壊が激しい箇所を応急修理して坑井径を保つ技術も開発されている。それではこうした技術を駆使すればKTBの坑井はロシアのコラ半島のSG-3の様に12kmまでの深度に到達可能であろうかという地圧・岩石強度が違うので簡単には結論できない。第7-3図はKTBの坑井の最大・最小径を測定した結果である。坑内の坑壁ブレイクアウトが8,000m以上の深度では非常に激しい。これは坑内圧をある程度揚げても、また泥水を多少改良しても掘削中坑壁が崩れ落ち、ビットの周辺に大きな掘りくずがパックしていくトラブルを物語っている。

KTBの坑井の9km深度で測定された地圧と地圧勾配は次の値であった。

地圧：9km

$$\sigma_v = 2475 \text{ MPa} (1.22 \text{ psi/ft})$$

$$\sigma_H, \text{min} = 180 \text{ MPa} (0.88 \text{ psi/ft})$$

$$\sigma_H, \text{max} = 350 \text{ MPa} (1.73 \text{ psi/ft})$$

$$P_o = 98 \text{ MPa} (0.48 \text{ psi/ft})$$

$$P_{wb} = 130 \text{ MPa} (0.64 \text{ psi/ft})$$

ただし最大水平地圧は坑井のブレイクアウト条件より計算された値、及び剪断型断層滑りを引き起こす値の2つの方法で推定された値であるので非常に大きな誤差を持つ。この坑井で流体圧入を行った際、近傍に存在した断層で剪断滑りによる微小地震波が観測されたので断層面は滑りを起こす応力の限界状態に近いと考えられる。

上記の様にKTBの坑井では地圧が地震を引き起こす状態に近く、掘削には過酷な状況であった事が坑井ブレイクアウトの激しい原因となっている。ロシアのコラ半島のSG-3井では地圧状態が報告されていないので比較できないが、この様に激しい坑井ブレイクアウトは報告されていない。ただしこの2坑井では掘削条件に2つの大きな相違がある。1つは地層強度の違いであり、他の1つは使用された泥水の違いである。坑内温度の違いよりSG-3井では水ベースの粘土分の多いクレイ・ベース、又はエマルジョン掘削泥水が使われた。水をベースにしたクレイ・ベース泥水は頁岩など膨潤を起こす地層では坑井不安定問題を引き起こすが、砂岩・火山岩性の地層では脱水作用による泥水皮膜形成の為、皮膜背部の地層の有効応力が高く地層を非常に安定化させる作用がある。完全に浸透率の無い火山岩では脱水による造壁効果はないが、この様な地層では岩石強度が高いので坑井障害が起りにくい。しかし火山岩でも坑井障害の対象になる脆弱周辺部では剪断により生じたマイクロクラックが縦横に走る為、従来の造壁作用のあるクレイ・ベース泥水はクラック内部への泥水浸透を防ぎ坑井安定に有効である。特にマイクロクラックの先端部に泥水皮膜を作り、剪断・引張り両タイプのクラック進展を妨げる。KTBの坑

井安定問題では泥水は坑内圧力コントロール作用だけに重点がおかれ、造壁作用による坑井安定化の技術は全く考慮されていない。KTBで使用されている泥水では、ブレイクアウト部分を拡張可能チュービング及びセメンチング技術で修復しても、これ以上坑井を掘り下げるのは非常に困難を伴う。

現在石油坑井に使用されている破壊理論では、鉱山・土木用坑道に應用されている破壊理論と同じものを使用する技術者が多い。すなわち鉱山・土木用坑道では人間が中に入る為安全には2重3重の考慮が払われており、線形歪み弾性方程式でブレイクアウトを生じる条件を求め、それ以上は掘削不可能とみる。しかし第7-3図のKTBの坑井の様に、石油坑井ではかなり破壊が進んでも掘削可能な場合が多い。このように人間の入らない坑井ではかなり破壊が進行しても掘削可能なため、実際の坑井は、現在世界の技術者・研究者が使用している破壊の理論で予測される坑井破壊条件よりはずっと安定である。しかし、破壊が進んでも無限に掘削可能と言うわけではない。今坑井安定の限界をテストする為、坑井破壊室内実験の結果を解析する。第7-26図は30 x 30 x 45cmの岩石に直径3.7~8.0cmの坑井をあけ、1:1.5の比を保ちながら周圧をかけていった際の坑井破壊室内実験の結果の1つである。周圧をかけていくとまず坑井が降伏点を越えた時点で、急速に坑井径が非線形に減少し、暫く経つと最大主応力方向に直交する歪計が坑井ブレイクアウトの為に突然拡大する。しかし最大主応力方向の坑壁は安定しており、ブレイクアウトを起こしはじめた周圧の2倍をかけても坑井は全破壊を起こしてはいない。この実験で示すように、実際の坑井が降伏点後ブレイクアウトを生じる周圧は線形弾性式で計算された値より著しく高く、またその後掘削に支障を来す全破壊を生じる周圧はブレイクアウトを引き起こし始める周圧よりかなり高いのが普通である。

実験後ブレイクアウトを起した坑内に落下した岩石を調べると数cmもある大きな破砕片が多かった。このような実験を30のサンプルを使ってくりかえした結果、その内3つは最終段階で突然坑井全破壊を生じた。すなわちこの実験ではブレイクアウトが進行すると、坑井径が縮小しパイプが抑留してしまう場合、坑井のブレイクアウトで生じる大きな破砕片がリフト出来ないでビットをパックしてしまう場合、突然坑井が不安定になり坑井全破壊を引き起こす場合の3ケースで坑井障害が生じる事が分かる。ブレイクアウトが生じ始めの状態では掘削が続行可能でも、坑井歪みが数%以上になりブレイクアウトもかなり進行すると上記の3つの坑井障害がくり返し、また組み合わせて起こり、それに長時間の掘削管の上下時間も加わり掘削効率が極端に低下する。すなわちKTBの坑井の最終状態はブレイクアウトの初期状態ではなく、ブレイクアウトがかなり進行した状態を示しており現在の技術ではそれ以上掘削する事は不可能に近い事を示している。

さて日本の地震地帯を掘削する場合はどうであろう

か。まず地圧はプレートの沈み込み地帯である為最大水平主応力は非常に高いはずである。また沈み込み速度の不均質性から折れ曲がり現象が生じ、最小地圧は掘削場所によりかなりばらつきがあると予測されるが、最悪の場合には孔隙圧に近い地圧になっていることが予想される。その様な状態では剪断型マイクロクラックが存在し、坑内圧を水平最小地圧以上に揚げる事は剪断型滑り面を生じ掘削管の抑留を引き起こす危険性があるので坑内圧は最小水平地圧より低い状態に保つのが安全である。しかし最大水平地圧が著しく高いので当然岩石の強度が低ければ坑井ブレイクアウトを生じる。すなわち日本の地震地帯で掘削を行う場合、超深部では泥水の上限・下限が第7-25図のように幅広くなく、非常に接近してしまう。したがって裸坑部分が短くてもある部分で逸泥、他の部分で坑井崩壊を引き起こす。そのため少し掘削すると逸泥・坑壁破壊が頻繁に起こる。日本の地震地帯の掘削条件はこのように厳しい条件であることが予想されるが、しかし岩石の強度は色々な因子によって決まるので実際にコアを採集しその強度・歪み挙動を測定しないと厳密にはどの状態で坑井ブレイクアウト起こすかは推定できない。周圧下における岩石強度は、その岩石の固有強度と周圧下で加算された強度の和である。地下10kmで150MPaを越すような平均有効応力下ではその有効応力によって加算された岩石強度の方が固有岩石強度より一般に高くなる。しかし最小地圧が孔隙圧に近い岩石、すなわち有効最少応力が零に近い岩石ではその平均有効応力によって加算された岩石強度も小さく、また坑内圧も高く保てない為、坑井ブレイクアウトを発生する可能性が高い。また温度が高い事と深度が大きい為泥水は坑井を安定化させる造壁作用の強いソリッド分の多い泥水を使用できないのでこの見地からも掘削条件は厳しい物となる。

日本での超深部掘削は上記の様に掘削条件が坑井安定の見地からも過酷である。ロシアのコラ半島では既に12 km以上を掘削しておりしかもあと数km深度を伸ばす事は技術的に困難では無い。しかしKTBの科学井、スウェーデンの深層ガス探索井では現在の掘削技術では坑井安定性の限界だと考えられる坑井ブレイクアウトが生じている。日本の掘削条件は温度だけでなく、地圧の異方性も見地からもこの2つの地域より厳しい条件を持つ。しかしその様な過酷な条件が予測される一方、逆に不確定な要素も存在する。すなわち岩石の強度は坑井安定の第1因子であり状況判断では高い強度は望めないが、厳密には実際にコアを採集してみないと推定不可能である。また超深部科学井用の泥水は泥水による孔隙汚染の低下、坑壁でのフリクション低下、掘削リフト能力、高温下での安定性の向上等だけを目的にして改善されてきており、クレイベース泥水の造壁作用が火山岩でも坑井安定に寄与する事にそれ程考慮がはられ無かった、また新技術である拡張可能チュービング及びセメンチング技術による坑井修復技術も今は使用可能である、この様な不確定因子が幾つか存在するほか、過去の日本での6 km超深部掘削実績から判断すると深度を1~2 km増加させる事

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

は現在の掘削技術で不可能ではない。これら6kmの坑井も最小・最大水平地圧差がかなり大きな地帯で掘削された。しかしそれ以上の掘削は最大の不確定要素である地層の強度に左右されるところが大きいので掘削には幾つかの分枝プランが必要となる。

7.4.3 泥水技術

掘削泥水はロータリー式掘削機の循環流体として使用される流体である。人体に例えれば、体内を循環して栄養素を運び、老廃物を運び出す血液に相当する極めて重要な役割を果たしており、坑井掘削の成否は泥水技術に大きく依存している。掘削泥水は大別して、水をベース流体とするウォーターベース泥水と、油をベース流体とするオイルベース泥水の2種類がある。後者は地下資料の各種分析の障害になるなど科学掘削の目的を妨げる危険があるので、この章ではウォーターベース泥水を中心に述べる。ウォーターベース泥水は基本的には粘土(モンモリロナイト)のコロイド液に各種添加剤を加え、掘削に必要な物理的、化学的特性を与えてある。

掘削泥水の役割

泥水はポンプでドリルパイプへ送られ、ビット先から出てドリルパイプの外側を通り地表へ戻り坑内を循環しながら以下に述べる役割を果たす。第7-27図に泥水循環系統図を示す。

(1) 掘屑の除去：ビットで削られた地層の掘屑は泥水によって坑底から地表へ運び出され、地上のシェーカースクリーンによって泥水中から除去される。泥水の循環を停止した時は、掘屑が沈降して坑内が埋没しないように、掘屑の沈降を抑制している。掘屑が完全に除去されないで、坑内に残留すると、掘削不能になる(第7-28図)。

(2) 地層流体の噴出防止：坑内圧力を地層圧力と均衡させることによって、地層流体の噴出を防止する。坑内圧力は泥水比重を増減することによって調整する(第7-29図)。

$$P_1 \geq P_2$$

但し P₁：坑内圧力

P₂：地層孔隙圧力

(3) 裸坑の安定化：泥水は坑壁面で、口過作用を受け不浸透性の泥壁(フィルターケーキ)を形成し、裸坑の安定化を図っている(第7-30図)。また同時に、泥水によって坑壁に加わる圧力が、地層圧力に対抗することによっても裸坑の安定化が図られる。

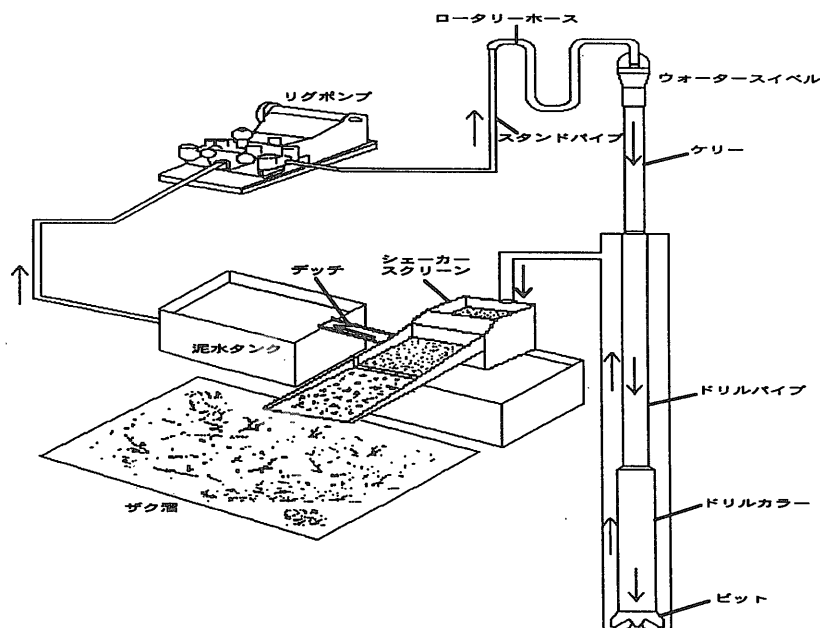
(4) 冷却と潤滑：掘削中はビットとドリルパイプの回転により、高い摩擦熱と大きな摩擦力が発生するが、泥水が冷却と潤滑作用を果たしている。

(5) 坑内情報の伝達：泥水が坑底から運び出してくる掘屑や、泥水性状の変化は、地下の様々な情報を地上へもたらす。

掘削泥水の特性

掘削泥水には、前項の役割を果たすために以下の特性が適正にコントロールされる。

(1) 流動特性：泥水は一種のコロイド液であり、静置するとゲル化し、力を加えると元に戻る、いわゆるチキソトロピック性があり、非ニュートン流体に分類される。その流動は非常に複雑な挙動を示し、流動特性は、粘性、フロービヘイビア指数(Flow Behavior Index)、ゲルストレングス(Gel Strength)などで表される。便宜的には擬プラスチック流体と見做し、プラスチック粘性、イールドポイント、ゲルストレングスで表す。掘屑は泥水の流れに乗ってアニュラス部を坑底から地表へ上昇して行く

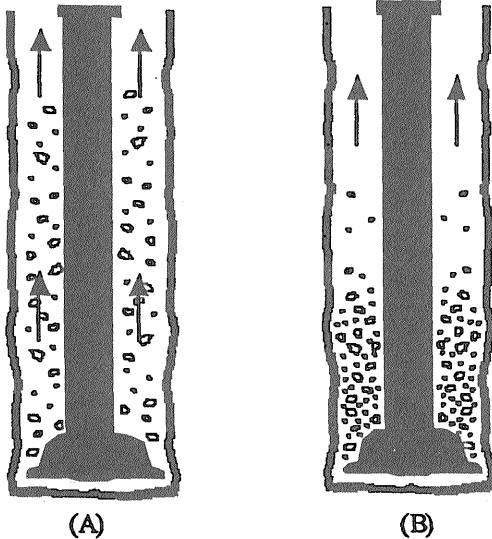


第7-27図 泥水循環経路

が、常に下へ落下しようとする力が作用しているので、泥水の流速よりも遅れてくる(第7-31図)。この遅れを滑り速度 (Slip Velocity) といい、次式で与えられる。

