

堆積岩地域における試錐掘削に関する 調査・試験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2000年3月

三菱マテリアル資源開発株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Tokai-mura, Ibaraki 319-1194,
JAPAN

©核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

堆積岩地域における試錐掘削に関する
調査・試験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2000年3月

三菱マテリアル資源開発株式会社

堆積岩地域における試錐掘削に関する調査・試験

池田則生^{*}、永井保弘^{*}、荒屋智史^{**}、重野未来[†]、大島和夫^{**}
阿部順之^{***}、津崎成幸^{***}、上田 晃^{***}、齋藤茂幸^{****}

要 旨

本調査・試験は、堆積軟岩地域およびガス／油兆存在下における合理的かつ具体的調査の実施に必要な試錐掘削工法や泥水について、文献調査による事例調査や室内試験を実施し、掘削工法や泥水が地下の地質環境、特に地下水理に与える影響について調査・検討することを目的として行った。

実施内容は、室内試験としては、API 基準に則った泥水の性状試験、泥水と岩石を用いた泥水浸透試験、膨張率および膨潤圧測定、浸水崩壊度試験である。また事例調査として、国内の堆積岩地域の水理観測孔、NEDO の地熱、石油公団の基礎試錐、海外では ODP や放射性廃棄物処分研究における調査のための試錐掘削事例を収集、整理した。

試験に用いた泥水としては石油掘削で一般的に用いられている KCL-リグネート泥水、シリケート泥水 2 種、Drill-In-Fluid (DIF)、供試岩石としては新第三紀堆積岩を代表するものとして、北海道幌延町で掘削された D-1 孔の勇知層砂岩、声間層上部相泥岩、およびそれらと時代等が類似している房総半島清澄地域の清澄層砂岩、泥岩を選定した。なお、膨張率および膨潤圧測定、浸水崩壊度試験には比較のために脱イオン水も用いた。

今回の室内試験や事例調査結果から、地下水理への影響、地下水の地球化学への影響、岩石の地球化学への影響が少ない泥水としてはシリケート泥水、特に塩化カリウム (KCl) を添加しているシリケート泥水の有効性が示唆された。一方、膨潤性岩石の掘削については、今回の調査・試験結果から KCL-リグネート泥水と DIF が最も信頼性に富む掘削流体と結論づけられるが、DIF は石油生産ゾーンの掘削時に主に用いられるものであり、石油生産ゾーン以外の地層の掘削には使用実績の多い KCL-リグネート泥水等が使用されている。従って、堆積岩地域の掘削には特定の掘削流体 1 種類に決めるのではなく、ケーシング設置予定区間は KCL-リグネート泥水、試験対象区間はシリケート泥水あるいは可能であれば清水 (あるいは地層水) というようにそれぞれの特性を生かし、併用するのが現実的であると考えられる。

試錐掘削・調査工法に関しては、泥水試験、泥水と岩石の室内試験、国内外の掘削事例調査を基に、堆積岩地域における現状において最も安全で、コアが回収でき、各種のデータを取得できる掘削工法を提案した。

本報告書は、三菱マテリアル資源開発(株)が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号：110C0209

機構担当部課室および担当者：立地推進部 川村 淳

^{*}：企画開発部、^{**}：試錐部、^{***}：三菱マテリアル(株)総合研究所、^{****}：三菱マテリアル(株)原燃サイクル事業センター

Study for the Drilling Methods, Drilling Fluids and Investigation Techniques in Sedimentary Rocks

Norio Ikeda*, Yasuhiro Nagai*, Satoshi Araya**, Miki Shigeno*, Kazuo Oshima**
Yoriyuki Abe***, Shigeyuki Tsuzaki***, Akira Ueda***, Shigeyuki Saito****

Abstract

The main purpose of this study is to investigate and discuss the effect of drilling methods and drilling fluids on the geological and hydrological conditions in the area of weakly consolidated sedimentary formation with a potentiality of gas/oil reservoirs. For this purpose, the case studies of the domestic and overseas cases through literature and the laboratory experiments on drilling methods and drilling fluids based on the actual drilling operation have been conducted.

The topics of case studies include the researches on various groundwater monitoring boreholes in Japan, geothermal and oil/gas research boreholes by NEDO and JNOC, and as the overseas drilling cases the projects of ODP and radioactive waste disposal were chosen. The experiments such as drilling fluid tests on API standard, the mud invasion test, the swelling hydrational stress test and the soaking test were conducted at the laboratory.

In the laboratory experiments, KCL-lignite fluid commonly used for the oil development programs, two types of silicate fluids and Drill-In-Fluid (DIF), were selected for these tests. The core samples of Neogene Tertiary formation used for experiments are the sandstone of Yuchi Formation and mudstone of Koitoi Formation collected from D-1 borehole in Horonobe district, Hokkaido, and the sandstone and mudstone of Kiyosumi Formation in Kiyosumi district, Boso Peninsula. These samples have similar geologic age and physical properties. Furthermore, unionized water was used as a comparison in the expanded-rate test, the expanded-pressure test and the infiltration - erosion test.

The results of this study suggest that silicate fluid, especially KCL-added silicate fluid, is the most effective considering the influence to hydrological and chemical conditions of groundwater and rock chemistry. While KCL-lignite fluid and DIF are considered to be most reliable fluids for the safety of drilling the swelling rocks. The use of DIF, however, is limited only to the drilling of petroleum production wells. KCL-lignite or other fluids, on the other hand, have been used for the drilling of wide variations of geological environments with good records of performance. Consequently, in the case of drilling at the area of sedimentary formations, it is suggested that the selection of drilling fluids should be done most effectively depending on the geological environments and drilling operation: i.e. using KCL-lignite fluid during drilling at the casing zones, or using silicate fluid or fresh water (or formation groundwater) during drilling at the hydrological/geochemical tests. The studies on *in situ* investigation techniques such as well-logging show that the effective well-logging equipment is available in Japan.

Based on the results of the studies, a drilling method believed to be most effective and efficient in terms of safe operation, core recovery and collection of various data has been suggested.

This work was performed by Mitsubishi Materials Natural Resources Development Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

JNC Liaison: Site Planning Division, Makoto Kawamura

*: Research & Planning Department, **: Drilling Department

***: Mitsubishi Materials Corporation, Central Research Institute

****: Mitsubishi Materials Corporation, Global Ecoindustry Center

目 次

まえがき	1
1. 実施要領	3
1.1 調査件名	3
1.2 調査目的	3
1.3 実施内容	3
1.3.1 泥水浸透試験	3
1.3.2 石油・ガスがある場合の掘削工法の調査	5
1.3.3 試験孔掘削工法・調査手法に関する予備的調査	6
2. 泥水浸透試験	7
2.1 岩石試料の選定	7
2.1.1 D-1孔のコアサンプル	7
2.1.2 房総半島清澄地域のコアサンプル	11
2.2 試験泥水の選定	15
2.2.1 試験用泥水の選定方針	15
2.2.2 選定した泥水の特徴	16
2.3 岩石の基礎的物性試験	21
2.3.1 薄片顕微鏡観察	21
2.3.2 室内透水試験	27
2.3.3 見掛比重および含水比・吸水率・含水率・有効間隙率・飽和度	29
2.3.4 粉末X線回折分析	31
2.4 選定した泥水の比較試験	35
2.4.1 試験内容	35
2.4.2 試験内容および測定方法	35
2.4.3 試験結果	40
2.4.4 試験結果の解釈	44
2.4.5 まとめ	46
2.5 岩石と泥水の室内試験	48

2.5.1	泥水浸透試験	50
2.5.2	泥水と清水の比較試験	68
2.5.3	岩石と泥水の室内試験のまとめと評価	82
3.	石油・ガスがある場合の掘削工法の調査	91
3.1	最近の国内の堆積岩地域、地熱およびガス・石油地域における掘削工法・試錐調査手法の調査	91
3.1.1	堆積軟岩地域の試錐孔掘削状況	92
3.1.2	地熱関係の試錐孔掘削状況	104
3.1.3	石油・ガス地域の試錐孔掘削状況	122
3.2	最近の海外の堆積岩地域における掘削工法・試錐調査手法の調査	161
3.2.1	海洋掘削計画（Ocean Drilling Project）における掘削技術	161
3.2.2	海外の放射性廃棄物処分研究における掘削技術	165
3.2.3	石油資源探査・開発における掘削泥水の調査（参考）	168
3.2.4	まとめ	170
4.	試錐孔掘削工法・調査手法に関する予備的検討	171
4.1	試錐孔掘削計画の指針	171
4.2	試錐孔掘削計画に当たっての設定条件	172
4.2.1	地質条件	172
4.2.2	天然ガスの存在と圧力の仮定	173
4.2.3	オールコアリング掘削と清水による掘削の可能性、および先進地質構造試錐	173
4.2.4	物理検層、BHTV と水理試験および採水試験計画	175
4.2.5	噴出防止装置による安全対策	183
4.2.6	その他の安全対策	184
4.2.7	ケーシングプログラム	184
5.	まとめ	191
6.	今後の課題	200

巻末

巻末A：現場写真

巻末B：X線回折チャート

巻末C：泥水浸透試験および回復試験状況写真浸水崩壊度試験状況写真

巻末D：浸水崩壊度試験状況写真

目 次

図 2.1.1-1	D-1 コア分析結果のまとめ (JNC,1998)	9
図 2.1.1-2	幌延地域の層序 (JNC,1998)	10
図 2.1.2-1	房総半島清澄地域の地質図 (坂ほか,1990)	13
図 2.3.1-1	勇知層細粒砂岩 (D-1 孔) (開放ニコル)	22
図 2.3.1-2	勇知層細粒砂岩 (D-1 孔) (直交ニコル)	22
図 2.3.1-3	声間層上部相泥岩 (D-1 孔) (開放ニコル)	23
図 2.3.1-4	声間層上部相泥岩 (D-1 孔) (直交ニコル)	23
図 2.3.1-5	清澄層砂岩 (房総半島清澄地区) (開放ニコル)	24
図 2.3.1-6	清澄層砂岩 (房総半島清澄地区) (直交ニコル)	24
図 2.3.1-7	清澄層泥岩 (房総半島清澄地区) (開放ニコル)	25
図 2.3.1-8	清澄層泥岩 (房総半島清澄地区) (直交ニコル)	25
図 2.4.2-1	FANN Viscometer Model 35SA (VG メーター) の測定概念図	39
図 2.4.3-1(1)	KCL-リグネート泥水の粒度分析結果	42
図 2.4.3-1(2)	シリケート泥水 A の粒度分析結果	42
図 2.4.3-1(3)	シリケート泥水 B の粒度分析結果	43
図 2.4.3-1(4)	テルナイト DIF の粒度分析結果	43
図 2.4.3-1(5)	テルナイト DIF のブリッジング剤タンカル F の粒度分析結果	44
図 2.5.1-1	成形前採取試料の一部	50
図 2.5.1-2	成形後の試験供試体	50
図 2.5.1-3	試験供試体作製までのフロー図	51
図 2.5.1-4	泥水浸透試験装置	52
図 2.5.1-5	浸透用治具	52
図 2.5.1-6	泥水浸透試験装置模式図	53
図 2.5.1-7	浸透試験フロー図	56
図 2.5.1-8	回復試験フロー図	57
図 2.5.1-9	孔径測定手順フロー図	58
図 2.5.1-10	回復試験洗浄中	59
図 2.5.2-1	吸水膨張率測定装置	69
図 2.5.2-2	膨張圧試験装置	70

図 2.5.2-3	勇知層細粒砂岩の膨張率変化	71
図 2.5.2-4	声問層上部相泥岩の膨張率変化	71
図 2.5.2-5	清澄層砂岩の膨張率変化	72
図 2.5.2-6	清澄層泥岩の膨張率変化	72
図 2.5.2-7	勇知層細粒砂岩の膨張圧変化	73
図 2.5.2-8	声問層上部相泥岩の膨張圧変化	73
図 2.5.2-9	清澄層砂岩の膨張圧変化	74
図 2.5.2-10	清澄層泥岩の膨張圧変化	74
図 2.5.2-11	MBC 測定に関する試料調整の手順	76
図 3.1.1-1	No.3 孔ケーシングプログラム (川越ほか,1999)	97
図 3.1.1-2	No.3 孔最終プロファイル (木方ほか,1999)	98
図 3.1.1-3	掘削、ケーシング設置およびパッカー設置作業手順 (木方ほか,1999)	99
図 3.1.1-4	機械式ウイングビット概要図 (川越ほか,1998)	101
図 3.1.1-5	パッカー概要図 (木方ほか,1998)	102
図 3.1.3-1	DST 概念図 (日本海洋掘削株の資料より)	159
図 4.2.4-1	MSCT 概念図 (シュルンベルジェ株のパンフレットより)	178
図 4.2.4-2	MDT 概念図 (シュルンベルジェ株のパンフレットより)	180
図 4.2.7-1	ケーシングプログラム案 (掘削深度 1,000m)	189
図 4.2.7-2	掘削フロー図	190

表 目 次

表 2.1.2-1 房総半島清澄層の砂岩および泥岩の採取資料一覧	14
表 2.3-1 岩石の基礎的物性試験 試験内容詳細	21
表 2.3.1-1 薄片顕微鏡観察構成粒子一覧表	26
表 2.3.2-1 室内透水試験結果	28
表 2.3.3-1 見掛比重および岩水比・吸水率・含水率・有効間隙率・飽和度試験結果	30
表 2.3.4-1 粉末 X 線回折分析条件一覧	31
表 2.3.4-2 粉末 X 線回折分析結果一覧表	34
表 2.4.2-1(1) 泥水組成一覧表 (KCL-リグネート泥水)	36
表 2.4.2-1(2) 泥水組成一覧表 (シリケート泥水 A)	36
表 2.4.2-1(3) 泥水組成一覧表 (シリケート泥水 B)	36
表 2.4.2-1(4) 泥水組成一覧表 (DIF)	37
表 2.4.3-1 各泥水のレオロジー性質 (剪断速度-剪断応力) 測定結果	40
表 2.4.3-2 各泥水の基礎的な物性および泥水性状結果	41
表 2.5-1 岩石と泥水の室内試験内容詳細	49
表 2.5.1-1 試料成形に使用した機器一覧	50
表 2.5.1-2 泥水浸透試験機器一覧表	54
表 2.5.1-3 泥水浸透試験結果	60
表 2.5.1-4 泥水浸透試験および回復試験後の泥壁の比較	61
表 2.5.1-5 回復試験結果	62
表 2.5.1-6(1) 試験泥水、浸透試験後泥水、回復試験洗浄水の分析結果	66
表 2.5.1-6(2) 試験泥水、浸透試験後泥水、回復試験洗浄水の分析結果	67
表 2.5.2-1 吸水膨張率および膨潤圧想定結果	75
表 2.5.2-2(1) 各種泥水における清澄層泥岩および砂岩の浸水崩壊度状況	78
表 2.5.2-2(2) 各種泥水における声間層上部相泥岩および勇知層細粒砂岩の浸水崩壊度状況	79
表 2.5.2-3 MBC 試験結果	80
表 2.5.3-1 岩石と泥水の室内試験結果に基づく試験泥水の比較	88
表 3.1.1-1 堆積軟岩地域「No.3 孔」試験錐孔仕様の概要	96
表 3.1.2-1 N7-AR-1 孔の試験錐孔仕様の概要	108

表 3.1.2-2	N7-AR-1 孔 主要機器設備	109
表 3.1.2-3	N7-AR-1 孔の孔芯傾斜測定の結果概要	110
表 3.1.2-4	N7-AR-1 孔で使用した掘削泥水の種類と組成及び性状	111
表 3.1.2-5	N7-AR-1 孔で実施した検層の種類	112
表 3.1.2-6	N7-AR-2 孔の試錐孔仕様の概要	115
表 3.1.2-7	N7-AR-2 孔 主要機器設備	116
表 3.1.2-8	N7-AR-2 孔の孔芯傾斜測定の結果概要	117
表 3.1.2-9	N7-AR-2 孔で使用した掘削泥水の種類と組成及び性状	118
表 3.1.2-10	N7-AR-2 孔で実施した検層の種類	119
表 3.1.3-1	基礎試錐「夕張」の試錐孔仕様の概要	130
表 3.1.3-2	基礎試錐「夕張」 主要機器設備	131
表 3.1.3-3	基礎試錐「夕張」の孔芯傾斜測定の結果概要	132
表 3.1.3-4	基礎試錐「夕張」で使用した掘削泥水の種類と組成及び性状	133
表 3.1.3-5	基礎試錐「夕張」で実施した物理検層の種類	134
表 3.1.3-6	基礎試錐「東山」の試錐孔仕様の概要	141
表 3.1.3-7	基礎試錐「東山」の孔芯傾斜測定の結果概要	142
表 3.1.3-8	基礎試錐「東山」で使用した掘削泥水の種類と組成及び性状	143
表 3.1.3-9	基礎試錐「東山」で実施した物理検層の種類	144
表 3.1.3-10	基礎試錐「天北」の試錐孔仕様の概要	150
表 3.1.3-11	基礎試錐「天北」で実施した物理検層の種類	151
表 4.2.4-1	各検層機器の仕様 (シュレンベルジェ(株)のパンプレットからの抜粋)	183

まえがき

本報告書では、堆積軟岩分布地域における試錐泥材の予備的影響評価、石油・ガス賦存の可能性が極めて高い地域での試錐掘削工法や試錐孔の調査手法の計画策定のための指針を得ることを目的として、予備的検討結果について報告するものである。

試錐調査の目的は、一般に次の5項目にまとめられる。

- ・ 地質・地質構造の把握（岩石コア、物理検層等による）
- ・ 水理地質構造・水理特性の把握（物理検層、原位置水理試験、岩石コア室内透水試験、原位置および室内透水特性の比較検討等による）
- ・ 地下水化学特性の把握（原位置採水試験、岩石コア間隙水分析等による）
- ・ 地質工学特性の把握（岩石コア、原位置試験、物理検層等による）
- ・ 上記の地質環境特性、地質環境の安定性に関わるデータの三次元的、経時的把握（モニタリング・クロスホールテスト等による）

上記のうち、水理地質構造・水理特性の把握および地下水化学特性の把握の目的を達成するために、東濃地域における広域地下水流動研究および超深地層研究所計画の試錐調査では、基本的な掘削工法として清水工法が採用されている。東濃地域は、主として花崗岩類で代表される結晶質岩で構成されているので、清水工法とセメンチングを併用して研究を進めることが可能である。

一方、堆積岩分布地域では、清水掘削に対する技術的信頼性は得られていない。すなわち、破損の少ないコアを採取し良好な孔壁を維持し諸試験を実施するために、泥水工法を採用する必然性が極めて高い。しかしながらこの工法は、特に地球化学的、水理学的な初期状態が変化し、人為的な影響を受けた状態を把握せざるを得ないという問題が生じる。

本報告では、既存の岩石コアおよび地表から採取した堆積岩試料を用いて行う室内実験、および文献による国内外の掘削事例の調査から、堆積岩、特に水に対する崩壊性が著しい堆積軟岩の分布地域における水理地質構造・水理特性および地下水化学特性に与える影響が小さく、かつ安全な掘削が可能な掘削流体と掘削工法について調査・試験を行った。

1. 実施要領

1.1 調査件名

堆積岩地域における試錐掘削に関する調査・試験

1.2 調査目的

堆積軟岩地域およびガス／油兆存在下における合理的かつ具体的調査の実施に必要な試錐掘削工法や泥水について、文献調査による事例研究や室内試験を実施し、掘削工法や泥水が地下の地質環境、特に地下水理に与える影響について調査・検討することを目的とする。

1.3 実施内容

本調査・試験では、以下の項目を実施した。

1.3.1 泥水浸透試験

泥水掘削による泥水の孔壁への付着と浸透状況等といった岩盤への影響を評価するために、実験室レベルでの浸透試験を行った。実施内容は以下のとおりである。

(1) 岩石試料の選定

岩石試料は、幌延町で掘削した D-1 孔のコアから勇知層および声問層上部相よりそれぞれの砂岩部と泥岩部の 2 種類、計 4 種類の試験試料を採取することを前提に、事前のコア保存状態を調査し選定することとした。

まず、「北海道北部地域の第四紀層序に関する検討報告書」(JNC,1998)¹⁾を参考に、D-1 孔のコアの記載から予め対象層準の代表的な岩石試料と判断される分布深度をそれぞれの層準から数カ所ずつ候補として抽出しそれらの深度のコアを調べたところ、コアの保存状況が極めて不良であることが判明した。その中で、試験に供する限界の試料として、次の 2 試料を採取した。

- ・ 勇知層細粒砂岩：447m～450m
- ・ 声問層上部相泥岩：1,344m～1,347m

次に、残りの 2 試料については、D-1 孔に分布している勇知層（鮮新世後期～更新世前期）・声問層上部相（鮮新世後期～一部更新世前期）・声問層主部相（中新世後期～鮮新

世中期)・稚内層(中新世中期～中新世後期)と同様の年代・岩質・強度の堆積岩を他地区の露頭から採取することとし、房総半島に分布する清澄層(勇知層～声問層(中新世後期～鮮新世後期)に対比)の砂岩および泥岩を選定した。

(2) 岩石の基礎的物性試験

選定した岩石試料に対し、粉末 X 線回折分析および薄片観察を行い、構成鉱物および変質度を調査した。薄片については偏光顕微鏡写真の撮影も行った。また、これらの試料に対し、自然・乾燥・湿潤状態の密度測定、有効間隙率測定、吸水率測定、含水比測定、含水率測定および透水試験を実施し、その基礎的な物性データを取得した。

(3) 試験泥水の選定

浸透試験は 4 種類の泥材を対象として実施した。試験に用いた泥水は水理学的・地球化学的影響の観点から検討し選定した。

国内メーカーで製造している堆積軟岩掘削に実績のある泥水が複数存在する。そのなかでは特に「KCL-リグネート泥水」(KCL-リグネート泥水の「KCL-」は全て大文字で表す場合が多いので本報告でもそれに従うこととする)が定評がある。また、最近の海外の調査・研究では、北海油田の BW 泥岩あるいは NAGRA による Mt.Terri プロジェクトに見られる Opalinus Clay の掘削に珪酸塩掘削流体(Silicate Drilling Fluids、以後シリケート泥水とする)が使用され、水理学的影響が少ない流体として注目されている。これについては、詳細な試験結果の実績を有していないが、堆積軟岩に適したものと考えられ、シリケート泥水は国内メーカーによる供給が可能である。さらに、(株)テルナイトはブリッジング剤(後述 2.2.2(3)参照)を添加することにより石油掘削において石油貯留層の掘削泥水の浸入による生産ゾーンの開塞などの障害を防止することと掘削中の試験孔の安定性を確保することを目的とした掘削流体(Drill-In-Fluid、以後 DIF とする)を開発している。石油生産井の掘削において泥壁は、生産ゾーンを保護する能力を備えていなければならない、更に、石油生産時には泥壁を容易に除去できることが望まれる。この特質は、深地層研究の試験掘削にも利用できるものと考えられる。よって今年度は以下の 4 種類の泥水を用いることとした。

- ・ KCL-リグネート泥水
- ・ シリケート泥水(成分を変えて 2 種類)
- ・ DIF

なお、上記で選定した泥水については、pH、塩濃度、成分比（化学成分、添加物の混合比）、粘度、比重、粒度等の基礎的な物性値を作泥直後に測定した。

(4) 泥水浸透試験

泥水浸透試験では、房総半島清澄地区の露頭から採取した清澄層の細粒砂岩および泥岩各1試料、合計2試料について以下の項目の作業を実施した。室内浸透試験システムの構築については、「岩の調査と試験」（土木工学会,1989²⁾）の「室内浸透試験」の章を参考にした。

- ・ 試験供試体の作製
- ・ 試験システムの構築
- ・ 浸透試験の実施
- ・ 試験供試体への泥水浸透の度合いの観察
- ・ 回復試験（浸透試験後、試験供試体を清水洗浄し表面に形成された泥壁の除去効果を目視で定性的に確認するもの）
- ・ 浸透試験前泥水、浸透試験後試料の試験孔に残っていた泥水および回復試験時の洗浄水の化学分析（岩石と泥水および洗浄水との反応を把握するもの）

なお、泥水の基となる清水および洗浄水には脱イオン水を使用した。

(5) 泥水と清水の比較試験

岩盤への泥水および清水の浸水による崩壊・膨張などの変形による影響を比較検討するために泥水と清水を使用して、浸水崩壊度試験、吸水膨張試験、膨潤圧試験を実施した。また、岩盤と泥水/清水が接することによる岩盤・それに含まれる地下水等の化学的変化を把握するために、陽イオン交換容量（CEC）試験等を実施した。

(6) 泥水の評価

(3)で選択した泥材について、浸透試験や比較試験等の結果に基づいて取りまとめ、各々の泥水についてその長所、短所について評価し、試験に使用した泥水間で比較し、堆積岩地域における目的に応じた最適な掘削泥水の使用法について検討した。

1.3.2 石油・ガスがある場合の掘削工法の調査

泥水浸透試験で得られた結果を整理し、それから考えられる既存の掘削工法（ワイヤー

ライン工法等)に係わる課題を抽出し、堆積軟岩の掘削に関する孔壁や地下水への影響が少ない最適な掘削工法、検層・孔内採水などの調査手法等に関して調査・検討した。特に石油・ガスの噴出がある場合を想定した上、以下の項目について調査・検討した。

- ① 最近の国内・国外の堆積軟岩地域における掘削工法・調査手法の調査
- ② 最近の地熱・石油・ガス地域における掘削工法・調査手法の調査
- ③ 最近のコアリング・ノンコアリング工法、泥水・清水工法の調査

具体的には、国内の事例については「応用地質」等の最近の学会誌に紹介された堆積軟岩掘削工法と試錐孔を利用した調査手法、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の地熱開発促進調査の構造試錐から2件および石油公団の基礎試錐から3件の試錐掘削と孔内検層のレビュー、海外の事例については国際機関である深海底サンプリング海洋学研究所共同研究機構(Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling; JOIDES)が計画運営している Ocean Drilling Programme (ODP) および放射性廃棄物処分研究における試錐掘削工法や掘削流体のレビューを実施し、調査地域、調査目的、主な調査手法、調査数量、掘削工法、掘削泥水の種類等についてまとめた。

1.3.3 試錐孔掘削工法・調査手法に関する予備的検討

上記の1.3.1項および1.3.2項の結果から対象岩石の冠水状態での自立性に関する検討を加え、試錐孔掘削工法と試錐孔における調査手法について提言した。

2. 泥水浸透試験

泥水掘削による泥水の孔壁への付着と浸透状況等といった岩盤への影響を評価するために、実験室での浸透試験を行い、その評価を行った。実施内容は以下のとおりである。

2.1 岩石試料の選定

岩石試料は、幌延町で掘削した D-1 孔のコアから勇知層および声問層上部相よりそれぞれの砂岩部と泥岩部の 2 種類、計 4 種類の試験試料を採取することを前提に、コアの保存状態を事前に調査した結果を基に、試料を選定するものとして作業を進めた。

2.1.1 D-1 孔のコアサンプル

D-1 孔のコアの記載から、予め勇知層および声問層上部相の代表的な岩石試料と判断される分布深度をそれぞれの層準から数カ所ずつ候補として抽出した。

D-1 孔のコアの地質は、以下のように区分されている（例えば JNC,1998¹⁾）。

- ① 0-30.00m：ノンコア
- ② 30.00-349.20m：更別層（砂岩・泥岩）
- ③ 349.20-886.60m：勇知層（砂岩主体）
- ④ 886.60-1,355.00m：声問層上部相（泥岩主体）

これらの地質のうち、「北海道北部地域の第四紀層序に関する検討報告書」(PNC,1992²⁾)に記載されている 100 分の 1 岩石コア柱状図を参考に、以下のように、勇知層の砂岩および泥岩と、声問層の砂岩および泥岩が、比較的連続して分布する深度を抽出した。

① 勇知層

砂岩：

- ・ 410-430m：中粒砂岩-1
- ・ 440-460m：細粒砂岩-2
- ・ 650-670m：細粒砂岩-3
- ・ 760-780m：細粒砂岩-4

泥岩：

- ・ 690-730m：3 枚の砂質泥岩-1

② 声問層上部相

砂岩：

- ・ 1,000-1,050m：細粒砂岩-1

- ・ 1,231-1,238m：細粒砂岩－2

泥岩：

- ・ 955-960m：泥岩－1
- ・ 1,115-1,120m：泥岩－2
- ・ 1,295-1,309m：泥岩－3
- ・ 1,323-1,348m：泥岩－4

それらの深度のコアを実際に調査・観察した結果、コアの保存状況が極めて不良であることが判明した。その中で、試験に供する限界の試料として、次の2試料を採取することとした。

- ・ 勇知層細粒砂岩：447m～450m（巻末写真 A-1）
- ・ 声問層上部相泥岩：1,344m～1,347m（巻末写真 A-2）

なお、採取数量は80cmほどで後述の試験に十分な量であるが、この試料の範囲でも、コアの保存状態が不良の箇所もあるため、上記のように余裕の量を採取することとした。

従来、幌延地区周辺の新第三系の地質層序は、下位より宗谷層、中部中新統の増幌層、それを不整合に覆う中部中新統の稚内層、その上位に整合的に累重する声問層（上部中新統～下部鮮新統）、勇知層（鮮新統）、更別層（上部鮮新統～下部更新統）に区分されている。

動力炉・核燃料開発事業団による調査・研究で微化石年代測定、放射性年代測定等のデータの追加により、D-1孔周辺の地質年代については以下のように見直しがなされている（図2.1.1-1,2, JNC,1998¹⁾）。

- ・ 更別層：下部～中部更新統
- ・ 勇知層：上部鮮新統～下部更新統
- ・ 声問層上部相：上部鮮新統～下部更新統
- ・ 声問層主部相：上部中新統～中部鮮新統

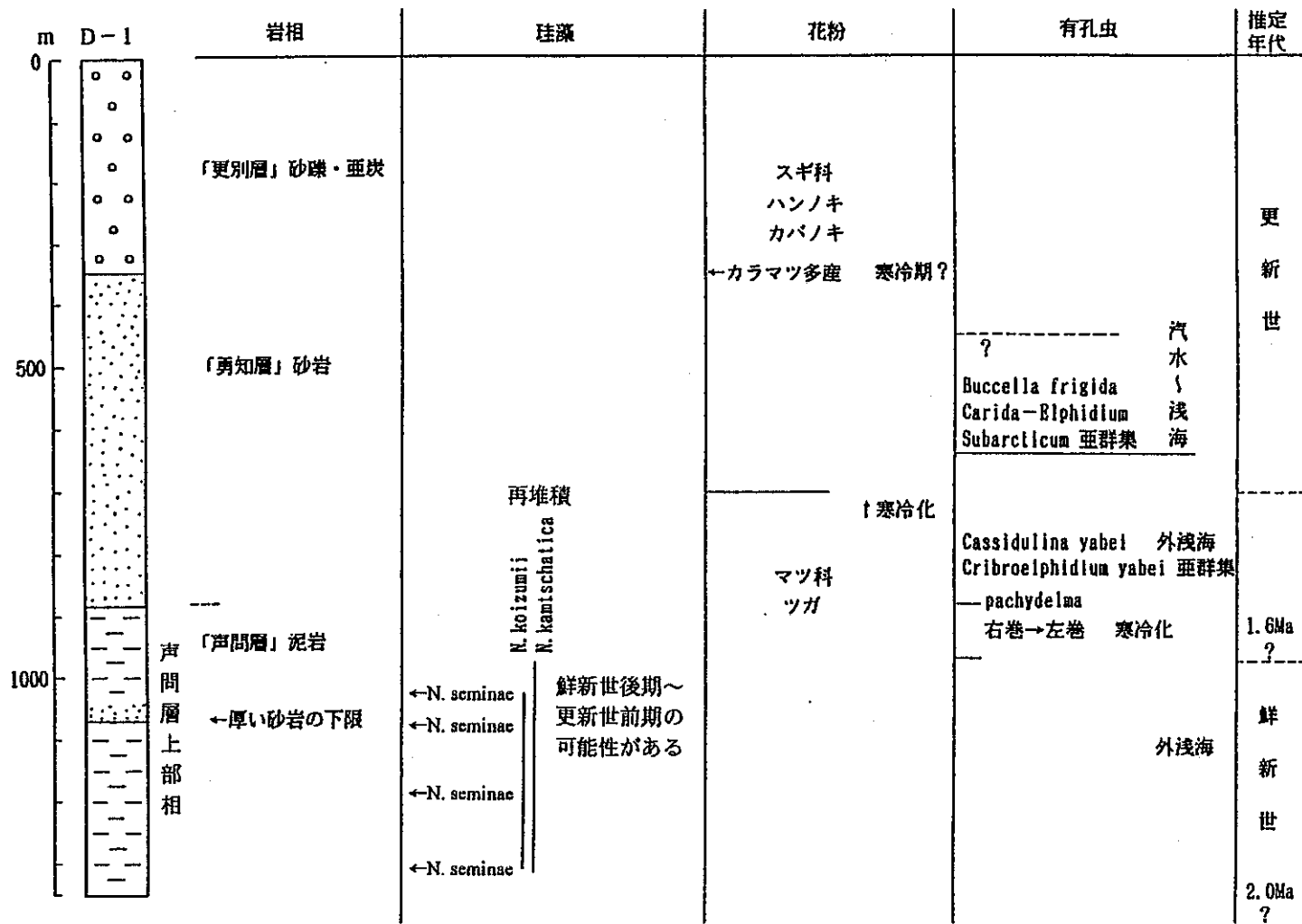
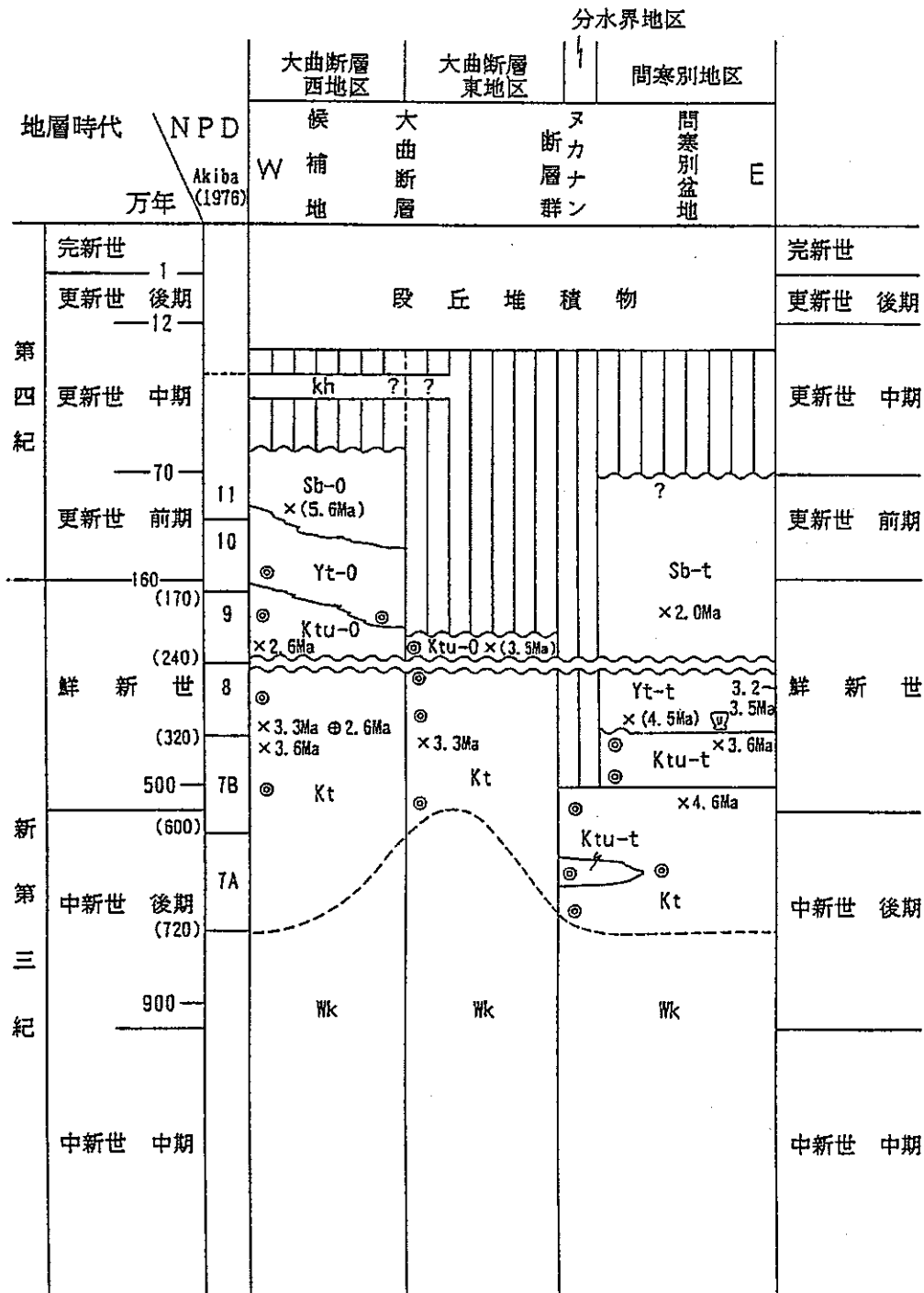


図 2.1.1-1 D-1 コア分析結果のまとめ (JNC,1998¹⁾)



kh: 葱北層
 Sb-0: 大曲断層西地区の更別層
 Yt-0: 大曲断層西地区の勇知層
 ktu-0 { 大曲断層西地区の声間層上部相
 大曲断層東地区の声間層上部相
 kt: 声間層主部相
 Wk: 稚内層

Sb-t: 間寒別地区の更別層
 Yt-t: 間寒別地区の勇知層
 ktu-t: 間寒別地区の声間層上部相

×: FT年代 ()は古すぎる値
 ⊕: K-Ar年代
 ⊕: 貝化石による年代
 ⊙: 珪藻化石による年代

図 2.1.1-2 幌延地域の層序 (JNC,1998¹⁾)

2.1.2 房総半島清澄地域のサンプル

当初の4試料のうち、残りの2試料については、サイクル機構と協議の上、幌延地区に分布している勇知層・声問層上部相・声問層主部相・稚内層と同様の年代・岩質・強度の堆積岩を他地区の露頭から採取するものとした。

その候補地として、房総半島の三浦層群上部層を構成する安野層の泥岩、清澄層の砂岩か泥岩、天津層の泥岩を選定した(図2.1.2-1、坂ほか,1990³⁾)。

地質年代については、フィッシュトラック年代および化石年代(例えば蟹江ほか,1991⁴⁾)から、清澄層下部~中部層は声問層主部相に対比され、安野層~清澄層上部層は勇知層~声問層上部相に対比される。

「貯蔵工学センター立地環境調査-深層ボーリング報告書」(PNC,1987⁵⁾)によれば、ボーリングコアを使用した室内試験では、声問層の一軸圧縮強度は50~200kgf/cm²(約5~20MPa)、封圧下の圧縮強度は200~500kgf/cm²(約20~50MPa)である。塚原・池田(1989)⁶⁾によれば、ボーリング孔を使用した原位置水圧破砕法による岩盤中の応力測定では、三浦層群の岩盤の圧縮応力値は、深度に応じて、5~15MPaを示す。したがって、強度についても幌延地区の岩石とほぼ同様の数値の間に収まるものと考えられる。

中島ほか(1981)⁷⁾、坂ほか(1990)³⁾、小玉ほか(1990)⁸⁾等によれば、清澄背斜・向斜等の褶曲や古期断層、新期断層を形成した構造運動により、複雑な地質構造を呈していることが記述されている。北海道幌延地域も、背斜・向斜等の褶曲構造や大曲断層や幌延断層(ヌカナン断層)などの構造運動を受けていることがわかっている。

以上より、幌延地域の岩石と房総半島清澄地域の岩石は同様の年代、岩質、強度および地質構造を有しているものと判断できる。

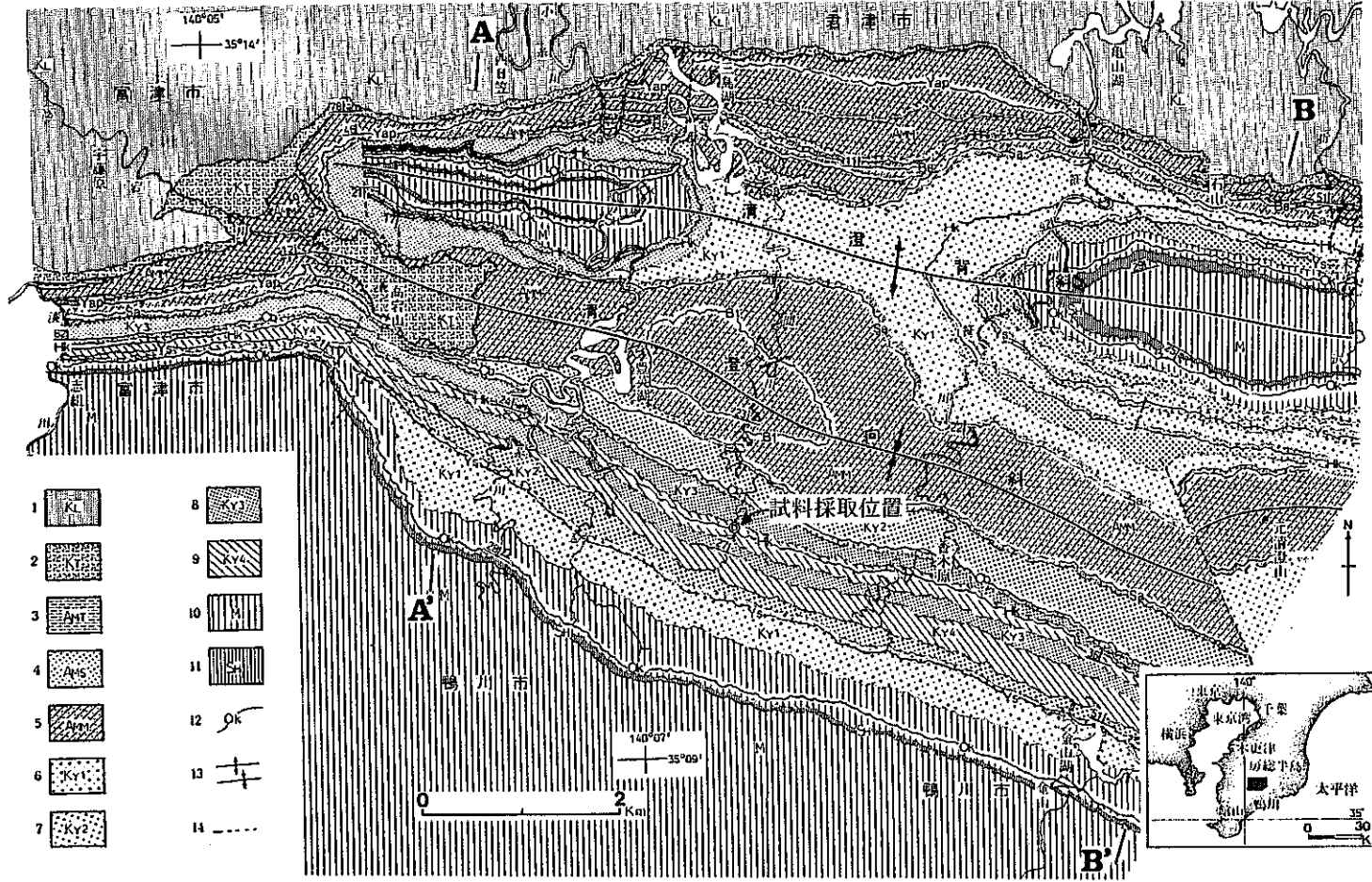
候補地の選定については、中嶋ほか(1981)⁷⁾や坂ほか(1990)³⁾を参考に、勇知層および声問層の代替えとして、前述のように天津層、清澄層および安野層を非グリーンタフ地域の新期堆積岩の代表的地質と判断したが、試料の最終的な選定については、露頭の状況により決定するものとした。

採取箇所は、君津市の小系川上流の三間川のルートから選定した。同ルート周辺には「川廻し」による水路トンネルが見られ、その側壁では地表の露頭に比較して風化が進行せずに新鮮な露頭状況が保持されている(巻末写真A-3~5)。

採取箇所のトンネルは、長さ13m、幅5m~5.6m、高さ2.1m~2.6m、トンネル上部の土壌、地層の被りは約10m~20mである。トンネル内の地質は、黒色スコリア質砂岩、灰色泥岩、灰色凝灰質砂岩、灰色細~中粒砂岩、暗灰色スコリア混じり泥岩、灰色中流砂岩、

灰色細粒砂岩からなる。各々の層厚は数 cm～数 m の範囲にあり、数 10cm の層厚が一般的である。これらのうち、D-1 孔のコアと類似の岩相を示す灰色細粒砂岩および灰色泥岩を対象岩石とした。

採取数量および試料のサイズ等は、後述の試験を考慮した上、約 10～20cm 立方を含む数個とした（採取試料の一例：巻末写真 A-6,7）。また、凝灰岩類等の挟みはあるものの、岩質は砂岩および泥岩ともに、塊状で均質な部分が多く認められる。したがって、挟みの部分を避け、目標となる試料のサイズの確保に努力し、理想的な試料の採取ができた（表 2.1.2-1）。



第1図 清澄地域の地質図

凡例 1: 下部上総層群 (KL), 2: 黒流層 (Kt), 3~5: 安野層 { 3: 凝灰質泥岩層 (AMT), 4: 砂礫も凝灰質砂岩泥岩互層 (AMS), 5: 泥礫も凝灰質泥岩泥岩互層 (AMM)}, 6~9: 清澄層 { 6: 砂岩泥岩互層の含砂層率80%以上 (Kvi), 7: 砂岩泥岩互層の含砂層率80~70% (Kvz), 8: 砂岩泥岩互層の含砂層率70~60% (Kvs), 9: 砂岩泥岩互層の含砂層率60%以下 (Kva)}, 10: 三浦層群中部・下部 (天津塚および木ノ根層) (M), 11: 千畑層相当層 (天津塚中の凝灰質泥岩層) (Sh), 12: 火砕錐層, 13: 褶曲軸, 14: 断層.

図 2.1.2-1 房総半島清澄地域の地質図 (坂ほか,1990³⁾)

表 2.1.2-1 房総半島清澄層の砂岩および泥岩の採取試料一覧

サンプルNo.	岩石名	サンプルの大きさ・形状	試験内容	試験に供する個数	室内試験No.	泥水の種類
	砂岩					
S-1	清澄層・細粒砂岩	中	泥水浸透試験	1/1	S-A-1	シリケート泥水A
					S-A-2	シリケート泥水A
S-2	清澄層・細粒砂岩	中	泥水浸透試験	2/3	S-B-1	シリケート泥水B
					S-B-2	シリケート泥水B
					予備	
S-3	清澄層・細粒砂岩	大	泥水浸透試験	2/5	S-C-1	KCL-リグネート泥水
					S-C-2	KCL-リグネート泥水
					S-D-1	DIF
					S-D-2	DIF
S-4	清澄層・細粒砂岩	中	泥水浸透試験	1/6	予備	
S-5	清澄層・細粒砂岩	中	泥水浸透試験	1/7	予備	
S-6	清澄層・細粒砂岩	平	泥水浸透試験	1/8		
S予-1	清澄層・細粒砂岩	小	泥水浸透試験(予備)	1/9		
S物-1	清澄層・細粒砂岩	小	透水試験	1/1		
S物-2	清澄層・細粒砂岩	小	透水試験以外の物性試験	1/2		
	泥岩					
M-1	清澄層・泥岩	大	泥水浸透試験	2/2	M-A-1	シリケート泥水A
					M-A-2	シリケート泥水A
					M-B-1	シリケート泥水B
					M-B-2	シリケート泥水B
M-2	清澄層・泥岩	中	泥水浸透試験	2/4	M-C-1	KCL-リグネート泥水
					M-C-2	KCL-リグネート泥水
					M-D-1	DIF
M-3	清澄層・泥岩	大	泥水浸透試験	2/6	予備	
M-4	清澄層・泥岩	小	泥水浸透試験	1/7	予備	
M-5	清澄層・泥岩	小	泥水浸透試験	1/8	M-D-2	DIF
M予-1	清澄層・砂質泥岩	小	泥水浸透試験(予備)	1/9		
M物-1	清澄層・泥岩	小	透水試験	1/1		
M物-2	清澄層・泥岩	平	透水試験以外の物性試験	1/2		
M物-3	清澄層・泥岩	平	透水試験以外の物性試験	1/3		

2.2 試験泥水の選定

掘削計画の目的によって、使用可能な掘削泥水の種類はしばしば制限されることがある。石油資源探査・開発における掘削泥水が、常に他の分野（例えば地層科学研究）で適用可能であるとは限らず、しばしば地下の地質環境に影響を与えるものとして敬遠されることの方が多い。しかしながら、掘削技術は分野の目的にかかわらず類似しており、石油資源探査・開発に関わる泥水開発を含む掘削技術は参考にすべきものとする。

2.2.1 試験用泥水の選定方針

室内試験では4種類の泥水を対象として実施した。試験に用いた泥水は、

- ① 堆積軟岩の掘削には最も一般的に使用されているもの
- ② 水理的・地球化学的影響が少ないと考えられるもの
- ③ 国内での供給が容易なもの

の観点から検討し選定した。

国内メーカーで製造している堆積軟岩掘削に実績のある泥水が複数存在する。そのなかでも特に「KCL-リグネート泥水」が安定した掘削や孔壁の維持では最も定評があり、堆積軟岩の掘削では最も多く用いられている。今回の試験においても、最も標準的な組成のKCL-リグネート泥水を作成し、試験に供することとした。

最近の海外の調査・研究では、NAGRAによるMt.Terriプロジェクトに見られるOpalinus Clayの掘削に珪酸塩掘削流体(Silicate Drilling Fluids)が使用されている。これについても、詳細な試験結果等のデータは有していないが、堆積軟岩に適したものと考えられ、国内メーカー(株)テルナイトなどによる供給が可能である。今回はM-I社およびBaroid社等が出した文献を参考に標準と考えられる組成のものと、粘土の膨潤をより抑制する効果があると考えられるKCl(後述2.2.2(1)参照)を添加したものの2種類を作製し、試験に供した。

(株)テルナイトはブリッジング剤(後述2.2.2(3)参照)を添加することにより石油掘削において石油貯留層の掘削泥水の浸入による生産ゾーンの閉塞などの障害を防止することと掘削中の試験孔の安定性を確保することを目的とした掘削流体(DIF)を開発している。石油生産井の掘削において泥壁は、生産ゾーンを保護する能力を備えていなければならない、更に、石油生産時には泥壁を容易に除去できることが望まれる。この特質は、深地層研究の試験掘削にも利用できるものと考えられる。

よって今年度は以下の4種類の泥水を用いることとした。

- ・ KCL-リグネート泥水

- ・ シリケート泥水（成分を変えて2種類）
- ・ DIF

なお、上記で選定した泥水については、pH、塩濃度、成分比（化学成分、添加物の混合比）、粘度、比重、粒度等の基礎的な物性値を作泥直後に測定した。

2.2.2 選定した泥水の特徴

(1) KCL-リグネート泥水

リグネート泥水 (Lignite Mud)とは、清水または海水をベースとしたベントナイト懸濁液に対して、リグニンスルホン酸誘導体（一般的にはフェロクロムリグニンスルホン酸ソーダ）とフミン酸誘導体（一般的にはクロムフミン酸ソーダ）を加え、苛性ソーダでpHを9.5~10.5に調節したウォーターベース泥水の総称である。フェロクロムリグニンスルホン酸ソーダとクロムフミン酸ソーダの複合物をリグネート (Lignite) といい、最も広く使用されている分散剤（泥水中の粘土粒子の陰電荷を大きくすることによって、粒子同士の反発力を牽引力よりも大きくし、粘性、イールドポイント等を下げる働きをする添加剤）である。

リグネート泥水は、多機能なインヒビテッド泥水（高比重の維持が容易であるとともに泥岩層の水和、膨潤を抑制する機能を持った泥水）として過去40年にわたって使用され、現在でも最も一般的な安定した泥水として、泥岩層や高圧層などの試錐孔掘削に使用されている。フェロクロムリグニンスルホン酸ソーダとクロムフミン酸ソーダ中の鉄とクロムはリグニンおよびフミン酸と強固なキレート結合をしており、イオン解離しないという特徴をもっている。キレート結合のままの状態粘土粒子表面に吸着され、強固な保護膜をつくり、この保護膜によって粘土類の膨潤、分散を抑制する機能を発揮する。

試錐孔を掘削する場合、最も障害を起こしやすい地層は、モンモリロナイト、イライト、緑泥石およびそれらの混合層鉱物を多量に含有している泥岩層である。このような泥岩層の水和、膨潤、分散を抑制するのに無機塩類が有効であり、特に K^+ イオンは他の Na^+ や Ca^{2+} などに比べて粘土類の膨潤抑制能力に優れていることは古くから知られていた。これは、 K^+ イオンのイオン半径が 2.66\AA であり Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} よりも大きく、かつモンモリロナイトのような3層構造粘土の結晶間距離の大きさである 2.8\AA とほぼ等しいため、塩基交換によってK-モンモリロナイトになると粘土内に固定されやすい。固定化されると他のイオンによって置換されにくくなり、また K^+ イオンは水和エネルギーが小さいなどの特徴をもっているため、他の無機イオンよりも粘土類の膨潤、分散抑制力が優れていると考えられて

いる。K⁺イオンの供給源として一般的なのはKClであり、KClを添加したリグネート泥水は泥岩層の安定化、掘進率の向上、カッティングスの運搬能力の優れた多機能なインヒビテッド泥水として盛んに使用されるようになった。

KCL-リグネート泥水の長短をまとめると以下のようになる。

長所：

- ① 泥岩層の保護機能が優れている。
- ② 流動性や比重のコントロールが容易である。
- ③ 温度に対する安定性が大きい。
- ④ 塩水、セメント、石膏およびその他の汚染剤に対する抵抗力が大きい。
- ⑤ 作泥、調泥その他日常の取り扱いが容易である。

短所：

- ① クロムはリグニンおよびフミン酸とキレート結合しており有害物質である遊離の6価クロムは存在しないが、泥水中に重金属であるクロムが含まれていることになるので、重金属による環境汚染の危惧がある。
- ② 掘削の安全性のみを目的としており泥壁の完全な除去が困難であるため、例えば生産ゾーンが目詰まりなどを起こしやすい。

KCL-リグネート泥水は石油・ガス井の掘削に広く一般的に使用されている泥水で、堆積軟岩地域を考えた場合、この泥水を使用すれば問題なく掘削はできるものと考えられるため、第一候補の泥水と考えられる。

(2) シリケート泥水

シリケート泥水は、清水、海水あるいは1価の塩水をベースとしたローソリッド、非分散系ポリマー泥水に泥化抑制剤として珪酸ソーダなどの可溶性シリケートを添加し、pH=11~12.5に調整したウォーターベースの泥水である。

珪酸ソーダは1,300℃の高温下で砂とソーダ灰（炭酸ナトリウム, CaCO₃）を溶解して作られるものであり、分子式はNa₂O・n(SiO₂)で表され、nの値によって珪酸ソーダの化学的性質、物理的性質が異なり、それに伴い用途も異なる。現在工業的に生産されているのはnが0.5、0.67、1、2、2.5、3および4のものに限られており、一般にシリケート泥水で用いられるのは主にn=3のもの（珪酸ソーダ3号（JIS K 1408-1966））である。珪酸ソーダは通称「水ガラス」と呼ばれ、生セメントに接すると急激に固結することから、セメント急結剤としても利用されている。

シリケート泥水の使用例は意外と古く、1930年代米国で100本以上の石油井掘削で使用されている。しかしながら、高いレオロジーのため粘性コントロールが困難であることから廃れ、1940年代には使用されなくなった。1960年代に一時再採用されたが、短期間で廃れた記録がある。しかしながら、1994年再三採用され、海洋でMOBIL、陸上でNAMが成功裏に使用した。最近の海外の事例では、北海油田のBW泥岩あるいはNAGRAによるMt.Terriプロジェクトに見られるOpalinus Clayの掘削に使用されている。国内ではシリケート泥水は頁岩の泥化抑制能力が大きいという理由から、10年以上前に実用化を検討したようであるが、当時の調泥剤、特にシリケート泥水に適した分散剤がないため、泥水管理が非常に難しく実用化には至らなかった。

シリケート泥水は頁岩を安定して掘削できることで定評があるが、その安定化のメカニズムは他の泥水と比較して特徴的である。シリケート泥水が孔内で岩石に接するとその表面に半透膜であるシリケート膜が形成され、その膜が岩石のマトリックスに圧着する。半透膜であるシリケート膜は一部シリケート泥水そのものを通し、浸透したシリケート泥水は細かな割れ目を充填し固結する。そのため脆く剥離しやすい頁岩を固結させることができ、安定した掘削を行うことができる。また同様に、粘土層、炭カル層、セメント固化物の掘削においても安定した掘削を期待することができる。

先にも記したようにシリケート泥水に適した分散剤がないことから、泥水中のソリッド含有量が多くなり、温度が高く(110~120℃)になるとシリケート泥水そのものを増量してソリッド濃度の低下や粘性低下をしなければならないのでシリケートの消費は大きくなる。また、石膏、生セメント、石灰岩層、塩水層、炭酸ガス、硫化水素等が存在する場合、シリケート泥水中の珪酸ソーダがそれらに対し反応を起こすため、珪酸ソーダの濃度が低くなったり泥水そのものが消費されてしまう。そのためシリケート泥水の消費が大きくなる。

シリケート泥水の長短をまとめると以下ようになる。

長所：

- ① 泥岩層、特に剥離性が著しい頁岩の保護機能に優れている。
- ② 水理学的影響が少ない流体との報告がある。

短所：

- ① シリケート泥水に適合した分散剤がない。流動性の調整には現状ではベース流体の希釈のみで対処するしかない。そのため泥水の消費量が多くなる場合がある。
- ② 温度安定性がKCL-リグネート泥水よりも劣る。
- ③ 高pHである(危険物・毒物ではない)。泥水ラインの配管に耐高pHのパッキンの

使用などの対策が必要とされる（防腐、防蝕剤は必要としない）。

取り扱い上の留意点：

高濃度のシリケートが目や皮膚に接触すると、やけど様の症状を呈する場合がある。

そのため保護メガネ、手袋の着用が必要とされる。

既述したように、シリケート泥水は海外において幌延と同様な研究を目的にした試験掘削に利用され、地下水理に対する影響が少ないと評価されている。実際の使用時の配合等に関するデータは入手できなかった。今回の試験では、国内で入手可能な泥剤を使用してシリケート泥水を作成し、性状評価および実用化を検討するものとする。

シリケート泥水については、粘土類の膨潤抑制の働きをするKClを添加したものと無添加のもの2種類作製し、両者でどのような違いがでるかを調査した。

(3) Drill-In-Fluid (DIF)

近年、世界的な動向として、石油・天然ガスの掘削においては、より経済的、且つ効率的に多量の石油・天然ガスを産出するため、水平掘削、マルチラテラル掘削（1本の試験孔から数本の試験孔を枝掘りする技術で、その掘削方向を自由に変えることができる）、そしてスリムホール掘削（口元孔径が7インチで、生産ゾーンを4.3/4インチで仕上げる一般の石油・ガスの生産井よりも細い試験孔）等が脚光を浴びてきている。これに伴い、泥水技術面でも、各石油会社及び泥水関連会社等において、いわゆる“Drill-In-Fluids”という生産層掘削時の専用掘削流体についての研究開発がなされ、幾つかのDrill-In-Fluidsが良好に実使用されている。

Drill-In-Fluidsの基本的な考え方は以下の二つである。

- ① 油層障害を防止できる流体である。
- ② 掘削した裸孔部の安定性が得られる流体である。

生産層を水平方向に掘削する水平掘削やマルチラテラル掘削では、生産層が掘削流体に曝される時間が長くなり、より油層障害を起こしやすくなると共に、掘削した裸孔部も不安定になりやすい。上記の二つの事項を満足させる最適 Drill-In-Fluids の選択が極めて重要となる。

地層障害を最小限にするためには、まず第1点目は泥壁を形成して地層内へのソリッド、流体の浸入を防ぐことである。特に生産層が掘り込まれた早い段階に低浸透性の泥壁を如何に作るかが重要であり、このような泥壁の形成にはブリッジング剤の添加が不可欠である。一般にブリッジング剤には炭酸カルシウム（CaCO₃、通称「炭カル」）が使用される。

第2点目として泥壁は生産層を保護する能力を備えており、更にこの泥壁は容易に除去できるものでなければならないことが挙げられる。

上記の条件を満たし、安全で効率的な掘削および仕上げ作業を可能にでき、更に生産性が最大になるような流体の具体的条件は以下ようになる。

- ① 人体への影響、取り扱いの安全性、環境への影響に関する基準を全てクリアすること。
- ② ホールクリーニング性、孔内安定性等の掘削泥水としての性質を満足すること。
- ③ 広範囲の比重レンジを持っていること。
- ④ 生産障害を最小限に抑え、高い浸透率回復を示すこと。

上記の点は地層科学研究の試錐掘削にそのまま適用できるものと考えられる。そのため、国内で入手可能な(株)テルナイトのDIFを試験泥水として選定し、特性等について把握した。但し、この掘削泥水は石油・ガスの生産層のみを対象にしたもので、掘削長全体にわたって使用するものではない。堆積岩地域の地層との適合性もあるが、今回の試験である程度検討が進めば実際の掘削に際して実用化できるものと期待される。

2.3 岩石の基礎的物性試験

選定した岩石試料を対象に室内透水試験、粉末 X 線回折分析、薄片顕微鏡観察を行い、構成鉱物・変質度について調査した。また、見掛比重および含水比・吸水率・含水率・有効間隙率・飽和度の諸物性データを取得した。試験に供した試料の一覧を表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 岩石の基礎的物性試験 試験内容詳細

試験名	岩石名	サンプル No.	備考
室内透水試験、薄片顕微鏡観察、粉末 X 線回折分析	清澄層砂岩	S 物-1	
	清澄層泥岩	M 物-1	
	勇知層細粒砂岩	D-1 孔コア	
	声間層上部相泥岩		
見掛比重および含水比・吸水率・含水率・有効間隙率・飽和度	清澄層砂岩	S-物 2	
	清澄層泥岩	M-物 2	
	勇知層細粒砂岩	D-1 孔コア	
	声間層上部相泥岩		

2.3.1 薄片顕微鏡観察

(1) 勇知層細粒砂岩 (D-1 孔のコアサンプル)

岩石の構成粒子は亜角礫状であり、粒度 80~300 μ m の細粒砂岩である。構成粒子は岩石全体の 4/5 以上を占め、粒間はモンモリロナイト類、絹雲母類および沸石を伴う微細鉱物により充填されている。

構成粒子のうち岩石片としては泥岩、安山岩、珪化岩、火山ガラスが認められる。岩石片のほかに、石英、斜長石の破片、少数の珪藻殻、角閃石、変質雲母の破片が認められる。岩石片のなかでは弱モンモリロナイト化した泥岩片が最も多い。安山岩片には弱い絹雲母化、緑泥石化が認められる。火山ガラスは無色透明な気泡の多い軽石破片や中空棒状態で変質を受けていない。不透明鉱物は微小立方体のほか微小球状の形態のものが認められ、フランボイダル黄鉄鉱と推定される。

図 2.3.1-1 に勇知層細粒砂岩の開放ニコル写真を示し、図 2.3.1-2 に直交ニコル写真を示す。写真中記号の MD は泥岩、Sm はモンモリロナイト類、Ch は緑泥石、Pl は斜長石、Am は角閃石、Gs は火山ガラス、Bt は変質黒雲母、Oq は不透明鉱物である。

なお、モンモリロナイトは緑泥石や絹雲母と混合層鉱物を形成したり、結晶の層構造の違いにより多種にわたる。また、カオリナイトも似たような組成の結晶構造の鉱物（例えばハロイサイト）がある。これらの鉱物は互いに光学的性質が類似しているため、薄片顕微鏡観察では同定は非常に困難であり、粉末 X 線回折分析でも同定が困難な場合が多い。従って、薄片顕微鏡観察においては「モンモリロナイト類（略号 Sm）」および「カオリナ

イト類（略号 K1）」と表記することとした。

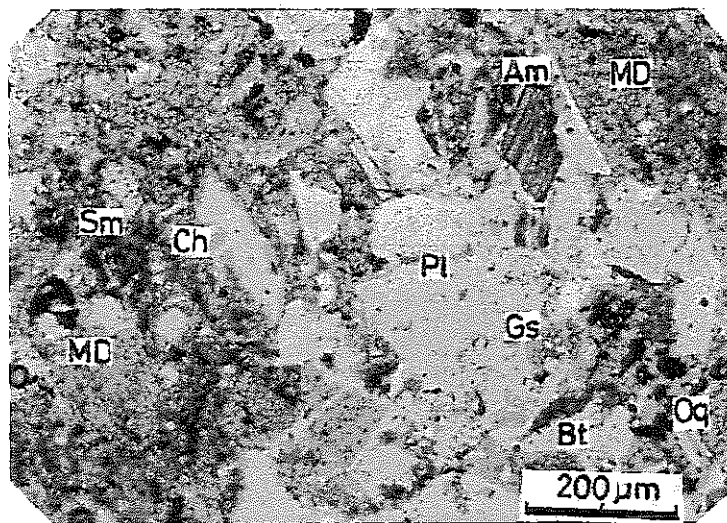


図 2.3.1-1 勇知層細粒砂岩 (D-1 孔) (開放ニコル)

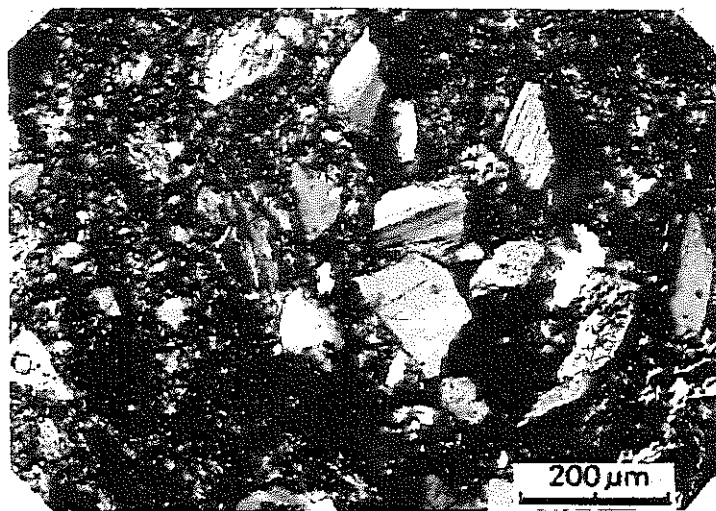


図 2.3.1-2 勇知層細粒砂岩 (D-1 孔) (直交ニコル)

MD : 泥岩、Sm : モンモリロナイト類、Ch : 緑泥石、Pl : 斜長石、Am : 角閃石

Gs : 火山ガラス、Bt : 変質黒雲母、Oq : 不透明鉱物

(2) 声問層上部相泥岩 (D-1 孔のコアサンプル)

岩石を構成する粒子の粒径が数十 μm 以下のシルト質泥岩である。構成粒子は石英、斜長石、火山ガラス、珪藻殻の破片が認められ、これらの構成比率は約40%である。火山ガラスは多孔質透明破片や中空棒状体をなし変質を受けていない。泥質部には微細なモンモリロナイト類、カオリナイト類、絹雲母、緑泥石等の粘土鉱物と少量の沸石、針鉄鉱、ジルコンが認められる。

図 2.3.1-3 に声問層上部相泥岩の開放ニコル写真を示し、図 2.3.1-4 に直交ニコル写真を示す。写真中記号の Gs は火山ガラス、Sm はモンモリロナイト類、Cc は炭酸塩鉱物、Dt は珪藻殻である。なお、粉末 X 線回折分析結果から炭酸塩鉱物は菱鉄鉱である可能性が高い。

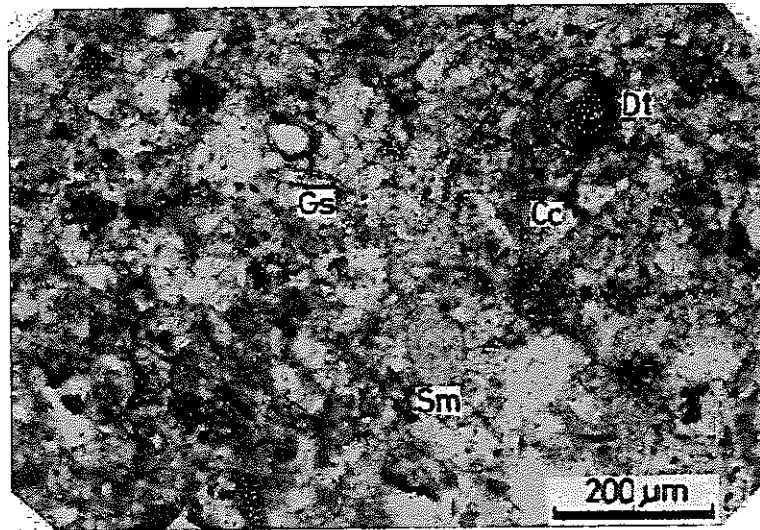


図 2.3.1-3 声問層上部相泥岩 (D-1 孔) (開放ニコル)

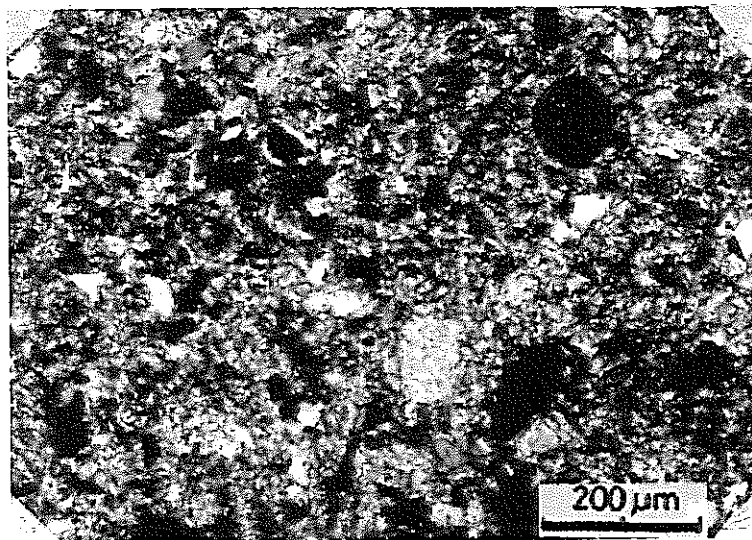


図 2.3.1-4 声問層上部相泥岩 (D-1 孔) (直交ニコル)

Gs : 火山ガラス、Sm : モンモリロナイト類、Cc : 炭酸塩鉱物 (菱鉄鉱)、Dt : 珪藻殻

(3) 清澄層砂岩 (房総半島清澄地区)

石英、斜長石、安山岩、火山ガラスの破片からなる細粒砂岩である。これらのほか、少量の角閃石、輝石、変質雲母、珪藻殻、方解石、不透明鉱物、針鉄鉱、ジルコンなどが認められる。砂岩の構成粒は全体の 2/3 以上を占め、マトリックスはやや多く、粒間はモン

モリロナイト類、絹雲母、カオリナイト類などの微細な粘土鉱物により充填されている。火山ガラスは無色透明な気泡の多い軽石破片や中空棒状体で変質は受けていない。炭酸塩鉱物（方解石）は不規則形のほか岩石の空孔内壁に沿う放射繊維状フィルムをなして産するものがある。放射状方解石リングの中に微小な球状不透明鉱物が認められ、フランボイダル黄鉄鉱と推定される。中程度の炭酸塩化変質を受けた砂岩である。

図 2.3.1-5 に清澄層砂岩の開放ニコル写真を示し、図 2.3.1-6 に直交ニコル写真を示す。写真中記号の Oq は不透明鉱物、Px は輝石、Cc は方解石、Pl は斜長石、Gs は火山ガラス、Ge は針鉄鉱、Bt は変質黒雲母である。

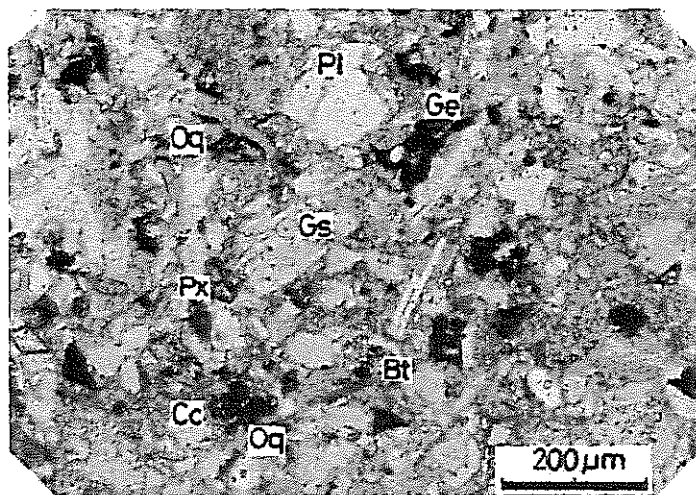


図 2.3.1-5 清澄層砂岩（房総半島清澄地区）

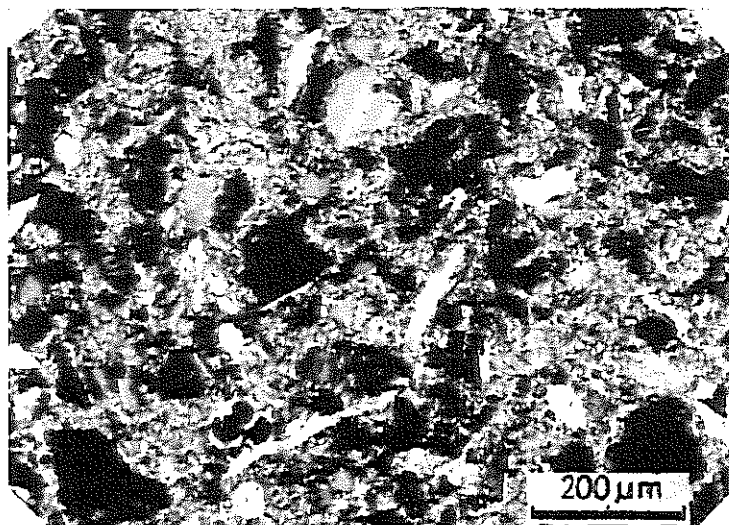


図 2.3.1-6 清澄層砂岩（房総半島清澄地区）

Oq : 不透明鉱物、Px : 輝石、Cc : 方解石、Pl : 斜長石、Gs : 火山ガラス
Ge : 針鉄鉱、Bt : 変質黒雲母

(4) 清澄層泥岩（房総半島清澄地区）

斜長石、輝石、珪藻殻、変質雲母を少量含む泥岩である。微小な安山岩片が認められる。泥質部にはモンモリロナイト類、カオリナイト類、絹雲母などの粘土鉱物が認められるほか、フランボイダル黄鉄鉱と推定される微小な形状不透明鉱物および不規則形の針鉄鉱が散在する。方解石は、空隙を充填する微小粒の集合体、リング状の微細繊維放射状集合体として産するほか、微細粒として泥質部に散在、あるいは粒間を網目状に充填して産する。強い炭酸塩化作用を受けた泥岩である。

図 2.3.1-7 に清澄層泥岩の開放ニコル写真を示し、図 2.3.1-8 に直交ニコル写真を示す。写真中記号の Gs は火山ガラス、Sm はモンモリロナイト類、Cc は方解石、Dt は珪藻殻である。

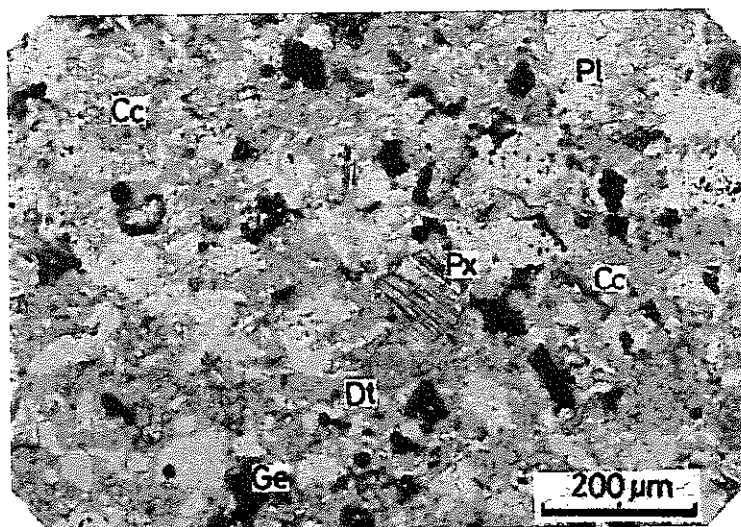


図 2.3.1-7 清澄層泥岩（房総半島清澄地区）

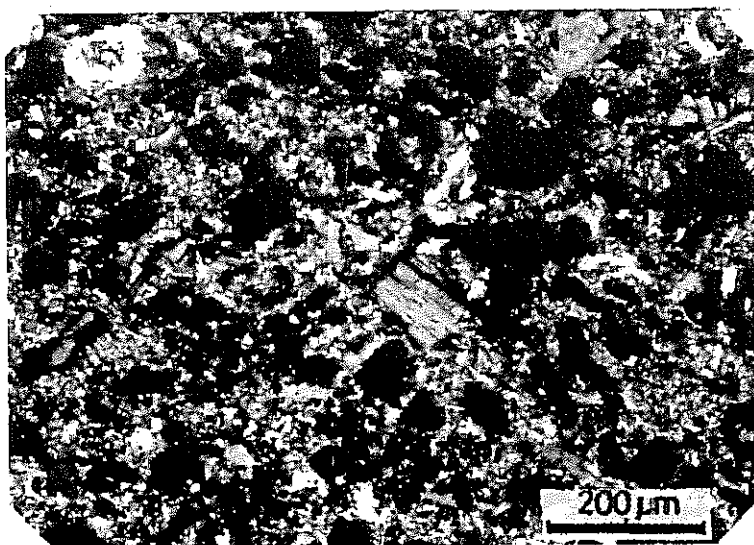


図 2.3.1-8 清澄層泥岩（房総半島清澄地区）

Gs : 火山ガラス、Sm : モンモリロナイト類、Cc : 方解石、Dt : 珪藻殻

(5) 薄片顕微鏡観察結果のまとめ

表 2.3.1-1 に構成粒子一覧表を示す。

表 2.3.1-1 薄片顕微鏡観察構成粒子一覧表

	構成粒子																	
	岩片等					鉱物片					変質鉱物				その他			
	MD	SR	AD	Gs	Dt	Qz	Pl	Px	Am	Mc	Sm	Ch	Sr	Kl	Ze	Cc	Ge	Oq
勇知層細粒砂岩	○	△	・	・	△	○	○	・	・	・	・	・	・	-	・	-	-	・
声問層上部相泥岩	-	-	-	・	・	○	○	-	-	-	・	・	・	・	・	・	・	-
清澄層砂岩	-		△	△	・	○	○	・	-	・	△	-	・	△	-	△	・	・
清澄層泥岩	-	-	・	-	・	△	△	・	-	・	△	-	・	△	-	○	・	・

構成粒子の多寡
 ◎：100～50% ○：50～25% △：25～10% ・：10%以下 -：なし
 記号
 MD：泥岩 SR：珪化岩 AD：安山岩 Dt：珪藻殻 Gs：火山ガラス
 Qz：石英 Pl：斜長石 Px：輝石 Am：角閃石 Mc：雲母類
 Sm：モンモリロナイト類 Ch：緑泥石 Sr：絹雲母 Kl：カオリナイト類 Ze：沸石類
 Cc：炭酸塩鉱物 Oq：不透明鉱物 Ge：針鉄鉱

