

「地質環境総合評価技術高度化開発
-次世代型サイト特性調査情報
統合システムの開発-」

平成19年度成果報告書

Establishment of Advanced Integration Technology for Site Characterization
of Deep Geological Repository
- Development of Information Synthesis and Interpretation System -
Annual Report 2007

大澤 英昭 太田 久仁雄 濱 克宏 澤田 淳
竹内 真司 天野 健治 三枝 博光 松岡 稔幸
宮本 哲雄 豊田 岳司 岩月 輝希 前川 恵輔
國丸 貴紀 新里 忠史 浅森 浩一 平賀 正人
山中 義彰 重廣 道子 島田 顕臣 阿部 寛信
梅木 博之

Hideaki OSAWA, Kunio OTA, Katsuhiro HAMA, Atsushi SAWADA
Shinji TAKEUCHI, Kenji AMANO, Hiromitsu SAEGUSA, Toshiyuki MATSUOKA
Tetsuo MIYAMOTO, Gakuji TOYODA, Teruki IWATSUKI, Keisuke MAEKAWA
Takanori KUNIMARU, Tadafumi NIIZATO, Koichi ASAMORI, Naoto HIRAGA
Yoshiaki YAMANAKA, Michiko SHIGEHIRO, Akiomi SHIMADA, Hironobu ABE
and Hiroyuki UMEKI

地層処分研究開発部門

Geological Isolation Research and Development Directorate

November 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人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>)
より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

目 次

1. はじめに	1
1.1 本事業の背景と目的	1
1.2 本事業の概要	3
1.3 本報告書の構成	7
2. 次世代型サイト特性調査情報統合システム (ISIS) の開発	8
2.1 従来の地質環境調査評価に関する体系化技術の課題	8
2.2 ISIS 開発の視点とアプローチ	13
2.2.1 地質環境調査評価に必要な知識とその分類	13
2.2.2 ISIS 開発の手順	16
2.2.3 エキスパートシステムの実現可能性	18
2.2.4 処分場設計・性能評価との連携	19
2.2.5 沿岸域プロジェクト	21
2.3 平成 19 年度の ISIS 開発の達成目標	23
3. 地質環境調査評価情報の分析・整理	26
3.1 基本的考え方	26
3.2 東濃地域の地質環境調査事例を対象とした情報の抽出及び分析	27
3.2.1 背景	27
3.2.2 アプローチ	29
3.2.3 分析結果	36
3.3 諸外国の地質環境調査事例を対象としたノウハウ・判断根拠などの抽出・分析・整理	81
3.3.1 背景	81
3.3.2 アプローチ	82
3.3.3 分析結果	82
3.4 沿岸域を対象としたノウハウ・判断根拠の蓄積	113
3.4.1 背景と目標	113
3.4.2 アプローチ	118
3.4.3 実施結果	121
4. ISIS の開発	179
4.1 システムの基本コンセプト	179
4.1.1 エキスパートシステムに向けた地質環境調査評価の分析・整理の対象範囲	179
4.1.2 インデックスフローダイアグラムの構築	181
4.1.3 知識協働ダイアグラム	185
4.2 知識構造のモデル化	188
4.2.1 知識構造のモデル化手法	188
4.2.2 階層モデルによる知識構造の表現	190
4.2.3 知識ネットワークによる知識構造の表現	192
4.2.4 より深い知識の知識ベースの構築	195
4.2.5 不確実なルールに基づくエキスパートシステム	197

4.3 プロトタイプシステムの構築	200
4.3.1 システムの基本設計	200
4.3.2 プロトタイプシステムの構築	204
4.3.3 詳細設計に向けた課題の抽出	234
5. まとめ	237
5.1 本年度成果のまとめ	237
5.2 今後の課題	240
謝辞	245
付録 1：地質環境調査評価情報の統合化に関する既存事例	247
付録 2：東濃の調査事例の分析結果	421
付録 3：諸外国の調査事例の分析結果	527
付録 4：沿岸域プロジェクトの調査結果	561
付録 5：プロトタイプの概要	631
付録 6：地質環境総合評価技術高度化開発委員会	731

CONTENTS

1. Introduction	1
1.1 Background and purpose of the project	1
1.2 Summary of the project	3
1.3 Structure of the report	7
2. Development of Information Synthesis and Interpretation System (ISIS)	8
2.1 Issues of conventional synthesis methodology for site characterization	8
2.2 Approach for development of ISIS	13
2.2.1 Classification of knowledge on site characterization	13
2.2.2 Procedure of the development	16
2.2.3 Feasibility of construction of expert system	18
2.2.4 Linkage with design of repository and performance assessment	19
2.2.5 Project for characterisation of the coastal geological environment	21
2.3 Goals in FY 2007	23
3. Information analysis of site characterization	26
3.1 Basic concept	26
3.2 Technical know-how and decision process for characterization of Tono geological environment	27
3.2.1 Background	27
3.2.2 Approach	29
3.2.3 Results	36
3.3 Know-how and the technical basis for site investigation developed in foreign programmes	81
3.3.1 Background	81
3.3.2 Approach	82
3.3.3 Results	82
3.4 Technical know-how and decision process for characterization of the coastal geological environment	113
3.4.1 Background and Purpose	113
3.4.2 Approach	118
3.4.3 Results	121
4. Development of intelligent system	179
4.1 Basic Concept of the System	179
4.1.1 Target for trial of expert system building	179
4.1.2 Development of index-flow diagram	181
4.1.3 Diagram for knowledge coordination	185
4.2 Knowledge modeling	188
4.2.1 Methods for knowledge modeling	188
4.2.2 Knowledge mapping	190

4.2.3 Network model	192
4.2.4 Accumulation of deep knowledge	195
4.2.5 Treatment of epistemic uncertainty	197
4.3 Development of prototype	200
4.3.1 Basic design of the system	200
4.3.2 Development of prototype	204
4.3.3 Issues of detailed design	234
5. Summary	237
5.1 Results of the study	237
5.2 Future issues	240
Acknowledgment	245
Appendix 1 : Case example of conventional synthesis methodology	247
Appendix 2 : Technical know-how and decision process for characterization of Tono geological environment	421
Appendix 3 : Know-how and the technical basis for site investigation developed in foreign programes	527
Appendix 4 : Technical know-how and decision process for characterization of the coastal geological environment	561
Appendix 5 : Summary of the prototype	631
Appendix 6 : Committee of establishment of comprehensive site characterization technology	731

付録 3

諸外国の調査事例の分析結果

- A. 現地において議論を行った各機関の専門家リスト
- B. 各国における調査で得られた経験的知見とその活用

This is a blank page.

付録 3-A

現地において議論を行った各機関の専門家リスト

This is a blank page.

・ フィンランド :

Posiva : A. Mustonen (水理学、地球化学)

Pöyry Environment: E. Heikkinen (物理探査)

T. Ahokas (物理探査)

H. Ahokas (水理学)

・ スウェーデン :

SKB : M. Olsson (計画立案)

P. Wikberg (計画立案、地球化学)

K-E. Almen (計画立案)

M. Lundgren (物理探査)

L. Stenberg (物理探査)

GEOPOINT: M. Laaksoharju (地球化学)

・ 英国 :

BGS: R. Show (地質学、鉱物学)

T. Milodowski (地質学、鉱物学)

M. Cave (物理探査)

J.P. Busby (物理探査)

Quintessa: R. Metcalfe (地球化学)

Intellisci: A. Bath (水理学、地球化学)

This is a blank page.

付録 3-B

各国における調査で得られた経験的知見とその活用

(沿岸域を対象としたボーリング調査技術)

This is a blank page.

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (1/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおい て参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
	情報の特徴・留意事項	沿岸域の結晶質岩からなる処分場候補地において、必要な地質環境特性の概要が把握され、地下施設の建設が進んでいる段階で、実施主体が行うべき補足的な調査、施設建設に反映すべき調査、技術。	沿岸域の結晶質岩からなる処分場候補地において、地質環境特性の概要が把握されている段階で、実施主体が行うべき調査や技術。	沿岸域の堆積岩を対象として、地質環境特性(処分場の立地可能性)の評価を開始する段階で、実施主体に必要なボーリング調査の考え方や技術、処分場建設後のモニタリング孔の考え方。	—	—	—
	ボーリング調査全体の目的	地質構造の把握(海域に繋がっている地質構造、塩水の浸入状態など)、地下施設のレイアウト設計。	処分場候補地域の地質環境の把握、地質構造(Major・Minor Deformation Zone)を含む岩盤特性の把握。	地下施設建設予定地周辺の地質・地質構造、水理特性、地下水水質の把握。	—	—	—
	調査技術・試験の考え方・手順に影響を与えている因子 1) 政治・社会因子 2) 事業段階・組織因子 3) 地質環境条件因子 4) 技術的因子	2-1) 2020年から処分を開始する計画で地下施設の建設が進行中であり、地下施設の増設のための調査を行っている。その工程と予算上の制約がある。 2-2) 調査地域の地質環境特性の概要を把握し、確認の段階にある。 3) 低透水性岩盤であり、汚染水の排除に数ヶ月間を要する。 4) 独自の検層機器、長期にわたって採水調査が可能な体系(採水装置を保有。低コストで自動排水が可能)となっている。	2-1) 2009年に処分場を選定、2020年に処分場を操業開始、それまでに地質環境評価と処分場レイアウト設計、安全評価を行う。 2-2) 調査地域の地質環境特性の概要を把握し、確認の段階。 3) 低透水性岩盤であり、汚染水の排除に数ヶ月間を要する。 4) 一連の地球化学調査システム(アンビリカルホースシステム-モニタリングシステム-現場分析車)を保有している。	1) 1990年代に中低レベル放射性廃棄物処分場の建設計画が中止されている。 2) 地質分野の専門家が調査の主体。ボーリング調査の項目は、処分場のレイアウト、安全評価への反映を目的として決める。 3) 炭化水素ガスが産出する環境であり、海岸線に淡水の湧水地点が多数あることから、淡水が海側に押し出されており、沿岸域の浅部に海水が浸入していないと想定されている。 4) 要素技術は、10年以上前の技術を用いている。	—	1) 幌延町外での調査は不可能。海域については未調整。 2) 3~5年間のプロジェクトであり、主に産業総合研究所、電力中央研究所が現場調査を行う。ボーリング孔本数が数本程度と少ない。 3) 比較的透水性が高いと想定される軟岩(堆積岩)である。 4) 揚水試験装置及び封圧採水用ボトルを備えた採水装置など使用する装置は未定である。自動排水が可能で低コストの採水装置はない。	各国・機関の経験的知見を、地質や水質などで類型化、整理することで、任意の地質環境に適用すべき技術やノウハウとして、参照することが可能となる。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (2/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地質・地質構造	ボーリング孔掘削時の計画立案に関わる基本的考え方	<ul style="list-style-type: none"> ボーリングの位置、方向は、地質構造モデルの確認・拡張、施設レイアウトへの反映などその時の目的により決定する。意思決定に際しては、ボーリング計画ごとに Posiva の研究者及び委託先の研究者で編成したグループで議論して決定し、外部の評価者に評価も受ける。 ボーリング掘削の途中で掘削を中断して水理試験や採水調査を実施しない。理由は、岩盤の透水性が低いことが分かっており、掘削中に水理試験、採水を実施すると時間がかかり、次のボーリング調査の支障となるためである。 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリングの位置、方向は、事前の物理探査結果、既存のボーリング調査の結果に基づく地質構造モデルとその時点のニーズを踏まえて決定する。 地質を砕屑物で確認するため、検層のみを行う場合、掘削水を得るため、孔間水理試験などを目的とする場合は、ノンコア（パーカッション）掘削で経費を節約する。 掘削長100 mごとに揚水試験、採水を行い透水性と水質の概略を把握しながら掘削する。また、割れ目帯などの水理地質構造に遭遇した時点で掘削を中断し、水理試験、採水を行う。周辺に既存ボーリング孔があり、必要な情報が得られていて、他の目的で掘削を行う場合は、このような段階ごとの調査はしない。 	<ul style="list-style-type: none"> 初期のボーリング孔は処分場候補地から沿岸までの、地質・水理地質断面図の作成を目的として、海岸線に直交する線上に配置した。 その後のボーリング孔は、地震波探査結果やボーリング地点までの交通、許認可などを踏まえて、処分場候補地を通過する地下水流線の涵養域に当たる領域と海岸線に平行する線上に配置した。 詳細な水理地質構造モデルの構築を行ってから確認のためのボーリング孔を掘削し、流出域の地質構造、地下水水圧分布、塩水・淡水の分布の調査を行う。 ボーリング調査では、深度 50m ごとに掘削を止め、水理試験と採水調査を実施する。これにより概略の透水性や水質を把握し、その後の詳細な試験計画の素材とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング孔の位置、方向は地質構造モデルとその時点のニーズを踏まえて決定する。 地質構造モデルの構築は物理探査結果、既存ボーリングの情報に基づいて構築する。 特にコアを回収する必要がない場合は、必要深度までノンコア掘削を行う。 初期段階の調査では、海岸線に直交及び平行する線上にボーリング孔を配置し、三次元的に地質構造や、岩盤の水理特性を評価する。 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング孔の配置については、地質構造モデルを参照し、複数掘削が可能な場合は、三次元的に地質構造や、岩盤の水理特性の評価が可能な配置とする。 コア回収の必要性を確認し、不要な部分はノンコア掘削を検討する。 岩盤の透水性から予想される水理試験・採水の工期を踏まえて計画立案する。 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング孔の配置については、地質構造モデルを参照し、複数掘削が可能な場合は、三次元的に地質構造や岩盤の水理特性の評価が可能な配置（例：海岸線に直交、平行な線上）とする。 コア回収の必要性を確認し、不要な部分はノンコア掘削を検討する。 初期段階の調査では、掘削過程の水理試験・採水、概要を把握した段階では、掘削後の水理試験・採水と、段階に応じて試験計画を使い分ける。また、柔軟な計画立案のために、低コストの採水装置があると良い。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (3/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地質・地質構造	ボーリング孔掘削技術	<ul style="list-style-type: none"> • 基本的なケーシングプログラムでは、深度約 40 m までノンコア掘削 (孔径 194 mm)、ケーシング (内径 134 mm) を挿入した後、以深をコア掘削 (孔径 76 mm) する。 • コア掘削区間は、コア回収率が高い三重管掘削工法を使用する。 • 調査に必要なポンプを挿入する孔径を確保するためノンコア掘削区間を大孔径とする。 • ノンコア掘削区間の地質環境情報の取得のため、本孔近傍に別途コアボーリング孔を掘削し、必要な調査を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> • 深度約 100 m まではノンコア掘削 (孔径 200 mm) である。この大孔径部にスクリーン (小さな孔) を多数開け、エアリフトにより、ボーリング掘削時も連続的に地下水をくみ上げることで、掘削屑を排出する方法を採用する。 • コア掘削区間は、コア回収率の高い三重管掘削工法であり、孔径は 76 mm、コア径は 51 mm である。 	<ul style="list-style-type: none"> • 深度約 100 m まではノンコア掘削を行い、ケーシングを挿入する。それ以深の掘削は三重管掘削工法でコア掘削を実施する。孔径は 96 mm である。 • なお、海岸線のボーリング孔では、基盤岩までノンコア掘削としている。この理由は当時の認識で、PRZ の深部の調査を重視しており、海岸線の浅部のデータを必要とできていなかったためである。 	<ul style="list-style-type: none"> • 掘削時のスライムの効果的な排除のため、大孔径部でのエアリフト揚水が有効である。 • コアの回収率を重視する場合は、三重管掘削工法を採用する。 	<ul style="list-style-type: none"> • コアの回収率を重視する場合は、三重管掘削工法を採用する。 • スライムの排除方法として、掘削時の連続的エアリフトについても検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> • コアの回収率を重視する場合は、三重管掘削工法を採用する。 • 浅部でノンコア掘削を行う場合は、ノンコア掘削区間の地質環境情報の取得のため、本孔近傍に別途コアボーリング孔を掘削し、必要な調査を行う。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (4/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地質・地質構造	ボーリング孔掘削時の品質管理	<ul style="list-style-type: none"> 掘削水には、電気伝導度検層への影響も考慮して淡水を使用する。 検出が容易なため、トレーサにはウラニウムを使用する。他のトレーサの使用経験はない。 全深度まで掘削後の孔内洗浄方法は、物理・化学的影響が小さいという理由から金ブラシを採用する。薬品は化学影響が大きい。高圧水での洗浄は、強度の弱い割れ目帯において孔径が広がるという弊害がある。 掘削中の洗浄は、工程を踏まえた費用対効果から、エアリフトを採用する。 掘削中は、ボーリング掘削状況の確認や水理試験、採水箇所に関わる情報を得るため、送排水の量、電気伝導度、ウラニウム濃度、掘削水圧、カッピングス（量、岩種、割れ目帯の概略を把握するため）、掘削速度などをモニタリングする。 	<ul style="list-style-type: none"> 調査ボーリング孔の近辺に、孔洗い用水を得るためのノンコアボーリング孔を設け、一定品質の用水を確保する。 深度約100 mまでの区間で連続的に掘削屑を排除することで、掘削屑が割れ目を閉塞する可能性を低減することができる。 孔洗浄は、ブラシを用いた物理的洗浄の後、孔底から4回以上、窒素ガスを用いたエアリフトによる孔内洗浄を行う。この回数はボーリング孔内のスライムの量に依存する。 ボーリング掘削終了後に約50 mごとにボーリング孔壁にマーキングし、物理検層の深度補正を行う。 掘削状況の把握、掘削後の水理試験、採水のための品質管理として、送排水の水質、トレーサ（ウラニウム、アミノG酸）濃度、掘削パラメータをモニタリングする。 微生物調査用のボーリングについては、掘削水循環装置に紫外線殺菌装置を付け、生菌数のモニタリングを行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削水にはポリマー（Xanthan gum）を添加した泥剤を使用する。また、アルカリ剤を、掘削機材の腐食を防ぐために掘削水に加える。泥水掘削の採用理由は、当時主流の掘削技術として、石油掘削の技術を用いたからであり、実際に、初期のボーリング孔において清水掘削を行った結果、予期せず孔曲がりが発生している。その結果、計画外の予算使用を避けるため泥水掘削の方針が定着した。また、セラフィールド計画末期に、BH-16で清水掘削した結果、深度300 mで孔崩壊し、掘削不能となった事例もある。 Nirexの調査はボーリングコア回収率を重視しており、当時のボーリング技術者が石油掘削で一般的に用いられているポリマーとベントナイトの混合泥剤の使用を決めた。コア径が大きいのも、割れ目部の鉱物調査に重点をおいているため。これらの課題に重点が置かれるのは、調査を主導した技術者が地質分野の専門家であり、地質の把握を重視するためである。 	<ul style="list-style-type: none"> 物理化学的影響の小さいブラシによる洗浄とエアリフトを併用することで、孔内及び孔壁の洗浄を効果的に行うことができる。 検層時の正確な深度を確認するための品質管理として、岩盤が固く孔内崩壊が懸念されない場合は、孔壁へのマーキング手法が有効である。 ボーリング孔掘削状況の把握、掘削後の水理試験、採水のための品質管理として、送排水の水質、トレーサ濃度、掘削パラメータなどをモニタリングする。 	<ul style="list-style-type: none"> 孔内及び孔壁の洗浄方法として、物理化学的影響の小さいブラシによる洗浄とエアリフトを併用する方法について検討する。 ボーリング孔掘削状況の把握、掘削後の水理試験、採水のための品質管理として、送排水の水質、トレーサ濃度、掘削パラメータなどをモニタリングする。 コアを主体とした調査を行う場合は、泥剤を使用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 物理化学的影響の小さいブラシによる洗浄とエアリフトを併用することで、孔内及び孔壁の洗浄を効果的に行うことができる。 ボーリング孔掘削状況の把握、掘削後の水理試験、採水のための品質管理として、送排水の水質、トレーサ濃度、掘削パラメータなどをモニタリングする。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (5/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
岩盤の水力特性	水力試験方法	<ul style="list-style-type: none"> • PFL (Posiva Flow Log) により透水性割れ目 (水みち) の位置と透水性、間隙水圧を測定した後、水力試験装置 (HTU-Tool) を用いて約 2 m の区間長でなど間隔での水力試験を実施する。HTU-Tool を用いた水力試験は、主として深度 300~700m の廃棄体埋設相当深度を対象に実施する。(PFL の測定限界は透水量係数 (T) で $T > 10^{-9}$ (m²/s)、HTU の測定下限値は区間長 2 m の場合、透水性係数 (K) = 10^{-11} (m/s) ・水力試験は定圧注水試験と回復試験を実施する。注水は通常、約 20 分間実施し、その後約 10 分間の圧力回復測定を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> • 水力試験はボーリング掘削中に実施する、100 m 毎の揚水試験で概略の透水性を把握し、その結果を基に、透水性の高い区間 (透水性係数 (K) $> 10^{-9}$ (m/s)) では、更に 20m 区間長での試験を実施する。この透水性係数の基準は、岩盤の平均的透水性係数値とされている。 • 廃棄体埋設予定深度 (深度 350~700 m 付近) ではキャニスタの長さ (8 m) を超えない 5 m 区間長の試験を実施する。掘削中の揚水試験以外は、全て注水試験 (定圧注水試験とその後の回復試験) を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 深度 50 m ごとに掘削を中断し、シングルパッカーによるスラグ試験を実施し、概略の水力特性を把握する。 • その後、50 m ごとの水力試験結果や掘削終了後の物理検層の結果に基づいて、水みちを対象にダブルパッカーにより、短区間長の水力試験 (揚水試験) と採水を実施する。短区間の水力試験により、詳細な水みちの水力特性を把握する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 岩盤の水力特性 (水力試験・採水に要する工期) と調査開始時の達成目標 (未知の情報の取得なのか既存情報の確認なのか) に基づいて、最深部までボーリング孔掘削後、試験を行うか、掘削途中段階で試験を行うかを検討する。 • 概要把握のための長区間の試験と詳細を把握するための短区間の試験を組み合わせる。 • 詳細な水みちを把握するための流体検層を実施する。 • 試験データの品質を確保するためには、試験手法や時間は区間の透水性に応じて変更することが望ましい。 	<ul style="list-style-type: none"> • 初期段階の未知の情報取得するための試験であり、ボーリング掘削過程で遭遇する地質構造に合わせて柔軟に水力試験を行う。 • 概要を把握するための長区間の試験と詳細を把握するための短区間の試験を組み合わせる。 • 詳細な水みちを把握するための流体検層を実施する。 • 試験データの品質を確保するためには、試験手法や時間は区間の透水性に応じて変更することが望ましい。 	<ul style="list-style-type: none"> • 岩盤の水力特性 (水力試験・採水に要する工期) と調査開始時の達成目標 (未知の情報の取得なのか既存情報の確認なのか) に基づいて、最深部までボーリング孔掘削後、試験を行うか、掘削途中段階で試験を行うかを検討する。 • 概要を把握するための長区間の試験と詳細を把握するための短区間の試験を組み合わせる。 • 詳細な水みちを把握するための流体検層を実施する。 • 試験データの品質を確保するためには、試験手法や時間は区間の透水性に応じて変更することが望ましい。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (6/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
岩盤の水利特性	試験区間の設定方法	<ul style="list-style-type: none"> 水利試験の区間長 (2 m) は、試験に要する時間とその区間に含まれる割れ目の数を考慮して決める。1 m 区間では試験点数が多くなるため試験時間が多くなるが、5 m 区間では多くの割れ目とその区間に含まれることになるため、個々の割れ目の透水性の評価が困難になる。 		<ul style="list-style-type: none"> 約 50 m ごとのシングルパッカーでの水利試験と検層で検出された水みちを対象に、ダブルパッカーで短区間 (5~30 m 程度) の揚水試験と採水を実施する。 採水を目的とする場合は、掘削中に水みちに遭遇した時点で、数 m の短区間長でシングルパッカーの水利試験と採水を実施する。 掘削終了後に、アップスケールリングのための試験として 1~2 m 及び 20 m 区間長の水圧を測定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概略の水利特性は長区間長の試験により把握し、水みちを対象とした水利特性は短区間長の試験で把握する。 それぞれの試験区間長は試験の目的 (採水、モデル化への反映など) や与えられた試験時間によって設定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概略の水利特性は長区間長の試験により把握し、水みちを対象とした水利特性は短区間長の試験で把握する。 試験区間長は試験の目的や与えられた試験時間によって設定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概略の水利特性は長い区間長の試験により把握し、水みちを対象とした水利特性は短区間長の試験で把握する。 試験区間長は試験の目的や与えられた試験時間によって設定する。
	解析方法	<ul style="list-style-type: none"> 透水性の解析は、定常式と非定常式で実施する。試験手法に適した解析方法として、定常式では定圧試験の解析方法の一つである Moye の式を、非定常式では、定圧試験後の回復過程のデータを用いた、Jacob-Lohman の方法や Horner の方法を用いる。 	<ul style="list-style-type: none"> 注水試験は定常解析に基づく Moye の式を、回復圧力は非定常解析に基づく圧力回復曲線とその時間微分へのフィッティングを適用することが多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 水利特性の評価は非定常解析を適用する。具体的には、解析解および数値解析に基づく圧力の時間変化曲線とその時間微分へのフィッティングである。 	<ul style="list-style-type: none"> 定常解析と非定常解析により、整合性を確認する。 試験初期に観測される孔内貯留やボーリング孔近傍に生じるスキンの影響がない領域の解析には、圧力変化の時間微分プロットによる確認が有効である。 非定常解析には、圧力の時間変化が直線を示す部分の傾きから、水利特性を求める方法と、フィッティング (解析解もしくは数値解析) による。 	<ul style="list-style-type: none"> 定常解析と非定常解析により、整合性を確認する。 試験の初期に観測される孔内貯留やボーリング孔近傍に生じるスキンの影響がない領域のデータを用いた解析を実施するため、圧力変化の時間微分プロットによる確認が有効である。非定常解析には、圧力の時間変化が直線を示す部分の傾きから、水利特性を求める方法と、フィッティングによる。 	<ul style="list-style-type: none"> 定常解析と非定常解析により、整合性を確認する。 試験の初期に観測される孔内貯留やボーリング孔近傍に生じるスキンの影響がない領域のデータを用いた解析を実施するため、圧力変化の時間微分プロットによる確認が有効である。 非定常解析には、圧力の時間変化が直線を示す部分の傾きから、水利特性を求める方法と、フィッティングによる。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (7/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
岩盤の水利特性	水理試験時の品質管理	<ul style="list-style-type: none"> HTU-tool を用いた水理試験の品質を確保するため、圧力センサーと流量計は品質管理マニュアルに基づいて毎年キャリブレーションを実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> 注水試験では通常、孔内のスライムが割れ目を閉塞し、岩盤本来の透水性を示さないことが懸念されるが、掘削中に深度約 100 m までの区間で継続的にエアリフトによりスライム除去を行うことで割れ目への閉塞を可能な限り排除している。これは注水試験に伴うスライムの影響を低減する品質確保方策と考えられる。 注水試験と揚水試験の結果を比較し、両者に大きな違いがないことを確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 約 50 m の掘削ごとの水理試験により概略の透水性を把握し、水みちの存在を確認した場合は短区間長での試験を実施するという方法は、現在の流体検層のように、詳細な水みち抽出技術が開発されてなかった当時においては、確実な手法といえる。 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削中に浅部のケーシングにスクリーン (たぐさの小孔を開け、通水する部分) を設けて、このケーシングの外側で常時、エアリフトによりスライムを排除することで、スライムによる水みちの閉塞を低減でき、取得データの品質を向上させることが可能となる。 試験装置の定期的なメンテナンスやセンサーのキャリブレーションが取得データの品質確保に重要である。 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削中に浅部のケーシングにスクリーンを設けて、このケーシングの外側で常時、エアリフトによりスライムを排除することで、スライムによる水みちの閉塞を低減でき、取得データの品質を向上させることが可能となる。 試験装置の定期的なメンテナンスやセンサーのキャリブレーションが取得データの品質確保に重要である。 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削中に浅部のケーシングにスクリーンを設けて、このケーシングの外側で常時、エアリフトによりスライムを排除することで、スライムによる水みちの閉塞を低減でき、取得データの品質を向上させることが可能となる。 試験装置の定期的なメンテナンスやセンサーのキャリブレーションが取得データの品質確保に重要である。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (8/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地下水の地球化学特性	調査計画立案	<ul style="list-style-type: none"> 水質の三次元分布の調査では、ボーリング孔での採水調査、電気伝導度測定、比抵抗検層、地表における電気・電磁探査を組み合わせる。 既存情報の確認を主目的とする場合は、採水や水理試験を、ボーリング孔掘削後に時間をかけて実施する考え方も採用できる。 未知の地球化学特性の把握を主目的とするボーリングでは、数ヶ月～数年かけて採水を実施する調査計画を立案する。 ボーリング調査で、リニアメント調査や地上物理探査で把握された断層位置の確度を上げ、水理地質構造モデルを更新し、次のボーリング位置、モニタリング位置を決めるといふ、繰り返しアプローチを採用している。 	<ul style="list-style-type: none"> 採水は、①掘削中のリターン水、②揚水試験時の揚水、③ボーリング孔掘削後の地球化学特性の把握を主目的とする採水、④長期モニタリング装置設置後の定期的採水、の四つの段階が対象であり、ボーリング孔の目的(既存の知見の確認や未明な地下水水質の把握など)に応じて、必要な品質を考慮し、段階・採水方法を決定する。 情報の少ない領域を対象としたボーリング調査では、上記③を選択する。水理試験後、地質構造や高透水性部の分布に応じて区間設定し、数週間～数ヶ月かけて採水する。予算や工程などの検討において長期間の調査を前提に計画立案する。 既存情報の確認を目的とするボーリング孔では、上記①、②を選択する。 	<ul style="list-style-type: none"> 初期のボーリング孔調査では、地下施設建設予定地から沿岸までの地質・水理地質断面図の作成を目的として行う。 その後のボーリングは、①地下施設建設予定地を通過する地下水流線の涵養域に当たる領域、②地質や地下水流動状態を三次元的に把握するため海岸線に平行する線上、に配置する。 詳細な水理地質構造モデルの構築を行ってから地下水流線の流出域及びその地質構造、地下水水圧分布、水質を把握するためのボーリング調査を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 水質の三次元分布の調査では、ボーリング孔での採水調査、電気伝導度測定、比抵抗検層、地表における電気・電磁探査を組み合わせる。 調査領域の既存情報の充実度と調査時のニーズを踏まえて、取得する情報の要求品質を決め、それに応じた採水方法(①掘削リターン水、②揚水試験時の揚水、③ボーリング孔掘削後の地球化学特性の把握を主目的とする採水、④長期モニタリング装置設置後の定期的採水など)を選択する。 地球化学特性の把握を主目的とする採水調査では、数ヶ月～数年かけて採水を実施する調査計画を立案する。 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング孔での採水調査、電気伝導度測定、比抵抗検層、地表における電気・電磁探査を組み合わせた調査計画を検討する。 未明な領域の地下水の地球化学特性を把握するための採水については、ボーリング孔掘削後(掘削を中断した時の最深部に相当する)、数週間程度の採水工程を想定する。数週間程度とする理由は、岩盤の透水性が、フィンランド、スウェーデン、英国に比較して高く、より短期間で掘削水が抜けると予想できるため。 掘削水の排除にかかる工程を推測するため、掘削時の逸水箇所や量のモニタリングを必ず行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 水質の三次元分布を把握するための調査項目として、地表からの電気・電磁探査、ボーリング孔を利用した採水調査、電気伝導度測定、比抵抗検層を用いる。 低透水性岩盤では、採水調査を、ボーリングを利用するその他の調査終了後に長期間かけて行う計画立案も可能。この場合、得られる情報が要求品質を満たし得るか否か留意する必要がある。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (9/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地下水の地球化学特性	採水区間の設定方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全深度掘削終了後に検層結果やコア観察結果に基づいて、優先順位付けして決定する。 ・ 採水区間の設定は、深部の高透水性部、連結性の高い地下水流動経路、塩分分布を把握するため一定深度ごとの区間配置、地下施設建設に伴う酸化還元境界深度の変化の観察を目的として、その上下深度などを対象とする。 ・ 割れ目帯などの連結性を確認するため、ボーリング掘削後、100 m³前後の地下水を数日間かけて孔底から排水し、他のボーリング孔で水圧モニタリングデータを取得する。 ・ 長期揚水中の塩分濃度を指標として、海域に繋がる割れ目帯を含む区間の情報を取得する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 掘削（リターン水）の採水を実施する場合の判断根拠は、①掘削速度の変動や送水圧の変化、②掘削水の電気伝導度の変化、③コア観察時の高透水性部の観察などである。 ・ 採水区間の設定は、①水理試験で明らかになった高透水性部、②地質構造モデルで海域と繋がっていると予想される地質構造、③事前に推察した塩分濃度分布を確認できる一定深度ごとの区間配置とする。 ・ ボーリング孔掘削時に、周辺モニタリング孔で水圧レスポンスを観測し、高透水性部の連結性に関わる情報も参照する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水理試験（揚水試験）が主要な地下水採水手段の場合は、水理試験により検出された相対的に透水性が高い割れ目帯などを採水対象とする。区間決定の基準は水理試験区間設定の考え方に準拠する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 採水区間の設定は、①高透水性部、②地質構造モデルで海域と繋がっていると予想される地質構造、③事前に推察した塩分濃度分布を確認できる一定深度毎の区間、④酸化還元境界の上下深度などを優先した配置とする。 ・ ボーリング孔掘削時に、周辺モニタリング孔で水圧レスポンスを観測し、高透水性部の連結性に関わる情報も参照する。 ・ 長期揚水中の地下水の塩分濃度を指標として、海域に繋がる割れ目帯を含む区間の情報を取得、参照する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海域に繋がる地質構造については、沿岸域の地質構造モデルの構築結果を参照する。 ・ 高透水性部については、水理試験結果を得て検討する。 ・ 既存の電気・電磁探査情報で推測できる、淡水から塩水への遷移帯の付近が採水区間の候補に挙げられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地表からの調査段階で考慮すべき点は、水理地質構造モデルにおいて海域と繋がっていると予想される地質構造、事前に物理探査などに基づき推察した塩分濃度分布である。 ・ 施設建設段階で考慮すべき点は、酸化還元境界の上下深度、地下施設に連続する可能性のある水理地質構造である。 ・ 重要な水理地質構造は、ボーリング孔掘削時に、周辺モニタリング孔で水圧レスポンスや長期揚水中の地下水の塩分濃度を指標として、その情報を取得する。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (10/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地下水の地球化学特性	採水方法	<ul style="list-style-type: none"> 試料採取の判断基準は、①電気伝導度の安定、②トレーサ濃度 2%以下（経験的に数ヶ月間の掘削水の排水で、到達できる濃度）である。 溶存ガスの脱ガスを防止しながら地下水を採取するためには封圧採水用ボトルを備えた採水装置が必要となる。 低透水性岩盤では、長期間にわたる汚染水の排水を行った上で採水を行う。汚染水が排除された段階で、封圧採水用ボトルによる試料採取を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 解析の代表値は、通常1ヶ月以上予備排水を行い、品質の高い試料を得られるまで採水を継続し取得する。 	<ul style="list-style-type: none"> 水理試験（揚水試験）時に地上で試料を採取する場合は、ボーリング掘削時の汚染水を完全に排除できない場合が多い。Nirex で、この方法を採用している理由は、低コストで採水が可能なることによる。また、長期モニタリング装置の設置を前提としており、モニタリング時に採水を行うことで、品質を担保するという考え方を採用している。 揚水作業において掘削水が抜けぬ場合の対応策は、トレーサ濃度と揚水された地下水の化学成分濃度の相関に基づいて、汚染の無い地下水の水質を外挿する。 	<ul style="list-style-type: none"> 低透水性岩盤では、長期間にわたる汚染水の排水を行った上で採水を行う。 溶存ガスの脱ガスを防止しながら地下水を採取するためには封圧採水用ボトルを備えた採水装置を用いる。 掘削水が抜けぬ場合の対応策は、トレーサ濃度と揚水された地下水の化学成分濃度の相関に基づいて、汚染のない地下水の水質を外挿する。 	<ul style="list-style-type: none"> 溶存ガスの脱ガスを防止しながら地下水を採取するために封圧採水装置の使用を検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> 汚染水の自動排水が可能な採水装置技術を確立しておくことで、低コストかつ自由度の高い採水調査計画が可能となるとともに、汚染率の少ない品質の高い試料を採取することができる。
	採水時の品質管理	<ul style="list-style-type: none"> 排水過程で定期的にトレーサの分析などはしない。ボーリング孔掘削時の掘削水逸水量を基に、汚染水の排水に必要な工期を見積もり、汚染水が除去できたタイミングでトレーサの分析を行う。その時点で、トレーサ濃度が基準値を満たしていない場合は、その濃度を基に再度、汚染水の排水に必要な工期を試算し、排水を継続する。 	<ul style="list-style-type: none"> 試験データの品質管理はSKBの技術仕様に基づき開発されたSICADA（一次データを保管するデータベース）により管理しているほか、試験が実際に正しく実施されていることを、担当者が現場で確認する。 SICADA で管理する項目は、イオンバランスなどによる品質確認と解析のためのデータ選定基準などである。 	<ul style="list-style-type: none"> 堆積岩・塩水環境において、市販されている蛍光トレーサと同様の蛍光特性を持つ天然有機物が存在する場合は、無機化合物（例：塩化リチウム、ヨウ化カリウム）がトレーサとして使用できる。 掘削水において、トレーサとして使用した無機化合物成分の濃度が高く、トレーサにできない場合は、天然環境に存在するトリチウムを指標にできる。 	<ul style="list-style-type: none"> 市販されている蛍光トレーサと同様の蛍光特性を持つ天然有機物が存在する場合は、無機化合物を使用するか、天然有機物とトレーサを分離測定する分析方法を選択する。 	<ul style="list-style-type: none"> 蛍光トレーサと同様の蛍光特性を持つ天然有機物が存在する可能性が高いため、天然有機物を分離測定する分析装置を準備する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概要の地下水水質が把握されている段階において、予算を節約する場合は、トレーサの分析頻度を予察した汚染水排除のタイミングのみにする。 堆積岩・塩水環境においては、使用するトレーサと地下水中の天然物質との競合関係を確認し、トレーサの選定または分析手法の選定を行う。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (11/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地下水の地球化学特性	物理化学パラメータの測定	<ul style="list-style-type: none"> ・ 揚水した地下水を地上で測定する場合は、汚染水の排水過程の変化の確認に利用できる。 ・ 実測値の信頼性については、溶存化学成分濃度から理論的に得られる計算値と比較して妥当性を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ボーリング孔掘削から数日後に孔壁に硫化物などのバイオマットが生成する場合がある。この場合、測定値の信頼性が担保できないため、ボーリング孔掘削直後に原位置測定を行う。 ・ 実測値の信頼性については、溶存化学成分濃度から理論的に得られる計算値と比較して妥当性を確認する。 ・ 地上で測定する場合は不活性環境で行う。この場合、圧力減圧に起因するパラメータ変化を免れないため、要求品質は、変化を把握できる程度と考える。 		<ul style="list-style-type: none"> ・ ボーリング孔内で原位置計測を行う場合は、ボーリング孔掘削後、孔壁に二次鉱物が沈殿する前（事例では数日）に行う。 ・ 揚水地下水の測定、原位置地下水の測定のいずれにおいても、実測値の信頼性については、溶存化学成分濃度から理論的に得られる計算値と比較して妥当性を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物理化学パラメータの取得を目的に含める場合は、ボーリング孔掘削後数日以内に原位置での測定を行うか、揚水を対象として不活性雰囲気で行う。 ・ 実測値の信頼性を、溶存化学成分濃度から理論的に得られる計算値と比較して確認するため、計算に必要な、酸化還元反応に関わる化学種（鉄や硫黄など）の分析を非酸化条件で行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物理化学パラメータの取得を目的に含める場合は、ボーリング孔掘削後数日以内に原位置での測定を行うか、揚水を対象として不活性雰囲気で行う。 ・ 実測値の信頼性を、溶存化学成分濃度から理論的に得られる計算値と比較して確認するため、計算に必要な、酸化還元反応に関わる化学種（鉄や硫黄など）の分析を非酸化条件で行う。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (12/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて 参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地下水の地球化学特性	モニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ・ モニタリング区間は、①水理地質構造モデルで決定論的に予測される割れ目帯、②海域に通じている可能性のある割れ目帯を優先して設定する。 ・ 施設建設に伴う周辺地下水の塩分濃度分布の変化(海水の浸入やより深部の高塩分地下水の湧昇)を確認することが課題の一つとなる。 ・ ボーリング孔でのモニタリングの他に、電気・電磁探査を複数の計測ラインで数週間から1年間隔で実施することで、塩分濃度分布の広域的な変化を観測できる。測点間隔は建設深度や地質構造を基にした事前予測に基づいて決定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ モニタリング区間の設定は、採水区間の決め方と同様に、①水理試験で明らかになった高透水性部、②地質構造モデルで海域と繋がっている、③事前に推察した塩分濃度分布を確認できる一定深度ごとの区間配置とする。 ・ ボーリング孔掘削中や掘削直後に得たデータの妥当性、その後の変動幅の確認を目的の一つとする。 ・ 頻度は年2回程度の採水と水質分析である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ モニタリング区間の設定は、施設建設領域に連続している可能性のある高透水性の地質構造を対象に設定する。 ・ ベースライン状態の把握が目的の一つとなる。 ・ 海域に繋がっている地質構造のモニタリング区間では、潮汐変化に伴う水圧の年変動が観察され、割れ目の連結性によってその程度が異なる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ モニタリング区間は、①高透水性部、②地質構造モデルで海域と繋がっていると予想される地質構造、③塩分濃度分布に対応した一定深度毎の区間、④酸化還元境界の上下深度を優先した配置とする。 ・ 海域と繋がっている地質構造においては、潮汐変化に伴う変動や海水の混入に伴う水質変化を観察できる可能性がある。 		<ul style="list-style-type: none"> ・ モニタリング区間は、①高透水性部、②地質構造モデルで海域と繋がっていると予想される地質構造、③塩分濃度分布に対応した一定深度毎の区間、④酸化還元境界の上下深度などを優先した配置とする。 ・ 電気・電磁探査を複数の計測ラインで定期的を実施することで、塩分濃度分布の広域的な変化を観測する。測点間隔は建設深度や地質構造を基にした事前予測に基づいて決定する。