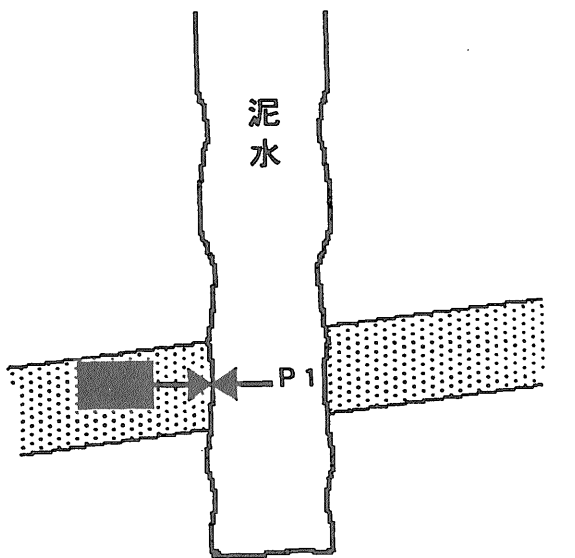
$$V_c = V_a - V_s$$

ただし V_c : 掘屑の上昇速度



(A)は掘屑が順調に排除されている状態を示し、
(B)は十分に排除されていない状態を示す。
(B)の状態が続くと掘削が不能になる。

第7-28図 掘屑の排除



$$P_1 \geq P_2$$

但し P_1 : 泥水頭圧

P_2 : 地層孔隙圧

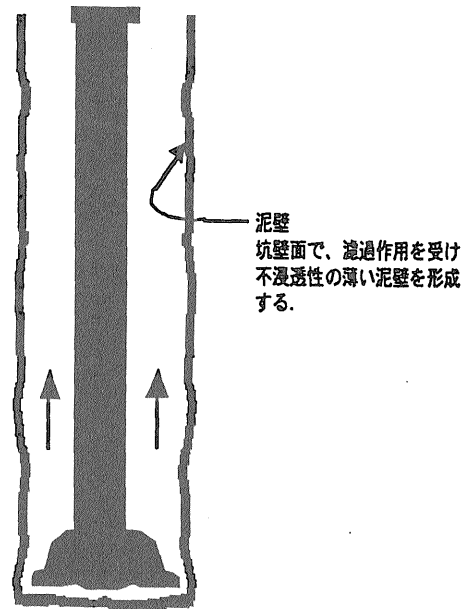
$P_1 < P_2$ になると地層流体が坑内へ流出して噴出する。

第7-29図 地層流体の噴出防止

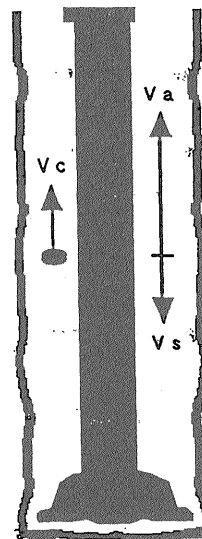
V_a : 泥水の流速

V_s : 掘屑の滑り速度

滑り速度が泥水の流速より大きくなると、掘屑は除去できない。滑り速度を小さくして掘屑を効率よく除去するためには、泥水の粘性が高いほど有効である。しかし一方で泥水の粘性が大きくなりポンプの負荷が大きくなるので、粘性はポンプ能力、掘削口径などの条件に適った適正な値にコントロールされる。泥水の循環を止めた時は、泥水はそのチキソトロピック性により、弱くゲル化して掘屑の沈降を抑制し、坑内の埋没を防止している。ゲル化した時のゲルストレングスが高いほど、掘屑の沈降防止に有効である。しかし一方で、ゲルストレングスが高くな



第7-30図 泥壁形成による坑壁保護



$$V_c = V_a - V_s$$

但し V_c : 掘屑の上昇速度

V_a : 泥水の流速

V_s : 掘屑の滑り速度

$V_a = V_s$ になると掘屑は上昇出来ず、坑内から除去出来ないことになる。

第7-31図 掘屑の上昇速度

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

第7-28表 高温度用泥水材料

機能	商品名	主成分	適用温度	備考
増粘剤	* Tel-Gel Aquagel M-I Gel	Bentonite	300°C	120°C以上になると、粘土粒子が凝集し、ゲル化が進むこの傾向は温度が高くなるほど激しくなる。これを防止して、安定した懸濁液を得るためには、分散剤を併用する。従って、Bentoniteの適用温度も併用する分散剤の組み合わせで決まる。
	Thermogel	Sepiolite	371°C	毛管状の粘土鉱物で、懸濁特性は371°Cまで安定している。Bentoniteのような泥壁形成作用、脱水調整作用はない。地熱井で一部使われている。
	* Hypergel Dehydrill HT	Synthetic Clay	371°C	KTBではDehydrill HTが使用された。
分散剤	* Tel-Lig Spersene	Fe-Cr-Lignosulfonate	177°C	分散剤としての機能の他に頁岩のインヒビション、脱水減少作用もある。
	* Tel-Con Desco	Cr-Sulfo-Metylated Tannin	232°C 260°C	Fe-Cr-Lignosulfonateの効果なくなる177°C以上の温度で使用される。頁岩のインヒビションや脱水減少作用はない。
	Miletemp	SSMA	204°C 260°C	
	* Tel-Flow Therma-Thin ID Spers HT	Polyacrylate	204°C 232°C	製品の重合度は各社によって異なる。
	* Hi-Flow 25	Acrylate/Acrylic Estel Copolymer	204°C 260°C	Polyacrylateの耐熱性を高めた。
	* Hi-Flow 30	Acrylate-Acrylic Ester-Sulfonated Stylen-Copolymer	204°C 260°C	耐熱性と耐塩性がある。
	* G-500 S	Lignite/Acrylamide Graft Copolymer	260°C	脱水調整作用もある。高温度下での泥水性質の安定化が得られる。
		Lignosulfonate- Acrylamide- Graft Copolymer	204°C 232°C	脱水調整作用もある。
脱水調整剤	* BM-nite XP-20	Cr-Lignite	204°C	分散剤としての効果もあり高温度下での懸濁液の安定化が得られる。

ると、泥水を再循環する時、ポンプの始動負荷が大きくなること、坑壁に異常な圧力がかかることなどにより大きなトラブルを招く。最悪の事態はポンプの始動不能になる。ゲルストレングスは、静止している泥水に力を加えた時、ゲル構造が壊れて流動を始める時の力の大きさを表

し、この値は坑内状況に適った適正な値にコントロールされる。

(2) 比重：泥水比重が高すぎると、逸泥を起し泥水が地層中へ流出し、逆に比重が低すぎると地層流体が坑内へ流入する。泥水比重は地層圧力に合わせて適正にコ

第7-28表 (つづき) 高温用泥水材料

機能	商品名	主成分	適用温度	備考
脱水調整剤	Resinex	Resin Compound	204°C 232°C	頁岩の安定化や懸濁剤としての効果もある。
	Soltex * Astex	Sulfonated Asphalt	204°C 232°C	頁岩の安定化が得られる。
	Hostadrill Therma-Check Polytemp	Vinyle Sulfonate- Vinyle Amide Copolymer	204°C 232°C	
	Baranex	PAL (Polymerised Lignin)	204°C	
	Cypan	Polyacrylamide	204°C 232°C	増粘効果も大きい。
熱安定化剤	PTS-100		204°C	酸化防止剤。調泥剤の熱酸化による劣化を防止する。耐熱性を204°Cまで高めることが出来る。耐熱性204°C以下の調泥剤に応用。
潤滑剤	* Speeder-PS	界面活性剤	350°C	
	市販品なし	黒鉛の微粉		滑材としての利用が考えられているが、実用化はされていない。

[註] *印は、国産品で、その他は海外品。

ントロールされる。

(3) 脱水特性と泥壁形成性 (Water Loss & Wall Building Properties) : 泥水を一定時間加圧濾過して出て来る濾液量を脱水量 (Water Loss) と定義し、この時形成される泥壁の厚さは脱水量に比し厚くなる。泥壁が厚くなると坑径が狭まるため掘削障害を起こし、また多量の脱水は地層に様々な障害を引き起こす。薄くて不浸透性の泥壁を形成することが、裸坑の安定を図る要因の一つであり、このためには適正なコロイド材を使用し、脱水量を可能な限り少なくする。

(4) 水和抑制機能: 粘土のような水和性に富んだ鉱物が泥水に浸されると、水和し物性が変化して崩壊などのトラブルを起こす。特にモンモリロナイト、イライト、クロライトを含む泥岩層を掘削する時はトラブルが多い。花崗岩を掘削中でも、断層破碎帯は変成を受けて一部粘土化している場合が多いので、泥水に触れると水和分散して崩壊などのトラブルを起こす例が多い。このような地層を掘削する泥水には、水和抑制機能が要求される。水和抑制は陽イオンを利用して粘土鉱物の塩基置換を制御する方法や、吸着性のポリマーを利用し、被膜を形成して保護する方法などがある。

(5) 潤滑: 一般に泥水は水に比べ、それ自体が潤滑性に富んでいるが、特に高深度掘削では掘削リグの機械的負荷を軽減させるために、より一層の潤滑が要求される。

この条件を満たすために特殊な潤滑剤を添加し泥水の潤滑機能を高める。泥水用の潤滑剤は高荷重下でも機能が損なわれないことが大きな要件である。

泥水材料

第7-28表に現在使用されている主な泥水材料を用途別に分類して示す。

JUDGE計画へ向けての技術的課題

掘削泥水が直面する最大の問題は温度である。一般の掘削泥水は基本的には粘土の懸濁液をベースにしているため、温度が高くなると泥水中の粘土粒子の凝集が進行してゲルストレングス、粘性、泥壁形成性などの泥水特性が悪化する。これらの問題を防止し、泥水特性を適正に維持する為に、第7-28表に示したような、それぞれの目的に応じた泥水調整剤が使用されているが、150~200°C以上の高温になると、粘土粒子は凝集さらには集合へと加速度的に進行し、一方では泥水調整剤の耐熱性の問題も重なり、泥水特性の適正維持は非常に困難となる。

泥水特性を悪化させるもう一つの要因に、ドリルソリッドがある。掘削の一部は泥水中に取り残されて、ドリルソリッドとなる。掘削深度が増すとドリルソリッドは微細になる傾向があり、これは岩石の硬度、ビットの歯形、泥水一循環時間の長さなどに関係してくる。ドリルソリッ

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

第7-29表 高温用泥水システム

システム名称	主要調泥剤	使用例
THERMA DRILL	BENTONITE THERMA-THIN THERMA-CHECK	北部スマトラ 温度：213℃ 比重：1.95 KCLベースで、Q-BROXIN、PAC、 BARANEXなども使用している。
DURA THERM	BENTONITE TANNANTHIN RESINEX	Louisiana 深度：6.096m 温度：246℃ 比重：1.94 SPERSENE、DESCO、PACなども 併用。
MILTEMP	BENTONITE MILTEMP CHEMTROL-X	Louisiana 深度：6.981m 温度：229℃ 比重：2.26 UNICALを使用。
POLYTEMP	BENTONITE ID-SPERSE-HT POLYTEMP PTS-200	South Texas 深度：6.016m 温度：230℃ 比重：2.24
DEHYDRILL	DEHYDRILL HT	KTB 深度：9.101m 温度：260℃
* HYPERGEL/G-500S	BENTONITE HYPERGEL G-500S HOSTADRILL	基礎試錐「富倉」 深度：6.000m 温度：177℃ 比重：1.83 基礎試錐「西頸城」 深度：6.005m 温度：238℃ 比重：1.85

[註] *印は、国産品で、その他は海外品。

ドは微細になればなるほど、泥水系からの除去が困難になる。泥水系に分散したドリルソリッドは再循環されるに従って微細化が進み、やがてコロイドとしての性質を帯び、泥水特性に重大な影響を与える。

このように掘削泥水は、掘削深度が増し、地層温度が高くなると、様々な問題を引き起こすので、超深度井掘削泥水を、浅深度井掘削泥水の深度延長線上に当たるものとして単純に捉えることは出来ない。

JUDGE計画では10kmを掘削し、この時の地層温度は400℃を想定している。掘削泥水にとって400℃は未知の世界である。第7-28表に示すように、現状では400℃に耐える泥水材料は無い。400℃に耐える泥水材料が開発され

たとしても、水が超臨界状態にあることが想像され、泥水システムとして、どのような挙動を示すのか、また泥水としてどこまで機能するのか現在は全く想像の世界である。400℃の高温下で泥水特性がどのように変化するか、その挙動を調べる為の泥水試験機器の開発、及び400℃の高温に耐える泥水材料の開発と高温下での泥水特性のコントロールが大きな技術課題となる。

また掘削は地下深部の観測や地質資料の分析などを目的としているので、地質試料が泥水に汚染されて分析が妨害されないように、使用する泥水材料についても十分に検討する必要がある。

KTBで使用した掘削泥水について

KTBで使用する掘削泥水には、以下の項目が要求された。

- ① 高温下(300°C)でも性状が安定していること。
- ② 泥水材料は、 hidroカーボンを含まない無機質であること。
- ③ 検層やコア試料の分析を妨害しないこと。
- ④ 新しく開発されたコア採取器と坑径のアニユラスが狭いので、それを考慮した流動特と潤滑性が得られること。
- ⑤ 公害問題を起ささないこと。

以上の要求を満たすために、新しいウォーターベースの泥水システム(Dehydrillシステム)が開発された。この泥水システムは、新しく開発した素材である合成粘土(商標名: Dehydrill HT)を主体に、pHコントロール剤として苛性ソーダを加えた極めてシンプルなシステムであり、特徴としては、起微粒のコロイド液でチクソトロピック性が非常に強い流体である。なお、脱水コントロールは、ほとんど考慮されていないがラボテストでの評価では、十分に要求を満足させる結果が得られた。

この新しく開発されたDehydrillシステムは、KTBのパイロット坑の掘削(4,000m)で成功裡に使用され、引き続き本坑で14,000mの掘削を目指して使用された、しかし、本坑の掘削では深度7,100~7,200m付近で崩壊、それに伴う坑径の拡大、浚渫の難行、ドリルストリングの抑留等のトラブルを起こしサイドトラックとなった。

この時点で、泥水について次の対策が検討された。

- ① 脱水をコントロールすること。
- ② 比重を上げること(1.35)。
- ③ 高温化での粘性低下を抑制すること。(浚渫が難行した原因の一つとして、高温下での粘性低下が挙げられている)。

この検討結果に基づいて、サイドトラック後は、泥水システムをDehydrillシステムから、脱水コントロールしたPyrodrillシステムへ変換して掘削が続けられたが、目的深度まで到達せずに、掘削は断念された。

Dehydrillシステムは、次の理由から流動特性のみに重点が置かれ、脱水特性や泥壁形成性等の特性はほとんど考慮されていない。

- ① 掘削対象地質は、結晶質岩で安定していると考えられたこと。
- ② 掘削目的が地球科学調査であるがために、研究者からの要望で使用する泥水材料が制約された。

そのため、深度7,100~7,200m付近で崩壊性地層に遭遇して、坑内状況が不安定になった時、トラブルを予想以上に大きくさせたものと考えられる。

Dehydrillシステムのもう一つの問題点は、ドリルパイプに酸素腐食と思われる孔蝕(Oxygen pitting Corrosion)が発生したことである。Dehydrillシステムは、前述したように、チクソトロピック性が非常に大きいため、エアレーションを受けるとエアを泥水中に抱き込み易くなる。気泡として酸素を抱き込んだ泥水がドリルパイ

プに付着し、極部酸素腐食が進み、孔蝕が生じたものと考えられる。

技術的課題解決へのアプローチ

(1) 泥水試験機器の開発: 泥水特性の評価や泥水材料の研究開発に泥水試験機器は不可欠である。現行の泥水試験機器は温度仕様が最高260°C(500°F)であるから、これらを400~500°Cの超高温仕様に改良する必要がある。特に必要とされる泥水試験機器としては次の3点になるであろう。