岩石に含まれる岩片および鉱物片を比較すると、幌延町の D-1 孔コアの岩石と房総半島清澄層の岩石はほぼ同様の岩石であると判断できる。但し、変質鉱物の比較では房総半島清澄層の岩石のほうが変質鉱物の量が多い。変質鉱物として、幌延 D-1 孔コアはモンモリロナイト類、緑泥石、セリサイトおよび沸石類が各々少量認められる程度であるが、清澄層の岩石中にはモンモリロナイト類とカオリナイト類が 10%以上認められ、鉄の水酸化物（赤錆）である針鉄鉱も認められる。これは、清澄層岩石は地表から採取しているため、一部風化を被っているためと考えられる。また、清澄層岩石は炭酸塩鉱物も比較的多く認められており、炭酸塩化が幌延の D-1 コアよりも強い。つまり、岩石薄片の顕微鏡観察結果からは、幌延 D-1 コアの方が清澄層岩石よりも新鮮であると言える。但し、幌延 D-1 コアの声問層上部相泥岩は粉末 X 線回折分析や CEC 試験結果からのモンモリロナイト類の量比と矛盾する結果となっているが、薄片顕微鏡観察では粘土鉱物は微細であり、同定不能の場合が多いので、そのため、他の分析方法との差異が生じたものと考えられる。

なお、粉末 X 線回折分析結果から、声問層上部相泥岩の炭酸塩鉱物は菱鉄鉱である可能性が高い。清澄層砂岩と泥岩の炭酸塩鉱物は方解石である。また、カオリナイト類は、粉末 X 線回折分析結果からはハロイサイトである可能性が高い。

2.3.2 室内透水試験

(1) 供試体

供試体はコアカッターおよびコア採取機（後述表 2.5.1-2 参照）で直径約 5cm、高さ約 10cm の円柱に整形し、これを円筒管（塩化ビニールパイプ）に入れて、供試体と円筒管の間をコンクリートボンドで固め、円柱の両端を平行かつ平滑に仕上げた。

(2) 試験手順

試験は「土木材料実験（改訂版）」（国分,1972¹⁾）と同様の方法で実施した。以下に試験手順の概略を示す。

- ① 円筒管に固定した供試体を純水タンクの中に入れて蓋をし、真空ポンプで供試体中の空気を脱気すると同時に供試体を純水で飽和させた。
- ② 水で飽和した供試体上下面にシール用ゴム板をいれ、それをモールドの上下蓋で覆い、供試体を固定して透水試験装置にセットした。
- ③ 圧力 0.5kgf/cm²（約 50kPa）で通水開始 72 時間後、単位時間当たりの流出量が安定した時点から流出量と時間を測定した。

(3) 透水係数の算出

次式により浸透率と透水係数を求めた。

$$\text{浸透率} : k = \frac{\mu \cdot L \cdot Q}{A \cdot P \cdot t}$$

k : T℃における浸透率 (Darcy)

μ : T℃における粘性係数 (cP)

L : 試料の高さ (cm)

Q : 透水量 (ml)

P : 圧力 (atm)

A : 供試体の断面積 (cm²)

t : 試験時間 (sec)

$$1\text{Darcy} = 9.613 \times 10^{-6} \text{m/sec}$$

から、

$$\text{透水係数} : K = 9.613 \times 10^{-6} \times k$$

となる。

K : T°Cにおける浸透係数 (m/sec)

(4) 測定結果

透水試験結果を表 2.3.2-1 に示す。

表 2.3.2-1 室内透水試験結果

試料名	透水圧(atm)	透水量(ml)	浸透率(Darcy)	透水係数(m/s)	備考
清澄層 砂岩	0.7259	2.55	1.418×10^{-4}	1.363×10^{-9}	サンプル No.S 物-1
清澄層 泥岩	0.9678	4.00	3.561×10^{-5}	3.423×10^{-10}	サンプル No.M 物-1
勇知層細 粒砂岩	0.2420	20.00	2.068×10^{-1}	1.988×10^{-6}	深度 447~450m
声問層上 部相泥岩	0.9678	2.15	1.167×10^{-5}	1.121×10^{-10}	深度 1,344 ~1,347m

透水試験は清澄層泥岩と声問層上部相泥岩は双方共に 10^{-10} オーダーで一致している。砂岩については清澄層砂岩は 10^{-9} であるのに対し、勇知層細粒砂岩は 10^{-6} と大きい値を示す。これは D-1 孔コアサンプルは採取後 10 年以上も経ており、乾燥が著しいためと考えられる。従って、勇知層細粒砂岩の浸透率および透水係数は真の値を示していないものと考えられる。浸透率および透水係数が清澄層泥岩と同オーダーの値を示している声問層上部相泥岩についても、勇知層細粒砂岩と同様の環境で保管されていたものであるため、データの信頼性は低い。

2.3.3 見掛比重および含水比・吸水率・含水率・有効間隙率・飽和度

(1) 供試体

供試体の形状は円柱または四角柱とし、一軸圧縮試験用試料と同一の原試料を使用する。供試体の大きさは、直径（または一辺の長さ）が約 5cm、長さが約 5cm（重量が約 200g）のものとする。

(2) 試験方法

まずは供試体の自然状態空中重量 (W_N) を秤量した。次に供試体を潤水中に約 96 時間（重量変化がなくなるまで）浸水させた後、水中重量 (W_S) を秤量し、さらに空中重量 (W_W) を秤量した。

この供試体を 105~110℃ の熱風乾燥器中で 24 時間以上（重量変化がなくなるまで）乾燥させてから、デシケータに入れて室温まで低下させた後、空中重量 (W_D) を秤量した。

(3) 測定および計算

重量は 0.01g まで秤量し、記録した。

次式により、見かけ比重を計算し、有効数字 3 桁まで求めた。

- ・ 自然含水状態の比重： $\rho_N = W_N / (W_W - W_S)$
- ・ 飽和含水状態の比重： $\rho_W = W_W / (W_W - W_S)$
- ・ 強制乾燥状態の比重： $\rho_D = W_D / (W_W - W_S)$

含水比・吸水率・含水率・有効間隙率・飽和度は見掛比重測定で得られたデータから次式を用い算出した。

- ・ 含水比： $W = (W_N - W_D) / W_D \times 100 (\%)$
- ・ 吸水率： $S = (W_W - W_D) / W_D \times 100 (\%)$
- ・ 含水率： $W_R = (W_N - W_D) / (W_W - W_S) \times 100 (\%)$
- ・ 有効間隙率： $n = (W_W - W_D) / (W_W - W_S) \times 100 (\%)$
- ・ 飽和度： $S_r = W / S$ (or W_R / n)

(4) 測定結果

見掛比重および含水比・吸水率・含水率・有効間隙率・飽和度試験結果を表 2.3.3-1 に示す。

表 2.3.3-1 見掛比重および含水比・吸水率・含水率・有効間隙率・飽和度試験結果

試料N o.	D-1	D-1	S-物 2	M-物 2
岩石名	声問層上部相 泥岩	勇知層 細粒砂岩	清澄層泥岩	清澄層砂岩
採取深度(m)	1344~1347	447~450	地表	地表
自然見掛比重	1.471	1.998	1.969	1.994
乾燥見掛比重	1.374	1.759	1.693	1.635
湿潤見掛比重	1.835	2.078	2.028	2.012
含水比 (%)	7.031	13.555	16.294	21.935
吸水率 (%)	33.525	18.086	19.807	23.057
含水率 (%)	9.661	23.849	27.583	35.871
有効間隙率 (%)	46.064	31.820	33.529	37.705
飽和度 (%)	21	75	82	95

上記の値を比較すると、声問層上部相泥岩は他の岩石より著しく低比重で、含水比、含水率、飽和度も低いことがわかる。逆に吸水率が最も大きい値を示す。これは、岩石コアの保存状況から、コアが乾燥してしまったためと判断される。そのため、表 2.3.3-1 の各値は声問層上部相泥岩の真の値を示していないと考えられる。一方勇知層細粒砂岩は一部破損しているもののコアパックに覆われて保存されていた。そのため、含水比、含水率、飽和度は房総半島清澄層の岩石よりは低いものの、掘削後 12 年以上たった現在でも極度の乾燥状態から保護されたものと考えられる。

2.3.4 粉末 X 線回折分析

(1) 分析方法

試験に供する 4 試料について粉末 X 線回折分析を行い、岩石構成鉱物の同定を行った。X 線分析の分析条件は表 2.3.4-1 のとおりである。分析精度は Si を標準試料とした場合に 2θ で ± 0.02 である。

表2.3.4-1 粉末 X線回折分析条件一覧

使用機器	X線回折装置	理学電機（株）製 RAD-IVC	
	対陰極	Cu-K α	
	フィルター	黒鉛モノクロメーター	
	管電圧	40 kV	
	管電流	20 mA	
	スリット	1° -1° -0.3mm	
	計数管	シンチレーションカウンター	
X線照射条件	測定方法	無定方位試料	定方位試料
	走査範囲	2 θ =2~50° (Cu-K α)	無処理 : 2 θ =2~35° EG処理 : 2 θ =2~15° HCl処理 : 2 θ =2~15° (Cu-K α)
	走査速度	2° /分	1° /分
	ソフトウェア	自動設定	自動設定

(a) 無定方位分析（全岩分析）

無定方位分析試料は以下の手順で作成した。

- ① 岩石試料をステンレス乳鉢内で粒径0.30~0.15mm程度まで粉碎する。
- ② 上記①の試料をさらに自動粉碎器内で指頭に感じない程度まですりつぶす。
- ③ 上記②の試料を粉末X線回折分析用の試料ホルダーに封入する。

(b) 定方位分析

無定方位分析では同定が難しい粘土鉱物については、定方位分析試料（水簸試料）（粘土鉱物が層状珪酸塩鉱物であることを利用した、底面反射が（{001}反射）が強く生ずるように層面が互いに平行になるように調整した試料）を作成し、粘土鉱物の同定を行った。また、定方位無処理試料だけでは同定が困難な緑泥石、セリサイト、モンモリロナイトの同定を確実にするためにエチレングリコール処理（EG処理）、および塩酸処理（HCl処理）も行った。

定方位分析試料（水簸試料）は、試料の一部をステンレス乳鉢で1~5mmに粉碎した

ものを蒸留水中で分散させた。8時間放置した後、水面から10cmの深さまでの上澄み液（径 $2\mu\text{m}$ 以下の粒子）を回収し、スライドガラスに塗布し風乾させた。

① 無処理試料

無処理試料は、スライドガラスに塗布し風乾させたものをそのままX線回折分析に供するものである。これにより、無定方位試料では量比が小さくて検出し難かった粘土鉱物などの層状珪酸塩鉱物が検出できる。

② EG処理試料

粘土鉱物である緑泥石、セリサイト、モンモリロナイトの最強の回折X線のピークは $2\theta \approx 6^\circ$ である。そのため、 6° 付近のピークが上記の鉱物のうちどの鉱物であるか同定が困難である。上記の鉱物のうちモンモリロナイトだけはエチレングリコールの分子を自分の層構造の結晶内に吸着することができ、そのため結晶構造の層間が開く。これ現象はX線回折ピークの低角側への移動でとらえることができる。

EG処理試料は、①にて測定された同一のホルダーに、エチレングリコール液を噴霧し、4時間程度放置させて作製した。

③ HCl処理試料

緑泥石、セリサイト、モンモリロナイトのうち、緑泥石だけが塩酸に溶ける。塩酸処理をすると、無処理で見られた 6° 付近のピークが著しく低くなったり消滅した場合は、そのピークは緑泥石であると判定できる。

HCl処理試料は、定方位分析試料作製時に回収された沈殿物の一部に6N塩酸を加え、約50分程度煮沸し、その後遠心分離器にて洗浄させて作製した。

(2) 測定結果

粉末 X 線回折分析結果のまとめを表 2.3.4-2 に示し、チャートを巻末に示す。

幌延町 D-1 孔の岩石も房総半島清澄地区の岩石も、ほぼ同様の鉱物が検出されている。異なるのは D-1 孔の岩石は雲母が検出されていること、清澄地区の岩石は方解石が検出されていることである。薄片観察では雲母は清澄地区の岩石も 10%以下の比率で含まれているが、D-1 孔岩石の方が清澄層の岩石よりも量がやや多いことを示しているものと考えられる。方解石については、薄片観察とほぼ同様の結果を示している。但し、声間層上部相泥岩は薄片顕微鏡観察では炭酸塩鉱物が同定されているが、X 線回折分析では菱鉄鉱 (FeCO_3) が同定されている。

モンモリロナイトおよび緑泥石はどの岩石にも含まれているが、D-1 孔の岩石は全岩試

料の分析でも検出されており、量比が大きいものと考えられる。特に声問層上部相泥岩のモンモリロナイトは HCl 処理後にも検出され、量が多いものと推定される。モンモリロナイトは水和すると膨潤する鉱物であり、後述する岩石の浸水崩壊度試験で当泥岩の崩壊が著しいことや声問層上部相泥岩の膨張率変化や膨潤圧変化が他の岩石に比して異常に大きいことは、モンモリロナイトの量比の影響が考えられる。

薄片顕微鏡観察結果では、カオリナイト類が同定されているが、X 線回折分析ではハロイサイトが検出されている。そのため、薄片顕微鏡観察で同定したカオリナイト類はハロイサイトである可能性が高い。

表2.3.4-2 粉末X線回折分析結果一覧表

試料		沸石鉱物						粘土鉱物						硫酸塩鉱物			炭酸塩鉱物			珪酸鉱物		長石		その他							
試料名	試験区分	斜	東	モ	輝	濁	沸	モ	緑	緑	絹	絹	ハ	カ	パ	明	硬	石	方	ド	菱	ク	ト	石	斜	カ	黄	磁	雲	角	輝
		プ	沸	ル	沸	沸	石	ン	泥	泥	雲	雲	ロ	オ	イ	バ	石	膏	解	ロ	鉄	リ	リ	英	長	長	鉄	鉄	母	閃	石
勇知層細粒砂岩 D-1孔コア 447m~450m	全岩							●		●													◎	○		●		●			
	定無							+		+														+	+			+			
	EG							+		+																		+			
声問層上部相泥岩 D-1孔コア 1,344m~1,347m	全岩						●	●		●										●			◎	●			●				
	定無							+		+											+			+	+			+			
	EG							+		+																		+			
清澄層砂岩	全岩																	●					○	●						●	
	定無							+		+								+						+	+						
	EG							+		+																					
清澄層泥岩	全岩																	●					○	●							
	定無							+		+								+						+	+						
	EG							+		+																					
	HCl																														

凡例

試験区分

- 全岩: 全岩分析
- 定無: 定方位無処理分析
- EG: 定方位エチレングリコール処理分析
- HCl: 定方位塩酸処理分析

量比(検出鉱物の最強強度)

- ◎: 2,500cps ≤
- : 1,000 ≤ < 2,500cps
- : 500 ≤ < 1,000cps
- : < 500cps

その他

- +: 定方位分析にて検出された鉱物の表示

2.4 選定した泥水の比較試験

2.4.1 試験内容

試験泥水として KCL-リグネート泥水、シリケート泥水 2 種 (A および B) および Drill-In-Fluid (DIF) の 4 種の流体を選定し、以下の試験を行った。

- ・ 泥水比重
- ・ 流動特性
- ・ 塩素濃度
- ・ pH 値
- ・ 脱水特性
- ・ 電気伝導率
- ・ 粒度分布

2.4.2 試験内容および測定方法

(1) 試験泥水の調製

- ① KCL-リグネート泥水：本泥水が安定した掘削や孔壁の維持では最も定評があり、堆積軟岩の掘削では最も多く用いられている。最も標準的な組成の KCL-リグネート泥水 1 試料を試験に供した。
- ② シリケート泥水：本泥水は 2.2.1 に既述したように水理学的影響が少ない流体と報告されている。M-I 社および Baroid 社等が出した文献を参考に標準と考えられる組成のもの (シリケート泥水 A) と、粘土の膨潤を抑制する効果のある KCl を添加したもの (シリケート泥水 B) の 2 種類を作製し、試験に供した。
- ③ DIF：本泥水は、ブリッジング剤を添加することにより石油掘削において石油貯留層の掘削泥水の浸入による生産ゾーンの閉塞などの障害を防止することと掘削中の試験孔の安定性を確保することを目的として開発されたものである。国内では(株)テルナイトが開発しており、(株)テルナイトが提示する最も標準的な組成のもの 1 試料を試験に供した。

各選定泥水の添加物組成を表 2.4.2-1(1)から(4)に示す。

表 2.4.2-1(1) 泥水組成一覧表 (KCL-リグネート泥水)

泥水材料名	添加量	主成分	機能
脱イオン水	100 ml		
テルゲル	3 gr	ベントナイト	増粘、泥壁形成剤
KCl	7 gr	塩化カリウム	泥化抑制剤
テルポリマー(L)	0.3 gr	ポリアニオンニックポリマー；低粘性	増粘、脱水調整剤
テルポリマー(H)	0.3 gr	ポリアニオンニックポリマー；高粘性	増粘、脱水調整剤
リグネート K	4 gr	フミン酸,リグニンスホルン酸誘導体	分散剤、泥化抑制剤 脱水調整剤
KOH	0.72 gr	水酸化カリウム	pH 調整剤
アステックス S	1 gr	スホルン化アスファルト誘導体	裸孔壁保護壁強化剤
クリーンリユープ	2 ml	ポリプロピレングリコール	泥化抑制剤、潤滑剤
XCD ポリマー	0.1 gr	ザンサンガム	増粘剤
消泡剤 NO.15	0.05 ml	高級アルコール配合物	消泡剤

表 2.4.2-1(2) 泥水組成一覧表 (シリケート泥水 A)

泥水材料名	添加量	主成分	機能
脱イオン水	100 ml		
ソーダ灰	0.25 gr	炭酸ナトリウム	多価陽イオン除去剤
NaOH	0.35 gr	水酸化ナトリウム	pH 調整剤
テルシルク	12.0 ml	珪酸ソーダ	泥化抑制剤
テルポリマー(DX)	1.0 gr	でんぶん誘導体	脱水調整剤
テルポリマー(L)	0.5 gr	ポリアニオンニックポリマー；低粘性	脱水調整剤
テルポリマー(H)	0.3 gr	ポリアニオンニックポリマー；高粘性	増粘、脱水調整剤
XCD ポリマー	0.15 gr	ザンサンガム	増粘剤
消泡剤 NO.30C	0.05 ml	シリコン系エマルジョン	消泡剤

表 2.4.2-1(3) 泥水組成一覧表 (シリケート泥水 B)

泥水材料名	添加量	主成分	機能
脱イオン水	100 ml		
KCl	5 gr	塩化カリウム	泥化抑制剤
ソーダ灰	0.25 gr	炭酸ナトリウム	多価陽イオン除去剤
KOH	0.4 gr	水酸化カリウム	pH 調整剤
テルシルク	8.0 ml	珪酸ソーダ	泥化抑制剤
テルポリマー(DX)	1.0 gr	でんぶん誘導体	脱水調整剤
テルポリマー(L)	0.5 gr	ポリアニオンニックポリマー；低粘性	脱水調整剤
テルポリマー(H)	0.3 gr	ポリアニオンニックポリマー；高粘性	増粘、脱水調整剤
XCD ポリマー	0.15 gr	ザンサンガム	増粘剤
消泡剤 NO.30C	0.05 ml	シリコン系エマルジョン	消泡剤

表 2.4.2-1(4) 泥水組成一覧表 (DIF)

泥水材料名	添加量	主成分	機能
脱イオン水	100 ml		
NaCl	10.0 gr	塩化ナトリウム	泥化抑制剤
テルポリマー(DX)	1.0 gr	でんぶん誘導體	脱水調整剤
テルポリマー(L)	0.5 gr	ポリアニオンニックポリマー；低粘性	脱水調整剤
テルポリマー(H)	0.3 gr	ポリアニオンニックポリマー；高粘性	増粘、脱水調整剤
XCD ポリマー	0.3 gr	ザンサンガム	増粘剤
タンカルF	8.0 gr	炭酸カルシウム	ブリッジング剤
クリンリュープ 300	0.5 ml	ポリプロピレングリコール	消泡剤、潤滑剤
NaOH	0.05 gr	水酸化ナトリウム	pH 調整剤
消泡剤 NO.30C	0.05 ml	シリコン誘導體	消泡剤

なお、各泥水は標準組成に従って作泥後、ポリマー類の溶解および泥水組成の均一化を目的に、一昼夜室温で静置養生し再度充分に攪拌後、試験に使用した。

(2) 試験方法

(a) 選定泥水の標準的な物性試験

各物性試験のうち泥水比重、流動特性、脱水特性、pH 値測定および塩素イオン濃度は、API(1990)¹⁾および API(1985)²⁾に準拠した。

① 泥水比重

マッドバランスによる実測を行った。

② 流動特性

・ 剪断速度／剪断応力特性

各剪断速度に対する剪断応力の測定は、FANN Viscometer Model 35SA (VG マーター) を使用した。測定温度は 25℃とした。なお、測定結果には各剪断速度における剪断応力を示した。図 2.4.2-1 に FANN Viscometer Model 35SA (VG マーター) の測定概念図を示す。

・ Bingham Plastic Model 流動特性

泥水の流動特性として Bingham Plastic Model は、従来から広く使用されているモデルであって、日常の泥水管理に有効な指針を与える。パラメーターは、プラスチック粘度 (PV : Plastic Viscosity) とイールドポイント (YP : Yield Point) で表わされる。

また、Bingham Plastic Model のパラメーターではないが、ゲルストレングス (Gelstrength) も泥水状態や調泥の指針を知るうえにおいて、重要な性質である。

プラスチック粘度 (PV : Plastic Viscosity) : プラスチック粘度は泥水中に含まれるソリッド分の機械的摩擦によって生じる流動抵抗であって、①ソリッド分の濃度、②ソリッド分の大きさと形状、③液相部の粘性によって大きく影響されるパラメータである。

イールドポイント (YP : Yield Point) : イールドポイントは流体が流動状況にあるとき流動を続けるのに必要な剪断力の測定値であって、泥水のイールドポイントは、泥水中に含まれているソリッド粒子間のけん引力によって生じる流動抵抗である。ソリッド間のけん引力は、粒子表面上に存在する電荷によって生じる。電荷の大きさは、①ソリッド分の濃度、②ソリッド分の形状とソリッドの有する表面電荷、③液相中に含まれている塩類のイオン濃度、などによって影響される。イールドポイントは泥水を良好な状態に維持する指標として重要な性質であり、日常の調泥の多くはイールドポイントをコントロールするために行われる。

ゲルストレングス (Gels : Gelstrength) : ゲルストレングスは、泥水が静止状態から流動を始めるために必要な剪断力の測定値であって、イールドポイントと同様に、ソリッド粒子間のけん引力によって生じる。イールドポイントが流動下の性質を表すのに対して、ゲルストレングスは静止状態下の性質を表す。泥水は静置しておくか 0 に近い剪断速度下に置くと、泥水中のソリッド粒子が機械的に弱い集合を形成して網状組織をつくり、ゲル化する傾向がある。この特性をチキソトロピー (Thixotropy) または揺変性という。ゲルストレングスはチキソトロピー性の大きさを表すのに使用される。

以下にパラメーターの算出方法を示す。

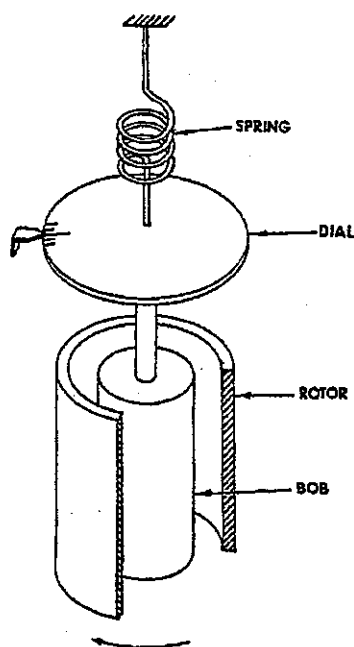
$$*AV(\text{Apparent Viscosity: 見かけ粘度:cP})=R_{600}/2$$

$$*PV(\text{cP})=R_{600}-R_{300}$$

$$*YP(\text{lb}/100\text{ft}^2)=R_{300}-PV$$

$$*Gels(\text{ゲルストレングス : lb}/100\text{ft}^2)=R_3(10\text{sec gel}/10\text{min gel})$$

(但し、 R_{600} = VG メータ 600rpm(θ_{600})の読み値、 R_{300} = VG メータ 300rpm(θ_{300})および R_3 = 3rpm(θ_3)の読み値)



- ① ROTOR と BOB の間に測定する泥水を封入する。
- ② ROTOR が回転すると泥水もその粘性により流動する。
- ③ 泥水の流動により中央部の BOB が回転する。但し、BOB はバネにより固定されている。
- ④ BOB の回転角度をダイヤルで読みとる。

ROTOR の 600rpm の回転の時のダイヤルの読みとり値が R_{600} 、300rpm が R_{300} 、3rpm が R_3 となる。

図 2.4.2-1 FANN Viscometer Model 35SA (VG メーター) の測定概念図 (API(1985)²⁾より引用)

③ 脱水特性

泥水の脱水特性は、FANN Model 12BL Filter Press を用いて、0.7MPa の圧力条件下で、脱水量 (ml/30min.) と泥壁の厚さ (mm) を測定した。脱水量はスパートロス (Spurt Loss: 正常状態の脱水 (濾過水) が出る前に濁った脱水 (泥水そのもの) が出ること) を含めて測定した。

なお、本文で用いた濾水とは、この条件で得られた脱水を示す。

④ 粒度分布測定

基本組成で作泥した泥水中の固形分の粒度分布は、分散媒として脱イオン水を使用し、SK Micron Sizer Pro-700S, SEISHIN で測定した。

粒度は平均粒径として D_{50} で表示した。

粒度分布測定データは資料として添付した。

⑤ pH 測定

TOA: pH meter HM-30G を用いて泥水の pH を測定した。

⑥ 塩素イオン濃度測定

塩素イオン (Cl⁻) は、硝酸銀滴定法で濾水中のイオン濃度 (mg/l) を測定した。

⑦ 電気伝導率測定

Conductivity Meter DS-14, HORIBA を用いて泥水および濾水の電気伝導率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$ 、

mS/cm)を測定した。

2.4.3 試験結果

表 2.4.3-1 に各泥水のレオロジー性質（剪断速度－剪断応力測定）の結果を示す。

表 2.4.3-2 各泥水の標準的な物性試験（泥水性状）結果を示し、粒度分布測定結果を図 2.4.3-1(1)～(5)に示した。なお、粒度分析は DIF については、比較のため DIF にブリッジング剤として添加するタンカル F（炭酸カルシウム）単品の粒度分析も実施した。

表 2.4.3-1 各泥水のレオロジー性質（剪断速度－剪断応力）測定結果

泥水の種類 (測定温度:25℃)	上段：剪断応力；ダイヤルの読み lb/100ft ² （括弧内は Pa） 下段：粘度；cP*1					
	剪断速度（Shear Rate:sec ⁻¹ ）					
	1020 (600rpm)	510 (300rpm)	340 (200rpm)	170 (100rpm)	10.2 (6rpm)	5.1 (3rpm)
KCL-リグネート	67 (32) 33.5	43 (21) 43	33 (16) 49.5	21 (10) 63	3.5 (2) 170	2 (1) 200
シリケート A	67 (32) 33.5	45 (22) 45	36 (17) 54	24 (12) 72	4.5 (2) 225	3 (1) 300
シリケート B	67 (32) 33.5	45 (22) 45	36 (17) 54	24 (12) 72	4.5 (2) 225	3 (1) 300
テルナイト DIF	51 (24) 25.5	35 (17) 35	28 (13) 42	20 (10) 60	6 (3) 300	4.5 (2) 450

注) *1：VGメーター回転数に相当する見掛け粘性＝300×回転数におけるダイヤルの読み÷

VGメーター回転数

表 2.4.3-2 各泥水の基礎的な物性および泥水性状結果

測定項目(25℃)		KCL-リグ ネート泥水	シリケート 泥水 A	シリケート 泥水 B	テルナイト DIF
比重*1		1.07	1.06	1.07	1.11
流動 特性 (*2)	AV(cP)	33.5	33.5	33.5	25.5
	PV(cP)	24	22	22	16
	YP(lb/100ft ²)	19	23	23	19
	Gels(lb/100ft ²)	3/4	4/4	4/4	6/7
泥水 pH*3		10.1	11.6	11.4	10.2
API 脱水性*4					
脱水量(ml)		5.3	8.5~9.0*5	8.5~9.0*5	5.5
泥壁 (mm)		0.5	0.3	0.3	0.4
塩素濃度(Cl ⁻ :mg/l) *6		32,400	210	22,590	59,850
電気伝導率(μS/cm) *7					
濾水(mS/cm)		100.7	22.9	76.0	120.8
泥水(mS/cm)		85.4	23.4	73.1	110.8
粒度分布(D ₅₀ : μm) *8		4.5	70.4	68.7	50.0

注) *1=比重は下三桁を四捨五入した値で表した。

*2= Bingham Plastic Model を用いた流動性質

*3= TOA:pH meter HM-30G

*4= API 脱水性の測定は、0.7MPa/30min.における測定値

*5=シリケート泥水は、スパートロス (Spurt Loss : 正常状態の脱水 (濾過水) が出る前に濁った脱水 (泥水そのもの) が出ること) 量によって異なる。

*6=濾水中の Cl⁻濃度を示す。

*7= Conductivity Meter Model DS-14, HORIBA

*8= SK Micron Sizer Pro-700S, SEISHIN

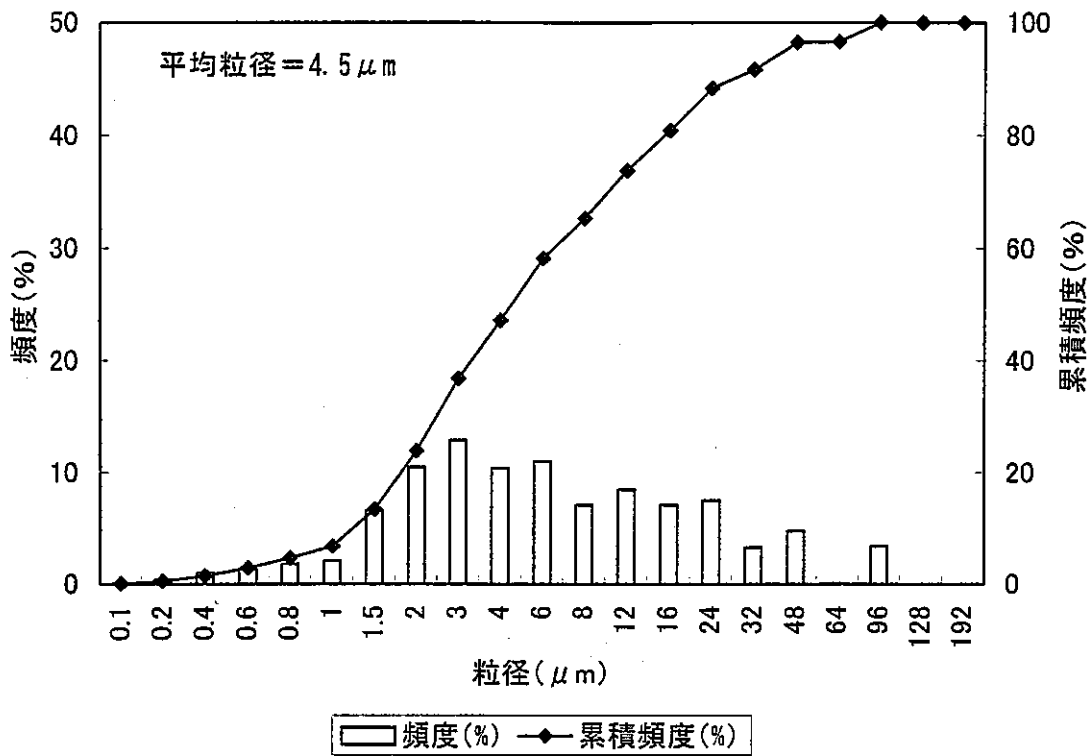


図 2.4.3-1(1) KCL-リグネート泥水の粒度分析結果

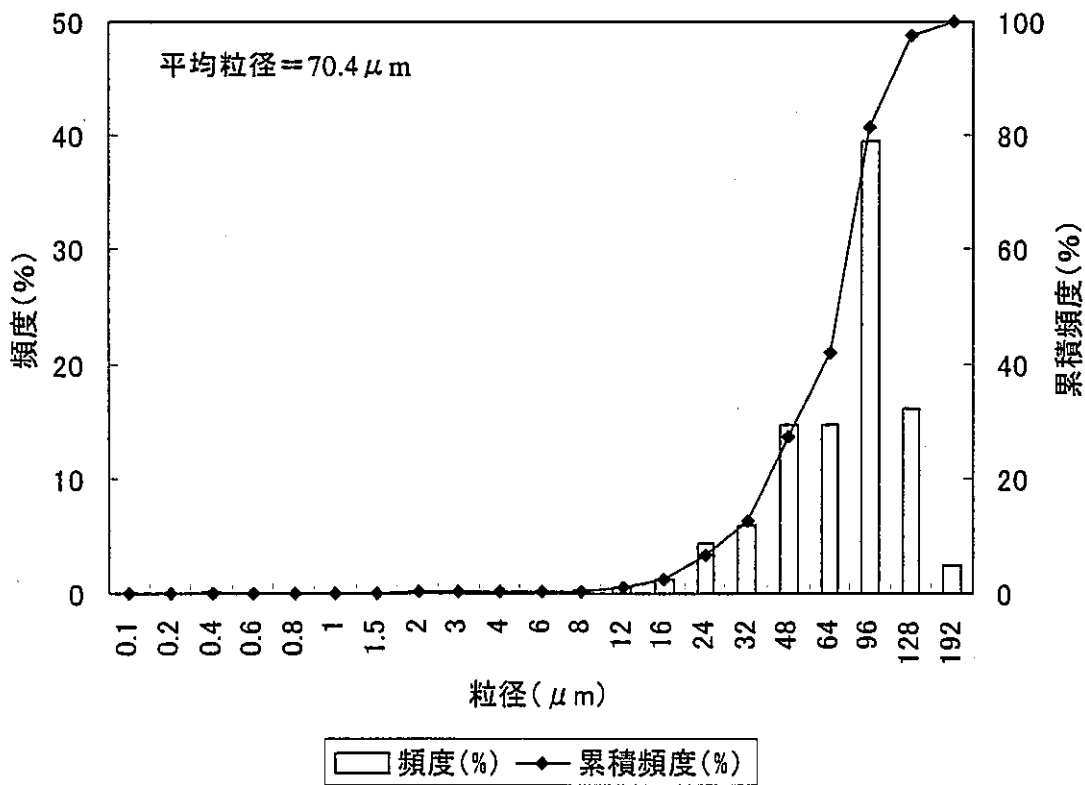


図 2.4.3-1(2) シリケート泥水 A 泥水の粒度分析結果

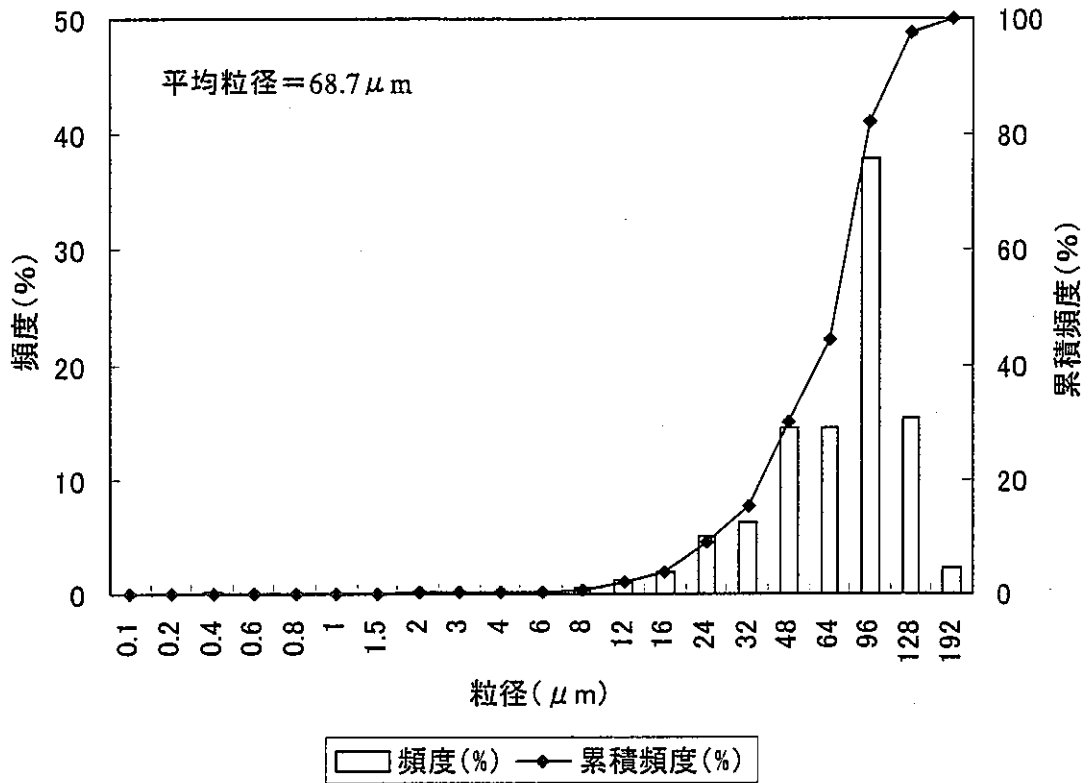


図 2.4.3-1(3) シリケート泥水 B 泥水の粒度分析結果

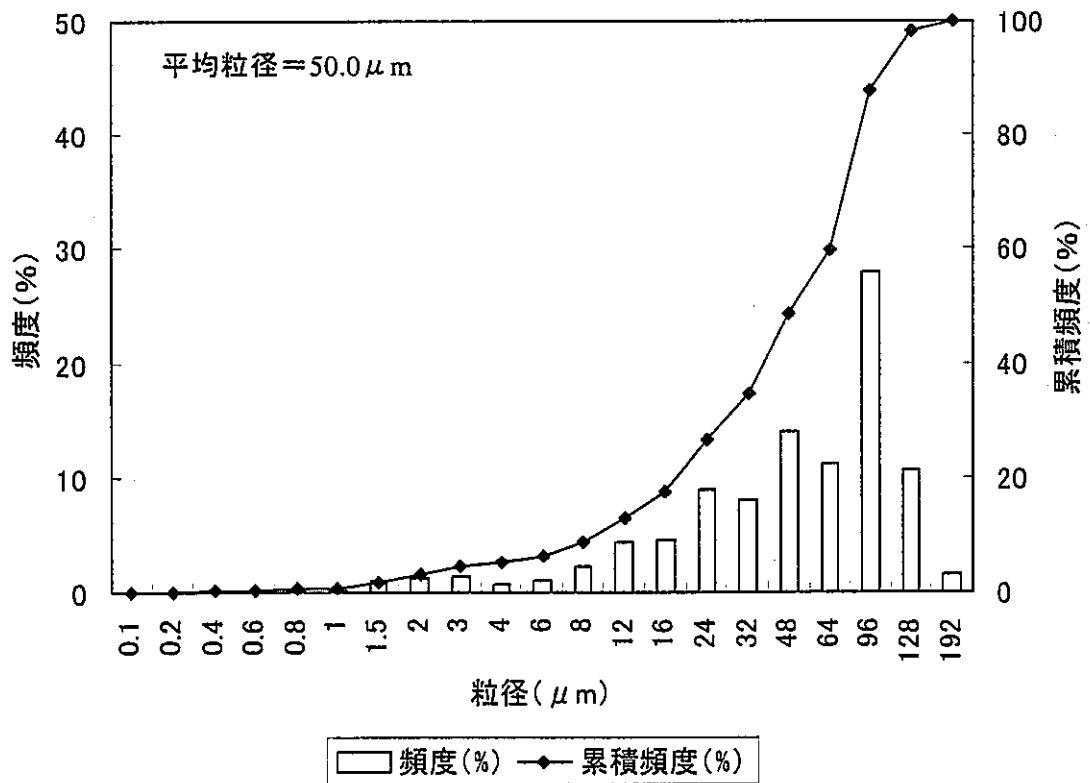


図 2.4.3-1(4) テルナイト DIF の粒度分析結果

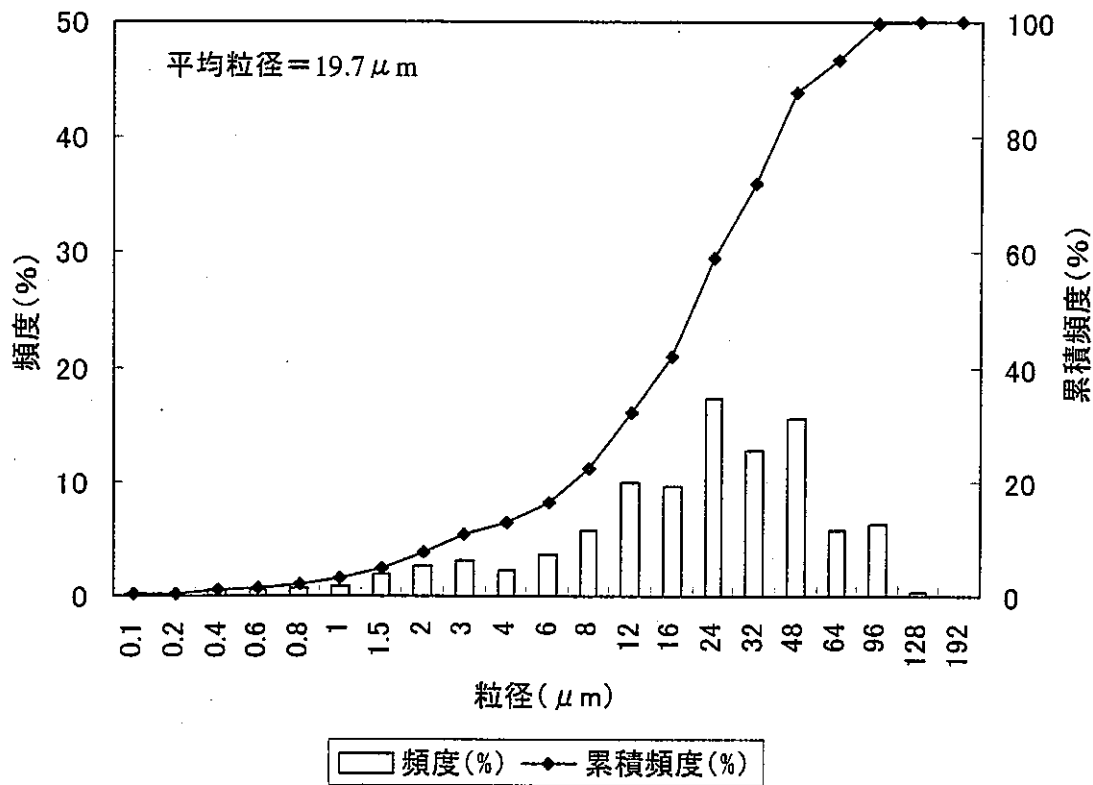


図 2.4.3-1(5) テルナイト DIFブリッジング剤タンカル F の粒度分析結果

2.4.4 試験結果の解釈

(1) 泥水比重

標準組成で作泥した場合、テルナイト DIF が最も比重が高くなった。これは塩濃度が大きいこととブリッジング剤として添加したタンカル F の影響である。

(2) 流動性質

レオロジー性質（剪断速度-剪断応力の関係）、プラスチック粘度、イールドポイントおよびゲルストレングスの比較では、KCL-リグネート泥水、シリケート泥水 A およびシリケート泥水 B はほぼ同様の性質を示すことがわかった。DIF については低剪断速度では他の 3 者よりも高い剪断応力、粘度を示すが、剪断速度が 170 以上では 3 者よりも低い値を示す。これは、DIF が他の 3 者よりも高いゲルストレングスを示しながら、低いイールドポイントであることと調和的である。DIF は他の 3 者よりもチキソトロピー性が高いものの、泥水の流動性は比較的高いと考えられる。これはブリッジング剤として添加されているタンカル F が静置状態では沈殿しやすいが、流動状態では粒子間のけん引力があまり働

かないためと考えられる。

(3) pH 値

pH 値は何れの泥水も pH 調製剤として KOH あるいは NaOH を添加している。特に KCL-リグネート泥水は最も多く、KOH を 100ml 中 7gr も添加している。しかしながらシリケート泥水 A とシリケート泥水 B の pH 値が他の 2 者よりも高い 11.5 前後の値を示しているのは、テルシルク（珪酸ソーダ）の影響であると考えられる。

(4) 脱水量と泥壁

KCL-リグネート泥水とテルナイト DIF は、共に 5.5ml 前後の脱水量であったが、シリケート泥水 A とシリケート泥水 B は、スパートロスが出て 9.0ml 前後と高い値を示した。この差は泥壁形成性の違いから生じるもので、前者 KCL-リグネート泥水とテルナイト DIF 泥水はベントナイトやブリッジング材の炭酸カルシウムにより直ぐに泥壁が形成される為スパートロスはでない。一方、シリケート泥水 A とシリケート泥水 B の泥壁形成はテルシルク（珪酸ソーダ）の皮膜によるもので、皮膜形成が出来るまで時間が多少かかるためにスパートロスがでることによって脱水量も多くなったと考えられる。

(5) 塩素イオン濃度

選定泥水の中で KCL-リグネート泥水、シリケート泥水 B および DIF は、5%~10% の塩化物（NaCl, KCl）を含んでいる。しかし、シリケート泥水 A は、KCl や NaCl などの塩化物を添加していないにもかかわらず Cl⁻が微量確認されている。これはポリマー類中に含まれている塩素イオンであると考えられる。

(6) 電気伝導率

泥水と濾水の電気伝導率を測定した。泥水の電気伝導率が低い傾向を示した。これは電極周辺に存在する泥水固形分（ポリマー類など）の影響と考えられる。

(7) 粒度分布

KCL-リグネート泥水の平均粒径は 4 種類の泥水のなかでは最も小さな値 4.5 μ m を示しており、この値は他の泥水よりも一桁小さい。これは、添加物として他の泥水にはないベン

トナイトが含まれているためと考えられる。

シリケート泥水は A、B 共に約 70 μm であり、最も大きい。シリケート泥水の粒度分析に寄与している粒子はポリマー類だけであるので、シリケート泥水の粒度分布は添加したポリマー類の粒度分布とほぼ等しいものと考えられる。粒径頻度分布は平均粒径付近を中心とした比較的対称的な分布を示している。

DIF は平均粒径は 50 μm であるが、ブリッジング剤として添加されているタンカル F の平均粒径は約 20 μm である。粒径頻度分布を比較すると、24 μm までは DIF とタンカル F が対応した分布を示している。しかしながら DIF は 96 μm で粒径頻度分布のピークを形成する。これは、DIF 中のポリマー類の粒度分布を反映しているものと考えられる。

同じ泥水であっても、泥水中の固形分の粒度分布は、各種調泥剤濃度、塩濃度、ポリマー類の水和度および凝集度合い等で異なるのが普通である。更に泥水の状態（静置および流動）、掘削中のソリッドの混入によっても異なってくる。

2.4.5 まとめ

(1) 脱水量と泥壁厚さ

泥水試験の目的は API 基準に則った泥水自体の性状を確認するための試験であり、実際に泥水が岩石と接触したときに発生する浸透量や脱水量或いは泥壁の厚さ等の値は、泥水が接触する岩石自体の性状によって変わってくる。一般に、泥水自体の脱水作用により、泥水中の固形分が岩石表面に泥壁となって残る泥水と、泥水自体が岩石の中に浸透しながら、泥水中の固形分が岩石表面に集積して、泥壁を形成する泥水とがある。KCL-リグネート泥水と DIF は前者に、シリケート泥水はスパートロスがあることから後者に属するものとする。泥水が岩石に接触した場合、浸透性のある岩石であれば泥水の浸透量や脱水量が増えて泥壁の厚さが厚くなるが、浸透性の少ない岩石であれば泥壁は形成され難く、また泥壁は薄くなる傾向を示す。このことは岩石試験に於いては泥壁が薄いことは必ずしも泥水の性状のみを反映していないことを意味する。崩壊性岩石に対しては脱水量が多い泥水程、岩石内に浸透する水の量が増加し、その結果崩壊性岩石は浸透水と反応して膨潤し、崩壊を発生することになるので、崩壊抑止性能は脱水量に反比例する。また、崩壊性の度合いは岩石中の膨潤性物質の量に左右される。

今回の泥水試験の結果は以下に示す。

脱水量（シリケート泥水の場合はスパートロスで表示）は

KCL-リグネート泥水 < DIF < シリケート泥水 A = シリケート泥水 B

泥壁厚さは

シリケート泥水 A = シリケート泥水 B < DIF < KCL-リグネート泥水

となり、脱水量の多いシリケート泥水で泥壁厚さは薄く、DIFとKCL-リグネート泥水はほぼ似た値を示す。この泥水試験の結果のみからは泥壁が薄いシリケート泥水が推薦される。しかしながら、今回は泥水成分も2試料のみであるので、今後サンプルを増やしてデータを増加させて総括的な評価を行う必要がある。また、高比重泥水にした場合の性状の安定性も追加試験調査が必要と考えられる。

(2) pH と安全性

通常の泥水と同様にアルカリ性を示すが、シリケート泥水は2種類ともpHが11を超えている。KCL-リグネート泥水の10.1およびDIFの10.2に比べて高く、取り扱いに当たっては、目に入れない、肌に付けない等の安全性に注意する必要がある。

2.5 岩石と泥水の室内試験

本試験は泥水掘削による泥水の孔壁への付着と浸透状況等の岩盤への影響を評価するために、それに関する実験室での浸透試験により取得するものである。実施内容は以下の通りである。

① 泥水浸透試験

泥水浸透試験は以下の項目を含む。

- ・ 試験供試体の作成
- ・ 試験システムの構築
- ・ 浸透試験の実施
- ・ 試験供試体の浸透度合いの観察、測定
- ・ 回復試験（浸透試験後、試験供試体を脱イオン水で洗浄し効果を確認する）
- ・ 試験泥水、脱イオン水、浸透後の泥水、回復試験後の洗浄水の成分分析および pH と電気伝導度の測定を実施した。成分分析は Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、Si、T-Fe、Cl、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、の 9 成分である。

② 泥水と清水の比較試験

泥水と清水の岩盤への影響を比較検討するために、泥水 4 種類と清水（脱イオン水）を使用して、吸水膨張試験、膨潤圧試験、浸水崩壊度試験を実施した。

清澄層砂岩および泥岩（房総半島清澄地区）と勇知層細粒砂岩および声間層上部相泥岩（幌延町 D-1 孔のコア）の 4 種類を試験試料に供した。試験試料の試験内容詳細を表 2.5-1 に示す。

表 2.5-1 岩石と泥水の室内試験内容詳細

試験名	岩石名	サンプルNo.	試験 No.	備考
泥水浸透試験	清澄層砂岩	S-1	S-A-1	シケート泥水 A
	清澄層泥岩	M-1	M-A-1	
	清澄層砂岩	S-2	S-B-1	シケート泥水 B
	清澄層泥岩	M-1	M-B-1	
	清澄層砂岩	S-3	S-C-1	KCL-リグ ネット泥水
	清澄層泥岩	M-1	M-C-1	
	清澄層砂岩	S-3	S-D-1	DIF
	清澄層泥岩	M-2	M-D-1	
泥水浸透回復試験	清澄層砂岩	S-1	S-A-2	シケート泥水 A
	清澄層泥岩	M-1	M-A-2	
	清澄層砂岩	S-2	S-B-2	シケート泥水 B
	清澄層泥岩	M-1	M-B-2	
	清澄層砂岩	S-3	S-C-2	KCL-リグ ネット泥水
	清澄層泥岩	M-1	M-C-2	
	清澄層砂岩	S-3	S-D-2	DIF
	清澄層泥岩	M-5	M-D-2	
吸水膨張率試験	清澄層砂岩	S-5	1 試料に対し 5 試験 (脱イオン水 + 泥材 4 種類)	
	清澄層泥岩	M-3		
	勇知層細粒砂岩	D-1 孔コア		
	声間層上部相泥岩			
膨潤圧試験	清澄層砂岩	S-5	1 試料に対し 5 試験 (脱イオン水 + 泥材 4 種類)	
	清澄層泥岩	M-3		
	勇知層細粒砂岩	D-1 孔コア		
	声間層上部相泥岩			
浸水崩壊度試験	清澄層砂岩	S-4	1 試料に対し 5 試験 (脱イオン水 + 泥材 4 種類)	
	清澄層泥岩	M-4		
	勇知層細粒砂岩	D-1 孔コア		
	声間層上部相泥岩			

2.5.1 泥水浸透試験

(1) 試験供試体の作成

泥水浸透試験には1辺15cmの立法体の試料が必要である。そのため、コア試料では大きさが不足する。従って、泥水浸透試験は清澄層の砂岩および泥岩のみで実施した。

試験供試体は岩石カッターを用いて、層理面の方向を考慮し、1辺15cmの立方体に整形した。次に層理面と平行な面を上下面とし、平面研削盤で研磨し表面を平滑にした。ついで原則的に層理の上方の面を試料の上面とし、コア採取機で径22mm深さ50mmの孔を層理面に垂直に開けた。試料成形に使用した機器一覧を表2.5.1-1に示す。また、図2.5.1-1に成形前採取試料の一部を示し、図2.5.1-2に成形後の試験供試体を示す。試験供試体作成までのフローを図2.5.1-3に示す。

表 2.5.1-1 試料成形に使用した機器一覧

使用装置	主な仕様
平面研削盤	岡本機械製作所製、型式 PFG-450AN 砥石回転数 3000rpm、砥石外形 205mm、幅 19mm、
コア採取機	千代田製作所製、MODEL No.CM87
大型岩石カッター	岩本鉱産物商会製 カッター直径 50cm、刃幅 4 mm
小型岩石カッター	岩本鉱産物商会製 カッター直径 25cm、刃幅 2mm

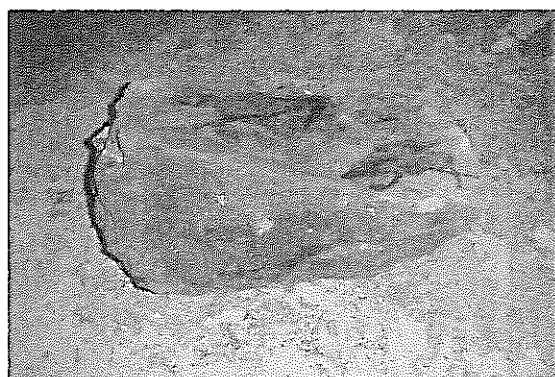


図 2.5.1-1 成形前採取試料の一部

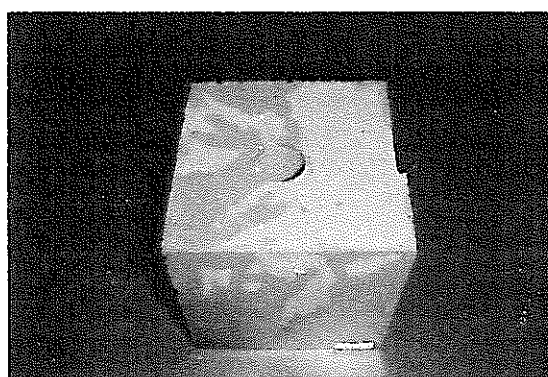


図 2.5.1-2 成形後の試験供試体

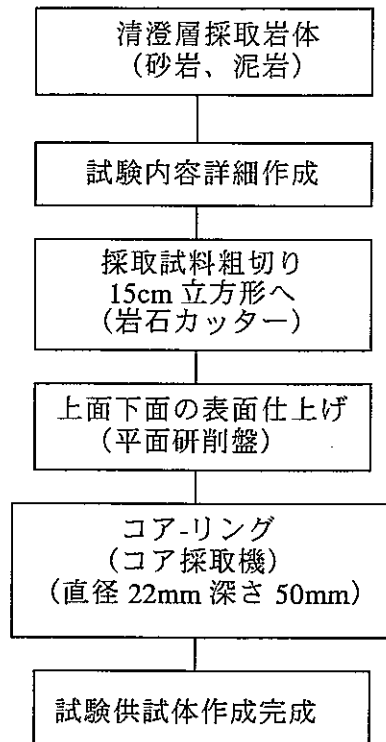


図 2.5.1-3 試験供試体作成までのフロー図

(2) 試験装置

試験装置は図 2.5.1-4 泥水浸透試験装置に示すように 50t 載荷装置及び載荷コントロール盤、2 重管ビューレットと泥水補充用容器、脱イオン水補充用 20l ポリタンク、脱イオン水加圧タンク、加圧用圧力調整装置から構成される。浸透用治具を図 2.5.1-5 に示す。

浸透試験は図 2.5.1-6 試験装置模式図に示すように 2 重管ビューレット内の泥水を試料中空部に空気圧を作用させ充填し浸透させる方法であり、回復試験は加圧タンク内の脱イオン水に空気圧を作用させ、浸透試験により試料中空部内壁に付着した泥壁を洗浄除去する方法である。使用機器一覧表を表 2.5.1-2 に示す。

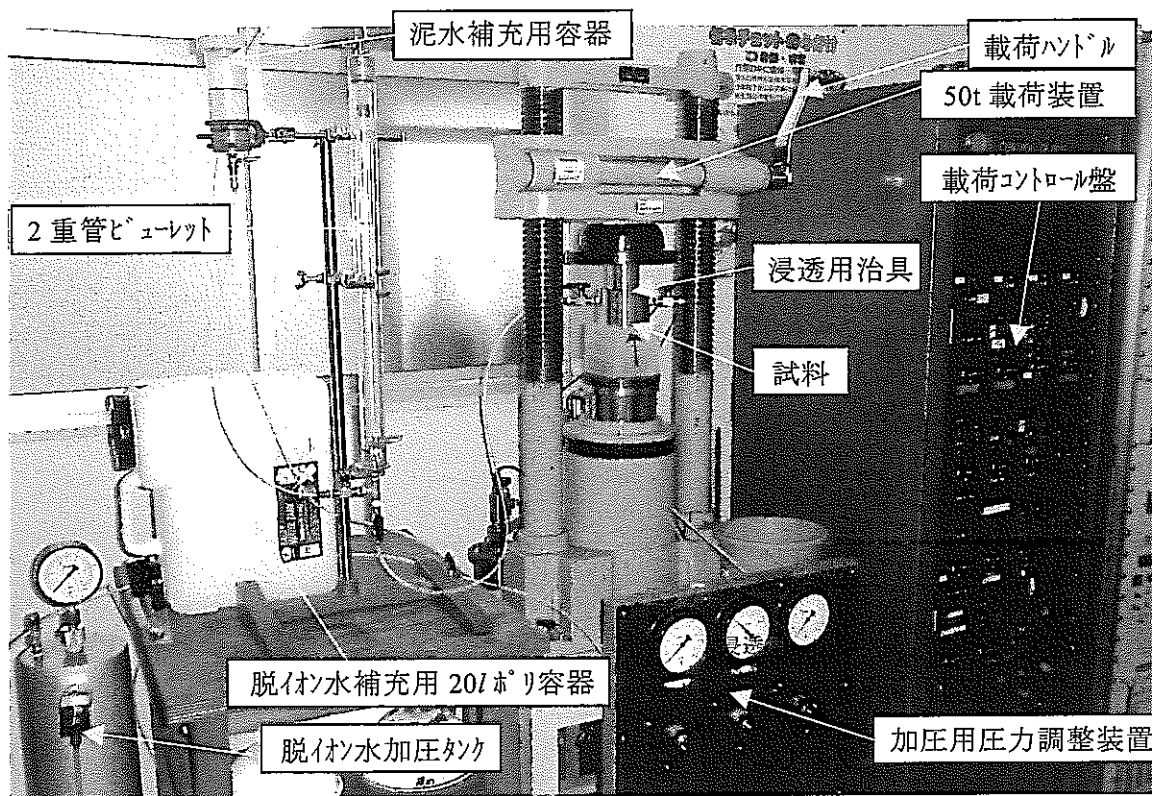


図 2.5.1-4 泥水浸透試験装置

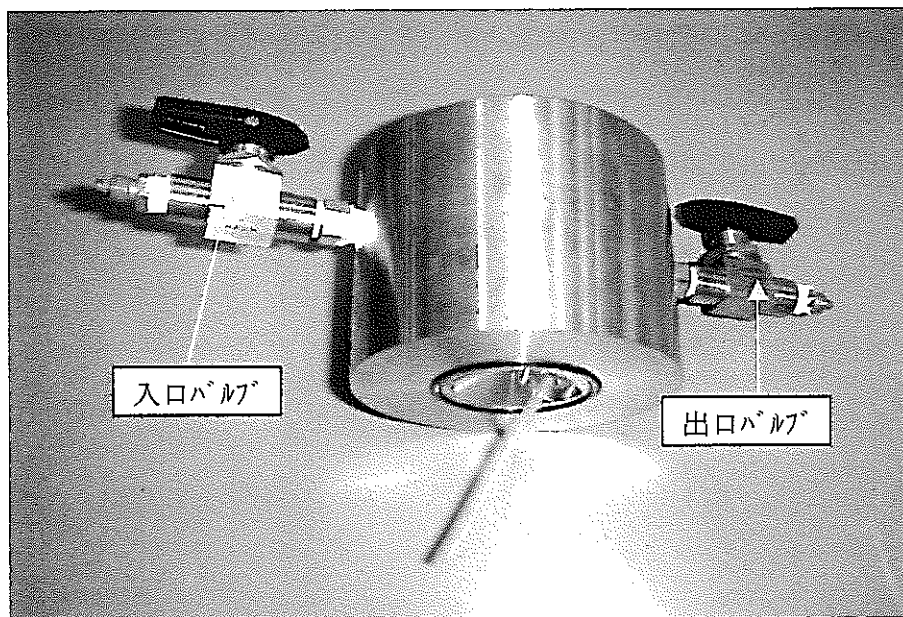


図 2.5.1-5 浸透用治具

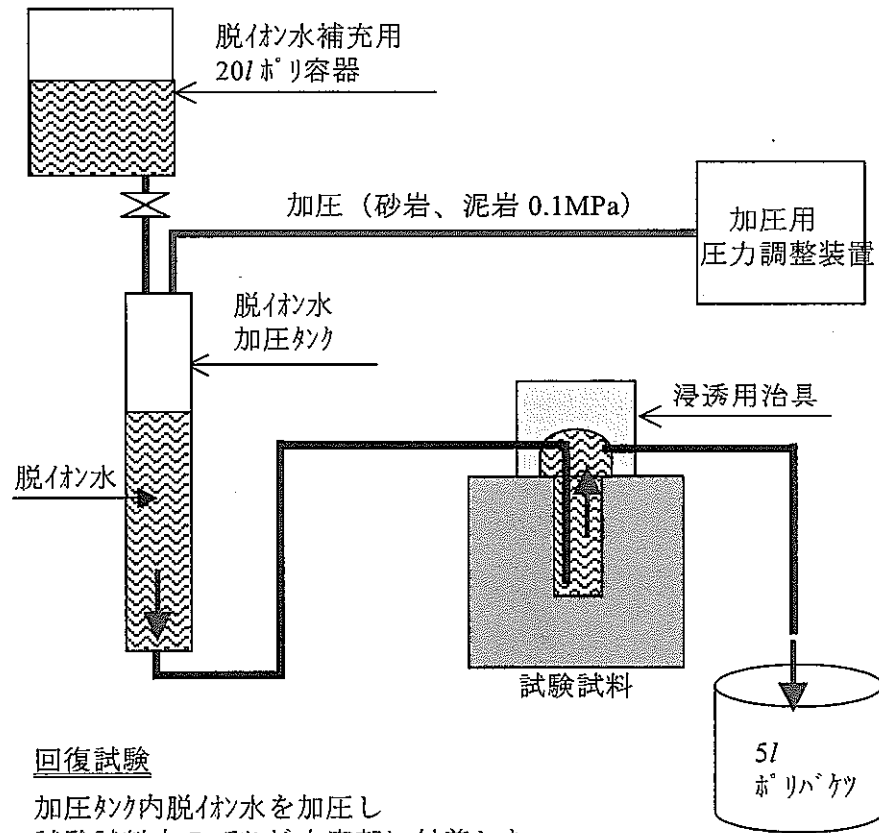
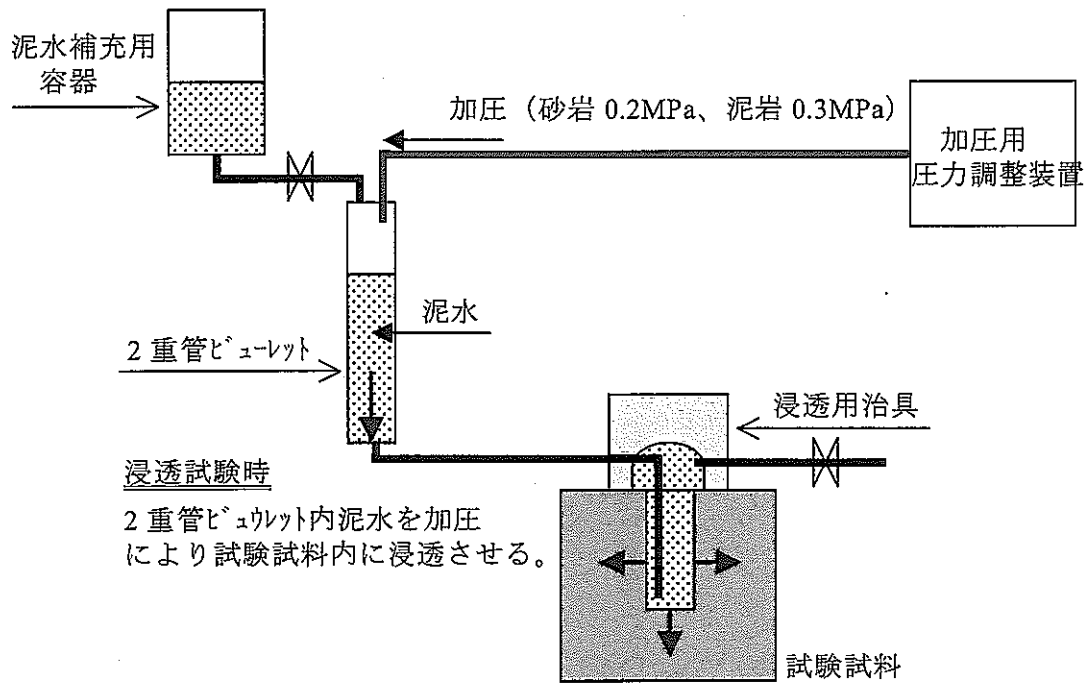


図 2.5.1-6 泥水浸透試験装置模式図

表 2.5.1-2 泥水浸透試験機器一覧表

使用装置	主な仕様
50トン載荷装置	マルイ製、最高載荷荷重 50t 載荷コントロール制御盤
脱イオン水加圧タンク	マルイ製 内容量 10l
加圧用圧力調整装置	最高使用圧力 0.6MPa、調整バルブ 3個
脱イオン水補充用ポリ容器	市販品 内容量 20l
2重管ビューレット	市販品 100ml
ベピコン	日立製作所、2.2kw、最高圧力 0.93MPa、 吐出し空気量 265l/min

(3) 試験手順

浸透試験、回復試験とも手順に従い実施した。図 2.5.1-7 に浸透試験手順フローを示し、図 2.5.1-8 に回復試験の手順フローを示す。また、試験直後および乾燥後の孔径測定手順フローを図 2.5.1-9 に示す。

浸透試験用泥水に加える空気圧の設定については、透水試験および予察浸透試験結果に基づいて設定した。透水試験では砂岩は 0.75kgf/cm^2 (約 75kPa) の加圧で透水量が $2.55\text{ml}/24\text{h}$ であった。このことから砂岩の設定圧を 2kgf/cm^2 (約 0.2MPa) とし 5ml から 10ml の浸透量を予測した。しかしながら、泥水浸透試験は孔壁の内側に泥水の付着膜が時間の経過とともに厚くなるため、時間の経過とともに浸透量が少なくなると推定された。予察試験はシリケート A を用いて実施した。予察試験では設定圧を 1.3kgf/cm^2 (約 0.13MPa) から始めて、 1.5kgf/cm^2 (約 0.15MPa)、 2kgf/cm^2 (約 0.2MPa) へ昇圧させ浸透量を確認した。予察試験の結果シリケート A は加圧 2kgf/cm^2 (約 0.2MPa) の時 $2.6\text{ml}/16.5\text{h}$ と予測よりも小さな浸透量であった。そこで砂岩の設定圧を 2kgf/cm^2 (約 0.2MPa) に決め、同様に泥岩は 3kgf/cm^2 (約 0.3MPa) とした。

シリケート泥水 A を用いた予察試験の結果、泥水が無色に近く洗浄水の色による洗浄の度合いの判定が困難なため、pH 試験紙を用い pH が中性に変化した時点で洗浄が完了したものと判断することとした。その流量および水量は、砂岩・泥岩とも 5l であった。洗浄時間は 7 分間で洗浄流量は 0.7 l/min である。また、加圧値は砂岩・泥岩とも 1kgf/cm^2 (約 0.1MPa) であった。pH の測定には通常 pH 計を用いるが、pH 値が安定するまでに通常 10 数分かかる。今回の回復試験では 7 分程度で試験が終了するため pH 計では時間が掛かりすぎる。従って、今回は pH 試験紙を用いて洗浄水の pH を把握することとした。予察試験

結果で得られたこれらの値を全ての泥水に適用することとし、以後の本試験を実施した。

洗浄水としてはシリケート泥水の場合は NaOH を使用すると形成された泥壁（シリケート薄膜）が溶解し、除去が容易であるという NAGRA の報告（後述 3.2.2(2)参照）があるが、今回は条件を同一にするため、洗浄水としては脱イオン水で統一した。

回復試験洗浄中の状況を図 2.5.1-10 に示す。

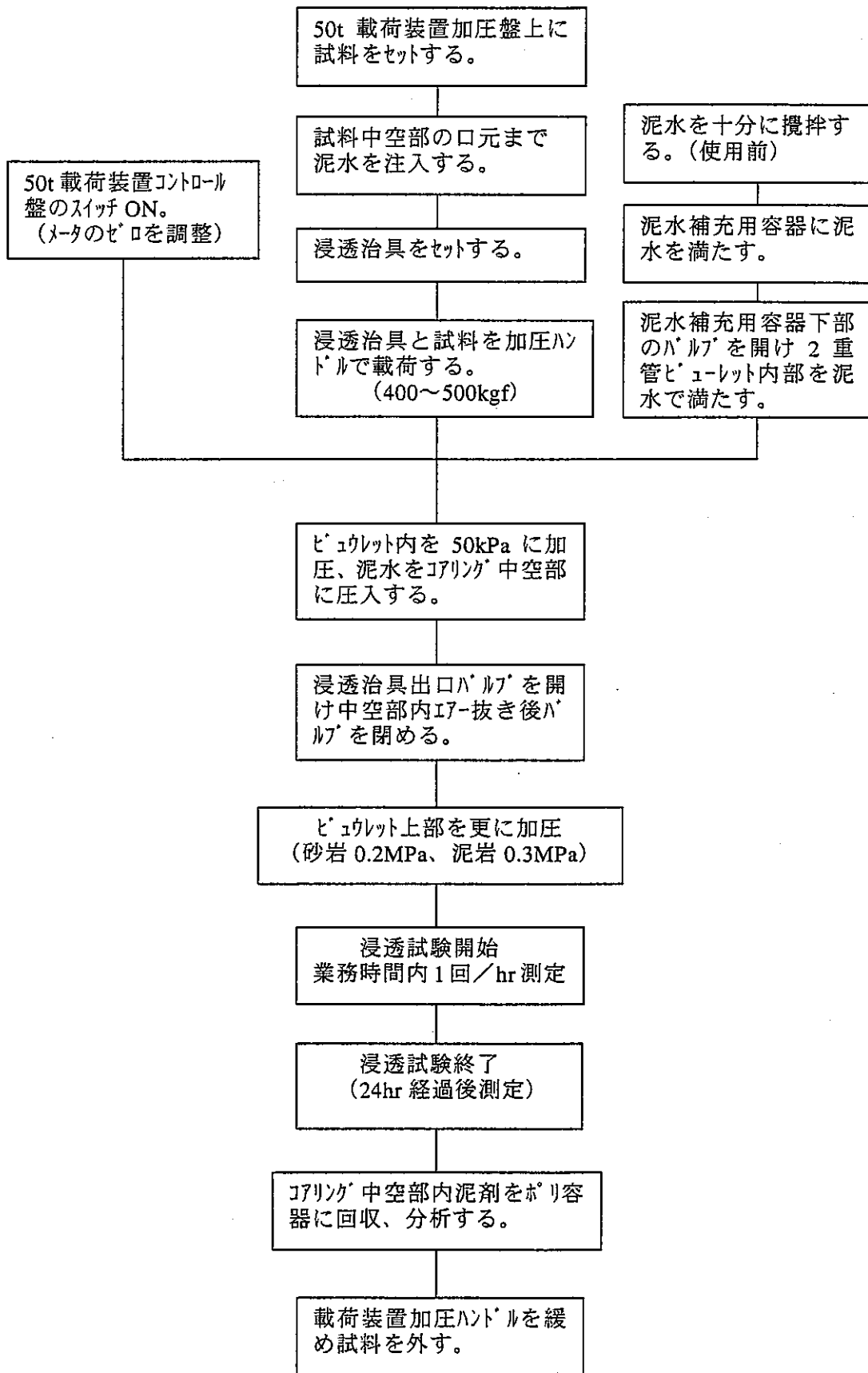


図 2.5.1-7 浸透試験フロー図

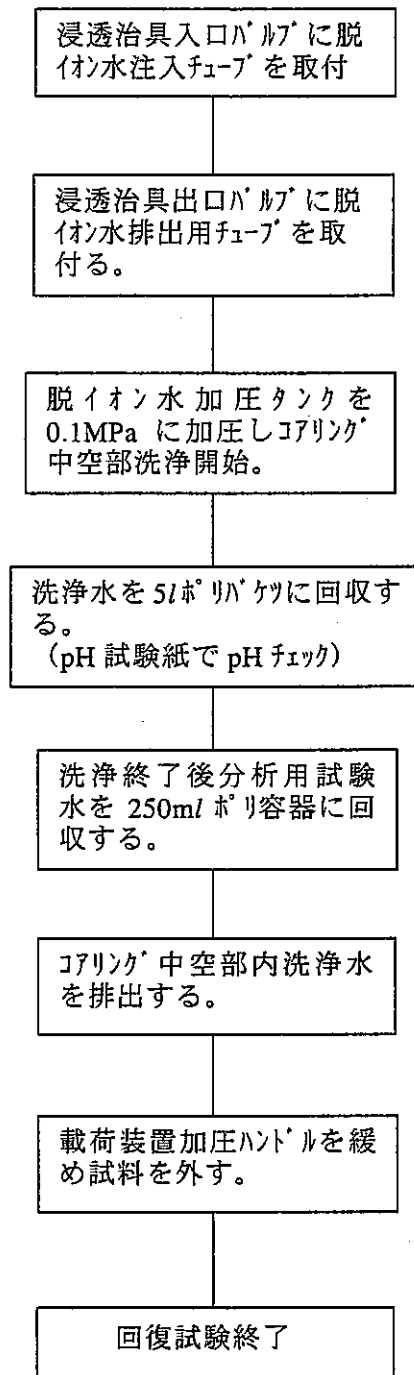


図 2.5.1-8 回復試験フロー図

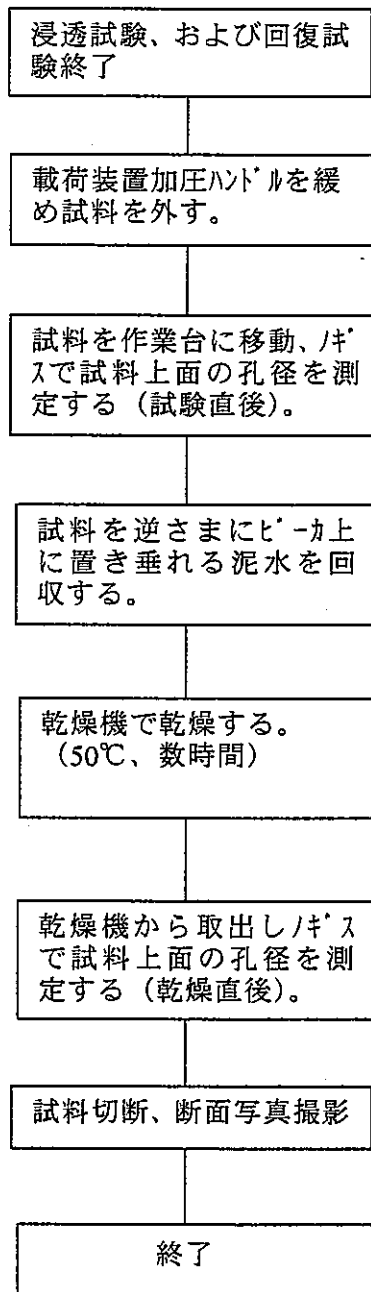


図 2.5.1-9 孔径測定手順フロー

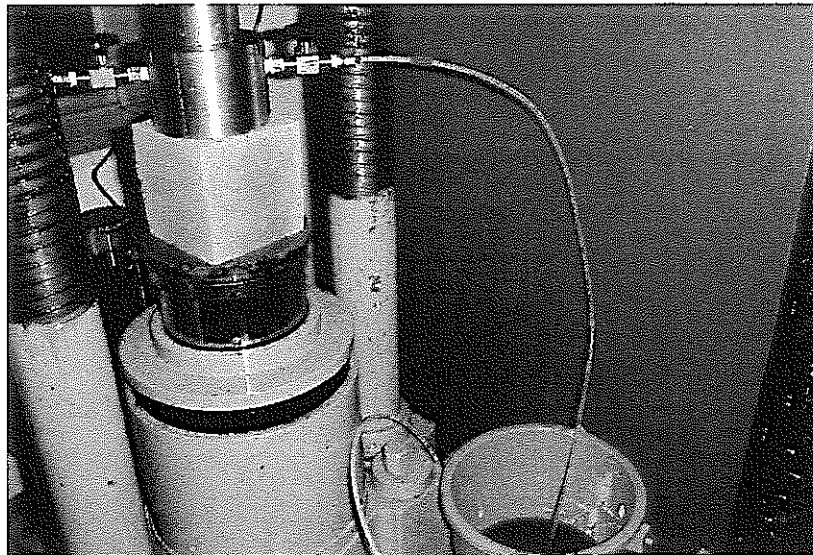


図 2.5.1-10 回復試験洗浄中

(4) 試験結果

表 2.5.1-3 に浸透試験結果を示す。浸透量は各泥水とも試験開始から 1 時間間隔で 5 時間測定し 1 時間あたりの浸透量 (ml) を示した。24 時間後の浸透量は測定開始から測定終了まで 24 時間の累計浸透量 (ml) である。泥水に加圧する空気圧は透水試験結果を参考に砂岩 2kgf/cm^2 (0.2MPa)、泥岩 3kgf/cm^2 (0.3MPa) とした。孔径測定は試験前、試験直後、乾燥後とノギスで測定した。供試体の乾燥は付着泥水の表面が手に付着しない程度である。泥水の付着状況を確認のため試料を切断した。浸透試験および回復試験終了後の切断面写真を巻末に示す。KCL-リグネート泥水は乾燥が進むと壁面に付着した泥壁表面にひび割れが生じ剥離が生じた。

表 2.5.1-3 泥水浸透試験結果

泥水種類	岩石種類		浸透量(ml)						孔径測定(mm)		
			1h後	2h後	3h後	4h後	5h後	24h後	試験前	試験直後	乾燥後
シリケート A	清澄層 砂岩	S-A-1	0.2	0.1	0	0	0	0.5	22.15	21.45	21.93
		S-A-2	0.1	0.1	0	0	0.1	2.2	22.15	22.10	22.15
	清澄層 泥岩	M-A-1	0.4	0.9	1.0	0.9	0.9	19.9	22.15	20.30	21.90
		M-A-2	0.5	0.7	0.5	0.8	0.7	16.4	22.15	22.15	22.15
シリケート B	清澄層 砂岩	S-B-1	0.2	0.4	0	0.1	0.1	2.3	22.15	21.40	21.90
		S-B-2	0.5	0.1	0.4	0	0.2	3.5	22.15	22.15	22.15
	清澄層 泥岩	M-B-1	0	0	0.1	0.1	0.1	2.7	22.15	21.20	21.85
		M-B-2	0.1	0.1	0.1	0	0	2.2	22.15	22.15	22.15
KCL- リグネート	清澄層 砂岩	S-C-1	1.8	1.1	0.9	0.8	0.9	16.1	22.15	18.10	剥離
		S-C-2	2.2	1.3	1.1	1.2	0.9	20.4	22.15	18.70	剥離
	清澄層 泥岩	M-C-1	1.4	1.8	1.8	2.0	2.0	33.4	22.15	17.60	剥離
		M-C-2	0.9	1.3	1.6	1.4	1.6	27.2	22.15	20.05	剥離
DIF	清澄層 砂岩	S-D-1	1.3	1.3	1.0	0.9	0.9	19.2	22.15	19.55	20.65
		S-D-2	2.2	1.2	1.1	0.8	0.8	19.1	22.15	19.80	20.75
	清澄層 泥岩	M-D-1	1.2	1.4	1.4	1.4	1.6	29.1	22.15	19.35	21.50
		M-D-2	1.6	1.1	1.1	1.0	1.0	23.9	22.15	20.40	21.40