表 3-B 各国における調査で得られた経験的知見とその活用 (13/13)

地質環境調査 課題	調査項目	フィンランド (結晶質岩)	スウェーデン (結晶質岩)	英国 (堆積岩)	汎用性のある技術的知見	沿岸域プロジェクトにおいて参照すべき知見	実施主体が活用可能な知見
地下水の地球化学特性	概念モデルの構築に関わる 解析手法		<ul style="list-style-type: none"> ・ 塩水や淡水の分布については、多変量解析による定量化、視覚化が有効である。 ・ 淡水（氷河水）、現海水、化石海水、ブラインなどの起源の同定や分布状態の解析には、ヘリウム・炭素・ホウ素・塩素同位体が指標にできる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 浅層部の高塩化物イオン濃度の成因は、海塩粒子の影響であることが多い。海塩の寄与の指標として、Ba²⁺イオンとSO₄²⁻イオン濃度の相関が利用できる。 ・ 氷河起源地下水の判断基準として、氷河水の同位体特性により生じる、水素・酸素同位体比の負の値への変化を利用できる。 ・ 長期間滞留している化石海水と現海水を区別する基準には、蓄積されたヘリウム濃度と水-岩石反応により濃度が増加する塩化物イオン濃度の相関（各々の変化量の違い）が指標となる。 ・ 淡水や塩水の分布状態の長期変遷の指標は、二次鉱物の同位体比や沈殿層の厚さなどが利用できる。 ・ 塩分濃度は、岩種の分布、堆積層の密度分布と相関がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 浅層部で、高い塩化物イオン濃度が観察される場合は、化学成分比に基づいて、海塩の寄与の有無を確認する。 ・ 淡水、汽水、塩水の起源の同定においては、ヘリウムガスの蓄積量やヘリウム・炭素・ホウ素・塩素同位体などの情報が必要となる。 ・ 塩分濃度分布の長期変遷の解析には、二次鉱物の産状や同位体比を利用できる。 ・ ボーリング孔間の塩分濃度分布の補間時には、岩種や密度分布を参照し、矛盾の有無を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 溶存ガス、各種同位体の分析を行い、地下水の起源と滞留時間の解析に使用する。 ・ ボーリング孔とボーリング孔間の塩分濃度分布の補間時には、岩種や密度分布を参照する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 沿岸域において異なる塩分濃度の地下水が複数存在する場合、起源、滞留時間の違いを明らかにしておくことで、地下水流動解析結果の妥当性を検証することも可能となる。 ・ 地下水の起源と滞留時間の解析には、溶存ガス、各種同位体の情報が不可欠である。 ・ ボーリング孔とボーリング孔間の塩分濃度分布の補完時には、結果の確認のため、岩種や密度の分布を参照する。

付録 4

沿岸域プロジェクトの調査結果

- A. 収集文献一覧表及び幌延地域の既存調査位置図
- B. 概念モデル図
- C. 反射法地震探査 計画測線設定フローダイアグラム
- D. 電磁探査 計画測線設定フローダイアグラム
- E. 地質構造モデル

This is a blank page.

付録 4-A

収集文献一覧表及び幌延地域の既存調査位置図

- (1) 収集文献一覧表
- (2) 幌延地域の既存反射法地震探査調査位置図
- (3) 幌延地域の既存電気・電磁探査調査位置図

This is a blank page.

表 4-A (1) 収集文献一覧表 (1/5)

要素	対象エリア	報告書種別	著者	タイトル	雑誌名	号	ページ	年		
地形	全 国	数値地図	国土地理院	数値地図50mメッシュ(標高) 日本-I				2001		
		論文・書籍	小池 一之、町田 洋編著	日本の海成段丘アトラス(CD-ROM3枚+付図)	東京大学出版会				2001	
	北海道	陸 域	論文・書籍	小崎尚、野上 道男、小野 有五、平川 一臣編	日本の地形 2 北海道地方	東京大学出版会		359p.	2003	
				田中幸哉	宗谷丘陵および白糖丘陵における谷壁斜面発達と岩石物性	地理学評論	63A-12	836-847	1990	
			Suzuki, T., Tokunaga, E., Noda, H., Arakawa, H.	Effects of rock strength and permeability on hill morphology	Transactions, Japanese Geomorphological Union (地形)	6	101-130	1985		
			田中幸哉、安形 康、笹 賀一郎	宗谷丘陵の河川における流出特性と基盤岩石物性との関係について	北海道大学農学部演習林研究報	53	269-287	1996		
		海 域	図面類	海上保安庁	20万分の1海底地形図「宗谷岬西方」					1972
				海上保安庁	20万分の1海底地形図「天売島」					1972
				海上保安庁	20万分の1海底地形図「宗谷岬西方」					1973
				海上保安庁	20万分の1海底地形図「天売島」					1973
				海上保安庁水路部	海底地質構造図・海底地形図・海底地形地質調査報告「利尻島」	沿岸の海の基本図(5万分の1)	6321-5			1991
				海上保安庁水路部	海底地質構造図・海底地形図・海底地形地質調査報告「遠別」	沿岸の海の基本図(5万分の1)	6321-2			1992
	海上保安庁水路部	海底地質構造図・海底地形図・海底地形地質調査報告「利尻水道」	沿岸の海の基本図(5万分の1)	6321-1			1993			
	海上保安庁水路部	海底地質構造図・海底地形図・海底地形地質調査報告「天売島」	沿岸の海の基本図(5万分の1)	6321-3			1994			
日本海洋データセンター	500mメッシュ海底地形データ(I-EGG500)	http://www.jodc.go.jp/								
大竹 政和、平 朝彦、太田 陽子編	日本海東縁の活断層と地震テクトニクス	東京大学出版会					2002			
地震	日本海東縁全体	論文・書籍	岡村 行信、加藤幸弘	第4章 海域の変動地形および活断層			47-69			
			岡村 行信	第7章 新第三紀以降の歪み集中帯			111-121			
	北海道	論文・書籍	外部機関報告書	岡村 行信、倉本 真二、佐藤 幹夫	日本海東縁海域の活断層およびその地震との関係	地質調査所月報	49	1-18	1998	
			森谷武男	浅い地震活動と起震歪力から見た北海道のテクトニクス	地研専報	31	475-485	1986		
			森谷武男	北海道とその周辺における地震のメカニズム解から推定される地殻内部応力場	月刊地球	21	557-564	1999		
			島村英紀、森谷武男	北海道の地震	北海道図書刊行会		224p.	1994		
			森谷裕一、新里忠史、北村至、堀田光、大原英史	マルチプレット・クラスタリング解析による北海道北部幌延地域の微小地震活動	社団法人物理探査学会第115回 学術講演会論文集		46-49	2006		
			笠原 稔	3つのプレートの相互作用する地域(北海道周辺)の地震予知研究	月刊地球号外	20	16-21	1998		
			田村 慎、笠原 稔、森谷 武男	臨時地震観測による北海道北部地域の微小地震活動と地殻構造	地震2	55	337-350	2003		
			天北地域重力図(ブーゲー異常)	地質調査所					2001	
名寄地域重力図(ブーゲー異常)	地質調査所					2000				
重力	北海道	図面類	山本明彦、森谷武男	北海道の重力異常と地下構造	月刊地球	11	377-385	1989		
			原子力機構	東中 基倫	重力データの解析	核燃料サイクル開発機構	JNC TJS410 2004-003		2004	
			田中 明子、山野 誠、矢野 雄策、笹田 政克	日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベース、数値地質図 DGM P-5	産業技術総合研究所 地質調査総合センター				2004	
地殻熱流量	全 国	数値地質図	田中 明子、山野 誠、矢野 雄策、笹田 政克	日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベース、数値地質図 DGM P-5	産業技術総合研究所 地質調査総合センター			2004		
地質分布・層序	日本海東縁全体	論文・書籍	Wei, D., Seno, T.	Determination of the Amurian plate motion	In Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia (Flower, M., Chung., S.L., Lo, C.H., Lee, T.Y. eds.), Geodynamic series	27	337-346			
			地質調査所	1:2,000,000地質編纂図(23) 日本の磁気図				1992		
	陸 域	図面類	根本 隆文、佐川 昭、植田 芳郎、織田 精徳、松井 寛、三梨 昂	日本炭田図Ⅷ天北炭田地質図説明書	地質調査所				1979	
			山口 昇一、須田 芳朗	20万分の1地質図「枝幸」	地質調査所		NL-54-11	1981		
			秦 光男、植田 芳郎、松田 武雄、杉山 友紀	20万分の1地質図「天塩」	地質調査所		NL-54-17	1969		
			北海道立地下資源調査所	5万分の1地質図幅「豊富」(旭川-第15号)				1960		
			北海道立地下資源調査所	5万分の1地質図幅「稚内」(旭川-第14号)				1981		
			北海道立地下資源調査所	5万分の1地質図幅「稚内」(旭川-第14号)				1960		
			北海道立地下資源調査所	5万分の1地質図幅「稚内」(旭川-第14号)				1960		
			北海道立地下資源調査所	5万分の1地質図幅「上猿払」(旭川-第14号)				1981		
	海 域	図面類	地質調査所	100万分の1北海道周辺日本海およびオホーツク海域海底地質図					1979	
			岡 孝雄	北海道とその周辺海域のネオテクトニクスに関する諸問題-付、札幌付近での活断層の存在と地震発生についての考察-	加藤誠教授退官記念論文集(川村信人、岡孝雄、近藤務編)			427-449	1997	
	北海道	陸 域	論文・書籍	宮坂省吾、松井 愈	中央北海道の新生代末期テクトニクス	地研専報	31	333-344	1986	
				越智 智雄	変動地形からみた北海道中軸部短縮変動帯のアクティブテクトニクス	地球惑星関連学会合同大会		Q042-P013	2003	
				日本の地質「北海道地方」編集委員会	北海道地方			337p.	1990	
				加藤 直子、佐藤 比呂志	北海道中軸部のアクティブテクトニクス-馬追丘陵を例として-	月刊地球	24	481-484	2002	
				伊藤 谷生	北海道におけるアクティブテクトニクスの現フェーズはいつ始まったのか?	月刊地球	21	608-613	1999	
				岡 孝雄	北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス	地研専報	31	295-320	1986	
				小野有五、五十嵐八枝子	北海道の自然史-氷期の森林を旅する-	北海道大学図書刊行会		219p.	1991	
				三浦一樹、平川一臣	北海道北・東部における化石凍結割れ目構造の起源	地学雑誌	104	189-224	1995	
				英文	Sakaguchi, Y., Kashima, K., Matsubara, A.	Holocene marine deposits in Hokkaido and their sedimentary environments	Bulletin of the Department of Geography University of Tokyo	17	1-17	1985
				海 域	論文・書籍	佐藤 任弘、桜井 操、田口 広、永野 真男、内田 摩利夫、大森 哲雄	北海道西方大陸縁域の海底地質	水路部研究報告	8	1-49
		正谷 清	北海道地域の堆積盆の分布と性格			石油技術協会誌	44	22-27	1979	
池原 研		北海道北端部、利尻トラフの海底堆積物中にタービダイトとして記録された地震	第四紀研究			39	569-574	2000		
外部機関報告書		Honza Eiichi	Geological Investigation of the Okhotsk and Japan Seas off Hokkaido.	Cruise Report, Geological Survey of Japan	11	72p.	1977			
	内田 康人、菅 和哉、嵯峨山 積、村山 泰司、濱田 誠一、川森 博史、大沢 賢人、仁科 健二		北海道沿岸域の地質・底質環境-3-日本海北部海域 付図 1:200,000	北海道立地質研究所調査研究報告			2003			
内田 康人、菅 和哉、嵯峨山 積、村山 泰司、濱田 誠一、川森 博史、大沢 賢人、仁科 健二	北海道沿岸域の地質・底質環境-3-日本海北部海域	北海道立地質研究所調査研究報告	31	58p.	2003					

表 4-A (1) 収集文献一覧表 (2/5)

要素	対象エリア		報告書種別	著者	タイトル	雑誌名	号	ページ	年	
地質分布・層序	北海道	海 域	外部機関報告書	池原 研、岡村 行信(編)	北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究及び海域活断層の評価手法に関する研究	平成10年度研究概要報告書(地質調査所)			1999	
				池原 研、岡村 行信(編)	北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究及び海域活断層の評価手法に関する研究	平成11年度研究概要報告書(地質調査所)			2000	
	北海道北部地域	論文・書籍	秋葉 文雄、平松 力、I. B. Tsoy、小笠原 憲四郎、天野 和孝	珪藻化石層序によるサハリン島南部のMaruyama層・Kurasi層の年代と北海道天北地域の新第三系との対比	地学雑誌	109		203-017	2000	
			福沢仁之	新第三紀生物源珪質頁岩の堆積作用と古海洋環境の関係について	地質学論集	37		219-226	1992	
			福沢仁之	新第三紀層状珪質頁岩の堆積機構—北海道北部、上部中新統稚内層を例として—	地質学雑誌	94		669-688	1988	
			秋山 雅彦、保柳 康一	新第三系、天北地域	日本の地質1 北海道地方、共立出版会			105-106	1990	
			越後 智雄、岡田 真介、小田 晋、木村 治夫、森下 信人	天塩断層帯南部の天売—羽幌地域における第四紀後期の地殻短縮変動量の試算	月刊地球	号外No.54		127-135	2006	
			嵯峨山 積	軟体動物化石Fortipecten takahashii (Yokoyama)の産出層準の地質年代—北日本からサハリンまで—	石井次郎教授追悼文集			169-176	1993	
			福沢 仁之、保柳 康一、秋山 雅彦	北海道中央部の新第三系の層序と古環境	地質学論集	37		1-10	1992	
			三浦英樹	北海道北部サロベツ原野周辺の台地に分布する利尻火山起源の後期更新世テフラ	第四紀露頭集—日本のテフラ、第四紀学会			100p.	1996	
			福沢 仁之	北海道北部、新第三紀後期の層状珪質頁岩の堆積場	地質学雑誌	93		37-55	1987	
			大井信夫・三浦英樹	北海道北部、豊富に分布する泥炭層の花粉分析による後期更新世テフラ、利尻アチャ(Rs-Ac)の降下時期推定と古環境復原	植生史研究	13		25-30	2004	
			高橋 功二、福沢 仁之、和田 信彦、保柳 康一、岡 孝雄	北海道北部、日本海沿岸地域の第三系—その層序と古地理について—	地球科学	38		299-312	1984	
			越後 智雄、小田 晋、岡田 真介、木村 治夫、森下 信人	北海道北部の天塩断層帯周辺地域における第四紀後期の地殻短縮量と変位速度の試算	日本地球惑星科学連合大会			S107-P001	2006	
			本山 功、仲村佐知子	北海道稚内市宇流谷川における中新統増幌層と稚内層の放散虫化石層序と不整合境界の再認定	地質学雑誌	108		219-234	2002	
			英文	Fukusawa, H.	Depositional scheme of Neogene bedded siliceous rocks in an active upwelling area—on the Wakkanai Formation, northern Hokkaido, Japan—	In Sedimentary facies in the active plate margin (Taira, A. and Masuda, F. eds.), TERRAPUB,			395-419	1989
			幌延町周辺	論文・書籍	大平明夫	完新世におけるサロベツ原野の泥炭地の形成と古環境変化	地理学評論	68		695-712
	岡 孝雄	高レベル放射性廃棄物の地層処分と幌延の地質							1986	
	増田富士雄、天野和孝、桂 雄三、伊藤 慎	北海道天塩町北西部および南東部における新第三系・第四系の浅海堆積相(北海道天塩町周辺の地質及び古生物概報、その2)			北方科学調査報告	2		1-41	1981	
	岡 孝雄、五十嵐 八枝子	北海道・天塩平野北部の上部新生界—特に勇知層・更別層の堆積相と花粉化石層序について			加藤誠教授退官記念論文集			341-365	1997	
	秋葉 文雄	北海道天北地域の勇知層から産出したNeodenticula seminaeとProboscia curvirostris(珪藻化石)およびその生層序学的意義			地質学雑誌	第105巻		733-736	1999	
	岡 孝雄	北海道天北・間寒別構造盆地のネオテクトニクス			活断層研究	1		19-29	1985	
	福沢仁之	北海道天北—羽幌地域の第三紀珪藻質堆積岩の堆積機構と続成作用			月刊地球	4		492-501	1982	
	安江 健一、秋葉 文雄、大平 寛人、石井 英一	北海道北部、サロベツ背斜付近に分布する声間層上部の鮮新統上部珪藻化石帯とフィッショントラック年代			地質学雑誌	112		284-293	2006	
	嵯峨山 積	北海道北部地域の遠別層・声間層と勇知層の地層境界の地質時代—ルベシユベ川と上スカナン川ルート—			地質学雑誌	109		310-323	2003	
	岡 孝雄、五十嵐 八枝子	北海道北部、間寒別構造盆地の鮮新—更新統—とくに堆積相および花粉層序について—			地質学雑誌			365-389	1993	
	福沢 仁之	北海道北部—羽幌地域の上部新第三系層序の再検討—とくに稚内・声間層について—			地質学雑誌	第91巻 第12号		833-849	1985	
	新里 忠史、舟木 泰智、安江 健一	北海道北部、幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史			地質学雑誌	第113巻 補遺		119-135	2007	
	岡 孝雄	幌延町の地質			新幌延町史			9-36		
	松井 愈	幌延町の地質			白山友正編「幌延町史」			19-46	1974	
	新里 忠史、安江 健一	幌延地域における地質環境の長期安定性に関する研究—長期安定性の評価・予測における地域特性の考慮—			原子力バックエンド研究	11		125-137	2005	
	岡 孝雄、五十嵐 八枝子、林 正彦	ボーリングデータ解析および花粉解析による天塩平野の沖積層の研究			北海道立地質研究所報告	第77号		17-75	2006	
	英文	Yasue, K., Ishii, E. and Niizato, T.			Neotectonics of the Tenpoku Sedimentary Basin in northern Hokkaido, Japan: a case of Horonobe area.	In Research on active faulting to mitigate seismic hazards: the state of the art. Abstracts of the HOKUDAN International Symposium on Active Faulting, Hokudan, Japan, January 17th—			176-177	2005
	原子力機構	原口 強、市原 李彦、小笠原 洋			研究所設置地区およびその周辺地域の地質層序に関する調査		JNC TJ5410 2005-008			2002
		舟木 泰智、石井 英一、安江 健一、高橋 一晴			文献調査に基づく幌延地域の地質・地質構造に関する検討		JNC TN5400 2004-006			2005
		柳田 誠			北海道北部地域の地質に関する研究	サイクル機構技術資料	JNC TJ1400 98-001			1998
		アイ・エヌ・エー新土木研究所	北海道北部地域の地質に関する調査資料の購入業務報告書		JNC TJ1420 98-020			1988		
		高橋 一晴、新里 忠史、安江 健一、石井 英一	北海道北部幌延町における地球化学的特徴を用いた侵食量の推定		JNC TN5400 2005-011			2005		
		戸井田 克、須山 泰宏、塩釜 幸弘、渥美 博行、安部 泰典、古市 光昭	幌延深地層研究計画における地質環境モデルの体系化に関する検討		JNC TJ5400 2003-003			2003		
		高瀬 博康、リチャード・メカーフ、稲垣 学、野口 俊英、青山 裕司、高瀬 今日子、田原 道子	幌延深地層研究計画における地質環境モデルの体系化に関する検討(その2)		JNC TJ5400 2003-006			2004		

表 4-A (1) 収集文献一覧表 (3/5)