- ① 高温高圧泥水養生器
- ② 高温高圧粘度計
- ③ 高温高圧脱水試験器

①はオートクレーブ機器専門メーカーで製作可能と思われる。②、③はシール材の耐圧耐熱性が大きな問題となる。

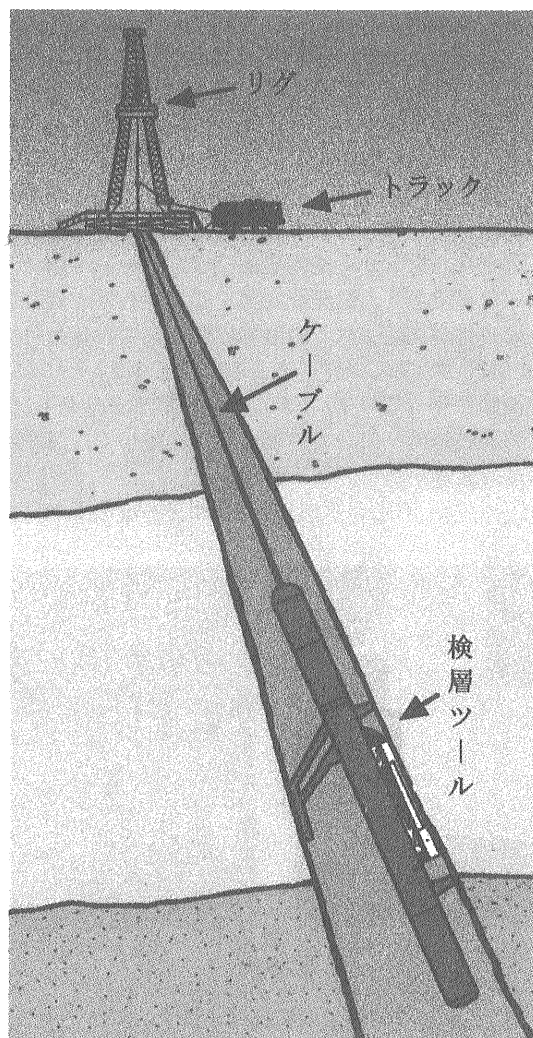
(2) 既存泥水材料の改良と新規材料の開発: 既存泥水材料の耐熱性について評価し、耐熱性向上の為の改良研究を行うと同時に新規材料の開発研究も進める。新規材料の開発については、その見通しは非常に難しい。

(3) 本掘削の泥水に要求される特性の検討。掘削泥水は第7-28表に示す各種の材料を組み合わせた泥水システムとして構築されており、材料の組み合わせ方により、第7-29表に示すように各々特性の異なった特徴ある色々な種類の泥水システムが出来ている。一般的には、これらの泥水システムの中から地層条件(岩石の物性、地層、温度、地層孔隙圧力等)や掘削条件(掘削深度、掘削坑径、ケーシングプログラム等)から泥水に要求される特性を検討し、最適な泥水システムを選定する。本掘削において掘削対象地域の地層に関する情報をより多く集め、掘削計画の検討と併せて、泥水に要求される特性について綿密に検討する事が重要である。例えば、高圧層が存在すれば高比重の泥水が要求される。水和力の強い鉱物の存在や、割れ目の発達した地層、傾斜の急な地層では、常に崩壊の危険を伴っているため、これに対処できる特性を備えた泥水システムが求められる。このように、地層に関する情報があれば、超高温に耐える新規泥水システムを開発する場合、その目標が明確になるので、開発もし易くなる。全ての地層条件をカバーできる汎用性の高い泥水システムを開発することはコストと時間のかかる問題である。

(4) 冷却装置の検討: 泥水の強制冷却は高温対策の有力な手段の一つであり、坑内から地上に戻ってきた高温の泥水を、冷却装置で強制冷却し坑内へポンプ循環する方法である。地熱井の掘削では、地上に戻ってきた泥水が沸点温度を越えないように、クーリングタワー等で冷却しながら循環している。この場合、坑内温度は泥水を循環すると低下し、停止すると上昇するので、温度変動により岩石に歪みが生じると坑内が不安定になることが危惧される。

(5) 調泥技術の検討: 一般に、泥水は掘削中、地層中の様々な物質に汚染され、あるいは調泥剤の熱劣化や経時変化によって泥水特性が悪化して行く。このような問題

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

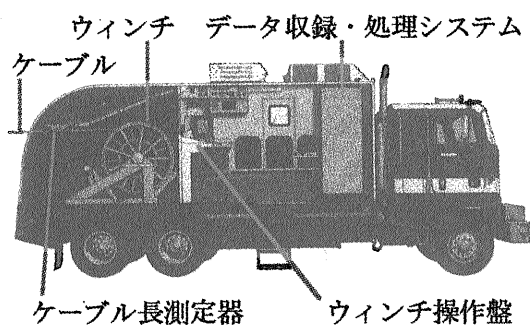


第7-32図 ワイヤライン検層

に対して、調泥剤の使い方や使用量を処方して、泥水特性の適正維持に努めている。この作業を調泥と言ひ、調泥技術はノウハウとして積み重ねられる。調泥剤の一部が熱劣化しても、泥水システムとしての耐熱性は調泥技術の工夫によって、かなり維持できるものと思われる。

問題解決に向けて

掘削深度10,000m、地層温度400°Cは、掘削泥水にとって極めて苛酷な条件である。10,000mの掘削を可能にさせるためには、特に温度が大きな問題になる。この問題解決のために、400°Cに耐える泥水材料の開発が必要であるが、それに先立ち、超高温度仕様の泥水試験機器を開発して、超高温度下での泥水特性の挙動を調べることが、最重要課題となる。箇々の泥水材料が熱劣化しても、泥水システムとして、その機能がかなりの時間持続している例はよく経験されている。超高温度下での泥水特性の挙動が明らかにできれば、既存泥水材料の改良と、機能の持続性を高めるための調泥技術の検討等で、高温問題のかなりの部分が解決されるであろう。



第7-33図 ワイヤライン検層トラック

また400°Cの高温下で、水は超臨界状態にあり、相変化が起こっていると考えられるが、空気を循環流体として使用するエアードリリングの例を考え併せれば、坑内不安定性の問題は残るものの、掘削泥水に不可欠の機能である掘削除去機能は、十分に維持されると考えられる。

温度が高くても地層が安定していれば、高温による問題は大幅に削減される。NEDOの深部熱調査井が、1995年に岩手県葛根田地区で、3,729mまで掘削され、地層温度500°Cを記録した。掘削泥水は、地熱仕様の泥水を使用した。泥水の劣化が激しく、3,700m付近より水に入替えて約30m掘削し、3,729mで掘止めた。この間幸いにして、地層が安定していたこと、及び、掘削区間長が短かったこともあり、大きなトラブルは無かった。一方、KTBでは、特殊な泥水システムを開発して使用したが、崩壊性地層に遭遇して、トラブルを拡大させた。以上の2例からわかるように、その地層に適した最適泥水システムについて調査研究することが重要であり、そのためには、地層に関する情報をより多く収集する必要がある。パイロット坑の掘削、または既存の周辺坑井からの情報収集は、地質情報を収集するための最も有効な手段である。

7.4.4 坑内計測技術・坑内転送技術・坑内サンプリング・コアリング

背景

石油や天然ガス資源開発で発達してきた検層システムには大別してMWD(掘削同時計測)とワイヤライン検層の二つの形態がある。MWDは掘削中に行い、ワイヤライン検層は掘削後に検層を行う。ともに検層測定を深度の関数として行うが、深度のものさしとして掘削同時計測ではドリルストリング(ドリルパイプを繋いだもの)を使い、ワイヤライン検層ではケーブルを使う。坑井近傍の地層に対する掘削の影響が掘削時に最小であり、同じ精度・分解能を持った測定ができるならMWDの方がより正しい測定になっていると考えられている。なお、単に深度というとき、鉛直深度ではなく、ドリルストリングあるいはケーブルの長さをいう。

MWDは、目的の違いによりMWD(Measurement While Drilling)とLWD(Logging While Drilling)の二つに区別される。MWDは、掘削制御に必要な測定を行

い、計測データは泥水パルスを使いリアルタイムで地上に送る。データ送信率は、ワイヤライン検層の場合の100K~500Kビット/秒に比べ、1~10ビット/秒と低いが、掘進率も遅いので十分とされている。LWDは、掘進速度に応じてデータを泥水パルスを使いリアルタイムで地上に送る場合とメモリーに記録し地上に戻ってから取り出す場合がある。MWD/LWDで使われている計測機器の最高使用温度は、泥水循環による冷却効果があるためワイヤライン検層機器より低く、150°Cである。掘削同時計測は、コア掘りを行った後も含め、坑壁が不安定な際に特に有用と考えられる。

ワイヤライン検層

第7-32図にワイヤライン検層の様子を示す。地上の掘削リグの傍にウィンチとデータ収録・処理システムを収容している第7-33図のようなトラックがある。ウィンチから引き出されたケーブルはリグ上のシープを経て坑内に入り、その先にツールが吊され坑内を移動しながら計測する。一般にワイヤライン検層システムは、次の四つの部分から成り立っている。

- ①坑内検層機器 (以降、ツールと呼ぶ。)
- ②ケーブル
- ③ウィンチ
- ④データ収録・処理システム (ハードウェア・ソフトウェア)

地震探査では、このほかに人工地震を起こす音源が使われる。

ケーブルは、ツールを吊す機械的な役目とツールに電力を送りツールが得たデータを地上のシステムに送る電気的な役目を担う。

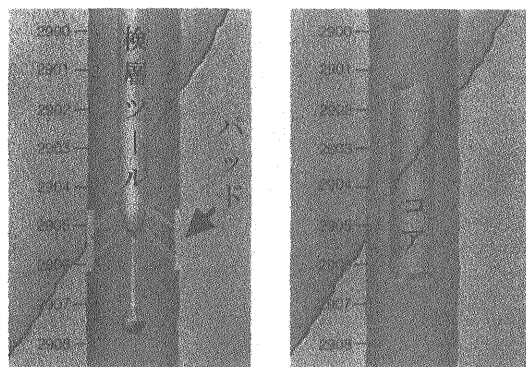
ツール移動の基本は、自重とケーブル重量により坑井中を降ろし、ウィンチで引っ張り上げるというメカニズムである。しかしながら、最近では水平井掘削技術の発達と共に、ドリルストリングやセメンティングで使われるコイルドチュービングを使ってツールを移動する方式も使われている。ドリルパイプを使う場合、深度はケーブルによって測られる。一方、コイルドチュービングの場合、コイルドチュービングのなかをケーブルを通してツールに繋ぎ、コイルドチュービングのインジェクターによりチュービングごとツールを搬送させ、深度はチュービングによって測られる。

ツール自体は、センサーや駆動部など測定を行うのに必要な部品を内蔵し、特徴的な構造を持つソンドと呼ぶ部分と、ソンドの制御や地表との通信を行う電子回路が入っているカートリッジと呼ぶ部分の二つで構成される。ツールのなかには、ソンドのなかにも電子回路を持つものもある。各ツールはできる限り独立に設計・動作できるように検層システムは構築されているので、第三者の手で独自に開発されたセンサーやツールを既存の検層システムに組み入れることは、通信部とデータ収録のためのソフトウェアを追加することで可能である。

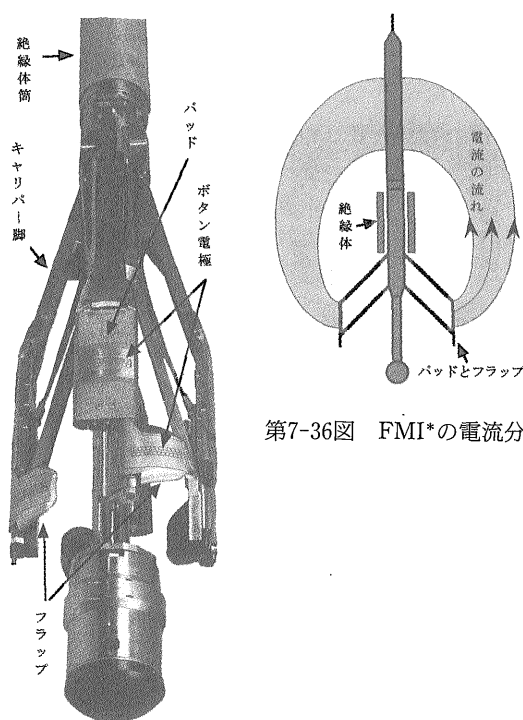
ワイヤライン検層は、色々な測定を175°Cまでの温度域

で行ってきた実績を持つが、1回の測定サイクルは数時間程度であり、より長期の連続測定におけるツールの信頼性については検証する必要がある。ただ一方で、同等の技術に基づいて造られている圧力・温度観測ツールは、175°Cで1ヶ月から数ヶ月、150°Cで数年以上の長期観測に使われており、ワイヤライン検層ツールが一般的に短期観測用というわけではない。動作温度の上限を決めている因子は、センサーや電子部品並びにシール用エラストマーなどであり、急激な変化を起こすわけではないが徐々に劣化が加速される温度域で使用しているわけである。使用許容時間に限界があるのは仕方なく、それを定期的な補修で補っている。このような事情であるから、使用許容時間の見積りのための加速試験は難しく、信頼性評価には時間がかかる。

さて、175°C対応の圧力・温度観測ツールのなかには、



第7-34図 検層とコアリング



第7-35図 閉脚中のFMI*

第7-36図 FMI*の電流分布

電池駆動でメモリーに記録するものがあり、低電力消費、低発熱といった技術的に新しい要素を持つ。150°C対応の設置型長期観測システムは、チュービングとケーシングの間隙に設置できるように、ツール外径が小さいことが一つの特徴である。

ワイヤライン検層に対する制限

ワイヤライン検層を制限する環境条件として、温度に注目しがちであるが、他の条件もあるので、ここに挙げる。坑井の環境条件により、ツールが主に制限を受けるが、以下に述べるようにケーブルやウィンチも見直しが必要になり得る。通常の検層環境に比べ苛酷な環境条件での検層をHostile Environment Logging (HEL)と呼んで、次の環境条件の内一つでも当てはまる場合として定義されている。

- ①温度：175°C以上
- ②圧力：1240bar以上
- ③深度：4500m以上
- ④H₂S, HCl, CO₂が含まれる場合
- ⑤極圏（地上が極寒）
- ⑥坑口圧力：550bar以上
- ⑦固形物が出てくる場合

これまでの石油開発では、5 kmを越す井戸はまれでおよそ3 km、130°C以内のものが多数を占めている。深度が増加することで、温度と圧力が高くなるだけでなく、ケーブルの自重によるケーブル負荷荷重の増加や坑壁との摩擦の増加がある。ケーブル強度の問題もあるし、泥水圧力と地層内圧力との差圧によるケーブルやツールの抑留の危険性も大きくなる。腐食環境④、特にH₂Sは、温度・圧力・深度とは無関係に起こり、毒性が高く安全性の問題が生じると同時に、ケーブルやツールに使える材料が限られ高価なものになり、対策に時間も必要なので、資金や時間の見積りや計画に当っては注意を要する。日本国内の井戸でH₂Sの発生は、石油井では見られないが地熱井で起こるケースがあるようで、JUDGE計画での懸念の一つである。

