

# 深層ボーリング技術調査

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1997年3月

東洋エンジニアリング株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂 1-9-13  
動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technical Evaluation and Patent Office, Technology Management Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 ( Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation ) 1997

# 要 目

深層ボーリング技術調査

藤田 義夫\*  
村上 文啓\*\*  
鈴木 雅之\*\*  
樋口 和弘\*\*

要 旨

深層ボーリング研究計画達成のためには、精度の高い地盤データ等の取得用に高精度ボーリング技術を確立することが必要であり、従来のボーリング技術開発では、精度の高いかつ深いボーリングの要求・議論を満足するかどうかを考えると、未だに未解決な課題が存在する。

そこで、従来の最新ボーリング技術調査を基礎としつつ、他の最先端分野の技術を取り入れてより精度の高くかつ深いボーリング研究開発のために、国内外のボーリング技術レベルの調査を行い問題点を抽出し、高精度ひいては深層ボーリングシステムの確立に向けた要素技術開発及び適用試験項目と問題点の抽出・策定を行った。

特に孔曲がり制御技術、非泥水法技術を検討後、各種要素技術・適用試験項目等を検討した。

---

本報告書は、東洋エンジニアリング株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委記により実施した研究内容である。

契約番号：080D0378

事業団担当部及び担当者：環境技術開発本部 地層科学研究グループ 武田 精悦

\* プラント・エネルギー事業本部

\*\* 原子力設計部

March, 1997

Deep Boring Technological Survey Research

Yoshio Fujita\*

Tomohiro Murakami\*\*

Masayuki Suzuki\*\*

Kazuhiro Higuchi\*\*

Abstract

In order to practice Deep Boring Research Plan, it is important to establish more accurate direction boring techniques.

However, conventional boring techniques are not necessarily sufficient for future requirement of accuracy and environmental contamination prevention.

In this report, advanced boring techniques were summarized based on bibliographies, and were extracted the elementary and applicable test items for achievement of deep boring.

Especially, bending prevention techniques and non - mud drilling water techniques for boring were emphasized with view of proposition of elementary technique tests and applicable technique tests.

---

Work performed by Toyo Engineering Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : Geosciences Research Program Radioactive Waste Management

Project(Seietsu Takeda)

\* Plant and Energy Sales and Operations

\*\* Nuclear and Electric Power Engineering Dept.

まえがき

まえがき

深層ボーリングに係わる文献については、従来学術的立場から超深度ボーリング技術調査として、ロシアやドイツを中心に実績ある長距離ボーリングに関わる数多くの報告が存在し、かつそれらの中にはボーリング機器の仕様や掘削プロセスなどが詳細に記載されているものも存在する。

一方、地熱開発分野あるいは石油開発分野についても同様に、精度よく深いボーリング技術が重要であることから、それぞれの分野で独自に深掘りや泥水をテーマに深掘りボーリング技術が検討され、報告書も発行されている。

本報告書では、これら各分野独自に開発・進歩してきたボーリング技術を全般的技術レベルとしてまとめ、近い将来高精度なボーリングを実施するための開発項目を抽出するための文献調査を実施した。

調査結果をまとめるにあたり、各ボーリング機器の仕様等、実際に掘削する場合に必要な機器データは他の文献に詳しく記載されているため、ここでは省略した。

ただし、高精度あるいは深層ボーリングの技術的工法のうち特に孔曲り防止技術としてはKTBで実績のあるVDS (Vertical Drilling System) 法、非泥水工法としては石油開発分野で実績のあるエアドリリング法について具体的な仕様とメカニズムを強調して記載した。

さらに、レーザー技術等最先端技術のボーリング適用性について検討した。

また、将来要素技術研究項目及び適用試験についてはどのような要素技術について開発できるのか、どのようなアプローチをすればよいのかの見通しについて知識人のコメントを反映しつつ提案した。

# 目 次



## 目 次

1. ボーリングの現状調査及び問題点の抽出 .....	1
1.1 諸外国の深層ボーリングに関わる調査及び研究開発項目の抽出 .....	1
1.1.1 ロシア (旧ソビエト連邦) .....	1
1.1.2 ドイツ .....	4
1.1.3 スウェーデン .....	13
1.1.4 アメリカ合衆国 .....	17
1.2 我が国の深層ボーリングに関わる調査 .....	19
1.3 高精度ボーリング技術調査 .....	26
1.3.1 ボーリング指向掘進技術 .....	29
1.3.2 非泥水掘削技術 .....	43
1.3.3 ボーリング孔を利用した調査技術 .....	52
1.3.4 エアドリル技術 .....	55
1.3.5 傾斜ボーリング技術 .....	65
1.4 地層科学関連調査ボーリングに関わる調査 .....	69
1.4.1 アメリカ合衆国 .....	69
1.4.2 イギリス .....	73
1.4.3 スウェーデン .....	76
1.4.4 カナダ .....	80
1.4.5 フィンランド .....	82
1.4.6 スイス .....	86
1.4.7 フランス .....	86
1.5 第8回陸上ボーリングによる観測国際シンポジウム (Feb'96) の概要 .....	88
2. 応用技術及び適用試験項目の検討 .....	91
2.1 他分野の最新技術のボーリングへの適用検討 .....	91
2.1.1 GPS技術 .....	91
2.1.2 レーザー技術 .....	91
2.2 高精度ボーリングシステム研究開発基本項目の策定 .....	95
2.3 深層ボーリング要素技術研究項目の検討 .....	98
2.4 深層ボーリングシステム適用試験基本項目の検討 .....	100
3. まとめと今後の課題 .....	105

参考文献

# 表 目 次

## 表 目 次

表1.1.1-1	ロシア及び旧ソビエト連邦で実施された学術ボーリング	2
表1.1.2-1	KTB VBボーリングの仕様	12
表1.1.2-2	KTB HBボーリングの仕様	12
表1.2-1	NEDO葛根田地熱ボーリングWD-1Aで検討された ボーリング機器の温度限界	22
表1.2-2	我が国の石油開発関係陸上長距離ボーリング	24
表1.2-3	我が国の観測孔長距離ボーリング	24
表1.3.1-1	村田式測定器による孔曲り測定記録	35
表1.3.1-2	イーストマン測定器による孔曲り測定記録（掘削時）	36
表1.3.1-3	MWD測定器による孔曲り測定記録（掘削時）	39
表1.3.2-1	有明中央海域海上試錐（深度1,000mクラス）	50
表1.3.2-2	主要機器類（有明海上試錐）	51
表1.3.4-1	エアドリル用所要空気量	64
表1.4.1-1	ユッカマウンテンでのUSWH-4ボーリングの地下水化学組成	72
表1.4.3-1	SKBで実施したボーリング孔地下水化学組成（分析限界値）	78
表1.4.3-2	SKBで実施したボーリング孔地下水化学組成	79
表1.4.4-1	AECL URL WNシリーズボーリング孔地下水化学組成	83
表2.1.2-1	新しいドリル	94
表2.2-1	高精度ボーリング要素技術研究項目	97
表2.3-1	深層ボーリング要素技術研究項目	99

# 目 次

## 目 次

図1.1.1-1	SG-3孔とKTBメイン孔と三島孔の地温と深度の関係	3
図1.1.1-2	SG-3孔周囲の地質	5
図1.1.1-3	SG-3孔地温プロファイル	5
図1.1.2-1	KTBで用いられたVDS (Vertical Drilling System) と孔曲り長さ	7
図1.1.2-2	KTBのVDSシステム	8
図1.1.2-3	KTBでのパイロット孔 (VB孔) とメイン孔 (HB孔)	10
図1.1.2-4	KTB地表施設	11
図1.1.2-5	KTBの応力と深度の関係	14
図1.1.2-6	KTBで検討されたボーリング機器の温度限界	15
図1.1.3-1	スウェーデンGravberhgl号井	16
図1.1.4-1	米国サンアンドレアス断層ボーリング概念	18
図1.2-1	地質調査所JUDGE計画概念	20
図1.2-2	南房総地域のプレート沈み込み概念	21
図1.2-3	NEDO葛根田地熱ボーリングでの温度と深度の関係	23
図1.3-1	リバーササーキュレーションボーリング工法	28
図1.3-2	孔曲り概念	28
図1.3-3	孔曲り測定法	30
図1.3.1-1	増角の方法	32
図1.3.1-2	沿角の方法	32
図1.3.1-3	減角の方法	32
図1.3.1-4	ホイップストック	33
図1.3.1-5	泰荘地震観測井完成構造図	35
図1.3.1-6	防災科研地殻活動観測井完成構造図	37
図1.3.1-7	MWD工法 データ採取システム概念図	38
図1.3.1-8	地上システム概念図	40
図1.3.1-9	EM-MWDシステムの概念図	41
図1.3.1-10	孔底機器の概略図	41
図1.3.2-1	掘削流体循環の模式図	44
図1.3.2-2	リバーササーキュレーション・エアハンマーコアリング工法概念図	46
図1.3.2-3	地質層序	49
図1.3.2-4	ケーシング模式図	49
図1.3.2-5	孔芯図 (A 5 試錐)	50
図1.3.3-1	1,000m対応採水装置概念図	54
図1.3.4-1	掘進率と静水圧 (流体コラム圧-間隙流体圧) の関係	56
図1.3.4-2	コーンビットのプランク	57
図1.3.4-3	スタンドパイプ上のバルブマニホールド	59

図1.3.4-4	回転ドリルヘッド	59
図1.3.4-5	ブースター	60
図1.3.4-6	ブルーイライン	60
図1.3.4-7	エアジェット	61
図1.3.4-8	デダスター	61
図1.3.4-9	サンプルキャッチャー	61
図1.3.4-10	圧力記録装置	62
図1.3.4-11	バーンビット	62
図1.3.4-12	パケットホール技術	66
図1.3.5-1	ドリルカラー重量と傾斜対策の関係	67
図1.4.1-1	ユッカマウンテンUSWH-4ボーリング孔位置	70
図1.4.1-2	ユッカマウンテンUSWH-4ボーリング水使用量と深度の関係	71
図1.4.1-3	深層ボーリング孔を利用したキャニスター埋設構想	74
図1.4.2-1	セラフィールドボーリング孔位置	75
図1.4.2-2	セラフィールドボーリング孔断面	75
図1.4.2-3	セラフィールド区域の地下水流れ概念	77
図1.4.2-4	セラフィールド区域の地下水水頭概念	77
図1.4.3-1	SKBで開発した地下水採取分析システム	78
図1.4.3-2	SKBで開発した地下水のEhとpHの関係	79
図1.4.4-1	カナダ Whiteshell ボーリング位置	81
図1.4.4-2	カナダ Whiteshell ボーリング地下水採取分析システム	81
図1.4.4-3	AECL URL WNシリーズボーリング位置	83
図1.4.5-1	フィンランドサイト選定ボーリング位置	84
図1.4.5-2	フィンランドサイト選定ボーリングでの塩素濃度と深度の関係	85
図2.1.1-1	GPS (Global Positioning System) 概念	92
図2.1.1-2	GPSの精度	92
図2.1.2-1	レーザによる岩石掘削概念	94

# 第 1 章

## 1. ボーリングの現状調査及び問題点の抽出

### 1.1 諸外国の深層ボーリングに関わる調査及び研究開発項目の抽出

諸外国で実施されたあるいは実施中のボーリングについて、深部を目標としたボーリングを中心に精度向上の視点から国別に概要、工法、特異点を調査した。

ここでいう「深層ボーリング」とは、一般にいわれている「超深度ボーリング」を含む深掘りボーリングとほぼ同義語である。超深度ボーリングとは、一般には孔底200mm程度の直径で、6km以上の垂直孔のことであり、学術的な研究を目的としているものが多い。

超深度ボーリングは深部地層の諸問題を解明することを主目的として、現在いくつかの地点で10kmを目標としたボーリングが実行され、または計画が進行中である。

以下に国別に、これらの現状を述べる。

#### 1.1.1 ロシア（旧ソビエト連邦）

現在までに中央シベリア西部に12か所以上のボーリングを実施しており、中でもコラ半島のSG（Super Deep）-3孔は世界最深で、12,260mに達している（コラ半島Pechenga-Zapolyarnyy区域、北緯69度、東経31度）。

表1.1.1-1にロシアで実施された4,000m級以上の深層ボーリングの深度及び掘削期間、対象岩盤を示す<sup>1)</sup>。この表から、Kola（SG-3孔）以外でもTumenの7,502mをはじめ3,000m～7,000m級の結晶質岩、堆積岩で覆われた火成岩、しゅう曲帯を対象とした19本のボーリング実績があり、全長11kmに及ぶことがわかる。

深層ボーリングが技術的に困難な理由として地熱が300℃を超えると軽合金パイプの強度が低下し、また掘削泥水及びセメンチングがこの温度に耐えられないこと、また地殻圧力が大きくなり孔が崩壊すること、掘削方向のコントロールできなくなるなどがあげられている。

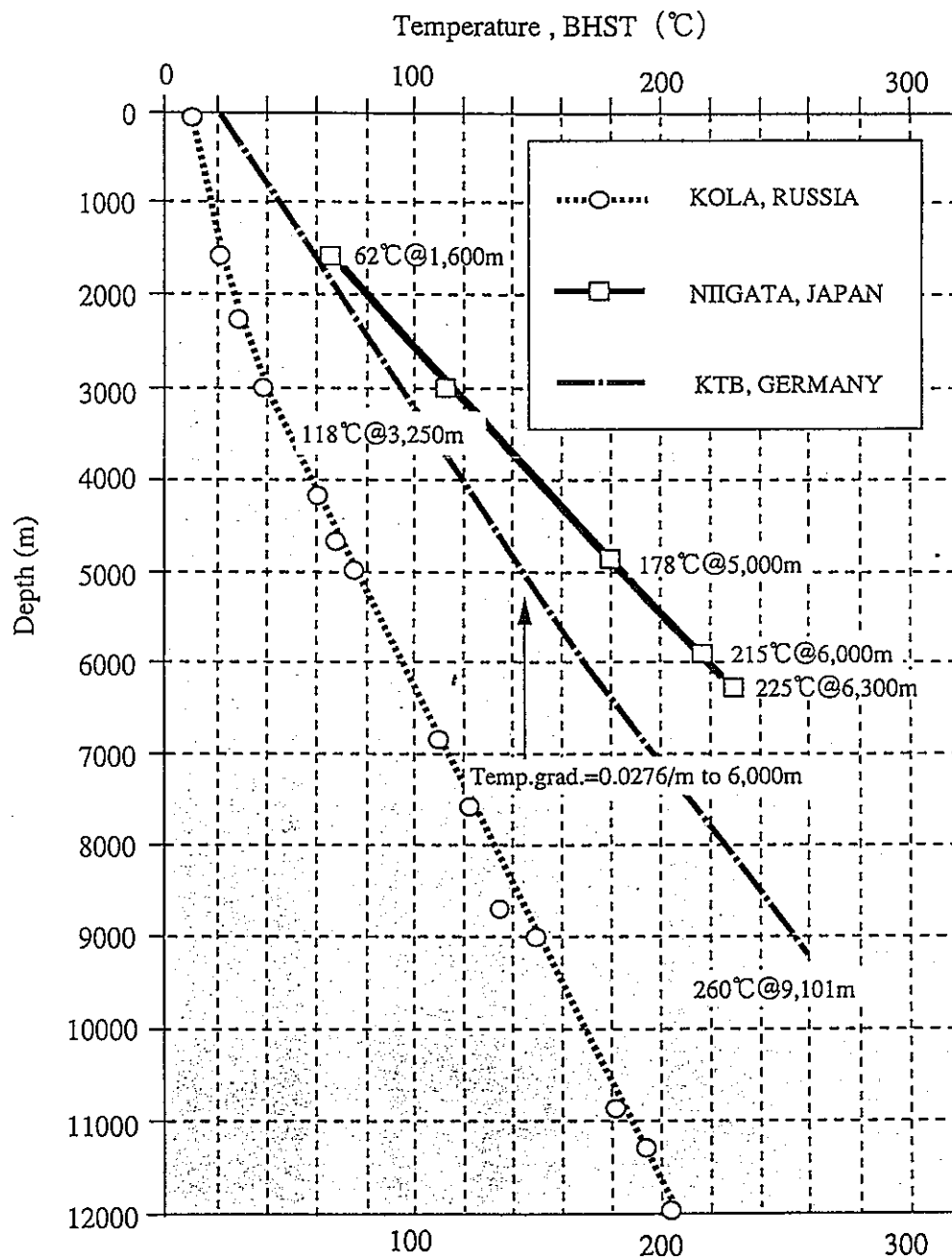
図1.1.1-1にはSG-3孔の他にドイツKTB HB孔（9,101m）、日本新潟県石油開発三島孔（6,300m）の深度と地温の測定値を示す<sup>2)</sup>。SG-3孔では地温勾配は1.7℃/100m、KTBメイン孔では2.8℃/100m、日本石油開発三島孔では3.6℃/100mであり、日本では地温勾配が大きいことがわかり、また深層ボーリングの達成には最高温度200℃程度以上になるとかなり困難であることがわかる。サイト設定には地温勾配及び最高温度200℃を超えるかどうか重要な要素となると考えられる。

なお、SG-3孔では10km以深の採取岩石の特性データを用いて廃棄物貯蔵のための空



表1. 1. 1-1 ロシア及び旧ソビエト連邦で実施された学術ボーリング

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			



Geothermal Gradient Comparison

図1.1.1-1 SG-3孔とKTBメイン孔と三島孔の地温と深度の関係 (BHST:ボーリング孔温度)

洞建設の可能性を検討している。SG-3孔周囲の地盤の熱特性調査を実施し、heat fluid flow data, HFDが30-68mW/m<sup>2</sup>と変化していることを示し、これに基づき熱流体流れをシミュレートし2次元差分多孔質媒体モデルを用いたSG-3孔周囲の対流-熱伝導モデルを開発している<sup>3)</sup>。

図1.1.1-2にはSG-3孔周囲での熱対流-熱伝導モデルの対象となった地質分布（SG-3孔周囲は塩基性火成岩が主体）を、また図1.1.1-3には検討結果の1例としての地温プロフィール（10kmで約200°C）を示す。このように地温・熱の研究は深層ボーリング達成の不可欠要素である。

SG-3孔以外のボーリングとしてUral地区では15,000mを目標にしゅう曲帯を対象としてボーリングを1985年より開始し、1996年で5,350mに達した。このボーリング孔には426mmケーシング（steel）を3,942mまで使用している。（表1.1.1-1参照）

Tumen Superdeep Well（ツーマン超深度ボーリング孔）では8,000mを目標に堆積岩で覆われたbasalt（玄武岩）を対象としてbaryte-bentonite mud（1.92の比重）を用いて7,502mを掘削した。孔底温度は215.9°Cであった。（表1.1.1-1参照）

また、今後の研究としてSG-3にDeep Geolaboratoriesが建設され、各方面・分野に利用を呼びかけている。

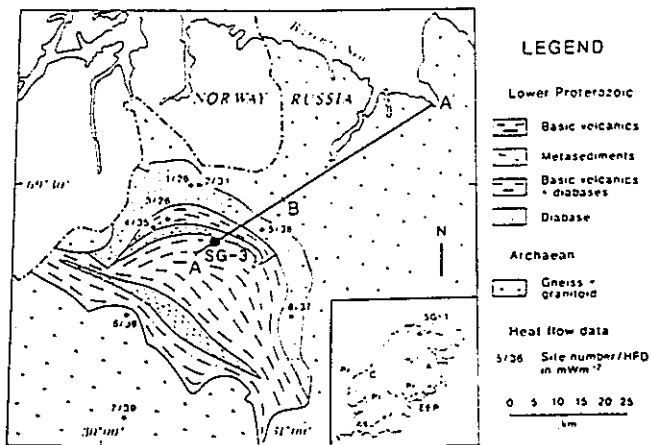
今後の研究開発項目として、高温高圧、腐食性や摩耗性などの過酷な環境に耐える各種の素材の開発や、センサー技術、地中での特殊な情報伝達システムの要素技術の新規開発などを挙げている。

### 1.1.2 ドイツ

ドイツではKTB計画（大陸超深度ボーリング計画、Kontinentales Tief Bohr）を単国体制で進めてきた。これはドイツ連邦政府研究技術省がプロジェクト費用340億円（うち掘削費50%）をかけて参加国11ヶ国体制で実施してきた陸上深層ボーリング計画である。実施期間は1982年～1994年（前準備期間1982年～84年、掘削期間1990年10月～94年12月）で、パイロット孔（4,000m, VB孔）とメイン孔（9,101m, HB孔）を掘削した。掘削場所は地温勾配が小さい（14,000m深度でも300°C以下と推定された）WindischeschenbachのOberpfalz地区である。

KTBの目的として下記の5項目をあげている。

- ① 地殻はどのようにして作られたか、地殻の構造はどうかを調査する。



Geological map of the deep drill-hole area with HFD data points (Table 1). Simplified from Nalivkina *et al.* (1987). Abbreviations in the inset are: A = Archaean, Pr = Proterozoic, C = Caledonides, EEP = East European Platform.

図1.1.1-2 SG-3孔周囲の地質

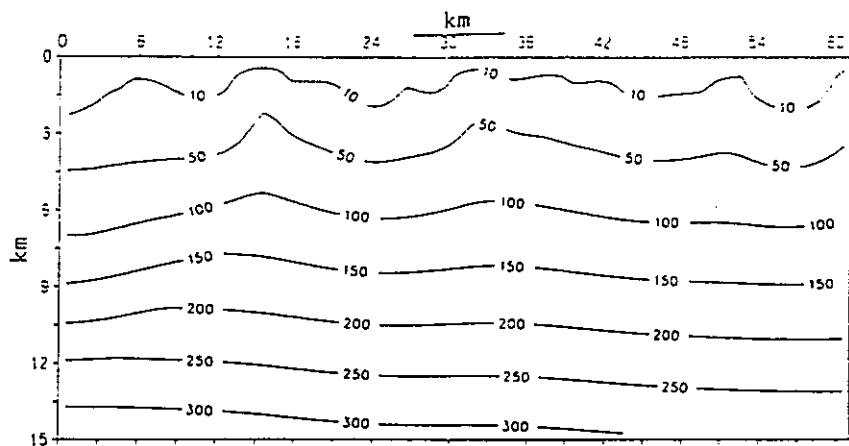


図1.1.1-3 SG-3孔地温プロファイル

- ② 化学組成成分はどのような構成かを調査する。
- ③ どんなガス相や揮発相があるのか調査する。
- ④ 温度/圧力挙動を調査する。
- ⑤ 岩盤の異方性を調査する。

KTBの掘削技術で孔曲り対策として、特に重要なものにVDS (Vertical Drilling System) システムがある<sup>4)</sup> (図1.1.2-1)。従来のドリル技術での傾斜制御は難しいため、VDSを用いてスタビライザをベースとしたステアリング操作を主体とした垂直掘削 (ダウンホール式) を実施することにより、7,000mまでは孔曲り精度は15m以内であった。

ここでVDSについて技術的な掘り下げを行う<sup>5)</sup>。

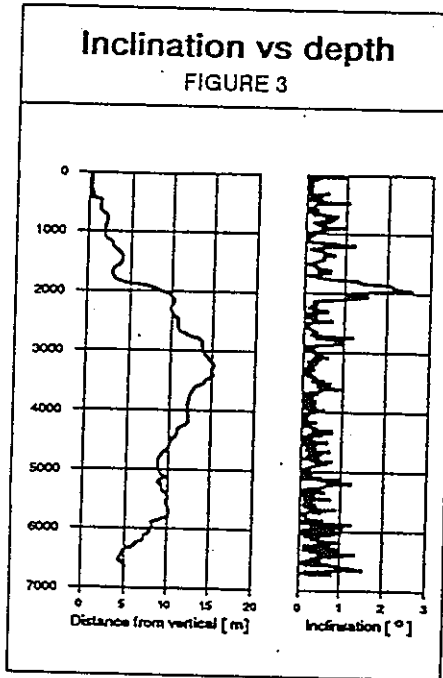
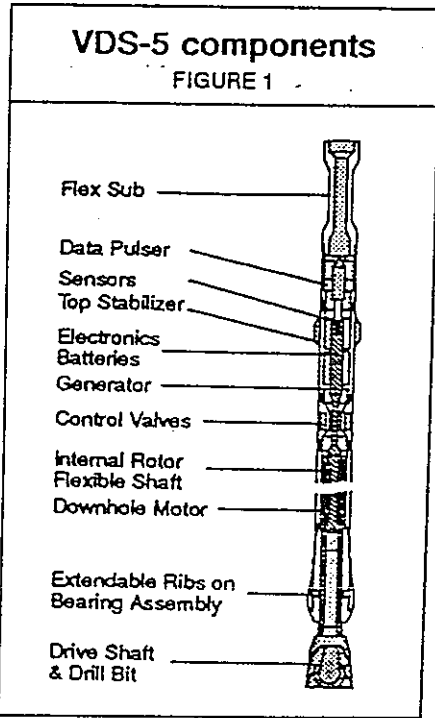
ドリルビットの上にVDSは付けられる。ビット直上の方向制御により、孔井の掘削偏距は調整される。

すなわち、孔底センサーにより偏距が感知され、エレクトロニクスによりソレノイドバルブが開けられる。ソレノイドバルブが開くことにより、圧力流体がピストンシリンダーに流れ込む。水圧ピストンがビットにおける偏距力を制御しスタビライザに半径方向の力を発生させる。傾斜、温度などの情報は泥水パルス通信装置により送信される。また、センサーが方向パラメータを決定する。現データはプロセッサにより指標パラメータと比較する。もし、相互のパラメータに違いがあれば、プロセッサにより、方向調整機能を引き起こす。VDSシステム全体を図1.1.2-2に示す。

VSDのシステムは、孔底ツール、泥水掘管、圧力センサー、地表のコントロールユニット及び遠隔表示装置、ダウンホールモーター関連設備及び外側鞘管、回転シャフト、モーターのユニバーサルジョイントより成る。鞘管は水圧により起動する4つの方向転換リブ (steering rib) があり、要求に応じて半径方向の力を発生させる。地層の不均一性により掘削ビットに横方向の力が加わると、方向転換装置により半径方向の力が生じることになる。

最新バージョンVSD-5は負の水圧方向転換装置を持っている。垂直に掘進しているときは全ての4つのリブはリブの下のピストンから水圧を受け、中心に位置取りがなされることになる。もし、傾きが生じて方向転換が行われる場合には、孔井の低圧側ピストンの圧力供給が遮断される。このことより、圧力遮断されたリブと反対側のリブが孔井低圧側に方向転換することになる。

このVSDを用いて陸上深掘計画の一環としてドイツ内で80回以上の掘削が行われた。



*(Adapted from "Vertical Drilling Technology: A Milestone in Directional Drilling", SPE/LADC 25759, presented at the 1993 SPE/LADC Drilling Conference, held Feb 23-25 in Amsterdam.)<->*

図1.1.2-1 KTBで用いられたVDS (Vertical Drilling System) と孔曲り長さ

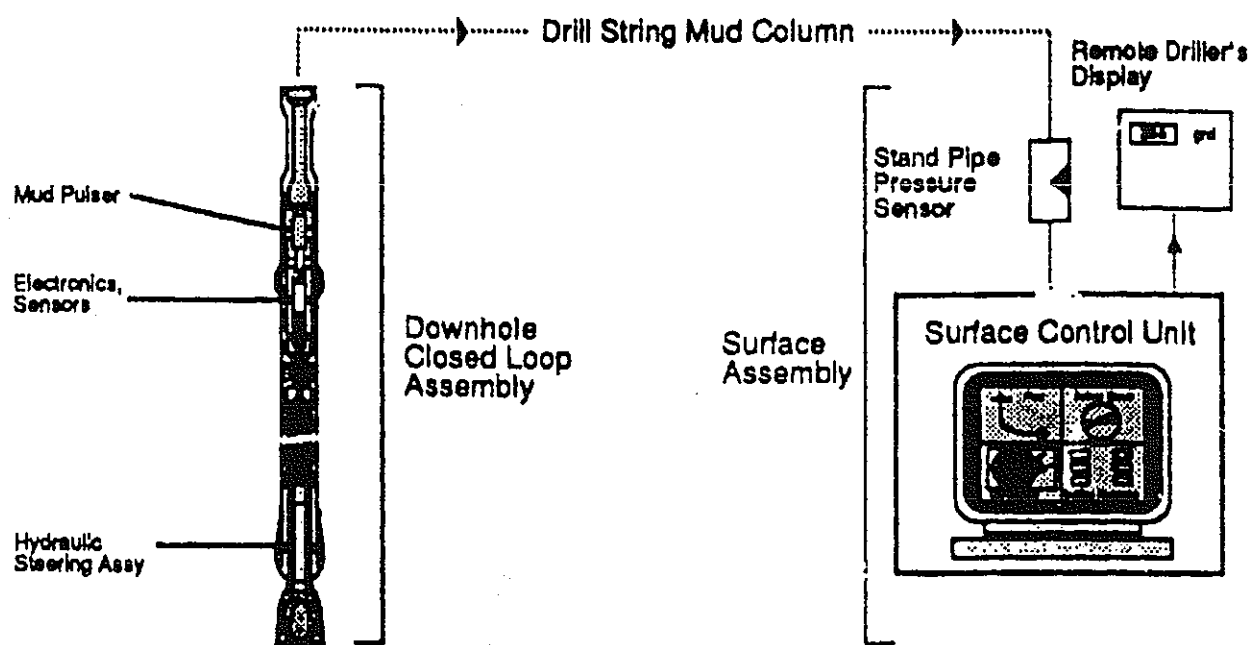


図 1.1.2-2 KTB の VDS システム

6,760mまで掘削された孔井の孔跡の断面図を図1.1.2-1に示す。孔井の傾斜は1度以下であり、6,700m時点での垂直からのズレはわずかに4mである。

現在でも、VSD改良が試みられているが、目標はいかなる方向でも掘削しうる自動方向制御掘削装置である。

VSD-5はexternal negative steering device (曲りを補正するため特殊なスタビライザーを備えた装置) ステアリングツールを有し、センサー、エレクトロニクス、動力の供給、流体関係装置及び関連する機械的部分は200°C (390° F) の温度、8,000m深度相当の条件下で稼働するように設計されている。

KTBプロジェクトでは2つのboreholeがある<sup>①, ②, ③</sup>。即ちVB孔とHB孔である。この2孔間距離は200mである。図1.1.2-3~4の対象岩石は主に、Crystalline metamorphic rock (結晶質変成岩) で、60° 以上のへき開を有する地殻岩盤である。表1.1.2-1, 2及び下記には2ボーリングの仕様及び結果を簡単に示す。

#### (1) VB孔

Dehydrill HT (スクメタイトの一種) を0.8~2.5%含有し、pHが9~11相当で比重1.0の掘削水を用いたトップドライブ方式 (ロータリー方式及びワイヤーライン方式) で、掘削日数は560日であった。

対象岩石は角閃岩と準片麻岩であり、褶曲や断層が多数存在していた。

孔曲り対策として、ビット及びコアバーレル間の口径差を極力小さくし、かつ方向制御のための掘削を3回実施した。その結果1,000mまでは1m、4,000mで4mのズレにおさまった。

ジャーミングによるサイドトラッキング (枝掘り) も実施した。

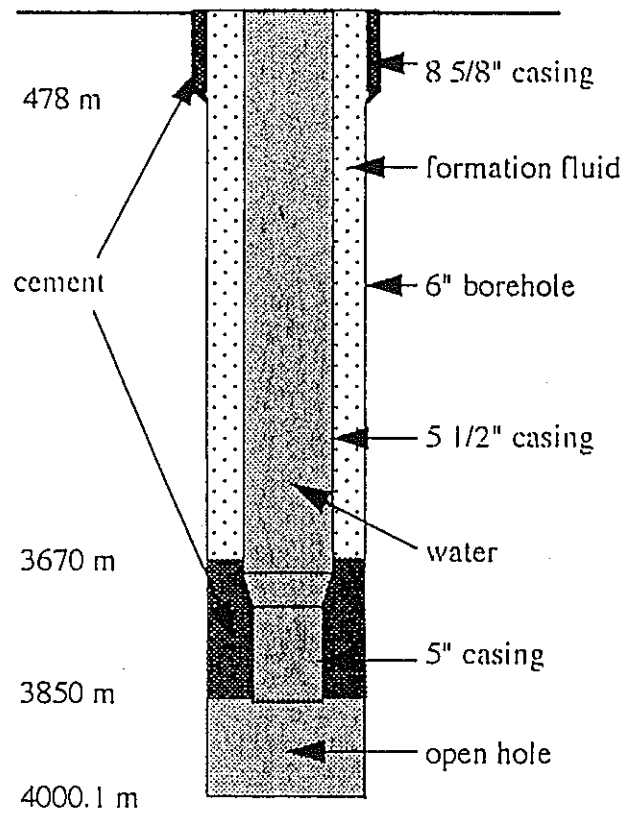
#### (2) HB孔

ダウンホールモータを基本として掘削を実施した。ここで孔曲り防止対策としてVDS (Vertical Drilling System) を世界で最初に開発・適用した。

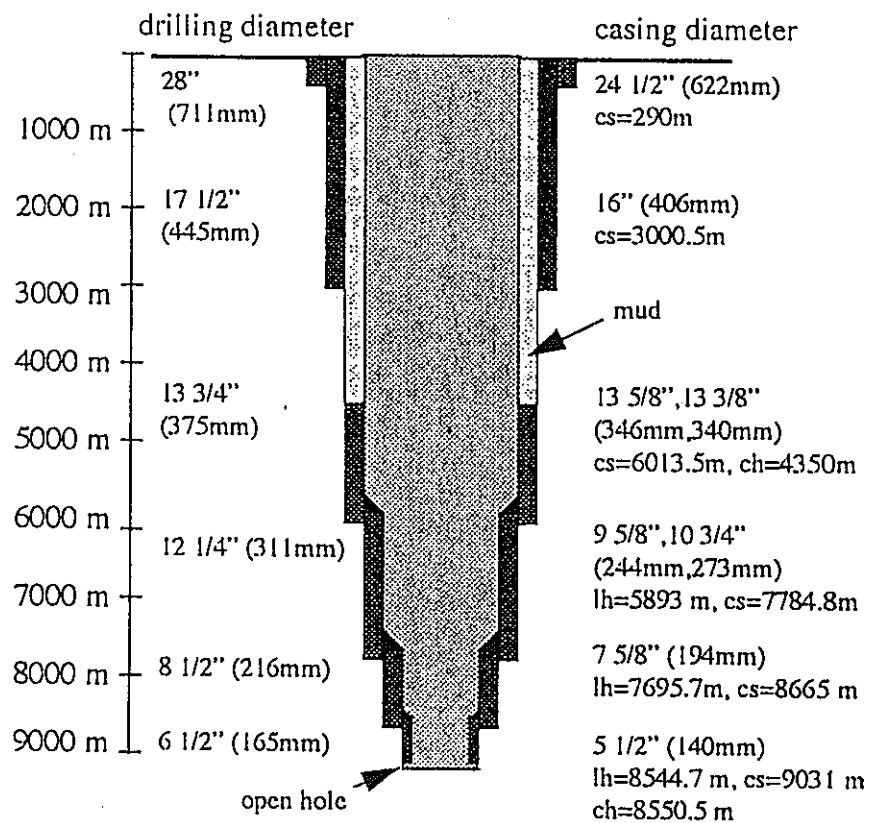
掘削水は、深度0~2,100mはDehydrill HTを、7,220mまではDehydrill HTの他にHostadrill 3118ポリマー系材料を1.5%添加した泥水を、それ以深ではPyrodrill (ベントナイトとAMPS系ポリマー主体) 泥水を用いた。

傾斜感知センサー、ステアリング部リブ4個を用いて孔曲り防止を実施したが、耐





Casing & cementation scheme KTB pilot hole, VB.



