

ドイツ KTB の掘削技術と日本の超深度掘削への期待

斎藤清次¹⁾

はじめに

人類がいつから井戸を掘るように成ったか定かではないが、おそらく水を獲得するために大昔から人類は地球に穴を開けていたと想像できる。現在では、その目的は多様化し水・石油・地熱・鉱物等の地下資源開発、土木工事・地下空間利用、および地球科学研究調査のために坑井が掘削されている。我々の住んでいる地球の中がどのように成っているかは、専門の地球科学者でなくとも非常に興味あるところで、KTB プロジェクトの技術責任者であった故 Rischmüller 博士は“坑井は地球内部を探る内視鏡”と述べている。

本小文では、筆者が4回訪問した(斎藤, 1994)、ドイツ超深度科学ボーリングで掘削された目的深度10 km のメインホール掘削技術を中心に、超深度掘削について述べる。

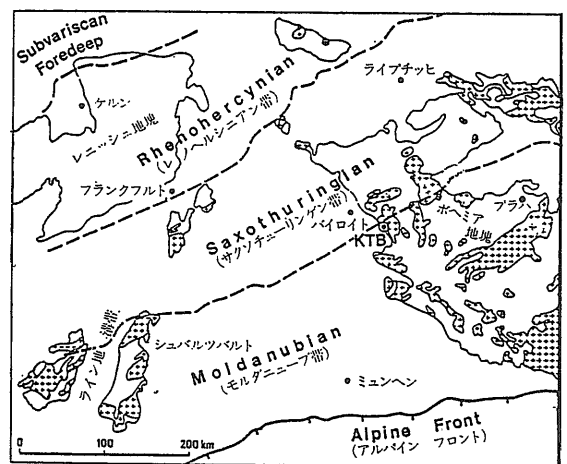
1. 超深度掘削の世界記録

深度何メートル以上の坑井を超深度井と呼ぶかの一般的な定義は個人によって異なり、統一見解はないが、Rischmüller 博士は5,000 m 以上を深部井、8,000 m 以上を超深度井としている(Rischmüller, 1994)。坑井掘削の困難性は単に深度だけでは表現されないが、世界で1番深い井戸はロシアのコラ半島に存在する地球科学調査井で、深度はなんと12 km 以上、2番は米国のガス探査井の9,583 m、KTB のメインホール(第1図)は世界3番に位置している。このうち、コラ半島の調査井は掘削記録や掘削技術に関する資料が発表されていないため、ごく限られた情報しか得られず、残念な事には明らかでない。一方、1990年10月に開坑し1994年10月10日に深度9,101 m で掘止めされた KTB メイン

ホールは、原則的には全ての資料が公開されているため、超深度井掘削技術の検討に極めて貴重なデータを提供している。

2. 超深度井掘削はなぜ難しい? KTB ではいかに対処したか?

深度100 m の水井戸を掘削するのも、深度10 km の坑井を掘削するのも基本的な掘削原理は同一である。すなわち、先端にビットを取り付け、パイプを接続して地下に降下し、ビットに回転と衝撃を与え岩石を砕く。砕いた岩石屑(カッティングと呼ばれる)を除去するため、地上から泥水などの流体をパイプ内部からポンプし、カッティングはパイプと坑壁の間隙部を上昇して地上に排出される。ある一定深度に達した時点で坑壁の崩壊を防止するため、ケーシング(鉄パイプ)を挿入しセメントで固定され、更に深部が掘削される。これらの作業の繰り返しで目的深度まで坑井が掘削される。



