

超深度ボーリング JUDGE 計画†

伊藤久男††

JUDGE 計画とは Japanese Ultradeep Drilling and Geoscientific Experiments の略であり、陸上から海洋プレートの沈み込み帯を貫く超深度掘削を行うというものであり、深度約 10 km、温度～400℃の条件で、坑井掘削、岩石・水・ガス試料の採取、坑井を利用した各種観測を行うものである。デコルマ面での各種観測、モニターは JUDGE 計画の最も重要な目的であり、計画の概要、掘削・計測の課題を議論する。

The Geological Survey of Japan and the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention have been jointly proposing an ultradeep continental scientific drilling JUDGE (Japanese Ultradeep Drilling and Geoscientific Experiments) which is designed to penetrate through the subduction zone of the Phillipine Sea plate at 10 km depth. In the JUDGE project, observation and monitoring of the decollement zone is one of the most important issues. The technical problems regarding drilling and observation are also reviewed.

1. はじめに— JUDGE 計画とは

1.1 JUDGE 計画とは

JUDGE 計画とは Japanese Ultradeep Drilling and Geoscientific Experiments の略であり、陸上から海洋プレートの沈み込み帯を貫く超深度掘削を行うというものであり、深度約 10 km、温度～400℃の条件で、

1. 坑井掘削
2. 岩石・水・ガス試料の採取
3. 坑井を利用した各種観測

を行うものである。

さらに、JUDGE 計画は

- ・プレートの移動を引き起こしているドライビング・フォースは何か？
- ・プレート沈み込みの実態：連続的か、間歇的か？地殻応力の大きさと方向は？
- ・沈み込み帯の変形面（デコルマ帯）は 1 つか複数か？その摩擦係数と表面特性は？
- ・関東地域で発生が懸念されている海溝型巨大地震の発生場所、機構と頻度は？

- ・沈み込みに伴う水が地震発生の引き金になるという説は正しいのか？
- ・地下浅所の脆性破壊温度圧力領域ではなく、実際に岩石の破壊現象である地震が発生している塑性破壊温度領域における応力の大きさ、方向、経年変化、および地震発生前後の変化はどのようなものか？
- ・応力の深度分布はどのようになっているか、脆性破壊と塑性変形の境界は何 km にあるのか？
- ・深さ 10 km 付近から起こると言われているアンダープレーティングの機構と実態は？
- ・変成作用の進行のメカニズムは？深さによって変成流体の組成はどう変わるのか？
- ・生成した変成岩はどのようなメカニズムで再び急激に上昇するのか？
- ・沈み込み帯においてどれほどの規模の元素循環が起こっているのか？
- ・マントルへ還流する炭素化合物のフラックスは？またその地球環境への影響は？
- ・堆積物中の有機物はどのように分解・熟成されるのか？石油の生成機構は？
- ・微生物生態圏は地下どれくらいまで存在しているのか？新しい活性を持つ微生物は？
- ・日本列島に分布する地層の約 20% を占める付加体の構造断面と成因は？
- ・地殻内および付加体中の水の流動と循環は？地下

† Japanese Ultradeep Drilling and Geoscientific Experiments, by Hisao Ito (hisao@gsjnhk.gsj.go.jp)

†† 工業技術院 地質調査所 地殻熱部 Geothermal Research Department, Geological Survey of Japan 〒305 茨城県つくば市東1-1-3

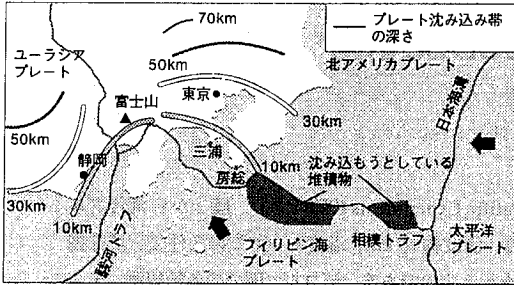


図1 JUDGE 計画の候補地域（房総・三浦・静岡）と周辺の構造。

この領域の特殊性は房総半島南東域に存在する世界にただ一箇所しかない海溝—海溝—海溝型の三重会合点の存在に起因している。このプレート配置の幾何学的制約によって、島弧に島弧が沈み込むという現象が生じる。島弧地殻は沈み込みを妨げるため、地塊の衝突を引き起こし、上盤の前弧域を広域的に屈曲・隆起させる。一方、付加作用に着目すると、伊豆半島周辺では伊豆・小笠原弧の火山弧が、東海地域では背弧雁行海山列から四国海盆が、そして房総半島付近では非火山性の前弧域（前弧海盆）が沈み込んでおり、その一部が付加している（[2]；図1）。

水、ガス、石油の移動速度は？
 といった、現在の地球科学上最も重要な仮説の検証：
 judgeを行うという意味もあわせもつ[1]。

1.2 JUDGE 計画の予定地域

日本列島周辺の沈み込み帯では、太平洋プレートが日本海溝—伊豆・小笠原海溝で、フィリピン海プレートが相模トラフから琉球海溝にかけて沈み込んでいる。これらの沈み込み帯では、中央海嶺や背弧海盆で生産された玄武岩溶岩を主体とする海洋地殻が沈み込んでいる。ところが、相模トラフから駿河トラフにかけては海洋地殻ではなく島弧（伊豆・小笠原弧）が沈み込んでいる。