岩石種類の試料ナンバーの末尾が「1」は泥水浸透試験、「2」は泥水浸透後、回復試験を行った試料を示す。

泥水の浸透量については、試験開始後5時間までの比較では、例外があるもののどの泥水でも最初の1~2時間の浸透量が多いが時間と共に次第に少なくなる傾向が認められる。これは、浸透試験開始当初は岩石中の空隙に容量があること、そして時間と共に泥壁が形成されるため泥水の岩石への浸透が抑えられるためと考えられる。24時間後の浸透量の比較では砂岩と泥岩の比較では泥岩の方が浸透量が多い。特にシリケート泥水Aは砂岩が0.5~2.2mlにかかわらず、泥岩では16.4~19.9mlと特に差が大きい。この原因については泥岩の含水率や飽和度が砂岩よりも低かったため、泥水からの濾過水が浸透しやすかったためと考えられる。砂岩と泥岩で浸透量に大きく差があるシリケート泥水Aの泥岩に対する浸透量を無視すると、シリケート泥水の浸透量はKCL-リグネート泥水とDIFの浸透量よりも一桁少ない。これは、シリケート泥水が岩石の孔壁に密着しシリケートの薄膜を形成するため、薄膜形成後の泥水の浸透を抑えているためと考えられる。KCL-リグネート泥水とDIFは試験後の試料断面の目視観察では泥水の固形成分が岩石マトリックス中に浸透した形成は認められない。後述する泥壁の厚さの比較ではKCL-リグネート泥水とDIFは比較的厚い泥壁を構成している。従って、泥水中の固形成分は泥壁を構成し、泥水中の水分

のみが岩石マトリックス中に浸透しているものと考えられる。

次に浸透試験直後の孔径を比較した。試験前と試験直後の孔径の差は、後述する膨潤率試験の結果から泥水による試験岩石の膨張率は砂岩で最大 0.017%、泥岩で最大 0.028%である。孔径 22.15mm の 0.017%は 0.00038mm、0.028%は 0.00062mm と十分に小さくノギスによる測定の検出限界よりも十分に小さい。従って、孔径の変化はほとんど孔内にできた泥壁によるものと考えて良い。従って、ここでは試験前と試験直後の孔径の変化は全て泥壁形成によるものとして検討した。泥壁の比較を表 2.5.1-4 に示す。

表 2.5.1-4 泥水浸透試験および回復試験後の泥壁の比較

泥水種類	岩石種類		試験前の孔径 (mm)	試験直後の孔径 (mm)	試験直後の孔径差 (mm)	試験直後の泥壁の厚さ (mm)	API 脱水性による泥壁の厚さ (mm)*1
シリケート A	清澄層 砂岩	S-A-1	22.15	21.45	0.30	0.15	0.3
		S-A-2	22.15	22.10	0.05	0.03	
	清澄層 泥岩	M-A-1	22.15	20.30	1.85	0.93	
		M-A-2	22.15	22.15	0	0	
シリケート B	清澄層 砂岩	S-B-1	22.15	21.40	0.75	0.38	0.3
		S-B-2	22.15	22.15	0	0	
	清澄層 泥岩	M-B-1	22.15	21.20	0.95	0.48	
		M-B-2	22.15	22.15	0	0	
KCL- リグネート	清澄層 砂岩	S-C-1	22.15	18.10	4.05	2.03	0.5
		S-C-2	22.15	18.70	3.45	1.73	
	清澄層 泥岩	M-C-1	22.15	17.60	4.55	2.28	
		M-C-2	22.15	20.05	2.10	1.05	
DIF	清澄層 砂岩	S-D-1	22.15	19.55	2.60	1.30	0.4
		S-D-2	22.15	19.80	2.35	1.18	
	清澄層 泥岩	M-D-1	22.15	19.35	2.80	1.40	
		M-D-2	22.15	20.40	1.75	0.88	

*1=本報告表 2.4.3-2 参照

試験岩石は房総半島清澄地域の砂岩および泥岩である。岩石種類の試料ナンバーの末尾が「1」は泥水浸透試験、「2」は泥水浸透後、回復試験を行った試料を示す。

巻末に示した断面写真からわかるように、浸透試験で形成された泥壁はほぼ均一に孔壁をコーティングしている。そこで、均一に孔壁をコーティングしているとすれば、孔径差の 2 分の 1 が泥壁の厚さで見なして良い。表 2.5.1-5 にはその考え方で計算した泥壁の厚さを示している。表 2.5.1-4 では一部例外があるものの泥壁の厚さは薄い方から順に

シリケート泥水 B ≤ シリケート泥水 A < DIF < KCL-リグネート泥水

となる。この結果は表 2.4.3-2 の API 脱水性による泥壁の厚さの結果と調和的である。砂岩と泥岩という岩質による差は、今回の結果を見る限り砂岩の方が泥岩よりも泥壁が薄い傾向がある。これは、砂岩が泥岩よりも透水性が良いため、泥水中の固形成分の一部までが岩石中まで浸透したためと考えられる。しかしながら、試料断面の孔壁付近の目視による観察では泥水の固形成分が浸透した形成は認められない。今後はトレーサーを用いた試験を実施するなどして影響範囲の検討が必要になると考えられる。

回復試験における泥壁の厚さの比較では、シリケート泥水は A、B 双方共に除去できていることが示されている。KCL-リグネート泥水は、回復試験では泥壁は多少は薄くはなるものの、1mm 以上の厚さで残留する。DIF は巻末写真でわかるように洗浄水の流出口付近は除去されるものの、その他は除去されない。DIF は石油などの生産ゾーンを保護する泥材として開発されており、生産開始時には剥がれやすいという特徴を本来は期待されている。そのため、今回の回復試験でも泥壁の良好な洗浄状況を期待した。しかしながら、今回の回復試験で良好な洗浄状況を示すことができなかったのは、実際の石油井の生産時に地層内から孔壁にかかるバックプレッシャーが本試験ではかけられなかったこと、DIF に添加されているブリッジング剤であるタンカル F の粒径が試験岩石の空隙のサイズと合っていない（岩石の空隙径の 1/3 程度の粒径が理想といわれている）可能性があることなどが原因として考えられる。

表 2.5.1-5 回復試験結果

泥水種類	岩石種類	pH 値							
		直後	1分後	2分後	3分後	4分後	5分後	6分後	7分後
シリケート A	清澄層砂岩	11 以上	9	7.5	7.5	7	7	7	7
	清澄層泥岩	11 以上	11	9	8.5	8	7.5	7	7
シリケート B	清澄層砂岩	11 以上	10	8	7.5	7	7	7	7
	清澄層砂岩	11 以上	8	7	7	7	7	7	7
KCL-リグネート	清澄層砂岩	11 以上	8	7	7	7 以下	7 以下	7 以下	7 以下
	清澄層砂岩	11 以上	8	7.5	7	7 以下	7 以下	7 以下	7 以下
DIF	清澄層砂岩	7.5	7	7 以下	7 以下	7 以下	7 以下	7 以下	7 以下
	清澄層砂岩	9	8	7	7 以下	7 以下	7 以下	7 以下	7 以下

回復試験は毎分約 0.71l/min の流量で脱イオン水を流し、孔内を洗浄しているが、シリケート泥水 B を除くと砂岩よりも泥岩の方が pH の低下に時間がかかる傾向が認められる。pH 試験紙による測定であるので pH 値そのものに正確を期すことはできないが、泥水間の比較ではシリケート泥水が KCL-リグネート泥水および DIF よりも洗浄時間がかかる傾向

が認められる。これは、KCL-リグネート泥水および DIF は孔壁に付着した泥壁が除去されず、泥壁表面のみ洗浄水が接触している。そのため泥壁表面のみの NaOH や KOH が洗浄されただけなので比較的短時間で pH が低下したものと考えられる。一方シリケート泥水は A も B もある程度洗浄によって泥壁が除去されている。従って、洗浄水中に溶け出す泥壁が KCL-リグネート泥水や DIF よりも多いので、pH の低下に時間がかかったものと考えられる。

(5) 化学分析

試験泥水、脱イオン水、浸透後の泥水、回復試験後の洗浄水の成分分析結果および pH と電気伝導度の測定結果を表 2.5.1-6 に示す。

泥水の化学分析については、固形物を濾過して行った。そのため、例えば DIF などではタンカル (CaCO_3) を添加しているにも係わらず、カルシウム濃度が低い値になっている。また、泥水そのものが高濃度の溶液であるため、分析時に 10 倍に希釈して行った。更に添加物同士が反応してコロイドなどを形成するため、希釈時および分析時にコロイドなどの濃淡等があると分析値にばらつきを生じさせる原因となる。洗浄水は流動させた 7 分後の（最終の）洗浄水を分析試料として採取した。

(a) シリケート泥水 A

泥水の分析では、陽イオンでは、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、T-Fe は大きな変動はないと判断される。 K^+ は倍増まではしていないが増加傾向にある。 Ca^{2+} は 3 倍程度に増加している。陰イオンでは HCO_3^- と SO_4^{2-} 硫酸イオンは若干の増加、 Cl^- は若干の減少傾向にあるが大きな変動とは言えない。Si もほぼ同程度の値と考えられる。大きな変動を示した Ca^{2+} の変動原因は、岩石中のマトリックス中の方解石 (CaCO_3) の溶脱、 K^+ についてはモンモリロナイト類などの粘土鉱物中の K^+ の溶脱と考えられる。しかしながら、今回は岩石の定量化学分析を実施していないので、推定の域を出ない。

洗浄水の分析では、陽イオンでは Na^+ 、陰イオンでは HCO_3^- と Cl^- が検出されているが大きな値ではない。但し、砂岩を洗浄した場合の Si の濃度が 349mg/l と泥岩の場合の検出限界以下 (<10mg/l) よりも高い値を示す。後述するシリケート泥水 B では双方共に 10mg/l 程度であるので、349mg/l は異常な値であるが pH 値は 6.9 と中性を示す。この原因は検証できていないが、泥壁からシリケートの薄膜が一部剥離し、洗浄水中に混じったためと考えられる。

(b) シリケート泥水 B

泥水の分析では、陽イオンでは、 Na^+ と Mg^{2+} が1/2以下に減少し、 Ca^{2+} と全鉄が若干の増加、 K^+ が若干の減少傾向を示す。陰イオンは SO_4^{2-} が若干の上昇、 Cl^- が若干の減少傾向を示すが大きな変動は認められない。 Si はほとんど変化していない。シリケート泥水 A と B の主な違いはシリケート泥水 B は KCl を添加していること、シリケート泥水 A は pH 調製剤で NaOH を使用しているのに対し、シリケート泥水 B では KOH を使用しており、シリケート泥水 A よりも K^+ が多い点にある。また、溶存成分の濃度もシリケート泥水 A に比較して多い。例えば Na^+ はほぼ倍、 K^+ は 3800 倍である。そのため、岩石からの溶脱による泥水の溶存成分濃度が増加する方向には働きにくいと考えられる。しかしながら、今回は岩石の定量化学分析を実施していないので、推定の域を出ない。

洗浄水の分析では、陽イオンでは K^+ 、陰イオンでは Cl^- が検出されているが大きな値ではない。 Si も検出限界ぎりぎりの値を示している。

(c) KCL-リグネート泥水

陽イオンでは Mg^{2+} が約 1.8 倍、 Na^+ 、 K^+ がほぼ 2 倍、全鉄が 3 倍以上と増加し、 Ca^{2+} が若干の減少傾向にある。陰イオンは SO_4^{2-} がほぼ 2 倍、 HCO_3^- が若干の増加傾向にあり、 Cl^- が若干の減少傾向にある。 Si はほぼ一定である。また、pH 値が 10 から 8~9 まで低下している。シリケート泥水よりも濃度が変化する溶存成分が多い傾向にある。KCL-リグネート泥水はリグニンに含まれる Fe や Cr がキレートを形成し孔壁表面に吸着して泥壁を形成する。また Na^+ や K^+ は泥岩中のモンモリロナイトなどの粘土鉱物の層構造の結晶の層の間に入り込み、水和による膨潤を防ぐ働きをする。そのため、泥水中の T-Fe、 Na^+ および K^+ は消費されるため、濃度が低下することが予想されるが、試験結果はこの推察と非調和的である。この結果を検証するには、岩石の定量化学分析を実施する必要がある。

洗浄水の分析では、どの成分も濃度は十分に低下しているが、シリケート泥水と異なり、 Si を除いて検出限界以下にはならない。pH は中性の値を示す。但し、洗浄水の色は最後まで無色になることはなく、採取試料は淡褐色を呈している。

(d) DIF

陽イオンでは T-Fe がほぼ 3 倍、 Ca^{2+} が 2 倍弱、 Mg^{2+} が若干の増加傾向を示すが、 Na^+ と K^+ は変化していないものと見なせる。陰イオンは炭酸水素イオンと塩化物イオンが若干の増加傾向にあるが、陰イオン全体的にはほぼ変化していないと言える。 Si は若干の減少傾

向にある。pH は 10.2 から 9 程度まで低下している。Ca²⁺の増加は岩石中の方解石 (CaCO₃) の溶脱が考えられるが、T-Fe については増加の原因が特定できない。この結果を検証するには、岩石の定量化学分析を実施する必要がある。

洗浄水の分析では、どの成分も濃度は十分に低下しているが、シリケート泥水と異なり、Si を除いて検出限界以下にはならない。pH は中性の値を示す。

表2.5.1-6(1) 試験泥水、浸透試験後泥水、回復試験洗浄水の分析結果

分析項目	脱イオン水	検定方法
ナトリウム(Na ⁺)	<0.5mg/l	JIS K 0101 47.1
カリウム(K ⁺)	<0.50mg/l	JIS K 0101 48.1
カルシウム(Ca ²⁺)	<0.1mg/l	JIS K 0101 49.3
マグネシウム(Mg ²⁺)	<0.1mg/l	JIS K 0101 50.3
鉄(全鉄)(T-Fe)	<0.1mg/l	JIS K 0101 60.4
炭酸水素イオン(HCO ₃ ⁻)	<10mg/l	JIS K 0101 14.2
硫酸イオン(SO ₄ ²⁻)	<0.1mg/l	JIS K 0101 42.4
塩化物イオン(Cl ⁻)	<0.1mg/l	JIS K 0101 32.4
けい素(Si)	<10mg/l	JIS K 0101 44.3.2
pH ()内は温度(°C)	6.1 (20.4)	JIS K 0101 11
電気伝導率	3.2 μ S/cm	JIS K 0101 12

分析項目	シリケート泥水A				
	試験前	浸透試験後		回復試験後	
		清澄層砂岩	清澄層泥岩	清澄層砂岩	清澄層泥岩
ナトリウム(Na ⁺)	13.1g/l	10.7g/l	14.5g/l	0.65mg/l	1.95mg/l
カリウム(K ⁺)	63.5mg/l	97.5mg/l	102mg/l	<0.5mg/l	<0.5mg/l
カルシウム(Ca ²⁺)	9.63mg/l	39.4mg/l	38mg/l	<0.1mg/l	<0.1mg/l
マグネシウム(Mg ²⁺)	2.47mg/l	2.09mg/l	2.84mg/l	<0.1mg/l	<0.1mg/l
鉄(全鉄)(T-Fe)	15.2mg/l	18.9mg/l	22.8mg/l	<0.1mg/l	<0.1mg/l
炭酸水素イオン(HCO ₃ ⁻)	4.97g/l	5.58g/l	6.89g/l	<10mg/l	25mg/l
硫酸イオン(SO ₄ ²⁻)	25mg/l	47mg/l	35mg/l	<0.1mg/l	<0.1mg/l
塩化物イオン(Cl ⁻)	65mg/l	57mg/l	52mg/l	0.2mg/l	0.1mg/l
けい素(Si)	19.3g/l	17.1g/l	26g/l	349mg/l	<10mg/l
pH ()内は温度(°C)	11.0 (21.0)	11.0 (21.4)	11.0 (21.9)	6.9 (21.2)	8.9 (21.0)
電気伝導率	42.4mS/cm	36.2mS/cm	47.4mS/cm	6.6 μ S/cm	12.7 μ S/cm

分析項目	シリケート泥水B				
	試験前	浸透試験後		回復試験後	
		清澄層砂岩	清澄層泥岩	清澄層砂岩	清澄層泥岩
ナトリウム(Na ⁺)	22.2g/l	7.70g/l	8.79g/l	<0.5mg/l	<0.5mg/l
カリウム(K ⁺)	24.4g/l	19.8g/l	21.7g/l	0.65mg/l	<0.50mg/l
カルシウム(Ca ²⁺)	13.6mg/l	10.5mg/l	11.8mg/l	<0.1mg/l	<0.1mg/l
マグネシウム(Mg ²⁺)	4.62mg/l	1.91mg/l	1.81mg/l	<0.1mg/l	<0.1mg/l
鉄(全鉄)(T-Fe)	11.4mg/l	14.6mg/l	12.6mg/l	<0.1mg/l	<0.1mg/l
炭酸水素イオン(HCO ₃ ⁻)	4.81g/l	4.07g/l	4.13g/l	<10mg/l	<10mg/l
硫酸イオン(SO ₄ ²⁻)	16mg/l	19mg/l	18mg/l	<0.1mg/l	<0.1mg/l
塩化物イオン(Cl ⁻)	21.4g/l	15.5g/l	17.3g/l	0.8mg/l	0.3mg/l
けい素(Si)	11.8g/l	11.6g/l	11.0g/l	11mg/l	12mg/l
pH ()内は温度(°C)	10.9 (20.9)	10.7 (24.6)	10.7 (24.7)	6.8 (24.4)	6.5 (24.3)
電気伝導率	108mS/cm	94.2mS/cm	104mS/cm	6.2 μ S/cm	4.1 μ S/cm

表2.5.1-6(2) 試験泥水、浸透試験後泥水、回復試験洗浄水の分析結果

分析項目	KCL-リグネート泥水				
	試験前	浸透試験後		回復試験後	
		清澄層砂岩	清澄層泥岩	清澄層砂岩	清澄層泥岩
ナトリウム(Na ⁺)	1.81g/l	3.71g/l	3.63g/l	3.3mg/l	2.55mg/l
カリウム(K ⁺)	19g/l	37.3g/l	38.8g/l	21.7mg/l	15.8mg/l
カルシウム(Ca ²⁺)	721mg/l	592mg/l	499mg/l	0.8mg/l	1.8mg/l
マグネシウム(Mg ²⁺)	76.4mg/l	159mg/l	132mg/l	0.2mg/l	0.4mg/l
鉄(全鉄)(T-Fe)	263mg/l	968mg/l	940mg/l	1.4mg/l	3.4mg/l
炭酸水素イオン(HCO ₃ ⁻)	3.29g/l	4.79g/l	4.79g/l	4.54mg/l	11.4mg/l
硫酸イオン(SO ₄ ²⁻)	2.7g/l	6.54g/l	5.39g/l	5.6mg/l	4.4mg/l
塩化物イオン(Cl ⁻)	28.6g/l	24.3g/l	21.4g/l	23g/l	13g/l
けい素(Si)	6.63g/l	6.21g/l	6.68g/l	<10mg/l	<10mg/l
pH ()内は温度(°C)	10.0 (24.9)	8.2 (24.4)	8.8 (25.1)	6.8 (24.4)	7.1 (24.4)
電気伝導率	128mS/cm	132mS/cm	137mS/cm	93.1 μ S/cm	67.2 μ S/cm

分析項目	DIF				
	試験前	浸透試験後		回復試験後	
		清澄層砂岩	清澄層泥岩	清澄層砂岩	清澄層泥岩
ナトリウム(Na ⁺)	36.9g/l	35.5g/l	35.1g/l	8.05mg/l	6.95mg/l
カリウム(K ⁺)	0.34g/l	0.37g/l	0.41g/l	0.80mg/l	0.60mg/l
カルシウム(Ca ²⁺)	391mg/l	607mg/l	378mg/l	3.2mg/l	2.7mg/l
マグネシウム(Mg ²⁺)	50mg/l	67mg/l	64mg/l	0.1mg/l	0.1mg/l
鉄(全鉄)(T-Fe)	2.5mg/l	16.2mg/l	17.9mg/l	0.4mg/l	0.2mg/l
炭酸水素イオン(HCO ₃ ⁻)	1.44g/l	1.58g/l	1.67g/l	11.6mg/l	11.9mg/l
硫酸イオン(SO ₄ ²⁻)	58mg/l	48mg/l	67mg/l	0.5mg/l	0.5mg/l
塩化物イオン(Cl ⁻)	42.3g/l	51.6g/l	51.6g/l	12mg/l	9.7mg/l
けい素(Si)	0.79g/l	0.56g/l	0.42g/l	<10mg/l	<10mg/l
pH ()内は温度(°C)	10.2 (25.1)	8.7 (25.1)	8.8 (25.0)	6.9 (24.6)	7.0 (24.8)
電気伝導率	175mS/cm	162mS/cm	163mS/cm	56.9 μ S/cm	51.0 μ S/cm

2.5.2 膨潤性岩盤に対する泥水と清水の比較試験

泥水と清水の岩盤への影響を比較検討するために、泥水4種類と清水（脱イオン水）を用い、吸水膨張試験、膨潤圧試験および浸水崩壊度試験を実施した。

(1) 吸水膨張試験および膨潤圧試験

(a) 試験概要

吸水膨張率は供試体の軸方向の変位のみを許して吸水膨張させたときの軸方向の変位量を供試体の元の長さで除した値である。通常は日本国有鉄道(1969)¹⁾で用いられていた方法（膨張率測定法）が適用される。試験手順は以下のとおり。

- ① 直径40～80mmの円筒形供試体（高さは直径と同程度とする）を円筒形容器に封入する。
- ② 供試体と円筒形容器の間はパラフィンで充填し、上下方向に動きやすくする。
- ③ 供試体の上下面は濾紙を介して水を自由に通すことができる多孔質の「ポーラスストーン」を当てる。
- ④ 供試体を封入した円筒形容器を水槽に入れ、供試体上面まで注水する。
- ⑤ 時間経過に伴う軸方向の伸びを測定する。

吸水膨張率測定装置の写真を図2.5.2-1に示す。吸水膨張率は以下の式で求める。

$$l = \frac{d}{L} \times 100 (\%)$$

但し、 l ：吸水膨張率

d ：最大膨張量

L ：初期の長さ

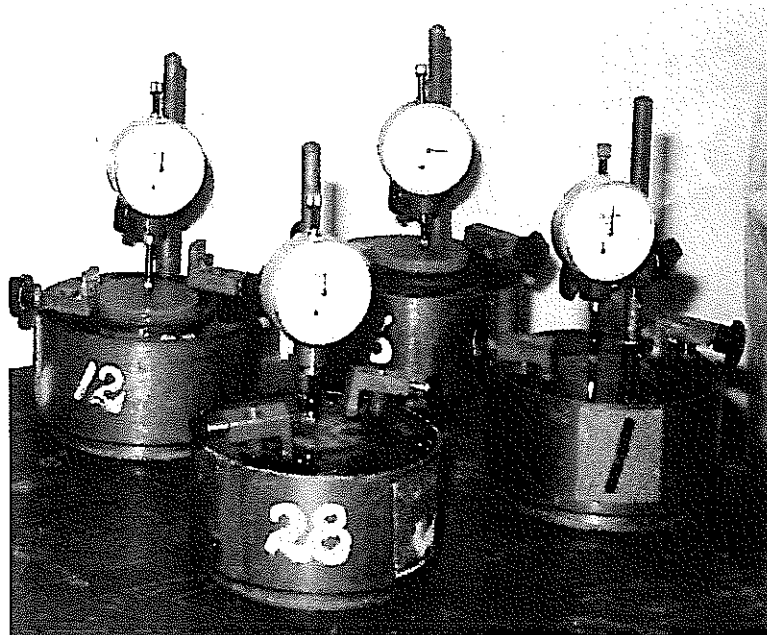


図 2.5.2-1 吸水膨張率測定装置

膨潤圧試験は供試体の体積変化を生じさせず、その時に発生する圧力である。原則的には原位置での状態をシミュレートしたモデル実験として行われる。従って、原位置の条件に合わせてコントロールできる装置を用いる必要がある。基準として定められた膨潤圧試験法は極めて少ないが、通常は ISRM (岩の力学連合会,1982²⁾) の指針を基本とした。手順は以下の通り。

- ① 膨張率試験と同様に整形した試料を円筒形容器に封入する。
- ② 供試体を圧密試験装置にセットした後、 0.1kgf/cm^2 (約 10kPa) 程度の小さな軸力を作用させる。
- ③ 注水し、時間経過に伴う膨張圧の測定を行う。
- ④ 試験中は常に供試体の膨張量が 0 になるように荷重を調節する。
- ⑤ 膨潤圧がほぼ一定になるまで試験を継続する。

膨潤圧試験装置の写真を図 2.5.2-2 に示す。

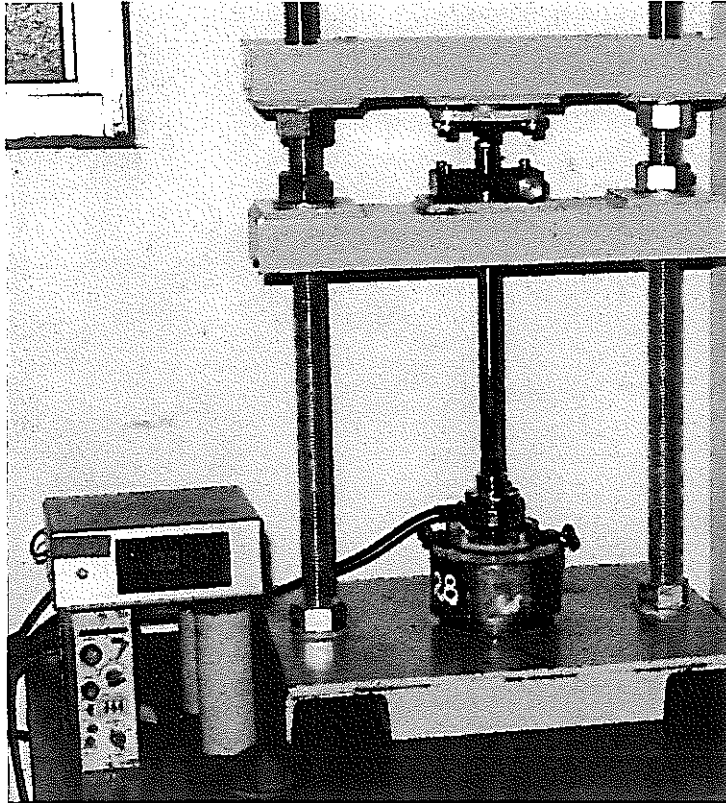


図 2.5.2-2 膨潤圧試験装置

(b) 吸水膨張試験結果

勇知層細粒砂岩の膨張率変化を図 2.5.2-3 に示し、図 2.5.2-4 に声間層上部相泥岩の膨張率変化を示す。また、清澄層砂岩の膨張率変化を図 2.5.2-5 に示し、清澄層泥岩の膨張率変化を図 2.5.2-6 に示す。

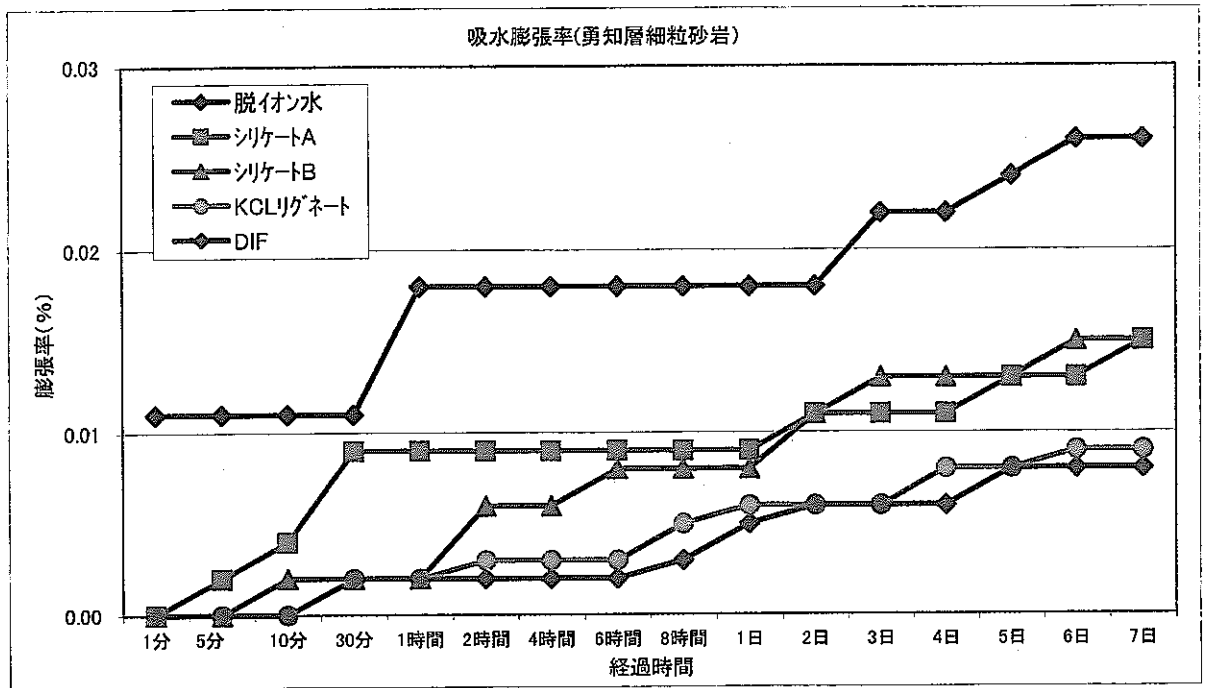


図 2.5.2-3 勇知層細粒砂岩の膨張率変化

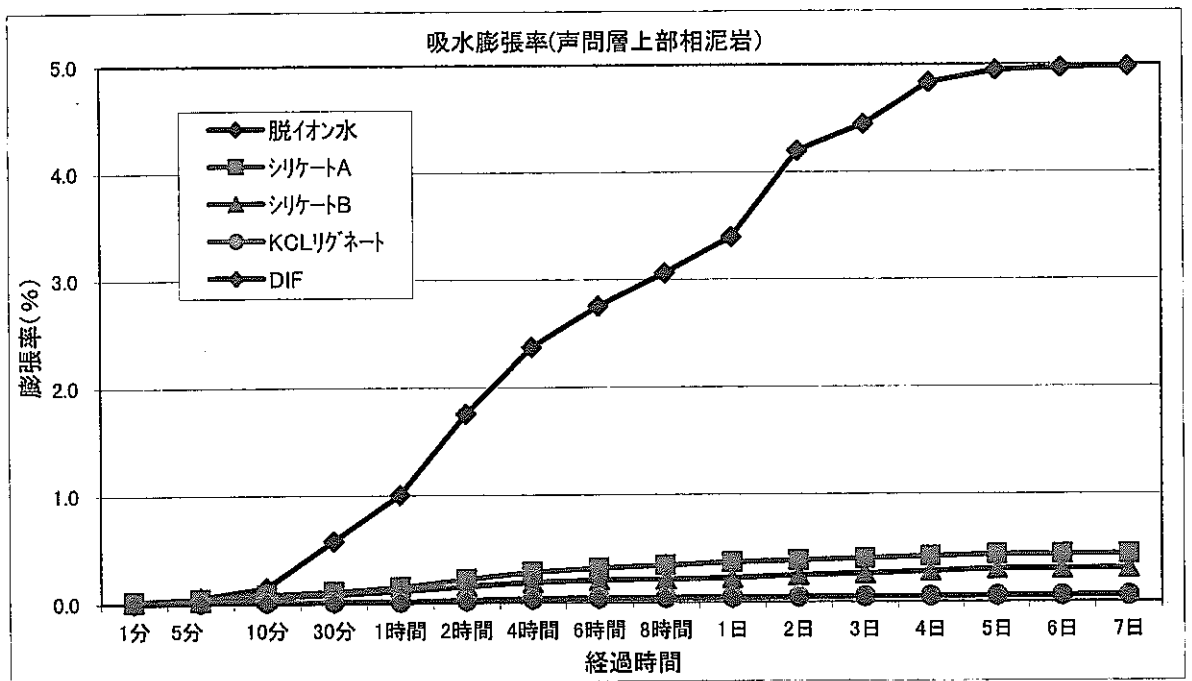


図 2.5.2-4 声間層上部相泥岩の膨張率変化

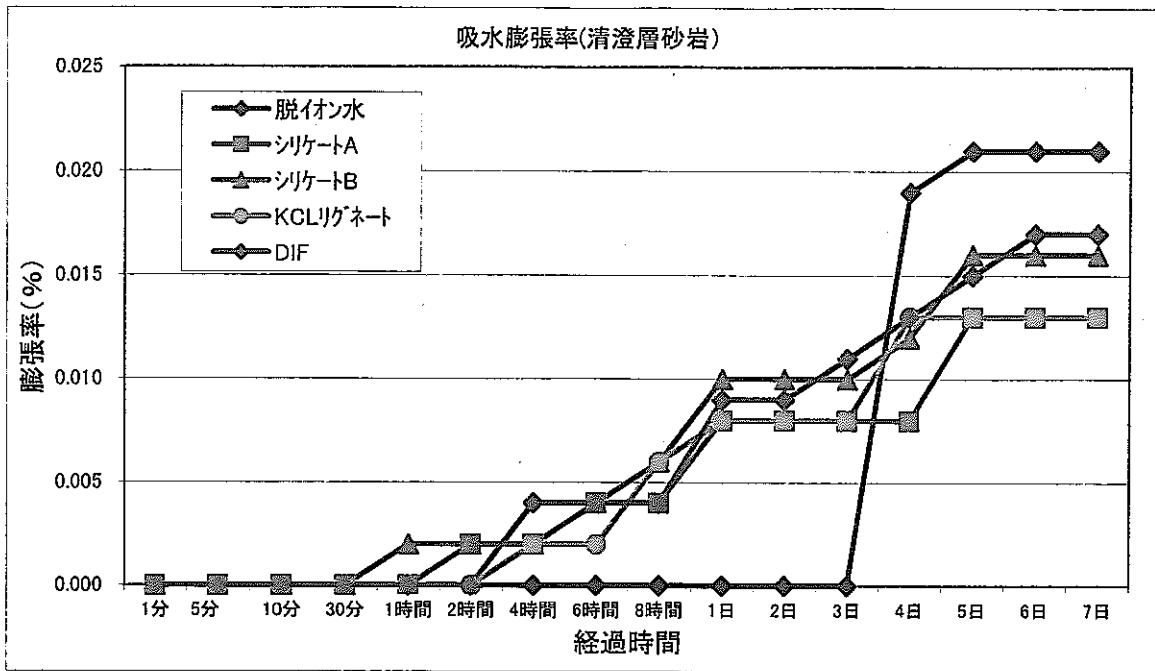


図 2.5.2-5 清澄層砂岩の膨張率変化

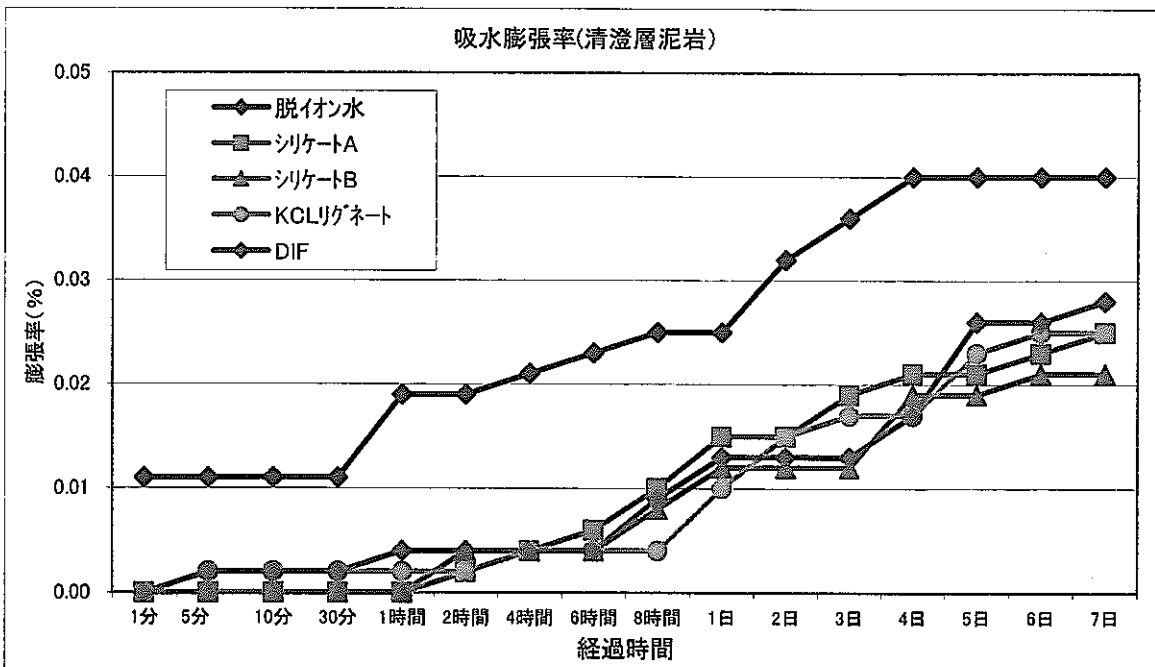


図 2.5.2-6 清澄層泥岩の膨張率変化

(c) 膨潤圧試験の結果

勇知層細粒砂岩の膨潤圧変化を図 2.5.2-7 に示し、図 2.5.2-8 に声問層上部相泥岩の膨潤圧変化を示す。また、清澄層砂岩の膨潤圧変化を図 2.5.2-9 に示し、清澄層泥岩の膨潤圧変化を図 2.5.2-10 に示す。

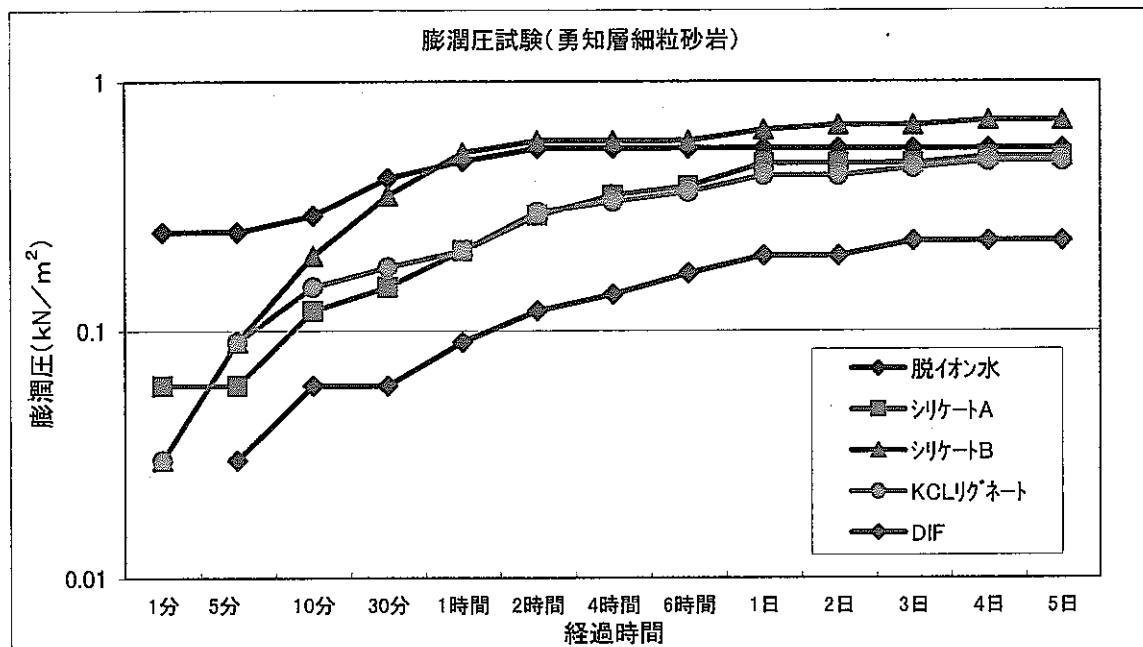


図 2.5.2-7 勇知層細粒砂岩の膨潤圧変化

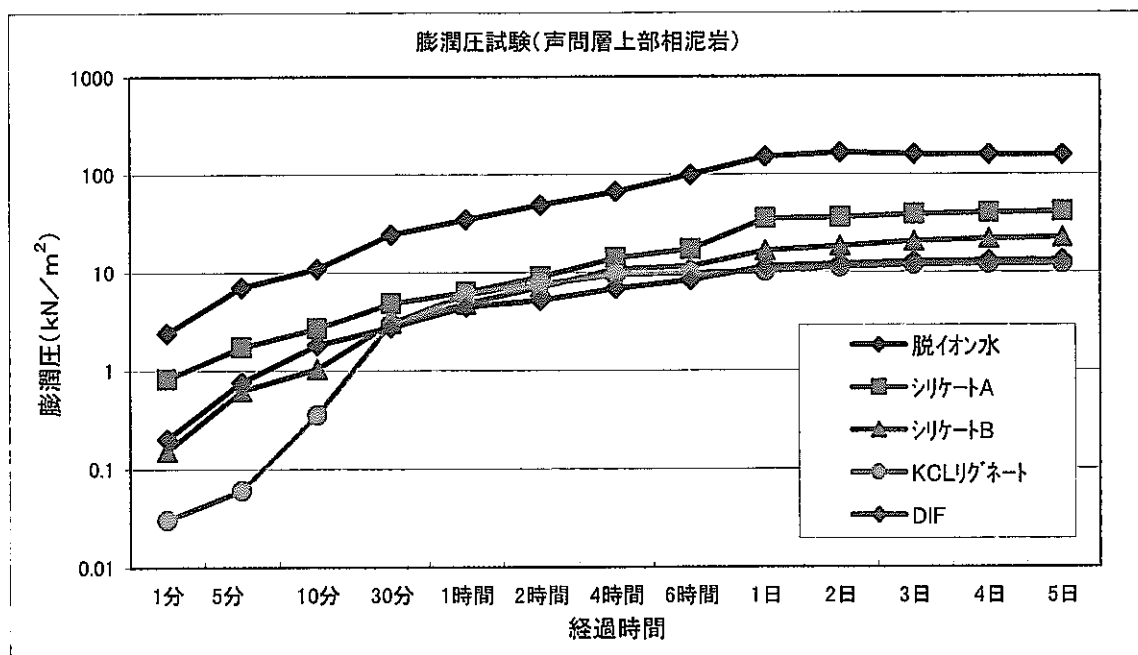


図 2.5.2-8 声問層上部相泥岩の膨潤圧変化

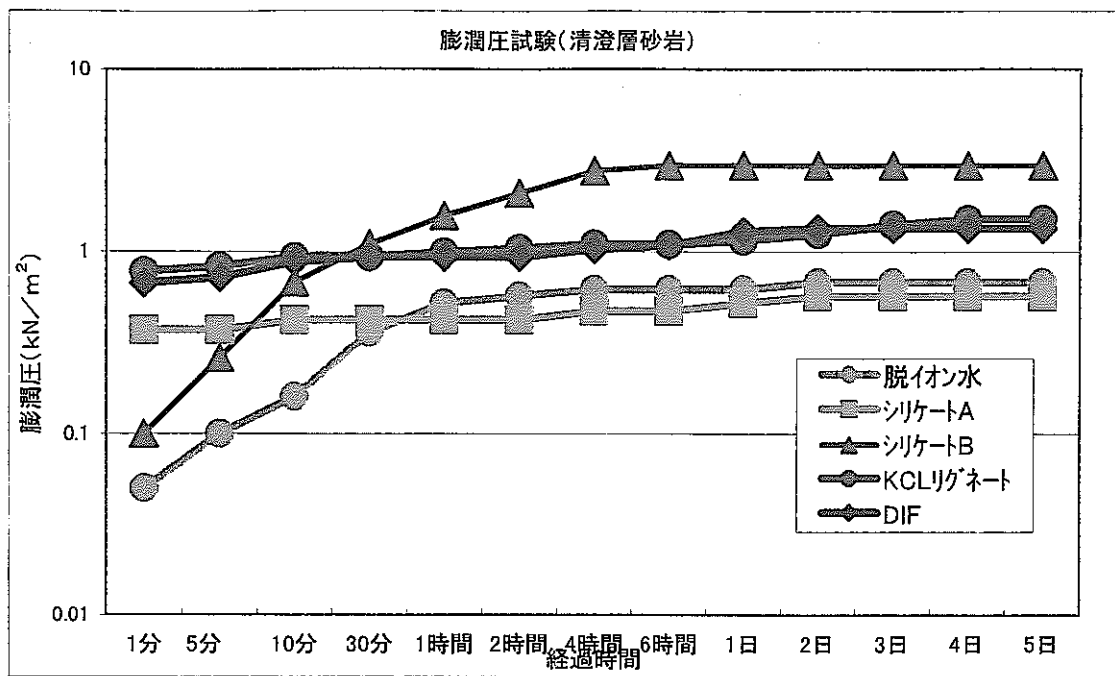


図 2.5.2-9 清澄層砂岩の膨潤圧変化

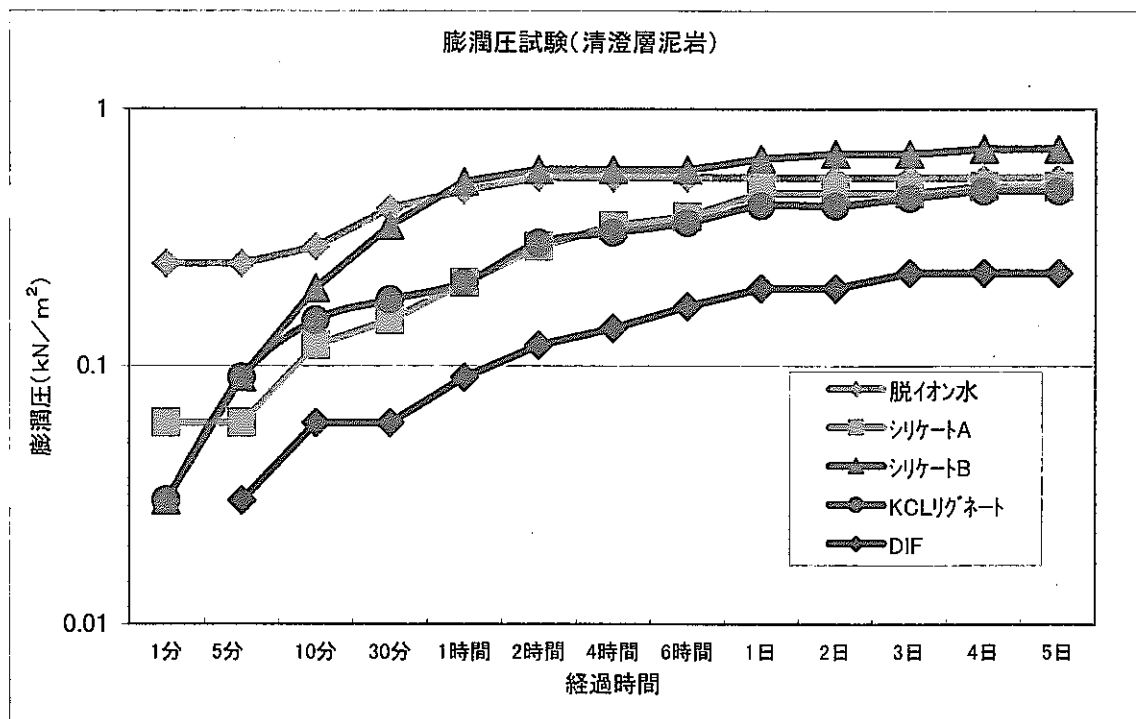


図 2.5.2-10 清澄層泥岩の膨潤圧変化

(d) 吸水膨張試験および膨潤圧試験結果の解釈

吸水膨張率および膨潤圧測定結果を表 2.5.2-1 に示す。

表 2.5.2-1 吸水膨張率および膨潤圧測定結果

岩石名	項目	脱イオン水	シケート A	シケート B	KCL-リグネート	DIF
勇知層 細粒 砂岩	密度(g/cm ³)	1.920	1.908	1.729	1.784	1.896
	含水量(%)	18.9	18.5	18.6	13.2	18.4
	膨張率(%)	0.026	0.015	0.015	0.009	0.008
	膨潤圧(kN/m ²)	0.54	0.50	0.70	0.48	0.23
声問層 上部相 泥岩	密度(g/cm ³)	1.920	1.958	1.757	1.738	1.845
	含水量(%)	10.8	15.5	11.4	8.6	24.3
	膨張率(%)	4.981	0.440	0.308	0.057	0.058
	膨潤圧(kN/m ²)	157.23	41.05	22.47	12.08	13.18
清澄層 砂岩	密度(g/cm ³)	1.854	1.818	1.764	1.840	1.846
	含水量(%)	17.0	21.1	20.5	20.5	20.0
	膨張率(%)	0.021	0.013	0.016	0.013	0.017
	膨潤圧(kN/m ²)	0.68	0.57	2.97	1.51	1.34
清澄層 泥岩	密度(g/cm ³)	1.786	1.906	1.884	1.845	1.712
	含水量(%)	20.8	16.5	16.6	17.0	17.8
	膨張率(%)	0.040	0.025	0.021	0.025	0.028
	膨潤圧(kN/m ²)	0.41	1.86	2.28	0.93	0.57

吸水膨張率も膨潤圧も声問層上部相泥岩の変化が他の岩石の変化よりも 2~3 桁大きく
 になっている。特に脱イオン水に対する変動が著しい。しかしながら、KCL-リグネート泥水
 および DIF では他の岩石よりも若干値は大きいとはいうものの、膨張率は KCL-リグネー
 ト泥水で 0.057% (他の岩石は 0.009~0.025%)、DIF で 0.058% (他の岩石は 0.008~0.028%)
 とオーダーが同等になってきている。幌延泥岩の膨張率と膨潤圧は脱イオン水と 4 種の泥
 水中の比較では KCL-リグネート泥水が最小値を示し、最も抑制効果が期待できる。声問
 層上部相泥岩のような膨潤性が著しい岩石を掘削するには、KCL-リグネート泥水が最も適
 しているという結果となった。声問層上部相泥岩以外の岩石については、脱イオン水を含
 む 5 種の流体では、確かに脱イオン水の膨張率がどの岩石でも最高値を示しているとはい
 うものの、極端な膨張率や膨潤圧の差は認められない。

(2) 浸水崩壊度試験および岩石と泥水との MBC 試験

(a) 試験概要

浸水崩壊度試験は、浸漬による岩石の形態変化からその岩石の有する結合の程度（崩壊のしやすさ）を簡便に知ろうとするものであり、掘削工事の計画立案における定性的な試料となるものである。今回は泥水浸透試験で作製した泥水および脱イオン水（計 5 種類）に岩石試料を浸漬した。試料は浸漬前、1、3、5、7 日間の浸漬後の状況を観察し、写真撮影した。なお、7 日間浸漬後岩石試料の表面に付着した流体を軽く拭き取り、重量を秤量し、浸漬前と比較した。従って極端な重量増加は水和膨潤、あるいは亀裂内に流体を含むことを示す。さらに、浸漬した平面方向から 50～60kPa（指で軽く押した強さとして：コア採取時に硬さを記録する方法として採用されている）、30 秒間の一軸圧縮した結果を観察し、写真撮影した。

粘土懸濁液中に塩類溶液を加えると粘土粒子は溶液中から陽イオンを吸着し、同時に今まで粘土粒子に吸着されていた当量の陽イオンを溶液中に出す。この化学変化を塩基交換または塩基置換という。陽イオン交換容量（CEC：Cation Exchange Capacity）は、正式には pH 値 7.0 において交換吸着された塩基の化学当量で表される。しかしながら、今回は泥水とに岩石を混合させた場合のイオン交換容量を把握する目的であるため、試験泥水の pH 値などは 7.0 に調製するのは不可能である。そこで今回は CEC の簡便法として API RP 13B-1, Section 6 の MBC（Methylene Blue Capacity：メチレンブルー吸着容量）試験を採用し、試験を実施することとした。塩基交換は粘土の持つ最も重要な特色の一つであり、特に含有モンモリロナイトの特性を知るための一つの方法として泥岩の塩基交換容量を把握することは重要である。図 2.5.2-11 に MBC 測定に関する試料調整の手順を示す。

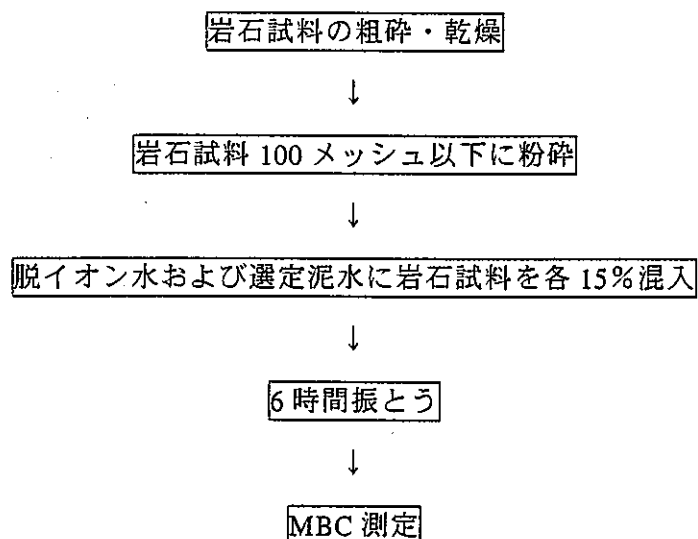


図 2.5.2-11 MBC 測定に関する試料調整の手順

(b) 浸水崩壊度試験結果

表 2.5.2-2 に供試岩石の浸水崩壊度試験状況の結果を示す(表 2.5.2-2 (1)に各種泥水における清澄層泥岩、清澄層砂岩の浸漬状況、また表 2.5.2-2 (2)に各種泥水における声問層上部相泥岩、勇知層細粒砂岩の浸漬状況をそれぞれまとめた)。また、巻末に浸水崩壊度試験の状況写真を示す。

- ① 清澄層泥岩、清澄層砂岩および勇知層細粒砂岩の 3 種供試岩石は、脱イオン水および 4 種泥水に 7 日間浸漬した結果、崩れおよび亀裂の発生がなかった。さらに浸漬した岩石は、何れも一軸圧縮後、形状変化が認められなかった。浸漬前後の重量は近似している。

シリケート泥水 A およびシリケート泥水 B に浸漬した房総泥岩、房総砂岩表面上に析出した白色物は、シリケートと岩石中のカルサイト (CaCO_3) の反応によるカルシウムシリケートの生成と推定される。

- ② 浸水崩壊度試験において最も顕著な形状変化が観察された岩石は、声問層上部相泥岩であった。

脱イオン水では、浸漬 1 日目で崩れて原形が失われた。その後の浸漬日数でもほぼ同様であった。即ち、声問層上部相泥岩は脱イオン水に対して、一日足らずで水和・膨潤し崩れることが確認された。また、浸漬液である脱イオン水が褐色を呈した。これはコア採取時の泥水(リグニン、リグナイトを含む調泥剤の使用)のコアからの溶出が原因と考えられる。選定 4 種泥水に浸漬した声問層上部相泥岩は、一筋或いは二筋の亀裂が 1 日目或いは 3 日目で発生し、浸漬終了まで同様な状態が認められた。但し、原形が保持されている。

浸水崩壊度試験の全期間に亘る結果では、勇知層細粒砂岩、清澄層砂岩および清澄層泥岩に関しては、脱イオン水および 4 種の泥水で 7 日間の試験中亀裂も発生せずに原型を保持していた。

一軸圧縮後の亀裂の発生は、シリケート泥水 A が特に顕著であった。他の KCL-リグネート泥水、シリケート泥水 B および DIF の 3 種泥水は、声問層上部相泥岩に対して、ほぼ同程度の浸水崩壊度を示し、優劣の評価が困難であった。

声問層上部相泥岩に関する浸水崩壊度試験は、多試料を用いた平均的な結果でないことから、泥水の選定に関して注意が必要である。

表 2.5.2-2(1) 各種泥水における清澄層泥岩および砂岩の浸水崩壊度状況

岩石種類	流体種類	浸漬日数と状況観察					一軸圧縮後 (*1)	重量変化(*2) (上段:浸漬前) (下段:浸漬後)
		浸漬直後	1日間	3日間	5日間	7日間		
清澄層 泥岩 (浸漬前: 水分 13%)	脱イオン水	崩れ, 軋みなし	同直後、形状 に変化なし	形状に変化 なし	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	24.3 24.7
	KCL-リグネ ート泥水	流体が不透 明のため目 視できず	崩れ, 軋みなし	形状に変化 なし 同1日間	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	25.2 25.8
	シリケート 泥水 A	流体が不透 明のため目 視できず	崩れ, 軋みなし 表面に白色 物析出	形状に変化 なし 同1日間	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	24.2 24.5
	シリケート 泥水 B	流体が不透 明のため目 視できず	崩れ, 軋みなし 表面に白色 物微量析出	形状に変化 なし 同1日間	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	24.4 24.6
	テルナイト DIF	流体が不透 明のため目 視できず	崩れ, 軋みなし 表面の白色 物は増加	形状に変化 なし 同1日間	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	24.5 25.1
清澄層 砂岩 (浸漬前: 水分 9%)	脱イオン水	崩れ, 軋みなし	同直後、形状 に変化なし	形状に変化 なし	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	22.1 22.8
	KCL-リグネ ート泥水	流体が不透 明のため目 視できず	崩れ, 軋みなし	形状に変化 なし 同1日間	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	24.3 24.8
	シリケート 泥水 A	流体が不透 明のため目 視できず	崩れ, 軋みなし 表面に白色 物析出	形状に変化 なし 同1日間	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	22.4 22.9
	シリケート 泥水 B	流体が不透 明のため目 視できず	崩れ, 軋みなし 表面に白色 物微量析出	形状に変化 なし 同1日間	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	20.8 20.7
	テルナイト DIF	流体が不透 明のため目 視できず	崩れ, 軋みなし 表面の白色 物は増加	形状に変化 なし 同1日間	形状に変化 なし 同3日間	形状に変化 なし 同5日間	崩れ, 軋み発生な し 同7日間	25.7 26.1

注) * 1 = 浸漬した上表面方向から 50~60kPa(指で押した強さとして)、30 秒間の一軸圧縮したことを示す。

* 2 = 試験前後の岩石試料の表面に付着した流体をかるくふき取り重量を秤量した。極端な重量増加は水和或いは軋み内に流体を含むことを示す。

表 2.5.2-2(2) 各種泥水における声問層上部相泥岩および勇知層細粒砂岩の浸水崩壊度状況

岩石種類	流体種類	浸漬日数と状況観察					一軸圧縮後 (*1)	重量変化(*2) (上段:浸漬前) (下段:浸漬後)
		直後	1日間	3日間	5日間	7日間		
声問層上部相泥岩 (浸漬前: 水分 11%)	脱イオン水	崩れ,キツなし	崩れて原形なし,液相部淡灰色	崩れた状態液相部カッ色を呈す	崩れた状態同3日間	崩れた状態同5日間	水和した多数の小片状となる	20.0 25.5 沈降部含まず
	KCL-リグネート泥水	流体が不透明のため目視できず	崩れ,キツなし形状変化なし	平面一筋キツ発生,形状保つ	3日間目と同様な状態	5日目と同様な状態	側面に二筋キツ発生,平面一筋のキツ,原形有	22.4 25.4
	シリケート泥水A	流体が不透明のため目視できず	平側面にキツ発生,やや形状保つ	平側面にキツ発生,やや形状保つ	平側面にキツ発生,3間目と同様な状態	平側面にキツ発生,キツ目大きくなる	平側面にキツ多数発生	22.8 27.8
	シリケート泥水B	流体が不透明のため目視できず	平面一筋キツ発生,形状保つ	平面一筋キツ発生,1日間目と同状態	3日間目と同様な状態	5日間目と同様な状態	一筋のキツは側面を通り低部まで到達	23.7 27.0
	テルナイトDIF	流体が不透明のため目視できず	平面一筋キツ発生,形状保つ	平面一筋キツ発生,1日間目と同状態	3日間目と同様な状態	5日間目と同様な状態	一筋のキツは低部まで到達	20.1 23.2
勇知層細粒砂岩 (浸漬前: 水分 14%)	脱イオン水	崩れ,キツなし	同直後,形状に変化なし	形状に変化なし	形状に変化なし同3日間	形状に変化なし同5日間	崩れ,キツ発生なし同7日間	30.5 30.4
	KCL-リグネート泥水	流体が不透明のため目視できず	崩れ,キツなし	形状に変化なし同1日間	形状に変化なし同3日間	形状に変化なし同5日間	崩れ,キツ発生なし同7日間	35.3 35.8
	シリケート泥水A	流体が不透明のため目視できず	崩れ,キツなし	形状に変化なし同1日間	形状に変化なし同3日間	形状に変化なし同5日間	崩れ,キツ発生なし同7日間	30.0 30.6
	シリケート泥水B	流体が不透明のため目視できず	崩れ,キツなし	形状に変化なし同1日間	形状に変化なし同3日間	形状に変化なし同5日間	崩れ,キツ発生なし同7日間	29.1 29.8
	テルナイトDIF	流体が不透明のため目視できず	崩れ,キツなし表面の白色物はタカルF	形状に変化なし同1日間	形状に変化なし同3日間	形状に変化なし同5日間	崩れ,キツ発生なし同7日間	37.1 37.6

注) *1 = 浸漬した上表面方向から 50~60kPa(指で押した強さとして)、30秒間の一軸圧縮したことを示す。

*2 = 試験前後の岩石試料の表面に付着した流体をかるくふき取り重量を秤量した。極端な重量増加は水和或いはキツ内に流体を含むことを示す。

(c) MBC 測定結果

泥水との MBC 試験結果を表 2.5.2-3 に MBC 試験結果を示す。

表 2.5.2-3 MBC 試験結果

試験流体	MBC 値 (ml/ml 泥水)				
	試験流体 の MBC 値	清澄層 泥岩	清澄層 砂岩	声問層上 部相泥岩	勇知層細 粒砂岩
脱イオン水	0	1.50	1.50	2.50	1.00
KCL-リグネット泥水	1.75	2.50	2.50	2.50	2.25
シリケート A 泥水	0	1.25	1.25	1.25	1.00
シリケート B 泥水	0	1.25	1.25	1.25	1.00
テルナイト DIF	0	1.25	1.25	1.25	1.00

参考までに各供試岩石の CEC 値 (meq/100gr 試料) は、以下の通りであった。

清澄層泥岩 10.5

清澄層砂岩 11.5

声問層上部相泥岩 18.0

勇知層細粒砂岩 6.0

塩基置換容量 (CEC; 単位 meq/100g 岩石) は、通常石油掘削井などで簡便法としてメチレンブルー容量 (MBC) で表現している。MBC 値は地層 (コア) の粘土鉱物量や泥水中に混入したドリルソリッドの活性度 (水和・膨潤性) の尺度として求められる。

頁岩・泥岩における平均的な CEC 値と活性度の関係を以下に示す。

- ・ 高膨潤性地層 (主成分スメクタイト) : 20~40meq/100gr 試料
- ・ 低膨潤性/水感性地層 (スメクタイト/他の粘土鉱物互層) : 15~30meq/100gr 試料
- ・ 低膨潤性及び低粘土含有量地層 : 7~15meq/100gr 試料

供試岩石の CEC 値は、声問層上部相泥岩(18.0) > 勇知層細粒砂岩(11.5) > 清澄層泥岩(10.5) > 清澄層砂岩(6.0:meq/100gr 試料) の順であった。よって、声問層上部相泥岩が、供試岩石の中で水和膨潤性の高い泥岩である。

供試岩石を KCL-リグネット泥水に浸漬して測定した MBC 試験値は、声問層上部相泥岩、清澄層砂岩、清澄層泥岩を浸漬した場合、1.75ml/ml から 2.50ml/ml へ MBC 値は上がった。これは供試岩石の CEC 値から膨潤性のある泥岩が混入されたため、つまり泥水中のモンモリロナイトなどの粘土の総量が増加し、全体的に塩基交換容量が増加したためと考えられる。一方、勇知層細粒砂岩は MBC 値の上昇が 2.25ml/ml と他の岩石よりも小さい。これは CEC 値からモンモリロナイトなどの粘土含有量が他の岩石よりも少ない岩石であるためである。

と考えられる。

声問層上部相泥岩は脱イオン水では岩石の崩壊が著しいため、MBC 値の変化でも 0ml/ml から 2.50ml/ml (KCL-リグネート泥水と同程度まで) 急激に上昇している。しかしながら、泥水に浸漬したものについては、KCL-リグネート泥水で 2.50ml/ml、他の泥水で 1.25ml/ml と同様の値を示している。また、勇知層細粒砂岩以外の岩石では各泥水の MBC 値の変化は同等となっており、今回の試験では各泥水間の水和膨潤抑制効果の比較はできなかった。

2.5.3 岩石と泥水の室内試験のまとめと評価

(1) 岩石と泥水の室内試験のまとめ

(a) 泥水浸透試験

① シリケート泥水の浸透量は KCL-リグネート泥水および DIF の浸透量よりも一桁少ない結果が得られた。これは、シリケート泥水が岩石の孔壁に密着しシリケートの薄膜を形成し、薄膜形成後の泥水の浸透を抑えているためと考えられる。

② KCL-リグネート泥水と DIF は、試験後の試料断面の目視観察によると泥水の固形成分が岩石マトリックス中に浸透した形成は認められなかった。KCL-リグネート泥水と DIF は比較的浸透量が多く、厚い泥壁を構成していた。従って、泥水中の固形成分は泥壁を構成し、泥水中の水分のみが脱水し岩石マトリックス中に浸透しているものと考えられる。

③ 供試体の断面観察から浸透試験で形成された全試験泥水による泥壁はほぼ均一に孔壁をコーティングしていることがわかった。一部例外があるものの泥壁の厚さは薄い方から順に

シリケート泥水 B ≤ シリケート泥水 A < DIF < KCL-リグネート泥水

となり、「選定した泥水の比較試験」における API 脱水試験による泥壁の厚さ測定の結果と調和的であった。

④ 砂岩と泥岩の岩質による差は、今回の結果を見る限り砂岩の方が泥岩よりも泥壁が薄い傾向があった。一般に、砂岩は泥岩よりも透水性が良いため、泥水中の固形成分を泥壁として岩石の表面に残し、脱水分は岩石の中に浸透するため、泥岩よりも砂岩の方が泥壁は厚くなるはずであるが、相反する結果となった。これは、「岩石の基礎的物性試験」における「見掛比重および岩水比・吸水率・含水比・有効間隙率・飽和度」測定の結果から、試験に供した清澄層泥岩の飽和度が 82%、対して清澄層砂岩の飽和度が 95%と、清澄層泥岩の飽和度が清澄層砂岩よりも低かったため、濾過水が浸透しやすかったものと考えられる。但し、この結果は各 1 試料の比較であるため、全ての清澄層岩石について普遍的結果であるとは限らない。

⑤ 泥水の液相中の溶存化学成分の分析結果では、シリケート泥水が KCL-リグネート泥水や DIF よりも浸透試験後に試験孔に残留した泥水の液相の溶存成分の変化が小さい傾向にあった。これはシリケート泥水が孔壁表面にシリケート薄膜を形成し、岩石と泥水の反応が抑えられるためであると考えられる。

⑥ シリケート泥水 A、B 間の比較では、シリケート泥水 B が A に比較して浸透試験後

に試験孔に残留した泥水の液相の溶存成分の変化が小さい傾向にあった。これは、シリケート泥水 A が泥化抑制剤である KCl が添加されていないが、シリケート泥水 B は KCl が添加されており、溶存成分がシリケート泥水 B の方がシリケート泥水 A より高濃度となっているため、泥水の成分濃度がより大きくなる岩石から泥水への化学成分の溶脱がシリケート泥水 A よりも起こりにくかったためと考えられる。

- ⑦ 回復試験における泥壁の厚さの比較では、シリケート泥水は A、B 双方共に除去できていることが示された。KCL-リグネート泥水は、回復試験では泥壁は多少は薄くなるものの、1mm 以上の厚さで残留する。DIF は洗浄水の流出口付近は除去されるもののその他は除去されなかった。但し、DIF は実際の石油井の生産時には地層内から孔壁にバックプレッシャーがかかるため剥がれやすいものであり、更に塩酸 (HCl) を循環させることによりブリッジング剤であるタンカル (CaCO_3) を除去できる。
- ⑧ 回復試験では砂岩よりも泥岩の方が洗浄水の pH の低下に時間がかかる傾向が認められた。また、各泥水の比較ではシリケート泥水が KCL-リグネート泥水および DIF よりも洗浄時間がかかる傾向が認められた。KCL-リグネート泥水および DIF は孔壁に付着した泥壁が除去されず、泥壁表面のみ洗浄水が接触している。そのため泥壁表面のみの NaOH や KOH が洗浄されただけなので比較的短時間で pH が低下したものと考えられる。一方シリケート泥水は A も B もある程度洗浄によって泥壁が除去されている。従って、洗浄水中に溶け出す泥壁が KCL-リグネート泥水や DIF よりも多いので、pH の低下に時間がかかったものと考えられる。
- ⑨ 回復試験における洗浄水の溶存成分の分析では、Si を除くとシリケート泥水が概ね検出限界以下の濃度を示し、良好な洗浄結果となった。KCL-リグネート泥水と DIF については、シリケート泥水と異なり Si は検出限界以下であるが、他の成分については概ね検出された。特に KCL-リグネート泥水の洗浄水の色は最後まで無色になることはなく、採取試料は淡褐色を呈していた。

(b) 吸水膨張率および膨潤圧測定

- ① 吸水膨張率も膨潤圧も声問層上部相泥岩の変化が勇知層細粒砂岩、清澄層砂岩・泥岩の変化よりも 2~3 桁大きくなっている。特に脱イオン水に対する変動が著しい。しかしながら、KCL-リグネート泥水および DIF では声問層上部相の膨張率は他の勇知層細粒砂岩、清澄層砂岩・泥岩よりも若干値は大きいものの、オーダーが同等になった。
- ② 声問層上部相泥岩の膨張率と膨潤圧は脱イオン水と 4 種の泥水中の比較では KCL-

リグネート泥水が最小値を示し、最も抑制効果が期待できる。幌延泥岩のような膨潤性が著しい岩石を掘削するには、KCL-リグネート泥水が最も適しているという結果となった。

- ③ 声問層上部相泥岩以外の岩石については、脱イオン水および4種の泥水で比較すると、脱イオン水の膨張率が勇知層細粒砂岩および清澄層砂岩・泥岩のどの岩石でも最高値を示してはいるが、泥水による結果と比較して、極端な膨張率や膨潤圧の差は認められなかった。つまり、声問層上部相泥岩以外の岩石については、清水による掘削の可能性も示唆される。

(c) 浸水崩壊度試験およびMBC試験

- ① 清澄層泥岩、清澄層砂岩および勇知層細粒砂岩は、脱イオン水および4種泥水に7日間浸漬した結果、崩れおよび亀裂の発生がなかった。さらに浸漬した岩石は、何れも一軸圧縮後、形状変化が認められなかった。浸漬前後の重量に大きな変化はなかった。
- ② 浸水崩壊度試験において最も顕著な形状変化が観察された岩石は、声問層上部相泥岩であった。脱イオン水では、浸漬1日目で崩れて原形が失われた。即ち、声問層上部相泥岩は脱イオン水に対して、一日足らずで水和・膨潤し崩れることが確認された。また、浸漬液である脱イオン水が褐色を呈した。これはコア採取時の泥水(リグニン、リグナイトを含む調泥剤の使用)のコアからの溶出が原因と考えられる。
- ③ 4種の泥水に浸漬した声問層上部相泥岩は、一筋或いは二筋の亀裂が1日後あるいは3日後に発生し、浸漬終了まで同様な状態が認められた。但し、原形は保持されていた。
- ④ 勇知層細粒砂岩、清澄層砂岩および清澄層泥岩に関しては、脱イオン水および4種の泥水で7日間の試験中亀裂も発生せずに原型を保持していた。
- ⑤ 一軸圧縮後の亀裂の発生は、シリケート泥水Aが特に顕著であった。他のKCL-リグネート泥水、シリケート泥水BおよびDIFの3種泥水は、声問層上部相泥岩に対して、ほぼ同程度の浸水崩壊度を示し、優劣の評価が困難であった。
- ⑥ 供試岩石のCEC値は、声問層上部相泥岩(18.0)>清澄層砂岩(11.5)>清澄層泥岩(10.5)>勇知層細粒砂岩(6.0:meq/100gr 試料)の順であった。よって、幌延泥岩が、供試岩石の中で水和膨潤性の高い泥岩であり、これは吸水膨張率試験、膨潤圧試験および浸水崩壊度試験と調和的な結果であった。

- ⑦ 供試岩石を KCL-リグネート泥水に浸漬して測定した MBC 試験値は、声問層上部相泥岩、清澄層砂岩、清澄層泥岩を浸漬した場合、1.75ml/ml から 2.50ml/ml に MBC 値が上昇した。これは供試岩石の CEC 値から膨潤性のある泥岩が混入されたため、つまり泥水中のモンモリロナイトなどの粘土の総量が増加し、全体的に塩基交換容量が増加したためと考えられる。一方、勇知層細粒砂岩は MBC 値の上昇が 2.25ml/ml と他の岩石よりも小さい。これは CEC 値からモンモリロナイトなどの粘土含有量が他の岩石よりも少ない岩石であるためであると考えられる。
- ⑧ 声問層上部相泥岩は脱イオン水では岩石の崩壊が著しいため、MBC 値の変化でも 0ml/ml から 2.50ml/ml (KCL-リグネート泥水と同程度まで) 急激に上昇している。しかしながら、泥水に浸漬したものについては、KCL-リグネート泥水で 2.50ml/ml、他の泥水で 1.25ml/ml と同様の値を示している。また、勇知層細粒砂岩以外の岩石では各泥水の MBC 値の変化は同等となっており、今回の試験では各泥水間の水和膨潤抑制効果の比較はできなかった。

(2) 泥水の評価

岩石と泥水の室内試験結果に基づく試験泥水の比較を表 2.5.3-1 に示す。

表 2.5.3-1 には今回の室内試験結果から予想される地下水理への影響、地下水の地球化学への影響、岩石の地球化学への影響について評価した。これら 3 種の特性に与える影響が最も少ないと考えられるのは、シリケート泥水、特に KCl を添加しているシリケート泥水 B が有効と予想される。これは、今回の室内試験結果および本報告 2.2.2(2)で既述したように、シリケート泥水がまず孔壁にシリケート薄膜を構成し、さらに細かな割れ目までシリケート薄膜で充填すると期待されるためである。そのため、勇知層細粒砂岩や清澄層泥岩および砂岩のように、膨潤性が著しくない岩石の場合はシリケート泥水、場合によっては清水（その掘削地点の地層水）で掘削するのが地下水理、地下水の地球化学および岩石の地球化学への影響を最も小さくできる掘削流体であると判断される。

膨潤性岩石の掘削に対する安全性については、KCL-リグネート泥水と DIF が最も信頼性に富む掘削流体である。石油・ガスの胚胎が予想される地域において掘削されている石油公団の基礎試錐における掘削流体は KCL-リグネート泥水が一般的である（次章、「3. 石油・ガスがある場合の掘削工法の調査」参照）。一方、DIF は、石油生産ゾーンの掘削に用いられるのが通常の使用法であり、更に DIF は開発されてからまだ日が浅いため、使用実績がまだ少ない状況である。DIF を使用した掘削実績は、後述する 3 章の「石油・ガスがある場合の掘削工法の調査」でも見いだせなかった。但し、今回の試験結果から膨潤性岩石の掘削には強固な泥壁形成による孔壁の膨潤や崩壊の抑制効果が期待できるので、今後の使用実績の調査などが必要と考えられる。

従って、堆積岩地域の掘削には特定の掘削流体 1 種類に決めるのではなく、それぞれの特性を生かし、併用するのが現実的であると考えられる。例えば、以下のような方針をたて、掘削計画を立案するのが妥当と考えられる。

- ① 試錐孔を利用した試験対象とはならない区間およびケーシングで覆ってしまうような区間は KCL-リグネート泥水で掘削する。
- ② 試験対象区間の掘削において、もし、その区間が幌延の勇知層砂岩、房総半島清澄地域泥岩・砂岩のように清水（地層水）でもある程度の孔壁の自立が確実な区間は清水で掘削する。
- ③ 試験対象区間の掘削において、もし、孔壁が自立する時間が十分でないような場合はシリケート泥水を使用する。
- ④ 試験対象区間の掘削において、もし、シリケート泥水を使用しても孔壁の自立が期

待できないようであれば、再び KCL-リグネート泥水を使用する。

- ⑤ DIF は透水試験予定区間等にスポット的に使用し、パッカー設置後に DIF を酸などで洗淨、除去する方法を考える。

表2.5.3-1 岩石と泥水の室内試験結果に基づく試験泥水の比較

	脱イオン水	KCL-リグネート 泥水	シリケート泥水A	シリケート泥水B	DIF
泥壁の形成厚さ		厚い	薄い	薄い	厚い
泥水浸透試験後の 泥水の溶存成分濃 度変化の度合い		大	比較的小	小	比較的小
回復試験後の泥壁の 剥離性		剥がれにくい	比較的剥がれ やすい	比較的剥がれ やすい	*剥がれにくい
洗浄水の溶存成分 濃度の比較		比較的多い	少ない	少ない	比較的多い
洗浄水の色		淡褐色	無色	無色	無色
膨張率および膨潤圧 試験による膨潤性岩 石の抑制効果	期待できない	大いに期待でき る	ある程度期待でき る	ある程度期待でき る	大いに期待でき る
浸水崩壊度試験によ る膨潤性岩石の崩壊 抑制効果	期待できない	大いに期待でき る	ある程度期待でき る	ある程度期待でき る	大いに期待でき る
浸水崩壊度試験後 の膨潤性岩石の耐圧 縮性効果	期待できない	大いに期待でき る	あまり期待でき ない	ある程度期待でき る	大いに期待でき る
MBC試験による水和 膨潤抑制効果		今回の試験では評価できなかった			
地下水理への影響 (予想)	無 (但し、地層水を使 用する場合)	大	小	小	中
地下水の地球化学 への影響 (予想)	無 (但し、地層水を使 用する場合)	大	小	小	中
岩石の地球化学への 影響 (予想)	無 (但し、地層水を使 用する場合)	大	小	小	中
膨潤性の岩石におけ る掘削の安全性	適さない	安全性大	あまり期待でき ない	ある程度期待でき る	安全性大

*DIFはバックプレッシャーが掛かると剥がれやすい。また、HClなどの酸で処理すると溶解する。今回はこれらの試験は行われていないので、あくまでも脱イオン水での洗浄結果であることに注意。

(3) 今後の課題

今年度の調査・試験では、堆積軟岩地域における試験掘削に現状で最も有効と考えられる KCL-リグネート泥水、シリケート泥水および DIF の特性について検討した。今後は今年度選定した泥水の特性の把握を更に精緻なものとし、実用化に近づけるために、以下に示す課題の検討が必要である。