■ = cement cs = casing shoe ch = cement head lh = liner head

図1.1.2-3 KTBでのパイロット孔 (VB孔) とメイン孔 (HB孔)  
 (下図中 mud は、5,893m からのセメンテーションを行ったものの、  
 3,000.5m まで達していないことを示す)

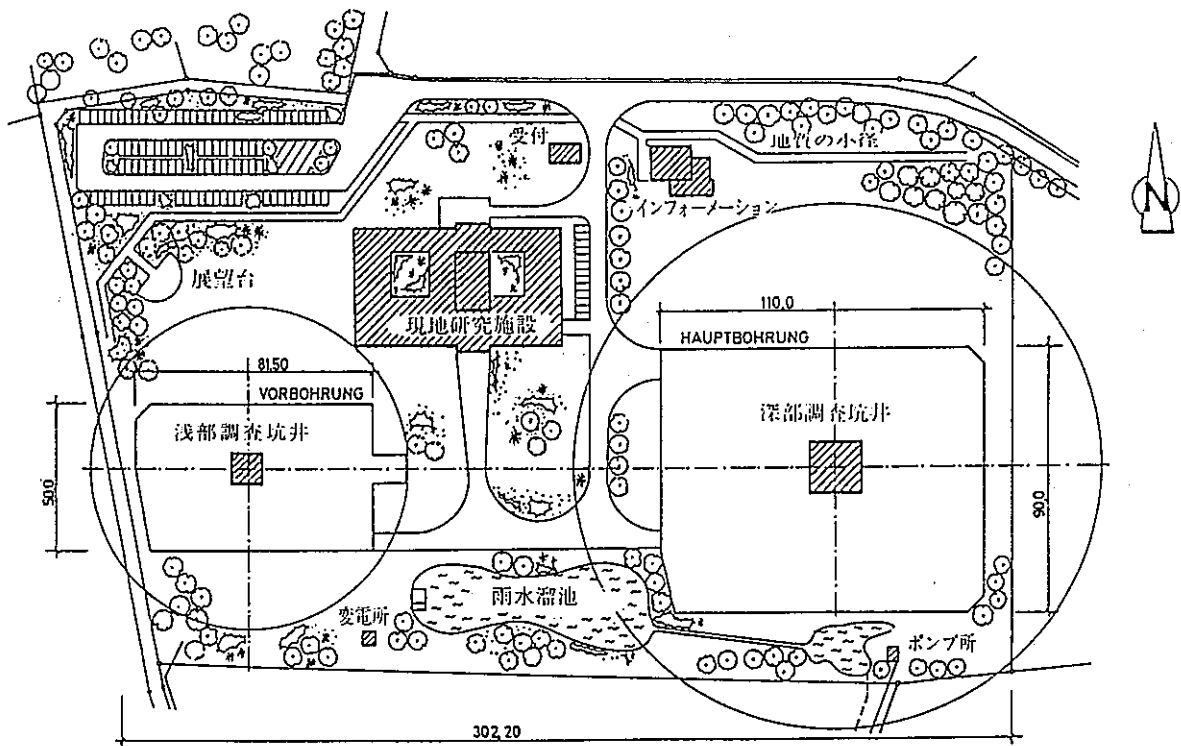


図1.1.2-4 KTB地表施設

表 1.1.2-1 KTB VB ボーリング仕様

Technical specifications of the pilot borehole VB:

total depth:	4000.1 m ( <i>dd</i> )
latest accessible depth:	3997 m ( <i>ld</i> )
cased hole section:	0 - 3850 m ( <i>dd</i> )
open hole section:	3850 m - bottom hole
difference $\Delta z = ld - dd$ depends on depth: +1m/1000m, e.g. at 4000 m $\rightarrow \Delta z = 4$ m.	
latitude:	49° 48.98' N
longitude:	12° 7.16' E
height above sea level:	513.4 m (ground level)
smallest ID:	108.75 mm
mud weight: (water)	1000 kg/m <sup>3</sup>
pressure bottom hole:	39.2 MPa
expected temperature at BH:	ca. 120°C (248°F)
temp. gradient, $\Delta T/\Delta z$ :	27.8 K/km
maximum hole inclination:	11.5° at 1065 m
drilling time:	18-SEP-1987 - 04-APR-1989, 560 days
long logging/testing phase:	APR-1989 - OCT-1990

表 1.1.2-2 KTB HB ボーリング仕様

Technical specifications of the main borehole HB:

total depth:	9101m ( <i>dd</i> )
latest accessible depth:	9085m ( <i>ld</i> )
cased hole section:	0 - 9031m ( <i>dd</i> )
open hole section:	9031m - bottom hole
$\Delta z = ld - dd$ depends on depth: 0-8050m: approx. +1m/1000m, e.g. at 8050m $\Delta z \approx 8$ m. In the latter stages of drilling after kick off at 7800m the difference is not well known. Reliably are only the liner shoe marks: at 7800m $\rightarrow \Delta z \approx 9.7$ m; at 9031m $\rightarrow \Delta z \approx 6.2$ m.	
latitude:	49° 48' 58.8" N
longitude:	12° 07' 19.2" E
height above sea level:	513.8 m (ground level)
smallest ID:	at least 98 mm (casing deformation at 8663m), probably 105 mm
mud pH	11.4 at surface
mud weight: (water/ <chem>Na2CO3</chem> solution)	1170 kg/m <sup>3</sup>
pressure bottom hole:	104.5 MPa
maximum recorded temperature:	256°C (493°F) at 9070 m ( <i>ld</i> )
expected temperature at BH:	260 - 270°C (518-536°F)
temp. gradient:	27.8 K/km
maximum hole inclination:	20° at 8647 m
drilling time:	06-OCT-1990 - 12-OCT-1994, 1468 days
no operations within the well since:	16-JAN-1995

熱性を考慮して（200°Cまでが限度）、7,000mまで使用し、それ以深は使用をやめた。従って孔曲りは7,000mまでは2°以内であった。それ以深8,600付近で21°となった。

この掘削孔を利用した研究活動としては、地殻応力の絶対値と深さの関係及びテクニクスによる応力方向を調べた研究がある（図1.1.2-5）<sup>9),10)</sup>。

この結果、深さ4,000mに対して水圧破壊法による応力値は110MPaであった。

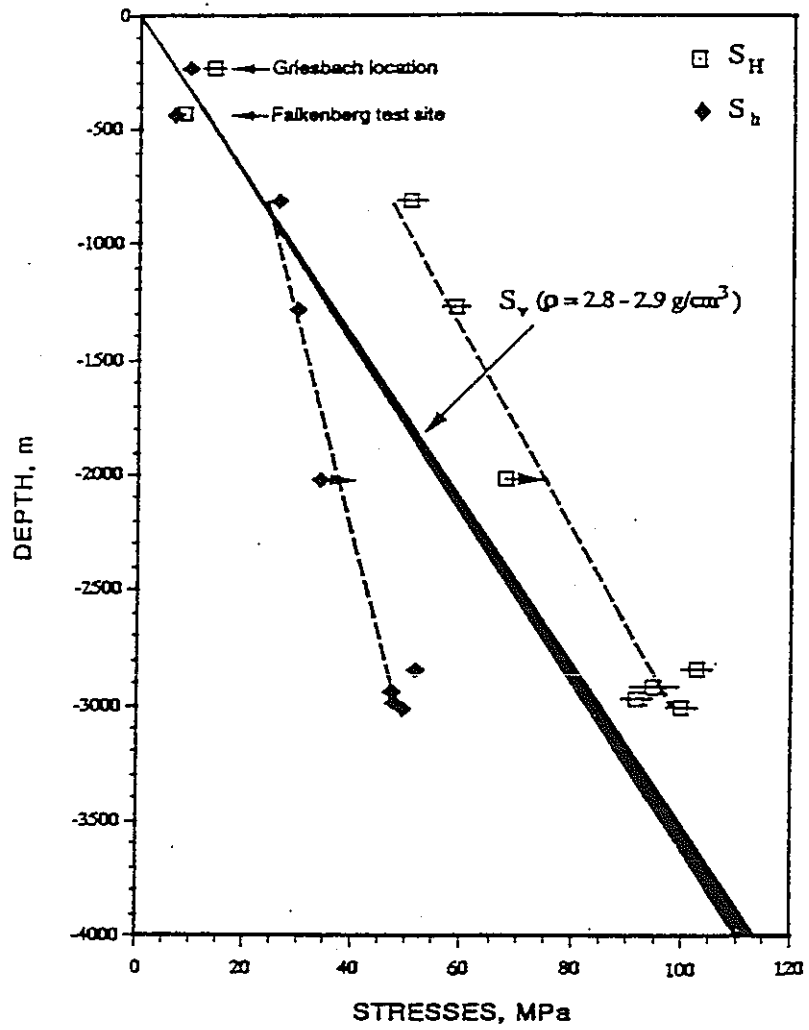
また、KTBサイトでのGFZ（Geo Forschungs Zentrum：ドイツ地球科学研究センター）では、KTB孔跡を利用した各種研究を呼びかけており、1996年1月スタートで5年間を目標に実施する計画である。これはGFZ-TO（Tiefenobservatorium）planを基金としている。

例えば、1999年までに水圧（透水）試験を実施し、乱されない状態での温度測定を実施する計画が挙げられている。また将来ボーリング孔に関わる調査・研究項目として40項目を挙げている（図1.1.2-6）。たとえば、

- ① 温度による各drill rodsと付属ツールの限界値を調査する。研究費用として13.5百万DMである。
- ② ドリルリグを8年間寿命をもたせる研究を実施する。

### 1.1.3 スウェーデン

原子力に替わる代替エネルギーを新規に開発する必要性から、スウェーデン中央部付近の隕石が衝突して形成されたクレータ周辺部に深層ボーリングを実施し、マントル起源とされるメタンを主成分とする深層ガスの開発計画（シルヤンクレータ掘削計画）がある。実施したのはスウェーデン国営電力会社Vattenfallである。1986年～1988年にかけて7,500mを目標にしてボーリングが数回試みられたが、孔内トラブルで目標深度まで到達出来ず、有望なガスが発見されたとの報告も聞かない。Vattenfall社は探査ボーリング会社Dala Djuggas Provborrhningar（DDP）を設立し、約40億円（うちVattenfall社負担は半分）をかけてGravberhgl号井を実施した。深度6,000m付近では逸泥水やジャーミングが発生した。しかしこのトラブルは花崗岩がガス貯留層を有する兆候であることを示した。また孔曲りも5,000m以降大きくなり、枝掘りを2～3回実施した<sup>11)</sup>。（図1.1.3-1）



水圧破壊法による応力値の深さ分布 (Baumgärtner et al., 1990)

図1.1.2-5 KTBの応力と深度の関係

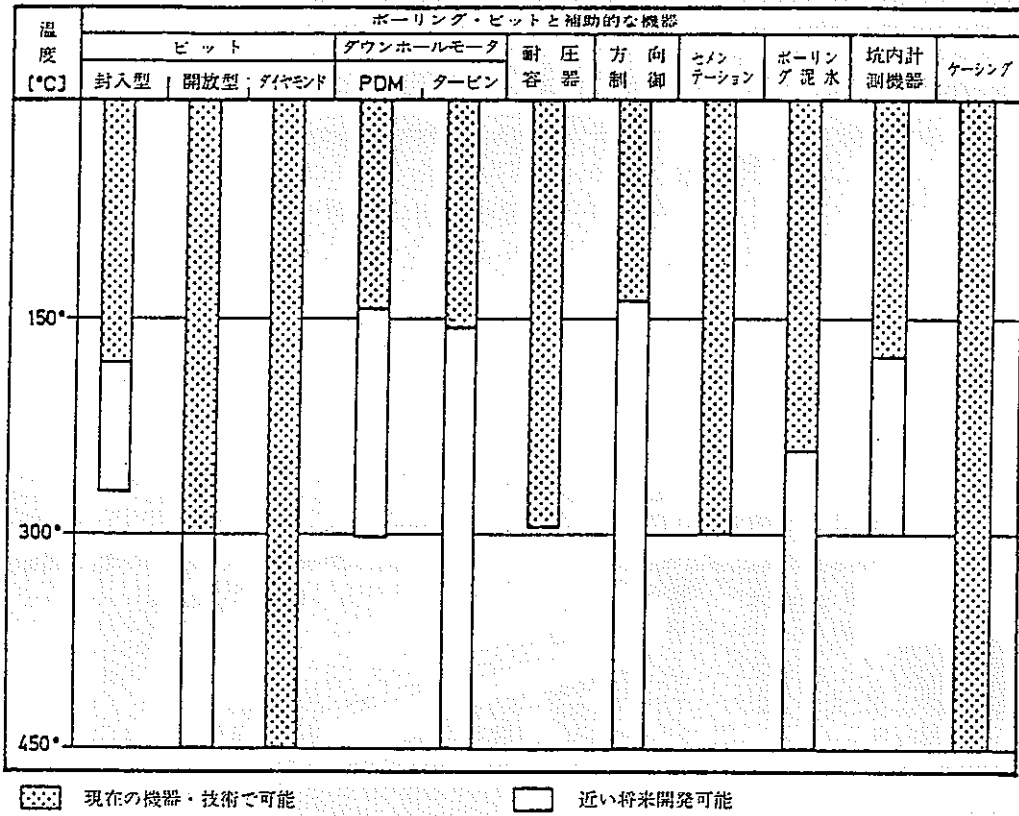


図1.1.2-6 KTBで検討されたボーリング機器の温度限界

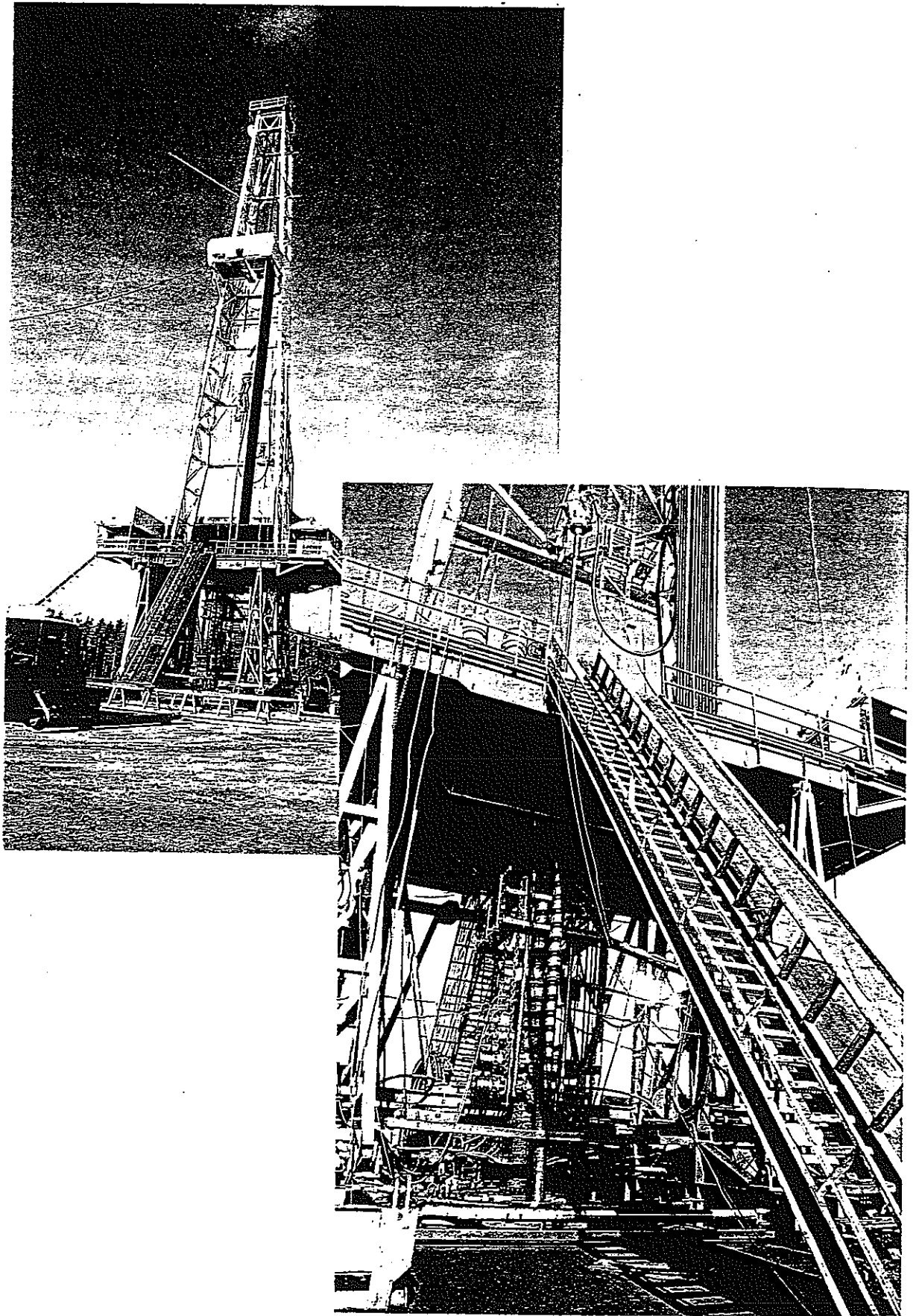


図1.1.3-1 スウェーデンGravberhg1号井

#### 1.1.4 アメリカ合衆国

陸上での深層ボーリングの実績としては、世界最長レベルに匹敵したものは現在のところ存在しない。ただ、米国石油業界は10km～15kmは技術的には可能であるとしており、9kmを超える石油調査井の実績は存在する。超深度ボーリング計画としては、米国大陸学術掘削計画（U. S. CSDP）があり、下記の目的を挙げている。

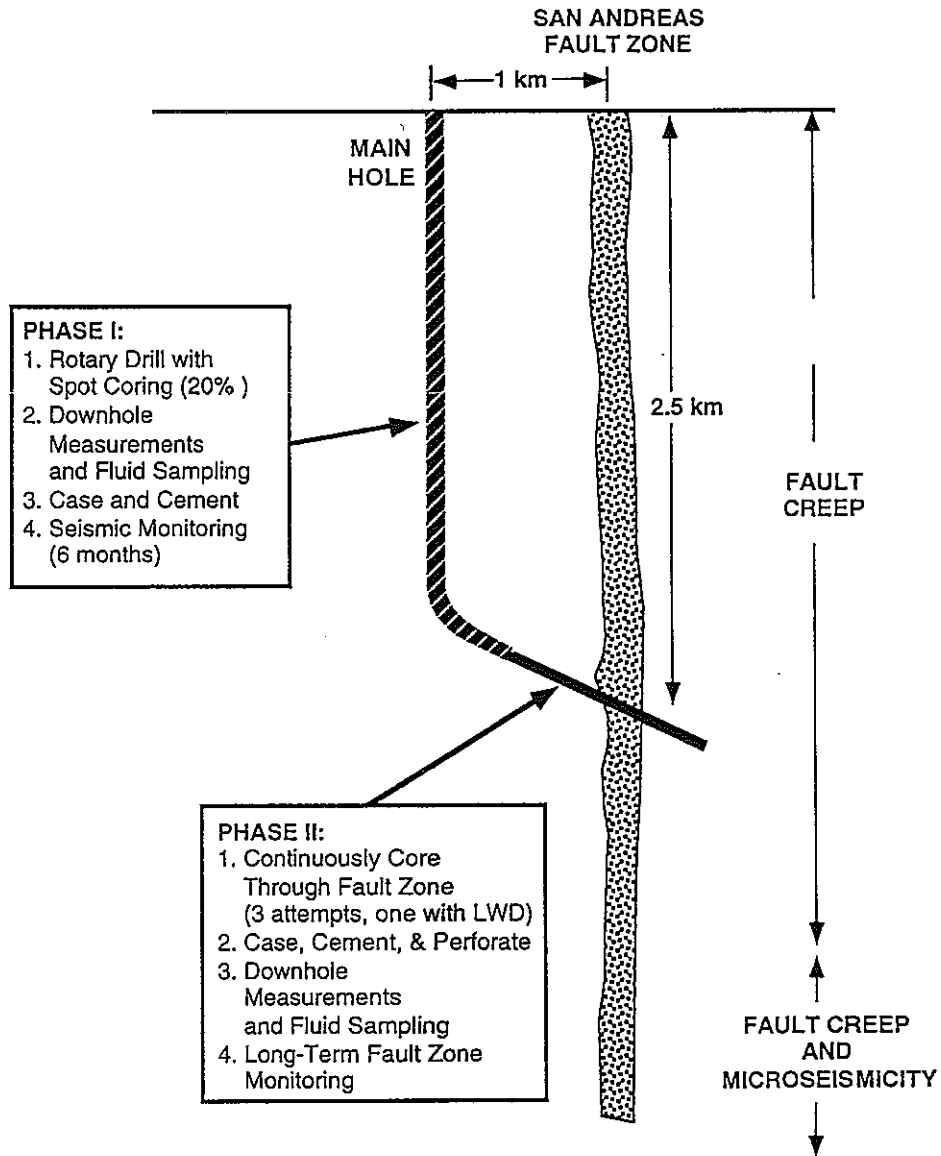
- ① エネルギー、水及び鉱物資源の適切な供給
- ② 放射性並びに有害廃棄物の安全な隔離
- ③ 地震及び火山噴火による被害の緩和
- ④ 技術分野における競争力の向上
- ⑤ 科学と技術教育の機会の拡大

最近、特に注目されている超深度ボーリングとしては、これまでしばしば地震源となっているサンフランシスコに近いサンアンドレアス断層貫通計画がある<sup>12)</sup>（図1.1.4-1）。サンアンドレアス断層は、南部東太平洋中央海膨を垂直に切断するトランスフォーム断層であり、カリフォルニア半島に沿って延びており現在もスリップしているため、将来的にも地震源となる可能性はあり、10kmボーリングのうち2.5kmで断層を貫通するようなボーリング技術の開発を実施している。この計画は、すべり面の近くにまず垂直ボーリングを実施しある深度に達するとそこから孔を曲げてすべり面を貫通させるものである。まず3km地点、その後順次深度を増していき最終的には10kmを目標にしている。

なお、米国では1985年～1994年における超深度ボーリング実績としては61孔、全長31,310mボーリングを実施し、全費用83,721,000ドルを費している。このうち16%はインフラ整備、4%が技術開発に使用したとしている<sup>13)</sup>。



# SAN ANDREAS PILOT PROJECT



Schematic of the proposed pilot drill hole at Parkfield. Downhole seismic monitoring at the end of Phase I would allow for more accurate microearthquake locations and targeting of the fault zone during Phase II. The first fault-zone crossing in Phase II would employ rotary drilling in conjunction with logging while drilling (LWD); subsequent crossings would be continuously cored and logged with conventional wireline techniques.

図1.1.4-1 米国サンアンドレアス断層ボーリング概念

## 1.2 我が国の深層ボーリングに関わる調査

我が国で実施されたあるいは実施中のボーリングについて、採用されている技術、深層ボーリング計画、業界の活動等について調査した。

通産省工業技術院地質調査所で計画されている深層ボーリング計画：JUDGE計画は主に同所内にJUDGEプロジェクト推進チームを設置し、研究者の併任体制で現実化に向け進められている。ただし、現在は研究構想の段階であり、10kmボーリング掘削時の孔内熱影響等ソフト検討は実施されているものの実際に掘削機器の製作や掘削は実施されていない<sup>14)</sup>。図1.2-1に本計画の概念を示す。フィリピン海プレート沈み込み部の付加帯に向けボーリングを実施する。ビットはリーミング付きで、泥水は正逆共用タイプである。

JUDGE計画のボーリングは三つのフェーズに分かれ、最終目標深度10kmに到達することを提案している。

フェーズ1：予定地点（房総半島又は三浦半島）の周辺に7km以浅の予備ボーリングを行い、地温の上昇率などを予想する。

フェーズ2：垂直孔をコア無しで7kmまで掘削する。いかに真っ直ぐな孔を掘削できるかに重点を置いている。

フェーズ3：ユーラシアプレートとフィリピン海プレートの境界（深度約10km）までボーリングを実施する（約10km）。この深度の地熱温度は最高400°Cと予想され、しかもコンタクトゾーンは3~5cm/yで現在も沈み込んでいると言われている。（図1.2-2）

NEDOではkakkonda projectとして岩手県駒ヶ岳付近の葛根田地熱開発ボーリングを1994年1月から1995年7月の期間で実施した<sup>15)</sup>。その結果、地温500°C条件下のボーリングも可能である理由としてmud circulation（泥水循環）によりボーリング孔内では170°C以下となることをあげている。即ち、return（リターン）泥水をmud cooling system（pump rate:200kl/時）で冷やす方法を採用することを述べている。

表1.2-1にボーリング機器の温度限界値及び図1.2-3にボーリング掘削時の温度を示す。この図は、MTI（泥水温度入口）及びMTO（泥水温度出口）、循環をStopした時からの経過時間：STを示し、STが7時間経過すれば、3,500m深度で300°Cとなること、83時間経過すれば400°Cとなることがわかる。

その他の深層ボーリングとして石油開発ボーリングの実績を表1.2-2に、また地震観察孔など防災上の深層ボーリングを表1.2-3に示す。

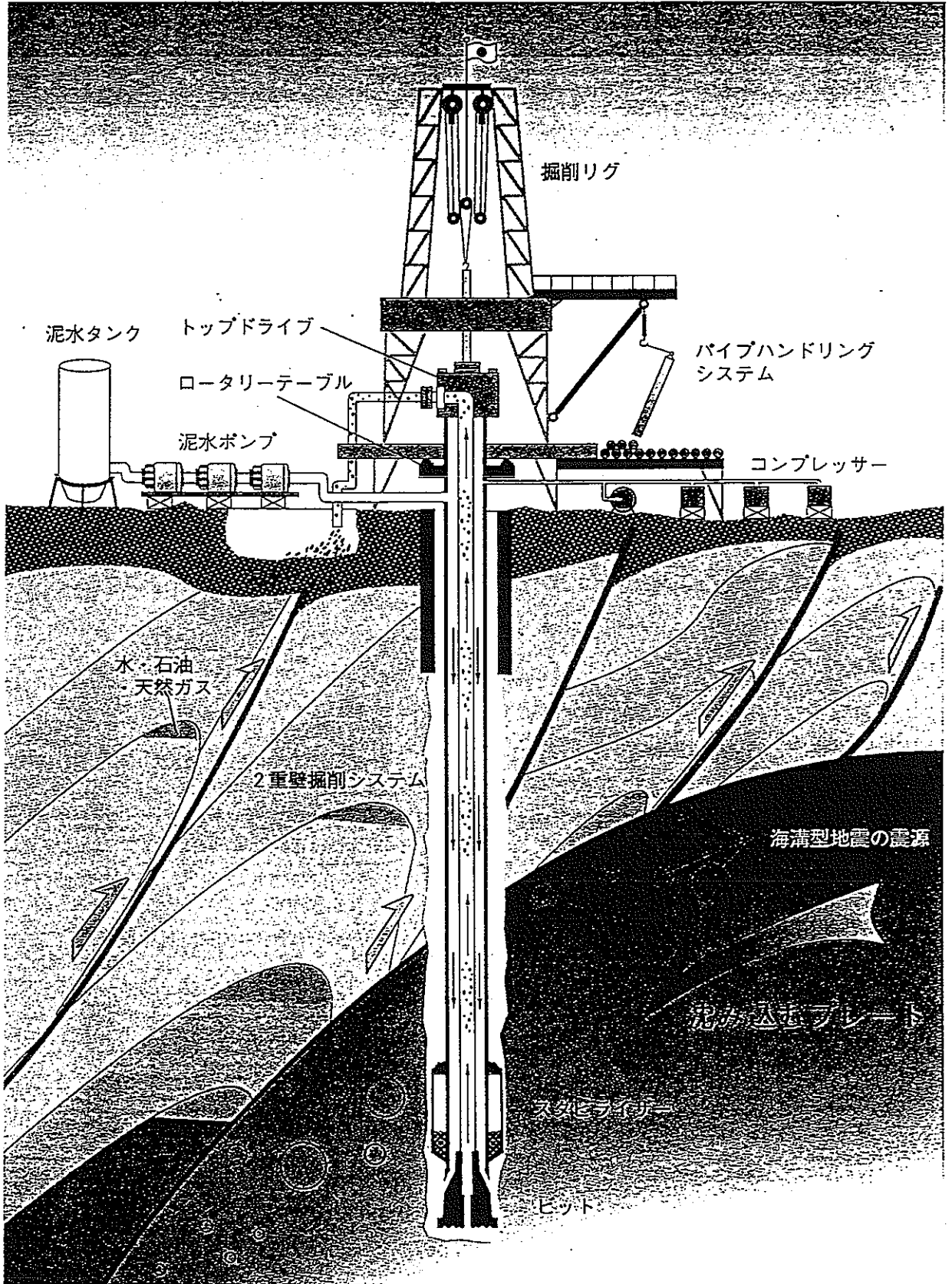
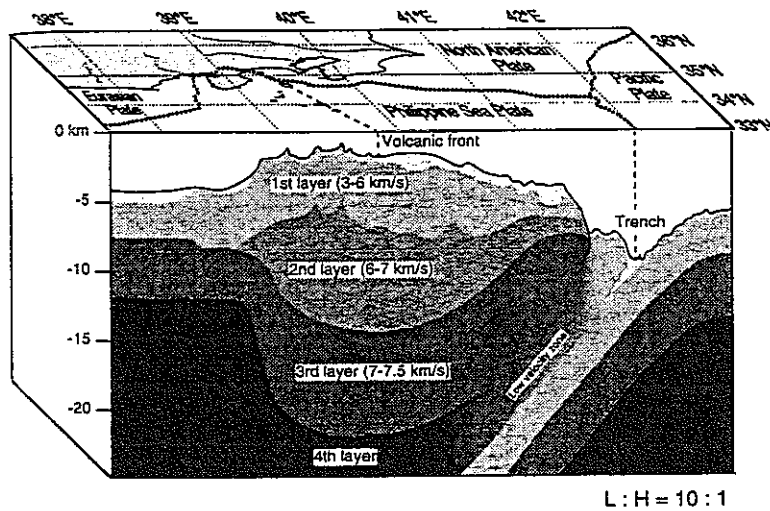


図1.2-1 地質調査所 JUDGE 計画概念

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—



南関東—東海地域でのプレート配置と伊豆・小笠原弧の地殻構造概念図

図1.2-2 南房総地域のプレート沈み込み概念

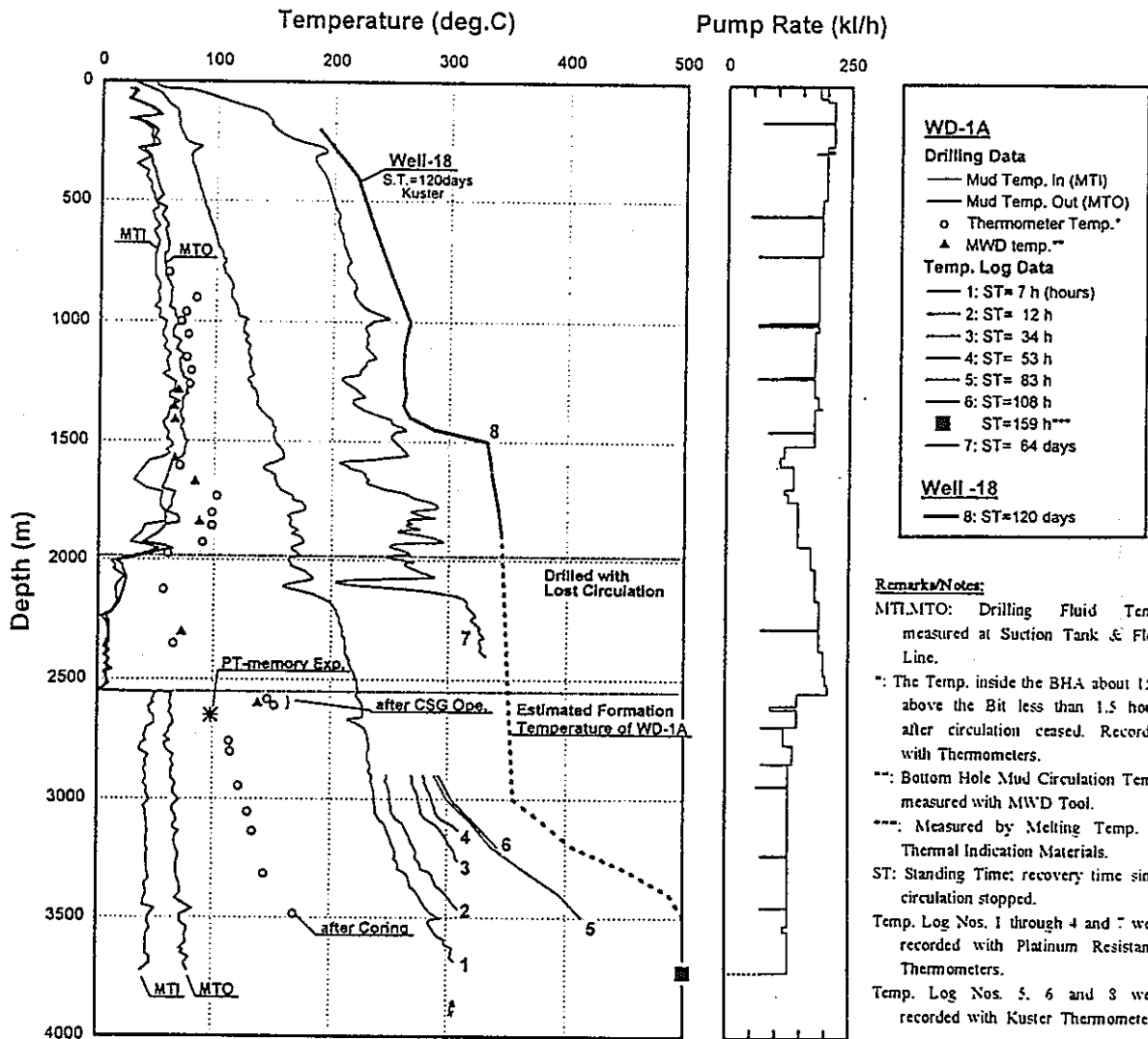
表1.2-1

NEDO葛根田地熱ボーリングWD-1Aで検討されたボーリング機器の温度限界

## Temperature limitations for major drilling tools and materials.

Tools/Materials	Temperature Limitation (°C)
Downhole Motor Stator Rubbers:	
Now	150~175
Under Development	175~200
Bit Seal Materials:	
O-Ring & Diaphragm	150~190
Trajectory Measurement Devices:	
Retrievable MWD	150
Non-Retrievable MWD	175
Mud Dispersant	250~300
Explosives:	
Backoff	220
Perforation	150