デコルマがどの深さに存在するのかを予想するのは非常に難しいが、関東・東海地域の微小地震の震源分布から推定した南房総での地震学的なフィリピン海プレートの上面は10km付近に存在することから（[3]）、おそらくデコルマも10km付近かそれ浅に存在するのであろう。デコルマに到達し、さらに沈み込むスラブの掘削が成功すれば、沈み込んだ伊豆・小笠原弧の地殻の層序が復元でき、世界で唯一つの活動的島弧の沈み込み現象を検証できる。また沈み込み帯やその上下層準で起こっている現象、すなわち付加体内での温度構造や流体移動、物性変化に関しても孔内計測の技術を駆使して多くの情報を得ることができよう。

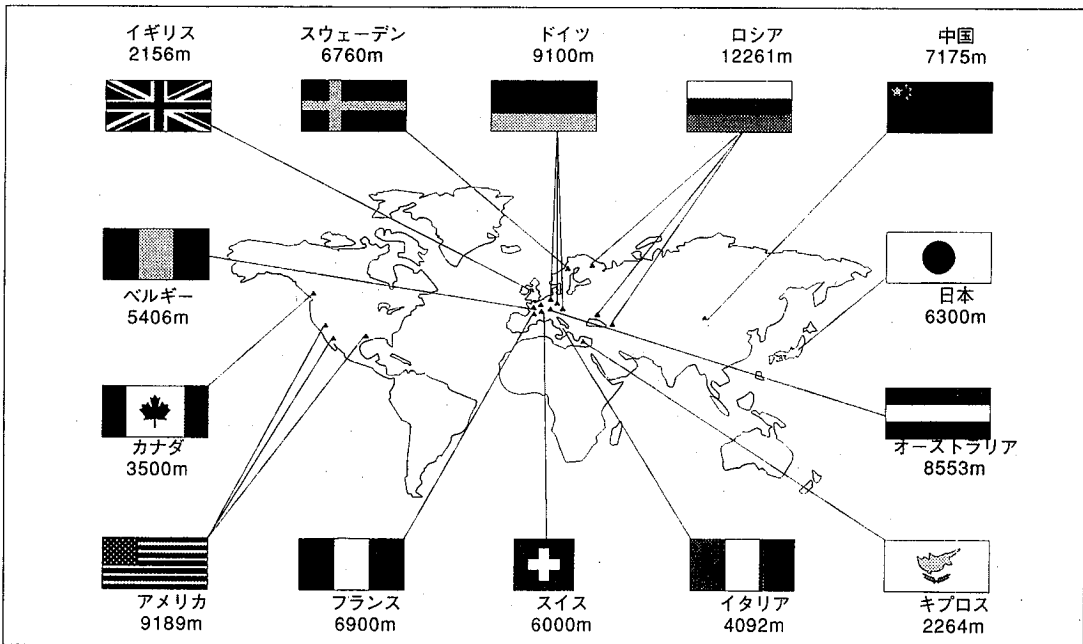


図2 世界における超深層掘削の実績。

2. 世界の現状

世界中での超深層掘削の現状を図2にまとめた。このうちロシアのコラにおける12,261 mが現在のところ世界最深のものである[4]。さらにロシア及び旧ソビエトでは、コラの他でも多くの掘削が行われており、ウラルでは掘削中の計画がある(表1)。

コラには深度では届かなかったものの、科学掘削として有名なのはドイツKTB計画である。ドイツではKTB計画(Kontinentales Tiefbohr-Program der Bundesrepublik Deutschland: German Deep Drilling Program)により深度9.1 kmの坑井が掘削された[5]。KTB計画では1990年10月から掘削を開始し、1994年10月10日に深度9,101 mで掘り止めされた。まず深度4,000 mのパイロットホールをオールコアリングで掘削し、その経験をもとにメインホールを掘削した(表2、図3)。

コア・流体試料の採取、坑井を利用した各種計測・

実験が行われ、さらに坑井掘削後は、坑井を利用した深部地殻観測施設としての利用が計画されている[6]。

アメリカでは現在、サンアンドレアス断層掘削計画(Hickman et al., 1994)に注目が集まっている。これはサンアンドレアス断層を貫く掘削を行い、各種観測・計測を行おうというもので(図4)、現在計画の詳細が固まりつつある[7]。

我が国では石油・ガス・地熱資源採取のために深部掘削が行われている。石油・ガスでは年々深度が深くなり、近年では深度6,000 mを超える掘削が行われている[8、9](図5)。また地熱井では温度500℃を超える高温での掘削に成功している[10]。

陸上科学掘削を世界規模で推進するため国際陸上科学掘削計画(ICDP)が、1996年2月にドイツ・アメリカ・中国の3国により調印され、その活動を開始した。

ICDPの組織はODP(Ocean Drilling Program: 国際海洋掘削計画)のそれにならって作られたものであ

表1 ロシア・旧ソビエトにおける超深層掘削

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
Almaiik	3722	1984-90	Fold belt
Azerbaijan			
Saatly	8324	1977-90	Sedimentary cover
Total by the Program	114928		
* - Deep Geolaboratories			
** - Under Drilling			