- ① 今回は 4 種類の泥水で試験を実施したが、KCL-リグネート泥水、DIF については、一般的な標準組成の泥水を各 1 種類を試験に供した。今回試験に供した泥水は、今回の試験結果から膨潤等の抑制効果が確認され、試験岩石（勇知層細粒砂岩、声間層上部相泥岩、清澄層砂岩および泥岩）には適合したものと言える。但し、今後は泥水の組成の違いが岩石に与える影響を把握するために成分比を変えた浸透試験も実施する必要がある。例えば KCL-リグネート泥水を使用した掘削中に逸水が発生するとさらに低濃度に調泥したり、また逆に地層からの流体の噴出がある場合はバライトなどの添加により高比重に調泥することもある。このような成分の変化に対する岩石への影響の違いの把握が必要である。更に DIF はタンカルの粒度がもっと粗粒のものも用意されており、それらの効果の違いも検討する必要がある。
- ② シリケート泥水については、M-I 社および Baroid 社等が出した文献を参考とした標準組成のもの（シリケート泥水 A）と膨潤抑制効果のある KCl を添加したもの（シリケート泥水 B）の 2 種類を試験したが、同様に成分比を変えた試験数を増やす必要がある。
- ③ 今回の供試体としては勇知層細粒砂岩、声間層上部相泥岩（以上幌延町で掘削した D-1 孔コア）、清澄層砂岩および泥岩（以上房総半島清澄地域の露頭岩石）の計 4 種の岩石での試験であった。これらの岩石の地層は上部鮮新統～下部更新統で、一軸圧縮強度が $50\sim 200\text{kgf/cm}^2$ であり、比較的新しく軟質な堆積岩である。従って、今回の試験結果はいわゆる「堆積軟岩」の地下水理や地下水の地球化学に影響が少ない泥水についての示唆を得ることができた。今後は更に他の地域の堆積岩試料を用いて室内試験を実施し、堆積岩と掘削流体の影響に関する指標を作成すべきである。
- ④ 浸透試験は泥水のみを使用し、脱イオン水では行っていない。これは、当初岩石と泥水のある程度の反応は予期されたが、泥水の溶存成分が高濃度であるため、岩石との反応による濃度変化は誤差範囲に収まるであろうと予想したためであった。しかしながら、高濃度の泥水の溶存成分が大きく変化することが今回の試験で判明した。泥水と岩石の反応について、よりよく解釈するためには脱イオン水を用いて浸透試験を実施し、試験

後の脱イオン水の溶存成分について把握する必要がある。

- ⑤ 泥水浸透試験において、特に KCL-リグネート泥水などは浸透量が比較的多い。しかしながら、試料断面の孔壁付近の目視による観察では泥水の固形成分が浸透した形成は認められないため、固形成分は泥壁を形成し、水分がマトリックスに拡散していったものと考えられる。従って、試験泥水中にトレーサーを混入し岩石を分析することによって、どの程度まで拡散するか把握する必要がある。トレーサーには泥水の添加剤 NaCl や KCl と化学的性質が類似している NaBr、KBr (Brがトレーサー) あるいは KI (Iがトレーサー) が良いと考えられる。
- ⑥ 今回は洗浄効果を同一条件で比較するため、洗浄水として脱イオン水を使用した。例えばシリケート泥水使用後 NaOH 溶液を循環させシリケート薄膜を除去し、地層水あるいは地層水を模擬した溶液で更に洗浄することにより地下水の地球化学的な影響を最小限に抑えることができるという情報がある。また、DIF については、ブリッジング剤がタンカルであるため酸で溶ける。また、KCL-リグネート泥水についても有効な洗浄剤を開発できれば最も安全に掘削でき比較的影響が小さい泥水とすることができるものと考えられる。従って、洗浄水を脱イオン水以外の溶液でも試して見るのは必要な検討事項であると考えられる。温泉等の地下水採取を目的にした試錐孔では、泥壁をできるだけ剥がして、地下水の採取効率を上げる目的でウエルクリーナー溶液が洗浄水として使われている。この様な洗浄水による洗浄効果も試験してみることも検討すべきであろう。
- ⑦ 泥水は掘削に際して使用するものである。上記の検討事項について浅深度(数 10m 程度)の原位置試験孔を掘削して、実際に岩石コアを採取し、透水試験などを実施し、実際の掘削における泥水の影響について把握すべきである。

3. 石油・ガスがある場合の掘削工法の調査

地層科学研究における試錐掘削は、岩石や地下水のサンプルを採取するため、水理地質学的パラメータや地球物理学的パラメータ（水理学的伝導性や自然応力）を原位置で測定するため、およびクロスホールトレーサー試験のような原位置試験を行うためというように複数の目的で掘削される場合も多い。そのため地表付近の地質環境についての水理地質学的パラメータや地球物理学的パラメータへの影響を最小限にするような方法で、すべての試錐孔を掘ることが重要である。

堆積軟岩の掘削技術については石油資源の探査・開発関連および地熱開発の技術が現状では最も秀でている。しかしながら、石油資源探査・開発の掘削は、掘削から石油資源の生産までの時間を短縮し、開発に関わる費用を最小にするよう計画され、探査においても多くの場合対象深度は少なくとも 3,000m 以深である。一例として、岩石コアの採取は基本的には行われず、必要な場合はスポットコアリングを行うのが普通である。そのため、基本的には石油資源の探査・開発の掘削方法は地層科学研究の目的とは適合しない場合が多い。地熱開発井についても石油資源探査・開発と同様のことがいえ、掘削から蒸気の生産、熱水の還元までの時間を短縮する必要があり、さらに 200℃ 以上、場合によっては 300℃ 以上の高温であることが地熱開発井の掘削を技術的に困難なものとしている。

以上石油資源開発と地熱開発では地層科学研究とは目的などが大きく異なるが、石油資源開発の場合でも地熱開発の場合でも、例えば貯留層を保護して—例えば多孔質の貯留層の空隙あるいは割れ目を泥水／泥壁で閉塞しないようにして—掘削する技術など地層科学研究にも応用できる技術は多い。

従って、本章では国内のおよび海外の事例についての文献調査および事情聴取結果について記すこととする。

3.1 最近の国内の堆積岩地域、地熱およびガス・石油地域における掘削工法・試錐調査手法の調査

最近国内で実施された堆積軟岩地域、地熱および石油・ガス地域における試錐孔掘削の公開報告書に基づき、掘削工法、コアリング・ノンコアリング工法、泥水・清水工法および各種調査法に関する実施状況調査結果をまとめた。

これらのとりまとめは、堆積軟岩地域については日本応用地質学会研究発表会講演論文集、地熱関係の調査井掘削状況は新エネルギー・産業技術総合開発機構が実施した調査報告書、石油・ガス関係については石油公団が実施した調査報告書に基づいて行われた。

3.1.1 堆積軟岩地域の試錐孔掘削状況

近年、新第三紀堆積軟岩地域などにおける大深度地下の開発や空間利用が注目されている。地下開発を実施する上では当該地域における水理的な問題を解明する必要がある。しかし、従来の泥水を使用した試錐孔における観測では、透水性および水質を考える上で化学的な影響が懸念される。

そこで、新第三紀堆積軟岩地域において、清水で大深度の観測井を仕上げるための掘削ツールおよび掘削工法について平成6年度以降の文献について日本応用地質学会、土木学会、地盤工学会、日本地下水学会等の雑誌から調査したところ、日本応用地質学会研究発表会講演論文集から堆積軟岩地域において地下水理に影響を及ぼさずに掘削を実施し、地下水理観測孔として仕上げている事例を収集することができた（川越ほか,1998¹⁾,1999²⁾,木方ほか,1998³⁾,1999⁴⁾）。本収集文献で報告されている事例には、未だ問題点はあるものの、堆積軟岩地域における地層科学研究の目的には合致している。そこで、以下では川越ほか(1998)¹⁾、川越ほか(1999)²⁾、木方ほか(1998)³⁾および(1999)⁴⁾に基づいた調査結果を既述するものとする。

(1) 第三紀堆積軟岩における大深度孔井掘削における掘削状況

参考文献には簡単な岩盤概要と試錐孔の配置図は記載されているものの具体的な試験地域名と対象地層名は記されていない。

本掘削計画の初年次に深度100mの「No.1孔」を掘削し、本計画のために開発された拡孔ビットやパッカーなどの機器類の試験運用を実施している。ついで第2年次に「No.1孔」の試験運用で判明した問題点を改良した機器を用いて深度400mの「No.2孔」および「No.3孔」を掘削している。本報告では、最後に掘削を実施した「No.3孔」を中心に既述することとする。

この「No.3孔」の掘削の前提条件は以下のとおりである。

- ① 深度は400mとする。
- ② 65m離れた地点に深度100mの「No.1孔」、215m離れた地点に深度400mの「No.2孔」が先進掘削されており、地層が緩傾斜のため深度150mまではコア採取は行わない。
- ③ コアの完全回収を目標とする。そのため、ワイヤーラインによるコア掘削は泥水を使用する。
- ④ コア掘削で使用した泥水の影響を排除するために、清水を用いて新ツールであるウイングビットで拡孔し、清水仕上げとする。

- ⑤ 清水で拡孔したのちの孔壁を保護するために、FRPケーシングを追降させる。
- ⑥ 拡孔したのち地下水理観測用のパッカーシステムを、ケーシングを切断することによって設置する。設置したパッカーシステムにより、長期間の水圧モニタリングやパッカー区間での採水を行えるようにする。

(i) 地質状況

掘削地点の地質は、鮮新世～更新世の堆積岩で構成されており、上位（約GL-200m以浅）に均質な砂岩（ $qu=0.88\sim 2.75\text{MPa}$ ）、中位（GL-200～300m程度）にテフラの薄層を多く含む砂質岩、下位（約GL-300m以深）に主にスコリアを挟在する泥岩（ $qu=7.06\sim 12.06\text{MPa}$ ）が分布している。

(ii) 試錐孔仕様

試錐孔仕様の概要を表3.1.1-1に示す。また、試錐孔のケーシングプログラムを図3.1.1-1に、パッカーを設置した最終のプロファイルを図3.1.1-2示す。

(iii) 掘削作業の概要

掘削作業の概要を掘削段毎に以下に示す。掘削作業手順を図3.1.1-3に示す。これはNo.2孔の例である。No.3孔の掘削作業手順について文献には記されていなかったが、No.2孔については見つけることができた（木方ほか,1998³⁾）。No.2孔とNo.3孔ではケーシングやパッカー設置深度が多少異なる程度で、手法としては同様である。

使用した泥水の種類については、文献には記されていなかった。

(a) 10インチケーシングセットまで

泥水を使用して12.1/4インチトリコンビットで150mまで掘削し、浅部地盤の孔壁崩壊を防止するため10インチケーシングを同深度まで挿入、孔口部およびケーシングシュー尻部のセメンチングを行った。なお、地質は砂岩である。

(b) 泥水先行掘削

泥水を使用してHQワイヤーラインによるオールコアリング掘削を404mまで行った。コア採取率は100%であった。途中、コアにおける走向・傾斜の把握および孔曲がりの把握を目的とした定方位コアの採取を、SUS316で作製したオリエンティングツールズを用いて行った。結果、スクライプラインをコアに付けることができた。また、採取したコ

アの観察、先行掘削時の機械データおよび掘削状況から、ケーシングプログラムとパッカー設置深度を決定した。なお、地質は砂岩、テフラを多く挟在した砂岩および泥岩である。

(c) φ220mm用機械式ウイングビット清水拡孔

泥水から清水に替えてφ220mm用機械式ウイングビットによる拡孔を258.2mまで行った。本拡孔は、175FRPケーシングパイプを追降しながら清水拡孔するという掘削方法を用いた。また、当該区間での逸水・湧水、ウイングビット使用のためのロッドのバイブレーション、カッティングスの埋績および孔壁の崩壊もなく順調に拡孔できた。

(d) φ170mm用機械式ウイングビット清水拡孔

258.2mからは、φ170mm用機械式ウイングビットに切り替えて、清水拡孔を398.2mまで行った。本拡孔も前段と同様に125FRPケーシングパイプを追降しながら清水拡孔する掘削方法を用いた。ビット回転数、ビット荷重はφ220mmウイングビット拡孔時と顕著な差はなかったが、送水量に関してはポンプ圧力が高くなる傾向であったため、孔壁を痛める危険が懸念されたことから送水量を低く抑えた。当該区間でも逸水・湧水、ウイングビット使用のためのロッドのバイブレーション、カッティングスの埋績および孔壁の崩壊もなく拡孔できた。

(e) パッカーシステムの設置と試錐孔仕上げ

採取したコアの観察、地盤状況（透水性、設置地盤の強度など）と全体の調査計画から大型・中型パッカー（インフレッターパッカー）の設置深度を決定した。パッカーを設置するために、先ずケーシングカッターで125および175FRPケーシングのブラインド管を切断し、パッカーを2深度のケーシング切断面に固定した。その後、長期的な原位置試験や採水試験が可能な観測井として仕上げた。

(iv) 孔芯傾斜測定結果

傾斜測定の結果は、HQワイヤーライン掘削で採取した定方位コアの観察から、1°50'程度（深度300～350m付近）という結果が得られている。

(v) 掘削関係の特記事項

- ・ HQワイヤーライン掘削中に定方位コアを採取しているが、砂岩・泥岩系の地質に対し、所定のスクライプラインを付けることができた。
- ・ 清水を使用してウイングビットによる拡孔を行っている。これは、オープナープラグを投入することで機械的にブレードが開く方式を採用している。拡孔終了後はオープナープラグを回収することでブレードが閉じて、追降したケーシング管内からの回収が可能な構造となっており、本地域のような堆積性軟岩では有用という成果が得られている。

表3.1.1-1 堆積軟岩地域「No.3孔」試錐孔仕様の概要

ケーシングプログラム

掘削区間 (m)	孔径 (mm) -ケーシング サイズ (mm)	ケーシング 設置深度 (m)	備考
0~150.0	311.2 - 267.4	38.84	
150.0~258.2	220.0 - 190.0	254.91	φ220mmウイングビット清水拡孔
258.2~398.2	170.0 - 145.0	389.20	φ170mmウイングビット清水拡孔
150.0~404.0	101.0 - なし	-	HQワイヤライン泥水コアリング 区間

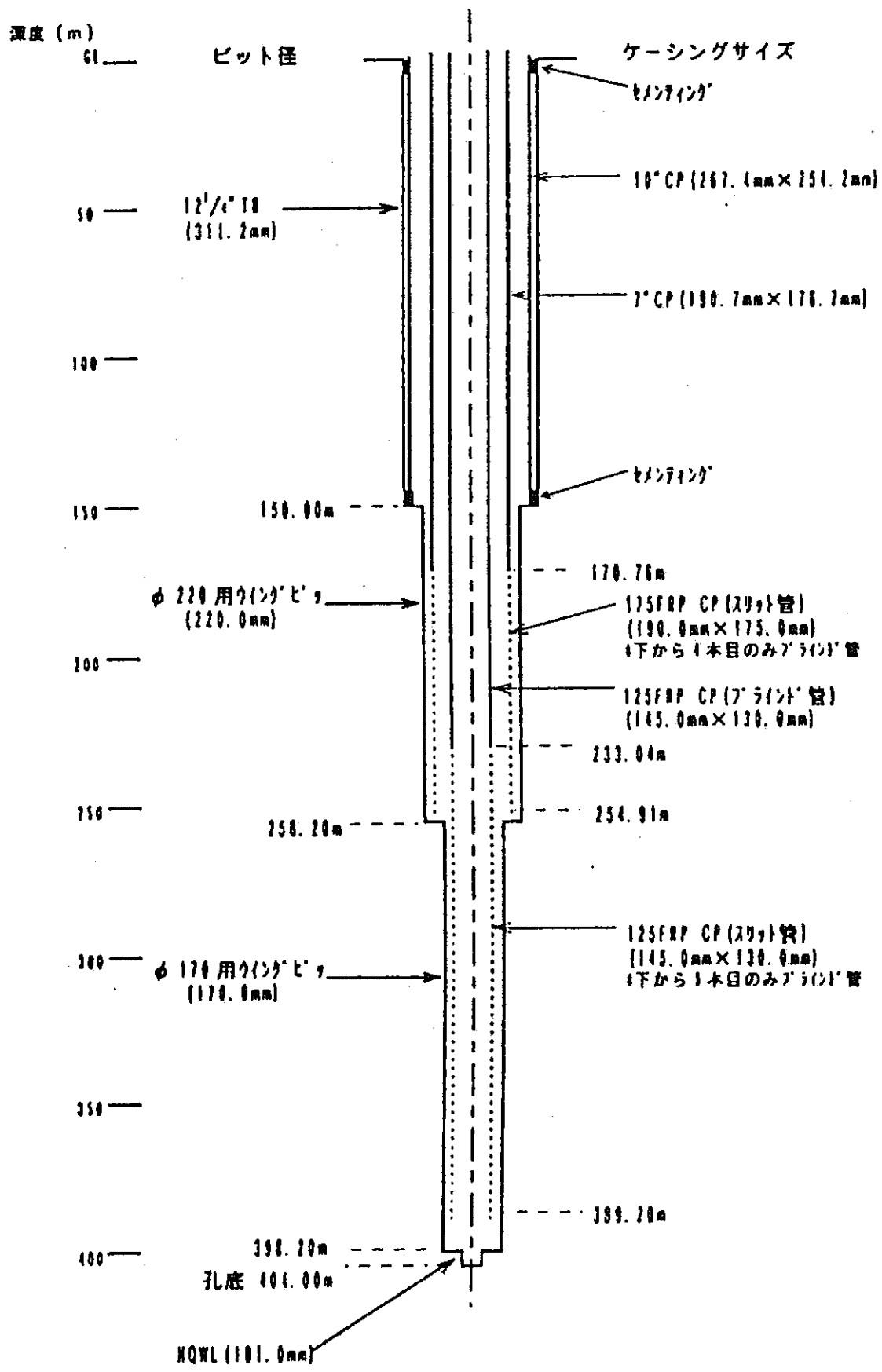


図 3.1.1-1 No.3 孔ケーシングプログラム (川越ほか,1999)

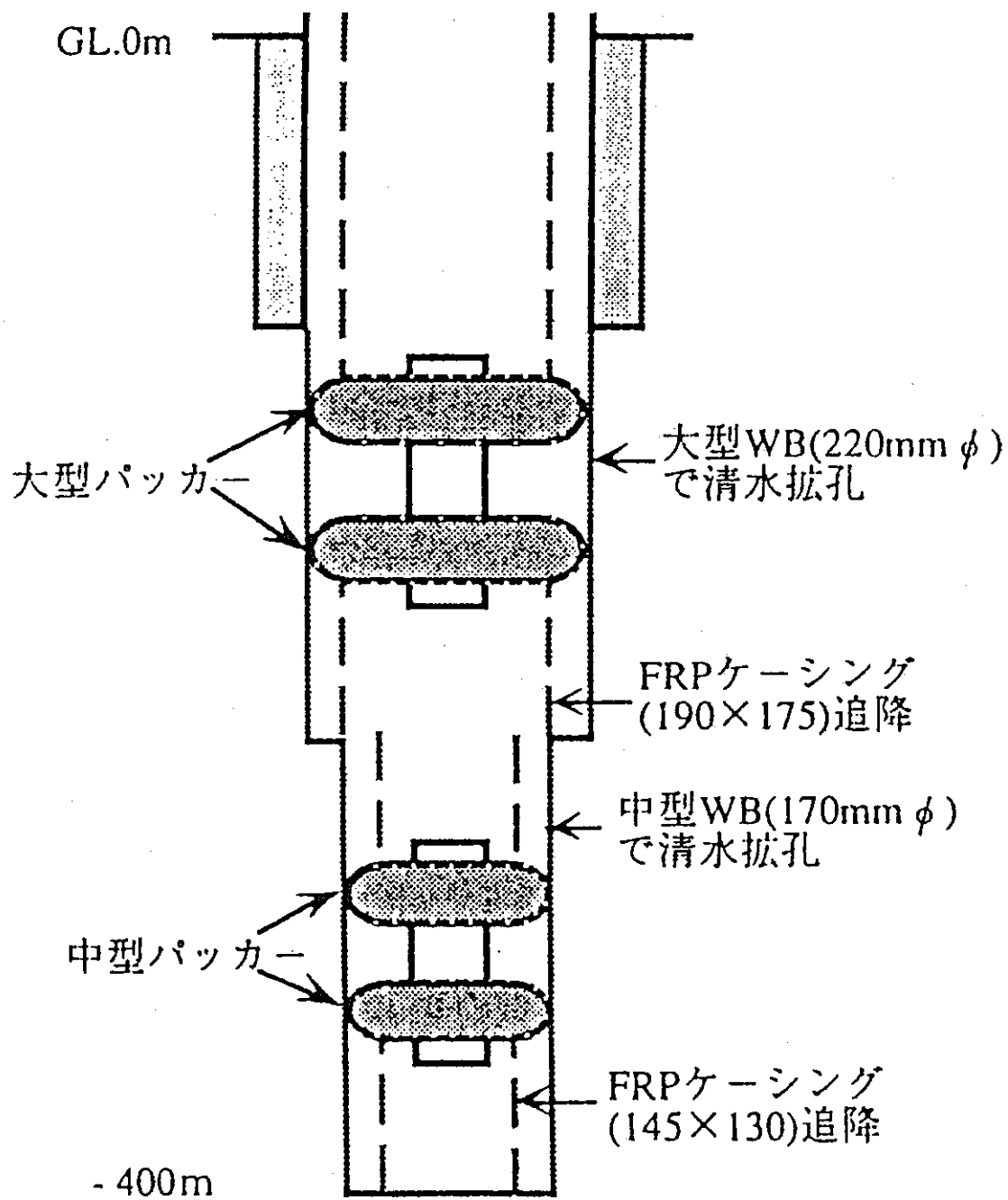
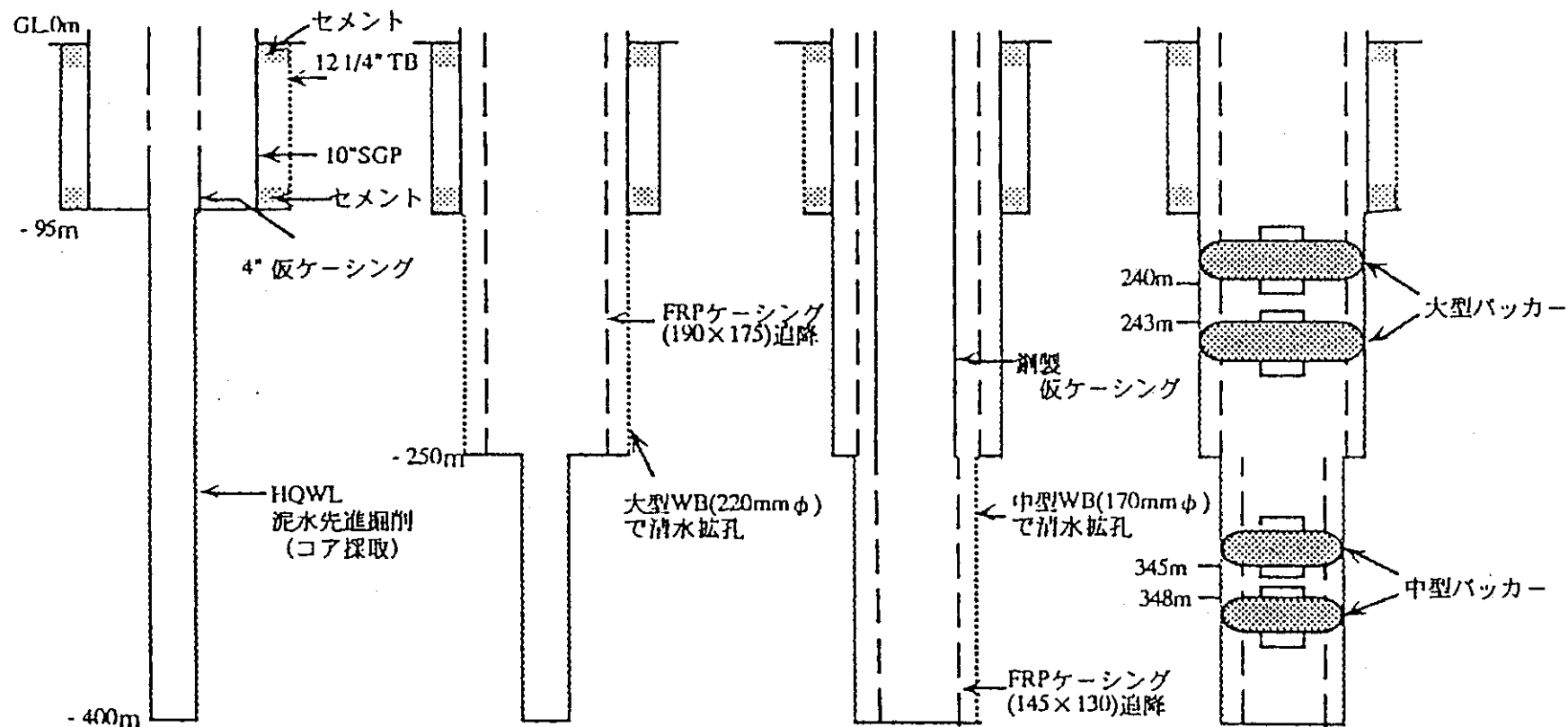


図 3.1.1-2 No.3 孔最終プロファイル (木方ほか,1999)



- ① 0～95m : ノンコア掘削
95～400m : 泥水先進掘削 (コア採取)
- ② 95～250m : 清水掘孔 (220mm φ)
FRPケーシング追降
- ③ 250～400m : 清水掘孔 (170mm φ)
FRPケーシング追降
- ④ 240～243m : バッカー設置 (上部)
345～348m : バッカー設置 (下部)

図 3.1.1-3 掘削、ケーシング設置およびバッカー設置作業手順 (木方ほか、1998)

(2) 第三紀堆積性軟岩における地層・地下水調査技術に係わる機器開発

(1)で取り上げた掘削を行うためにウイングビット(開閉式ビット)、パッカーを設計し、試作している。本報告では、これらウイングビットおよびパッカーについてその詳細を既述する。

(i) ウイングビット

既述したように清水仕上げの際、孔壁を保護するため、掘削時にケーシングを追降する方式を採用している。そのため、掘削後ケーシングを通してのビットの回収を可能とするため、開閉式のウイングビットを開発している。その概念を図3.1.1-4に示す。ウイングビットの特徴は以下のとおりである。

- ① ブレード(ウイング)の開閉には、オープナープラグを採用しており、オープナープラグが途中で止まったときは水圧をかけ、下まで押し下げることができ、ブレードが開かない状況を極力減らす工夫をしている。
- ② ウイングビット引き上げ時のボディーへのブレードの収納性、および掘削時に発生するカッピングスの詰まりを減らすため、ブレードは下向きに開く構造となっている。
- ③ ビットを降下させるとき、ブレードが水圧によって開かないように、水圧差を解消するような構造となっている。
- ④ 拡孔中の孔曲がりやを極力小さくするため、先行掘削孔(コア掘削孔)をガイド孔として用いるため、先端が孔中に挿入するような形状としている。また、ブレードが開いた状態で、孔壁と平行になる部分を設けるようにしている。

(ii) パッカー

既述したように試錐孔内は全区間においてケーシングが挿入されているため、パッカーはケーシングの切断・揚管により予め選定された裸孔区間に設置する。パッカーにより区切られた区間において水圧モニタリングや採水などの各種試験が実施できることを前提にして、以下のような特徴をもつパッカーを設計、試作している。

- ① 孔径のある程度の拡大に対応できるよう、水圧によるインフレータブルパッカーとしている。
- ② パッカーを膨張させるために、インナーパッカーを使用している。
- ③ 設置後のラバー内の水圧低減による収縮を考慮して、再膨張できる構造である。
- ④ 収縮時の脱落を防止し、ケーシングと共に支え合うように、上下端に脱落防止爪をつけている。

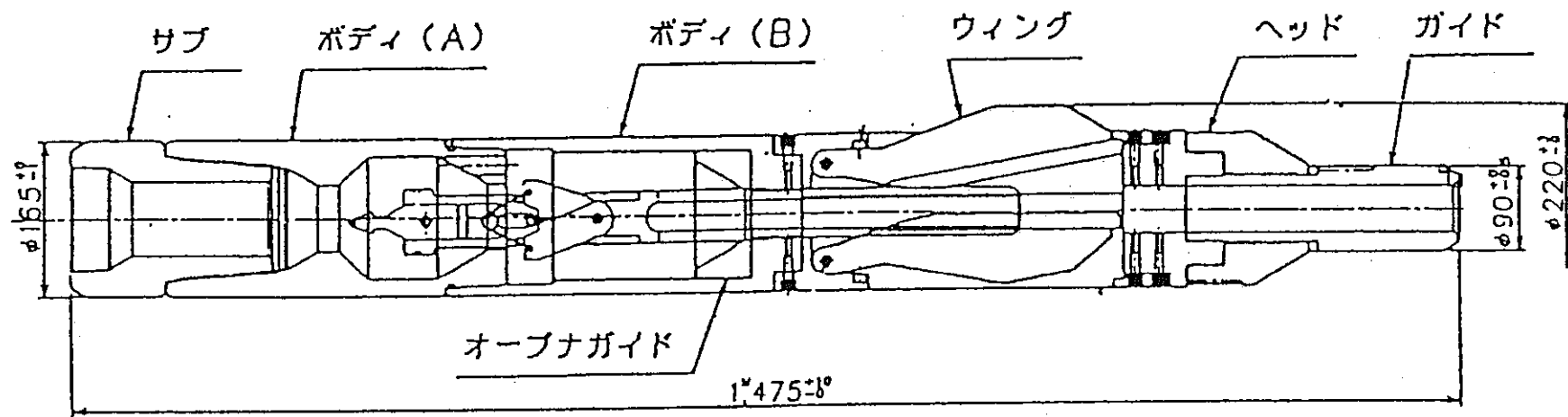


図 3.1.14 機械式ウイングビット概要図 (川越ほか,1998)

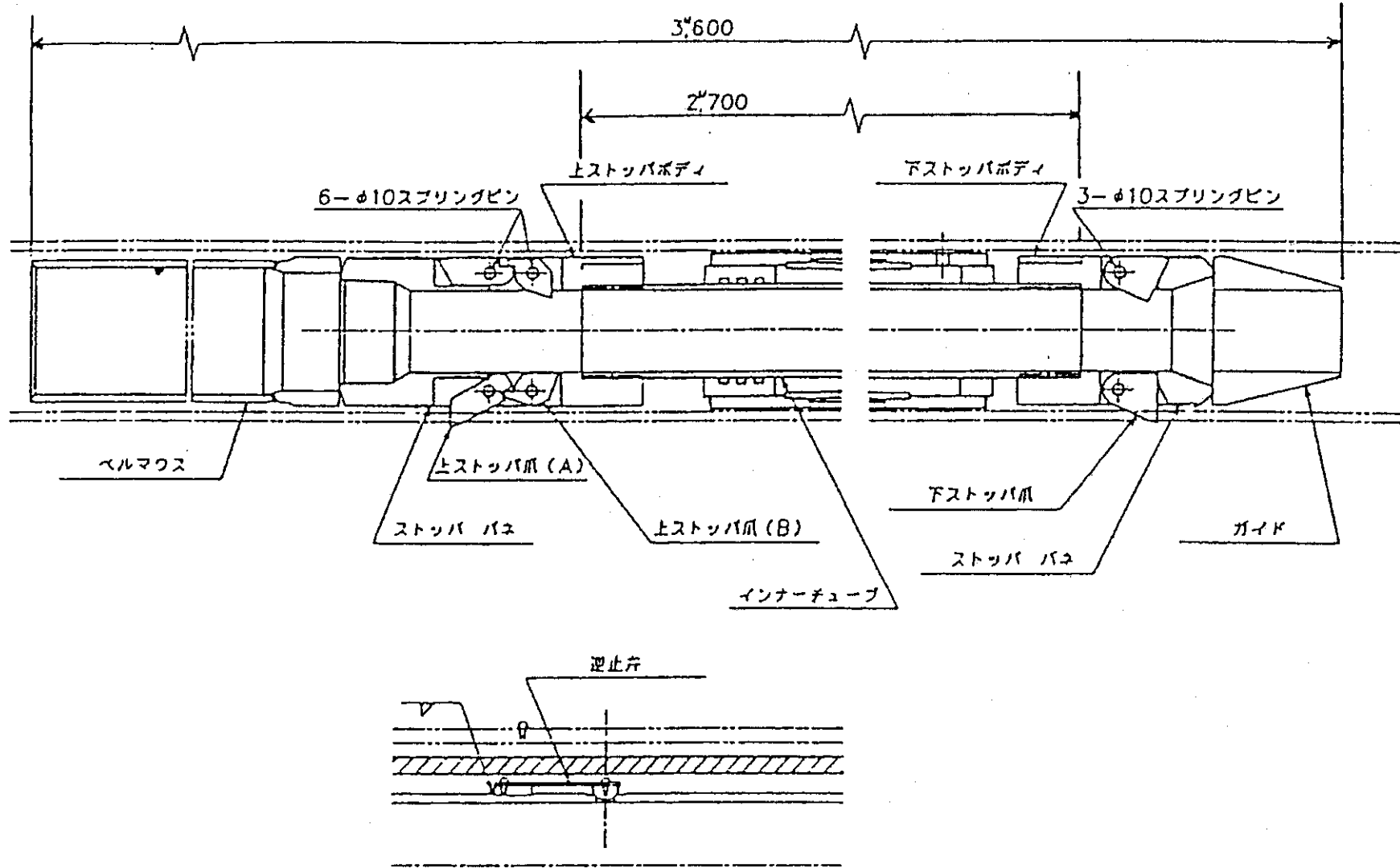


図 3.1.1-5 パッカー概要図 (木方ほか,1998)

(3) まとめ

今回調査した手法は、堆積軟岩地域における掘削手法として有効であると判断される。しかしながら、今回の調査では以下のような問題点を指摘できる。

- ① 本掘削手法による実績はまだ深度400mまでであり、それより深い深度1,000m程度については実績がない状態である。
- ② ケーシングとしてFRPを用いているが、深度によってはステンレスパイプや鋼管を用いざるを得なくなる。その場合のケーシングカッター（特にステンレスパイプ用）やケーシングの重量が増すため、パッカーの耐重量性の向上なども検討する必要があるであろう。
- ③ パッカーの設置が現状では1段1箇所となっており、1段複数箇所という構造にはなっていない。

今回調査した文献中には使用した泥水についての情報を見いだすことができなかった。泥水掘削で採取したコアを用いてのトレーサーによる地化学特性試験を実施しているが、文献中には試験方法のみが記されている程度であり、結果はまだ報告されていない。今後はこのような使用泥水や地化学特性試験結果について、今後公開される文献を追跡調査する必要がある。

3.1.2 地熱関係の試錐孔掘削状況

地熱開発井の掘削は、高温地帯を掘削し、高温の地熱流体の噴出を予期した仕様となっている。そのため、地層科学研究分野における堆積軟岩地域の掘削手法とは大きく異なる部分が多い。しかしながら、後述するように、ケーシングプログラム策定時の論理など地層科学研究分野にも参考にすべき技術が見られる。また、掘削中の高温流体の噴出予防対策、また地熱開発は国立公園などの環境規制が厳しいところでの掘削工事が多いので、その環境汚染対策（特に泥水の選定）など参考になる部分もある。

地熱発電所および地熱開発地域は我が国でも10数カ所存在しており、例えば日本地熱学会などで論文として報告はされているが、詳細な掘削状況を公表しているのは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下NEDOとする）が実施した地熱開発促進調査報告書に限られるのが現状である。従って、本報告では最新の調査報告である、平成11年3月に公表された「地熱開発促進調査報告書 No.B-2 安代地域」（NEDO,1999⁹⁾）の事例を報告する。

地熱開発促進調査は、石油代替エネルギーの導入促進の一環として実施されている。地熱開発促進調査は昭和55年度に開始され、探査リスク等により開発調査が進んでいない地熱有望地域について、先導的に調査を行うことにより、民間企業の開発を誘導し、地熱発電の開発促進を図ることを目的としている。地熱開発促進調査は平成4年度から広域調査（調査A）、概査（調査B）、精査（調査C）のおおの2～3年間の調査を実施する3段階方式になり現在に至っている。本報告で事例紹介する「安代地域」は岩手県二戸郡安代町で実施された概査（調査B）、その調査範囲は東西約5.5km、南北約2.75km、面積約15km²の範囲の調査結果である。

平成7年度から平成9年度の3年間の調査中、構造試錐掘削は第2年次の平成8年度に行われている。平成7年度は机上調査である既往調査のとりまとめを行い、現地地表調査として地質構造調査、地化学調査、電磁探査、重力探査、環境影響調査を実施し、地表からの地下の地質構造、熱構造、熱水流動構造の把握の推定を行い、平成8年度の構造試錐掘削計画を立案している。平成8年度には後に詳述する2本の構造試錐N7-AR-1とN7-AR-2を掘削し、さらにデータ処理に係わる捕捉調査（室内試験など）を実施している。最終年次の平成9年度には2本の構造試錐の噴気試験を行い、地熱ポテンシャルの評価を行っている。

この調査における構造試錐に係わる前提条件について以下に示す。

- ・ 最終的な目的は蒸気・熱水の噴気試験による地熱ポテンシャル評価である。
- ・ 掘削中、特に蒸気・熱水の生産ゾーンにおける掘削水の逸水が予想される。

- ・ 地表付近の第四紀火山岩類掘削中に逸水が予想される。
- ・ 生産ゾーン掘削中、高温流体（250℃以上）の噴出が予想される。
- ・ 第1年次の地表調査および既往調査から昭和55年度および60年度にコア掘削を行っているので、ある程度地下の地質状況について把握している。そのため、トリコンビットによるノンコアで掘削し、地質の把握はカッティングス調査で行う。
- ・ 掘削リグを設置できる敷地の確保が難しく、地表調査および既往調査から推定される地熱有望地点直上にリグを設置できないため、途中から孔を傾斜させる傾斜掘削を採用する。
- ・ 構造試錐の孔口から、地熱有望地点までは直線距離で約600m程度、深度1,600mであるので、試錐孔の孔長は1,750m程度を予定する。
- ・ 掘削する地層は、八幡平火山群の噴出物である第四紀火山岩類（地表～深度100m程度）、鮮新世～更新世のデイサイト質火砕岩および安山岩からなる火砕流堆積物（深度100～500m程度）、中新世のデイサイト質火砕岩、凝灰質シルト岩および黒色泥岩からなる阿仁合層（深度500m以深）である。
- ・ 既往調査および地表物理探査（電磁探査）の結果から、深度200～600m間は低比抵抗ゾーンであり、変質により岩石が粘土化し難透水ゾーンを形成し、これが地熱のキャップ・ロックになっていると予想される。
- ・ 地熱ポテンシャル評価に必要な孔内データは温度と比抵抗分布であるので、検層は温度検層と電気検層のみ実施する。

以下に2本の構造試錐の掘削状況について記載する。

(1) 地熱開発促進調査安代地域構造試錐“N7-A R-1”の掘削状況

(i) 試錐孔仕様

試錐孔仕様の概要を表3.1.2-1に示す。

(ii) 掘削作業の概要

掘削作業の概要を掘削段毎に以下に示す。主要な掘削機器の一覧を表3.1.2-2に示す。

(a) 20インチケーシングセットまで

ベントナイト泥水を使用して24インチ孔で45mまで掘削し、20インチケーシングを降下の上フルホールセメンチングを実施した。12.6mと22.4mで発生した約200～300l/minの逸水はLCM（逸水防止剤）で防止した。

(b) 13.3/8インチケーシングセットまで

ベントナイト泥水を使用して17.1/2インチ孔で205mまで掘削し、13.3/8インチケーシングを降下の上フルホールセメンチングを実施した。安山岩とデイサイト質火砕岩が続き、逸水は認められなかった。なお、ケーシング挿入前に第1次電気検層と温度検層を実施した。

(c) 9.5/8インチケーシングセットまで

BH泥水を使用して9.5/8インチ孔で掘削した。250mからダウンホールモーターを使用して、SW10°の方向に向けて傾斜掘削を開始し、393mで約11°の傾斜を確認後、ロータリー掘削に移行した。512mから568m間でSW19°に方位が振れたので、577mから703m間で再度ダウンホールモーターを使用して試錐孔方位の修正掘削を実施し、SW5°に向けた後、706mで9.5/8インチケーシングを降下の上フルホールセメンチングを実施した。

安山岩、デイサイト質火砕岩、凝灰質シルト岩が続いたが逸水は認められなかった。なお、ケーシング挿入前に第2次電気検層と温度検層を実施した。

(d) 7インチケーシングセットまで

BH泥水を使用して8.1/2インチ孔で傾斜掘削を継続。途中から耐熱温度の高いG-500S泥水に切り替え、1,210mまで掘削。試錐孔方位はSW4~6°で安定し、傾斜は834mで29.6°まで増角後はほぼ沿角で掘削した。デイサイト質火砕岩、デイサイト、凝灰質シルト岩が続いたが逸水は認められなかった。7インチケーシングを降下しフルホールセメンチングを実施した。なお、ケーシング挿入前に第3次電気検層と温度検層を実施した。

(e) 4.1/2インチケーシングセットまで

G-500S泥水を使用して6.1/4インチ孔で沿角傾斜掘削を継続した。試錐孔方位はSW9~11°でほぼ安定、傾斜も28~30°でほぼ安定したまま最終深度1,781.2mで終掘した。1,743mで約220l/minの逸水が発生したが逸水掘削を続けた結果次第に減少し、1,781.2mでは40l/minの逸水量になっていた。地質はデイサイト質火砕岩、黒色泥岩、安山岩が続いた。第4次電気検層と温度検層を実施した後、4.1/2インチケーシングとストレーナーを1,171mから孔底まで挿入、洗浄後注水試験を実施した。

(iii) 孔芯傾斜測定結果

スペリーサン傾斜測定器による孔芯傾斜測定の結果概要を表3.1.2-2に示す。

(iv) 掘削泥水の使用状況

掘削区間毎に使用した泥水の種類と組成および性状の一例を表3.1.2-4に示す。また、逸水対策に使用したLCMの種類と使用量も示す。

(v) 試錐孔調査、物理検層の状況

掘削区間毎に実施した検層の種類を表3.1.4-5に示す。

(vi) 掘削関係の特記事項

- ・ 傾斜井であり、250mからダウンホールモーターを使用して孔を曲げ、傾斜掘削を開始した。以降の掘進は、ほぼ計画通りの孔芯軌跡を維持することができた。
- ・ 逸水は、浅部では12.6mと22.4mで約200～300l/min、深部では1,743.6mで約220l/min規模で発生している。

表3.1.2-1 N7-AR-1孔の試錐孔仕様の概要

1. 概況

試錐孔名	安代地域 N7-AR-1
場所	岩手県二戸郡安代町八幡平山国有林 12班い小班
掘削期間	開孔 平成 8年 8月17日
	掘止 平成 8年11月 7日
掘削深度	1,781.2m (傾斜井)
使用リグ	80UE

2. ケーシングプログラム

掘削深度 (m)	孔径 (インチ) - ケーシング サイズ (インチ)	ケーシング 設置深度(m)
45.0	24 - 20	38.84
205.0	17.1/2 - 13.3/8	202.00
706.0	12.1/4 - 9.5/8	702.29
1,210.0	8.1/2 - 7	1,203.00
1,781.2	6.1/4 - 4.1/2	1,781.20

3. コアリング 区間 なし

4. 泥水掘削状況 (清水掘削は行われていない)

インターバル (m)	使用した泥水のタイプ
0 ~ 45	ベントナイト泥水
45 ~ 205	ベントナイト泥水
205 ~ 706	BH泥水
706 ~ 1,210	BH泥水
1,210 ~ 1,781.2	G-500泥水

表3.1.2-2 N7-AR-1孔 主要機器設備

名称	型式	性能
ドローワーク	80UE	動力：752KW DCモーター付き
リフトポンプ	PZ-7×2台	動力：752KW DCモーター付き
ロータリーテーブル	C-27.1/2インチ型	動力：752KW DCモーター付き
マスト	油圧テレスコープ型	静荷重160t
サブストラクチャー	上・下伸縮式	高さ：10.67m
発電機	600～800KVA×2台	
BOP	GK13.3/5インチ×5000型、MITRIL製	
シェルシエカー	アジャスタブル型	1台
デシレーター	4T6型	1台
デサンダー	12インチΦ×2本	1台
アキュムレーターユニット	タイプ 80、ケーミー製	1台
孔芯測定器	B型シングルショット、スペリーサン製	1台

表3.1.2-3 N7-AR-1孔の孔芯傾斜測定の結果概要

測定深度 (m)	記事と傾斜角度 (° ')
100	1° 20'
233	0° 40'
285	250mでキック初、方位指向掘削、2° 40'
341	方位指向掘削、8° 50'
398	11° 50'
483	11° 30'
568	方位指向掘削、17° 20'
653	方位指向掘削、19° 00'
691	方位指向掘削、22° 00'
749	23° 50'
834	29° 40'
1,033	28° 10'
1,195	27° 30'
1,472	30° 30'
1,781.2	29° 20'

表3.1.2-4 N7-AR-1孔で使用した掘削泥水の種類と組成及び性状

掘削区間 (A) : 0m~45.0m

泥水の種類 : ベントナイト泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	8~10%
CMC	0.5~1%
カセイター	0.5%

比重	1.06~1.08
ファンネル粘性 (秒)	55~60
PH	11

掘削区間 (B) : 45.0~205.0m

泥水の種類 : ベントナイト泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	8~10%
CMC	0.5~1%
カセイター	0.5%
ソーダ灰	0.2%

比重	1.08~1.16
ファンネル粘性 (秒)	55~70
PH	11

掘削区間 (C) : 205.0~706.0m

泥水の種類 : BH泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	6~8%
CMC	0.5%
テルナイトBH	2~3%
G-500S	必要量*
カセイター	0.5%
ソーダ灰	必要量*

比重	1.08~1.12
ファンネル粘性 (秒)	50~60
PH	11

掘削区間 (D) : 706.0~1,210.0m

泥水の種類 : BH泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	5~6%
CMC	0.3~0.5%
テルナイトBH	3~5%
G-500S	必要量*
カセイター	0.5%
ソーダ灰	必要量*
消泡剤No.15	必要量*

比重	1.10~1.19
ファンネル粘性 (秒)	40~50
PH	11

掘削区間 (E) : 1,210.0~1,781.2m

泥水の種類 : G-500S泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	3~4%
CMC	必要量*
テルナイトBH	必要量*
G-500S	1~1.5%
テルボリマーL	0.3~0.5%
カセイター	0.5%
ソーダ灰	必要量*
消泡剤No.15	必要量*
スピーター-PS	必要量*
スピーター-X	必要量*
クリンリユーブ	必要量*
クリンマジック	必要量*
テルクリン	必要量*
軽油	必要量*

比重	1.10~1.13
ファンネル粘性 (秒)	30~45
PH	11

*「必要量」と記した添加剤については、状況に応じて添加しており、具体的な数量については調査した文献からは不明である。

逸水対策に使用した逸泥防止剤の種類と量

種類	使用量合計 (kg)	区間 (A)
テルストップ G	1,000	1,000

(注) 逸水対策用のセメントングは実施していない

表3.1.2-5 N7-AR-1孔で実施した検層の種類

検層の時期（試錐孔深度）	検層の種類	測定区間（m）
第1次（205.0m）	温度検層	0～205.00
	電気検層	38.84～205.00
第2次（706.0m）	温度検層	0～706.00
	電気検層	202.00～706.00
第3次（1,210.0m）	温度検層	0～1,210.00
	電気検層	702.29～1,210.00
第4次（1,781.2m）	温度検層	0～1,781.20
	電気検層	1,203.00～1,781.20

(2) 地熱開発促進調査安代地域構造試錐“N7-A R-2”の掘削状況

(i) 試錐孔仕様

試錐孔仕様の概要を表3.1.2-6に示す。

(ii) 掘削作業の概要

掘削作業の概要を掘削段毎に以下に示す。主要な掘削機器の一覧を表3.1.2-7に示す。

(a) 13.3/8インチケーシングセットまで

ベントナイト泥水を使用して17.1/2インチ孔で54mまで掘削し、13.3/8インチケーシングを降下の上インナーストリング方式によるフルホールセメンチングを実施した。46mと53mで発生した約30~60l/minの逸水はLCMで防止した。

(b) 9.5/8インチケーシングセットまで

BH泥水を使用して12.1/4インチ孔で405mまで掘削し、9.5/8インチケーシングを降下の上インナーストリング方式によるフルホールセメンチングを実施した。地層は安山岩とデイサイト質火砕岩の互層で、59m、95.5m、および260mの3ヶ所で逸水が発生。59mの約400l/minの逸水はセメントスポットで、95.5mで発生した1,900l/minの全量逸水と、260mの約1,000l/minの逸水は、LCMおよびセメントスポットで防止した。なお、ケーシング降下前に第1次電気検層と温度検層を実施した。

(c) 7インチケーシングセットまで

耐熱温度の高いBH-G500S泥水を使用して8.1/2インチ孔で掘削。450mからSW52°に向けてダウンホールモーターによる方位指向掘削を開始。483mでSW73°を確認したので507.6mからロータリー掘削に移行。751mでSW39°に方位が振れたので、761mで再度ダウンホールモーターを使用して試錐孔方位の修正掘削を実施した。778mでSW50°となったことから、788mよりロータリー掘削を再開。1,105mで第2次電気検層と温度検層を実施後、7インチケーシングをライナーハンガーで設置し、フルホールセメンチング（ライナーセメンチング式）を実施した。地層は615mまではデイサイト質火砕岩・凝灰質シルト岩互層、以深はデイサイトが続いたが逸水は認められなかった。

(d) 4.1/2インチケーシングセットまで

BH-G500S泥水を使用して6.1/8インチ孔を沿角編成で掘削した。試錐孔方位はSW50~

54° でほぼ安定、傾斜も29～32° で安定したまま1,737.7mで終掘した。地層は1,385mまではデイサイト、以深は黒色泥岩、凝灰質シルト岩、デイサイト質火砕岩および安山岩が続いたが逸水は認められなかった。第3次電気検層と温度検層を実施した後、4.1/2インチケーシングとストレーナーを1,070.8mから孔底まで挿入、洗浄後加圧注水試験を実施した。

(iii) 孔芯傾斜測定結果

孔芯傾斜測定の結果概要を表3.1.2-8に示す。

(iv) 掘削泥水の使用状況

掘削区間毎に使用した泥水の種類と組成および性状の一例を表3.1.2-9に示す。また、逸水対策に使用したセメントおよびLCMの種類と使用量も示す。

(v) 試錐孔調査、物理検層の状況

掘削区間毎に実施した検層の種類を表3.1.2-10に示す。

(vi) 掘削関係の特記事項

- ・ 傾斜井であり、450mからダウンホールモーターを使用して孔を曲げ、傾斜掘削を開始した。以降の掘進は、ほぼ計画通りの孔芯軌跡を維持することができた。
- ・ 逸水は260mの安山岩までは比較的頻繁に発生しているが、以深の安山岩、デイサイト質火砕岩、凝灰質シルト岩、黒色泥岩では全く確認されなかった。

表3.1.2-6 N7-AR-2孔の試錐孔仕様の概要

1. 概況

試錐孔名	安代地域 N7-AR-2
場所	岩手県二戸郡安代町八幡平山国有林 15班い1小班
掘削期間	開孔 平成8年8月17日 掘止 平成8年11月24日
掘削深度	1,737.7m (傾斜井)
使用リグ	T-70

2. ケーシングプログラム

掘削深度 (m)	孔径 (インチ) - ケーシング サイズ (インチ)	ケーシング 設置深度(m)
54.0	17.1/2 - 13.3/8	50.54
405.0	12.1/4 - 9.5/8	401.68
1,105.0	8.1/2 - 7	1,101.65
1,737.7	6.1/8 - 4.1/2	1,137.70

3. コリング 区間

なし

4. 泥水掘削状況

(清水掘削は行われていない)

インターバル (m)	使用した泥水のタイプ
0~ 54	ベスト泥水
54~ 405	BH泥水
405~1,105	BH泥水
1,105~1,737.7	G-500泥水

表3.1.2-7 N7-AR-2孔 主要機器設備

名称	型式	性能
ドローカス	T-70	最大巻上能力 150t
リグポンプ	8P-80	最大吐出量 2,051ℓ/min
マスト	38Mカンチバー	高さ：38.5m
サブストラクチャー	ブロック型	高さ：5.5m
発電機	DCA-400SPK×2台	350KVA/421ps/1,500rpm
BOP	12インチ-3,000型、ハイドリル製	
シールセーカ	タンデム型	処理能力 3.0m ³ /min
クーリングタワー	強制通風型	高さ：8.0m
ピアノ線ウインチ	ハリバートン製	3,000m
モーターホイスト	PS-40	

表3.1.2-8 N7-AR-2孔の孔芯傾斜測定の結果概要

測定深度 (m)	傾斜角度 (° ') と記事
102	0° 38'
300.5	0° 37'
450	450mでキック初、方位指向掘削、0° 40'
483	方位指向掘削、5° 50'
530	11° 00'
645	15° 40'
751	22° 30'
778	方位指向掘削、23° 50'
846	29° 30'
970	30° 30'
1,085	31° 00'
1,185	30° 10'
1,278	29° 20'
1,363	32° 30'
1,737.7	30° 20'

表3.1.2-9 N7-AR-2孔で使用した掘削泥水の種類と組成及び性状

掘削区間 (A) : 0m~54.0m

泥水の種類 : ベントナイト泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	8~10%
テルボリマーH	0.2~0.3%
テルナイトBH	必要量*
リーダ灰	必要量*

比重	1.08~1.09
ファンネル粘性 (秒)	50~76
PH	9

掘削区間 (B) : 54.0~405.0m

泥水の種類 : BH泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	6~8%
テルボリマーH	0.2~0.3%
テルナイトBH	1.0~2.0%
消泡剤No.15	必要量*
テルフロー	1.0~2.0%
カセイソダ	0.3%
リーダ灰	必要量*

比重	1.06~1.12
ファンネル粘性 (秒)	40~55
PH	11

掘削区間 (C) : 405.0~1,105.0m

泥水の種類 : BH泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	5~7%
テルボリマーH	0.1%
テルナイトBH	1.0~2.0%
スピードPS	必要量*
消泡剤No.15	必要量*
テルフロー	1.0~2.0%
ハイフロー	1.0~2.0%
カセイソダ	0.3%
リーダ灰	必要量*

比重	1.09~1.18
ファンネル粘性 (秒)	40~56
PH	11

掘削区間 (D) : 1,105.0~1,737.7m

泥水の種類 : G-500S泥水

泥水組成

泥水性状

クニゲルV1	4~5%
テルボリマーH	0.1%
テルボリマーL	必要量*
テルナイトBH	必要量*
G-500S	0.3~0.5%
スピードPS	必要量*
消泡剤No.15	必要量*
ハイフロー	1.0~2.0%
クリーンユーフ	必要量*
テルグリーン	必要量*
カセイソダ	0.3%

比重	1.13~1.18
ファンネル粘性 (秒)	37~42
PH	10

*「必要量」と記した添加剤については、状況に応じて添加しており、具体的な数量については調査した文献からは不明である。

逸水対策に使用したセメント及び逸水防止剤の種類と量

種類	使用量合計 (kg)	区間 (A)	区間 (B)
普通セメント	3,180	-	3,180
地熱セメント	9,500	-	9,500
塩化カルシウム	50	-	50
テルストップ P	500	-	500
テルシール	200	150	50
テルマイカ	100	70	30

表3.1.2-10 N7-AR-2孔で実施した検層の種類

検層の時期 (試錐孔深度)	検層の種類	測定区間 (m)
第1次 (405.0m)	温度検層	0~405.00
	電気検層	50.54~405.00
第2次 (1,105.0m)	温度検層	0~1,105.00
	電気検層	400.90~1,105.00
第3次 (1,737.7m)	温度検層	0~1,737.70
	電気検層	1,101.65~1,737.70

(3) まとめ

地熱開発井は石油、ガス開発井と同様に多段階ケーシングプログラムとなっている。これは、浅部の生産ゾーンにあまり関係しないところをケーシング・セメンチングで覆って、固定し、生産ゾーンにおける掘削を安全なものにするためである。地熱開発井では、浅部に蒸気・熱水などの地熱貯留層のキャップロックがあるのが普通であり、そのキャップロックは湖沼堆積物や岩石が熱水によって変質した粘土化帯など軟岩であることが多い。本報告で示した安代地区でも、地表下深度200～600m間は粘土化しており、この区間が軟岩となっている。N7-AR-1もN7-AR-2のどちらも4段のケーシングプログラムとなっているが、掘削地点により粘土化帯の深度が異なるため、N7-AR-1では第2段を深度205mであるのに、N7-AR-2では405mとなっている。これは、第2段ケーシングは掘削中、更には掘削終了後も孔口装置や観測機器を設置するための基礎的なケーシングとなるものであるため、柔らかい岩相になるまえの比較的硬い岩相に設置するためである。この第2段のケーシングの設置が不良の場合は試錐孔掘削に支障が発生することがあるばかりではなく、地熱では熱水および蒸気のリークの原因になることがある。また、第3段はN7-AR-1で深度約1,200m、N7-AR-2で約1,100mと第2段よりは深度差が小さい。これは予想される生産ゾーンの深度を想定しての設定となっている。

次に、地熱開発井が石油、天然ガス開発井と異なる主な相違点を以下に示す。

- ① 深度に比べて温度が著しく高い
- ② 高圧流体をもった地層はほとんどなく、大部分は低圧層であり、しかも割れ目をもった地層が多いため大きな逸水が起こりやすい
- ③ 地質は比較的硬く、水和、膨潤するような泥岩層はほとんどないが、変質岩が多いため、岩石比重が大きい。
- ④ 蒸気生産層はほとんど静水圧か静水圧以下の場合が多いので、蒸気生産ゾーンに入ると例外なく逸水する。従って、特殊な掘削流体が必要である。
- ⑤ 開発地域は火山地帯でしかも国定公園や国立公園付近が多いので、環境破壊、汚染防止が大きな問題になる。
- ⑥ 掘削中硫化水素のような有毒ガスに遭遇するが多い。

上記のうち特に①の高温であることや⑤の環境破壊や汚染防止の観点から、地熱開発井においてはBH泥水やG-500S泥水などの特殊な泥水が開発されており、本報告で示した2本の構造試錐においても特殊泥水を使用している。

石油開発で使用する泥水との違いは、温度が著しく高いために、高温に安定な泥水お

よび調製剤が要求されることである。一般に石油開発用に使用されている分散剤やポリマー類は150℃以上の高温になると機能が著しく劣化したり、分解するので使用できない。また、高温に安定な分散剤でも、重金属（特にクロムなど）を含んでいるものは原則として使用ができない制限がある。

本報告で示した2本の構造試錐では、地表から温度があまり高くない区間（深度約200m程度）においては、重金属を含むリグニンなどを添加しないベントナイト泥水を使用しており、これはKCL-リグネート泥水のベースとなる泥水である。KClなども添加していない。深度が増し温度が高くなってきた時点で、地熱用の特殊泥水であるBH泥水さらにはG-500S泥水に切り替えている。この泥水は重金属を含まない地熱開発用泥水として開発されたもので、ベントナイト分の少ない泥水は250℃の高温下においても大きな安定性を示すが、その反面、石油開発用に使用されている泥水ほど分散性や泥化抑制力などが大きくない。

BH泥水およびG-500S泥水は高温安定剤、脱水減少剤、軟弱地層安定化剤としてテルナイトBH（フミン酸誘導体の一種）および高温脱水減少剤であるG-500S（アクリルアミド加水分解物）を添加した泥水である。掘削に伴い排泥温度が高くなるとテルナイトBHを添加したBH泥水を用い、更に高温になるとそのBH泥水にG-500Sを添加しG-500S泥水としている。両者の泥水の切り替えは150℃を目安とし、150℃以下はBH泥水、150℃以上ではテルナイトBHの添加をやめG-500Sを添加することにより、泥水の粘性、イールドポイントの調製を行っている。

地熱開発井の掘削においては、地熱専用の掘削泥水が存在することがわかった。また、途中で行う孔内検層は温度検層と電気検層であることがわかった。地熱に係わる掘削技術は特に高温対策などのために非常に特化した技術であることがわかった。しかしながら、地熱開発井は石油・ガス開発井よりも浅深度であることが多く（1,000～2,500mが多い）、地層科学研究分野の試錐孔とほぼ同程度の掘削長である。そのため、地熱開発井における多段ケーシングプログラムの考え方は、地層科学研究分野の試錐孔のケーシングプログラムを策定するときに参考にすべきと考えられる。

3.1.3 石油・ガス地域の試錐孔掘削状況

石油・ガス地域の掘削は堆積岩地域で行われるため、本報告の目的である堆積岩地域における試錐掘削技術の調査の目的にかなう。しかしながら、民間の石油資源企業による掘削データは内部資料となっており、通常は対外的には公表はしない。また、たとえ調査種目（例えば検層種目）などがわかっても、対外的な資料には具体的な数値を載せていないのが普通である。そこで今回は石油公団が実施している基礎試錐の調査資料をサイクル機構経由で閲覧し、石油・ガス地域の試錐孔掘削状況の調査を実施することとした。

調査対象は、平成11年度現在で最新の公開資料である、基礎試錐「夕張」（石油公団,1999^{6,7)}）および「東山」（石油公団,1999^{8,9)}）である（双方共に平成9年度）。また平成5年度と少々古くなるが今回室内試験で対象としたD-1孔コアの産地である幌延町で掘削した「天北」（石油公団,1999¹⁰⁾）についても調査した。

基礎試錐は平成10年度も実施しているが、本報告をまとめる時点（平成11年度）においては、公表されていない。

石油公団の基礎試錐は多岐にわたる調査を実施しているが、報告書の内容はデータ集という要素が強く、基礎的な解析などはあるものの、具体的な数値の既述や考察がない場合が多い。検層なども多種のものを実施しているが個々の結果については記述していないため、検層手法による特性の違いの把握などはできなかった。特に、石油・ガスの生産性を把握するのに重要な透水係数の具体的数値等は調査しても見いだすことができなかった。また、石油・ガスの生産テストと位置づけられているDST（Drill Stem Test）も実施区間と実施状況が記載されているものの、具体的な数値は記載されていない状況である。

そこで、基礎試錐の調査では、使用している掘削泥水とDSTや検層など孔内調査の項目と、それらの地層科学研究分野の試錐孔への適用性を中心に調査・検討することとした。

(1) 基礎試錐“夕張”の掘削状況

基礎試錐調査「夕張」（石油公団,1999^{6,7)}）は、道央南部地域における白亜系の炭化水素ポテンシャルを評価するための石油地質学的データを取得する目的でおこなった。この目的に従って次のように掘進中に孔内諸調査を実施するとともに、コア、サイドウォールコア、カッティングス試料などを用いた種々の調査、分析を実施した。

① 泥水検層（ガス徴、油徴、溢泥・逸水、泥水比重）

掘削にはベントナイト泥水（0～1,092.5m）、KCL-リグネート泥水（1,092.5～4,465m）を使用した。

- ・ マッドガス測定
0～4,465m（全深度）を連続的に実施した。
- ・ カuttingガス測定
0～4,465mを10m毎に実施した。
- ② 岩質調査（カuttingガス調査、コア調査）
- ③ 微化石調査
- ④ 岩石鉱物・岩石物性試験
- ⑤ 地化学分析
- ⑥ 物理検層
- ⑦ 試錐孔速度検層
- ⑧ 地震探査データ再処理
- ⑨ 産出テスト

(i) 掘削地点の層序

4,465mまでの掘削により、3枚のスラストシートが確認された。次にスラストシート別、層準別に概要を述べる。

スラストシートNo.1(0～2,813m)

スラストシートNo.1は幌内層、石狩層群、函淵層群、蝦夷層群からなる。

○ 幌内層(0～317m)

オリーブ灰色～オリーブ黒色のシルト質泥岩からなる。基底部付近には、特徴的に海緑石が含まれる、シルト質泥岩からなる。

○ 石狩層群(317～1,092m)

本層は下位よりD1～D3の3層に区分される。また、本層はNo.1～No.3のスラストシートに繰り返し出現する。

・ D3層 石狩層群上部；幾春別層：317～408m

淡灰色の細粒～中粒砂岩、淡青灰色～淡灰色の凝灰質シルト岩、オリーブ灰色～褐色で中硬質のシルト岩を主体とし、石炭および炭質シルト岩を挟在する。砂岩は概ね硬～中硬質で、淘汰度は普通である。

・ D2層 石狩層群中部；若鍋層：408～575m

オリーブ灰色で中硬質のシルト岩およびシルト質泥岩を主体とし、オリーブ灰色～オリーブ緑灰色の細～中粒砂岩を挟在する。砂岩は硬～中硬質で、淘汰度は普通であ

る。本層の上部は下部比べて砂岩が卓越する。

- ・ D1層 石狩層群下部；夕張層・幌加別層・登川層：575～1,092m

上部はオリーブ灰～オリーブ緑灰色の細～粗粒砂岩、礫岩、およびオリーブ灰色のシルト岩を主体とし、凝灰質シルト岩、炭質シルト岩および石炭を挟在する。中部はオリーブ灰～オリーブ黒色の塊状シルト質泥岩からなる。下部は明灰色の中～粗粒砂岩および礫岩をを主体とし、シルト岩～シルト質泥岩、炭質シルト岩および石炭を挟在する。砂岩は概ね中硬～硬質であるが、まれに若干膠結度の低いものが含まれる。礫岩は中硬質で円磨度の良い細～中礫を主体とし、礫種は赤～灰色チャート、石英、緑色岩などである。

- 函淵層群(1,092～1,334m)

最上部は硬質の細～中粒砂岩からなり、石炭層を挟む。中～下部はややルーズな中～粗粒砂岩・礫岩および硬質の細粒砂岩を主体とし、黄灰色で軟質の凝灰岩、黄灰色で淘汰が悪く軟質の凝灰質の細～中粒砂岩、淡オリーブ灰色で中硬質～軟質の凝灰質シルト岩、泥岩、オリーブ灰～黒色で硬質のシルト～砂質シルト岩などの多様な岩相を挟在する。最下部はオリーブ黒色で灰緑色で海緑石を含む凝灰質細粒砂岩を主体とし、黄灰色で軟質の凝灰岩、暗灰～オリーブ灰色の硬質珪質頁岩などの特徴的な岩相を伴う。本層の砂岩は淡青灰～淡緑色を帯び、チャートや緑色鉱物等を含む。

- 上部蝦夷層群(1,334～2,813m)

淡オリーブ灰色の凝灰質シルト岩およびオリーブ灰～オリーブ黒色で中硬質～硬質のシルト～泥岩を主体とし、白～淡オリーブ灰色で軟質の凝灰岩、黄灰～淡灰色で中硬質の砂質凝灰岩、淡オリーブ灰～黄灰色で中硬～軟質の凝灰質細～中粒砂岩、オリーブ灰～淡緑灰色で中硬～硬質の極細～中粒砂岩などを挟在する。凝灰質砂岩および砂岩は、粒子の淘汰度は普通～不良でしばしば緑色鉱物を含む。

スラストシートNo.2(2,813～3,844m)

- D1'層 石狩層群下部：2,813～3,462m

上部は淡オリーブ灰色の凝灰質シルト岩を主体とし、黄灰～淡灰色の凝灰質砂岩および石炭を頻りに挟む。中部はオリーブ灰～黒色の塊状シルト岩からなる。下部はシルト岩と凝灰質砂岩の互層を主体とし、凝灰岩、細粒砂岩、石炭を挟在する。

- ・ C'層 函淵層群？：3,462～3,528m

凝灰岩、凝灰質砂岩、砂岩、凝灰質シルト岩、シルト岩などの互層からなる。

- ・ B'層（上部蝦夷層群）：3,528m～3,580m

オリーブ黒色のシルト岩からなる。

○ 中部蝦夷層群(3,580~3,844m)

本層は上位より砂岩を主体とするA2層と泥岩を主体とするA1層に区分される。

・ A2層（三笠層） 3,580~3,785m

灰~暗灰色、硬質で淘汰不良の細粒砂岩を主体とし、オリーブ灰色でしばしば炭質となるシルト岩を挟在する。

・ A1層（主部） 3,785~3,844m

オリーブ灰~灰黒色を呈する硬質のシルト質殿岩を主体とし、オリーブ灰~黒褐色のシルト岩および硬質の細粒砂岩を挟在する。

スラストシートNo.3(3,844~44,65m)

・ D3"層 石狩層群下部：3,844~4,052m

石炭を挟む砂岩-泥岩互層からなる。

・ D2"層 石狩層群下部：4,052~4,151m

シルト岩を主体とし、細~中粒砂岩を挟在する。

・ D1"層 石狩層群下部：4,151~44,65m

シルト岩を主体とし、最上部および中部に石炭層をともなう砂岩-泥岩互層が発達する。

(ii) 試錐孔仕様

試錐孔仕様の概要を表3.1.3-1に示す。

(iii) 掘削作業の概要

掘削作業の概要を掘削段毎に以下に示す。主要な掘削機器の一覧を表3.1.3-2に示す。

(a) 30インチケーシングセットまで

高濃度ベントナイト泥水を使用して17.1/2インチ孔で先進掘削し、物理検層を実施後26インチビットで拡孔、更に36インチホールオープナーで拡孔し、30インチケーシングを降下してインナーストリングセメンチングを実施。逸水は認められない。

(b) 20インチケーシングセットまで

高濃度ベントナイト泥水を使用して17.1/2インチ孔で先進掘削し、物理検層を実施後26インチビットで拡孔。605mで7°まで増角した試錐孔傾斜は、減角編成と低荷重掘削

を行ったにも関わらず、硬質で急傾斜の地層の影響を受けて1,113mで12°までアップデ
ップ方向に増角した。但し、逸水は認められない。

(c) 13.3/8インチケーシングセットまで

高濃度ベントナイト泥水からKCL-リグネート泥水に替えて17.1/2インチ孔で掘削。崩
壊し易い石狩層群を掘り抜くため比重1.55程度の泥水が必要と想定。1,138mで24～
18kl/hr、1,146mで6kl/hrの逸水が発生しLCMスクイズで対処、その後も小逸水が断続的
に発生のため泥水比重の降下で対処し、1,500mでは比重1.20で逸水は止まっていた。
1,528mで発生した12kl/hrの逸水は、LCMのスポットで防止した。試錐孔傾斜を修正する
ために1,128m～2,243m間でアナドリル社のダウンホールモーター（A962M）を使用し
12°から3°に減角した。物理検層を実施後13.3/8インチケーシングを降下し2ステージ
セメンチングを行った。

(d) 9.5/8インチケーシングセットまで

角編成で12.1/4インチ孔の掘削を行ったが、2,885mで再び17°まで増角したため、
2,900mから3,650mまでアナドリル社のダウンホールモーター（A800M）で減角修正掘
削をした。掘削中のガスの上昇と崩壊の発生に対処するため泥水比重を1.22から1.53へ
序々に上げた。3,300mで4kl/hr、3,575mで10～12kl/hr、3,595mで8kl/hrの逸水が発生した
ため泥水比重を1.48程度まで下げて調泥した。3,625mからは掘進率が比較的良い箇所
で小逸水が発生したため、LCMを混入して防止した。12.1/4インチ孔は3,800mまで削る
計画であったが、試錐孔傾斜の変化が激しく、掘削トルクの上昇や掘進率の低下等から
3,650mで止めた。物理検層の後9.5/8インチケーシングを降下し、2ステージセメンチ
ングを実施したが、ケーシング降下中に9kl、循環中に18kl、ファーストステージセメンチ
ング中に10klの逸水が発生した。

(e) 4,368mの中間物理検層まで

8.1/2インチ孔の掘削を開始したが崩壊による孔内状況の悪化から3,690mから3,780m
にかけて泥水比重を1.36から1.51に調整した。4,008mで3～2kl/hrの小逸水が発生、4,150m
で石炭層に逢着したところで抑留事故発生したが、ジャーリングを行い約24時間後に離
脱。4,180mでトルクが上昇し浚渫が難航のため泥水比重を1.51から1.54に調整して掘削。
その後ガスの上昇と崩壊で孔内状況が悪化したため、再度泥水比重を上げて1.58に調整

したが、4,305mで3~1.5kl/hrの逸水が発生したため泥水比重を1.56に下げた。泥水比重を上げると逸水が発生し、下げるとガスの上昇と崩壊の発生が見られる状況となり、孔内状況が非常に悪化してきた。

4,367mで再度抑留事故が発生したが、ジャーリングで離脱、再度浚い後4,368mまで掘削し、中間検尺のための揚管時に再び抑留事故が発生した。中間物理検層も4,189m以深には下がらなかった。沿角・減角編成で掘削した区間にも関わらず3,625mで6.5°が3,770mで20°、4,005mで23°まで増角したが、地層の影響で次第に減角し3,260mで12°になった。なお、以深は孔内状況悪化のため傾斜測定は実施していない。

(f) 7インチライナーセットまで

中間物理検層後4,410mまで掘削したが孔内状況悪化のためビット、編成等を変えて5回トライしたが浚いができずプラグバックセメンチングを実施した。3回のセメンチング後4,175mからアナドリル社のMWD (Measurement While Drilling) (SLIM-1) でサイドトラックを行った。

しかしその後も4,290m付近から崩壊による孔内状況の悪化が顕著になり泥水比重を1.56から1.61へ上げたが、4,315mで2~3kl/hrの逸水が発生したためLCMで対処した。4,400m付近から崩壊防止のために泥水比重を上げると逸水が発生し、LCMで対処しなければならぬ状況に加え浚いが難航し始め、サイドトラックの前の状況に似てきたため、これ以上の掘削は不可能と判断し予定深度5,000mに未達であったが、4,465mで堀止めた。

検尺後物理検層を行ったが4,360mから下がらず、更に4,350mでスタックされたが強引して離脱できた。DSTのために3,875mまでプラグバックセメンチングを行い9.5/8インチケーシングと8.1/2インチ裸孔部にパーフォレーションをして、7インチライナー管を降下した。7インチ管はセメンチングしていない。また、3mの埋没があったため設置深度は3,872mになった。

(g) DSTから廃孔まで

ハリバートン社のツールズを使用して7インチライナー部と9.5/8インチケーシング内で3回のDSTのを行った。結果は3箇所とも油を伴わない、ごく少量のガスおよび地層水の産出に終わったため、廃孔作業を行った。

(iv) 孔芯傾斜測定結果

TOTCO傾斜測定器による孔芯傾斜測定の結果概要を表3.1.3-3に示す。

試錐孔の傾斜は地層の傾斜と走行に影響を受けている。傾斜角が増加した時点で随時ダウンホールモーターを使用して試錐孔傾斜の修正を行っているが、3,707m～3,787mに掛けではドッグレグが8.21～9.45と著しく大きい部分が認められ、トルクの上昇や孔壁の崩壊とも相まって掘削が難航したものと考えられる。

(v) 掘削泥水の使用状況

掘削区間毎に使用した泥水の種類と組成および性状の一例を表3.1.3-4に示す。また、逸水対策に使用したLCMの種類と使用量も示す。

(vi) 試錐孔調査、物理検層の状況

本試錐調査において実施した物理検層は、Composite Log、インダクション検層、音波検層、デュアル・ラテロ検層、密度・中性子検層、地層傾斜、サイドウォールコアサンプラー、セメントボンド・ヴァリアブルデンシティー検層、試錐孔内速度検層である。掘削区間毎に実施した物理検層の種類を表3.1.3-5に示す。

(vii) 掘削関係の特記事項

- ・ トップドライブを使用しており、掘削中の孔壁の崩壊や逸水等に起因する掘削中の高トルクや揚降管作業中の負荷に対して何時でも泥水循環と浚いおよびリーミングアップ等の対応をすることができたが、それでも抑留事故が発生した。抑留はジャーリングで離脱することができたが、孔内状況の悪化で予定深度の5,000m迄は掘削できなかった。
- ・ 鉛直井であるにも関わらず試錐孔軌跡が著しく変化し、ダウンホールモーターによる試錐孔傾斜の修正を余儀なくされた。原因は急傾斜の地層によるものと考えられる。ダウンホールモーターによる試錐孔軌跡の修正は全体の試錐孔軌跡の乱れを誘発し、著しいドッグレグを起こして孔壁崩壊の一因となったと推察される。
- ・ 孔壁の崩壊防止のために泥水比重を増加させると逸水が発生し、逸水防止のために泥水比重を下げると崩壊が発生する状況で、掘削にとっては非常に難しい地層であった。
- ・ 試錐孔軌跡の修正にMWDを使用したとの記載はないが、サイドトラックの際はアナ

ドリル社のMWD (SLIM-1) を使用した。

- ・ 泥水比重の選定に当たっては、基本的にはケーシング設置後のフォーメーションリークオフテストの結果から最大比重を推察し、実際は掘削状況に合わせて比重調整をしている。

表3.1.3-1 基礎試錐「夕張」の試錐孔仕様の概要

1. 概況

試錐孔名	基礎試錐 夕張
場所	北海道夕張市清水沢清栄町地内
掘削期間	開孔 平成9年12月18日
	掘止 平成10年8月19日
掘削深度	4,465m (鉛直井)
使用リグ	1625-DE (II)

2. ケーシングプログラム

掘削深度 (m)	坑径 (インチ) - ケーシング サイズ (インチ)	ケーシング 設置深度 (m)
261.00	36 - 30	258.37
1,096.00	26 - 20	1,092.50
2,391.00	17.1/2 - 13.3/8	2,375.00
3,650.00	12.1/4 - 9.5/8	3,634.00
4,465.00	8.1/2 - 7	3,872.00

3. コアリング 区間 (5箇所スポットコアリング実施)

No.	採取深度(m) (採取率%)	地層、岩石名
1	1,106~1,113 (99)	泥岩、砂岩、砂質凝灰岩
2	2,896~2,900 (100)	砂岩、石炭質泥岩
3	3,584~3,587 (93)	砂岩
4	3,724~3,732 (100)	砂岩
5	4,016~4,019.8 (79)	砂岩・泥岩・礫岩互層

4. 泥水掘削状況 (清水掘削は行われていない)

インターバル (m)	使用した泥水のタイプ
0~ 261	高濃度ベントナイト泥水
261~1,096	高濃度ベントナイト泥水
1,096~2,391	KCL-リグ ネット泥水
2,391~3,650	KCL-リグ ネット泥水
3,650~4,465	KCL-リグ ネット泥水

表3.1.3-2 基礎試錐「夕張」 主要機器設備

名称	型式	性能
ドローワーク	1625-DE	動力：1,000HPター×3台
リフトポンプ	12-P-160×2台	動力：1,000HPター×2台
ロータリーブル	D-375インデペンデントドライブ	動力：1,000HP
トップドライブシステム	TDS-3 500ton	動力：1,000HPター
マスト	カンチバ-型 730ton	高さ：47.85m
サブストラクチャー	ハイロー-型	高さ：10.67m
発電機	GTA-30(1,162KVA)×4台	600V、動力：1167HP×4台
BOP	30インチ、ハイドリル型	1,000# 1台
	21.1/4インチ、アニュー-、ハイドリル型	5,000#各1台
	13.5/8インチ、アニュー-、ハイドリル型	10,000#各1台
リフトコントロール機器		
シェルシエカー	フローラインクリーナー	3台
デシキター	T16-E4	2台
デガッサー	DG-10, シーロー	各1台
マットクリーナー	10×5インチ	1台
セントリフュージ	SC-4	1台

表3.1.3-3 基礎試錐「夕張」の孔芯傾斜測定の結果概要

測定深度 (m)	傾斜角度 (°) と記事
269	2°
605	7°
1,113	12°、迄増角のため減角修正
1,505	9°
2,225	6°
2,486	2.75°
2,980	18°、迄再度増角のため減角修正
3,310	13.5°
3,513	9°
3,625	6.5°、減角修正終了
3,713	13.25°、自然増角発生
3,770	20.0°、迄再度自然増角
4,005	23.0°、迄自然増角
4,105	18.0°、迄自然減角
4,260	12.0°、迄自然減角、以下測定せず

