

西ドイツの超深部ボーリング計画K T B

世界一深い「夢」を目指して

浦 辺 徹 郎 (鉱物資源部)
Tetsuro URABE

1. はじめに

西ドイツ(ドイツ連邦共和国)は10年余の歳月と400億円の巨費を投じて 中部ヨーロッパの基盤岩に深さ 14 kmの世界最深のボーリングを行う計画に着手している。

大陸深部掘削計画 (Kontinentales Tiefbohrprogramm; 略称KTB) と呼ばれる国家的科学研究プロジェクトがそれである。

明日の経済効果を目指した技術開発プロジェクトが白日押しの我が国に対し 西ドイツがこのような科学的な夢を語ろうとしたのはなぜか。 このたび科学技術庁が派遣した専門家による調査団*に参加して 掘削現場を訪問する機会を得たので その報告を兼ねてKTBの実情を紹介したい(写真1)。

2. なぜボーリングなのか

私達が住んでいる宇宙船「地球号」には厚さ5~70kmの地殻 2900kmのマントル それに半径3500kmの核がある。地殻は地球全体の質量のわずか0.4%を占めるにすぎないが「ドラエモンの四次元ポケット」のように 人類の必要とする資源のほとんどを生み出してくれる宝の山でもある。しかし我々の地殻に対する知識は深さとともに急激に減少し 下部地殻(以前シマと呼ばれていた)についての情報はきわめて断片的になってしまう。

浅発地震はどうして起こるのか 火山の下はどうなっているのか 巨大な花こう岩体には「根」があるのか 変成作用はどこで起こるのか 鉱床をもたらした熱水はどこから上がってきたのか。この様な基本的な疑問に対し 地球科学者達は満足に答えるすべを持っていない。皮肉なことに その様な様々な現象が起こっている下部地殻より 更に下に有るマントルの方がより研究が進んでいるときえ言われている。 下部地殻に直接帰因する

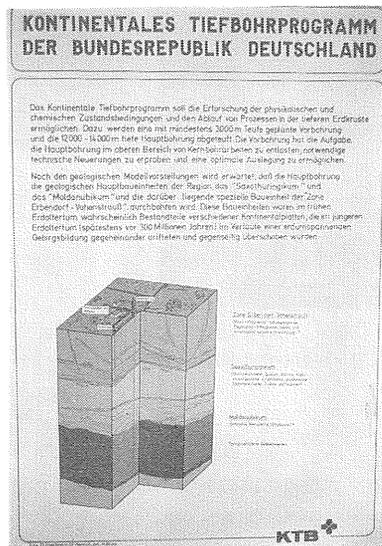


写真1 KTB計画のポスター。

現象のあまりの多様さが マントルについては普通に受け入れられている一般化単純化を防げているからである。

この多様な下部地殻の実態を明らかにするためには 直接地下深部に観察窓を開け その岩石や流体を採取して調べる方法が最も直接的である。超深部ボーリングはその究極の手段として 世界で同時多発的に計画が進んでいる。中でも西独の計画は周到な事前調査と掘削技術の開発体制とを組み合わせ 世界一の穴に挑戦している点で群を抜いている。その経験を学び 技術の進歩を調べ 我が国が将来検討している超深部ボーリング計画との間で何らかの科学技術協力協定があり得ないか話し合ってください というのが今回の調査団の目的であった。

3. ヴィンディッシュェエッセンバッハ村へ

Windischeschenbach. KTBの現場のある村の名である。どこでどう切って発音するのか分からないまま こう書いた紙片を前日飛行機で降り立ったフランクフルトの中央駅の切符案内へ差し出したところ 係の人が略

脚注* 東京大学工学部 田中彰一教授・国立防災科学技術センター 塚原弘昭博士・科学技術庁海洋開発課 近藤徹和専門職・在独日本大使館 小田公彦一等書記官(現地参加)・および筆者。 期間は昭和63年5月28日~6月5日