Based on Manufacturer Data, not Field Data (Jan. 1996)



WD-1A borehole temperature data

図1.2-3 NEDO葛根田地熱ボーリングでの温度と深度の関係

表1.2-2 我が国の石油開発関係陸上長距離ボーリング

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	中新世岩稲層
留萌	北海道	1985.07.24	1986.06.02	5,023	白亜紀隈根層群
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

表1.2-3 我が国の観測孔長距離ボーリング

No.	都道府県	さく井年	深度(m)	目的	用途	No.	都道府県	さく井年	深度(m)	目的	用途
1	千葉	1971	2146	観測用	地盤沈下観測	36	千葉	—	650	観測用	地盤沈下観測
2	三重	—	1880	雑用	—	37	宮城	1958	615	雑用	—
3	新潟	1940	1708	雑用	石油	38	新潟	1949	612	水道用	上水道
4	三重	—	1540	雑用	—	39	新潟	—	611	水道用	上水道
5	北海道	1974	1370	雑用	温泉	40	青森	1971	610	水道用	飲雑用
6	北海道	1980	1201	雑用	温泉	41	北海道	1960	606	雑用	天然ガス
7	北海道	1976	1200	雑用	温泉	42	大阪	1964	604	観測用	地盤沈下観測
8	北海道	1978	1105	雑用	温泉	43	青森	1971	601	工業用	—
9	滋賀	1968	1097	雑用	—	44	山形	1978	601	雑用	浴用
10	青森	1976	1059	雑用	温泉	45	青森	—	600	水道用	上水道
11	千葉	—	1050	観測用	地盤沈下観測	46	北海道	1973	600	雑用	温泉
12	北海道	1978	1000	雑用	温泉	47	青森	1971	600	雑用	—
13	北海道	1977	950	雑用	温泉	48	埼玉	1973	600	観測用	地盤沈下観測
14	青森	1974	944	雑用	—	49	大阪	1976	600	雑用	地盤調査
15	青森	1977	930	雑用	温泉	50	山形	1976	595	雑用	温泉
16	青森	1977	916	雑用	温泉	51	北海道	1934	570	—	—
17	大阪	1963	907	観測用	地盤沈下観測	52	青森	1961	569	水道用	飲料水
18	青森	1977	900	雑用	—	53	秋田	—	553	—	—
19	新潟	1965	900	—	—	54	東京	—	553	雑用	—
20	青森	1978	801	雑用	—	55	新潟	—	551	雑用	温泉
21	北海道	1976	800	雑用	温泉	56	青森	1972	550	水道用	上水道
22	北海道	1980	800	雑用	温泉	57	新潟	1968	541	—	—
23	青森	1980	800	雑用	—	58	三重	—	540	雑用	—
24	山形	1975	776	—	—	59	山形	1947	525	—	—
25	青森	1977	756	雑用	—	60	千葉	—	520	観測用	地盤沈下観測
26	青森	1977	750	雑用	—	61	千葉	1973	520	工業用	—
27	秋田	1963	720	雑用	—	62	北海道	1953	510	雑用	温泉
28	秋田	1953	720	水道用	上水道	63	青森	1970	508	水道用	飲雑用
29	青森	1979	703	雑用	—	64	青森	1974	508	雑用	—
30	北海道	1976	700	雑用	温泉	65	北海道	1955	503	雑用	天然ガス
31	埼玉	1972	700	観測用	地盤沈下観測	66	青森	1974	503	水道用	飲雑用
32	神奈川	1975	700	雑用	温泉	67	北海道	1974	501	雑用	温泉
33	京都	1961	700	水道用	上水道	68	北海道	1975	501	雑用	温泉
34	三重	—	700	雑用	—	69	秋田	1956	501	雑用	—
35	青森	1970	666	雑用	温泉						

—は記載無し

(注) 本表に記載はないが最近新たに、観測用孔として埼玉県日高市の1,832mの他、岩槻市や府中市にも3,000m級のボーリングが存在する。

石油開発ボーリングでは第3紀中新世地層対象の深層ボーリングとしては新竹野町で6,310m, 三島で6,300mがあり、観測孔としては千葉県（沼南町）の2,146mが挙げられる<sup>16)</sup>。



### 1.3 高精度ボーリング技術調査

各ボーリング装置は種々の分野での歴史的背景に基づき開発され、現在に至っている。この節ではまず現状ボーリング技術のレベルについて概要を述べたのち、孔曲り防止技術など特殊な技術について説明する。技術的に高いレベルのボーリング装置を機構によって主に分類すると次のようになる<sup>17)</sup>。

衝撃式：先端駆動型

回転式：スピンドル型，ロータリーテーブル型，ドライブヘッド型，パワースイベル型，  
先端駆動型

まず一般的に実施されている掘削方法について述べる。掘削流速は浅掘りボーリングで流速0.2～0.4m/s，深掘りボーリングで流速0.3～0.5m/sであり、平均掘進速度は硬岩は2～4cm/min，軟岩は3～6cm/minである。

ロッド昇降1回当たりの平均掘進長は、浅掘りボーリングで硬岩の場合0.7～1.0m、軟岩の場合1.0～1.5mとなり、深掘りボーリングでは2.0～3.0mである。

ケーシング挿入は浅掘り普通工法では50～100m、浅掘りワイヤライン工法では150～250m、深掘りワイヤライン工法では300～500mごとに挿入することが多く、破砕帯などは挿入段数が増すことになる。

使用ケーシングの種類は、JIS規格で定められた寸法が43mmから142mmまで9段、DCDMA規格（アメリカサイズ）が36.5mm～114.3mmの6段となっている。

次に特殊な掘削方法の概略を述べた後、具体的な適用例を示す。

#### ① エアドリリング

泥水循環水の代わりに空気を利用する方法である。硬岩で地層水の存在が少ない場合や地すべり調査など、水を欲しないボーリングに最適であり、揚水設備を必要とせず、軟弱地層に対しては崩壊しにくいなどの利点がある。圧縮空気と添加剤により、圧縮空気のみによるストレートエアドリリング，圧縮空気と界面活性剤によるミストドリリング，圧縮空気とポリマー，ゲル，発砲剤によるフォームドリリング，泥水と圧縮空気によるエアレーテッドドリリングの4種類がある。

空気圧は5～8kgf/cm<sup>2</sup>、空気量は65mm孔の場合2～5m<sup>3</sup>/min、スライムの排除が極めて良く、ビット摩耗も少なく、掘進能率は数倍と言われている。湧水箇所のスライム張付き防止のため界面活性剤を空気に混ぜて送る場合がある。

## ② ビット交換システム

ビット交換時のロッド昇降作業は、実掘削時間の有効性を低下させる。ロッドを孔内に定置のままビットを交換するシステムとしてワイヤライン工法を利用したビット交換システム挙げられる。これを用いてビットを引き上げることでロッド昇降時間が節減でき、掘削能率の向上になると言われている。

## ③ 無水掘り

シングルコアチューブとメタルビットを使用する。効率はきわめて悪く、無水掘りの1回の掘進長は、軟弱粘土及び粘土分混合砂で50～100cm、軟質礫で5～20cm、硬質岩盤及び硬質礫混合砂礫では2cm以下と言われている。また掘削前、掘削中はスライム排除、コア脱落での注意が必要である。

## ④ リバースサーキュレーション工法 (RCD工法)

RCD工法とは、静水圧で孔壁崩壊を防ぎながら、回転ビットにより削孔して、掘削土砂を循環水とともにドリルパイプの中を通して孔外へ排出する工法である。ドリルパイプ中の排出方法に下記の2種類がある。(図1.3-1)

- ・エアリフト方式：ドリルパイプの先端からの圧縮空気の上昇力を利用して、上向き水流排出する方式であり、深度が深くなれば有効である。
- ・ウォータージェット方式：高圧タービンポンプからの水をドリルパイプの下方から噴射させ、掘削土砂を上げる方式をいい、エアリフト方式との併用が多い。

## ⑤ 孔曲がり防止

ボーリング孔には孔曲りの問題があり、孔曲り0の削孔は不可能に近い。しかし近年高精度技術の進歩によりKTBで用いられたVDSシステムなどいくつかの試みがなされている。

従来の技術として、目標とする方向に正確に掘削するため、エッジ(くざび)を用いて、孔曲りを修正する方法、先端駆動型ドリルとベントサブで孔曲りを修正するコントロール方法などがある。(図1.3-2)

## ⑥ 先端駆動型ドリル

ダウンザホールドリルとも呼ばれ、ボーリングロッドは回転せずに、ロッド先端のダウンザホールドリルビットのみが回転する工法である。

ダウンザホールドリルには、回転トルク発生用に流体を利用するものと電気を利用するものがある。流体を利用するものに、ターボドリル、ダイナドリル、ナビドリル

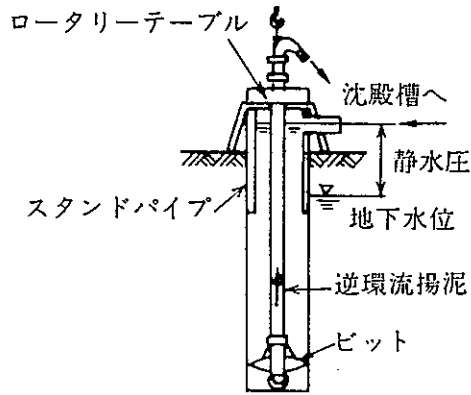
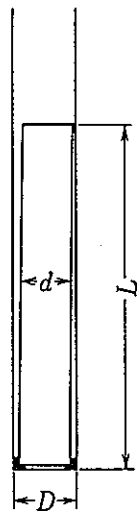
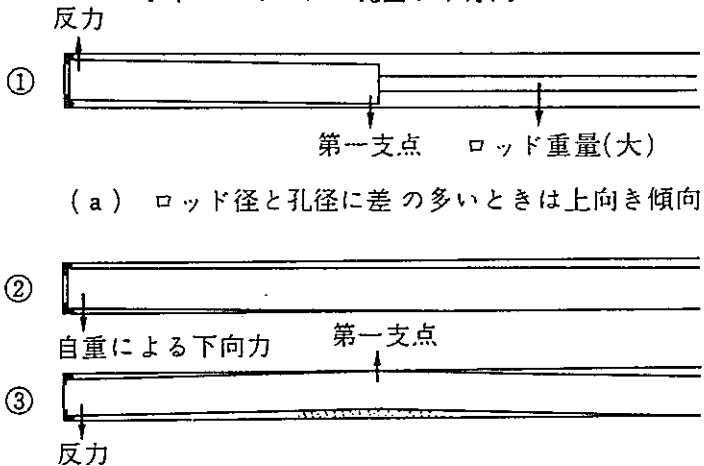


図1.3-1 リバースサーキュレーションボーリング工法

孔曲がりの原因



水平ボーリングの孔曲がり方向



(a) ロッド径と孔径に差の多いときは上向き傾向

②または③のように、なんらかの力(スライムの分布)で第一支点が持ち上げられ、下向き反力が生ずる

(b) ロッド径と孔径に差のないときは下向き傾向

$D$ : でき上がり孔径,  $d$ : コアチューブ外径,  $L$ : コアチューブ全長(最大2~5m 程度か)

孔曲がりは  $(D-d)/L$  に比例する。それゆえ、 $L$  を大きくし、 $D-d$  を小さくするような工法を使えば孔曲がりは少ない。

図1.3-2 孔曲り概念

ル、気体（圧縮空気）の衝撃力を与えるものにダウンザホールドリル、電気を利用するものにはエレクトロドリルがある。

なお、孔曲がり測定には、方位計あるいは鉛直方向からのずれをボーリングロッドの先端に装着したセンサーを降下させ、座標を求めるものがある。また、方位及び傾斜の信号出力を地上に送るオンライン連続測定方式もある。

現在、一般的には国産では村田式、外国製ではトロパリ型がある。（図1.3-3）

その他、イーストマン測定器も用いられている。これらの簡単な原理は1.3.1 (ii) (c) 孔曲り測定器にて説明する。

#### ⑦ GPS

GPS (Global Positioning System: 汎地球測位システム)<sup>18)</sup>は人工衛星から発信される電波を受信して2点間の相対位置を高精度で測定可能なものである。

GPSは、測地学や地球物理学を中心に進歩してきたが、超深度ボーリングの孔曲り精度測定に対しての適用は現状検討されていない。

#### ⑧ 無公害泥水

一般にボーリングには孔壁保護、データ伝送媒体、ビット摩擦軽減などの理由からベントナイトと添加混合泥水が用いられる。西村ら<sup>19)</sup>はこの泥水の、無公害性を検討した。

水質汚濁防止法上、人の健康保護項目として10種類の有害物質があげられ、そのうち泥水材料中のリグニン誘導体、フミン酸誘導体、タンニン誘導体にクロムが含有されているが、その中に有害な六価クロムはないことを述べている。

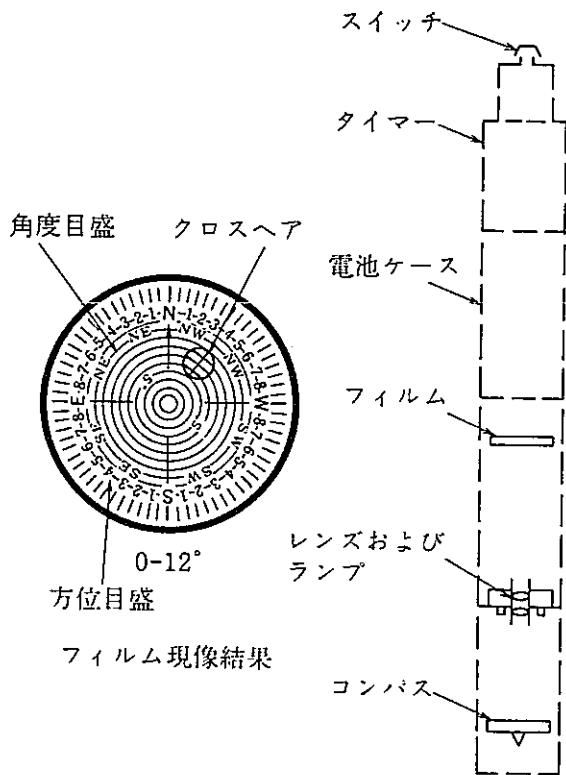
また将来的には、米国の2～3州でクロム含有材料の使用を規制している例を参考として、クロムフリー泥水を構築するための開発項目を上げた。

今後ポリマー高分子化技術の開発によりクロムフリー材料が可能であり「無公害泥水」が石油掘削現場で使用され得ることを示した。

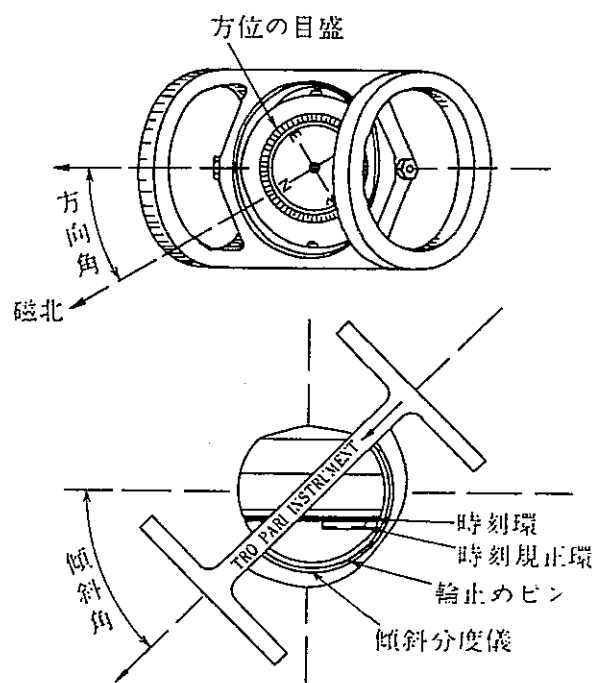
### 1.3.1 ボーリング指向掘進技術

ボーリングの方向制御技術は、石油開発の関連技術の一環として、最近のエレクトロニクスや測定機器類の技術進歩に呼応して急速に発展してきた。

その関連機器類としては、掘管内の測定を可能とした非磁性ドリルカラー、ジャイロ式孔曲り測定器の開発、さらに孔方向の偏距具としてのダウンホールモータードリル



(a) 村田式



(b) トロバコ型

図1.3-3

孔曲り測定法

(ダイナドリル、ナビドリル、ターボドリル、エレクトロドリル)等の出現が挙げられる。

ボーリング方向制御に係る最先端技術は、石油掘削分野で開発された MWD 技術 (Measurement While Drilling) であり、これは掘削中に孔井の方位、傾斜、その他の孔底データをリアルタイムで地上に伝送するシステムとして、最近では石油掘削のみならず大深度掘削、水平孔井掘削等でも活用されている。

#### (1) 高精度鉛直ボーリング

地震計埋設、地下発電所・鉱山等における各種立坑の掘削、ダムのためみ測定装置 (プラムライン) の設置等を目的として、鉛直ボーリング技術の高精度化が重要視されている。

現在の技術レベルでは、従来からの孔曲り防止工法を基本とし、上述の方向制御に係る偏距機器類を使用しつつ施工されているのが実情である。

##### (i) 孔曲り防止工法<sup>20)</sup>

掘削過程で孔方向を制御するための一般的な手法として、ドリルストリングス編成替えによる方法 (増角掘削、沿角掘削、減角掘削) が用いられ、ビットの上部にスタビライザー、ドリルカラーを取り付け、その位置操作によって行われる。

##### (a) 増角の方法

ビットの真上にリーマ、またはスタビライザーを取り付ける形式のもので、リーマまたは、スタビライザーを支点にした梯子の理で、ビットは孔井の高い方へ押し上げられ、上向きに掘り進むことになる (図 1.3.1-1)。

##### (b) 沿角の方法

孔の方向を維持するためには、剛性の高い、先端ストリングスが必要である。ビットの上位にリーマが接続され、さらにその上方に大径のドリルカラー及びスタビライザーが接続される。剛性の高いドリルカラーは、左右への孔曲りを防止する働きをし、指向の直線上を掘り進むことになる (図 1.3.1-2)。

##### (c) 減角の方法

孔方向の減角には、振子の効果を利用する。振子効果は、ビット真上のリーマを取り外し、上部のリーマまたはスタビライザーのみとする。適切に配置された上部のリーマやスタビライザーが支点となり、下部のドリルカラーとビットの重量によりビットは下方へと押し付けられ、掘削の進行に伴って孔方向は減

角する（図 1.3.1-3）。

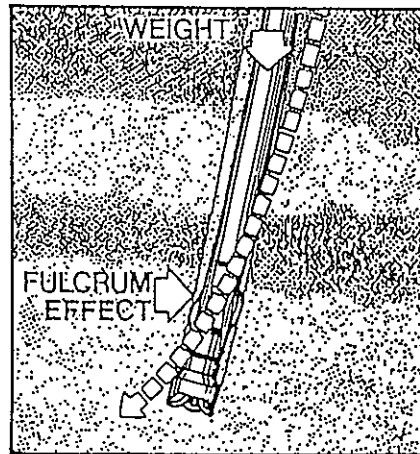


図 1.3.1-1 増角の方法

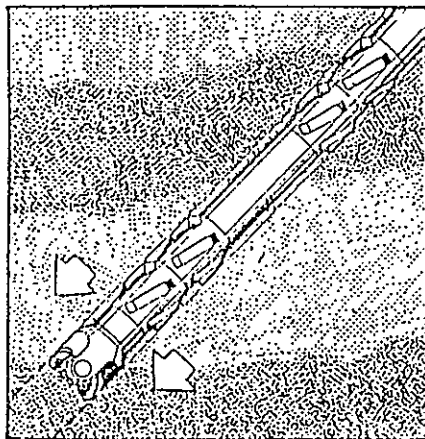


図 1.3.1-2 沿角の方法

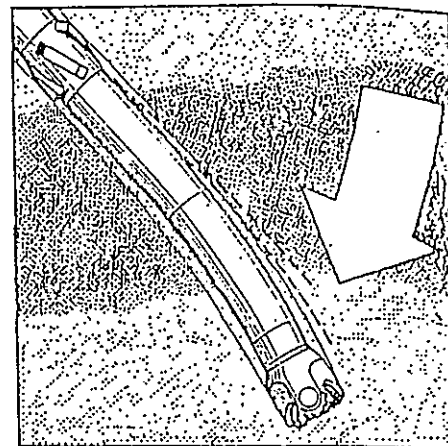


図 1.3.1-3 減角の方法

(ii) 孔曲り修正工法

(a) ホイップストックによる方法

ホイップストックは、長鋼製の“くさび”形をしたもので、ピット方向性を制御する役目をするため半円形の溝状になっている。使用法は、パイロット掘削編成にホイップストックを孔底まで下げ、その指向を孔曲り測定器を用いて計測し、ホイップストック固定のシャーピンを切断してビットを降下させる（図 1.3.1-4）。ビットは、ホイップストックのテーパに沿って地層を切り下がり、3～5m 掘削後、ホイップストックと共に揚管する。その後、掘削ツールスを拡孔編成に切り替え、パイロット孔を正規の孔径に拡孔する。

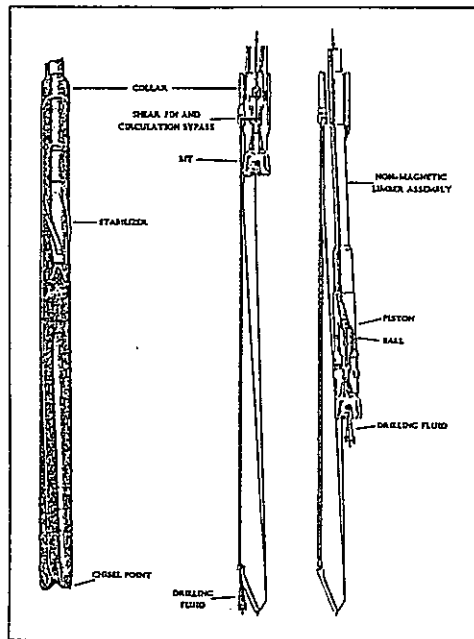


図 1.3.1-4 ホイップストック

(b) ダウンホールモータードリルとベントサブの組合せによる方法

ダウンホールモータードリル（先端駆動型ドリル）には、ダイナドリル、ナビドリル、ターボドリル等が用いられる。これらのドリルは、管体内部に回転する原動機を内蔵し、掘削泥水の循環流を駆動源としているものが多い。

掘削方向の修正は、この先端駆動型ドリルの真上に角度を持つベントサブ指向装置を取り付け、その軸方向を孔曲がり測定器により測定し、目的方向に向けて行う。指向装置の機構は、2個のマグネットが内蔵されたオリエンティングサブ内にバーレルを水圧で挿入すると、ディテクター内のマグネットディスクが応答してベントの方向を測定する。また、測定データは、ケーブルを通して信号を地上パネルに伝送し、検出する。

(c) 孔曲がり測定器

孔曲がり測定器の種類は、測定方式により磁石方式、ジャイロ方式及び光学方式とに大別される。磁石方式は、安価で測定容易であるが、磁性部では影響を受けるため測定不可となる難点がある。非磁性ドリルカラーをロッド先端部に接続し、非磁性管内でロッドを揚管せずに計測することも可能で、テレビオンラインシステムでは、超小型カメラを用い、方位・傾斜・ツールスフェースのデータ等



をケーブルを通して地上に伝送し、TV画像でモニターできる。

ジャイロ方式には、機械式ジャイロ、振動ジャイロ及び光ファイバージャイロ等があり、特に光ファイバージャイロは、測定器に可動部がなく、小型・軽量・長寿命の特性を有し、機械ジャイロのような計測範囲の制限がなく、次代のジャイロスコープとして期待されている。

### (iii) 鉛直ボーリング施工例<sup>21)</sup>

(a) 地震予知地下水観測井（滋賀県愛知郡泰荘）：深度 500m クラス

#### ① 目的

近畿地方における地震予知を目的とした地下水等観測施設を設置するために実施されたもので(1995.9.20～1996.3.25)、本観測施設において収集されたデータはテレメーターシステムにより、地質調査所に転送し、集中管理される。

#### ② 実績仕様（図 1.3.1-5）

- ・コアボーリング（HQワイヤライン工法） 鉛直 515m
- ・掘孔（12-1/4～5-7/8 インチ） 441m
- ・観測井仕上げ（200A ケーシングパイプ） 431m
- ・観察・測定・試験等

軟弱堆積物試料検査、コア試料検査（岩石試験）、孔内検層、揚水試験・解析、水質試験

#### ③ 内容

- ・431.15mにて掘止め後、200A ケーシングパイプを 431.05m まで降管。
- ・ストレーナより下部をインナーストリング式にてフルホールセメンテーションして固定。
- ・ストレーナより上部のセメンテーションは、ケーシングパイプ挿入時にセットしたセメントバスケット及び膨張パッカーによりストレーナ部と遮断後、口元より注入管（AQ ロッド）を降下し、下部より順次セメンテーションにて口元部までセメント打ち上げ。
- ・200A ケーシングのセメンテーションでは、セメントボンドログ後、引続き管内セメント浚い、歪み計設置部の掘進のため 5-7/8 インチツールスを降管。
- ・揚水試験は、441.00mにて掘止め後、孔内洗浄を行って清水置換後、ドリルパイプ内に AQ ロッドを降下、エアリフト逆循環方式により実施。



(b) 防災科研地殻活動観測井（埼玉県日高市高萩）：深度 2,000m クラス

① 目的

地震計埋設のための鉛直観測井の掘削(1995.10.20～1996.3.28)。

② 実績仕様 (図 1.3.1-6)

- ・ 試錐機 (石油掘削井用ターンテーブル式マシン)
- ・ ノンコアボーリング (径 8-1/2 インチ) 鉛直 1,832m
- ・ スポットコアリング (サンプル採取)

③ 孔芯傾斜の測定結果

地質は、深度 1,410m から 1,420m までの 10m 区間に凝灰岩層が認められたほかは、概ね泥岩を主体とする。

孔芯傾斜の測定は、1,600m 以浅では最大 0° 37' であり、極めて良好な結果を示すが、その後、傾斜角がほぼ 3° 近くに増加する (表 1.3.1-2)。

この孔曲り現象に対し、掘削ツールの編成を減角編成に替え、ビット荷重の軽減等に努めたものの、所定の効果が得られなかったため、方位・傾斜連続測定装置(MWD)とダウンホールドリルを組み合わせた孔曲りの修正を実施した (図 1.3.1-7)。

作業は、深度 1,712m から 1,785m までの 73m 区間で実施し、深度 1,785m での傾斜角度を 1° 48' にまで回復、目標の孔井傾斜 (3° 以内) を確保した (表 1.3.1-3)。

表 1.3.1-2 イーストマン測定器による孔曲り測定記録 (掘削時) <sup>21)</sup>

深度(m)	傾斜	深度(m)	傾斜	深度(m)	傾斜	深度(m)	傾斜
30	0° 48'	490	0° 16'	940	0° 14'	1,390	0° 20'
60	1° 00'	520	0° 13'	970	0° 15'	1,430	0° 32'
90	0° 40'	550	0° 05'	1,000	0° 08'	1,460	0° 31'
120	0° 50'	580	0° 10'	1,030	0° 12'	1,500	0° 20'
150	0° 40'	610	0° 17'	1,060	0° 20'	1,530	0° 31'
190	1° 00'	640	0° 17'	1,090	0° 16'	1,560	0° 37'
220	0° 15'	670	0° 16'	1,130	0° 25'	1,610	2° 50'
250	0° 13'	700	0° 32'	1,160	0° 30'	1,640	2° 20'
280	0° 22'	730	0° 13'	1,190	0° 22'	1,670	2° 30'
310	0° 16'	760	0° 18'	1,210	0° 14'	1,700	2° 40'
340	0° 08'	790	0° 30'	1,240	0° 17'	1,800	1° 16'
370	0° 16'	820	0° 24'	1,270	0° 13'	1,830	0° 47'
400	0° 04'	850	0° 10'	1,300	0° 10'		
430	0° 25'	880	0° 10'	1,330	0° 35'		
460	0° 30'	910	0° 13'	1,360	0° 24'		

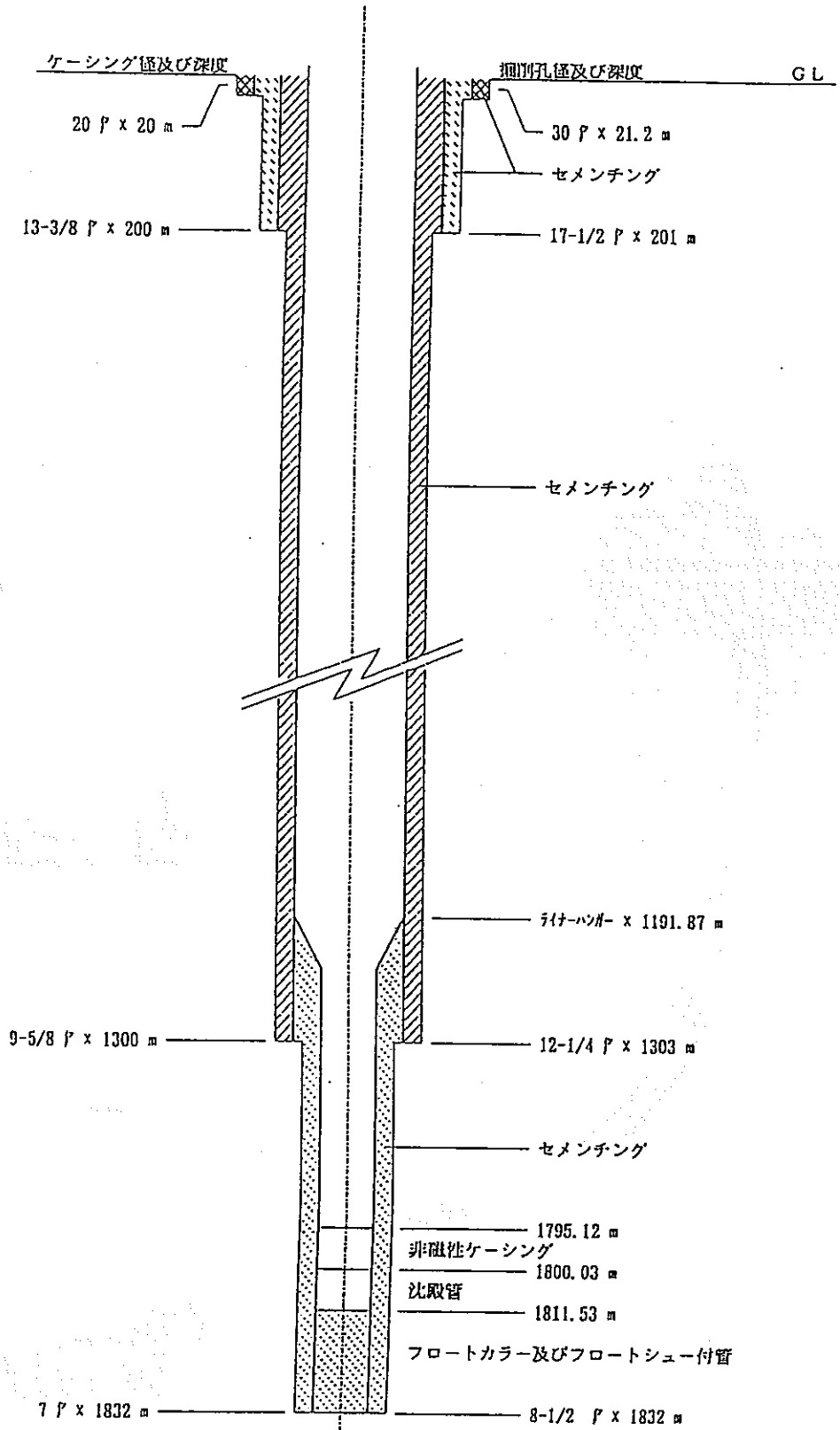


図 1.3.1-6 防災科研地殻活動観測井完成構造図

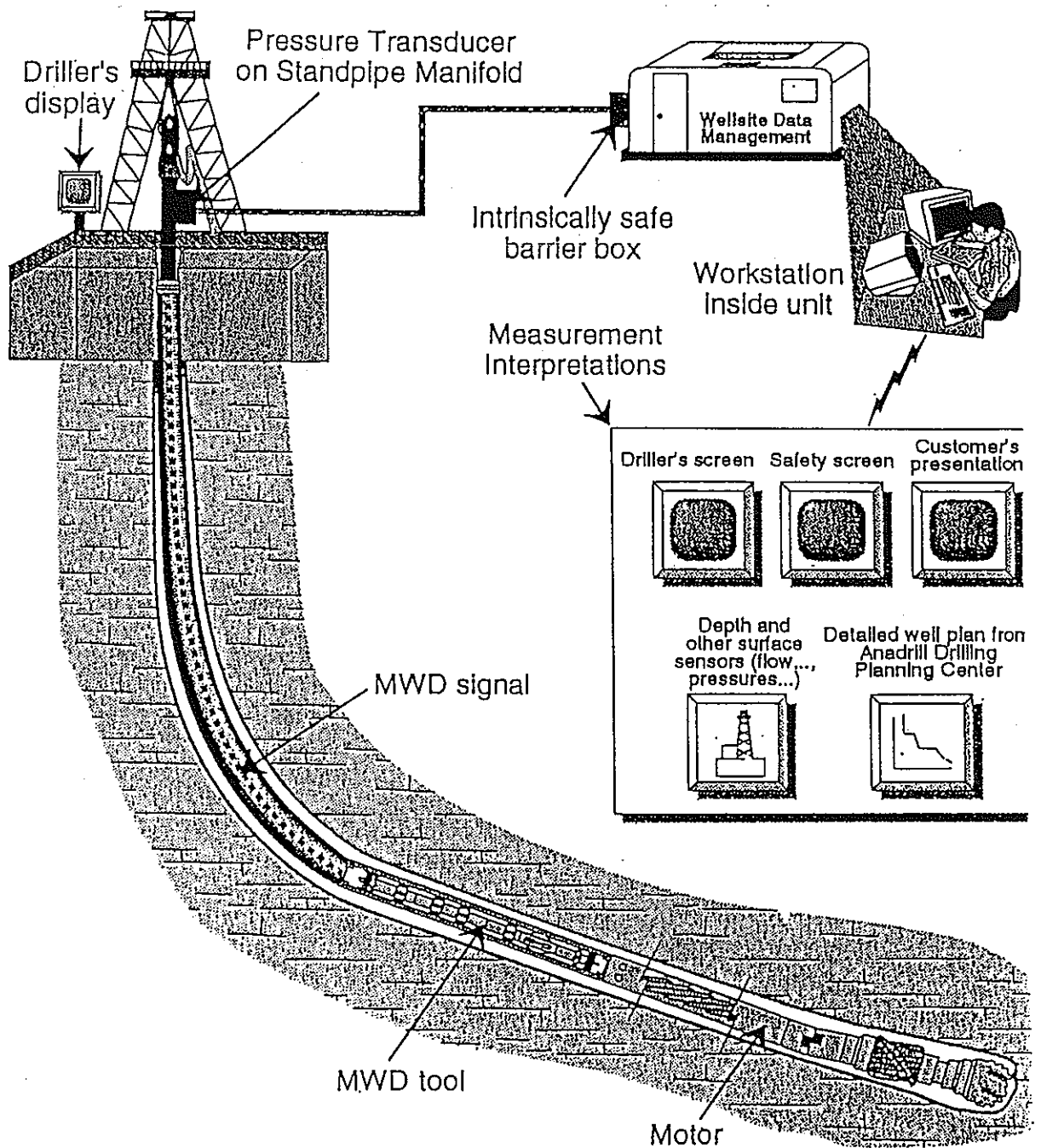


図 1.3.1-7 MWD工法 データ採取システム概念図

表 1.3.1-3 MWD 測定器による孔曲り測定記録 (掘削時)