要素	対象エリア	報告書種別	著者	タイトル	雑誌名	号	ページ	年	
地質分布・層序	幌延町周辺	原子力機構	太田 久仁雄、阿部 寛信、山口 雄大、國丸 貴紀、石井 英一、操上 広志、戸村 豪治、柴野 一則、濱 克宏、松井 裕哉、新里 忠史、高橋 一晴、丹生屋 純夫、大原 英史、浅森 浩一、森岡 宏之、舟木 泰智、茂田 直孝、福島 龍朗	幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」		JAEA-Research 2007-044	137-195	2007	
			澤田 臣啓、奥池 司郎	幌延町内における地質調査		JNC TJ1420 2001-037		2001	
			高畑 裕之、長根 将格、松本 尚巳	幌延町における新第三紀堆積岩の地質・地質構造に関する調査		JNC TJ5420 2004-002		2004	
			渡辺 孝文	幌延町における新第三紀堆積岩の地質・地質構造に関する調査(その2)		JNC TJ5120 2005-005		2004	
			石井 英一、安江 健一	幌延町における鮮新世～前期更新世のテフラ層序とFT年代		JNC TN5400 2005-006		2005	
			津久井 朗太	幌延における地質環境の長期安定性に関わるデータ集-電磁探査機器およびGPS機器による長期観測		JNC TN5450 2004-001		2005	
			中田 高、今泉 俊文編	活断層詳細デジタルマップ	東京大学出版会			2002	
地質構造	全 国	論文・書籍	池田 安隆、今泉 俊文、東郷 正美、平川 一臣、宮内 崇裕、佐藤 比呂志 編著	第四紀逆断層アトラス	東京大学出版会		254p.	2002	
			徳山 英一、本座 栄一、木村 政昭、倉本 真一、芦 寿一郎、岡村 行信、荒戸 裕之、伊藤 康人、徐 垣、日野 亮太、野原 壮、阿部 寛信、坂井 眞一、向山 建二郎、海域地質構造マップワーキンググループ	日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史(CD-ROM版)	海洋調査技術	13	27-53	2001	
			地質調査所	日本周辺海域音波探査データベース	CD-ROM			2001	
			活断層研究会編	日本の活断層-分布図と資料	東京大学出版会		437p.	1991	
	日本海東縁全体	論文・書籍	岡村 行信	新第三紀以降の歪集中帯	大竹 政和、平 朝彦、太田 陽子編「日本海東縁の活断層と地震テクトニクス」、東京大学出版会		47-69	2002	
			岡村 行信	日本海東縁海域の逆断層と地殻短縮量推定の試み	月刊地球	Vol.20 No.8	460-465	1998	
			玉木賢策	日本海東縁部の活構造とテクトニクス	月刊地球	6	38-48	1984	
		鷲谷 威	明治期以降の歪み集中帯	大竹 政和、平 朝彦、太田 陽子編「日本海東縁の活断層と地震テクトニクス」、東京大学出版会		133-150	2002		
		英 文	Tamaki Kensaku	Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications	Bulletin of the Geological Survey of Japan	39	269-365	1988	
	北海道周辺海域	論文・書籍	山本 裕彦	オホーツク海および天北日本海側海域の地質構造と堆積盆について	石油技術協会誌	44	28-35	1979	
			保柳康二、宮坂省吾、渡辺 寧、木村 学、松	“衝突帯”のタービダイト相形成とテクトニクス-中新世・中央北海道の例-	地団研専報	31	265-284	1986	
			荒井 晃作、岡村 行信	北海道天塩沖海域の地質構造	日本地質学会第107年学術大会講演要旨		50-50	2000	
			荒井 晃作	北海道北西沖の活構造-白嶺丸による構造調査-	地質ニュース	550	33-36	2000	
		外部機関報告書	荒井 晃作、岡村 行信、倉本 真一	留萌沖-天塩沖海域の海底地質構造. 北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究及び海域活断層の評価手法に関する研究(平成10年度研究概要報告書)	地質調査所速報	MG/99/1	13-24	1999	
英 文		Kimura, G., Miyashita, S., Miyasaka, S.	Collision tectonics in Hokkaido and Sakhalin	In Accretion tectonics in the circum-pacific Regions (Hashimoto, M., Uyeda, S., eds.) TERRAPUB, Tokyo		123-134	1983		
北海道北部地域		空中写真	原子力機構	三箇 智二	大曲断層に関するリニアメント判読および地表踏査		JNC TJ5410 2005-006		2005
	三箇 智二			幌延地域におけるリニアメント調査		JNC TJ5420 2004-001		2004	
	反射法地震探査	原子力機構	東中 基倫、佐野 雪子、小澤 岳史	既存反射法地震探査データの再解析		JNC TJ5410 2005-009		2005	
			津久井 朗太、西木 司、東中 基倫、津 信宏	幌延深地層研究計画における高密度反射法地震探査、マルチオフセットVSP探査、重力探査		JAEA-Data/Code 2006-026		2006	
			東中 基倫、津久井 朗太、太田 陽一	幌延深地層研究計画における反射法地震探査を用いた地質構造調査		JNC TJ1410 2002-002		2002	
	地中レーダ	論文・書籍	安江 健一、新里 忠史、千葉 昭彦	地中レーダ探査による沖積・段丘面下の地質構造調査	日本地質学会第113年学術大会講演要旨		273p.	2006	
	比抵抗分布	外部機関報告書	論文・書籍	浴 信博、山崎 眞一	核燃料サイクル開発機構が進める深地層の科学的研究の現状(その2)-幌延深地層研究センターにおける研究の現状-	物理探査	57	373-382	2004
			財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター	平成16年度地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書		平成17年3月	3.24p.	2005	
			財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター	平成17年度地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書		平成18年3月	2.5-2.23	2006	
			財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター	平成18年度地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書		平成19年3月	2.42-2.52	2007	
			財団法人北海道科学技術総合振興センター 幌延地圏環境研究所	平成17年度地圏環境研究事業 研究成果報告書		平成18年3月		2006	
			財団法人北海道科学技術総合振興センター 幌延地圏環境研究所	平成18年度地圏環境研究事業 研究成果報告書		平成19年3月		2007	
田村 慎、大津 直、秋田 藤夫、岡 孝雄、酒井 利彰、若浜 洋、三橋 順、平井 祐次郎、石島 洋二			北海道北部、サロベツ原野における浅部比抵抗構造	北海道立地質研究所報告	第78号	83-94	2007		
原子力機構	松尾 公一、岸本 宗丸、根木 健之、手島 稔	大曲断層を対象とした電気探査		JNC TJ5440 2005-001		2005			

表 4-A (1) 収集文献一覧表 (4/5)

要素	対象エリア	報告書種別	著者	タイトル	雑誌名	号	ページ	年			
地質構造	北海道北部地域	比抵抗分布	原子力機構	岸本 宗丸、高山 純一、横井 浩一	電磁法による地上物理探査		JNC TJ1420 2001-036		2001		
				五十嵐 亨、池田 和隆、東 宏幸、今村 杉夫、大島 雅浩	ヘリコプターを用いた空中物理探査		JNC TJ1420 2001-035		2001		
				石井 英一、安江 健一	幌延深地層研究計画における断層の解析と地質構造モデルの構築		JNC TN5400 2005-008		2005		
				石井 英一、安江 健一	幌延深地層研究計画における電磁探査を用いた断層帯調査—大曲断層の三次元分布と水理特性—		JNC TN5400 2005-009		2005		
				松尾 公一、根木 健之、横井 浩一、高橋 武春、手島 稔	幌延深地層研究計画における電磁法による大曲断層調査		JNC TJ5410 2004-002		2004		
		地表踏査	論文・書籍	石井 英一、福島 龍朗	新第三紀珪質岩における断層の解析事例	応用地質	47	280-291	2006		
				小椋 伸幸、掃部 満	天北・羽幌地域の石油地質—深部構造特性と炭化水素ポテンシャル—	石油技術協会誌	57	32-44	1992		
				安江 健一、石井 英一	北海道北部、幌延町における大曲—豊富断層の正確な位置の特定	活断層研究	25	39-46	2005		
		資源探査	論文・書籍	天然ガス鉱業会、大陸棚石油開発協会	日本の石油・天然ガス資源<新版>技術報告書	天然ガス鉱業会、大陸棚石油開発協会			1982		
				広岡 悦郎	北海道天北地方の石油地質学的研究	石油技術協会誌	27	113-134			
			外部機関報告書	北海道鉱業振興委員会	北海道の石油・天然ガス資源:その探査と開発(昭和43~51年)				157p.	1979	
				北海道鉱業振興委員会	北海道の石油・天然ガス資源—その探査と開発(昭和52~63年)					1990	
				北海道鉱業振興委員会	北海道の石油・天然ガスの探査と開発					1968	
				エスケイエンジニアリング	幌延町温泉湧出可能性調査報告書					1996	
				長尾 捨一、三谷 勝利、斎藤 尚志	北川口背斜について	北海道立地下資源調査所報告	No.37	45-55	1967		
				長尾 捨一、牧野 登喜男	天塩国大曲油田調査報告	北海道地下資源調査資料		22p.	1959		
				長尾 捨一	天塩国幌延郡サロベツ背斜試錐について	北海道立地下資源調査所報告	No.21	37-41	1959		
				三谷 勝利、早川 福利、高橋 功二、石山 昭三、和気 徹、重山 武	豊富背斜地域の天然ガス鉱床	北海道地下資源調査資料	125	25-30	1971		
				長尾 捨一	北海道の構造性天然ガスについて	北海道立地下資源調査所報告	No.40	1-59	1969		
				長尾 捨一	北海道白亜系油田の基礎的研究	北海道立地下資源調査所報告	No.31	1-29	1963		
				図面類	杉山雄一郎他2名	50万分の1活構造図「旭川」					1987
				論文・書籍	活断層研究会編	「日本の活断層」天塩					1980
					横倉 隆伸、宮崎 光旗、加野 直巳	北海道天北地域の深部構造と断層構造—基礎物理探査「天北地域」データの再処理結果—	東京大学出版会			56p.	2005
		越智 智雄、小田 晋	北海道羽幌地域における第四紀後期の活動性		日本地震学会2005年度秋季大会講演要旨集						
		外部機関報告書	地震調査研究推進本部	サロベツ断層帯の活動性および活動履歴調査	地球惑星間連学会合同大会			1027-P002	2005		
			兼清 豊比古	北海道北部地域における地質環境データ収集・整理	http://www.iishin.go.jp/				2006		
		原子力機構	柳田 誠	北海道北部地域の断層に関する研究(II)	サイクル機構技術資料	JNC TJ1420 98-027			1993		
				日本原子力研究開発機構	幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」		JAEA-Research 2007-044	17-58	2007		
		水理	北海道	図面類	広田 知保、嵯峨山 積、横山 英二、管 知哉、松浪 文博	北海道水理地質図幅説明書 第1号 稚内	北海道立地下資源調査所			1983	
					論文・書籍	操上 広志、安江 健一、新里 忠史、今井 久、塩崎 功、山下 亮	気候・海水準変動が地下水流動に与える影響に関する解析的検討—幌延地域を例として—	地下水流動解析とモデル化に関するシンポジウム発表論文集		59-66	2007
石井 英一、安江 健一、田中 竹延、津久井 朗太、松尾 公一、杉山 和稔、松尾 重明	北海道北部、幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性					地質学雑誌	112	301-314	2006		
熊本 創、下茂 道人、操上 広志	幌延深地層研究計画における地下施設掘削に伴う地下水流動予測解析—地上からの調査結果に基づく水理地質構造のモデル化と解析—			日本地下水学会2007年地下水流動解析とモデル化に関するシンポジウム発表論文集			43-50	2007			
操上 広志、竹内 竜史、瀬尾 昭治、今井 久、塩崎 功、下茂 道人、熊本 創	幌延堆積岩中の割れ目帯を考慮した地下水流動解析			日本地下水学会2005年秋季講演会講演要旨			100-105	2005			
竹内 竜史、平田 洋一	溶存ガスを含む地下水調査手法に関する一考察			第38回地盤工学研究発表会、平成15年度発表講演集			1259-1260	2003			
外部機関報告書	若浜 洋、平井 祐次郎、石島 洋二			沿岸地域における地下水流動調査研究—幌延町浜里地区におけるボーリング調査—	ライズ研究紀要	1	33-41	2005			
	原子力機構			下茂 道人、山本 肇、熊本 創	亀裂を有する堆積岩中の流れと移行現象に関する研究		JNC TJ8400 2003-028		2003		
下茂 道人、熊本 創				亀裂を有する堆積岩中の流れと移行現象に関する研究(II)		JNC TJ8400 2004-011		2004			
瀬尾 昭治、操上 広志、藪内 聡、原 稔				浅層ボーリング孔を利用した地下水観測		JAEA-Research 2006-079		2006			
今井 久、山下 亮、雨宮 清、塩崎 功				堆積岩地域における広域地下水流動解析手法に関する検討		JNC TJ1410 2001-002		2001			
野本 康介、松井 幹雄、井上 博之、吉野 尚人、唐崎 健二、伊藤 一誠				堆積岩地域の水理特性を把握するためのモデル解析		JNC TJ8400 2005-005		2005			
井上 博之、石黒 健、久慈 雅榮、吉野 尚人				堆積岩地域の特徴を考慮した地下水流動現象の解明とモデル化に関する研究		JNC TJ8400 2004-013		2004			
池田 良光、関根 達夫、堀田 康光				地下水位・土壌水分観測システムの設置		JNC TJ5410 2004-014		2005			
操上 広志、竹内 竜史、瀬尾 昭治				幌延深地層研究計画における地下水流動解析		JNC TN5400 2005-003		2005			
操上 広志				幌延深地層研究計画における地下水流動解析—平成17年度までの調査結果を踏まえた再解析—		JAEA-Research 2007-036		2007			
今井 久、前田 信行、塩崎 功、雨宮 清、千々松 正和				幌延深地層研究計画における地下水流動解析に関する検討		JNC TJ1400 2002-004		2002			
今井 久、福留 和人、粥川 幸司、佐々木 肇、千々松 正和、茂呂 吉司				幌延深地層研究計画における地下水流動に関する研究		JNC TJ5400 2004-001		2004			
下茂 道人、山本 肇、熊本 創、小野 誠、藤原 靖				幌延深地層研究計画における地質環境のモデル化研究		JNC TJ5400 2004-004		2005			
日本原子力研究開発機構				幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」		JAEA-Research 2007-044	59-89	2007			

表 4-A (1) 収集文献一覧表 (5/5)

要素	対象エリア	報告書種別	著者	タイトル	雑誌名	号	ページ	年		
水 理	幌延周辺	原子力機構	中林 宏典、松岡 直基、松尾 満、中野 洋一、戸村 豪治、操上 広志、柴野 一則、國丸 貴紀、原 稔	幌延深地層研究計画における表層水理現地調査		JNC TJ1410 2001-005		2002		
			藪内 聡、操上 広志、瀬尾 昭治、原 稔、國丸 貴紀、竹内 章史	幌延深地層研究計画における表層水理調査の現状		JAEA				
			瀬尾 昭治、竹内 章史、操上 広志、原 稔	幌延深地層研究計画におけるボーリング孔を用いた地下水の水圧の長期モニタリング		JAEA-Research 2006-056		2006		
			大島 洋志、西田 道人、前川 統一郎、平山 利晶、藤原 幹之、嵐 正治	幌延深地層研究計画における水収支法による地下水涵養量の推定-2003年8月~2004年7月-		JNC TN5400 2005-005		2005		
				幌延町開進地区における地下水流動解析研究		JNC TJ1400 99-045		1995		
		英文	C. Doughty and C. F. Tsang	Application of direct-fitting, mass-integral, and multi-rate methods to flowing fluid electric conductivity logs from Horonobe, Japan	Report to JAEA/EDOE collaborative Project				2006	
		H. Yamamoto, T. Kunimaru, H. Kurikami, M. Shimo, and T. Xu	Long-term simulation of ambient groundwater chemistry at Horonobe Underground Research Laboratory, Japan -Application of coupled hydro-geochemical model-	GeoProc2006 Advances on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Geosystems and Engineering	Nanjing		382-387	2006		
ボーリング	全 国	外部機関報告書	田中 明子、矢野 雄策、笹田 政克、大久保 泰邦、梅田 浩司、中司 昇、秋田 藤夫	坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル	地質調査所月報	50	457-487	1999		
	幌延周辺	外部機関報告書	幌延町 石油公団	北進R-1報告書 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「天北」調査報告書					1968 1995	
		原子力機構	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結果の解析・評価		PNC TJ4027 87-007(1)			1987	
			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		PNC TJ1027 98-012			1987	
			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-付図表-		PNC TJ1027 98-011			1987	
			山本 卓也、下茂 道人、藤原 靖、服部 弘通、田所 照夫、岩間 彦衛、名合 牧人、熊本 創	幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HDB-1孔)		JNC TJ1400 2002-010			2002	
			山本 卓也、下茂 道人、藤原 靖、服部 弘通、田所 照夫、岩間 彦衛、名合 牧人、熊本 創	幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HDB-2孔)		JNC TJ1400 2002-011			2002	
			山本 卓也、下茂 道人、藤原 靖、服部 弘通、名合 牧人、田所 照夫、久慈 雅栄	幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-3孔)		JNC TJ5420 2004-003			2003	
			山本 卓也、下茂 道人、藤原 靖、服部 弘通、名合 牧人、田所 照夫、久慈 雅栄	幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-4孔)		JNC TJ5420 2004-004			2003	
			山本 卓也、下茂 道人、藤原 靖、服部 弘通、名合 牧人、田所 照夫、久慈 雅栄	幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-5孔)		JNC TJ5420 2004-005			2003	
			山本 卓也、下茂 道人、藤原 靖、服部 弘通、名合 牧人、田所 照夫、中垣 真一	幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6、7、8孔)のうちHDB-6孔		JNC TJ5400 2005-004			2004	
			山本 卓也、下茂 道人、藤原 靖、服部 弘通、名合 牧人、田所 照夫、中垣 真一	幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6、7、8孔)のうちHDB-7孔		JNC TJ5400 2005-005			2004	
			山本 卓也、下茂 道人、藤原 靖、服部 弘通、名合 牧人、田所 照夫、中垣 真一	幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6、7、8孔)のうちHDB-8孔		JNC TJ5400 2005-006			2004	
			高橋 一晴	幌延深地層研究計画における地表踏査およびボーリング調査の各種測定・分析		JNC TN5400 2005-010			2005	
			その他	幌延周辺	外部機関報告書	電力中央研究所	平成17年度 地層処分技術調査等(地下水年代測定技術調査)報告書			
		電力中央研究所				平成18年度 地層処分技術調査等(地下水年代測定技術調査)報告書				2007
		電力中央研究所				平成18年度 地層処分技術調査等(ボーリング技術高度化調査)報告書				2007
		原子力機構			核燃料サイクル開発機構	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-	JNC TN1400 2002-003			2002
		核燃料サイクル開発機構		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-	JNC TN1400 2003-004				2003	
		核燃料サイクル開発機構		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-	JNC TN1400 2004-007				2004	
核燃料サイクル開発機構	高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年取りまとめ 分冊1 深地層の科学的研究-	JNC TN1400 2005-014					2005			



図 4-A (2) 幌延地域の既存反射法地震探査調査位置図 4-A-1,4-A-11~13

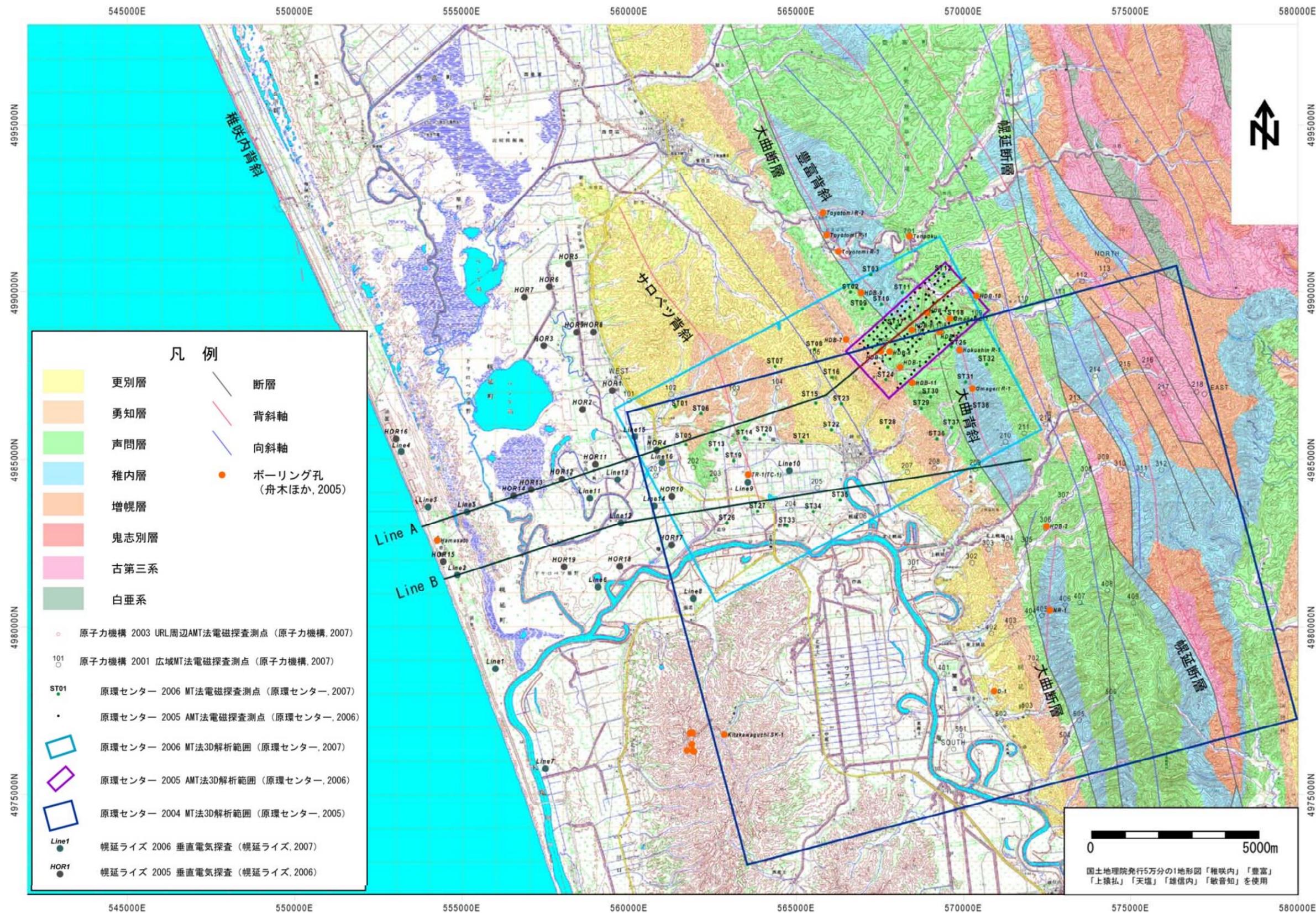


図 4-A (3) 幌延地域の既存電気・電磁探査調査位置図 (4-A-1,4-A-3,4-A-4,4-A-6)-9)

付録 4-A 参考文献

- 4-A-1) 舟木泰智, 石井英一, 安江健一, 高橋一晴: “文献調査に基づく幌延地域の地質・地質構造に関する検討”, JNC TN5400 2004-006 (2005).
- 4-A-2) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱 克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: “幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書”, 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044 (2007).
- 4-A-3) 岸本宗丸, 高山純一, 横井浩一: “電磁法による地上物理探査”, JNC TJ1420 2001-036 (2001).
- 4-A-4) 松尾公一, 根木健之, 横井浩一, 高橋武春, 手島稔: “幌延深地層研究計画における電磁法による大曲断層調査”, JNC TJ5410 2004-002 (2004).
- 4-A-5) 原子力環境整備促進・資金管理センター: “平成 16 年度 地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書”, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2005).
- 4-A-6) 原子力環境整備促進・資金管理センター: “平成 17 年度 地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書”, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2006).
- 4-A-7) 原子力環境整備促進・資金管理センター: “平成 18 年度 地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書”, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2007).
- 4-A-8) 北海道科学技術総合振興センター幌延地圏環境研究所: “平成 17 年度地圏環境研究事業研究成果報告書”, 北海道科学技術総合振興センター幌延地圏環境研究所 (2006).
- 4-A-9) 北海道科学技術総合振興センター幌延地圏環境研究所: “平成 18 年度地圏環境研究事業研究成果報告書”, 北海道科学技術総合振興センター幌延地圏環境研究所 (2007).
- 4-A-10) 東中基倫, 津久井朗太, 太田陽一: “幌延深地層研究計画における反射法地震探査を用いた地質構造調査”, JNC TJ1410 2002-002 (2002).
- 4-A-11) 津久井朗太, 西木司, 東中基倫, 津信宏: “幌延深地層研究計画における高密度反射法地震探査, マルチオフセット VSP 探査, 重力探査”, JAEA-Data/Code 2006-026 (2007).
- 4-A-12) 東中基倫, 佐野雪子, 小澤岳史: “既存反射法地震探査データの再解析”, JNC TJ5410 2005-009 (2005).
- 4-A-13) 兼清豊比古: “北海道北部地域における地質環境データ収集・整理”, JNC TJ1440 99-005 (1999).

This is a blank page.

付録 4-B

概念モデル図

- (1) 既存情報に基づく地質・地質構造概念モデル
- (2) 既存情報に基づく地下水の流動特性に関する概念モデル
- (3) 既存情報に基づく地下水の塩分濃度に関する概念モデル
- (4) 既存情報に基づく概念モデル（地質・地質構造／地下水流動／塩分濃度）

This is a blank page.

(1) 既存情報に基づく地質・地質構造概念モデル

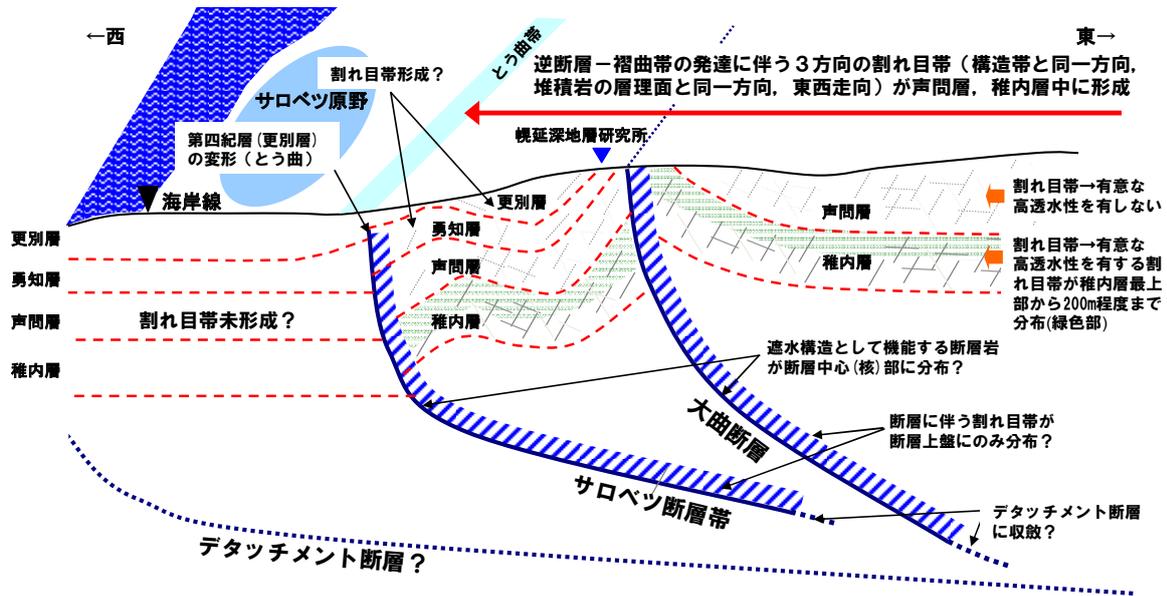


図 4-B (1)-1) 既存情報 (石油公団^{4-B-1)}) に基づく地質・地質構造概念モデル

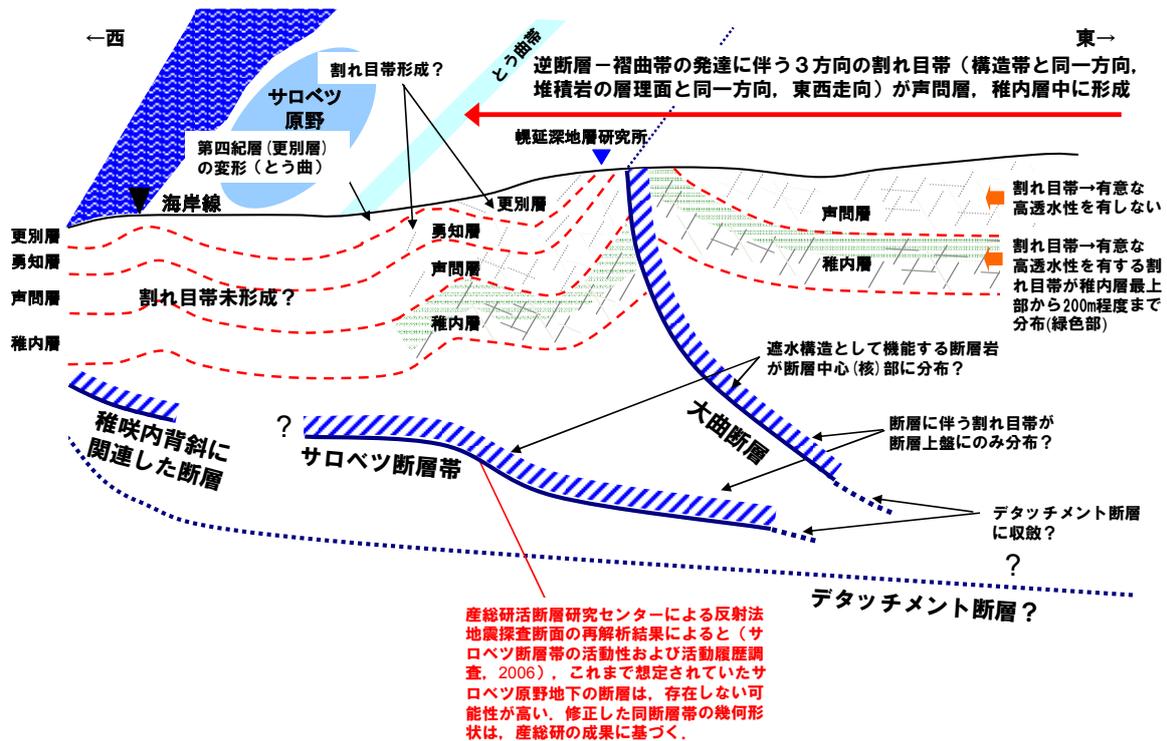
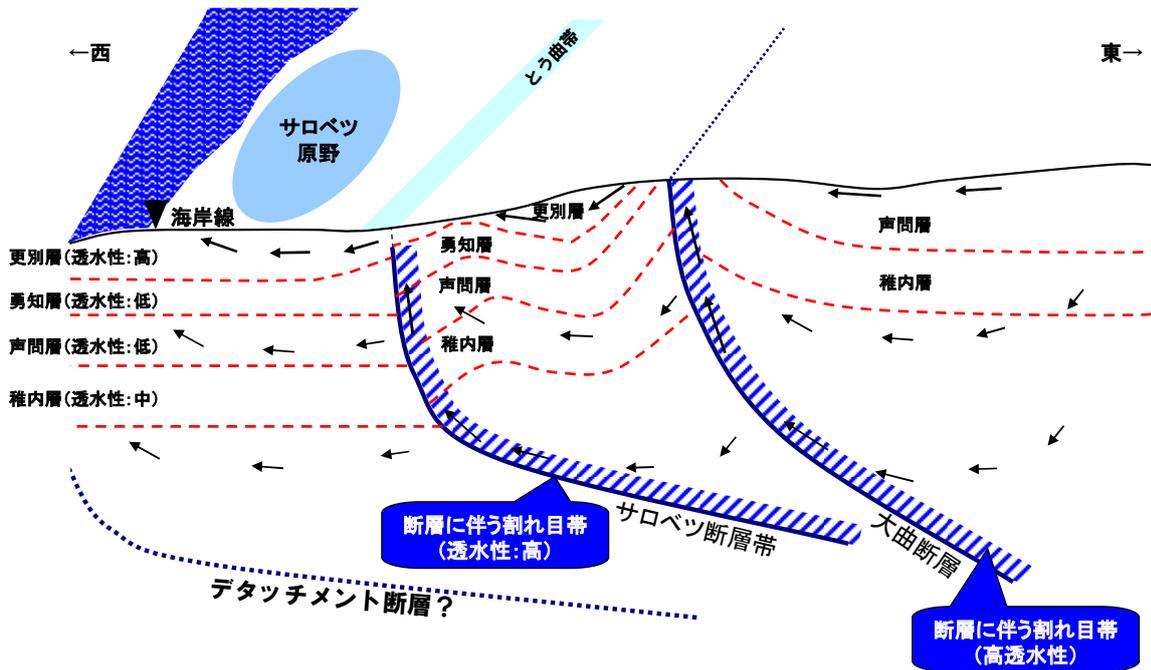