表3.1.3-4 基礎試錐「夕張」で使用した掘削泥水の種類と組成及び性状

掘削区間 (A)	泥水の種類	泥水組成	泥水性状
: 0~261m	: 高濃度ベントナイト泥水	クニゲルV1 11%	比重 極力低比重
		テルロース (HP) 0.10%	ファンネル粘性 (秒) 300以上
			イールドバリュ (lb/100ft ²) 80~120
掘削区間 (B)	泥水の種類	泥水組成	泥水性状
: 261~1,096m	: 高濃度ベントナイト泥水	クニゲルV1 10%	比重 極力低比重
		テルロース (HP) 0.10%	ファンネル粘性 (秒) 130
		テルポリマー (L,H) 0.20%	イールドバリュ (lb/100ft ²) 40~50
		テルソートB 0.20%	
		リグネットK 0.40%	
		ホセイリダ 0.10%	
掘削区間 (C)	泥水の種類	泥水組成	泥水性状 (2,391m時)
: 1,096~2,391m	: KCL-リグネット泥水		比重 1.21
		入替え時 掘削時	ファンネル粘性 (秒) 58
		テルゲル - - 2%	プラスチック粘性(cp) 31
		クニゲルV1 3% -	イールドバリュ (lb/100ft ²) 17
		KCL 7% 5%	ゲルストレングス(lb/100ft ²) 4~5
		テルポリマー (L) 0.40% 0.50%	API脱水量(cc/30min) 2.7
		テルポリマー (H) 0.60% 0.70%	PH 10.8
		リグネットK 4% 3%	MBC(cc/cc泥水) 1.5
		アステックスS - 1%	Kイオン(mg/l) 27,500
		XCD-ポリマー - 0.15%	
		スピダーP - 0.50%	
		A1 重油 - 0.50%	
		バライト 必要量 必要量	
掘削区間 (D)	泥水の種類	泥水組成	泥水性状 (3,644m時)
: 2,391~3,650m	: KCL-リグネット泥水		比重 1.47
		テルゲル 2%	ファンネル粘性 (秒) 73
		KCL 5%	プラスチック粘性(cp) 40
		テルポリマー (L) 0.40%	イールドバリュ (lb/100ft ²) 43
		テルポリマー (H) 0.6~0.7	ゲルストレングス(lb/100ft ²) 10~18
		リグネットK 3%	API脱水量(cc/30min) 1.7
		アステックスS 1~3%	PH 11.6
		XCD-ポリマー 0.30%	MBC(cc/cc泥水) 1.75
		スピダーP 0.5~1%	Kイオン(mg/l) 26,300
		クリンチューブ 2~5%	
		A1 重油 0.50%	
		バライト 必要量	
掘削区間 (E)	泥水の種類	泥水組成	泥水性状 (4,457m時)
: 3,650~4,465m	: KCL-リグネット泥水		比重 1.61
		テルゲル 2%	ファンネル粘性 (秒) 72
		KCL 4%	プラスチック粘性(cp) 45
		テルポリマー (L) 0.40%	イールドバリュ (lb/100ft ²) 38
		テルポリマー (H) 0.60%	ゲルストレングス(lb/100ft ²) 8~14
		リグネットK 3%	API脱水量(cc/30min) 2
		アステックスS 3~4%	PH 11.5
		XCD-ポリマー 0.40%	MBC(cc/cc泥水) 1.5
		スピダーP 1%	Kイオン(mg/l) 21,400
		クリンチューブ 4~5%	
		A1 重油 0.50%	
		バライト 必要量	

* 「必要量」と記した添加剤については、状況に応じて添加しており、具体的な数量については調査した文献からは不明である。

逸水対策に使用した逸水防止剤の種類と量

種類	使用量合計 (kg)	区間 (C)	区間 (E)
テルストップ	5,160	4,680	400
テルアラガ	5,580	5,260	200
テルマイカ	3,920	3,060	800
テルシル	9,030	6,590	1,000
マッド	940	740	200
ニューアラガF	4,000		4,000

(注) 区間 (C)、(E) はそれぞれの掘削区間で使用した量
逸水対策用のセメンチングは実施していない

表3.1.3-5 基礎試錐「夕張」で実施した物理検層の種類

検層の時期（孔井深度）	検層の種類	測定区間（m）
第1次（274m）	AIT-GR	20.6～274.0
	SHDT-GR	20.6～274.0
第2次（1,126m）	AIT-MCFL-TLD-CNL-BHC-GR	258.4～1,126.5
	SHDT-NGS	258.4～1,126.5
	CST-GR	300.5～1,080.0
第3次（2,391m）	HALS-MCFL-TLD-CNL-BHC-GR	1,094.5～2,394.5
	FMI-NGS	1,094.5～2,394.5
	CST-GR	1,109.5～1,883.5
	VSP(zero offset)	875.0～2,350.0
第4次（3,650m）	HALS-MCFL-TLD-CNL-GR	2,377.5～3,657.0
	FMI-NGS	2,377.5～3,657.0
	DSI-GR-EMS	2,377.5～3,657.0
	CBL-VDL-GR	847.0～1,145.5
		1,617.0～2,365.0
	MDT-GR	3,355.5～3,628.2
	CST-GR	2,557.0～3,635.5
中間検層（4,368m）	HALS-GR	3,641.5～4,364.0
	FMI-GR	3,641.5～4,282.0
第5次（4,465m）	HALS-MCFL-GR-BHC	3,641.5～4,337.0
	TLD-CNL-NGS	3,641.5～3,864.0
	CBL-VDL-GR	1,575.0～2,117.0
		2,660.0～3,629.0
	VSP(zero offset)	2,350.0～4,250.0
	VSP(offset)	500.0～4,247.0

（注）検層の種類を表示略

AIT	比抵抗検層（インダクション検層）
GR	ガンマ線検層
SHDH	ディップメーター検層
MCFL	マイクロ比抵抗検層
TLD	密度検層
CNL	中性子検層
BHC	音波検層（BHC）
NGS	自然ガンマ線スペクトル検層
CST	コアサンプル採取
HALS	比抵抗検層（ラテロ検層）
FMI	地層イメージ検層（DIP METERを含む）
DSI	音波検層（DSI）
CBL	セメント評価検層
EMS	坑内環境検層
VDL	VLD検層（ヴァリアブルデンシティー検層）
VSP	弾性波検層 （地下への到達時間及び反射波を捉える）

(2) 基礎試錐“東山”の掘削状況

基礎試錐「東山」（石油公団,1999^{8,9)}）では、東山地域の石油地質学的評価および今後の探鉱に資することを目的として、掘進中に試錐孔内諸調査を実施するとともに、掘削によって得られたカッティングスおよびコア試料を用いて種々の調査・分析を実施した。次に、その調査、分析項目を示す。

① 泥水検層（ガス徴、油徴、溢泥・逸水、泥水比重）

掘削にはベントナイト泥水（0～1,495m）、KCL-リグネート泥水（1,495～4,720m）、G-500S泥水（4,7200～6,100m）を使用した。

・ マッドガス測定

0～6,100m（全深度）を連続的に実施した。

・ カッティングガス測定

10～6,100mを10m毎に実施した。

② 岩質調査（カッティングス調査、コア調査）

③ 微化石調査

④ 岩石鉱物・岩石物性試験

⑤ 地化学分析

⑥ 石油根原岩分析

⑦ 物理検層

⑧ フローテスト

(i) 掘削地点の層序

6,100mまでの掘削により確認された層序の概要を述べる。

椎谷層F-2層0～242m

暗灰～帯緑灰色の安山岩類を主体とし、灰褐～褐色の安山岩質ラピリ凝灰岩や帯緑黒～暗黄褐色のシルト質泥岩を伴う。最下部は明灰色で中～極粗粒の砂岩からなり、淘汰度、円磨度ともに悪い。

上部寺泊層F-1層 242～837m

暗緑灰～緑黒色ないし、帯緑灰～暗緑色の安山岩類および暗黄褐～帯緑明灰色の安山岩質凝灰岩を主体とし、暗黄褐～帯緑灰色の泥岩を伴う。

下部寺泊層E層837～1,217m

帯暗緑灰～明灰色の中～極粗粒ないし細～中粒の砂岩および暗灰～暗黄褐色の泥岩から

なる。砂岩は主に石英の亜円～亜角粒子からなり、分級度は中程度である。

D層1,217～1,909 m

D-2層1,217～1,735m

暗黄褐～褐色ないし暗灰色の泥岩と灰～帯緑灰色ないし明灰～帯緑灰色の安山岩質凝灰岩からなる。

D-1層1,735～1,909 m

明灰～帯緑灰色ないし明灰～灰色の安山岩質凝灰岩および安山岩からなる。

C層1,909～3,127 m

明灰～帯緑灰色ないし明灰～灰色のデイサイト類および凝灰岩からなる。

七谷層B層3,127～3,853m

B-2層

帯緑灰～暗灰色ないし帯緑明灰色の酸性凝灰岩および黒褐色ないし暗黄褐色の泥岩からなる。

B-1層

黒褐色ないし暗黄褐～暗褐色の泥岩を主体とし、わずかに帯緑灰ないし灰～暗灰色の凝灰岩を伴う。

グリーンタフA層3,853～6,100m

A-4層3,853～4,023m

緑灰～明緑灰色の流紋岩類や帯緑灰～暗緑灰色の安山岩類からなり、わずかに泥岩を挟在する。

A-3層4,023～4,774m

暗緑灰～暗緑色ないし黒灰色の玄武岩類ないしドレライトを主体とし、帯緑明灰色の酸性凝灰岩や泥岩を挟在する。

A-2層4,774～5,468m

暗緑灰～黒灰色の玄武岩類および安山岩類からなる。

A-1層5,468～6,100m

暗緑灰～黒灰色の玄武岩類および灰～明灰色ないし帯緑灰色の流紋岩類からなる。

(ii) 試錐孔仕様

試錐孔仕様の概要を第3.1.3-6表に示す。

(iii) 掘削作業の概要

掘削作業の概要を掘削段毎に以下に示す。

(a) 30インチケーシングセットまで

ベントナイト泥水を使用して26インチ孔で106mまで先進掘削した後、36インチホールオープナーで92mまで拡孔し、30インチケーシングを降下後インナーストリング方式によるフルホールセメンチングを実施。

逸水は40mから52m付近の掘削中と30インチケーシング降下時およびセメンチング時に合計88klの逸水が発生したが対策作業は特にしていない。

(b) 20インチケーシングセットまで

ベントナイト泥水を使用して12.1/4インチ孔で1,495mまで先進掘削を実施。途中1,060mでスポットコアリングおよび物理検層を行った。その後、26インチ孔による拡孔を開始したが安山岩質集塊岩および硬質泥岩層で掘進率が低下したため、1,458mで拡孔を終了し、20インチケーシングを降下後、F/Oセメンターによる2ステージセメンチングを行った。同区間での逸水は認められない。

(c) 13.3/8インチケーシングセットまで

ベントナイト泥水からKCL-リグネット泥水に替えて17.1/2インチ孔で掘削。1,497mまで掘削した後PIT (Pressure Integrity Test) を実施した。泥水比重を1.40にして掘削を開始したが、硬質泥岩層でカッティングスの停滞が顕著となったことから、次第に比重を1.62まで上げて孔内を安定させた。デイサイトが変わった後も孔内状況を維持させるため、同じ比重で掘削を継続、3,112mまで掘削した後、物理検層を実施し、13.3/8インチケーシングを降下、ESセメンターによる2ステージセメンチングを行った。同区間での逸水は認められず。

(d) 9.5/8インチケーシングセットまで

12.1/4インチ孔で掘削を開始し、3,114mでPITを実施した。17.1/2インチ孔掘削時から東南東方向に試錐孔が傾斜する傾向が認められたが、当区間の掘削においてもこの傾向が続いた。そのため、3,383mで試錐孔傾斜を落とすべくダウンホールモーターおよびMWDを降下したが、途中の3,125mでの方位傾斜測定中にスタックされた。ジャーリングにより離脱したが、DHMの使用を断念し減角編成で傾斜を抑えることとした。

硬質泥岩層において掘進率の向上を図るべく、3,705mからダイヤモンドビットを使用したが、更に掘進率が低下したため、当区間の終掘までインサートタイプのビットのみを使用した。

グリーンタフ層中における3,862.8m、3,880.5mおよび4,273.8mで全量逸水が発生、LCMおよびセメントスポットで対処した。当区間での合計逸水量は1,201klに達した。また、泥水比重は1.54で掘削を開始したが、硬質泥岩層で孔内状況が不安定になったため比重を1.72まで上げた。グリーンタフ層に変わってからは、度重なる全量逸水に対処するため1.45まで比重を下げたが、これにより孔内状況が悪化したため、逸水が止まってからは比重を1.56に戻して孔内の安定を図った。

12.1/4インチ孔掘削は不安定な孔内状況が続いたことおよび13.3/8インチケーシングをセットしてから既に100日も経過していたことから、孔内状況の更なる悪化が懸念されたため、計画深度よりも280m浅い4,720mで終掘し物理検層を実施した。その後、9.5/8インチケーシングを降下し、ESセメンターによる2ステージセメンチングを行った。なお、この間において3,192m、3,921mおよび4,559mでスポットコアリングを実施している。

(e) 6,100mの終掘まで

KCL-リグネート泥水からを高温用泥水であるハイパーゲル-G-500S泥水に替えて8.1/2インチ孔で掘削を開始し、4,722mでPITを実施した。当泥水に替えたことにより掘管の外面腐食が発生したが、防食剤のコートTPで対処した。逸水は4,796.3mから5,148m間で少量発生したが、LCMスポットで対処した。泥水比重は逸水発生のため1.54から1.50まで下げたが、逸水が止まってからは孔内状況安定のため、比重1.53を維持した。しかし終掘深度が近づいてからは孔内状況が著しく悪化したため、孔内安定化のため最終比重を1.56まで上げざるを得なかった。計画深度である6,100m到達後に物理検層を実施し終掘した。尚、物理検層の結果、本区間では試ガスの対象となる区間がなかったため、7インチケーシングは挿入していない。

当区間の掘削は、深度が増すに従って揚降ドラッグとロータリートルクが上昇し、掘削リグおよび掘管の能力限界に近い吊り荷重および高トルクが発生した。そこで泥水循環圧力を軽減するために3~4%の濃度のクリーンリューブを泥水中に添加した。試錐孔傾斜の抑制は前段に引き続き減角編成で行ったが、当区間に入ってからには更に抑制が難しくなった。掘進率が上がると傾斜が増加する傾向が見られ、5,950mで最大傾斜24.5°に達した。

スポットコアリングは5,216m、5,730mおよび6,055mで実施したが、使用したコアビットCB-601（インプリグネーテッドダイヤモンドビット）の平均掘進率は良好で、特に硬質の安山岩層のコアリングにおいては非常に効果を発揮した。

(f) 試ガスおよび廃孔作業

9.5/8インチケーシング内の4,682mおよび2,780mにブリッジプラグをセットし、各々加圧テストを行った後、ゾーンアイソレーションのため、テスト対象深度上部の9.5/8インチケーシングと13.3/8インチケーシング間をコミュニケーションセメンチングによりセメントを充填した。その後、シュルンベルジェ社のPCT（Pressure Controlled Tester）ツールズとTCP（Tubing Conveyed Perforator）ツールズを組み合わせた試ガス編成を降下し、9.5/8インチケーシングと13.3/8インチケーシングの2重管内である2,540m～2,579m間をパーフォレーションすると同時にフローイングテストを実施した。結果、ガスの産出はごく微量であることが判明したため、引き続き廃孔作業を行った。

(iv) 孔芯傾斜測定結果

孔芯傾斜測定の結果概要を表3.1.3-7に示す。

本試錐孔は17.1/2インチ孔掘削時から東南東方向に傾斜する傾向が出始めた。そのため修正すべくダウンホールモーターの使用を試みたが、降下の途中にスタックされたため使用を断念した。

結局、終掘深度である6,100mまで減角編成で対処したが、深部にいくに従いドッグレックが大きくなり、揚降管時のドラッグやロータリートルクの上昇が発生した。

(v) 掘削泥水の使用状況

掘削区間毎に使用した泥水の種類と組成および性状の一例を表3.1.3-8に示す。また、逸水対策セメンチング回数と使用LCMの種類と使用量も示す。

(vi) 試錐孔調査、物理検層の状況

本試錐調査において実施した物理検層は、Composite Log、インダクション検層、音波検層、デュアル・ラテロ検層、密度・中性子検層、地層傾斜、サイドウォールコアサンプラー、セメントボンド・ヴァリアブルデンシティー検層、試錐孔内速度検層である。掘削区間毎に実施した物理検層の種類を表3.1.3-9に示す。

(vii) 掘削関係の特記事項

- ・ トップドライブを使用しており、掘削中の孔壁の崩壊や逸水等に起因する掘削中の高トルクや揚降管作業中の負荷に対して、何時でも泥水循環と浚いおよびリーミングアップ等の対応をすることができた。
- ・ 孔壁の崩壊防止およびカッティングスの停滞防止対策として泥水比重を増加させたが、特にグリーンタフ層に入ってから全量逸水が頻発した。そのため、再度泥水比重を下げる孔内状況が悪化するという、掘削にとっては非常に難しい地層であった。
- ・ 試錐孔軌跡の修正に対しては、掘削編成を変化させることのみで対処せざるを得なかった。特に8.1/2インチ孔掘削においては、掘進率が上がると傾斜が増加する傾向が見られた。
- ・ ハイパーゲル-G-500S泥水の使用に伴い堀管の外面腐食が発生した。そのため、腐食防止対策として防止剤であるコートTPを泥水に混入し、更に揚降管時には直接堀管に塗布し腐食を防止した。

表3.1.3-6 基礎試錐「東山」の試錐孔仕様の概要

1. 概況

試錐孔名	基礎試錐 東山
場所	新潟県長岡市栖吉町字貝坂地内
掘削期間	開孔 平成9年9月8日
	堀止 平成10年9月11日
掘削深度	6,100m (鉛直井)
使用リグ	1320-UE No.2号機

2. ケーシングプログラム

掘削深度 (m)	坑径 (インチ) - ケーシング サイズ (インチ)	ケーシング 設置深度(m)
92.00	36 - 30	84.76
1,458.00	26 - 20	1,450.00
3,112.00	17.1/2 - 13.3/8	3,100.00
4,720.00	12.1/4 - 9.5/8	4,701.00
6,100.00	8.1/2 - 7	-

3. コアリング 区間 (7箇所スポットコアリング実施)

No.	採取深度(m)	(採取率%)	地層、岩石名
1	1,060~1,066	(100.00)	砂岩
2	3,192~3,196	(38.75)	泥岩
3	3,921~3,924	(100.00)	流紋岩
4	4,559~4,564	(100.00)	玄武岩
5	5,216~5,220	(93.25)	玄武岩
6	5,730~5,739	(96.67)	玄武岩
7	6,055~6,064	(94.44)	流紋岩

4. 泥水掘削状況 (清水掘削は行われていない)

インターバル (m)	使用した泥水のタイプ
0~ 92	ベントナイト泥水
92~1,458	ベントナイト泥水
1,458~3,112	KCL-リグ ネット泥水
3,112~4,720	KCL-リグ ネット泥水
4,720~6,100	ハマゲル - G-500S泥水

表3.1.3-7 基礎試錐「東山」の孔芯傾斜測定の結果概要

測定深度 (m)	傾斜角度 (°)
100	0.30
200	1.00
500	1.18
1,000	3.18
1,500	4.12
2,000	4.00
2,500	3.06
3,000	7.30
3,500	12.30
4,000	7.30
4,500	11.00
5,000	6.00
5,500	24.00
6,000	21.30
6,100	20.00

表3.1.3-8 基礎試錐「東山」で使用した掘削泥水の種類と組成及び性状

掘削区間 (A)	: 0m~92m	泥水の種類	: ベントナイト泥水
泥水組成		泥水性状	
クネゲルV1	10.60%	比重	1.09~1.10
テルセローズ (HP)	0.10%	ファンネル粘性 (秒)	148~160
		イールドバリュ (lb/100ft ²)	59~60
掘削区間 (B)	: 92~1,458m	泥水の種類	: ベントナイト泥水
泥水組成		泥水性状	
クネゲルV1	4.57%	比重	1.20~1.40
テルセローズ (HP)	0.19%	ファンネル粘性 (秒)	50~68
リグネットK	1.89%	イールドバリュ (lb/100ft ²)	22~32
A1重油	0.40%		
カセインゲ	0.45%		
テルDD	0.22%		
掘削区間 (C)	: 1,458~3,112m	泥水の種類	: KCL-リグネット泥水
泥水組成		泥水性状 (3,001m時)	
	入替え時	掘削時	比重
テルゲル	2.00%	0.19%	1.62
テルボリマー (L)	0.50%	0.37%	ファンネル粘性 (秒)
テルボリマー (H)	0.50%	0.59%	42
XCDボリマー	0.10%	0.13%	プラスチック粘性(cp)
アステックスS	-	1.04%	40
リグネットK	1.00%	2.64%	イールドバリュ (lb/100ft ²)
A1重油	-	4.90%	26
カセインゲ	0.50%	1.58%	ゲルストレングス(lb/100ft ²)
スピゲ-P	-	0.39%	4~13
KCL	7.00%	6.00%	API脱水量(cc/30min)
			2.4
			PH
			11.0
			MBC(cc/cc泥水)
			2.0
			Kイオン(mg/l)
			33,000
掘削区間 (D)	: 3,112~4,720m	泥水の種類	: KCL-リグネット泥水
泥水組成		泥水性状 (4,564m時)	
テルボリマー (L)	0.31%	比重	1.56
テルボリマー (H)	0.42%	ファンネル粘性 (秒)	52
XCDボリマー	0.18%	プラスチック粘性(cp)	40
アステックスS	1.49%	イールドバリュ (lb/100ft ²)	29
リグネットK	3.28%	ゲルストレングス(lb/100ft ²)	5~14
A1重油	2.42%	API脱水量(cc/30min)	2.9
スピゲ-P	0.38%	PH	11.0
クリーンユープ	2.05%	MBC(cc/cc泥水)	2.0
		Kイオン(mg/l)	37,900
掘削区間 (E)	: 4,720~6,100m	泥水の種類	: ハイパーゲル-G-500S泥水
泥水組成		泥水性状 (5,972m時)	
テルゲル	2.00%	比重	1.53
ハイパーゲル	1.50%	ファンネル粘性 (秒)	50
G-500S	2.00%	プラスチック粘性(cp)	36
ホスタトリル	1.00%	イールドバリュ (lb/100ft ²)	18
アステックスS	1.00%	ゲルストレングス(lb/100ft ²)	4~12
A1重油	1.00%	API脱水量(cc/30min)	1.8
クリーンユープ	1.00%	PH	11.0
XCDボリマー	0.10%	MBC(cc/cc泥水)	1.5
カセインゲ	-	Kイオン(mg/l)	-
NaCl	0.05%		

* 「必要量」と記した添加剤については、状況に応じて添加しており、具体的な数量については不明である。

逸泥対策セメンチング回数と使用逸泥防止剤の種類と使用量

種類	使用量合計 (kg)	区間 (D)	区間 (E)
CMT回数	-	8	-
テルストップ G	5,500	200	5,700
テルストップ P	5,050	300	5,350
テルブガ C	4,520	200	4,720
テルブガ M	5,140	100	5,240
テルブガ F	3,560	400	3,960
テルマイカM	3,830	400	4,230
テルマイカF	3,490	370	3,860
テルシル	4,970	260	5,230

(注) 区間 (D), (E) はそれぞれの掘削区間で使用した量

表3.1.3-9 基礎試錐「東山」で実施した物埋検層の種類

検層の時期 (孔井深度)	検層の種類	測定区間 (m)
第1次 (1,485m)	PEX	85.0~1,485.0
	DSI-NGS	85.0~1,485.0
	FMI-GR	85.0~1,485.0
	CST-GR	85.0~1,485.0
第2次 (3,113m)	DLL-MSFL-GR	1,451.0~3,113.0
	LDL-CNL-NGS	1,451.0~3,113.0
	DSI-GR	1,451.0~3,113.0
	FMI-GR	1,451.0~3,113.0
	CST-GR	1,451.0~3,113.0
第3次 (4,721m)	DLL-MSFL-GR	3,103.0~4,721.0
	LDL-CNL-MSFL-NGS	3,103.0~4,721.0
	FMI-GR	3,103.0~4,721.0
	DSI-GR	3,103.0~4,721.0
	CST-GR	3,103.0~4,721.0
	CBL-VDL-GR	3,103.0~4,721.0
第4次 (6,035m)	BHC-SGR	4,701.0~6,035.0
	CBL-VDL-GR	4,701.0~6,035.0
	FMS-GR	4,701.0~6,035.0
	DLL-HSGR-SP	4,701.0~6,035.0
	HLDL-HAPS-HNGS	4,701.0~6,035.0
	Check Shot	4,701.0~6,035.0
	CST-SP	4,701.0~6,035.0
	CBL-VDL-GR	4,701.0~6,035.0

(注) 検層の種類を表示略

PEX	プラットフォームエクспレス (比抵抗、密度、中性子、ガンマ及びキャリパー検層を一つの検層器で行う)
DSI	音波検層 (DSI)
NGS	自然ガンマ線スペクトル検層
FMI	地層イメージ検層 (DIP METERを含む)
GR	ガンマ線検層
CST	コアサンプル採取
DLL	比抵抗検層 (ラテロ検層)
MSFL	マイクロ比抵抗検層
LDL	密度検層
CNL	中性子検層
CBL	セメント評価検層
VDL	VLD検層 (ヴァリアブルデンシティー検層)
BHC	音波検層 (BHC)
SGR	ガンマ線検層
FMS	地層イメージ検層 (DIP METERを含む)
HSGR	ガンマ線検層 (高温対応)
HLDL	密度検層 (高温対応)
HAPS	中性子検層 (高温対応、Minitron型)
HNGS	自然ガンマ線スペクトル検層 (高温対応)
Check Shot	弾性波検層 (地下への到達時間のみ測定)
SP	自然電位検層

(3) 基礎試錐“天北”の掘削状況

基礎試錐「天北」（石油公団,1999¹⁰⁾）では、北海道天北地域で白亜系函淵層群の良好な砂岩貯留岩が期待される豊富構造において、上部蝦夷層群までの探鉱を実施し、炭化水素ポテンシャルを把握するとともに基礎的な石油地質学的データの取得と解析を行い、将来の周辺地域の探鉱に資することを目的として、掘進中に試錐孔内諸調査を実施するとともに、掘削によって得られたカッティングスおよびコア試料を用いて種々の調査・分析を実施した。次に、その調査、分析項目を示す。

① 泥水検層（ガス徴、油徴、溢泥・逸水、泥水比重）

掘削にはベントナイト泥水（0～316m）、KCL-ポリマー泥水（316～2,100m）、KCL-リグネート泥水（2,100～5,050m）を使用した。

・ マッドガス測定

0～5,050m（全深度）を連続的に実施した。

・ カッティングガス測定

10～5,050mを20m毎に実施した。

② 岩質調査（カッティングス調査、コア調査）

③ 微化石調査

④ 岩石鉱物・岩石物性試験

⑤ 地化学分析

⑥ 石油根原岩分析

⑦ 物理検層

(i) 掘削地点の層序

5,050mまでの掘削により確認された層序の概要を述べる。

声問層0～248m

明オリーブ灰色軟質泥岩からなり、最上部に細礫を挟む。

稚内層248～1,271m

上部（1,000m以浅）は暗オリーブ灰色硬質泥岩（一部シルト質）からなる。下部は軟質～堅固な明褐灰色泥岩からなる。上下部とも凝灰岩質部を伴う。

増幌層1,271～2,247m

上部（1,750m以浅）は堅固～硬質な明褐灰色～暗褐灰色泥岩よりなる。凝灰質部、白色凝灰岩を挟み、一部（1,640m付近）に海緑石を伴う。下部は明灰色～灰色、やや固結した

砂岩、暗灰色中～細礫岩、灰色・堅固なシルト岩およびオリーブ灰色～褐灰色・硬質（一部堅固）泥岩互層からなり、基底付近で海緑石を伴う。

鬼志別層2,247～2,364m

軟質～堅固（一部硬質）の灰色泥岩と明灰色～灰色の固結した砂岩の互層（細粒相優勢）からなる。

曲淵層2,364～2,968m

明灰色～オリーブ灰色の軟質～堅固（一部硬質）泥岩を主体とし、中部および最上部に層厚10～20m程度の明灰色細粒凝灰岩（一部砂質）を挟む。また、中部には海緑石を多産する。

羽幌層2,968～3,625m

明灰色～緑灰色の粗粒～細粒凝灰岩（一部安山岩質）を主体とし、上部（3,300m以浅）では明灰色で堅固～硬質の細粒～中粒凝灰質砂岩、オリーブ灰色～暗褐灰色泥岩（一部炭質、あるいは凝灰質）および石炭を、下部では明灰色で堅固～硬質の細粒～極細粒砂岩および軟質～堅固の明灰色～明オリーブ灰色シルト岩を伴う。

函淵層群3,625～4,553m

明灰色～緑灰色で堅固～硬質の粗粒～極細粒砂岩（一部凝灰質）、中灰色で軟質～堅固なシルト岩およびオリーブ灰色の堅固～硬質泥岩（一部シルト質）を主体とし、稀に石炭の薄層が挟在する。稀に方解石脈を伴う。

上部蝦夷層群4,553～5,050m

オリーブ灰色～暗灰色の軟質～硬質泥岩を主体とし、明灰色砂岩（一部凝灰質）および明灰色細粒凝灰岩を挟在する。また稀に方解石脈を伴う。孔底付近では一部褐灰色～暗灰色シルト質泥岩～シルト岩が主体となり、海緑石を多産する。

(ii) 試錐孔の仕様

試錐孔仕様の概要を表3.1.3-10に示す。

(iii) 掘削作業の概要

掘削段毎の作業概要を以下に示す。主要な掘削機器の一覧を表3.1.3-11に示す。

(a) 30インチケーシングセットまで

ベントナイト泥水を使用して17.1/2インチ孔で先進掘削を開始した。途中、深度85mから逸水が始まり、同深度部でLCMのスポットを2回、セメントスポットを3回実施した。

以深は泥水中にLCMを混入したまま先進掘削を継続し、深度316m到達後、第1次物理検層を実施した。その後、26インチ、36インチの拡孔を深度314.5mまで行い、30インチケーシングを降下してインナーストリング方式によるフルホールセメンチングを実施した。しかし、セメントがリターンしなかったため、アニュラス部にチュービングパイプを降下し、計4回のトップアウトセメンチングで対処した。

(b) 20インチケーシングセットまで

ベントナイト泥水からKCL-ポリマー泥水に替えて、セメントおよびケーシングシューを切削後、シュー直下の深度315mでシューボンドテスト、18m掘削後の深度334mでリークオフテスト（地層が耐えうる最高圧を知るためのテスト）を実施した。しかし、両者とも十分な強度が得られなかったため、各々1回づつのスクイズセメンチングを実施し、結果、前者はEMW（等価泥水比重；孔底にかかる圧力を泥水比重に換算したもの）が1.454、後者ではEMWが1.433となった。

17.1/2インチ孔で先進掘削開始直後の深度344mで逸水が発生したが、1回のLCMスポットで防止。深度547mでの逸水は、LCMおよびセメントによるスクイズを各々1回づつ実施し、更に30インチケーシングシュー以深の補強を目的としたLCMスクイズを1回、セメントスクイズを3回実施した。深度547m以深の先進掘削でもしばしば逸水が発生したが、必要に応じてLCMやセメントで対処。しかし、深度1,288m付近からマッドガスが上昇し、更には泥水比重を1.17に下げても逸水が止まらなかったことから、予定深度よりも約260m浅い深度1,342mで先進掘削を終了。第2次物理検層を実施後、泥水にLCMを混入した状態で26インチ孔で拡孔し、深度1,328mまで到達後、20インチケーシングを挿入してセメンチングを行った。アニュラス部のセメントが確認されなかったことから、2回のトップアウトセメンチングで対処した。

(c) 13.3/8インチケーシングセットまで

17.1/2インチ孔で20インチケーシングのセメントおよびシューを切削後、シュー直下でシューボンドテスト、3m掘り込んだ位置でリークオフテストを行っており、それぞれ2.00と1.93のEMWが得られている。

KCL-ポリマー泥水を使用して比重を1.25として掘削を開始したが、マッドガスの上昇や崩壊の為、泥水比重を除々に上げていき、最大で1.76に達した。この間でも逸水が発生しているが、LCMスポットで対処。また、深度2,100mからKCL-リグネート泥水に切り

替えて掘削を行っているが、深度3,110mでマッドガスが切れなくなり、更には大規模逸水が発生した為、予定深度よりも390m浅い同深度で掘削を終了。なお、この間の深度1,389.3mでスポットコアリングを実施している。

第3次物理検層およびEM-MWD（電磁MWD）の電送実験後、13.3/8インチケーシングを挿入し、2ステージセメンチングを実施しているが、逸水は確認されていない。

(d) 9.5/8インチケーシングセットまで

12.1/4インチ孔で13.3/8インチケーシングのシューから5m掘り込んだ深度3,115mでリークオフテストを実施しており、1.93のEMWが得られている。

KCL-リグネート泥水を使用して、比重1.80で掘削を開始しているが、崩壊や孔内負荷の発生のため、最終的には比重を1.84まで上げている。

深度3,650mおよび4,150m付近での小規模逸水はLCMのスポット等で対処。また、本区間では各種のインサートビットを使用しているが、特に泥岩、凝灰岩層では芳しい掘進率は得られていない。なお、孔内状況の悪化の為、ダイヤモンドビットの使用は断念している。

深度4,570m以深での掘進率の低下、裸孔区間が1,500m以上であることによる孔内トラブルの発生の危惧および主要探鉱層準である白亜系が予想よりも早く出現したこと等の理由により、予定深度よりも約150m浅い深度4,646mで本区間の掘削を終了。なお、本区間の深度3,202m、3,969m、4,210mおよび4,360mでスポットコアリングを実施。第4次物理検層実施後、9.5/8インチケーシングを降下し、2ステージセメンチングを行った。

(e) 堀止めまで

KCL-リグネート泥水を使用して比重を1.81に調整後、セメントおよびシューを切削。深度4,649.2mのリークオフテストでは1.958のEMWが得られている。

本区間では、硬質泥岩、シルト岩が続いたため、ダイヤモンドビットでの掘進率は向上した。しかし、地層のフラクチャーに起因すると推定される孔壁の崩壊が原因で抑留気味となり、余儀なく以降のダイヤモンドビットの使用を断念している。前段でも述べた通り、主要探鉱層準である白亜系の早期出現と、上部蝦夷層群の発達があまり期待出来ないことが理由で、予定よりも450m浅い深度5,050mで本孔の掘削。なお、深度4,768mと5,020mでスポットコアリングを実施している。

(f) DSTから廃孔まで

8.1/2インチ孔から9.5/8インチケーシング管内である深度4,415m～4,690m間のプラグバックセメンチングを行った後、9.5/8インチケーシング管内で1回のDSTを実施。結果、極めて微量しかフローしなかったことから廃孔作業に移行した。

(iv) 試錐孔調査、物理検層の状況

本試錐調査において実施した物理検層は、Composite Log、音波検層、ラテロ検層、密度・中性子検層、地層傾斜、サイドウォールコアサンプラー、セメントボンド・ヴァリアブルデンシティー検層、試錐孔内速度検層である。掘削段毎に実施した物理検層の種類を表3.1.3-11に示す。

(v) 掘削関係の特記事項

- ・ リアルタイム掘削制御技術の検証として、EM-MWD（電磁MWD）を17.1/2インチ孔掘削終了後に実施。受信システムのノイズ低減方式を確立。深度2,000mまでの信号伝送は確認したが、以深部では機器トラブルにより受信不能。ただし、シミュレーションにより深度3,500mでの伝送の可能性を確認している。
- ・ スポットコアリングを計7回実施。上部より新第三系増幌層、古第三系羽幌層、白亜系函淵層群および白亜系上部蝦夷層群でそれぞれコアを採取。

表3.1.3-10 基礎試錐「天北」の試錐孔仕様の概要

1. 概況

試錐孔名	基礎試錐 天北
場所	北海道天塩郡幌延町字北進123番地1
掘削期間	開孔 平成5年10月1日 掘止 平成6年6月27日
掘削深度	5,050m (鉛直井)
使用リグ	1625-DE

2. ケーシングプログラム

掘削深度 (m)	坑径 (インチ) - ケーシング サイズ (インチ)	ケーシング 設置深度 (m)
314.50	36 - 30	310.85
1,328.00	26 - 20	1,323.00
3,110.00	17.1/2 - 13.3/8	3,104.00
4,646.00	12.1/4 - 9.5/8	4,640.00
5,050.00	8.1/2 --	-

3. コーリング 区間 (7箇所ですべてコーリング実施)

No.	採取深度(m)	(採取率%)	地層
1	1,389.3~1,398.5	(79)	増幌層 泥岩
2	3,202.0~3,211.0	(100)	羽幌層
3	3,969.0~3,976.5	(100)	函淵層群
4	4,210.0~4,219.0	(100)	函淵層群
5	4,360.0~4,364.3	(100)	函淵層群
6	4,768.0~4,769.7	(100)	上部蝦夷層群
7	5,020.0~5,029.0	(98)	上部蝦夷層群

4. 泥水掘削状況 (清水掘削は行われていない)

インターバル (m)	使用した泥水のタイプ
0~ 316	ベントナイト泥水
316~2,100	KCL-ポリマー泥水
2,100~5,050	KCL-リグ ネット泥水

表3.1.3-11 基礎試錐「天北」で実施した物理検層の種類

検層の時期 (孔井深度)	検層の種類	測定区間 (m)
第1次 (316m)	DIL-GR	0 ~ 313.5
第2次 (1,126m)	DIL-BHC-GR	310.9~1,327.0
	LDL-CNL-NGS	310.9~1,329.0
	SHDT-GR	310.9~1,329.5
	CST-GR	847.2~1,311.2
第3次 (2,391m)	LDL-CNL-NGS	1,323.0~3,113.0
	DLL-MSFL-BHC-GR	1,323.0~3,109.5
	SHDT-GR	1,323.0~3,110.0
	CST-GR	1,345.0~3,095.5
	VSP(zero offset)	500.0~3,000.0
第4次 (3,650m)	PI-BHC-GR	3,106.2~4,652.0
	LDL-CNL-GR	3,106.2~4,654.0
	DLL-MSFL-GR	3,106.2~4,649.5
	FMI-GR	3,880.0~4,567.0
	CST-GR	3,145.4~4,649.4
	DSI-GR	3,106.2~4,646.5
	CBL-VDL-GR	2,075.0~3,097.0
	NGS	3,106.2~4,634.0
	SHDT-GR	3,106.2~4,556.0
第5次 (4,465m)	DSI-GR	4,647.0~5,050.0
	CNL-LDL-HNGS	4,647.0~5,058.0
	DLL-MSFL-GR	4,647.0~5,054.0
	FMI-GR	4,647.0~5,058.0
	CST-GR	4,662.0~5,048.2
	CBL-VDL-GR	3,900.0~4,275.0
	VSP(zero offset)	2,900.0~5,050.0
	VSP(offset 'A')	1,500.0~5,050.0
VSP(offset 'B')	1,500.0~5,050.0	

(注) 検層の種類を表示略

DIL	デュアルインダクション検層
GR	ガンマ線検層
BHC	音波検層 (BHC)
LDL	密度検層
CNL	中性子検層
NGS	自然ガンマ線スペクトル検層
SHDT	ディップメーター検層
CST	コアサンプル採取
DLL	比抵抗検層 (ラテロ検層)
MSFL	マイクロ比抵抗検層
VSP	弾性波検層
PI	インダクション検層 (Phaser Induction)
FMI	地層イメージ検層 (DIP METERを含む)
DSI	音波検層 (DSI)
CBL	セメント評価検層
VDL	VLD検層 (ヴァリアブルデンシティー検層)
HNGS	自然ガンマ線スペクトル検層 (高温対応)

(4) 基礎試錐で採用された検層項目の概要

今まで述べてきた基礎試錐は様々な検層を実施している。しかしながら、これらの検層機器は毎年のように技術の向上が図られ、機器の更新が行われており、今回調査した平成9年度の基礎試錐調査で実施したものが、すでに新しい調査手法に取って変わられているものもある。特に平成5年度に実施した「天北」については、内容が古いと見なされるようになっている。ここでは、今回調査できた最新の資料である平成9年度報告の「夕張」および「東山」で実施された検層項目の概要について述べるものとする。なお、本来は目的に応じて（例えば比抵抗測定が目的など）分けて既述するのが良いと思われるが、一つの検層器で多機能を果たすものがあり、また、何種類かの手法を組み合わせる算出する測定種目（例えば孔隙率など）もあり、厳密な分類が難しい。そこで、以下では検層略号のアルファベット順に並べることにした。また、基礎試錐報告書では各検層の特性等に関する記述はない。従って、以下に示す記述はシュルンベルジェ(株)からのパンフレット収集や電話/FAXや電子メールによる情報収集によっている。

AIT (Array Induction Tool) ; 比抵抗検層 (インダクション検層)

インダクション型比抵抗検層は比抵抗検層の一種であり、Platform express (PEX) ツールを編成する際、比抵抗検層用に組み合わせることが可能な機器である。

一般に、インダクション検層は導電性構造を見る目的で、ラテロ検層は高比抵抗構造を見る目的で選択する。

よって、泥水掘削における比抵抗検層として有効な場合がある。

BHC (BoreHole Compensated Sonic Log) ; 音波検層

音波検層は検層機器内に設置された発信機の弾性波エネルギーが泥水内を伝わって孔壁に達し、地層内を伝播した音波エネルギーを受信器でとらえ、その速度を計算する検層手法である。

音波検層は、密度検層、中性子検層と組み合わせて、岩相を判定する目的で実施する。よって、堆積層の岩相変化を把握する目的に有効である。

CBL (Cement Bond Log) ; セメント評価検層

セメント評価検層は音波検層の原理を応用した検層の一つでケーシングとセメントの密着度を連続的に評価する検層である。

堆積層を掘削する際にはセメンティングをおこない、ケーシングを設置する場合があるため、その際に試錐孔状況を把握し、評価する手法として有効である。

CNL (Compensated Neutron Log) ; 中性子検層

中性子検層とは放射線源より中性子を放射し、地層内を通過する際の減衰率から岩石の孔隙率を求める検層手法である。本検層では、水素原子を含むのは岩石の孔隙に存在する水(H₂O)や炭化水素(油、ガス)であると仮定し、水素原子を岩石内の水素原子量を測定し、その結果は相対値として計算される。

中性子検層は、密度検層、音波検層と組み合わせて、岩相を判定する目的で実施する。よって、堆積層の岩相変化を把握する目的に有効である。

CST (Sidewall Core Sample Taker) ; コアサンプル採取

CSTは地層のコアサンプルを採取するツールである。ツール上に配置されたBulletが火薬の力によって地層に食い込む。下のBulletから上に向かって1つずつ異なる深度に発射し、最大60個のサンプルを1回の検層で採取可能である。よって、硬岩の場合に比べて堆積岩の場合は孔壁が不安定な場合もあり、コアの回収率が低下する場合もあるので、コアが回収できなかった区間でのサンプル採取が可能である本検層は有効と考えられる。

CSTは火薬を爆破することによってコア回収Bulletを発射するため、孔壁のダメージが大きい。近年はCSTを改良し、ビットを回転させて孔壁からコアサンプリングをするMSCT (Mechanical Sidewall Coreing Tools) が開発されている。

DLL (Dual LateroLog) ; 比抵抗検層 (ラテロ検層)

比抵抗測定のリテロ検層の一種であり、9つの電極で同時に深部および浅部の比抵抗(LLd, LLs)を測定する。

ラテロ検層は、地層の比抵抗を正確に測定するために試錐孔および隣接する地層の影響を受けないう、測定電流の方向を制御し焦点を持つ電流を使用する方法を用いた検層の一つである。

よって、岩相変化が著しく、比抵抗の値の異なる地層が接するような堆積層分布地域には有効と考えられる。基礎試錐「東山」はDLLを実施しているが、「夕張」では更に高精度に改良された**HALS** (High-Resolution Azimuthal Laterolog Sonde) を使用している。

DSI (Dipole Shear-Sonic Imager) ; 音波検層

DSIとは、従来のMonopole Source (無指向性発振子) を用いた音波検層 (弾性波速度検層) にDipole Source (指向性発振子) を組み込み、軟岩であってもP波、S波およびStoneley波を同時に測定することを可能にした手法である。

Monopole Sourceは、S波が泥水中の音波速度より速い場合 (つまり硬い地層) にはP波、S波およびStoneley波を同時に測定することが可能である。しかし、S波が泥水中の音波速度より遅い場合には、泥水の音波が先に到達するためS波の測定は困難になる。

よってDipole Source (指向性発振子) を使用するDSI検層は、地質状況が軟質な堆積層の音波検層 (弾性波速度検層) に有効である。

FMI (Fullbore Formation Micro Imager) ; 地層イメージ検層 (DIP METERを含む)

全方位地層イメージ検層は、ディップメータの一種であり、試錐孔において地層面の傾斜角とその方位 (ディップ) やフラクチャーを求める検層機器である。全方位地層イメージ検層は、SHDTに試錐孔の電氣的画像を得る機能を付け加えたFMSに、さらに電極を4方向に配置したものである。

断層、堆積構造、古流行等の地質構造の認定、解析に使用される。

堆積岩には地層の走向、傾斜のみならず堆積構造が発達するため、多くの情報が得られるので有効である。

FMS (Formation Micro Scanner) ; 地層イメージ検層 (DIP METERを含む)

地層イメージスキャナーはディップメータの一種であり、試錐孔において地層面の傾斜角とその方位 (ディップ) やフラクチャーを求める検層機器である。地層イメージスキャナーは、SHDTに試錐孔の電氣的画像を得る機能を付け加えたものである。

GR (Gamma Ray) ; ガンマ線検層

ガンマレイ検層は地層中に含まれる放射性物質が放つ自然ガンマ線の総量を連続的に測定する方法である。

泥岩、粘土等に放射性物質が含まれるため、堆積岩分布地域には有効と考えられる。

MCFL (Micro Cylindrically Focused Log) ; マイクロ比抵抗検層

マイクロ比抵抗検層 (MCFL) は、真の比抵抗を求めるために、HALSあるいはAITによ

って得られる孔壁から離れた探査範囲のデータの他に、孔壁近傍の比抵抗を求めるためのツールである。MCFLはTLD（後述）と1つのパッドに収まっている。

MCFLは測点が一つしかなかったMSFL（Micro Spherically Focused Log：マイクロ比抵抗検層）の電極配置を改良して、新たに2つの測定点を追加したものである。各測定電極からの電流の地層内への到達深度が異なることにより、探査範囲の異なる3つのデータが得られる。これらを相互比較することによって、従来、測定困難であった泥壁の比抵抗および厚さを求めることが可能になった。

よって、泥水掘削において泥壁の比抵抗および厚さを求める場合に有効な手法である。

NGS（Natural Gamma Ray Spectroscopy）；自然ガンマ線スペクトル検層

地層中の粘土鉱物に多く含まれる、ウラン（U）、トリウム（Th）、カリウム（K）から放射される放射線自然放射線（ γ 線）の強度を測定する検層である。 γ 線の強度から粘土の含まれる量（頁岩含有率）を知ることが可能である。

泥岩、粘土等に放射性物質が含まれるため、堆積岩分布地域には有効と考えられる。

PEX（Platform EXpress）；プラットフォームエクスプレス

Platform expressは従来、別の測定機器で行っていた種目である比抵抗検層、密度検層、中性子検層、ガンマ線検層、孔径測定（キャリパー検層）を1つの検層機器にまとめ、効率的に検層をおこなうことを目的として開発されたツールである。

よって、地質状況が軟質な堆積層である場合、5種類の検層を一度に実施することによって孔壁への負担を軽減できるため有効である。

SHDT（Stratigraphy High-Resolution Dipmeter Tool）；SHDT検層

ディップメータの一種であり、試錐孔において地層面の傾斜角とその方位（ディップ）やフラクチャーを求める検層機器である。

SP；自然電位検層

地層区分のための情報を得る目的で実施されることが多い。自然電位とは地層水、導電性の泥水、頁岩の相互作用により起こる電位である。この測定により地表に置かれた電極と試錐孔中の電極間の電位が連続的に記録される。その結果によって浸透性地層の把握、層の境界の認識、地層水の比抵抗算出、頁岩量の評価が行われる。

よって、堆積層分布地域には有効と考えられる。

TLD (Three-Detector Litho-Density Tool) ; 密度検層

密度検層は、検層機器内に放射線源を持つ観測装置を使用して、そこから放射されるガンマ線が地層を伝播し、検出器に到達したときの強度から岩石の密度を算出する手法である。

TLDは、2つの検出器のほかにBS (Backscatter detector) と呼ばれる検出器が放射線源のすぐ近くに配置されていて、3つの検出器から得たデータを用いるため精度の高い結果を得ることができる。また、各検出器には測定範囲によって11個のWINDOWを使用して測定するため、異なる種類および孔隙率の岩石についても、密度を求めることができる。

密度検層は、中性子検層、音波検層と組み合わせて、岩相を判定する目的で実施する。よって、堆積層の岩相変化を把握する目的に有効である。

VDL (Variable Density Log) ; VLD検層 (ヴァリアブルデンシティー検層)

音波検層の原理を利用した検層で、音波検層の波形の振幅 (amplitude) にコントラストをつけて表示する。

セメント評価 (密着度を調べる)、フラクチャー解析、Amplitude解析 (岩相変化等を把握するため) などに用いられる。

VSP (Vertical Seismic Profile) ; 弾性波検層

VSP検層は弾性波探査を応用したものである。本検層では地表に発信源を、試錐孔内に弾性波センサーを配置して、地下断層面での反射波をとらえる。

これによって地層境界面などの地質構造を把握することが可能である。よって、岩相変化が著しく、比抵抗の値の異なる地層が接するような堆積層分布地域には有効と考えられる。

(5) DST (Drill Stem Test) について

石油掘削においては生産テストとしてDST (Drill Stem Test) を実施している。大深度試錐孔試錐技術 (コア採取、検層、泥水検層) では、掘削した地層のうち多孔質層内の流体タイプしか想定できない。しかし、地層からの石油、ガス、または水を含む流体が実際に生産可能か、また流体の流量や地層の静的圧力を評価することは重要である。

これらの情報は、石油・ガスの掘削においては、通常掘削中に得られるべきデータとしており、一旦掘削作業が終了した後に行うべき試験とは位置づけられていない。この理由は、掘削される地層に石油やガスがあった場合、あるいはなかった場合で増掘や掘削終了の判断、あるいは見切りをつけた掘削中止、更には掘削した試錐孔の廃孔まで含む掘削計画の変更に大きく寄与するからである。

DSTはそのため、掘削装置を変えることなく、一時的に試錐孔の評価を行うものと定義されている。これにより地層中に含まれている流体サンプルが採取され、流量と貯留層圧の概要を評価することができる。

DSTを行う時点での前提条件は以下のとおりである。

- ① DSTが計画されている地層の掘削泥水の圧力 (つまり泥水の水柱重量による圧力) は、均衡しているか地層流体圧よりも下げて行う。
- ② 地層流体は掘削泥水に汚染されることなく、噴出の要因とならないように地表まで導かなければならない。
- ③ 試験対象でない区間の地層は、試験期間中掘削と同じ条件下に置き、試験により孔壁が広がったり、生産流体が試験対象区間から試験対象外区間からの流体の侵入を防ぐ。

上記の前提条件を満たすために以下のような準備を必要とする。

- ① 試験対象区間上に、パッカーもしくはラバースリーブをセットし、これにより孔内を試験対象区間 (パッカー以深) と試験対象区間外 (パッカー以浅) に隔離する。
- ② 孔口装置のうちテストバルブが最も重要な働きをする。試験編成の掘削ツール (ドリルステム) を降下中、テストバルブを閉じ、試験編成のドリルパイプ内は完全に空気あるいは事前に決められた高さまで水 (ウォータークッション、いきなりガスなどが突出しないようにするための水) で満たす。

パッカーセット後、バルブが開かれることで、パッカー以深の地層に含まれる流体圧が減圧される。この流体はテストバルブ上の大気圧、あるいはウォータークッションの水柱圧に達する。この減圧により、流体はドリルステム中を流れる。出てきた流体は試験編成

内に組み合わせているセパレータでガス・石油・水に分離させ、それぞれの流量を測定し、分析試料を採取する。圧力計を孔底にセットすることにより、流体の再圧縮（圧力上昇）曲線が記録される。DST試験装置の概念図を図3.1.3-1に示す。

DSTは使用機器等は大きいがかりであるがJFTと類似している。そのため、地層内から十分な流体が出てくること前提とした試験である。従って、地層からの流体が全くない場合は適用できない。それをなるべく避けるために、地層内からの流体を確保する目的で、通常試験時に火薬による爆破（通常パーフォレーションと呼ぶ）を行う場合が多い。しかしながら、パーフォレーションは實際上孔内の破壊であるため、その試験孔を観測井としての使用が困難となる。

地層からの流体が少ない場合は、孔底に設置した圧力計による圧力上昇（ビルドアップ）記録から透水性などを評価する場合があるが、石油業界では精度に問題があるといわれている。そのため、正確な評価をするために各段の掘削終了後、各種検層を行っている。

先にも述べたようにDSTは掘削中に行うものとの認識から基本的にはシングルパッカーである。つまり、パッカー以下孔底までを試験区間として対象としている。今回の3本の基礎試験の調査ではDSTをダブルパッカーで行っていない。

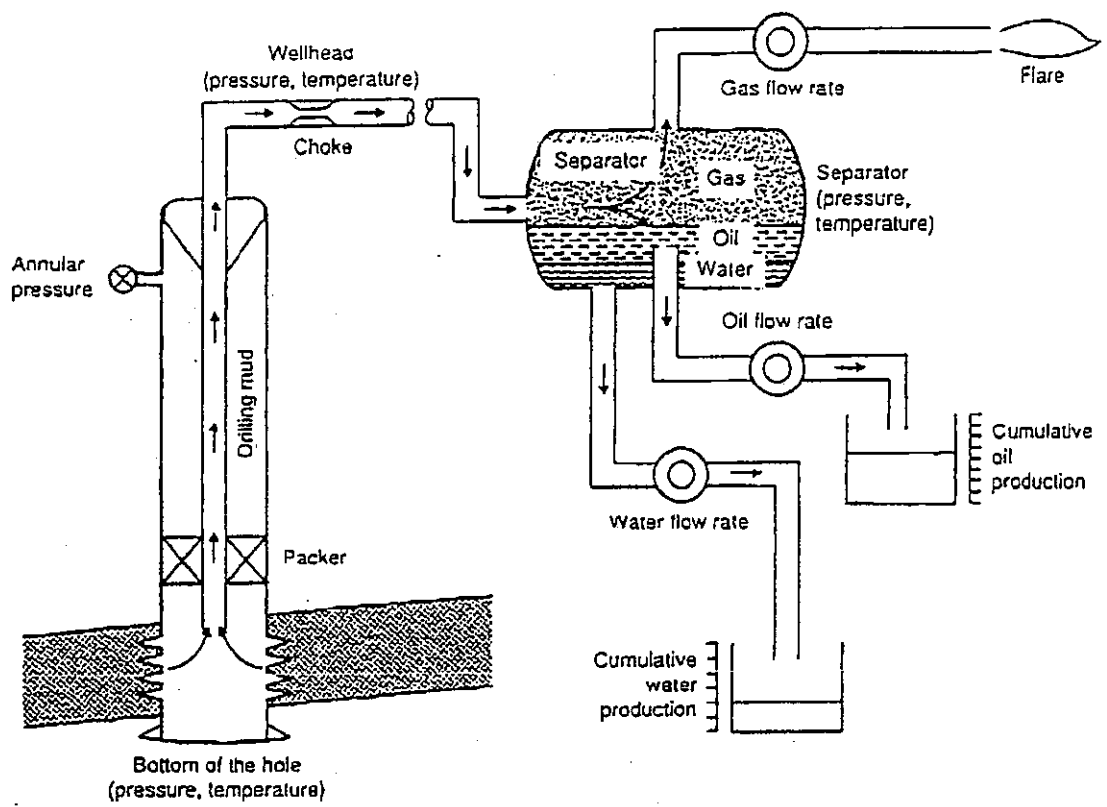


図 3.1.3-1 DST 概念図 (日本海洋掘削(株)資料より)

(6) まとめ

石油・ガスを対象とした石油公団の基礎試錐では、コア掘削は基本的に行われず、トリコンビットによるノンコア掘削が行われていることがわかった。コアは数回程度のスポットコア掘削である。地質層状の判定にはカッティングス調査とスポットコア、FMIなどの地層イメージ検層、場合によってはCSTによる孔壁からのコアサンプリングを実施している。

石油・ガスの賦存状況の把握には孔隙率、浸透率および飽和率が必要なデータであることから、これらを求めるために多種の検層を実施しているが、残念ながら今回の調査では、各々個別の検層データを取りまとめたものが見いだせなかった。従って、今回の調査では、シュルンベルジェ㈱からパンフレット収集、電話／電子メールによる情報収集で各検層の概要について調査した。

トリコンビットによるノンコア掘削であり、基本的に石油・ガスの採取を目的としていることから、清水掘削は一切行われていない。泥水としては地表付近は地熱井同様ベントナイト泥水を使用しているが、深度が深くなるとKCL-リグネート泥水が最も一般的に用いられていることがわかった。更に深度が深くなり、ある程度の温度上昇などが想定される場合は地熱同様G-500S泥水も使用されている。

掘削工事については「夕張」が非常に苦労している。急傾斜の堆積岩層のため鉛直井にもかかわらず孔曲がり激しく、修正しながら掘削している。孔曲がりの修正はMWDを使用しているが、孔内の崩落が著しくなってくると、孔曲がりの修正もできない状況までなっている。ガスの湧出が予想されるため、泥水の高比重化で孔内安定を図っているが、低圧層による逸水が始まるとまずは泥水比重を低下させることで対応している。しかしながら、泥水の低比重化がガス層などの抑制効果の低下を招き孔壁崩壊などの事故を誘発させている。それにより掘削が不能に陥り、最終的にはプラグバックセメンチングをしケーシングセット、更にサイドトラックも実施している。しかしながら、それでも孔内の安定性が確保できず予定深度5,000mに未達の4,465mで掘止めている。更に、検尺後物理検層を行ったが4,360mから下がらず、更に4,350mでスタックされたが強引して離脱している。DSTのために3,875mまでプラグバックセメンチングを行い9.5/8インチケーシングと8.1/2インチ裸孔部にパーフォレーションをして、7インチライナー管を降下したが更に3mの埋没があったため設置深度は3,872mになった。「夕張」の例は、急傾斜の堆積岩地域の掘削には細心の対策を心がける必要があるという教訓になるであろう。

3.2 最近の海外の堆積岩地域における掘削工法・試錐調査手法の調査

前項では、国内の堆積軟岩地域、地熱および石油・ガス資源探査の掘削について具体的な事例を挙げて述べた。本項では主に文献調査や事情聴取による、海外における堆積岩地域における掘削手法に関する調査結果について記述する。

3.2.1 海洋掘削計画 (Ocean Drilling Project) における掘削技術

国際機関である深海底サンプリング海洋学研究所共同研究機構 (Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling ; JOIDES) が計画運営している海洋掘削計画 (Ocean Drilling Project, 以後 ODP とする) は海底の軟堆積物のコアの採取を目的として、掘削手法やツールを開発している。本節では堆積軟岩の掘削技術として、ODP による掘削技術について記述することとする。

ODP は国際的な活動であり、特別仕様の掘削研究船 JOIDES Resolution 号で調査を行っている。JOIDES Resolution 号が保有している掘削パイプ長は 10,000m であり、JOIDES Resolution 号による ODP の最長掘削記録は、海底下 2,111m (コスタリカ沖海洋地殻) である。なお、ODP 第三期 (1998~2003 年) には日本近海の掘削が計画されており、Leg186 航海では日本海溝の陸側斜面推進 2,500m の地点に海底下深度 1,400m の孔を 2 本掘削し、孔内地震計・歪み計を設置する予定となっている。

ODP では海底掘削による試錐掘削と検層が計画の重要な部分を占めており、地化学的および地球物理的パラメータの測定に適したコアを採取すべく各種手法とツールの開発を行っている。そのため、現在までに多くの掘削ツールが開発されてきた。その主なものを以下に示す。

- ・ ピストン式コアバーレル (Advanced Piston Core ; APC) : 軟泥および軟堆積物採取に適用
- ・ 標準ロータリーコアバーレル (Rotary Core Barrel ; RCB) : 中～硬質な結晶質堆積岩採取に適用
- ・ 拡張型ロータリーコアバーレル (Extended Core Barrel ; XCB) : 安定した堆積物採取に適用
- ・ モーター駆動コアバーレル (Motor Driven Core Barrel ; MDCB) : 硬質で破碎された岩石や硬軟互層に適用
- ・ 圧力保持コアバーレル (Pressure Core Sampler ; PCS) : 原位置の圧力を保持した堆積物採取に適用

以下に軟質堆積物のコアサンプル採取のために開発された手法およびツールスについて詳述する。

(1) ピストン式コアバーレル (Advanced Piston Core ; APC)

① 概要

APC は水理学的な影響を最小にするように考案されたツールであり、海底下 250m 以深の軟泥および軟堆積物のコアサンプルを採取するよう設計されている。また、定方位コアも採取できる。

② 仕様

- ・ アウターコアバーレルの内径：3.800 インチ (96.5mm) (BHA で最も細い)
- ・ 一回の最大回収コア長：9.5m
- ・ コアリング掘削力 Coring force：28,000lbf (約 12,700kgf)

(2) 標準ロータリーコアバーレル (Rotary Core Barrel ; RCB)

① 概要

RCD は中～硬質の地層のコアサンプルを採取するために開発された、石油掘削で使用されているロータリー式ワイヤーライン工法を応用した手法である。ODP で開発されたコアリングシステムの中で最も耐久性に優れている手法、ツールである。特徴としてはライナー上のスイベルがビットの回転情報に応じてコアが回転しないよう作用をすることであり、定方位コアのサンプリングが可能である。

② 仕様

- ・ 回収コア直径：2.312 インチ (58.7mm)
- ・ 一度の回収コア長：9.5m

(3) 拡張型ロータリーコアバーレル (Extended Core Barrel ; XCB)

① 概要

XCB も、石油掘削におけるロータリー式ワイヤーライン工法を改良したものである。XCB は、RCB が対象とするよりも軟質（軟質～中程度）な地層からコアサンプルを採取するために開発されたものであり、APC などのピストンコアリング掘削ができない場合に使用している。XCB を使用してコアを採取する場合は必ずカッピングシュー (cutting shoe) を使用するが、このカッピングシューがビットよりも 7 インチ (約

17.8cm) 先端に拡張してコアを回収することができる。このため「拡張型コアバーレル」と名付けられている。従って、RCBよりも柔らかいが、安定した堆積物のコア回収に適した手法となっている。XCBについてもコアバーレルが回転しないような機能がついており、定方位コアの採取が可能である。

② 仕様

- ・ 回収コア径：2-3/7 インチ (60mm)
- ・ 回収コア長：9.8m (最大)
- ・ カuttingシュー (cutting shoe)：ビット先端より最大7インチ拡張できる

(4) モーター駆動コアバーレル (Motor Driven Core Barrel ; MDCB)

① 概要

硬質で割れ目の発達した岩石層や硬軟互層に用いる。コアバーレル内部に水圧で駆動するダウンホールモータが組み込まれており、ビットから独立した回転と荷重をカuttingシューに与えることにより、その地層に最適なコアリングを行うことができる。

② 仕様

今回の調査では情報を得ることができなかつたため、不明。

(5) 圧力保持コアバーレル (Pressure Core Sampler ; PCS)

① 概要

通常海洋底は水圧がかかっており、海洋底の堆積物も原位置では水圧がかかった状態で存在している。しかしながら、コアリングにより回収コアを海面まで運んでくる間に減圧し、回収コア中に圧縮状態で存在していたガスなどの揮発成分や水分が抜けてしまう。それら揮発成分を調査するには、加圧状態のままコアを回収のが望ましい。これを実現するために開発されたのがPCSである。PCSでは回収コアこそAPC、XCB、RCBよりも小さくなってしまいが、加圧型コアバーレルである、サンプルチャンバーは最大 689.7 気圧までの加圧ができ、その原位置圧力までの加圧状態を保存したコアサンプルの回収が可能である。

② 仕様

- ・ コアサンプルの径：1.65 インチ (42mm)
- ・ コアサンプル長：34 インチ(0.86m)

- ・ 最大サンプルチャンバー圧：689.7 気圧 (69.88MPa, 712.6kgf/cm²)
- ・ サンプルチャンバー長の全長：60 インチ (1.5m)
- ・ サンプルチャンバー外径：3.3/4 インチ (95.25mm)

3.2.2 海外の放射性廃棄物処分研究における掘削技術

放射性廃棄物処分研究計画では、掘削泥水を含む掘削手法の調査や試錐孔を用いた調査技術の情報は、多くの機関で必要とされてきており、独自に開発を試みたりしている。放射性廃棄物処分研究は、花崗岩類で代表される結晶質岩と泥岩・砂岩で代表される堆積岩地域の両方で進められている。堆積岩地域における放射性廃棄物の処分研究計画は、以下に示すような計画が存在する。

- ・ フランス (ANDRA) : URL
- ・ ベルギー (SCK/CEN) : Mol の HADES 地下研究所における地質調査
- ・ スイス (NAGRA) : Mont Terri 研究所における Opalinus Clay の掘削
- ・ イギリス (NIREX) : セラフィールドサイトにおける第四紀堆積物および富ガス堆積物での掘削
- ・ スペイン (ENRESA) : Duro 盆地における粘土層の掘削調査

しかしながら、試錐孔は掘削後の試験が目的で掘削されるものであるため、掘削後に測定されたデータや試験結果については膨大な報告書等が公開されているものの、掘削工法や使用した流体の情報は非常に少ないのが現状である。どの組織においても掘削工法や掘削流体が地質環境に与える影響について配慮しているようであるが、報告書にはその点の記述が少ない。従って、今回の調査では文献調査および過去に行った事情聴取（電話、FAX、電子メールによる）のメモなどから有効な情報が得られた、ベルギーの SCK/CEN およびスイスの NAGRA の事例について報告する。

(1) ベルギー (SCK/CEN)

以下の記述は Mol 原子力研究センターの Dr.Martin Put からの聴取した情報に基づいている。ベルギーでは Mol における HADES 地下研究施設は非常に低透水性である Boom Clay 泥岩層に位置している。この研究地下研究施設においては二つのタイプの掘削工法が採用されている。

一つ目は一般的な掘削工法（ワイヤーライン工法など）を使用した地表からの試錐孔掘削である。これらの地表から掘削される試錐孔は広域およびサイト領域の地下水流動解析などを実施するための水理データの取得を目的としている。地球化学的データの取得は第一義的な目標には含まれていない。地表からの試錐孔は基本的に清水掘削であり、使用される掘削流体はそのサイトの水道水を使用している。

二つ目は HADES 地下施設の坑道内から試錐孔を掘削するものである。坑道内から掘削

する試錐孔には掘削流体を用ず、圧縮空気あるいは圧縮窒素が使用される。特に地球化学的あるいは鉱物学的なデータ取得を目的とする試錐孔の場合は必ず用いられている。また、間隙水の試料採取のための試錐孔掘削の場合は酸化状態を避けるために圧縮窒素を選択している。清水掘削では水により膨潤する泥岩層でも、空気掘削することにより粘土層を膨潤させることなく、安定した掘削が可能である。

(2) スイス (NAGR)

NAGRA が発行した報告書には掘削方法や使用した掘削流体の詳細な情報は記載されていない。従って以下の記述は、Dr.Mark Thury、Dr.Andreas Gautschi、Dr.Andreas Scholtis およびベルン大学の Dr.Russell Alexander からの聴取情報を基にしている。

NAGRA はスイス北部において Mont Terri 計画の一環として Opalinus Clay における掘削計画を実施している。掘削工法や使用した流体の情報は少ないものの、掘削後に測定されたデータや試験結果については、膨大な報告書が公開されている。但し、Gautschi and Scholtis(1989)には簡素ではあるが、スイス北部で使用された掘削流体について記述がある。Gautschi and Scholtis(1989)による NAGRA の目的別掘削流体の使い分け法の概要は以下のとおり。

- ・ 清水：崩壊しない安定な岩盤で使用。
- ・ 脱イオン水：崩壊しない安定な岩盤で、同位体分析試料を採取する場合に使用。
- ・ ポリマー泥水（清水ベース）：泥岩を挟むやや崩壊性の岩盤で使用。
- ・ ベントナイト泥水（清水ベース）：固結度が弱い砂岩や泥岩を挟む崩壊性の岩盤で使用。
- ・ ベントナイト泥水（塩水ベース）：岩塩掘削のみに使用。
- ・ バライト泥水（清水ベース）：暴噴の危険性がある場合のみ使用

全てにトレーサーが添加され、掘削流体の挙動についてトレースされている。トレーサーとしては、フルオレセインナトリウム（通称ウラニン）と m-TFMBA（メタ-三フッ化メチル安息香酸）が使用されている。

NAGRA では Mont Terri 計画において泥岩層（Opalinus Clay）の掘削を実施している。Opalinus Clay は低透水性の泥岩からなっている。計画の初期の段階では、塩水（NaCl）を使用した一般的なロータリー掘削を実施していた。NaCl は泥岩の水の吸収と膨潤を抑制する目的で添加されている。また、塩（NaCl）を添加したベントナイト泥水も使用している。これは、ベントナイトを添加することにより泥壁を形成させ、孔壁の自立を向上させると

ともに、粘土の膨潤をさらに抑制することを目的とされた。これらの掘削流体の使用は掘削工事そのものには大いに効果を発揮したが、岩石試料、地下水分析をすると、NaCl がかなりの岩石-掘削流体反応と汚染を引き起こしていることが示された。

次に Mont Terri では圧縮空気のみを用いた掘削が実施された。この方法は、透水性が低い岩盤であったことにより、実施可能であることが証明された。このことは、試錐孔掘削中に周囲から地下水が侵入してこなかったことを意味している。

NAGRA では掘削流体と岩石が接することによる水-岩石反応の違いを比較する実験も実施している。3本の異なる試錐孔を掘削し、それぞれに異なる流体、すなわち脱イオン水、塩水 (NaCl)、泥水 (NaCl を添加したベントナイト泥水) で満たし、しばらく放置した後孔内の水試料と岩石試料を採取した。その結果、脱イオン水が最も化学的な汚染が少ないが、岩盤への物理的な損傷 (膨潤や崩壊) が著しいという結果になった。

さらに NAGRA ではシリケート泥水を使用して試錐孔の掘削も試みている。さらに、試錐孔掘削の後、水理試験を実施するためシリケート薄膜を除去するため、シリケートブレーカー (NaOH) を孔内に循環させ、さらに孔内を地層水を模擬した合成水に置換させた。その結果、シリケート泥水は岩石の透水性を変化させない、あるいは変化が小さいことが判明した。Opalinus Clay を用いた室内試験も実施している。なにも処理されていない Opalinus Clay は水に浸漬するとすぐに崩壊を始める。しかしながら、シリケート泥水に接した Opalinus Clay は水に浸漬しても崩壊しない。電子顕微鏡観察では、試料の表面や空隙も十分にシリケート薄膜でコーティングされていることがわかった。シリケート薄膜でコーティングされた試料を、シリケートブレーカー (NaOH) に浸して 2 時間後に状況を観察したところ、元の状態近くまで回復したことがわかった。以上より、シリケート泥水は岩石をシリケート薄膜コーティングし、水との接触を防ぎ元の構造を保護するメカニズムが判明した。

3.2.3 石油資源探査・開発における掘削泥水の調査（参考）

以下に海外からの資料収集や事情聴取によるシュルンベルジェ社が取り扱っている「QUADRILL」、「ULTIDRILL」および「VISPLEX」を事例として述べる。

(1) QUADRILL

QUADRILL 泥水は塩、陽イオン、ポリマーおよびポリオールを混合した泥水である。本泥水は環境汚染の規制が厳しい地域用に、オイルベースの掘削泥水に代わるものとして開発された水ベースの掘削泥水である。これは剥離性の著しい頁岩の剥離崩落を防止し、孔内に潤滑を与え、掘削水の岩盤への浸透を抑え、掘削中の孔内温度や孔内状況を安定させ、さらに石油貯留層に与える影響が小さいという特徴がある。

QUADRILL 泥水は掘削中の孔内状況を極めて安定させドリルパイプのスタックなどの障害を減少させることができるため、掘削作業を短時間で完了させることが可能である。水ベースではあるが、各種塩、陽イオン、ポリマー、ポリオールなどの添加により泥水の崩落抑止作用を高め、粘土鉱物の水和や散乱も抑止できる。これにより例えば粘土鉱物の膨潤や剥離の誘発や孔径が小さくなるというような多くの掘削に関する障害を回避できる。

このように本泥水は水による影響を受けやすい崩落性の地層や軟質の堆積層の掘削には信頼性が高い。また、本泥水は油成分がなく、きわめて毒性は低く、地質環境への浸透性が低い。

(2) ULTIDRILL

Dowell 社製の ULTIDRILL 泥水は、環境汚染の規制が厳しい地域用に使用する目的で作られた、合成オイルベースの掘削泥水である。本泥水のベース流体は低粘性の非石油起源の合成ハイドロカーボンである。

本泥水は掘削中の圧力損失を減少させるために極めて低粘性となっており、そのため試験孔洗浄効果が向上している。泥水中にカッティングスや岩石粒子などが懸濁しても流動特性が低下しないという特性を持っており、油／水比が多少変化しても粘性などが変化しにくいいため KCL-リグネート泥水などよりも調泥に関わる時間を短縮することが可能である。

また、ベース流体は不活性であり、酸性条件下やアルカリ条件下でも変質しにくい。そのため、本泥水は高アルカリのセメントへの接触、塩・高塩水濃度の地下水、二酸化炭素などのガスの泥水への混入条件下でも安定した掘削を実施することができる。また、各種

添加剤の添加によって 200℃以上の高温環境下でも泥水の物性を安定化させることができる。

(3) VISPLEX

VISPLEX 泥水は、高角度の傾斜井および水掘削で物理的に弱い部分を安定化させたり、固結度が低い岩盤を掘削するために発達した水ベースの掘削流体である。

VISPLEX viscosifier はベントナイトと組み合わせることにより、降伏値が高く、低粘性で高ゲルストレングスの shear-thinning 流体を作製することができる。VISPLEX 泥水は流速が早い場合であってもカッティングスや岩石粒子を懸濁させる能力が高い。高 shear-thinning に調整された泥水は特に高角度の傾斜井においてカッティングスなどの運搬排出性能が高い。このことは泥水循環のポンプ圧を低くしても、高い掘進率を期待できる。

本泥水は毒性が弱く、泥水の有機物質は低濃度であり、地下水理や地下水の地球化学特性など地質環境への影響は少ない。

3.2.4 まとめ

ODP で開発された機器は、大洋底の未固結の堆積物から、比較的硬い岩盤まで掘削可能なように各種機器開発がなされている。特にコアを定方位でかつ堆積構造などを破壊しないように、更には採取地点の圧力を保存してコア採取／運搬する方法は優れたものがある。

海外の放射性廃棄物処分研究に係わる試錐孔掘削手法の調査については、今回はベルギーとスイスの事例を抽出した。地下の岩盤や採取するコアの水理学的および地球化学的データに影響を与えないような手法が考案されているが、実際上は試錐孔の使用目的と岩盤状況に合わせて掘削流体を含む掘削手法を選定していることがわかった。特に掘削流体は圧縮空気、脱イオン水、清水、塩水、ベントナイト泥水および塩水ベースのベントナイト泥水と主に岩盤の状況から使い分けている。圧縮空気を流体とした手法は岩盤中から試錐孔中に水が湧き出してこないという条件が必要である。我が国の堆積岩の岩盤で水が湧出しないような岩盤は非常に限られていると考えられるので、圧縮空気による掘削は我が国では適用困難であろう。

地下水理と地球化学の両方の要求を満たし且つ安定した掘削が可能な掘削流体については、最近の研究開発によりシリケート泥水がその条件を満たす可能性があることが示唆された。

4. 試錐孔掘削工法・調査手法に関する予備的検討

4.1 試錐孔掘削計画の指針

今年度の泥水試験は試験対象の岩石サンプルが幌延町勇知層砂岩と幌延町声問層上部相泥岩（以上 D-1 孔コア）およびそれらと時代、岩石物性が類似していると評価される房総半島清澄地域の砂岩と泥岩の合計 4 個であった。

今年度試験対象とした岩石のうち声問層上部相泥岩は脱イオン水に接触した場合、1 日で原形をとどめない程度に崩壊するが、他の 3 者（勇知層砂岩、清澄層砂岩および泥岩）は脱イオン水でも崩壊しない。一方、試験に使用した KCL-リグネート泥水、シリケート泥水 A、シリケート泥水 B および DIF の 4 種類の泥水については、幌延声問層上部相泥岩でも崩壊を防止できるデータは取得できた。

室内試験の結果から予想される地下水理、地下水の地球化学、岩石の地球化学特性に与える影響が最も少ないと予想されたのは、シリケート泥水であった。特に KCl を添加しているシリケート泥水 B が有効であった。シリケート泥水の有効性については海外（スイス NAGRA）からの事例調査でも明らかになっている。

掘削に対する安全性については、KCL-リグネート泥水と DIF が信頼性に富む掘削流体である。KCL-リグネート泥水は石油・ガスの掘削では最も一般に使用されている。しかしながら、DIF については、石油生産ゾーンの掘削など特殊な用途に用いるものであり、使用実績がまだ少ない状況である。

以上より、

- ① 砂岩および泥岩のような堆積岩でも清水である程度掘削が可能な岩石があること、
- ② 清水で掘削が不可能でもシリケート泥水で膨潤や崩壊がある程度抑制できること、
海外でも実績があること
- ③ 掘削が困難な、あるいは困難が予想される場合は KCL-リグネート泥水が最も有効であること

がわかった。

石油掘削においては、そのほとんどをトリコンビットによるノンコア掘削を行うため、地下深部の透水性、孔隙率、および飽和度を把握するための試錐孔調査手法、特に各種検層を実施しており、それらの検層機器が年々改良／特化している状況がわかった。

4.2以下に示す条件は、今回の室内試験や調査結果を参考に設定した。しかしながら、今後の更なる室内試験や原位置試験、実際の試錐孔掘削による調査対象地域の調査が進むに

つれて次第にいろいろな特性が明確になるものと考え。調査が進んでいく上で不明瞭であった条件がより明確になれば、試錐孔掘削計画はより安全性を高め、より具体的に決めることができ、結果としてより経済的に調査を実施することができるようになるものと考え。

上記のような考察を基本に、試錐孔掘削に必要な条件として現状で考えられる項目を仮定し、仮定的な試錐孔掘削計画と検層等による孔内調査計画を立案するものとする。また、計画立案時に出現する問題点を抽出し、その問題点を解決するための試験方法等を含めて検討する。

なお、今後この計画案を参考にして堆積軟岩地域の調査が進み、今回仮定した条件の事実関係が明確になれば、訂正すべき条件は訂正し、実状に即したより良い計画に変えていく必要がある。

次項以降に示す条件は、仮想的なモデル地を想定して設定するよりは、具体的な岩石物性データが入手できている地点で設定する方が今後の堆積軟岩地域で試錐掘削を行う時の参考になるものと考えられる。そのため、次項以降では堆積軟岩中1,350mまで掘削データを入手できている幌延町D-1ボーリング地点付近を想定して記述する。

4.2 試錐孔掘削計画に当たっての設定条件

4.2.1 地質条件

幌延町D-1孔の地質状況は概略以下の通りである。

地表から深度350mまでは更別層、その下は深度890mまで勇知層、更に、勇知層以深1,350mまで声間層上部相が分布していることが確認されている（JNC,1998¹⁾）。

更別層は岩相変化が著しく泥岩、砂質泥岩、中粒砂岩、砂岩、礫岩等が互層をなしており、全体に固結度が低く、コアはかろうじて自立する程度の硬さで、手でほぐすことができる。礫岩の礫には先第三系の砂岩、頁岩、チャート、緑色岩、花崗岩類、安山岩類等が含まれていて固結度は低く、全体にルーズな状況である。

勇知層は全体には均質な細粒砂岩が主体であるが、上部は中粒砂岩で固結度はやや低く、コアは棒状を示し、指でつぶせる程度の軟らかさである。また、中部の細粒砂岩の部分は比較的良く固結しているが、コアは手で折ることができる。下部は砂質泥岩と泥岩を挟在し声間層上部相に移行する。