写真2 ユーロシティ列車ヨハンシュトラウス号。これでフランクフルトからニュルンベルグまで行きあと3回ローカル線に乗り継いだ。

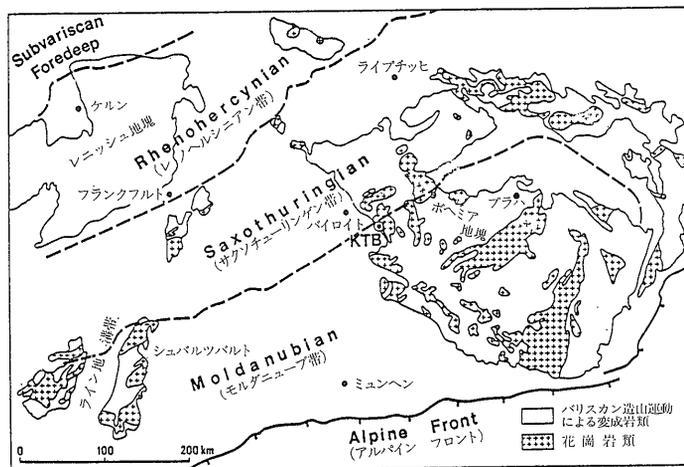


写真3 KTBボーリングサイトから見おろしたヴィンディッシュエッセンバッハ村の遠景。山なみの向こうはチェコスロバキアである。

線図の索引とにらめっこを始めた。しばらくしてそこへは列車を4回乗り継ぐ必要があり4時間余かかると言う(写真2)。目指すボーリングは相当な田舎で行なわれているらしい。バイエルン州オーバープファルツ郡にあるこの村(写真3)は、チェコ国境から20 kmしか離れておらず、横向けに超深部ボーリングを打つと隣国に突入しそうなところにある(第1図)。地質学的には、中部ヨーロッパの基盤岩をなすボヘミア地塊の西端部に位置し、古生代末に地塊同士の衝突により片麻岩よりなるモルダニューブ帯が、やや変成度の低い堆積岩よりなるサクソチューリングン帯の上に斜めに衝上している所に当たる。ボーリングはこの衝上帯を突っ切る

ように計画されており、上から横倒しのしゅう曲の先がちぎれて残ったナップ・モルダニューブ帯の下部地殻もみ込まれてきたマントルの破片とサクソチューリングン帯の上部地殻を順に串ざしにする予定である(第2図)。つまりボーリングの最深部が衝上運動以前の位置ではもっとも地表に近かったことになる。ここでは上部・下部地殻の境界面であるコンラッド面は見られず、両地塊の衝上後は上部・下部地殻を再び作る活動(例えば変成作用)が起こらなかったことを推定させる。

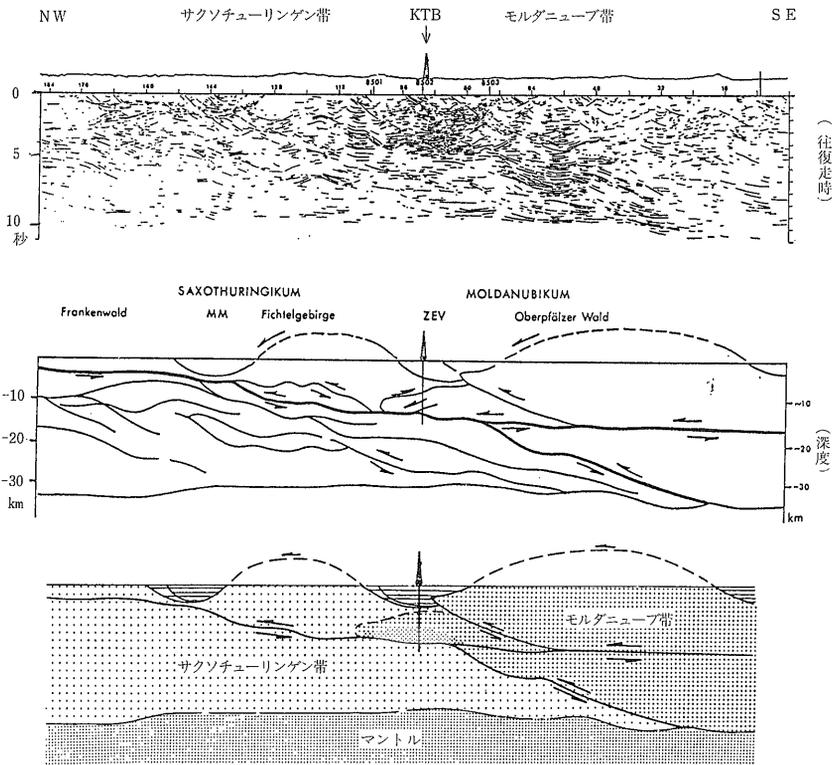
ここに見られる岩石は地質学の教科書に必ず登場するパリスカン造山運動(古生代; 2.6億年前ごろ)の“化石”なのである。



第1図 西ドイツの基盤岩類の概略分布とKTBボーリングの位置。ライン地溝帯の方は地温勾配が高いので取り上げられず、ボヘミア地塊西縁に位置するオーバープファルツに決定された。

ローカル線の車窓には緑におおわれたなだらかな丘や畑が5月の風の中でゆったりと波打つように展開している。所々に見られる数十戸の集落。その中心にそびえる教会の塔。ドイツの列車の旅は時刻の正確さと心安らぐ農村風景ゆえに非常に快適であった。やがて列車は定刻にヴィンディッシュエッセンバッハ駅に到着した(写真4・5)。その日の宿であるホテルイグル(ハリネズミのこ)は駅から車で15分ほどの街道ぞいの林の中に立っていた。

