



JAEA-Technology

2006-054



JP0750129

幌延深地層研究計画
地上からの調査研究段階における
深層ボーリング調査計画とその実績

Horonobe URL Project

Experience on Borehole Investigations in Surface-based Investigation Phase

松井 裕哉

Hiroya MATSUI

地層処分研究開発部門
堆積岩地質環境研究グループ

Sedimentary Environment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JA
E
A
T
e
c
h
n
o
l
o
g
y

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

幌延深地層研究計画
地上からの調査研究段階における深層ボーリング調査計画とその実績

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット
松井 裕哉

(2006年10月25日 受理)

日本原子力研究開発機構（以降、原子力機構と称す）は、平成12年度より北海道天塩郡幌延町において新第三紀堆積岩を対象とした幌延深地層研究計画と称する地下施設建設を伴う研究プロジェクトを実施している。同プロジェクトは、岐阜県瑞浪市において結晶質岩を対象として実施中の瑞浪超深地層研究所計画と対をなすものであり、以下の3つの段階から構成された全体として約20年間のプロジェクトである。

- 1) 地上からの調査研究段階
- 2) 坑道掘削中の調査研究段階
- 3) 坑道を利用した調査研究段階

本報告は、平成17年度まで実施した地上からの調査研究段階における各種の調査研究のうち、特に重要となるボーリング調査計画およびその実績をとりまとめたものである。

具体的には、原子力機構の地上からの調査研究段階の目標、研究実施にあたっての制約条件、社会的条件およびを考慮し、年度毎に実施した検討作業および実績を時系列的に示し、その結果から様々な制約条件のもとで目標を達成するために重要と考えられる事項を抽出・整理している。

Horonobe URL Project
Experience on Borehole Investigations in Surface-based Investigation Phase

Hiroya MATSUI

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October, 25, 2006)

JAEA(Japan Atomic Energy Agency) has been conducting the project which is combined with construction of URL(Underground Research Laboratory) on Neogene sedimentary rock in Horonobe-cho, Hokkaido, JAPAN. This project conjugates with the MIU project on crystalline rock in Mizunami-shi, Gifu-prefecture, JAPAN, was started FY1999/2000. The total duration of the project is about twenty years. The project consists of the following three phases;

- 1) Surface-based investigation phase
- 2) Construction phase
- 3) Operation phase

This report summarizes the experience for deep borehole investigation in surface based investigation phase, which is the most important investigation in the phase. All the deep borehole investigations had been planed and carried out in taking account of not only technical consideration but also practical and social aspects.

Specifically, the report describes the important suggestions derived from the work of the deep borehole investigations.

Keywords: Neogene Sedimentary Rock, Surface-based Investigation, Deep Borehole Investigation, Horonobe URL Project

目次

1. はじめに.....	1
2. 幌延深地層研究計画における深層ボーリング調査計画の基本的考え方.....	2
3. 深層ボーリング調査計画とその実績.....	4
3.1 平成 13 年度計画.....	4
3.2 平成 13 年度実績.....	6
3.3 平成 14 年度計画.....	11
3.4 平成 14 年度実績.....	19
3.5 平成 15 年度計画.....	21
3.6 平成 15 年度実績.....	30
3.7 平成 16 年度計画.....	34
3.8 平成 16 年度実績.....	46
4. 幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における深層ボーリング調査計画の評価.....	49
4.1 地上からの調査研究段階における目標に対する評価.....	49
4.2 プロジェクトの進捗に対する評価.....	50
5. 取得したデータ量と地質環境の理解度に関する定量的な検討例.....	51
5.1 基本的な検討の流れ.....	51
5.2 検討結果の概要.....	51
5.3 データ量と地質環境の理解度について.....	56
6. おわりに.....	57
参考文献.....	57
付録 幌延地域の地質環境モデル構築において考慮すべき不確実性因子の検討(平成 15 年度実施).....	59

Contents

1. Introduction	1
2. Basic idea on deep borehole investigations phase in Horonobe HRL project	2
3. Plans and results of deep borehole investigations from FY.2001 to FY. 2005.....	4
3.1 Plan of the investigations in FY.2001/FY.2002	4
3.2 Result of the investigations in FY.2001/FY.2002	6
3.3 Plan of the investigations in FY.2002/FY.2003	11
3.4 Result of the investigations in FY.2002/FY.2003	19
3.5 Plan of the investigations in FY.2003/FY.2004	21
3.6 Result of the investigations in FY.2003/FY.2004	30
3.7 Plan of the investigations in FY.2004/FY.2005	34
3.8 Result of the investigations in FY.2004/FY.2005	46
4. Estimation on deep borehole investigations in surface-based investigation phase in Horonobe URL project	49
4.1 Estimation to the aims on surface-based investigation phase.....	49
4.2 Estimation for the contribution to progress with project	50
5. A examination for the relationship between data acquisition and understanding level of geological environment	51
5.1 Methodology.....	51
5.2 Summary of the results	51
5.3 Comments for relationship between data acquisition and understanding level of geological environment	56
6. Concluding remarks.....	57
Reference.....	57
Appendix: Extraction of the uncertainties to improve the confidence of the models for geological environment (carried out in FY.2003/FY.2004)	59

図目次

図 1.1 峴延深地層研究計画の地上からの調査研究段階におけるプロジェクトの推移.....	1
図 3.1.1 空中物理探査結果および選定した A, B1, B2, C 区域	4
図 3.1.2 平成 13 年度深層ボーリング調査地点 (HDB-1, HDB-2)	5
図 3.2.1 研究所設置地区およびその周辺で深層ボーリング調査が可能な地点 (平成 13 年度時点)	8
図 3.2.2 HDB-1, HDB-2 孔の深層ボーリング調査結果等から推定した両孔周辺の地質環境の概念.....	10
図 3.3.1 地質構造に関する調査結果の一例 (平成 13 年度までの結果)	12
図 3.3.2 岩盤の水理に関する調査結果の一例 (平成 13 年度までの結果)	13
図 3.3.3 地下水の地球化学に関する調査結果の一例 (平成 13 年度までの結果)	14
図 3.3.4 岩盤力学に関する調査結果の一例 (平成 13 年度までの結果)	15
図 3.3.5 基本的なボーリング孔配置の検討結果	16
図 3.3.6 平成 14 年度ボーリング調査候補地点	18
図 3.4.1 研究所用地位位置を考慮し更新した平成 15 年度以降の深層ボーリング調査位置図	20
図 3.5.1 地質構造に関する調査結果の一例 (平成 14 年度までの結果)	22
図 3.5.2 岩盤の水理に関する調査結果の一例 (平成 14 年度までの結果)	23
図 3.5.3 地下水の地球化学に関する調査結果の一例 (平成 14 年度までの結果)	24
図 3.5.4 岩盤力学に関する調査結果の一例 (平成 14 年度までの結果)	25
図 3.5.5 平成 15 年度の深層ボーリング調査位置案	27
図 3.5.6 平成 15 年度、平成 16 年度ボーリング調査候補地点	29
図 3.6.1 平成 15 年度深層ボーリング調査位置図	32
図 3.7.1 地質構造に関する調査結果の一例 (平成 15 年度までの結果)	36
図 3.7.2 岩盤の水理に関する調査結果の一例 (平成 15 年度までの結果)	37
図 3.7.3 地下水の地球化学に関する調査結果の一例 (平成 15 年度までの結果)	38
図 3.7.4 岩盤力学に関する調査結果の一例 (平成 15 年度までの結果)	39
図 3.7.5 地質構造概念モデルと水理地質および地下水水質分布との関係	40
図 3.7.6 地質構造概念モデルと力学特性および物質移行特性との関係	41
図 3.7.7 平成 16 年度深層ボーリング調査候補地点	43
図 3.8.1 平成 16 年度までの深層ボーリング調査実施位置 (実績)	47
図 5.1 解析対象領域	52
図 5.2 解析対象領域内における地上物理探査測線位置 (平成 14 年度地上電磁探査)	53
図 5.3 空中電磁探査、地上電磁探査および深層ボーリング調査時の比抵抗探査結果を統合して構築した三次元比抵抗分布モデル	54
図 5.4 三次元比抵抗分布モデルを用い構築した解析対象領域内の三次元総溶存成分の濃度分布	55
図 5.5 HDB-5 孔地点を対象に三次元比抵抗分布モデルより予測した岩盤の透水係数および地下水中の総溶存成分濃度分布と実測値の比較	56

表目次

表 3.2.1 深層ボーリング調査の実施可能性に関する調査結果	9
表 3.3.1 井戸式に基づく立坑のみを考えた簡易的な影響範囲の検討	16
表 3.3.2 図 3.3.5 に示した各ボーリング調査内容の検討結果	17

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と称す）は、平成12年度より北海道幌延町において、幌延深地層研究計画を開始した。本プロジェクトは、全体で約20年間のプロジェクトとして計画されており、以下に示す3つの段階から構成されている。

- ・ 地上からの調査研究段階（平成12年度～平成17年度）
- ・ 坑道掘削を伴う調査研究段階（平成17年度～）
- ・ 坑道を利用した調査研究段階

平成17年度までの第1段階におけるプロジェクトの推移を示したものを図1.1に示す。図に示すように、平成13年度の研究所設置地区選定から本格的な地上からの調査を開始した。平成17年度時点で、研究所用地の選定および研究所設置地区およびその周辺地区に計10孔のボーリング調査（HDB-2を除く）を行い、現在地下施設建設に伴う周辺地質環境への影響予測を実施中である。

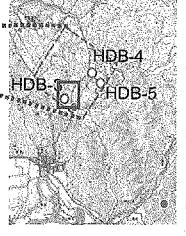
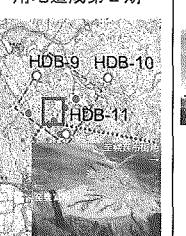
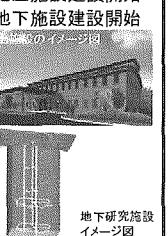
	2001(平成13)年度	2002(平成14)年度	2003(平成15)年度	2004(平成16)年度	2005(平成17)年度
対象領域	幌延町全域	幌延町全域	研究所設置地区 およびその周辺地区	研究所設置地区 およびその周辺地区	研究所設置地区 およびその周辺地区
調査目的	研究所設置地区的選定	研究所設置地区的選定 地質環境モデルの構築	地質環境モデルの構築	地質環境モデルの構築	地質環境モデルの構築
					 地上施設建設開始 地下施設建設開始 地下研究施設 イメージ図
調査項目	既存情報の調査 地表地質調査 物理探査(空中、地上) ボーリング調査 •HDB-1: 720 m •HDB-2: 720 m	地表地質調査 表層水理調査 物理探査(地上) ボーリング調査 •HDB-3: 520 m •HDB-4: 520 m •HDB-5: 520 m	地表地質調査 表層水理調査 物理探査(地上) ボーリング調査 •HDB-6: 620 m •HDB-7: 520 m •HDB-8: 470 m	地表地質調査 表層水理調査 物理探査(地上) ボーリング調査 •HDB-9: 520 m •HDB-10: 550 m •HDB-11: 800 m	地表地質調査 表層水理調査 ボーリング調査 •HDB-11: 800~1,020m

図1.1 幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階におけるプロジェクトの推移

本資料は、地上からの調査研究段階において最も重要な調査のひとつである深層ボーリング調査計画（平均掘削深度が500m以上）とその実績についてとりまとめたものである。

2. 幌延深地層研究計画における深層ボーリング調査計画の基本的考え方

深層ボーリング調査は、幌延深地層研究計画で実施する2つの研究分野（深地層の科学的研究、地層処分研究開発）のうち、主として深地層の科学的研究に位置づけられるものである。幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階の目標は、以下の2つである。

- ・ 地表からの地下深部にいたる地質環境の把握および地下施設建設に伴う周辺地質環境への影響予測
- ・ 調査技術開発と関連機器の開発

具体的には、前者の目標は、対象となる地質環境がどのようになっており、地下施設を掘削した場合、初期の地質環境にどのような変化が生じるのかを坑道掘削前に予測することである。第2次とりまとめに示されるように、実際の処分場は数km×数kmの平面規模が想定されており、そのような大規模地下施設の建設・操業・埋め戻しと安全評価を行う点が、従来の土木・資源関連で掘削された地下構造物と大きく異なる点である。これらの検討には、対象とする地質環境の三次元的な情報が必要である。しかし、地質環境は人工物ではないため、場所による程度の差はある様々な不均質性が存在し、無作為に深層ボーリング調査を含む多種多様の調査を行ったとしても、三次元的な地質環境を定量的に評価することは容易ではない。

これらの状況を踏まえ、限られた調査量によって地質環境のもつ特徴を正確に捉える技術の確立が、地層処分に関する研究開発では重要な課題のひとつとなっている。その課題に対するアプローチとして、人為的に乱されていない状態から調査を実施し、その調査結果に基づき地質環境の特徴を表現するモデルを構築し、地下施設建設のような非定常的なインパクトを加えた場合の変化の程度や範囲を予測し、実際に掘削された地下施設からの調査によって得られるデータで予測結果を検証するプロセスが有力と考えられ、国外の地層処分研究開発を進める機関でも採用されている。

後者の目標は、既往の調査技術によって研究対象となる新第三紀堆積岩や幌延に特有の条件（塩水系地下水、メタンガスの存在）下で品質を担保したデータを取得することが可能かの確認と、不可能な場合の装置の改良および代替手段の確保を含んでいる。これは、同様の地質環境の特徴を有する場所において、様々な特性を定量的に把握する上で必要不可欠なものである。

対象となる地質環境の把握および地下施設建設に伴う周辺地質環境への影響予測を行うためには、少なくとも現在の地質環境の諸特性を三次元的に表す場のモデルと、地下施設建設に伴って生じると考えられる諸現象を表現可能な数学モデル（構成則や支配方程式など）が必要である。

深層ボーリング調査自体は、場のモデルの構築に重きを置いて実施されるものであるため、深層ボーリング調査計画の検討においてもそれを念頭において実施してきた。また、既往の文献及び昭和63年度に幌延町開進地区にて実施したD-1孔（掘削深度1300m程度）における調査¹⁾などから、幌延町内の深度1300m程度までの範囲に分布する地層が第三紀～第四紀の堆積岩であり、地下水には塩分が含まれていること、メタンガスが存在することなどが想定されていた。これらの地質環境条件は、力学的には第2次とりまとめに示される堆積岩系（軟岩系岩盤）に相当するものと推定した。この既存情報と、本プロジェクトで計画した地下研究施設の最深深度(500m程度)を考慮し、深層ボーリング調査開始前に想定した、深度500m程度までの地質環境の特徴は、以下のようなものであった。

- ・ 堆積岩であるため、岩盤中の割れ目が透水性や力学特性に与える影響は結晶質岩に比べ相対的に小さく連續体に近い性質を持つ。また、堆積岩はその成因により水平方向に広範囲に同じ地層が分布している可能性が高い。
- ・ 上記の場合には、岩盤の透水性や力学特性などは基本的に地質構造（地層の三次元分布）に支配される。また、力学特性などは結晶質岩に比べ相当小さく、透水性は低いことが想定される。
- ・ 地下水は塩水でありかつメタンガスが存在する。

一方、幌延深地層研究計画の進め方として、まず幌延町内全域を調査し、主たる深層ボーリング調査の実施領域（以降、研究所設置地区と呼ぶ）を選定した後、各種調査結果を踏まえ地下施設建設地点（以降、研究所用地と呼ぶ）を選定することとなっていた。このため、各選定段階で選定根拠となるデータなどを取得する必要があった。

これらを踏まえ、かつ前述の想定の場において、深層ボーリング調査を含む限定された地上からの調査により効率的に地質環境を把握するひとつの方法として、以下のような調査研究の進め方を採用した。

- ・ 地上からの物理探査や深層ボーリング調査などから概略的かつ広範囲の三次元的な地質構造要素（例えば地層毎や断層などの大規模不連続構造など）を把握する。
- ・ 地質構造要素毎に室内試験・原位置試験を実施し、それらの地質環境の諸特性を把握するとともに、その特徴（地下水の流動形態・化学的性質、岩盤の力学的挙動など）を抽出する。
- ・ 抽出した特徴に基づき、現象を記述するために必要なモデルを検討する。

前 2 者は、主として場のモデルの構築を、最後の項目は定量的な予測のための数学モデルの選定を意図したものである。

以上の基本的な考え方に基づき実施した、プロジェクトの進め方を考慮した深層ボーリング調査計画の概要およびその実績・評価について以降に述べる。

3. 深層ボーリング調査計画とその実績

3.1 平成 13 年度計画

(a) ボーリング孔配置

深層ボーリング調査開始前に実施した既存の文献調査、空中物理探査（電磁、磁気、自然放射能探査）²⁾、地上物理探査（電磁）などから、研究対象となる新第三紀堆積岩層（声問層、稚内層、増幌層（上部））が深度 300m 以深で十分な厚さ（具体的には 150m 程度）で分布している可能性がある地域として、図 3.1.1 に示す A、B1、B2、C の 4 つの区域を選定した。

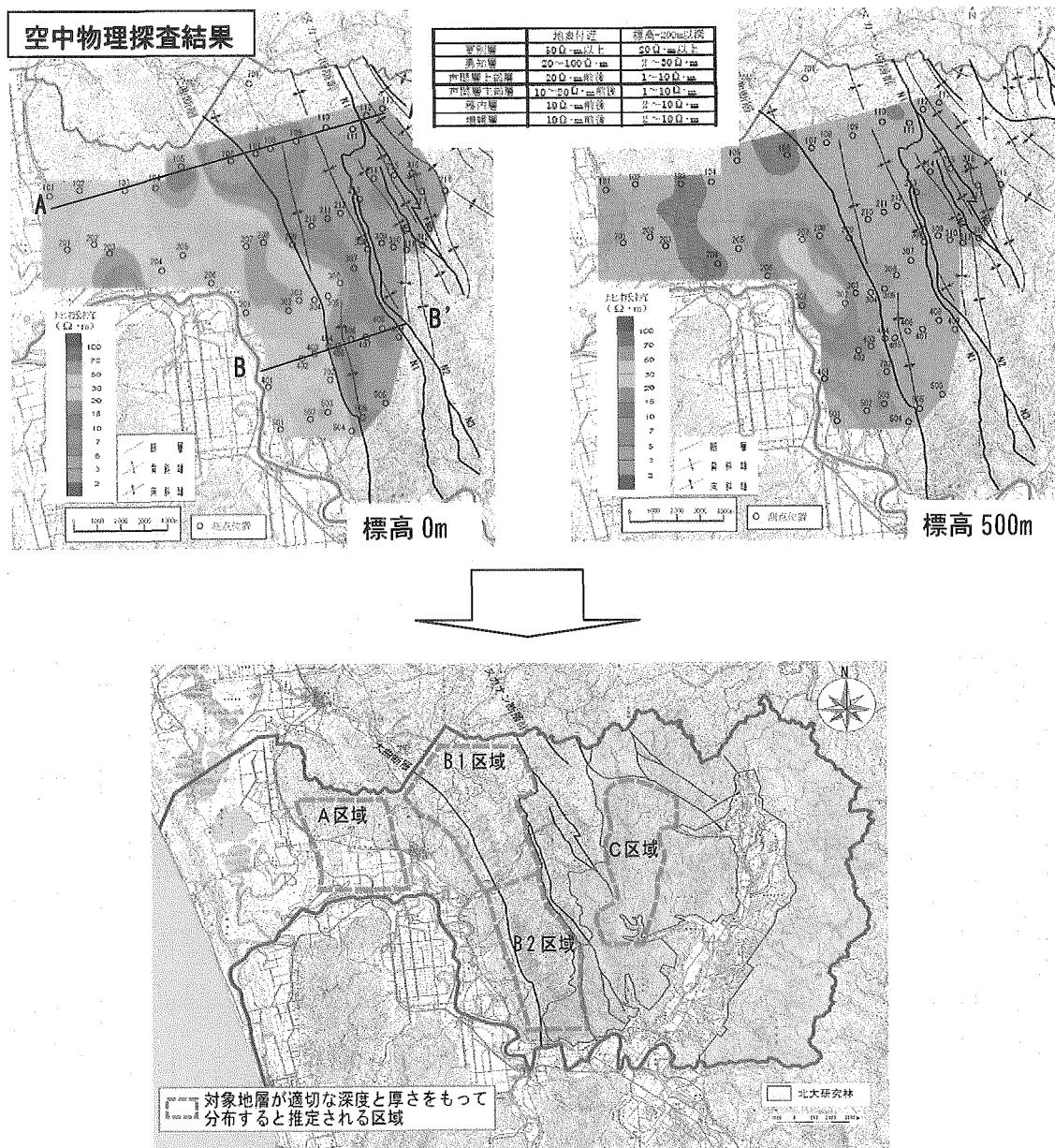


図 3.1.1 空中物理探査結果¹⁾および選定した A, B1, B2, C 区域

(国土地理院発行 5万分の 1 地形図「稚咲内」「天塩」「雄信内」「上猿払」「敏音知」を使用)

このうち、A 区域は既存の情報より大量のガス湧出記録があること、C 区域は社会的条件により各種調査の実施が困難であったことなどにより、2.で述べた方針に従い残る 2 区域に HDB-1, HDB-2(HDB: Horonobe Deep Borehole の略)と呼ぶボーリング孔を各 1 孔掘削し、調査を実施することとした。これらのボーリング調査は、幌延町内において研究所設置地区を選定するために、概略的な地質環境の把握を目的としていた。掘削深度は、当初地下施設の最深部を 500m と予定していたことに加え研究対象地層の厚さの確認も考慮し 720m (余掘り 20m を含む) とした。最終的な HDB-1 孔、HDB-2 孔の掘削地点は、アクセスの確保・許認可手続きや用地確保の容易さを考慮して決定した (図 3.1.2)。

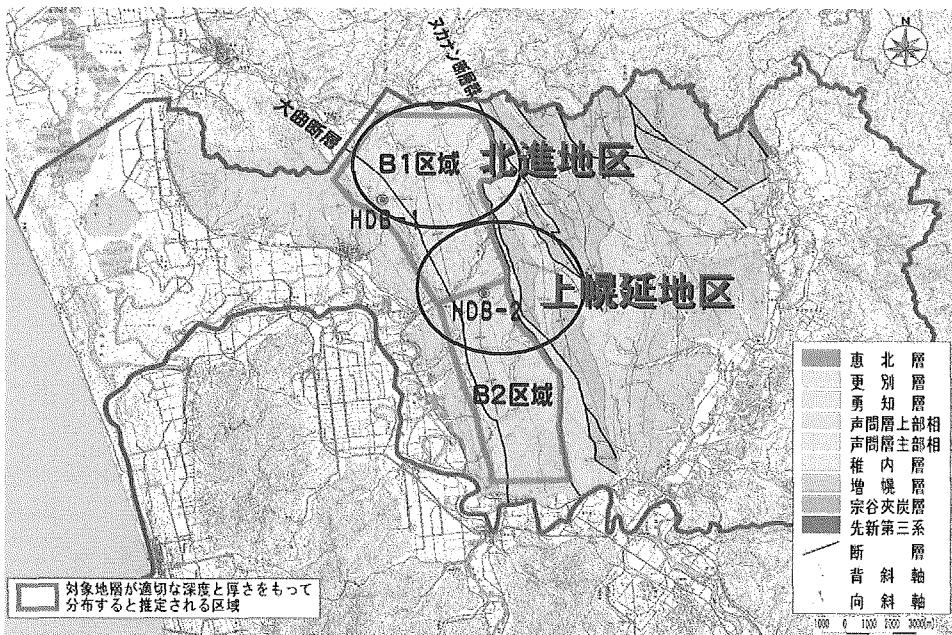


図 3.1.2 平成 13 年度深層ボーリング調査地点 (HDB-1, HDB-2)
(国土地理院発行 5 万分の 1 地形図「稚咲内」「天塩」「雄信内」「上猿払」「敏音知」を使用)

(b) ボーリング孔掘削仕様

HDB-1,2 孔は、幌延深層研究計画における最初のボーリング孔掘削であり、掘削対象の岩盤が新第三紀堆積岩であったことから、ボーリング孔掘削時の孔の自立性や掘削に泥水を使用することによる調査への影響（泥水が岩盤の水理特性や地下水の化学的特性に与える影響）が懸念されていた。最初のボーリング孔であったため、調査の影響を最小限にすることを重視し、可能な限り泥水を使わず清水で掘削することを試みることとした。

一方、孔壁の崩壊などに伴う調査などへの影響も懸念されたため、HDB-1,2 孔は不測の事態が生じた場合も所定の深度まで掘削して調査が可能なケーシングプログラムを採用した。また、掘削中のメタンガスの突出なども考慮し石油井掘削の仕様でボーリング孔を掘削し、マッドロギングにより掘削にかかる各種のパラメータの取得を行うこととした。なお、これらのボーリング孔は、調査終了後長期モニタリング孔としての使用を予定していたため、孔全体にケーシングを設置し孔を保持することとした。

(c) 調査仕様

当該年度のボーリング調査は、調査対象とする場の地質環境を概略把握するとともに、主として東濃における研究開発で適用されていた既往の各種調査手法の適用性を把握することが重要な目的であったことから、以下のような考え方で調査仕様と数量を決定した。

① 地質構造

物理検層は、東濃で実施している深層ボーリング調査と同様の数量と仕様で行う。すな

わち、全孔長にわたって各種検層を実施することとした。

地質観察も、東濃で実施している深層ボーリング調査と同様の仕様で実施する。すなわちオールコアリングで岩石サンプルを採取することとした。

②岩盤の水理、③地下水の地球化学

岩盤の水理および地下水の地球化学に関する調査は、原位置にて透水性の高い部分が認められた場合、そこで透水試験と採水を行うことを基本とした。これは、東濃では原位置の“水みち”的特定とそこで採水した地下水の分析が重要視されており、それを踏襲したことによる。

④岩盤力学

岩盤力学に関しては、掘削される地下施設の坑道径とそれを考慮したモデル化、堆積軟岩に一般に見られる拘束圧依存性（深度依存性）・境界条件の影響（排水/非排水状態）の把握、泥岩の場合に坑道掘削に影響を及ぼす膨張性やスレーキング特性の把握などを目的として、最小 50m ピッチで室内試験用のコアをサンプリングし、各種の試験を実施した。なお、試験点数が多いことを考慮し、50m ピッチの試験は、1 深度あたり最低 3 供試体で通常の物理物性試験、一軸圧縮・圧裂引張試験を行い、各種物性の局所的なバラツキを把握できるようにした。拘束圧依存性は境界条件の影響を把握するための三軸圧縮試験は 100m ピッチで実施した。

原位置試験は、東濃で実績のあった水圧破碎法による初期応力測定のみを行うこととし、測定点数は、応力値や方向の深度勾配を把握するに必要な最低数量（3箇所）とした。また、孔の崩壊などで原位置応力測定が不可能な場合も想定し、東濃鉱山の堆積岩を対象とした研究において、その適用性が概ね把握できていた AE 法による応力測定もあわせて実施した。