表2 KTBにおける坑井内測定内容

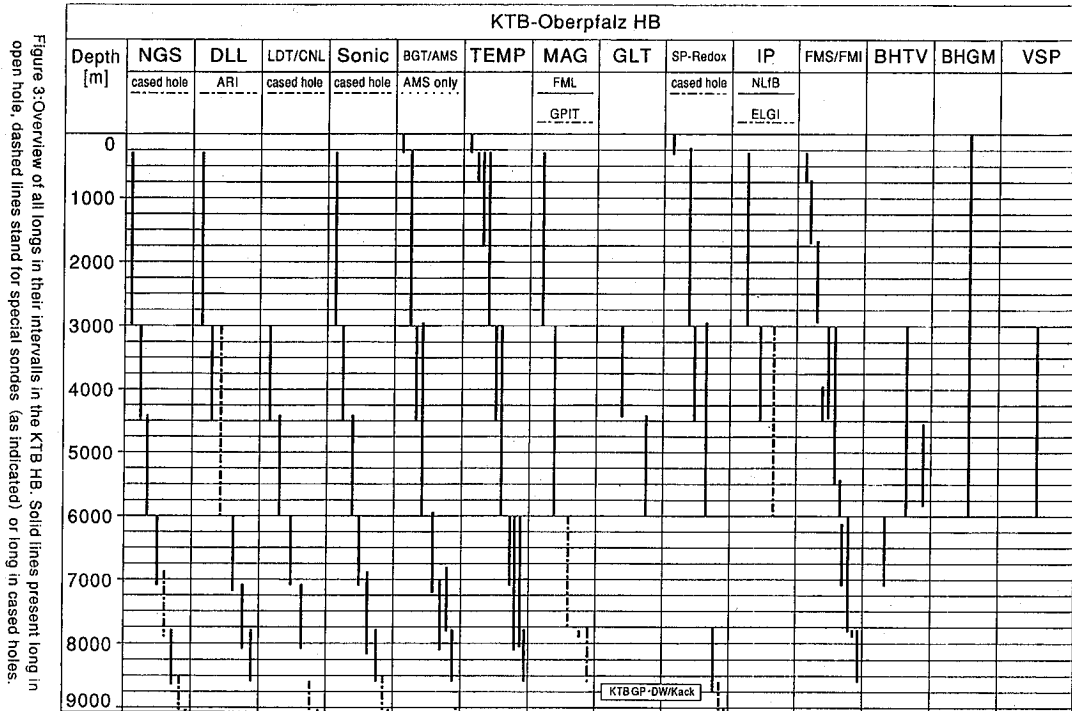


Figure 3: Overview of all logs in their intervals in the KTB HB. Solid lines present long in open hole, dashed lines stand for special sondes (as indicated) or long in cased holes.