羽根布団に白いスーツが清潔で気持ちがいい。夕食のメニューには通常のドイツ料理のほか、鹿、イノシシ、ウサギの肉、川魚などの地方料理が並んでいる。今回の会合のためボンから車を飛ばして来られた小田彦一等書記官やKTB関係者もや



第2図 反射法地震探査および地質調査などから推定されたこの地域の地殻断面。 上が反射法の記録 下2葉はそれに基づく解釈。

って来て早速ビアパーティとなった。

4. 顔をそろえたキーパーソンたち

ビアパーティの翌朝 掘削現場実施本部で我々を迎えてくれた人々に改めて会って 私の二日酔いも吹き飛ん

でしまった。 KTB 所長 H. リッシュミュラー教授 KTB 研究プロジェクト選定評価委員会委員長 R. エーマン教授 KTB 運営本部地球科学部長 H. J. ベール教授 同坑井地質部長 P. ケーラー博士 それに 研究技術省 KTB 関連予算担当課長 D. レンツ博士 と KTB を総括運営しているキーパーソン達がすべて顔をそろ

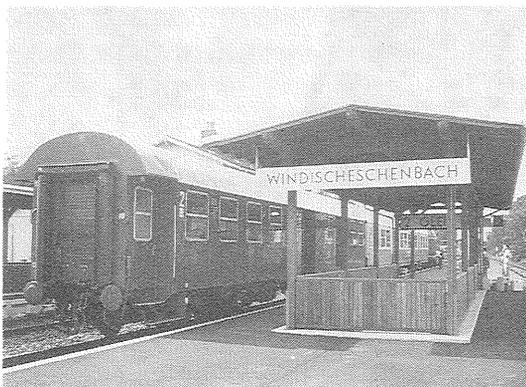


写真4 ヴィンディッシュ エッシェンバッハ駅。



写真5 駅の壁に取り付けてあった水準点(?)。 何と0.2mmまで表示してある。



写真6 KTB写真を支える人々と調査団メンバー。右よりリッシュミュラー教授、ペール教授、近藤専門職、エマーマン教授、塚原博士、田中教授、ケーラー博士、レンツ博士、浦辺、小田一等書記官。KTB現場実施本部横にて。

えていたからである(写真6)。またワーキンググループ3のリーダーで塚原さんと顔見知りのF. ルンメル教授もにこやかにパイプの煙をくゆらせていた。これは日本大使館がKTBの現場会合の日程を配慮してこの会を設定して下さったこともあるもののドイツ側の日独科学技術協力協定への熱意の表れと言えるであろう。

会はず各々の責任者がKTBの概要を紹介することから始まった。予算体制、技術開発など我々が知りたい点は質問書として事前に発送しておいたので最大漏らさず聞くことができ、非常に能率が良かった。そうして話を聞いている内に、彼らが限られた予算の中で実に合理的に計画を立て、それに従って着実に前進していることが分かり、不思議な感動を覚えた。ビッグプロジェクトにあり勝ちな硬直した運用や予算の無駄使いなどとは無縁の、ケレン味の無さが伝わってきたからである。

5. KTBが決まるまで

ここで少しKTBの歴史を振り返ってみよう(第1表)。約10年前ドイツ研究協会(DFG)は深海底掘削計画(DSDP)の成功を見て、新しいアイデアに基づいた大陸ボーリングを始める時期がきていると考えた。これは地球科学分野においてもビッグサイエンスとビッグテクノロジーが必要になって来ているという認識によるものである。DFGが1981年に研究技術省に提出した意見書は幸運にも受け入れられ、まず候補地選びが開始された。ついで掘削技術のアセスメントが始まり、事前調査と技術開発が同時進行することになる。4ヶ所挙げ

1989年7月号

第1表 KTB略史

西暦	事項
1977	ドイツ研究協会(DFG)が超深部掘削を初めて提案。
1981	事前調査開始。40ヶ所の候補地点が4ヶ所に絞られた。
1982	事前調査の主要な項目である反射法地震探査の開始。
1983	掘削技術の現状と開発課題が検討された。候補地が2ヶ所に絞られた。
1984	KTB実施の母体組織としてローワーサクソニー州地質調査所(NLFB)が選ばれた。
1985	KTB計画を連邦研究技術省(BMFT)が正式に承認。
1986	掘削地がオーベルプファルツ地方に決まる。
1987	500メートル深の浅部調査坑井掘削開始(9月)
1988	現場研究施設の完成(2月)
1989~1990	本掘削の開始。6~7年で完了予定。