第1図 ドイツの基盤岩類分布と KTB ボーリングの位置。

1) 日本重化学工業株式会社 地熱事業部 企画技術部：
〒103 東京都中央区日本橋小網町8番4号

キーワード：超深度掘削, KTB, JUDGE 計画

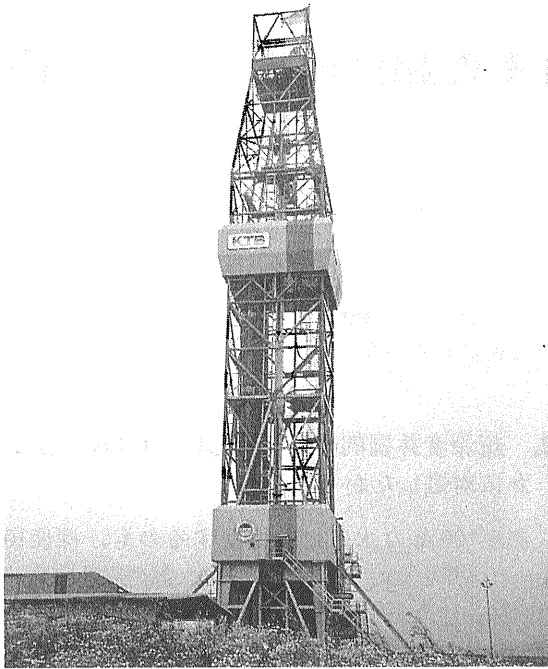


写真1 KTBメインホール掘削用リグ。世界最大の陸上リグ。40 mのドリルパイプスタンドを使用するため地上から83 mの高さがある。最大吊り下げ荷重800 トン。リグ中央部にドリルパイプの自動操作装置(口絵 p. 2)が見える。

では、なぜ超深度科学調査井の掘削は難しいのであろうか？その要因として、①掘削装置、坑井内で使用する掘削用ツールの改良と開発の必要性、②地層温度上昇への対応、③坑壁不安定性への対応、④科学者の要求への対応、⑤新しい掘削組織の必要性、などが指摘できる。以下に、これらの要因について解説する。

(1) 掘削装置、掘削用ツール改良・開発の必要性

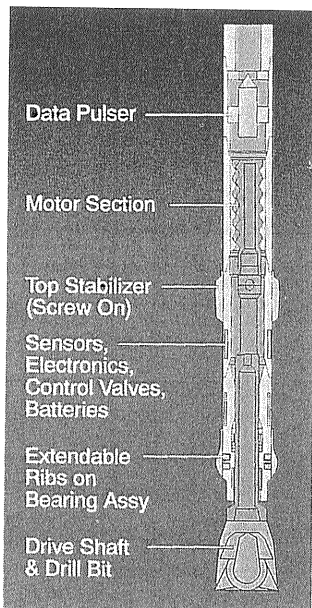
掘削用のビットは一般的に数十時間使用すると寿命になる。このため、超深度掘削では数千メートル分のパイプを揚管し、新しいビットを取り付けて坑底まで降管する作業が繰り返す必要になる。また、ケーシングのセット深度が深くなるため、掘削装置は大きな吊り下げ荷重を支えるよう製作されなければならない。KTBの調査では、10 kmの坑井を1本掘削するのに、600回の揚降管作業が必要とされ、その仕事量は深度6,000 mのガス井30坑分に相当する事が判明した。このため、揚降管作業を効率的に実施する目的で、高さ約83 m、最大吊り下げ

荷重約800 トンの世界最大の陸上掘削機(リグ)を、メインホール掘削用に設計製作している(写真1)。このリグでは、通常使用されている27 mドリルパイプ(DP)スタンドの代わりに40 m DP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(口絵 p. 2)。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。なぜならば、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)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2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力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6,700 mまでの掘削では、坑井傾斜はほぼ1度以下に保たれ、この時点での坑井偏距は僅か5 mであった(第3図；Chur and Oppelt, 1993)。この結果、深度7,000 mでの余分な揚げ荷重は15 トン程度であった。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てた。

(2) 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/100 mの割合で温度が上昇する。このため、地層温度は深度5,000 mでは150°C、深度10,000 mでは300°Cに達する。一方、坑内に降下される掘削用ツールの一部は、ゴム製品(ダウン



第2図 垂直掘進装置(VDS タイプ4). VDSはビット直上に取り付けられ、センサーが常に坑井の傾斜・方位を監視している。坑井が傾斜している時は、4つのリブのうち、坑井傾斜下面に位置するリブの圧力が、電磁バルブで自動的に閉じられ、リブの圧力が開放される。このため、反対側のリブに押しされ、坑井傾斜を減少する向きにビットが押しつけられる。システムの一部にはモーターが組み込まれ、泥水をポンプするとモーターが回転し、シャフトで連結されたビットが回転する。坑底部で行われている情報は泥水圧力信号に変換されパルサーで地上に伝達される。

ホールモーターのステイター、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、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、これらのツールズ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4,000 mのパイロット井掘削時点で地下増温率が約2.9°C/100 mであることが判明したため、当初掘削目標深度であった12,000 mを推定地層温度300°Cの深度10,000 m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7,000 m付近で使用を断念し、ダウンホールモーターは6 1/2 in.(インチ)坑の深度8,800 m付近で断念している。このため、深度7,000 m以深では坑井傾斜が増加し、深度