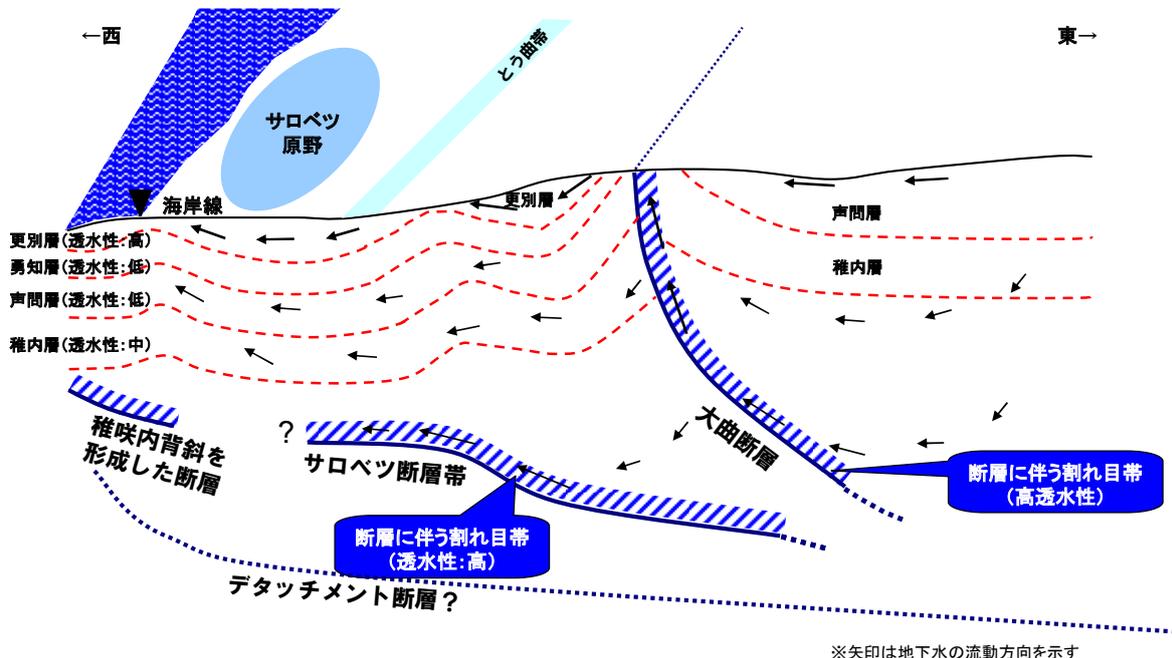
図 4-B (1)-2) 既存情報 (産総研^{4-B-2)}) に基づく地質・地質構造概念モデル

(2) 既存情報に基づく地下水の流動特性に関する概念モデル



- ✓ 断層に直交する方向の透水性は、低透水性の可能性有り
 - ✓ 後背地地形による動水勾配の詳細は、三次元的に検討する必要有り
- ※矢印は地下水の流動方向を示す

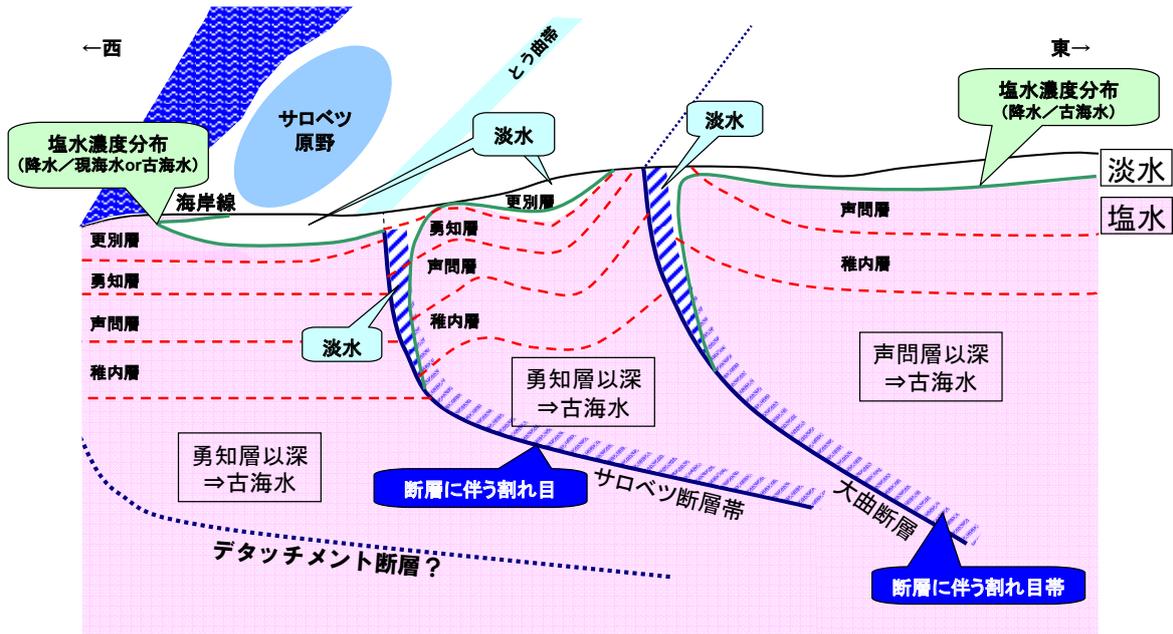
図 4-B (2)-1) 既存情報 (石油公団^{4-B-1)}) に基づく地下水の流動特性に関する概念モデル



- ✓ 断層に直交する方向の透水性は、低透水性の可能性有り
 - ✓ 後背地地形による動水勾配の詳細は、三次元的に検討する必要有り
- ※矢印は地下水の流動方向を示す

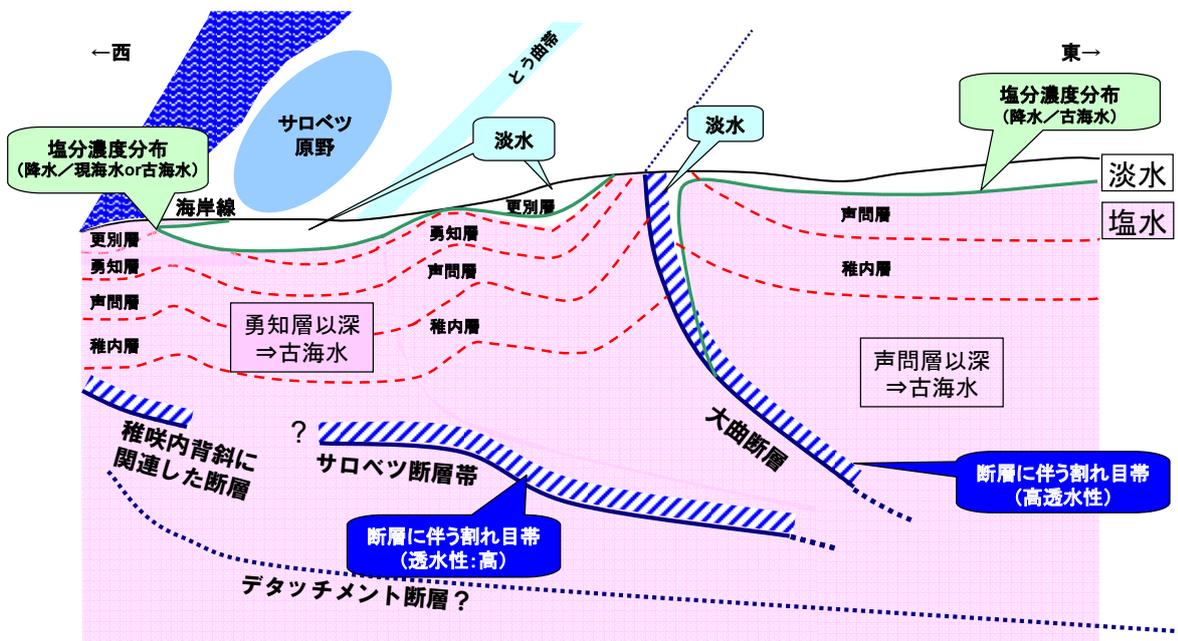
図 4-B (2)-2) 既存情報 (産総研^{4-B-2)}) に基づく地下水の流動特性に関する概念モデル

(3) 既存情報に基づく地下水の塩分濃度に関する概念モデル



- ✓ 更別層の上部は陸成, 下部は海成
- ✓ 古海水と現海水の区別は困難
- ✓ 海岸線付近の塩分濃度分布は不明
- ✓ 海岸線付近では, 更別層内の堆積構造による透水性の違いにより, 複雑な塩分濃度分布である可能性有り

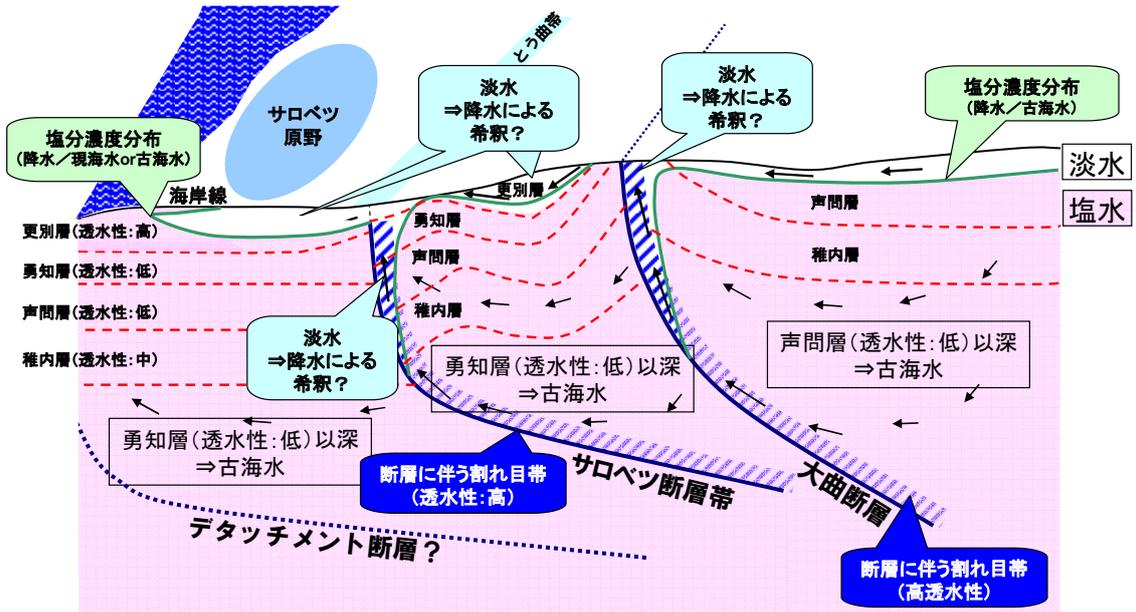
図 4-B (3)-1) 既存情報 (石油公団 4-B-1) に基づく地下水の塩分濃度に関する概念モデル



- ✓ 更別層の上部は陸成, 下部は海成
- ✓ 古海水と現海水の区別は困難
- ✓ 海岸線付近の塩分濃度分布は不明
- ✓ 海岸線付近では, 更別層内の堆積構造による透水性の違いにより, 複雑な塩分濃度分布である可能性有り

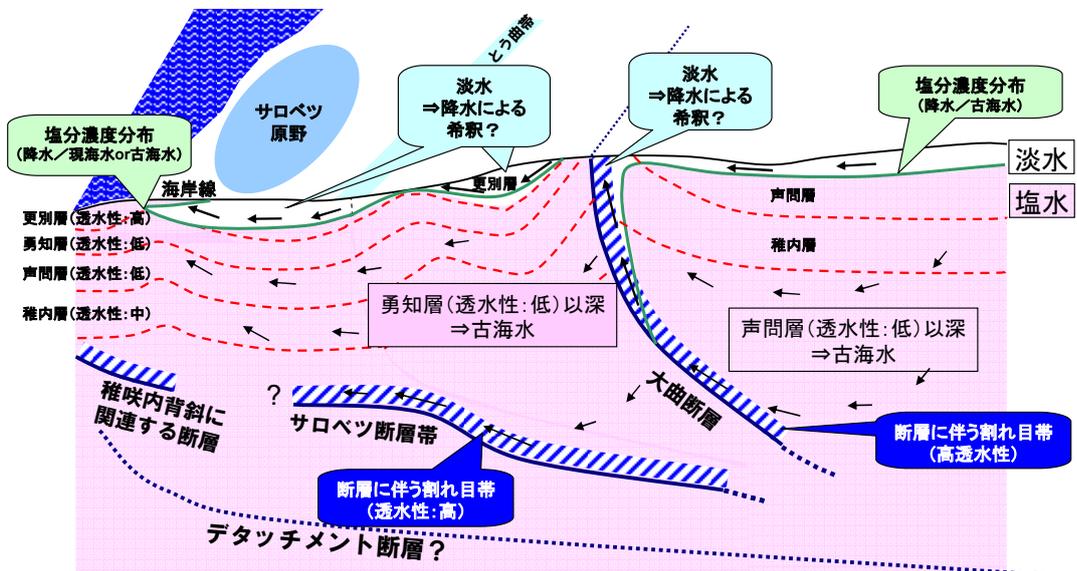
図 4-B (3)-2) 既存情報 (産総研 4-B-2) に基づく地下水の塩分濃度に関する概念モデル

(4) 既存情報に基づく概念モデル (地質・地質構造/地下水流動/塩分濃度)



- ✓ 断層に直交する方向の透水性は、低透水性の可能性有り
 - ✓ 後背地地形による動水勾配の詳細は、三次元的に検討する必要有り
 - ✓ サロベツ断層帯の透水性(透水性の有無や高透水性の割れ目帯の分布など)や後背地地形による動水勾配は沿岸域の塩分濃度分布に影響を与えている可能性有り
 - ✓ 古海水と現海水の区別は困難
 - ✓ 海岸線付近の塩分濃度分布は不明
 - ✓ 海岸線付近では、更別層内の堆積構造による透水性の違いにより、複雑な塩分濃度分布である可能性有り
- ※矢印は地下水の流動方向を示す

図 4-B (4)-1) 既存情報 (石油公団^{4-B-1)}) に基づく概念モデル
(地質・地質構造/地下水流動/塩分濃度)



- ✓ 断層に直交する方向の透水性は、低透水性の可能性有り
 - ✓ 後背地地形による動水勾配の詳細は、三次元的に検討する必要有り
 - ✓ サロベツ断層帯の透水性(透水性の有無や高透水性の割れ目帯の分布など)や後背地地形による動水勾配は沿岸域の塩分濃度分布に影響を与えている可能性有り
 - ✓ 古海水と現海水の区別は困難
 - ✓ 海岸線付近の塩分濃度分布は不明
 - ✓ 海岸線付近では、更別層内の堆積構造による透水性の違いにより、複雑な塩分濃度分布である可能性有り
- ※矢印は地下水の流動方向を示す

図 4-B (4)-2) 既存情報 (産総研^{4-B-2)}) に基づく概念モデル
(地質・地質構造/地下水流動/塩分濃度)

付録 4-B 参考文献

- 4-B-1) 石油公団: “国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「天北」調査報告書”, (1995).
- 4-B-2) 産業技術総合研究所: “サロベツ断層帯の活動性および活動履歴調査”, 「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書, No.H17-1 (2006).

This is a blank page.

付録 4-C

反射法地震探査

計画測線設定フローダイアグラム

- (1) 反射法地震探査全体フローダイアグラム
- (2) 反射法地震探査の計画測線設定に係わる作業概要
- (3) 各作業項目における作業内容

This is a blank page.

(1) 反射法地震探査全体フローダイアグラム

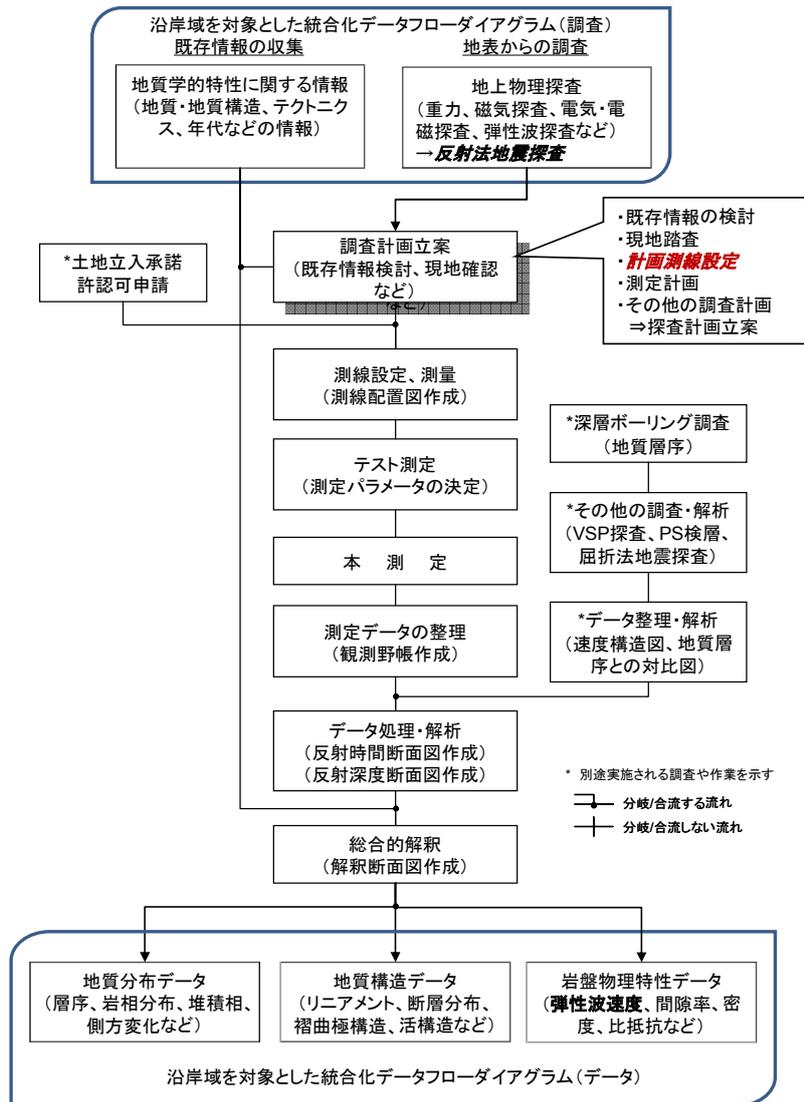


図 4-C (1) 反射法地震探査全体フロー図

上図(図 4-C (1))は、反射法地震探査の計画立案から解析結果及び解釈までの一般的な作業の流れを示したものである(4-C-1~3)。

このうち、その最初の作業である調査計画立案に係る中で、測線計画の設定について作業の流れをフロー化し、ノウハウの抽出を行った。

(2) 反射法地震探査の計画測線の設定に係わる作業概要

表 4-C (2) 計画測線の設定に係わる作業概要

名 称	反射法地震探査の計画測線の設定	
定 義	既存情報と合わせて、当該地域の地質構造を把握するための探査計画測線の設定	
入力データ	既存情報による地質構造モデル	
	現地踏査(測定実施の可能性を確認) *ルート選定ができた段階で実施	
	探査の目的(何を知りたいのか)	
	地形データ(土地利用の状況を含む:市町村発行のと都市計画図など)	
	地質変遷を考慮した調査領域	
	許認可等の手続きの情報	
出力データ	探査計画測線	
作業項目	①探査目的(対象)に対して理想的な探査測線配置の検討	
	②測線を設定可能なルートを選定	
	③制約条件の整理(技術的、社会的、経済的)と検討	
	④総合的評価	
作業内容	①探査目的(対象)に対して理想的な探査測線配置の検討 ・既存文献から想定される地質構造を考慮して、探査目的(対象)に対して理想的な測線(方向や延長)を検討	
	②測線の設定可能なルートを選定 ・理想的な配置に対して、測線が設定可能なルートを検討 ・複数のルートが考えられる場合、地理的条件などを単位として区間に区分	
	③制約条件の整理(技術的、社会的、経済的) ・設定したルートに対して技術的側面からメリット・デメリットについて整理・評価 ・設定したルートに対して社会的側面からメリット・デメリットについて整理・評価 ・設定したルートに対して経済的側面からメリット・デメリットについて整理・評価	
	④総合的評価 ・技術的、社会的、経済的制約条件を整理・評価した結果から、探査ルートを選定	
	関連図書	・兼清豊比古:“北海道北部地域における地質環境データ収集・整理”, サイクル機構技術資料(契約業務報告書: 榎地球科学総合研究所), JNC TJ1440 99-005, (1999) ・東中基倫, 佐野雪子, 小澤岳史:“既存反射法地震探査データの再解析”, JNC TJ5410 2005-009, (2005) ・津久井朗太, 西木司, 東中基倫, 津信宏:“幌延深地層研究計画における高密度反射法地震探査, マルチオフセットVSP探査, 重力探査”, JAEA-Data/Code 2006-026, (2006) ・東中基倫, 津久井朗太, 太田陽一:“幌延深地層研究計画における反射法地震探査を用いた地質構造調査”, JNC TJ1410 2002-002, (2002)
	関連テキスト	物理探査学会: 物理探査ハンドブック 第1章 反射法地震探査, 物理探査学会, 1-114 (1998). 物理探査学会物理探査要領作成委員会: 物理探査適用の手引(とくに土木分野への利用), 物理探査学会, (2000).

今回実施した反射法地震探査の計画測線の設定における作業内容を上記の表にまとめた。作業項目は、以下の通り。

- ①探査目的(対象)に対して理想的な探査測線配置の検討
- ②測線を設定可能なルートの選定
- ③制約条件の整理(技術的、社会的、経済的)と検討
- ④総合的評価

作業を開始するために準備すべき入力データとして必要なものは、以下の通り。

- ・既存資料による当該地域の地質構造モデル
- ・探査の目的(何を知りたいのか)
- ・地形データ(土地利用状況を含む:市町村発行の都市計画図など)
- ・地質変遷を考慮した調査領域
- ・許認可などの手続きの情報

(3) 各作業項目における作業内容

① 探査対象に対して理想的な探査測線配置の設定

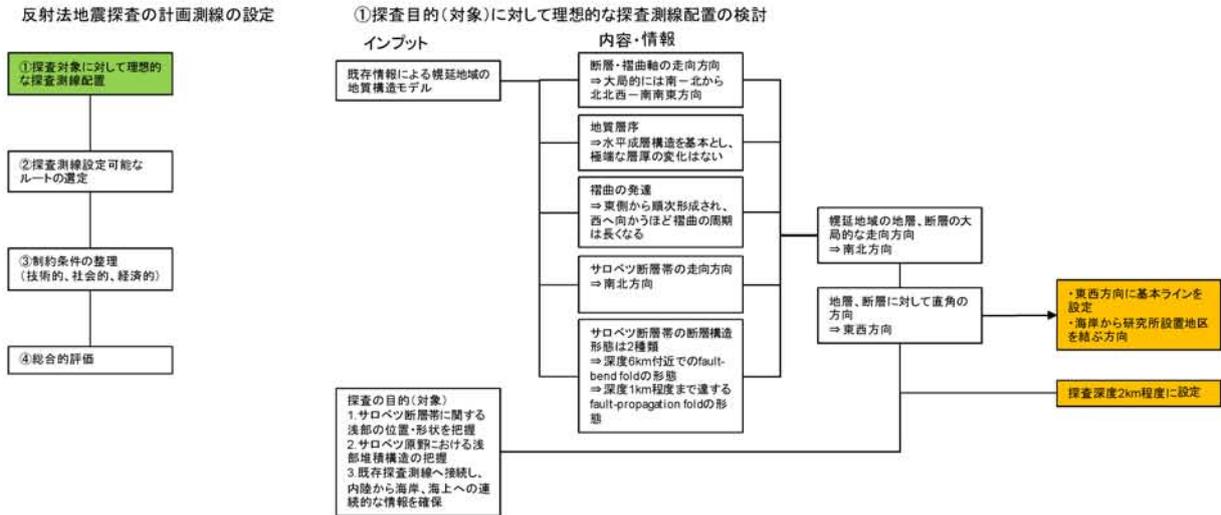


図 4-C (3)-1) 探査対象に対しての理想的な探査測線配置の設定の作業の流れ



図 4-C (3)-2) 探査対象に対しての理想的な探査測線配置図

本作業では、目的とする探査対象を把握するためには、どのような測線配置が最も適しているかを、既存情報を基に検討した。

インプット情報は以下の通り。

・既存情報による幌延地域の地質構造モデル

解説：地質図幅や既存調査などの地質・地質構造に係る情報を収集・整理を行い、反射法地震探査を計画するにあたって重要な、地質の層序とその分布形状、断層の分布形状及び地盤の弾性波速度などに関する情報を確認した。

・探査の目的（対象）

1. サロベツ断層帯に関する浅部の位置・形状を把握
2. サロベツ原野における浅部堆積構造の把握
3. 既存探査測線へ接続し、内陸から海岸、海上への連続的な情報を確保

解説：上記3つの項目が探査測線設定に対する目的である。既存情報より幌延地域には資源探査による石油・天然ガスを対象とした数多くの反射法地震探査の実績があり、深度8 km程度までのデータが存在している。これらの探査は、探査対象が今回設定した対象より深いため、受振点間隔が広い仕様の探査であることから、浅部の詳細な地質構造を反射断面から読取ことは困難である。一方、サロベツ断層帯には2つの解釈が存在し、どちらが現実の地質構造を反映したものか判断がつかない。基礎試錐「天北」の解釈によると、深度1 km程度の勇知層の下面までサロベツ断層帯が深部から伸びていると解釈されている。また、既存の反射断面図(4C-4)から、サロベツ原野の地下1 km付近の勇知層に斜交する反射イベントが確認できる。この斜交構造から浅部の堆積順序が読み取れ、時間変化に係る情報が得られると考えた。これらのことから、探査深度を2 km程度とし、高密度の探査を計画することが必要と考えられる。幌延町の内陸部では、原子力機構による高密度反射法地震探査やボーリング調査が実施されていることから、これらの結果への接続を図ることで、その結果との直接対比が解釈の際に可能となると考えた。

・作業の内容

既存情報から得られる当該地域の地質構造の特徴は以下の通り。

- ✓断層・褶曲軸の走向方向は、大局的には南北方向である。
- ✓地質構造・層序は、水平構造を基本とし、極端な層厚の変化はない。
- ✓褶曲の発達は、東側から順次形成され、西へ向かうほど褶曲の周期は長くなるとともに、褶曲の程度も小さくなる。
- ✓サロベツ断層帯の走向方向は、おおむね南北方向である。
- ✓サロベツ断層帯の断層構造形態は2種類ある。

上記地質構造の特徴から、幌延地域の地層及び断層の走向方向は、南北方向で、南北方向の地質の変化は小さいと考えられる。

二次元探査の場合、探査測線は地質構造に直交する方向に設定することが基本であること（原理原則の面から：既存のノウハウ）から、本地域での二次元探査測線の基本となる方向は、東西方向である。また、探査の目的から探査深度は2 km程度であり、測線の延長は、海岸から既存の探査測線への接続を図るものとした。

② 探査測線設定可能なルートを選定

反射法地震探査の計画測線の設定



②探査測線設定可能なルートを選定(S1測線)

インプット 内容・情報

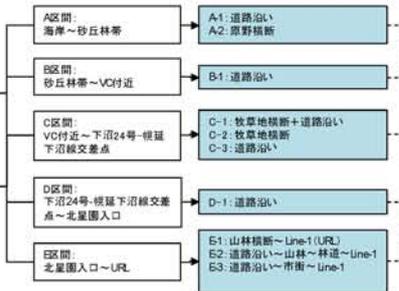
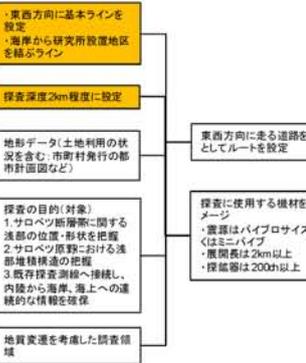


図 4-C (3)-3) 探査測線設定可能なルートを選定作業の流れ



図 4-C (3)-4) 探査測線設定可能なルートを選定結果図

ここでは、探査測線が設定可能と考えられるルートを抽出する作業を行った。

入力情報は以下の通り。

- ・東西方向に基本ラインを設定。・海岸から研究所設置地区を結ぶライン。・探査深度 2 km 程度に設定。(これらは、前作業のアウトプット)
- ・地形データ (土地利用の状況を含む：市町村発行の都市計画図など)
- ・探査の目的 (対象)
- ・地質変遷を考慮した調査領域

作業の内容

- ✓東西方向で探査可能なルートを抽出
- ✓複数のルートを抽出した区間に分類
- ✓現地踏査

解説：探査の実施が不可能な場所を確認した。今回はサロベツ原野が国立公園に指定されているため、公園内は探査範囲から除外した。探査可能と考えられるルートの抽出は、東西方向に走る道路を基本とした。牧草地は地権者との交渉次第で探査可能と考えた。山林内も許可条件により探査可能と考えた。抽出したルートは、全部で 10 ルート。これらを複数のルートを抽出した区間別に 5 区間に区分した。また、実際に現地踏査は実施していないので、航空写真により現地の状況を把握した。

探査深度 2 km に必要な使用機器をイメージして、ルートを抽出した。今回イメージした機材は、震源には探査深度や道路上での作業性を考慮して、バイプロサイズもしくはミニバイブ、測線展開長は 2 km 以上、それに必要なチャンネル数 200 ch 以上 ($2 \text{ km} \div 10 \text{ m} = 200 \text{ ch}$) とし、ルート選定した。反射法地震探査の場合、探査深度 = 展開長が探査深度のおおよその目安である (4-C-2)。

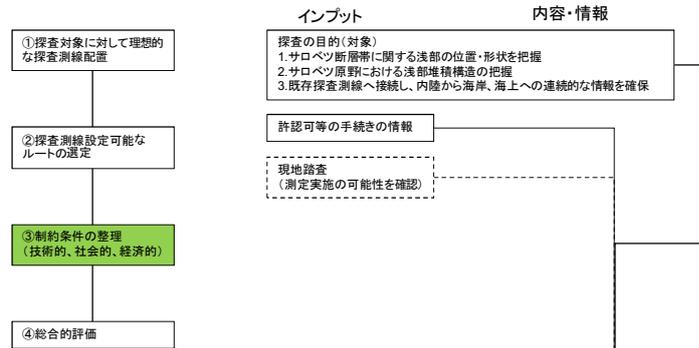
ルート選定の際のポイント

- ・測線を屈曲させてもできるだけなめらかになるような配置を心がけた。
- ・使用機材が入れる可能性とそれに代用できる機材が使用可能かを考えている。例えば、山林内であれば受振器の展開は可能だが、震源には火薬類の使用に変更するなど。

③ 制約条件の整理 (技術的、社会的、経済的)

反射法地震探査の計画測線の設定

③制約条件の整理 (S1測線)