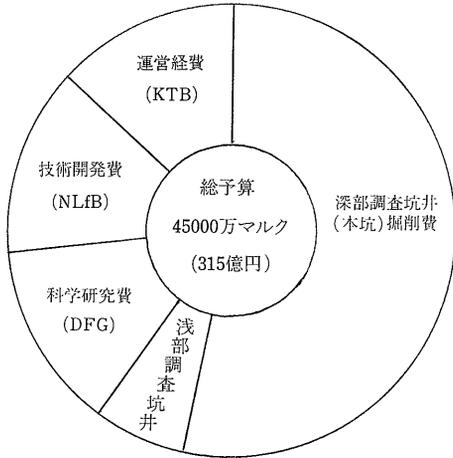
られていた候補地も1983年には、ライン地溝(ライン凹地)東側のシュバルツバルト(黒い森)とポヘミア地域内のオーベルプファルツの2ヶ所に絞られた。シュバルツバルトもモルダニューブ帯に属する基盤岩地域であるが、ここは新生代に到るまで活動的で、約5000万年前に変成作用を受けている。地質学の立場から言えばこちらの方が面白いターゲットであると言えるが、残念ながら深度7~8kmで孔底温度が300℃を越えることが推定されたため、技術的な理由から採択されなかった。後に述べるように超深部掘削における最大の技術的困難はその深さよりむしろ高い温度にあるからである。

6. KTBの推進体制

KTB計画が連邦研究技術省の正式な承認を受けたのは1985年になってからである。KTBの予算はすべて研究技術省から出ており、科学研究費はドイツ研究協会を通じて大学その他の研究者に分配され、掘削費・技術開発費・運営費・人件費はKTBの運営母体であるローワーサクソニー州地質調査所に配分されている。このローワーサクソニー州地質調査所は連邦地質調査所と同じ敷地内にあり、一心同体の組織と言える。

プロジェクトの総予算(上限値)は45,000万マルクで、毎年5年先までの計画を立てた上で、次の年1年分の予算額を決めるという方法を取っており、その責任者がレンツ博士だそうである。大まかな各予算項目の割合を第3図に示してある。ただしこれはあくまで予定であり、研究費と掘削に要する費用との配分はリッシュミュラー教授の裁量によるところが大きいようであった。

KTBを取り巻く組織体制(第4図)は、大まかには科



第3図 KTBの総予算(約10年分の合計)に占める各項目の割合(概数値)。

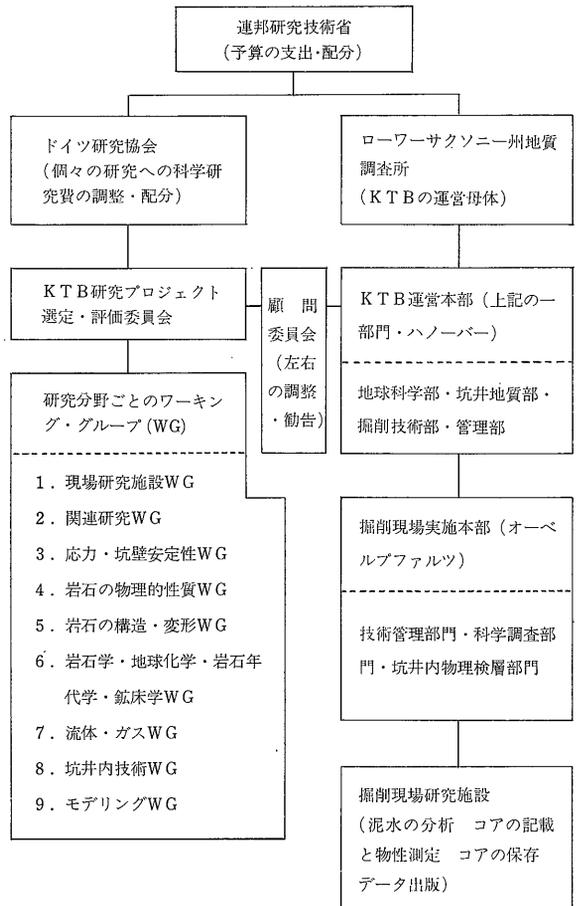
学研究を支えるドイツ研究協会と 技術開発・運営を行う KTB本部に分かれており その間の調整と研究技術省への勧告を顧問委員会が担当している。この顧問委員会には民間企業の重鎮 学者 隣国の専門家と言ったメンバーも含まれており全体の基本方針を承認する場となっている。これら3組織は有機的に組み合っておりたとえばワーキンググループ1で設計制作した各種の測定装置が 掘削現場研究施設でルーチン測定に使用されているといったぐあいである。

さらに地方分権の国西ドイツらしいところは 各々の組織が散在している点である。研究技術省と研究協会は首都ボンに ローワーサクソニー州地質調査所と KTB本部はドイツ北部の工業都市ハノーバーに 掘削現場は南部のヴィンディッシュ エッセンバッハと お互い数百 km 離れており 最初訪問調査の日程をどうやりくりするか迷ったほどであった。なお 現地のバイエルン州政府も数億マルクをかけて 用地取得 道路 電力などインフラストラクチャーの整備を行って KTBを側面から支えているそうである。