深度(m)	傾斜	深度(m)	傾斜	深度(m)	傾斜	深度(m)	傾斜
1,400	0° 06'	1,700	2° 54'	1,740	2° 00'	1,767	1° 36'
1,500	1° 06'	1,720	2° 42'	1,749	1° 48'	1,776	1° 48'
1,600	2° 36'	1,730	2° 18'	1,758	1° 42'	1,785	1° 48'

(2) MWD システム<sup>22), 23), 24)</sup>

本システムは、掘削中の孔井の方位・傾斜に関するデータ、地層評価に関するデータ及び掘削パラメータに関する諸データを計測し、リアルタイムで地上へデータを連続的に伝送して解読・表示する MWD (Measurement While Drilling : 掘削同時計測) 技術を活用した方向制御掘削の方法である。

(i) MWD システム活用による方向制御掘削

ボーリング孔の方向を目標に向けて掘削制御する技術は、石油・天然ガスの孔井掘削で、MWD システムとダウンホールモータドリルの組合せにより多くの実績がある。

この MWD 技術の発展は、方位・傾斜データのみならず地層比抵抗・自然ガンマ線・中性子・密度・温度等の地層評価に関するデータやビット荷重・トルク・圧力等の掘削パラメータに関する諸データの計測を包含するまでに拡大されている。

掘削オペレーターは MWD を駆使しながら、必要に応じて何時でも測定結果を得ることができ、費用のかかる従来のワイヤーラインシステムを用いることなく、掘削作業の効率化、掘削費の低減、さらに安全性を確保し、方向制御を行うことができる。

現在、MWD を世界的に商業化しているサービス会社は、次のとおりである。

Anadrill Schlumberger 社

Baker Hughes Inteq 社

Halliburton Drilling Systems 社

Sperry-Sun Drilling Services 社

Computalog 社

Geolink 社

Geoservice 社

MWD 技術に関する研究開発活動は、1990 年代に入った現在でも極めて活発で

あり、MWD システムの信頼性向上や適用範囲の拡大についての研究開発はもとより、次世代の MWD システムの実用化に向けて多くの企業が取り組んでいる。

その主な研究開発は、スリムホール掘削に適応する周辺機器類のコンパクト化のための研究開発であり、将来的には現在のワイヤーライン検層に匹敵、または、それを超える計測能力を備えるべく、主に検層技術サービス会社により研究開発が進められている。

孔底と地上の間での双方向通信に関する研究も行われており、この技術が確立されれば、孔内機器について地上からの制御も可能となる。

孔底データの伝送方式は、現在マッドパルス（泥水圧力波）方式が主流である。マッドパルス方式とは全く異なる電磁波地中伝搬による伝送方式（図 1.3.1-8, 9, 10）、また、最近ではドリルストリングスを媒体とする管体伝送システム等の開発研究が進められている。

なお、ドリルカラーに直接各センサーが実装された通常の MWD ツールは、外径 4-3/4 インチから 9-1/2 インチまでの各サイズが幅広く製品化されている。最高仕様温度は現状 150°C まで使用でき、最高使用圧力は 15,000psi から 20,000psi である。

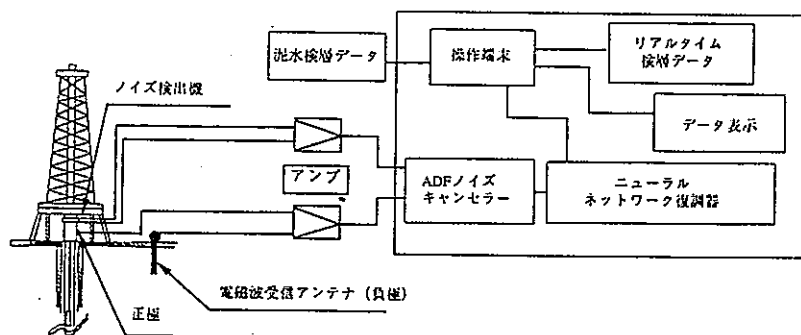


図 1.3.1-8 地上システム概念図

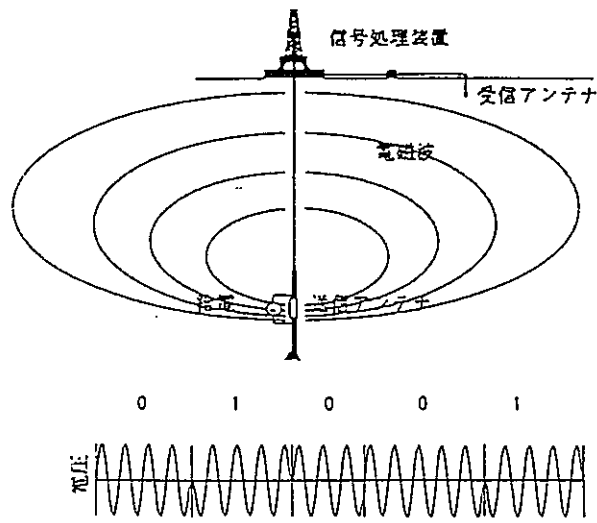


図 1.3.1-9 EM-MWD システムの概念図

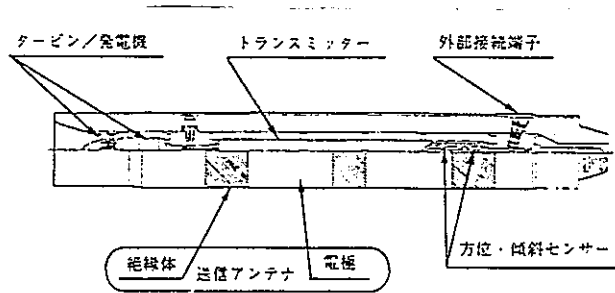


図 1.3.1-10 孔底機器の概略図

(ii) 我が国における MWD システムの研究開発

(a) 社団法人 日本海洋開発産業協会 (JOIA)

「海洋石油開発高能率掘進技術開発調査」(1984~1989)の一環としてマッドパルスによる MWD 技術を中心とする自動計測システムの調査研究を実施。

(b) 石油公団 石油開発技術センター (TRC) <sup>25), 26)</sup>

大型研究「リアルタイム掘削制御技術」の一環として、1986 年度より 7 年間にわたって EM-MWD (電磁波方式) の研究開発を実施し、その後、1993 年度より特別研究として「EM-MWD システム実用化技術」を開始、外径 6-3/4 インチの EM-MWD 孔底機器の開発、高傾斜・水平孔井への適用等、システムの実用性向上を図るための技術開発に取り組んでいる。



(c) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) <sup>27)</sup>

日本海洋開発産業協会 (JOIA) での研究成果を踏まえ、1990 年度に「高効率耐熱型 MWD システムに関する調査」を実施、1991 年度より「地熱井掘削時孔底情報検知システムの開発」の一環として、マッドパルス方式を用いた地熱井用 MWD システムの研究開発を開始し、1997 年度のシステム完成を目指している。

(3) コアオリエンテーション装置

ボーリングコアは、掘削により、地山から切り離されて、回転しつつ孔外に排出されたサンプルであるため、地層の傾斜方向については特定できず、地質構造の解析が傾斜方向の推定如何によって大きく異なってくる。

本装置については、石油探査部門でオリエンティングコアバーレルが開発されており、タイマー作動の測定器であり、マルチショットによりコア掘り区間の全長にわたって繰り返し測定も可能である。この他、コア掘り後、孔底の圧力を維持したままコアを採取できるプレッシャーコアバーレルも開発されている <sup>28)</sup>。

我が国でも、資源探査部門で普及しているワイヤライン工法に適應し、ダブルコアチューブのインナーチューブを改良して測定器を内蔵し、掘削中のコアに縦キズを付け、その縦キズの方位を測定器で読み取り、地層の原位置における真の走向・傾斜を判定できるコアバーレルが開発されている <sup>29)</sup>。

(4) 今後の研究課題の抽出

本題の主旨から、その目的を十分満たす鉛直調査孔の許容度は、かなり高精度であることが前提となる。

現状の技術レベルでは、前述した MWD システムとダウンホールドリルを組み合わせた孔曲り修正による工法が最善と思考されるが、条件設定が異なる地層構成の状況下においても、また、鉛直許容度が 1° 以下の厳しい仕様ともなれば、新たな工法を選択する必要がある。

例えば、一般的なワイヤライン工法のダブルコアチューブ・コアバーレルのインナーチューブを改良し、孔の方位・傾斜連続測定装置として MWD 方式の測定器を改良して組み込み、掘削中の孔の軌跡を地上でリアルタイムにモニタリングできる機器及びその技術開発等、最先端要素技術の活用が挙げられる。

### 1.3.2 非泥水掘削技術

ボーリング孔調査技術は、地上物理探査技術等に比べて、地下の環境を直接的に把握することのできる手段であり、地質環境条件を把握するための調査技術として極めて重要である。特に、地下深部における地下水の水質や賦存状況・流動状況を把握することが重要であるので、真の地下水の保持のために、清水掘削技術の適用範囲の拡大に関わる技術開発が重要視されている。

#### (1) 非泥水掘削技術の研究開発事例

ボーリングで最も重要な保孔対策として、一般的に泥水の使用が最善で、難地質での掘削ではケーシング及びセメンテーション等が併用される<sup>30)</sup>。

泥水の使用目的は、スライムの孔外搬出・沈下抑制、孔壁保護、出水・高圧ガス噴出の制圧、さらにロッド、ポンプ系統に潤滑性を付与する等である。

乾式あるいは清水等による非泥水掘削技術では、これらの保孔対策を兼ね備え、かつ安全で経済的な工法の選定が大前提となる。

#### (i) 乾式ボーリング機器の改良・開発<sup>31)</sup>

##### (a) ダウンザホールドリルの開発

ダウンザホールドリルは、従来、空気圧が 10 気圧程度のものが多く、数十メートルの深さまでの掘削に適用されてきたが、ここ数年の間に、コンプレッサーの能力向上に呼応して 15～23 気圧の高圧型ダウンザホールドリルが開発され、数百メートルを超える大深度掘削に使用されている。

ダウンザホールドリルによるサンプリングは、その掘進の早さと水を使わない簡便性から、発破孔の掘削を兼ねたスラッジサンプリングとして、以前から海外の露天採掘鉱山などで使用されていた。

最近の傾向として、ノーマルサーキュレーション（正循環）工法に対し、リバーサーキュレーション（逆循環）工法によるサンプリングが急速サンプリング方法として利用されている（図 1.3.2-1）。

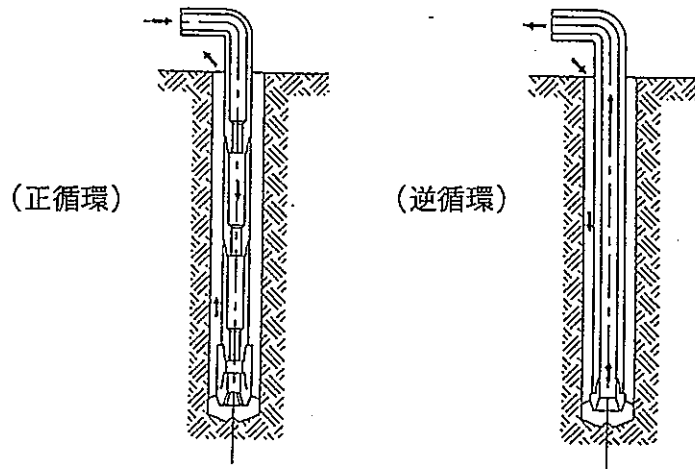


図 1.3.2-1 掘削流体循環の模式図

ダウンザホールドリルによるサンプリングでは、鉍量や鉍石品位の精度が採掘コストに極めて重大な影響を及ぼすことから、サンプルの攪乱や地層の混ざり合いを防止するため、これまでは単管ロッドによるエア掘削が用いられていた。しかしその後、二重管によるリバースサーキュレーション工法が開発され、特に豪州において急速に普及している。

なお、既存の技術によるリバースサーキュレーション工法には、次のような方式がある。

- ・単管を使用し、孔壁とロッドのアニュラス部にエアや掘削揚水を供給し、ビットからロッド内に循環させる。
- ・二重管を使用し、内管と外管との間からエアや掘削用水を送り、ビットから内管に循環させる。
- ・二重管を使用し、内管と外管との間からエアを供給し、ビットの上方のノズルから内管に吹き出してエアリフトポンプを構成し、地下水を汲み上げながらコアを回収する。大口径掘削では、地下水の補給が豊富にないとエアリフトが継続できないので、外部から水を供給循環して行う。

現在、一般市場において実用に供されている空気圧式のリバースサーキュレーション工法用ダウンザホールドリルには次のものがあるが、300m を超える滞水層を対象としたものはない。

- ・SAMPLEX
- ・DIGGER



③ 評価と対策

- ・試験結果から、適用現場の選択として、現状では深度 200m 程度までの浅層調査、あるいは地下水が極めて少ない地域等での使用を考慮する。
- ・深度 500m 級の掘削に供するためには、掘削過程での湧水を考慮し、より高圧のコンプレッサーの開発を必要とする（装置の大型化）。

④ 本工法の利点

- ・掘進速度が早いこと。
- ・泥水が不要であること。
- ・コア観察及び試料分析に十分なサイズと量のサンプル採取ができること。
- ・サンプルの擾乱や地層との干渉がないこと。

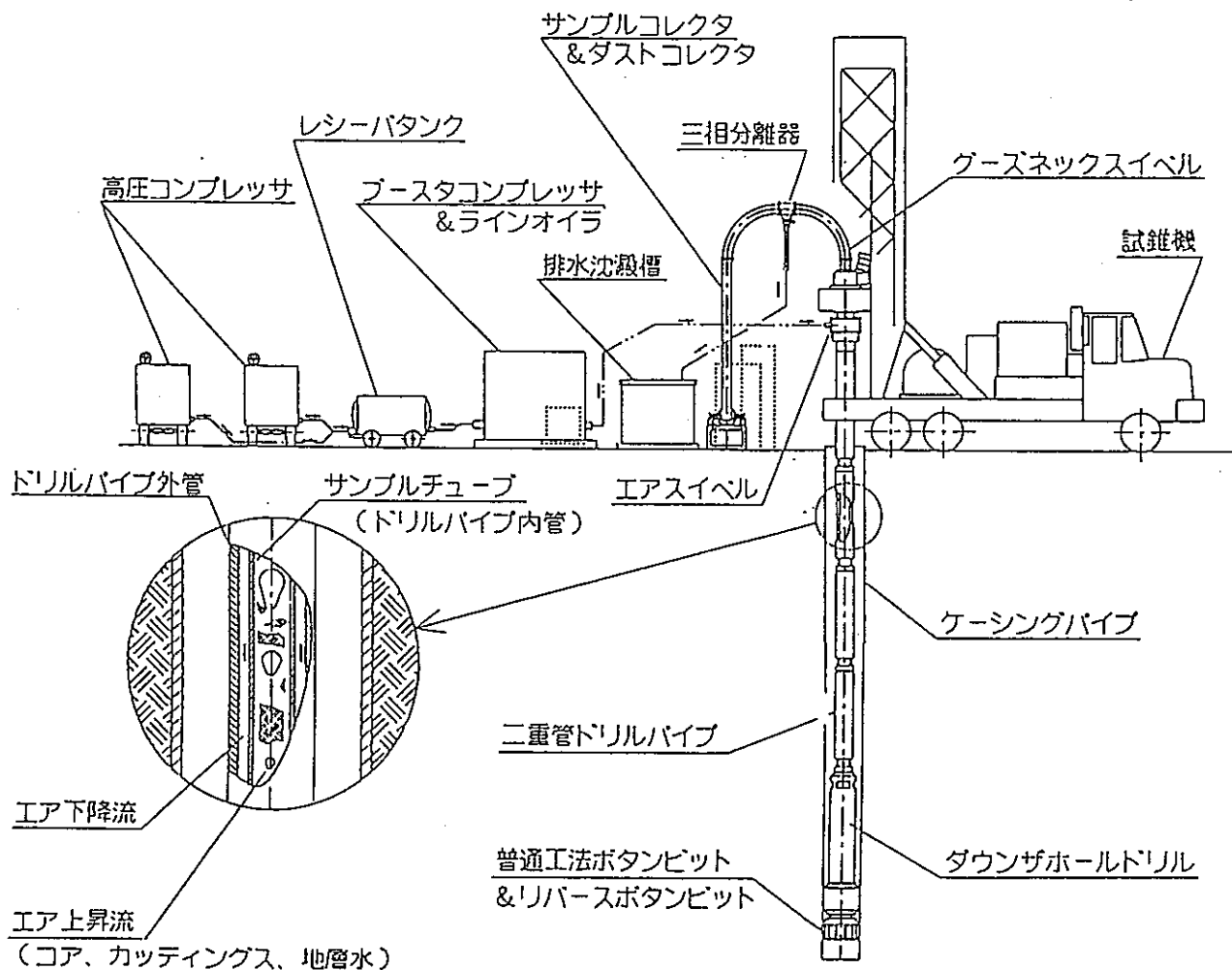


図 1.3.2-2 リバースサーキュレーション・エアハンマーコアリング工法概念図

(ii) 乾式大口径ボーリングの研究開発<sup>33), 34)</sup>

放射性廃棄物の大口径ボアホール貯蔵構想が、技術・経済的観点からの評価のもとに、ドイツ研究技術省の助成を受けたボーリングの科学研究並びに技術開発によって実現し、直径 0.6~3.5m、深さ 300m までの乾式大口径ボーリングができることが実証された。目下、研究技術省の援助のもとに、深度 600m までの機械・技術的開発が進められている。

この放射性廃棄物のボアホール貯蔵構想に対しては、理論的研究とモデル計算の結果並びに特に熱負荷を受けた場合の岩盤の挙動に関する研究結果が出ている。貯蔵用ボーリングモデル機が製作されており、一部成果があがっている。これまでの研究開発状況によれば、垂直なボアホール貯蔵構想は有望であることを示している。

また、ドイツの放射線防護庁は放射性廃棄物貯蔵のため、深さ 300~600m の大口径ボアホール内に、固体高レベル放射性廃棄物と発熱性中レベル放射性廃棄物を貯蔵する構想を考えている。

ここで、容器中に密封した放射性廃棄物の最終貯蔵のためには、貯蔵ボアホールは乾燥していなければならない。これはボアホール循環泥水によるサビで容器が腐蝕すること及びボアホール充填装置が放射性汚染を生ずること等を防止するためである。この2つの要件は、乾式ボーリングの実施によってのみ満たすことができ、エアードリルにより孔内洗浄液体に代わって線粉を搬送排除することになる。最終貯蔵場としての地層を利用することは、坑道にできるだけ多くの貯蔵空間を、またそこから垂直に深く開発することによって可能となる。

また、大量のバラ荷の最終貯蔵のため、技術的・経済的に相当のコストをかけてこのようなボアホールを掘削する場合は、立坑なみの直径 3.5 から 5m のボアホールが考慮の対象となる。

(iii) 三池炭田有明海の海上試錐（深度 1,000m クラス）<sup>35)</sup>

当該地域における地層の構成は、図 1.3.2-3 の地質層序に示すとおり、花崗岩（地域南部）もしくは結晶片岩（地域北部）を基盤とし、下位より古第三紀の大牟田層群及び万田層群から成り、その上位に第四紀の軟質な未固結層が広く分布している。古第三紀層の地層傾斜は 5 度前後の緩傾斜を示すが、地域内には大小規模の数条の断層が発達していることから、比較的複雑な地質構造を呈している。

難地質を対象とする非泥水ボーリングでは、とくに孔壁崩壊防止等、試錐孔の掘

削・維持技術の向上を図るため、試錐地点における地質予測並びに孔内状況の変化に柔軟に対応できる保孔対策が肝要である。

孔内状況の悪化が軽微な場合は、セメンテーションによってある程度まで回復できるが、重度な事態に遭遇した場合には、ケーシング併用の措置を必要とする。

(a) 掘削工法

第四紀層は、ベントナイト泥水を循環しながらメタルビットでノンコアリングの錐進をし、古第三紀層では、逸水が多く、ときに完全逸水となるため、循環泥水を使用することが難しい。また、清水の海上運搬にはコスト的に限度があり、手近に得られる海水を送り、逸水状態のまま計画深度まで掘削する。表 1.3.2-1, 2 に、主な掘削状況及び掘削機器を示す。

(b) 保孔及び逸水防止

帯水層を伴う第四紀層は、3、4段のケーシングで保孔する。古第三紀層では、海水によるオールコアリングを実施し、断層擾乱部、地山不良部及び崩壊性の地層においてセメンテーション、状況に応じてケーシングにて保孔する。セメンテーションは、都度注入量を正確に計算し、注入には小口径ロッドを使用する。図 1.3.2-4 に、ケーシング保孔の模式図を示す。

(c) 孔曲り測定

探査ボーリングは、鉛直であることが望ましい。高精度の測定器出現により、掘削後の孔芯の軌跡を正確に捉えることで、調査データの精度向上を図っている(図 1.3.2-5)。

地質層名	地質記号	地質図例	海底下深層 (m)	層厚 (m)	備考					
泥層	四	泥層	12250	12250	砂泥層 最下部 23.1m は安山岩					
古田群	山	II-a部 II-b部 I-b部 I-a部	80225	67975	泥岩・極細粒砂岩 極細粒砂岩中に、海綠石及び 貝片入り。					
						浮立層	91925	11700	石灰岩層 第一層 第二層 粗粒砂岩	
						大年田群	七	102304	10379	石灰岩層 上層 粗粒砂岩
							米の山	104145	1841	石灰岩層 本層 泥岩
						赤崎群	水	107660	3515	粗粒砂岩
底層		(111000)	(3340)	泥岩・硬塊り極細粒砂岩 (結晶片岩)						

図 1.3.2-3 地質層序

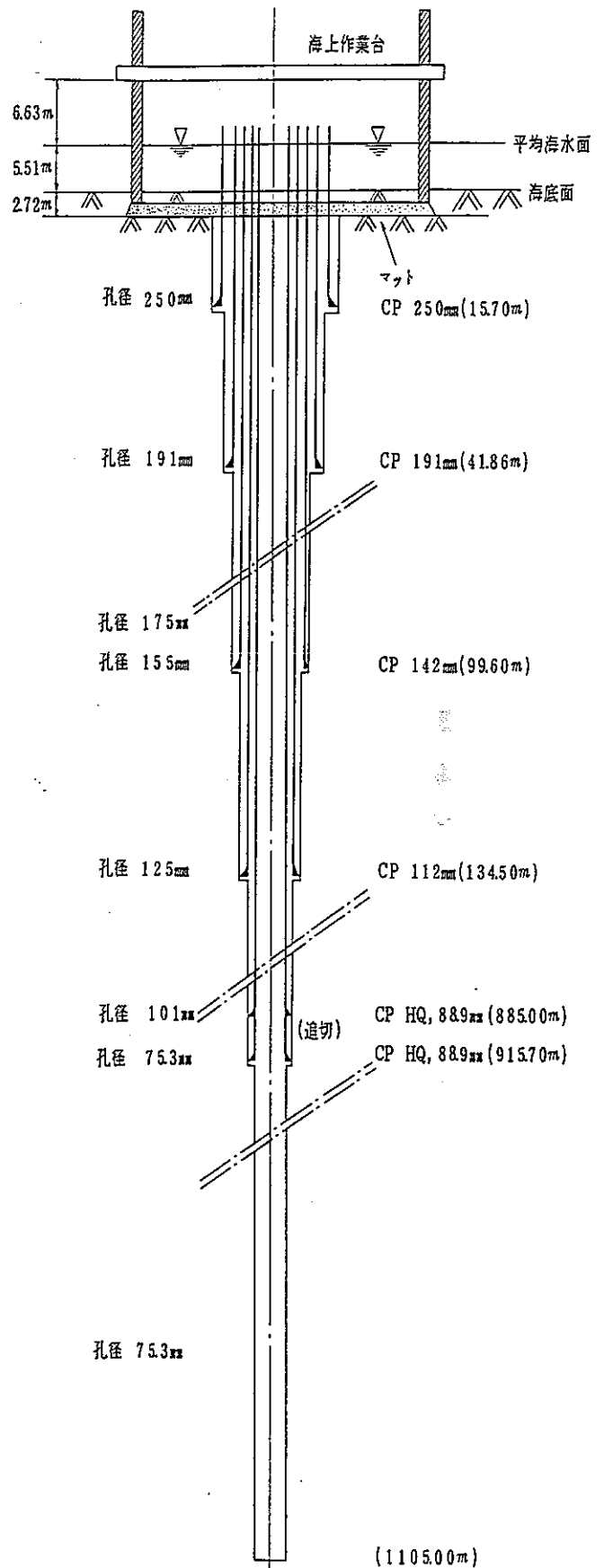


図 1.3.2-4 ケーシング模式図

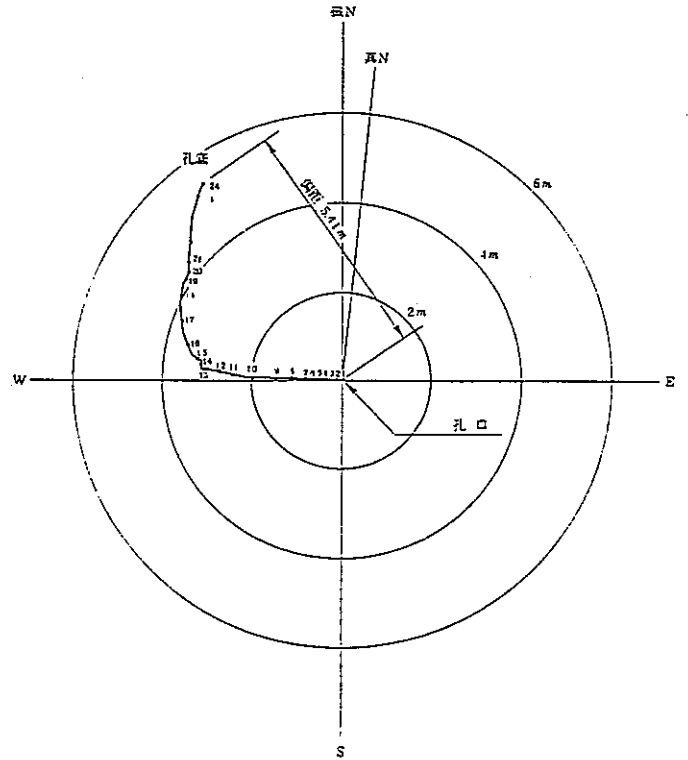


表 1.3.2-1 有明中央海域海上試錐 (深度 1,000m クラス)

試錐番号	掘削期間 年度, 月/日	掘削深度 (m)	セメンテーション箇所 ケーシング段数	平均孔芯傾斜 (偏距 m, 度)
A 3	84,11/11~85,3/9	1,105.00	10 箇所, 5 段	15.85,(0.82)
A 4	85,7/15~11/5	1,159.60	16 箇所, 5 段	53.11,(2.62)
A 5	86,7/19~11/4	1,063.00	11 箇所, 5 段	5.41,(0.29)
A 6	87,7/21~88,1/12	1,361.75	26 箇所, 6 段	9.24,(0.39)
A 7	90,8/17~12/26	1,361.00	不詳, 4 段	25.68,(1.08)

測点 深	測定 深度	区間 距離	計算距離		傾 斜	垂直深度		区間 偏距	方 位
			上 下	計		区間	累計		
1	0								
2	50	50	25	25	0° 4'	25.00	25.00	0.03	(N88° W)
3	100	50	25	50	0° 8'	50.00	75.00	0.12	(N88° W)
4	150	50	25	75	0° 12'	50.00	125.00	0.17	(N88° W)
5	200	50	25	100	0° 10'	50.00	175.00	0.15	(N88° W)
6	250	50	25	125	0° 8'	50.00	225.00	0.12	(N88° W)
7	300	50	25	150	0° 10'	50.00	275.00	0.15	(N88° W)
8	350	50	25	175	0° 12'	50.00	325.00	0.17	(N88° W)
9	400	50	25	200	0° 20'	50.00	375.00	0.29	(N88° W)
10	450	50	25	225	0° 40'	50.00	425.00	0.58	(N88° W)
11	500	50	25	250	0° 34'	50.00	475.00	0.49	(N88° W)
12	550	50	25	275	0° 20'	50.00	525.00	0.29	(N75° W)
13	600	50	25	300	0° 28'	50.00	575.00	0.41	(N80° W)
14	650	50	25	325	0° 14'	50.00	625.00	0.20	(N86° W)
15	700	50	25	350	0° 13'	50.00	675.00	0.19	(N 4° W)
16	750	50	25	375	0° 16'	50.00	725.00	0.23	(N50° W)
17	800	50	25	400	0° 37'	50.00	775.00	0.54	(N24° W)
18	850	50	25	425	0° 42'	50.00	825.00	0.61	(N 6° W)
19	900	50	25	450	0° 30'	50.00	875.00	0.44	(N10° E)
20	950	50	25	475	0° 22'	50.00	925.00	0.32	(N22° E)
21	971.10	21.10	10.55	35.55	0° 12'	35.55	960.55	0.12	(N 4° W)
22	1000	28.90	14.45	25	0° 36'	25.00	985.55	0.26	(N 1° E)
23	1050	50	14.45	39.45	1° 15'	39.44	1024.99	0.86	(N 4° E)
24	1062.35	12.35	6.175	31.175	1° 10'	31.17	1056.16	0.63	(N17° E)
孔底	1063.00		6.175	6.825	1° 27'	6.82	1062.98	0.17	(N24° E)

(村田式孔曲り測定器による測定値)



(平面図)

図 1.3.2-5 孔芯図 (A 5 試錐)

表 1.3.2-2 主要機器類 (有明海上試錐)

名 称	メーカー, 型式	仕 様	数 量
試 錐 機	鉦研製 クラスター CR-2B	寸 法 L 3,120×W1,320×H2,390mm 重 量 3.5 t 回 転 数 正転 8 段, 逆転 2 段 35~945 rpm 巻 上 7.1 t, 200m/分 スピンドル 内径 107% φ, 外形六角 原 動 機 モーター 30 kw-4P	1 台
泥 水 ポ ン プ	鉦研製 MG-40	寸 法 L 2,900×W900×H1,450mm 重 量 2.0 t 吐 出 量 480~35ℓ/min 吐 出 圧 22kg/cm <sup>2</sup> 原 動 機 モーター 30 kw-4P	1 台
ミ キ サ ー	鉦研製 HM-250	寸 法 L 1,260×W920×H1,100mm 重 量 0.3 t 容 量 250ℓ 原 動 機 モーター 5.5 kw-4P	1 台
ワイヤライン ホイスト	鉦研製 WLS-4s-4	寸 法 L 1,130×W450×H1,000mm 重 量 0.2 t 巻 上 1.6 t, 13~140m/min 原 動 機 モーター 3.7 kw-4P	1 台
水中サンド ポンプ		吐 出 径 4" 原 動 機 5.5 kw	1 台
水 中 ポ ン プ		吐 出 径 3" 及び 2" 原 動 機 5.5 kw 及び 0.5 kw	各 1 台
槽	鉦研製 SDA-20B サブストラクチャー付	寸 法 L 6.0m×W6.0m×H2.0m 耐 荷 重 40 t 重 量 8 t	1 組
水 タ ン ク		容 量 5m <sup>3</sup> 2m <sup>3</sup> 0.5m <sup>3</sup>	各 1 槽
マッドスクリーン		原 動 機 2.2 kw	1 台
ゼネレーター	日本車輛製 EDG-125SN	寸 法 L 3,600×W1,140×H1,780mm 重 量 3.5 t エンジン 日野 EK-100	1 台
その他電気器具	電気熔接器 分 電 盤 電動ウインチ	200A 400A, 100A 1.5 t	1 台 各 1 台 1 台
ボーリングロッド	HQ WL φ 88.9% × 3.0 m 33.6kg/本 NQ WL φ 70.0% × 3.0 m 24.0kg/本 BW φ 54.0% × 3.0 m 18.7kg/本		

## (2) 今後の研究課題の抽出

非泥水掘削技術として、乾式ボーリングは、現状の技術水準では深層掘削が難しく、その解決となると、装置がかなり大がかりになる。また、掘削過程もしくは掘削後の各種試験を考慮すれば、調査孔としての目的にそぐわないことが想定される。

前述した有明海上試錐は、循環水に海水を使用しているが、実際は清水使用の方が海水よりも孔壁保護の面で優れている。

かかる観点から、清水掘削では、先ず逸水を考慮して十分な清水の確保を前提とする。また、保孔対策は、各種孔内測定・試験への影響を最小限にする方策として、通常のケーシングパイプよりもかなり高価な保孔ツールスとなるが、強度を高めたステンレス非磁性ケーシングパイプの開発・導入の検討を必要とする。