声間層上部相の上部は泥岩、砂質泥岩、細粒砂岩がおおまかに互層し、中～下部は砂質

泥岩を主体とし、所所に泥岩を挟在する状況が見られる。全体に無層理で均質であり、固結度も比較的高く、下部に行く程固結度が良い。

4.2.2 天然ガスの存在と圧力の仮定

D-1孔の掘削結果からは、深度800m付近の勇知層の細粒砂岩、声間層上部相の930m付近の細粒砂岩および1,180m～孔底（1,355m）付近の砂質泥岩と細粒砂岩では、採取したコアの表面からガスの気泡が発生する等のガスショーイングが確認されており、このガスを採取した結果、可燃性ガスの存在が認められている。しかしながら、掘削中の泥水比重は1.02～1.11で特に問題が発生しなかった点からは、ガスの圧力は概ね静水圧程度と推察される。今回の掘削計画案の立案、検討に当っては、深部に存在するガスの圧力をいくりに設定するのが非常に重要である。

一般に、天然ガスは地質構造的に背斜構造の背斜部に、泥岩等の透水性の低い地層をキャップロックにして、その下位の空隙率の大きい砂岩等に含まれている場合が多いと考えられる。しかしながら、ガスは流動性があるため、地層内の割れ目や岩盤中の空隙部を通じて移動し、局部的にガスの溜まりやすい地質構造の部分があればそこに溜まっていることも十分に考えられる。

掘削中の試錐孔がガス層に逢着する可能性は、掘削する地点の地質構造が重要な要素になると推察される。しかしながら、ガス層が存在する可能性は推察できても、ガス圧や胚胎している量等を予測し、安全対策を講ずることは事実上困難な状況である。因って、安全に掘削を行うためにはある程度のガス圧を設定し、この状況に安全に対処できる方法で掘削計画を検討する必要がある。

ここでは、D-1孔は高比重泥水を使用していないが、ガス対策を講じて掘削をするものとした。ガス層の圧力を想定する根拠はないが、ガス層の圧力は比重1.7以下の泥水で十分に抑圧できるものと仮定する。この条件は深度1,000mで清水柱圧力10MPaに対し17MPaの泥水柱圧力を掛けられることで、これ以下のガス圧力は泥水柱圧力で抑圧が可能となる。更に、深度1,500mでは清水柱圧力15MPaに対し25.5MPaのガス圧力まで抑圧が可能であることを意味する。

4.2.3 オールコアリング掘削と清水による掘削の可能性、および先進地質構造試錐

掘削は表土層を除いてオールコアリングとし、コア採取率は100%を目標に、且つ、掘削中の作業でコアを破損する恐れが最小限の掘削工法を採用する。基本的には泥水掘削で行

う。試錐孔の仕様は、掘削作業や掘削後の試験作業の安全性を考慮して多段ケーシング式とする。つまり、最終段が掘削終了後の試験対象区間とする。従って、試錐孔の仕上げで浅部のケーシング、セメンチングを行う区間については、掘削後の試験対象とならないので、最も一般的に使用されているKCL-リグネート泥水を使用する。

最終段の試験対象区間については、可能な限り地下水理に対する影響が少ない泥水、具体的には今回の室内試験で、比較的良好な結果が得られ、さらにスイスのNAGRAで一定の評価が得られているシリケート泥水を用いる。但し、シリケート泥水で孔壁の膨潤や崩壊の抑制が困難な場合およびガスの湧出などが認められる場合は、速やかに比重の調整などが可能なKCL-リグネート泥水に切り替える。この場合、採取コアのリアルタイムの観察から必要と判断される場合は、スポット的にシリケート泥水あるいはDIFに切り替えることも考慮する。

先進試錐孔やリアルタイムに行うコア試験結果から、清水掘削が可能と判断される結果が得られれば、清水（地層水）掘削を行う。清水掘削中、孔壁の膨潤、崩落が認められる場合は、泥水掘削（シリケート泥水、DIF、更にはKCL-リグネート泥水）に切り替える。

上記ような使用に足る観測孔掘削の前に、コア採取を主目的とした先行地質構造試錐を掘削するのが理想的である。先進地質構造試錐はコアの確実な採取を目的とするので、全深度泥水掘削で行う。以後の掘削泥水選定に必要なデータを得るためのコア試験を以下に示す。

- ・ 比重試験
- ・ 密度試験
- ・ 吸水率試験
- ・ 含水量試験
- ・ 有効間隙率試験
- ・ 室内透水試験
- ・ 浸水崩壊度試験
- ・ 吸水膨張試験
- ・ 膨潤圧試験
- ・ CEC試験
- ・ 一軸圧縮強度

以上の試験を実施することにより、岩石の掘削に対する物理的挙動と水に接触した場合

の挙動を予測することができ、掘削泥水選定の指針とすることができる。先行地質構造試錐の掘削地点については、今後行われる試錐掘削計画地点で出現が予想される全ての岩相がコアとして得られる地点が望ましい。また、試験数量は特異データの評価をするために一つの地質層準に対して3箇所以上取得するのが望ましい。

なお、先進地質構造試錐で使用する掘削泥水はトレーサーを混入し、採取されたコアのトリミングを行い、コアに侵入したトレーサー濃度を測定し、泥水の影響を評価するのが望ましい。

4.2.4 物理検層、BHTVと水理試験および採水試験計画

試錐孔を掘削すると、孔内の地質状況の判断や物性を連続的に知るために、孔内検層が行われる。検層の目的を大まかに分けると、地質構造の把握、岩盤の物性値、特に透水性の把握に分けられる。更に岩盤の透水性の把握には、岩盤比抵抗、孔隙率などのデータが必要であり、可能な限り連続したデータであることが望ましい。更には目的とした深度の採水も可能であれば、地下の地質環境の把握に大いに寄与できる。

検層技術も石油探査技術において発展したものであり、地熱などでも基本的には石油技術と同じ機器あるいは、耐熱型機器を使用しているに過ぎない。従って、検層器は基本的に泥水中で測定することを想定しており、泥水中で、しかも孔壁に泥壁が厚く付着している状態でも正確な物性データを取得できるように設計されている。必要な場合は泥壁をこすり取る、あるいは押しのけながら測定する検層器も存在する。検層器開発において想定している泥水は最も一般的なKCL-リグネート泥水などであるが、シリケート泥水中でも清水中でも測定には全く影響しない。

以下では、3.1.3で調査した石油公団の「夕張」、「東山」で実際に行われた検層を参考に、本想定地域で地質構造、透水性、更には孔内で採水する検層計画について検討する。なお、以下に検討する技術の一部については基礎試錐「夕張」、「東山」以降に開発されたものもある。この技術についてはシュルンベルジェ(株)からの事情聴取によって情報を得た。なお、以下に示す検層機器は全て国内で使用実績があり、国内に機器が存在しているものである。

(1) 地質構造の把握

地質構造の把握にはコア観察が有効であるが、コアの回収率が悪い場合や更には脱落などによりコアが場合などがあり、その区間地質のデータが取られない場合ことがある。特

に堆積軟岩の掘削ではコアの脱落は頻度が高くなる。近年はコア脱落を防止する各種の工夫がなされたコアバーレルなどが開発されているが、未だ決定的な手法はないというのが現状である。コアの脱落はブランクの調査区間が生じるだけでなく、コアの移動により、深度が不正確になる。また、コアは定方位コアを採取しない限り割れ目などの層厚傾斜が不明である。従って、ある程度地質構造の正確な深度や割れ目などの走行傾斜の把握には孔内を直接目視、写真／ビデオ撮影できるBHTV(BoreHole TeleVision)が使用されてきた。しかしながらBHTVは試験器を試錐孔に挿入しカメラで目視、写真およびビデオ撮影するものであるため、試錐孔中を満たしている孔内水が透明(つまり清水)であることが条件となる。本試錐孔掘削計画では泥水掘削を想定しており、たとえシリケート泥水中でもBHTVによる孔内観察は不可能である。また、たとえ清水であっても堆積岩は結晶質岩ほど懸濁物が発生しない掘削は不可能であり、BHTVによる孔内観察は困難であると考えられる。従って、これに代わる調査手法を検討し、実施する必要がある。このようなデータを泥水掘削した後の堆積岩の孔壁から採取できる技術としては、シュルンベルジェ社のFMI

(Fullbore Formation MicroImager)や物理計測コンサルタント社のEMI(Electrical Micro Imaging)と呼ばれる電気検層の応用技術が最適と考えられる。FMIやEMIと呼ばれる方法は、岩盤の比抵抗を精密に測定し、孔壁の岩盤状況を電気伝導度の違いで分析し画像表示する技術である。岩盤の電気伝導度の違いは堆積岩中の岩層の違いや割れ目に影響されるので、必ずしも割れ目だけを表示しているとはいえない。特にその割れ目が開口しているかどうかはFMIではわからない場合が多い。そのため、超音波を利用したシュルンベルジェ社のUBI(Ultrasonic Borehole Imager)と呼ばれる方法がある(基礎試錐「夕張」、「東山」では実施されていない)。この方法は、孔壁の凹凸等の形状や孔壁に見られる割れ目の状況等の調査に利用されているものである。超音波を孔壁面に照射し、その超音波が孔壁から跳ね返ってくるまでの時間で孔壁までの距離を計測し、孔壁面の凹凸や割れ目の状況を観測し、また、跳ね返ってきたものの波長の減衰状況を計測し、孔壁面の堅さ、柔らかさを評価し、岩盤の性状を分類するものである。UBIはこの反射してくるまでの時間と波長の減衰状況の両方のデータを利用して、孔壁面の状況を観察し、映像として出力する技術である。従って、副産物として非常に感度の良い全方向の孔径データも得ることができる。FMIやEMIとUBIを併用することで、孔壁面に現れた岩盤中の地層の変化と割れ目の分布状況、更に割れ目の開口性などを評価することが可能である。

先にも触れたようにコアが採取できなかった区間で、岩石サンプルが必要となる場合が発生することもある。FMI、EMIおよびUBIでは孔壁の微細な比抵抗構造や弾性波速度構造

が得られるに過ぎない。その場合、基礎試錐「夕張」、「東山」ではCST (Chronological Sample Taker) を用いている。これは、記述したように火薬を利用したものであるため、孔内に大きな損傷を与える可能性がある。そのため、3.1.3に記述したように近年ではビットを回転させるMSCT (Mechanical Sidewall Coring Tool) が開発されている (図4.2.4-1参照)。これらの機器は、基本的に石油開発井はトリコンビットによるノンコア掘削であるため、後に岩石試験に必要な資料を採取するために開発された。本試錐孔掘削計画では、コアが採取できなかった区間の岩石の採取に適用する。従って、コア回収率が100%である場合は不要である。

(2) 透水性把握

3.1.3で検討したように、石油開発井においては、石油・ガスの生産テストとして位置づけられているDST (Drill Stem Test) がある。しかしながら、DSTは基本的に掘削途中で行うことを目的としており、シングルパッカーで、パッカー以深～孔底までを試験区間として行われる。従って、試験回数を多くすると、掘削工程に影響することになる。また、場合によってはパーフォレーションなどの爆破作業を伴うため、孔内状況の悪化を引き起こし、以後の掘削作業に障害を生じる場合もある。更に、掘削中に行う試験であるためコア観察やコアを用いた室内試験結果から後日水理試験区間を設定しDST実施することは困難である。

石油開発井では孔内検層により、透水性を把握できるデータとして、比抵抗、密度、孔隙率、有効空隙率の可能な限り正確なデータをしようとしている。

HALS (High-Resolution Azimuthal Laterolog Sonde) はラテロ比抵抗検層器である、ラテロ検層は、地層の比抵抗を正確に測定するために試錐孔および隣接する地層の影響を受けないよう、測定電流の方向を制御した電流を使用する検層である。従って、通常実施されている電気検層よりも地層の真の値に近い比抵抗値が高精度で得られる。よって、岩相変化が著しく、比抵抗の値の異なる地層が接するような堆積層分布地域には有効と考えられる。

TLD (Three-Detector Litho-Density Tool) は γ 線を用いた密度検層である。検層機器内に放射線源を持つ観測装置を使用して、そこから放射されるガンマ線が地層を伝播し、検出器に到達したときの強度から岩石の密度を算出する。TLDは、2つの検出器のほかにBS

(Backscatter detector) と呼ばれる検出器が放射線源のすぐ近くに配置されていて、3つの検出器から得たデータを用いるため精度の高い結果を得ることができる。また、各検出器

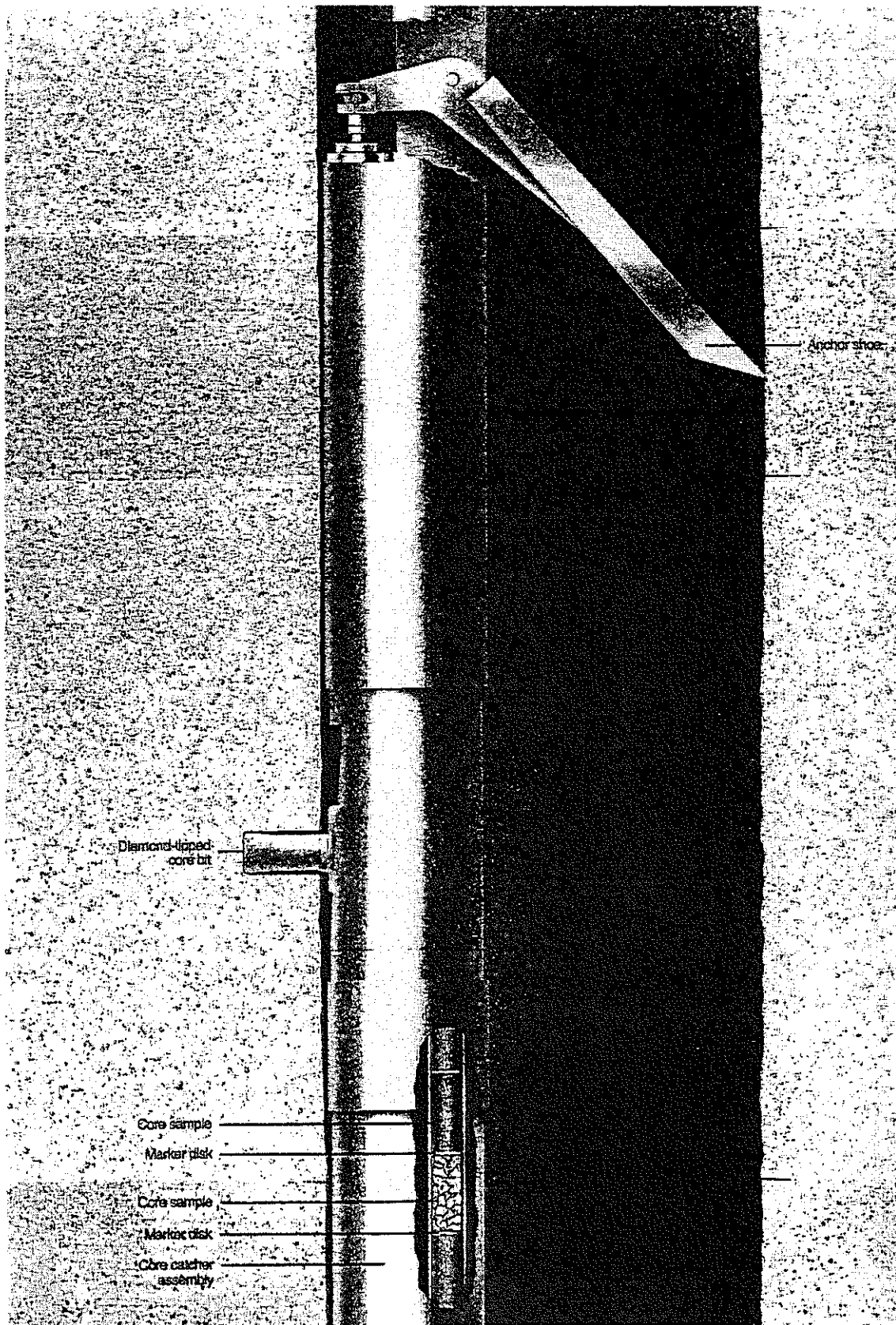


図 4.2.4-1 MSCT 概念図 (シュルンベルジェ(株)パンフレットより)

には測定範囲によって11個のWINDOWを使用して測定するため、異なる種類および孔隙率の岩石についても、密度を求めることができる。

CNL (Compensated Neutron Log) は中性子検層の一種である。放射線源より中性子を放射し、地層内を通過する際の減衰率から岩石の孔隙率を求める検層手法である。本検層では、水素原子を含むのは岩石の孔隙に存在する水 (H₂O) や炭化水素 (油、ガス) であると仮定し、水素原子を岩石内の水素原子量を測定し、その結果は相対値として計算される。CNLのデータと密度検層、音波検層のデータを組み合わせることにより孔隙率を測定し、岩相を判定する。よって、堆積層の岩相変化を把握する目的に有効である。

CMR (Combinable Magnetic Resonance Logging) は、地層内の水分子による回転運動によって生じる磁場の変化 (核磁気共鳴) から、地層内の有効空隙率とその浸透率を測定するものである。現状では岩盤の浸透率を区間データではなく連測的なデータとして測定できる、唯一の測定器である。孔内にパッカーを設置する必要なく、更に非接触型であるので、孔内にダメージを与えることなく有効空隙率と透水率を測定できる。従って、堆積軟岩における透水率の測定には有効であると考えられる。

(3) 地層流体のサンプリング

泥水掘削を行うと、通常的手法による試錐孔内の採水は泥水による汚染を避けることができない。従って、今までは泥水掘削した場合の孔内水あるいは地層流体の採取による地球化学的データの取得はあきらめざるを得なかった。

近年、MDT (Modular Dynamics Formation Tester) という機器が開発された (図 4.2.4-2 参照)。MDT 検層は地層圧の測定および流体サンプルの採取を目的とした検層機器である。MDT は機器を孔壁に押しつけ、孔壁の垂直方向に観測孔/流体採取孔を掘削する。そのため、泥水および泥壁の影響を極力排除できる仕組みとまっている。本ツールは役割の異なる機器を目的に応じて組み合わせることにより、効率的に検層をおこなうことができるツールである。一般的な編成では、地層圧、地層浸透率、地層流体比抵抗、地層流体温度が測定できる。また、試料瓶をセットすることができ、最大 20 リットル程度の試料瓶を 4 本セットすることができる。採水時、試料瓶に流入する電気伝導度のモニタリングをすることができ、そのモニタリングより泥水の影響が少ないと考えられる地層流体の採取が可能である。また、一度に複数箇所での採水が可能であり、それぞれが鉛直方向に配列されているので、一箇所での採水による他の箇所の圧力変化を測定することにより、通常の試験では測定が困難な鉛直方向の透水率の測定が可能である。地下水流動解析では、水平方向と

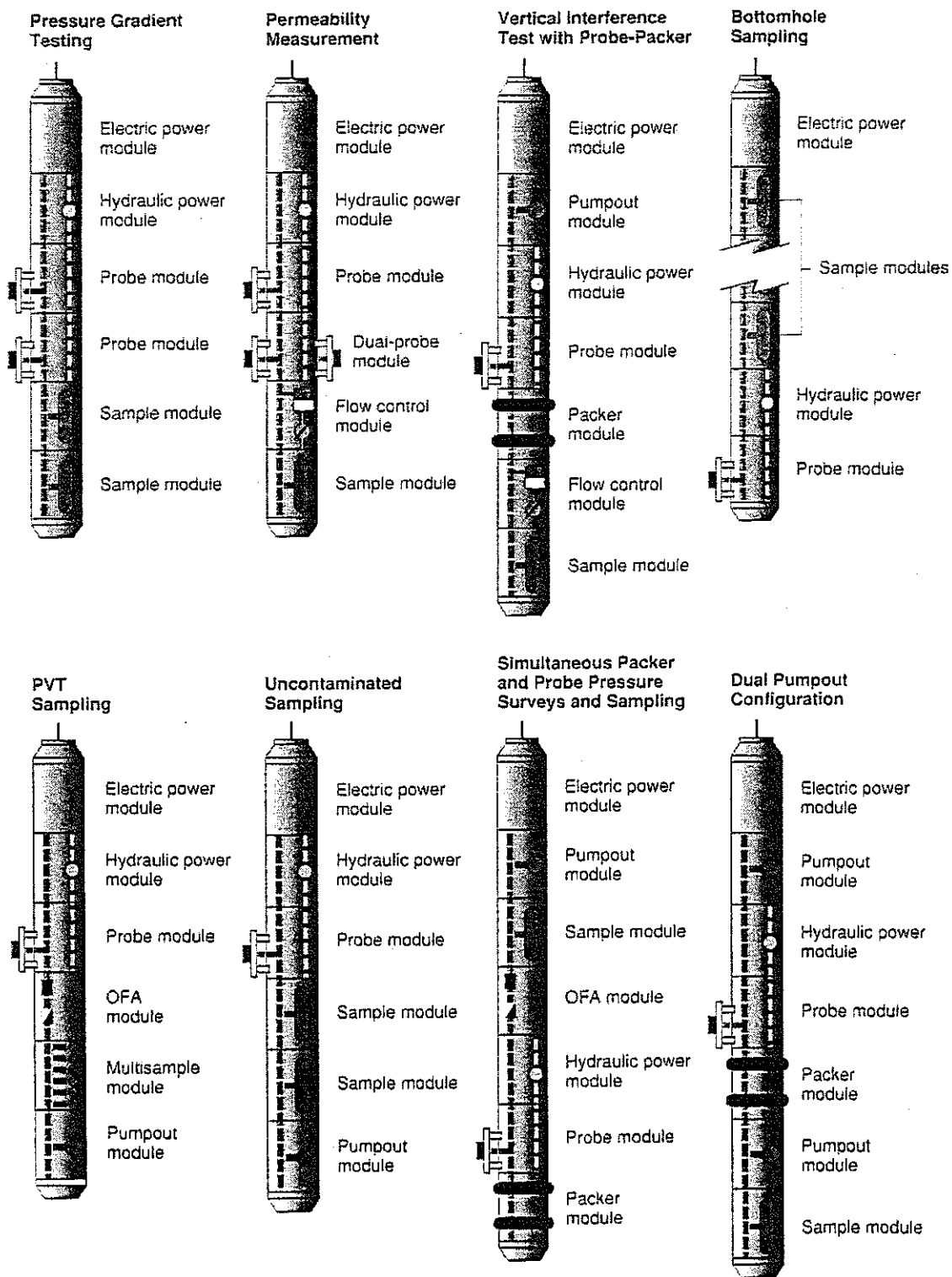


図 4.2.4-2 MDT 概念図 (シュルンベルジェ(株)パンフレットより)

鉛直方向の透水係数、あるいは浸透率を入力する必要があるが、通常は水平方向の10分の1の値を鉛直方向の透水係数、あるいは浸透率としている。MDTを実施することにより、鉛直方向の透水係数が測定できるので、より厳密な流動解析を実行することができる。

以下に実施すべき検層項目をまとめる。①と②③④で重複している項目がある。①の電気検層と③のHALSは測定項目が重複しているが、①は通常用いられている方法（Long Normal および Short Normal）である。①の電気検層と③のHALSは比抵抗測定でありながら、手法が異なるので、データとしては整合しない場合がほとんどである。HALSは非常に優れた方法であるが、既存の試錐孔では実施されていない場合が多い。従って、既存試錐孔との比較のためには①の電気検層も行うのが望ましい。①のX-Y検層については、UBIを実施すれば実施不要となる。

- ① 基礎物理検層の種類（以下の8種目は東濃地域の結晶質岩で実施中の種類と同じ）
 - ・ 電気検層：比抵抗測定
 - ・ 密度検層：岩盤の密度測定（TLDで行う）
 - ・ 中性子・ガンマ線検層：岩盤の孔隙率と地層中の自然ガンマ線の総量の測定
 - ・ 音波検層：岩盤の弾性波速度の測定
 - ・ 温度検層：孔内温度測定
 - ・ 孔曲がり検層：試錐孔の方向・傾斜測定
 - ・ フローメーター検層：孔内の水の流れを測定
 - ・ X-Y孔径検層：孔径測定（UBIを実施すれば不要）
- ② 地質構造の把握ために行う検層およびサンプリング（シュルンベルジェ社の呼称で記載）
 - ・ FMI（Fullbore Formation MicroImager）：孔壁のイメージング
 - ・ UBI（Ultrasonic Borehole Imager）：孔径や孔壁の状態を測定、これを実施すればX-Y孔径検層は不要
 - ・ MSCT（Mechanical Sidewall Coring Tool）：メカニカルサイドウォールサンプリング（コアサンプリング）、補足的に使用する
- ③ 岩盤の透水性把握のために行う検層（シュルンベルジェ社の呼称で記載）
 - ・ HALS（High-Resolution Azimuthal Laterolog Sonde）：泥壁と試錐孔近傍の岩盤の比抵抗値測定
 - ・ CNL（Compensated Neutron Log）：岩盤の孔隙率を測定

- ・ CMR (Combinable Magnetic Resonance Logging) : 岩盤の有効空隙率と浸透率を測定
- ④ 地層流体のサンプリング
 - ・ MDT (Modular Dynamics Formation Tester) : 地層圧と透水係数の測定および地層流体のサンプリング

上記の②③④の検層を実施するためには最小掘削孔径が6.1/4インチは必要になる。上記

②③④の検層器の耐熱、耐圧、サイズなどを表4.2.4-1に示す。

表4.2.4-1 各検層器の仕様（シュルンベルジェ㈱のパンプレットからの抜粋）

機器名	耐熱温度 ℃	耐久圧力 上：kpsi 中：kgf/cm ² 下：MPa	必要孔径		外径 上：inch 下：mm	長さ m	重量 上：lbm 下：kg
			最小 上：inch 下：mm	最大 上：inch 下：mm			
FMI	175	20 1,406 138	6.1/4 158.75	21 533.40	5 127.00	8.28	455 206
UBI	175	20 1406 138	5.1/2 139.70	12.8 325.12	3.3/8 85.73	6.65	378 171
MSCT	175	20 1406 138	6.1/4 158.75	19 482.60	5.3/8 142.88	6.22	471 214
HALS	175	20 1406 138	5 127.00	16 406.40	3.5/8 92.08	9.27	480 218
TLD	125	10 703 69	5.1/2 139.70	21.1/2 546.10	4.3/4 120.65	3.74	314 142
CNL	200	20 1,406 138	4.3/8 111.13	24 609.60	3.3/8 85.73	3.05	87 39
CMR	175	20 1,406 138	6.1/4 158.75	21 533.40	5.3 134.62	4.27	300 136
MDT	175	15 1055 103	6 152.40	19 482.60	5 127.00	6.53	681 309
MDT Pompout module	200	20 1,406 138	6 152.40	19 482.60	4.3/4 120.65	3.20	340 154

HALS、CNL、CMR等で得られる岩盤の透水性に関する測定値の精度の程度、また、MDTによる地層水のサンプリングによりどこまで信頼性に足る地化学的な調査が可能か等のデータを今回得ることができなかった。今後は最適な掘削泥水の選定や水理試験、採水試験等の方法を踏まえ、今後実際のデータを見ながら利用価値について検討していくことが重要と考えられる。

4.2.5 噴出防止装置による安全対策

ガスが噴出する恐れのある試錐孔掘削時の安全対策としては、孔口に噴出防止装置を取り付けて対処する。このような孔口装置は通常の石油、ガス、地熱等を目的に掘削する試錐孔では常に使用されており、3章で調査した地熱、石油を目的とした掘削においても使用している。掘削の信頼性、安全性等から同じものを使用することとする。孔口装置の耐圧基準には各種あり、掘削する試錐孔の深度や胚胎が予想される地層流体の圧力を想定して

設定するものであるが、ここでは取りあえずAPI3000クラスとする。

この孔口装置は、深度250～300m付近の固い岩盤まで挿入し、フルホールセメンチングで地中にしっかりと固定した第2段目のケーシングの上部に設置する。ケーシングとの接続はケーシングヘッドフランジをケーシングにネジで取り付け、その上にドリリングスプールとメインバルブ、更にこの上にブローアウトプレベンダー（BOP）を組み立てた構造とし、試錐孔作業中は何時でもBOPを作動できるように維持管理を行う。

4.2.6 その他の安全対策

試錐孔内から噴出する恐れのあるガスは可燃性ガスであり、もし噴出したガスに引火した場合、火災・爆発等の重大災害に発展する恐れがある。このため孔口付近の火気の取り扱いには十分注意しなければならない。

高圧の地層流体の噴出を防止する場合の安全対策として、掘削中の泥水比重の管理は非常に重要である。泥水中に溶解したガスは泥水比重の低下を招くため、泥水中からガスを分離するためのデガッサーをフローラインに設置する。また、泥水中のガスの状況を観測することで孔内状況を把握し、泥水管理に利用する。

試錐孔掘削作業中は孔口周囲での火気の使用を禁止し、必要に応じてファンで強制的に通気を確保し、危険なガスが孔口周囲やセーラー内或いはリグフロアーに滞留することを防ぐことも考慮する。

4.2.7 ケーシングプログラム

これまでの調査結果を基に、下記のようなケーシングプログラム案を作成した。ケーシングプログラム案を図4.2.7-1に示す。また、掘削フロー図を図4.2.7-2に示す。

(1) ケーシングプログラム策定の前提条件

本計画は石油・ガスおよび地熱による掘削計画を参考として立案した。

- ① 基本計画として、掘削計画深度は1,000mとする。
- ② 多段掘削工法（ここでは口元掘削も含めて4段）を採用する。ケーシングプログラム策定には地熱開発井の論理を適用し、第2段目を可能な限り健岩部に設置し、第4段目を調査対象層準（つまりパッカー設置による地下水理観測区間）とする。また、地表から30～50m程度までは口元掘削でノンコア、以深は6.1/4インチオールコアリングとする。

- ③ ガスの湧出や堆積軟岩であることを考慮し、孔内膨潤、崩落による抑留事故を回避するため、揚降管に大きな荷重をかけることが可能なロータリ式ワイヤーライン工法を採用する。口元掘削である1段目を深度30ないし50mまで掘削しケーシング・セメンチングする。さらに、2段目（深度30ないし50m～250ないし300mまで）を掘削し、ケーシング・セメンチング終了後孔口装置（BOP）を設置する。
- ④ 検層は4.2.4で検討したものを採用する。透水試験についてはダブルパッカーを用いたJFTを採用するが、地下水の湧出状況によっては他の手法も考えることとする。採水については、基本的にMDTあるいは対象区間をダブルパッカーで区切り、パッカー区間内の湧水を採水する方法（以下パッカー採水法とする）を採用するが、状況によってはタイマーによって採取瓶の弁を開閉する方式の採水器（以下、採水器とする）の利用も考える。
- ⑤ コアリングを全深度で6.1/4インチで統一し、第2段目（深度30ないし50m～250ないし300mまで）を12.1/4インチ、第3段目（深度250ないし300m～600ないし700mまで）を8.1/2インチのトリコンビットで拡孔する。それは以下の理由による。
- ・ 6.1/4インチはFMIおよびCMR（場合によってはMSCT）検層を実施する際の必要最小孔径となっている。
 - ・ 現在では12.1/4インチ（311.15mm）、8.1/2インチ（215.90mm）、6.1/4インチ（158.75mm）のダイヤモンドビットは全て特注となる。異なるサイズのビットを注文すると、コアバーレルなど全てそれに併せて同時に注文しなければならず、費用がかさむ。
 - ・ 大口径のダイヤモンドビットによるコアリングによる掘進速度は小口径のものよりも遅くなる。従って、同じ区間長の掘削にかかる時間が長くなるため、コアが受けるビットの回転の影響が大きくなり、コア回収率が悪化する。同時に工期が伸びるため費用も増大する。

以上は、掘削する地質条件によって異なるが、以下に示す掘削案が、現状では最も安全で、コアが回収でき、しかも各種のデータを取得できる工法と考える。

今後より深い深度の掘削計画を検討する場合は、それまでの実績等を勘案してより適切な計画を作成できるものとする。地層ガスの存在範囲の特定およびその予想圧力等は掘削計画全体に大きな影響を及ぼす条件であるが、これらに関しては、既存のデータの見直しや新たな地質構造解析調査、更に、これからの試錐孔掘削の実績等を勘案して、掘削計画全体を含めて順次改善されるものとする。

(2) 第1段掘削：掘削径・・・17.1/2インチトリコンビット

ケーシングサイズ・・・14インチSPG

地表から深度30～50m程度までの表土層と風化帯はノンコアリング掘削とし、JISのSPGあるいはSTPG製ケーシングを挿入した上で、インナーストリング法でフルホールセメンチングを行う。セメントは普通ポルトランドセメントを使用する。

(3) 第2段掘削：掘削径・・・6.1/4インチ径でオールコアリング掘削後、12.1/4インチで拡孔

ケーシングサイズ・・・9.5/8インチAPI油井用ケーシング

掘削深度は250～300mまでとし、この間で高圧ガス層に逢着する恐れはないものとする。もし、可能性があるとするればこの掘削深度を見直すか、あるいは第1段ケーシングの設置深度を深くして、第1段ケーシングにも孔口装置を取り付ける等の安全対策が必要である。

ケーシング設置区間のため掘削はKCL-リグネート泥水を使用し、先ず、孔径6.1/4インチのコアリングツールズでオールコアリング掘削を行う。掘削中は孔芯測定を行い、極端な傾斜が発生しなければそのまま掘削する。もし、試錐孔傾斜の修正が必要となった場合は12.1/4インチで拡孔時に、ダウンホールモーター等を利用して試錐孔傾斜を修正することとする。また、各種物理検層の結果とコアの対比等を行うため、初めの数本の試錐孔では2～3箇所でもリエンティングコアの採取を行う。

予定深度まで掘削後、各種検層を実施する。検層等が終了後12.1/4インチトリコンビットで拡孔する。試錐孔傾斜の修正はダウンホールモーターを使用して行う。

拡孔が終了したら9.5/8インチケーシングを250～300mの孔底まで挿入し、インナーストリング法か二詮式法でフルホールセメンチングを行う。セメントはクラスGセメントを使用する。油井用ケーシングはAPI規格のバットレスネジケーシングの中で、所定の耐圧力以上の性能を持つものを選定し使用する。このケーシングに孔口装置（BOP）を取り付け、第3段の掘削の前に耐圧試験を行い漏洩のないことを確認し、更にBOPの作動試験等を行い次の作業に移行する。

(4) 第3段掘削：掘削径・・・6.1/4インチ径でオールコアリング掘削後、8.1/2インチで拡孔

ケーシングサイズ・・・7インチAPI油井用ケーシング

第3段目の掘削予定深度は600～700mとする。第2段で採取したコアの状況から自立ができる場合はケーシングからの深度が浅いうちに清水掘削を試みる。孔径6.1/4インチのコアリングツールズを使用し、区間は十数m程度とする。まず数m程度清水で掘削し、自立の

様子を観察する。もし、自立可能であればそのまま予定深度（十数m程度）まで清水掘削を実施する。もし、自立が難しいようであればシリケート泥水など、地下水理に影響が少ない泥水を使用する。清水掘削終了後、各種検層、透水試験（JFTなど）および採水試験（MDTあるいはパッカー採水法、状況によっては採水器使用）を実施する。これが清水（場合によっては地下水理に影響が少ない泥水）掘削で得られるデータとなり、KCL-リグネート泥水掘削区間と物性値の比較が可能である。

本区間もケーシング設置区間であるので、試験終了後KCL-リグネート泥水に切り替え、孔径6.1/4インチのコアリングツールスでオールコアリング掘削を行う。掘削中は孔芯測定を行い、極端な傾斜でなければそのまま掘削する。必要に応じて2~3箇所でもリエンティグコアの採取を試みる。予定深度まで掘削後、各種検層、水理試験（JFTなど）および採水試験（MDTあるいはパッカー採水法、状況によっては採水器使用）を実施する。以上の結果を用いて泥水掘削区間と清水（場合によっては地下水理に影響が少ない泥水）掘削区間の物性値の比較を行う。

各種検層および試験終了後8.1/2インチトリコンビットで拡孔する。試錐孔傾斜が大きい場合はダウンホールモーターで傾斜修正掘削を行う。7インチケーシングを孔底まで挿入し、二詮式法でフルホールセメンチングを実施する。セメントはクラスGセメントを使用する。油井用ケーシングはAPI規格の所定の耐圧以上のものを使用する。

以深の掘削開始前に耐圧試験を行いケーシングや孔口装置に漏洩のないことを確認する。

(5) 第4段掘削：掘削径・・・6.1/4インチ径のワイヤラインでオールコアリング掘削

ケーシングサイズ・・・ストレーナーの要否は検討

最終掘削深度は1,000mとする。前段で採取されたコアの状況から自立が可能であれば、孔径6.1/4インチのコアリングツールスで清水掘削を実施する。まず十数m程度清水で掘削し、自立の様子を観察する。もし、自立可能であればそのまま清水掘削を実施する。もし、自立が難しいようであればシリケート泥水など、地下水理に影響が少ない泥水を使用する。更に孔内の膨潤、崩落が著しい場合、ガスが噴出してくるような場合あれば、KCL-リグネート泥水を使用する。もちろん清水掘削中、あるいはシリケート泥水などで掘削中に障害が生じる傾向が認められたら、事故が発生する前にKCL-リグネート泥水に速やかに切り替える。孔径6.1/4インチのコアリングツールスでオールコアリング掘削を行う。掘削中は孔芯測定を行い、試錐孔傾斜の修正の必要が生じた場合はダウンホールモーターで修正する。

なお、軟岩でコアリングをしながら試錐孔傾斜を修正する技術はまだ確立されていない

現状であり、修正区間についてはコアリングが不可能な状況が予測される。予定深度まで掘削後、各種検層、水理試験（JFTなど）および採水試験（MDTあるいはパッカー採水法、状況によっては採水器使用）を実施する。物理検層および試験終了後の試錐孔の利用法を検討した上で、最終ケーシング・ストレーナー等の設置の要否あるいはその他の仕上げの方法を決定する。

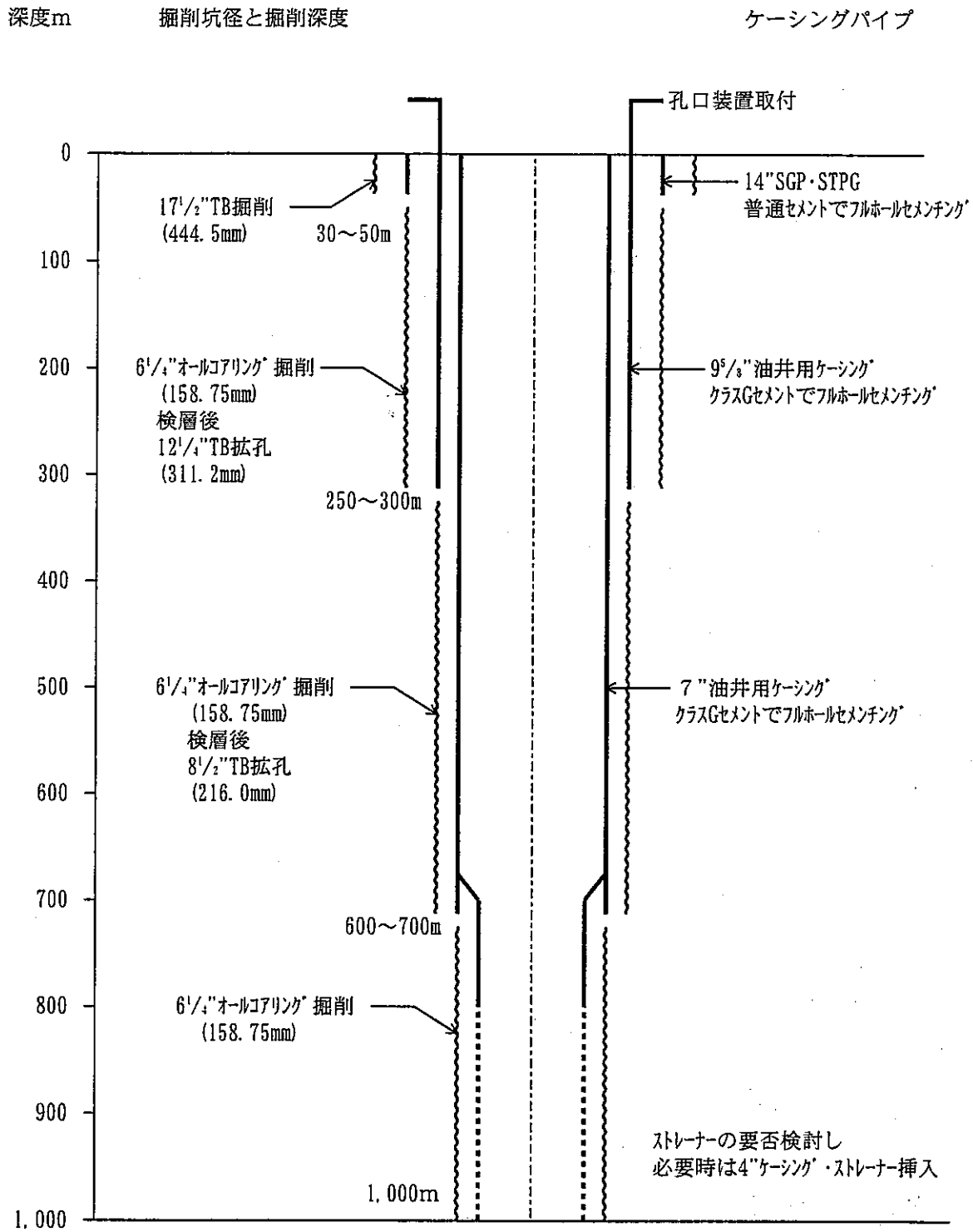


図 4.2.7-1 ケーシングプログラム案(掘削深度 1,000 m)

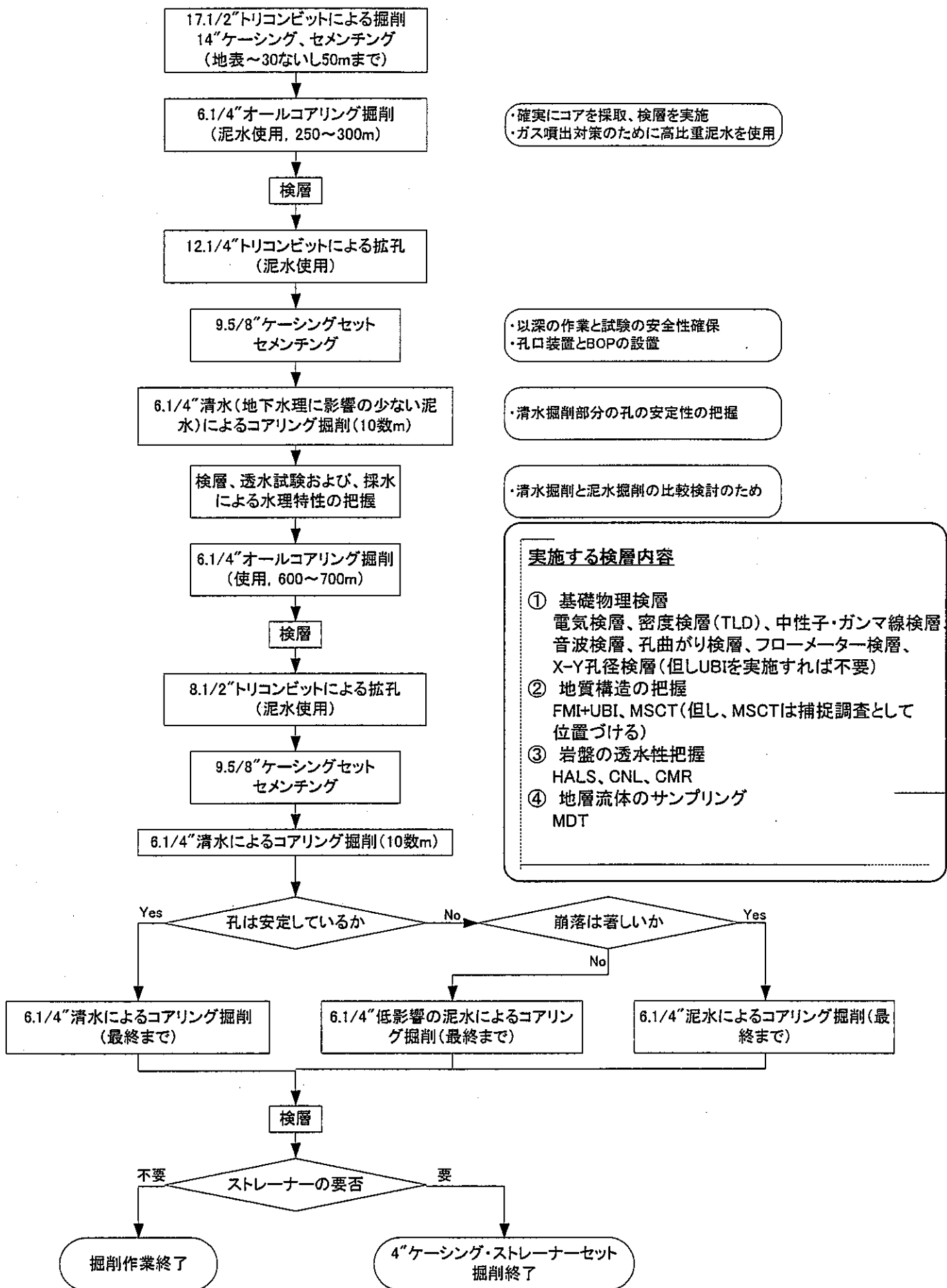


図4.2.7-2 掘削フロー図

5. まとめ

今年度の調査、試験結果を以下にまとめる。

(1) 岩石と泥水の室内試験

(a) 泥水浸透試験

- ① シリケート泥水の浸透量は KCL-リグネート泥水および DIF の浸透量よりも一桁少ない結果が得られた。これは、シリケート泥水が岩石の表面（壁面）に密着しシリケートの薄膜を形成することにより、薄膜形成後の泥水の内部への浸透を抑えているためと考えられる。
- ② KCL-リグネート泥水と DIF は、試験後の試料断面の目視観察によると泥水の固形成分が岩石マトリックス中に浸透した形成は認められなかった。KCL-リグネート泥水と DIF は比較的泥水濾過浸透水の量が多く、厚い泥壁を構成していた。従って、泥水中の固形成分は泥壁を構成し、泥水中の水分のみが脱水し岩石マトリックス中に浸透しているものと考えられる。
- ③ 供試体の断面観察から浸透試験で形成された全試験泥水による泥壁はほぼ均一に孔壁をコーティングしていることがわかった。一部例外があるものの泥壁の厚さは薄い方から順に
$$\text{シリケート泥水 B} \leq \text{シリケート泥水 A} < \text{DIF} < \text{KCL-リグネート泥水}$$
となり、「選定した泥水の比較試験」における API 脱水試験による泥壁の厚さ測定の結果と調和的であった（第 2.4 項，表 2.4.3-2 参照）。
- ④ 砂岩と泥岩の岩質による差は、今回の結果を見る限り砂岩の方が泥岩よりも泥壁が薄い傾向があった。一般に、砂岩は泥岩よりも透水性が良いため、泥水中の固形成分を泥壁として岩石の表面に残し、脱水分は岩石の中に浸透するため、泥岩よりも砂岩の方が泥壁は厚くなるはずであるが、相反する結果となった。これは、「岩石の基礎的物性試験」における「見掛比重および岩水比・吸水率・含水比・有効間隙率・飽和度」測定の結果から、試験に供した清澄層泥岩の飽和度が 82%、対して清澄層砂岩の飽和度が 95%と、清澄層泥岩の飽和度が清澄層砂岩よりも低かったため、濾過水が浸透しやすかったものと考えられる（第 2.3 項，表 2.3.3-1 参照）。但し、この結果は各 1 試料の比較であるため、全ての清澄層岩石について普遍的結果であるとは限らない。
- ⑤ 泥水の液相中の溶存化学成分の分析結果では、シリケート泥水が KCL-リグネート泥水や DIF よりも浸透試験後に試験孔に残留した泥水の液相の溶存成分の変化が小さ

い傾向にあった。これはシリケート泥水が孔壁表面にシリケート薄膜を形成し、岩石と泥水の反応が抑えられるためであると考えられる。

⑥ シリケート泥水 A、B 間の比較では、シリケート泥水 B が A に比較して浸透試験後に試験孔に残留した泥水の液相の溶存成分の変化が小さい傾向にあった。これは、シリケート泥水 A が泥化抑制剤である KCl が添加されていないが、シリケート泥水 B は KCl が添加されており、溶存成分がシリケート泥水 B の方がシリケート泥水 A より高濃度となっているため、泥水の成分濃度がより大きくなる岩石から泥水への化学成分の溶脱がシリケート泥水 A よりも起こりにくかったためと考えられる。

⑦ 回復試験における泥壁の厚さの比較では、シリケート泥水は A、B 双方共に除去できていることが示された。KCL-リグネート泥水は、回復試験では泥壁は多少は薄くなるものの、1mm 以上の厚さで残留する。DIF は洗浄水の流出口付近は除去されるもののその他は除去されなかった。但し、DIF は実際の石油井の生産時には地層内から孔壁にバックプレッシャーがかかるため剥がれやすいものであり、更に塩酸 (HCl) を循環させることによりブリッジング剤であるタンカル (CaCO_3) を除去できる。

⑧ 回復試験では砂岩よりも泥岩の方が洗浄水の pH の低下に時間がかかる傾向が認められた。また、各泥水の比較ではシリケート泥水が KCL-リグネート泥水および DIF よりも洗浄時間がかかる傾向が認められた。KCL-リグネート泥水および DIF は孔壁に付着した泥壁が除去されず、泥壁表面のみ洗浄水が接触している。そのため泥壁表面のみの NaOH や KOH が洗浄されただけなので比較的短時間で pH が低下したものと考えられる。一方シリケート泥水は A も B もある程度洗浄によって泥壁が除去されている。従って、洗浄水中に溶け出す泥壁が KCL-リグネート泥水や DIF よりも多いので、pH の低下に時間がかかったものと考えられる。

⑨ 回復試験における洗浄水の溶存成分の分析では、Si を除くとシリケート泥水が概ね検出限界以下の濃度を示し、良好な洗浄結果となった。KCL-リグネート泥水と DIF については、シリケート泥水と異なり Si は検出限界以下であるが、他の成分については概ね検出された。特に KCL-リグネート泥水の洗浄水の色は最後まで無色になることはなく、採取試料は淡褐色を呈していた。

(b) 吸水膨張率および膨潤圧測定

① 吸水膨張率も膨潤圧も声問層上部相泥岩の変化が勇知層細粒砂岩、清澄層砂岩・泥岩の変化よりも 2~3 桁大きくなっている。特に脱イオン水に対する変動が著しい。し

かしながら、KCL-リグネート泥水および DIF では声問層上部相の膨張率は他の勇知層細粒砂岩、清澄層砂岩・泥岩よりも若干値は大きいものの、オーダーが同等になった。

- ② 声問層上部相泥岩の膨張率と膨潤圧は脱イオン水と 4 種の泥水中の比較では KCL-リグネート泥水が最小値を示し、最も抑制効果が期待できる。幌延泥岩のような膨潤性が著しい岩石を掘削するには、KCL-リグネート泥水が最も適しているという結果となった。
- ③ 声問層上部相泥岩以外の岩石については、脱イオン水および 4 種の泥水で比較すると、脱イオン水の膨張率が勇知層細粒砂岩および清澄層砂岩・泥岩のどの岩石でも最高値を示してはいるが、泥水による結果と比較して極端な膨張率や膨潤圧の差は認められなかった。つまり、声問層上部相泥岩以外の岩石については、清水による掘削の可能性も示唆される。

(c) 浸水崩壊度試験および MBC 試験

- ① 清澄層泥岩、清澄層砂岩および勇知層細粒砂岩は、脱イオン水および 4 種泥水に 7 日間浸漬した結果、崩れおよび亀裂の発生がなかった。さらに浸漬した岩石は、何れも一軸圧縮後、形状変化が認められなかった。浸漬前後の重量に大きな変化はなかった。
- ② 浸水崩壊度試験において最も顕著な形状変化が観察された岩石は、声問層上部相泥岩であった。脱イオン水では、浸漬 1 日目で崩れて原形が失われた。即ち、声問層上部相泥岩は脱イオン水に対して、一日足らずで水和・膨潤し崩れることが確認された。また、浸漬液である脱イオン水が褐色を呈した。これはコア採取時の泥水（リグニン、リグナイトを含む調泥剤の使用）のコアからの溶出が原因と考えられる。
- ③ 4 種の泥水に浸漬した声問層上部相泥岩は、一筋或いは二筋の亀裂が 1 日後あるいは 3 日後に発生し、浸漬終了まで同様な状態が認められた。但し、原形は保持されていた。
- ④ 勇知層細粒砂岩、清澄層砂岩および清澄層泥岩に関しては、脱イオン水および 4 種の泥水で 7 日間の試験中亀裂も発生せずに原型を保持していた。
- ⑤ 一軸圧縮後の亀裂の発生は、シリケート泥水 A が特に顕著であった。他の KCL-リグネート泥水、シリケート泥水 B および DIF の 3 種泥水は、声問層上部相泥岩に対して、ほぼ同程度の浸水崩壊度を示し、優劣の評価が困難であった。
- ⑥ 供試岩石の CEC 値は、声問層上部相泥岩(18.0) > 清澄層砂岩(11.5) > 清澄層泥岩(10.5)

＞勇知層細粒砂岩(6.0:meq/100gr 試料)の順であった。よって、幌延泥岩が、供試岩石の中で水和膨潤性の高い泥岩であり、これは吸水膨張率試験、膨潤圧試験および浸水崩壊度試験と調和的な結果であった。

- ⑦ 供試岩石を KCL-リグネート泥水に浸漬して測定した MBC 試験値は、声問層上部相泥岩、清澄層砂岩、清澄層泥岩を浸漬した場合、1.75ml/ml から 2.50ml/ml に MBC 値が上昇した。これは供試岩石の CEC 値から膨潤性のある泥岩が混入されたため、つまり泥水中のモンモリロナイトなどの粘土の総量が増加し、全体的に塩基交換容量が増加したためと考えられる。一方、勇知層細粒砂岩は MBC 値の上昇が 2.25ml/ml と他の岩石よりも小さい。これは CEC 値からモンモリロナイトなどの粘土含有量が他の岩石よりも少ない岩石であるためであると考えられる。
- ⑧ 声問層上部相泥岩は脱イオン水では岩石の崩壊が著しいため、MBC 値の変化でも 0ml/ml から 2.50ml/ml (KCL-リグネート泥水と同程度まで) 急激に上昇している。しかしながら、泥水に浸漬したものについては、KCL-リグネート泥水で 2.50ml/ml、他の泥水で 1.25ml/ml と同様の値を示している。また、勇知層細粒砂岩以外の岩石では各泥水の MBC 値の変化は同等となっており、今回の試験では各泥水間の水和膨潤抑制効果の比較はできなかった。

(d) 泥水の評価

- ① 今回試験に供した KCL-リグネート泥水、シリケート泥水 A および B、DIF の 4 種の泥水について、室内試験結果から予想される地下水理、地下水の地球化学および岩石の地球化学への影響について評価した。これら 3 種の特性に与える影響が最も少ないと予想される泥水は、孔壁にシリケート薄膜を構成しさらに細かな割れ目までシリケート薄膜で充填すると期待されるシリケート泥水、特に KCl を添加しているシリケート泥水 B が有効である。
- ② 膨潤性岩石の掘削については、今回試験に供した泥水の中では KCL-リグネート泥水と DIF が最も信頼性に富む掘削流体である。石油・ガスの胚胎が予想される地域において掘削されている石油公団の基礎試験における掘削流体は KCL-リグネート泥水が一般的である。一方、DIF は、石油生産ゾーンの掘削に用いられるのが通常の使用法であり、更に DIF は開発されてからまだ日が浅いため、使用実績がまだ少ない状況である。但し、今回の試験結果から膨潤性岩石の掘削には強固な泥壁形成による孔壁の膨潤や崩壊の抑制効果が期待できるので、今後の使用実績の調査などが必要と考え

られる。

- ③ 勇知層細粒砂岩や清澄層泥岩および砂岩のように、脱イオン水でも膨潤性が著しくない岩石の場合は清水（その掘削地点の地層水）による掘削も検討できるものと考えられる。
- ④ 上記の結果より堆積岩地域の掘削には特定の掘削流体 1 種類に決めるのではなく、それぞれの特性を生かし、併用するのが効果的であると考えられる。例えば、以下のような方針をたて、掘削計画を立案するのが効果的であると考えられる。
 - ・ 試験錐孔を利用した試験対象とはならない区間およびケーシングで覆ってしまうような区間は KCL-リグネート泥水で掘削する。
 - ・ 試験対象区間の掘削において、もし、その区間が幌延の勇知層砂岩、房総半島清澄地域泥岩・砂岩のように清水（地層水）でもある程度の孔壁の自立が期待できる可能性がありそうな区間は清水で掘削する。
 - ・ 試験対象区間の掘削において、もし、孔壁が自立する時間が十分でないような場合はシリケート泥水を使用する。
 - ・ 試験対象区間の掘削において、もし、シリケート泥水を使用しても孔壁の自立が期待できないようであれば、再び KCL-リグネート泥水を使用する。
 - ・ DIF は透水試験予定区間等にスポット的に使用し、パッカー設置後に DIF を酸などで洗浄、除去する方法を考える。

(2) 国内の堆積岩地域、地熱地域、石油・ガス地域の掘削および調査手法の事例調査

(a) 堆積岩地域における掘削手法調査

今回調査した日本応用地質学会において報告された手法は、堆積軟岩地域における掘削手法として有効であると判断される。しかしながら、今回の調査では以下のような問題点を指摘できる。

- ① 本掘削手法による実績はまだ最深 400m であり、それより深い深度 1,000m 程度については実績がない状態である。
- ② ケーシングとして FRP を用いているが、深度によってはステンレスパイプや鋼管を用いざるを得なくなる。その場合のケーシングカッター（特にステンレスパイプ用）やケーシングの重量が増すため、パッカーの耐重量性の向上なども検討する必要があるであろう。
- ③ パッカーの設置が現状では 1 段 1 箇所となっており、1 段複数箇所という構造には

なっていない。

本手法を他の地域に適用するには上記のような問題点を解決する必要がある。

また、今回の調査では使用した泥水についての情報を見いだすことができなかった。但し、泥水掘削で採取したコアを用いてのトレーサーによる地化学特性試験を実施している。今後はこのような使用泥水や地化学特性試験結果について、今後公開される文献を追跡調査する必要がある。

(b) 地熱地域における掘削手法の調査

今回調査した 2 本の構造試錐では、地表から温度があまり高くない区間（深度約 200m 程度）においては、重金属を含むリグニンなどを添加しないベントナイト泥水を使用しており、これは KCL-リグネート泥水のベースとなる泥水である。KCl なども添加していない。深度が増し温度が高くなってきた時点で、地熱用の特殊泥水である BH 泥水さらには G-500S 泥水に切り替えている。地熱調査井の掘削においては、地熱専用の掘削泥水が存在することがわかった。また、途中で行う孔内検層は温度検層と電気検層であることがわかった。地熱に係わる掘削技術は特に高温対策などのために非常に特化した技術であることがわかった。しかしながら、地熱開発井は石油・ガス開発井よりも浅深度であることが多く（1,000～2,500m が多い）、地層科学研究分野の試錐孔とほぼ同程度の掘削長である。そのため、地熱開発井における多段ケーシングプロファイルの考え方は、地層科学研究分野の試錐孔のケーシングプロファイルを策定するときに参考にすべきと考えられる。

(c) 石油・ガス地域における掘削および調査手法の調査

- ① 石油・ガスを対象とした石油公団の基礎試錐では、コア掘削は基本的に行われず、トリコンビットによるノンコア掘削が行われていることがわかった。コアは数回程度のスポットコア掘削である。地質層状の判定にはカッティングス調査とスポットコア、FMI などの地層イメージ検層、場合によっては CST による孔壁からのコアサンプリングを実施している。
- ② 石油・ガスの賦存状況の把握には孔隙率、浸透率および飽和率が必要なデータであることから、これらを求めるために多種の検層を実施しているが、残念ながら今回の調査では、各々個別の検層データをとりまとめたものが見いだせなかった。
- ③ トリコンビットによるノンコア掘削であり、基本的に石油・ガスの採取を目的としていることから、清水掘削は一切行われていない。泥水としては地表付近は地熱井同

様ベントナイト泥水を使用しているが、深度が深くなると KCL-リグネート泥水が最も一般的に用いられていることがわかった。更に深度が深くなりある程度の温度上昇などが想定される場合は地熱同様 G-500S 泥水も使用されている。

- ④ 急傾斜の堆積岩層があるため、掘削が困難であった試錐孔の工事状況についても調査することができた。ガスの湧出が予想されるため、泥水の高比重化で孔内安定を図っているが、低圧層による逸水が始まるとまずは泥水比重を低下させることで対応している。しかしながら、泥水の低比重化がガス層などの抑制効果の低下を招き孔壁崩壊などの事故を誘発させている。それにより掘削が不能に陥り、最終的にはプラグバックセメンチングをしケーシングセット、更にサイドトラックも実施している。しかしながら、それでも孔内の安定性が確保できず予定深度に未達で掘止めている。このように掘削工事には泥水管理が重要であり、バランスが崩れると悪循環に陥ることが示されている。この例は、急傾斜の堆積岩地域の掘削には細心の対策を心がける必要があるという教訓になるであろう。

(3) 海外の掘削手法の調査

- ① ODP で開発された機器は、大洋底の未固結の堆積物から、比較的硬い岩盤まで掘削可能なように各種機器開発がなされている。特にコアを定方位でかつ堆積構造などを破壊しないように、更には採取地点の圧力を保存してコア採取／運搬する方法は優れたものがある。
- ② 海外の放射性廃棄物処分研究に係わる試錐孔掘削手法の調査については、今回はベルギーとスイスの事例を抽出した。地下の岩盤や採取するコアの水理学的および地球化学的データに影響を与えないような手法が考案されているが、実際上は試錐孔の使用目的と岩盤状況に合わせて掘削流体を含む掘削手法を選定していることがわかった。特に掘削流体は圧縮空気、脱イオン水、清水、塩水、ベントナイト泥水および塩水ベースのベントナイト泥水と主に岩盤の状況から使い分けている。圧縮空気を流体とした手法は岩盤中から試錐孔中に水が湧き出してこないという条件が必要である。我が国の堆積岩の岩盤で水が湧出しないような岩盤は非常に限られていると考えられるので、圧縮空気による掘削は我が国では適用困難であろう。
- ③ 地下水理と地球化学の両方を要求を満たし且つ安定した掘削が可能な掘削流体については、最近の研究開発によりシリケート泥水がその条件を満たす可能性があることが示唆された。

(4) 堆積軟岩地域における掘削計画

本計画は石油・ガスおよび地熱による掘削計画を参考として立案した。

- ① 基本計画として、掘削計画深度は1,000mとする。
- ② 多段掘削工法（ここでは口元掘削も含めて4段）を採用する。ケーシングプログラム策定には地熱開発井の論理を適用し、2段目を可能な限り健岩部に設置し、4段目を調査対象層準（つまりパッカー設置による地下水理観測区間）とする。また、地表から30～50m程度までは口元掘削でノンコア、以深は6.1/4インチオールコアリングとする。
- ③ ガスの湧出や堆積軟岩であることを考慮し、孔内膨潤、崩落による抑留事故を回避するため、揚降管に大きな荷重をかけることが可能なロータリ式ワイヤーライン工法を採用する。口元掘削である1段目を深度30ないし50mまで掘削しケーシング・セメンチングする。さらに、2段目（深度30ないし50m～250ないし300mまで）を掘削し、ケーシング・セメンチング終了後孔口装置（BOP）を設置する。

④ 検層は以下の項目を実施する。

○ 基礎物理検層の種類

電気検層、密度検層、中性子・ガンマ線検層、音波検層、温度検層、孔曲がり検層、フローメーター検層、X-Y孔径検層

○ 地質構造の把握ために行う検層およびサンプリング

FMI（孔壁のイメージング）、UBI（孔径や孔壁の状態を測定）、MSCT（メカニカルサイドウォールサンプリング：補足的に使用する）

○ 岩盤の透水性把握のために行う検層

HALS（泥壁と試錐孔近傍の岩盤の比抵抗値測定）、CNL（岩盤の孔隙率を測定）、CMR（岩盤の有効空隙率と浸透率を測定）

○ 地層流体のサンプリング

MDT（地層圧と透水係数の測定および地層流体のサンプリング）

但し、試錐孔掘削の目的に応じて上記の項目の中から適宜選択するものとする。

透水試験についてはダブルパッカーを用いたJFTを採用するが、地下水の湧出状況によっては他の手法も考えることとする。採水については、基本的にMDTあるいはパッカー採水法（対象区間をダブルパッカーで区切り、パッカー区間内の湧水を採水する方法）を採用するが、状況によっては採水器（タイマーによって採取瓶の弁を開閉する方式の採水器）の利用も考える。

- ⑤ コアリングを全深度で6.1/4インチで統一し、2段目（深度30ないし50m～250ないし300mまで）を12.1/4インチ、3段目（深度250ないし300m～600ないし700mまで）を8.1/2インチのトリコンビットで拡孔する。それは以下の理由による。
- ・ 6.1/4インチはFMIおよびCMR（場合によってはMSCT）検層を実施する際の必要最小孔径となっている。
 - ・ 現在では12.1/4インチ（311.15mm）、8.1/2インチ（215.90mm）、6.1/4インチ（158.75mm）のダイヤモンドビットは全て特注となる。異なるサイズのビットを注文すると、コアバーレルなど全てそれに併せて同時に注文しなければならず、費用がかさむ。
 - ・ 大口径のダイヤモンドビットによるコアリングは、小口径のものより、同じ区間長の掘削にかかる時間が長くなるため、コアが受けるビットの回転の影響が大きくなり、コア回収率が悪化する。同時に工期が延びるため費用も増大する。

6. 今後の課題

(1) 泥水と岩石の室内試験

今年度の調査・試験では、堆積軟岩地域における試験掘削に現状で最も有効と考えられる KCL-リグネート泥水、シリケート泥水および DIF の特性について検討した。今後は今年度選定した泥水の特性の把握を更に精緻なものとし、実用化に近づけるために、以下に示す課題の検討が必要である。

- ① 今回は 4 種類の泥水で試験を実施したが、KCL-リグネート泥水、DIF については、一般的な標準組成の泥水を各 1 種類を試験に供した。今回試験に供した泥水は、今回の試験結果から膨潤等の抑制効果が確認され、試験岩石（勇知層細粒砂岩、声問層上部相泥岩、清澄層砂岩および泥岩）には適合したものと言える。但し、今後は泥水の組成の違いが岩石に与える影響を把握するために成分比を変えた浸透試験も実施する必要がある。例えば KCL-リグネート泥水を使用した掘削中に逸水が発生するとさらに低濃度に調泥したり、また逆に地層からの流体の噴出がある場合はバライトなどの添加により高比重に調泥することもある。このような成分の変化に対する岩石への影響の違いの把握が必要である。更に DIF はタンカルの粒度がもっと粗粒のものも用意されており、それらの効果の違いも検討する必要がある。
- ② シリケート泥水については、M-I 社および Baroid 社等が出した文献を参考とした標準組成のもの（シリケート泥水 A）と膨潤抑制効果のある KCl を添加したもの（シリケート泥水 B）の 2 種類を試験したが、同様に成分比を変えた試験数を増やす必要がある。
- ③ 今回の供試体としては勇知層細粒砂岩、声問層上部相泥岩（以上幌延町で掘削した D-1 孔コア）、清澄層砂岩および泥岩（以上房総半島清澄地域の露頭岩石）の計 4 種の岩石での試験であった。これらの岩石の地層は上部鮮新統～下部更新統で、一軸圧縮強度が $50\sim 200\text{kgf/cm}^2$ であり、比較的新しく軟質な堆積岩である。従って、今回の試験結果はいわゆる「堆積軟岩」の地下水理や地下水の地球化学に影響が少ない泥水についての示唆を得ることができた。今後は更に他の地域の堆積岩試料を用いて室内試験を実施し、堆積岩と掘削流体の影響に関する指標を作成すべきである。
- ④ 浸透試験は泥水のみを使用し、脱イオン水では行っていない。これは、当初岩石と泥水のある程度の反応は予期されたが、泥水の溶存成分が高濃度であるため、岩石との反応による濃度変化は誤差範囲に収まるであろうと予想したためであった。しかし

ながら、高濃度の泥水の溶存成分が大きく変化することが今回の試験で判明した。泥水と岩石の反応についてよりよく解釈するためには以下のような試験をする必要がある。

- ・ 脱イオン水を用いて浸透試験を実施し、試験後の脱イオン水の溶存成分について把握する。
 - ・ 試料断面の孔壁付近の目視による観察では泥水の固形成分が浸透した形成は認められないが、孔壁近傍の岩石と孔から離れた部分の岩石を採取して化学的分析を実施し、岩石の化学組成の相違からの影響範囲を検討する。
- ⑤ 泥水浸透試験において、特に KCL-リグネート泥水などは浸透量が比較的多い。しかしながら、試料断面の孔壁付近の目視による観察では泥水の固形成分が浸透した形跡は認められないため、固形成分は泥壁を形成し、水分がマトリックスに拡散していったものと考えられる。従って、試験泥水中にトレーサーを混入し岩石を分析することによって、どの程度まで拡散するか把握する必要がある。トレーサーには泥水の添加剤 NaCl や KCl と化学的性質が類似している NaBr、KBr (Br⁻がトレーサー) あるいは KI (I⁻がトレーサー) が良いと考えられる。
- ⑥ 今回は洗浄効果を同一条件で比較するため、洗浄水として脱イオン水を使用した。例えばシリケート泥水使用後 NaOH 溶液を循環させシリケート薄膜を除去し、地層水あるいは地層水を模擬した溶液で更に洗浄することにより地下水の地球化学的な影響を最小限に抑えることができるという情報がある。また、DIF については、ブリッジング剤がタンカルであるため酸で溶ける。また、KCL-リグネート泥水についても有効な洗浄剤を開発できれば最も安全に掘削でき比較的影響が小さい泥水とすることができるものと考えられる。従って、洗浄水を脱イオン水以外の溶液でも試して見るのは必要な検討事項であると考えられる。温泉等の地下水採取を目的にした試錐孔では、泥壁をできるだけ剥がして、地下水の採取効率を上げる目的でウエルクリーナー溶液が洗浄水として使われている。このような洗浄水による洗浄効果も試験してみることも検討すべきであろう。
- ⑦ 泥水は掘削に際して使用するものである。上記の検討事項について浅深度（数 10m 程度）の原位置試験孔を掘削して、実際に岩石コアを採取し、透水試験などを実施し、実際の掘削における泥水の影響について把握すべきである。

(2) 堆積岩地域における試錐孔掘削計画

今年度では、さらに堆積岩地域を想定し、各種条件を仮定した上で掘削計画案を提示した。

- ① 今後の掘削計画を検討する場合は、それまでの実績等を勘案してより適切な計画を作成できるものとする。地層ガスの存在範囲の特定およびその予想圧力等は掘削計画全体に大きな影響を及ぼす条件であるが、これらに関しては、既存のデータの見直しや新たな地質構造解析調査、更に、これからの試錐孔掘削の実績等を勘案して、掘削計画全体を含めて順次改善されるべきである。
- ② 各種観測の使用に足る観測孔掘削の前に、コア採取を主目的とした先行地質構造試錐を掘削するのが理想的である。先進地質構造試錐はコアの確実な採取を目的とするので、全深度泥水掘削で行う。以後の掘削泥水選定に必要なデータを得るためのコア試験を以下に示す。

- ・ 比重試験
- ・ 密度試験
- ・ 吸水率試験
- ・ 含水量試験
- ・ 有効間隙率試験
- ・ 室内透水試験
- ・ 浸水崩壊度試験
- ・ 吸水膨張試験
- ・ 膨潤圧試験
- ・ CEC 試験
- ・ 一軸圧縮強度

以上の試験を実施することにより、岩石の掘削に対する物理的挙動と水に接触した場合の挙動を予測することができ、掘削泥水選定の指針とすることができる。先行地質構造試錐の掘削地点については、今後行われる試錐掘削計画地点で出現が予想される全ての岩相がコアとして得られる地点が望ましい。また、試験数量は特異データの評価をするために一つの地質層準に対して3箇所以上取得するのが望ましい。

なお、先進地質構造試錐で使用する掘削泥水にはトレーサーを混入し、採取されたコアのトリミングを行い、コアに侵入したトレーサー濃度を測定し、泥水の影響を評価するのが望ましい。

参考文献

1.3 実施内容

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団(1992)：北海道北部地域の第四紀層序に関する検討報告書 (JNC TJ1420 98-025) , 94p.
- 2) 土質工学会(1989)：岩の調査と試験, 土質工学会.

2.1 岩石試料の選定

- 1) 核燃料サイクル開発機構(JNC)(1998)：北海道北部地域の地質に関する研究報告書(JNC TJ1400 98-001) , 77p.
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団(PNC)(1992)：北海道北部地域の第四紀層序に関する検討報告書(JNC TJ1420 98-025) . 94p.
- 3) 坂 靖範・橋尾宣弘・山田将史・小室裕明・山内靖喜・三梨 昂(1990)：房総半島清澄背斜の形成機構の実験的研究. 地質学論集, no.34,pp.117-126.
- 4) 蟹江康光・岡田尚武・笹原由紀・田中浩紀(1991)：三浦・房総半島新第三紀三浦層群の石灰質ナノ化石年代および対比. 地質学雑誌, vol.97,pp.135-155.
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団(PNC)(1987)：貯蔵工学センター立地環境調査－深層ボーリング報告書(PNC TJ1027 98-012) . 227p.
- 6) 塚原弘昭・池田隆司(1989)：地殻応力測定値から推定した堆積岩岩盤中の応力状態. 地質学雑誌, vol.95, pp.571-578.
- 7) 小玉喜三郎・大竹規夫・富田 博・小野 敏・中島良員・城井浩介・鈴木尉元(1990)：房総半島中部における三浦層群天津層の堆積と褶曲の形成過程. 地質学論集, no.34, pp.105-115.
- 8) 中嶋輝允・牧本 博・平山次郎・徳橋秀一(1981)：鴨川地域の地質. 5万分の1地質図幅, 107p.

2.2 試験泥水の選定

2.2 項全般に亘る参考文献：

沖野文吉(1981)：ボーリング用泥水. 技報堂出版.

2.3 岩石の基礎的物性試験

- 1) 国分正種(1972)：土木材料実験(改訂版). 技報堂出版.

2.4 選定した泥水の比較試験

- 1) API(American Petroleum Institute)(1990): Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluid. P 13B-1.
- 2) API(1985): Bulletin on The Rheology of Oil-Well Drilling Fluids. BUL 13D.

2.4 項全般に亘る参考文献:

沖野文吉(1981): ポーリング用泥水. 技報堂出版.

2.5 岩石と泥水の室内試験

- 1) 日本国有鉄道(1969): 地質調査標準示方書(施管第166号). 日本国有鉄道協会, pp.97-98.
- 2) 岩の力学連合会(訳)(1982): ISRM 指針. Vol.1, pp.19-21.

3.1 最近の国内の堆積岩地域、地熱およびガス・石油地域における掘削工法・試錐調査手法の調査

- 1) 川越健・松村修治・岩井孝幸・木方建造・田中和弘・千木良雅弘・河野愛・大島和夫・岩崎慶次(1998): 第三紀堆積軟岩における大深度孔井掘削および調査技術の開発(その1) - 掘削機器の開発および掘削方法の検討 -. 日本応用地質学会平成10年度研究発表会要旨集.
- 2) 川越健・岩井孝幸・松村修治・木方建造・田中和弘・田代寿春(1999): 第三紀堆積軟岩における地質・地下水調査技術の開発(その1) - 大深度掘削技術の開発とその適用性 -. 日本応用地質学会平成11年度研究発表会要旨集.
- 3) 木方建造・田中和弘・河野愛・松村修治・川越健・大島和夫・岩崎慶次(1998): 第三紀堆積軟岩における大深度孔井掘削および調査技術の開発(その2) - 大深度ポーリング孔への適用 -. 日本応用地質学会平成10年度研究発表会要旨集.
- 4) 木方建造・田中和弘・宮川公雄・岡田哲実・馬場保典・田代寿春・川越健(1999): 第三紀堆積軟岩における地質・地下水調査技術の開発(その2) - 調査技術の開発と適用 -. 日本応用地質学会平成11年度研究発表会要旨集.
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1999): 地熱開発促進調査報告書, No.B-2, 「安代地域」.
- 6) 石油公団(1999): 平成9年度 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「夕張」調査報告書.
- 7) 石油公団(1999): 平成9年度 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「夕張」掘削報告

書.

- 8) 石油公団(1999) : 平成 9 年度 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「東山」調査報告書.
- 9) 石油公団(1999) : 平成 9 年度 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「東山」掘削報告書.
- 10) 石油公団(1997) : 平成 5 年度 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「天北」調査報告書.

3.2 最近の海外の堆積岩地域における掘削工法・試錐調査手法の調査 (参考文献)

Darley, H.C.H. and Gray, G.R. (1988):Composition and properties of drilling fluids and completion fluids, fifth edition. Gulf Publishing Company.

Gautschi, A and Scholtis, A.(1989):Sampling and analysis of groundwaters from deep boreholes, NAGRA Bulletin.

Lummus, J.L. and Azar, J.J. (1987):Drilling fluids optimisation – a practical field approach. Penwell Publishing Company.

Miller, W. and McLeod, R.S. (1998):The use of drilling fluids in geological investigations for radioactive waste disposal. A report for MMC. Report IG6115-1.

Moore, P.L. (1986):Drilling practices manual, second edition. Penwell Publishing Company.

Proceedings of the Ocean Drilling Program. (1996):Initial Reports. Volume 170:College Station, TX (Ocean Drilling Program).

Savage, D. Miller, W. (1996):The Hydrochemistry and palaeohydrochemistry of deep environments. A report for MMC. Report IG4430, Version 2.0.

Urquhart, J. C. (1998):DRILLING '98, Back to the future in silicate drilling fluids, WORLD OIL, p.61-65.

海洋科学技術センター(1999) : 深海地球ドリリング計画 (パンフレット) .

東京大学海洋研究所(1998) : 国際深海掘削計画 (Ocean Drilling Program) (パンフレット) .

4.2 試錐孔掘削計画に当たっての設定条件

- 1) 核燃料サイクル開発機構 (JNC) (1998) : 北海道北部地域の地質に関する研究報告書 (JNC TJ1400 98-001) , 77p.