7. 掘削の進む浅部調査坑井 (VB)

浅部調査坑井(パイロットホール)のリグはヴィンディッシュ エッセンバッハ村をはるかに見下ろす丘の上に立っている(写真7)。特徴的な2本足のヤグラは私の眼には新奇に映ったが 専門家の田中先生がずいぶん旧式のものを使っていますねとおっしゃったので我耳を

疑った。後のリッシュミュラー教授の説明によるとこのリグは第二次世界大戦後ドイツが最初に自前の技術で作ったもので 今回それを部分改良して使っているとのことであった。この様な所にも節約できる点はとことんそうして 本掘削に資金を温存しておこうというしたたかな合理精神が感じられた。さらに重要なポイントとして KTBが proven technique (実証済の技術)のみを用いるという基本方針を持っていることを見逃してはならないだろう。これはドイツの鉱山会社で長年探査ボーリングに携わって来た リッシュミュラー教授自身の実証主義的考え方の反映のように思われた。



第4図 KTBを取り巻く組織体制と資金の流れ。()内に各々の役割を示してある。

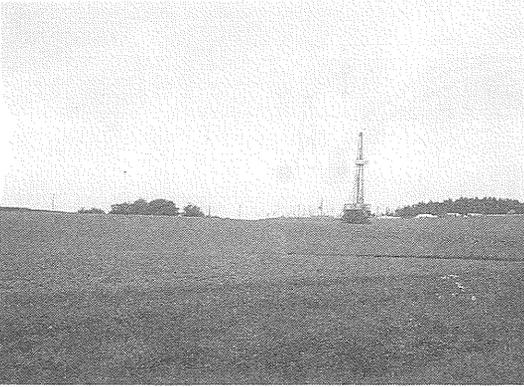


写真7 KTB写真の浅部調査坑井のリグ遠景。なだらかな牧場の向こうの丘の上に立っている。

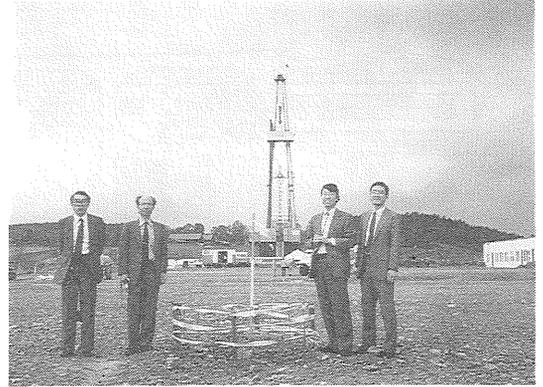


写真8 敷地内にある本掘削予定点。片麻岩が露出している。向こうに見えるのが浅部調査坑井のリグと現地研究施設。

この浅部調査坑井は通常の意味でのパイロットホールとは異なり 同一敷地内の 200m 離れた所に掘られる予定の本坑井の浅部部分であると言える(写真8)。掘削は6インチのダイヤモンドビットを用いたワイヤーライン方式でオールコアで行われており ルーチン観測 特殊な坑井内計測 ボーリング泥水および削り屑の分析等も本坑井で予定されているメニューと同一である。この浅部調査坑井は深度5000mを目指して掘れるところまで掘り 代わりに本坑井はその深度までノンコアでまっすぐに穴を開け それで深のコア掘削を容易にする計画になっている。

1988年5月現在浅部調査井は深度2200.6mに達していた。ビット径15cm 坑底斜度0.28度 坑底温度58℃で坑底の岩石はモルダニューブ帯の片麻岩である。

1989年3月に来日されたKTBのB. ホッファース氏によると 3月現在深度は3890mに達しており コア回収率98%平均掘削速度1.7m/時 ダイヤモンドビットの寿命101~135mという成績があがっているとのことである。

しかし坑底斜度は最大10°に達しており 温度勾配も30℃/kmと予想外に高く このまま行くと本坑井では14kmで420℃に達してしまう。先に述べたように最終的にこちらがボーリングサイトとして選ばれた理由の第一は地温勾配が低いということだったので これは大きな誤算と言える。岩石は角閃岩・片麻岩が主で予想通りであったが 水平に近いと思われていた地層が急傾斜であることも分かったという。興味のあるのは 3450m付近に割れ目があり 塩化カルシウム ヘリウムおよびメタンを溶存する被圧水のポケットがあったことである。