3.2 平成 13 年度実績

(a) ボーリング孔配置

計画通りの場所において実施した。

(b) ボーリング掘削

当初計画どおり、HDB-1,2 孔とも 720m まで掘削したが、清水による掘削は大きな孔径拡大を招き、結果として各種原位置試験が不可能になる可能性が高くなつたことから中途よりベントナイトを混合した泥水掘削に切り替えた。最初のボーリング孔掘削であったため、平均的な掘削速度は、24 時間作業で 9m/日程度であった。

(c) 調査

物理検層、地質観察、水理試験・採水/分析は、当初の仕様数量どおり実施した。しかし、水理試験時には、孔内圧の低下時に溶存ガスの遊離によると思われる影響が確認され、調査機器・手法の改良が必要であることが明らかになった。力学関係の試験は、室内試験は仕様どおり実施できたものの、原位置における水圧破碎法による応力測定は、各孔とも 2 点のみ実施した。これは、東濃で実績のあったワイヤーラインの水圧破碎システムが泥水中で適用可能な構造になつていなかつたことと、孔壁の凹凸などの問題から抑留の危険性が非常に大きかつたこと、両孔の深い所ではボアホールブレークアウトの発生が見られそのデータより応力値の評価が行えたことなどの理由による。

(d) 平成 13 年度の深層ボーリング調査の評価

ボーリング調査の結果³⁾、B1,B2 区域とも 500m 程度の深度に研究対象となる第三紀堆積岩層が十分な厚さを持っていること、メタンガスの測定結果や室内力学試験結果などから地下施設を安全に建設できることなどを確認し、所期の目的を概ね達成することができた。これらの調査結果を踏まえ、最終的には B1,B2 地区内において社会的用件（アクセス、許認可手続き・用地確保の容易さ）についても検討し、それらの結果を総合的に判断して B1 地区内の北進地区に研究所設置地区を設定することとした⁴⁾。

(e) 平成 14 年度以降の深層ボーリング調査計画

本調査終了後、HDB-1,2 孔の調査実績（深層ボーリング調査に要する用地面積など）に

基づき、設定した研究所設置地区およびその周辺地区において、許認可手続きや用地確保の面から単年度での深層ボーリング調査が可能な地点を調査した。その結果を表 3.2.1、図 3.2.1 に示す。後述する平成 14 年度以降の深層ボーリング調査計画はすべてこの調査結果を基礎に策定した。



図3.2.1 研究所設置地区およびその周辺で深層ボーリング調査が可能な地点(H13年度時点)
(国土地理院発行5万分の1地形図「雄信内」「天塩」「上猿払」「敏音知」を使用)

表3.2.1 深層ボーリング調査の実施可能性に関する調査結果

番号 地名No.	所有者	地名	地区	基盤出露	備考	既往内○ 既往外△			既往内○ 既往外△	既往内○ 既往外△
						既往内○ 既往外△	既往内○ 既往外△	既往内○ 既往外△		
1 国人 北浦	原野	原野	中津原	既往露 既往点付近		○	○	○	5	4
2 国人 北浦	原野	原野	中津原	既往露 既往点付近		○	○	○	5	5
3 借地権者 北浦	山林	林地	中津原	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	3	3
4 国人 北浦	山林	林地	中津原	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
5 借地権者 北浦	原野	原野	河内原	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	1	1
6 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	1	1
7 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	1	1
8 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	1	1
9 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	1	1
10 国人 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
11 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
12 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
13 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
14 国人 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
15 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
16 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
17 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
18 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
19 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
20 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
21 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
22 国人 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
23 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
24 国人 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
25 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
26 国人 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
27 借地権者 北浦	原野	原野	原野	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
28 借地権者 北浦	普通林	普通林	普通林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
29 借地権者 北浦	山林	山林	山林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
30 借地権者 北浦	山林	山林	山林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
31 借地権者 北浦	山林	山林	山林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
32 借地権者 北浦	山林	山林	山林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
33 借地権者 北浦	山林	山林	山林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
34 借地権者 北浦	山林	山林	山林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
35 借地権者 北浦	山林	山林	山林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2
36 借地権者 北浦	山林	山林	山林	既往露 既往点付近	既往露 既往点付近	○	○	○	2	2

平成 14 年度以降の深層ボーリング調査により、選定した研究所設置地区およびその周辺地区の地質環境を明らかにするためには、同地区内に位置する HDB-1 孔の調査結果に基づき地質環境の特徴を把握することが重要と考えた。このため、深層ボーリング調査結果を含む平成 13 年度までの調査で得られたデータなどに基づき、図 3.2.2 に示すような HDB-1,2 孔周辺の地質環境の概念モデルを構築した。

空中物理探査および地上物理探査の結果は、既存の地質構造と整合的であること（勇知層は高比抵抗帯、声問層・稚内層は低比抵抗帯として現れていることなど）から、HDB-1,2 孔周辺の地質環境に共通する特徴として、既存の地質図（地表、断面図）の信頼性は比較的高いと判断し、それに基づく検討を行った。その結果、両ボーリング孔周辺は声問層、稚内層などが中心となっており、大曲断層の走向方向に平行な方向への地質構造の変化は、それに直交する方向の変化に比べ小さいと想定した。

一方、両ボーリング孔周辺における違いの一つは、割れ目数の違いとガスの分布であった。HDB-2 孔周辺は、HDB-1 孔周辺と比べ稚内層中の割れ目数が多く、またガスの湧出についてはある深度で急激に発生する傾向を示した。これらの違いの要因としては、両ボーリング孔の位置が断層の上盤側と下盤側に位置していたため、断層形成時の地層への影響度合いが異なっていることが考えられた。

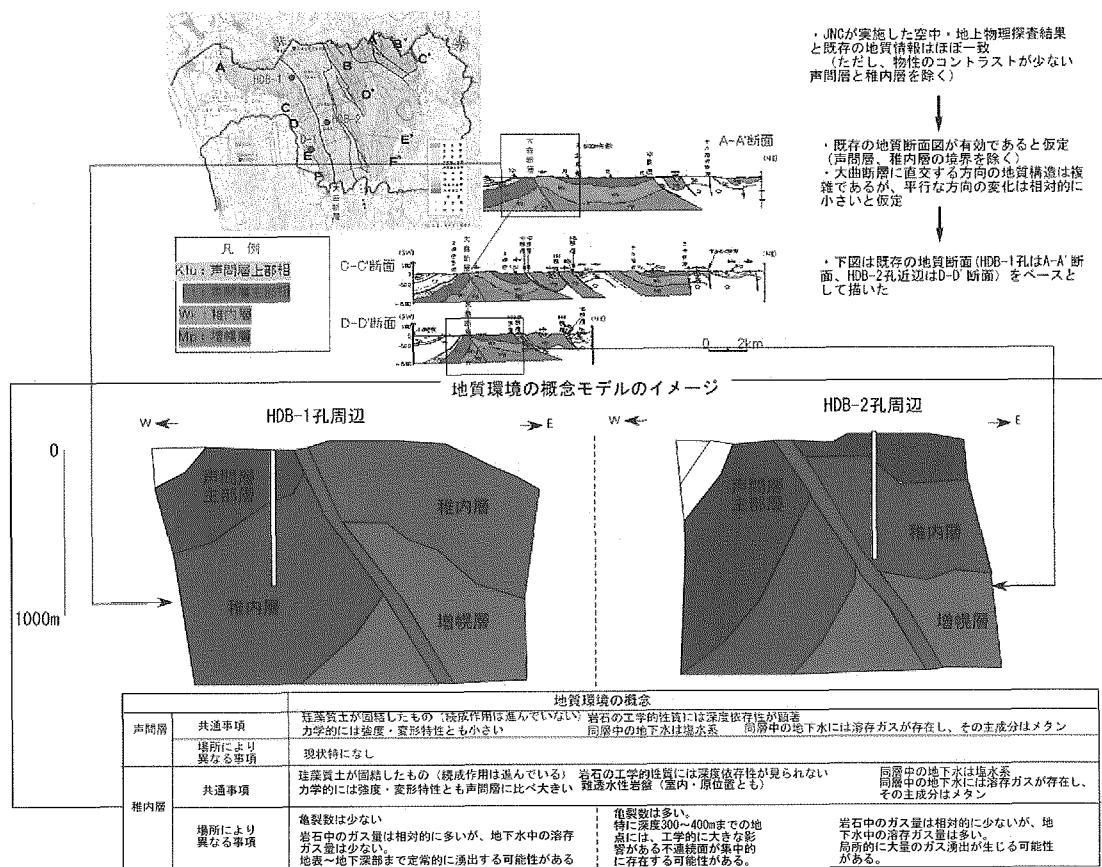


図 3.2.2 HDB-1, HDB-2 孔の深層ボーリング調査結果等から推定した両孔周辺の地質環境の概念

3.3 平成 14 年度計画

(a) ポーリング孔配置

図 3.3.1～図 3.3.4 に、平成 13 年度に実施した HDB-1,2 孔の調査で得られた地質構造、岩盤の水理、地下水の地球化学および岩盤力学の各分野でのデータをとりまとめた結果を示す。選定した研究所設置地区における地質構造の特徴は、深度 500m 程度の範囲まで勇知層、声問層および稚内層といった新第三紀堆積岩が分布し、領域内のほぼ中央部付近に大曲断層の存在が推定されること、断層直交方向には褶曲による変形が見られることなどがあげられた。声問層・稚内層の岩盤は、工学的には軟岩に分類できる程度の強度であると推定された。研究所設置地区内に位置する HDB-1 孔の原位置透水試験結果を用い、地下施設掘削に伴う地下水流动への影響範囲を簡易な方法で推定した結果を表 3.3.1 に示す。水位低下量が 500m とした場合でさえ、影響半径は地下施設を中心として数 100m 程度との結果であった。

一方、断層はその直交方向に遮水性の構造を、断層に沿った方向には断層形成時に生じた割れ目帯に沿った高透水性の構造を有するものとして取り扱われることが多い。また、東濃および釜石などで見られたように、このような遮水性断層の両側で地質環境が異なる可能性があるため、研究所用地の選定の上では断層両側の地質環境を把握する必要がある。また、研究上の要件すなわち第三紀堆積岩層が所定深度（500m 程度までの範囲）で分布していることも断層の両側で確認する必要がある。一方、本プロジェクトの地下施設は研究のために建設されるものであるが、建設のための安全要件（力学的な安定性が保たれかつ大規模な湧水やメタンガス突出が生じる可能性が低い）も満たされている必要がある。

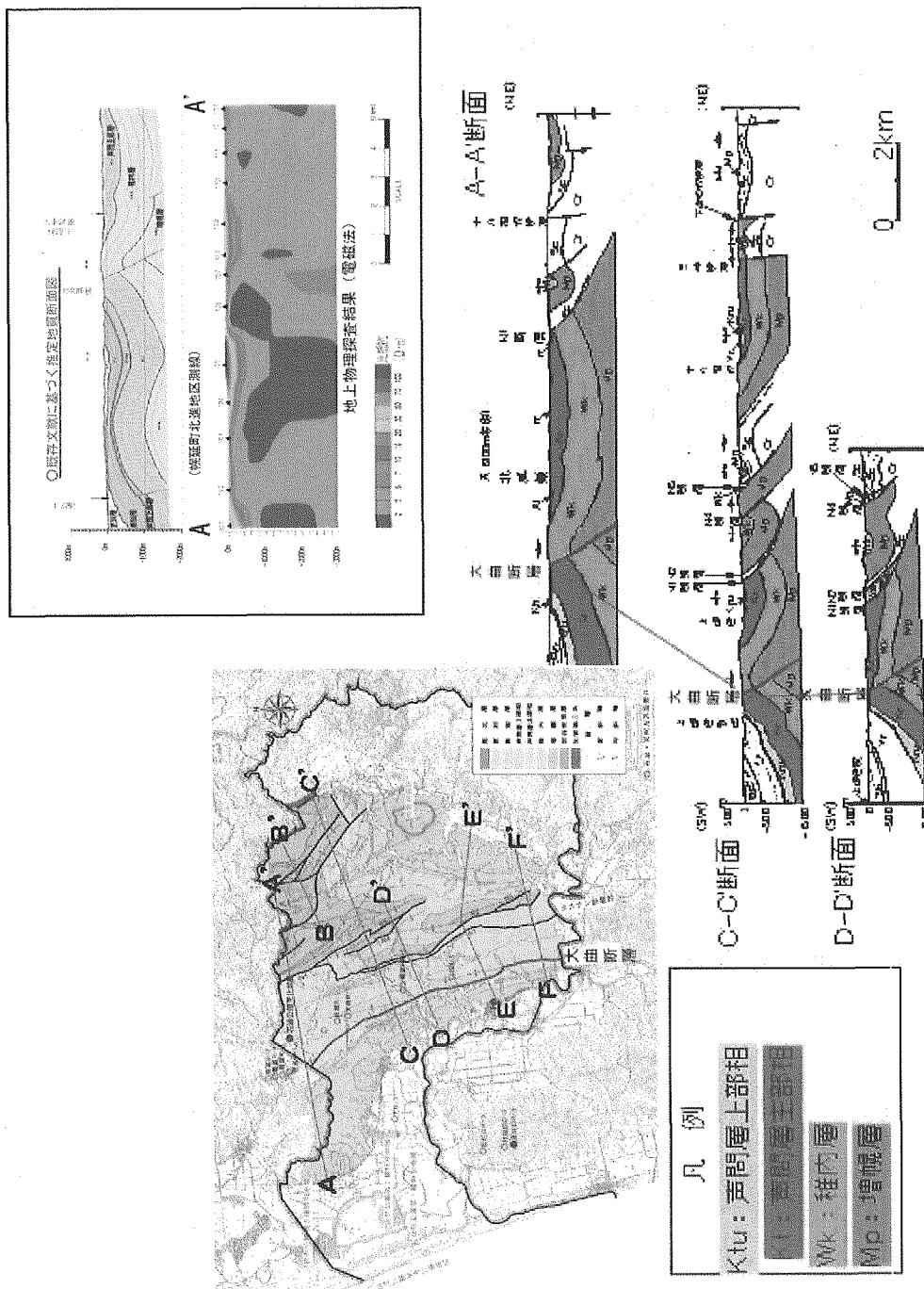
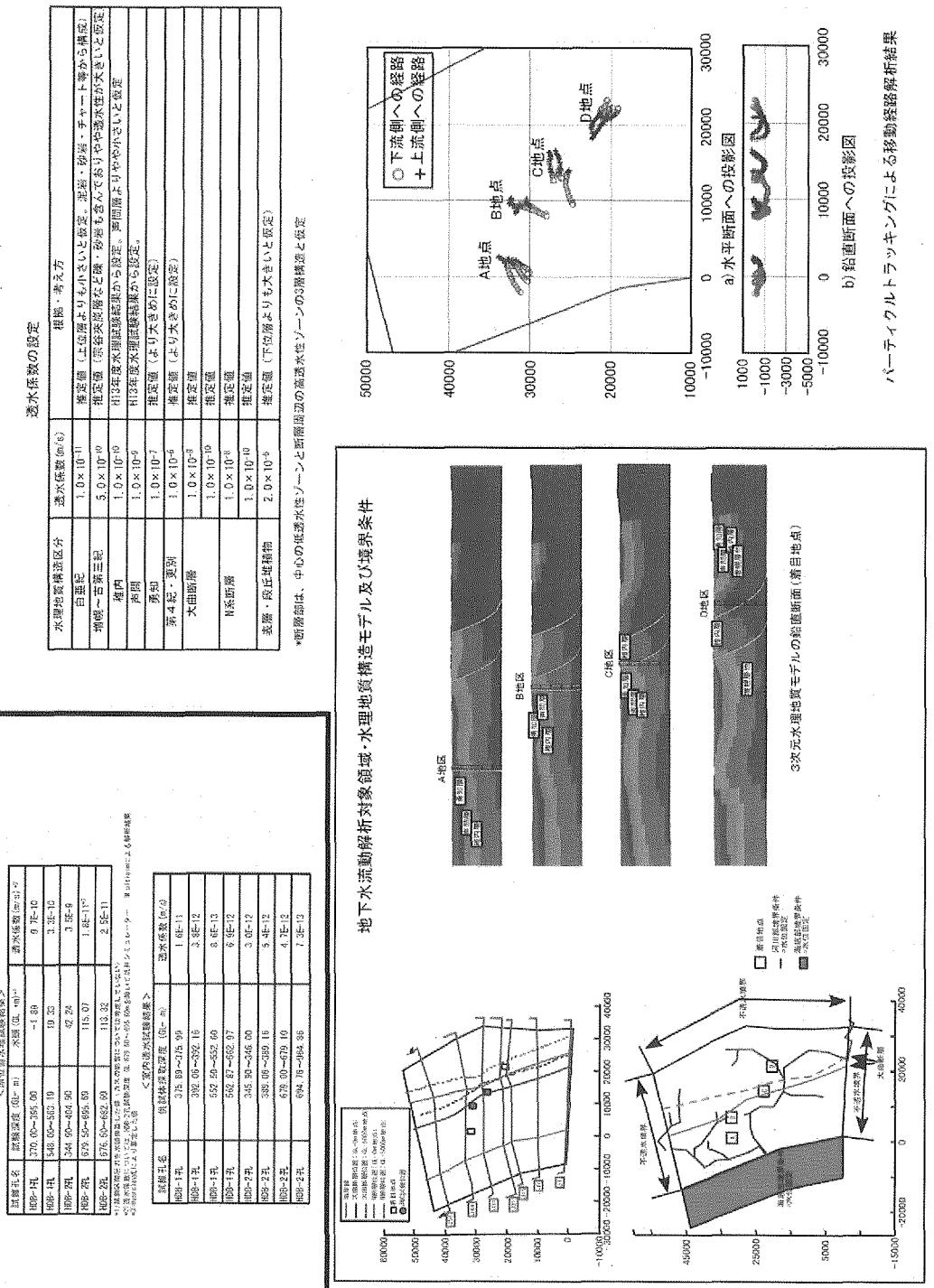


図3.3.1 地質構造に関する調査結果の一例（平成13年度までの結果）



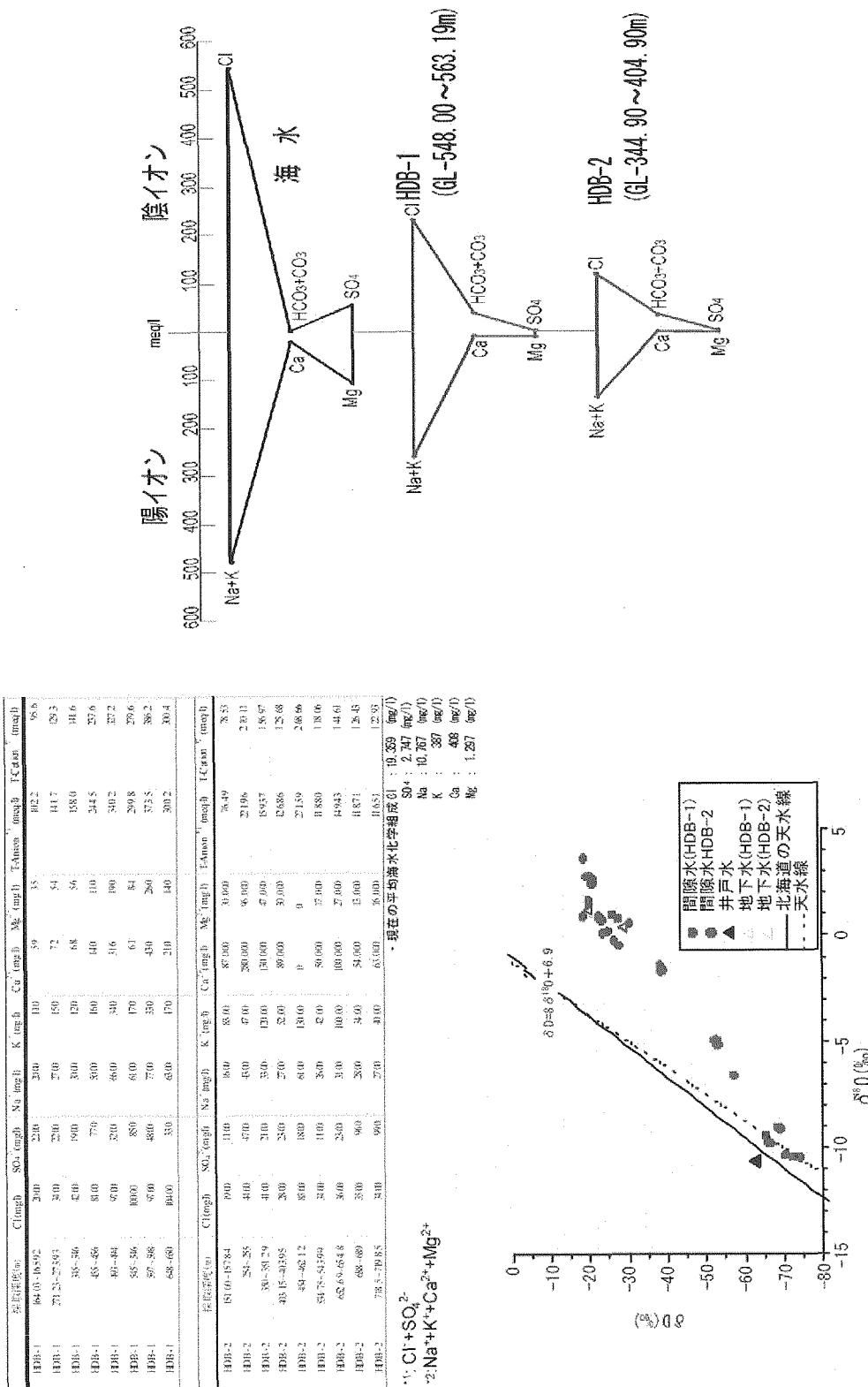
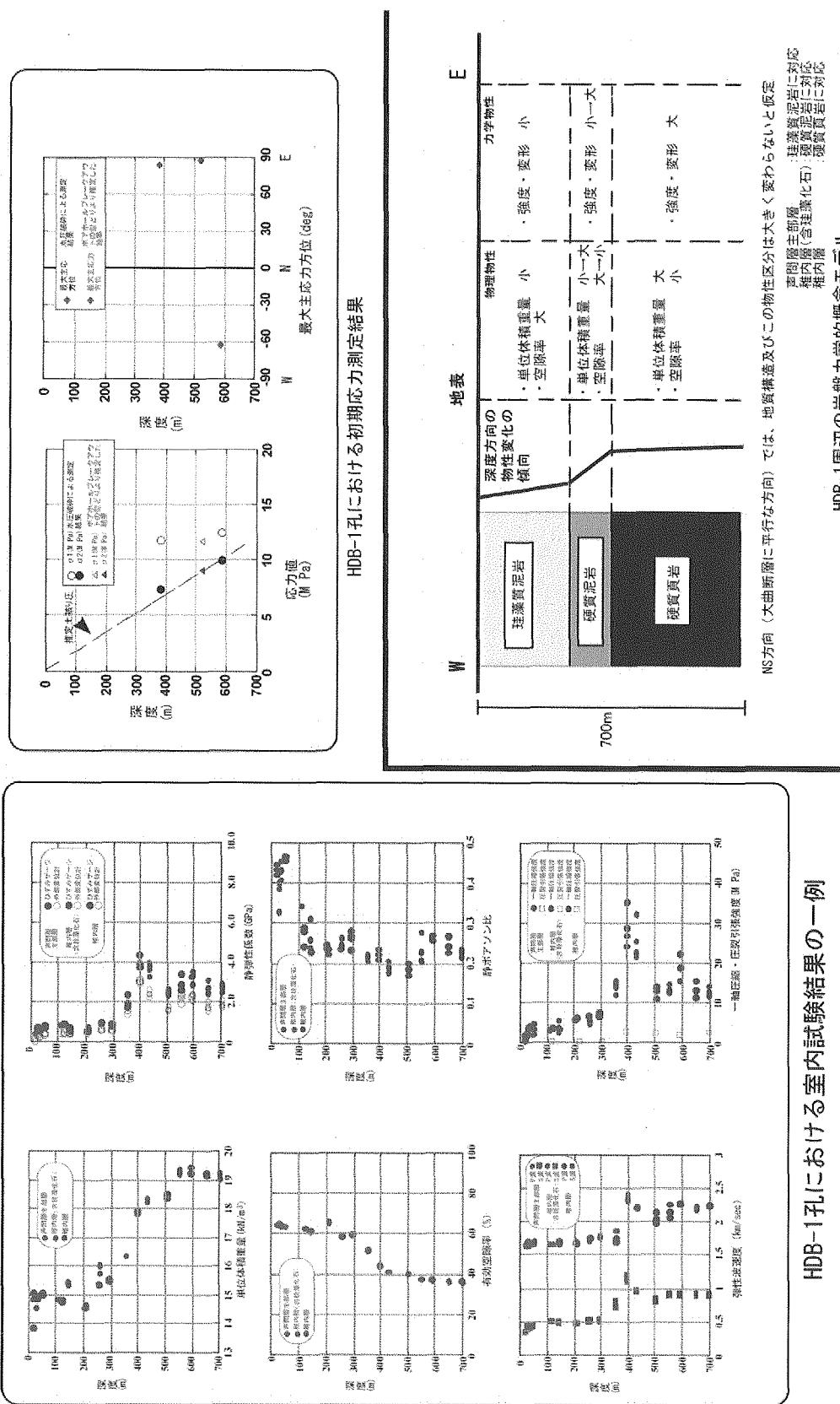


図3.3.3 地下水の地球化学に関する調査結果の一例(平成13年度までの結果)

コア抽出水中の δD — $\delta^{18}\text{O}$ の関係



先に述べた事項を考慮し、必要最低限の深層ボーリング調査によって研究所設置地区およびその周辺の地質環境を把握するとともに、調査後に長期モニタリングシステムを挿入し地下施設建設に伴う地質環境への影響を評価可能とするための基本的なボーリング孔配置を検討した。検討結果を図3.3.5、表3.3.2に示す。

前述した特徴から、研究所設置地区およびその周辺地区的地質環境は、断層が存在するもののその両側とも多孔質媒体が三次元的に分布するような場と想定した。このような場の地質環境特性と地下施設建設に伴う影響を三次元的に把握するために、図3.3.1のような配置での最低10孔程度の深層ボーリング調査が必要と考えた。この配置例では、地下施設建設の影響範囲を把握する観点から、断層の遮水性は考慮していない。なお、平成17年度に地上からの調査研究段階を終了するというプロジェクトのスケジュールも考慮し、表3.3.2のボーリング調査は各年度毎に3~4孔程度掘削することを前提とした。