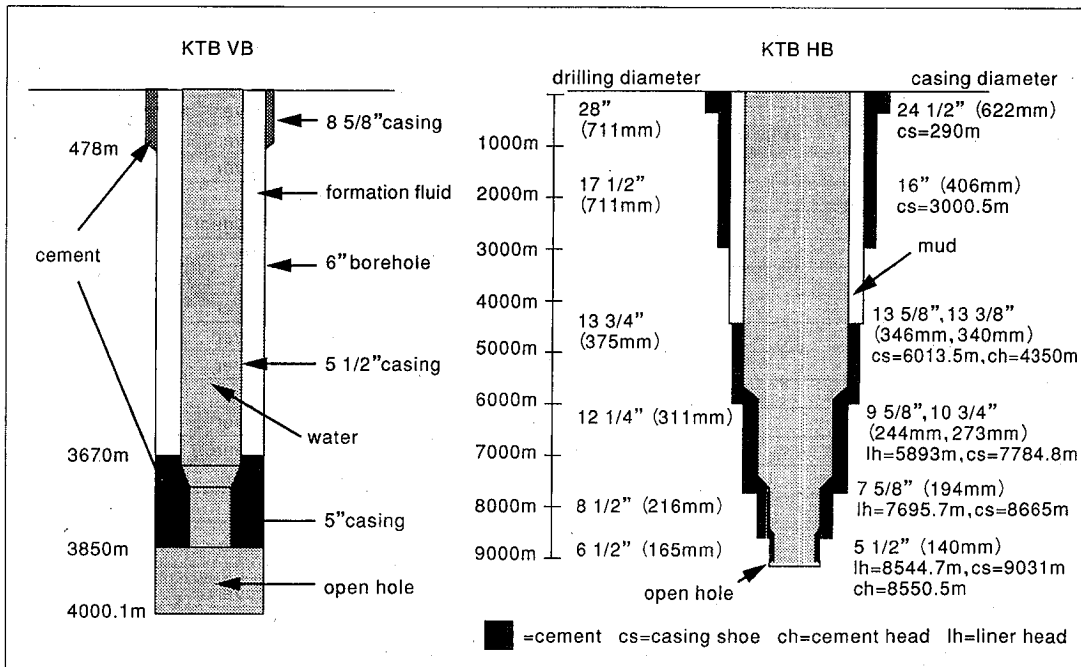


図3 ドイツKTBにおけるパイロットホール (VB) とメインホール (HB) の実績。

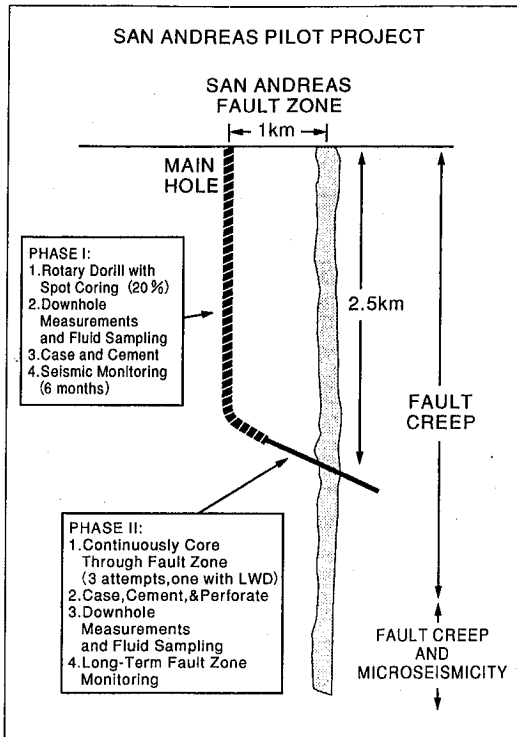


図4 サンアンドレアス断層掘削計画

るが、経費がかからないようはるかに簡素なものとなっている(図6)。組織の最上位には理事会(Assembly of Governors)がある。これは出資国の代表が2年に1度会ってICDPの政策を決定し活動を監督するためのものである。実際にはその内の1人が理事会の決定を受けて、ICDPの計画執行を監督することになる。

プロジェクトの科学的内容を討議するのは、世界中の指導的な研究者より構成される科学顧問グループ(Science Advisory Group)である。この専門家グループは提出されたプロジェクトを評価選定し、どれを第一に取り上げるべきかをプログラム委員会(Program Committee)に進言する役割を有している。このように、どの提案が選ばれるかはODP同様 peer reviewにより決定されるので、掘削がメンバー以外の国で行われる可能性も低い。

ICDPの中心に位置して計画全体の総括、プロポーザルの優先順位決定、予算の配分、および各掘削の実施に当たるのがプログラム委員会の役割である。この委員会には会員各国が少なくとも1名の代表を送る