検層できる最大深度はケーブルの長さやケーブル破断強度で決まり、最大ケーブル長はケーブルを巻くウィンチドラムの高さとケーブルの太さで決まっている。シュルンベルジェ社の標準的なウィンチとケーブルを例にとると、3.8トン（安全負荷；破断強度の50%）用ケーブルで約8.8km、5.3トン用ケーブルで約7.3km巻けるが、3.8トン用ケーブルの場合、約7.3km分のケーブル自重だけで安全負荷荷重になってしまう。ケーブルにとって最も大きな負荷はケーブル自身であり、同じ材料を使い強度を大きくするためには太く重くなるので、例えば、40%強度を増加させても吊せるケーブル長は10%程度しか増加しない。ただし、ここでは簡単のため、泥水によるケーブルに働く浮力とケーブルやツールを引き上げる際の摩擦などによる負荷は無視している。一般に、金属は高強度になればなるほど、応力腐食割れや水素脆化割れを起こしやすくなるので、より高強度の材料を使う場合には腐

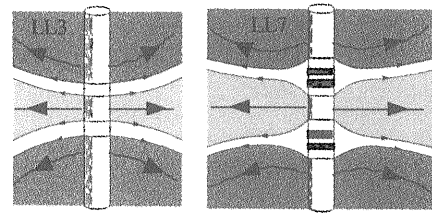
食に厳重な注意を払う必要がある。

さらに一般的に当てはまる制限として、ケーブルやツールが坑内で抑留する危険性から、坑壁の状態や坑内径が挙げられる。これらは、掘削時にかなり分かっているのので、検層を中止するか否かの判断は状況によって経験者により判断される。各ツールの外径はまちまちで、対応できる坑内径にはそれぞれ上限と下限がきまっており、サービス・カタログなどに記載されている。簡便なガイドラインとして、最小坑内径とツール外径の関係が、

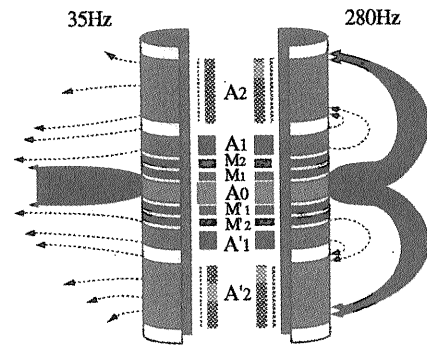
$$\begin{aligned} \text{裸坑内径} &\geq \text{ツール外径} + \text{約1インチ} \\ \text{パイプ内径} &\geq \text{ツール外径} + \text{約1/2インチ} \end{aligned}$$

と経験的にいわれている。ここでパイプは、ケーシング、チュービング、ドリルパイプ等である。

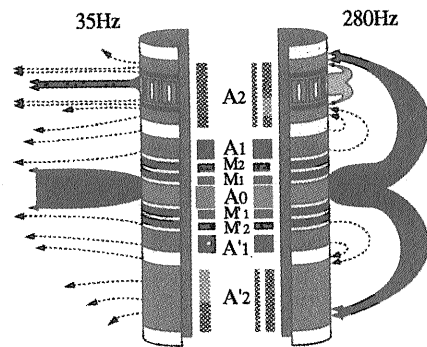
残る制限は、同時に検層できるツールの組み合わせである。設計上、最後尾にしか接続できないツールや通信システムの違いにより同時に動かさないツールの組み合わせ



第7-37図 初期のラテロログのツール周囲の電流分布



第7-38図 DLLの電極構造と電流分布



第7-39図 ARI*の電極構造と電流分布

せがある。

ワイヤライン検層ツール

HEL条件に触れない環境の場合に行われている一般的な測定を以下に簡単に述べる。ここでは、主にシュルンベルジェ社のツールを例にとって説明するが、地下でこういった物理量を計測する手段があるか、といった視点で捕えて頂きたい。JUDGE計画にとり、どの物理量が地質の判別に有効か、掘削地点の予想地質を基に科学者側で検討するための紹介である。その上で、実際のツールの計測が科学者の求める情報を与えるか、求める物性値の範囲、精度、分解能の詳細な検討を行うべきである。満足できるツールが無ければ、設計変更や新しいツールの開発も考えられる。ツールの詳細な仕様については、サービスカタログや各ツールのパンフレットを参照されたい。最高使用温度は、一般的に175°Cである。なお、ツールの発達の様子的一端を示すために、同様の測定に対し二つ以上のツールが挙げられている。また、ツール1または2と記してあるのは、物理的に同等の測定をしている場合で、どちらかを使えばよい。より新しいツールを1に挙げ、1と2の違いは説明の中で触れた。

(A) コアの評価に関連するか、あるいはその代替となる検層

第7-34図にコア掘で得られるコアと検層によって調べられる地層の関係を示す。コアは調査対象そのものであり、地上でしかできない高精度の解析方法で調べることができる。その一方で、コアの大きさは対象とする地層にくらべ小さいために、坑井周囲の地層の全体像を描くには不十分であるおそれがある。検層は逆に坑井周囲の地層を調べ、その場観測の技術的限界はあるものの視野のより大きな情報をもたらす。

検層方法は、地層の電気的あるいは音響的性質を測定するものと放射線との相互作用を利用するものの三つに大別される。

電気測定

FMI* (Fullbore Formation Micro Imager)

またはFMS* (Formation Micro Scanner)

第7-35図に示すように、坑内径を測るキャリパー脚の先端にボタン電極を埋め込んだパッドを装備したツールである。第7-36図に示すように、ボタン電極からツール上部への数メートルの経路に16kHzの電流を流し地層の電気抵抗を決定し、電気抵抗の相対変化を5mmの解像度で観ることができる。後述のGPIT (General Purpose Inclination Tool) を組み合わせることで、坑壁の方位や検層中のツールの自転などによる測定像の歪を補正できる。FMSは、第7-35図のフラップ部を持たないので。FMI*よりボタン電極の数が少なく、坑内周上の測定範囲が半分になっている。(*印はシュルンベルジェ社の登録商標。以下同)

ARI* (Azimuthal Resistivity Imager)

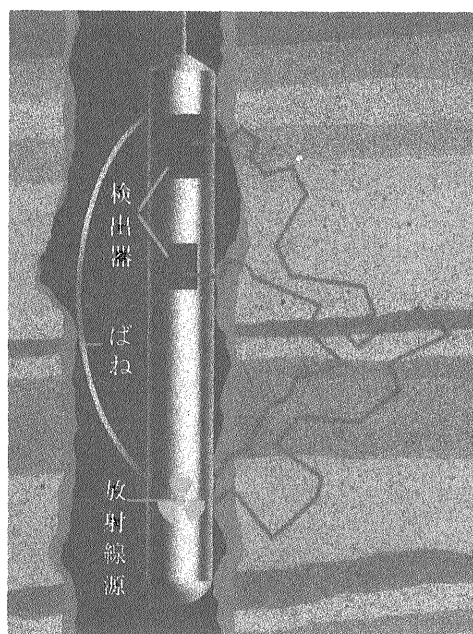
またはDLL (Dual LateroLog)

ツールから地表への35Hzの電流とツール近傍に280Hzの電流を流し地層の電気抵抗を決定する。35Hzでの測定は、ツール上の電極と数十メートル上のケーブル上の1点の間の電位を測るので観測深度が最も深く、電気検層のなかでも早く開発された測定方法の一つである。ARI*やDLLの基礎となったラテロログ3 (LL3) とラテロログ7 (LL7) の電極配置と電流分布を第7-37図に示す。電極が一つだけの場合の電流分布は放射状になるため、電気抵抗をきめる電流路が不明確になる。そのため、LL3では上下の補助電極を導入し、補助電極からの電流で中央電極からの測定電流をはさみ込むことにより、測定電流の上下方向への拡がりを抑え、測定対象地層に電流路を絞っている。LL7では、電極間の電位差を測るモニター電極を導入し、電極間電位差が零になるように電流を制御している。さらに第7-38図に示すDLLでは、補助電極をA1とA2 (下側ではA'1とA'2) に分割し同図右側に示すような分布を持つ280Hzの電流を重畳している。電流分布の違いにより観測深度を変えた二つの抵抗測定を比べることで、泥水の地層への浸透具合も知ることができる。ARI*は第7-39図に示すようにA₂電極の中のツール周上に12個の分割電極を持ち、坑井の周上の異方性を観ることができる。井戸の深度方向の分解能は、約75cmである。

AIT* (Array Induction Imager Tool)

またはPhaser*

数十kHzでの電磁誘導の測定を行い、地層の電気抵抗を決定する。AIT*は、8つの検出コイルを持つのでArrayという名前を持っている。観測深度は約25cmから2m前後の範囲で、AIT*は5つの異なる観測深度の測定を、Phaser*は3つの異なる観測深度の測定を同時に行



第7-40図 放射線検層

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

う。井戸の深度方向の分解能は、AIT*で約30cm、Phaser*で約90cmである。

SP (Spontaneous Potential)

自然電位を15cmごとに測る。

ADEPT* (Adaptive Electromagnetic Propagation Tool)

1.1GHzで電波の伝搬時間と減衰を測り、地層の誘電率を決定する。観測深度は、25mmから76mmの範囲で、井戸の深度方向の分解能は、約5cmである。

音響測定

UBI* (Ultrasonic Borehole Imager)

またはBTT (Borehole Televier Tool)

自転する超音波振動子を使い、超音波の坑壁からの反射振幅と坑壁までの往復伝搬時間を測る。UBI*は250kHzあるいは500kHzを使い、BTTは300kHzあるいは400kHzを使う。分解能は500kHzで約5mmで周波数に反比例する。UBI*の超音波振動子は、直接泥水に接しており泥水中の音速と減衰をその場測定できる機能を持つが、BTTのそれはツール内にあり直接泥水に関する較正はできない。

DSI* (Dipole Shear Sonic Imager)

250Hz～5kHzと8kHz～30kHzの音波の伝搬速度を測る。バンド幅の広いモノポール音源と4kHzまでの2方向のダイポール音源の2種類の音源と、8つの受信子を持つ。

Array-Sonic*

5kHz～18kHzの音波の伝搬速度を測る。1つの十数kHzのモノポール音源と8つの受信子を持つ。

放射線測定

自然ガンマ線を測るものと放射線源を使うものの二種類のツールがある。放射線源を使う場合、線源から地層に向けて放射された中性子やガンマ線は地層中の元素と相互作用し次第に拡散減衰し、その一部は第7-4-4-9図に示すようにツール上の線源からの距離が違う2つの検出器に入ってくる。それぞれの検出器で測定された放射線エネルギースペクトルの差は地層中で起こっている相互作用を示すので、地層中に存在する元素を知ることができる。

中性子と元素との相互作用には、弾性および非弾性散乱と中性子捕獲がある。高速中性子にとって主な相互作用である弾性散乱では、質量が同等の粒子と衝突したときに最もエネルギーを失うので、高速中性子のエネルギースペクトルは水素量を示す。高速中性子の非弾性散乱や低速中性子の捕獲時に励起されるガンマ線は、元素に特有なエネルギースペクトルを持つので、励起ガンマ線エネルギースペクトルは元素の種類を示す。

ガンマ線と元素との相互作用には、高エネルギー時のコンプトン散乱と低エネルギー時の光電子放出がある。コンプトン散乱は電子密度に依存し、光電子放出は元素特有の依存性を持つので、ガンマ線のエネルギーの失い

方から電子密度や元素の種類を知ることができる。

IPLT* (Integrated Porosity Lithology Tool)

パルス中性子を使った測定をするソンドと後述のLDL (Litho-Density* Log)およびHNGS* (Hostile Environment Natural Gamma Ray Spectrometry)が組み合わされている。パルス中性子発生器から放射された高速中性子は、地層内で散乱され徐々にエネルギーを失いつつ拡散するが、中性子発生器からの距離の違う4つの熱外中性子検出器と1つの熱中性子検出器に入ってくる中性子数と飛来時間を6インチごとに測定し、地層内の水素量を決定する。熱中性子数を測る場合に比べ、地層内の硼素、塩素、ガドリニウムなどによる捕獲がないので、地層がこういった元素を含む場合に、より正確な水素量を示す。同時に、LDLとHNGS*がそれぞれの測定を行う。パルス中性子発生器は14MeVの中性子を毎秒3×10⁸個放射できる。

CNL* (Compensated Neutron Log)

放射線源²⁴¹AmBeから放射された高速中性子は、地層内で散乱され徐々にエネルギーを失いつつ拡散するが、線源からの距離の違う2つの熱中性子検出器に入ってくる中性子数を6インチごとに測定し、地層内の水素量を決定する。²⁴¹AmBeは、4.4MeVの中性子を毎秒4×10⁷個放射できる。

HLDL (Hostile Environment Litho-Density Log)

またはLDL (Litho-Density* Log)

放射線源¹³⁷Csから放射されたガンマ線は、地層内で散乱され徐々にエネルギーを失いつつ拡散し、その一部はツールに戻ってくる。線源から違う距離にある2つのシンチレーション検出器を使い、戻ってくるガンマ線のスペクトルを測り、密度と光電子効果吸収係数を決定する。ガンマ線は、電子により散乱されエネルギーを失っていき、光電子効果で吸収されることを利用している。電子密度が高いものは一般に密度も高いという相関に基づき、密度を決定している。HLDLはLDLを基に開発されており、対応する坑内径と環境温度の範囲が広い。

GLT* (Geochemical Logging Tool)

放射線源²⁵²Cfを使った地層中のアルミニウム量を決定するためのガンマ線計測ソンドとNGS* (Natural Gamma Ray Spectrometry)およびGST* (Gamma Ray Spectrometry Tool)が組み合わされている。放射線源²⁵²Cfから放射された中性子が、地層中のアルミニウムに捕獲されるときに付随して起こるガンマ線放射量を測り、アルミニウム量を決定する。同時に、NGS*、GST*がそれぞれの測定を行うことで、12個の元素(K, Th, U, Al, Si, Ca, Fe, S, Gd, Ti, Cl, H)の量を決定する。GST*を使うため、検層速度は180m/hであり、150°Cツールである。²⁵²Cfは、2.4MeVの中性子を毎秒1.2×10⁸個放射できる。

GST* (Gamma Ray Spectrometry Tool)

パルス中性子発生器から放射される高速中性子が、地層中の元素と相互作用する結果、誘起されるガンマ線放射スペクトルを測り、8個の元素(Si, Ca, Fe, S, Gd,

Ti, Cl, H) の量を決定する。ガンマ線スペクトルを決定するためにデータの積算が必要となり、検層速度は180 m/hであり、150°Cツールである。

HNGS* (Hostile Environment Natural Gamma Ray Spectrometry) またはNGS* (Natural Gamma Ray Spectrometry)

シンチレーション検出器を使った自然ガンマ線スペクトルの測定により、 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U の量を決定する。このなかで、 ^{238}U の崩壊過程は中間状態が多く、その娘核種のいくつかは半減期が非常に長いために、測定しているガンマ線を放射している娘核種は、 ^{238}U の現時点での存在を直接示していない。例えば、何らかの理由で ^{238}U が遅れて来たとしても、測定対象のガンマ線を放射する娘核種までは崩壊が進んでないこともありうる。そのため、ウラン量の解釈には、注意を要する。また、泥水中にカリウムや重晶石などのガンマ線吸収率が高いものが含まれる場合には、補正が必要になる。HNGS*は、BGO(ビスマス・ゲルマニウム)結晶をシンチレーターに使用した検出器を2つ使うことで、スペクトル分析性能が向上しており、260°C対応でもある。

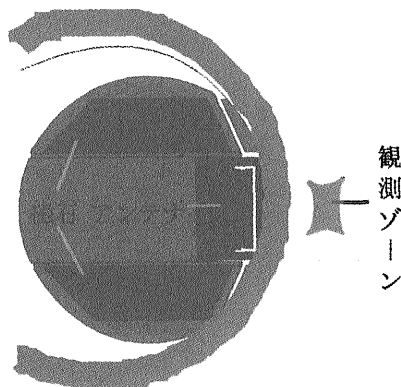
核磁気共鳴

CMR* (Combinable Magnetic Resonance)