表3.3.1 井戸式に基づく立坑のみを考えた簡易的な影響範囲の検討

解析条件	解析式	計算結果
井戸における水位低下量Sw 500 m	$R=575 \times Sw \times (H_0 \times K)^{0.5}$	6.43E+02
初期水位H0 500 m	$R=3000 \times Sw \times K^{0.5}$	1.50E+02
透水係数K(m/s) 1.00E-08 m/s	$R=2.45 \times (H_0 \times K \times t/ne)^{0.5}$	1.71E+02 ne=0.65
有効空隙率ne 0.65 声間 0.3 離内	$R=2.45 \times (H_0 \times K \times t/ne)^{0.5}$	2.51E+02 ne=0.3
操業期間t(s) 630720000	$R=1.9 \times (H_0 \times K \times t/ne)^{0.5}$	1.32E+02 ne=0.65
	$R=1.9 \times (H_0 \times K \times t/ne)^{0.5}$	1.95E+02 ne=0.3

*操業期間は20年と設定

*有効空隙率は、HDB-1,2孔における室内物理試験結果より設定

*解析式は、地盤工学ハンドブック（地盤工学会編：1999、pp21-28）

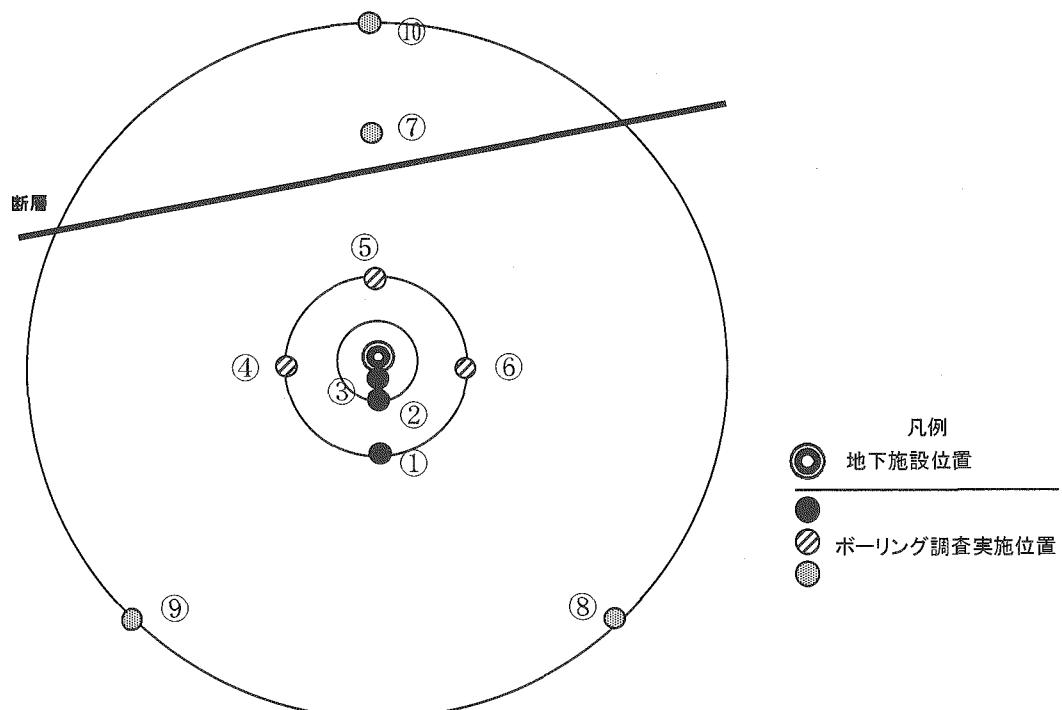


図3.3.5 基本的なボーリング孔配置の検討結果

表 3.3.2 図 3.3.5 に示した各ボーリング調査内容の検討結果

*表中の調査数量等は HDB-1,2 の実績に基づき設定

ボーリング調査	取得データ (1孔当たり)	各試錐孔の主な役割	
		(調査時)	(調査後のモニタリング)
●	地質・物理検層データ (0~500m分) 水理・地球化学データ (1~2深度分) 力学データ (物性: 10深度分) (応力: 2深度分)	① 地質環境モデル構築のためのデータ取得 地下施設設計のためのデータ取得 境界条件設定のためのデータ取得	境界条件設定のためのモニタリング (年変化、地震等による変動幅の把握)
		② 地質環境モデル構築のためのデータ取得 地下施設建設のためのデータ取得	掘削影響評価のためのモニタリング
		③ 地質環境モデル構築のためのデータ取得 地下施設設計のためのデータ取得	掘削影響評価のためのモニタリング
◎	地質・物理検層データ (0~500m分) 水理・地球化学データ (3深度: 浅部・中間部・深部) 力学データ (物性: 10深度分) (応力: 3深度 : 浅部・中間部・深部)	④ 地質環境モデル構築のためのデータ取得 解析のための境界条件の設定 地下施設設計のためのデータ取得	境界条件設定のためのモニタリング (年変化、地震等による変動幅の把握)
		⑤ 地質環境モデル構築のためのデータ取得 解析のための境界条件の設定 地下施設設計のためのデータ取得 断層の地質環境に与える影響評価のためのデータ取得	断層の地質環境特性の把握及び境界条件設定のためのモニタリング (年変化、地震等による変動幅の把握)
		⑥ 地質環境モデル構築のためのデータ取得 解析のための境界条件の設定 地下施設設計のためのデータ取得	境界条件設定のためのモニタリング (年変化、地震等による変動幅の把握)
◎	地質・物理検層データ (0~500m分) 水理・地球化学データ (3深度: 浅部・中間部・深部) 力学データ (応力: 3深度 : 浅部・中間部・深部)	⑦ 断層の地質環境に与える影響評価のためのデータ取得	断層の地質環境特性の把握及び境界条件設定のためのモニタリング (年変化、地震等による変動幅の把握)
		⑧ 広域的な地質環境モデル構築のためのデータ取得 応力場の不均質性評価のためのデータ取得 解析のための境界条件の確認	環境影響評価のためのモニタリング (年変化、地震等による変動幅の把握)
		⑨ 広域的な地質環境モデル構築のためのデータ取得 応力場の不均質性評価のためのデータ取得 解析のための境界条件の確認	環境影響評価のためのモニタリング (年変化、地震等による変動幅の把握)
		⑩ 広域的な地質環境モデル構築のためのデータ取得 応力場の不均質性評価のためのデータ取得 解析のための境界条件の確認	環境影響評価のためのモニタリング (年変化、地震等による変動幅の把握)

平成 14 年度は 3 孔の深層ボーリング調査を予定していたため、前述の検討結果を踏まえ図 3.2.1 中の No.20 及び No.8, No.12 を予定地点として選択した (図 3.3.6)。これは、平成 13 年度までの調査から推定された地質環境の妥当性の確認 (地質構造が断層直交方向に比べ走向方向には大きく変化しないなど) および断層東西領域の地質環境を把握するという目的に照らして、推定断層方向に対して直交および平行方向にほぼ等距離にボーリング孔が位置する配置がもっとも合理的と判断したためである。

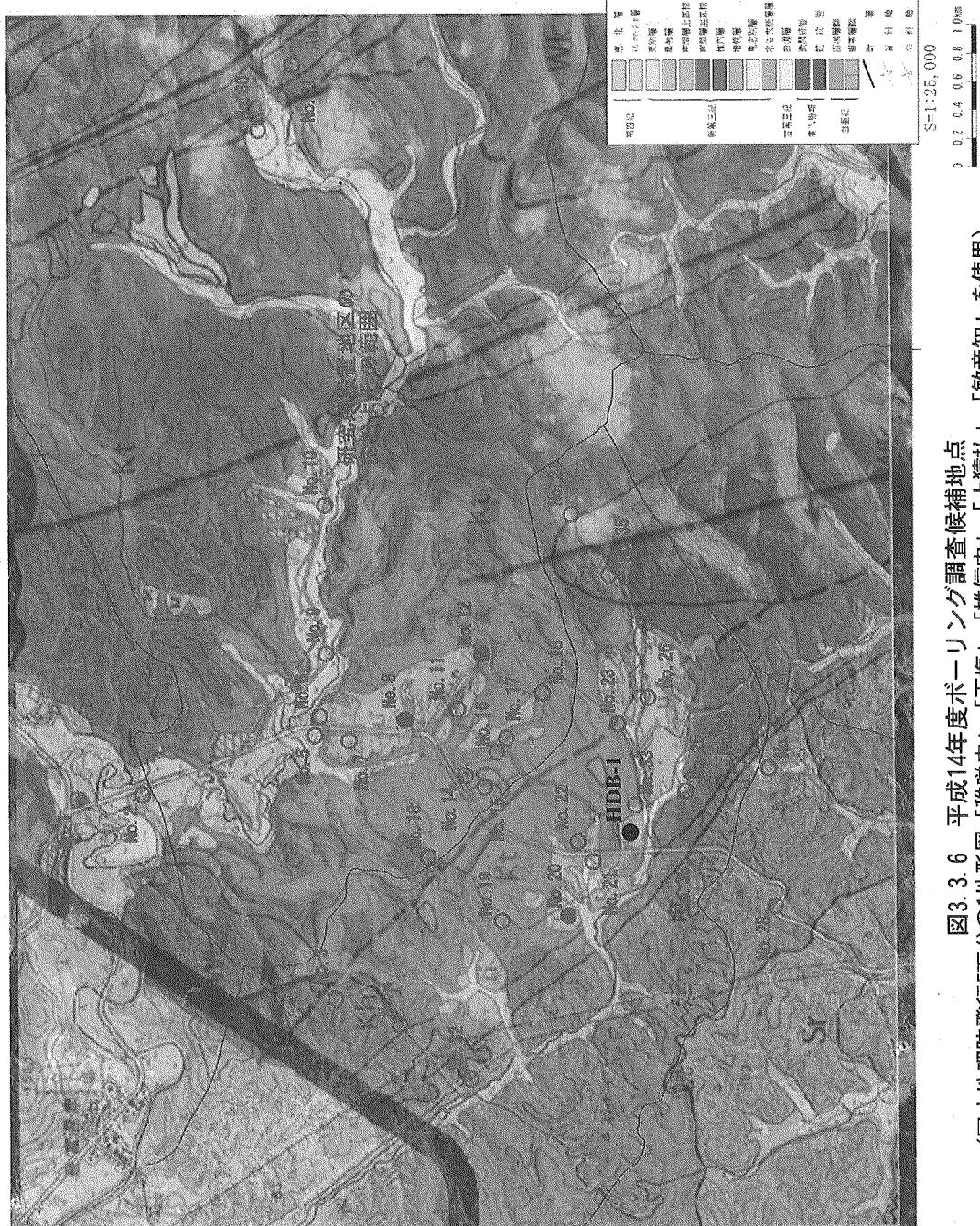


図3.3.6 平成14年度ボーリング調査候補地点
(国土地理院発行5万分の1地形図「稚咲内」「天塩」「雄音内」「猿払」を使用)
（資料：北海道開拓部）

(b) ボーリング掘削仕様

HDB-3,4,5 孔の掘削は、HDB-1,2 孔の実績を踏まえ、清水掘削が孔径拡大に及ぼす影響を検討する観点から、浅い深度の一部を清水掘削とし、それ以深は泥水による掘削を実施した。その他の事項は HDB-1,2 孔と同様とした。

(c) 調査仕様

当該年度のボーリング孔調査は、設定した研究所設置地区およびその周辺の地質環境を把握することと研究所用地の選定に資するデータの取得が主たる目的であったこと、および HDB-1,2 孔における調査実績などを踏まえ、以下のように調査仕様と数量を決定した。

①地質構造

HDB-1 孔における調査結果との比較の観点から、物理検層・地質観察とも以下の仕様・数量で調査を実施することとした。

②岩盤の水理、③地下水の地球化学

地下水の水理・地球化学的調査は、HDB-1,2 孔の調査と同様の考え方で仕様を決定したが、それらの調査で透水試験時にガスの湧出による影響などが見られたため、試験方法の再検討および透水試験装置の改良（ガスの収集も可能な構造とする）を加えた。

数量については、ケーシング挿入により掘削後の原位置試験が困難になると、データ点数を極力増加させるため、原位置の透水試験・採水を各孔 4 箇所（HDB-1,2 孔調査時は 2 箇所）とし、それ以外にコア空隙水の抽出・分析を行うこととした。

④岩盤力学

室内試験は、HDB-1,2 孔での調査結果との比較と、断層両側における地下施設建設の可能性を検討するため、HDB-1,2 孔調査時と同等の仕様・数量で実施することとした。

原位置応力測定に関しては、HDB-1,2 孔の調査実績を踏まえ、水圧破碎システムをワイヤーライン方式から掘削ロッドを用いる方式に変更した。また、AE 法による初期応力測定も、HDB-1,2 孔の調査実績を踏まえ、本試験前に試験手法そのものの適用性に関する予備試験をあわせて実施した。さらに堆積岩に一般に見られる力学的異方性の程度を把握するための定方位コアを用いた一軸圧縮試験を加えた。

3.4 平成 14 年度実績**(a) ボーリング孔配置**

当初計画の場所で実施した。

(b) ボーリング掘削

当初計画どおり、HDB-3,4,5 孔とも 520m まで掘削した。HDB-1,2 孔の実績をふまえ、浅部よりベントナイト泥水を用いた掘削を行ったため、孔径拡大は最小限にとどめられた。平均的な掘削速度は、24 時間作業で 10m/日を超え HDB-1,2 孔の掘削速度よりも向上した。

(c) 調査

物理検層、地質観察、水理試験・採水/分析は、当初の仕様数量どおり実施した。水理試験については、試験機器および試験手法を改良した結果溶存ガスの遊離が測定データの品質に与える影響を抑えることができることを確認した。水圧破碎法による応力測定も当初仕様数量実施したが、HDB-1,2 孔の調査実績を踏まえ測定システムを変更したため、それによるトラブルが発生した。具体的には、パッカーシステムのリーク、メタンガスによるインプレッションパッカーライン切り替え時の動作不良である。

(d) 平成 14 年度の深層ボーリング調査の評価

ボーリング調査の結果⁵⁾から、選定した研究所設置地区およびその周辺において、大曲断層の推定位置の東西領域で地質環境の相違が認められた。

具体的には、推定断層位置東側では、西側に比べ声問層（珪藻質泥岩層）が薄く稚内層（硬質頁岩層）がより浅い深度から出現しておりかつ割れ目が多くかった。また、同一深度での透水性が高い場所が存在し、より深部まで地下水の塩分濃度が低かった。一方、地下

施設建設という視点では、断層東西領域とも施設最深部（500m付近）での力学特性は、ほぼ同等であり、大きな差異は認められなかった。また、HDB-1,3孔およびHDB-4,5孔を比較した場合、相対的に断層走向方向に平行な方向での地質構造に変化の少ないことが確認できた。

以上のことから、断層東西の地質環境の把握という平成14年度の深層ボーリング調査の目的は概ね達成されたものと判断した。また、前年度に実施したHDB-1孔の深層ボーリング調査結果も考慮し、岩盤中の割れ目が岩盤力学特性や透水特性に及ぼす影響が相対的に小さいと考えられる大曲断層西側に研究所用地を設定した。

(e) 平成15年度以降の深層ボーリング調査の考え方

平成14年度に研究所用地を設定したことを受け、図3.3.5のボーリング孔配置の考え方を反映しつつ作成した、研究所用地を含む研究所設置地区およびその周辺を対象とした平成15年度以降のボーリング調査の配置案を図3.4.1に示す。

研究所用地近傍に掘削する深層ボーリング調査では、地下施設設計に直接必要となるデータ（地質的データ、力学的なデータ、ガスに関するデータなど）を取得する調査のプライオリティーをあげる必要があると考えた。また、それ以外の深層ボーリング調査では包括的に研究所設置地区およびその周辺の地質環境を把握するため、地質的データ、水理・地球化学的調査のプライオリティーをあげた調査計画とする必要があると判断した。

これらの技術的な必要事項と、平成17年度以降の第2段階への移行のために必要な作業期間（地下施設設計1年、設計に基づく許認可・契約手続きに1年以上）を考慮し、研究所用地を中心とした狭い範囲で深層ボーリング調査を先行実施し、その後調査範囲を拡大するという計画とした。

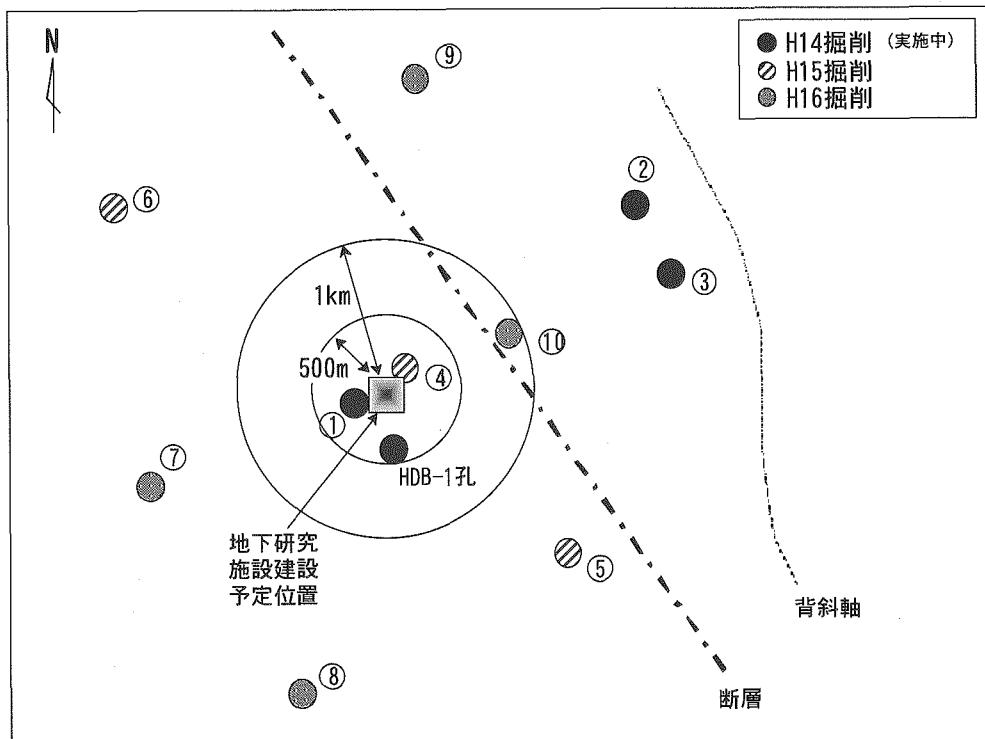


図3.4.1 研究所用地位置を考慮し更新した
平成15年度以降の深層ボーリング調査位置図
(基本的なボーリング孔配置の検討結果(図3.3.5)を更新)

3.5 平成 15 年度計画

(a) ボーリング孔配置

3.2 に述べた研究所設置地区およびその周辺を対象とした調査では、最低 10 孔程度の深層ボーリング調査を前提とした検討を行ってきた。また、プロジェクトとして平成 17 年度より第 2 段階の開始、すなわち地下施設の着工となることから、遅くとも平成 16 年度までには深層ボーリング調査のデータに基づき、地下施設の設計および地質環境への影響予測が実施できる必要があった。

平成 14 年度までに実施した HDB-1,3,4,5 孔の深層ボーリング調査などの結果をまとめたものを図 3.5.1～図 3.5.4 に示す。これらのデータを含め、平成 14 年度までに実施してきた深層ボーリング調査の結果から推定した研究所設置地区及びその周辺の地質環境は以下の通りである。

(地質構造)

- ・ 研究所設置地区は、深度 500m までの範囲では勇知層、声問層および稚内層で構成されると想定される。
- ・ 大曲断層（推定）の走向に直交する方向には複雑な地質構造の変化を示すが、それと平行な方向の地質構造変化は少ないものと想定される。

(岩盤の水理)

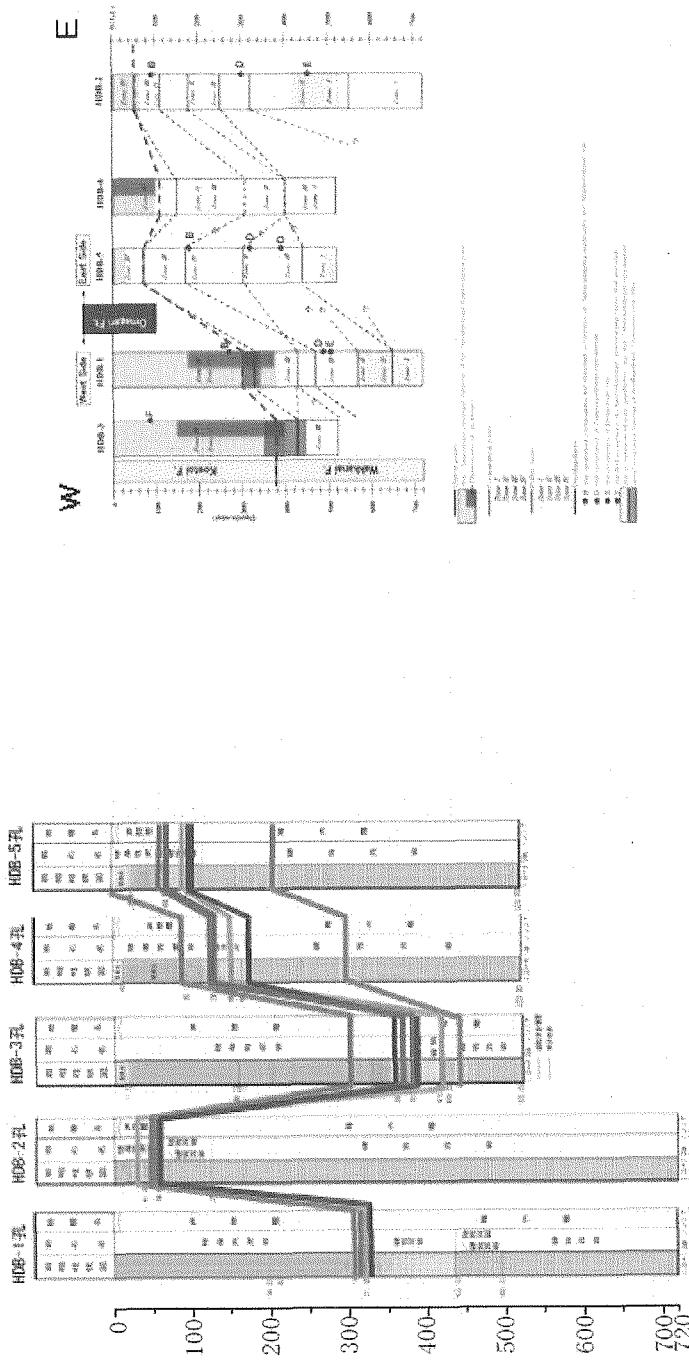
- ・ 大曲断層（推定）の西側の稚内層の透水性は低く、難透水性岩盤とみなせる（声問層についてはデータがないので不明）
- ・ 広域的な地下水流动方向は研究所設置地区周辺では北東-南西方向であると思われる（地下水流动解析結果より）。

(地下水の地球化学)

- ・ 大曲断層（推定）西側領域の地下水は、深度 100m 以深から塩水系の地下水となっている。東側領域では、塩分の薄い地下水が深部まで存在している。
- ・ 同位体分析の結果では、深度が深くなるにつれ地下水の起源は天水起源からはずれる。

(岩盤力学)

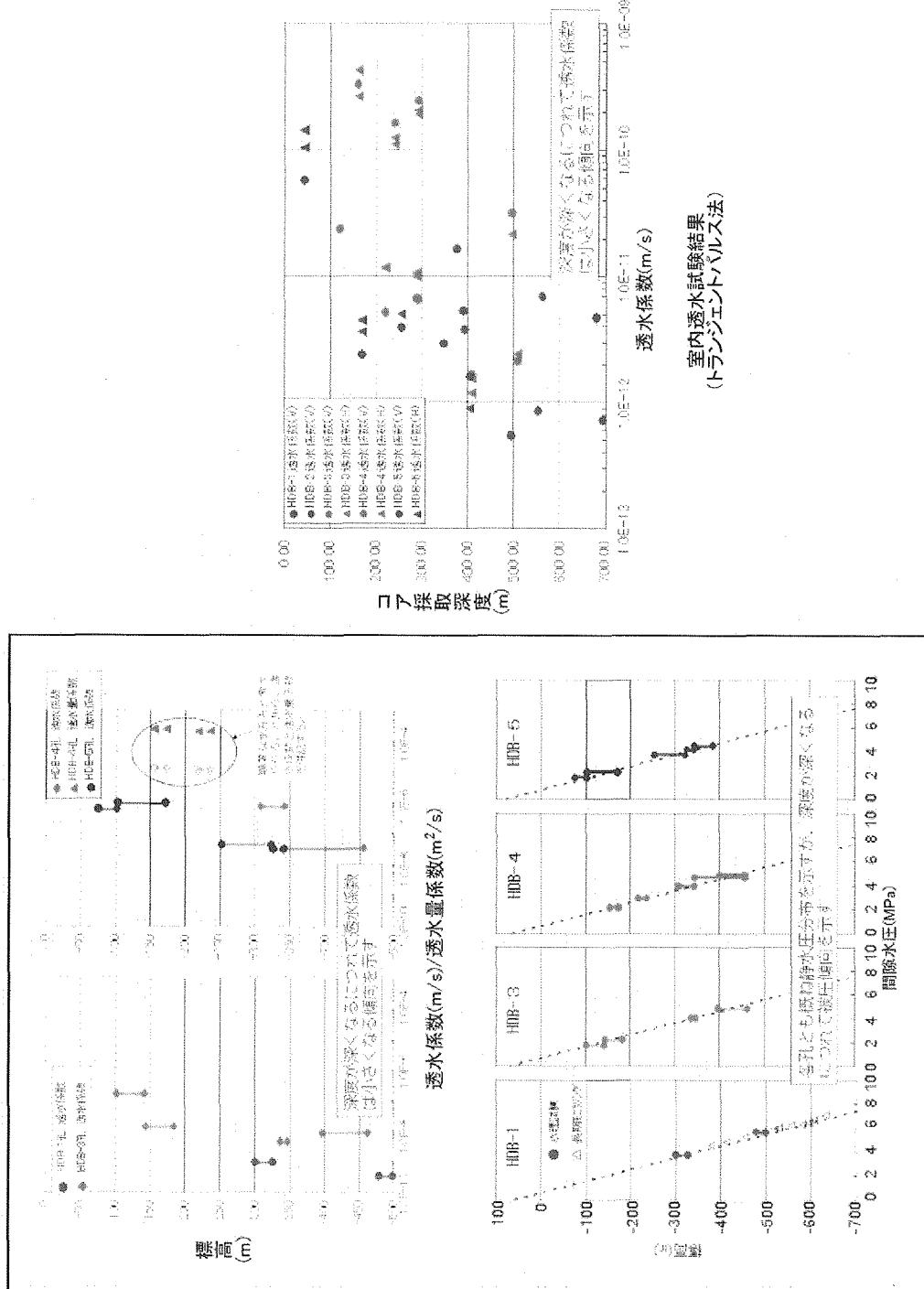
- ・ 声問層と稚内層では、岩石コアの力学的特性は若干異なる。岩盤の力学的な性質に関しては、内在する亀裂の影響は大きくないと思われる。
- ・ 大曲断層（推定）西側の稚内層中の初期応力状態は、最小主応力が推定被り圧にほぼ等しく、水平面内最大主応力方向は深度 400 付近～700m までほぼ東西方向である。