区間	ルート	目的に対する達成品質	技術的側面		社会的側面		経済的側面		評価
			メリット	デメリット	メリット	デメリット	メリット	デメリット	
A	A-1 道路沿い	目的に対して◎ ボーリング孔データと直接対比可能	作業性は良い。 震源・受振線の配置に特別な作業なし。 海上との接続を考慮すると、繰返し使用可能で作業性が悪い。	測線未満であることから重合効果は元々小さい場所。屈曲測線では重合効果を損ないやすい。	現状復帰が容易。	片面交互通行など交通規制が必要。 道路使用許可、道路占有許可申請が必要。	作業性が良いことから、経済的にも相対的に安価に実施できる。	路面に損傷が生じた場合の現状復帰が必要。	◎
	A-2 原野横断	目的に対して◎ ただし、ボーリング孔からのオフセットがあり、層厚と対比する際に不確実性が生じる	測線未満であることから重合効果は小さい場所。直線に配置する方が浅部まで明確な結果が得られる。	異なる震源(火災類とパイプ)を使用することでデータ処理作業量が増える。	通行車両等がないため測定が制約されにくい。	売れ地のための作業性が悪い。 震源にパイプを使用できず、火災類となる可能性あり。 火災類の使用の場合、発破孔の掘削作業を伴う。 海上との接続に際して、測定時期がずれることで作業量が多い。	火災類調査消費許可申請が必要。 公費では火災類の使用に關して許可されない可能性も。作業性が悪いこと、測線設定のための依頼、発破孔の掘削など、費用は出る。	○	
B	B-1 道路沿い	目的に対して◎	作業性は良い。 震源・受振線の配置に付随する特別な作業なし。 海上との接続を考慮すると、繰返し使用可能で作業性が悪い。 直線測線のための理想的。		現状復帰が容易。	片面交互通行など交通規制が必要。 道路使用許可、道路占有許可申請が必要。	作業性が良いことから、経済的にも相対的に安価に実施できる。	路面に損傷が生じた場合の現状復帰が必要。	◎
C	C-1 牧草地横断	目的に対して◎	サロベツ断層帯通過部に相当するため、直線的な測線を配置して、浅部の品質を高める。	地盤が脆弱なため、パイプロサイズが使用不可能の可能性がある。 地下水位が高いため、振動により水が噴き出す可能性もある。	通行車両等がないため測定が制約されにくい。	牧草地を傷める。 畜舎への配慮も必要。	○-2ルートに比べ牧草地の換長が短い。ため、牧草地への影響が少ない。	地盤が軟らかいため、立入対策や現状復帰への対策費が必要。	○
	C-2 牧草地横断	目的に対して◎	サロベツ断層帯通過部に相当するため、直線的な測線を配置して、浅部の品質を確保。最も理想的な配置。	地盤が脆弱なため、パイプロサイズが使用不可能の可能性がある。 地下水位が高いため、振動により水が噴き出す可能性もある。	通行車両等がないため測定が制約されにくい。	牧草地を傷める。 畜舎への配慮も必要。		地盤が軟らかいため、立入対策や現状復帰への対策費が必要。	◎
	C-3 道路沿い	目的に対して△		屈曲測線となるため、浅部の品質が低下する。	現状復帰が容易。	片面交互通行など交通規制が必要。 道路使用許可、道路占有許可申請が必要。	作業性が良いことから、経済的にも相対的に安価に実施できる。	路面に損傷が生じた場合の現状復帰が必要。	△
D	D-1 道路沿い	目的に対して◎ (E-1区間と組み合わせれば◎)	作業性は良い。 震源・受振線の配置に特別な作業なし。 直線的な測線のための理想的。		現状復帰が容易。	片面交互通行など交通規制が必要。 道路使用許可、道路占有許可申請が必要。	作業性が良いことから、経済的にも相対的に安価に実施できる。	路面に損傷が生じた場合の現状復帰が必要。	○
E	E-1 山林横断-Line-D	目的に対して◎	直線的に測線を配置できるため、処理は比較的平易。山地部の新たな情報が得られる。	地形の凹凸により、静修正の品質が低下する可能性がある。 異なる震源を使用することでデータ処理作業量が増える。	通行車両等がないため測定が制約されにくい。	山林部では作業性が悪い。 震源にパイプロを使用できず、火災類となる可能性あり。 火災類の使用の場合、発破孔の掘削作業を伴う。	火災類調査消費許可申請が必要。 山林部では火災類の使用に關して許可されない可能性も。山林部は作業性が悪いこと、測線設定のための依頼、発破孔の掘削などに費用は出る。	△	
	E-2 道路沿い-山林-林道-Line-1	目的に対して◎	市街地を避けるルートのため、ノイズの影響が小さい。	地形の凹凸により、静修正の品質が低下する可能性がある。 異なる震源を使用することでデータ処理作業量が増える。	山林-林道区間を通行車両等がないため測定が制約されにくい。	山林部では作業性が悪い。 山林部では震源にパイプロを使用できず、一部火災類となる可能性あり。 火災類の使用の場合、発破孔の掘削作業を伴う。	市街地手前まで道路を使用するため、E-1ルートに比べ、復旧に測定可能。	火災類調査消費許可申請が必要。 山林部では火災類の使用に關して許可されない可能性も。作業性が悪いこと、測線設定のための依頼、発破孔の掘削など、費用は出る。	△
	E-3 道路沿い-市街-峠道北道線	目的に対して△	東側へ延長することで大曲断層の研究施設設置場所南側の新たな情報が得られる。 市街地を直線的に横断するため、比較的全体の品質は確保できる。	市街地区間ではノイズの影響を懸念する可能性がある。 東側は、沢沿いの林道まで測線が設定する必要があるのである。	現状復帰が容易。	片面交互通行など交通規制が必要。 道路使用許可、道路占有許可申請が必要。 市街地を通過するため、振動に対する住民への配慮が必要。	作業性が良いことから、経済的にも相対的に安価に実施できる。	路面に損傷が生じた場合の現状復帰が必要。	○

図 4-C (3-5) 制約条件の整理作業の流れ

前作業で抽出したルートに対して、制約条件を整理した。制約条件として、技術的側面、社会的側面、経済的側面のメリット・デメリットを各ルートに対して考えた。技術的側面は、反射法の探査原理、データ処理の原理、現場測定における技術的な事項である。社会的側面は、調査地への立ち入りに関する事項、道路を使用する場合の許可申請など、道路状況・交通状況、探査測線付近の住民への影響や家畜への影響及び探査により生じる踏み荒らしの復旧などに関する事項である。経済的側面は、探査を実施する場合に必要な費用や探査実施に際して生じる経費に関する事項である。

インプット情報は以下の通り。

- ・抽出したルート
- ・探査目的
- ・許可申請などの情報
- ・現地踏査による現地状況

作業の内容

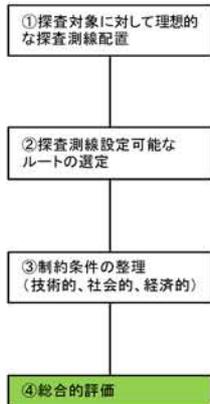
- ✓抽出したルートが、目的に対して達成できる品質を予測
- ✓設定したルートに対して、各側面からのメリット・デメリットを抽出・整理
- ✓現実性を考慮して各ルート进行评估

解説：達成品質の判断は、そのルートが原理原則に則り、目的に対して品質を確保できるかどうかで判断した。技術的側面では、作業性、原理原則に対する品質の良否、バイプロサイズの適応性について優位な点、不利な点を抽出した。社会的側面では、許可申請の必要性、補償の可能性について抽出した。経済的側面では、作業を実施するに当たり、掛かる費用を相対的に比較した。これら抽出した内容から、区間の中でどのルートが現実的であるか判断した。

- ・ A 区間は、海上との接続を考えなければならないこと、ボーリングが計画されている区間であることから、ボーリング結果との対比や VSP 探査の実施を考えて技術的な側面を重視して、ルート进行评估した。
- ・ B 区間は、最初の探査可能なルート抽出する段階で、選択の余地がなかった。
- ・ C 区間は、サロベツ断層帯の通過が想定される区間であることから、探査目的を達成するためには最も重要な区間であると考えた。そのため、技術的な側面を重視したルートを選択した。
- ・ D 区間も B 区間と同様選択に最初の段階でルートが決定された。
- ・ E 区間は、技術的な側面から、既存の測線との接合を図ることが重要と考えるとともに、経済的側面で他の区間に比べて、山林通過とした場合の費用が大きくなると考えられたため、山林ルートは現実的でないと考えた。

④総合的評価

反射法地震探査の計画測線の設定



④総合的評価(S1測線)

インプット

区間	ルート	評価
A 海岸～砂丘林帯	A-1 道路沿い	◎
	A-2 原野横断	○
B 砂丘林帯～ビジターセンター付近	B-1 道路沿い	◎
C ビジターセンター付近～下沼24号線×横延下沼線	C-1 牧草地横断	○
	C-2 牧草地横断	◎
	C-3 道路沿い	△
D 遺道浜里下沼線×横延下沼線～北星園入口	D-1 道路沿い	○
E 北星園～URL	E-1 山林横断～Line-D	△
	E-2 道路沿い～山林～林道～Line-1	△
	E-3 道路沿い～市街～横延北進線	○

内容・情報

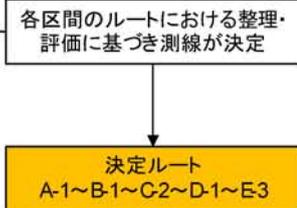


図 4-C (3)-6) 総合評価作業の流れ



図 4-C (3)-7) 総合評価により決定した探査計画測線

これまでの検討結果から、「A-1～B-1～C-2～D-1～E-3」とした、全体の測線ルートを決めた。

付録 4-C 参考文献

- 4-C-1) 物理探査学会物理探査要領作成委員会: “物理探査適用の手引(とくに土木分野への利用)”, 物理探査学会 (2000).
- 4-C-2) 物理探査学会: “物理探査ハンドブック”. 物理探査学会 (1998).
- 4-C-3) 地盤工学会地盤調査法改定編集委員会: “地盤調査の方法と解説”, 地盤工学会 (2004).
- 4-C-4) 産業技術総合研究所: “サロベツ断層帯の活動性および活動履歴調査”, 「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書, No.H17-1 (2006).

付録 4-D

電磁探査

計画測線設定フローダイアグラム

- (1) 電磁探査全体フローダイアグラム
- (2) 電磁探査の計画測線の設定に係わる作業概要
- (3) 各作業項目における作業内容

This is a blank page.

(1) 電磁探査全体フローダイアグラム

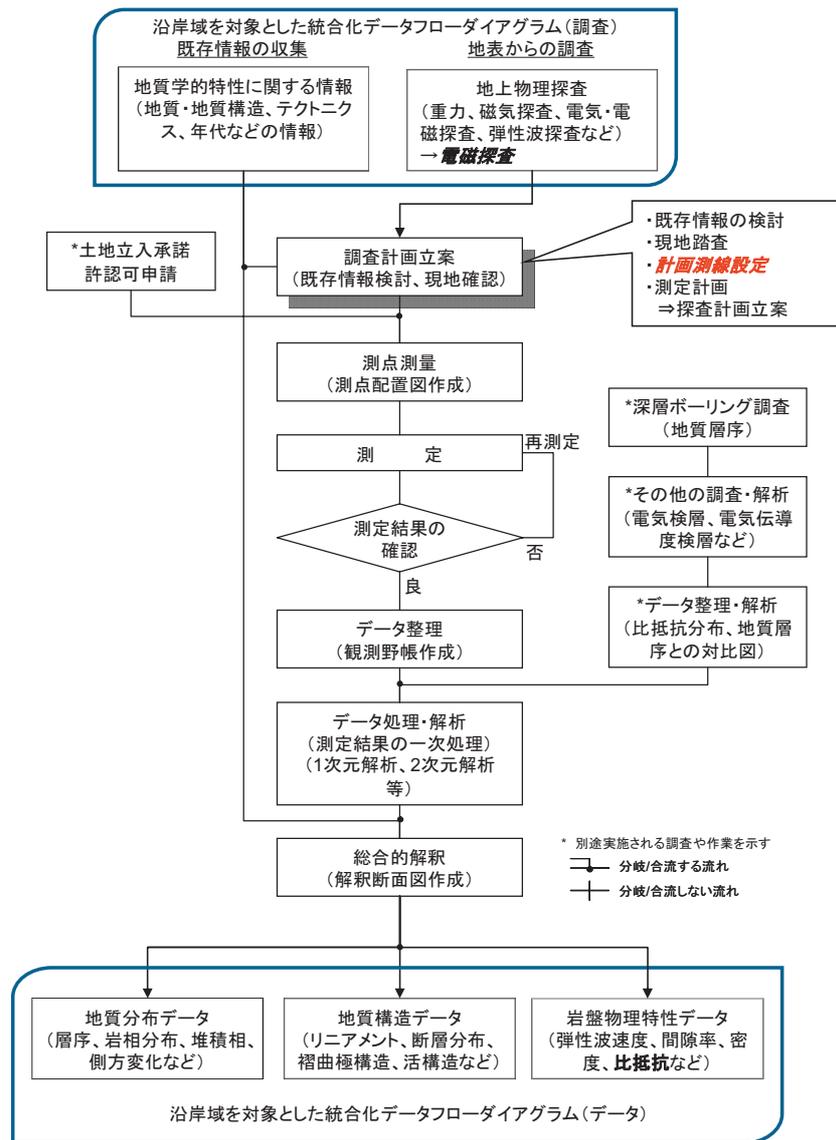


図 4-D (1) 電磁探査全体フローダイアグラム図

上図 (付録 4-D-1) は、電磁探査の計画立案から解析結果及び解釈までの一般的な作業の流れ図を示したものである (4-D-1, 4-D-2)。

今回は、最初の作業である計画・立案に係る中で、測線計画の設定について作業の流れをフローダイアグラム化し、ノウハウの抽出を行った。

(2) 電磁探査の計画測線の設定に係わる作業概要

表 4-D (2) 計画測線の設定に係わる作業概要

名 称	電磁探査(MT/AMT)の計画測線(測点)の設定
定 義	既存情報と合わせた、当該地域の地質構造を把握するための探査計画測線(測点)の設定
入力データ	既存の比抵抗データ
	既存情報による地質構造モデル
	現地踏査(測定実施の可能性を確認) *地図上での測点位置選定ができた段階で実施
	探査の目的(何を知りたいのか)
	地形データ(土地利用の状況を含む:市町村発行の都市計画図など)
	地質変遷を考慮した調査領域
	許認可等の手続きの情報
	(K指数:地磁気擾乱の程度を定量的に表現する地磁気活動指数の一つ。観測日の設定において考慮されることが理想)
出力データ	電磁探査(MT/AMT)計画測線(測点)
作業項目	①既存探査測線(測点)の把握と当該地域の比抵抗構造の把握
	②探査目的(対象)に対して理想的な探査測線配置の検討
	③測線(測点)を設定可能な場所を選定
	④制約条件の整理(技術的、社会的、経済的)と検討
	⑤総合的評価
作業内容	①既存探査測線(測点)の把握と当該地域の比抵抗構造の把握 ・既存の測点位置の確認と解析結果から得られている比抵抗構造の把握する
	②探査目的(対象)に対して理想的な探査測線配置の検討 ・既存文献から想定される地質構造を考慮して、探査目的(対象)に対して理想的な測点(方向や延長)を検討
	③測線(測点)の設定可能な場所を選定 ・理想的な配置に対して、測線が設定可能な場所を検討 ・他の物理探査との位置関係を検討 ・複数のルートが考えられる場合、地理的条件などを単位として区間に区分
	④制約条件の整理(技術的、社会的、経済的) ・設定した測点に対して技術的側面からメリット・デメリットについて整理・評価 ・設定した測点に対して社会的側面からメリット・デメリットについて整理・評価 ・設定した測点に対して経済的側面からメリット・デメリットについて整理・評価
	⑤総合的評価 ・技術的、社会的、経済的制約条件を整理・評価した結果から、探査測線(測点)を選定
	・太田久仁雄、阿部寛信、山口雄大、國丸貴紀、石井英一、操上広志、戸村豪治、柴野一則、濱 克宏、松井裕哉、新里忠史、高橋一晴、丹生屋純夫、大原英史、浅森浩一、森岡宏之、舟木泰智、茂田直孝、福島龍朗:幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」,日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044 (2007).
	・原子力環境整備促進・資金管理センター:平成16年度 地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書,原子力環境整備促進・資金管理センター (2005).
	・原子力環境整備促進・資金管理センター:平成17年度 地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書,原子力環境整備促進・資金管理センター (2006).
	・原子力環境整備促進・資金管理センター:平成18年度 地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験 報告書,原子力環境整備促進・資金管理センター (2007).
	・物理探査学会:物理探査ハンドブック 第6章 電磁探査.物理探査学会, 297-398 (1998).
・物理探査学会:物理探査要領作成委員会:物理探査適用の手引(とくに土木分野への利用),物理探査学会,(2000).	
・物理探査学会:新版物理探査用語辞典.愛智出版,(2005)	

今回実施した電磁探査の計画測線の設定における作業内容を上記の表 4-D(2)にまとめた。

作業項目は、以下の通り。

- ①既存探査測線（測点）の把握と当該地域の比抵抗構造の把握
- ②探査目的（対象）に対して理想的な探査測線配置の検討
- ③測線（測点）を設定可能な場所を選定
- ④制約条件の整理（技術的、社会的、経済的）と検討
- ⑤総合評価

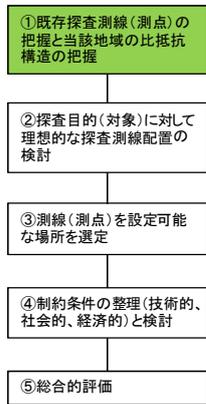
作業を開始するために準備すべき入力データとして必要なものは、以下の通り。

- ・既存資料による当該地域の地質構造モデル
- ・現地踏査（測定実施の可能性を確認） *地図上での測点位置選定ができた段階で実施
- ・探査の目的（何を知りたいのか）
- ・地形データ（土地利用の状況を含む：市町村発行の都市計画図など）
- ・地質変遷を考慮した調査領域
- ・許認可などの手続の情報
- ・(K 指数：地磁気擾乱の程度を定量的に表現する地磁気活動指数の一つ。観測日の設定において考慮されることが理想)

(3) 各作業項目における作業内容

① 既存探査測線（測点）の把握と当該地域の比抵抗構造の把握

電磁探査の計画測線（測点）の設定



① 既存探査測線（測点）の把握と当該地域の比抵抗構造の把握

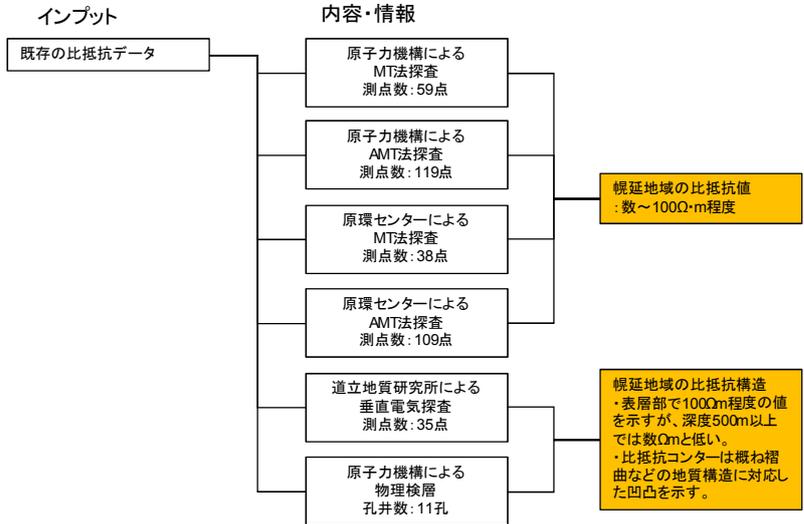
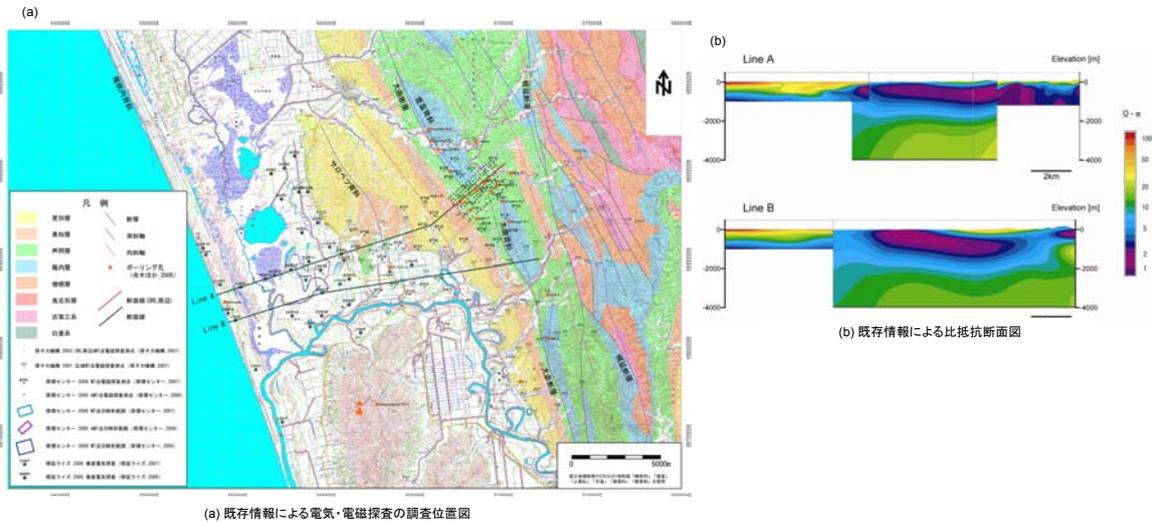


図 4-D (3)-1 既存情報による当該地域の比抵抗構造の把握作業の流れ



(a) 既存情報による電気・電磁探査の調査位置図

図 4-D (3)-2 既存情報による当該地域の比抵抗構造の把握

本作業では、幌延地域の比抵抗に関する既存情報から、比抵抗コンター図を作成し、海岸から研究所周辺までの東西方向の比抵抗分布を把握した。

インプット情報は以下の通り。

- ・既存の比抵抗データ

解説：幌延地域では各種手法により比抵抗データが存在する。データは、電磁探査（MT 法：幌延町中央部、AMT 法：研究所周辺）によるものが研究所周辺から幌延町中央部にかけて、サロベツ原野から海岸にかけて垂直電気探査（最大探査深度 1,000 m）によるもの、物理検層によるものが存在する。それぞれのデータは、取得方法と解析手法及び解析パラメータなどの違いにより、重複箇所では比抵抗値に不連続が生じている。

- ・作業の内容

既存の測点位置の確認と解析結果から得られている比抵抗構造を把握した。

- ✓幌延地域の比抵抗値は、数～100 Ωm 程度
- ✓幌延地域の比抵抗構造は、表層部で 100 Ωm 程度の値を示すが、深度 500 m 以上では数 Ωm と低い。
- ✓比抵抗コンター図は概ね褶曲などの地質構造に対応した凹凸を示す。

② 探査目的（対象）に対して理想的な探査測線配置の検討

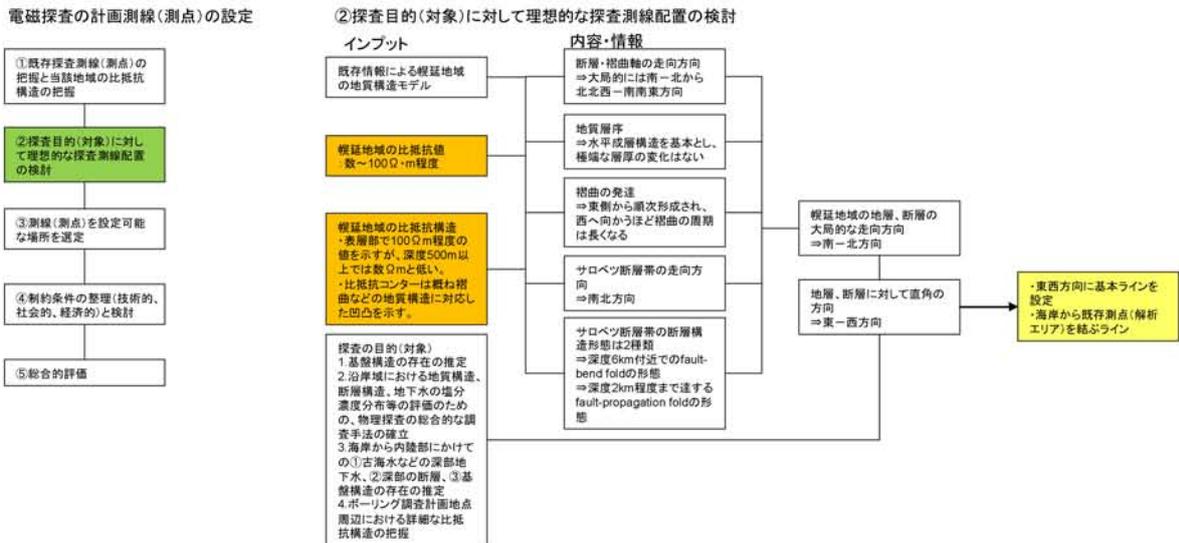


図 4-D (3)-3) 探査対象に対しての理想的な探査測線配置の設定の作業の流れ

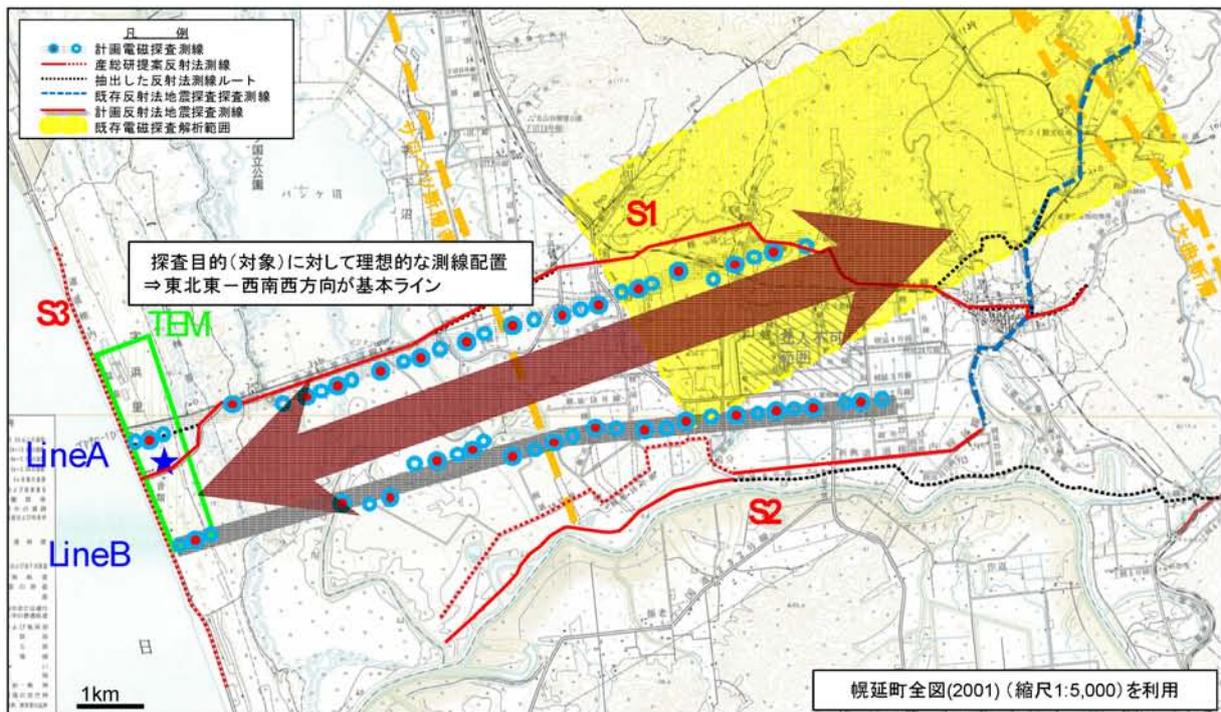


図 4-D (3)-4) 探査対象に対しての理想的な探査測線配置図

本作業では、目的とする探査対象を把握するためには、どのような測線配置が最も適しているかを、既存情報を基に検討した。

インプット情報は以下の通り。

・既存情報による幌延地域の地質構造モデル

解説：地質図幅や既存調査などの地質・地質構造に係る情報を収集・整理を行い、電磁探査を計画するにあたって重要な、地質の層序とその分布形状、断層の分布形状及び地盤の比抵抗値などに関する情報を確認した。

・探査の目的（対象）

1.基盤構造の存在の推定

2.沿岸域における地質構造、断層構造、地下水の塩分濃度などの評価のための、物理探査の総合的な調査手法の確立

3.海岸から内陸部にかけての①古海水などの深部地下水、②深部の断層、③基盤構造の存在の推定

解説：上記三つの項目が探査測線設定に対する目的である。

・作業の内容

既存情報から得られる当該地域の地質構造の特徴は以下の通り。

✓断層・褶曲軸の走向方向は、大局的には南北方向である。

✓地質構造・層序は、水平構造を基本とし、極端な層厚の変化はない。

✓褶曲の発達は、東側から順次形成され、西へ向かうほど褶曲の周期は長くなるとともに、褶曲の程度も小さくなる。

✓サロベツ断層帯の走向方向は、おおむね南北方向である。

✓サロベツ断層帯の断層構造形態は2種類あり、深度6 km付近での **fault-bend fold** の形態と深度1 km程度まで達する **fault-propagation fold** の形態である。

上記の地質構造の特徴から、幌延地域の地層及び断層の走向方向は、南北方向で、南北方向の地質の変化は小さいと考えられる。

二次元探査の場合、探査測線は地質構造に直交する方向に設定することが基本であることから、本地域での二次元探査測線の基本となる方向は、東西方向である。また、探査の目的から探査深度を数百 m 程度から数 km とし、浅部の淡水分布域を対象に AMT 法を、深部の基盤構造を対象に MT 法を適用する。測線の延長は、海岸から既存探査解析エリアへの接続を図るものとした。また、ボーリング孔から採水した地下深部の地下水の水質結果と比抵抗値の対比を行うために、ボーリング孔周辺で三次元の TEM 法を計画し、比抵抗値から水質分布を推定するための資料とすることとした。

③ 測線（測点）を設定可能な場所を選定

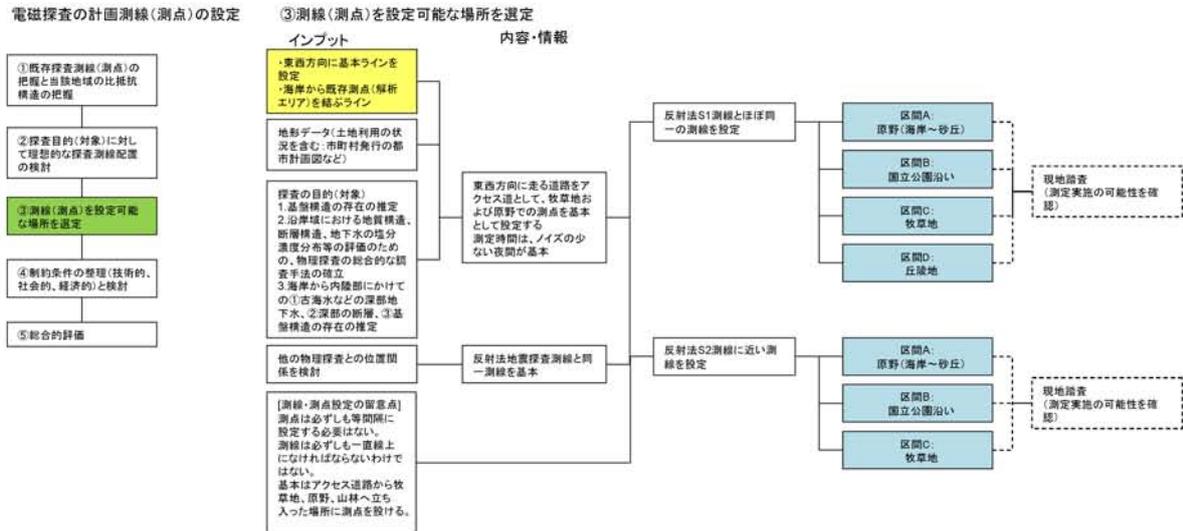


図 4-D (3)-5) 探査測線設定可能なルートを選定作業の流れ



図 4-D (3)-6) 探査測線設定可能なルートを選定結果図

ここでは、探査測線（測点）が設定可能と考えられるルートを抽出する作業を行った。

インプット情報は以下の通り。

- ・東西方向に基本ラインを設定。・海岸から既存測点（解析エリア）を結ぶライン。（これらは、前作業のアウトプット）
- ・地形データ（土地利用の状況を含む：市町村発行の都市計画図など）
- ・探査の目的（対象）
- ・他の物理探査との位置関係を検討

作業の内容

- ✓理想的な配置に対して、測線が設定可能な場所を検討
- ✓他の物理探査との位置関係を検討
- ✓複数のルートが考えられる場合、地理的条件などを単位として区間に区分

解説：探査の実施が不可能な場所を確認した。今回はサロベツ原野が国立公園に指定されているため、公園内は探査範囲から除外した。探査測点は東西方向に延びる道路をアクセス道として、牧草地や原野での測点を基本とする。測線は、東西方向の測線を平行に2測線を設定することで、南北方向の地質構造変化も確認することとした。また、三次元解析を適用することも考慮し、既往のMTデータへの接続させることとし、重複範囲を設けて既往データとのマッチングを図ることとした。さらに、別途計画している反射法地震探査との解析結果の対比を行い易くするために出来るだけ同一の測線とした。測点間隔は、AMT法を300m間隔、MT法を600m間隔を基本として、東西方向に配列させた。