裸坑壁近傍の陽子(水素原子)のパルス核磁気共鳴を観測しスピンスピン緩和時間を測る。孔隙が大きいほど緩和時間は長いことを利用して地層中の個々の孔隙の大きさの分布を決定する。スピンスピン緩和時間ではなくスピンスピン緩和時間を測るのは、検層速度を速くするためであるが、それでも180m/h以下である。第7-41図に計測部の断面を示す。通常核磁気共鳴の計測装置では、コイルや磁石の内側の磁場の均一性の良い位置に測定対象試料を置けるが、測定対象が計測装置の側壁から坑泥層を越えた外側に位置することが検層の特徴である。図に色濃く示した部分にある陽子が核磁気共鳴を起こすように設計している。

サイドコア採取

第7-34図に示したようなコア掘によるコアではなく、



第7-41図 CMR*の断面と観測ゾーン

坑壁からコアを採取する。

CST (Chronological Sampler Taker)

火薬を使いコアバレルを地層中に打ち込み、サイドコア((9).3用語集参照)を採取する。採取するコアの大きさは、数種類有るが、最大で内径1インチ×長さ2.25インチで、一度に採取できるコアの数は、最大66個である。コアバレルの形状や材質は、石油開発用に堆積岩を対象として設計されているので、対象岩質によっては検討を要する。

MSCT (Mechanical Side Wall Coring Tool)

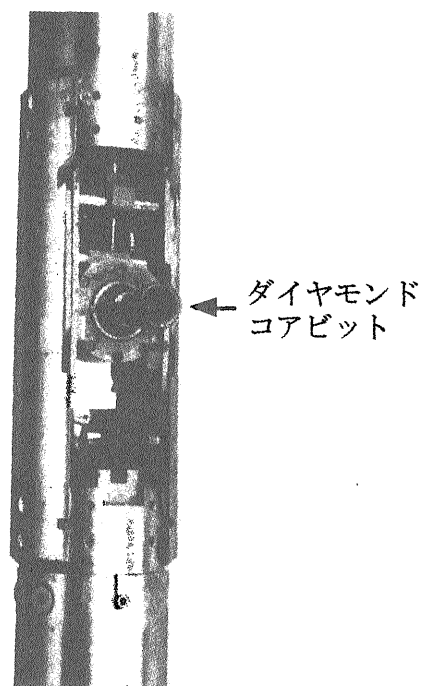
第7-42図に示すダイヤモンドコアビットを第7-43図に示すように坑壁に掘込みサイドコアを採取する。採取されたコアは同図に示すように採取した順序でツール内に収納される。特に硬い岩質に対して、火薬を使うCSTに比べ損傷の少ないコアが採れる。採取するコアの大きさは、径0.92インチ×長さ2インチで、一度に最大50個のコアを採取できる。

(B) 流体採取

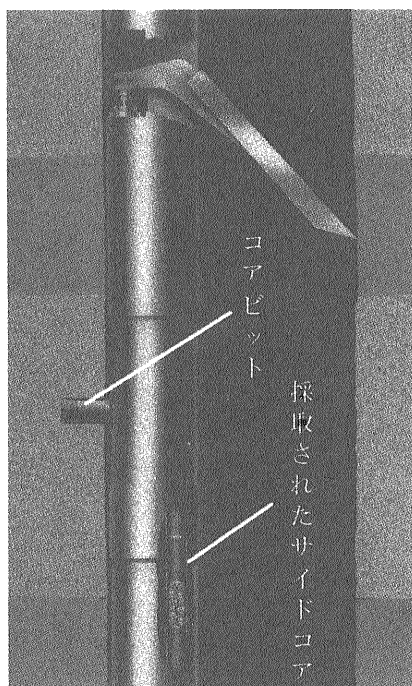
MDT* (Modular Formation Dynamics Tester)

またはRFT* (Repeat Formation Tester)

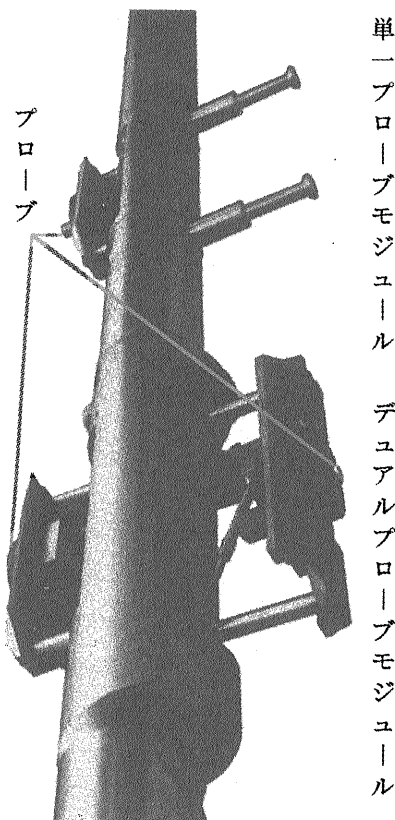
第7-44図に示すように、地層にプローブと呼ぶパイプを突き刺し、泥水が混ざらないようにパイプとマッドケーキ(フィルターケーキ; (9).3用語集参照)の間をシールし、地層内流体を採取する。MDTは、その機能を独立したモジュールとして自在に組み合わせられるように設計されたツールで、例えば、第7-45図は単一プローブモジュールを上側にデュアルプローブモジュールを下側に組み合わせ、プローブを突き出した状態を示している。この



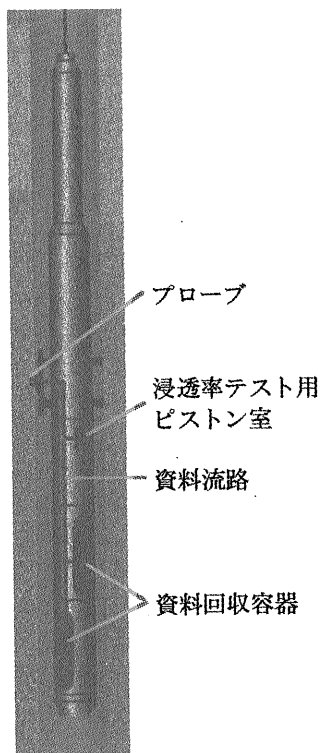
第7-42図 MSCTのビット部



第7-43図 MSCTによるサイドコアリング



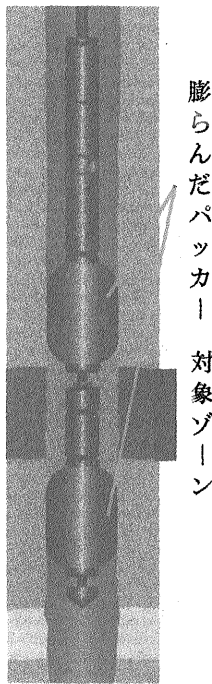
第7-45図 MDT*：二つのプローブモジュールを組み合わせた場合



第7-44図 流体採取ツール

ため、MDT*は試料収納モジュールを繋ぎ合わせることで試料容器を幾つでも持つことができるが、RFT*は第7-44図のように2つしか持てない。さらに、MDT*は坑内ポンプを接続できるので、マッドフィルトレイトで汚染された地層内流体を採取前に汲み出し、より汚染の少ない地層内流体が採取できる。さらに光分析モジュールを追加し、ポンプにより汲み出される流体の光吸収をモニターすることで、石油開発にとり重要な油の採取を確実なものにしている。またMDT*は、坑内ポンプと第7-46図に示すように2個のパッカー((9).3用語集参照)を使い、地層にプローブを突き刺すことなく2個のパッカーに挟まれた区間に接続する地層からの流体を採取できる。

湧出物の化学分析モニターを、ケーシング設置前に裸坑中で行うのは困難である。掘削中の坑内泥水圧力は、泥水密度の制御により地層内圧力より常に高く保たれ、裸坑の検層時も同様である。ガスや液体の湧出物が、坑井内に出てこないように差圧を造っているわけで、この差圧を無くするのは、坑井を維持できなくなる危険が高い。ケーシング設置前の坑井内では保圧コアリングや流体採取のみを行い、地上で分析するのが現実的である。ケーシング設置後は、ケーシングに穿孔して地層内流体を産出できるが、多くの深度地点で同時にかつ別々に産出するのは難しい。



第7-46図 対象ゾーンの上下にセットされたパッカー

(C-1) 地層内圧力

MDT* (Modular Formation Dynamics Tester)
またはRFT* (Repeat Formation Tester)

上で述べたように、削井中の坑内圧力は地層内圧力に比べて高くなっているため、地層内圧力は、流体採取と同様にパイプを地層に突き刺すかパッカーを2個使い、坑内泥水から隔離した状態で測定する。MDT*は、流体採取速度を調整できる。センサーは、現在のところ、水晶振動子を使った圧力温度センサーが、約1000bar、175°Cまでの範囲で精度、分解能、安定性で最も優れている。これ以上の圧力と温度の場合には歪ゲージなど電気抵抗変化を利用した圧力センサーが使われている。

このほか、同じセンサーを使いメモリーに記録する電池駆動のものや、ケーブルを使うが敷設して長期モニターを行うものが、ケーシング設置後の観測用に実用化されている。

(C-2) 地層内温度

圧力は地層内温度と坑内温度の間に差が有っても深度差が無ければ測れるが、地層内温度の測定は求める精度によっては検討を要する。掘削により、坑井近傍は掘削前の自然温度よりは冷却されていると考えられ、検層時にどれほど回復しているかは坑井によってまちまちである。平衡温度を推測するのに十分な時間、裸坑内で温度観測を行えるかどうかは、坑井の安定度に依存し削井計画との摺り合せが必要である。ケーシング設置後も、やはり求める精度によってはケーシングの熱伝導の影響を無視できなくなるので、その場合には、横掘りをして裸坑を作ることになる。センサーは白金抵抗温度計が一般的である。

高感度が必要であれば、水晶振動子を温度計に応用したものもある。

(D) 岩盤歪

サックス・エバートソン体積歪計(脚注)のように歪を直接測るもので100°Cを越える環境条件で使えるものは、まだ無い。研究中のものとして、レーザーを使い歪を直接測る高温用歪計が坂田ほか(1994)により考案され報告されている。これらの歪計の使用するには、歪計と固定用セメントの機械的強度は岩盤のそれと同じでなくてはならないので、設置位置の岩盤強度をあらかじめ知る必要がある。さらにセメントが歪計と岩盤の隙間を埋める必要があり、数kmの深度での計測には歪計自身もさることながら、セメンティング((9).3用語集参照)技術あるいはそれに替る設置技術の開発も必要である。

現在のところ、コアなどを基に岩盤の機械的強度を知ったうえで水圧破碎を行い、破碎に至る圧力から歪量を導く方法が一般的である。水圧破碎を行うには、ドリルスリングとパッカーを使い地上から加圧する方法と、MDT*で行うように坑内ポンプと2個のパッカーを使う方法がある。ただし、石油開発でよく行う水圧破碎は、貯留岩(砂岩、炭酸塩岩)が対象であり、ケーシングを設置して穿孔後、圧力をかけ破碎するが岩盤歪を求めるわけではない。岩盤歪を決定するには、穿孔による地層損傷を避けて裸坑で行うことになるが、以下の問題がある。

- ①市販されている裸坑用パッカーは種類も限られ柔らかいものが多いので、対象岩石が固い場合に破碎するに足る強度を持つものが有るかどうか。
- ②坑壁がパッカーでシールできるほどきれいか。
- ③破碎圧力を低くするような掘削時の地層損傷があるかどうか。

(E) 地震波

爆薬やエアガンにより人工地震を起こし、伝搬してくる地震波を坑内で測る。裸坑壁やケーシング壁と地震計の間の音響結合をとる方法がツールを特徴づけている。

ASI* (Array Seismic Imager)

3成分のジオフォン加速度計を持つ地震計を、15mおきに5個ケーブルで繋いで、5レベルでの地震波形を同時に測定する。強力な永久磁石の60kgの磁力を使ってケーシングに固定するので、他のばねで固定するツールに比べ、各々の地震計を小さく4.2kgと軽くでき、地震計とケーシング間の音響的結合が良いが、裸坑では使えない。共振周波数25Hzの加速度計を使い3Hz~200Hzで平坦な感度を得ている。また、共振周波数が14Hzのジオフォンを入れ替えて使うこともできる。

岩盤の変形により起こる容器の変形を、変形に伴う容器の体積変化として検出する。体積変化は、容器中のシリコン油が付属するペローへ移動することで起きるペローの長さ変化として測られ、シリコン油の熱膨張による体積変化は温度計測により補正している。

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

CSI* (Combinable Seismic Imager)

またはSAT* (Seismic Acquisition Tool)

ASI*と同じ加速度計を使い、3成分の地震波形を測定する。ばねによりツールを坑内に固定するので、裸坑でも使える。CSI*の地震計部分は、ツール本体より音響的に独立しているが、SAT*のそれは一体である。さらに、裸坑中で3本のCSI*を組み合わせ、3レベルでの同時測定ができる。ASI*と同様に3 Hz~200Hzで平坦な感度を持つ。また代替センサーとして、共振周波数10Hzのジオフォンをギンバルに載せ鉛直・水平方向とそれらに垂直な方向の地震波形を測定することもできる。

(F) 重力

BHGM (BoreHole Gravity Meter)

深度を変えて重力差を測り、坑井周囲の密度変化を決定する。例えば、1mの深度差で観測される重力差は、約50%が半径1m以内の密度差、約90%が半径5m以内の密度差に起因する。観測点間の距離が大きくなれば、より遠距離の情報を得られる。

その他の検層に必要なツール

GPIT (General Purpose Inclinometry Tool)

3軸の磁力計と3軸の加速時計を持ち、ツールの姿勢を示す鉛直からの傾斜と磁北からの回転、さらにツール自体の軸の回りの自転を決定する。

GR (Gamma Ray)

シンチレーション検出器を使って自然ガンマ線量を測定し、複数の検層データの相対的な深度合わせに使う。

EMS-LHT (Environment Measurement Service-Logging Head Tension) またはAMS (Auxiliary Measurement Service)

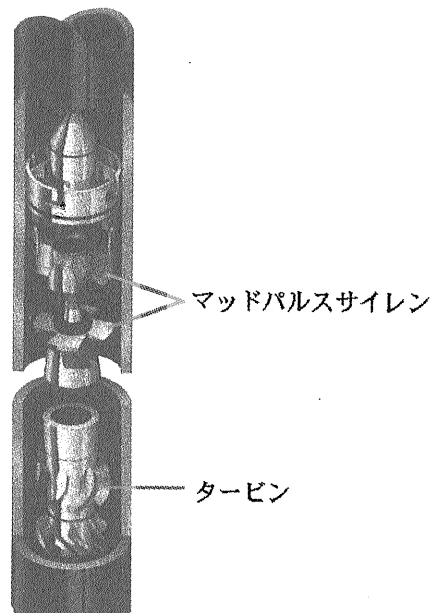
ツールに掛かるケーブル張力と泥水の電気抵抗と温度を測る。

LWD検層

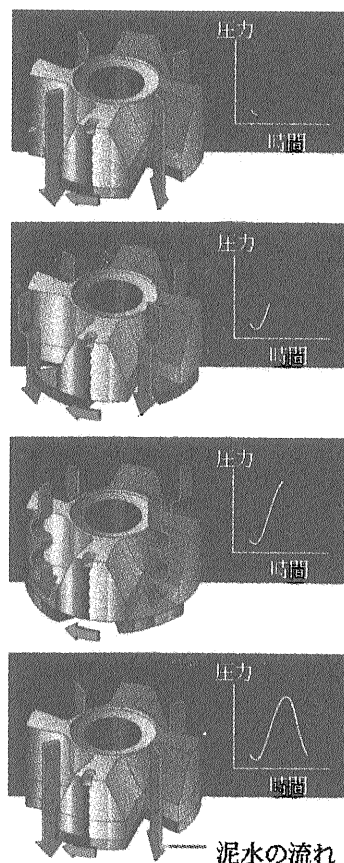
LWD検層は、ワイヤライン検層ツールの計測機器をドリルパイプに組み込み計測していると考えてよいが、掘削中という環境条件のため、ワイヤライン検層に比べ計測の種類は少なく分解能も低い。泥水汚染の少ない計測ができ掘削制御にも役立つという特長を持つため、発達中の検層技術である。分解能が低い一つの理由として、ツールと坑壁の距離が、ワイヤライン検層ツールに比べて大きいことが挙げられる。ワイヤライン検層ツールの場合には、センサーを坑壁に押し当てる機構を持つことができるが、LWDツールの場合には、掘削時にツールが回転されることが多いため、そのような機構は機械的強度の点から持てない。