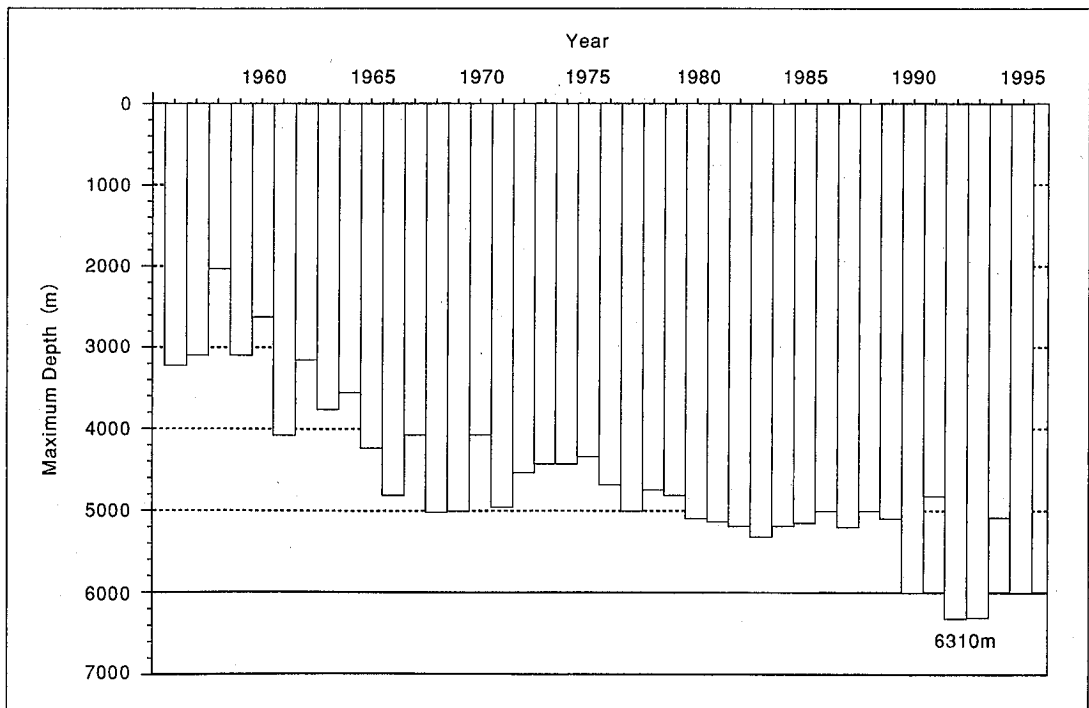


図5 我が国の石油掘削の実績

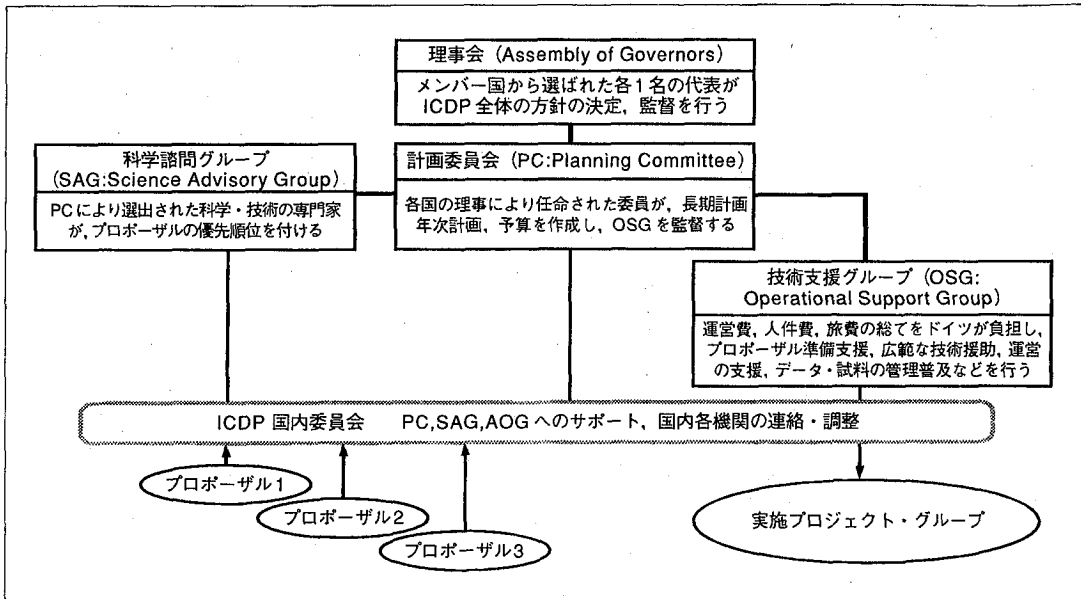


図6 国際陸上科学掘削計画 (ICDP) の組織図

ことができるが、その人数は出資額に比例するものとする。このプログラム委員会の下に技術集団としての技術支援グループ (Operational Support Group) があり、プロポーザルを提出する人に技術的な助言を与えてくれると共に、実際の掘削の管理運営を行なう。この技術支援グループはドイツ地球科学研究センター (GFZ) 内に設立されている。

このICDPの組織は、浅いボーリングから超深層掘削計画まで広く対応できるよう柔軟な組織形態を取っている。浅いボーリングでは費用があまりかからないので、ICDP予算のみで年間何本か掘削することができる。これにより、ある研究者が長年自分の提案が実現するのを待たなければならないという状況が改善される。一方、超深層計画のようなメガサイエンスでは、それを計画した国が90~95%以上の資金負担をすることが不可欠になる。そのような場合は、各掘削の運営はそれぞれの国における首席研究者およびそのチームの自主性が最大限尊重される。ICDPは技術的支援をすると共に、プロジェクトの進行具合を見守り、理事会に報告するものとする。

3. 掘削上の問題点

JUDGE計画では、深度約10 km、温度~400℃の条件で陸上から海洋プレートの沈み込み帯を貫き、坑

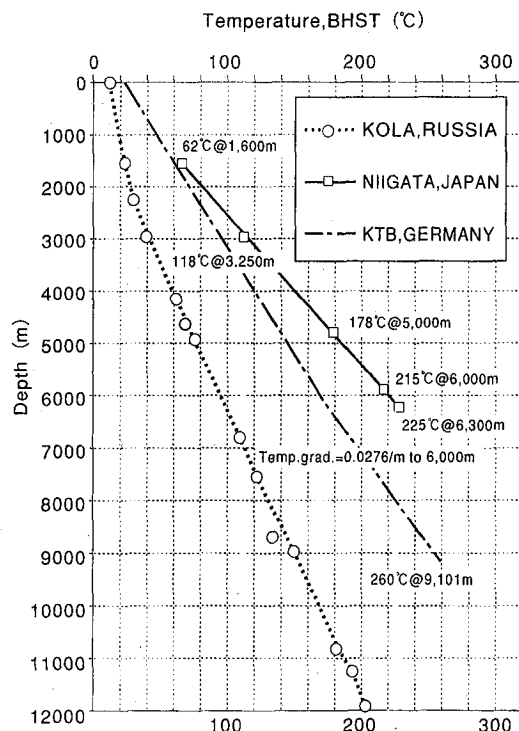


図7 コラ・KTB・新潟の深度-温度実績

井掘削、岩石・水・ガス試料の採取、坑井を利用した各種計測・観測を行うというものである。これは現状の技術の延長では必ずしも達成可能ではなく、今後の技術開発が必要になる。