また、セメントに替わる地下水等に全く影響を及ぼさない保孔剤及び逸水防止剤の研究開発も必要である。

さらに、清水掘削では、孔壁崩壊・張出し等を要因とするジャーミング（ロッド抑留）等の掘削トラブルの発生が危惧されるため、前述した MWD システムの簡便法として、高能率試錐システムに係る孔内事故防止システムの応用も考えられる。

本システムは、地上の試錐機及び送・排水ラインに各種センサーを装着し、掘進速度、ビット荷重、トルク、回転数、送水圧及び送・排水量等の掘削パラメータをリアルタイムに計測し、モニタリング・警報機能に基づく掘削制御により、オペレータの主観を極力回避して掘削トラブルを未然に抑止することを目的としている<sup>36)</sup>。

### 1.3.3 ボーリング孔を利用した調査技術<sup>37), 38), 39)</sup>

深地層の地質環境の諸特性に関するデータ、特に、地下深部においては地下水の水質や賦存状況・流動状況を把握することが重要であるので、原位置でのデータを精度良く取得できる技術の改良・開発が必要である。その要件としては、地下の情報をできるだけ正確に取得するため、地層や地下水の性質を変化させずにそのままの状態で計測・測定すること、地下深部での圧力や温度の下で正確なデータを取得すること、さらに地質環境をできるだけ非破壊で把握すること等が挙げられる。

## (1) 調査試験技術開発の現状

### (i) 岩盤の水理特性調査

岩盤の水理特性を原位置で得るために、揚水試験や現場透水試験、単孔式の透水試験、クロスホール透水試験など水理試験方法が一般的に実施されている。また、原位置水理試験の補完として室内の岩石透水試験や水質調査、水質試験も行われている。

これらの透水試験方法をもとに数百 m 以深の水理特性を把握するために、調査機器の大深度化や難透水性岩盤の透水係数や間隙水圧などを精度良く測定するための水理試験装置の開発が進められている<sup>40)</sup>。

#### (a) ジョンソンフォーメーションテスタ (JFT)<sup>41)</sup>

大深度地下対応のホース式またはパイプ式の調査機器である。パイプ式の調査機器はボーリング孔内への挿入・回収が非効率的であるが、岩盤が軟弱で崩壊が発生した場合でも回収しやすいなどの長所を持っている（適用深度 500m）。

#### (b) 動燃式低水圧制御水理試験機（動燃式 J F T 試験機）<sup>42)</sup>

透水係数  $10^{-4} \sim 10^{-9} \text{cm/s}$  の難透水性岩盤において、透水係数及び間隙水圧を効率良く測定することができる（現在適用深度 1,000m）。

#### (c) 低圧ルジオン水理試験装置

動燃式低水圧制御水理試験機と相互比較を行う目的で、従来型の定常法ルジオン水理試験装置を改良し、低圧注水微流量測定による試験装置である（測定範囲  $10^{-3} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ ）。

#### (d) 孔間透水試験<sup>43), 44)</sup>

単孔式の透水試験で得られるデータは、ボーリング孔周辺の水理特性を表しており、その空間的な広がりや異方性に関する情報を得ることは困難である。このような問題点を解決するために、クロスホール透水試験が用いられる。

クロスホール透水試験では、定圧・定流量の注水または揚水試験法が用いられるが、その他に、注水圧または流量を周期的に変化させる正弦波の注入法も提案されている。この方法は、地下の水位や水圧が変化する場合でも圧力応答を捉え易い長所がある。

### (ii) 地下水の地球化学的特性調査

試錐孔を利用して、地質環境が本来有する特性をできるだけ乱すことなく、地表

から地下深部までの地下水の地球化学特性を、正確かつ迅速に把握するための調査機器が開発されている。これまでに、深度 500m までの地下水を原位置で採取する装置の開発を終了し、深度 1,000m までの地下水の物理化学パラメータを原位置で測定でき、かつ地下の圧力・雰囲気を保持したまま地下水を採取できる装置が開発されている。さらに、その耐熱性の向上と軽量化（総重量 10ト以下）を目指した装置の開発も実施されている<sup>45)</sup>。

基本仕様	
適応孔径	φ 75~130mm
総重量	約 15ト
採水方式	ポンプ式及びバッチ式
地下水位	低下限界 G.L.-300m
挿入方式	パイプシステム
測定項目	酸化還元電位, 電気伝導度 pH, 酸化物イオン濃度, 水温

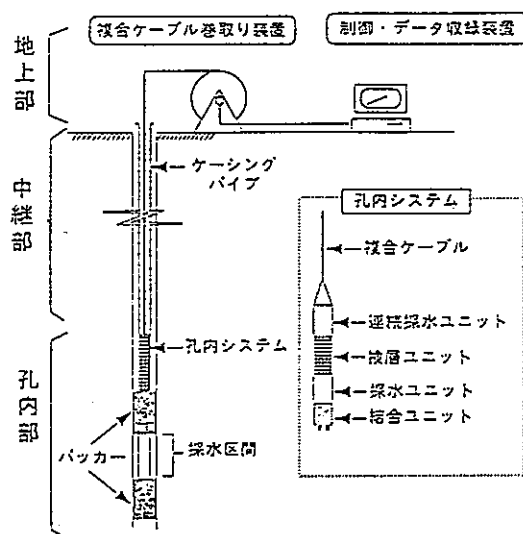


図 1.3.3-1 1,000m 対応採水装置概念図

### (iii) 地球物理学的調査

地球物理学的手法には、リモートセンシング、弾性波探査、電気探査、物理探査及びボアホールテレビなど多種多様な調査法がある。最近では、小領域を対象にボーリング孔を利用し高精度に地下の地質構造や物性値の空間的な広がり把握する手法として、数十 m 程度の狭い範囲を対象にボーリング孔を利用して水理特性に関する物性値の空間的広がりを非破壊で精密に把握できるトモグラフィ解析技術が用いられている。

#### (a) 物理検層

ボーリング孔周辺の岩盤の物性をボーリング孔に沿って連続的に取得できる技術であり、これまでに、物理検層の一つである電気検層による岩盤の見かけ比抵抗値から透水係数の深度方向分布を推定する手法の適用性についての検討が進められている。

また、測定回数を減らし、測定能率の向上を図るため、計測ソンドの複合化

(コンビネーションゾンデ)等の研究開発も進められている<sup>46)</sup>。

(b) VSP法 (Vertical Seismic Profile)

VSP法は、地表から発信した弾性波をボーリング孔内で受信することにより、地表からの地震探査法よりも詳細に岩盤内の弾性波速度や減衰率の分布を調査できる方法である。

最近、P波に加えS波も利用すると、地層の性質について多くの情報が得られることから、S波震源や三成分受振器ツールズを利用したS波VSPの試みが盛んに行われている。

例えば、P波とS波の区間速度の比 $V_p/V_s$ や、さらにはポアソン比を算出することで、岩相を推定したり、S波の偏光異方性を調べ、地層内のクラックの配列方向や分布密度を推定しようという試みもなされている<sup>47)</sup>。

(2) 今後の研究課題の抽出

- ① 深部地下水の原位置採取装置におけるコンパクト化/軽量化
- ② 高精度・高能率孔内測定システムの確立

地質環境を非破壊で各種岩盤物性を正確に把握するためには、物理検層及びVSP探査等を駆使することが最善の方法と考えられる。そのためには、測定の高精度化並びに清水裸孔内での測定作業の高能率化に向けての技術開発を必要とする。

VSP探査では、反射法地震探査よりもデータ量のはるかに少なく統計的取扱いが困難であること、探査領域が狭いこと等の探査費用に関わる問題解決として、マルチオフセット方式のVSP探査の実用化に向けての研究開発が挙げられる。

1.3.4 エアドリル技術<sup>48)</sup>

(1) 特徴

エアドリルは、1950年代に始まりその特徴は高掘進率によるコスト削減、連続的炭化水素の検知、掘削流体による油層への小ダメージ、逸泥対策、コアリング等が挙げられる。

(2) エアドリルの機構

硬岩層は地層水の存在が少ない場合が多く、エアドリルに最も適している。掘り屑

が粉末状を呈する場合の掘削法（ダスティング）の他にドライな状態を保てない時の掘削法（ミストドリリング）、空気混合泥水掘削（スラグドリリング）等がある。ミストドリリングは地層水が多い場合に空気とともに発泡剤を注入するものであり、空気混合泥水掘削は泥水中に空気を送り込むものである。エアドリルの最大の長所は高掘進率であることと、カッティングスの分離が容易で、さらにカッティングス自体のサイズが細粒化することである。エアドリリングではエアを注入することにより掘進部の静水圧を減少させることができ、このことが掘進率向上となっている。図 1.3.4-1 に掘進率と静水圧（fluid column press. - pore fluid pressure）の関係を示す。

ビットライフは長いものの、磨耗は大きな問題点である。ビットライフ、掘進率とも one blanking bit 使用によって向上できる。これはジェットノズルの内1つを閉鎖するものである。例えばコーン2個を選び、その中間のノズルをブランクにする方法がある（図 1.3.4-2）。

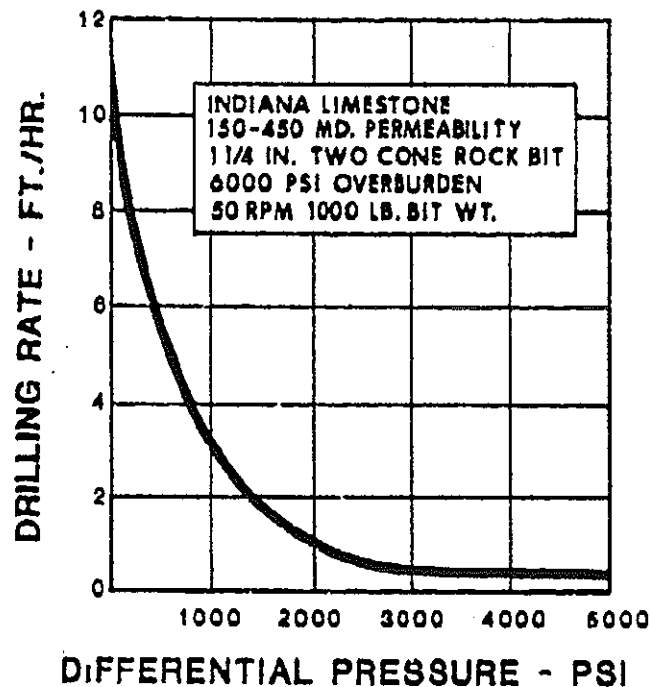


図 1.3.4-1 掘進率と静水圧（流体コラム圧-間隙流体圧）の関係

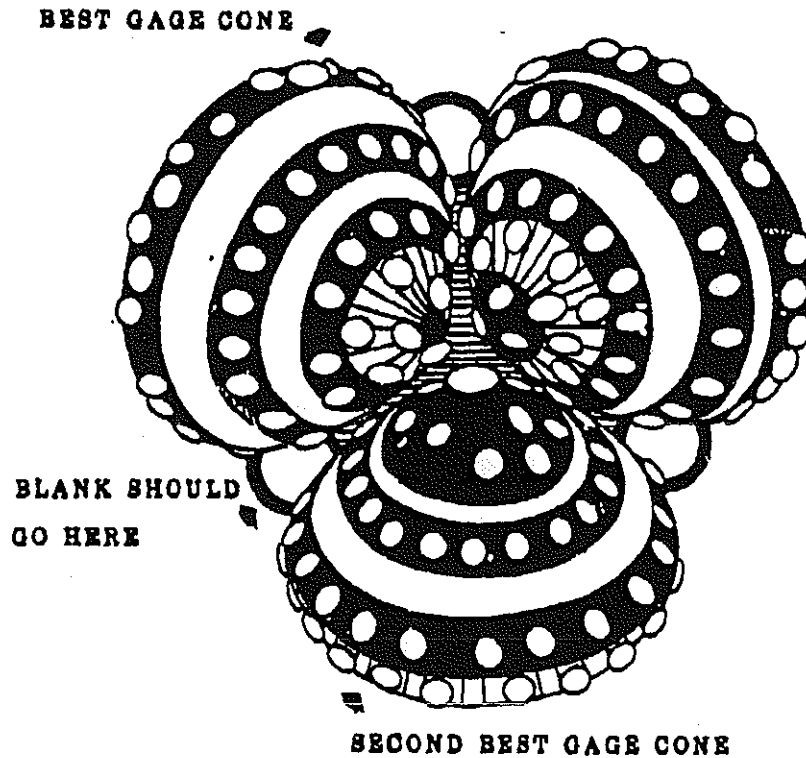


図 1.3.4-2 コーンビットのブランク

(3) エアドリルに必要な装置

(i) バルブマニホールド

リグフロアーのスタンドパイプに接続し、適正な掘削用の空気圧を保ち、摩擦抵抗を最小限にするよう空気圧を調整するものである (図 1.3.4-3)。

(ii) 回転ドリルヘッド

ケーシングヘッドにとりつける防噴装置である。回転ラバーシールが重要である (図 1.3.4-4)。

(iii) エアコンプレッサー

掘削流体として適正な圧力維持が必要とされる。2~3個のコンプレッサーをパッケージユニットとして設置する。空気量 400~1,200cf/min、最大圧力 300~320psi のものが普通である。

(iv) ブースター

掘進必要圧力がコンプレッサーの能力を超える場合にはブースターの必要性が生じる。ブースターは 300psi~1,500psi に昇圧可能なものが適している (図 1.3.4-5)。



(v) ミストまたはフォームユニット

ミストドリリング、スラグドリリング等の場合、設置しておく必要がある。

(vi) ブルーイライン

カッピングス排出用の 7~10in 内径のフローラインで、長さは 150~200ft である。(図 1.3.4-6)。

(vii) エアジェット

揚降管作業時もれたガスがリグフロアに充満することを防止する設備である。通常プライマリージェットと予備的なセコンダリージェットとがあり、前者はブルーイラインの端部に、後者はリグの近傍に設置する(図 1.3.4-7)。

(viii) デダスター

粉末状のダスト抑制装置でブルーイラインに簡単に取り付けられる(図 1.3.4-8)。

(ix) サンプルキャッチャー

カッピングサンプル捕集装置でブルーイラインに取り付ける。デダスターが稼働しているとき、カッピングスを観察することができる。もし突然ダストがなくなると何かトラブルの可能性が考えられる(図 1.3.4-9)。

(x) ガススニファー

ブルーイラインに取り付けガスを検知させる。

(xi) 圧力記録装置

連続的に空気圧をモニターする装置である。(図 1.3.4-10)

(xii) 高圧アラーム

掘進中に空気圧が高くなったとき、アラームが作動する。

(xiii) ストリングフロート

ガスまたは空気の逆流を防ぐ。

(xiv) バーンピット

炭化水素流体がリグの近くに溢れた場合、火災を防止する(図 1.3.4-11)。

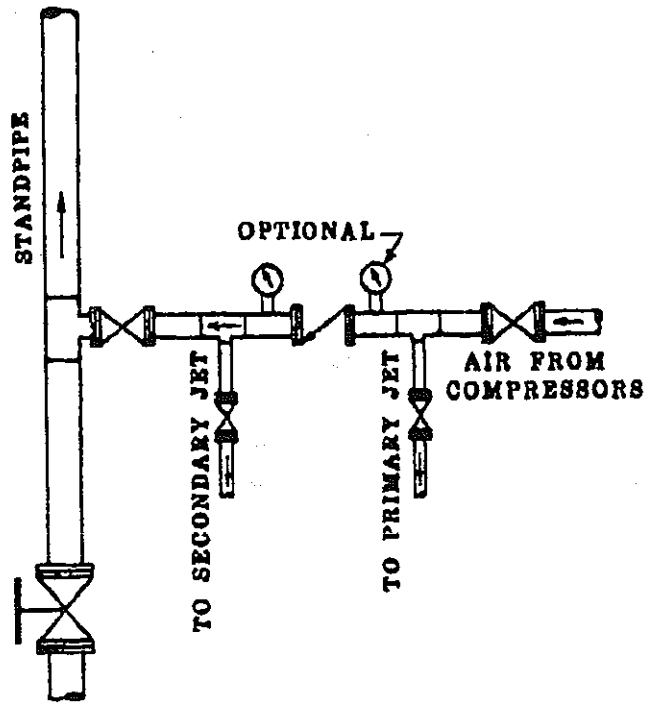


図 1.3.4-3 スタンドパイプ上のバルブマニホールド

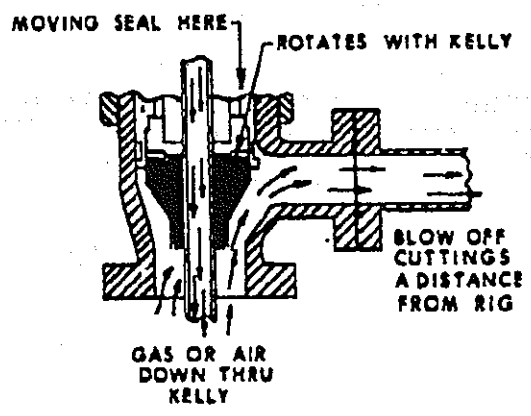


図 1.3.4-4 回転ドリルヘッド

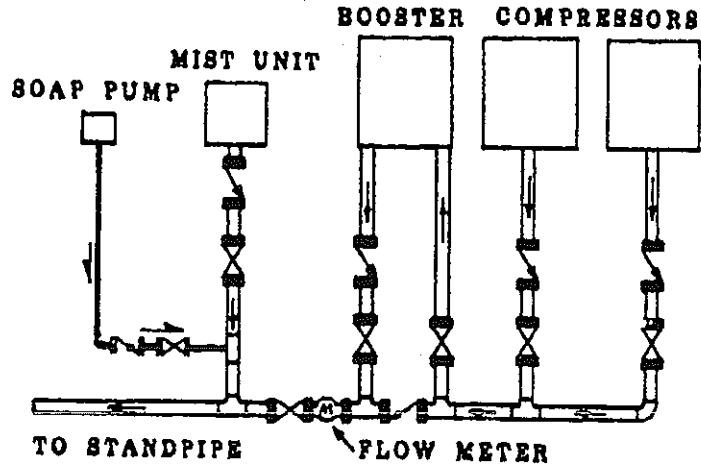


図 1.3.4-5 ブースター

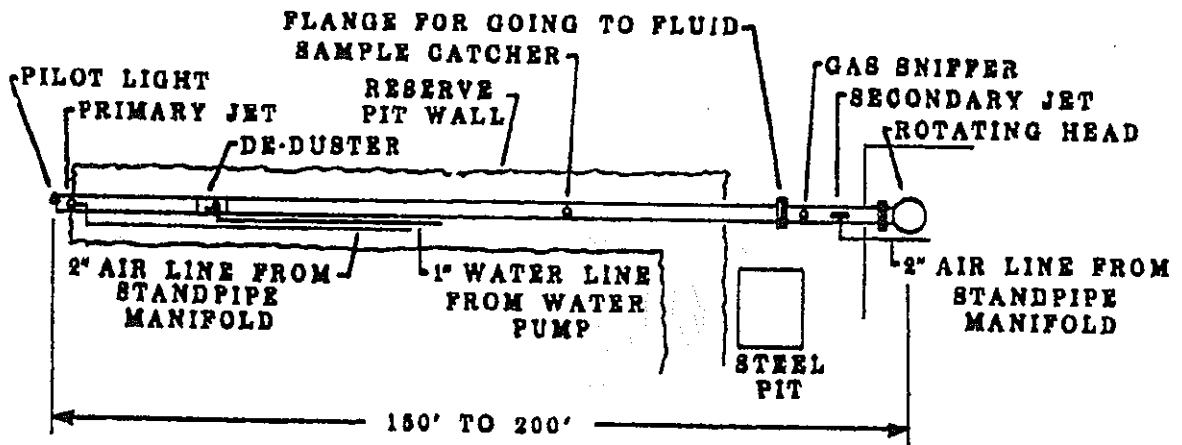


図 1.3.4-6 ブルーライン

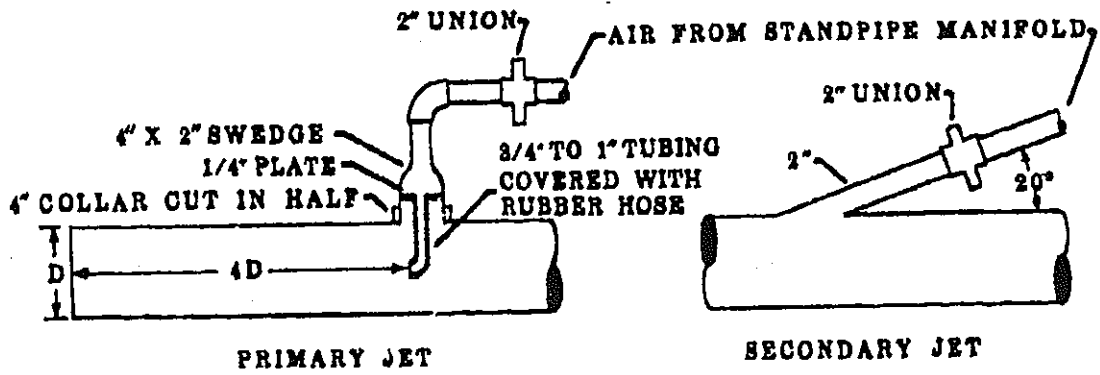


図 1.3.4-7 エアジェット

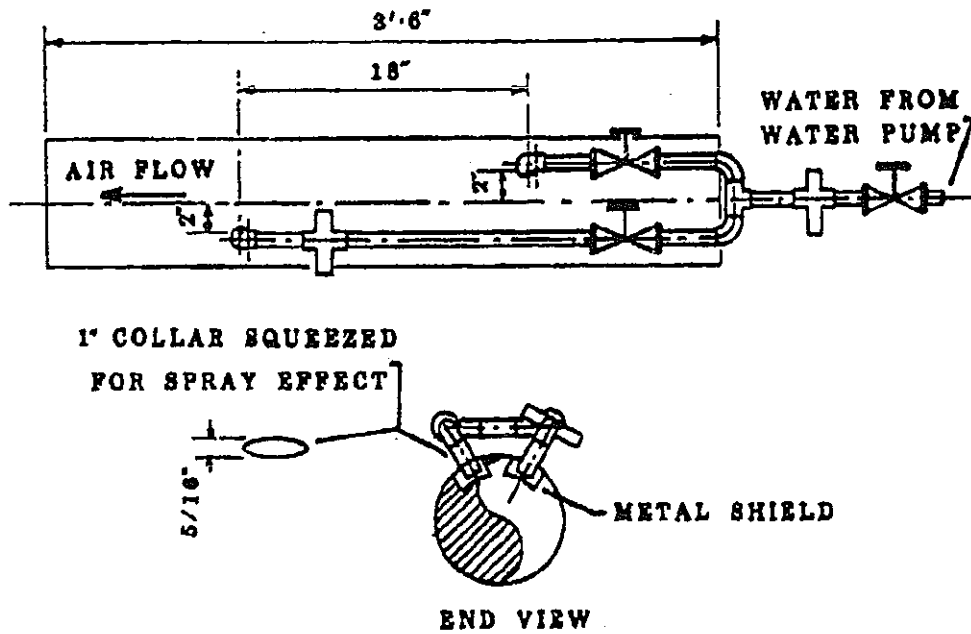


図 1.3.4-8 テダスター

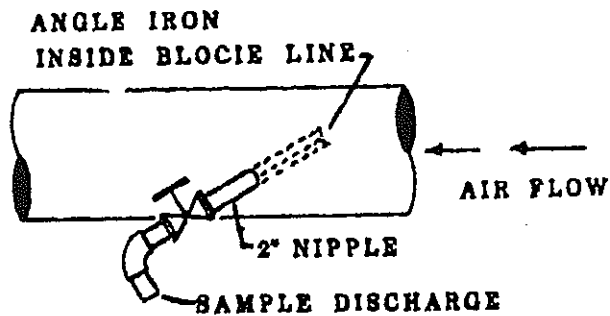


図 1.3.4-9 サンプルキャッチャー

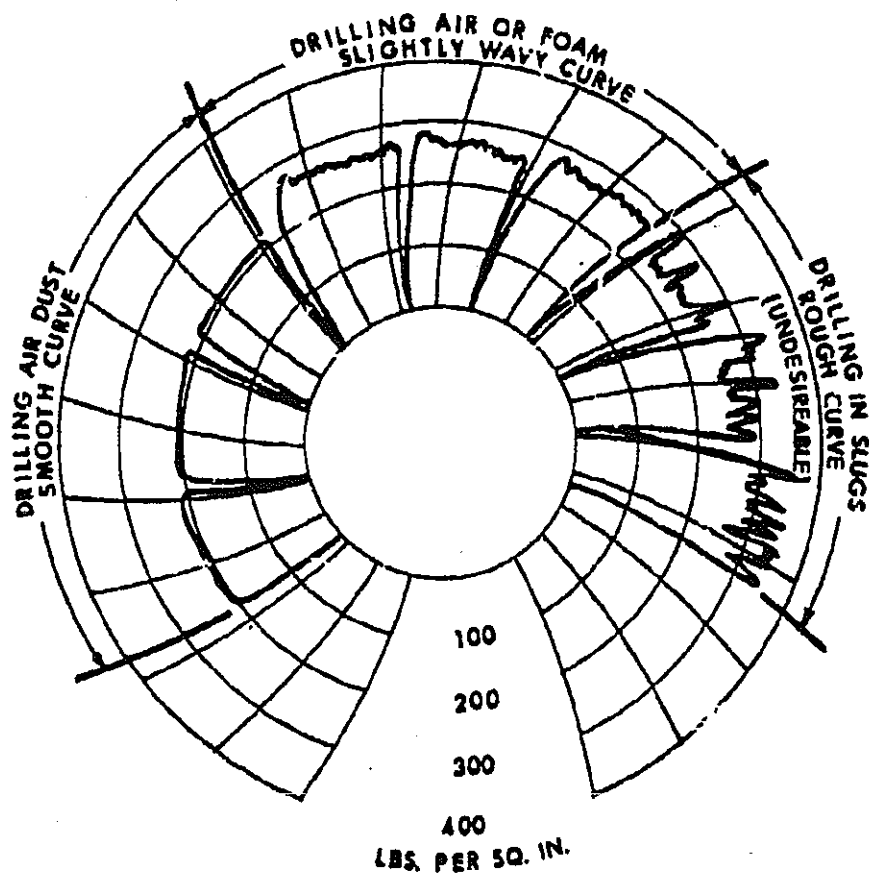


図 1.3.4-10 圧力記録装置

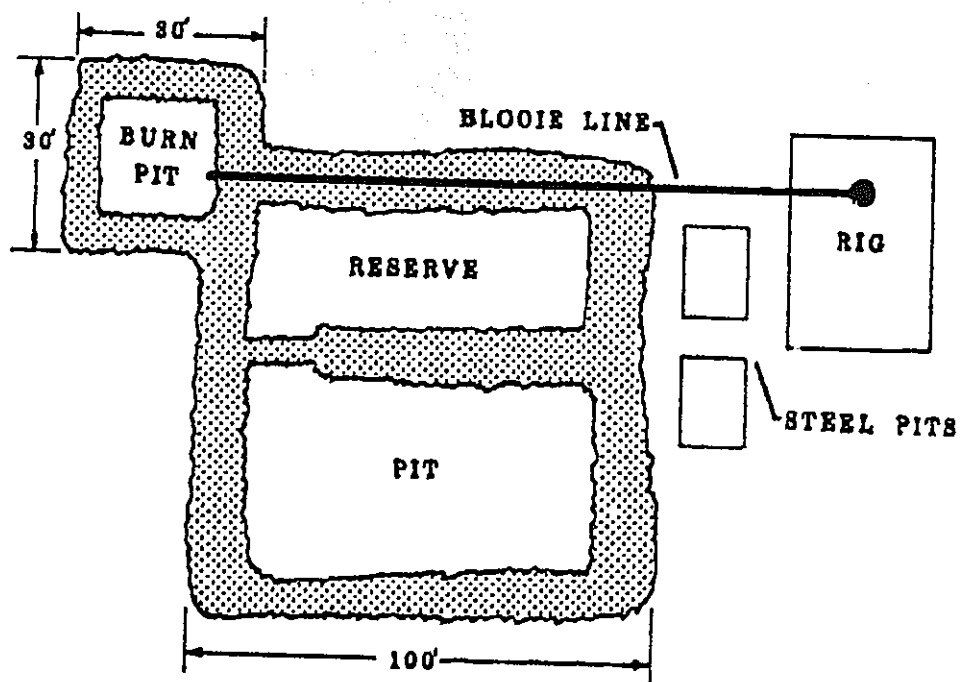


図 1.3.4-11 バーンピット

#### (4) 空気量の必要性

エアドリル作業に際して重要なことは、空気量確保である。平均掘進率 1,000ft/d の硬岩掘削の場合、必要空気量は 2,000~2,400cf/min である（7.875inch ホールに 4.5inch 径の掘管を使用）。孔径が大きくなれば必要量は増える。使用中の空気量が充分であるか否かの判定は、孔を清浄するのに深さ 1,000ft 当たり 1 分を超えないことである。

表 1.3.4-1 は標準的な孔径と深度による所要空気量を示す。

地層水の影響がある場合には、ミストリングあるいは泡混入掘削となるが、ミストの場合には所要空気量は 30~40%増となる。この場合掘進時の空気圧は 200 ないし 400psi で、ダステングに比べて約 100psi 高くなる。

カッティングスが順調でない場合は、1) 空気量を増加する、2) 発泡剤を注入して孔底を洗浄する、3) 流体がクリーンになるまで循環を続ける等の方法がある。

#### (5) 孔内ドライ

既存の液体（水・泥水等）を排除し、内部を出来るだけドライにしなければならない。

#### (6) 孔曲がり防止技術<sup>49)</sup>

孔曲がりを防止する技術として、ペンデュラム技術とパケットホール技術がある。ペンデュラム技術はドリルカラーの重量を利用するのに対し、パケットホール技術はスタビライザーを使う。

##### (i) ペンデュラム技術

ペンデュラムアセンブリはビットと数個の大口径のドリルカラーより成る。ドリルカラーの重量が振り子運動によりビットに加わる力を制御する。

1 例として空気衝撃装置付きペンデュラム掘削を示す。地表近くで硬質な地層に遭遇した場合には、充分なドリルカラーの重量が得られないため、ビットが岩層を貫通することが困難となる。このような場合に空気衝撃ハンマーとペンデュラムアセンブリのコンビネーションが効果的である。

##### (ii) パケットホール技術

パケットホールアセンブリは最低 3 つのスタビライザー、短い大口径のドリルカ

表 1.3.4-1 エアドリル用所要空気量 (ft<sup>3</sup>/min)

AIR REQUIREMENTS

ESTIMATED PENETRATION RATE - 50 FT. PER HOUR

Hole Size	Drill Pipe	Depth and Volume Required S.C.F.M.						
		1000	2000	4000	6000	8000	10000	12000
17 1/2	6 5/8	6150	6600	7150	7700	8400	8950	9500
	5 1/2	6450	6700	7400	8000	8550	9100	9650
	4 1/2	6600	6850	7550	8100	8700	9250	9800
12 1/4	6 5/8	2600	2800	3000	3400	3700	4150	4500
	5 1/2	3000	3100	3350	3900	4300	4700	5000
	4 1/2	3100	3350	3700	4200	4500	4900	5400
11	6 5/8	2000	2150	2350	2650	3200	3550	3900
	5 1/2	2300	2400	2700	3000	3300	3700	4000
	4 1/2	2500	2600	2900	3200	3400	3800	4100
9 7/8	5 1/2	1700	1950	2150	2400	2600	2850	3100
	5	1900	2000	2300	2600	3000	3300	3600
	4 1/2	1950	2100	2400	2700	3200	3500	4000
9	5	1450	1550	1850	2150	2350	2550	2850
	4 1/2	1550	1700	2000	2300	2500	2700	3000
	3 1/2	1700	1850	2200	2600	2700	3000	3300
8 3/4	5	1350	1500	1700	2000	2200	2400	2700
	4 1/2	1450	1650	1850	2140	2400	2600	2850
	3 1/2	1600	1750	2000	2280	2600	2800	3000
7 7/8	4 1/2	1100	1200	1500	1800	2100	2350	2650
	3 1/2	1300	1400	1650	1900	2120	2400	2700
7 3/8	3 1/2	1070	1150	1300	1550	1800	1950	2150
6 3/4	3 1/2	850	1000	1200	1420	1650	1850	2100
6 1/4	3 1/2	710	790	930	1030	1280	1420	1650
	2 7/8	790	850	970	1150	1420	1700	1800
4 3/4	2 7/8	430	500	650	790	930	1070	1200

ラー、通常の長さの大口径のドリルカラーより成る。図 1.3.4-12 に示すように、第一のスタビライザーはビット直上に、第二のスタビライザーは短いドリルカラーの上に、第三のスタビライザーは通常の長さのドリルカラーの上に置かれる。孔曲がり傾向が大きい場合には、追加のスタビライザーが付加される。

### (iii) まとめ

エアドリルにおいて孔曲がりができるだけ少ない掘削技術としてペンデュラム技術とパケットホール技術のアセンブリの検討をした。パケットホールアセンブリのスタビライザーの選択に際して考慮すべきことは、地層の硬度である。すなわち、地層硬度が高い場合には接触面積の小さいスタビライザーで良いが、地層硬度が低い場合には接触面積の大きいスタビライザーでなければならないことがわかった。

その他、エアドリル技術改善のための研究として多相水力学的モデルを用いてカッピングスの移動シミュレーションを実施し、エアドリルのための基礎的設計を構築し、エアドリル実施に関してモデルの予測能力を検討したものである<sup>50)</sup>。

## 1.3.5 傾斜ボーリング技術

### (1) 重金属ドリルカラーの使用<sup>51)</sup>

重く、堅いドリルカラーを用いることで偏距のコントロールが容易になることが知られている。図 1.3.5-1 に示すように重金属を用いたドリルカラーにより同じ傾斜角を維持しながら、より大きなビット荷重を加えることが可能となる。