データは、泥水パルスによりリアルタイムで地上に送る場合と、ツール内メモリーに記録する場合がある。第7-47、48図に泥水パルス通信を行うPower Pulse*ツールとその内部で泥水パルスの搬送波を作る様子を示す。さらに、メモリー中のデータを、ツールを地上に引き上げず

坑内においたまま、検層ケーブルを通して吸い上げるツールも開発され使われ始めている。LWDツールの最高使用温度は150°Cであり、自然坑内温度にして何度まで使用できるかは、泥水循環量に依存する。



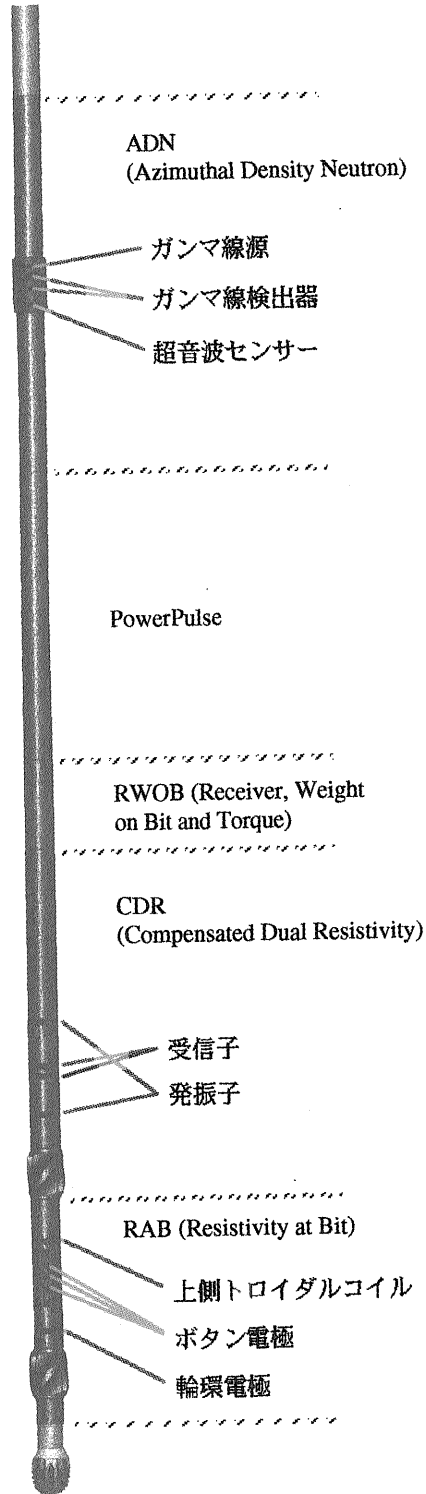
第7-47図 Power Pulse*マッドパルス生成ツール



第7-48図 マッドパルス搬送波の生成

LWDツール

第7-49図にLWDツール構成の一つを示す。ワイヤライン検層ツールとの計測機器設計上の大きな違いは、LWDツールは形状が制限され、高い機械的強度および耐衝撃性を求められることである。LWDツールの外見は例えると大砲の砲身のようにあり、その中空部は泥水を流すた



第7-49図 掘削同時計測ツール構成の例

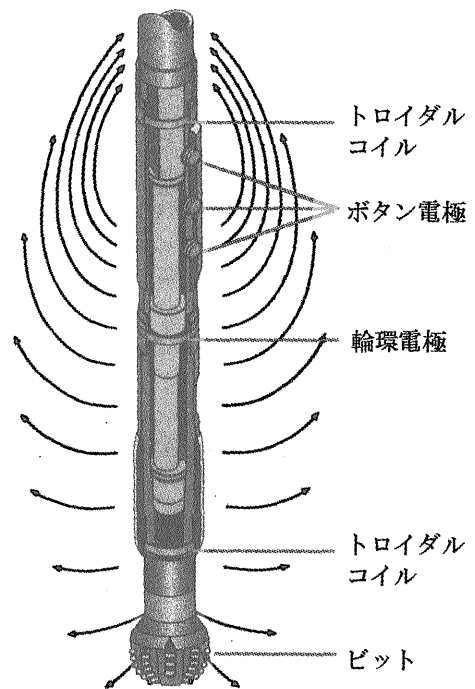
めの流路として確保され、センサーを含め計測機器は環状金属部分に入らなくてはならない。そのため、LWDツールには8.5インチを主にそれ以上の坑径に対応するものが多いが、スリムホール掘削の発達とともに、今後小径のものが開発されてくると思われる。

一般的なLWD測定を、シュルンベルジェ社のツールを例に、以下に簡単に述べる。流体採取や圧力測定はLWDとして原理的には考えられるが、今のところ行われていない。

電気測定

RAB* (Resistivity At the Bit)

第7-50図にツールとその周りの電流分布を示す。下側トロイダルコイルを使い、1.5kHzの誘導電流を生成し電気抵抗計測を行う。誘導電流は、ツール上をビットまで流れ、ビットの周囲から地層に入り、再びツールに戻るループを形成する。この誘導電流の大きさを測り、ビット近傍の地層の電気抵抗を決定する。この測定の井戸の深度方向の分解能は、ビットとツール間の距離に依存し、ビットに直結した場合に約60cmである。さらに、対向する上下2つのトロイダルコイルを使い、3つの2.5cm径ボタン電極と1つの輪環電極から坑壁に向けて流れる誘導電流を測定し、電気抵抗を決定する。観測深度は、例えば8.5インチ坑井の場合、ボタン電極による測定では、各々約3cm、8cm、13cmで、輪環電極による測定では約23cmである。ツールが回転すればボタン電極も回転するので、坑壁周上の電気抵抗分布を観ることができる。さらに、複数の検層データの相対的な深度合わせに使うため、自然ガンマ線量を測る。また、掘削制御用にツール軸方向と径方向の衝撃と温度を測る。



第7-50図 RAB*と電流分布

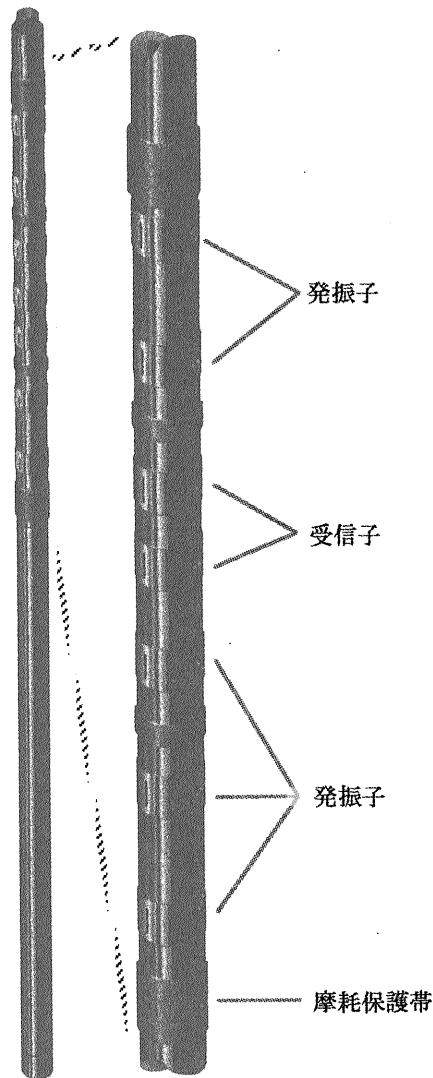
(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

ARC5* (Array Resistivity Compensated)

第7-51図にツールを示す。2つの受信子上側に3つの発振子と下側に2つの発振子を配置し、2MHzで電磁誘導の測定を行い、地層の電気抵抗を振幅減衰と位相差から決定する。振幅減衰は位相差に比べ、より深い観測深度を持つ。また、観測深度は発振子と受信子の距離にも依存するので、5つの発振子についてそれぞれ違う観測深度の測定を行うので、全部で10種類の観測深度での抵抗を求めることができる。観測深度と井戸の深度方向の分解能は、地層の抵抗にも依存し、抵抗が大きくなれば大きくなる。さらに、自然ガンマ線量を測る。次に挙げるCDR*よりツール径が小さく5.75インチから6.75インチの坑径に対応している。

CDR* (Compensated Dual Resistivity)

第7-49図に示すように、2つの受信子の上下に発振子を1つずつ配置し、2MHzで電磁誘導の測定を行い、地層の電気抵抗を振幅減衰と位相差から決定する。振幅減衰は位相差に比べより深い観測深度を持つ。2つ発振子



第7-51図 ARC5*

は受信子から等価の位置にあるため、ARC5*のように距離に依る観測深度の違う測定は増えない。観測深度と井戸の深度方向の分解能は、地層の抵抗にも依存し、抵抗が大きくなれば大きくなる。さらに、ワイヤライン検層ツールのNGS* (Natural Gamma Ray Spectrometry)と同様なガンマ線スペクトル測定により、⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸Uの相対量を決定する。

音響測定

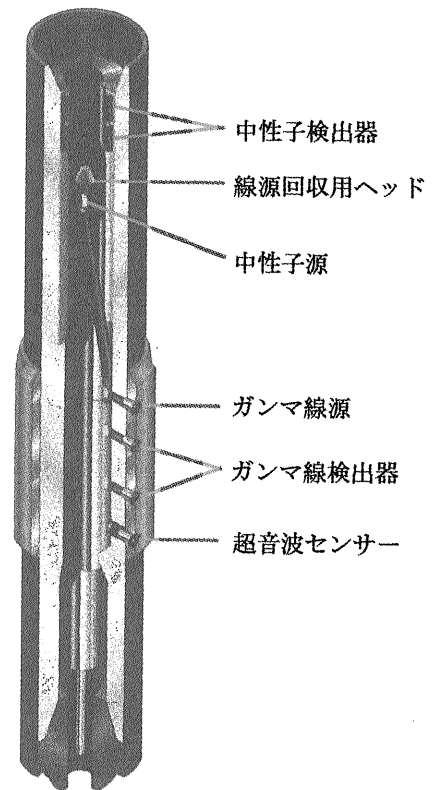
ISONIC*

1つのモノポール音源と4つの受信子を持ち、音波の伝搬速度を測る。掘削中に発生する騒音周波数域を避けた測定をしている。井戸の深度方向の分解能は約60cmである。

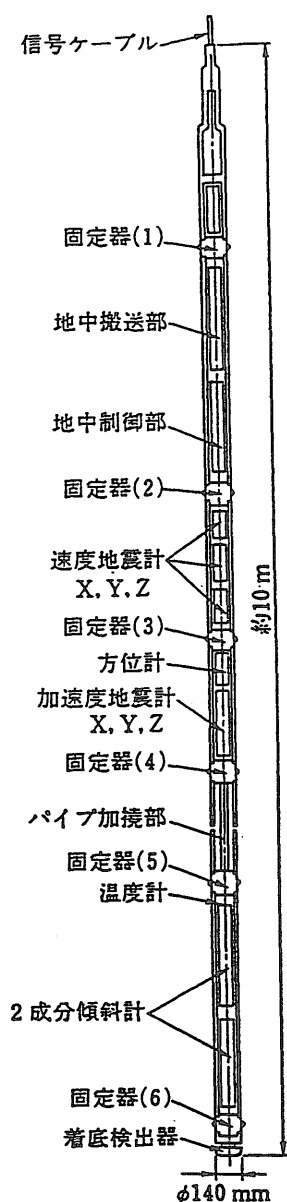
放射線測定

ADN* (Azimuthal Density Neutron)

第7-52図にツールを示す。ガンマ線源¹³⁷Csと中性子線源²⁴¹AmBeを使い、ワイヤライン検層ツールのLDL (Litho-Density* Log)とCNL* (Compensated Neutron Log)と同様の測定を行い、密度および光電子効果吸収係数と水素量を決定する。ツールが回転している場合、それぞれの量の坑壁周上の分布を4分割ごとに観測することができる。井戸の深度方向の分解能は、密度、光電子効果吸収係数、水素量のそれぞれについて15cm, 5cm, 30cmである。さらに、1つの超音波振動子を使い、超音波の坑



第7-52図 ADN*



第7-53図 深層地殻活動観測装置構造図

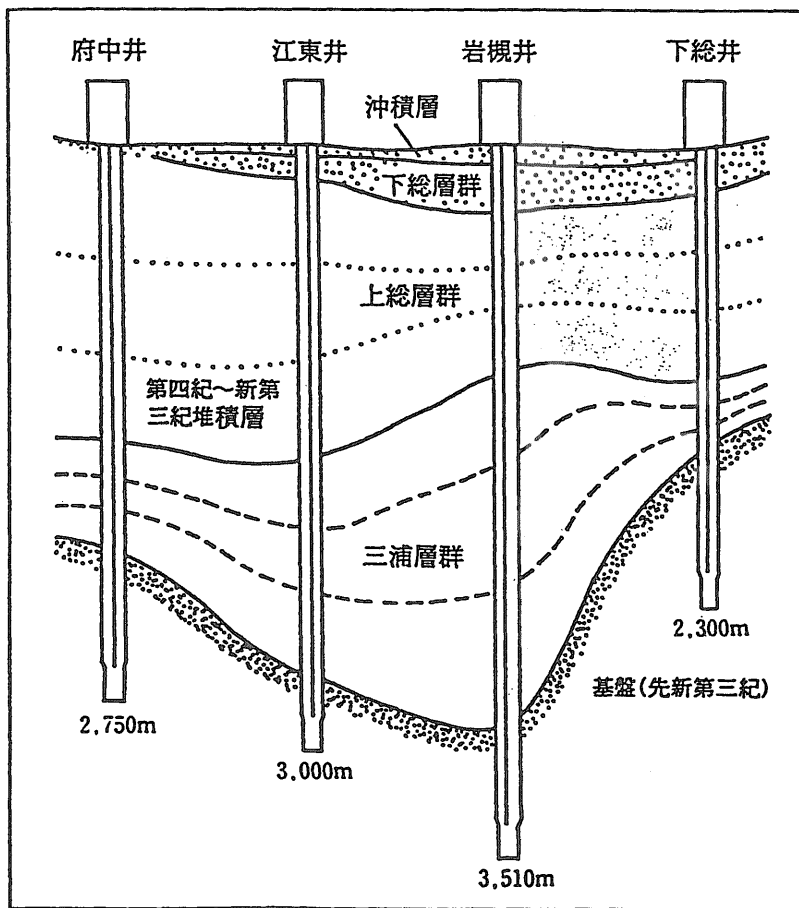
壁からの反射振幅と坑壁までの往復伝搬時間を測り、坑内径の測定と坑内ガスの検出を行う。