ルート選定のポイント

- ・測点は必ずしも等間隔に設定する必要はない。
- ・測線は必ずしも一直線上になければならないわけではない。
- ・基本はアクセス道路から牧草地、原野、山林へ立ち入った場所に測点を設ける。
- ・高圧線や人工構造物などはノイズ源となりやすいのでできるだけ距離を離す。
- ・測点周辺の地形はできるだけ平坦な場所を選択する。

④ 制約条件の整理 (技術的、社会的、経済的)

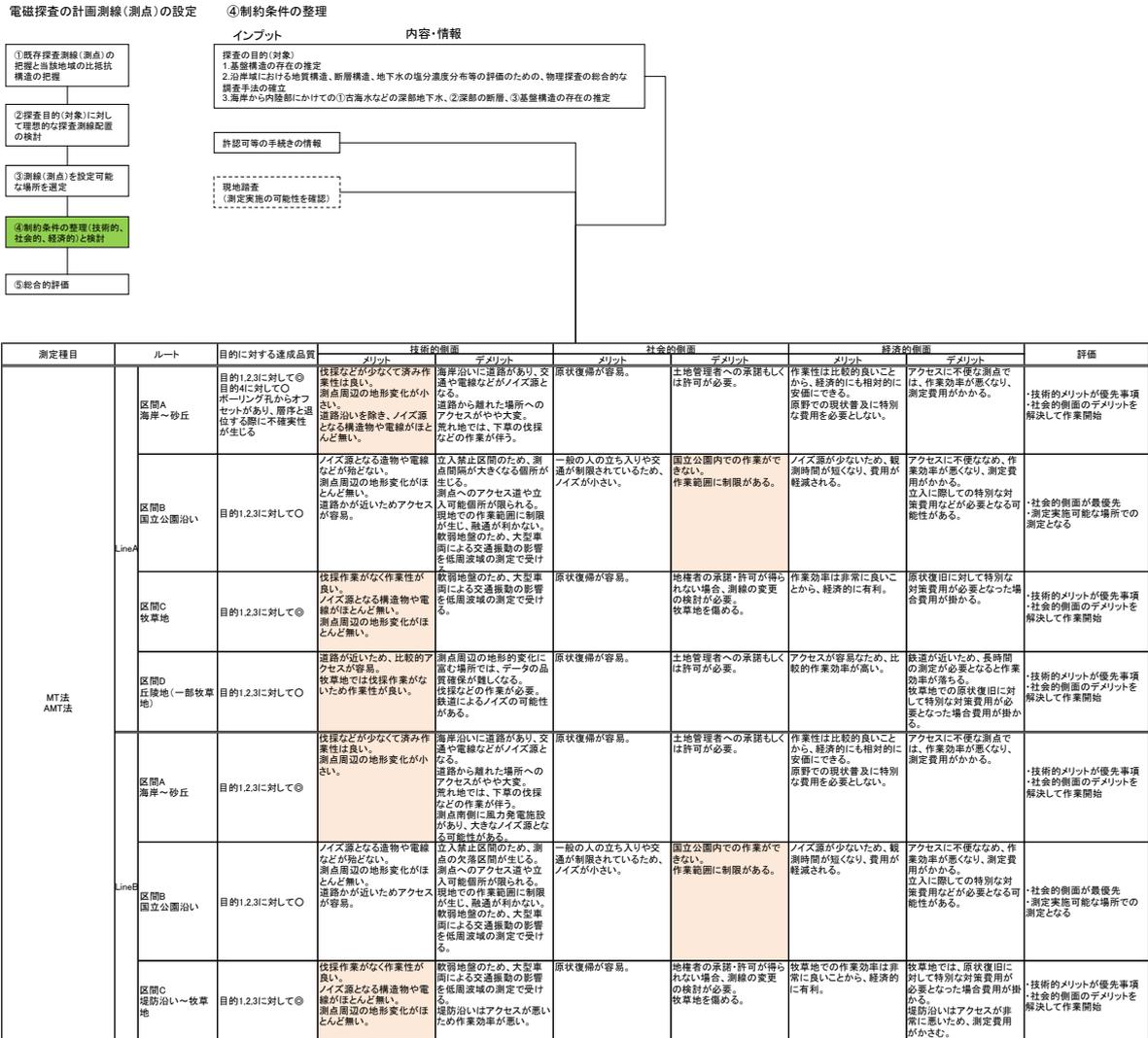


図 4-D (3)-7) 制約条件の整理作業の流れ

前作業で抽出したルートに対して、制約条件を整理した。制約条件として技術的側面、社会的側面、経済的側面のメリット・デメリットを各ルートに対して考えた。技術的側面は、電磁探査法の探査原理、データ処理の原理、現場測定における技術的な事項として、道路や鉄道、電話線や高圧線などのインフラの状況などに関わる事項である。社会的側面は、調査地への立ち入りなどに関する事項である。経済的側面は、探査を実施する場合に必要な費用や探査に際して生じる経費に関する事項である。

インプット情報は以下の通り。

- ・抽出した区間
- ・探査目的
- ・許可申請などの情報
- ・現地踏査による現地状況

作業の内容

選択した測点と測線が、目的に対して達成できる品質を予測

設定した測点・測線に対して、各側面からのメリット・デメリットを抽出・整理

現実性を考慮して各測点・測線を評価

解説：達成品質の判断は、その測点・測線が原理原則に則り、目的に対して品質を確保できるかどうかで判断した。技術的側面では、作業性、原理原則に対する品質の良否について抽出した。社会的側面では、地権者や土地管理者への承諾、許可申請の必要性、他者への影響、補償の可能性について抽出した。経済的側面では、作業を実施するに当たり、掛かる費用を相対的に比較した。これら抽出した内容から、区間の中でどの位置が測点・測線として現実的であるか判断した。

Line A：反射法地震探査とほぼ同一測線上に設定することが可能である。

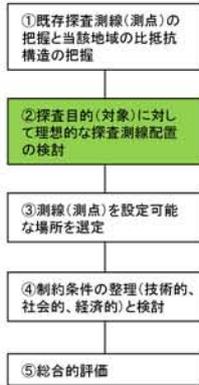
- ・区間 A は、海岸部でのボーリング調査が計画されているため、ボーリング結果との対比を考慮するとその付近に測点・測線を設定する必要があるが、道路や海岸部にある工場にあまり近づけすぎると、かえってデータの品質低下を招く恐れがあるため技術的側面が優先事項。
- ・区間 B は、国立公園があるため社会的側面が優先事項。
- ・区間 C と区間 D は、技術的側面が優先事項。

Line B：反射法地震探査測線に測点・測線を合わせてしまうと、国立公園があるため、海岸との空白範囲が広くなりすぎること、海岸部にある風力発電施設に測線が掛かるため、デメリットが大きいと判断し、海上での電磁探査との接続を考慮して測点・測線位置を決定した。

- ・区間 A は、海上との接続を図るため必要な測点であることから、技術的側面が優先事項。
- ・区間 B は、国立公園があることから、社会的側面が優先事項。
- ・区間 C は、当初 **Line A** とほぼ平行に測線を計画していたが、社会的制約条件により、東側の測線を南側へシフトさせた。

⑤ 総合的評価

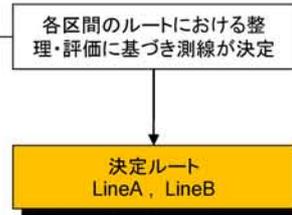
電磁探査の計画測線(測点)の設定



⑤総合的評価
インプット

測定種目	ルート	評価
MT法 AMT法	区間A 海岸～砂丘	・技術的メリットが優先事項 ・社会的側面のデメリットを 解決して作業開始
	区間B 国立公園沿い	・社会的側面が最優先 ・測定実施可能な場所での 測定となる
	区間C 牧草地	・技術的メリットが優先事項 ・社会的側面のデメリットを 解決して作業開始
	区間D 丘陵地(一部牧草 地)	・技術的メリットが優先事項 ・社会的側面のデメリットを 解決して作業開始
	区間A 海岸～砂丘	・技術的メリットが優先事項 ・社会的側面のデメリットを 解決して作業開始
	区間B 国立公園沿い	・社会的側面が最優先 ・測定実施可能な場所での 測定となる
	区間C 堤防沿い～牧草 地	・技術的メリットが優先事項 ・社会的側面のデメリットを 解決して作業開始

内容・情報



付録 4-D (3)-8 総合評価作業の流れ

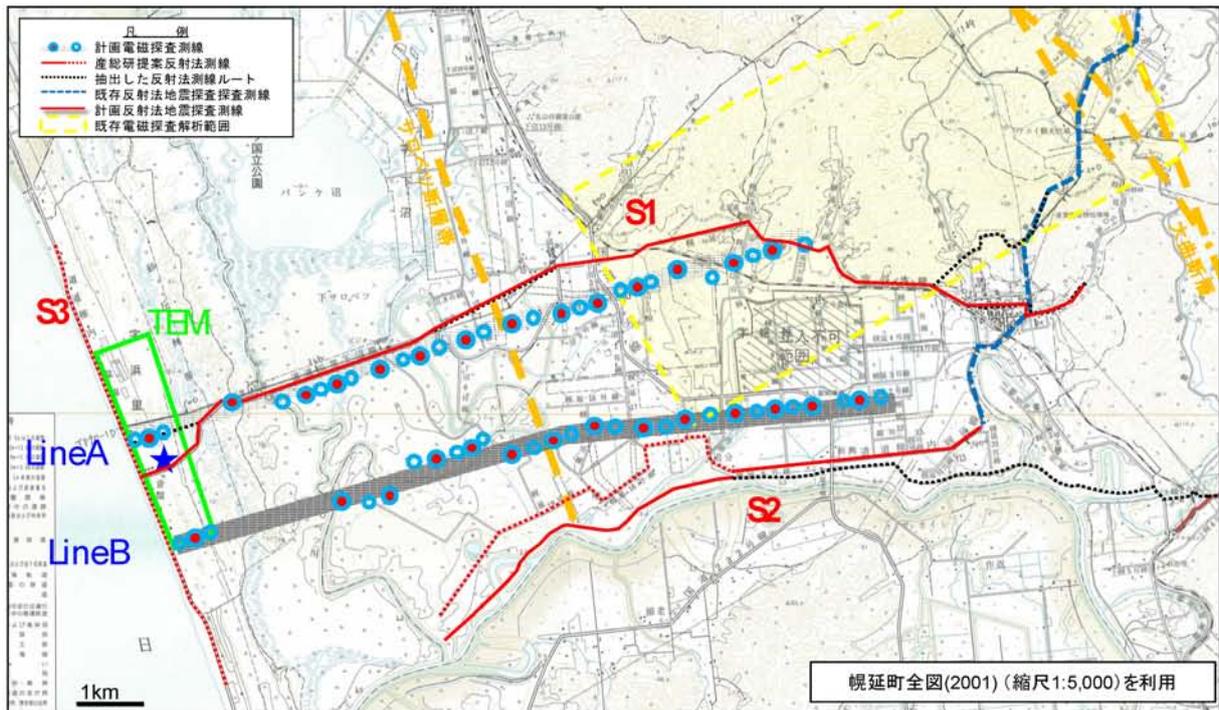


図 4-D (3)-9 総合評価により決定した探査計画測線

各区間のルートにおける制約条件の整理・評価結果から、Line A と Line B の測線を決定した。

付録 4-D 参考文献

- 4-D-1) 物理探査学会物理探査要領作成委員会：“物理探査適用の手引(とくに土木分野への利用)”，物理探査学会 (2000).
- 4-D-2) 物理探査学会：“物理探査ハンドブック”，物理探査学会 (1998).

This is a blank page.

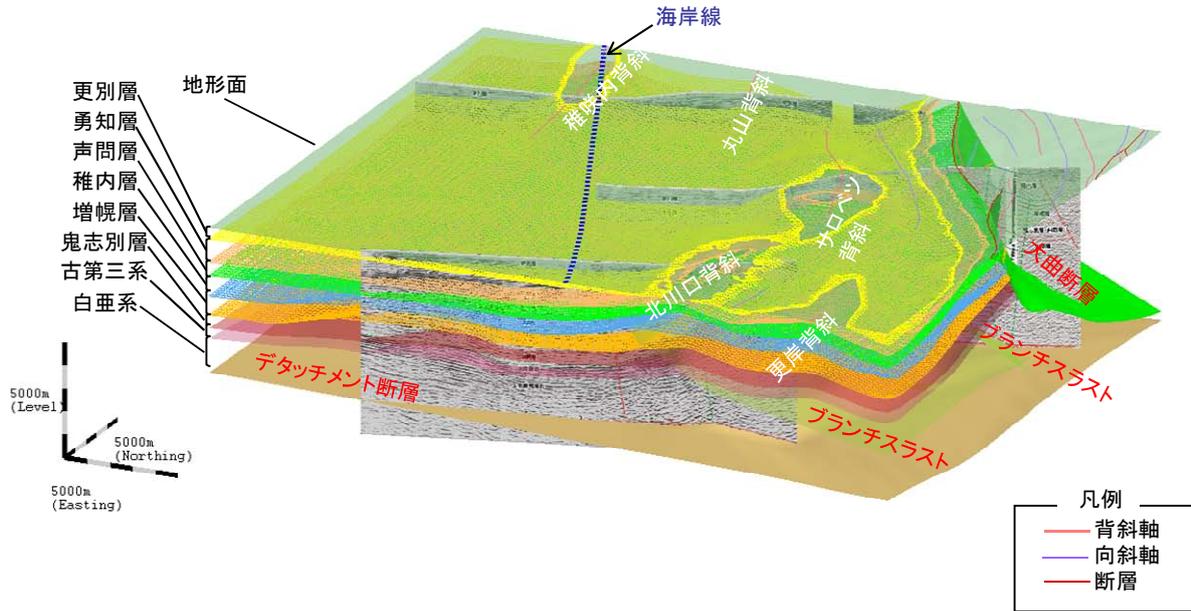
付録 4-E

地質構造モデル

- (1) 各層の基底面の形状と分布（更別層～古第三系；地形面含む）
- (2) 更別層基底面の形状と分布
- (3) 勇知層基底面の形状と分布
- (4) 声問層基底面の形状と分布
- (5) 稚内層基底面の形状と分布
- (6) 増幌層基底面の形状と分布
- (7) 鬼志別層基底面の形状と分布
- (8) 古第三系基底面の形状と分布
- (9) 地質構造モデルの作成にあたって検討した事項
- (10) 地質構造モデル作成作業を通して抽出された今後の課題

This is a blank page.

(1) 各層の基底面の形状と分布（更別層～古第三系；地形面含む）



各層の基底面の形状と分布を描くにあたって使用した主な情報は以下のとおり(付録 4-E (1)～(8)共通)。

- ・地表地質分布、断層面及び褶曲軸面の地表トレース: 既存地質図のコンパイル結果^{4-E-0}、幌延第1段階報告書^{4-E-1}、「天塩」図幅^{4-E-2}
- ・地質境界深度: 幌延第1段階報告書^{4-E-1}、基礎試錐「天北」^{4-E-3}及び北川口SK-1^{4-E-4}によるボーリング調査結果
- ・地下地質構造(断層・褶曲の幾何形状含む): 幌延第1段階報告書^{4-E-1}、産総研による反射法地震探査結果の解釈断面図^{4-E-5}、反射法地震探査断面の測線位置^{4-E-4}、北海道北部地域の重力図^{4-E-6}

図 4-E (1)-1) 各層の基底面の形状と分布（更別層～古第三系；地形面含む）

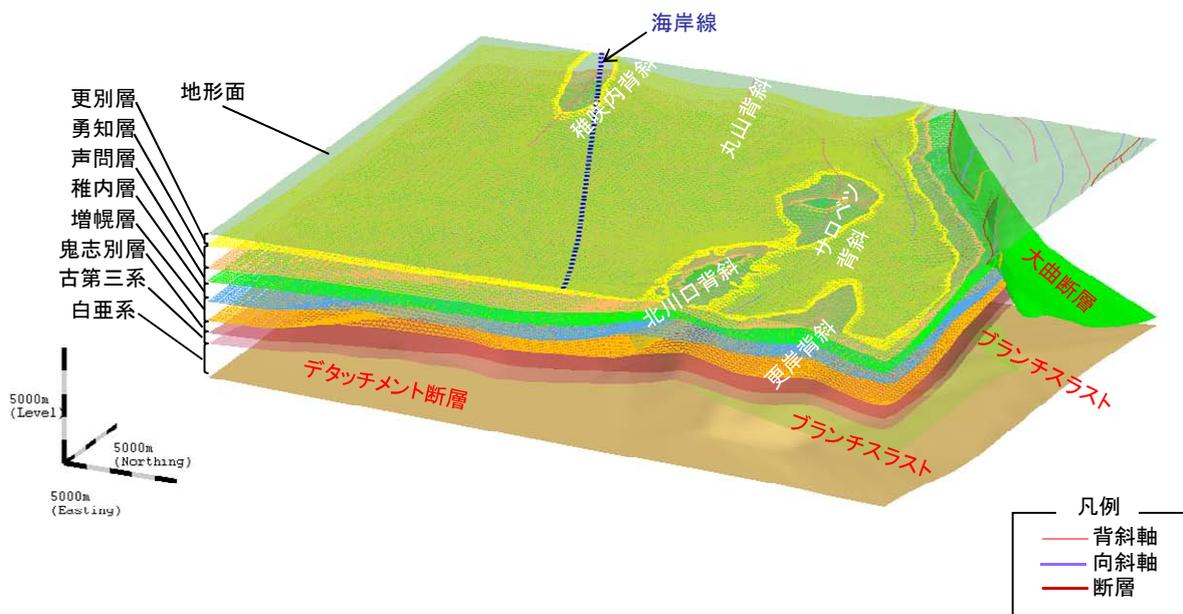
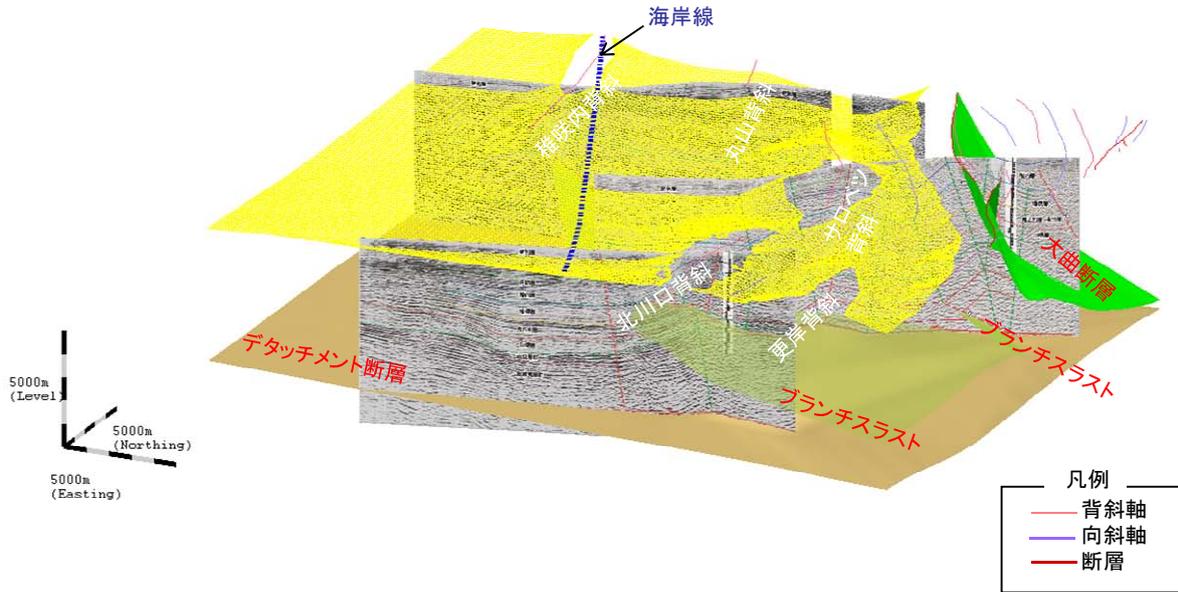


図 4-E (1)-2) 各層の基底面の形状と分布（更別層～古第三系；地形面含む）

(2) 更別層基底面の形状と分布



モデル化対象領域内に分布する断層及び褶曲もあわせて示した。

※上記を描くにあたって使用した主な既存情報は以下のとおり(付録4-E (2)~(8)共通)。

- ・地表地質分布、断層トレース及び褶曲軸トレース：幌延第1段階報告書^{4-E-1}及び「天塩」図幅^{4-E-2}
- ・地質境界深度：幌延第1段階報告書^{4-E-1}、基礎試錐「天北」^{4-E-3}及び北川口SK-1^{4-E-4}によるボーリング調査結果
- ・地下地質構造(断層・褶曲の幾何形状含む)：幌延第1段階報告書^{4-E-1}、産総研による反射法地震探査結果の解釈断面図^{4-E-5}、反射法地震探査断面の測線位置^{4-E-4}、重力図^{4-E-6}