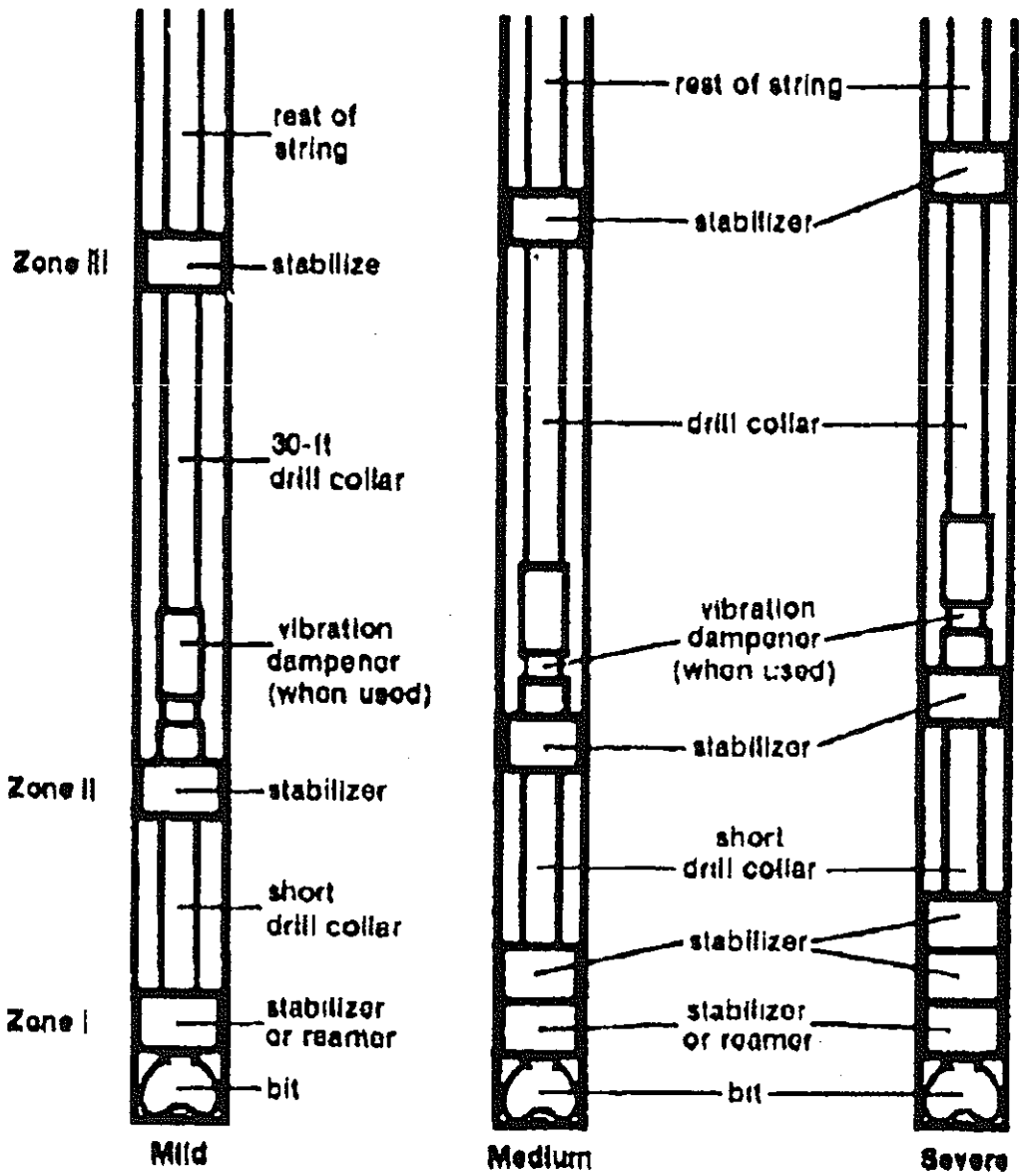
ビット荷重増加で水平方向のビット荷重も大きくなり、横方向の荷重はドリルカラーの振り子運動によってもたらされるため、振り子となる部分の長さが長いほど、また重いほど水平方向のビット荷重は大きくなる。

①は傾斜 5°、12.25in.孔中でスタビライザーを使用していない 8in.スチール製ドリルカラー、②は①と同条件でドリルカラー6.25in カラーを使用したもの、③はドリルカラーをより重いウラニウム性に変更したものである。

重金属は鉄よりも高価であるが、ドリルカラー全部を重金属でできたものに変えなくとも同様の効果がある。



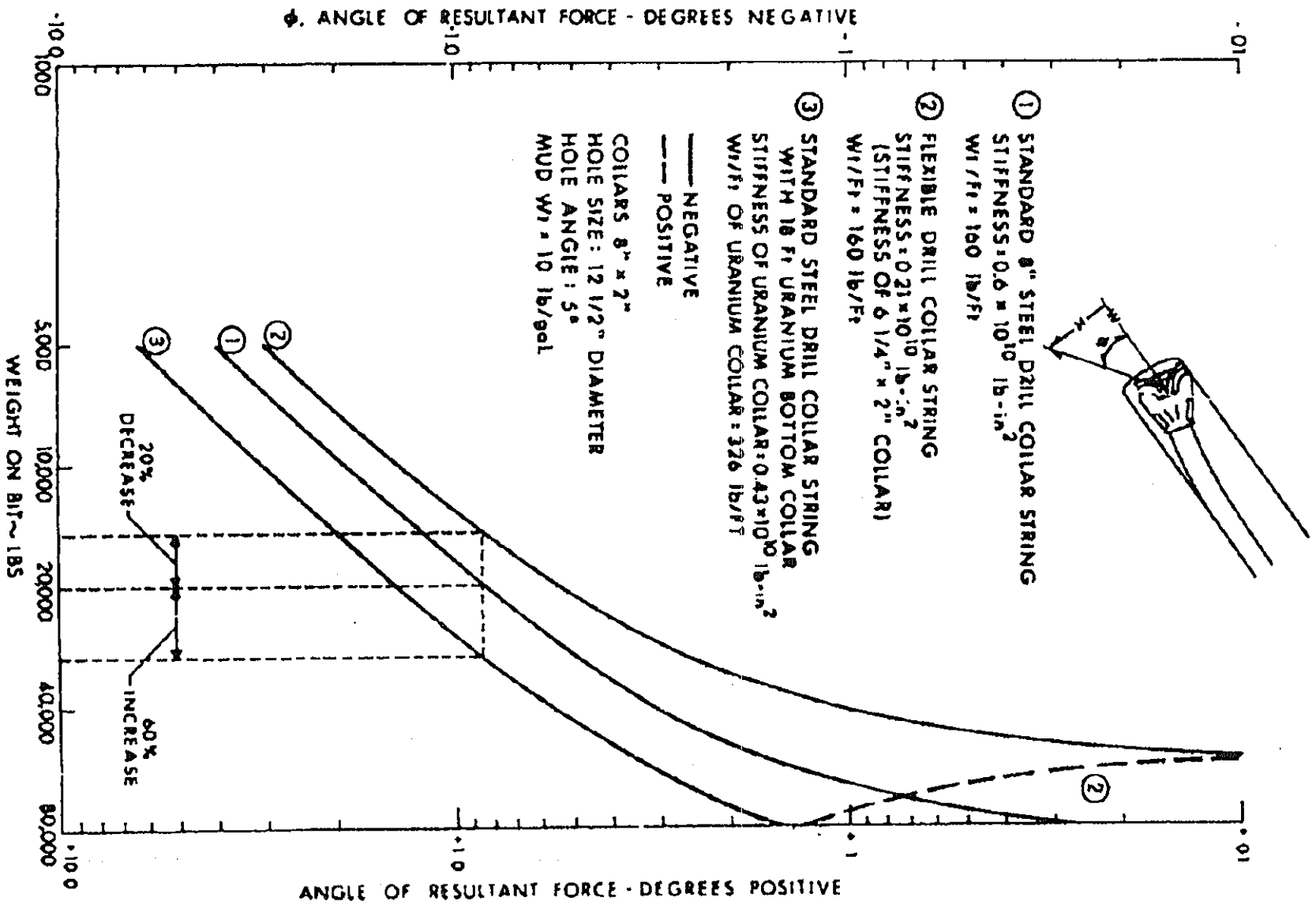
# PACKED HOLE ASSEMBLY



CROOKED HOLE TENDENCIES

FIGURE 5

図 1.3.4-12 パックホール技術



1.3.5-1 トリルカラー重量と傾斜対策の関係

(2) 新ガイダンスツール<sup>52)</sup>

エアドリリングにおいて、傾斜掘りされた各孔井の暴噴対策としてのリリーフ弁の位置の決定、環境保護等を目的として 92mm 径のケーシング内に装置される最新式のガイダンスツールを開発している。

その結果、この新ガイダンスツールを用いることにより下記のことになった。

- ① 掘削の制御が正確にでき、孔底位置が正確にわかる。
- ② ジャイロを用いた連続測定とコンピュータ制御の検層機器を組み合わせることで精度は向上できる。
- ③ 測定の結果、サイトで使用可能であることがわかった。

#### 1.4 地層科学関連調査ボーリングに関わる調査

地層科学関連調査のための各国ボーリング実績、深部地下水水理及び水質の計測方法並びに採取された地下水が掘削に使用された水ではなく原位置地下水であるかどうかの判断基準等について調査した。

##### 1.4.1 アメリカ合衆国

###### (1) ユッカマウンティン

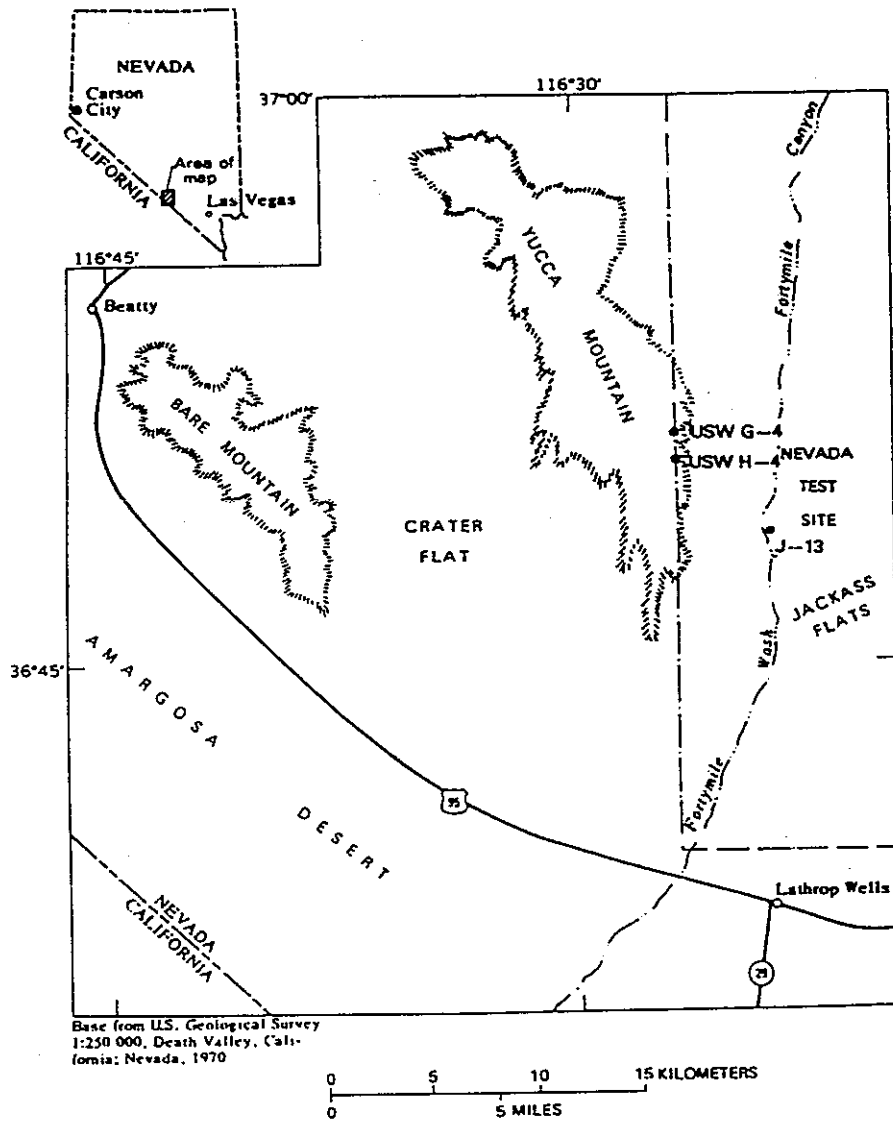
高レベル放射性廃棄物処分サイトとして検討されているNevada州南西部ユッカマウンティンでDOE及び地質調査所が実施したボーリング調査方法を述べる。対象岩盤は凝灰岩である。地表面高度はSL1,248.9mである<sup>53)</sup>。(図1.4.1-1)

ロータリードリル工法を用いて、1,219mまでを1982年3月22日から同年6月7日の工期で掘削した。泥水の代わりに空気泡含有水を用いた。これは空気と洗浄剤及びJ-13井戸(5km南東)から採水した水から成る。空気泡を用いた理由は、地下水汚染の観点より、むしろ目詰まりにより亀裂岩盤の透過係数を低下させないため、また、ボーリング水を岩盤内に入れなかったためである。1%の洗浄剤が使用された。ボーリングの結果、垂直から3°以内の孔曲りで掘削が可能であった。

地下水面は519m(シーレベル730m)であった(図1.4.1-2)。この図から720m以深でボーリング水使用量が増加したことがわかる。試験井USWH-4ボアホールを用いて水理調査を実施した。

まず、I-131トレーサを用いてボアホール水の流れ分布を調査した。地下水組成調査として、1982年5月17日に深度519mから1,219mの間でのボーリング孔内水サンプリング分析(表1.4.1-1)が可能であった。この表から孔内水温度34.8°C下、原位置でのpH7.4条件下で、Na, SiO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub>が多く陽イオン4.1ミリ当量/L、陰イオン3.7ミリ当量/Lである。

最近(1996年)、NWTRB(放技審委)によりNRC(原規委)へ、ユッカマウンティンで地下180mにてCL-36が発見されたことから、さらに水文学的不確実性をなくす必要があるとのコメントがあった。NWTRBは2.5マイルの探査トンネルの必要性を述べている。この探査トンネルは現在掘進中のESF(探査調査施設、未完成)とは別のものである。また処分サイト(2.5マイル×0.75マイルの敷地)に対して地上からのボーリングの必要性及び地下掘削の必要性も述べている。



Location of test well USW H-4 and nearby geographic features in southern Nevada.

図1.4.1-1 ユッカマウンテンUSWH-4ボーリング孔位置

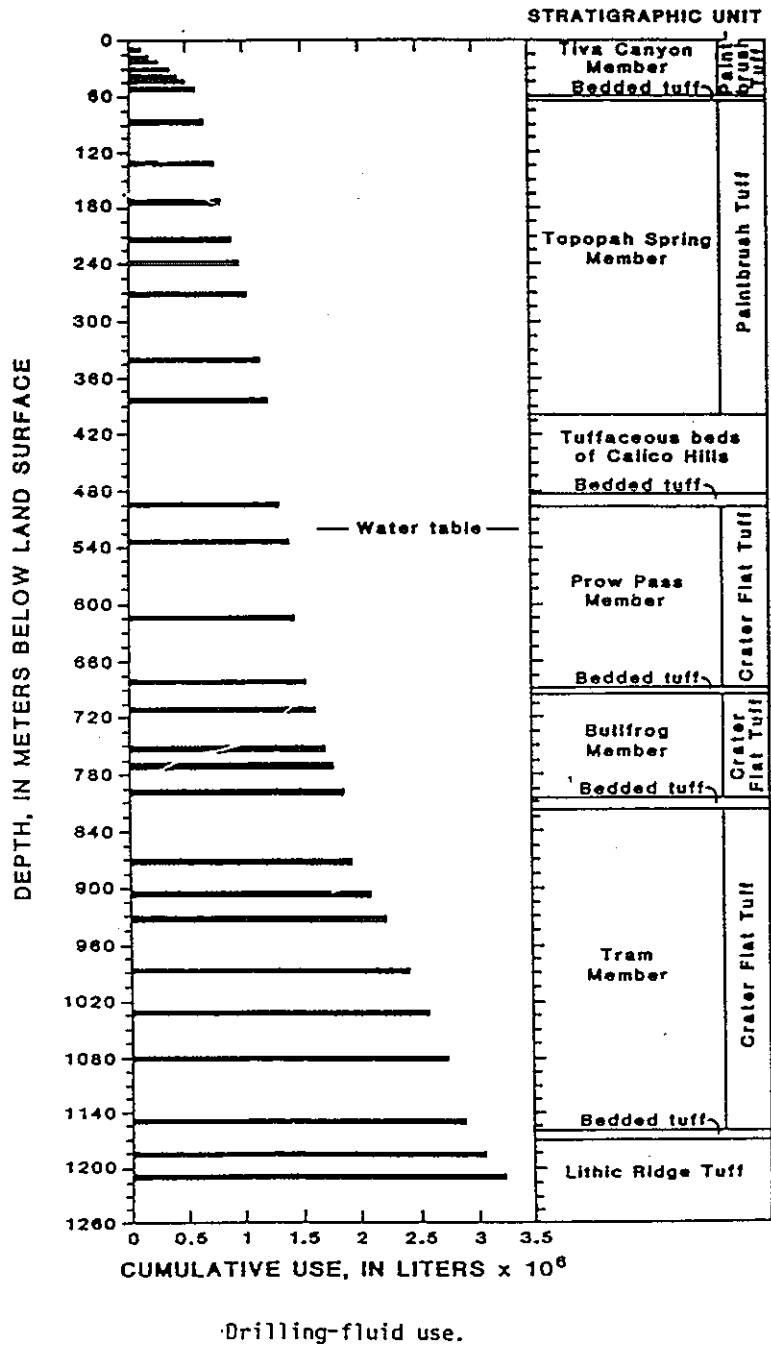


図1.4.1-2 ユッカマウンテンUSWH-4ボーリング水使用量と深度の関係

表1.4.1-1 ユッカマウンテンでのUSWH-4ボーリングの地下水化学組成

[All units are milligram per liter unless otherwise indicated; sample collected 05/17/82 during pumping of depth interval from 519 m to 1,219 m]

Chemical constituents or physical property	Value
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> ) (onsite)-----	173
Alkalinity (CaCO <sub>3</sub> ) (laboratory)-----	140
Calcium (Ca)-----	17
Carbon-13/Carbon-12 ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) <sup>2</sup> -----	-7.4
Carbon-14 (H <sub>2</sub> O)AGE-----	17,200
Chloride (Cl)-----	6.9
Deuterium/hydrogen ratio ( $\delta^2\text{H}$ ) <sup>3</sup> -----	-104.0
Fluoride (F)-----	4.6
Lithium (Li, micrograms per liter)-----	130
Magnesium (Mg)-----	0.29
Oxygen-18/oxygen-16 ratio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) <sup>4</sup> -----	-14.0
pH, laboratory (units)-----	7.9
pH, field (units)-----	7.4
Potassium (K)-----	2.6
Residue on evaporation-----	248
Silica(SiO <sub>2</sub> )-----	46
Sodium (Na)-----	73
Specific conductance, field (microsiemens) <sup>5</sup> -----	340
Specific conductance, laboratory (microsiemens)-----	381
Strontium (Sr, micrograms per liter)-----	27
Sulfate (SO <sub>4</sub> )-----	26
Temperature (degrees Celsius)-----	34.8
Tritium (picocuries per liter)-----	10
Cations (milliequivalents per liter)-----	4.114
Anions (milliequivalents per liter)-----	3.785
Difference (percent)-----	4.16

<sup>1</sup>Chemical analysis made by U.S. Geological Survey laboratory, Denver, Colo.

<sup>2</sup>Deviation of carbon-13/carbon-12 ratio of sample from PeeDee Belemnite standard (PDB) relative to PDB, in parts per thousand.

<sup>3</sup>Deviation of deuterium/hydrogen ratio of sample from standard mean ocean water (SMOW) relative to SMOW, in parts per thousand.

<sup>4</sup>Deviation of oxygen-18/oxygen-16 ratio of sample from standard mean ocean water (SMOW) relative to SMOW, in parts per thousand.

<sup>5</sup>Equivalent to micromhos per centimeter at 25°C.

また、特定サイトを対象としない深層ボーリング孔を利用したプルトニウム含有の放射性廃棄物処分の構想を述べている<sup>54)</sup>。これは、4kmのボーリングを掘削して、2km以深の個所に処分する構想である。ボーリング孔は0.5~0.75m直径であり、10年間で50MTプルトニウムを処分できる考え方を示した(図1.4.1-3)。

#### 1.4.2 イギリス

##### (1) セラフィールド

1997年2月、Nirexではセラフィールド近郊に低・中レベル地下研究所(正式名称;岩石特性調査施設(RCF))の建設構想を示している。主として原位置での岩盤地質水文特性調査であり、総工費250億円、完成後の研究費143億円と見積られている。

現在(1996年)最深ボーリング長は、1,950mで総ボーリング長は25,712mである。対象フィールドは $5 \times 10^6 \text{m}^2$ と考えられている。深部地盤調査データ取得のためさらに、坑道掘進も検討されている(図1.4.2-1~2)<sup>55)</sup>。

このボーリングの目的は、地質構造調査、コアの回収・調査、地下水水頭調査、孔内壁調査、水化学/同位体モニタリングなどである。

ボーリング泥水には添加剤としてポリマーを使用し、その中にLiClトレーサを1,000mg/l含有し、Liをモニタしている。pH, redox, 溶解中カーボン, CL-14も調査している。

この一連のボーリングの結果、Mesozoic堆積盆地はCarboniferous & Permian-Triassic 堆積岩から成り、地表300m以上の高度で海岸から12km離れている場所では、深度0~1,600m間は堆積岩であり、その下に変成岩(Ordovician)、火山岩が存在することがわかっている。また、変成岩、火山岩の直上はbressia(角礫岩)が約450m厚で存在し、処分場予定地はbase brecciaであるがその上にはカバーロックとして低透過性砂岩、その上に中透過性砂岩が存在することがわかっている(図1.4.2-3)。

NaClの支配的傾向があり、塩分はボアホールの深さとともに増加することがわかった。Total dissolved solid(TDS)では1g/l以下が深度200~300mに存在した。1,000~2,000m深度では塩分は東から西に向かって増加することがわかった。

PRZ(Potential Repository Zone)は、25~30g/lであった(1,600m深度での測定の結果)。

塩分濃度分布に基づいて、地下水は海水起源であり、そのドライビングフォースは



TYPICAL ARRANGEMENT OF DEEP BOREHOLE WITH EMPLACEMENT CANISTERS IN EMPLACEMENT ZONE

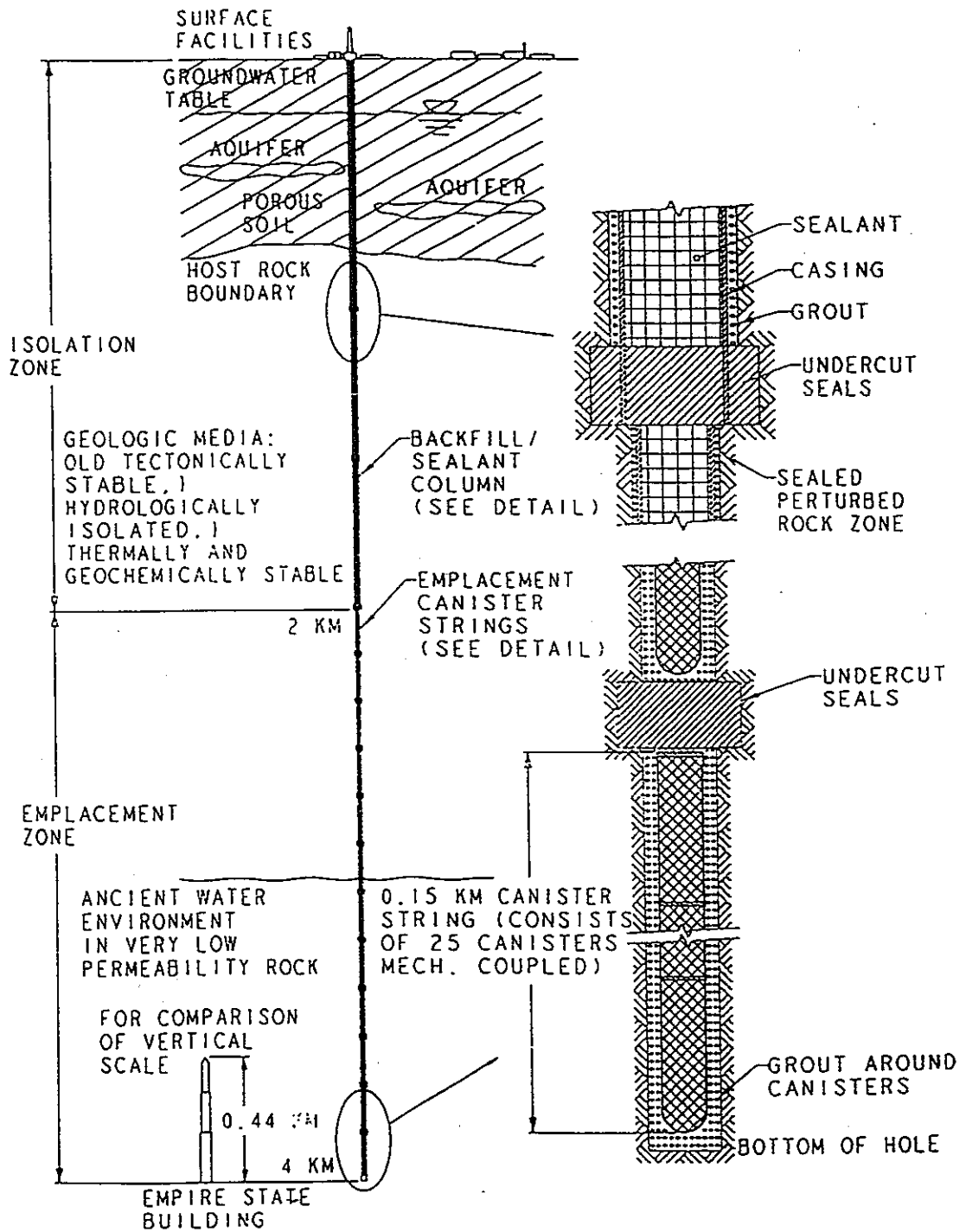
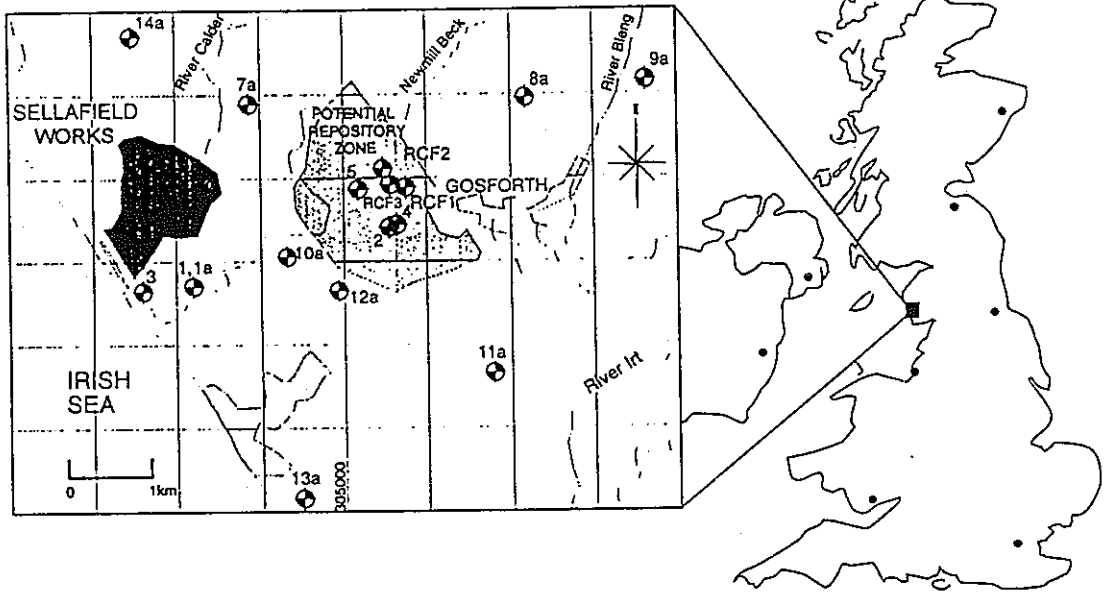
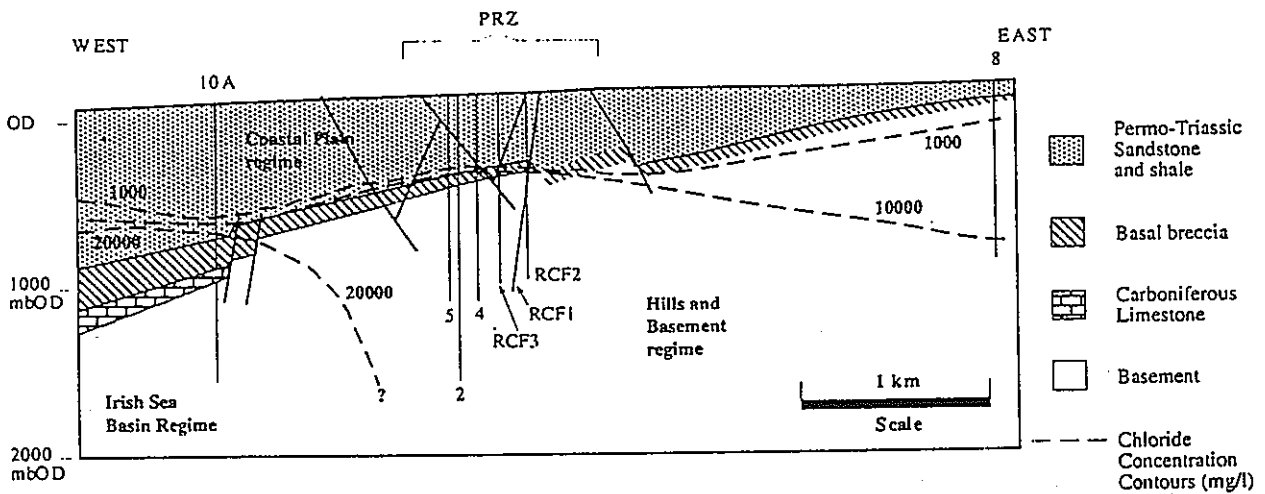


図1.4.1-3 深層ボーリング孔を利用したキャニスター埋設構想



Locations of deep boreholes at Sellafield site.

図1.4.2-1 セラフィールドボーリング孔位置



E-W schematic section through the PRZ and surrounding rocks, showing approximate contours for chloride concentrations (mg/l) in groundwaters. (Boreholes have been projected on to section from array in the PRZ for illustrative purposes only; RCF1 and RCF2 were drilled as deviated holes, in west and south directions respectively).

図1.4.2-2 セラフィールドボーリング孔断面

地形によるとしている（図1.4.2-4）。

### 1.4.3 スウェーデン

SKBでは、処分場における地下水化学組成調査のため、1977年以降結晶質岩のうち片麻岩、花崗岩、はんれい岩を対象として、9サイトにおいて最大15孔/サイトのボーリングを実施した。最深ボーリングは1,000mであった<sup>56)</sup>。

数多くのボーリングが衝撃式掘削法により実施され、ドリル水は数百m離れた地点の衝撃式ドリルにより掘削した孔から採集した。

ウラニントレーサ調査から孔内へ地層水が流入しない（亀裂の目詰り発生せず）ことが確認された。ドリルによる汚染が1/100万以下の精度でトレースできることがわかった。孔曲りは200m～500mでは傾斜計を用いて50m毎に調査し1°，500m～1,700mでは100m毎にアシッド法（フッ化水素傾線エッチング法）を用いて2°であった。

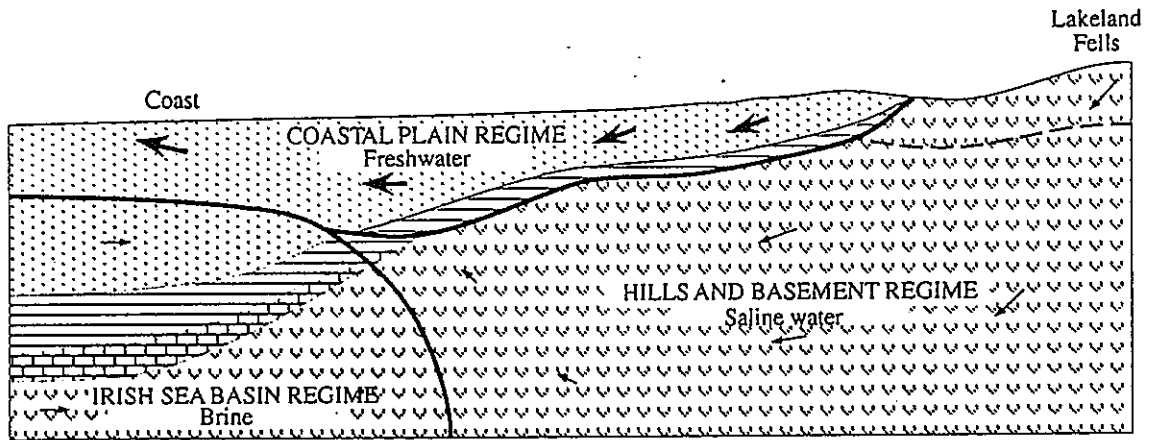
採水サンプリングはパッカーとdown holeポンプから成り、孔内水の化学的組成、溶存元素、ガスが分析された。例えばEh, pH, pS, pO<sub>2</sub>が原位置で測定された。大気中の酸素と水分中の還元要素の反応を避けるため、大気との接触をなくして水分分析できる装置を用いた（図1.4.3-1）。


地下水採取・分析法について以下に述べる（表1.4.3-1～-2及び図1.4.3-2）。

地下水採取法では、ポンプを孔内に挿入し、パッカーを用いてサンプリングを実施するもので、分析装置は移動型である。採取水はただちに分析された。

電極を有するセルを孔内に挿入しEh, pHなどは地表へリアルタイム伝送された。pHは圧力平衡ガラス電極により、Ehは金及びプラチナ等を電極として測定した。ウラニンを蒸留水に溶かしトレーサーとした。また、0.45ミクロンフィルターを介してイオンクロマトグラフィ及びスペクトラフォトメータを用いて、Fe, Mg, S, Ca, Si等を測定した。

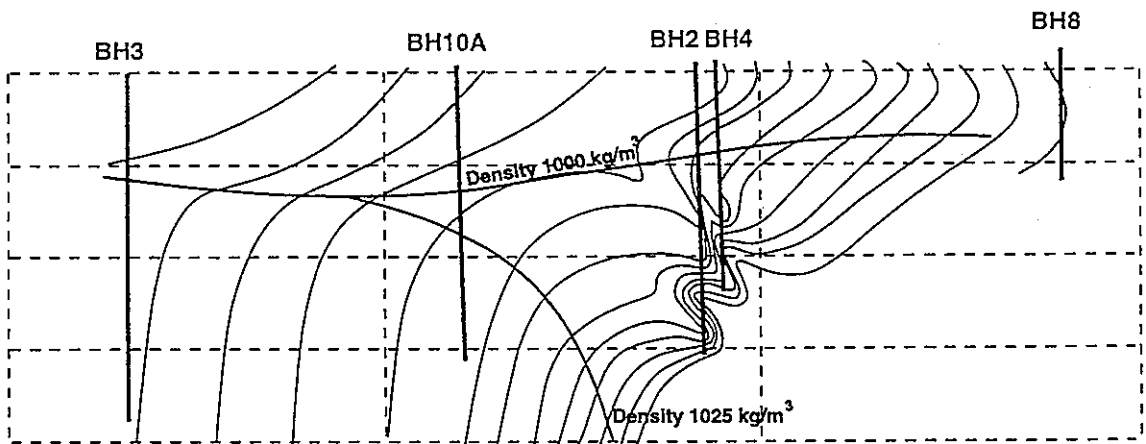
分析の結果から、深度71m～860mにおいて、Na, Cl, SO<sub>4</sub>, Ca, Mg, HCO<sub>3</sub>濃度が大きく、かつpHが大きいほどEhが小さい傾向がわかった。深度とpH及びEhの関係は明確ではなかった。その他の元素分析として、4価Puには類似特性を有するトリウムを代用することで4価Pu値を求め、ウラン含有量はRedox条件に影響すること及び、4価Uは6価U（炭酸化合物中に多く含有）より数オーダーほど溶解度が小さいことを考慮して、トレーサ分析及び重水素、トリチウム、C-14, O-18が分析された。結晶質岩を存在期



- |  |   |
|--|---|
|  Permo-Triassic sandstone |  Regime Boundary             |
|  Shales and basal breccia |  Flow Direction (large flux) |
|  Carboniferous Limestone  |  Flow Direction (small flux) |
|  Basement                 |   |

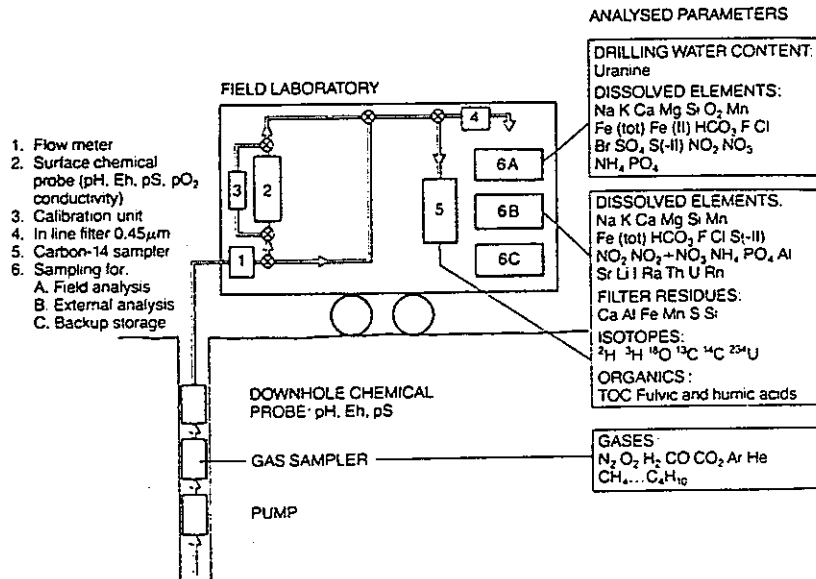
*Schematic illustration of the conceptual groundwater regimes for the Sellafield area*

図1.4.2-3 セラフィールド区域の地下水流れ概念



*West-coast cross section showing contours of environmental head in groundwaters interpreted from hydraulic tests*

図1.4.2-4 セラフィールド区域の地下水水頭概念



A schematic illustration of the integrated groundwater chemical equipment consisting of down-hole sampling and measuring devices connected to a mobile field laboratory by a multi-hose system.