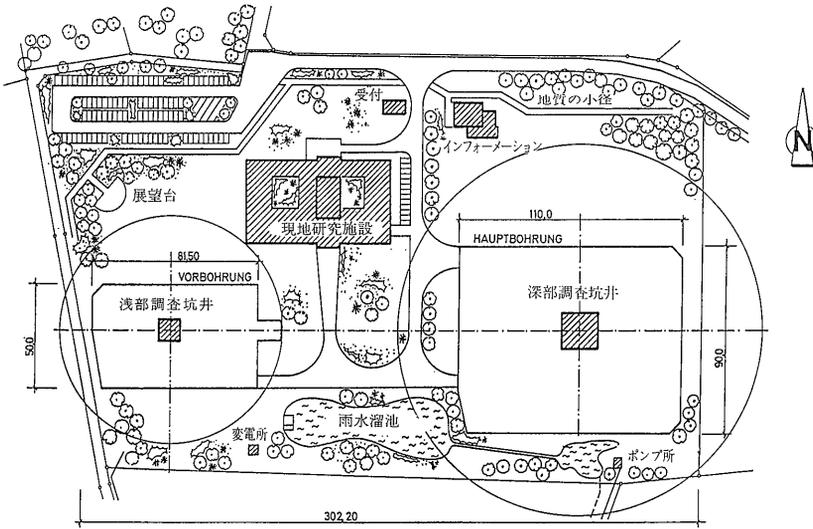
8. 掘削現場実施本部と現地研究施設

現地研究施設(フィールド ラボラトリー)は掘削現場実施本部と同一の建物の中にある 浅部調査坑井から50mの至近距離にある(第5図)。ここは西ドイツ唯一の総合地球科学研究ラボだと担当者が自慢するだけあって種々の分析・計測装置とコア・ライブラリー(コアを整理・分配・保管する場所)が完備している(写真9)。更に重要な点は博士号を取りたての若い研究者が沢山居てそれぞれ助手を使ってルーチン分析・計測をする体制ができてきていることである。少し細部に亘るがここでやられている研究・作業を第2表にまとめてある。

(1) 泥水分析: ボーリングをする際 掘削に伴い発生する熱と切り屑を地表に捨てるために液体を循環させる必要がある。KTBでは超深部掘削用に新しく開発し

第2表 現地研究施設で行われている科学研究とルーチン業務

- ① 泥水分析 (mud logging)
 - イ. ボーリング泥水の化学分析(アトミックエミッション分光分析装置; 12成分について)
 - ロ. ガス分析(気体質量分析装置; 14成分について)
 - ハ. 泥水中の切り屑の化学分析(X線蛍光分析装置; 17元素について)
 - ニ. 切り屑の鉱物分析(岩石顕微鏡)
- ② コア解析 (core logging)
 - イ. 物性測定(圧縮試験, アコースティックエミッションなど)
 - ロ. 地球物理学的測定(岩石磁化率, 残留磁気, 地震波速度)
 - ハ. 地質学的解析(鉱物同定, 化学分析, 岩石記載)
- ③ コアの方位づけ(坑井内音波テレビ画像との比較)
- ④ コアの整理 保管 分配
- ⑤ データベース作成
- ⑥ データ集の出版(2ヶ月に1回)



第5図 施設の平面図と2本のボーリングの位置。 現在深部調査坑井とインフォメーションセンターは完成していない。

た デハイドリルHTというゾル状の無機質液体をこのボーリング泥水に用いている。これは揺らすと液状になり動かさないとシャーベット状になるという不思議な物性を持った液体である(口絵5)。これを用いると泥水ポンプを止めた時 デハイドリルHTが固まり切り屑が坑井の途中にホールドされ下に溜らないという利点がある。さらにこれが無機質であることからメタン等の炭化水素ガスの噴出があったときにもそれを正確に分析することができる。坑井のヘッドの部分には新しく開発されたガスコレクター(口絵4)が取り付けられておりここで分離したガスを直接現地研究施設にパイプ流送している。

このガス分析は地球科学者のみならず多くの人々の注目を集めている。と言うのも地球の核には地球が生成したときに封じ込められたメタンガスが大量に存在しそれが深部亀裂を伝って上昇してくるのでないかとするゴールドの説(本号 星野論文参照)の妥当性が実証できるからである。

(2) コア解析: 回収されたコアはまず圧力の解放にともなう変形と微小割れ目の発生によるアコースティックエミッションが計られる(写真10)。これは地下の応力の方向と大きさをコアから推定しようとする試みの一つである。次に地震波速度などの地球物理学的測定が行われる(口絵7)。これにより地表から地震探査法など