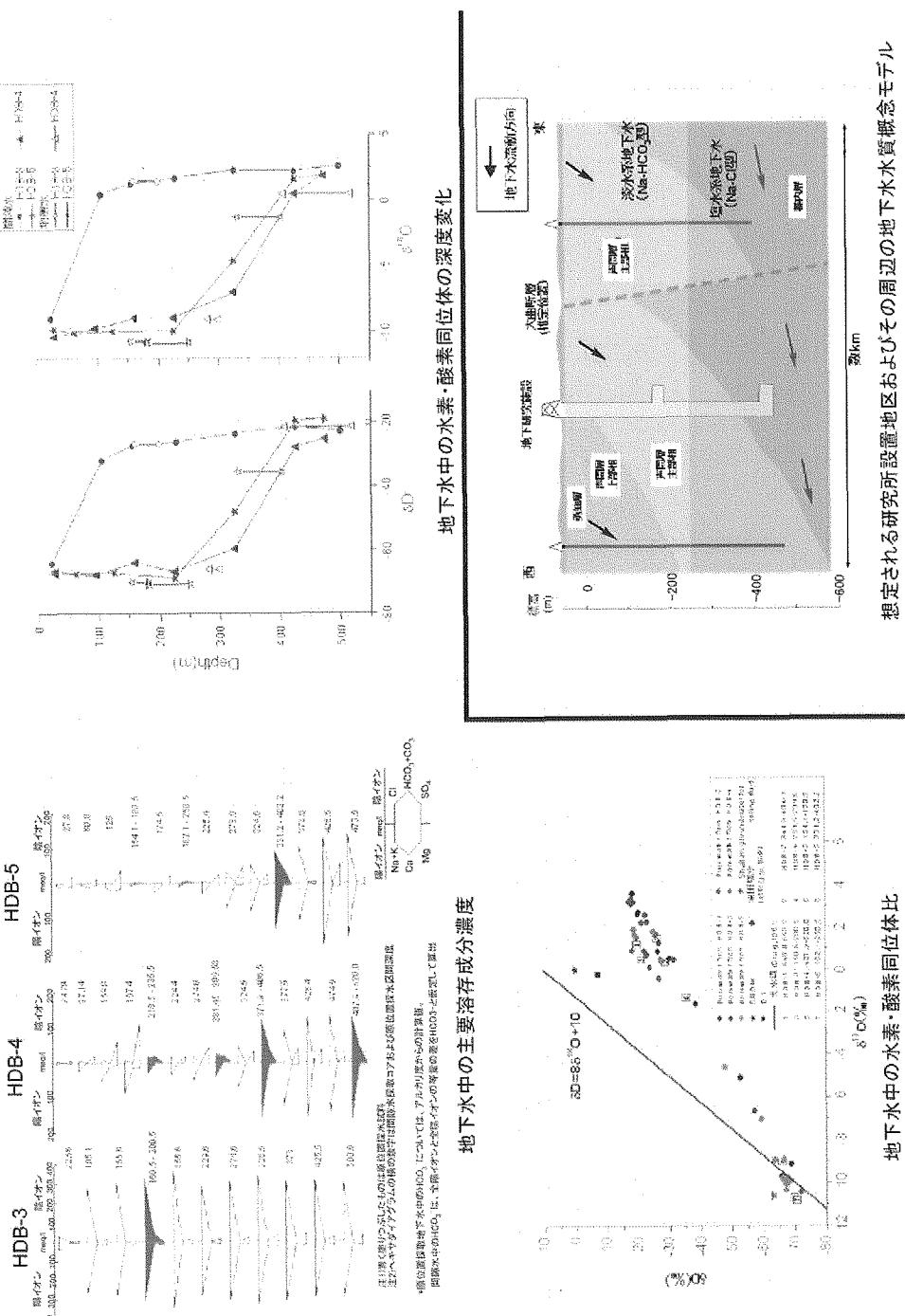


- 微化石層序
・珪藻解釈
北太平洋から得られた *Neodenticula kamishatiae* 帯が更に生息層から得られる。東側で長い示準化石間に有孔虫化石花粉化石の算出パターンにより Zone I~IV に分帶でき、対比可能。
- 岩相層
・堆積層／岩相層境界
東西方向では西側で深く、東側で浅い傾向を示す
HDB-1孔とHDB-5孔の間に大断層が推定されている。
- 標度 (L値)
・堆積層境界
350~500への変化点
・色調 (L*)
暗さの増加 (<30)
・有機物地化学的特長
ステランニステレン
65%→35%への変化点
・単位体積重量
15k./Nm3→18k.Nm3への変化点

各孔とも比較的調和的な結果を示す

図3.5.1 地質構造に関する調査結果の一例(平成14年度までの結果)





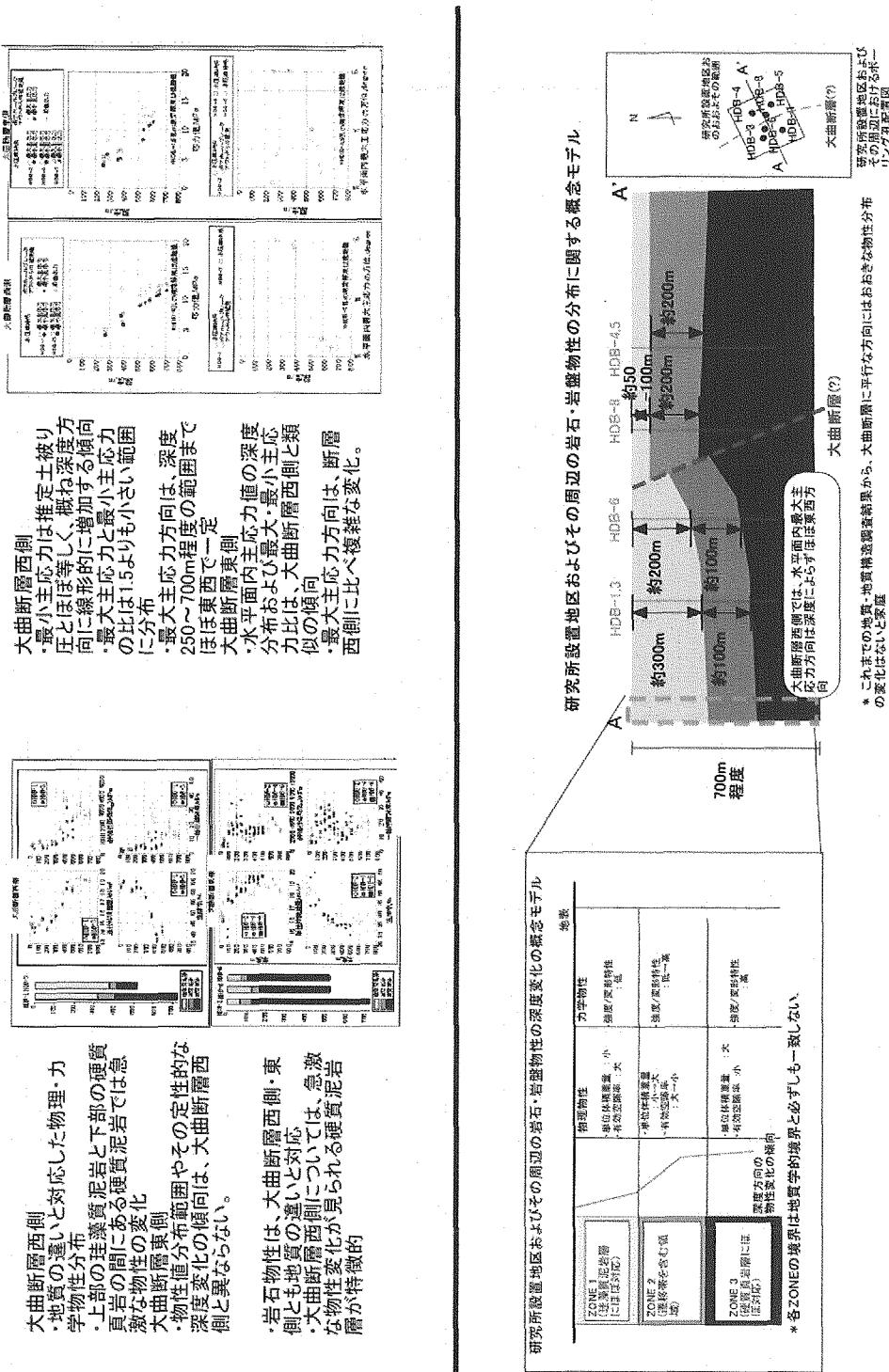


図3.5.4 岩盤力学に関する調査結果の一例（平成14年度までの結果）

上記の想定結果では、研究所設置地区およびその周辺地区の地質環境の把握、地下施設の設計および地下施設建設に伴う周辺地質環境への影響予測に際して、以下の情報が不足していると考えられた。

- ・地下施設設計の精度向上のために必要な建設予定地点での深層ボーリング調査による設計に必要な力学・水理・ガスなどの情報
- ・研究所設置地区内に分布するがデータが取得されていなかった勇知層の地質環境特性（勇知層は、声問層・稚内層と異なり砂岩系の岩石で構成されていることがわかつていたため、勇知層の地質環境が異なる可能性があった）
- ・研究所設置地区内に存在する大曲断層の位置（地下水流动に大きな影響を及ぼす可能性がある大曲断層の位置を特定するための情報が不足していた）

これら3つの異なる情報の取得と、平成15年度実施予定であった3箇所の深層ボーリング調査を考慮し、以下の3箇所を深層ボーリング調査の候補地点とした（図3.5.5）。

立坑位置近傍（立坑間のセンターから100～200m程度の距離）

地質環境モデル構築のためのデータ取得、地下施設建設のためのデータ取得、地下施設掘削による影響把握のためのモニタリング（岩盤の透水性が低いため、可能な限り近いモニタリング孔が1孔必要。ただし、水平坑道の展開スケールを考えると立坑間中心より100m以内に近づけることは困難）

No. 26 地点

地質環境モデル構築のためのデータ取得、南側の境界条件と断層の諸特性の把握、地下施設掘削による影響把握のためのモニタリング

No. 32 地点

地質環境モデル構築のためのデータ取得（勇知層）、解析のための境界条件の設定、北側の境界条件の把握、地下施設掘削による影響把握のためのモニタリング

上記の平成15年度の深層ボーリング調査データの増加と想定の妥当性の確認、HDB-4, 5孔のデータに基づく地下施設東側の境界条件の推定によって、幌延深地層研究計画第1段階で必要となる地下施設建設に伴う影響予測については、ある程度の精度で可能と判断した。

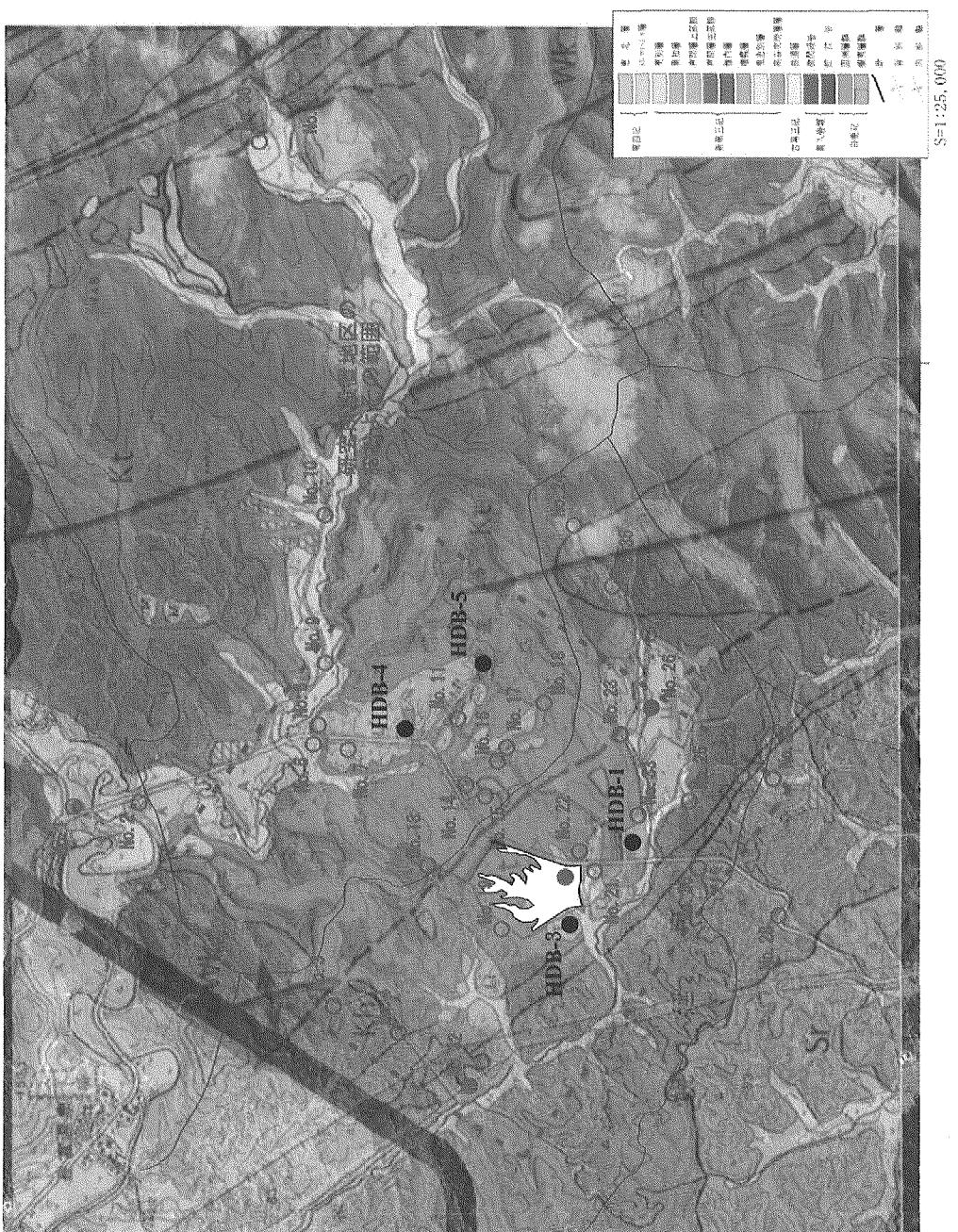


図3.5.5 平成15年度の深層ボーリング調査位置案
(国土地理院発行5万分の1地形図「稚内」「天塩」「雄信内」「上猿払」「敏音知」を使用)

しかし、研究所設置地区およびその周辺地区（数km×数km程度）の範囲内の地質環境の不均質性については、平成15年度までの深層ボーリング調査終了時においても定量的な評価は困難と思われた。このため、平成16年度は、広域的な地質環境の不均一性把握に重点を置いた深層ボーリング調査を行い、調査終了後は研究所設置地区境界付近の地下施設掘削に伴う影響モニタリングを考慮する配置とする必要があると考えた。このような観点から、ボーリング孔位置は図3.5.6に示した以下の4箇所を候補地点とした。

No.3 地点

広域的な地質環境モデル詳細化のためのデータ取得、解析のための境界条件の確認、広域的な掘削影響把握のためのモニタリング、応力場の不均質性評価のためのデータ取得

No.5 地点

広域的な地質環境モデル詳細化のためのデータ取得、解析のための境界条件の確認、広域的な掘削影響評価のためのモニタリング

No.19 地点

地質環境モデル詳細化のためのデータ取得、地下施設設計のためのデータ取得、掘削影響把握のためのモニタリング

No.29 地点

広域的な地質環境モデル詳細化のためのデータ取得、解析のための境界条件の確認、広域的な掘削影響評価のためのモニタリング

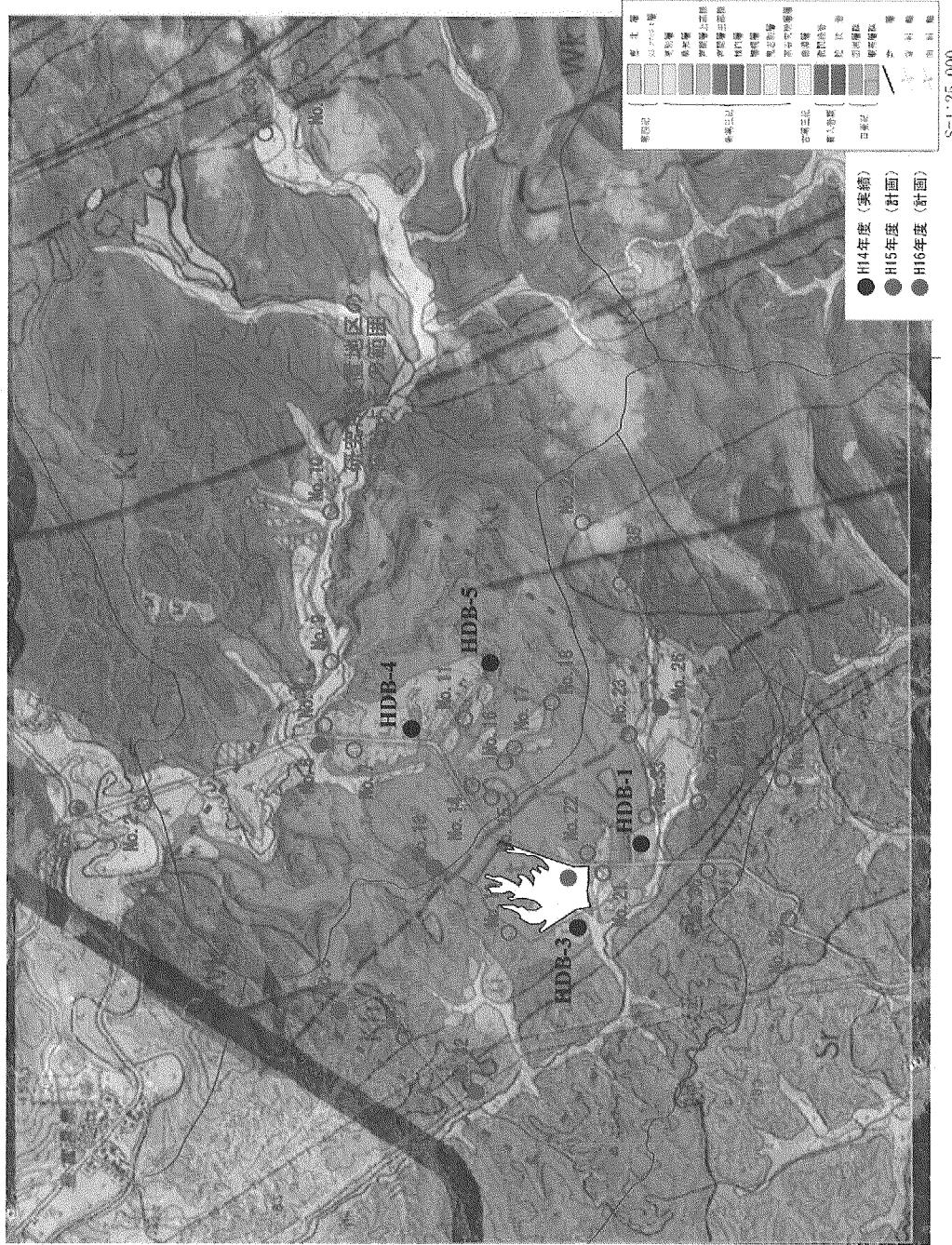


図3.5.6 平成15年度、平成16年度ボーリング調査候補地点
(国土地理院発行5万分の1地形図「稚咲内」「天塩」「雄信内」「上猿払」「敏音知」を使用)
H14年度(実績)
H15年度(計画)
H16年度(計画)

(b) ボーリング掘削仕様

平成 15 年度のボーリング調査は、HDB-1～5 孔の実績を踏まえ、当初から泥水による掘削とし、その他の事項も同等とした。ただし、各ボーリング孔の調査目的が異なることと、調査終了後の長期モニタリングの観点から、各孔の掘削深度を変化させた。具体的には、地下施設予定地点に最も近接するボーリング孔の掘削深度を 620m とし、研究所設置地区北西側境界付近のボーリング孔は 520m、断層周辺の地質環境調査のためのボーリング孔は 470m とした。それぞれの深度の設定理由は以下の通りである。

- ・地下施設近傍のボーリング孔：地下施設（最深深度：500m 程度）建設の影響を深度方向にも捉えるため 600m とした。
- ・北西境界のボーリング孔：掘削後の長期モニタリング孔として地下施設最深部（520m）と同深度までのデータを取得できるようにするために、既存のボーリング孔と同様 520m とした。
- ・断層近傍のボーリング孔：声問層・稚内層境界の深度は、断層の東西領域を判定する一つの指標となるが、その深度は 500m よりも浅いことが予想されたため 470m とした。

(c) 調査仕様

当該年度のボーリング孔調査は、地下施設建設のためのデータ取得、大曲断層に関する地質環境データの取得及び研究所設置地区およびその周辺の地質環境モデル構築のためのデータの取得（特に勇知層）が主目的であり、3 孔のボーリング孔それぞれが異なる目的を有していた。このため、調査仕様もボーリング孔毎に異なるものとしている。以下に各孔の調査仕様設定の考え方を示す。

①地質構造

物理検層は、各孔とも HDB-1～5 孔と同様の仕様で行うが、新たに BHTV 検層を追加することとした。これは、より明確に原位置岩盤中の割れ目を抽出するためである。地質観察は、各孔とも HDB-1～5 孔と同様の仕様で行う。

②岩盤の水理

岩盤の水理に関する調査も、適用する調査手法自体は HDB-1～5 孔と同様としたが、HDB-1～5 孔までの調査では、原位置岩盤の透水性に関する情報が不足しているとの判断から、原位置透水試験と採水を分離して考えることとした。具体的には、地下施設予定地点近傍のボーリング孔では可能な限り多くの透水試験を実施することとし、他の 2 孔は重要な構造に着目して透水試験を行うものとした。重要な構造としては、平成 14 年度までにデータが取得できていなかった声問層および勇知層を対象とした。

③地下水の地球化学

地下水の地球化学特性については、透水試験結果から 1 週間程度で原位置地下水を採水可能なポイントに絞って実施することとした。また、HDB-1～5 孔までの調査結果から、採水が困難な箇所が多いと想定されたため、間隙水の抽出・分析により水質データの鉛直分布を補間することとした。

④岩盤力学

岩盤力学に関しては、地下施設近傍に掘削するボーリング孔での調査に力点をおく。具体的には、物理試験・一軸圧縮試験・圧裂試験の他、三軸圧縮試験および初期応力測定点数を増加させるとともに、孔内載荷試験を追加した。他の 2 孔に関しては最低限の物性分布を把握できる物理試験・一軸圧縮試験・圧裂試験のみを実施し、原位置測定は行わないこととした。これは、力学的な影響範囲が、地下水への影響範囲に比べてはるかに小さい（せいぜい坑道直径の 3 倍程度の範囲）ためである。

3.6 平成 15 年度実績**(a) ボーリング孔配置**

計画したボーリング孔のうち、研究所用地近傍の深層ボーリング調査は計画通りの位置で行ったが、他の 2 孔は位置を変更した（図 3.6.1）。No.26 地点については研究所用地によ

り近い所において大曲断層を捉えることが重要であるということと、それまでに実施して
いた地上物理探査結果と直接比較が可能という2点を考慮しNo.14地点に変更した。また、
No.32地点に関してはアクセスの問題が生じたため、若干南側の地点に変更した。

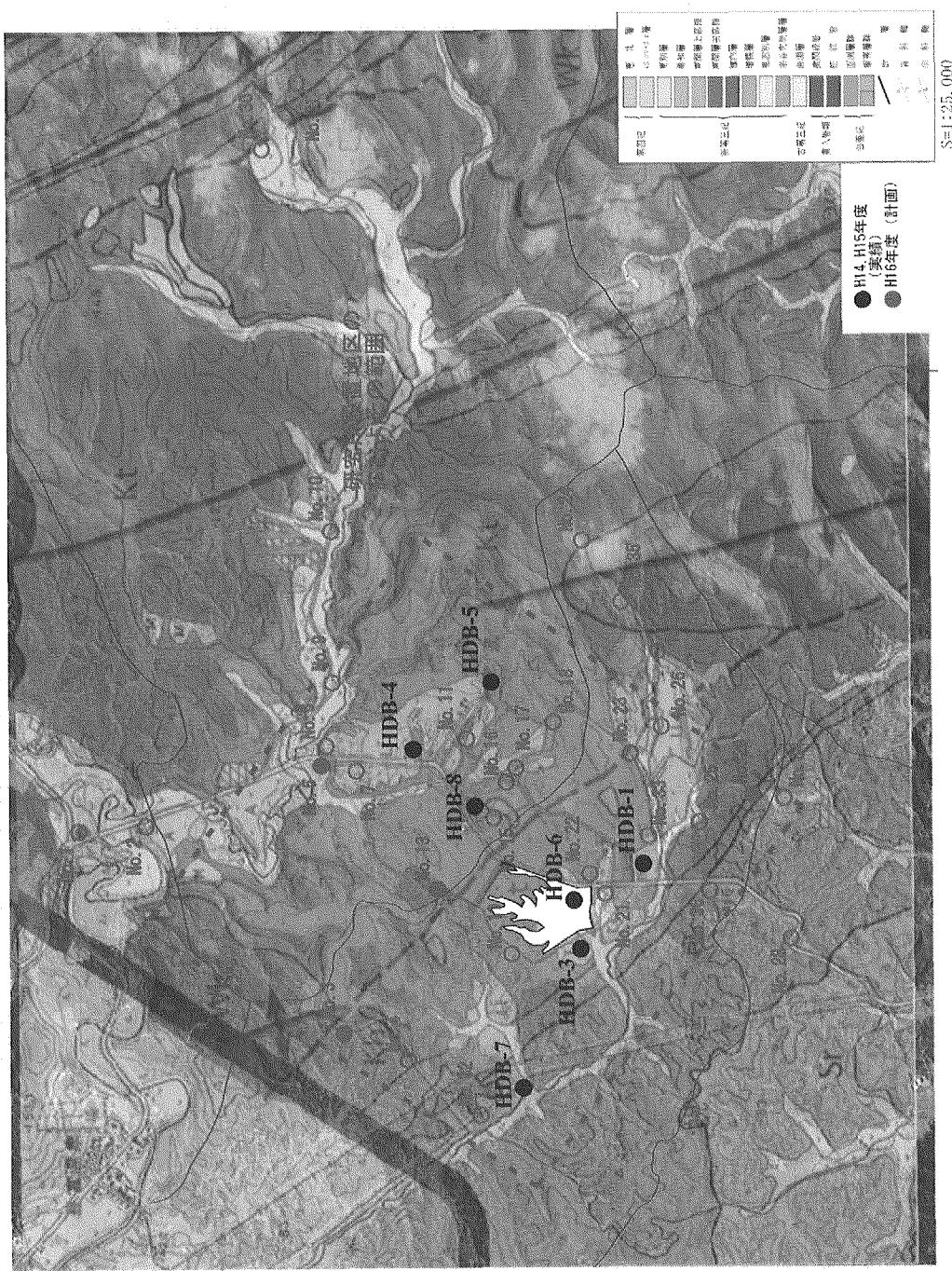


図3.6.1 平成15年度深層ボーリング調査位置図
(国土地理院発行5万分の1地形図「稚内」「天塩」「雄信内」「上猿払」「敏音知」を使用)
● H14・H15年度
(実績)
● H16年度(計画)