8,600 m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克服しなければならない大きな問題となる。

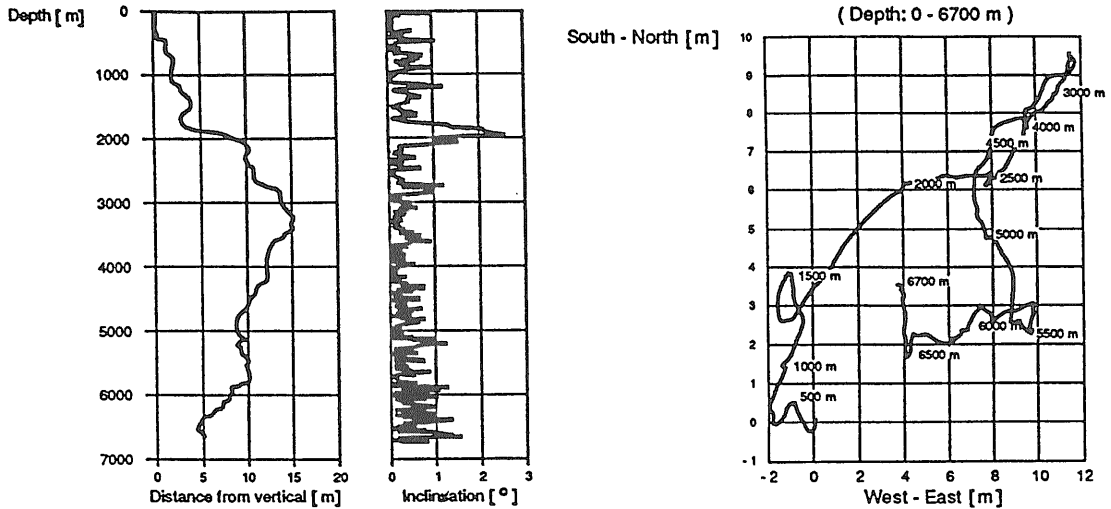
(3) 坑壁の不安定性

地下の地層は、地層の荷重や地下の応力を受けている。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様に思われるが、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。

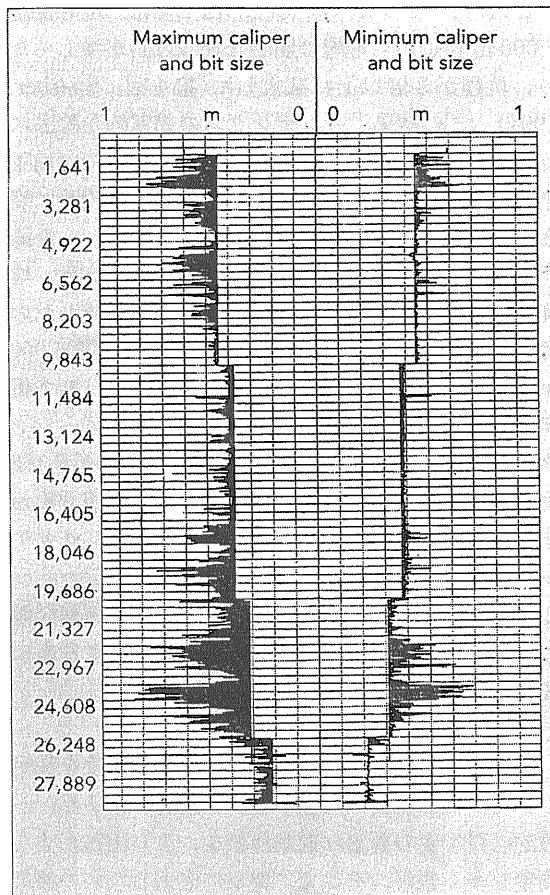
KTBのメインホールでは、12 1/4 in. 坑の深度7,000 m付近から地層の崩壊(Breakout)が激しくなり、坑径が3倍以上に拡大した(第4図, Sperber, 1994)。この結果、カッタングスの効率的な除去に支障をきたした。また、深度8,700 m付近では地下応力が大きく、かつ異方性のため坑井が楕円形に変形し(第5図, Sperber, 1994)、新しいビットを降下しても坑底から150 m上部でつかえるため、坑径浚いを余儀なくされ、2ヵ月間で坑底に達したのは僅か1回であった。これらの理由で、深度6,000 m到達時には深度10,000 mまで12 1/4 in. 坑で掘削の予定であったが、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 in. 坑になった。しかし、KTBでは深度6,000 m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。

(4) 科学者の要求

科学ボーリングでは、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の掘削ではカッタング、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、当初は泥水の添化剤を無機



第3図 メインホールの坑跡断面，坑井傾斜および坑跡平面図(深度6,700 m 時点)(Chur and Oppelt, 1993)