CDN* (Compensated Density Neutron)

ガンマ線源¹³⁷Csと中性子線源²⁴¹AmBeを使い、LDL (Litho-Density* Log)とCNL* (Compensated Neutron Log)と同様の測定を行い、密度および光電子効果吸収係数と水素量を決定する。井戸の深度方向の分解能は約60cmである。さらに、2つの超音波振動子を使い、超音波の坑壁からの反射振幅と坑壁までの往復伝搬時間を測り、坑内径の測定と坑内ガスの検出を行う。

より高温での検層

主な検層サービス会社が行っている検層の上限温度は一般に260°C (500°F)であるが、これまでに挙げた測定と同等の全ての測定が260°Cまで行えるわけではない。これは、技術的な問題もさることながら、開発投資に見合うほど高温検層の市場が大きいという経済的側面によることも大きい。技術面から見た場合、一般的な数時間の検層を行える上限温度は、現在の技術レベルでおよそ300°Cであろう。技術的な制限は坑内機器に使われる材料に起因しており、その一つは絶縁材料である。例えば、代表的な検層である電気検層は7芯導体ケーブルを必要とする。現在の7芯ケーブルは、絶縁体にテフロンあるいは



第7-54図 深層地殻活動観測点の地質構造図

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

ピークそれぞれデュポン社とICI社の登録商標。使用しており、その最高使用温度は、連続使用で280°C、数時間の使用で320°Cである。米国地質調査所は、このタイプのケーブルを使い310°Cまでのいくつかの検層を行っている。テフロンやピーク(それぞれデュポン社とICI社の登録商標)を越える耐加圧熱水性と共に同等の柔軟性を持つ絶縁材料は今のところ無く、300°Cという温度は、これらの材料が使えなくなる境界温度域にある。今後の技術開発によりこれらを越える新材料が現われれば、検層の上限温度も上がると期待される。測定に必要な電力種類や通信データ量が少ない場合には、無機材料を絶縁体とするケーブルが一つのブレークスルーになる。宮入ほか(1985)は無機絶縁体ケーブルを使い、圧力、温度および流量測定を450°Cまで行っている。

7.4.5 深井戸の長期観測技術

深層地殻活動観測装置による長期連続観測とその背景
現在、日本での地殻活動の長期連続観測装置で、最も深い井戸での観測装置群は科学技術庁防災科学技術研究所が首都圏で連続観測を行っている深層地殻活動観測装置である。都市における直下型地震は地震の規模は小さくとも、被害は非常に大きくなることが予測される。地震予知を効果的に実現するためにはより正確で信頼性の高いデータを震源予測域でいち早く得ることが決め手となると考えられる。

一般に地震のマグニチュード(規模)が大きいほどその前兆現象も広い地域に現れると言われているが、東京直下を震源域とする地震は過去の例から見て被害の割にそのマグニチュードはそれほど巨大ではなく、その前兆現象を捕まえるには東京首都圏内に観測点を設置することが必要であると言われてきた。しかし東京は世界的に見ても最も社会的、経済的活動が活発な地域であり、交通機関を始めとする人為的ノイズが多く、地表面近くでは高感度地震観測などは不可能であり、通常的手段では地震予知のための精密観測ができる環境ではなかった。そこで1973年、科学技術庁国立防災科学技術センター(現防災科学技術研究所)が東京の地下深く約3,500m級の深い観測井を掘り、その孔底に観測装置を設置した。

この深井戸による長期地殻観測システムは深層地殻活動観測装置と呼ばれ、日本や世界にとって最も重要な地域である首都圏が地震の多発地帯にも関わらず、地震活動度や地殻変動のデータが不足であり、地震予知のための基礎的観測の空白地帯であった事を解消する方法として計画され、設置された観測装置である。

深層地殻活動観測装置(地下3,000m級)の主な仕様

本観測装置の当初の設計条件は水圧350気圧以上、温度100°C程度の環境で10年以上連続使用出来る事であり、この条件を前提に設計製作した結果以下のような観測装置が完成し、ほぼ所期の目的を達成している。この観測井は石油井戸掘削の技術を利用して掘られ、その基本的構造

は鉛直軸に対して3度以内の傾斜角で掘削され、鋼管で保護された口径約150mmの精密観測井であり、その最底部をステンレスの鋼管で仕上げ、さらに観測井全体をモルタルで巻き上げて内部には清水を満たしてある。この観測井の底のステンレス鋼管部に外径140mm内径90mm長さ約10mのステンレス鋼で作られた耐圧容器に各種観測計器をいれ、その観測装置をステンレス鋼線を外装された海底ケーブルで吊り下げて設置し、地中深く地殻基盤で発生している地震や地殻の変動を観測する装置である。またこの装置は海底ケーブル(信号ケーブル)を巻き上げる事で地表に引き上げが出来る構造になっており、定期的に装置の保守管理を行っている。この点検間隔は3~4年間隔である。この深層地殻活動観測装置の主な仕様は以下の通りである。

1) 深層地殻活動観測装置のセンサー

微小地震観測用動電型速度地震計 1 Hz 3 成分
中、小地震観測用サーボ型加速度計 3 成分
地殻傾斜測定用サーボ型傾斜計 2 成分
精密温度計(地熱測定用)

2) 観測装置補機および設置工専用センサー

CCL(ケーシングカラーロケータ:ケーシングパイプ接続部の計測用)

方位計(磁気コンパス:観測センサーの基準方位の測定用)

着底検出器

水漏れ検出器

耐圧容器固定装置

信号ケーブル巻き上げ装置

3) 信号搬送装置

PCM多重搬送方式(開発当初はFM多重搬送方式)

センサー制御装置地中部(直送、搬送切換装置)

4) 耐圧容器およびケーブル

耐圧容器:SUS-316L外径140mm,内径90mm

ケーブル:SUS線 2重外装19芯テフロンシール海底電線

5) 孔底係留時の安全対策

ケーブルヘッドの破断ボルト

容器固定器脚の破断ピン

6) システムとしての冗長対策

速度地震計、傾斜計出力を搬送、無搬送切換可方式
二重伝送方式(同一信号を2chでテレメータ)

第7-53図に深層地殻活動観測装置(3,000m級)の構造図を示す。

深層地殻活動観測装置の設置点

この装置は日本橋を中心に半径約30km以内の地点(別表)に設置されており、平成7年3月には江東地区の夢の島に4本目の観測装置を設置し観測を始めている。完成したこれら4個所の施設は世界で最も深い地震観測所群を構成しており、最も深い埼玉県岩槻観測井は-3,510m、水圧351気圧、温度約86°Cと言う厳しい環境で毎日20

個以上の微小地震を観測している。

深層地殻活動観測施設

観測井	場所	深度	温度	観測開始年月
岩槻井	埼玉県岩槻市	-3,510m	85.9°C	昭和48年3月
下総井	千葉県沼南町	-2,300m	61.0°C	昭和53年4月
府中井	東京都府中市	-2,750m	77.6°C	昭和55年4月
江東井	東京都江東区	-3,000m	78.0°C	平成7年3月

この深層地殻活動観測装置の有用性は東京の直下で高感度地震観測や地殻変動観測を可能にするという画期的な観測システムを実現したが、その施設を建設するには観測点の選定を含めて大規模な事業であり、この施設を多数建設することは容易ではなく、そのためまだ首都圏で不足の観測点を埋めるため2,000m級の中層地震観測装置が開発され関東各地に多数設置する計画がスタートした。

この中層地震計の基本構造は深層地殻活動観測装置で実績のある機器を利用し、観測成分は微小から強震までの地震観測を主に観測する装置として簡素化し、地上の観測施設も簡略化して多数の観測点を確保している。

これにより世界有数の近代都市圏の地下に高感度地震

観測網を張り巡らせることになり、近年最も危険視されている東京直下型地震の前兆を観測するの必要な地震活動度の観測と、それらの微小地震の震源決定精度が格段に向上することが期待できるようになった。第7-54図に各深層地殻活動観測点の地質構造を示す。

各観測センサーの構造

(1) 微小地震用動電型地震計水平動成分 (第7-55図)

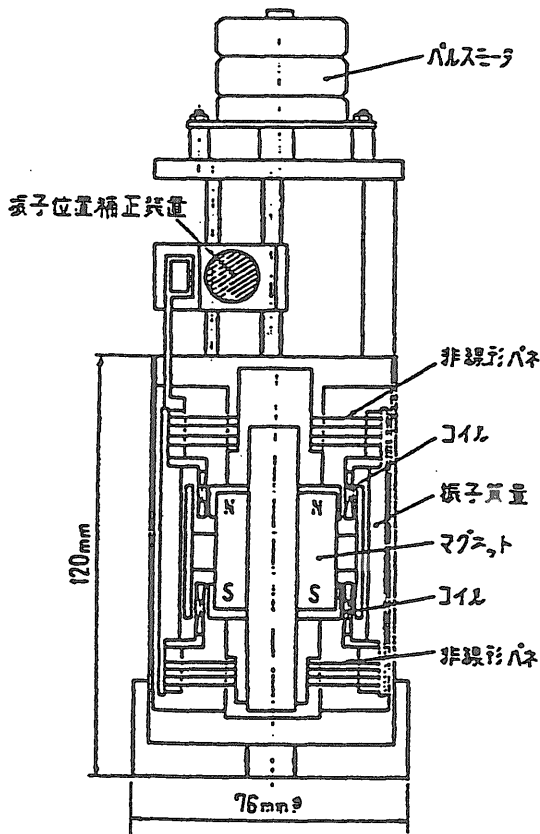
細長い構造に作るため小判状の検出コイルと扁平な磁気回路を組み合わせ、振子の形態は十字ばねを支軸とした特殊な倒立振子で構成されている。また全体をモータ駆動による傾斜補正装置で3度以内の傾斜であれば振子を鉛直に保持する事が可能になっている。

(2) 微小地震用動電型地震計上下動成分 (第7-56図)

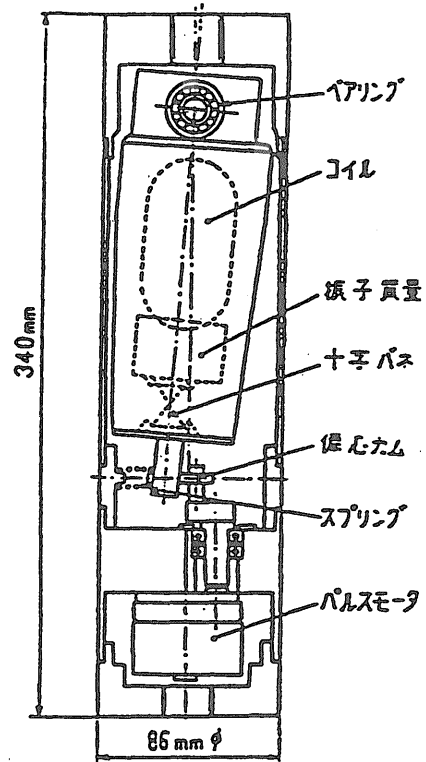
固有振動数1 Hzの上下動振子の静撓みを少なくするために振子の中立点付近だけのばね定数が1 Hz振子を構成する非線形ばねを使用している。しかしこの構造はばねに過大な内部応力を残すことによって実現できる構造であるため、銅ベースの合金ばね材料にとって80°C以上の温度ではであればバネにクリープ現象が発生する高温環境に属する温度である。そのためこの上下動地震計には振子の中立点を維持するために磁力を利用した非接触機構で振子釣り上げ機構を内蔵している。

(3) 加速度計 (第7-57図)

動電型微小地震計では振りきれてしまう地表で小地震以上に拡大される比較的大きな地震をも観測するために最大30ガルまで観測できるサーボ型加速度計である。当

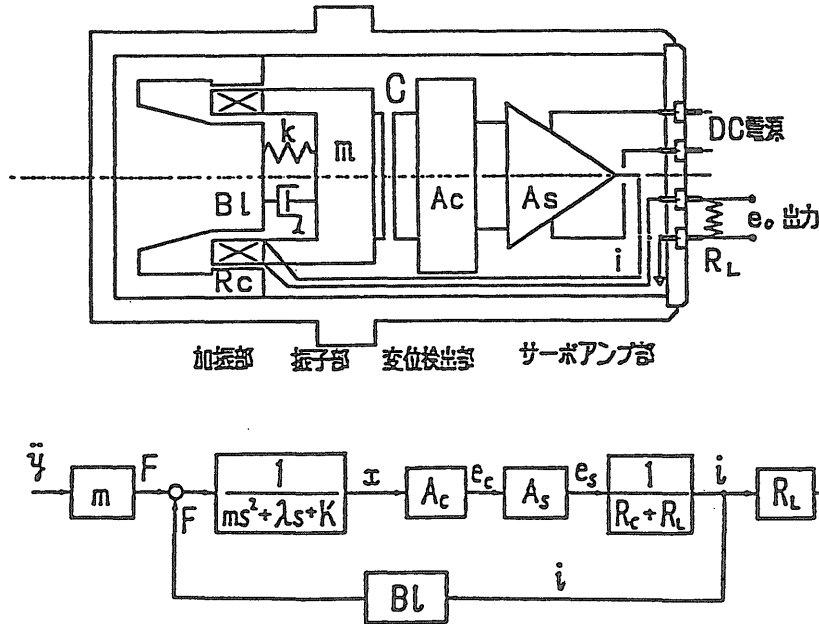


第7-55図 微小地震用動電型地震計水平動成分



第7-56図 微小地震用動電型地震計上下動成分

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)



第7-57図 サーボ型加速度計原理，構造図

然圧力は耐圧容器により保護されるため問題はないが、高温対策として各構成部品は設定温度（例えば岩槻用は86°C）でエージングを行い、電子部品はICを使用せず、個別に温度試験をして選別したトランジスタや抵抗類を使用してサーボ回路を製作してある。

(4) 傾斜計 (第7-58図)

力平衡型サーボ加速度計と全く同じ原理のサーボ型傾斜計である。分解能は1/100秒角以上の高分解能で100秒までのダイナミックレンジを持っている。検出成分はX、Y 2成分あり、各3度の傾斜補正が出来る構造になっている。各構成部品は同じく高温環境でエージングを行い設置している。

(5) 体積歪計 (第7-59図)

この計測器は岩盤に直接膨張セメントで固着し、地殻の歪みを直接観測する測定器であり、一度設置したら引き上げは不可能である。したがって引き上げ点検が可能な深層地殻活動観測装置には含まれていない。この体積歪み計の動作原理は地殻歪みの感知筒である薄肉ステンレスパイプが岩盤の歪みに追従して変形した時、感知筒内に満たされたシリコンオイルがパイプ内の通路を通過して押し出され、その量を電流量として計測出来る構造になっている。この方式の体積歪み計使用限界は現状のままでは約500mまでの実績である。これはパイプの肉厚やシリコンオイルを使用していることによる制約であり、圧力、地熱がネックになっている。また設置工法についても、現在の方法は1970年代に開発したベイラー方式であり、孔底にモルタルを注入し、そのモルタルが流動性を持っている時間内に計測器を設置するため、設置の時間制限があり、これ以上の深度に設置する時は新たな設置工法の開発も必要となる。しかしこれらの制約を越えて観