図1.4.3-1 SKBで開発した地下水採取分析システム

表1.4.3-1 SKBで実施したボーリング孔地下水化学組成 (分析限界値)

Methods and detection limits of the analyses which are performed in the field laboratory.

Method	Element	Concentration mg/l	Method	Element	Concentration mg/l
IC	Na	0.1	IC	K	0.1
IC/SP	NH <sub>4</sub>	0.1/0.005	IC	NO <sub>3</sub>	0.05
IC/SP	NO <sub>2</sub>	0.05/0.001	IC	F	0.1
IC	Cl	0.1	IC	Br	0.05
IC/SP	PO <sub>4</sub>	0.2/0.002	IC	SO <sub>4</sub>	0.05
SP	Fe <sub>tot</sub>	0.005	SP	Fe <sup>2+</sup>	0.005
SP	Mn	0.01	SP	SiO <sub>2</sub>	1
SP	S <sub>tot</sub> <sup>2-</sup>	0.01	Tit	Ca	2
Tit	Mg	0.4	Tit	HCO <sub>3</sub>	0.6
SF	uranine	<0.1% drilling water contamination			

IC = ion chromatograph  
Tit = titrations

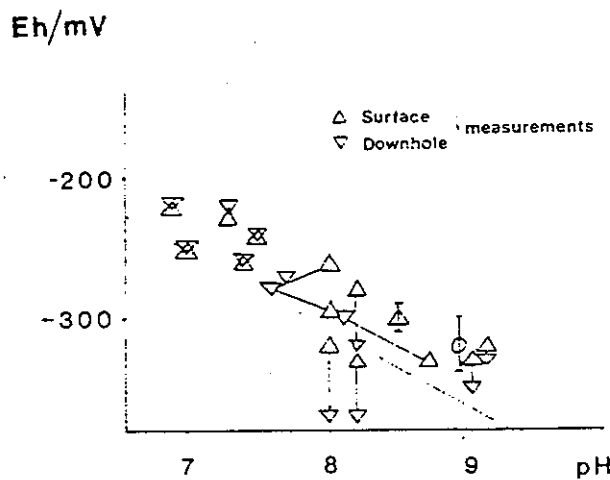
SP = spectrophotometer  
SF = spectrofluorimeter

表1.4.3-2 SKBで実施したボーリング孔地下水化学組成

Chemical composition of the groundwaters analysed in the mobile field laboratory. All concentrations are given in mg/l, except for pH and Eh.

Bore level hole	Na	K	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	S-II	Fe <sub>tot</sub>	Fe <sup>2+</sup>	pH	Eh/mV
Fj 2 468	36	1.4	27	3.0	182	3.7	2.0	0.2	0.65	0.65	6.9	-220
Fj 7 722	300	1.3	40	0.2	16	470	0.5	0.6	0.005	0.004	9.0	-350
Kl 1 406	45	1.0	14	2.3	78	45	1.8	0.1	0.013	0.012	8.2	-305
Kl 2 326	28	1.1	31	1.0	137	17	0.1	0.08	0.140	0.134	7.6	-290
741	38	1.6	16	2.0	99	23	0.1	0.24	0.045	0.039	8.2	-340
761	12	3.0	23	4.0	106	7	0.5	0.03	0.350	0.345	8.0	-290
860	65	1.6	8.3	1.8	102	51	1.5	0.12	0.043	0.041	8.1	-300
Kl 9 696	16	1.3	29	3.0	120	6	4.4	0.02	0.096	0.094	7.6	-275
Fi 9 94	410	6.2	101	16	286	670	100	0.22	0.590	0.580	7.5	-245
182	1050	17	708	78	150	2900	220	0.24	0.915	0.915	7.3	-220
360	1500	8	1900	110	33	5200	300	0.01	0.310	0.310	7.7	----
FiB1 71	23	3	76	6	220	61	8	<.01	9.01	8.88	6.9	+ 40
234	650	9	320	40	260	1500	140	0.03	0.437	0.432	7.7	-270
HK1 89	1500	7	950	170	75	4100	340	<.01	0.470	0.465	7.5	-140
HK10 140	1500	16	1100	250	104	5000	490	<.01	5.25	5.25	7.5	+ 50

Fj = Fjällveden      Kl = Klipperås      Fi = Finnsjön      HK = Forsmark



Eh versus pH of all the waters where stable electrode readings have been obtained. The line represents the equilibrium magnetite-hematite.

図1.4.3-2 SKBで開発した地下水のEhとpHの関係

間と起源の観点からいくつかのクラスにグルーピングを実施した。また、地下水化学の重要なプロセスはcarbon-dioxide, 二酸化物（重酸素）であることを示した。

一方、近年実施された1,700m深度ボーリングは、ダウンザホールかつ衝撃式掘削法（圧気掘削方式、排出ズリはエア+気泡活性剤を使用）にして200m（口径215mmφ）まで掘削し、それ以深（口径76mmφ）はワイヤライン工法を採用した例がある<sup>57)</sup>。

また、別の例として逆循環式掘削工法（Vasterbo Hen州 Mala市, 1990年秋～1992年春）試験を実施している<sup>58)</sup>。カッチングスはエアリフトを利用し、掘削流体に地層水のみを用いるため地下水への化学的コンタミを抑えることができたとしている。しかし帯水層を有すること及び二重管スイベルを用いる必要があるとしている。

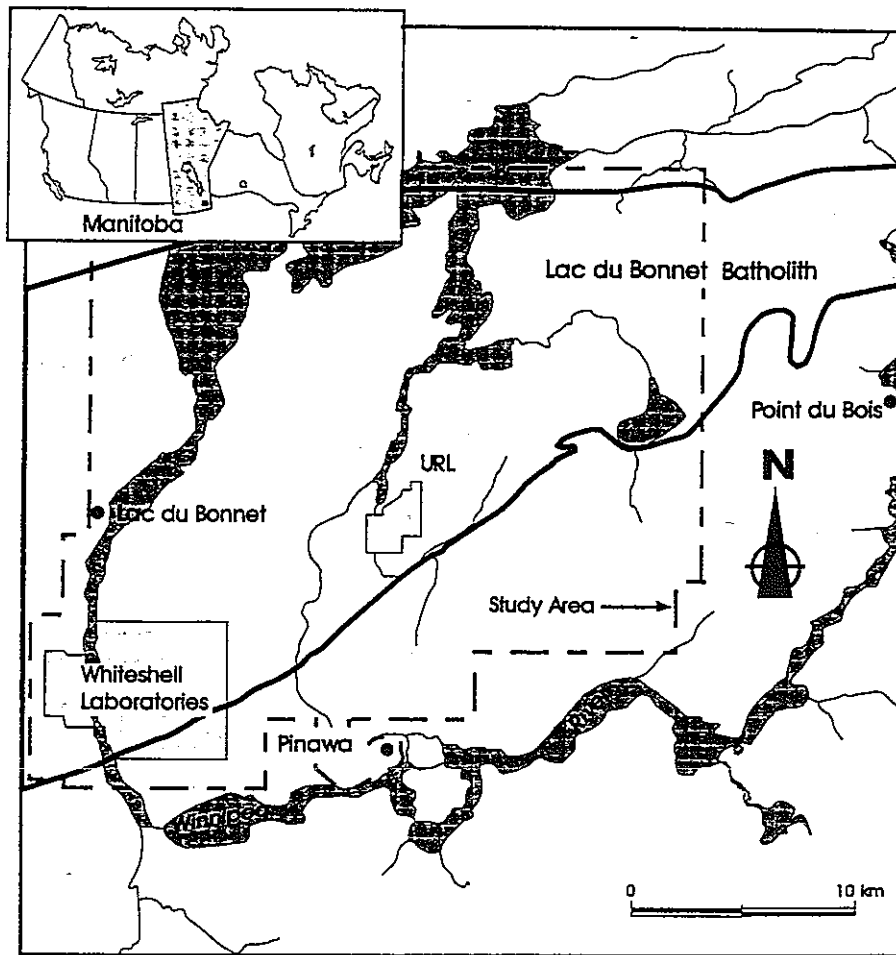
#### 1.4.4 カナダ

Whiteshell研究区域（WRA）においてCanadian Shield 亀裂系花崗岩内の核種移行の調査の一環として地下水組成調査が実施された<sup>59)</sup>（図1.4.4-1）。地下水中の有機カーボン濃度はフラクチャーゾーンでは平均 $0.8 \pm 0.1 \text{ mg/L}$ 、深部（塩水中）では $2.3 \pm 0.8 \text{ mg/L}$ であった。有機炭素は親水性あるいは中性成分からなるものが60～70%存在した（図1.4.4-2）。

ボーリングによる地下水汚染の影響が、いくつかの試料で見られた。それらは疎水性・中性物質であったが、天然バリアシステム中の核種移行及び有機物錯体形成過程には影響しないことが述べられている。

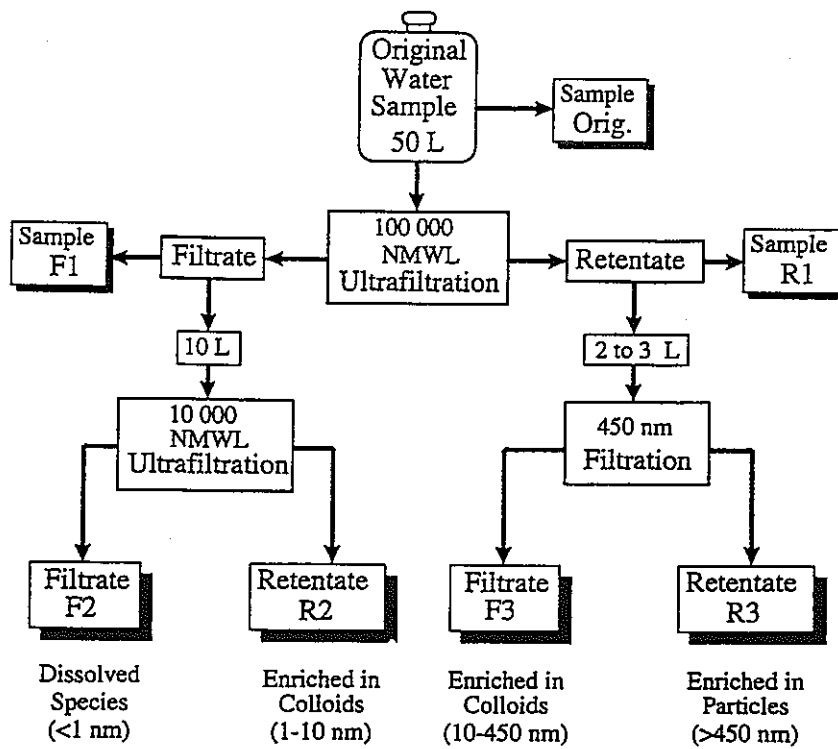
Whiteshellにおける天然有機体平均錯体形成ポテンシャルは $2.9 \times 10^{-6} \text{ eg/L}$ であった。溶存有機カーボン濃度（DOC）を測定し、結晶質岩特有データベースを作成した。ボーリングは、0～350m, 350m～1,100mと2深度に分けて掘削され、掘削方法には、直径155mmのair-percussionドリル、または直径76mmのダイヤモンドビットを用いた。泥水や他の薬剤は使用しなかった。vigorous pumping技術によって掘削後すばやく孔を洗浄した。採水は地表まで0.25～1L/分の速度で空気動押しポンプによってポンプアップした。

一方、アクチノイドが低溶解性及び鉱物への強吸着性等の特性を有し移動しにくいこと、もし天然有機体がアクチノイドを錯体化するならば、移動しやすくなっていることを考慮してアクチノイドに及ぼす有機体の影響を調査した。また、錯体形成には有機体濃度は10mg/l程度必要があるが、本調査では $100 \mu\text{g/l}$ 以下であることがわかった。



Location of the Whiteshell Research Area (dotted line), including the Whiteshell Laboratories and the URL, which is the location for most of the groundwater sampling. The area is located northeast of Winnipeg, Manitoba, Canada.

図1.4.4-1 カナダWhiteshell ボーリング位置



Scheme for fractionating organic and inorganic groundwater components into suspended particles (>450 nm), colloids, and dissolved species by tangential-flow ultrafiltration.

図1.4.4-2 カナダWhiteshell ボーリング地下水採取分析システム



以上の結果から、WhiteshellではAm, Th等の化学反応は自然有機物の錯体化に影響されないことを述べている。

図1.4.4-3にはURL近傍のボーリング調査から推定された地質断面図で、フラクチャーゾーンを有する花崗岩が存在することを示す。また表1.4.4-1にはトルエンや可塑性有機体及びDOC濃度を示す。

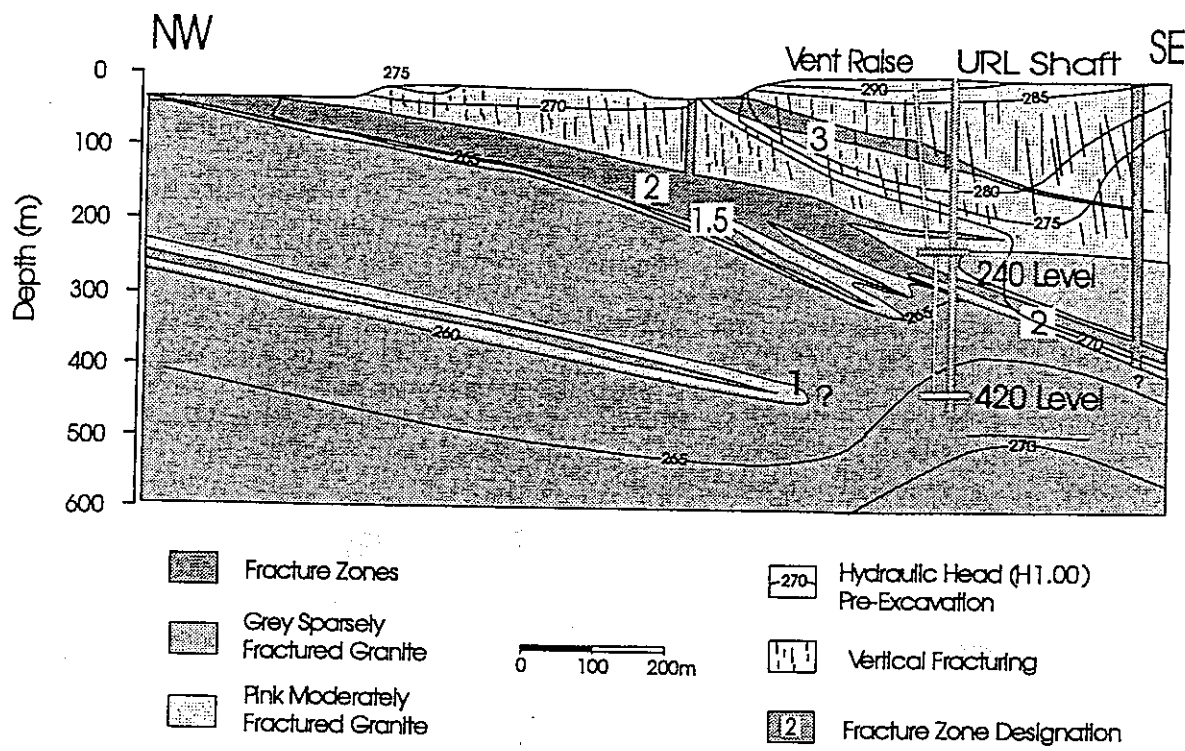
一方同地区では、1978～79年にかけて数百mボーリングを12本掘削している（WNシリーズ）<sup>60), 61)</sup>。現場は南Manitoba州 Lac du Batholithの花崗岩ブルトン層を対象とした。コアリング（水使用）とノンコアリング（水+ベントナイト又は水+エア）とに掘削方式を分けている。

掘削方式はワイヤライン工法（302～349mコア）、ダウンホールハンマー工法（18～302mノンコア）、ロータリー工法（0～18mノンコア及び拡孔）を用いた。掘削水には清水（供給水は井戸水）+ベントナイトの混合物を使用した。孔曲り測定はジャイロスコープ式傾斜・方位計（Sperry Sun Gyroscopic）を使用した。孔曲りの掘削後の詳細記載はないが垂直に対して1°以内であった。ビット回転数及び荷重調整により孔曲り防止を行った。特にアクティブな孔曲り補正機器を用いたとの記載はない。セメンテーションは行わないこととしている。

#### 1.4.5 フィンランド

高レベル放射性廃棄物処分サイト選定プログラムの1つとして、1980年中期までに実施された調査ボーリングを示す（図1.4.5-1, -2）<sup>62)</sup>。これら深部ボーリングは先カンブリア結晶質岩を対象に行った。含有塩素濃度は2～3mg/lから100g/lの幅であり、深さとともに塩素濃度が上昇することがわかった。50孔からの採水分析を実施した。ボアホール直径は46mmで、1,000m以深からサンプリングした。背圧付きプラスチックチューブ、ダブルパッカー式ニューサンプラーを用いた。サンプラーにより各50m毎に連続プロファイルを示すことが可能となった。地下水は主に陰イオンとしてBicarbonate（重炭酸塩）、Sulphate（硫酸塩）、Chloride（塩化物）等の混合物から成り、Bicarbonateは総固形物量1g/l以下であり、Sulphateは1～10g/l、Chlorideは2～180g/lまで変化することがわかった。地質断面をみると、Bicarbonateは多く上層200～300mまでであり、Chlorideの上に覆われていることがわかった。

また、H-3は塩水中の濃度が低く指標にならないとし、C-14を年代測定の指標元素と



Geological cross-section showing the main subhorizontal fracture zones and the vertical fracturing in the vicinity of the Underground Research Laboratory, Whiteshell Research Area. The section also gives the contours for hydraulic heads before the excavation of the URL, whose 240 and 420 levels are shown.

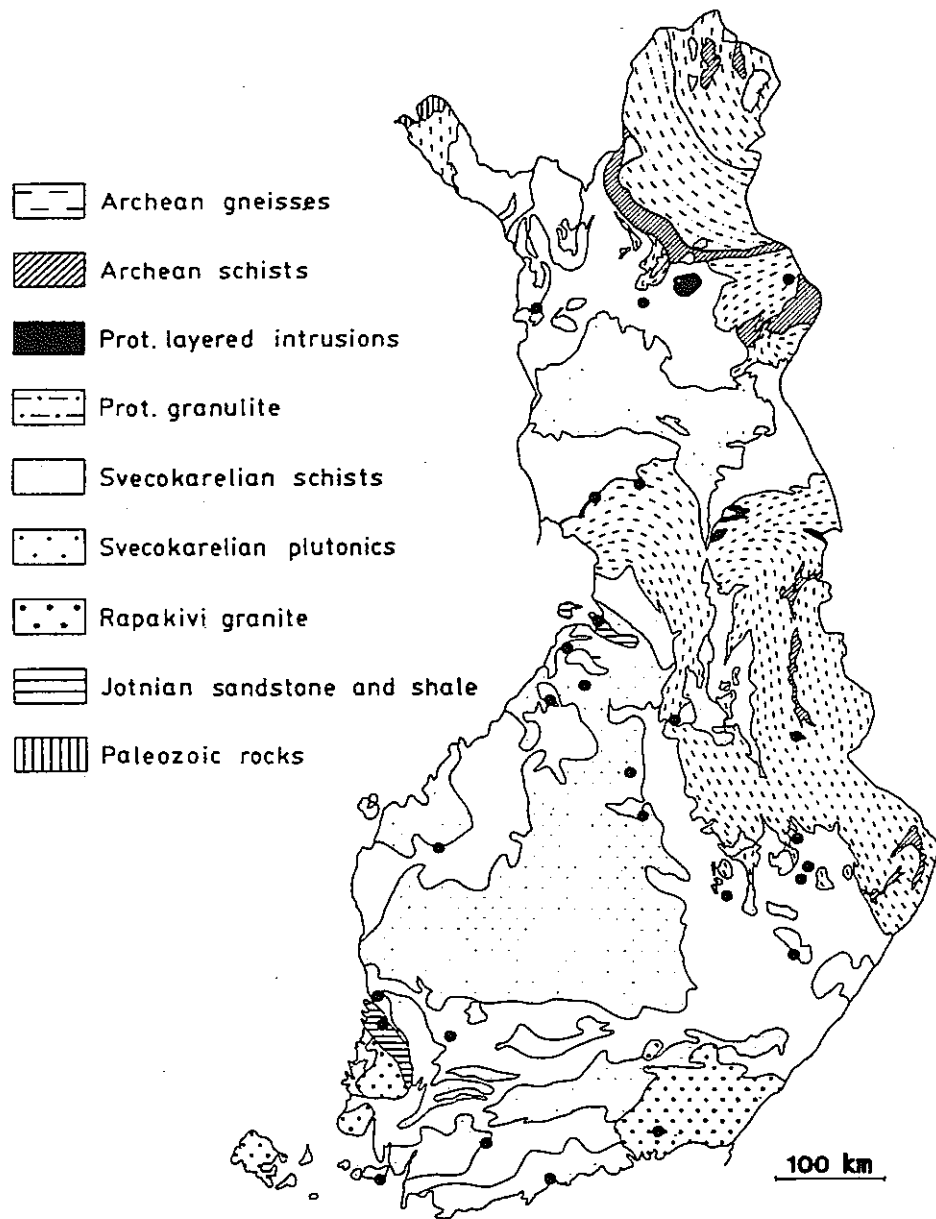
図1.4.4-3 AECL URL WNシリーズボーリング位置

表1.4.4-1 AECL URL WNシリーズボーリング孔地下水化学組成

Contribution of volatile and semivolatile organic compounds to the observed DOC of WRA groundwater samples

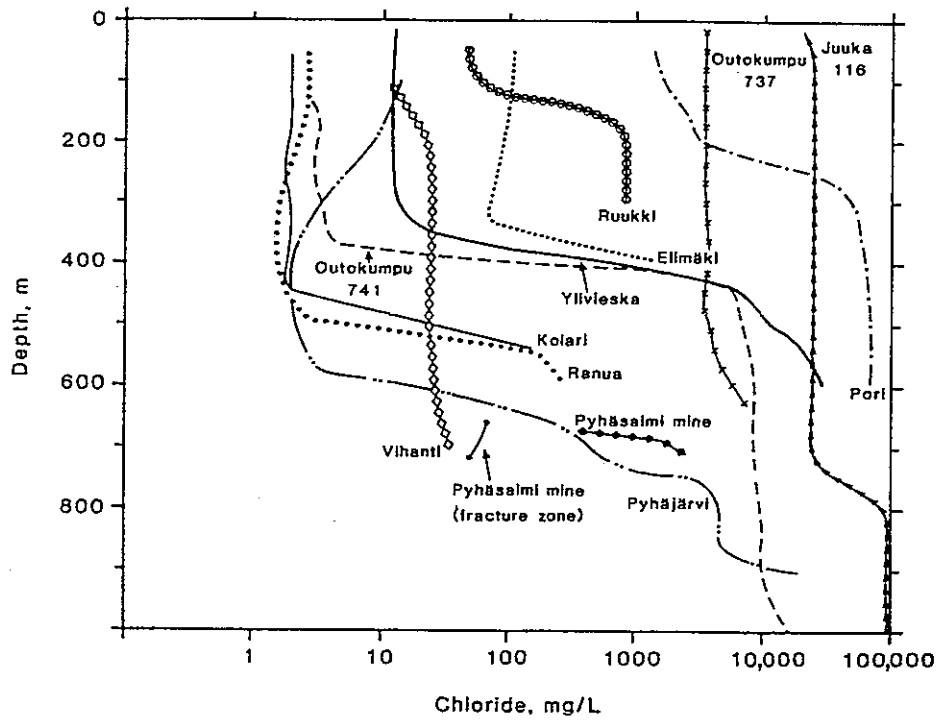
Sample and year	Total measured volatiles and semivolatiles (mg/L)	DOC (mg/L)	DOC (%)	Principle type of volatile or semivolatile
HC26-90, 92	0.000	*	0.67	0.0
HC29-90	0.000	*	0.26	0.0
HC33-92	0.000	*	0.22	0.0
HC38-90	0.001	*	0.12	0.8
HC35-90	0.003		0.60	0.5
HC8-90	0.007		1.68	0.4
PH3-Z4-90	0.010		<0.1	
GC3A-91	0.014	*	<0.1	
HC33-90	0.016	*	0.22	7
HC33-91	0.030	*	0.22	14
HC16-90	0.040		0.67	6
M4A	0.040		0.70	6
PH5-Z6-90	0.041		1.80	2
HC6-90	0.054		2.59	2
URL10-92	0.054		2.15	3
HC34-90	0.054		1.28	4
VB1-7-91	0.069		0.30	23
HC13-90	0.11		0.40	28
HC16-91	0.13		0.67	19
HC27-90	0.13	*	0.55	24
HC27-91	0.20	*	0.55	37
GC3A-Z1-90	0.96		1.45	66
PH3-Z5-90	1.12		7.35	15
HC37-91	1.43		2.64	54
HC15-Z3-91	19		19	100

The total measured volatiles and semivolatiles includes estimated concentrations for "unknown compounds", whose peaks could not be matched to compounds in the database. \* This DOC value is an average for the borehole. The other DOC values were determined for the characterized samples. LP: Low permeability borehole, yielding water at less than 1 L/min.



Location of the sampling sites studied (black dots). Map compiled after Simonen (1980).

図1.4.5-1 フィンランドサイト選定ボーリング位置



Chloride values  
versus depth at various  
drillhole waters.

図1.4.5-2 フィンランドサイト選定ボーリングでの塩素濃度と深度の関係

した。

#### 1.4.6 スイス

Nagraではグリムゼル試験サイトにて多くのテストボーリングが実施されているが、貯蔵所とは考えられていない。一方、Schwandrainサイト（マール、泥灰岩）にて、ドイツ超深度ボーリング技術をも取り入れながら高精度ボーリングを実施した。このボーリングは、石油開発ボーリングよりコストが高いが、1990年5月15日に開始し、掘削に102日間かかり9月17日で757.6mを掘削した<sup>63)</sup>。

ドリル工法としてはrotary drilling (diamond bit) を用い、コアサンプリング法にはワイヤラインコアリング工法を用いた。地表からの操作によりdirect flush boringを行った。ボーリング機器はhydraulic rotary swivel, coring Wirth B5-R16タイプであり、175kw, 500 kN容量を有している。20° までの傾斜ボーリングが可能であった。58.4mまではRoller bitを用い、それ以深はコアビット（ダイヤモンドビット）を用いた。703.5m深で、96mmのドリル径（コア径は57mm）を用いており、757.6m深で104.8mmに拡孔した。

3種類のパーマネントケーシング（American Petroleum Institute : API規格）を用いた。掘削液による地下水汚染から低部第4紀層を守るため、低粘性粘土＋淡水混合液を用いた。

Nagraでは深掘を最重要と考えており、地下水への掘削作業の影響はあまり考慮していない。従って水＋ベントナイトを用い保孔にはグラウトを使用している。

#### 1.4.7 フランス

ANDRAは、1997年2月現在地下廃棄物研究施設建設を3ヶ所のサイトのいずれかで建設するため業者の入札等、具体的な準備に取りかかっている。総工費は170億円と言われている。

ANDRAのHLW及び長寿命廃棄物管理に係わる1991年以後の任務は、地下実験所建設を実現するものである<sup>64)</sup>。現在4ヶ所の地下実験場候補地（オートマルム、ミューズ、ガール、ピエンヌ）周辺に対しボーリングによる広範な地質・水理調査が実施されている。

オートマルム及びミューズの県境では、粘土層に4本（2,600m級）ボーリングが実施

された。ガールでは、粘土層に対して4本(3,600m級)ボーリングが実施された。ビエヌヌ県では、石灰岩と粘土被覆花崗岩に対して9ヶ所の試錐が実施され、花崗岩に対して、1,800mのボーリング実績がある。

## 1.5 第8回陸上ボーリングによる観測国際シンポジウム (Feb'96) の概要

諸外国及び我が国の深度ボーリング技術の現状については「1.1」及び「1.2」にて記載しているため、ここではボーリングの技術的項目は避け、1996年2月つくばで開催された国際シンポジウムから見られる国際陸上深度ボーリングの活動グループ動向及び我が国での深層ボーリングの取り組み方及び方向性の概要について述べた。

わが国の深層ボーリング計画に関わる活動グループ及びその概要は下記のとおりであると考えられる。

- ① 1989年に業界約40社による「超深度コアドリリング技術研究会」が発足し、JUDGE計画の実現に向け情報交換を行うとともに、各方面へ呼びかけている。
- ② 1988年から、石油技術協会内部に深掘技術分科会があり、この活動グループで技術的検討を行っている。業界を中心メンバーとし、中立機関からオブザーバが出席して、主として調査結果をまとめて報告書を出している。

主に、油井深掘技術者が技術的かつ高度化に係わる研鑽を動機として、研究している分科会である。

- ③ 1993年地質調査所と防災科学技術研究所のメンバーを中心に「島弧超深度掘削推進協議会 (ISD)」が組織化され、JUDGE計画の推進を旨としている。一方、防災科学技術研究所では10年程前から地震観測井掘削に力を入れている。

具体的計画として、科技庁防災科学研究所で、平成3年から8年計画で162億円を投じて3,000m級深層ボーリング1本（埼玉県岩槻市）、2,000m級12本を実施し、直下型地震観測（ケーブル式地震計挿入）孔とする予定である。現在までに3,000m級は千葉県沼南町でもボーリング済みである。

- ④ 日本学術会議では第4部ICDP小委員会、ワーキンググループが設置されている。活動内容としては、大学を中心とする学術ボーリングワーキンググループ（静岡大学新妻教授代表）が活動ニュースを発行し、シンポジウムを開催している。

また、地球科学者団体によって進められている陸上学術ボーリングワーキンググループでは学術ボーリングとして東大、東北、九大などの教授が中心となり、具体的な学術ボーリング候補地（集I、II、IIIを発行）をあげ、ボーリングの意義、目標、深度、段階などを立案している。

- ⑤ ICDPと第8回国際シンポジウム (Feb,96)

海洋掘削計画 (ODP) の国際組織はジョイデス・レゾリューション号を用いて深海

底のボーリングを実施し、地殻構造の解明を行っている。

一方、陸上掘削についてはOECD（経済協力開発機構）が1992年に第1回メガサイエンスフォーラムを開催し、地球深層掘削を取り上げ1993年8月30日～9月1日ポツダムにて「陸上科学掘削に関するポツダム国際コンファレンス」の席上、国際陸上科学掘削計画（ICDP）設立への強い同意が確認された。その後ICDP準備委員会の設立が合意され、ドイツ、アメリカ、オーストラリア、イギリス、メキシコ、中国、フランス及び日本が代表となった。準備委員会は1993年12月にサンフランシスコで第1回会議を開いた。しかし現在このICDPに我が国は加入していない。