写真9 西ドイツKTB現地研究施設的全景。 向かって右半分は掘削現場実施本部になっている。手前は請負業者のプレハブ。

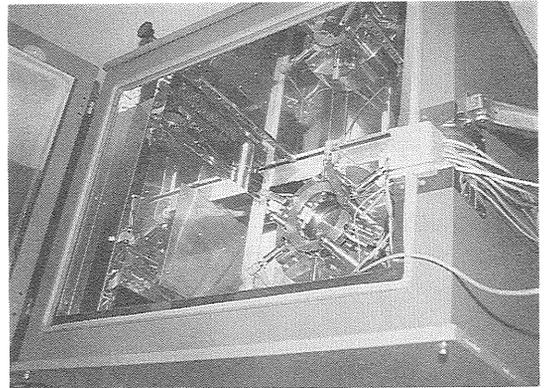


写真10 回収されたコアの圧力解放にともなうアコースティックエミッションを計っているところ。

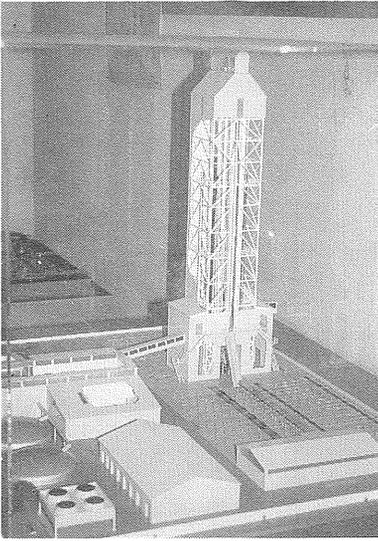


写真11 本掘削用のリグの模型。 1990年に建設される予定。これで14kmを目指す。

を用いて推定されていた地下の構造が更に正確に分かるようになる。 と言うのも 地震波の解析をする際に岩石の地震波速度を仮定せざるを得なかったのが コアの実測により実際の値を用いることができるようになるからである。

最後にこれらのコアは切断され 鉱物の同定 岩石の記載 化学組成の分析 などの地質学的解析が加えられる。 これを地表調査のデータと併せて検討することによって地下構造を3次的に求める。

(3) コアの方位づけ： コアは丸いものなのでもとどの方向を向いていたのか分からない。 そこでボーリング孔内に下ろされた超音波テレビューアの画像とコアの表面の模様とを比較して方位を決める。

ここではこれらの作業を管理職2名 研究員15名 技術職員18名 作業員10名 計45名で行っている。 通常の坑井内測定や泥水管理は民間の請負業者にまかされているので より特殊ないし科学的な研究を担当していると言える。

(4) コアの保管： このような計画でもとすればないがしろにされがちな作業にコアの管理と保管がある。 ここでは小さなコアの破片に到るまで完全に番号が振られており 台帳に記録されている(口絵6)。 それ之余りにも完全主義なので 外部の研究者がサンプルリクエストを出しづらくなるのではと要らない心配をするほどであった。 コア倉庫も 8000 m まで収容できるスペースがあり 足らなくなったら増設するとの事であった。

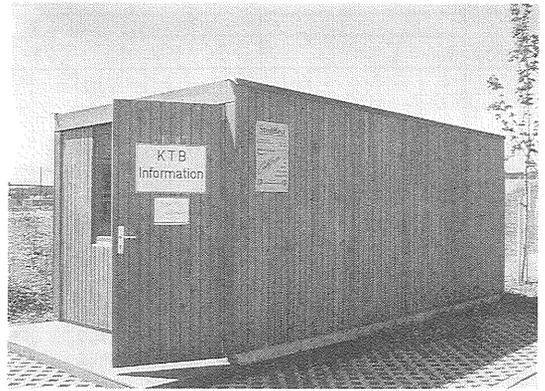


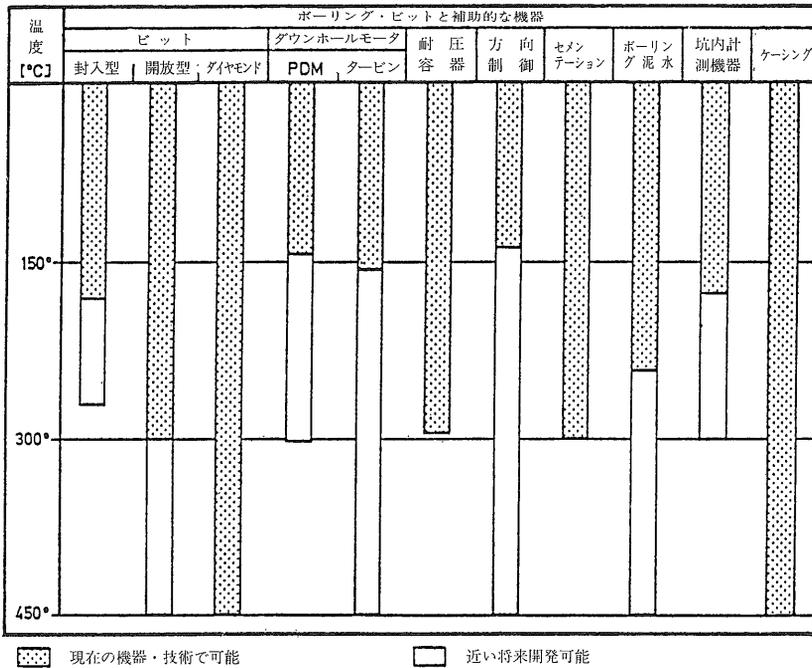
写真12 敷地の外側にある仮設のインフォメーションセンター。 既に15万人の人がここを訪れているとのことで ドイツ国民の関心の高さを伺わせる。