(b) ポーリング掘削

当初計画どおりの深度で各孔とも掘削した(HDB-6:620m, HDB-7:520m, HDB-8:470m)。HDB-1,2 孔の実績をふまえ、掘削開始時からベントナイト泥水を用いた掘削を行ったため、孔径拡大は最小限にとどめられている。平均的な掘削速度は、24 時間作業で 15m/日程度であった。

(c) 調査

物理検層、地質観察、水理試験・採水/分析、力学関連の原位置試験は、当初の仕様数量どおり実施した。室内試験は、原子力機構内部の議論の結果を受け、力学物性に及ぼす①供試体の飽和過程で用いる水の影響、②供試体サイズが異なることによる影響を確認するための試験を追加実施した。

(d) 平成 15 年度の深層ポーリング調査の評価

ポーリング調査の結果⁶⁾、調査計画設定時の各深層ポーリング調査の目的はほぼ達成されたと判断される。

具体的には、最も地下施設近傍に掘削した HDB-6 孔における調査において地下施設建設の検討に必要な力学データおよび水理・ガスのデータが室内・原位置試験で取得された。これらは直接地下施設設計時のパラメータ設定に反映された。また、得られたデータから同様に西側に掘削した HDB-1,3 孔の調査から推定される地質環境とほぼ整合する結果が得られ、それは掘削影響予測のための地質環境モデルの構築に反映された。

最も北側に掘削した HDB-7 孔における調査から、勇知層の砂岩層と声問層の境界は当初の想定よりも 100m 程度深い位置にあったが、勇知層の砂岩層の透水性は声問層と同等であること、地下水の分析結果から勇知層と声問層の層間の地下水流动が示唆されるような結果は出でていないことなどの結果が得られた。

大曲断層位置近傍に掘削した HDB-8 孔の調査結果から、本ポーリング孔は直接断層を貫いてはいないものの、その地点の地質構造は前年度断層東側に掘削した HDB-4,5 孔に近いことがわかった。一方、岩盤の透水性および水質分布は、HDB-4,5 孔よりも HDB-1,3,6 孔に近い結果が得られた。これらの結果から、大曲断層推定位置が少なくとも HDB-6 と HDB-8 孔の間にある可能性が高いこと、大曲断層は單一面の断層ではなく分岐している可能性が考えられた。

3.7 平成 16 年度計画

平成 16 年度の深層ボーリング調査は、平成 15 年度までの計画に従い研究所設置地区的境界近くで実施し、研究所設置地区およびその周辺の三次元的な地質環境の把握および種々の解析評価の境界条件となりえるデータの取得を主目的として計画していた。

平成 15 年度までに実施した HDB-1,3,4,5,6,7,8 孔における深層ボーリング調査などで明らかになった研究所設置地区およびその周辺の地質環境は以下のようにまとめることができた（図 3.7.1～図 3.7.6）。

①地質構造

研究所設置地区およびその周辺の深度 700m 程度の範囲までの地質は、新第三紀鮮新世の砂岩（勇知層）、新第三紀鮮新世～中新世に形成されたと考えられる珪藻質泥岩（声問層）、硬質頁岩（稚内層）および珪藻質泥岩と硬質頁岩の遷移帶（稚内層）で構成される。大曲断層については、その地表位置の特定にはいたっていない。また、現在の研究所設置地区およびその周辺の大曲断層東西の変位量は、従来言われていた垂直変位量（数 100m）よりもかなり小さく、断層が存在しない場合にも説明しうる。

②岩盤の水理

声問層は割れ目の有無によらず透水性はほぼ同じであるが、稚内層（遷移層も含む）については、割れ目の有無により大きな差が生じる。具体的には、声問層については割れ目の有無による原位置岩盤の透水性の差は 1 オーダー程度であるが、稚内層は割れ目の有無により透水性に 3 オーダー程度の差がある。また、原位置岩盤の透水係数は割れ目のある場合にも深度依存性が認められる。コアの透水性には若干の拘束圧依存性があるがその差はオーダーが変化するほどのものではなく、別に室内試験で得られている間隙率の深度変化に呼応した形で透水性が変化している。原位置の割れ目がない部分の透水性とコアの透水性は概ね一致している。これらの分布は地質・地質構造と概ね対応するものと考えられる。研究所設置地区内の水圧分布は場所によらずほぼ静水圧である。

③地球化学

地下水中の総溶存成分濃度(TDS)は、地上物理探査で得られた比抵抗分布との相関が認められ、大曲断層の西側は総溶存成分濃度が相対的に高く東側は低くなっている。コア抽出水と原位置で採水した地下水の溶存イオンの濃度および電気伝導度はほぼ一致する。また、流体検層で計測した電気伝導度とコア抽出水の電気伝導度もほとんど変わらない。水素酸素同位体の関係から見ると、大曲断層の東西を問わず深度が深くなるにつれ重い同位体の地下水となっており、その変化は深度増加に対して線形的である。これらの分布特性は地質構造との関連は薄い可能性がある。

地上物理探査から得られた比抵抗分布もコア抽出水の総溶存成分濃度分布とは矛盾しない結果となった。すなわち、高比抵抗部は総溶存成分濃度が低く、低比抵抗部は総溶存成分濃度が高くなっている。

④物質移行

コアの透水係数(10^{-12} m/s)に対し、得られたヨウ素の拡散係数は同一有効空隙率の既往データに対し平均的な値となった。一般に、拡散係数は媒体が類似している場合、空隙率と相関があり、この結果はその知見と整合している。また、室内試験結果から稚内層のインタクトな部分では拡散支配であり、収着による遅延は無視できるレベルであると考えられる。一方、割れ目部分は移流分散を考慮する必要があること、割れ目面内の開口幅分布は不均一性が小さく応力が作用するとほぼ密着するような割れ目であることがわかっている。これらの結果は、先に述べた割れ目部分等の原位置透水係数も深度依存性を有することと矛盾しない。

割れ目の物質移行パラメータのスケール依存性（割れ目の大きさの違いによる）は既往の研究成果と大きく異なるため、補間できる可能性が高いこと等の知見が得られている。具体的には、三乗則で逆算した水理開口幅と解析と実験結果のフィッティングから求

めた物質移行開口幅の違いは最大でも 1.7 倍となりあまり大きな差がない。これは亀裂面内の開口幅の不均一性が小さいことに起因すると思われる。これらの分布特性は地質構造と概ね対応すると思われる。

⑤岩盤力学

地質構造（勇知層、声問層および稚内層）にほぼ対応して岩石コアの物性は変化している。特に珪藻質泥岩と硬質頁岩の中間部にある遷移帶では急激な物性変化が生じている。また、コアの弾性波速度と原位置速度検層から得られた弾性波速度はほとんど一致することから、原位置岩盤の変形特性も概ねコア試験で得られる変形特性と対応するものと考えられ、原位置岩盤中に存在する割れ目の影響は声問層では見られるものの稚内層ではかなり小さい。強度は深度の増加に伴い増加する傾向にあると思われるが、三軸圧縮試験結果を整理するとモールクーロンの破壊基準で言えば、声問層も稚内層も内部摩擦角に大きな違いはなく、粘着力のみが異なるような材料と考えられる。応力ひずみ曲線を見ると、珪藻質泥岩は延性的性質を、硬質頁岩は脆性的性質を示す。また、推定被り圧の 2 倍程度の拘束圧の範囲では、珪藻質泥岩は拘束圧が高くなると弾完全塑性型の挙動を示すが、硬質頁岩はひずみ軟化的な挙動を示す。これらの分布は地質構造と概ね対応する。初期応力については、大曲断層西側の領域では、水平面内最大主応力方向は地表付近から深度 700m 程度の範囲まではほぼ東西方向で変化しない。水平面内最大・最小主応力は概ね深度增加に伴い線形的に増加する。水平面内最小主応力は、概ね推定土被り圧に等しく、水平面内最大主応力はその 1.5 倍程度までの範囲にある。

以上の結果から、地球化学を除く各分野（水理、物質移行、岩盤力学）の物性値分布は、地質構造とほぼ対応する形で諸物性を割り当てることができる可能性が高いと考えられた（図 3.7.5, 図 3.7.6）。

また、研究所設置地区およびその周辺の地下水流动に関しては、調査対象岩盤の水理・物質移行特性や地球化学的調査結果から、非定常なインパクトがあった場合（透水試験のような場合）には、割れ目の有無により流れの局所的变化が生じる可能性はあるが、深度方向の水压分布も場所によらずほぼ静水圧に近いことから、定常状態では非常にゆっくりした地下水流れになっており、主に鉛直方向から雨水等が拡散のようなスピードで侵入して現在の地下水水質が形成されている可能性が高いと想定した。また、比抵抗分布と地下水水質に相関があるならば、大曲断層（推定）の周辺およびその東側には、相対的に透水性の高いゾーンが広がっていること、断層推定位置付近では断層に沿った上向き流れのようなものは考えにくいくことなどが推定された。

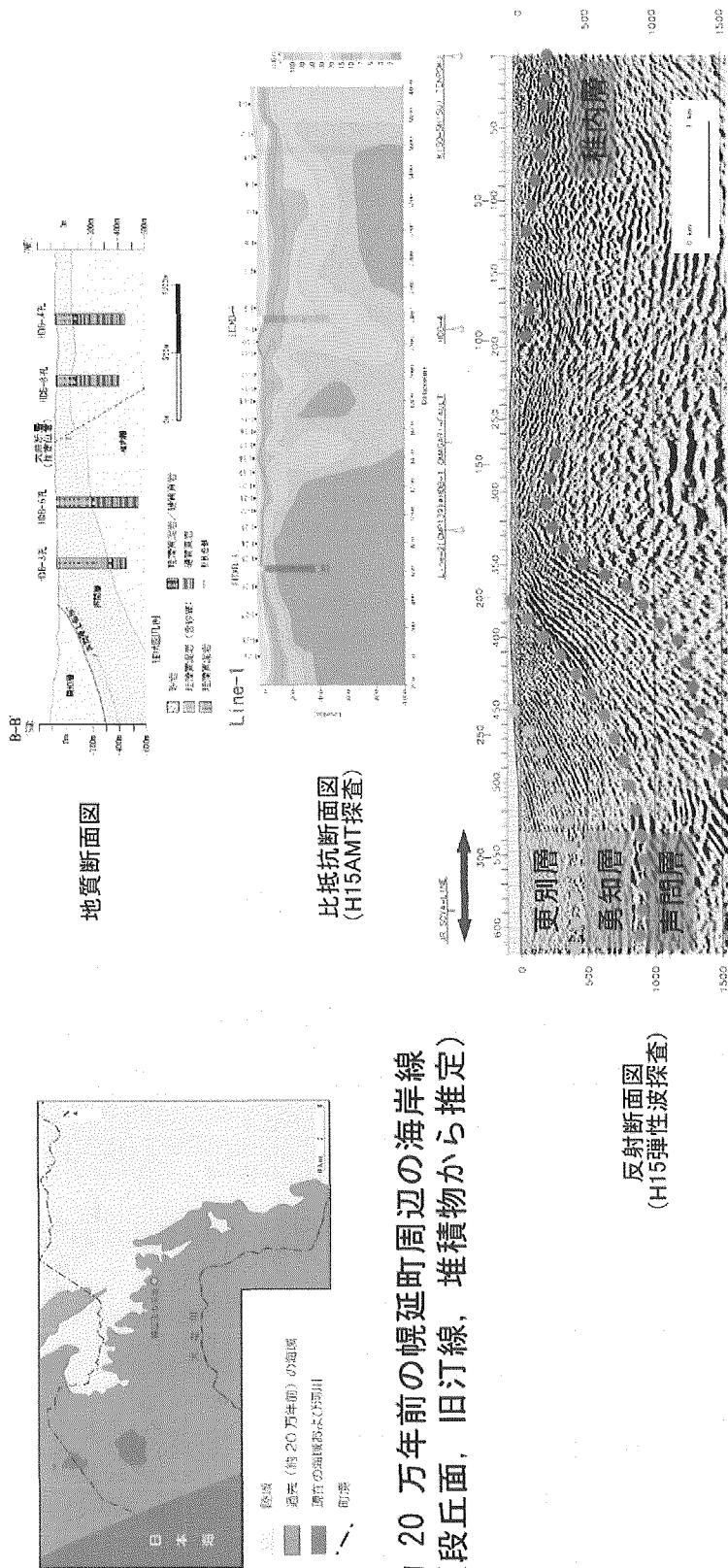


図3.7.1 地質構造に関する調査結果の一例（平成15年度までの結果）

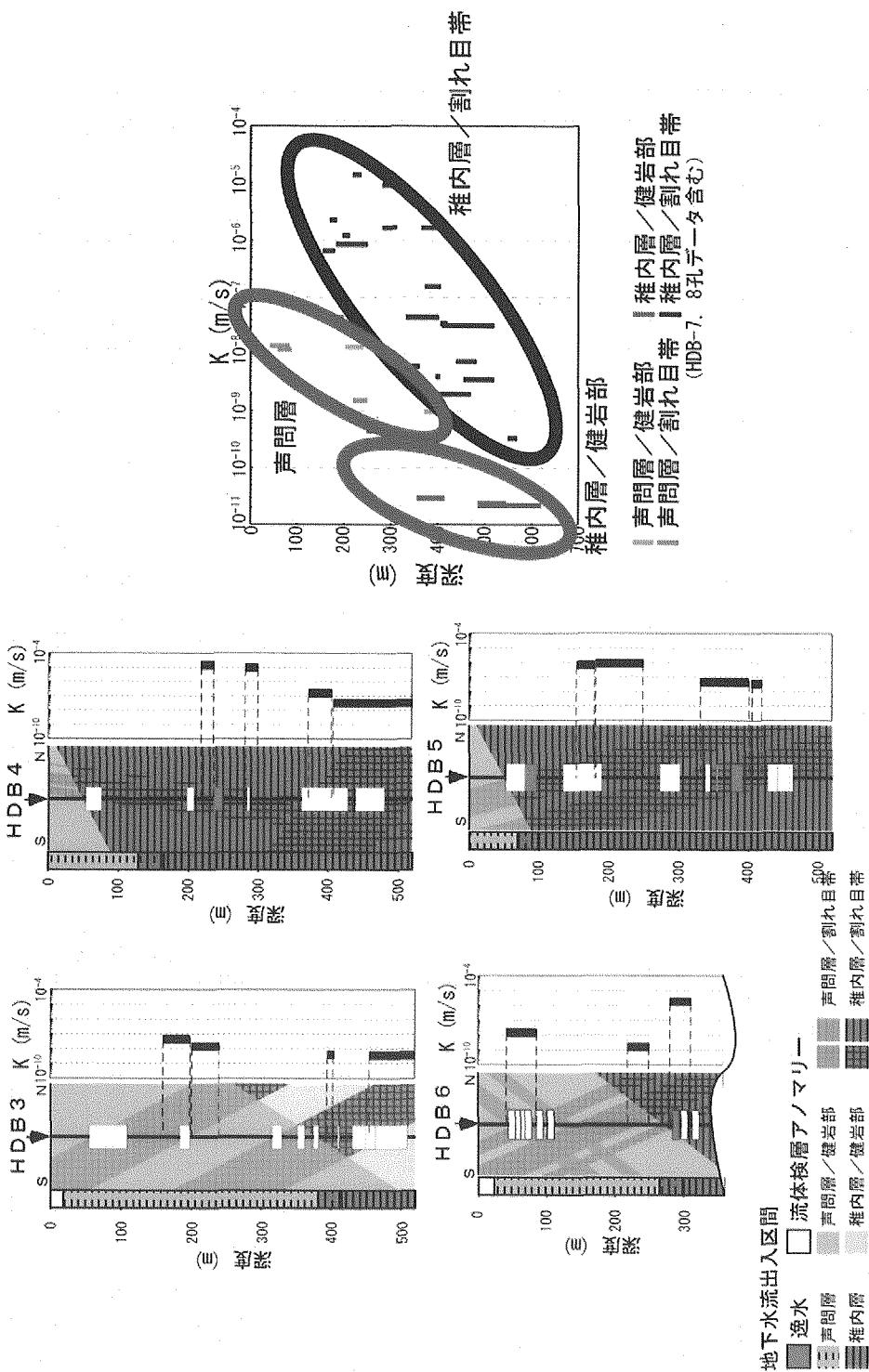


図3.7.2 岩盤の水理に関する調査結果の一例（平成15年度までの結果）

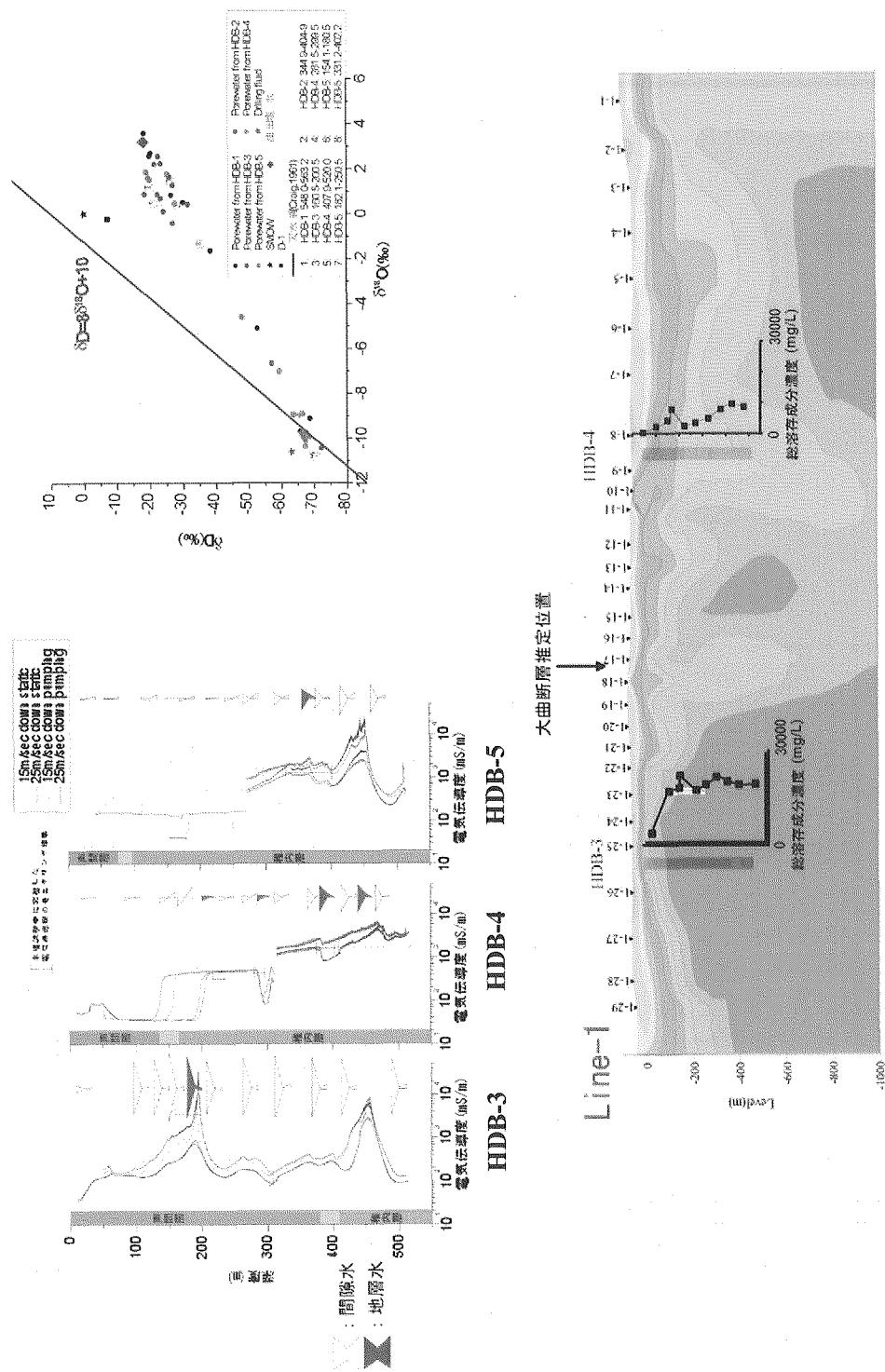


図3.7.3 地下水の地球化学に関する調査結果の一例（平成15年度までの結果）

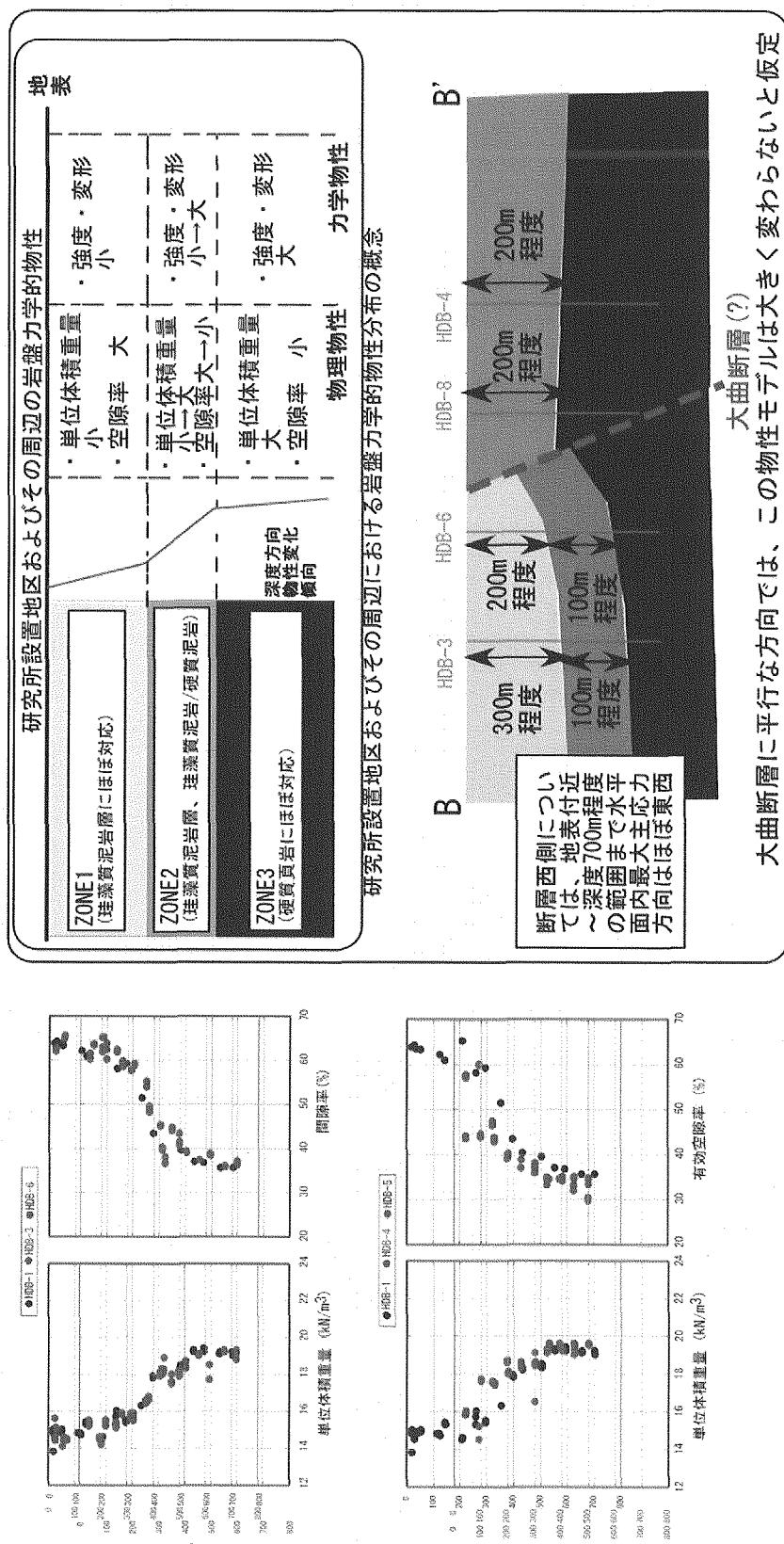


図3.7.4 岩盤力学に関する調査結果の一例（平成15年度までの結果）

大曲断層 (?)