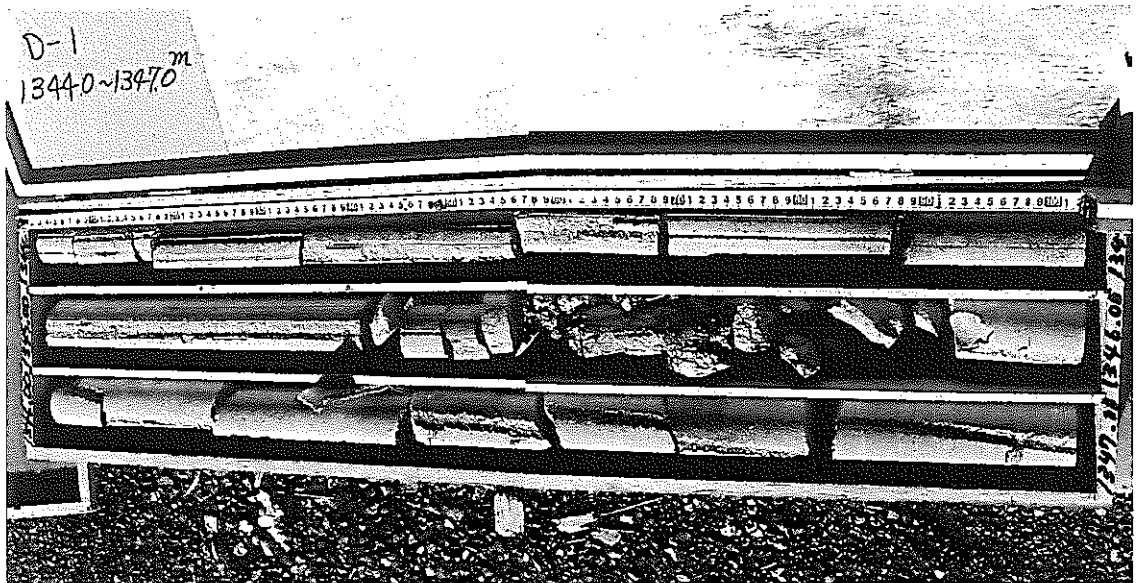
卷 末

卷 末 A

現 場 写 真



A-1 D-1 コア (勇知層細粒砂岩 : 深度 447.00~450.00m)



A-2 D-1 コア (声間層泥岩 : 深度 1344.00~1347.00m)



A-3 清澄層水路トンネル



A-4 清澄層細粒砂岩露頭



A-5 清澄層泥岩露頭



A-6 清澄層細粒砂岩試料 (サンプル No.S-1)

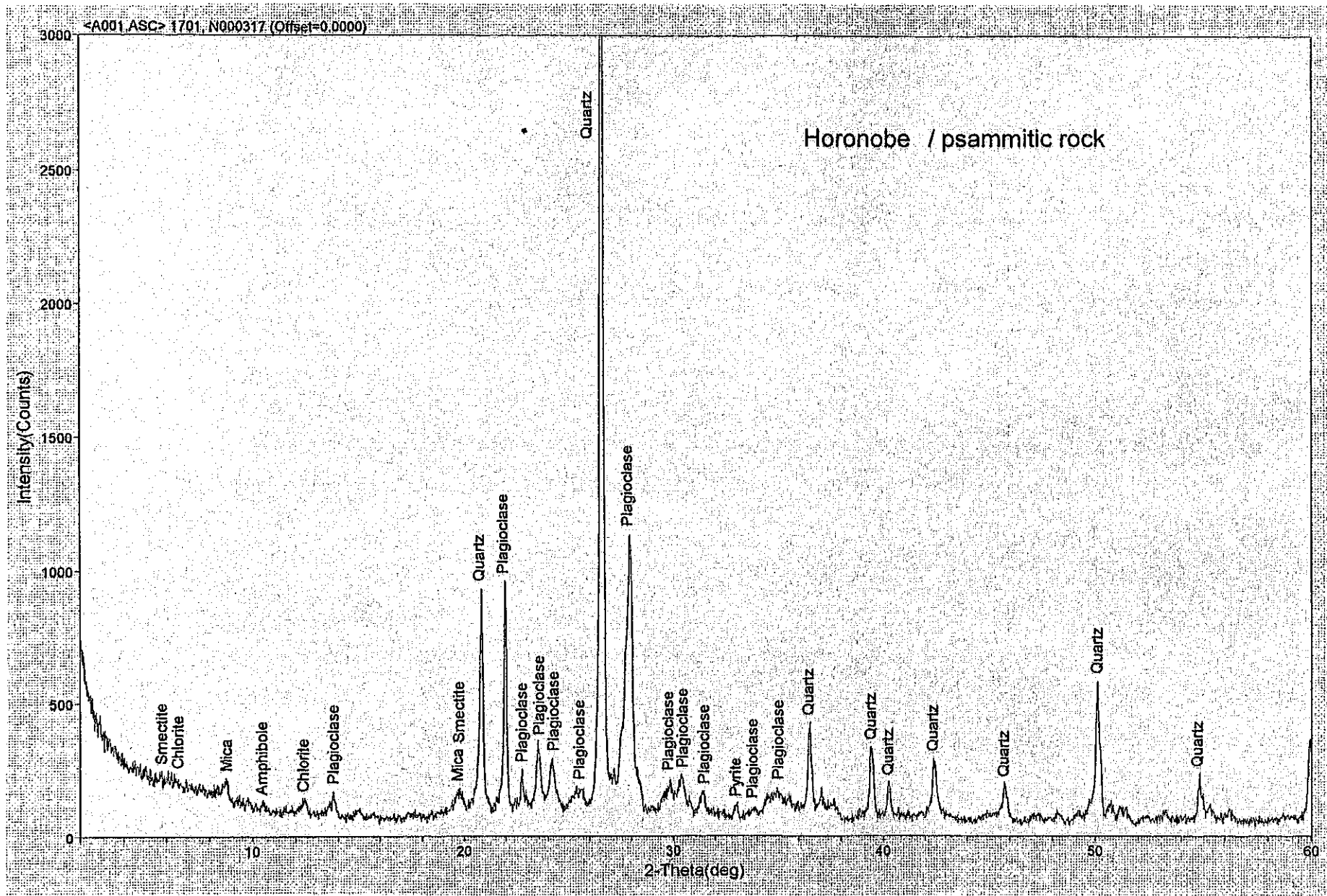


A-7 清澄層泥岩試料 (サンプル No.M-2)

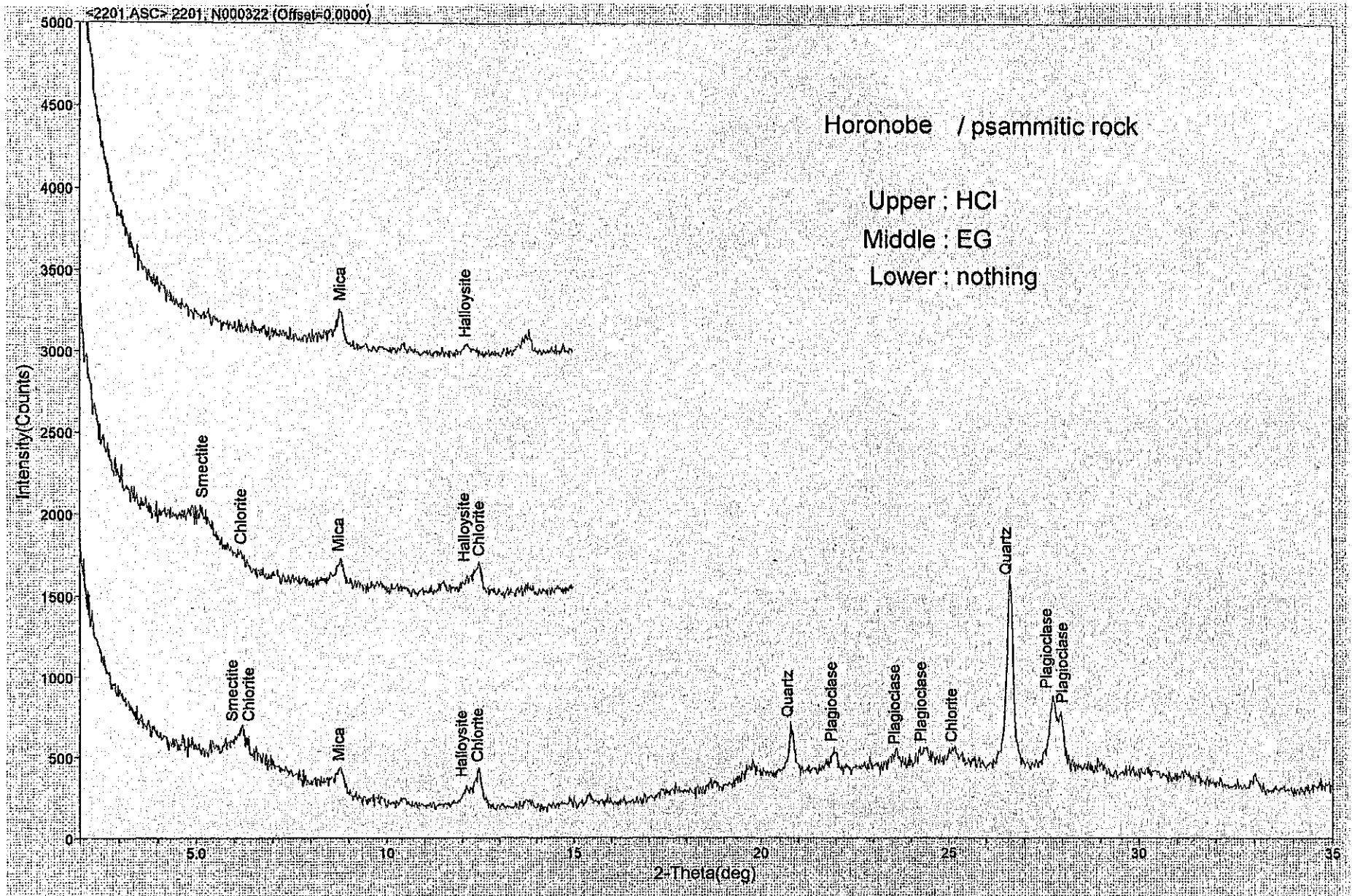
卷 末 B

X線回折チャート

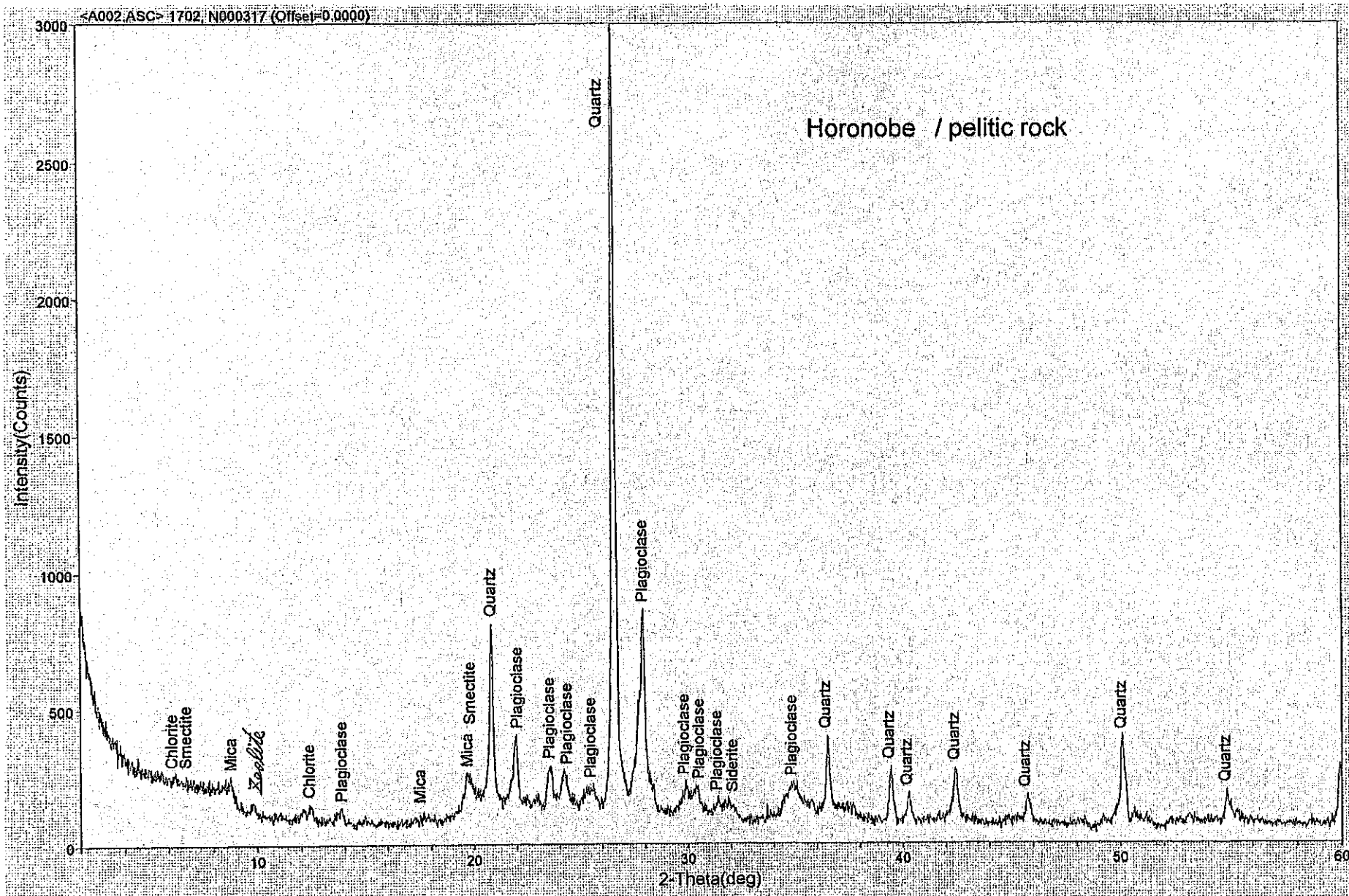
B-1 勇知層細粒砂岩 (D-1孔) 全岩測定結果

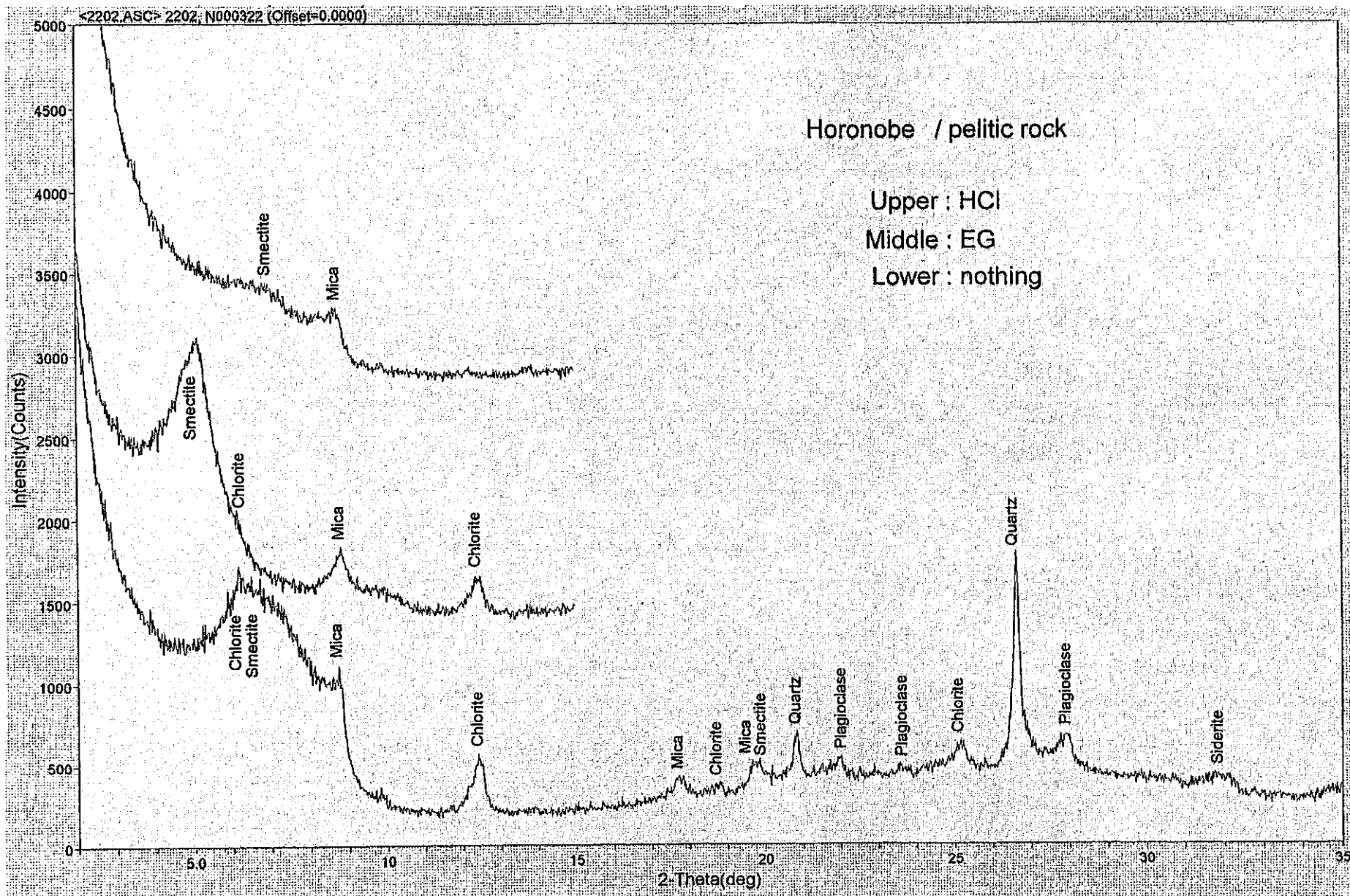


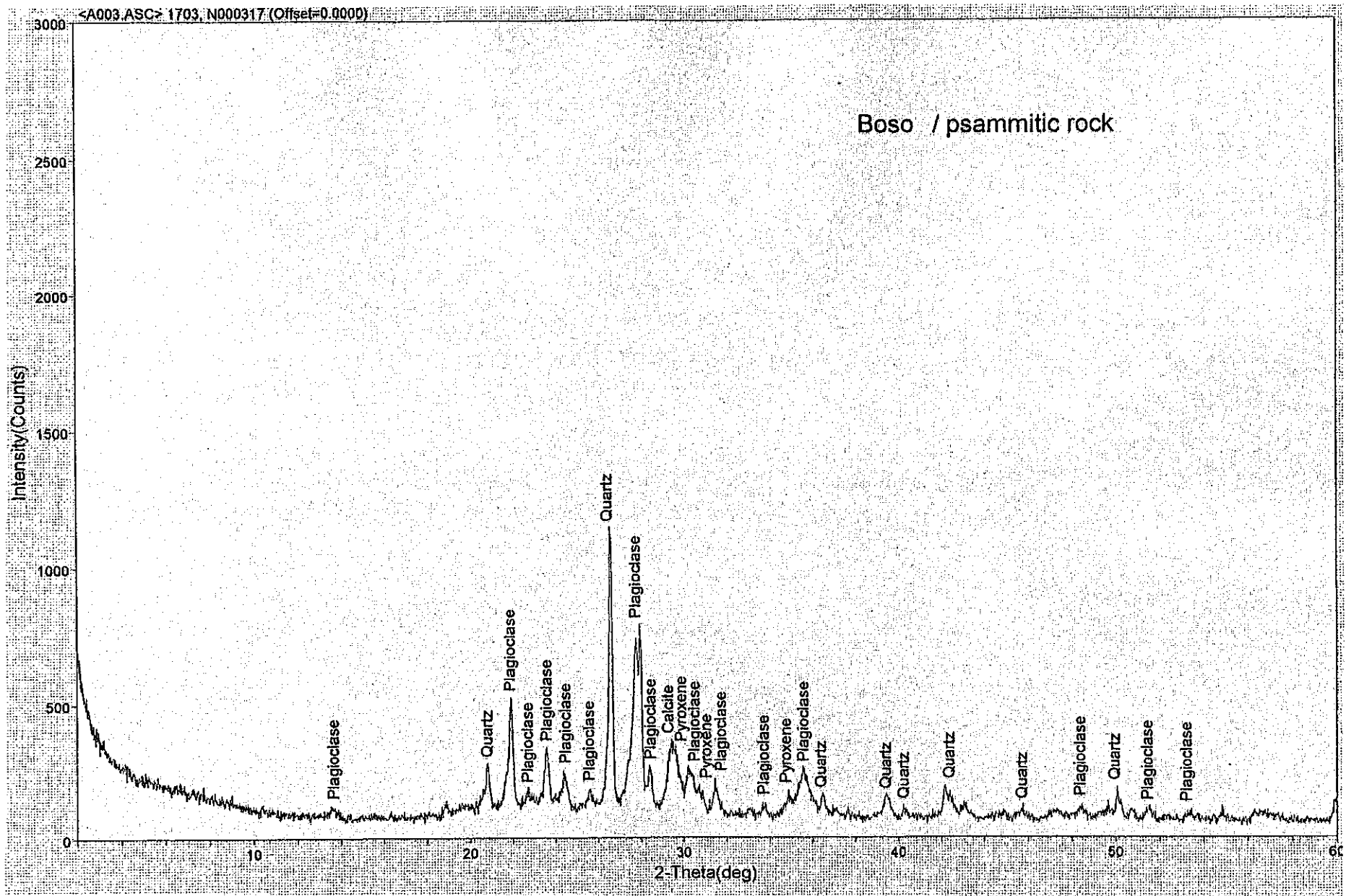
B-2 勇知層細粒砂岩 (D-1 孔) 定向測定結果

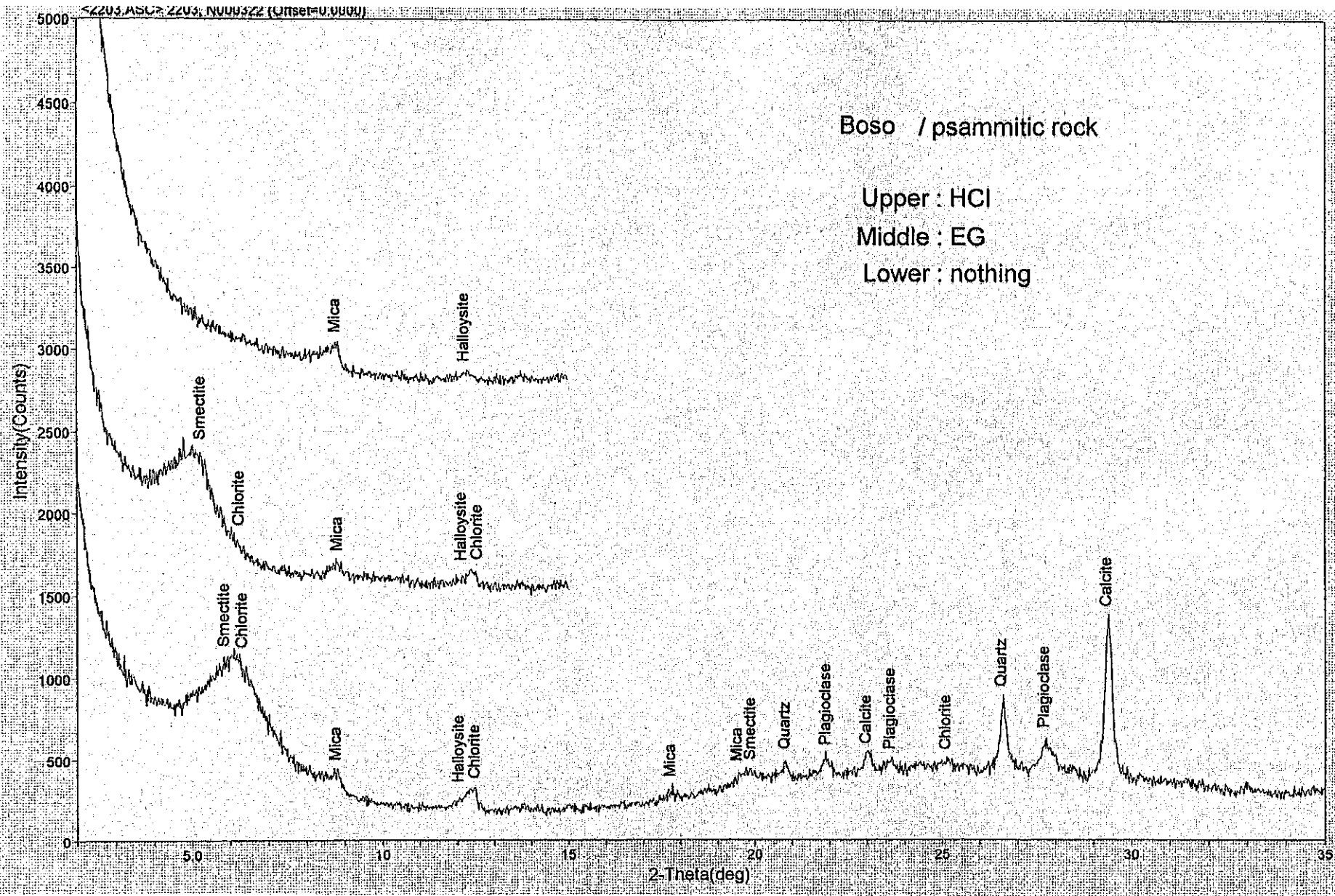


B-3 声間層上部相泥岩 (D-1 孔) 全岩測定結果

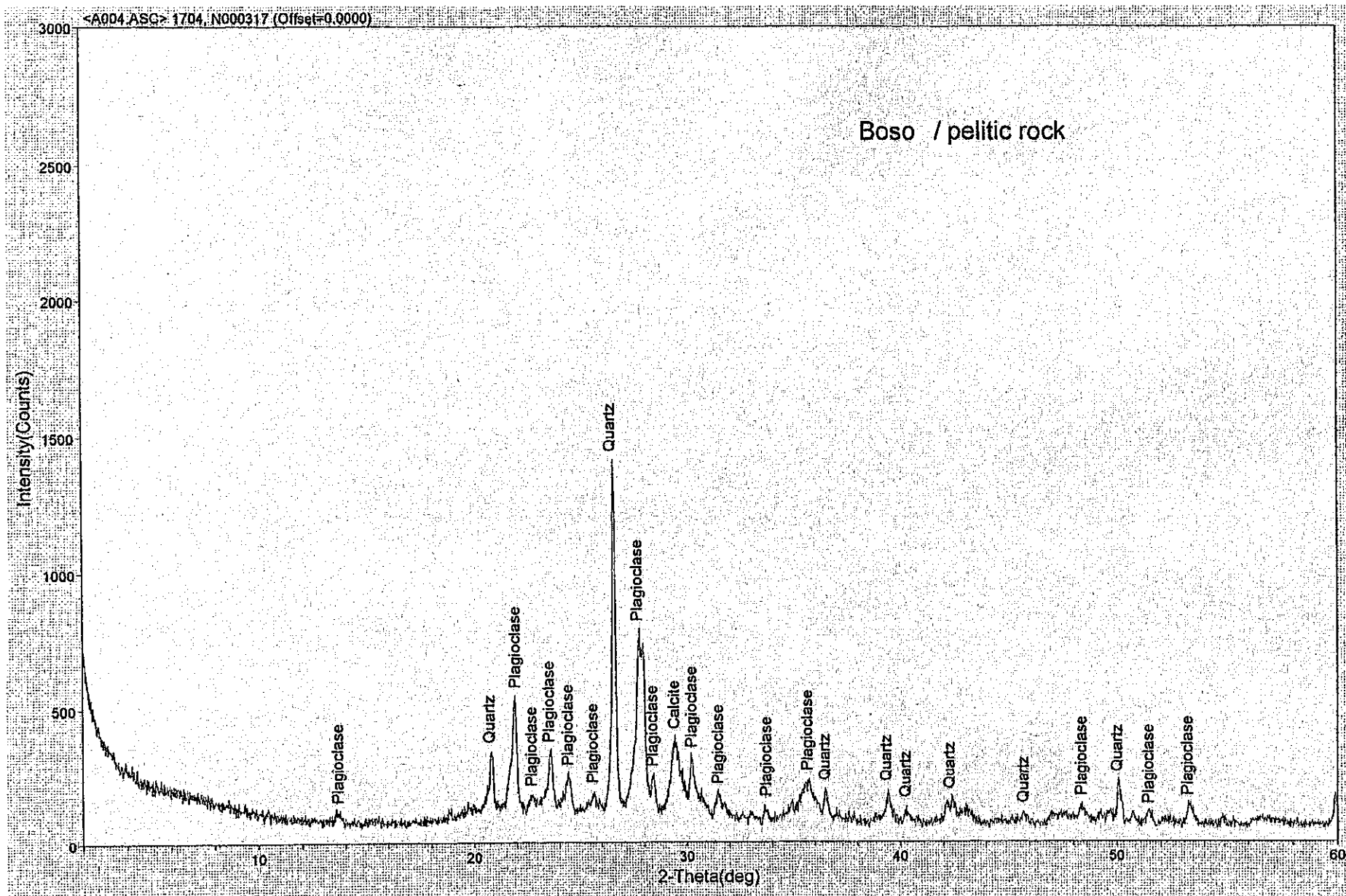




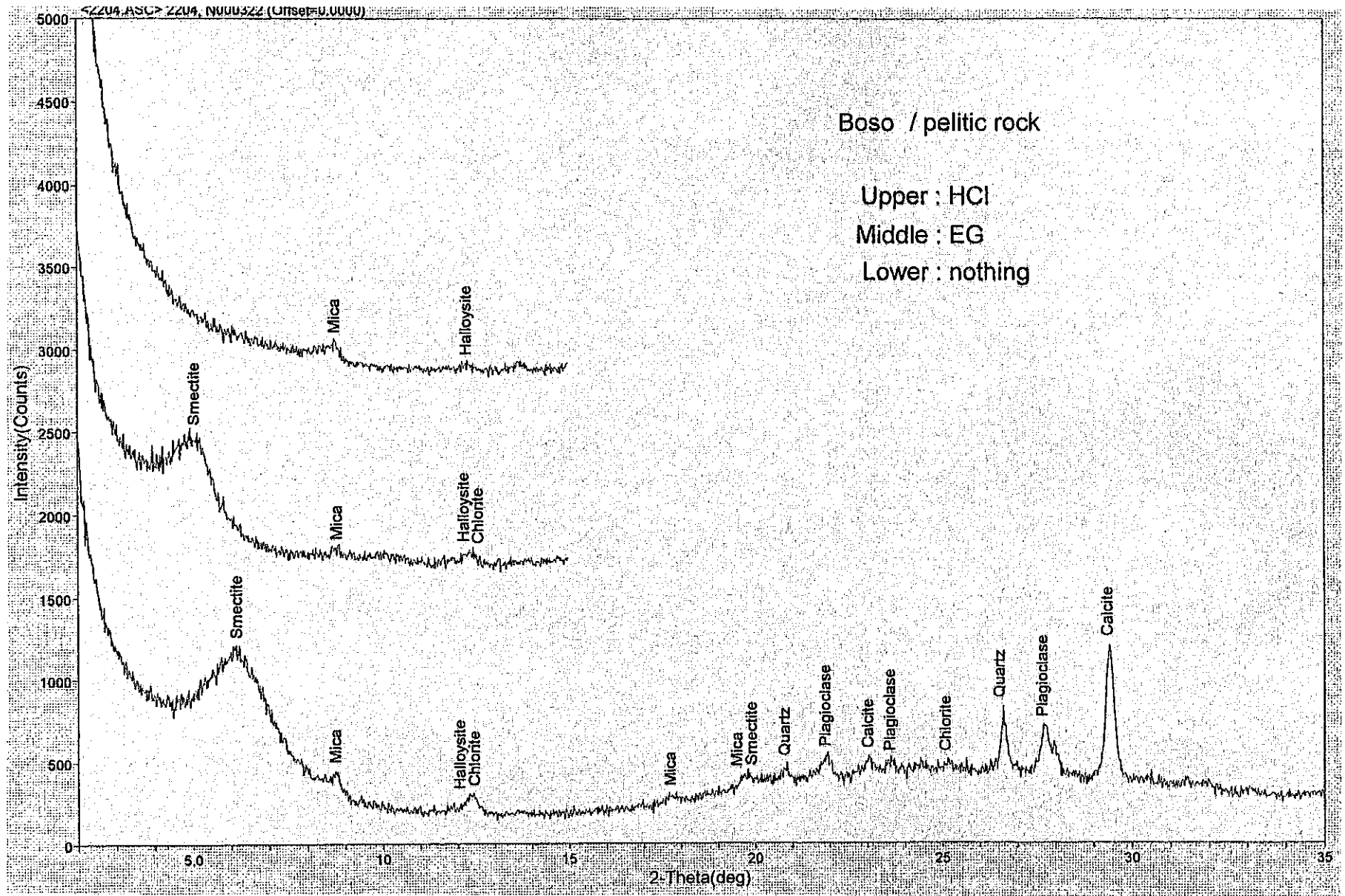




B-7 清澄層泥岩 (房総) 全岩測定結果

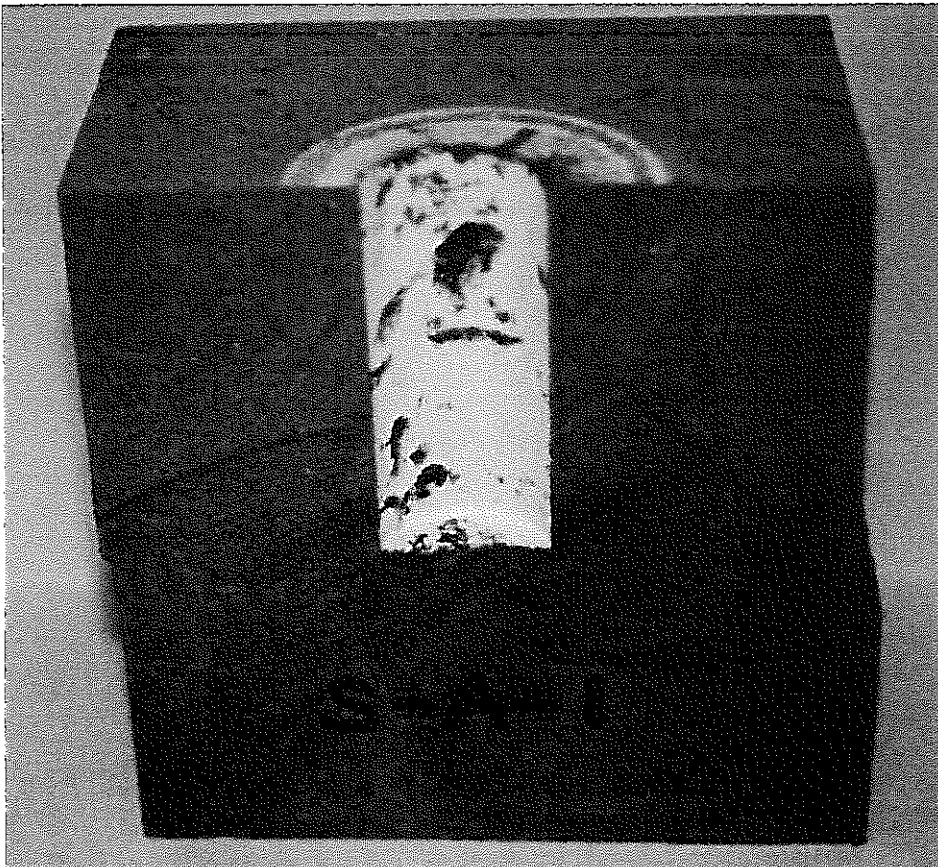
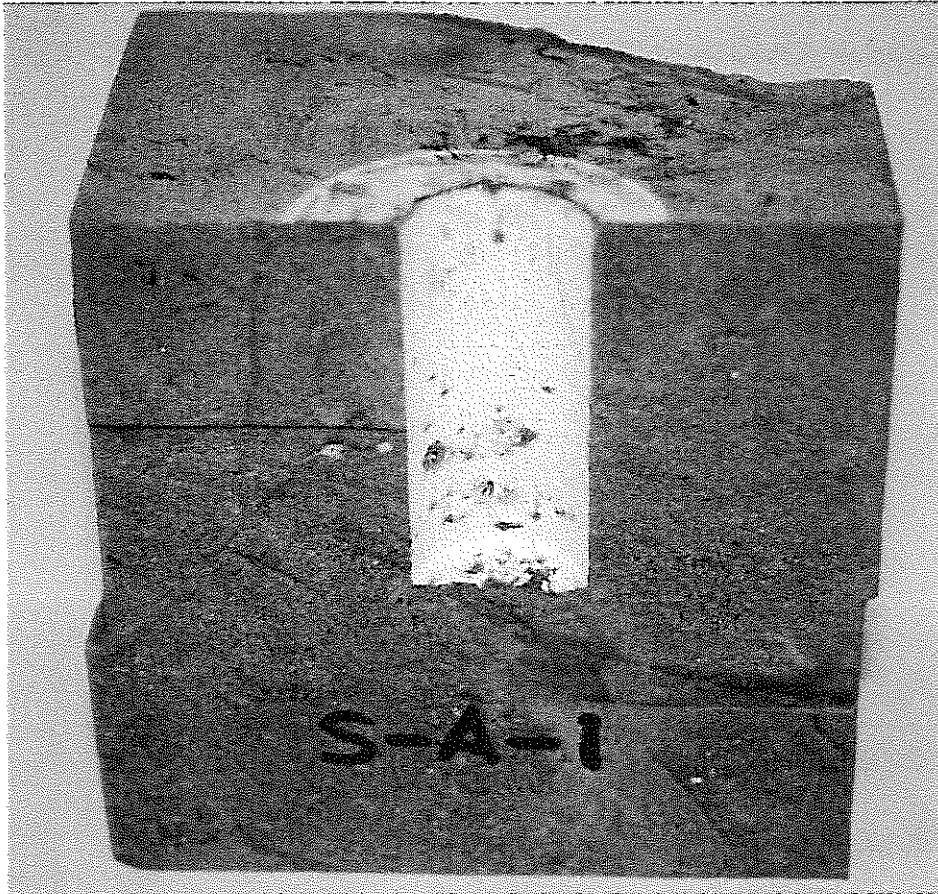


B-8 清澄層泥岩 (房總) 定向測定結果



卷 末 C

泥水浸透試験および回復試験状況写真



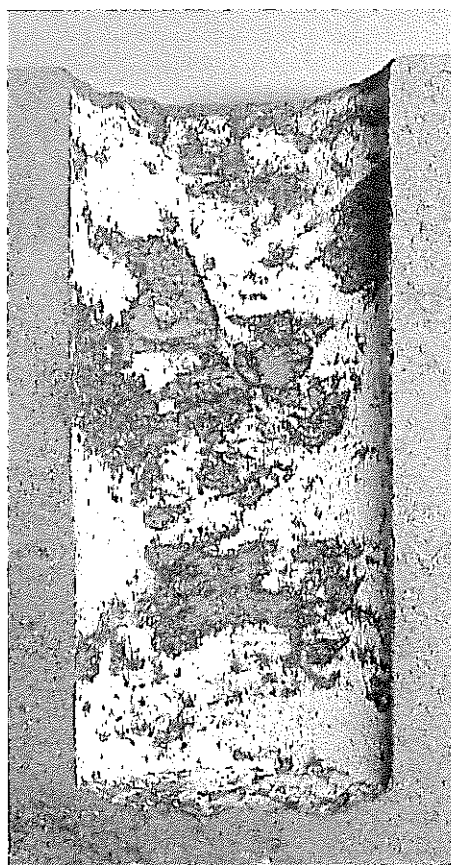
C-1 シリケート泥水 A 浸透試験後切断面 (砂岩 S-A-1)



C-2 シリケート泥水 A 回復試験後切断面 (砂岩 S-A-2)



C-3 シリケート泥水 A・砂岩・浸透試験後切断面拡大



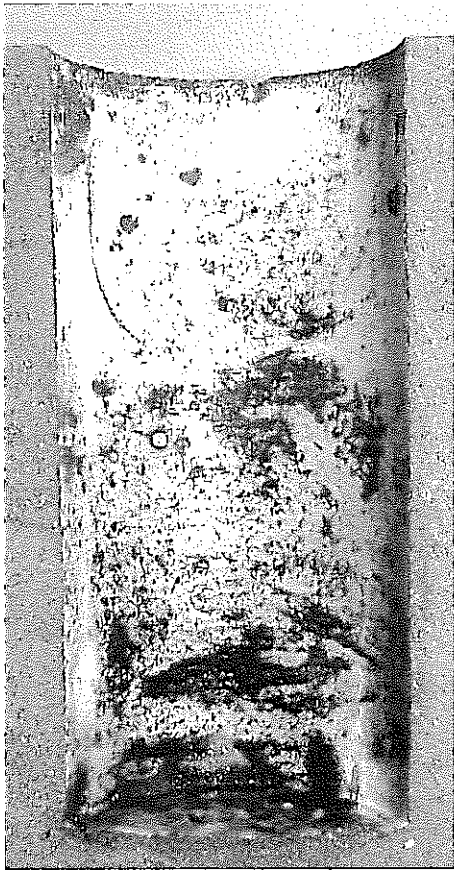
C-4 シリケート泥水 A・砂岩・回復試験後切断面拡大



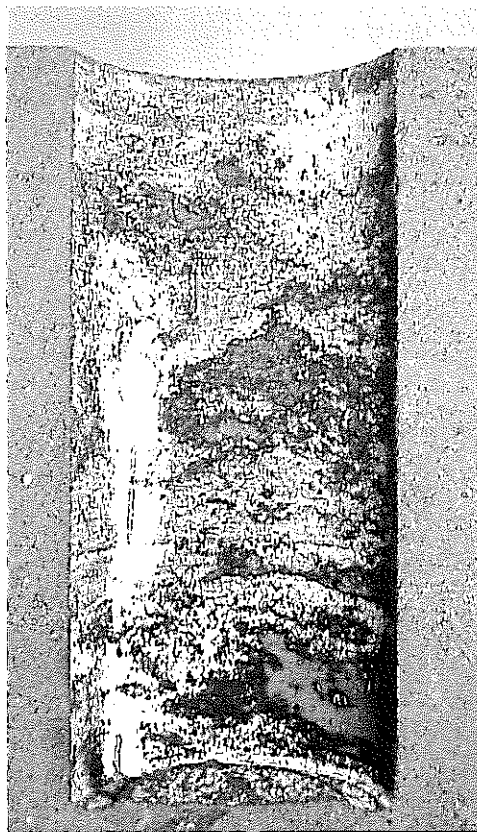
C-5 シリケート泥水 A 浸透試験後切断面 (泥岩 M-A-1)



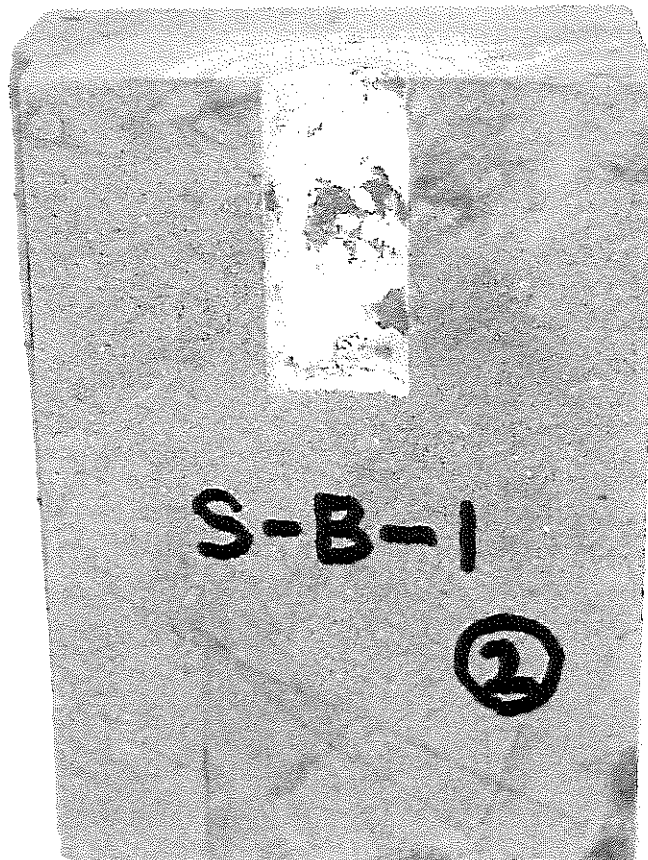
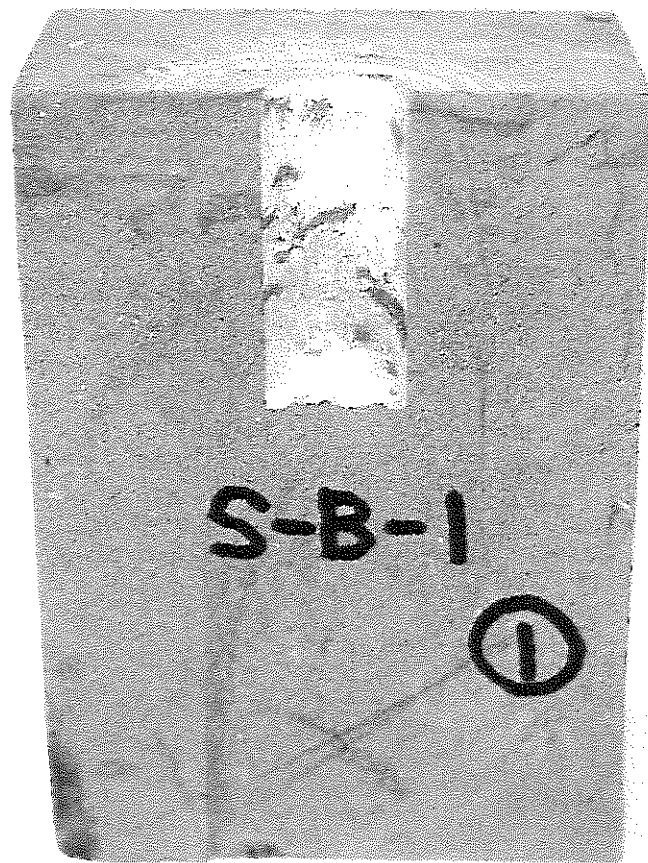
C-6 シリケート泥水 A 回復試験後切断面 (泥岩 M-A-2)



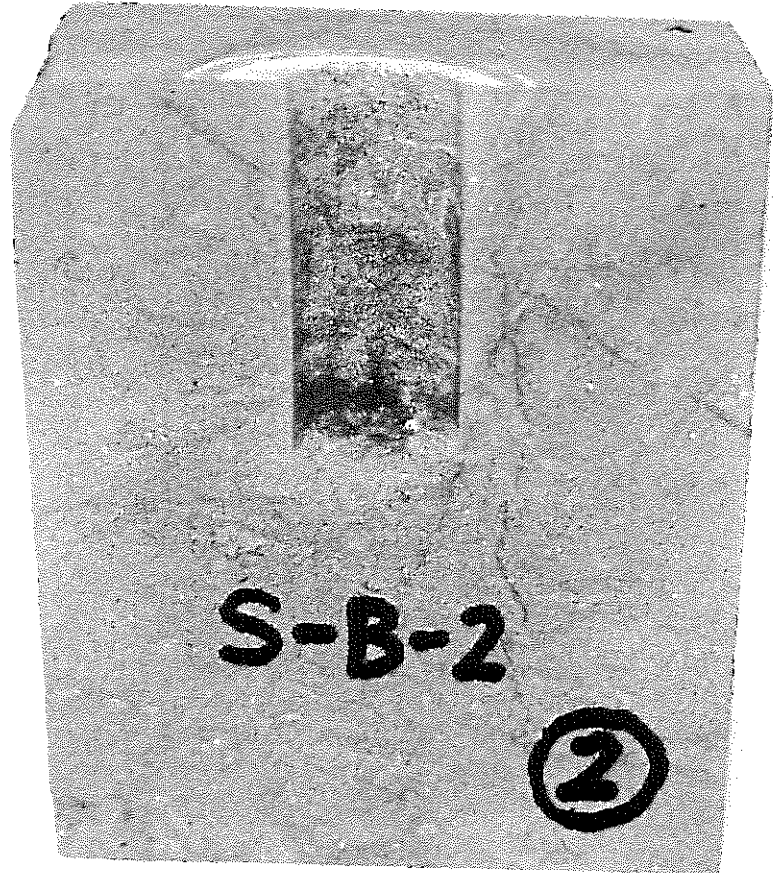
C-7 シリケート泥水 A・泥岩・浸透試験後切断面拡大



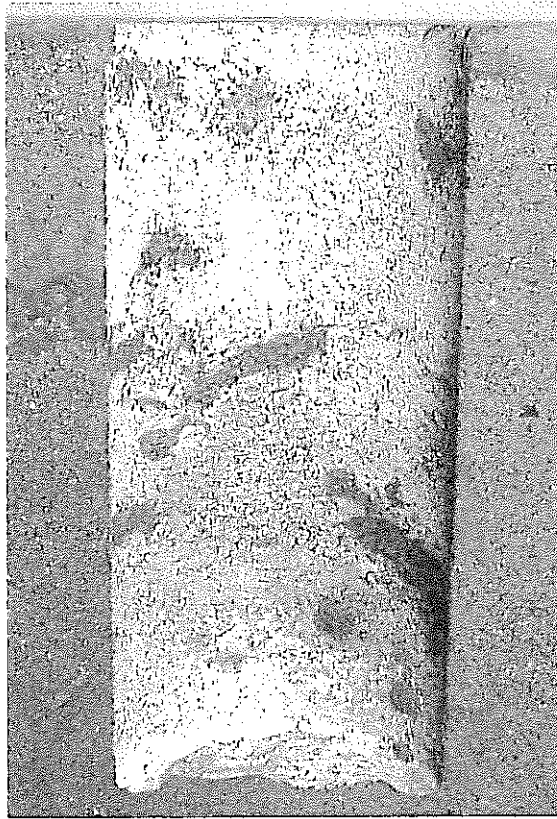
C-8 シリケート泥水 A・泥岩・回復試験後切断面拡大



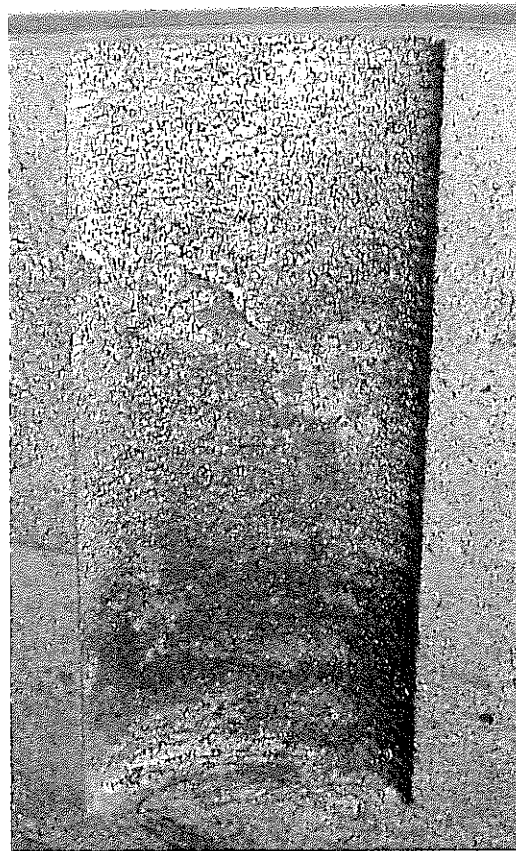
C-9 シリケート泥水 B 浸透試験後切断面 (砂岩 S-B-1)



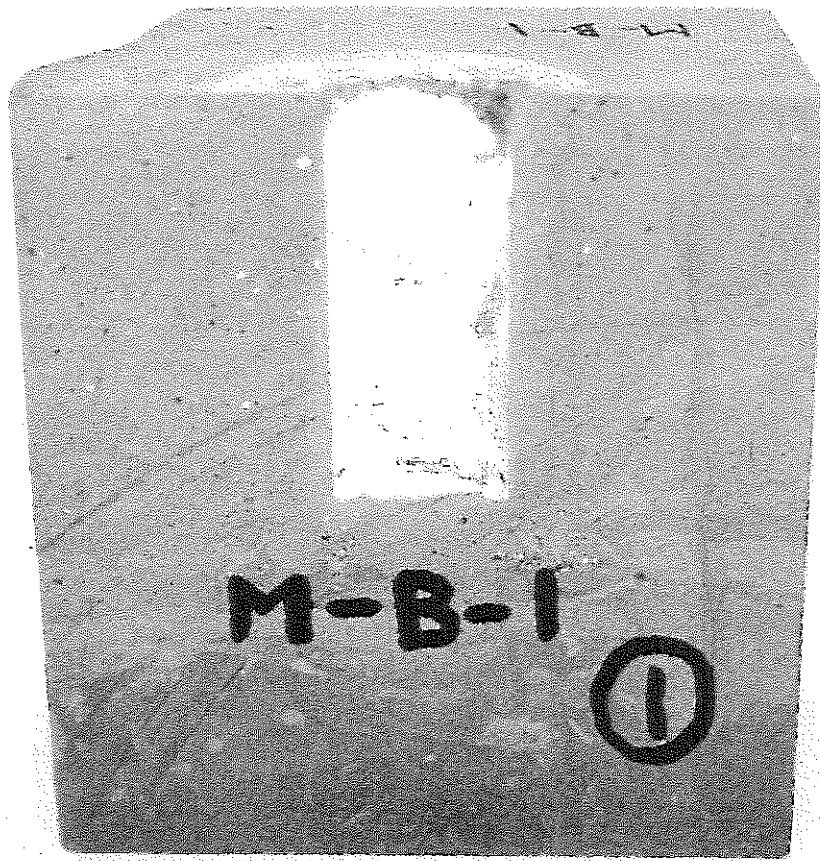
C-10 シリケート泥水 B 回復試験後切断面 (砂岩 S-B-2)



C-11 シリケート泥水 B・砂岩・浸透試験後切断面拡大



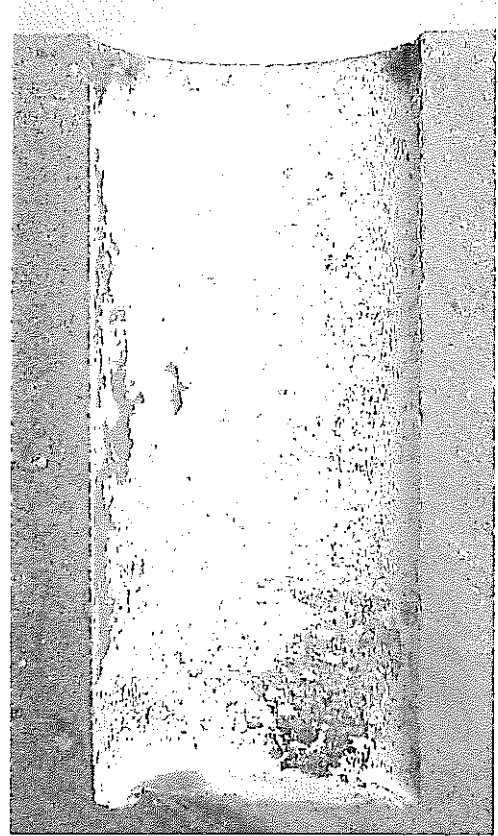
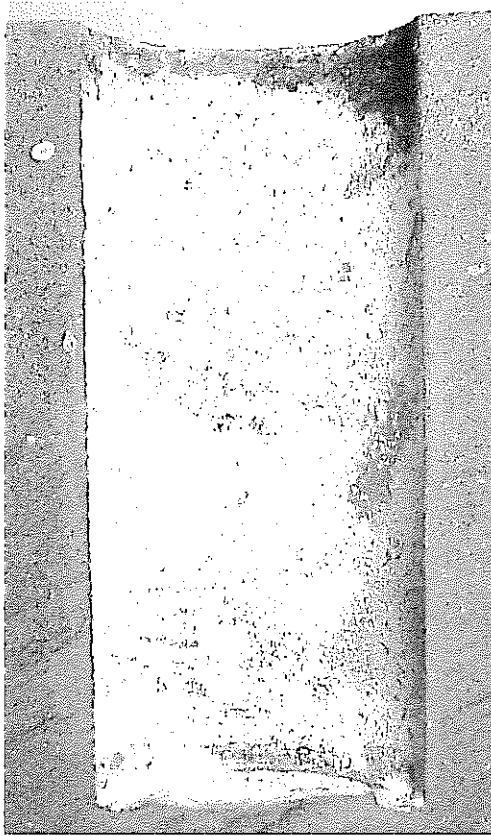
C-12 シリケート泥水 B・砂岩・回復試験後切断面拡大



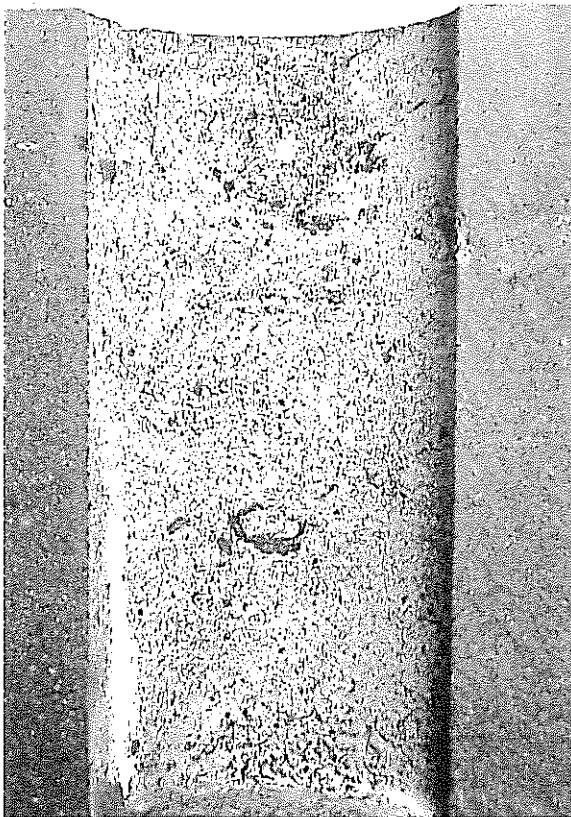
C-13 シリケート泥水 B 浸透試験後切断面 (泥岩 M-B-1)



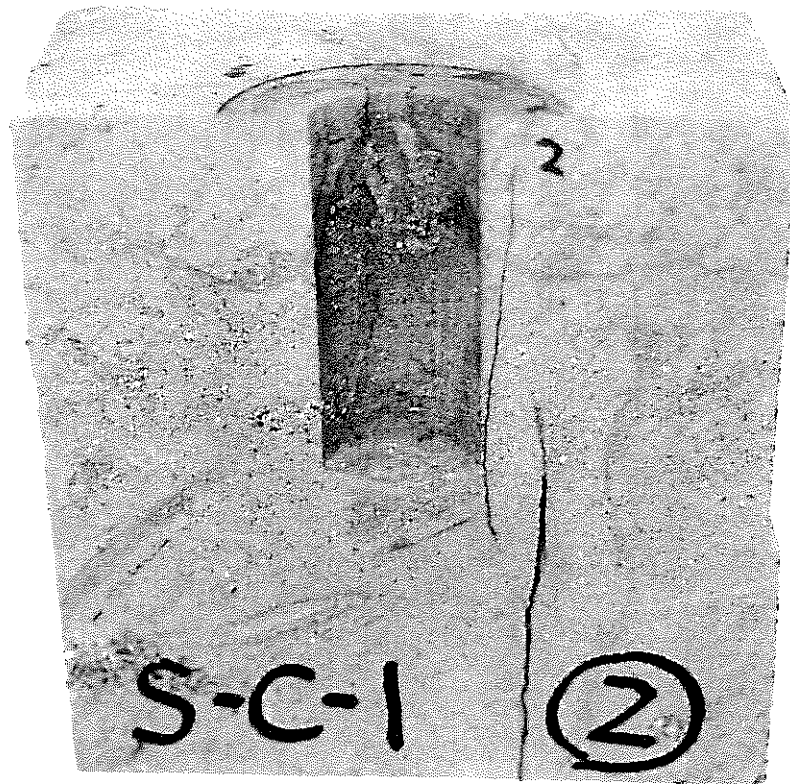
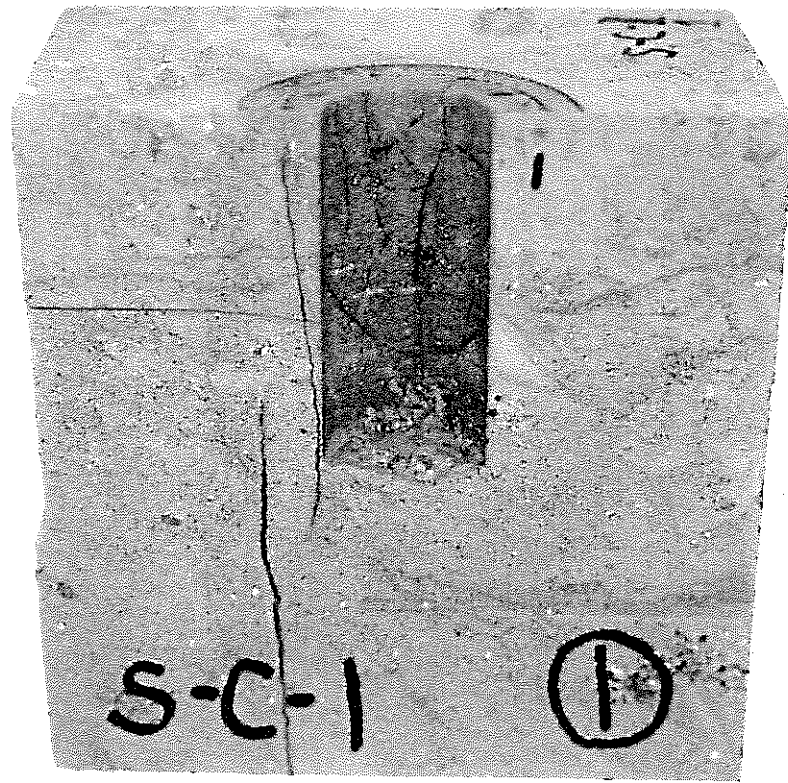
C-14 シリケート泥水 B 回復試験後切断面 (泥岩 M-B-2)



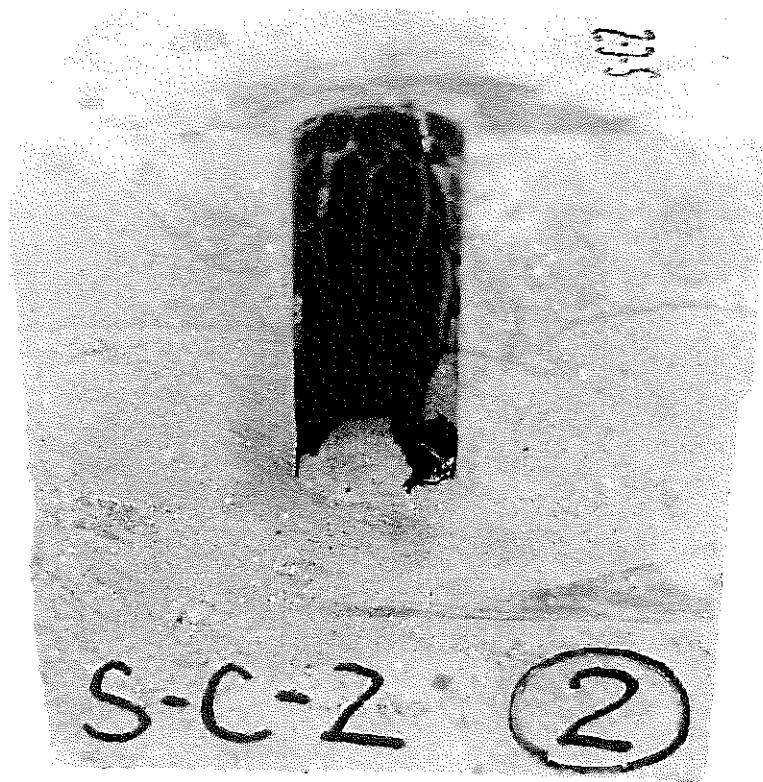
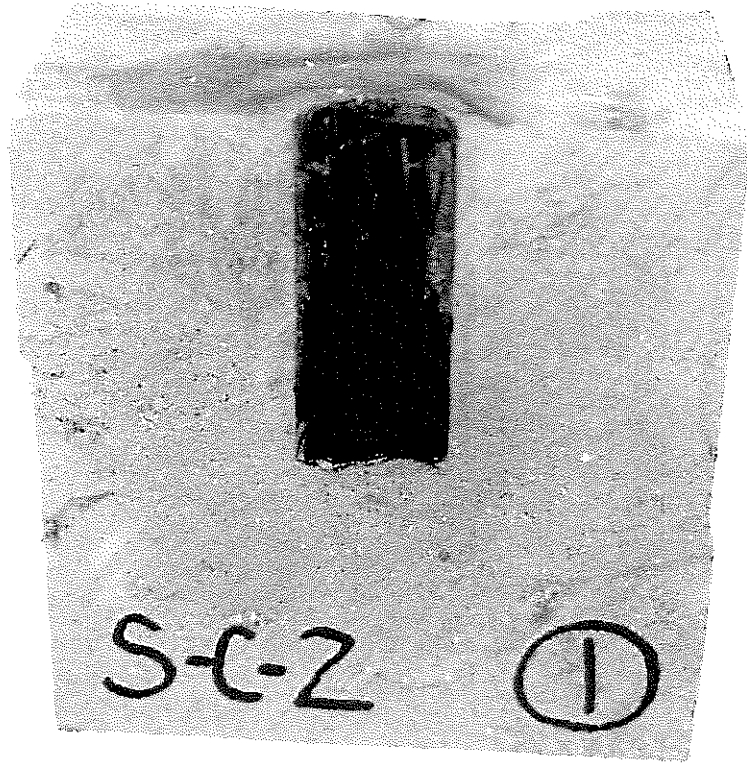
C-15 シリケート泥水 B・泥岩・浸透試験後切断面拡大



C-16 シリケート泥水 B・泥岩・回復試験後切断面拡大



C-17 KCL-リグネート泥水 浸透試験後切断面 (砂岩 S-C-1)

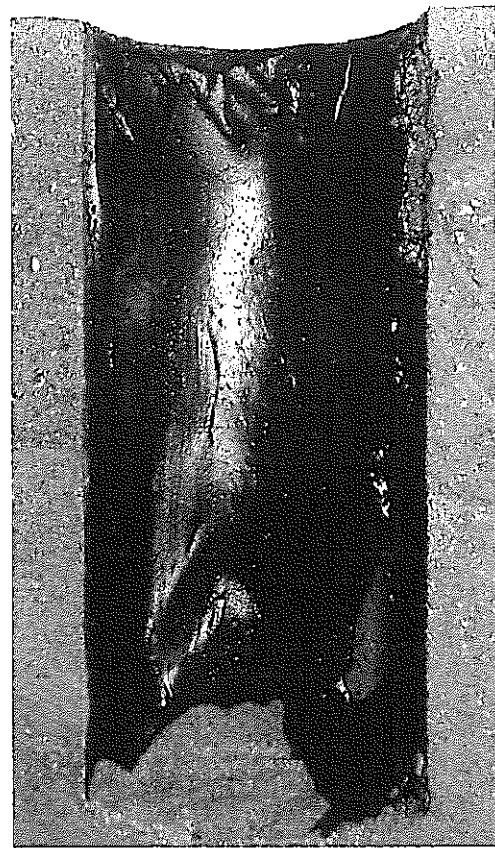
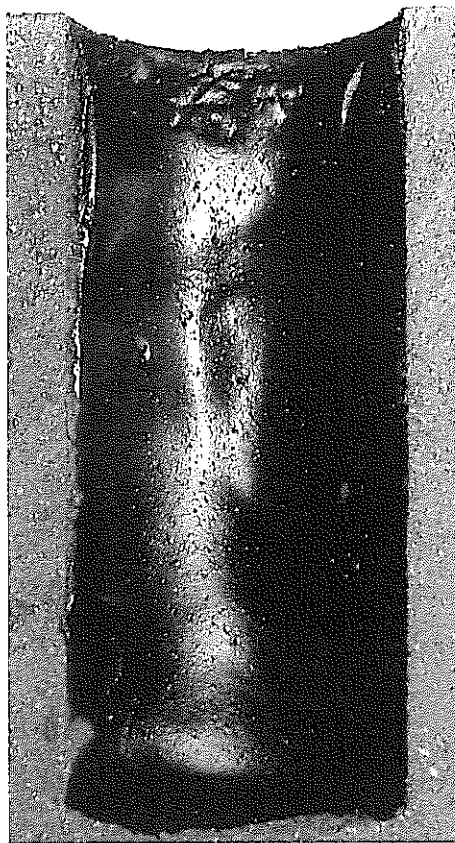


C-18 KCL-リグネート泥水 回復試験後切断面 (砂岩 S-C-2)

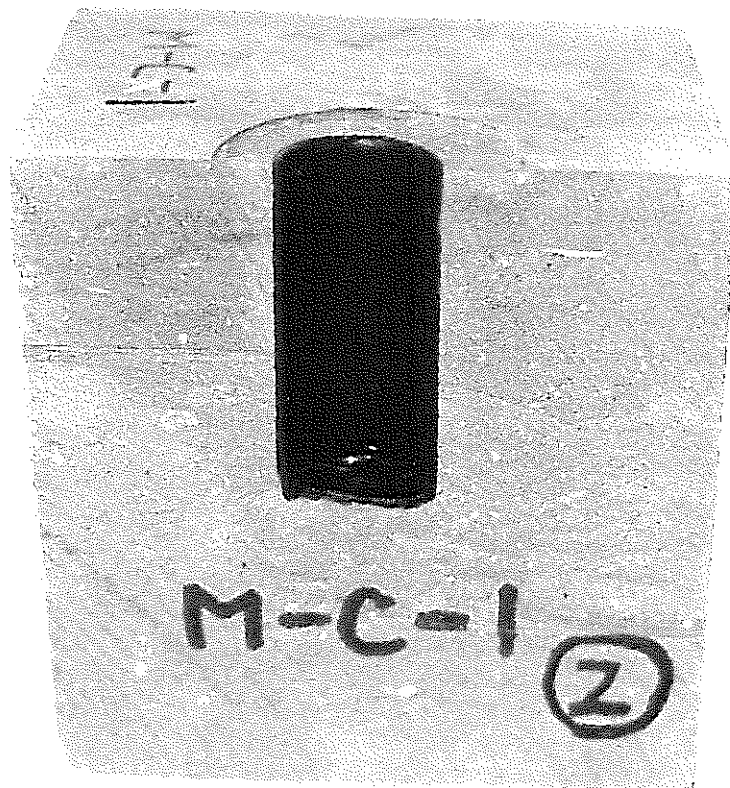
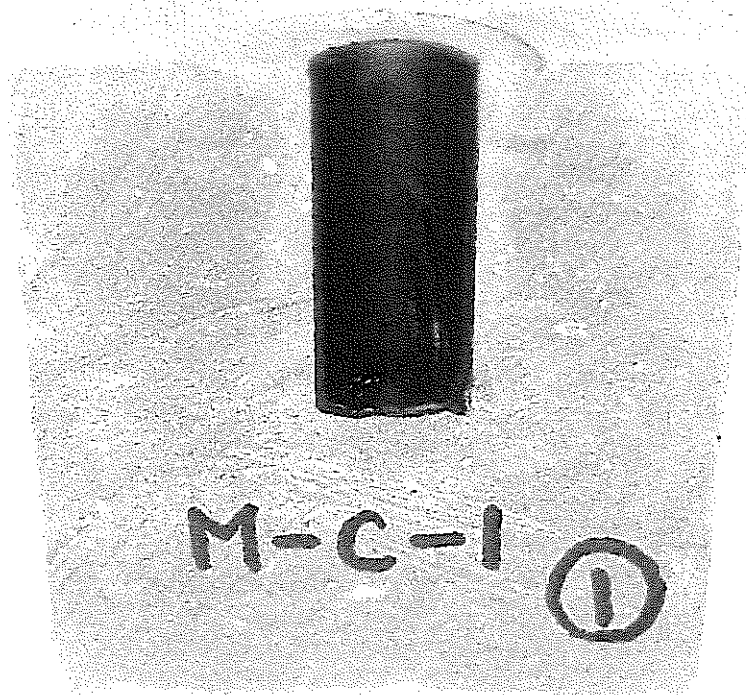


過乾燥のため剥離

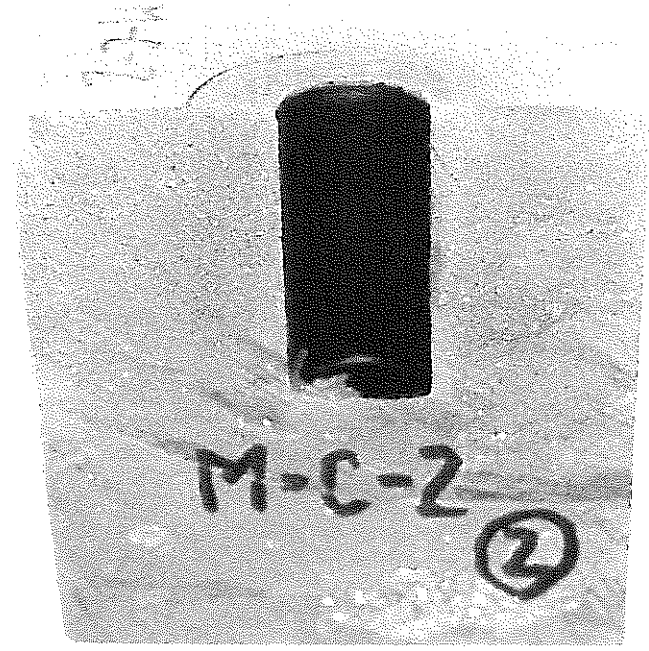
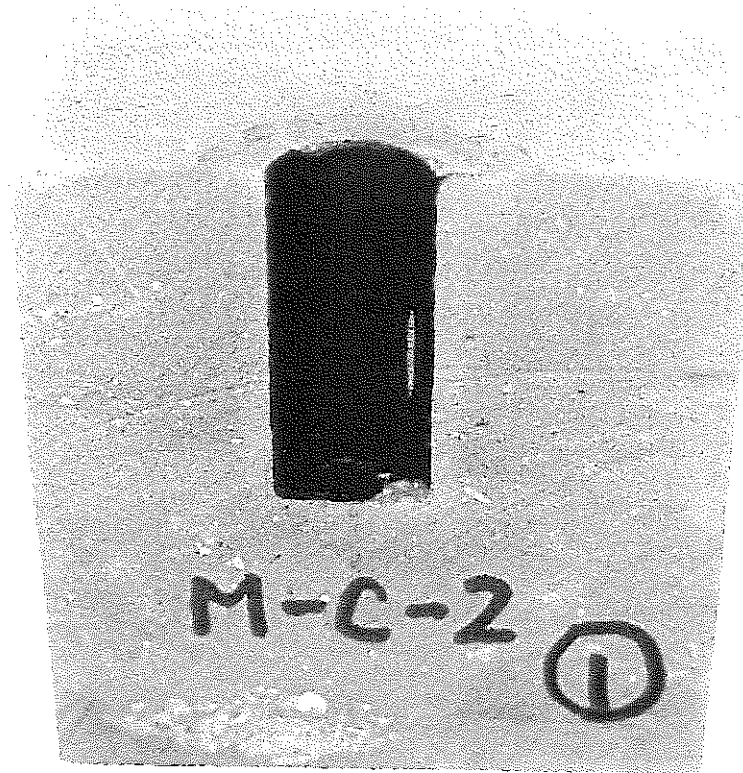
C-19 KCL-リグネート泥水・砂岩・浸透試験後切断面拡大



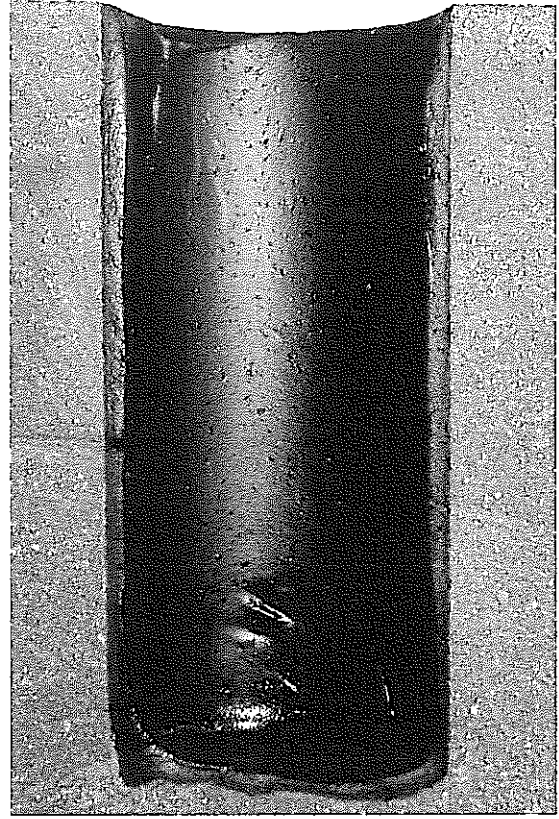
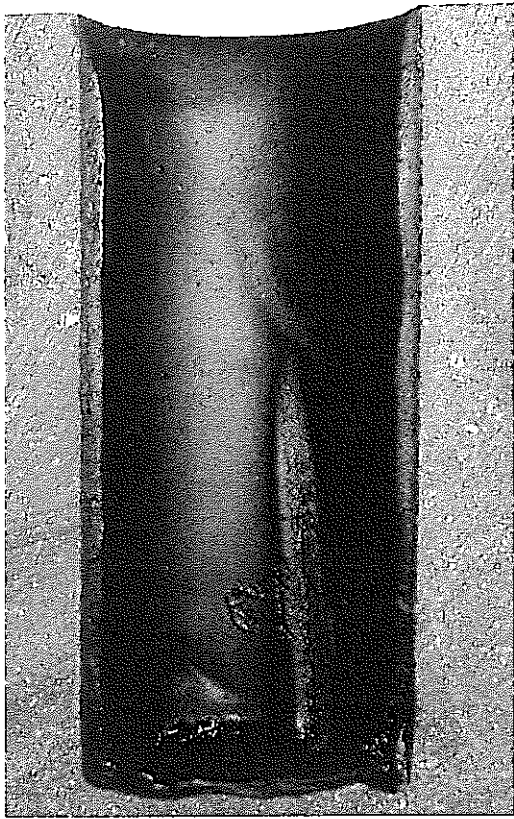
C-20 KCL-リグネート泥水・砂岩・回復試験後切断面拡大



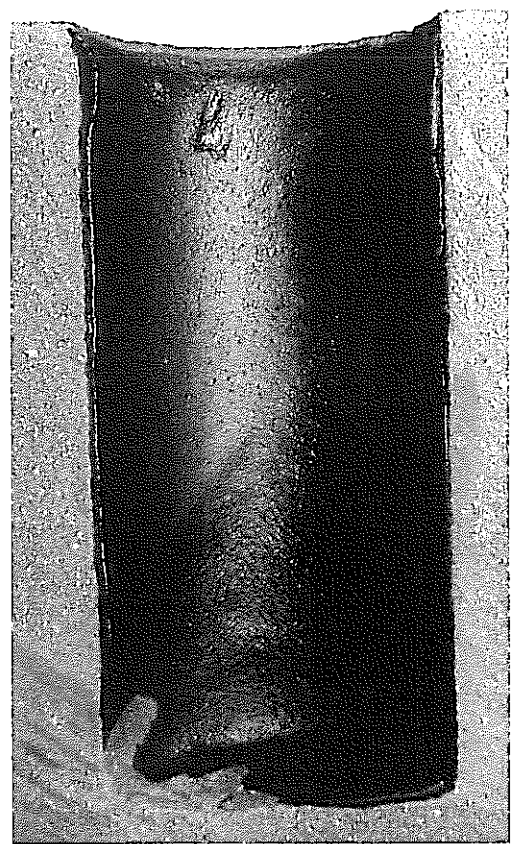
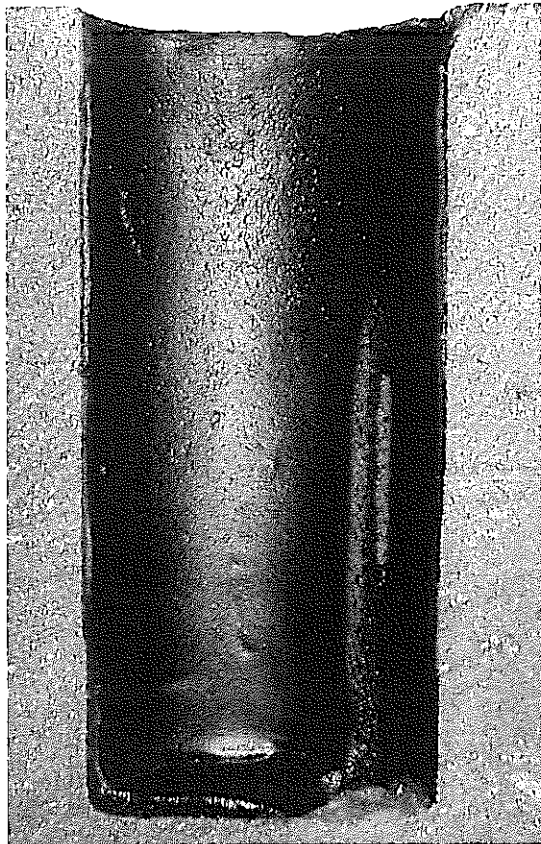
C-21 KCL-リグネート泥水 浸透試験後切断面 (泥岩M-C-1)