※断層面及び褶曲の幾何形状は、国内外の褶曲断層帯を対象とした研究成果^{4-E-7,4-E-8}を参照し、反射法地震探査結果などの解釈断面図を内外挿して描いた。

※ブランチスラスト：デタッチメント断層から派生する断層

図 4-E (2)-1) 更別層基底面の形状と分布

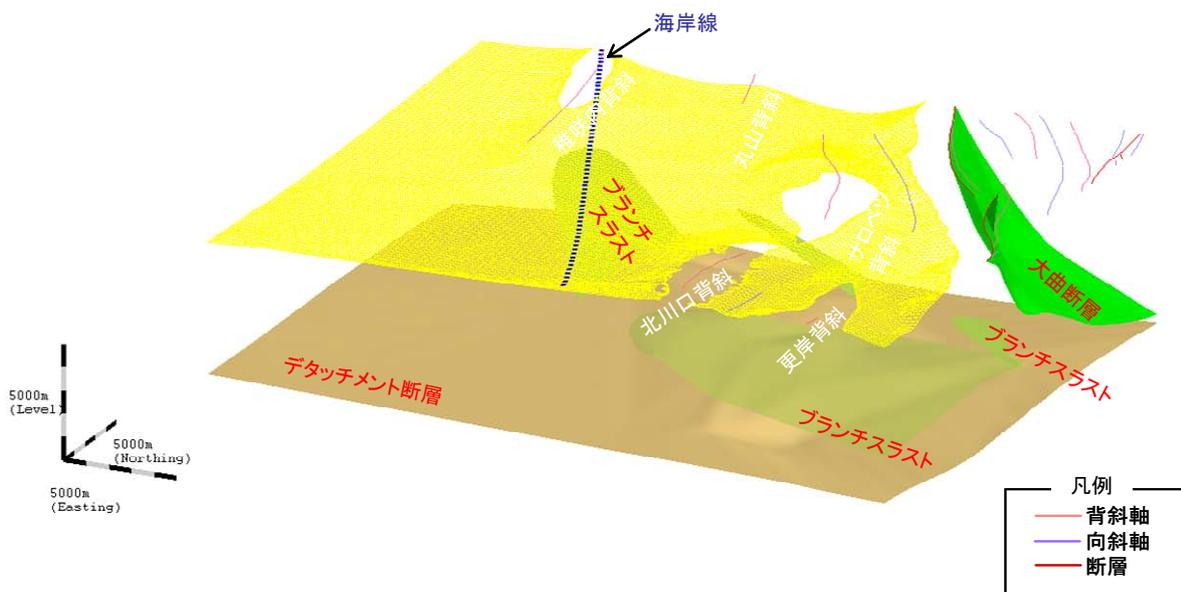


図 4-E (2)-2) 更別層基底面の形状と分布

(3) 勇知層基底面の形状と分布

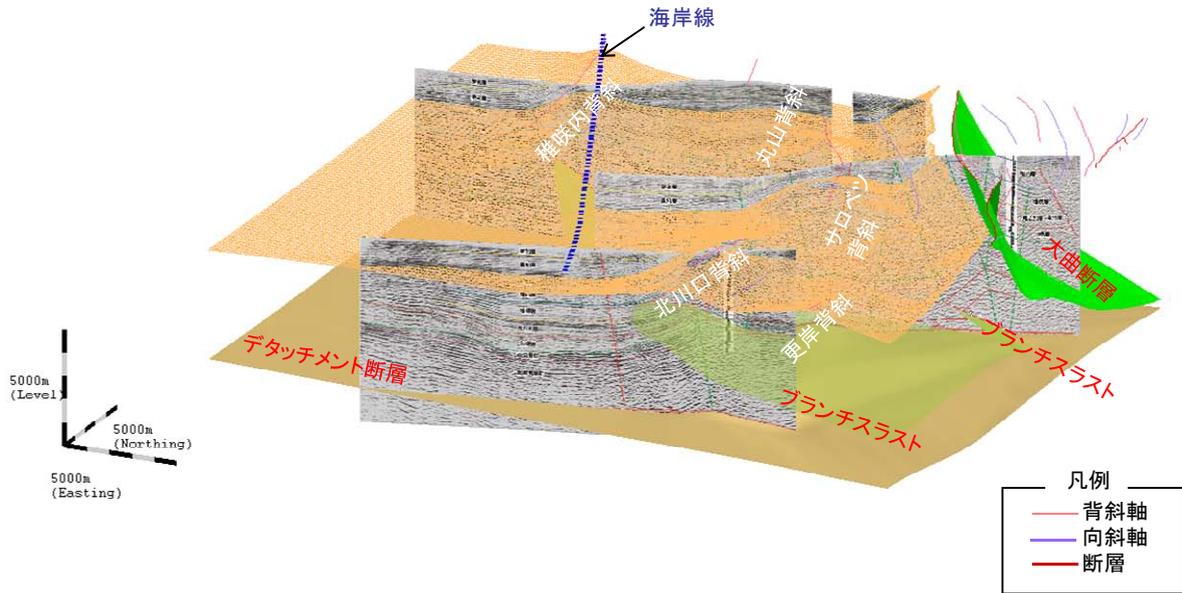


図 4-E (3)-1) 勇知層基底面の形状と分布

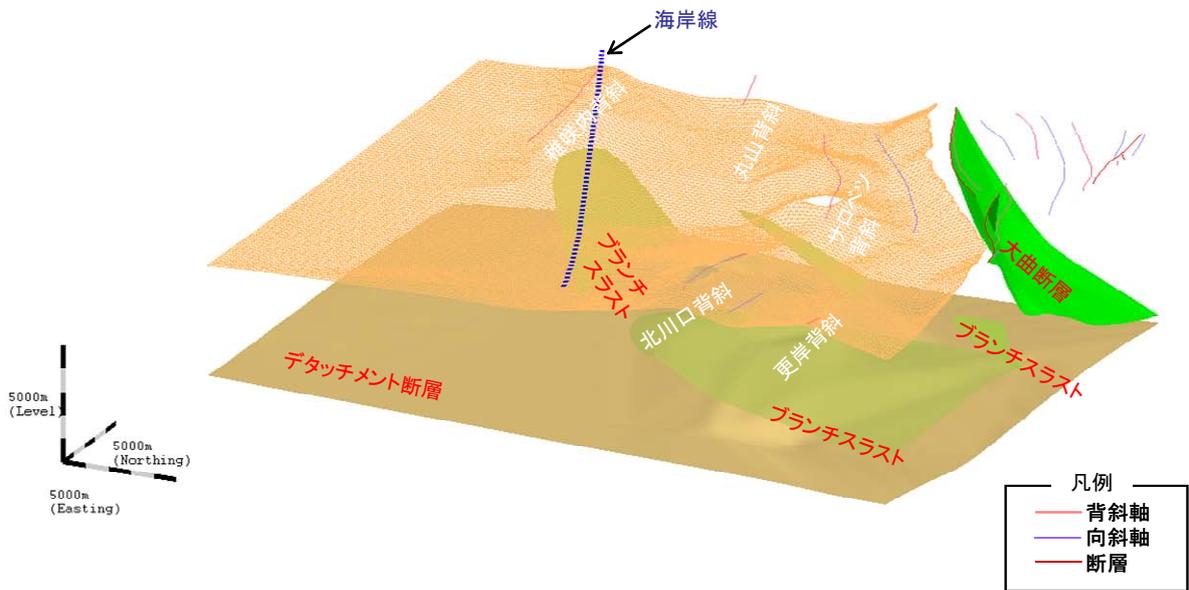


図 4-E (3)-2) 勇知層基底面の形状と分布

(4) 声問層基底面の形状と分布

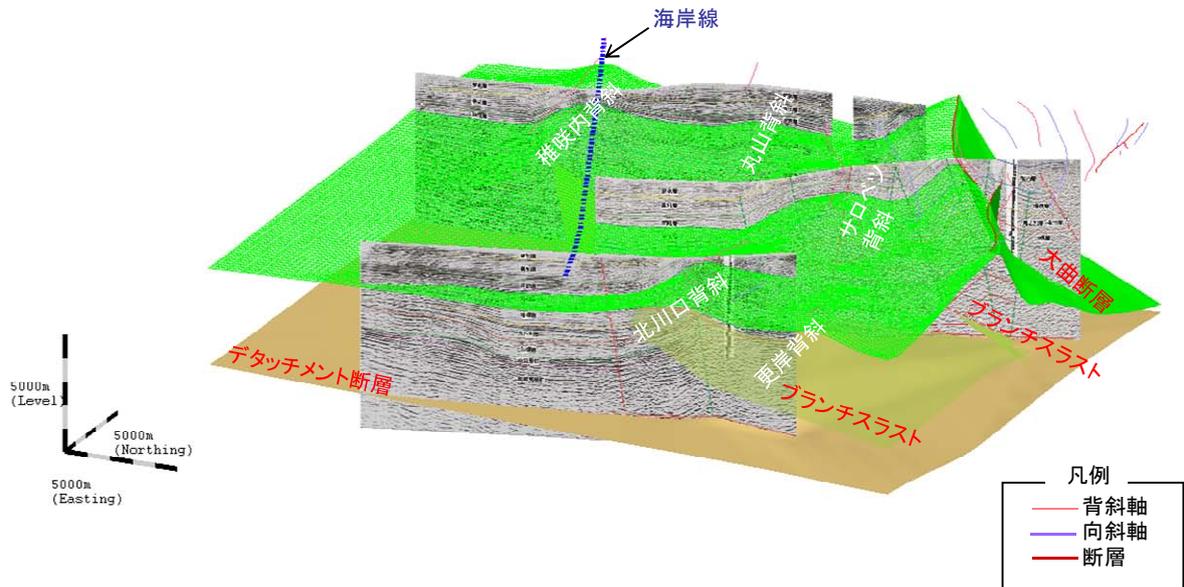


図 4-E (4)-1) 声問層基底面の形状と分布

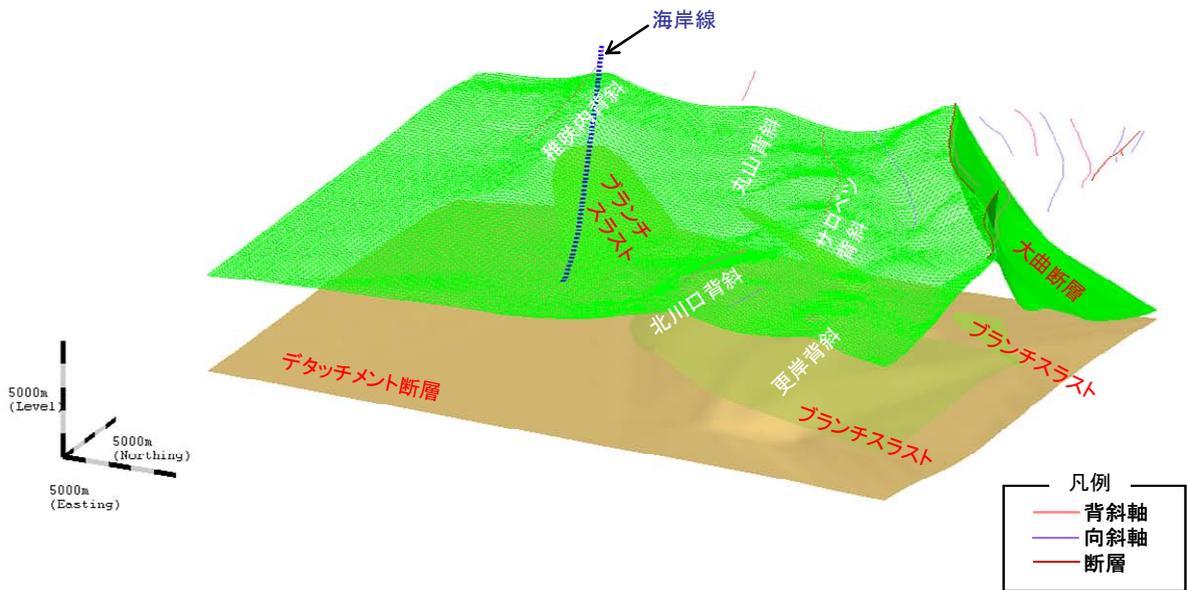


図 4-E (4)-2) 声問層基底面の形状と分布

(5) 稚内層基底面の形状と分布

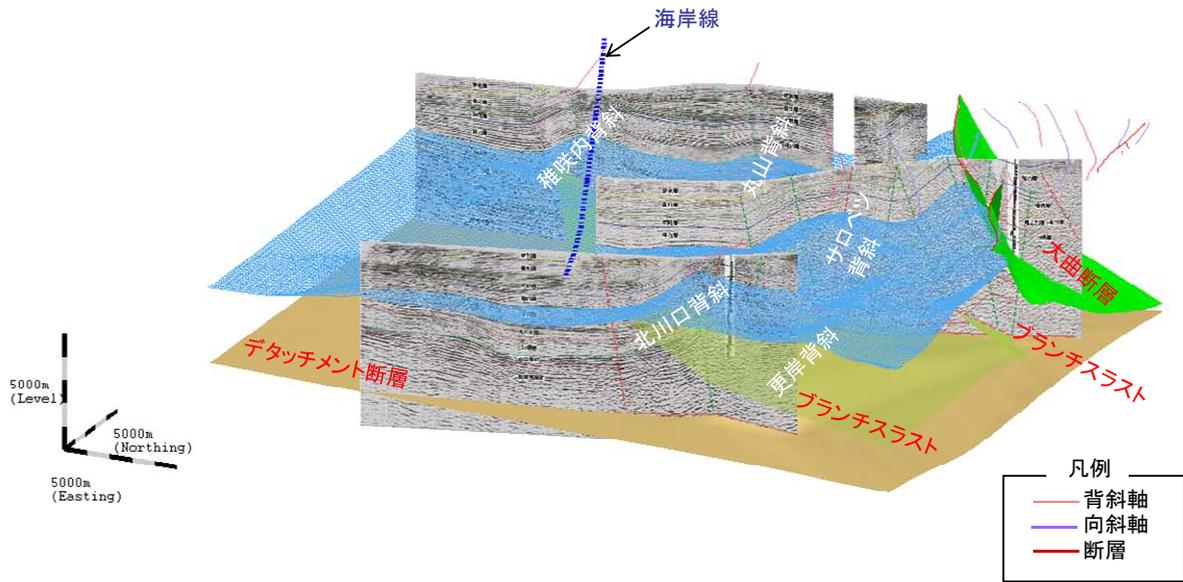


図 4-E (5)-1) 稚内層基底面の形状と分布

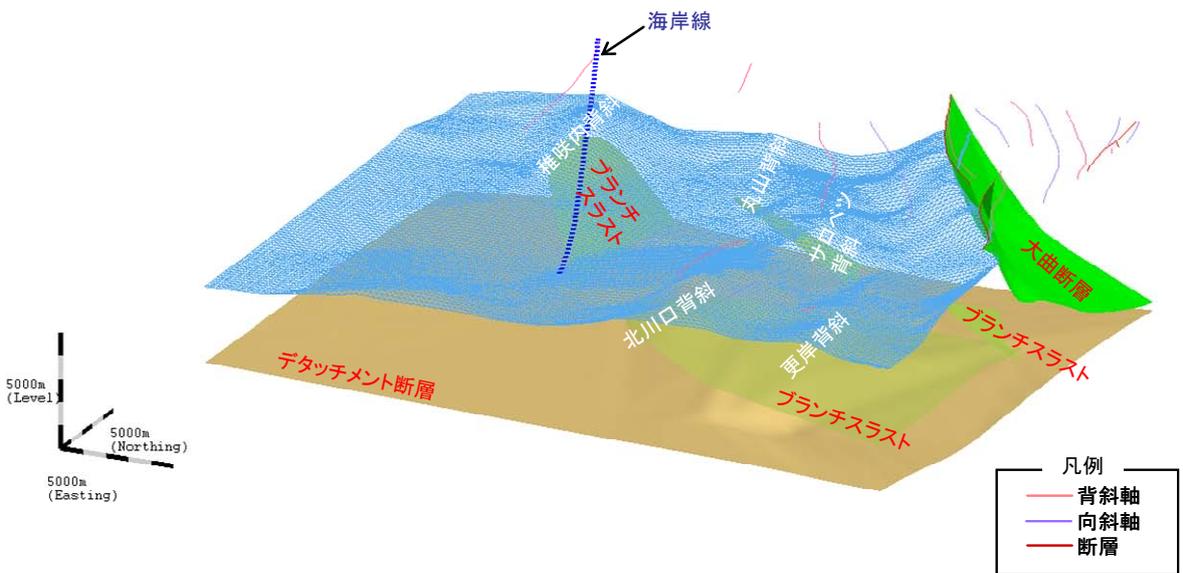


図 4-E (5)-2) 稚内層基底面の形状と分布

(6) 増幌層基底面の形状と分布

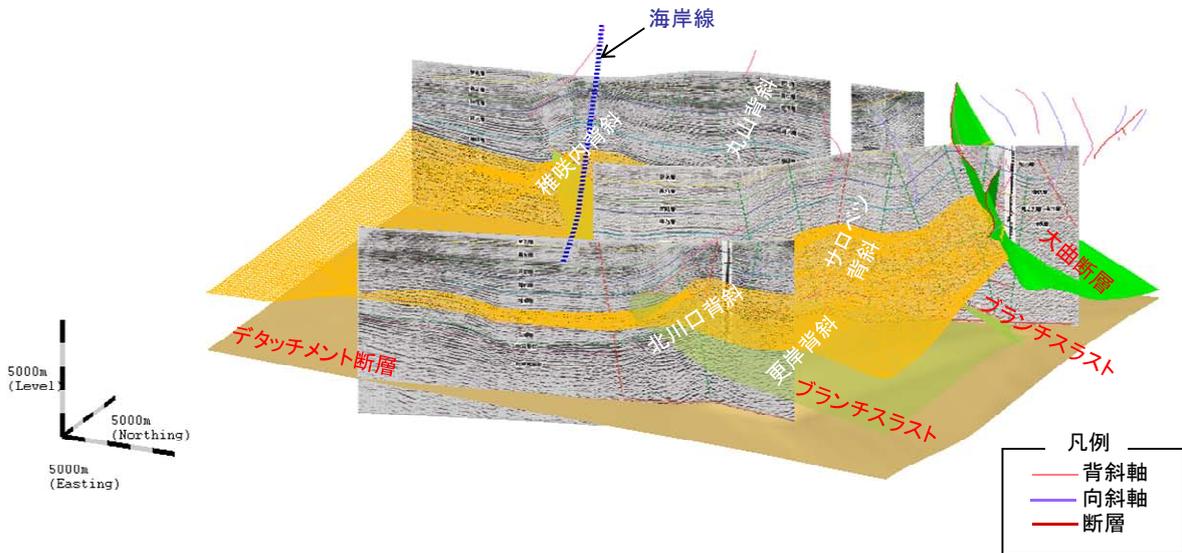


図 4-E (6)-1) 増幌層基底面の形状と分布

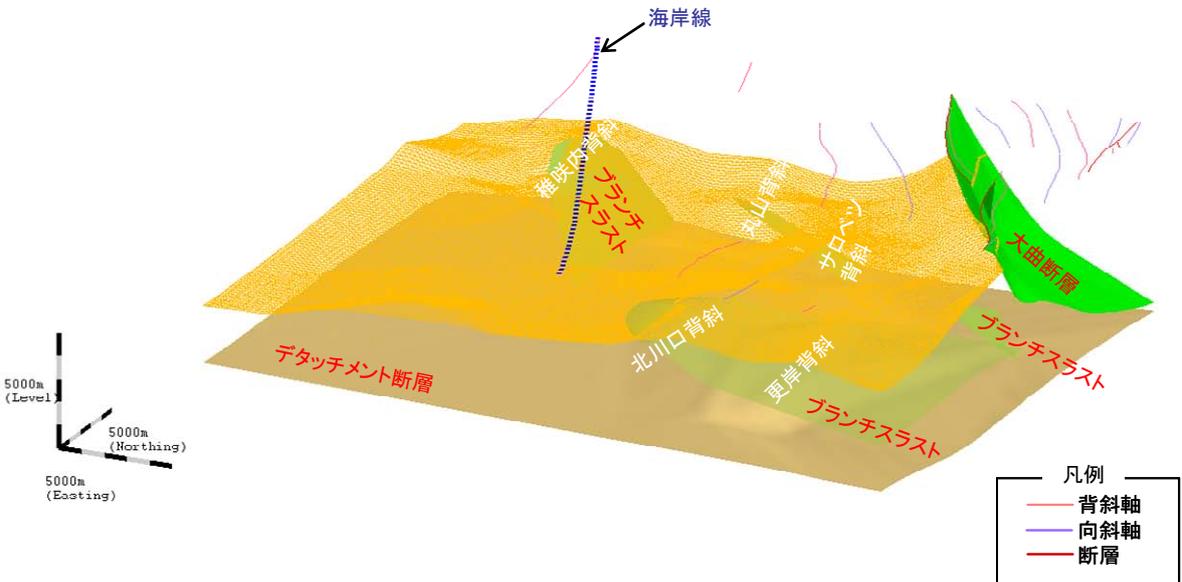


図 4-E (6)-2) 増幌層基底面の形状と分布

(7) 鬼志別層基底面の形状と分布

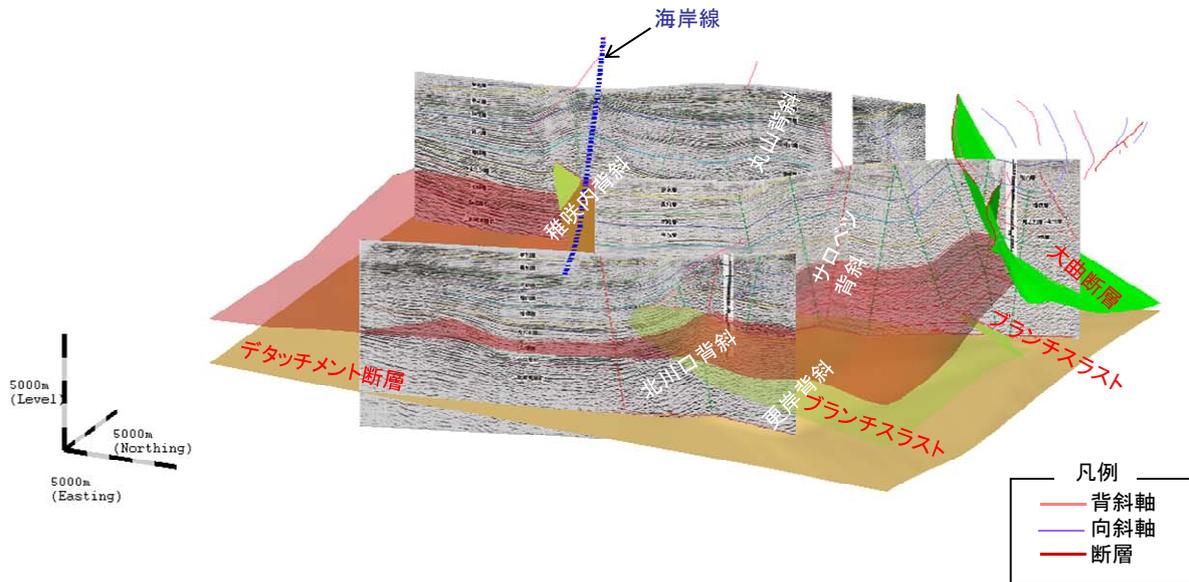


図 4-E (7)-1) 鬼志別層基底面の形状と分布

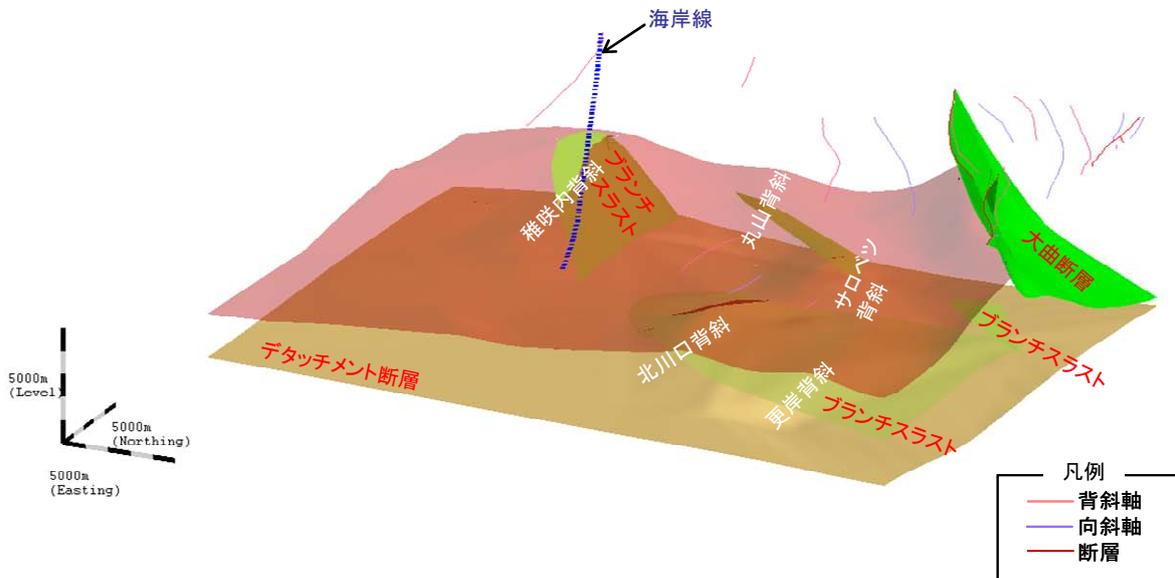


図 4-E (7)-2) 鬼志別層基底面の形状と分布

(8) 古第三系基底面の形状と分布

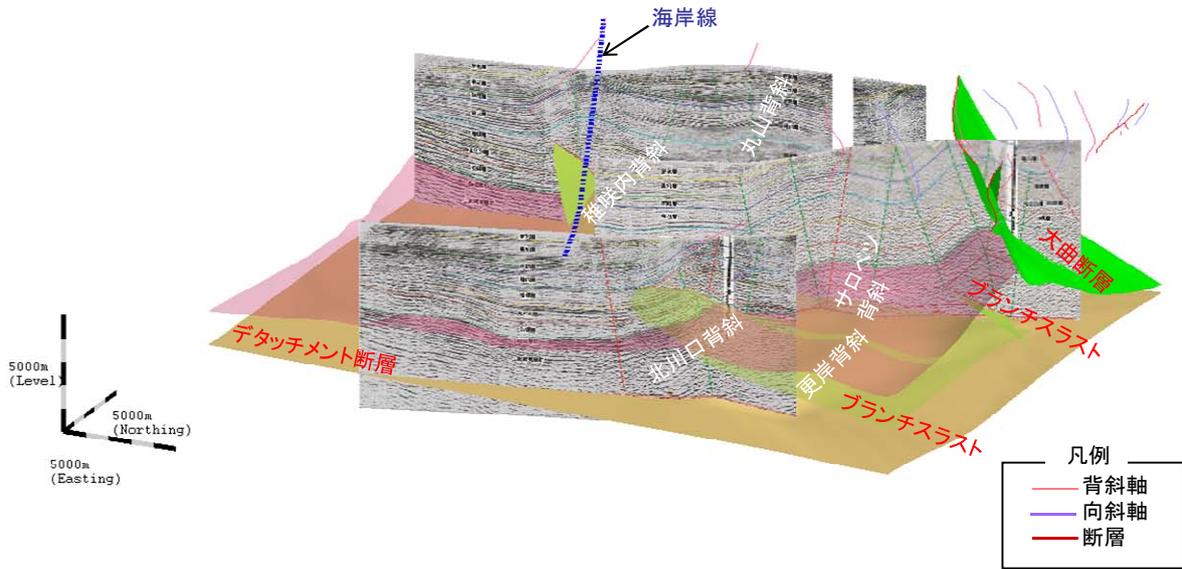


図 4-E (8)-1) 古第三系基底面の形状と分布

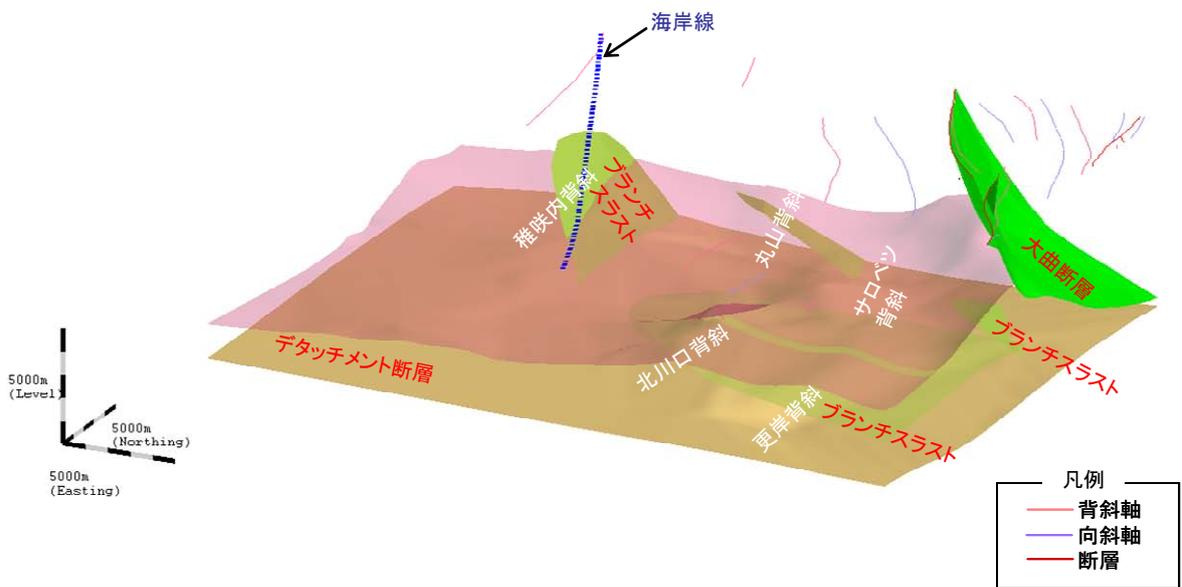


図 4-E (8)-2) 古第三系基底面の形状と分布

(9) 地質構造モデルの作成にあたって検討した事項

以下に、モデル作成の手順に従って、検討した事項をまとめた。

① モデル作成領域

モデル作成領域を設定する際の考え方は、本文 3.4.3 項(2)4)に述べたとおりである。その結果、設定した領域は以下の通り。

- ・西縁：既存の反射法地震探査による解釈断面図が存在する範囲
- ・東縁：大曲断層を含む範囲
- ・北縁、南縁：既存の反射法地震探査による解釈断面図が存在する範囲

なお、領域を上記の通り設定したものの、領域外の地表地質境界データも使用して、同領域外との地質・地質構造の連続性を考慮したモデルを作成した。

② 使用データとその優先順位

地質構造モデル作成に使用した主なデータは以下の通りである。

- ・地表地質分布、断層トレース及び褶曲軸トレース：既存地質情報のコンパイル結果^{4-E-1)}、幌延深地層研究計画第1段階報告書^{4-E-2)}及び「天塩」図幅^{4-E-3)}
- ・地質境界深度：幌延第1段階報告書^{4-E-2)}、基礎試錐「天北」^{4-E-4)}及び北川口 SK-1^{4-E-5)}によるボーリング調査結果
- ・地下地質構造（断層・褶曲の幾何形状含む）：幌延第1段階報告書^{4-E-2)}、産総研による反射法地震探査結果の解釈断面図^{4-E-6)}、反射法地震探査断面の測線位置^{4-E-5)}、重力図^{4-E-7)}

また、断層面や褶曲構造などの地質構造については、国内外の褶曲断層帯を対象とした研究成果^{4-E-8),4-E-9)}を参照しつつ、既存の反射法地震探査結果などの解釈断面図に記された地質構造を内外挿することにより描いた。

なお、これらデータの優先順位などについては、本文 3.4.3 項(2)4)②に述べたとおりである。

③ 使用地質図の選択

幌延深地層研究計画第1段階報告書^{4-E-2)}では、北海道立地質調査所（旧北海道立地下資源調査所）の5万分の1地質図幅^{4-E-10)}や産総研（旧地質調査所）発行の20万分の1地質図幅^{4-E-3)}を基にして、幌延地域周辺を対象とした地質分布に関わる既存文献のコンパイル^{4-E-1)}結果及び原子力機構による地表地質調査結果^{4-E-2)}を加味して作成されている。このため、同第1段階報告書に示された地質図は、現時点で利用可能な地質分布などに関わる情報をほぼ網羅的に収集して作成されていると考えられる。よって、地質構造モデルの作成にあたっては、幌延深地層研究計画第1段階報告書の地質図^{4-E-2)}を使用した。

④ 地層境界面の深度の検討

沖積層や砂丘などに被覆されている範囲については、重力図^{4-E-7)}や反射法地震探査による地質構造の解釈断面図^{4-E-6)}を参照して地層境界面の深度を推定した。一方、反射法地震探査による解釈断面図が存在しない範囲において地層境界面の深度を推定する際には、近接する地質構造の解釈断面図^{4-E-6)}から読み取れる褶曲構造や断層変位と、地表地質図^{4-E-2)}に記された褶曲軸の分布や重力図^{4-E-7)}から推定される褶曲構造の分布に基づいて地質境界深度を推定した。

⑤ 断層面の幾何形状

既存の反射法地震探査による地質構造の解釈断面図^{4-E-6)}は以下の通りである。

- ・ 反射法地震探査測線 TP90-1D における地質構造の解釈断面図^{4-E-6)}のデタッチメント断層は、バランス断面法を適用して描かれている
- ・ 反射法地震探査測線 ST96-2・ST96-3 における地質構造の解釈断面図^{4-E-6)}では、バランス断面法による地質構造の解釈がされているものの、デタッチメント断層は描かれていない

このため、測線 ST96-2 及び ST96-3 については、デタッチメント断層の深度と幾何形状を既存情報に基づいて検討した。

デタッチメント断層が活動した場合、それに関連した褶曲（断層関連褶曲）が形成される場合がある^{4-E-8)}。幌延地域の場合には、産総研による TP90-1D の解釈断面図^{4-E-6)}において、そのような断層関連褶曲が描かれている。

測線 ST96-2 の解釈断面図^{4-E-6)}では、フラットーランプ構造からなる断層関連褶曲が認められる。同測線におけるデタッチメント断層とそれから派生する断層については、その断層関連褶曲構造を形成しうる断層や褶曲構造の幾何学的制約を利用して推定した。

測線 ST96-3 の反射法地震探査断面図は、深度 5 km までしか示されていない。このため、幌延地域におけるデタッチメント断層の推定深度（測線 TP90-1D）^{4-E-6)}を基準として、同測線に認められる地質構造を形成しうる断層や褶曲構造の幾何学的制約を利用し、同測線におけるデタッチメント断層の深度と幾何形状を推定した。また、デタッチメント断層の幾何形状については、国内外における褶曲断層帯の地質構造に関わる研究成果^{4-E-8), 4-E-9)}も参考にした。

地質構造モデルの作成領域において、既存の反射法地震探査による地質構造の解釈断面図が存在しない場合については、地形及び地表地質分布から地質構造を推定しなければならない。地下深部の地質構造は、表層での地質構造の分布を規定しており、褶曲断層帯の地質構造を持つ地域では、表層で認められる褶曲構造は、デタッチメント断層もしくは同断層から派生した断層によって形成された断層関連褶曲である可能性が非常に高い^{4-E-8)}。このため、現在認められる地形や地表地質、褶曲構造の分布を基礎データとして、それら地質構造が地下の断層運動に関連して形成されたものとして、バランス断面法もしくは断層・褶曲の幾何学的制約を適用し、地質構造の解釈を行った。

(10) 地質構造モデル作成作業を通して抽出された今後の課題

- デタッチメントスラストの形状と分布はいくつかの仮定のもと描いており、今後、計画している地上物理探査などによるデータ取得とともに、仮定した内容を再検討
- デタッチメント断層から派生する断層の幾何形状の再検討
- 反射法地震探査断面図の解釈、バランス断面法による地質構造の再検討

付録 4-E 参考文献

- 4-E-1) 舟木泰智, 石井英一, 安江健一, 高橋一晴: “文献調査に基づく幌延地域の地質・地質構造に関する検討”, JNC TN5400 2004-006 (2005).
- 4-E-2) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱 克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: “幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書”, 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044 (2007).
- 4-E-3) 秦 光男, 植田芳郎, 松田武雄, 杉山友紀: “20 万分の 1 地質図幅「天塩」”, 地質調査所 (1969).
- 4-E-4) 石油公団: “国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「天北」調査報告書”, (1995).
- 4-E-5) 兼清豊比古: “北海道北部地域における地質環境データ収集・整理”, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書: (株) 地球科学総合研究所), JNC TJ1440 99-005 (1999).
- 4-E-6) 産業技術総合研究所: “サロベツ断層帯の活動性および活動履歴調査”, 「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書, No.H17-1 (2006).
- 4-E-7) 駒澤正夫, 村田泰章, 牧野雅彦, 広島俊男, 森尻理恵, 山崎俊嗣: “重力図 (ブーゲー異常) 「天北地域重力図」”, 地質調査所 (2001).
- 4-E-8) Suppe, J.: “Principles of structural geology”, Prentice-Hall (1985).
- 4-E-9) ショルツ, C. H.: “地震と断層の力学”, 柳谷俊訳, 古今書院 (1993).
- 4-E-10) 長尾捨一: “5 万分の 1 地質図幅「豊富」及び同説明書”, 北海道立地下資源調査所 (1960).

付録 5

プロトタイプの概要

- A. エキスパートシステムにおける知識獲得方法
- B. タスクブロックの知識の整理
- C. エキスパートシステムの詳細情報

This is a blank page.

付録 5-A

エキスパートシステムにおける知識獲得方法

- (1) インタビュー実施時の注意点
- (2) インタビューの種類

This is a blank page.

エキスパートシステムにおける知識獲得とは、知識ベースのシステムをつくる時の知識を用いながら専門家や専門家集団から知識を獲得する過程である。したがって、エキスパートシステムにおける知識獲得の第一歩は、エキスパートシステムを構築する知識工学の専門家とシステムが対象とする分野の専門家との対話から始まり、何度か対話を繰り返さなければならない。知識獲得のための対話は知識獲得インタビューと呼ばれ、エキスパートシステム知識獲得において頻繁に用いられている手法である。

一般的に、専門家は自分が興味をもつ分野については積極的に話をする傾向がある。しかしながら、エキスパートシステム構築のために必要な知識の中には専門家にとっては興味のないようなもの（特に各分野で暗黙の前提となっているようなこと）も含まれ、その全体に対して効率的かつ網羅的に知識を収集するような知識獲得インタビューを行うインタビュアーには豊富な経験と高度な技術が求められる。

インタビューには、体系化されていない形式、体系化された形式、事象回想型形式、発話思考型形式などの種類がある。インタビューによって獲得した知識と並行して用いられる大きな知識源には、特定分野についての専門家の記述した文書、マニュアル、ケーススタディ、教科書などがある。エキスパートシステムにおける知識収集においては、知識工学者がこういった知識源を最大限に利用することが非常に重要なことである。また、詳細で技術的な情報を獲得するにつれて、知識工学者はある分野の専門的な事柄に慣れてくるため、予備的なインタビューを行うことで専門家に対して最小限の時間だけでインタビューすることが可能となる^{5-A-1)}。

(1) インタビュー実施時の注意点

インタビュー実施者は、まず、適切な段階を踏むようなインタビューの計画を策定することが必要となる。インタビューが通常の会話と異なる点は、自然な会話の流れにおいて発生する相互作用が期待できない点である。知識工学者は専門家の指摘点を掴み、自らも専門家も満足するようなインタビューを構成する必要がある。インタビュー実施時における注意点としては以下のようものが挙げられる。

- ・ 曖昧な表現を用いない。比較形を用いる表現（より大きい、よりよいなど）は必ずしも有益ではなく正確さに欠ける。なにに比べて大きいか、より良いのかを明示する。
- ・ 専門家は推論の過程の中で核となる部分を伝えないことが多々あることを肝に銘じておく必要がある。推論の過程というものは複雑であることが多く、専門家は自らの知識を知識工学者に伝えるためにそれらの複雑な過程を単純化してしまうものだからである。同様に、問題解決を行うときにも専門家は無意識のうちに飛躍した論理を作成してしまうことがある。こういった無意識に飛躍させてしまう内容こそが専門家が長年の間に培ったものであるにも関わらず、専門家はこういった知識をインタビューの間に忘れてしまいがちである。したがって、インタビューを行う際、知識工学者は得られた知識にもれがないかどうか確認する必要がある。

インタビューを始める際に有益となる質問には以下のようなものがある。

- ・ この話題の概観は何か？
- ・ あなたが取り扱った最後の事例は何か？
- ・ 問題について考えるときに想定する前提あるいは仮説は何か？
- ・ 問題について考えるときにどういった情報から集めようとするか？
- ・ この目標は具体的にはどのようにして達成されたか？
- ・ 次の段階では何をするか？
- ・ それは前の段階での処理とどういった関係があるか？
- ・ どのように、なぜ、いつそれを行うか？
- ・ 今しようとしていることの意味は何か？

(2) インタビューの種類

インタビューには、体系化されていないインタビュー、体系化されたインタビュー、事象回想型インタビュー、発話思考型インタビューがあることは先に述べた通りであるが、インタビュアーは、獲得する知識や知識獲得に適したタイミングを見極め、これらのインタビューを実施していく必要がある。それぞれの種類のインタビューの特徴をまとめると以下ようになる。

1) 体系化されていないインタビュー

体系化されていないインタビューは、初期の段階に実施されるインタビューである。このインタビューを行う目的は知識工学者が知識領域についての概要を理解することにある。知識工学者は知識領域について高度な専門用語を用いながら話をしてもらうためにインタビューを行う。このインタビューを実施することで完全でうまく構成された知識が得られることはめったにないが、知識の基本構成を確認する上では極めて重要なインタビューである。このインタビューの特徴をまとめると以下ようになる。

- ・ 知識獲得の初期段階において用いられる。
- ・ 専門家が主に話をし、話をするとき定型化された形式のようなものはない。
- ・ 知識工学者から専門家に対して質問を行うこともある。
- ・ インタビューの内容をみながら今後の知識獲得計画を策定する。
- ・ インタビューを実施することで完全でうまく構成された知識が得られることはめったにない
- ・ インタビューの形式があまりに統一されている場合には無視されてしまいがちな重要なトピックを紹介する。

2) 体系化されたインタビュー

体系化されたインタビューは2段階目に行われるインタビューである。このインタビューは特定の領域における深い知識を獲得するために行われる。知識工学者は第一段階のインタビューを通じてその知識領域における何らかの認識を持っており、知識工学者から質問を行うことでその領域の詳しい理解を目指すものである。専門家への質問において焦点があてられるのは、「なぜその行動がとられたか」といったことや「専門家が意思決定を行う際にどのように理解を進めたか」といった点である。

このインタビューは通常、3つの部分から構成される。

- ・ **Part1** ; 知識工学者によって連続するトピックがフロー上に立案され、インタビューの最終目的が明示される。これによって専門家の動機付けが行われる。
- ・ **Part2** ; 議論が行われる。投げられた質問に対する回答を専門家が行う場である。
- ・ **Part3** ; 品質保証の基本となる部分である。インタビューと振り返り、知識工学者がその領域の知識を理解できているか、正しい答えを得られているか確認する場である。

体系化されたインタビューの特徴は以下のようなものがある。

- ・ 知識の特定の領域に焦点が当てられている。
- ・ 専門家が質問に対して明確かつ適切な詳細さで答えられるようリラックスした雰囲気を作り出す。

- ・ 専門家が時間的制約からストレスを感じないよう、話の展開が急速なものとならないよう留意する。
- ・ 知識工学者と専門家の両者にとって興味深いものであり、知識工学者が保有する情報を増やすことができるようなものであること。

3) 事象回想型インタビュー

事象回想型インタビューは意思決定過程そのもの、つまり思考過程を明らかにしていくのに非常に有益なインタビューである。事象回想型インタビューでは特定のケーススタディが効果的である。医者为例をあげると、この種のインタビューの中で、知識工学者は医者に対して、「A 氏の場合の意思決定過程を教えてください。どういった質問をどういった順番で問いましたか」と尋ねることになる。この場合には、専門家が尋ねる質問は何かということを知るだけでは十分ではなく、それらの質問がどのような流れの中で尋ねられているかが重要となる。専門家は最初に核となる質問を投げかけ、その他の質問を後回しにしたり、時には質問をしなかったりすることがある。したがって、意思決定をする際には、専門家の思考過程は、問題の特定の点において適用され得る知識と同じくらい重要なものである。文書などによる他の知識獲得と比べてインタビューによる知識獲得はこの点で大きく異なるものである。事象回想型インタビューは他の方法によって得られた収集された知識の品質が保証されていなかったり、知識が特有の複雑さを有しているために専門家が問題解決の際にどのようにルールを適用しているかを明確に記述したり、認識したりすることが非常に難しい場合に使われることが多い。

4) 発話思考型インタビュー

発話思考型インタビューは、問題解決過程の背後にある思考を掴もうとしている点において事象回想型インタビューと類似している。事象回想型インタビューにおいては、過去における問題解決過程を対象としていたが、発話思考型インタビューでは現在の問題解決過程を対象とする。言い換えれば、発話思考型インタビューは特定の状況において専門家がどのように考えるかを説明するように促すものである。このインタビューの目的は前出のインタビューの中で得られている知識のギャップを埋め、得られている知識や問題解決過程に関する情報の正当性を担保することである。一般的にこういったインタビューは実際の問題を議論することが多い。

以上のインタビューの種類と特徴を図 5A(2)-1 にまとめる。

<p>①非体系的 インタビュー</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 目的；インタビュー者の知識領域の概要の理解、知識獲得計画の策定 • 主に専門家が話をし、インタビュー者とともに領域の大きさ、内容を議論する
<p>②体系的 インタビュー</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 目的；特定の領域における深い知識の獲得 • タスクフローと最終目標を設定し、各タスクに対する知識を抽出し、インタビューの振り返りによる品質管理を行う
<p>③事象回想型 インタビュー</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 目的；専門家が無意識に行っている意思決定の過程を抽出する • 特定のケーススタディを行い、あるケースにおいて専門家が問題解決をするときのルールと理由を抽出する
<p>④発話思考型 インタビュー</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 目的；現在の問題に対する意思決定過程を抽出することで、上記のインタビューにおいて得られている知識や意思決定過程の情報の正当性を担保する • 実際の問題を議論しながら問題解決において必要となる知識、意思決定過程を推論する。

図 5-A (2)-1) 知識獲得を目的としたインタビューの種類と特徴

付録 5-A 参考文献

- 5-A-1) Kendal, S. and Creen, M. : “An Introduction to Knowledge Engineering”, Springer (2007).