最後に第8回国際シンポジウムの構成及び講演内容について簡単に述べる。防災科学技術研究所、科学技術庁並びに地質調査所が主催となり1996年2月つくばで開催されるものである。各国の深層ボーリング現状の報告がポスターセッションを含めて約80論文提出された。深層ボーリングの国家プロジェクトとして独（KTB）、ロシア（SG-3）、U.S.（学述ボーリング）、日本（JUDGE計画）があり、断層・掘削・検層技術・流体・熱移行等が報告されている。ICDP加盟の主要国の発表が多いが特にICDP共同声明として発表されたものはない。しかしICDPの重要性は確認され、日本も近い将来ICDPへの加入が期待されることが言われている。

#### ⑥ 超深地層研究所計画

動燃事業団では瑞浪市明世町において、超深地層研究所推進のため20年間で施設建設200億円、地層科学研究費400億円の合計で約600億円を見込んでいる。ボーリング計画についてはフェーズ1の地表からの段階研究5年間で実施されると考えられる。

この地層科学研究では地質学、地球科学等を中心とした国際的な研究が中心となり、また地震研究、地下空間利用の研究の場として期待され、東濃研究学園都市構想といわれている。



## 第 2 章

## 2. 応用技術及び適用試験項目の検討

### 2.1 他分野の最新技術のボーリングへの適用検討

GPS技術やレーザー技術等、他分野の最新技術のボーリングへの適用可能性について検討を行った。

#### 2.1.1 GPS技術<sup>18)</sup>

Global Positioning System (汎地球測位システム) はアメリカ合衆国が開発を進めてきた人工衛星を用いた新しい測位システムで、人工衛星から発信される電波を受信する。Navy Navigation Satellite Systemを改良したものである。これは米国空軍が1972年開発計画をスタートしたものである。このシステムにより2点間の相対変位を、短期間のうちに三次元的に精度良く求めることができる。(図2.1.1-1)

GPSは、高精度計測方法として、その可能性は大きいと考えられるものの、超深層ボーリングの精度向上に供するレベルにはないのが現状である。このシステムを利用する場合、受信機、アンテナ及びコンピューターを準備する必要がある。GPSは数100kmまでの側線に有効と言われている。

GPSによる地盤測定は、現在のところ1~2mの精度を目標にしている。その精度は、 $\pm \{ (\text{数mm} \sim 2\text{cm}) + (1 \sim 2\text{ppm}) \times D \}$  といわれている。ここで、Dは基線の長さ(km)である。

試験観測例として、カナダアルバータ州北部の約800mの区間で行われ、地上には6個の基点を設定し、パイプラインに25個のアンテナを取り付け観測点とした結果、数mm~2cm程度の精度であったと報じられている。(図2.1.1-2)

問題点として、湿度や大気の状態及び観測点周辺の構造物などの影響を受けやすいため、誤差の評価及び観測点の配置などを考慮する必要がある。

#### 2.1.2 レーザー技術<sup>65)</sup>

一般に、レーザー光を照射により、その部分が溶融気化(昇華)する。岩石に照射すると、照射された部分の温度が上がり、熱応力による局所的な破壊が生じる可能性がある。このレーザー光を応用した岩盤掘削は、1960年代、米国で急速掘削のための有力な手段の一つとして多くの研究が行われた。

我が国でもいくつかの基礎研究がなされたが、レーザー光を応用した岩盤掘削は実用化

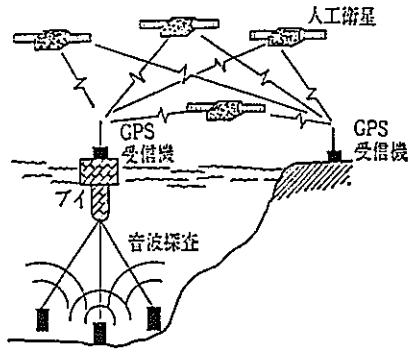


図2.1.1-1 GPS (Global Positioning System) 概念

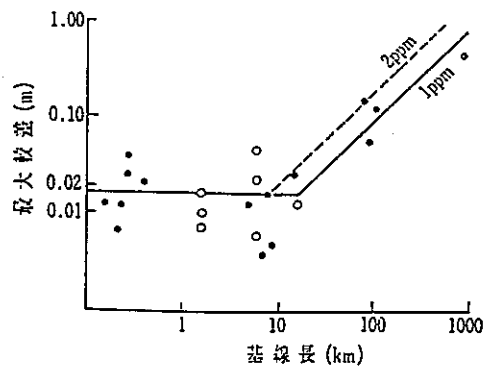


図2.1.1-2 GPSの精度

されるには至っていない。その理由として、大出力かつ小型のレーザー装置の入手が困難なこと、電力からレーザー光への変換効率が低いこと、基礎データが不足していること、などが挙げられる。ガスレーザードリルの原理は、下記のとおりである。(図2.1.2-1)

レーザー出力 $1013\text{W}/\text{in}^2$ 以上を岩石に照射させ、ガスなどに対して異なるエネルギーをもつ電子の衝突を発生させ、凝集性の光ビームを発生させる。孔井掘進には少なくとも有効エネルギー $0.02\text{kwh}/\text{in}^2$ を必要とするといわれ、 $20\text{kW}$ 以上にすれば掘進率は上昇するといわれている。東海大学ではヨウ素レーザーを用いた $100\text{kW}$ 高出力を目標に開発が進められており、科学の進歩とともに、岩盤掘削に応用可能と思われ、小型で大出力のレーザー装置が近い将来開発されると思われる。

表2.1.2-1には参考としてレーザードリルを含めた新しいドリルの種類を示す<sup>66)</sup>。

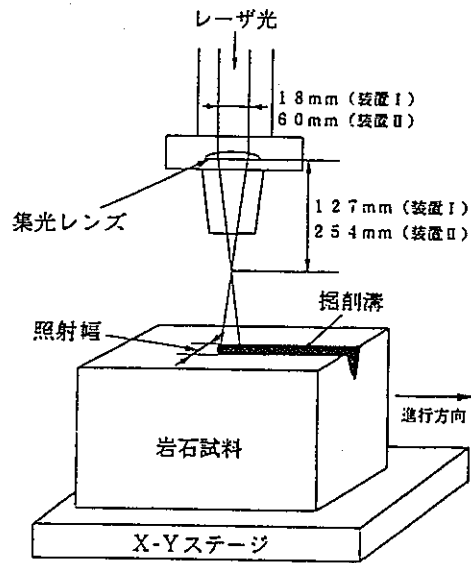


図2.1.2-1 レーザによる岩石掘削概念

表 2.1.2-1 新しいドリル

ドリルの種類	岩石の掘削機構	最大掘進能力 (ft/hr)
浸食ドリル*	機械的作用	70~280
放電ドリル*	"	70~280
爆発ドリル*	"	50~140
ロータリードリル*	"	30~170
火焰ドリル	剝離作用 +	55~110
熱ジェットドリル	" +	18~36
電気破砕ドリル	" ±	18~28
鋼球ドリル	機械的作用	8~28
ターボドリル単段式*	"	6~28
プラズマドリル	剝離作用 +	16~22
電弧ドリル	" +	8~16
高周波ドリル	" +	6~12
プラズマドリル	溶解作用	4~6
電熱ドリル	"	2~6
電弧ドリル	"	2~6
核ドリル	"	2~6
ガスレーザードリル	剝離作用 +	2~4
電子ビームドリル	" +	2~4
極超短波ドリル	" +	2~4
感応電流ドリル	" •	1~2
ガスレーザードリル	溶解作用	0.6~1.2
電子ビームドリル	"	0.6~1.2
"	酸化作用	0.2~0.4
ガスレーザードリル	"	0.2~0.4
超音波ドリル*	機械的作用	0.08~0.14

注) \* 孔内に清水を溜らす。

+ タコナイトのように破砕性の岩石に限る。

± 高い電導率をもつ破砕性の岩石に限る。

• 磁力に敏感な破砕性の岩石に限る。

## 2.2 高精度ボーリングシステム研究開発基本項目の策定

以上述べてきたように深層ボーリングの研究項目としては、主として高温・高圧対策であると考えられる。我が国における地温勾配は一般に100mにつき3°C上昇といわれている。これに基づけば、1,000mでは30°C、10,000mでは300°Cと予想される。SG-3孔(12,261m)、KTB HB孔(9,101m)においても最大の障害要因は地温であり、地温上昇によるボーリング長の限界が言われている。しかし葛根田地熱ボーリングに見られるように、ボーリング用水が十分に循環可能であれば地温以下の温度にてボーリングが可能である。従って、KTB関連の図1.1.2-6に示すように特に温度に影響され、150°C以上の環境でもなお技術開発が必要とされるものとして、ダウンホールモータ及び方向制御機器がある。

一方、数1,000mの深度レベルの高精度ボーリングの当面の研究開発項目は、深層ボーリングと異なり高温・高圧対策よりむしろ孔曲り防止、非泥水技術、ビット技術の改良が挙げられる。即ち、より垂直にかつ地下水を極力汚染することなく研究開発する項目が重要である。例えば、SKBの1,700mボーリングの結果からの問題点として下記の検討が必要であるとされている。

### ・掘削排水モニタリングの改善

電磁式流量計の測定に限界がありカッタリングスの詰りが生じたことにより開発が必要。

### ・カッタリングス排出効率のためのエアリフト試験が必要である。

コンプレストエアは孔壁外側から入れる(SKBはドリリングストリングの中に入れて)ことによりカッタリングスエリア拡大が期待できると考えられ開発が必要。

### ・長距離逆循環工法適用試験を実施する。

これらSKBでの問題点を考慮しつつ、今後高精度ボーリングを実施するための要素技術研究項目の一覧を表2.2-1に示す。以下に、表2.2-1の各項目のうち地下水判定技術を除く項目について説明する。

#### ① ビット/コアバーレル間隙の口径が及ぼす孔曲がり度合の研究

従来孔曲がりの要因とされている孔壁とビット/コアバーレルの直径差について、その差と孔曲がり度合を種々の岩石を用いて試験を行う。また重金属ドリルカラーによる孔曲がり防止工法について研究する。

#### ② 地質不連続面でのMWDシステムの挙動研究

MWDについてはいくつかのメーカーで製品化され、日本でもNEDO、石油開発技術

センター等で実用化に向けた研究がなされている。従来の大型MWD (EM-MWD) については総合的検層技術を含みかつ高価であるため、ここでは小型化かつ孔曲がり防止のみに焦点を絞った機器の開発研究を行う。

③ 高精度逆循環方式の適用試験

SKBでは300m以深の逆循環方式の困難さが指摘されている。ここでは逆循環方式がカッチングス排出システムなど高精度ボーリング技術の不可欠要素と考えられるため、300m以深の同方式の適用試験を実施する。

④ 高精度エアリフト排出方式適用試験

③の要素技術研究項目と同時に、カッチングス排出方式の1つとして、エアリフト排出適用試験を実施する。また、深層ボーリング孔底にて圧入した圧気とカッチングスの排出挙動について研究する。

⑤ 薬剤フリーエアドリル適用試験

エアドリルは石油開発ボーリングによく用いられている。しかしこのエアドリルを非泥水ボーリングの代用とするためには通常界面活性剤が混入しているエアドリルでは不十分である。ここでは界面活性剤を混入しないエアドリルの適用試験を実施する。

⑥ ビット交換システムの適用試験

ビット交換によるボーリング効率の低下をさけるため、孔内にてビット交換可能なシステムを製作し、適用試験を実施する。

その他表2.2-1には要素技術研究項目として地下水判定技術研究項目も記載したが、ここでは上記⑥項目が高精度ボーリング実現に急がれる項目と考えられ、地下水判定については上記項目達成の後に研究項目として挙げられるものと考えられるため、ここでは特に触れない。

表 2. 2-1 高精度ボーリング要素技術研究項目

研究対象	ポ イ ン ト	要素技術研究項目
孔曲り防止技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ KTB-VB孔で用いたビットとコアバーレルの口径間隔を小さくする方法の検討</li> <li>・ MWDシステムの不連続面への適用検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ビット/コアバーレルの口径間隔が及ぼす孔曲り度の研究</li> <li>②地質不連続面でのMWDシステムの挙動研究</li> </ul>
非泥水技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 300m以深の逆循環方式の適用検討</li> <li>・ エアリフトによる排出スライムの圧気レベルなど能力検討</li> <li>・ エアドリルは通常界面活性剤を混入している</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>③高精度逆循環方式の適用試験</li> <li>④高精度エアリフト排出方式適用試験</li> <li>⑤薬剤フリーエアドリル適用試験</li> </ul>
ビット技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ロシアSG-3孔で孔底ビット組立システム使用あり</li> <li>・ ワイヤライン工法を用いて孔底にてビットを交換できるシステムの検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⑥ビット交換システムの適用試験</li> </ul>
地下水判定技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ボーリング孔から採取した地下水による地下水起源判定技術の検討 (フィンランドのchloride温度システム及びイギリスLiモニターを参照)</li> <li>・ ボーリング孔から採取した地下水による地下水動水勾配判定技術の検討 (アメリカのI-131トレーサ、イギリスLiモニターを参照)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⑦地下水起源判定</li> <li>⑧採取システムの開発</li> <li>⑨地下水動水勾配判定</li> <li>⑩採取システムの開発</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ボーリング孔から採取した地下水による錯体形成能力有無判定技術の検討 (カナダのダブバルバック式DOC判定システム及びスウェーデンのEh-pH無酸素測定システムを参照)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⑪地下水含有有機体による錯体形成判定システムの開発</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ボーリング孔から採取した地下水によるボーリング泥水汚染判定技術の検討 (スウェーデンのウラニントレース参照)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⑫掘削による地下水汚染判定システムの開発</li> </ul>



## 2.3 深層ボーリング要素技術研究項目の検討

深層ボーリング要素技術研究項目として下記のもの挙げられる。(表2.3-1)

- ① 「2.2 高精度ボーリングシステム研究開発基本項目の策定」で検討した各要素技術研究項目についてさらに深度が増加した場合の技術の開発
- ② 「高温対策用泥水システム技術の確立」については、JUDGE計画においては泥水冷却結果及び地温勾配を考慮しても対象地域の10km地点では高温で400°Cと仮定している。この400°C条件下でのボーリングはNEDO葛根田地熱ボーリングでの実績から可能であると考えられる。この地熱ボーリング冷却技術の適用化を検討し、また環境上の見知からクロムフリーについても検討する必要がある。
- ③ 「孔曲り防止技術」については、KTBのVDSあるいは石油開発分野で実施されているMWD (EM-MWDを含む) を用いれば可能であると考えられる。VDSについては、1990年～94年時点で温度限度200°C (7,000m) である。さらにどこを改良すれば深層10kmまで孔曲り制御が可能であるかを検討する必要があると考えられ、これによって孔曲り2° 以内が達成できればかなりの精度と思われる。
- ④ 「ビット技術」については、深層ボーリング用先端駆動型ドリルを用いた場合の検討及び新しい分野としてレーザービット及びロシアSG-3孔で実績のあるビット交換システムについて適用性を検討する必要がある。

表 2. 3-1 深層ボーリング要素技術研究項目

研 究 対 象	ポ イ ン ト	要 素 技 術 研 究 項 目
高温対策用泥水システム技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・葛根田地熱ボーリングでは地熱400°Cに対して掘削可能として いる。 (高速循環 (mud circulation) により170°C泥水温度とな る。)</li> <li>・泥水中にクロムを用いない無公害泥水の開発が必要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・深層ボーリング用高温・高圧条件下の泥水シ ステム開発。</li> <li>・深層ボーリング用クロムフリー泥水の開発。</li> </ul>
孔曲り防止技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・KTBのVDSシステムでは7,000mで2°以内(15m以内)の 誤差実績あり。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・10km対応VDSシステムの開発。</li> </ul>
ビット技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・深層ボーリング用先端駆動型ドリルを用いた掘削。</li> <li>・レーザービットを用いた掘削技術の開発。</li> <li>・ロシアSG-3孔で孔底ビット組立システムの使用実績あり。 ワイヤライン工法を用いて孔底ビット交換システムを検討す る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・深層ボーリング用高温・高圧条件下の先端駆 動型ドリルの開発。</li> <li>・レーザーを用いた深層ボーリング掘削技術の 開発 (Stater Rubber, Bit Sealなど)。</li> <li>・深層ボーリング用ビット交換システムの適用 試験。</li> </ul>

## 2.4 深層ボーリングシステム適用試験基本項目の検討

要素技術各項目については2.3節で述べたように各研究試験によりさらに高度なレベルのボーリング技術の確認ができると考えられるが、全体システムとしてのボーリング掘削技術が完成しなければ、深層ボーリングは実現不可能であり各要素技術の研究・試験の意味が薄いものとなる。

従来外国における超深度ボーリング試験孔の利用による深層ボーリングシステム適用試験については可能性があると考えられる。研究サイトとしては、ロシアSG-3孔及びKTB VB, HB孔がその後の試験項目を各方面に呼びかけていることから、サイト提供を依頼すればより深層を模擬したボーリング試験が可能になる。

一方、我が国で深層ボーリングシステム適用試験を実施する場合については新たにボーリングサイトが決定すれば、深層ボーリングシステム適用試験案は下記のように考えられる。

### (1) 鉛直指向掘削機器の改良・開発

#### ① MWD 方式コアバーレル (同時方位・傾斜測定)

オリエンティング・コアバーレルの製品開発にヒントを得たもので、現在のところアイデア段階であるが、MWD 方式コアバーレルの開発に当たり、MWD 方式の方位・傾斜測定センサーのコンパクト化がポイントとなる。

今後、MWD 及びコアバーレル等の機器メーカーを通じ、技術的課題を明確にし、併せて測定データの伝達方式等も含めた研究開発を進める。

#### ② MWD・ダウンホールドリル (孔曲り修正ツール)

ボーリング孔の指向掘削技術として、MWD システムとダウンホールドリルとの組合せにより多くの実績がある。通常の MWD 孔内ツールの標準サイズ (最小外径 4-3/4 インチ) は、スリムホール等に適應できないことから、MWD 孔内ツールのコンパクト化に向けての技術開発がポイントとなる。

### (2) 孔内測定

#### ① 物理検層：コンビネーションゾンデの採用

密度検層と中性子検層における放射線源の相互干渉、音波検層の震源ノイズの影響等の問題から、コンビネーションゾンデは次の3通りの構成となる。

ゾンデ1	ガンマ, 中性子, 温度, 電気
ゾンデ2	密度, 孔径, 傾斜
ゾンデ3	音波

なお、NEDO では新探査技術におけるコンビネーションゾンデの開発機器を保有している。

② VSP : S波マルチ VSP 法の技術開発

S波マルチ VSP 法により、試錐孔周辺の岩相、地層内クラックの配列方向や分布密度等の解析手法の研究開発が進められている。

震源	S波震源バイブレータ
受振器	3成分受信器ツール
解析	高精度・高分解能処理

③ オリエンティング・コアバーレル

地層の原位置における真の走向・傾斜を判定できるコア採取法がある。これは、コアバーレルのインナーチューブ先端内部にクローリング（ダイヤもしくはメタル爪）を組み込み、掘削中のコアに縦キズをつける仕組みである。測定方法として、コアバーレルの上位に非磁性ドリルカラーが接続され、その中に孔曲り測定器を内蔵し、これがインナーバーレルと接続されている。測定器は、タイマー方式であるため、タイマーが作動する前に掘削機を一時停止してコンパスを安定させる時間が必要である。また、より効率的な測定法として、マルチショット方式によりコア掘削全長にわたって繰り返し測定できる。

システム適用試験に関する具体的なアプローチを以下に示す。

① 鉛直指向掘削技術システム適用試験

深度 500～1,000m クラスの鉛直ボーリングにおいて、許容度 3° 以内は、これまでの実績から判断して、通常の工法でビット荷重の調整及びドリルストリングス（スタビライザー、リーマ、ドリルカラー）の編成替え等を厳密に行えば、現状技術でも対応可能である。

しかし、鉛直許容度の目標設定が 1° 以内は、高度な孔曲り修正工法の技術検討が不可欠となり、例えば、MWD 方式の方位・傾斜測定装置とダウンホールドリルを組み合わせた手法等の機器開発とその基本試験を必要とする。

研究開発：スリム孔（小口径、通常 HQ 規格で 90～100mm 以下）に適應する MWD 方式測定器（孔の方位・傾斜測定）のコンパクト化。

② 非泥水技術システム適用試験

清水掘りを前提とした場合、孔壁の崩壊・張出しやスライム滞留等を要因とするジャーミングやツールス切断等のトラブル発生が危惧されることから、掘削過程での的確な地層変化・孔内状況変化をリアルタイムに把握していくことが肝要である。

研究開発：孔内事故防止システムのノウハウを基本とし、掘削データ計測の各種センサーを試錐機に内蔵一体化した専用試錐機の製作。

③ 高精度地質調査技術システム適用試験

従来のコア・オリエンテーション装置は、必要個所におけるコアスポット判定用として開発したもので、インナーチューブ（3m）を上段・下段の 2 室に分割し、上段に孔曲り測定器を設置し、下段をコア採取用とした。コア採取長は、測定器のタイマーセット時間（最長 99 分）により限定され、50cm 程度が限度であった。

研究開発：本題の調査精度を踏まえ、綿密な地層判定が要求される深度全区間でのコア原位置復元を目的として、常時 3m コア採取が可能なオリエンティング・コアバーレルの開発。

また、各要素技術検討としてシステム適用試験と同時並行に開発が必要となる項目として次のものがある。

① 非汚染逸水防止剤

現在使用されている逸水防止剤（LCM）として、繊維状、粒状、フレーク状のものが商品化されている。比較的大きな亀裂に対しては粒状のものが最も有効であり、

多孔質な砂礫層にはパルプ、紙、アスベスト等の繊維物質の方が効果的であるとされている。

保孔剤については、非汚染の観点から、セメント使用に代わる手段としてケーシング保孔を併せて検討する。

研究開発：現在使用もしくは開発中の逸水防止剤について、国内外における情報収集を進めるとともに、その他新素材開発の調査。

ケーシングについては、事後の孔内測定（物理検層、VSP等）への影響を考慮し、必要本数の高強度なステンレス非磁性ケーシングパイプの製作。

## ② VSP型フルウェーブ・トモグラフィ（岩盤亀裂の調査）

本手法に基づき、試錐孔周辺の岩相並びに地層内亀裂の配列方向や分布密度等を解析する。

研究開発：既存の人工地震計測法を基本とし、そのデータから多くの地盤情報（ $V_p$ 、 $V_s$ 、密度、 $Q$ 値等）を抽出し、これらのデータをコンピュータ処理・解析する技術開発。

## ③ 深層地質環境評価

現在、世界で広範に利用されている鉱山開発・評価システムのソフトには、豪ECS（Exploration Computer Service）社のMINEX、米MAPTEK社のVULCAN、豪MINCOM社のMINE SCAPES等があるが、この内、MINEXソフトの完成度が最も高い。

研究開発：MINEXをコアソフトとして、深層地質環境評価システムのソフト開発。

## 第 3 章

### 3. まとめと今後の課題

深層ボーリング特に10kmを目標としたボーリングは、今すぐを開始すれば実現するというものではなく、技術的問題、社会的問題、資金的問題といった様々な分野に及ぼす影響を考慮しつつ、地元の了解を得ながら国内外の英知を結集して、アクティブに推進していく必要がある。

この一大プロジェクト推進には官民学一体となり、地質・資源関係の研究者・技術者及び掘削機械技術者等のノウハウのみならず、自然科学や社会科学の専門家の協力を得ながら実施することが不可欠である。また技術的開発が必要なものは要素技術・適用試験等を同時並行に実施しながら進められる必要がある。

資金的には、我が国の国家予算あるいは各方面の財的・人的支援を得ながら、実施する必要があり、プロジェクトタスクフォースの方向性としては、研究者指導のみならず実務者の経験を生かして、かつ多くの他分野の先端技術を取り込みながら、メーカー固有技術及びこれらをコーディネートするエンジニアリングワークが必要となる。

以下にプロジェクトを推進するために考えられうる基本条件について簡単に述べる。

#### ① 地元の了承

深層ボーリングは国家的一大プロジェクトに伴う地域産業・環境調和が必要であることから、地元の了承を得る必要がある。現在JUDGE計画の予定位置としてあげられている一部の地域は協力的であるといわれている。地元の協力は最優先課題であると考えられるため、公開を原則に地元hearingを頻繁に実施し、納得して頂く必要がある。

#### ② ボーリング技術

ボーリング技術については主に温度・地圧とのたたかいであるが、掘削ドリルを地下環境下での試験及びパイロット孔掘削試験等により、高度な冷却効率を有する装置を開発し、要素・適用試験を繰り返して、多くの試行錯誤・インセンティブを踏まえて総合的な技術の確立が必要であると考えられる。

今後、深層ボーリングを遂行するためには、上記の基本条件を考慮しつつ、実績の多い、1,000m級ボーリングを対象に具体的な要素技術研究及びシステム適用試験を行い、少しずつ深掘りしていく方法が考えられる。



## 参 考 文 献

## 参考文献

- 1) B.N.Khakhaev et al., Superdeep Drilling in Russia : Progress and Outlook, VIII Int, Symp. Tsukuba, Japan, pp.4~10, Feb. 26-28 (1996)
- 2) C.Yoshida, Deep Oil and Gas Well Drilling in Japan : Progress and Outlook, VIII Int, Symp. Tsukuba, Japan, pp.46~51, Feb. 26-28 (1996)
- 3) I.T.Kukkonen et al., Simulation of Heat Transfer at Kola Deep Site : Geophys. J. Int., 116, pp.409~420 (1994)
- 4) C.Chur, Vertical Drilling Tech in the KTB Ultra-deep Well : Drilling Contractor, pp.25~27, Jan. (1994)
- 5) C.Chur, Vertical Drilling Technology - A Milestone in Directional Drilling : SPE/IADC 25759, pp.789~801 (1993)
- 6) 伊藤久男, 超深度ボーリング JUDGE 計画 : 放射性廃棄物研究, Vol.3, No.1, pp.3~13 (1996)
- 7) K.Fuchs et al., A Stress Measurement Profile to Mid-crust Depth in KTB Scientific Drilling Project, Southeastern Germany : Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 377, pp.25~28 (1991)
- 8) 地質調査所, 地質ニュース : 1989年7月号
- 9) J.Kuck, GFZ-Deep Crustal Lab. : Progress and Outlook, VIII Int, Symp. Tsukuba, Japan, pp.58~63, Feb. 26-28 (1996)
- 10) 池田隆司, KTB のホップ、ステップ、ジャンプ : 防災科学技術, No.68, pp.6~16 (1991)
- 11) 地質調査所, 地質ニュース : 1989年7月号
- 12) S.Hickman et al., Scientific Drilling in the San Andreas Fault Zone : Progress and Outlook, VIII Int, Symp. Tsukuba, Japan, pp.25~26, Feb. 26-28 (1996)
- 13) D.Russ et al., U.S. Continental Scientific Drilling Program (1985-1994) : Progress and Outlook, VIII Int, Symp. Tsukuba, Japan, pp.11~13, Feb. 26-28 (1996)
- 14) 地質調査所, 地質ニュース : 1995年4月号
- 15) S.Saito et al., The Experience of Drilling into 500°C Formation in NEDO WD-1A Well Kakkonda Japan : Progress and Outlook, VIII Int, Symp. Tsukuba, Japan, pp.52~57, Feb. 26-28 (1996)

- 16) 坂本義昭他、TRU 廃棄物処分場への人間侵入の観点から見た地下構造物深度分布調査：日本原子力学会誌，Vol.38，No.6，pp.10～15 (1996)
- 17) (社)全国地質調査業協会連合会，新版ボーリングポケットブック：平成7年10月，オーム社
- 18) 桜井春輔他，GPS の地盤変位計測への応用：土と基礎 38-4，pp.65～72 (1990)
- 19) 西村宏之，無公害泥水について：石油技術協会誌，第55巻，第5号，pp.366～371 (平成2年9月)
- 20) 鉦研工業(株)，水平垂直ボーリングに於ける孔曲り理論、測定及び修正に関して：社内資料 (1996)
- 21) 鉦研工業(株)，高精度ストレートボーリング：社内資料 (1996)
- 22) 石油技術協会編，最近の我が国の石油開発：石油技術協会創立60周年記念，pp.260～261，270～285 (1993)
- 23) 杉山弘訓，MWD 技術の現状及び超深層ボーリングの適用：地質ニュース，488号，pp.53～57 (1995)
- 24) 和佐田演慎，堺孝文，EM-MWD 技術の開発：石油学会受賞講演資料，Vol.17，No.8，pp.665～667 (1994)
- 25) 竹ノ下繁行他，三菱電機(株)共同研究，EM-MWD システムの実用化試験：石油開発技術センター資料，開-5 (1994)
- 26) 杉山弘訓他，三菱電機(株)共同研究，EM-MWD の研究開発：石油開発技術センター資料，開-6 (1995)
- 27) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成5年度熱水利用発電プラント等開発“地熱掘削時坑底情報検知システムの開発”：報告書 (1994)
- 28) Art Park，Coring Part 2 Core Barrel Types and Uses：World Oil，April，pp.83～90 (1985)
- 29) 三井石炭鉱業(株)，論説と報文 深部探査ボーリングにおけるワイヤライン・コアオリエンテーション：技術ダイジェスト，第20巻，12号，pp.7～11 (1984)
- 30) 全国地質調査業協会連合会編，新編ボーリングポケットブック，オーム社，pp.154～163 (1983)
- 31) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成4年度石炭資源開発基礎調査 新探査技術調査開発(陸域浅層探査)：報告書要約版 (1993)

- 32) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成7年度石炭資源開発基礎調査 新探査技術調査開発（陸域浅層探査）：報告書要約版，pp.87～99 (1996)
- 33) クラウス・デュル，ボアホール貯蔵 環境に危険を及ぼす廃棄物の貯蔵構想（日本文訳 房村信雄）：グルック アウフ，No.7，pp.526～528 (1992)
- 34) 日本鉱業会誌，坑内水について：昭和42年度春季大会 分科研究会資料，pp.1～11 (1967)
- 35) 三井石炭鉱業（株），昭和49年度石炭資源開発基礎調査 有明海59有3号試錐工事完成報告書：(1985)
- 36) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成7年度石炭資源開発基礎調査 新探査技術調査開発（水域中深度層探査）：報告書要約版，pp.110～120 (1996)
- 37) 地下水ハンドブック編集委員会，地下水ハンドブック：建設産業調査会，pp.3～149 (1989)
- 38) 土木学会編，ニューフロンティア地下空間：技報堂出版，pp.11～18 (1990)
- 39) 動力炉・核燃料開発事業団，高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書：PNC TN 1410 92-081，pp.2-92～100 (1992)
- 40) 土木学会編，地下空間の環境アセスメントと環境設計：pp.31～36 (1995)
- 41) 酒井軍治郎，地下水学：pp.320～332 (1965)
- 42) 柳澤孝一，斎藤章，西垣誠，平田洋一，新しい現場透水試験法（動燃式 JFT）の開発と測定例：土と基礎，第37巻，第7号，pp.47～52 (1989)
- 43) 青木謙治，塩釜幸弘，戸井田克，手塚康成，小淵考晃，升元一彦，亀裂性岩盤の透水特性評価に対するクロスホール透水試験の適用性について：第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.441～446 (1990)
- 44) 下茂道人，井尻裕二，飯星茂，橋本憲和，長田和洋，トモグラフィとクロスホール透水試験による岩盤内地下水浸透経路の調査：第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.31～35 (1992)
- 45) 濱克宏，瀬尾俊弘，豊島賢治，中野勝志他，1,000m 対応採水装置の開発：日本地下水学会，1995年秋季講演会講演要旨 (1995)
- 46) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成7年度石炭資源開発基礎調査 新探査技術調査開発（陸域浅層探査）：報告書要約版，pp.100～103 (1996)
- 47) 石油技術協会編，最近の我が国の石油開発：石油技術協会創立60周年記念，pp.160～164 (1993)

- 48) L.W.Cooper et al., Air Drilling Techniques : SPE 6435, pp.53~68 (1977)
- 49) G.E.Wilson, Air Drilling and Crooked Hole Problems : SPE 9529, pp.1~12 (1980)
- 50) M.A.Adewumi et al., Fundamental Study Makes Improves Air Drilling Technology Possible : SPE 26893, pp.77~82 (1993)
- 51) W.B.Bradley et al., Advantages of Heavy Metal Collars in Directional Drilling and Deviation Control : SPE 5545, pp.521~530 (1976)
- 52) D.J.Camden et al., A New Continuous Guidance Tool Used for High Accuracy Directional Surveys : SPE 10057, pp.1~10 (1981)
- 53) M.S.Whitfield et al., Geohydrologic and Drill-hole Data for Test Well USW H-4 Yucca Mountain NYE County Nevada, USGS-OFR-84-449 (1984)
- 54) W.G.Halsey et al., Disposition of Excess Fissile Materials in Deep Boreholes : UCRL-JC-120053, Lawrence Livermore National Lab. (1995)
- 55) A.Bath, Hydrogeological Measurements in Deep Boreholes at Sellafield, U.K. : Progress and Outlook, VIII Int, Symp. Tsukuba, Japan, pp.79~82, Feb. 26-28 (1996)
- 56) P.Wikberg, The Natural Chemical Background Conditions in Crystalline Rocks : Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.112, MRS (1988)
- 57) TR94-19, Deep Drilling KLX02, Drilling and Documentation of a 1700m Deep Borehole at Laxemar : Sweden (1994)
- 58) TR93-30, Core Drilling by Reverse Flushing, A New Drilling Concept for Small Diameter Borehole : Sweden (1993)
- 59) P.Vilks et al., Characterization of Organics in Whiteshell Research Area Groundwater and the Implications for Radionuclide Transport : Applied Geochemistry, Vol.11, pp.387~402 (1996)
- 60) TR-26, Physical Hydrogeology Measurements Conducted in Borehole WN-1, WN-2 and WN-4 to Assess the Local Hydraulic Conductivity and Hydraulic Potential of a Granitic Rock Mass
- 61) Report of Activities for the Period 1989 April 1990 March, Report of Summary of the Appendix B Groundwater Tracer Test Program at the WNRE BOREHOLES Site
- 62) R.G.Blomqvist, Deep Groundwater in the Crystalline Basement of Finland, with Implications for Nuclear Waste Disposal Studies : GFF, 4, pp.369-374 (1990)

63) Nagra Bulletin 1/91

64) 日本原子力産業会議, 原子力発電・核燃料サイクル・廃棄物管理の現状 (IAEA イヤーブック'96 から) : 1996年12月

65) 福井勝則ら, CO<sub>2</sub>レーザー光を応用した岩盤の掘削に関する基礎研究:資源と素材 112, No.8, pp.537~542 (1996)

66) 岩松一雄, ボーリングハンドブック:森北出版 (1973)