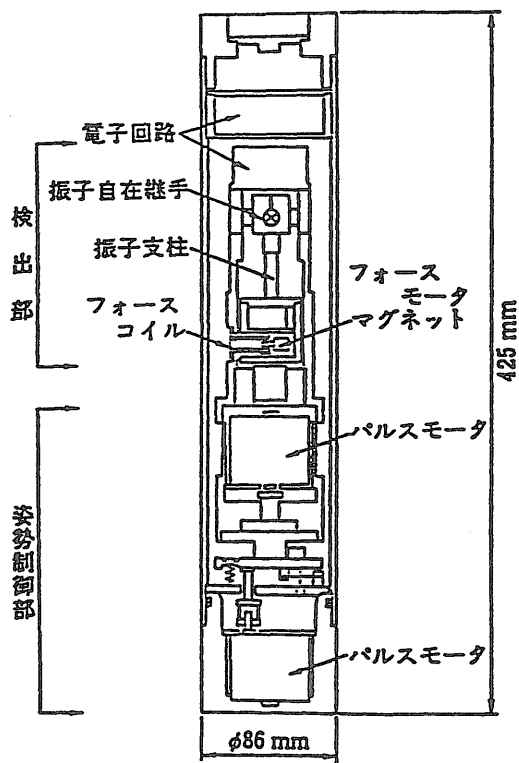
測できるレーザー光とファブリヘロー共振器を利用した新しいタイプの歪み計も開発されつつあり実用化も近くなっている。

現状および今後の問題点

深層および超深度における長期連続観測装置の問題点は現在も将来も地熱による高温対策に尽きると考えられる。

1970年代にスタートした時の問題点はボアホールの掘削精度、寸法、孔底の傾斜等の物理的制約から地震計を始めとする全ての観測センサの形状の問題、信号ケーブルの強度や、吊り上げて使う使用方法の問題、信号伝送手段の問題等が山積していた。さらに多くの問題点は基本性能に関する事よりも、むしろ実際に観測装置を設計製作する上で発生した些細な解決すべき問題点の積み重ねであった。例えば井戸内に異物を落としてしまった時の対策、ケーブルの回転の対策などである。これらの機構上の問題はほとんど応力計算と適正な材料の選択で最適設計が可能であり、解決することは難しくない。しかし熱に起因する問題は今後もさらに大きな問題となる。それは半導体を使用できないかもしくは非常に制約を受けるためサーボ回路のようなアクティブな回路が使えず、コイルとマグネットの組み合わせのような非常に単純な構造のセンサを使わざるを得なくなる。また絶縁材料についても高分子系からセラミック系への転換を迫られるものと思われる。さらに構造材料についても恒弾性ばね材料、耐熱ステンレス材、チタン材などの使用が多くなり、従来多く使われていたベリリウム銅などの銅合金が使えなくなる事が予測される。

以上のような現時点での深層地殻活動観測装置の運用

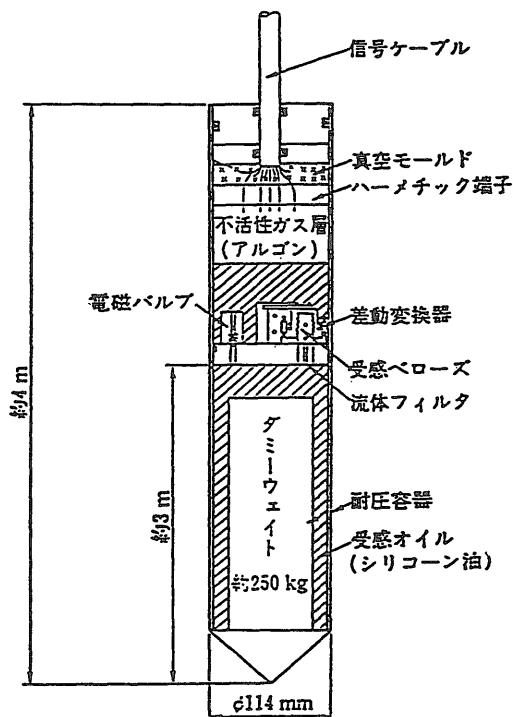


2成分傾斜計構造図

第7-58図 2成分傾斜計構造図

から見て超深度長期連続観測で予測される問題点を列挙すると以下ようになる。

- 1) 半導体の使用制限
現状の実績は86°C連続3年
- 2) 信号ケーブル絶縁材料
現状はテフロンで120°C, セラミックコーティングの検討
- 3) 高分子材シール材
現状はフッ素ゴム, シリコンゴム製Oーリングで200°C
超高真空ベーキング用金属 (Al, SUS) 製Oーリングの使用を検討
ケーブルと観測容器間のシール方法 (現状はテフロンモールド)
- 4) マグネット類のキュリー点の問題
希土類マグネットからアルニコ系への再転換
- 5) ケーブル自重対策
ステンレス外装線からチタン外装線への転換
- 6) 電気信号から光通信への転換
電子回路を埋設出来ない事により, センサの検出原理を含め電磁式より光センサーへの転換
- 7) モルタル硬化時間制限による設置工法の転換
- 8) 基準方位の設定方法
磁気コンパスからジャイロ (時間制限耐熱シールド付き)
- 9) 構造材料の使用制限



第7-59図 体積歪計構造図

各種金属材料の熱処理温度近傍になることによる特性の変化とクリープ現象の発生。セラミック系材料の利用を検討。

10) その他

素材開発を含め, 以上の諸問題の解決が期待できる時期を考慮し, 次世代観測装置の完成を推定する。

3年後の予測性能
温度: Max 200°C

計測成分: 短周期地震計 (動震型地震計)
加速度計 (速度帰還形サーボ方式0.02~100Hz)
レーザ歪み計 (1,500m級)

5年後の予測性能
温度: Max 260°C

計測成分: 短周期地震計 (動電型速度地震計)
加速度計 (速度帰還形サーボ方式0.02~100Hz)
レーザ歪み計 (5,000m級)

10年後の予測性能
温度: Max 400°C

計測成分: 短周期地震計 (動電型速度地震計)
加速度計 (速度帰還形サーボ方式0.02~100Hz)
傾斜計 (フィードバック方式)
レーザ歪み計 (10km級)

7.5 科学ボーリングへの課題・結論

掘削技術課題

今まで述べてきたように, 超深度科学掘削の難易度は掘削する地下の条件に深く左右される。旧ロシアコラ半島で12.26km掘削され, それより新技術を用いたKTBP

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

プロジェクトで9.1kmで掘留になったように、最新の掘削技術を用いても、地層条件が違えば9.1kmでも掘削出来るとは限らない。日本での超深度科学掘削はKTBや旧ロシアコラ半島の科学井より厳しい掘削条件が予測される。主な掘削障害を生じる項目は高温度、異方性地圧による坑井不安定、掘削効率の3点である。

JUDGE計画を実施するために今後検討が必要と思われる掘削関連の技術課題について、項目ごとに検討すべき事項と現状を第7-30表にまとめた。掘削技術課題のうちで掘削効率は、膨大な経費を使い最新技術を導入すれば短期間に飛躍的に改善可能であるが、ツールの温度限界の改善、坑内安定技術の改善速度は現存する技術自体にチャレンジするため改善速度は遅い。したがって高温度、坑井不安定問題をいかに克服するかがJUDGE計画を成功に導く手段と考えられる。高温度に関する技術は目

標値と現状との間に100~150°Cのずれがある。過去10年に50°C程度しか改善が見られない技術が多い事から、これから先もそのペース以上には望めず既存の高温耐久材料を使用した新しい機器の開発を促進する必要がある。またKTBの科学坑井が9.1kmで末期的な坑井不安定状態が見られたが、日本の地下の地圧状態はそれ以上に過酷でありKTB同様の技術を使用した場合その深度さえも到達不可能と思える。このように状況判断では日本の超深度科学井掘削は厳しいものとなる。

一方技術の進歩、地層条件に不確定事項もいくつか存在する。KTBの坑井では火山岩でも泥水の造壁作用が坑壁安定に深く影響を及ぼすことがあまり考慮されていず、またブレイクアウトを起こした坑井修復技術が導入されていない。また坑井安定は地圧の他地層強度にも深く影響されるので実際に掘削してみないと判断できない

第7-30表 JUDGE計画を実施するための掘削技術課題

要因	検討項目	現状	10年前	10km坑井 目標値
1. 高温度	1. 高温度機器・材料の開発 掘削中の測定機器 スタンダード ヒートシールドタイプ 短期坑内測定装置 長期坑内測定装置 シール材 (ピットオーリング, パッカー, 計器シール材) 火薬 泥水添加材 セメント添加材 2. 既存の高温度耐久材料を使用した機器の開発 3. 坑井冷却法の開発 泥水冷却 局所冷却	150-175°C	125°C	
		260°C	260°C	282°C
		175°C		要改良
		86°C		400°C
		150-230°C		282°C
		220°C		要改良
		250-370°C	180-260°C	360°C
		260°C	180°C	400°C
				282°C
				要改良
2. 坑井の不安定性	1. 路頭調査による予測地層強度推定 2. 泥水添加材の調整 3. ケーシング段数増加法 スリム仕上げ 坑井拡張, 崩壊補修	260-300°C		必要
		KTBで実績		要改良
		SG-3で実績, Shell Oil Co.開発		要改良
3. 掘削効率	1. 自動掘管交換装置 2. 垂直掘削コントロール 3. 軽重量掘削管 4. 効率よいワイアラインコア採集装置	KTBで実施		要改良
		KTBで実施, 日本では6kmが限界		
		SG-3で実施		要改良
		KTBで実施		要改良

不確定事項である。従来の掘削技術開発は、市場の広い石油開発など資源開発目的のために実施され、科学掘削のための技術開発はほとんど実施されていなかった。科学掘削は資源開発目的の掘削と共有できる掘削技術も多いが、特殊な技術も必要である。場合によってはニューコンセプトの掘削工法も必要になる。資金の裏付けがあれば、関連企業の技術開発意欲が高まり、科学掘削に必要な技術開発が短期間に発展することはKTBの例からも明らかである。そのためには、JUDGE計画に対する社会的な理解を得、資金と優秀な人材、そしてJUDGE計画専従の専門組織の構築は重要課題となる。

日本の石油技術・KTB実績から予測される坑井計画

JUDGE計画の科学井は10kmを目標にしているが2方向の水平地圧が非常に異なる地震地帯に掘削される事、また推定されている深度10kmでの地層温度400°Cであることからその目標を達成する事は技術的に未知な部分が多い。KTBが達成した深度9.1kmの地層温度は260°Cで掘削泥水の耐熱温度は当然260°C以下で良いことになり、また掘削ツールの耐熱も8-1/2インチ坑井で175°C程度まで可能である。KTBメインホール掘削当時の泥水と掘削ツールの耐熱は、それぞれ250°C、150°C程度であったと思われる。このため、KTBでは耐熱性の向上に飛躍的な結果を期待する必要がなかった。むしろKTB計画では、その当時のツール等の耐熱限界を考慮して掘削深度を変更した経緯がある。したがってKTBの場合温度よりは坑井安定問題で9.1kmの深度で掘留になった。このように坑井深度は技術限界により左右されるのでJUDGE計画の目標深度も現状の超深度掘削技術を考慮して計画する必要がある。

本特集号(7)4.1では温度シミュレーション結果から、現時点での掘削ツールと泥水の限界深度を検討した。この結果、最終坑径8-1/2インチ、ポンプ流量2,600 l/minで掘削した時、掘削ツールは深度7,700m、重泥水の場合は深度6,000m程度で限界になることが推定された。また、従来通りの掘削方法を使用した場合、10kmに到達するためには掘削ツールと重泥水の耐熱を、それぞれ282°C、360°C以上に向上させる必要がある(第7-30表)。これは、現状の耐熱限界から、掘削ツールと重泥水の両方とも約110°C向上させる事が必要となる。また温度の限界に加え坑井安定問題も過酷な問題になるとから日本での超深度科学井はまず第一段階として7 km~8 km調査井を目標として実施することが、より現実的と思われる。深度7 kmでは地層温度が280°C以上と推定されKTBの地層温度を越える。また日本の6 km井では坑井安定問題が現れはじめている。7~8 kmを目標として地層温度、地圧問題が技術的に克服可能なら目標を超えて掘削すればよい。7-8 kmは日本で6 km坑井が3本掘削されたという過去の実績から十分な技術的準備をすれば不可能な深さではない。また掘削技術だけでなく、これから進歩していく検層技術、長期観測技術を考慮してもこの深度は妥当である。このための予算は新技術開発の内

容にもよるが300億円程度であろう。

本章は地質調査所(1996)の技術フィージビリティ調査結果を多く引用して書かれている。

文 献

- 地質調査所(1996) 深部掘削技術・観測技術およびボーリング資試料データベース概念。設計。地質調査所研究資料集, 263, 218p.
- Chur, C. and Oppelt, J. (1993) Vertical drilling technology: A milestone in Directional drilling, SPE/IADC25759, 789-801.
- Clauser, C. and Huenges, E. (1995) Thermal conductivity of rocks and minerals. In Ahrens, T.J. ed., Rock Physics and Phase Relations, A Handbook of Physical Constants, AGU Reference Shelf 3, 105-126.
- Emmermann, R. (1996) The German continental deep drilling program (KTB) overview and major results, Proceedings 8th International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling, 3.
- Khakhaev, B.N., Lipilin, A.V., Mazur, V.B., Militenko, N.V. and Pevzner, L.A. (1996) Superdeep drilling in Russia: Progress and outlook, Proceedings 8th International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling, 4-11.
- Kozlovsky, Y.A. (1984) The superdeep well of Kola Peninsula. Springer-Verlag, Berlin, 558p.
- Miyairi, M. and Itoh, T. (1985) Super high temperature electronics well logging system, Proceedings of SPWLA Twenty-Sixth Annual Logging Symposium, 1-16.
- Mondy, L.A. and Duda, L.E. (1984) Advanced wellbore thermal simulator GEOTEMP2 user manual, Sandia Report SAND84-0857, 147.
- Rowley, J.C., Saito, S., Long, R. and Kato, M. (1996) Ultra-deep core drilling strategy and system concept, Proceedings 8th International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling, 316-321.
- Saito, S., Sakuma, S. and Uchida, T. (1996a) The experience of drilling into 500°C formation in NEDO WD-1A well, Kakkonda, Japan, Proceedings 8th International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling, 52-57.
- Saito, S., Sakuma, S. and Uchida, T. (1996b) Trajectory correction and borehole dynamic temperature survey experiments at formation temperature above 350°C in NEDO WD-1A well, Kakkonda, Japan, Proceedings 8th

(7) 本掘削に向けての技術開発課題と開発の可能性 (森田 ほか)

International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling, 322-327.

坂田正治・Gubin, M.A. (1994) ボアホール式レーザひずみ計の開発(その1). 日本地震学会秋季大会予稿集No 2, 170.

Sperber, A. (1994) German KTB project technologies overcome deep drilling challenges, *Petroleum Engineer*, 66, 26-30.

田中彰一 (1987) 学術ボーリングについて. 石油技術協会誌, 52, 466-477.

田中彰一 (1994) 深層掘削技術の現状と課題. 地質ニュース, 488, 48-52.

塚原弘昭・河合崇欣・斎藤清次 (1996) 地球環境変動とバイカル湖. 古今書院. (印刷中)

浦辺徹郎 (1989) 西ドイツの超深部ボーリング計画KTB (世界一深い「夢」を目指して). 地質ニュース, no. 419, 16-24.

Walton, M. (1987) Core drilling technology for ultradeep scientific holes, *In* Behr, H. J. and Raleigh, D. B., ed., *Exploration of the Deep Continental crust*, Springer - Verlag, Berlin, 160-169.

Wohlgemuth, L., Tran Viet, T. and Engeser, B. (1996) Drilling experiences at the ultradeep well KTB-HB, *Proceedings 8th International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling*, 39-45.

Yoshida, C. (1996) Deep oil and gas well drilling in Japan, *Proceedings 8th International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling*, 46-51. Tsukuba, Japan.

(受付: 1996年12月1日; 受理: 1997年2月18日)