大曲断層に平行な方向では、この物性モデルは大きく変わらないと仮定

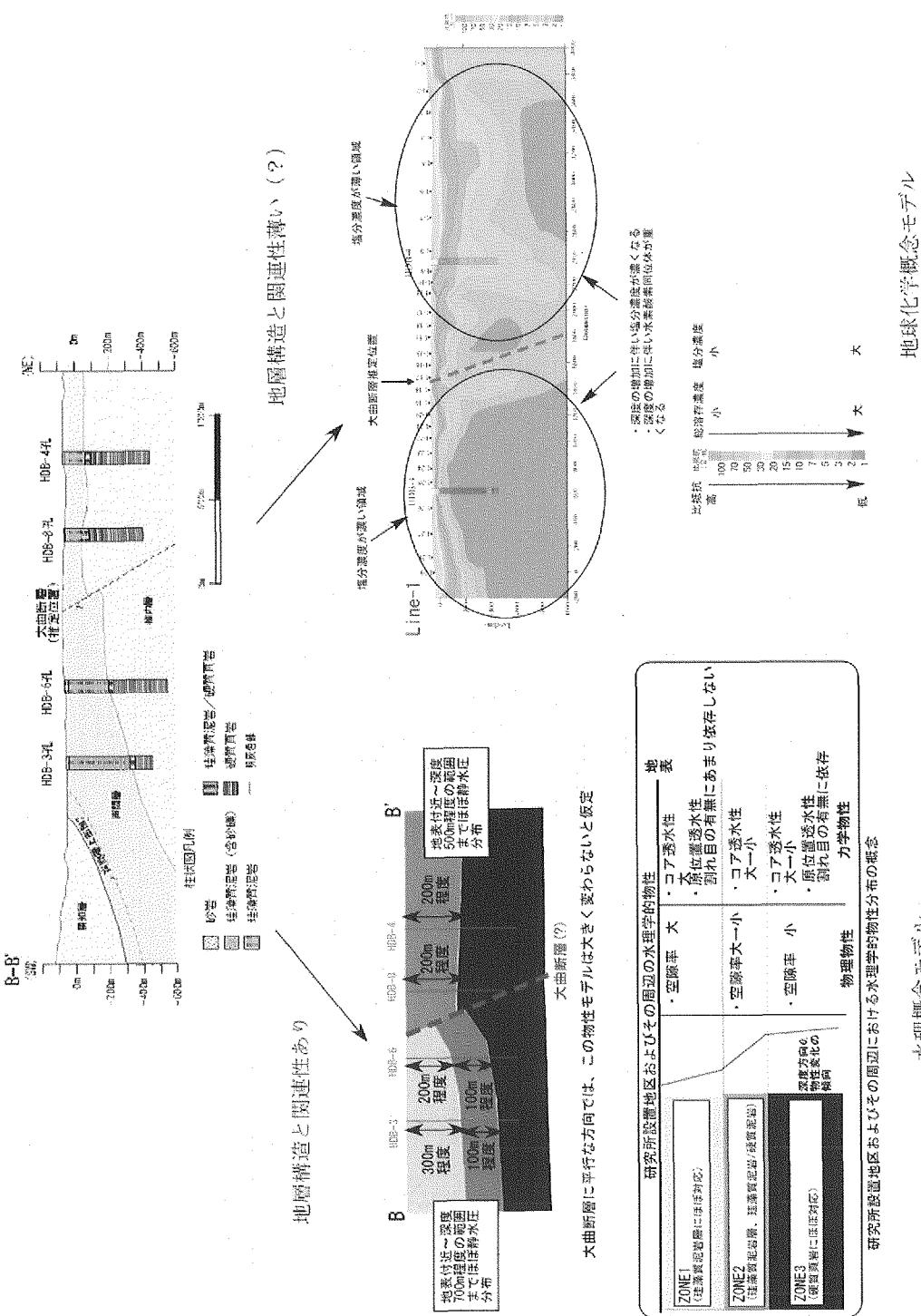


図3.7.5 地質構造概念モデルと水理地質および地下水水質分布との関係

地球化水概念モデル
水理概念モデル

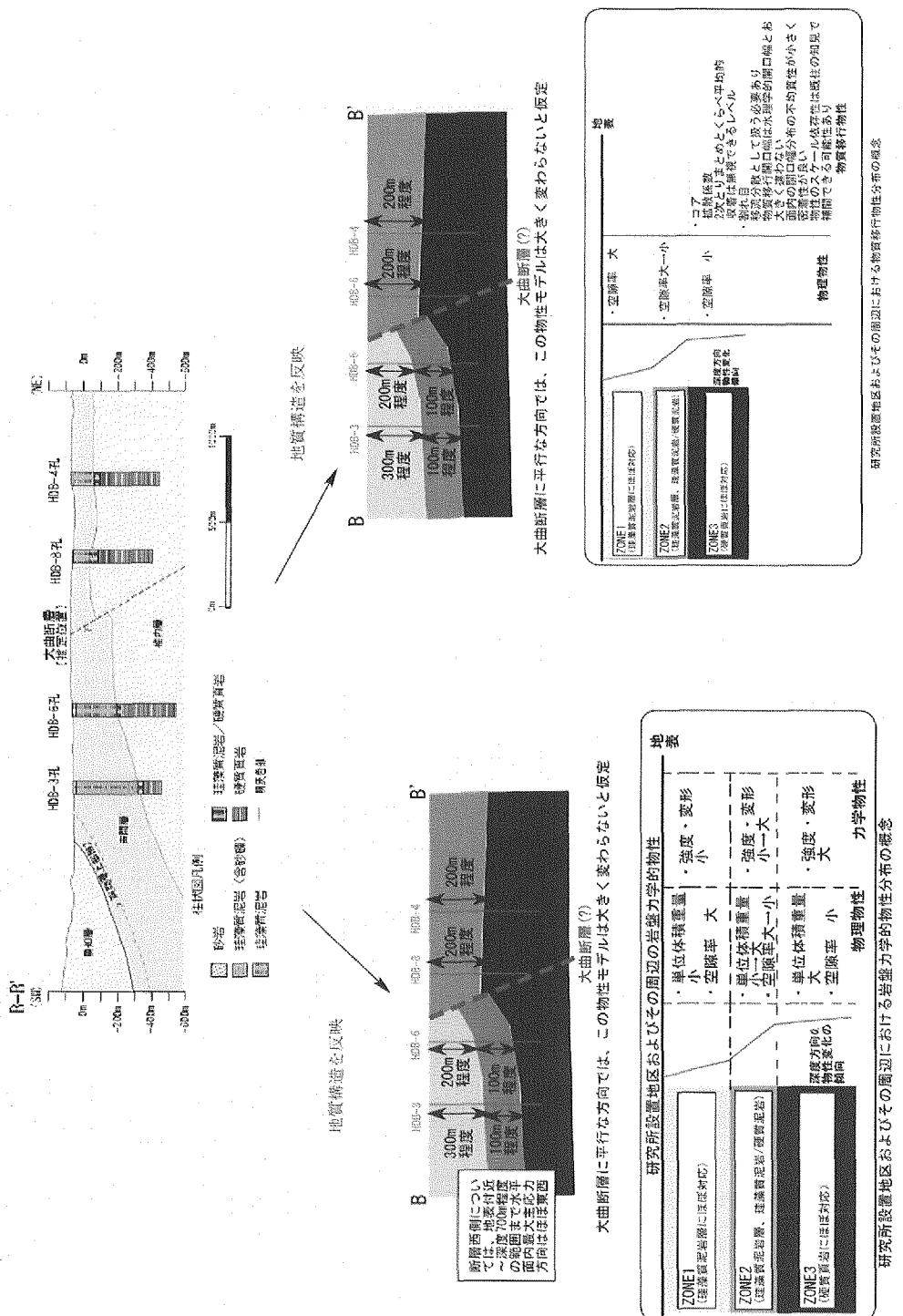


図3.7.6 地質構造概念モデルと力学特性および物質移行特性との関係

岩盤力学概念モデル

物質移行概念モデル

研究所設置地区およびその周辺における岩盤力学的物性分布の概念

前述の想定より、平成 15 年度に検討した平成 16 年度分の深層ボーリング調査目的などを大きく変更する必要はないと判断したが、今後の各分野毎のモデルの精度／信頼性向上の観点から APPENDIX にあるようなモデル構築の上で不確実性因子の抽出作業も実施した。その結果、最も重要なことは、すべてのモデル化のベースとなる地質構造に関する不確実因子をいかに取り除いていくかということであると結論づけられた。

不確実性因子の抽出では、研究所設置地区より広い範囲の地質・地質構造に関する不確実性因子と研究所設置地区およびその周辺における不確実性因子があるが、研究所設置地区より広い範囲の三次元的な地質・地質構造の不確実性を低減させることは、データが取得できないためほぼ不可能であったため、ここでは研究所設置地区およびその周辺部の地質・地質構造の不確実性因子を取り除くことに力点を置くこととした。

関連する大きな不確実性因子は、①研究所設置地区およびその周辺に分布する主要な地層（勇知層、声問層、稚内層および増幌層）の三次元的な厚さの分布、②大曲断層の存在の有無・その存在形態と三次元的な分布・性状であると考えられるが、②については地表物理探査を主体とした調査により把握する予定であったため、①を深層ボーリング調査で取得すべきデータのターゲットとした。

以上のことから、平成 16 年度の深層ボーリング調査は、研究所設置地区およびその周辺の地質・地質構造を初めとする地質環境特性の三次元的な連続性を評価できるような調査と、500m より深部の地質環境データの取得を目的とした。深層ボーリング調査候補地点を図 3.7.7 に示す。

平成 16 年度は 4 孔の深層ボーリング調査を行う計画であったが、予算の関係上 3 孔に減じたことと、平成 15 年度までの計画として想定していた No.5 の場所の近傍に電力中央研究所との共同研究の一環としてコントロールボーリング掘削を行うこととなったため、平成 15 年度の計画時の深層ボーリング調査計画のうち、No.5 を取りやめることとした。

以上のことから、最終的に No.25, No.36 および No.3 地点を深層ボーリング調査地点の候補とした。それぞれの深層ボーリング調査などの位置づけは以下の通りである。

No.3 地点

広域的な地質環境特性の把握、地下水流动解析のための北側境界条件の設定、地下施設建設に伴う広域的な影響評価のためのモニタリング

No.36 周辺

広域的な地質環境特性の把握（特に勇知層と声問層上部層／声問層主部層との境界深度の決定）、地下水流动解析のための西側境界条件の設定、地下施設建設に伴う広域的な影響評価のためのモニタリング

No.25 地点

広域的な地質環境特性の把握、地下水流动解析のための南側境界条件の設定、地下施設建設に伴う広域的な影響評価のためのモニタリング

なお、ボーリング孔長は No.25 を 1020m とし、残りの 2 孔は 520m とした。これは、深度 500m までの範囲の地下水流动系は清水川沿いの方向となっているとすれば、概念的には川の上流部に近い No.25 が地下水流动における涵養域に近く、涵養域であれば流出域に比べより深部まで地表からの地下水の流れが生じている可能性があったことと、地下水流动評価に重要である深度 500m 以深の地質環境に関するデータが不足していたことによる。

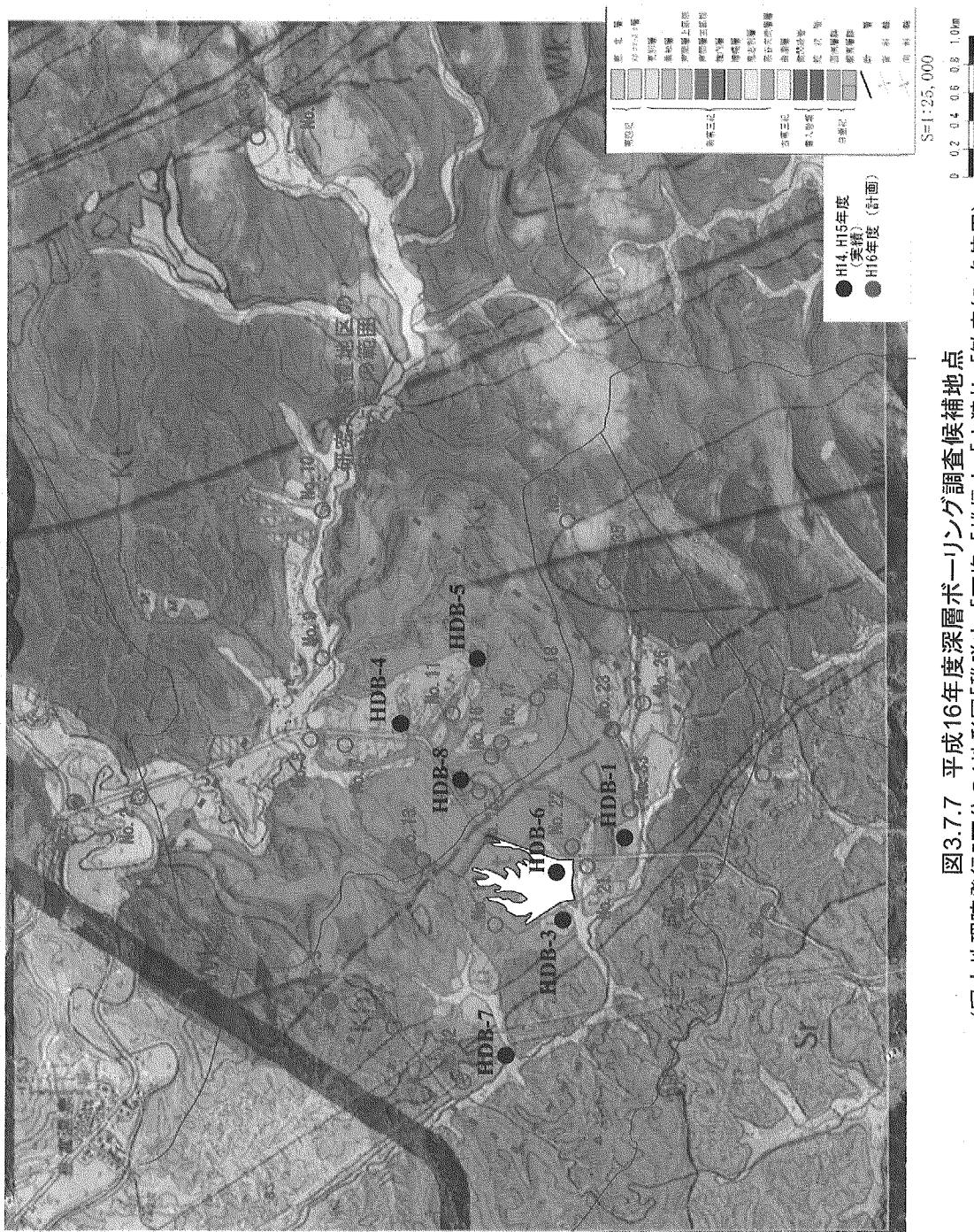


図3.7.7 平成16年度深層ボーリング調査候補地点
(国土地理院発行5万分の1地形図「稚内市」「天塩」「雄信内」「上韆」「敏音知」を使用)

(c) 調査仕様

平成 16 年度の深層ボーリング調査は、平成 15 年度までの計画に従い研究所設置地区の境界近くで実施し、研究所設置地区およびその周辺の三次元的な地質環境の把握および種々の解析評価の境界条件となりえるデータの取得を主目的として計画していた。また、幌延深地層研究計画第 1 段階の最後の深層ボーリング調査になると考えられるため、これまで得られている知見等をふまえ、第 1 段階の最終目標である地質環境モデルの構築および地下施設掘削に伴う影響予測を行うために必要と考えられるデータ取得を目標として実施する必要がある。このため、特に調査内容について、(b)で述べた検討結果等を踏まえ、研究所設置地区およびその周辺の地質環境モデル構築に必要なデータを取得するという観点から仕様を検討した。

① 地質構造

平成 16 年度ボーリング孔(HDB-9,10,11 孔)は、HDB-10 孔が大曲断層東側、HDB-11 孔が大曲断層西側に位置しており、先に述べたように研究所設置地区およびその周辺の地質環境の三次元的な連続性を評価する上では、これまでに地質・地質構造の連続性に言及できるデータが取得できている種目(岩芯観察、物理検層のうちの密度、速度検層および室内物理試験等)は、これまでのボーリング孔とほぼ同様の仕様で実施する必要があると考えられた。また、1000m ボーリング孔である HDB-11 においては、これまでデータが取得されていない増幌層に遭遇する可能性もあり、遭遇した場合には地質・水理・地球化学関連の調査が必須となるため、そのオプションを頭に入れておく必要があった。HDB-9 孔は大曲断層の地表推定位置に非常に近接しているため、地質関連の調査を重点的に行うことにより、HDB-9 孔の位置が大曲断層東西のどちらの構造に近いかや不連続面の分布特性を把握することにより、大曲断層に関連する情報や三次元地質構造モデルの精度向上の上で重要な情報を提供することができると考えた。

以上の検討の結果、全てのボーリング孔において下記の調査を必須項目として抽出した。

試験項目

- ・ 岩芯観察、EMI、アコースティックビューアー検層
- ・ 密度検層、速度検層、比抵抗検層

試験数量

- ・ HDB-9,10 孔 520m、HDB-11 孔 1020m

上記の調査は、ボーリング孔全長に亘って連続的に行われる必要がある。上記以外に後述する水理や地球化学と地質・地質構造との関連を評価する上では、地層中に分布する割れ目の形態や割れ目数と透水性との関連性に関する情報を蓄積する必要がある。これらについては、時間に制約のある深層ボーリング調査の中ではなく、平成 15 年度と同様に別件の研究として実施することが適当と考えた。

② 岩盤の水理

平成 15 年度までの調査により、勇知層、声問層および稚内層のうち、稚内層では割れ目のない部分と割れ目のある部分とに 3 オーダー程度の透水性の違いが見られること、大局的には割れ目のない部分も割れ目のある部分も透水性に関する深度依存性が見られ深度が深くなると透水性が減少すること、声問層については割れ目の有無によらず大きな透水性の違いがないこと等の知見が得られた。勇知層は、砂岩系の岩石であるため当初透水性が高いことが予想されていたが、結果として得られた値は $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ m/s}$ オーダーであり下位の声問層と比較してほとんど差がないことがわかった。しかし、割れ目が原位置岩盤の水理特性に与えている影響については、不明確な点も多かった。

特に、研究所設置地区およびその周辺部の岩盤の水理的な連続性を把握する上で有効な孔間試験を深層ボーリング調査時の時間的制約の中で実施することがほぼ不可能だったため、地質構造との関連を踏まえつつ上記の調査結果との整合性を把握できるような試験を実施する必要があると考えた。また、モデル化の上では、透水性のスケール効果(つまり試験区間に入っている割れ目数や開口幅の違いによる見かけの透水性の違い)も確認す

る必要があった。

APPENDIX に示した流れの形態(三乗則やダルシー則で近似できるレベルなのか否か)に関する情報も不確実性因子としてあげられていたが、これは当該地域の割れ目内の流動形態がチャンネルフローのような形態になっていなければ、室内試験レベルでも原位置の状態を再現し確認することは可能であると考えられた。透水性に及ぼすガスや応力依存性の影響についてはかなり難しい問題となるが、被圧状態でガスが溶解している状態での地下水サンプルが採取できればどの程度のガスがどの程度の圧力解放で抜けていくかを調べることは可能であり、応力依存性についても先に述べたような仮定が成り立てば応力を作用させた状態での亀裂透水試験によりデータを取得することは可能である。これらの情報は原子力機構核燃料サイクル工学研究所での幌延のコアを用いた物質移行に関する研究で得られつつあった。

以上により、深層ボーリング調査で行う水理試験では、①地質構造と岩盤の水理特性の関連性に関するデータ取得、②透水性のスケール効果、に関するデータ取得を中心として考えることが重要と思われた。さらに、1020m 挖削するボーリング孔で増幌層に到達した場合には、既存の地質環境モデルの大幅な見直し・変更が必要となり、これまで取得されていない増幌層のデータ取得が不可欠となることが想定された。

試験項目

- ・ 電気伝導度検層（湧水または逸水区間）
- ・ 同一箇所で区間長を変えたダブルパッカーによる透水試験（亀裂部・稚内層のみ）
- ・ 通常の透水試験（声問層・稚内層、稚内層は割れ目のない部分）

試験数量

- ・ HDB-9 孔 声問層：最低 2 点（割れ目の有無による違い＋スケール効果）
稚内層：最低 2 点（割れ目の有無による違い＋スケール効果）
- ・ HDB-10 孔 声問層：最低 2 点（割れ目の有無による違い）
稚内層：最低 2 点（割れ目の有無による違い）
- ・ HDB-11 孔 声問層：最低 6 点（割れ目の有無による違い＋深度依存性）
稚内層：最低 6 点（割れ目の有無による違い＋深度依存性）
(増幌層：最低 2 点（割れ目の有無）)

電気伝導度検層は、HDB-10,11 孔で実施（声問・稚内の平均透水係数分布を得るために）

③地下水の地球化学

平成 15 年度までの調査結果から、地球化学的な観点からは、大曲断層東西での地下水の水質分布が深度方向に異なること、総溶存成分量の深度変化と地表物理探査 (AMT) より得られた鉛直断面内の比抵抗分布は概ね一致していること、地層水とコア隙水の水質に大きな差がないこと、大曲断層東西での地下水塩分濃度分布には違いがあるが、水素酸素同位体比は変化していないこと等の知見が得られていた。前述のようにこれらの三次元的な広がりを把握することが、地球化学モデルの構築に重要な意味を持つことから、比較のために平成 15 年度までの調査とほぼ同等のものを行う必要があると判断した。また、原位置での Eh(酸化還元電位), pH データの計測は、第 2 段階以降に実施予定の人工バリア等原位置試験の仕様検討において必要不可欠なデータとされていた。

以上により、深層ボーリング調査で行う地球化学的調査では、①現在の大曲断層直交方向の水質分布の三次元的な広がりを把握すること、②原位置での Eh, pH に関する情報を取得すること、を基本として調査項目を選定する必要があると考えた。さらに、岩盤の水理に関する調査と同様、HDB-11 孔が増幌層に到達した場合には、これまで取得されていない増幌層のデータが必要と思われる。

試験項目

- ・ 同一箇所で区間長を変えたダブルパッカーによる地層水採取（深度 500m 付近）
- ・ コア抽出水の分析

試験数量

- ・ HDB-9 孔 声問層：最低 1 点（割れ目有）
稚内層：最低 1 点（割れ目有）
- ・ HDB-10 孔 声問層：最低 1 点（割れ目有）

- 稚内層：最低 1 点（割れ目有）
 - ・ HDB-11 孔 声問層：最低 3 点（割れ目有）
 - 稚内層：最低 3 点（割れ目有）
 - （増幌層：最低 1 点（割れ目有））
- 原位置での Eh, pH 測定：深度 250, 500, 750, 1000m
 コア抽出水の分析は、適当なサンプリング間隔で各孔とも実施。

④岩盤力学

地下施設位置が既に決定されていたため、その設計という観点では平成 16 年度の深層ボーリング調査で取得すべきデータはほとんどない。しかし、研究所設置地区全体を対象とした力学モデルの構築のためには、各ボーリング孔における室内物理試験／一軸圧縮試験は実施しておくことが重要と判断した。また、声問層の岩石は拘束圧によっては破壊形態が変化することが明らかとなっていたため、岩盤モデル（数学モデル）の構築のために、モールクーロン型の破壊基準以外にも対応できるデータを取得する必要があった。このため、等方圧密試験等を新たに追加した。

一方、プライオリティーは低いが、研究所設置地区内の三次元的な応力場評価の観点からは、今年度研究所設置地区用地境界付近に掘削するボーリング孔で応力測定を実施することは意味があり、このデータがあれば原子力機構 東濃地科学センターにて開発している三次元応力場を解析的に評価する手法を適用することができる。

以上により、深層ボーリング調査で行う岩盤力学に関する調査では、①これまでの知見に基づき各地層毎の物性値分布を把握すること、②数学モデル構築に資するようなデータを取得すること、を基本として調査項目を選定した。ただし、その範囲は声問・稚内層のみで十分であり、仮に増幌層が出現した場合にもその調査を行う必要はないとの判断した。

試験項目

- ・ 室内物理試験（単位体積重量、含水率、空隙率、弾性波速度等）
- ・ 一軸圧縮試験（声問層／稚内層）
- ・ 等方圧密試験（声問層（+稚内層））
- ・ 高拘束圧時の三軸圧縮試験（稚内層）

試験数量

HDB-9: 50m ピッチでの室内物理試験、一軸圧縮試験

HDB-10: 50m ピッチでの室内物理試験、一軸圧縮試験

HDB-11: 50m ピッチでの室内物理試験、一軸圧縮試験

等方圧密試験（声問層、稚内層各 1 深度）

高拘束圧三軸圧縮試験（稚内層 1 深度）

応力測定は予算的に余力があれば実施（HDB-9, 10 孔で 2 深度、HDB-11 孔で 3-5 深度）

3.8 平成 16 年度実績

(a) ボーリング孔配置

当初計画したボーリング孔配置のうち、No.36 地点は鳥獣保護区に入っていることが判明したため、深層ボーリング調査の目的は変更せず平成 15 年度までの計画において予定した No.5 地点に近く、より西側の No.10 地点に変更した（図 3.8.1）。

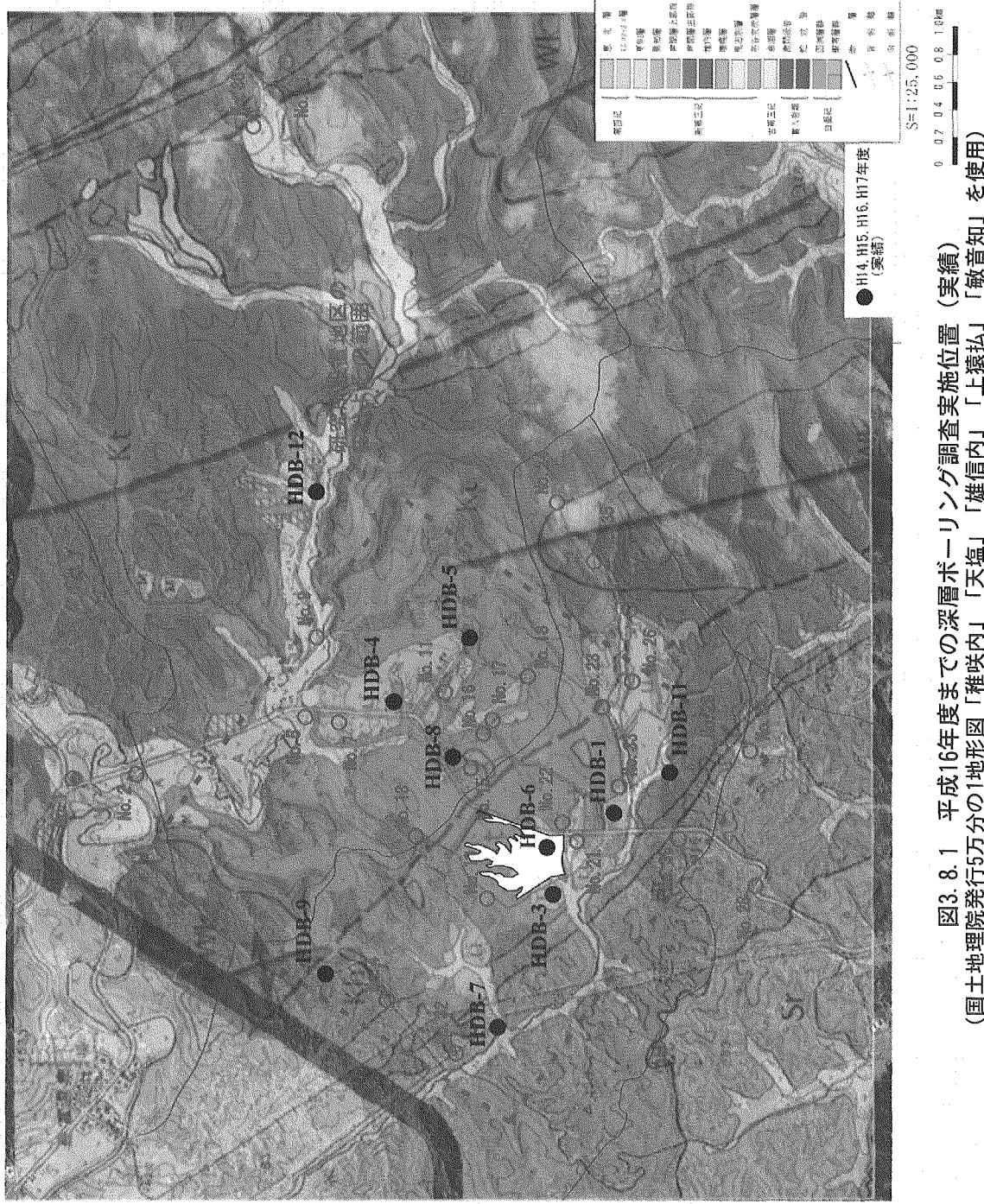


図3.8.1 平成16年度までの深層ボーリング調査実施位置（実績）
(国土地理院発行5万分の1地形図「稚咲内」「天塩」「雄信内」「猿払」「敏音知」を使用)