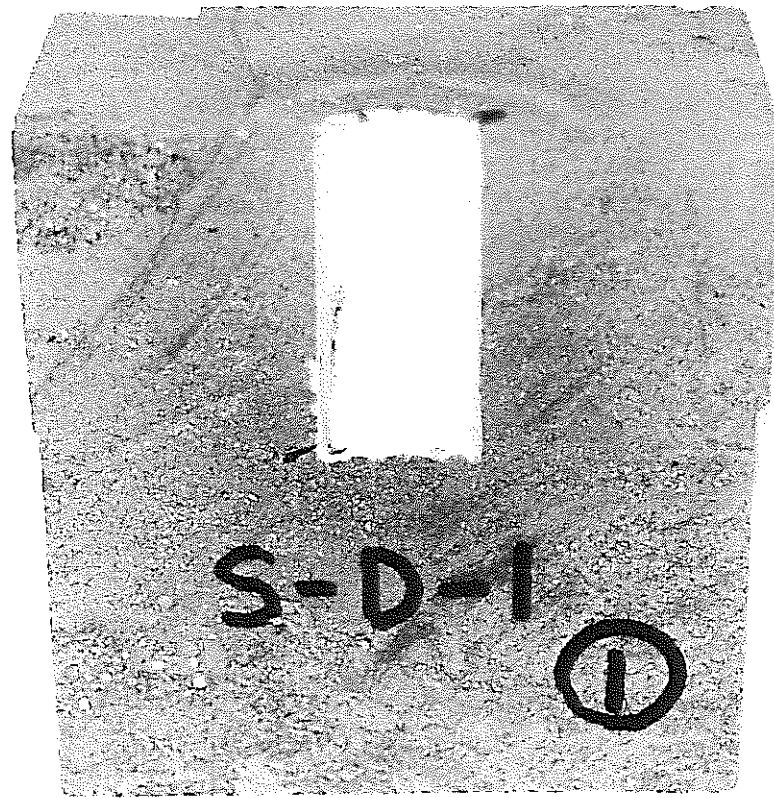
C-22 KCL-リグネート泥水 回復試験後切断面 (泥岩M-C-2)



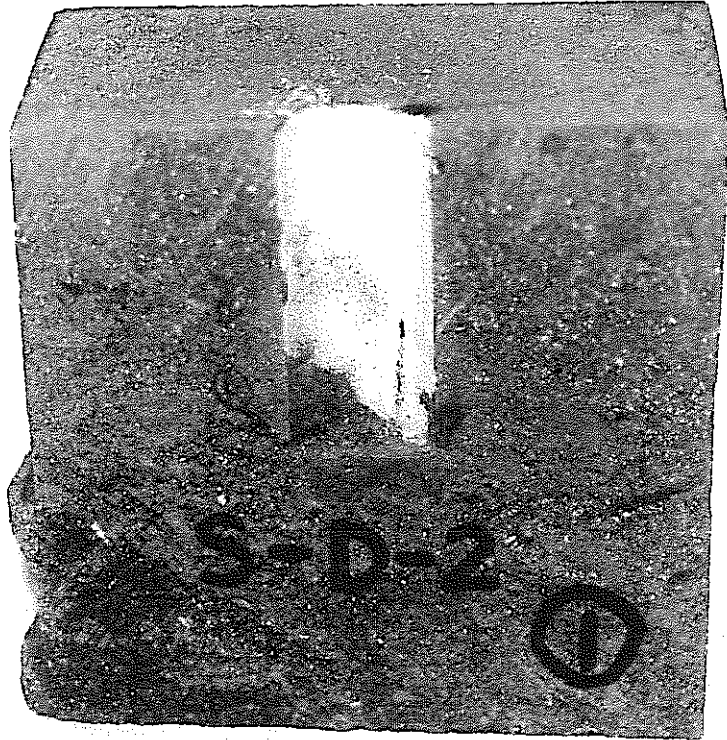
C-23 KCL-リグネート泥水・泥岩・浸透試験後断面



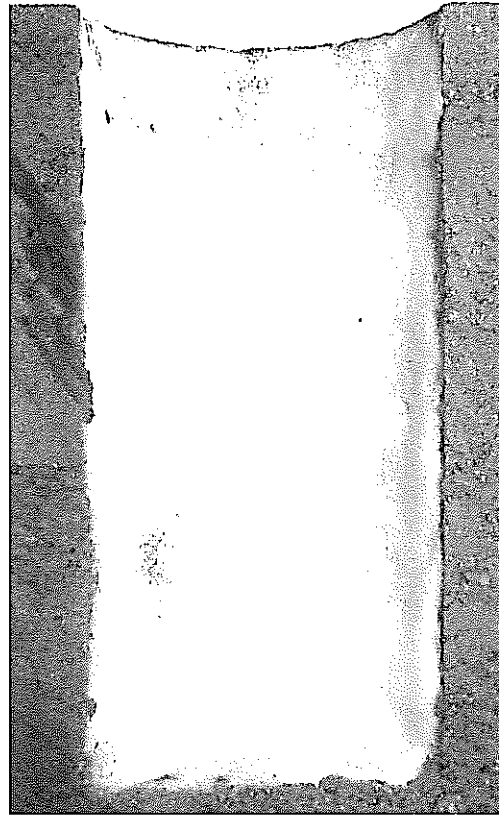
C-24 KCL-リグネート泥水・泥岩・回復試験後断面



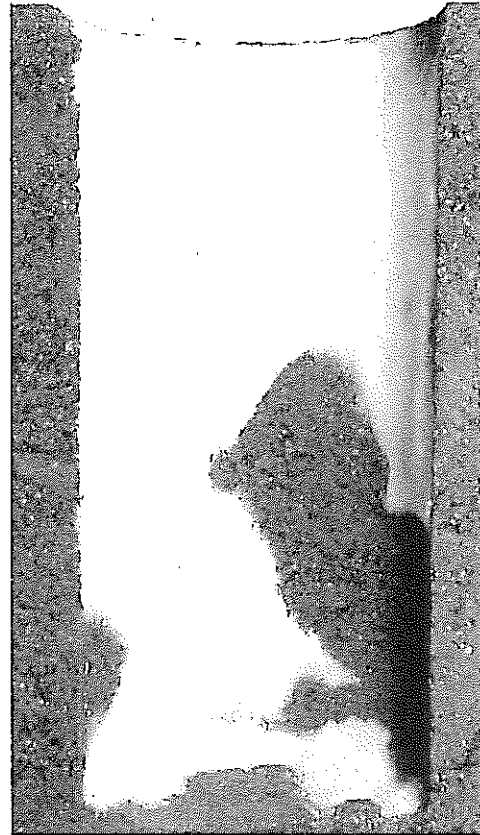
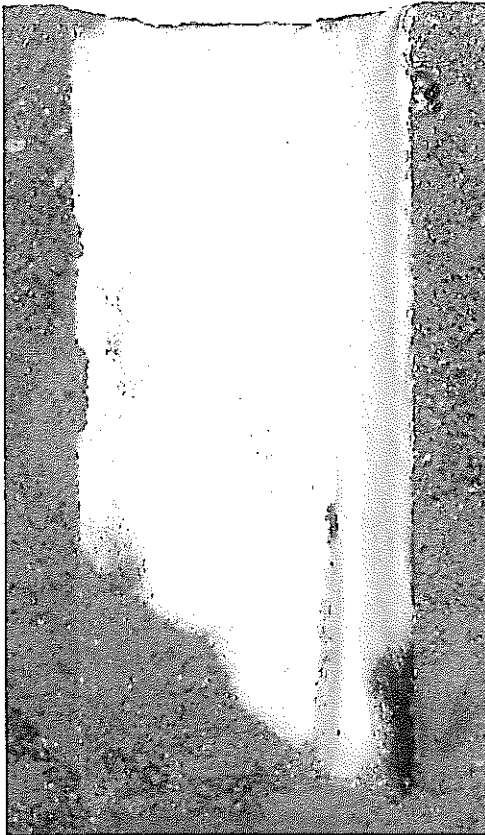
C-25 Drill-In-Fluid 泥水 浸透試験後切断面 (砂岩 S-D-1)



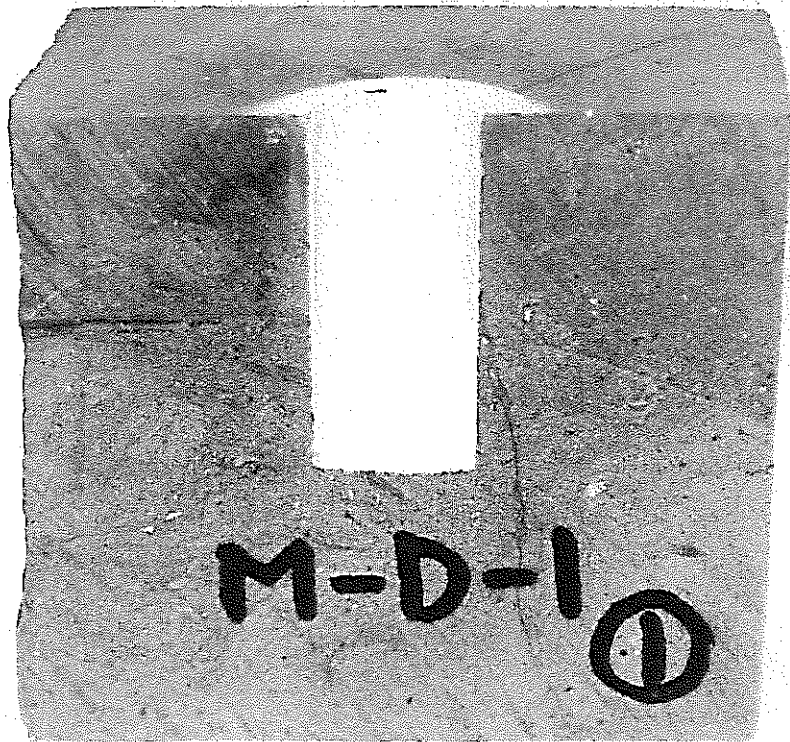
C-26 Drill-in-Fluid 泥水 回復試驗後切断面 (砂岩 S-D-2)



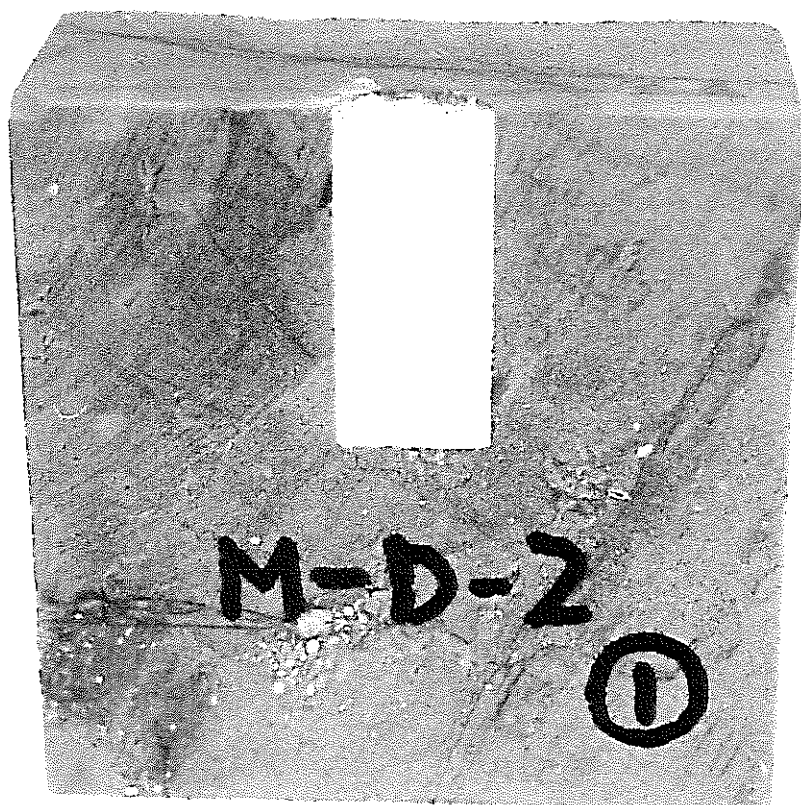
C-27 Drill-In-Fluid 泥水 · 砂岩 · 浸透試驗後断面



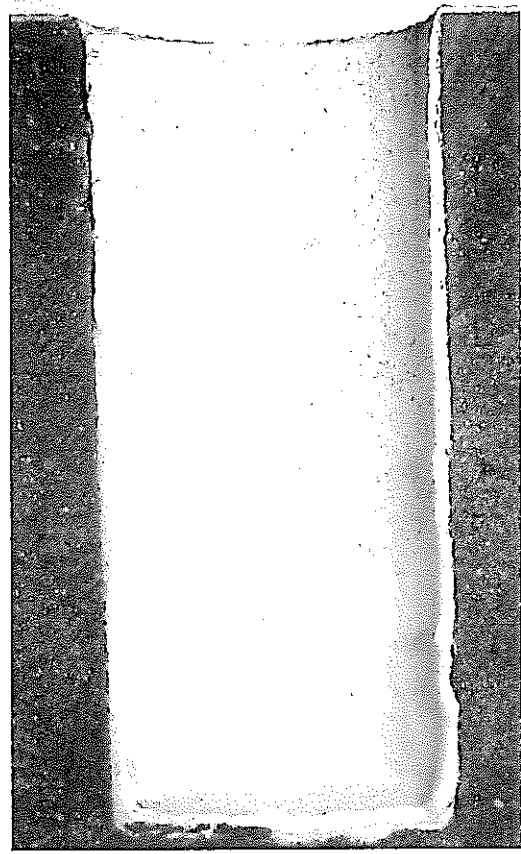
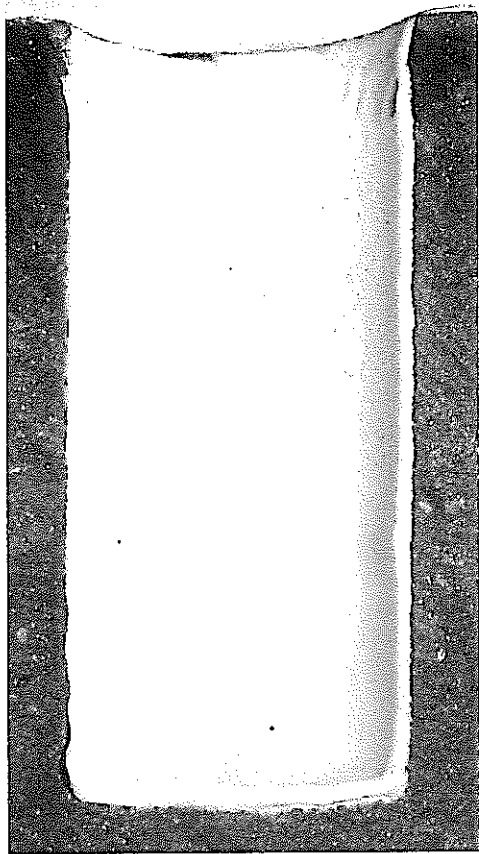
C-28 Drill-In-Fluid 泥水 · 砂岩 · 回復試驗後断面



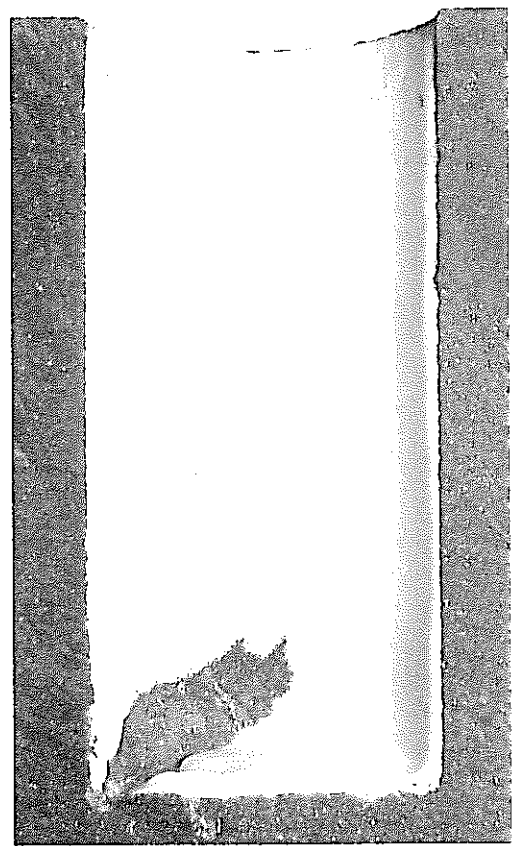
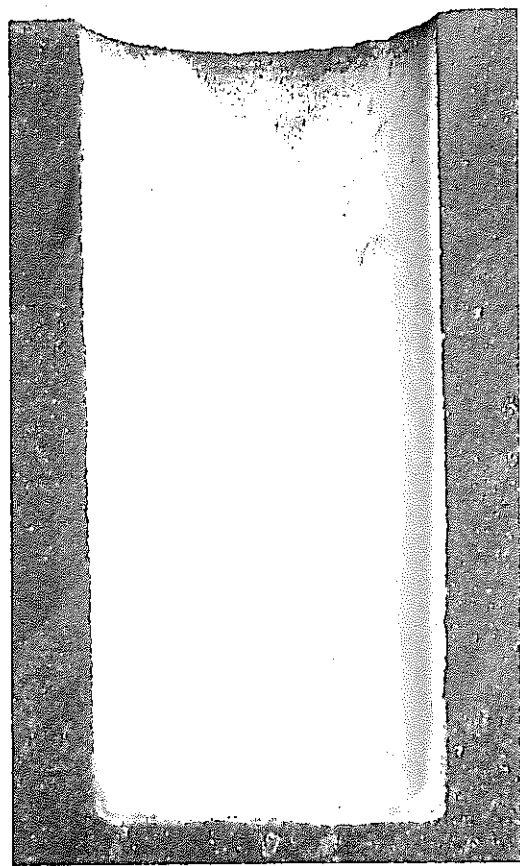
C-29 Drill-In-Fluid 泥水 浸透試験後切断面 (泥岩M-D-1)



C-30 Drill-In-Fluid 泥水 回復試驗後切斷面 (泥岩M-D-2)



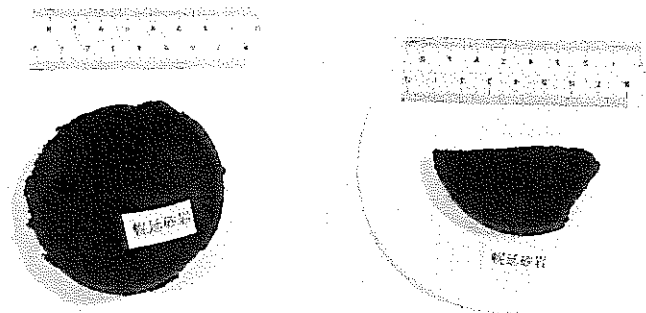
C-31 Drill-In-Fluid 泥水 · 泥岩 · 浸透試驗後断面



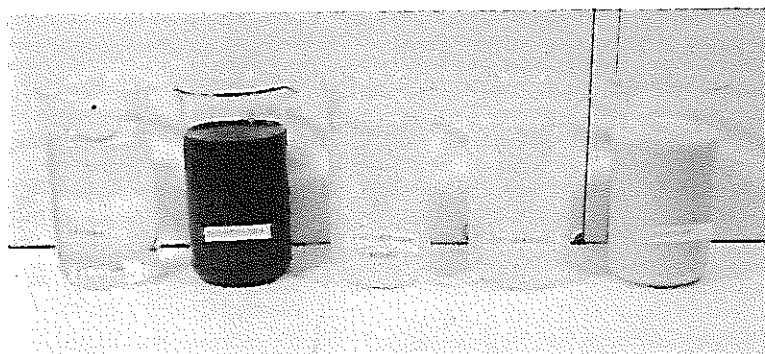
C-32 Drill-In-Fluid 泥水 · 泥岩 · 回復試驗後断面

卷 末 D

浸水崩壊度試験状況写真



勇知層細粒砂岩 (D-1 コア) 成形岩石

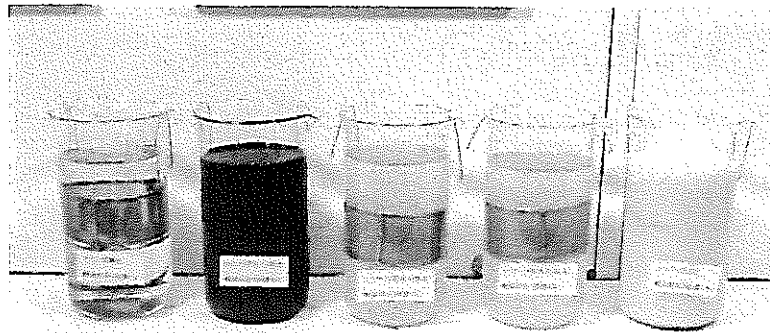


脱イオン水 KCL-リグネート泥水 シリケート泥水 A シリケート泥水 B DIF
作液後の各種流体

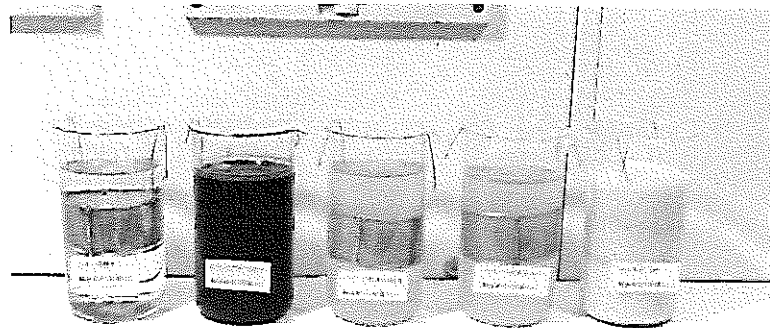


浸漬直後の状況

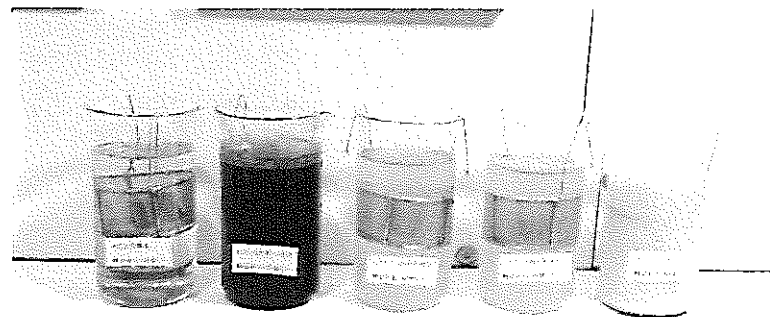
D-1 勇知層細粒砂岩 (D-1 コア) の浸水崩壊度試験状況写真 (各泥水の様子) ①



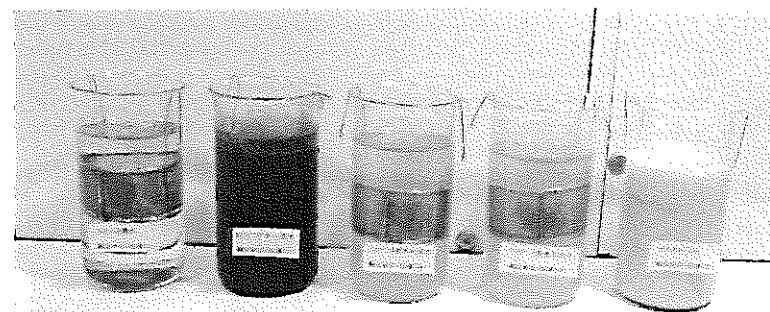
浸漬 1 日後の状況



浸漬 3 日後の状況



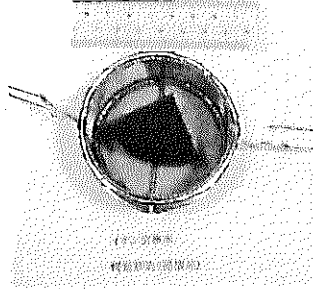
浸漬 5 日後の状況



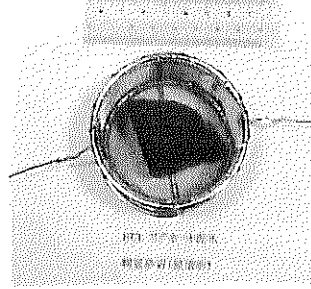
浸漬 7 日後の状況

D-2 勇知層細粒砂岩 (D-1 コア) の浸水崩壊度試験状況写真 (各泥水の様子) ②

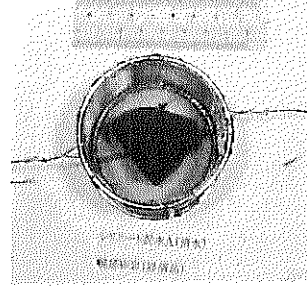
脱イオン水



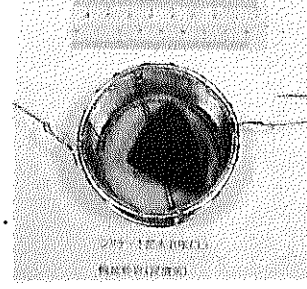
KCL-リグネート泥水



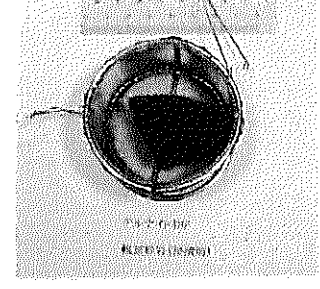
シリケート泥水A



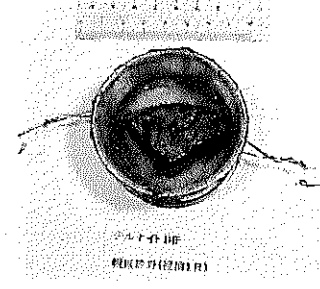
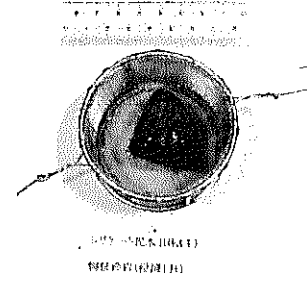
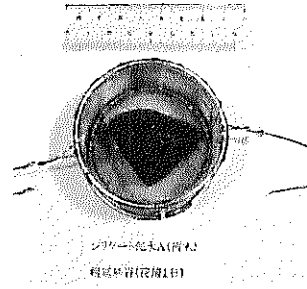
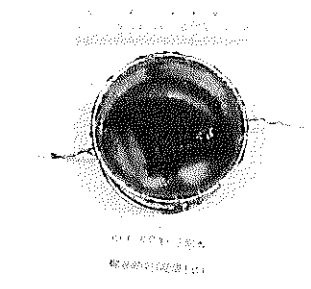
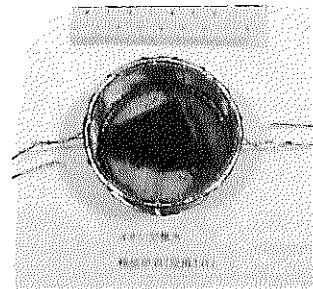
シリケート泥水B



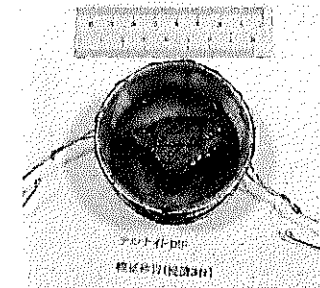
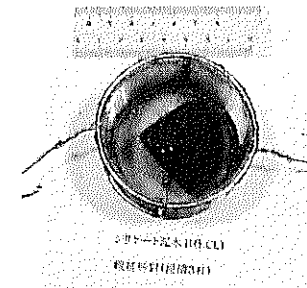
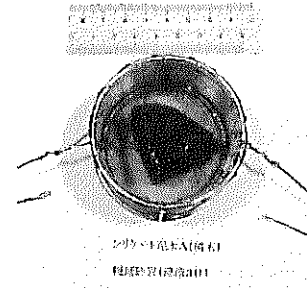
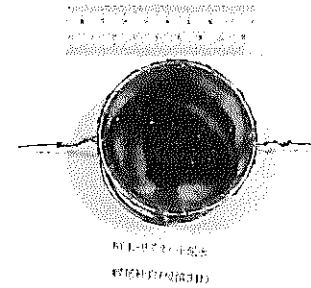
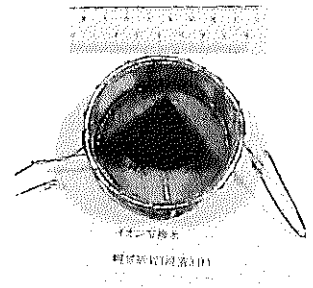
テルナイト DIF



浸漬前の勇知層細粒砂岩 (D-1 コア)



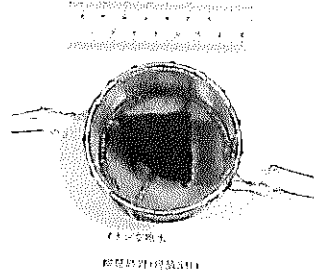
浸漬 1 日後の状況



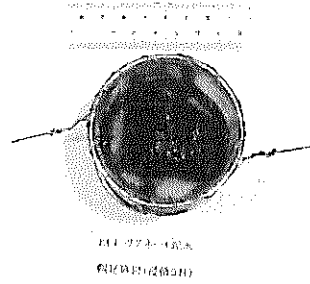
浸漬 3 日後の状況

D-3 勇知層細粒砂岩 (D-1 コア) の浸水崩壊度試験状況写真 (岩石の様子) ①

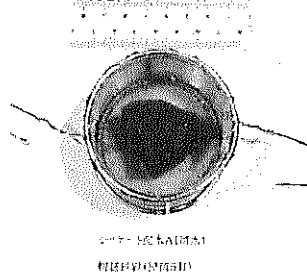
脱イオン水



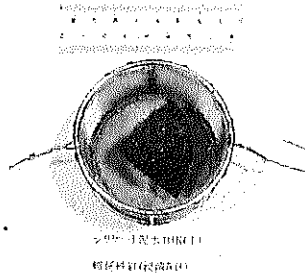
KCL-リグネート泥水



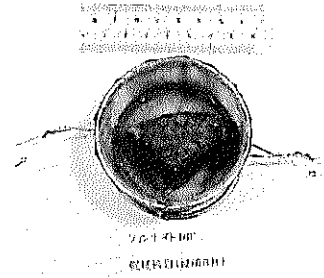
シリケート泥水A



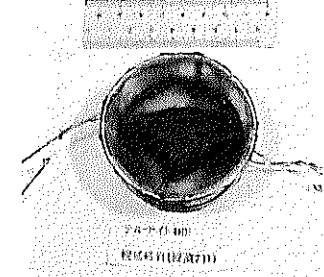
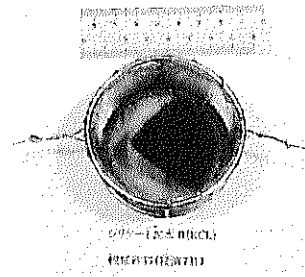
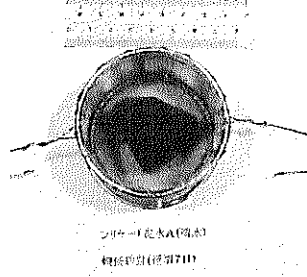
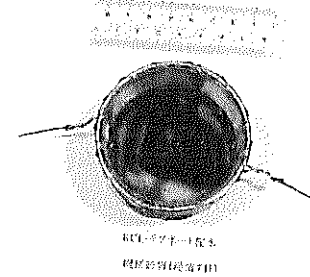
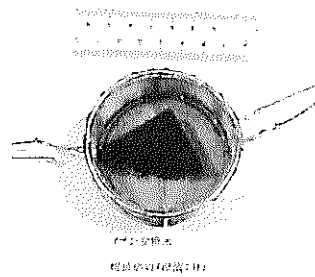
シリケート泥水B



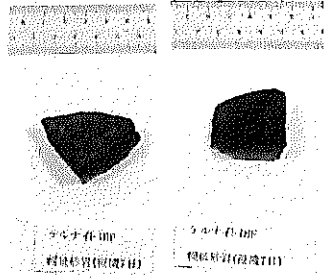
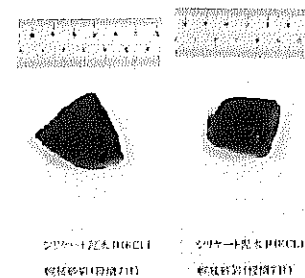
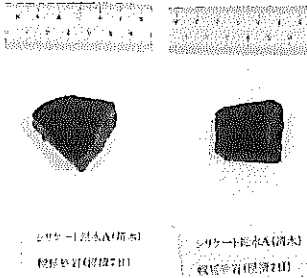
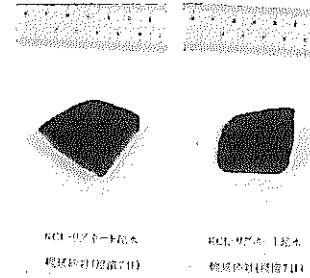
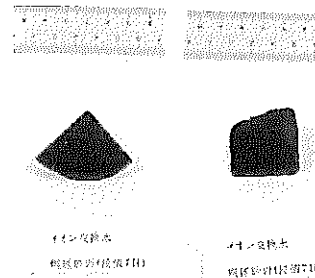
テルナイト DIF



浸漬5日後の状況

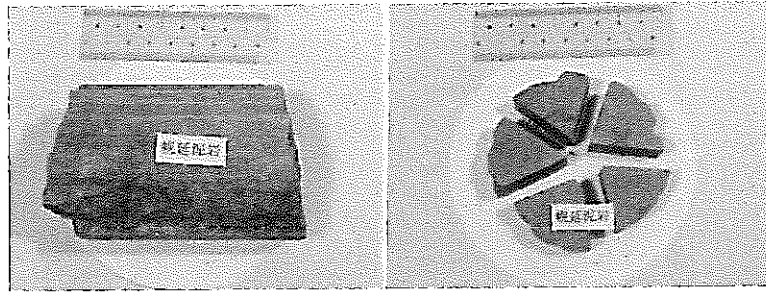


浸漬7日後の状況

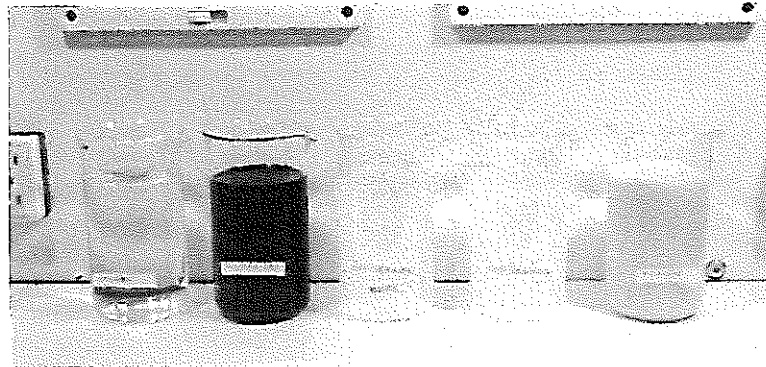


一軸圧縮 (500~600gf/cm² (約 50~60kPa)) 後の状況

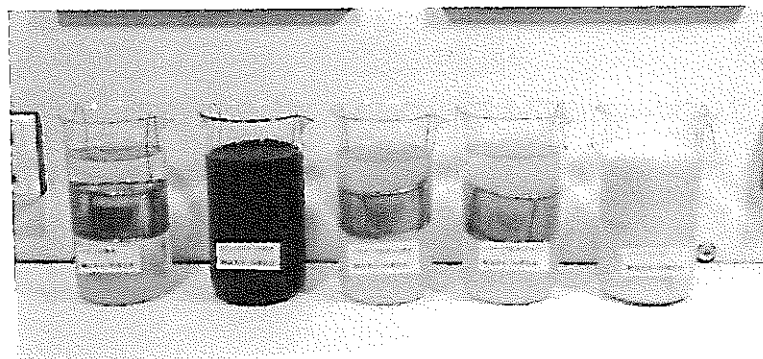
D-4 勇知層細粒砂岩 (D-1 コア) の浸水崩壊度試験状況写真 (岩石の様子) ②



声問層上部相泥岩 (D-1 コア) 成形岩石

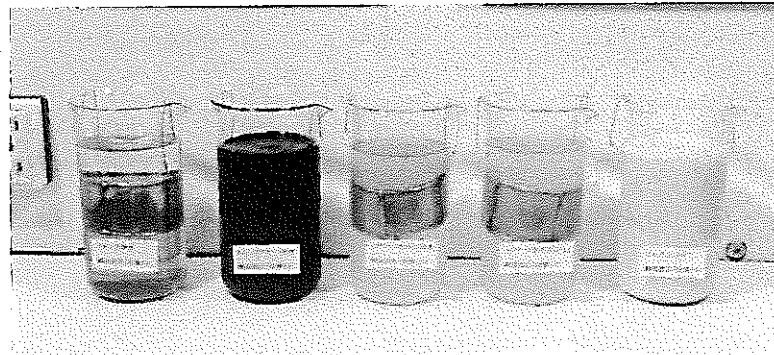


脱イオン水 KCL-リグネート泥水 シリケート泥水 A シリケート泥水 B DIF
作液後の各種流体

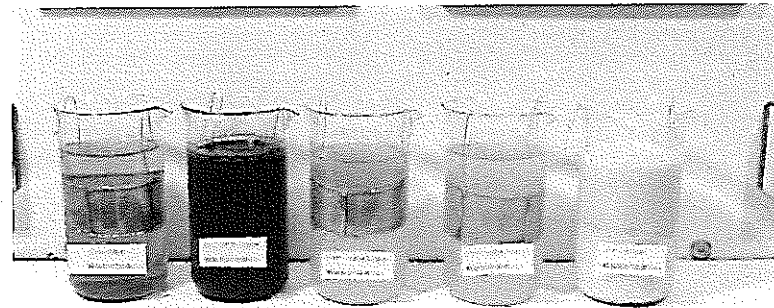


浸漬直後の状況

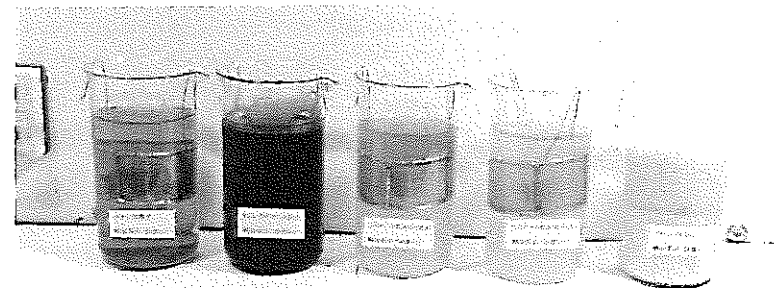
D-5 声問層上部相泥岩 (D-1 コア) の浸水崩壊度試験状況写真 (各泥水の様子) ①



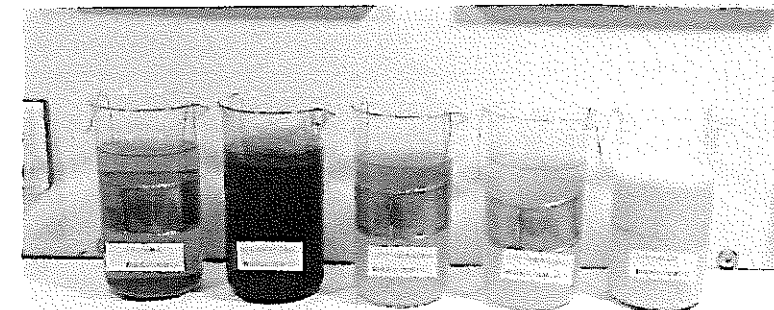
浸漬 1 日後の状況



浸漬 3 日後の状況



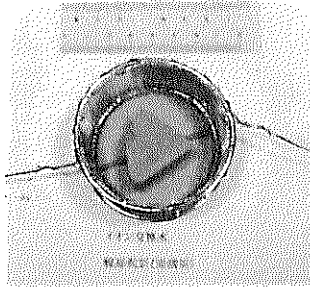
浸漬 5 日後の状況



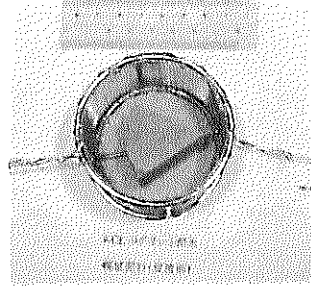
浸漬 7 日後の状況

D-6 声問層上部相泥岩 (D-1 コア) の浸水崩壊度試験状況写真 (各泥水の様子) ②

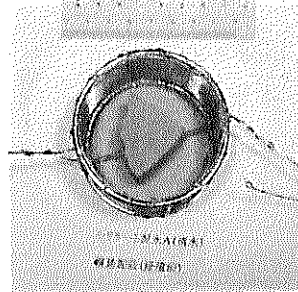
脱イオン水



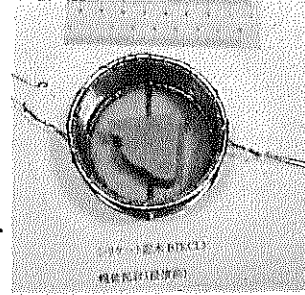
KCL-リグネート泥水



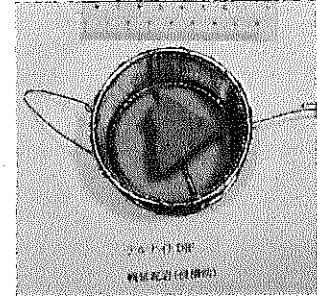
シリケート泥水A



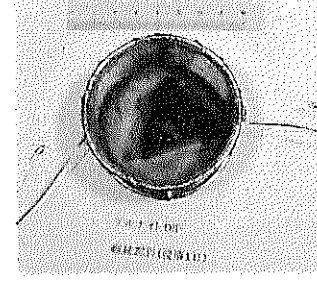
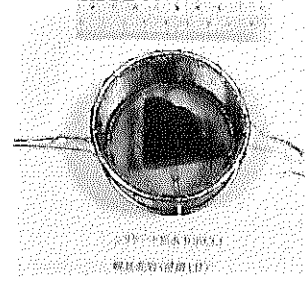
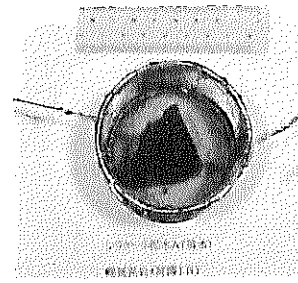
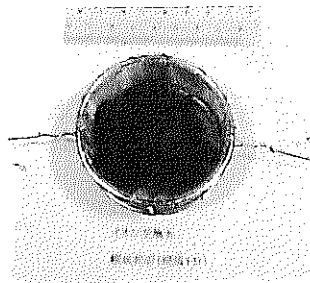
シリケート泥水B



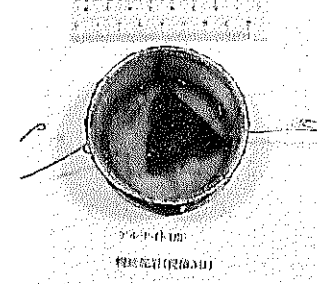
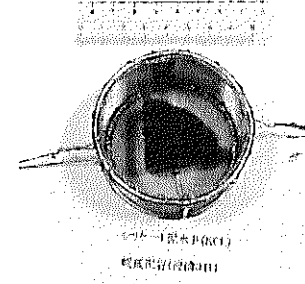
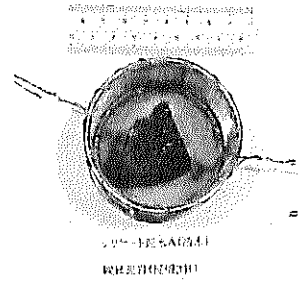
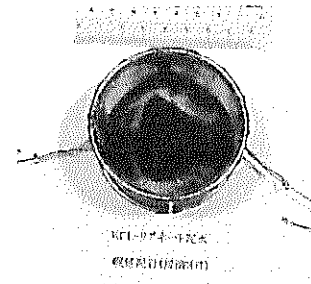
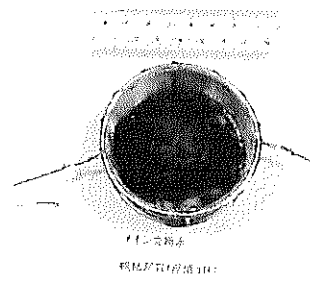
テルナイト DIF



浸漬前の声間層上部相泥岩 (D-1 コア)



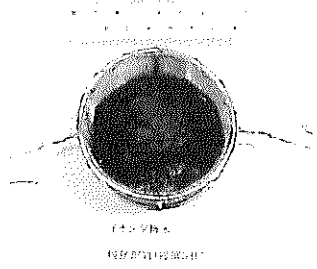
浸漬1日後の状況



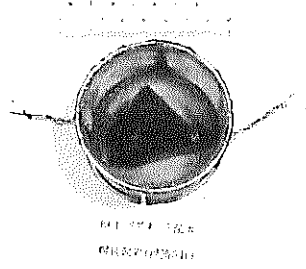
浸漬3日後の状況

D-7 声間層上部相泥岩 (D-1 コア) の浸水崩壊度試験状況写真 (岩石の様子) ①

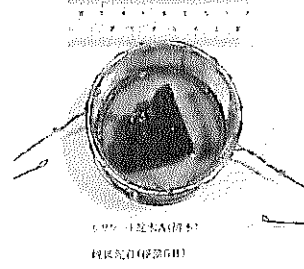
脱イオン水



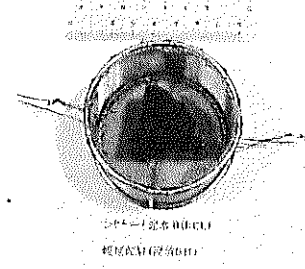
KCL-リグネート泥水



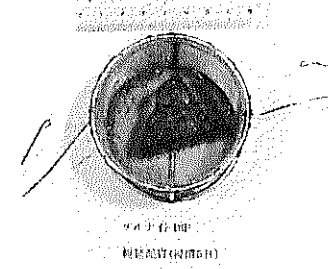
シリケート泥水A



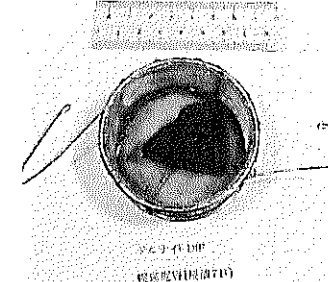
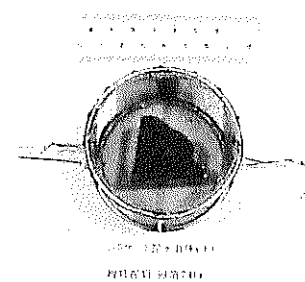
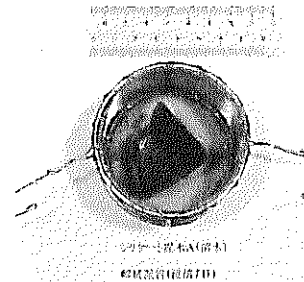
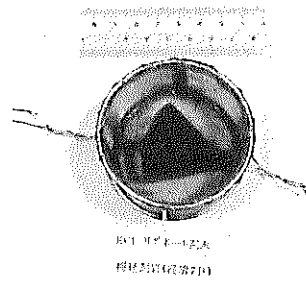
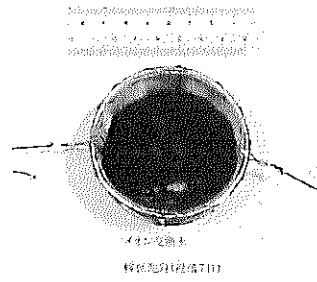
シリケート泥水B



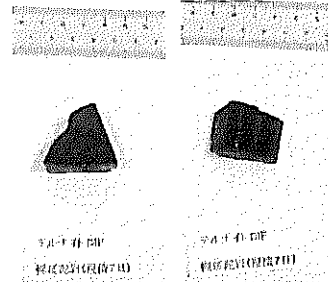
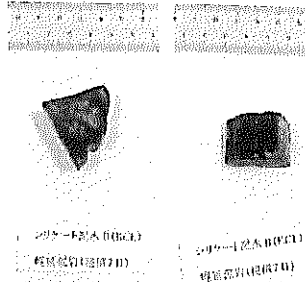
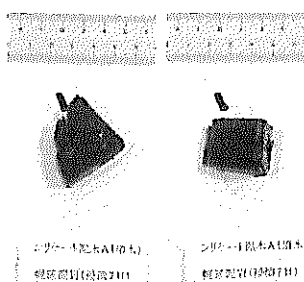
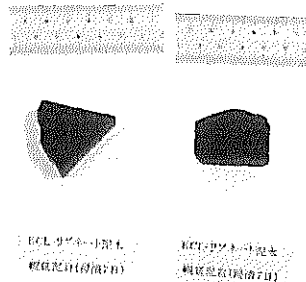
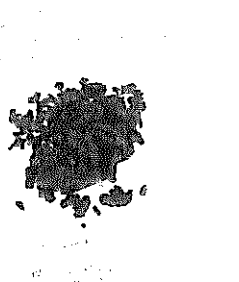
テルナイト DIF



浸漬5日後の状況

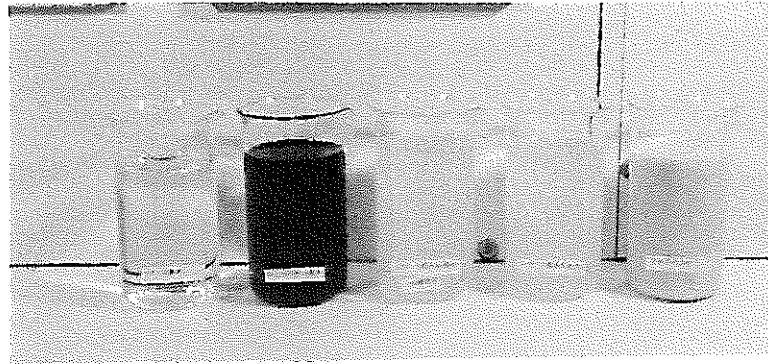


浸漬7日後の状況

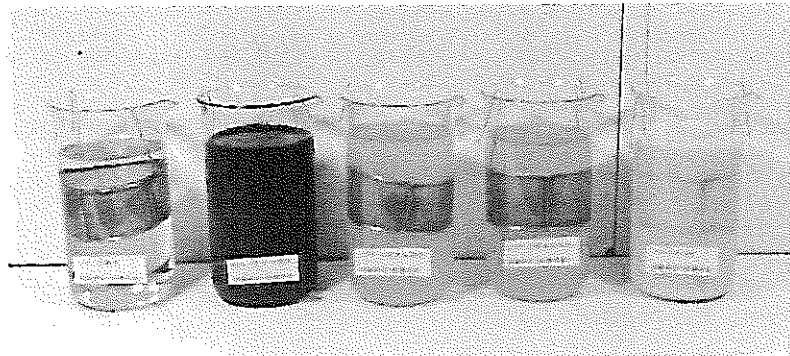


一軸圧縮 (500~600gf/cm² (約 50~60kPa)) 後の状況

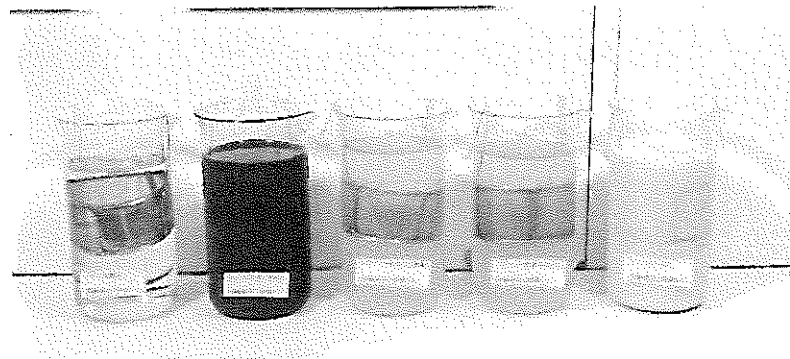
D-8 声間層上部相泥岩 (D-1 コア) の浸水崩壊度試験状況写真 (岩石の様子) ②



脱イオン水 KCL-リグネート泥水 シリケート泥水 A シリケート泥水 B DIF
作液後の各種流体

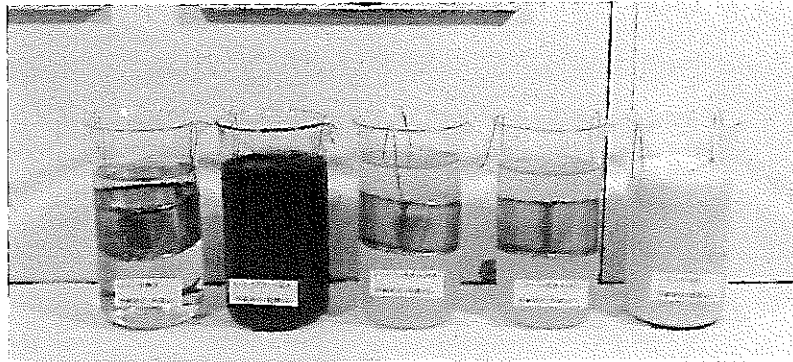


浸漬直後の状況

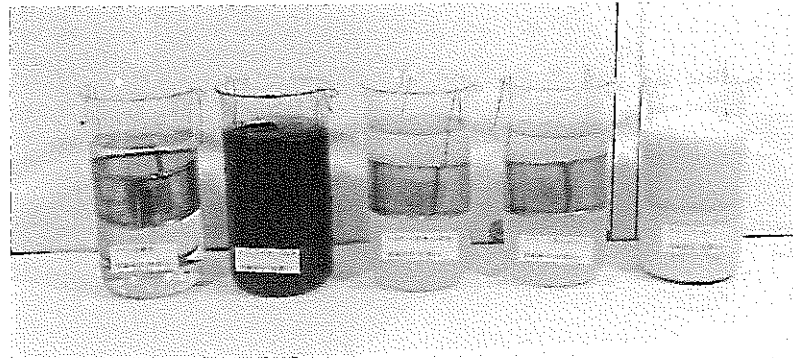


浸漬 1 日後の状況

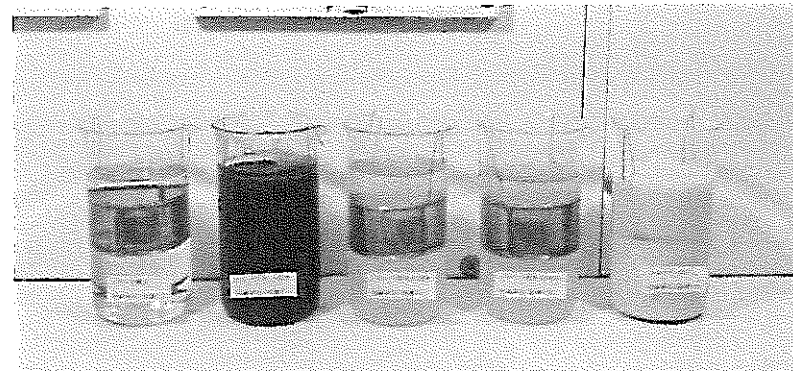
D-9 清澄層砂岩（房総）の浸水崩壊度試験状況写真（各泥水の様子）①



浸漬 3 日後の状況



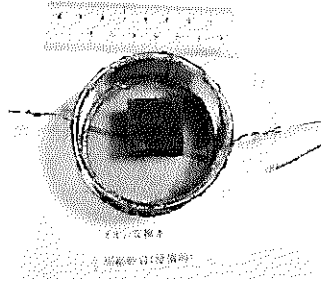
浸漬 5 日後の状況



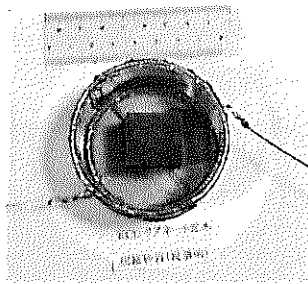
浸漬 7 日後の状況

D-10 清澄層砂岩（房総）に浸水崩壊度試験状況写真（各泥水の様子）②

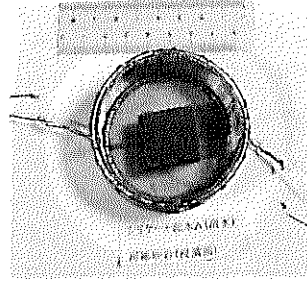
脱イオン水



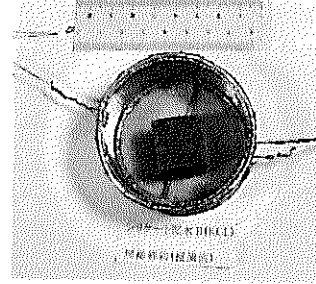
KCL-リグネート泥水



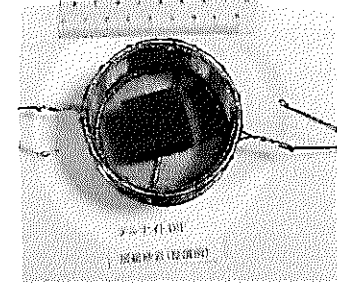
シリケート泥水 A



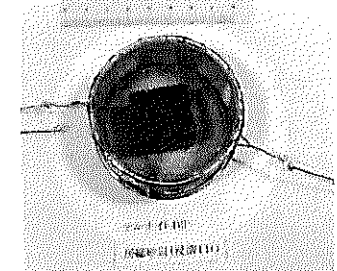
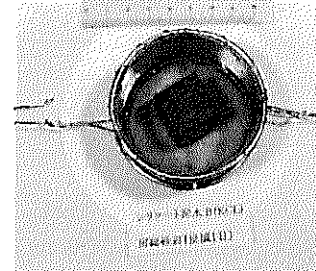
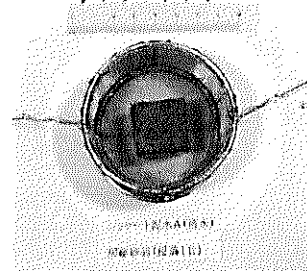
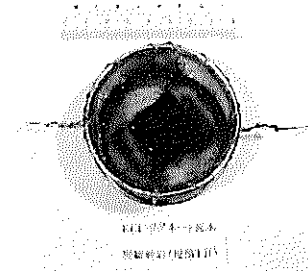
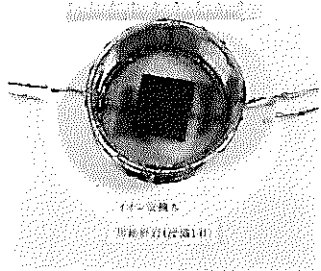
シリケート泥水 B



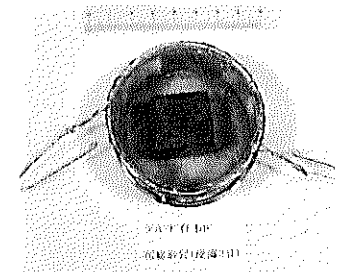
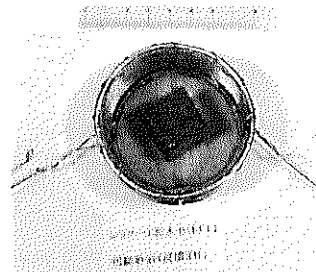
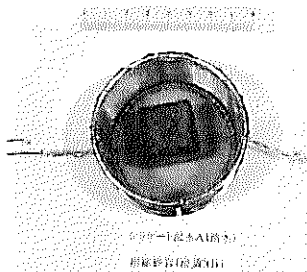
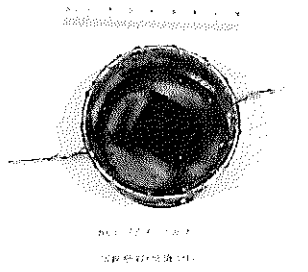
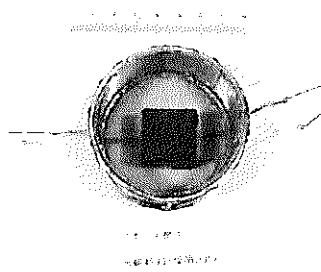
テルナイト DIF



浸漬前の清澄層砂岩 (房総)



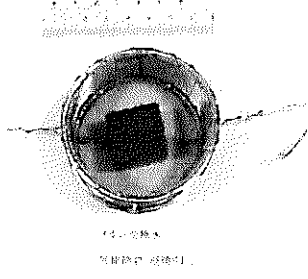
浸漬 1 日後の状況



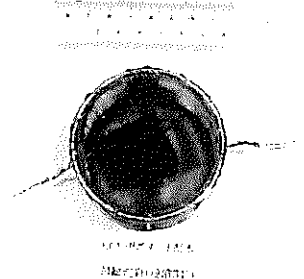
浸漬 3 日後の状況

D-11 清澄層砂岩 (房総) の浸水崩壊度試験状況写真 (岩石の様子) ①

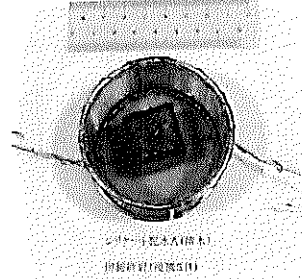
脱イオン水



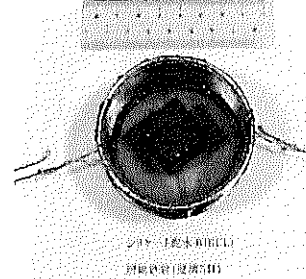
KCL-リグネート泥水



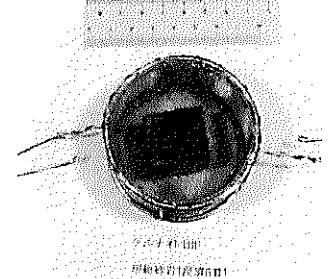
シリケート泥水 A



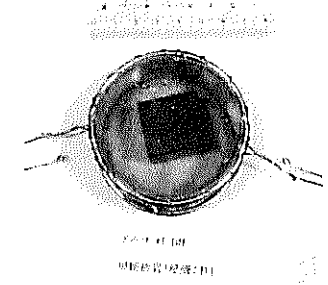
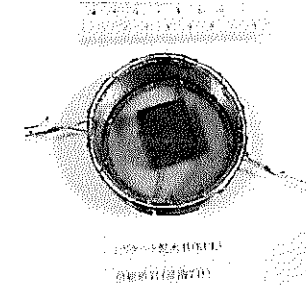
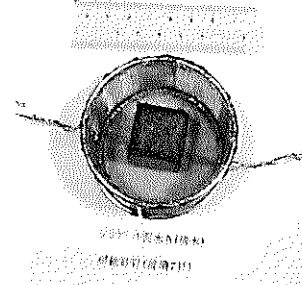
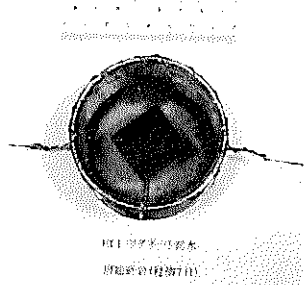
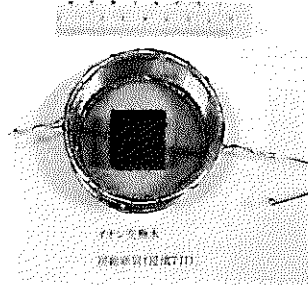
シリケート泥水 B



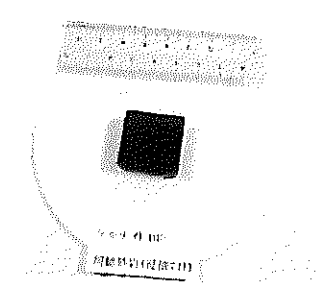
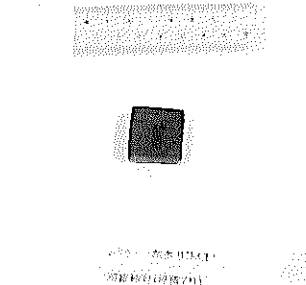
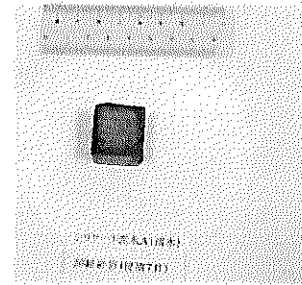
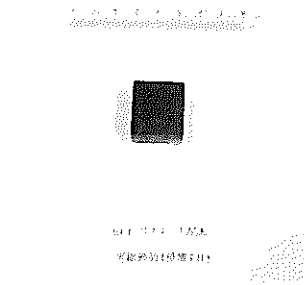
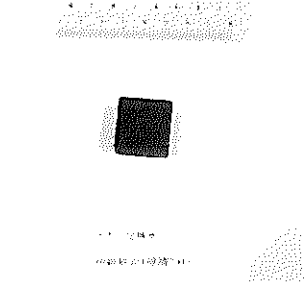
テルナイト DIF



浸漬 5 日後の状況

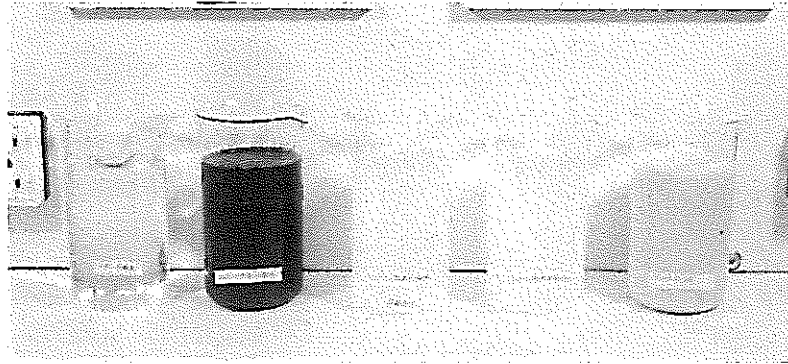


浸漬 7 日後の状況

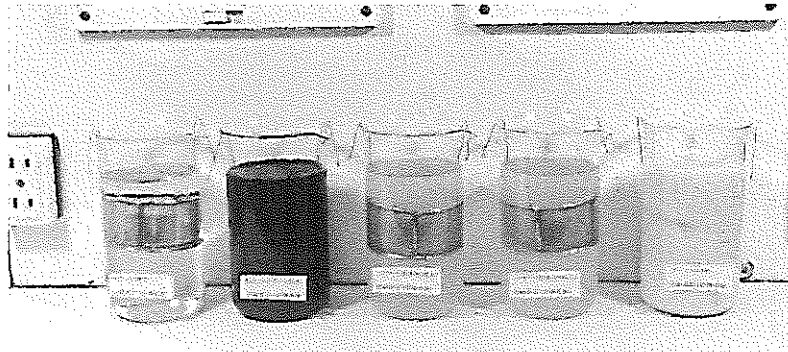


一軸圧縮 (500~600gf/cm² (約 50~60kPa)) 後の状況

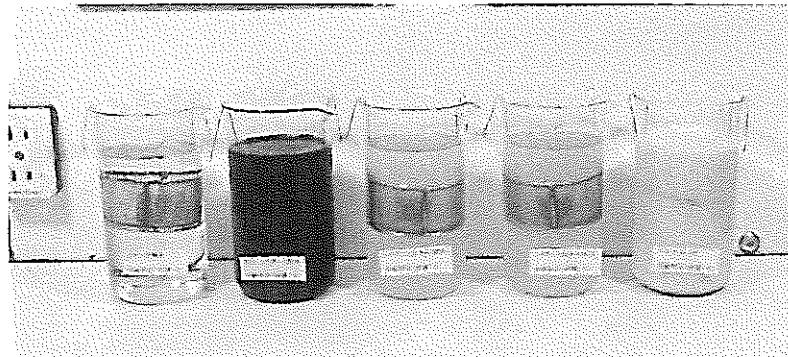
D-12 清澄層砂岩 (房総) の浸水崩壊度試験状況写真 (岩石の様子) ②



脱イオン水 KCL-リグネート泥水 シリケート泥水 A シリケート泥水 B DIF
作液後の各種流体

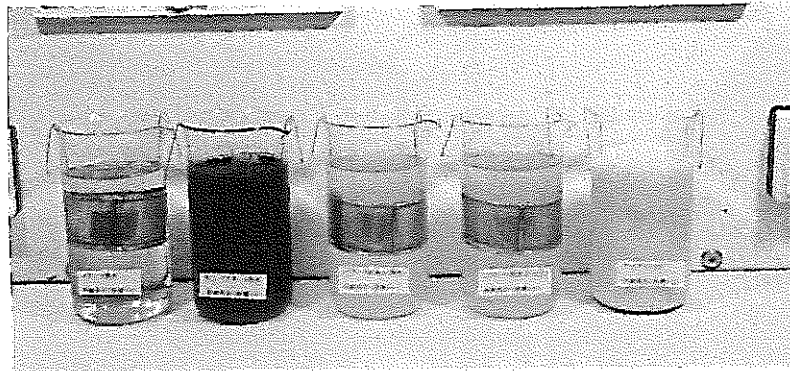


浸漬直後の状況



浸漬1日後の状況

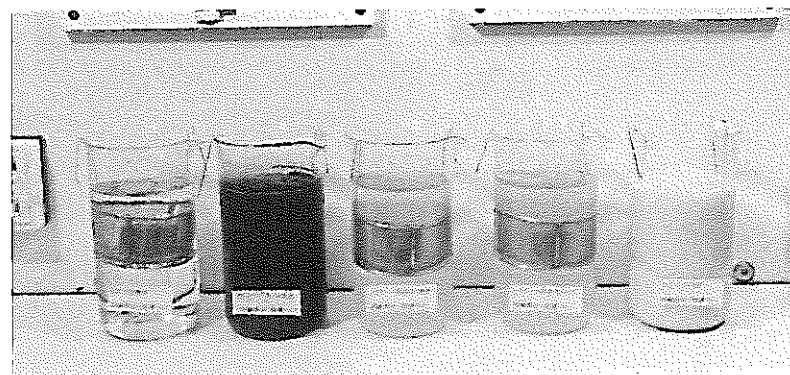
D-13 清澄層泥岩（房総）の浸水崩壊度試験状況写真（各泥水の様子）①



浸漬3日後の状況



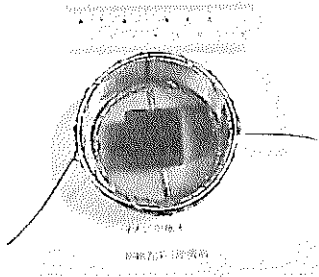
浸漬5日後の状況



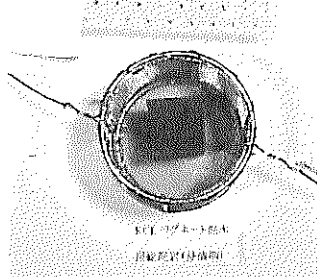
浸漬7日後の状況

D-14 清澄層泥岩（房総）の浸水崩壊度試験状況写真（各泥水の様子）②

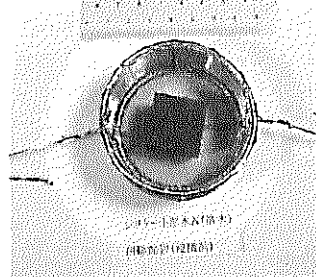
脱イオン水



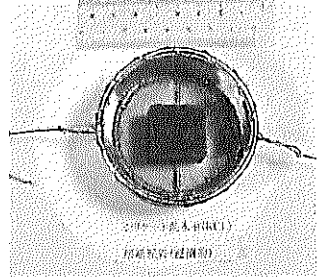
KCL-リグネート泥水



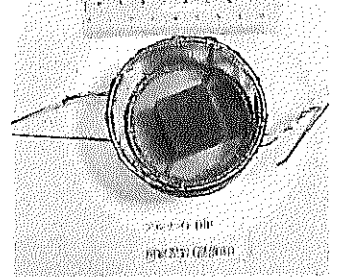
シリケート泥水 A



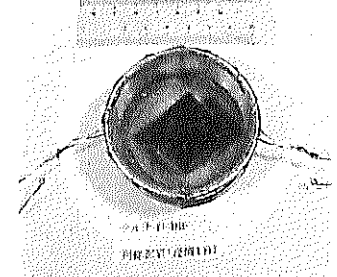
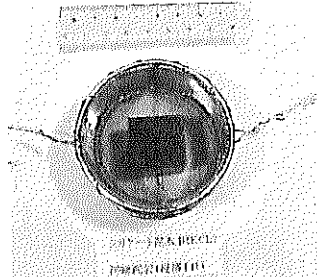
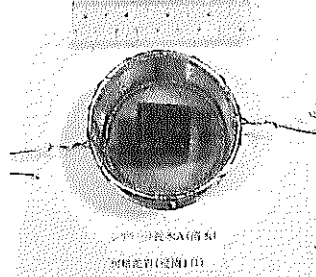
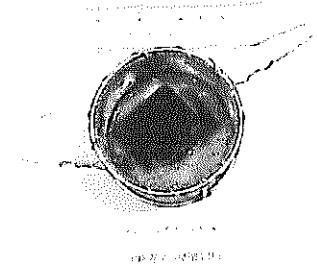
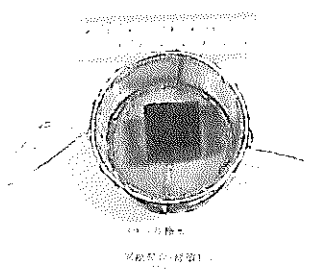
シリケート泥水 B



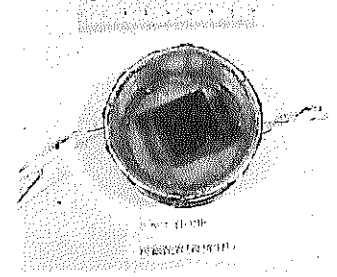
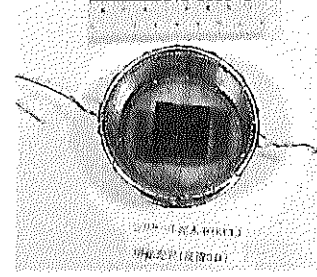
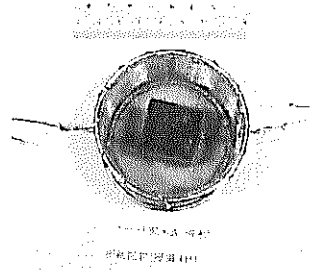
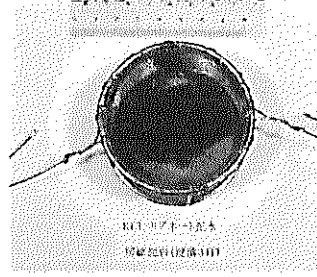
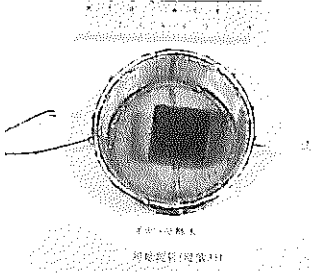
テルナイト DIF



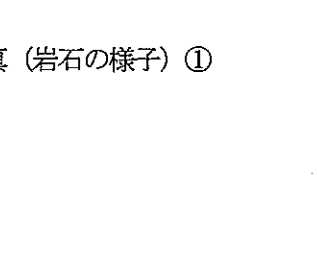
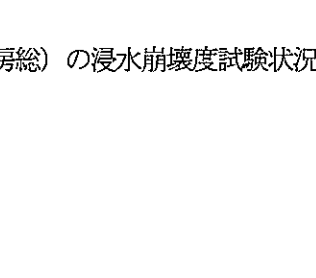
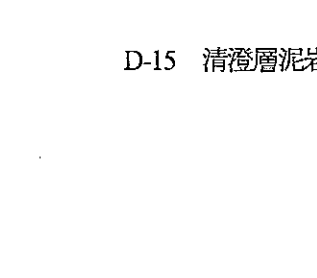
浸漬前の清澄層泥岩 (房総)



浸漬 1 日後の状況

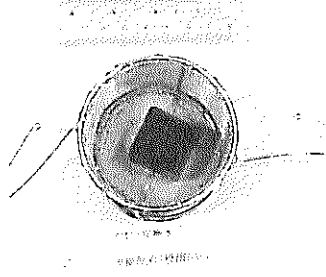


浸漬 3 日後の状況

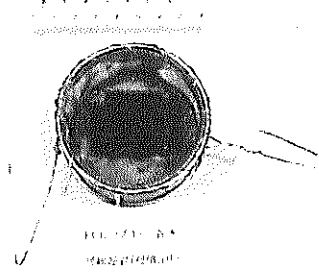


D-15 清澄層泥岩 (房総) の浸水崩壊度試験状況写真 (岩石の様子) ①

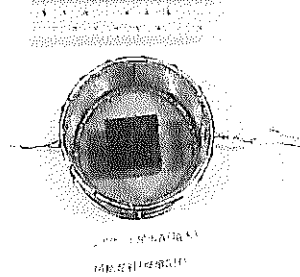
脱イオン水



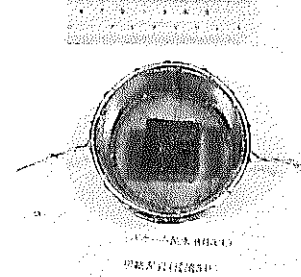
KCL-リグネート泥水



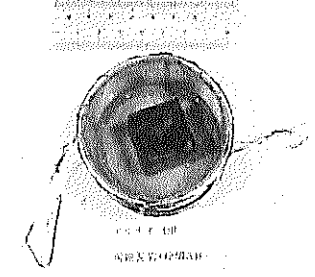
シリケート泥水 A



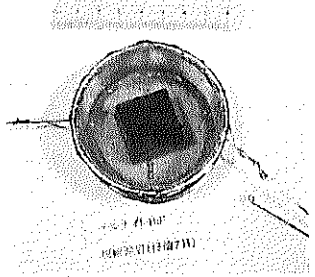
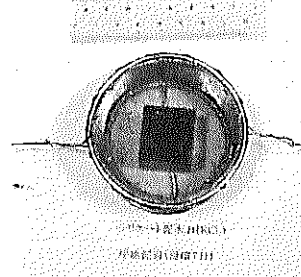
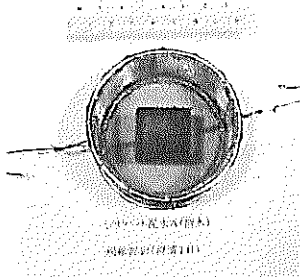
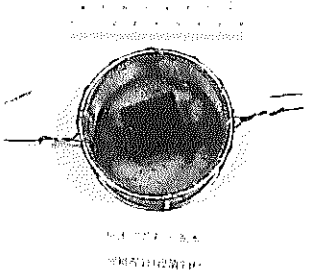
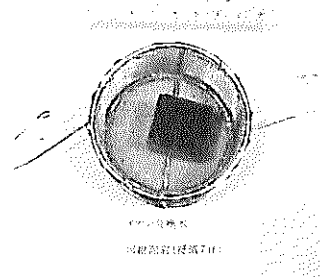
シリケート泥水 B



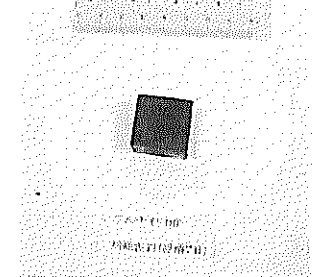
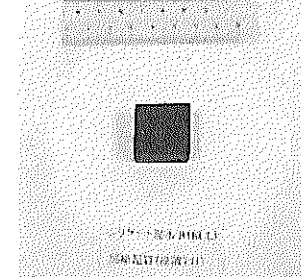
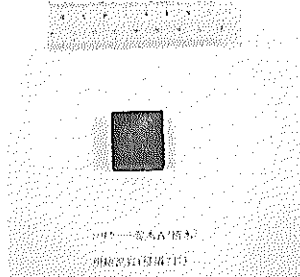
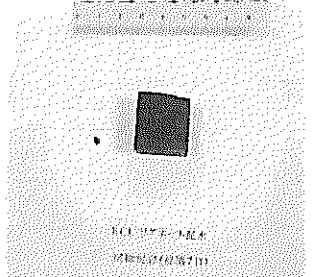
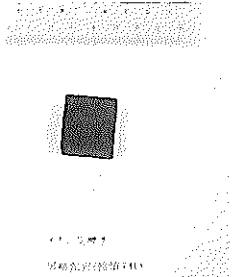
テルナイト DIF



浸漬5日後の状況



浸漬7日後の状況



一軸圧縮 (500~600gf/cm² (約 50~60kPa)) 後の状況

D-16 清澄層泥岩 (房総) の浸水崩壊度試験状況写真 (岩石の様子) ②