まず掘削上の問題点としては、

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
 - ・吊り下げ荷重の大きな陸上掘削機（リグ）の開発
 - ・垂直掘削システム（VSD）の開発
 - ・ダウンホールモーター（PDM）の開発
 - ・掘削監視装置（MWD）の開発
2. 地層温度上昇への対応
 - ・ゴム製品やエレクトロニクスの耐熱性の向上
 - ・上記機器の耐熱性の向上
 - ・ボーリング泥水の開発

3. 坑壁不安定性への対応
 - ・ケーシングプログラム
 - ・泥水管理

といった問題点がある[9][11]。温度についてはYoshida[9]がコラ、KTB、新潟の深度-温度を比較し（図7）、日本での地下温度の高さを改めて指摘した。さらに掘削に必要な、ビット・泥水・セメンティング等の耐温性の実績・開発状況・開発目標をまとめた（図8）。泥水循環により坑井は冷却されることを考慮しても、今後耐温性について開発すべき課題は多い。

地下深部では、差応力によりブレイクアウトが発生する（例えば[12]）。ブレイクアウトとは坑壁周辺の応力集中により坑壁で破壊が発生し、坑壁が不安定になる現象であり（図9）、深部では本質的に発生する。こ

Elements	Maximum Temperature Rating								JAPEX		
	Max. Temperature (°C)								1985	1995	1995.6.
	50	100	150	200	250	300	350	400 (°C)	Max.	Max.	Target
Down Hole Motor											
PDM									135°C	175°C	240°C
Turbine									160°C	315°C	
Vertical Drilling System									-	175°C	200°C
Core Barrel									300°C	300°C	
MWD											
Standard Type									125°C	150°C	175°C
Vertical Drilling for KTB									125°C	175°C	200°C
Heat Sealed Type									260°C	260°C	
Cementing											
Shoe Collar									150°C	210°C	
Stage Cementer									135°C	135°C	
Cement with Slica									400°C↑	400°C↑	
Cementing Additive									180°C	260°C	
Bit											
Seated Bearing									180°C	200°C	260°C
Natural Diamond									650°C	650°C	-
PDC									750°C	750°C	-
TSP									1200°C	1200°C	-
Drilling Mud											
Water Base Mud (weighted)									180°C	250°C	
Viscosifier									250°C	370°C	
Fluid Loss Reducer									230°C	230°C	
Dispersant									260°C	350°C	
Lubricant									200°C	300°C	
Drilling Jar											
Hydraulic Type									290°C	315°C	
Mechanical Type									230°C	285°C	
Blow Out Preventer											
BOP Ram									85°C	175°C	
CSG Hanger Seal									85°C	120°C	
Liner Hanger									205°C	260°C	

図8 掘削用機材の耐温性の実績・開発計画

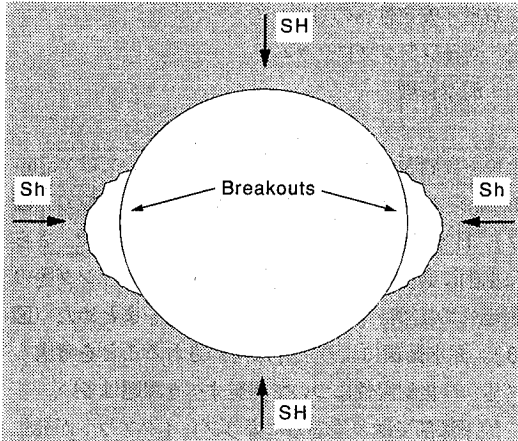


図9 ブレイクアウトの概念。SH, Shはそれぞれ水平最大応力、水平最小応力を示す

のため坑井掘削ではケーシングプログラム、泥水の管理に十分留意すべきである。

以上の困難点に加えてさらにJUDGE計画では岩石・水・ガス試料の採取、坑井を利用した各種計測・観測を行う必要があり、一層計画を困難にする。

4. 坑井内計測・観測

JUDGE計画では、石油、ガス、地熱等の資源採取のための掘削と異なり、コア・流体の採取、坑井を利用した各種計測・実験、坑井の観測施設としての利用が本質的に重要である。表3にJUDGE計画に必要な坑井内計測の内容をまとめたが、項目・内容とも多岐にわたり、技術的に現在の延長では不可能な部分も多い。特にデコルマ面での各種観測、モニターはJUDGE計画の最も重要な目的である。

JUDGE計画で必要になる項目は、

表3 JUDGE計画に必要な坑井内計測の内容

I. Vertical drilling system
II. LWD
III. Wireline logging
1) Logging Cable and cable handling Insulation materials, Cable design, Cable drum, Logging unit
2) Telemetry system for high temperature and long cables Cable impedance, Telemetry cartridge
3) Tools evaluation HEL tools characterized at higher temperature, Dewar flask performance
4) Tools development 400 °C sondes, TLC logging
5) Explosive systems and accessories: high temperature system
IV. Borehole Experiment
1) Stress measurements
2) Pore pressure, fluid sampling
3) VSP
4) Fluid injection
V. Permanent sensor
1) Measurements Earthquake, In-situ stress, In-situ strain, Pore pressure, Temperature, Resistivity, VSP Available services for 175 °C environment Modifications of existing sensors Multi level-multi sensors
VI. Well database
Core and data curation system Integration of different data