(b) ポーリング掘削

HDB-9,HDB-11 孔については当初計画どおりの深度(HDB-9:520m, HDB-11:1020m)で掘削した。HDB-10 孔は、掘削深度を 570m とし、最深部 50m を孔径約 100mm の裸孔区間とした。これは、調査技術の適用試験の場所として裸孔部を確保したいとのニーズがあり、それは平成 15 年度までの力学的調査の結果から大曲断層東側に位置している HDB-10 孔においてのみ可能と判断したためである。なお、掘削開始時からペントナイト泥水を用いた掘削を行ったため、孔径拡大は最小限にとどめられた。また、過去数年間のポーリング掘削の実績を踏まえて実施したため、平均的な掘削速度は 24 時間作業で 15m/日程度と最も良好であった。

(c) 調査

物理検層、地質観察、水理試験・採水/分析は、数量は当初の仕様どおりであったが、ポーリング孔位置の地質構造を踏まえ、HDB-9 孔は稚内層のみ、HDB-11 孔は声問層のみで水理試験・採水/分析を実施した。地質関連では、平成 16 年 10 月に開催した幌延国際ワークショップや NAGRA からの指摘を受け、岩盤中に含まれる粘土鉱物量を同定するための追加試験を行った。力学関連の原位置試験については、NAGRA からの指摘（遷移帶付近で応力状態が変化している可能性）を反映し、新たに水圧破碎法による応力測定を追加実施した。また、原位置の透水性に及ぼす割れ目の影響を解釈するための室内試験（单一割れ目の透水性の応力依存性）と平成 17 年 5 月から 8 月の間に滞在した国際特別研究員(Prof. J.-C. Roegiers)からのコメントをうけ DSCA 法による応力測定も実施した。

(d) 平成 16 年度の深層ポーリング調査の評価

HDB-9,10,11 孔は選定した研究所設置地区の境界部付近に配置したポーリング孔であり、地質環境モデルの構築とともに解析などの境界条件設定のためのデータ取得およびモニタリング孔として重要である。この意味では、全孔とも所定深度までの掘削を終了しケーシングも当初予定通りの形で挿入していることから、モニタリング孔としての使用に当たっては問題ないと考えられる。

HDB-9 孔は断層推定位置に最も近いポーリング孔であったため、大曲断層と交差する可能性があった。現状のデータからは断層交差部は明確ではないが、これまでの深層ポーリング調査の中で最も多くの断層岩が確認されている。

HDB-10 孔の位置では、これまでの断層東側の深層ポーリング調査結果とほぼ同様の地質構造が推定されていたが、想定よりも声問層の層厚が厚く、出現した声問層の物性は HDB-7 孔の最下部で見られる声問層の特徴に良く似ていることがわかった。このことから HDB-10 孔の浅部には勇知層との境界付近の声問層が現れている可能性が高いと推定される。なお、平成 17 年度に実施した微流量・流向測定装置の原位置適用試験を最深部の裸孔区間で実施し、当初の想定どおり HDB-10 孔最深部が孔の変形もなく裸孔で保持されていることが確認できた。

HDB-11 孔は、唯一の 1000m 孔であったが、断層西側においては深度 1020m まで声問層・稚内層で構成されていることが判明した。また、調査の中で重要課題であった原位置での pH, Eh 測定も実施できた。これらの結果から、これまで不明確であった地下水流动解析の下部境界条件設定のための情報がある程度取得できたと同時に、原位置地下水の pH, Eh データに基づく地下水の物理化学パラメータ設定の信頼度が向上した。

上記のことから、HDB-9,10,11 孔の深層ポーリング調査は、概ね所期の目的を達成していると判断される。なお、HDB-11 孔におけるポーリング調査は、平成 17 年 6 月に終了した。

4. 幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における深層ボーリング調査計画の評価

4.1 地上からの調査研究段階における目標に対する評価

2. で述べたように、深層ボーリング調査に関する地上からの調査研究段階での目標は以下の2点であった。

- ・ 地表から地下深部にいたる地質環境の把握および地下施設建設に伴う周辺地質環境への影響予測
- ・ 調査技術と関連機器の開発

前者の目標に対しては、3. で述べたように深層ボーリング調査及びそれ以外の調査の結果から、研究所設置地区およびその周辺の地質環境の概念モデルを構築し、そのモデルに基づき各年度ごとの深層ボーリング調査計画を作成してきた。また、その概念モデルの妥当性についても、実際の調査結果を踏まえ定性的な修正/更新を行いつつ次の深層ボーリング調査の計画に反映した。特に、場のモデル（三次元物性分布モデル）の構築に関して、想定した地質環境と実際の調査結果から得られる知見とを比較し不確実性が大きいものを抽出した上で、それを深層ボーリング調査計画に可能な限りフィードバックして調査を行うことに留意した。そのため、平成17年度までの調査結果をまとめた最終的な地質環境モデルは、定性的ながら最も不確実性が低減されているものであると言える。このようなアプローチによって構築された場のモデルの妥当性は、今後の第2段階以降の調査研究により、定量的に明らかになっていくこととなる。

対象となる場所がある程度特定された段階で実施する最初の深層ボーリング調査が最も重要であり、かつその調査では多方面から可能な限りの多くの情報を取得するように努力すべきであるということである。地質環境は多様性を有するため、一般性のある特徴は限られ、場所ごとに固有の特徴を有する場合が多い。この特徴を踏まえた概念化を適切に行うための情報を、最初の調査で見出せるか否かがその後の調査を効率的・合理的に進める上で非常に重要である。

後者の目標については、先行している東濃での調査研究の成果として構築された調査手法を適用しつつ、問題点を明らかにし改良を加え、幌延のような新第三紀堆積岩、塩水系地下水、溶存ガスなどの特徴を有する場に適用可能な調査技術（例えば、水理試験装置の改良、各種長期モニタリングシステムの適用、原位置採水の代用となる間隙水抽出による地下水分析 等）の有効性を確認したという意味では、所期の目的に対する一定の成果を得たものと考える。

最終的に課題として残されたのは、特に前者の目標に対して、前述した概念化→計画→調査→概念の更新→計画→調査という一連の流れが定性的な評価にとどまっていることである。これをより定量的な評価を組み入れ、調査のさらなる効率化を図るために、最初の“概念化”の部分をグレードアップし、“概念化+モデル化/予測”まで踏み込まざるを得ない。

概念化/モデル化/予測のレベルは、その程度を問わなければ、本研究で言えば地上からの調査段階で求められている目標（地質環境の予測）を満たせるものであれば良いが、実際の処分事業では処分場設計や安全評価までを考慮した定量的な評価を行うことになる可能性があり、その場合にはより多くの時間と労力が必要であろう。

現状では、これを単年度の業務サイクルの中で実施することは現実的に不可能である。なぜならば、深層ボーリング調査自体がその作業だけで許認可手続きを含めほぼ1年間の期間を要すること、そのデータに基づく地質環境の概念化/モデル化/予測の作業も同等程度の期間を要すること、フィードバックをかける必要があるためそれらの作業は決して同時に並行で行えないためである。したがって、定量的な評価に基づく深層ボーリング調査の実施を行うことは今後の課題として残されている。

4.2 プロジェクトの進捗に対する評価

幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階は、平成 12 年度～平成 17 年度までの 5 カ年となっており、その中で各種の調査結果に基づき幌延町内において研究所設置地区および研究所設置場所までの選定を行いつつ 4.1 の目標に対する成果を挙げるという、原子力機構にとってこれまで経験のないプロジェクトの流れで進められてきた。

この一環として実施した深層ボーリング調査は、平成 13 年度から平成 17 年度までの 5 カ年間で 11 孔実施し、その総延長が 6600m 程度となる短期間で大量のデータ取得と処理をする作業となった。このような調査も本質的にはこれまで経験がないものであった。

実務的な制約条件として、原則各年度の深層ボーリング調査は 1 年度内で終了することが求められていた。平成 13 年度の研究所設置地区選定のための最初の深層ボーリング調査(HDB-1,HDB-2)こそ単年度で終了することができなかったものの、平成 14 年度以降の調査は上記の現実的な制約条件を満足した形で進めることができた。

また、今回の経験から時間的な制約条件(1 年単位)で効率良く合理的に調査を進めるためには以下の作業が必要不可欠であるといえる。

- ・ 深層ボーリング調査は常にそれが可能な用地を確保することが大前提にある。深層ボーリング調査に必要な用地の面積は、これまでの深層ボーリング調査の経験から概ね判断できる。この情報を踏まえ、許認可手続きの期間も考慮し、対象領域の中で与えられた期間中にどの地点で用地が確保できるかを深層ボーリング調査開始前にあらかじめ調査しておくことは、深層ボーリング調査計画の立案・実施のみならずその後の用地使用までを考えても不可欠な作業である。今回の深層ボーリング調査計画は研究所設置地区選定後に実施したその作業の結果をベースとしたため、1 年間という非常に限定された期間の中ですべての作業を実施することが可能となった。
- ・ 深層ボーリング調査を技術的な観点から合理的に行うためには、当然のことながらなんらかの形で概念化→計画→調査→概念の確認・更新→・・・を行うことが必要不可欠である。これは、深層ボーリング調査に 1 年間の期間がかかる以上、計画作成は常にそれ以前に行う必要があることであり、それは深層ボーリング調査中に常に最初に想定した“概念”が本当に正しいものであったかどうかをチェックする必要があることを意味する。深層ボーリング調査中には定量的なモデル化・解析によるチェックをかけることは時間的に不可能であることから、可能な限り場の特徴を取り入れた概念モデルを作成しそれに基づくチェック・更新作業を行うことが重要である。
- ・ 許認可手続きは、前倒しで実施できるものは可能な限り早期に実施する必要がある。許認可手続きの段階で当初想定していなかったものが入ってくる可能性は常に存在しており、それによる工程遅延などを避けることは計画通りプロジェクトを進行される上で非常に重要である。また、このためには常に計画策定が十分事前に行われておく必要がある。

5. 取得したデータ量と地質環境の理解度に関する定量的な検討例

4.までに示した深層ボーリング調査計画への定性的な評価のほか、地質環境調査の中で常に問題となる“どれだけの深層ボーリング調査を行えば地質環境を理解できるのか”という課題に対し、幌延深地層研究計画の一環として地球統計学的手法を用いデータ量と地質環境の理解度に関する定量的な検討を試みている⁷⁾。以下にその事例を紹介する。

5.1 基本的な検討の流れ

平成13年度までの調査結果から、岩盤中の比抵抗分布と地下水中の総溶存成分濃度に相関性があることが定性的に把握されていた。一方、比抵抗分布は、空中電磁探査や地上電磁探査などにより、幌延町内のかなりの範囲にわたって三次元的な分布が得られていた。さらに、以降の地上物理探査や深層ボーリング調査により逐次データが蓄積されることが見込まれていた。

本検討では、これらの情報を利用し、以下の2つの視点から検討を行っている。

- ・ 得られたデータを用い客観的・定量的かつ短時間で地質環境モデルの更新が行える方法論を検討する。
- ・ 得られたデータを用い、新第三紀堆積岩を対象にデータ量と地質環境の理解度を定量的に評価し、どの程度の深層ボーリング調査を行えばいいかという一つの評価事例を提示する。

具体的な検討の流れは以下の通りである。

- ① 比抵抗値と各パラメータの相関性検討
- ② 空中物理探査、地上物理探査結果およびボーリング孔における物理検層結果という3種類のスケールの異なる調査データの統合とその結果に基づく三次元比抵抗分布モデルの構築（初期モデル）（図5.1,5.2）
- ③ 比抵抗分布モデルを用いた各パラメータの三次元分布モデルの構築
- ④ 新たに追加されたデータに基づく三次元比抵抗モデルの妥当性検証および更新
- ⑤ 新たに追加されたデータに基づく各パラメータの三次元分布モデルの妥当性検証および更新

検討の初年度には①～③までを実施し、それ以降は基本的に④、⑤を繰り返すという作業を行っている。このほか、平成17年度の研究においては深層ボーリング調査の順序を入れ替えることで三次元モデルの精度がどのように変わるかという検討も実施中である。

5.2 検討結果の概要

1) 比抵抗値と各パラメータとの相関関係

ここでは、三次元物性分布モデル構築のため、非線形な相関関係を線形的な相関関係に変換する手法（Box-Cox変換）を適用し、各パラメータと比抵抗値の相関関係を調べた。ただし、ここでは一つの方法論として地質構造は考慮せず単に取得したデータを集めて統計的に評価した。

結論としては、検討したパラメータの中で比抵抗値との相関性が高かったのは、定性的な相関関係が認められた総溶存成分濃度であった。物理物性（密度、有効空隙率など）や力学物性は統計的に相関はないという結果となっている。

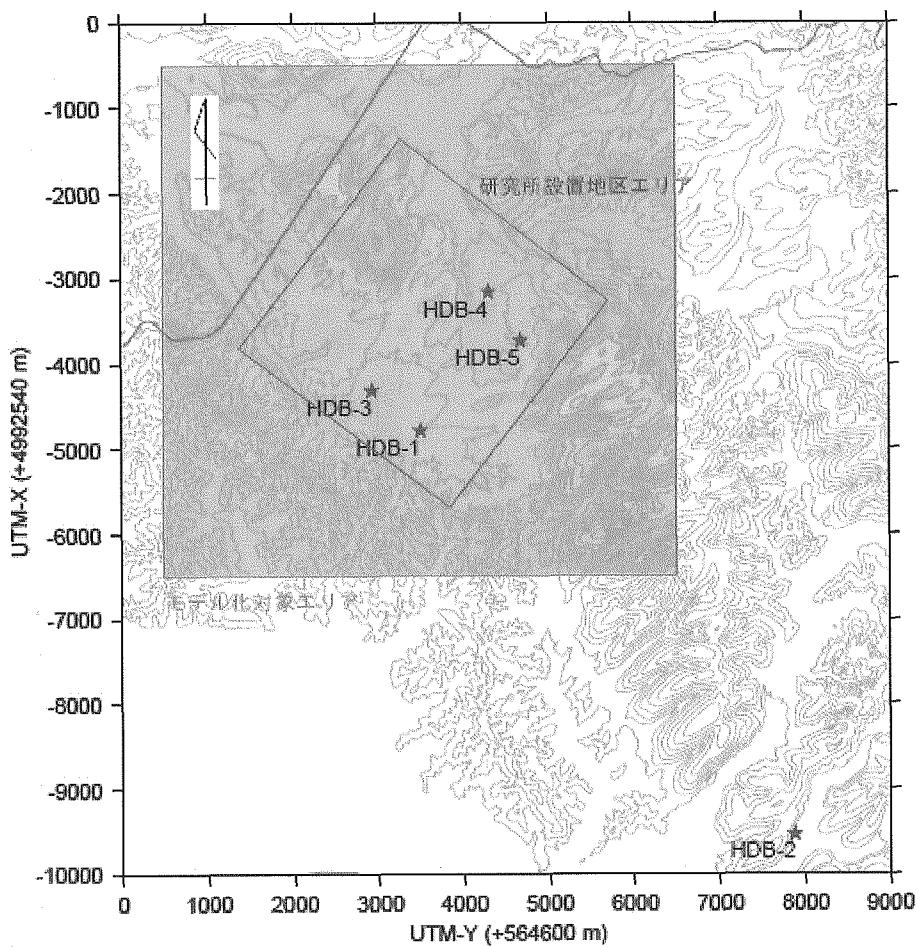
2) 空中物理探査、地上物理探査結果およびボーリング孔における物理検層結果という3種類のスケールの異なる調査データの統合とその結果に基づく三次元比抵抗分布モデルの構築（初期モデル）

ここでは、スケールと解像度の異なる各調査で得られた比抵抗分布を用い、空中物理探査の範囲で深度500m程度までの三次元比抵抗モデルを作成した。具体的には、空中物理探査～地上物理探査～物理検層間の相関性をまず検討し、その結果に基づき三次元比抵抗モデルを構築した。

検討の結果、地上電磁探査結果とボーリング孔で実施した物理検層結果は良く対応し明瞭な相関関係があることがわかった。一方、地上電磁探査結果と空中物理探査結果の間に統計的な相関関係は認められなかったこと（相関係数で0.1～0.4程度）から、評価対象

となる範囲を研究所設置地区を含む 7km 四方に絞って再評価した。その結果、地上電磁探査結果と空中電磁探査で得られた比抵抗値の相関係数が 0.6 程度まで改善したため、この範囲を目安として以降の評価を実施している。

以上の地上電磁探査～物理検層および空中物理探査～地上物理探査間の統計的な相関関係を用い、地球統計学の最も単純な方法であるクリギングにより三次元比抵抗分布モデルを作成した。結果を図 5.3 に示す。



調査名	データ抽出範囲（位置）
電気検層	試錐孔 5 孔 (HDB-1~HDB5) において深度方向 0.1m 間隔
地上電磁探査	7 本の測線において深度約 27,000m までの鉛直断面
空中電磁探査	幌延町中央部から西側エリアを 50m 格子間隔、深度は 10m ピッチで約 200m まで

図 5.1 解析対象領域（図中のピンク色のライン）

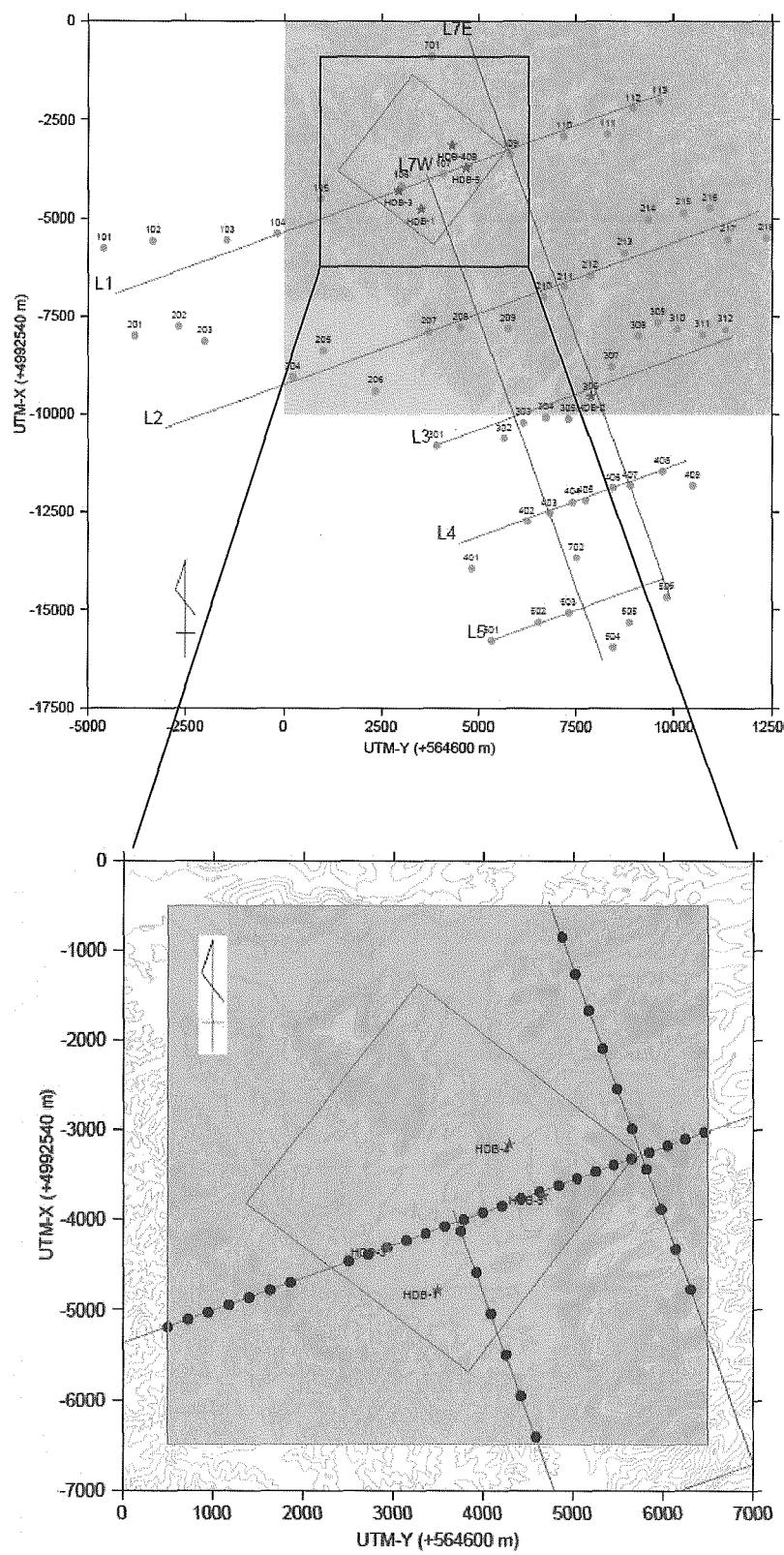


図 5.2 解析対象領域内における地上物理探査測線位置（平成 14 年度地上電磁探査）

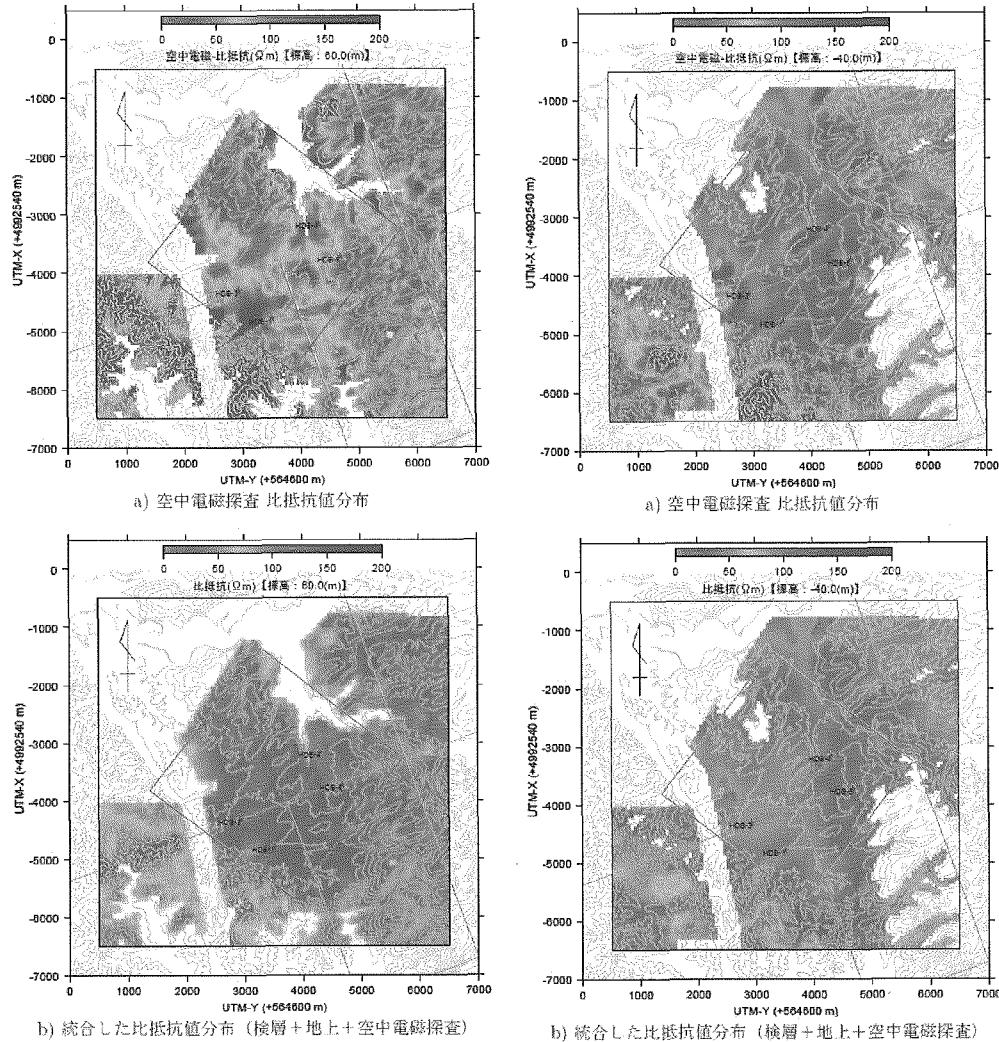


図 5.3 空中電磁探査、地上電磁探査および深層ボーリング調査時の比抵抗探査結果を統合して構築した三次元比抵抗分布モデル

3) 比抵抗分布モデルを用いた各パラメータの三次元分布モデルの構築

図 5.3 の三次元比抵抗分布モデルを用い、比抵抗値との相関関係に基づいて構築した総溶存成分濃度の三次元分布モデルを図 5.4 に示す。地球統計学的手法を用いているため、推定値とともにその不確実度をあらわす誤差分布も同時に求めることができる。本モデルを用い、HDB-1,3,4,5,6,7,8 孔の深層ボーリング調査結果によるモデルの評価等を実施した。