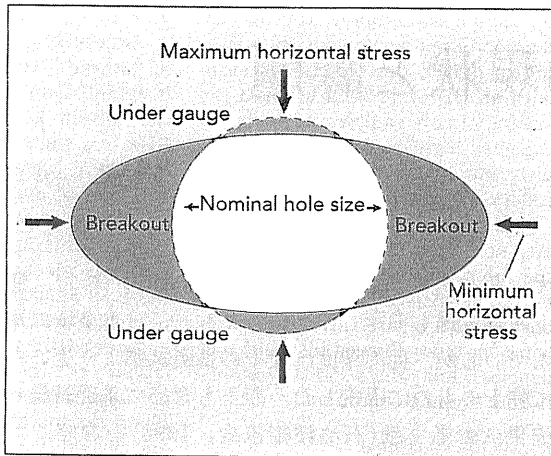


第4図 坑壁の崩壊による坑径拡大状況図(キャリパー測定；左：最大坑径，右：最小坑径，深度はfeet)

質に限定し，数量も2ヶ以下に制限された。また，地質をより詳細に観察する目的で，9 1/4 in. 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スライサーが開発され成果をあげている。深度6,000 m ではケーシング挿入前に，約2ヵ月間の検層と，地下応力測定のためのフラクチャーリング実験が実施されている。

(5) 掘削組織をいかに編成するか

超深度ボーリングでは，掘削作業に入る前に，少なくとも調査・掘削計画作成，目的に対応可能な掘削機器の製作が必要で，掘削開始以降は掘削現場での実施組織と掘削支援エンジニアグループが必要となる。また，プロジェクトの性格上，掘削前に充分計画検討をしても，一旦未知の世界にビットを降ろすと，様々な問題に遭遇することが予想される。このため，現場作業を推進しつつ，問題を解決する専門家集団が必要になる。KTB では，石油関係会社等から掘削技術者をスカウトし，新規組織を形成した。そして，プロジェクト開始当初から，科学者と緊密に打ち合わせを行なった。また，メインホール掘削のために，3つの石油会社が出資して掘削専門会社(UTB)を設立し，リグの設計から掘削作業まで実施している。メインホールを成功に導いたVDS，高温度用ダウンホールモーター，新コアリングシステム，泥水システム等は掘削専門メーカーを丸抱えにし，民間会社のノウハウと活力を利用する事により達成している。



第5図 坑井の変形概念図(坑井水平断面)(Sperber, 1994)

3. 日本の超深度掘削への期待

我が国では、“JUDGE”計画が地質調査所、防災科学技術研究所、大学の関係者から提案されて久しい。この計画では、房総半島または伊豆半島から約10 km 掘削すると、太平洋側から日本列島直下に潜り込んでいる地殻に到達でき、地層温度は400°C以上に達すると推定されている。残念な事に今までは、資金的な裏付け推進母体がないため、掘削関係者が真剣に関与するには至っていない。一方、世界の科学ボーリングの趨勢はごく最近までは、ロシアのコラ半島、ドイツ KTB プロジェクトの様に単独の国家で実施されてきたが、KTB プロジェク

トが終了間近になって、KTB の貴重な経験・人材・機械を最大限に活用するべく、国際協力して、超深度掘削を含む科学ボーリングに取り組む国際組織が、数年以内にできる見通しである。“JUDGE”計画は確かに困難な技術課題を含んでいるが、科学者の夢を現実に近づけるためには、まず推進組織を整え、何を成すべきか真剣に取り組む必要がある。日本独自で全てを実施するという考えは、もはや時代の流れにそぐわなくなっている。いかに国際組織や既存の海外技術を取り入れ、その上にどのような新技術を上乘せするかを考えれば、“JUDGE”計画も気の遠くなるような話でもない。機能的に行動できる専門組織を、いかに構築するかが日本の超深度掘削の最初の一步であろう。

参考文献

- Chur, C. and J. Oppelt (1993): Vertical drilling technology: A milestone in Directional drilling. SPE/IADC25759, 789-801.
 Rischmüller, H (1994): Technological Consideration. Scientific Rationale of an ICDP, 177-182.
 斎藤清次(1994): ドイツ KTB プロジェクトにおける最新掘削技術. 地熱, Vol. 31, 63-75.
 Sperber, A. (1994): German KTB project technologies overcome deep drilling challenges. Petroleum Engineer, Vol. 66, Num. 7, 26-30.

SAITO Seiji (1995): An introduction of KTB drilling technologies and comments for JUDGE project.

〈受付：1994年11月18日〉