I. 岩石・水・ガスの採取

4. 坑井を利用した長期観測

II. 計測

地震、歪み・応力、間隙水圧、温度・圧力等がある。

1. 掘削に際して必要な計測

JUDGEにおける坑井内測定については、高温、高圧、ケーブル長と張力、泥水の影響、坑壁の不安定、測定に長時間必要等があるが、ここで特に問題となる

2. 検層

3. 坑井内測定・実験

間隙水圧、地殻応力、VSP等

表4 MWDの耐温性の現状

サービス会社	Anadrill-Schlumberger		Baker Hughes Inteq		Halliburton		Sperry-Sun Drilling		Geoservice
MWD商品名	SLIM-1	LWD	ACCUTRAK	TRIPLECOMBO	DATADRILL	LWD	MPT	DWD	EM-MWD
外径	1-3/4", 3-1/16"	6-1/2", 6-3/4", 8"	6-3/4", 7-3/4"	6-3/4", 8-1/4"	4-3/4", 6-3/4"	6-3/4", 8", 9-1/2"	6-3/4", 8", 9-1/2"	3-3/8", 4-3/4", 8"	3-1/2", 4-3/4", 8"
長さ：傾斜のみ	28'	-	18'	-	18.5', 20.5'	-	25.6', 25.7', 26.7'	21', 26'	29.9', 30.2', 32'
傾斜+各センサー	-	59', 60', 89', 91'	-	72', 71'	-	42.4', 68.8'	30.2', 42.2', 56.7'	36', 52'	-
最高使用温度	150℃	150℃	125℃	125℃	150℃	150℃	140℃	140℃	125℃
電源	リチウムバッテリー	タービン発電器	リチウムバッテリー	タービン発電器	リチウムバッテリー	リチウムバッテリー	リチウムバッテリー	タービン発電器	リチウムバッテリー
(使用時間)	(800時間)	-	(500時間)	-	(400時間)	(200時間)	(250時間)	(240時間)	(240時間)
最高使用圧力	15,000psi	18,000psi	20,000psi	20,000psi	20,000psi	18,000psi	18,000psi	15,000psi	15,000psi
データ伝送方法	ポジティブ	マッドサイレン	ネガティブ	ポジティブ	ネガティブ	ネガティブ	ネガティブ	ポジティブ	電磁波
	マッドパルス	-	マッドパルス	マッドパルス	マッドパルス	マッドパルス	マッドパルス	マッドパルス	マッドパルス
データ記録	坑内メモリ	坑内メモリ	-	坑内メモリ	-	坑内メモリ	坑内メモリ	-	坑内メモリ
逸泥防止剤	ミディアムナッツプラグ	ミディアムナッツプラグ	制限なし	ミディアムナッツプラグ	制限なし	ファインミディアムナッツプラグ	ミディアムナッツプラグ	ミディアムナッツプラグ	制限なし
測定項目	傾斜廻り	傾斜廻り	傾斜廻り	傾斜廻り	傾斜廻り	傾斜廻り	傾斜廻り	傾斜廻り	傾斜廻り
(オプション含む)	γ線	γ線	ツール温度	γ線	γ線	γ線	γ線	γ線	γ線
	坑内温度	比抵抗	-	比抵抗	ツール温度	比抵抗	比抵抗	比抵抗	ツール温度
	振動	密度	密度	密度	密度	密度	密度	密度	密度
	-	中性子	中性子	中性子	中性子	中性子	中性子	中性子	中性子
	ビット重荷	-	ビット重荷	-	ドリルカラー温度	ツール温度	ツール温度	ツール温度	-
	ビットトルク	-	ビットトルク	-	振動	振動	振動	タービン回転数	-
	坑内温度	-	ツール温度	-	坑径	-	坑径	-	-
	振動	-	-	-	-	-	-	-	-
	坑径	-	-	-	-	-	-	-	-

表5 坑井内測定の耐温性の現状

		耐温・耐圧仕様
ケーブル	TFE テフロン (7芯)	温度315℃
	ミネラルインシュレーション (4芯)	温度600℃ ケーブル長3,500m以下
音波検査	BHC	温度600℃ 圧力25000psi
	DSI	温度175℃ 圧力20000psi
比抵抗検層	Dual Latero	温度260℃ 圧力25000psi
	Dual Induction	温度260℃ 圧力25000psi
	電気検層	温度315℃ 圧力20000psi
密度検層	Formation Density	温度260℃ 圧力25000psi
	Spectral Density	温度260℃ 圧力25000psi
中性子検層	Compensated Neutron	温度260℃ 圧力25000psi
	Dual Spaced Neutron	温度260℃ 圧力25000psi
放射能検層	Spectralog	温度260℃ 圧力20000psi
地球科学	Geochemical Log	温度175℃ 圧力20000psi
温度		温度315℃ 圧力25000psi
温度・圧力・流量	RTF Log	温度375℃
坑径	X-Y Caliper	温度260℃
坑壁イメージング	BHTV	温度315℃ 圧力20000psi
	CBIL	温度204℃ 圧力20000psi
	FMI	温度175℃ 圧力20000psi
	ARI	温度175℃ 圧力20000psi