9. 技術開発の重要性

世界一の穴を掘りたいという熱意と 未知のヨーロッパの基盤岩に対する科学的興味 それに人類に残された最後のフロンティアである地球内部へのロマン。 これらの夢もそれを可能にする技術的裏付けがなければ実現しない。 KTBでは先に紹介した耐熱ボーリング泥水やダイヤモンドビットの開発・改善を行っているほか本掘削坑井(写真11)用の升降管装置の技術開発を重点的に行なっている。 もちろんそれだけではなくこれからも掘りながら同時に技術開発を進めていくことになる。 第6図に現在彼らがないし他の国が持っている技術レベルをまとめてある。 この図からも分かるように 深部掘削にとって最大の難関はその深さにあるのではなくて むしろ高くなる温度にあるのである。

そのためKTBでは耐熱・耐圧の孔内計測機器および掘削装置の研究開発について国際協力を強く望んでいた。 田中教授が紹介した日本の地熱井用の耐熱計測装置に リッシュミューラー教授は強い関心を示し 各々が開発した技術をお互いに公開し合う事によって 開発費の節約を計るべきと強調していた。 もしそのような装置を開発しテストをしたいなら KTBの孔をお貸しするのにやぶさかでないとのことである(写真12)。

この小文では技術的な問題にはこれ以上触れない。 ただ一つ強調しておきたいのは超深部掘削は 升降管装置のロボット化 自重のために引きちぎられない強度と軽さを持った掘り管の素材の開発 ターボドリル・ビットの改良 耐熱・耐圧の孔内計測機器用高温半導体の開発などを含んだ 一つの総合システム工学であるということである。 宇宙開発がかつてそうであったように 広範囲の企業 大学 国立研究所が一致協力して初めて



第6図 超深部掘削技術の現状と現在の技術の延長上で開発可能と思われる技術。300°Cが一つの壁であることが分かる。

できる大事業であると言えよう。この意味で西ドイツのシステムは我々にとって多めに参考になる。予算を運営費 技術開発費 科学研究費に振り分け 官民学すべての研究者・技術者がこの国家的プロジェクトに参加できるようにして有るからである。またプロジェクトに直接たずさわっている人々がその予算配分に関与するのも 実質本意の計画を立てるのに役立つように思われた。リッシュミュラー教授というマネジメントにたけた最高責任者を得ることができたのがKT Bの成功の秘訣であるようである。最近日本でも超深層ボーリングに対する人々の関心が高まってきており 航空・電子等技術審議会(地球科学技術部会)・測地学審議会において超深部ボーリング(学術ボーリング)を日本でも取り上げるべきとの建議がなされている。これに呼応して 最近官民学の協力で「超深部コアボーリング技術開発研究会」(代表:平塚保明氏)が旗揚げされるなどの動きがある。わが国においても KT Bとの密接な国際協力のもとにオールジャパンでこの超深部掘削計画を推進したいものである。

10. おわりに

現在(1989)米国の海底掘削船ジョイデスレゾリューション号が小笠原海域および日本海で学術ボーリングを行っている。これは海洋底掘削計画(ODP)という国際共同研究の一環として行われているもので DSDP

の延長上にあるプロジェクトである。小笠原航海の乗船者の情報によると 小笠原島弧では事前にまったく予想していなかった岩石がコアとして続々上がってきたそうである。小笠原弧 東北日本弧に限らず島弧の推定地質断面図は数多く描かれており それらを見るとなんとなくすべて分かったような気持ちにさせられてしまう。しかし今回のように実際に掘ってみると それらの先入観がいかに不完全なものかが直ちに分かってしまう。

日本のような島弧は地殻中で起こっている現象の多様さで 他の地域を凌駕している。安定大陸と異なり“切れば血の出る”活動的なところでもある。プレートテクトニクス説の残された弱点も大陸と大洋がせめぎ合う島弧に集中している。この島弧を超深部ボーリングにより直接観察することは 地球全体に対する我々の知識に質的な革新をもたらすであろう事は疑う余地が無い。

21世紀になると 先進諸国でどこが最初にマントルに到達するかが大きな関心を集めることになるろう。現在の技術レベルでは下部地殻が限度であるものの 将来高温高圧の極限状況下での総合工学システムを發展させた国が 人類初のマントルの石を手にするようになる。

わが国がその技術力を活かして その夢にチャレンジする日のくることを祈って筆をおきたい。