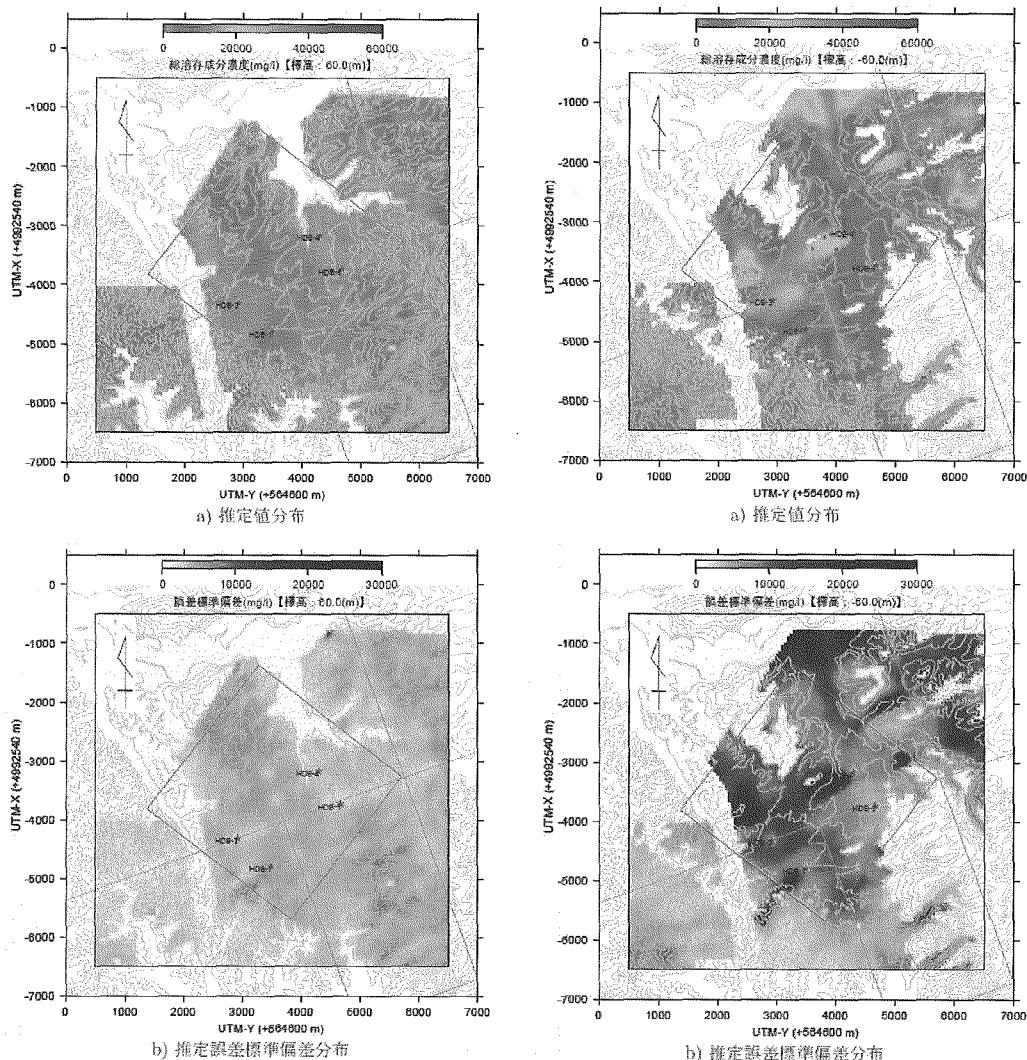


図 5.4 三次元比抵抗分布モデルを用い構築した解析対象領域内の三次元総溶存成分の濃度分布

4) 新たに追加されたデータに基づく三次元比抵抗モデルの妥当性検証および更新事例

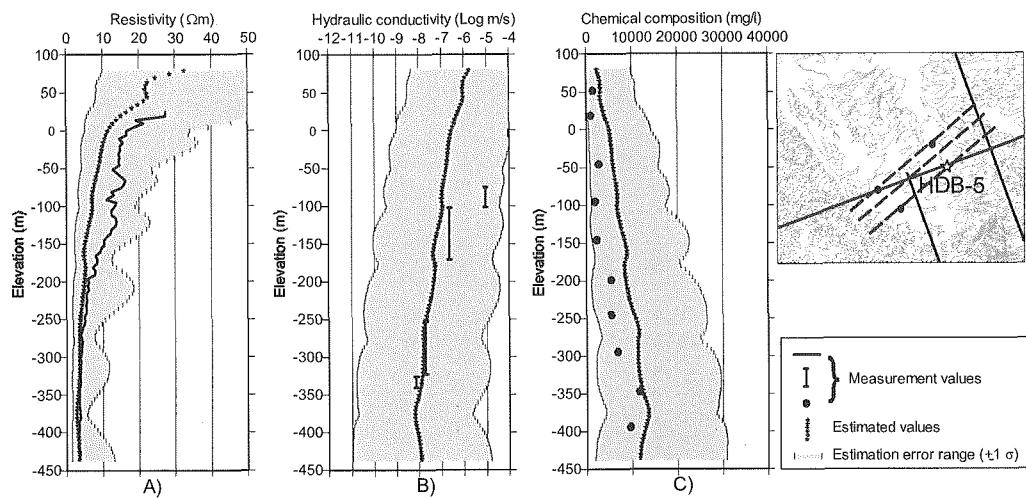
ここでは、3)に示した初期モデルを HDB-1,3,4,5,6,7,8 孔の深層ボーリング調査結果から得られたデータによって検証および更新した結果を例示する。

図 5.5 a)は、初期モデル構築時に使ったデータセットから HDB-5 孔のデータを除き、三次元比抵抗モデルと各パラメータ～比抵抗値の相関関係を再構築し、HDB-5 孔の場所のパラメータを予測した結果と HDB-5 孔の計測結果を比較したものである。同図より、予測した比抵抗、透水係数および地下水の総溶存成分濃度分布は、実測データの分布と調和的であり、実測値の範囲も予測結果の標準偏差（信頼性区間 68%）の範囲内に入っている。

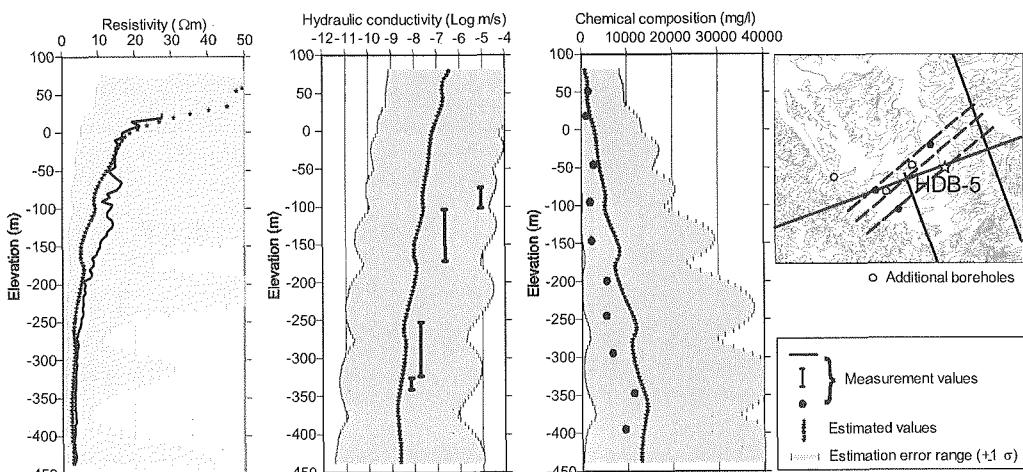
図 5.5 b)は、前述と同様 HDB-5 孔のデータをはずし、かつ新たに掘削したボーリング孔 (HDB-6,7,8 孔)のデータを追加して、各パラメータ～比抵抗値の相関関係、三次元比抵抗モデルおよび各パラメータの三次元分布を更新した結果と HDB-5 孔の実測値を比較したものである。a)の結果と同様、予測した比抵抗、透水係数および地下水の総溶存成分濃度分布は、実測データの分布と調和的であり、実測値の範囲も予測結果の標準偏差の範囲内に入っている。しかし、推定値の予測精度については、比抵抗値と相関性の高い総溶存成分濃度に

ついて若干の改善が見られるが、透水係数については逆に推定値からはずれてきている。このように、データが単純に増加するだけでは、予測値の精度は改善せず標準偏差がむしろ大きくなるケースもあることがわかる。

ここで示した検討は継続中であり、最終的には地上からの調査研究段階で実施した全 11 孔の深層ボーリング調査のうち HDB-2 孔を除くすべてのデータを用い、同様の検討を行う予定である。



a) HDB-1, 3, 4 孔のデータを追加し三次元比抵抗分布モデルを更新した後に実施した HDB-5 孔地点の透水係数および地下水中の総溶存成分濃度分布予測結果と実測値の比較



b) HDB-6, 7, 8 孔のデータを追加 (HDB-5 は除く) し三次元比抵抗分布モデルを更新した後に実施した HDB-5 孔地点の透水係数分布および地下水中的総溶存成分濃度予測結果と実測値の比較

図 5.5 HDB-5 孔地点を対象に三次元比抵抗分布モデルより予測した岩盤の透水係数および地下水中の総溶存成分濃度分布と実測値の比較

5.3 データ量と地質環境の理解度について

本検討では、上記に示したような形で各深層ボーリング調査結果に基づく事前の予測モデルの妥当性評価及びモデルの更新作業を行い、前述したように最終的にデータ量と予測

精度の関係（地質環境の理解度）を事例的に示す予定である。

しかし、4)の検討結果は、今回適用したような誰がやっても同じ解答が得られるような方法、すなわちデータを単純に増加させ統計的に処理する方法では、必ずしも不確実度が低減するわけではないことを定量的に示しており、不確実度の低減には別のアプローチが必要なことを示唆していると思われる。このような別のアプローチ方法については、別途検討を実施しているところである。

さらに、今後、深層ボーリング調査などの実施の順番を入れ替えたデータセットを構築し、今回の地上からの調査段階における3カ年間の深層ボーリング調査の実施手順がどの程度妥当であったかを定量的に評価することを試みる予定である。これによりどの程度の深層ボーリング調査をどのような順番で行ったときに不確実度が低減するかの評価が可能になると思われる。

6. おわりに

深層ボーリング調査は、人間が直接目視できない地下の状態を直接知ることができる唯一の手段であり、それに要する労力・時間・コストは他の地表からの調査に比べ莫大である。

そのため、“結果”だけではなく“成果”を重視するのであれば、目標設定は可能な限り具体的であるべきであり、かつ長期間にわたる調査であることから設定された目標に対し個々人の認識の差が現れないようにすることがプロジェクトとしてみた場合は非常に重要である。

また、地質環境は“場所”に応じて程度の差はある固有の特徴を有している。逆に言うと、それに付随して調査や解析評価の質・量・時間とも変わってくるため、一つのプロジェクトに要する時間を技術的な側面だけで決めるることはほとんど不可能に近い。それは、与えられたプロジェクト期間内に所期の成果を上げることを求められることを意味するため、4)で示したような実務的な側面も踏まえた計画策定・調査の実施が必要である。

参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団:貯蔵工学センター立地環境調査 - 深層ボーリング報告書 -, 原子力機構技術資料 JNC TJ1027 98-012, 1987
- 2) 五十嵐亨, 池田和隆, 東宏幸, 今村杉夫, 大島雅浩:ヘリコプターによる空中物理探査, 原子力機構技術資料 JNC TJ1420 2001-035
- 3) 原子力機構:高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 -平成13年度報告-, 原子力機構技術資料 JNC TN1400 2002-003, pp.3-61~3-106, 2002
- 4) 原子力機構:幌延深地層研究計画 平成13年度調査研究結果と研究所設置地区選定, 原子力機構技術資料 JNC TN1400 2002-017
- 5) 原子力機構:高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 -平成14年度報告-, 原子力機構技術資料 JNC TN1400 2003-004, pp.3-59~3-116, 2003
- 6) 原子力機構:高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 -平成15年度報告-, 原子力機構技術資料 JNC TN1400 2004-007, pp.3-71~3-137, 2004
- 7) 本多眞, 鈴木誠, 桜井英行, 岩佐健吾, 松井裕哉:地盤統計学的手法を用いた地質環境モデル構築技術に関する研究, 原子力機構・清水建設共同研究報告書 JNC TY5400 2005-001, 2005

This is a blank page.

APPENDIX

幌延地域の地質環境モデル構築において考慮すべき
不確実性因子の検討(平成15年度実施)

This is a blank page.

幌延地域の地質環境モデル構築において考慮すべき不確実性因子

平成15年度前半までに原子力機構が実施した地上からのボーリング調査などの結果に基づき地質環境モデルを構築し、それを用いた解析・評価を行う場合に、大きな影響を及ぼすと考えられる不確実性要因とその影響度について検討した。

1. 地質構造モデル

1.1 場のモデル化

① 増幌層と断層との位置関係

(不確実性が生じる要因)

White (2002)のモデルでは、N5 断層が増幌層を横切り、その N5 断層は、CR2 断層と交差するところに終端がある。しかしながら、増幌層の上部あるいは下部に位置する他の層はこの断層の影響を受けていない。増幌層と各断層との関係に不確実性が存在する。

(モデル化に及ぼす影響)

広域の地質構造モデルの精度、広域地下水流动の評価精度、広域の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

② 断層系の交差状況

(不確実性が生じる要因)

複数の断層のつながりや交差（一方が横切り、他方はそこで終端となる）の関係についてデータが不十分なため複数の可能性が残されている。

(モデル化に及ぼす影響)

広域の地質構造モデルの精度、広域地下水流动の評価精度、広域の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

③ 断層面の幾何形状

(不確実性が生じる要因)

White (2002)のモデルでは、断層面は複雑な形状を持つ局面として表現されている。しかしながら、データが不十分なためこれがEarthVisionのグリッディングに起因するものなのか実際の形状に対応するものなのかが不確定である。

(モデル化に及ぼす影響)

広域の地質構造モデルの精度、広域地下水流动の評価精度、広域の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

④ 大曲断層の存在

(不確実性が生じる要因)

最近の物理探査結果は大曲断層の存在を支持するものと考えられるが、ボーリング孔において断層が直接確認されているわけではなく、その存在に関しては不確実性が残されている（地下数百 m～数 km で断層面を伴う変位が終了しており、それ以上は変形構造だけ存在している（伏在断層）可能性もある）。

(モデル化に及ぼす影響)

広域／研究所設置地区の地質構造モデルの精度、広域／研究所設置地区の地下水流动の評価精度、広域／研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑤ 大曲断層の方向 (dip)

(不確実性が生じる要因)

大曲断層の方向として最近の地質図では東向きの dip を持つものと仮定されているが、過去の解釈ではこれと正反対のものが仮定されており、不確実性がある。→現在では、東傾斜とするのが妥当である。反射断面、地表推定トレース、変形構造、テクトニックセッティングなどは東傾斜を肯定する。西傾斜でないと言い切ることはできないが、東傾斜である可能性はかなり高い。

(モデル化に及ぼす影響)

広域／研究所設置地区の地質構造モデルの精度、広域／研究所設置地区の地下水流动の評価精度、広域／研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑥ 大曲断層の東西での各層の厚さ

(不確実性が生じる要因)

大曲断層の西側と東側とでは、各層の厚さが顕著に異なる。層厚が異なる層の堆積期に断層が活動していれば、起こりうる現象である。その変位センスは現在と違っていても構わないが、堆積時期と活動時期が一致しているか否かは不明であり不確実性がある。

(モデル化に及ぼす影響)

広域／研究所設置地区の地質構造モデルの精度、広域／研究所設置地区の地下水流动の評価精度、広域／研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑦ 大曲断層の変位

(不確実性が生じる要因)

HDB1, 2, 3, 4 孔のデータに基づけば、大曲断層の変位は 300m 程度に過ぎないものと考えられるが、この数値は、過去の解釈における 1,100 m という大きな変位とは顕著に異なる。これらのボーリング孔データと整合するためには、稚内層と声問層の境界を平均で 822 m 上方に移動する必要がある。変位量は計測する場所で異なると考えれば、北進地区で 300 m、幌延町の南部で 1100m という変位量分布の違いがある可能性があるので、稚内層と声問層の境界を移動する必要はない。また、1100 m という値は断層のすぐ両側で比べているのではなく、ある程度の幅を持って比べている。北進地区でも同様の観点から解釈すれば、HDB7 で勇知層と声問層の境界が深度 365 m 付近であることから、365 m 以上の変位があると捉えることも可能である。さらに反射法地震探査断面では、市街地付近の地下で勇知層と声問層の境界が深度 1000 m 付近に存在すると解釈され得ることから、変位量が 1000 m 以上とすることも可能である。

(モデル化に及ぼす影響)

広域／研究所設置地区の地質構造モデルの精度、広域／研究所設置地区の地下水流动の評価精度、広域／研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑧ 大曲断層以外の断層や破碎帯の分布

(不確実性が生じる要因)

ボーリング孔調査における逸水状況などから、大曲断層以外にも、水みちとなる破碎帯が存在すると想定される。このような水みちとなる断層や破碎帯の規模や分布、走向・傾斜についてはそれらの幾何学性を特定しうるような十分なデータがない。

(モデル化に及ぼす影響)

広域の地質構造モデルの精度、広域の地下水流动の評価精度、広域の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑨ 地表部と岩盤の境界面位置の分布に関する不確実性

(不確実性が生じる要因)

研究所設置場所周辺以外の地表部（未固結）と岩盤の境界の幾何学的分布は、現状で

は十分なデータがないため地下研を対象にした地下水流動や地球化学モデルの検討の不確実性因子になる。

(モデル化に及ぼす影響)

広域の地下水流動の評価精度、広域の地球化学モデルおよび物質移行（含む、生物圏評価）に影響を及ぼす可能性がある。

2. 岩盤の水理モデル

2.1 場のモデル化

① 地質構造モデルに含まれる不確実性の影響

(不確実性が生じる要因)

前項に挙げた地質構造モデルの不確実性は、層区分や境界位置の設定等を通じて水理地質構造モデルの不確実性となる。

(モデル化に及ぼす影響)

広域の地下水流動の評価精度、広域の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

② 研究所設置地区を対象とした解析のための境界条件

(不確実性が生じる要因)

解析対象領域として広域の地下水システムよりもずっと小さいスケールを取り上げかつその領域境界の水理的なデータがないため、側方境界条件に関して大きな不確実性が含まれる。また、HDB-2 孔において確認された高い水圧についても、堆積時に発生した過剰間隙水圧の残留である可能性も否定できない。また、上部境界条件（表層水理）としての地下水位の分布、地表部の水理特性、涵養・流出量の分布や位置に對しても、観測網がまだ不十分であるため不確実性がある。

積雪の影響で、特に上部境界条件を規定する表層水理特性の季節変動が無視できない可能性がある。その場合、どの程度の深度まで季節変動が生じるかについて不確実性がある。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地下水流動の評価精度、研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行（含む、生物圏評価）に影響を及ぼす可能性がある。

③ 地球化学とのカップリング（ここでは塩分濃度）における初期条件

(不確実性が生じる要因)

これまでの解析的研究から、地下水中に含まれる塩分は堆積時に取り込まれた古い海水が希釀されている途中であるという可能性が示されている。このような非定常現象を表現する解析を行う場合の初期条件には大きな不確実性が生じる。

(モデル化に及ぼす影響)

広域／研究所設置地区的地下水流動の評価精度、広域／研究所設置地区的地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

④ 断層の透水性

(不確実性が生じる要因)

稚内層及び声問層内の断層には、恐らくは構造的な要因で生成したと考えられる可塑性を持つ粘土層が挟在している。この粘土層は、断層と直交する流れを制限する効果を持つかもしれないがその空間分布特性については不確実性がある。稚内層、声問層とともに、マトリクス部の透水性が小さく、大規模な粘土層となっていない限り、遮水性を示さないと想定され、可能性としては極めて低い。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区的地下水流動の評価精度、研究所設置地区的地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑤ 各層毎の物性値およびその差

(不確実性が生じる要因)

これまでの調査では、水理試験と採水を合わせて実施していたために、相対的に透水性が高い領域に試験が集中していたため、各層の代表的な透水係数、比貯留係数などのパラメータやその違いに関して不確実性がある。層毎の透水性のコントラストは、地下水流动のみならず地下水化学とも関係する可能性がある。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地下水流动の評価精度、研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

2.2 現象のモデル化

⑥ 地下水流動形態（亀裂の影響）

(不確実性が生じる要因)

これまでの調査では、水理試験と採水を合わせて実施していたために、相対的に透水性が高い領域に試験が集中していたため、声問層及び稚内層における地下水がマトリクス部と亀裂をどの程度のバランスで流れているのかについて不確実性が残されている。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地下水流动の評価精度、研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑦ 構成式

(不確実性が生じる要因)

これまでの調査では原位置の割れ目の開口幅に関する情報がないため、三乗則、ダルシー則の成立性についての検討が不十分である。また、透水性の温度依存性、塩分濃度依存性などは小さいかもしれないがありうる。

地下施設建設を対象とする場合には、応力再配分による空洞周辺岩盤中の透水性の変化も不確定因子となる。さらに、条件によって、メタンが溶存せずに気体として存在する可能性がある。このような不飽和状態の場合の透水性に対してはデータがなく不確実性が残されている。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地下水流动の評価精度、研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑧ 密度勾配に起因する流れ

(不確実性が生じる要因)

当該地域には、比較的浅い深度に分布する塩分の低い淡水系の地下水と、より深部の塩分の高い地下水とが存在し塩分勾配があるが、この塩分勾配に起因する密度差が地下水流动に及ぼす影響についてはデータがなく不確実性が残されている。また、密度や粘性係数への温度の影響についても考慮すべきかと思われる。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地下水流动の評価精度、研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

3. 地下水の地球化学モデル

3.1 場のモデル化

① 地質構造及び水理地質モデルの不確実性の影響

(不確実性が生じる要因)

地下水の水質形成は、そのソース、地質構造、地下水流動等に大きな影響を受けるため、上記2つのモデルの不確実性は、地球化学モデルの構築の上の不確実性要因となる。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

② 深部の地球化学条件

(不確実性が生じる要因)

採水された地下水サンプルの化学的特徴に影響を及ぼすプロセスについては不明点が多く、深部の地球化学条件(pH,Eh等)の推定には不確実性が含まれている。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

③ 異なる水塊の配置

(不確実性が生じる要因)

比較的浅い深度に分布する塩分の低い淡水系の地下水と、より深部の塩分の高い地下水との間の境界の位置に関しては、これまでの調査においてデータが不十分なため不確実性が含まれる。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

④ 塩淡境界近傍の塩分勾配

(不確実性が生じる要因)

塩淡境界近傍の塩分勾配が拡散による混合を示唆する緩慢なプロファイルを示すのか、あるいは移流に支配された明瞭な境界を示すのかは、これまでの調査においてデータが不十分なため不確実である。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑤ 塩淡境界の形状

(不確実性が生じる要因)

塩淡境界が比較的単純な面的形状を呈するのか、あるいは複雑に入り組んだ形状を持つのかがこれまでの調査においてデータが不十分なため不確実である（後者を示すデータも得られている）。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

3.2 現象のモデル化

⑥ HDB-3孔において比較的浅部に塩水をもたらすプロセス

(不確実性が生じる要因)

HDB-3孔において比較的浅部に存在する塩水が、上向き流れによるものなのか、あるいは、声問層に含まれていたかつての塩水が低透水性のために保存されているのかが地下水流动形態がわからっていないため不明である。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑦ 塩水の起源

(不確実性が生じる要因)

塩分の高い地下水は、海水とは異なる同位体組成を示しており、起源に関して不確実性が存在する。仮に、この地下水が海水起源のものであるとすると、他の水による希釈や岩石との間の化学的相互作用が生じていることを意味する。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑧ 塩水の起源となるプロセスの生じた位置

(不確実性が生じる要因)

塩水の起源となるプロセスが現在塩水の存在する場所で生じたもの（例えば、声門層あるいは稚内層内での diagenetic な過程）であるのか、あるいは、他の場所で生じたものであるのかが地下水流動形態がわかっていないため不明である。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

⑨ 地下水の滞留時間

(不確実性が生じる要因)

上記の結果として、水質データから推測される各層内の地下水の滞留時間には大きな不確実性が含まれている。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の地球化学モデルおよび物質移行に影響を及ぼす可能性がある。

4. 物質移行モデル

4.1 場のモデル化

① 物質移行に関するパラメータ（流量、流速、移行経路、流出域、移行時間等）
(不確実性が生じる要因)

流量、流速、移行経路、流出域、移行時間等の物質移行評価については、水理地質構造モデルの不確実性が直接反映される。また、水理地質構造モデルとのスケールの違いなども上記項目の不確実性因子になり得る
(モデル化に及ぼす影響)
研究所設置地区の物質移行評価の精度に影響を及ぼす。

② 物質移行特性

(不確実性が生じる要因)

文献情報の活用や予備的な解析による予測などを実施することに対して、地質構造モデルの不確実性（岩種、鉱物組成等）や地球化学モデルの不確実性が、分配係数、拡散係数、溶解度等の不確実性因子となる。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の物質移行評価の精度に影響を及ぼす。

4.2 現象のモデル化

③ 物質移行形態

(不確実性が生じる要因)

物質移行経路や経路上で生じる諸現象の特定に際し、地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデルなどの理解の程度の不確実性、およびそこでの各種プロセス等に関する理解の程度の不確実性が直接反映される。また、それらを出発点に検討することになるシナリオ解析の不確実性因子ともなる。

(モデル化に及ぼす影響)

研究所設置地区の物質移行評価の精度に影響を及ぼす。

5. 岩盤力学モデル

5.1 場のモデル化

- ① 声問層のポアソン比
 (不確実性が生じる要因)
 ポアソン比は、数値解析上は重要なパラメータであるが、声問層については室内で測定したS波速度と原位置で計測したそれから求められる両動弾性係数に差があるため、値の設定について不確実性が存在する。
 (モデル化に及ぼす影響)
 モデル化に及ぼす影響：地下研究施設の設計や EDZ（掘削影響領域）の範囲・物性を解析評価する精度に影響を及ぼす。
- ② 岩石が有する強度／変形特性の異方性の程度およびその不均一性
 (不確実性が生じる要因)
 これまでの室内試験結果では、水平方向の力学特性が鉛直方向より高く、地下施設の設計は鉛直方向の試験結果を用いているため問題となっていないが、もし低い場合は地下施設設計および施工に関して問題が発生する可能性がある。
 (モデル化に及ぼす影響)
 モデル化に及ぼす影響：地下研究施設の設計や EDZ の範囲・物性を解析評価する精度に影響を及ぼす。
- ③ 断層東側の応力状態
 (不確実性が生じる要因)
 西側に比べ東側のデータが不足しており、不確実性が高い。
 (モデル化に及ぼす影響)
 研究所設置地区全体の力学モデルの精度に影響を及ぼす。

5.2 現象のモデル化

- ④ 構成式（応力ひずみ関係、破壊基準）
 (不確実性が生じる要因)
 研究対象となる岩石は、拘束圧／ひずみ速度／含水状態変化等によってその挙動が変化するため、それを表現するための構成式や破壊基準に不確実性が存在する。
 (モデル化に及ぼす影響)
 地下研究施設の設計や EDZ の範囲・物性を解析評価する精度に影響を及ぼす。
- ⑤ 岩盤中の不連続面の影響
 (不確実性が生じる要因)
 速度検層結果等からはあまり大きな影響はないと考えられるが、不連続面の力学特性に関するデータは取得しておらず掘削時の岩盤の挙動に及ぼす不連続面の影響については不確実性がある。
 (モデル化に及ぼす影響)
 地下研究施設の設計や EDZ の範囲・物性を解析評価する精度に影響を及ぼす。

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方米	m ²
立体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア每平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア每メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル每立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ每平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
平面角	ラジアン ^(a)	rad
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)
周波数	ヘルツ	Hz
圧力	ニュートン	N
エネルギー, 仕事, 熱量	パスカル	Pa
工率, 放射	ワット	W
電荷, 電気量	クーロン	C
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V
静電容量	ファラード	F
電気抵抗	オーム	Ω
コンダクタンス	ジemens	S
磁束密度	テスラ	T
磁感应度	ウェーバー	Wb
セルシウス温度	セルシウス度	°C
照度	ルクス	lx
(放射性核種の)放射能	ベカル	Bq
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy
ギガ一分与, カーマ		
線量当量, 周辺線量当量		
方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際には、使用する時は記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号 “1” は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号 sr を単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 m°C のように SI 接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
粘度	パスカル秒	Pa · s
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m
表面張力	ニュートン每メートル	N/m
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²
熱容量, エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K
質量熱容量 (比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)
質量エントロピー	每ケルビン	J/(kg · K)
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m · K)
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²
誘電率	ファラード每メートル	F/m
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg
吸収線量	グレイ每秒	Gy/s
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² · sr)

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エク	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アトト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10 (Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	mi	1 海里=1852m
ノット	kt	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘルツ	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイニ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn · s/cm ² =0.1Pa · s
ストーカス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホルト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² SV
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002 × 10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキ	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W · m ⁻² · Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
トーラ	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力口リ	cal	1 cal=1J=1Nm=10 ⁻⁷ m
ミクロ	μ	1 μ=1um=10 ⁻⁶ m