DSI Dipole Shear Sonic Imager (Schlumberger社)
 PTF Pressure Temperature Flow Meter
 CBIL Circumferential Borehole Imaging Tool
 FMI Fullbore Formation MicroImager (Schlumberger社)

のは耐温性と、多種目の計測・観測を掘削経過のなかでどう位置つけて実行するかである。

掘削に際して必要な計測として Measurement While Drilling (MWD) 技術あるいは垂直掘進システムがある。MWDとは、掘削中に坑井の方位・傾斜、地層評価、掘削パラメータに関する坑底データを計測し、リアルタイムで地上へデータを伝送する技術である。MDW技術は、掘削作業時間の短縮による掘削コストの低減及び掘削作業の安全性の向上の点で超深層掘削には不可欠の技術である[13]。MWDについても、また坑井内測定についても現状では耐温性に問題がある(表4、表5)。

坑井を利用した長期観測としては、地震、歪み・応力、間隙水圧、温度・圧力等多種観測をデコルマ面を含む多深度レベルで行いたい。測定時期としては掘削中適宜、掘削後連続的あるいは繰り返し観測を行う必要がある。このための問題点としては、信号伝送、計測種目による競合等が考えられ、耐温性の問題とともに、具体的な掘削計画に即して問題点を抽出してゆく必要があろう。

KTBでは掘削終了後深部地殻観測施設としての利用が計画されている[6]。またコラでも同様な計画があり、これらの情報を入手することも重要である。

5. 日本の体制

残念ながらJUDGE計画はまだ案の段階ではあるが、各方面で実現へ向けて努力が積み重ねられている。大学では、静岡大学新妻信明教授を中心とする「陸上學術ボーリングワーキンググループ」により掘削候補地点が「陸上學術ボーリング候補地集I, II, III」としてまとめられている。

科学技術庁防災科学技術研究所、工業技術院地質調査所の研究者を中心とした「島弧超深度掘削推進協議会」が、ICDPへの積極的な参加を目指した関係省庁への働きかけ、島弧掘削実現に向けた具体的な検討、その重要性の各方面へのアピールやネットワーク作りなどを目指して活動を行っている。その活動の一環として、1993年1月に"Internal Workshop on Ultra-deep Scientific Drilling Tokyo 1993"、1996年2月に第8回掘削による大陸地殻観測に関する国際ワークショップを開催した。

さらに、日本学術会議は平成7年9月に地質学研究

連絡委員会からの対外報告として「国際陸上科学掘削計画(ICDP)への我が国の参加について」をまとめた。この対外報告は地質学研究連絡委員会・同ICDPワーキンググループ・第4部付置ICDP小委員会の審議結果をとりまとめたものであり、我が国の早期参加を各機関に要請している。

6. 謝辞

本稿は地質調査所における「JUDGEプロジェクト推進チーム」、つくばの研究所等で構成している「島弧超深度掘削推進協議会」での日常的な討議がもたっている。

7. 文献

- [1] 浦辺徹郎, 伊藤久男, 宮崎光旗, 池田隆司: 国際陸上科学掘削計画(ICDP)と日本列島における超深度掘削(JUDGE計画), 地質ニュース, 488号, 14-18(1995).
- [2] 斎藤実篤, 南房総地域における沈み込み現象—JUDGE計画の地質学的側面—, 地質ニュース, 488号, 24-27(1995).
- [3] Ishida, M.: Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 489-513, (1992).
- [4] Khakhaev, B.N., Lipilin, A.V., Mazur, V.B., Militenko, N.V., Pevzner, L.A.: Superdeep drilling in Russia. Progress and outlooks, *Proc. of VIIIth International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling*, 4-9, (1996).
- [5] Wohlgenuth, L., Tran, T. Viet, Engeser, B.: Drilling-experiences at the Ultra Deep Well KTB-HB, *ibid.*, 39-45, (1996).
- [6] Kuck, J.: GFZ-Deep borehole Lab, *ibid.*, 58-63, (1996).
- [7] Hickman, S., Zoback, M.D.: Scientific drilling in the San Andreas fault zone: Status of site characterization studies and the Parkfield pilot experiment, *ibid.* 25-29, (1996).
- [8] 田中彰一, 深層掘削技術の現状と課題, 地質ニュース, 488号, 48-52, (1995).

- [9] Yoshida, C.: Deep oil and gas well drilling in Japan, *Proc. of VIIIth International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling*, 46-51, (1996).
- [10] 内田利弘, 八木正彦, 佐々木宗建, 亀之園弘幸, 宮崎真一, 土井宣夫: NEDO 深部地熱資源調査の概要, 地球惑星科学関連学会1996年合同学会, p.104, (1996).
- [11] 斎藤清次, ドイツKTBの掘削技術と日本の超深度掘削への期待, 地質ニュース, 488号, 43-47, (1995).
- [12] Moos, D., Zoback, M.D.: Utilization of observations of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses, Application to continental, Deep Sea Drilling Project, and ocean drilling program boreholes, *J. Geophys. Res.*, 95, 9305-9325, (1990)
- [13] 杉山弘訓: MWD技術の現状及び超深層ボーリングへの適用, 地質ニュース, 488号, 53-57, (1995)