This is a blank page.

付録 5-B

タスクブロックの知識の整理

This is a blank page.

4.1 節で述べた知識協働ダイアグラムのタスクブロックごとの知識の収集、整理の結果を記す。

表 5-B (1) 一般的な地質・地質構造に関する情報の整理・解釈

目的と概要	<ul style="list-style-type: none"> 種々の目的の下に実施された既往の調査からの基礎的情報の抽出 既存情報に基づき地史（地質概要）を堆積作用・火成作用・変成作用・風化変質作用・変形作用及びこれらの組み合わせと対応付けて表現する
必要となる先行知識	<ul style="list-style-type: none"> 既往の調査結果に関する情報（論文など）
成果	<ul style="list-style-type: none"> 地史（地質概要）
関連する領域（ドメイン）知識の例	<ul style="list-style-type: none"> 堆積作用 火成作用 変成作用 風化変質作用 変形作用

表 5-B (2) 地質構造区分に関する情報の整理・解釈

目的と概要	<ul style="list-style-type: none"> 水理、地球化学、及び施設設計などの特定の用途や視点からの整理に先立ち、地質学的特徴に基づき地質要素を区分する 被覆層の層序区分：粒度に応じて岩相を区分した後、同じ堆積イベントに対応する岩相を統合して層序区分とする 基盤岩の構造区分：割れ目頻度特性に応じて区分（断層、割れ目帯、低透水性岩盤など） 基盤岩の岩相区分：風化変質帯と健岩部を区分
必要となる先行知識	<ul style="list-style-type: none"> 既往の調査データ 地史（地質概要）
成果	<ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデル
関連する領域（ドメイン）知識の例	<ul style="list-style-type: none"> 層序 被覆層 基盤岩 岩相 堆積イベント 割れ目頻度 断層 割れ目帯 風化変質帯 健岩部

表 5-B (3) 地下水流動の場の概念と水理地質構造モデルの構築

目的と概要	<ul style="list-style-type: none"> 地形や地理に基づき涵養域と排水域を特定し主流動方向を推定する 広域地下水流動を規定し得る地質要素（被覆層、基盤岩、mappableな断層）を抽出 水理特性の観点からサイトスケールの地質構造区分を見直し（類似した層や構造／岩相区分を統合） 水理地質構造間の水理特性のコントラストが地下水流動に与える影響を推定する
必要となる先行知識	<ul style="list-style-type: none"> 地形情報 地質構造区分 水理特性に関する既往の調査結果
成果	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動概要の推定結果 水理地質構造モデル
関連する領域（ドメイン）知識の例	<ul style="list-style-type: none"> 涵養域 排水域 広域 ローカルスケール サイトスケール Mappableな断層 水理特性

表 5-B (4) 地下水水質分布と水質形成機構の理解

目的と概要	<ul style="list-style-type: none"> 既存データ（離散的）と類似した事例に基づき水質（酸化還元条件、pH、及び塩分濃度）の空間分布を推定する 水質分布におけるアノマリとなり得る不連続構造を把握する 主要な水質形成プロセス（岩石-地下水反応と異種水質間の混合）に関する仮説を生成する
必要となる先行知識	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動の場の概念 地質構造区分 水質に関する既往の調査結果
成果	<ul style="list-style-type: none"> 地下水水質空間分布の推定結果 水質形成機構に関する仮説
関連する領域（ドメイン）知識の例	<ul style="list-style-type: none"> 考慮すべき水質 水質形成機構 水質分布 水質分布のアノマリ 岩石-地下水反応 混合

表 5-B (5) 総合的地質環境概念モデルの構築

目的と概要	<ul style="list-style-type: none"> 地質構造、水理地質構造、水質分布と水質形成機構に関する概念モデルを統合し地質環境特性を多面的に表現する総合的概念モデルを構築する 水質分布と地下水流動の場の概念を比較し、整合性を検討するとともに、矛盾点を抽出して後続する調査の課題を設定する
必要となる先行知識	<ul style="list-style-type: none"> 地質構造、水理地質構造、水質分布と水質形成機構に関する概念モデル
成果	<ul style="list-style-type: none"> 総合的地質環境モデル 後続する調査の課題
関連する領域（ドメイン）知識の例	<ul style="list-style-type: none"> 水質分布と地下水流動の場の概念の整合性 水質分布と地下水流動の場の概念の間の矛盾

表 5-B (6) モデル化手法の選択

目的と概要	<ul style="list-style-type: none"> 各地質構造区分と水理地質構造区分における特性分布の不均質性や取得可能なデータの質や量、及び水理や物質移動解析の計算負荷に照らして適切なモデル化手法（均質／不均質モデル、決定論／統計モデル）を選定する 水質形成機構や岩石-地下水反応の時間スケールと入手可能なデータの制約に照らして適切な地球化学解析手法（平衡論／速度論、バッチ／物質移動との連成モデル）を選定する
必要となる先行知識	<ul style="list-style-type: none"> 総合的地質環境概念モデル 各地質構造と水理地質構造内の不均質性に関する既存データや類似例の情報 入手可能なデータの質や量に関する予測 水理物質移動解析の計算負荷に関する情報
成果	<ul style="list-style-type: none"> 選択された水理 物質移動 地球化学解析手法
関連する領域（ドメイン）知識の例	<ul style="list-style-type: none"> 特性分布の不均質性 データの質と量 均質モデル 不均質モデル 決定論モデル 統計モデル 平衡論モデル 速度論モデル バッチモデル 物質移動と連成した地球化学モデル

表 5-B (7) 調査対象と掘削仕様の最適化

<p>目的と概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 重要な地質環境特性の分布に関する情報の不確実性を評価し、その結果に基づき技術的観点から合理的と考えられる調査対象の選択肢を抽出し、重要度分類する。 ・ 関連法案や地権者あるいは地元との協定などの制約条件と予算や工期の予測に基づき社会・経済的観点も含めた調査対象の最適化を行う。 ・ 掘削仕様（掘削長・レイアウト・孔径・コア採取の有無や方法）を最適化し掘削時トラブルシューティングマニュアルを作成する
<p>必要となる先行知識</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 総合的地質環境概念モデル ・ 既存情報 ・ 制約条件に関する知識 ・ 予算や工期の予測
<p>成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 決定された場所と本数 ・ 掘削仕様
<p>関連する領域（ドメイン）知識の例</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 関連法案 ・ 地元との協定 ・ 予算 ・ 工期 ・ 掘削長 ・ ボーリングのレイアウト ・ 孔径 ・ 過去の掘削時のトラブル事例

表 5-B (8) 調査手法の選定

<p>目的と概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 地質学的調査・物理探査仕様の選定 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 岩芯地質調査のマニュアル化 ✓ 孔壁画像調査手法（BTV、BHTV、FMI など）の選定 ✓ 物理検層／流体検層項目（透水性によって可変）、及び機器精度の選定 ✓ 室内試験調査（岩石鉱物調査・年代測定・物質移動試験）手法の選定とサンプリングインターバルの決定 • 水理調査手法の選定 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 流体検層項目の選定 ✓ 水理試験手法の選定 • 地球化学調査・分析手法の選定 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 掘削水とトレーサの選定 ✓ ボーリング孔を利用した採水調査手法の選定 ✓ ボーリングコアを用いた間隙水調査手法の選定 ✓ 分析手法の選定 • 長期観測手法の選定
<p>必要となる先行知識</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 各調査の課題と目標 • 場所と対象に関する知識 • 掘削仕様 • 工期
<p>成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 調査手法選定結果
<p>関連する領域（ドメイン）知識の例</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 岩芯地質調査 • 孔壁画像調査手法（BTV、BHTV、FMI など） • 物理検層 • 流体検層 • 室内試験調査（岩石鉱物調査・年代測定・物質移動試験） • 水理試験 • 掘削水 • 掘削水トレーサ • ボーリング孔を利用した採水調査 • ボーリングコアを用いた間隙水調査 • 水質分析

表 5-B (9) 多分野の競合し得る目標・制約の調整

目的と概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 種々の目的のもとに選定された多分野の調査間の両立性を評価し工程上の制約条件を明確にする ・ 得られる情報の質と量、及び必要な時間とコストの観点から、上記の制約条件の範囲内で最適な調査計画と工程を選定する
必要となる先行知識	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各調査手法の目的 ・ 各調査の実施に関する制約条件 ・ 各調査の実施に要する時間とコスト ・ 各調査によって得られる情報の質・量の実施条件や工程への依存性
成果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最適化された総合調査計画
関連する領域（ドメイン）知識の例	<ul style="list-style-type: none"> ・ ユーティリティー関数 ・ 制約条件付き最適化

付録 5-C

エキスパートシステムの詳細情報

- (1) 孔壁画像調査方法選択
- (2) シーケンシャル水理試験
- (3) 地下水流動場の概念モデルの構築
- (4) 水質データ品質評価
- (5) 水質形成プロセスモデル化
- (6) 掘削水トレーサの選定
- (7) 掘削計画概要図の作成

This is a blank page.

付録 5-C (1)

孔壁画像調査方法選択

- (1) エキスパートシステムについて
- (2) 孔壁画像調査
- (3) 孔壁画像

This is a blank page.

(1) エキスパートシステムについて

孔壁画像調査は、ボーリング孔壁の地質分布を画像化させるために行われる調査であり、このエキスパートシステムは孔壁画像調査に用いられる複数の手法の中から最適な手法を選択するためのものである。ユーザーが計画している掘削方法やニーズから調査手法の候補を示し、候補の詳細な説明を適宜提供する。また、候補の中からユーザーが選択を行うと、その調査手法の単価、工期、データの品質についての情報が自動的に画像に表示される。

(2) 孔壁画像調査

孔壁画像調査は、ボーリング孔壁の地質分布を画像化させるために行われる調査である。

光学式（ボアホールテレビ）、超音波式（ボアホールテレヴィューア）、FMI（Formation MicroImager）などに分類される。

孔壁画像から得られる地質情報には、孔壁を構成する岩盤あるいは構造物の性状（色調、模様など）、不連続面（層理面、片理面、亀裂、断層、グラウトミルクなど）、孔壁の異常（崩壊、圧迫など）、地下水の動き（漏水、流入状況）などがある。孔壁に見られる不連続面の走向傾斜を測定することができるので、断層や割れ目帯などの三次元的な分布を推定することが可能となる。

例としてボアホールテレビの利用対象を示す。この他のボアホールテレヴィューアなどの手法に関してはそれぞれエキスパートシステム内において示す。

表 5-C (1)-1) ボアホールテレビの利用法

調査対象	主な計測対象	解析の主眼	備考
岩盤斜面	開口亀裂、密着亀裂、断層破碎帯など	緩み範囲 すべり面の方向など	—
地すべり斜面	すべり面、層理面、亀裂など	すべり面の方向 不動岩盤の構造解析など	孔壁の自立困難なケースが多い
トンネル	開口亀裂、密着亀裂、断層破碎帯、グラウトの充填状況など	崩落範囲など	—
ダム基礎	同上	透水性亀裂の分布など	—
地下貯蔵施設	同上	同上	大深度ボーリングが多い
産業廃棄物処理場	同上	同上	—
構造物基礎(杭など)	亀裂、鉄筋の状況	構造物基礎の損傷の程度と範囲など	震災調査関連において、近年多く実施
広域地下水流動系	開口亀裂、密着亀裂、断層破碎帯など	透水性亀裂や遮水性構造の分布など	—
その他	路盤（道路の路床の上に設けられた層）や法面（人工斜面）背後の空洞など	空洞量の推定など	—

(3) 孔壁画像

1) BTV(Borehole Television)

(a) 目的

CCD イメージセンサーなどを用いて光学的に孔壁画像を撮影、可視化する。

(b) 解説、調査方法

- ・ 測定深度は、耐圧上の制約から深度 200 m～300 m までが一般的であるが、機種によっては 1,500 m 程度までの測定が可能である。
- ・ 近年の CCD イメージセンサーが高い識別能力 (720 pixels/line) を有し、かつ不連続構造や岩相の直接観察が可能のため、非常に高い精度の地質情報を得ることが可能である。
- ・ 孔壁の地質分布のほか、すべり面やグラウトの注入状況の確認調査など、多岐にわたり利用されている。

2) BHTV (Borehole Televierwer)

(a) 目的

超音波を利用して、孔壁画像を取得、可視化する。

(b) 解説、調査方法

- ・ ボアホールテレヴィューは超音波 (0.5MHz～2.5MHz) を孔壁に向かって発し、孔壁からの反射波の強度と到達時間を深度方向に連続的に測定する方法である。
- ・ カメラなどの光学的方法と違い、孔内水が泥水のように不透明な場合でも適用できる。ゾンデの構造は頑丈なものが多く耐熱 300 °C、耐圧 1,400 kg/cm² という機種もある。
- ・ 地熱開発などの分野でフラクチャー (割れ目) 検出技術として利用されるほか、ケーシングの腐食や採取コアの方向の識別に使われる。また、孔径を反射波の到達時間から算出することが可能である。
- ・ 傾斜角度が 80 度を越えるような高角度の構造に対しては、ほぼ垂直な反射構造として抽出されるケースがあり、解析が困難な場合がある。
- ・ BTV や FMI 検層と異なり、岩相区分が困難なケースが多い。

3) FMI (Formation Microlmager)

(a) 目的

孔壁の多点で計測した比抵抗変化を用いて、孔壁画像を取得、可視化する。

(b) 解説、調査方法

- ・ FMI 検層は孔壁の比抵抗分布に、高解像度の孔壁画像を取得、可視化する手法である。
- ・ 堆積岩では、地層の厚さやそれらが互層する様子を詳細に観察することが可能となり、精度の高い岩相柱状図を連続的に作成することができる。
- ・ 微細な斜交葉理やソールマークなど、ボーリングコアでは識別困難な堆積構造なども把握可能である。
- ・ 堆積岩を対象とした調査では、不連続構造と岩相との識別が困難なケースがある。

This is a blank page.

付録 5-C (2)

シーケンシャル水理試験

- (1) エキスパートシステムについて
- (2) シーケンシャル水理試験について
- (3) パッカーとは
- (4) 判断ルール (A1) : パッカー圧と試験区間の間隙水圧は安定しているか?
- (5) 判断ルール(A2) : パッカー拡張時の試験区間の圧力回復に要する時間は数分以上または以下か?
- (6) 判断ルール(B) : パルス試験 (PW) で圧力回復に要する時間
- (7) 判断ルール(B) : パルス (PW) で圧力回復に要する時間
- (8) パルス試験
- (9) スラッグ試験
- (10) 判断ルール(C) : スラッグ試験 (SW) で圧力回復に要する時間
- (11) 判断ルール(C) : パルス試験 (PW) で圧力回復に要する時間
- (12) 判断ルール(D) : 透水量係数は 10^{-7} [m²/s]後半以上か
- (13) 判断ルール(D) : スラッグ試験 (SW) で圧力回復に要する時間
- (14) 揚水試験
- (15) 判断ルール(E) : 採水は可能か? (試験時間が二日以上あるか?)
- (16) シャットインスラッグ (SWS) 試験
- (17) 判断(F)の事例 : データの品質が悪い例 (揚水試験)

This is a blank page.

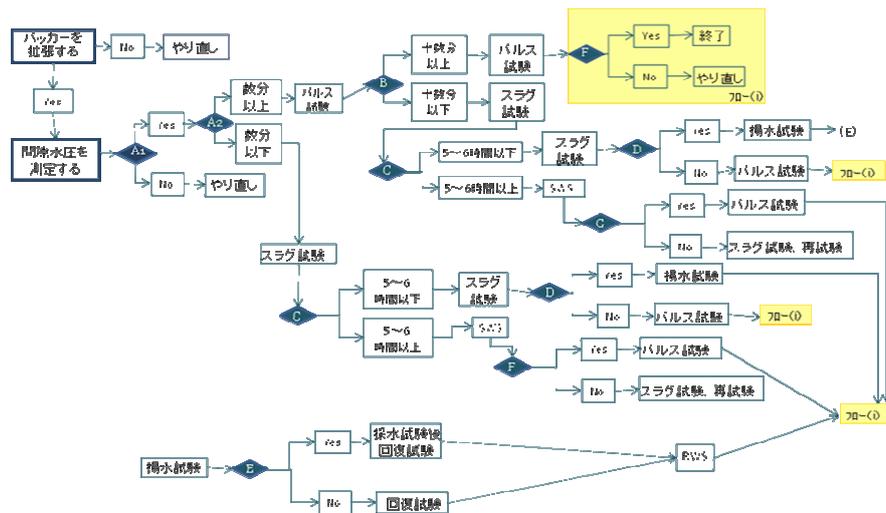
(1) エキスパートシステムについて

1) 概要

シーケンシャル水理試験は、試験区間の透水性に応じた適切な試験方法を選択し、品質の良い水理特性を把握することを目的に開発された試験方法である。試験区間に与えるインパクトが小さい試験イベントから開始し、順次、透水性を把握しながら、インパクトが大きい試験イベントに移行する過程で、適切な試験イベントを選択し、水理特性を把握するものである。このエキスパートシステムはユーザーが次に行うべき試験を各試験の結果に関する質問（データの品質、圧力回復に要する時間など）にユーザーが逐次答えていくことで提示していくものである。さらに、ユーザーが質問に答えやすいように実際の判断事例を示している。

2) シーケンシャル水理試験の全体のフローダイアグラム

図 5-C(2)-1 にシーケンシャル水理試験の流れを示す。ひし形で示しているのがユーザーに問いかける質問、四角で示しているのが質問に答えた後の行動を決定する分岐と行動を示している。例えば、「ルール A₁；パッカー圧力と試験区間の間隙水圧は安定していますか？」という質問にユーザーが答え、「Yes」であれば「ルール A₂」に進み、「No」であれば再度パッカー拡張と間隙水圧測定を行う。「ルール A₁」の説明画面においては間隙水圧が安定しているかどうかをみる根拠、間隙水圧が安定していないときの判断事例を示しており、ユーザーはこれらの情報を元に判断を行うことになる。



◆ ルール

- A1：パッカー圧力と試験区間の間隙水圧は安定しているか？
- A2：圧力回復に要する時間は？
- B1：圧力回復に要する時間は？
- C：圧力回復に要する時間は？
- D：透水量係数は $1E-7(m^2/s)$ 後半以上か？
- E：採水は可能か（試験時間が2日以上残されている）？
- F：データの品質は良好か？

図 5-C (2)-1) シーケンシャル水理試験の全体フローダイアグラム

(2) シーケンシャル水理試験について

放射性廃棄物の地層処分やエネルギー資源の地下備蓄においては、深層岩盤における地下水流動特性を理解することが必要である。この地下水流動特性を理解するためには、水理地質構造モデルを構築し、これに基づいて地下水流動解析を実施することが重要であり、このためにはモデル化や解析の入力情報となる岩盤の透水性などのパラメータを適切に把握することが必要である。

深度数百メートルから千メートル程度のボーリング孔を用いた深層岩盤における水理試験は、対象深度が深く、試験装置の重量やサイズが大きくなることなどから、浅層地盤での水理試験と比較してより多くの時間とコストが必要である。

特に、亀裂性岩盤の場合では、地下深部の岩盤が低透水性から高透水性までの広いレンジの透水性を有することから、試験対象区間の透水性の品質を確保して把握するためには、その場の透水性に相応しい試験手法（パルス、スラグ、揚水試験など）を選択することが重要である。

また、地下数百メートルまで装置を降ろして、試験を実施し、装置を引き上げるまでには時間がかかるため、コストもかさむことから、効率的に試験を実施することが要求される。

しかし、試験を実施するまでは、対象区間の岩盤がどれくらいの透水性を持っているかは不明であり、試験を行うとともに透水性などが適切に取得できたことをリアルタイムで判断しながら適切な手法を探っていくシーケンシャル水理試験が効率的である。

以上のように、地層処分のための安全性評価を目的として、深層岩盤における水理試験の特徴である、幅広い透水性を有する岩盤を対象に品質が確保されたデータを取得しなければならない点を考慮し、岩盤の水理特性を効率的にかつ、品質を確保して取得するためにシーケンシャル水理試験を行う。

(3) パッカーとは

試験区間を形成するための装置で、上下区間からの圧力の漏洩を防ぐために、試験区間の間隙水圧に対して2~3 MPa程度加圧する。拡張圧に耐えられるように、硬質ゴムなどでできている(図5-C(2)-2)。

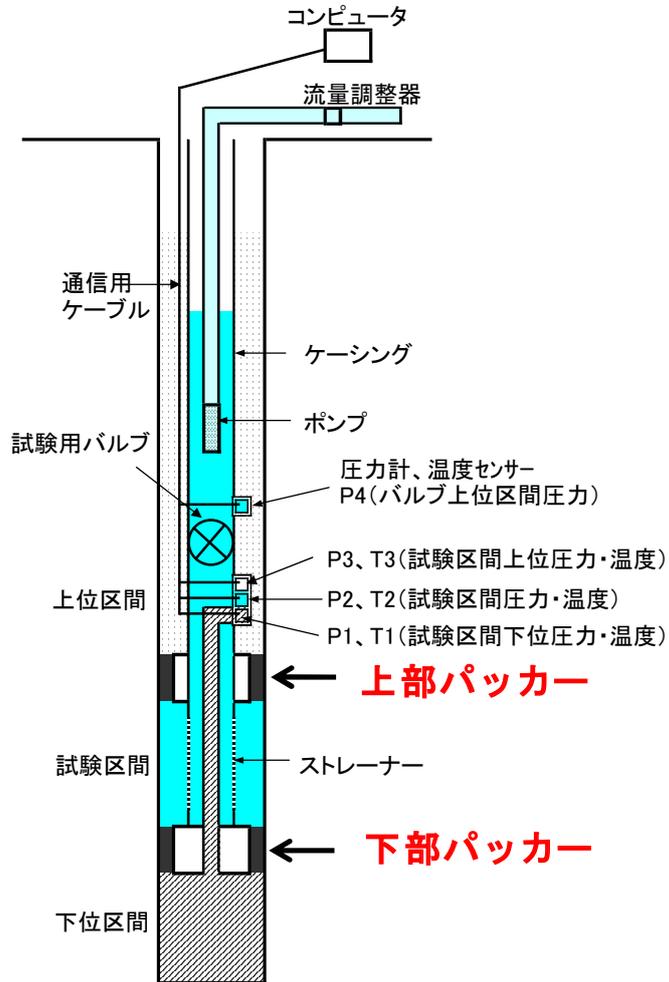


図 5-C (2)-2) シーケンシャル試験 試験装置全体図

(4) 判断ルール (A1) : パッカー圧と試験区間の間隙水圧は安定しているか？

1) ルールの根拠

パッカー圧の安定状況は圧力センサーの示す値の変化により判断する。試験を実施する担当者がインパクトを与えていないにもかかわらず、試験区間の間隙水圧に想定外の著しい変動（試験区間の間隙水圧の回復挙動が不自然）が発生したり、パッカー圧が上昇しない場合などは、周辺での人為的な活動（地下水のくみ上げやボーリング掘削など）や、パッカーの破損などの試験装置の不具合が発生している可能性がある。これらは取得データの品質を低下させるため、A1 の判断が必要となる（図 5-C(2)-3 参照）。

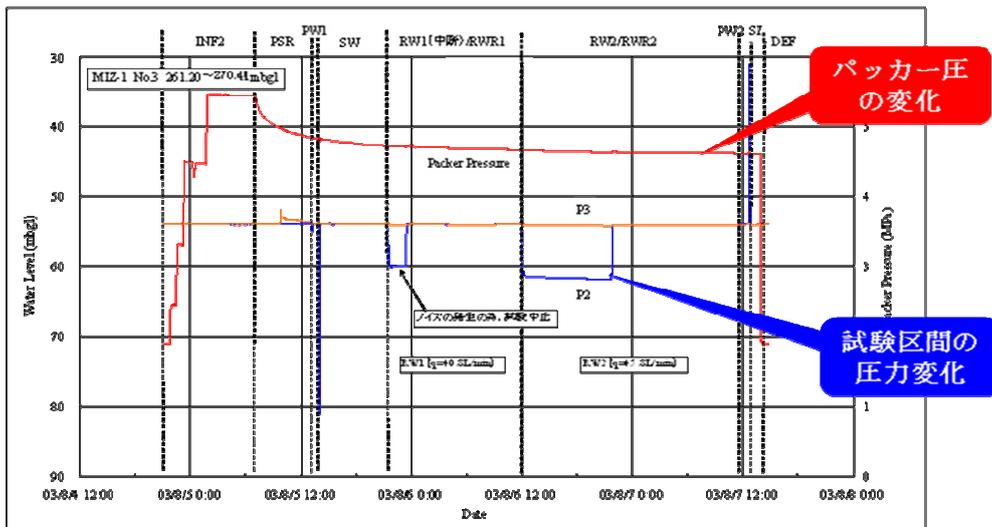


図 5-C (2)-3) パッカー圧力が安定している事例

(パッカー拡張時と間隙水圧測定時のパッカー圧、及び試験区間の間隙水圧の安定が良好と判断された事例)

(5) 判断ルール(A2) : パッカー拡張時の試験区間の圧力回復に要する時間は数分以上または以下か？

1) ルールの根拠

制限時間は、これまでの東濃地域での水理試験の経験に基づき、十数分と設定した。これは、ボーリング調査全体の工程の中で水理試験に与えられた時間内で試験を効率的に実施するための目安時間である。

2) ルールの詳細な説明

- ・ パッカー拡張作業において、パッカーが孔壁に密着し試験区間が閉鎖された時に試験区間の圧力上昇が観測され、岩盤が本来有する間隙水圧へ収束していく過程に数分以上を要すると推定される場合は、次のイベントにパルス試験 (PW) を選択する。
- ・ パッカー拡張作業において、パッカーが孔壁に密着し試験区間が閉鎖された時に試験区間の圧力上昇が認められない、もしくは圧力上昇後、岩盤が有する間隙水圧へ収束するのに数分以下と推定される場合は、次のイベントにスラグ試験 (SW) を選択する。

(6) 判断ルール(B) : パルス試験 (PW) で圧力回復に要する時間

1) パルス試験での圧力回復時間の推定

- ・ 圧力の回復曲線から初期状態の間隙水圧に戻るのに十数分を要すると推定される場合は、再度パルス試験を実施し、再現性を確認する。
- ・ 圧力回復曲線から初期状態の間隙水圧に戻るのに十数分を要しない場合は、スラグ試験を選択する。

2) ルールの根拠

制限時間は、これまでの東濃地域での水理試験の経験に基づき、十数分と設定した。これは、ボーリング調査全体の工程の中で水理試験に与えられた時間内で試験を効率的に実施するための目安時間である。

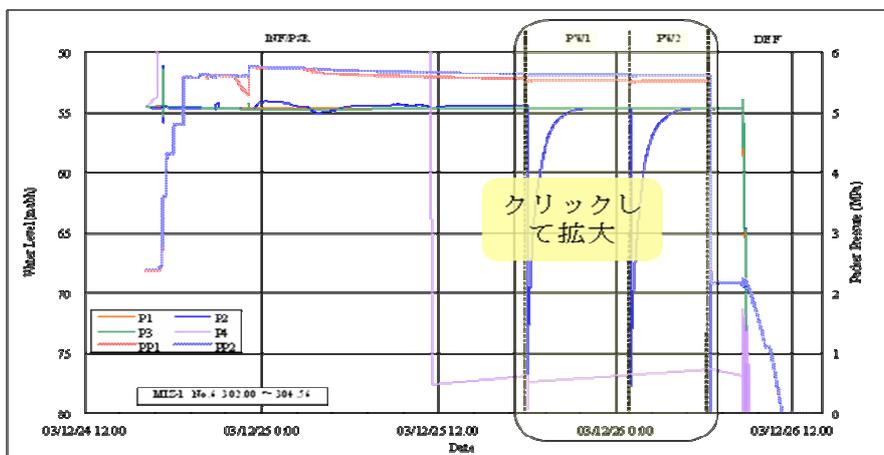


図 5-C (2)-4) パルス試験後の圧力回復に十数分以上を要する事例

(パルス試験(PW1)の回復に 4 時間程度を要したため判断ルール(B1)に従い、再度パルス試験(PW2)を実施して試験を終了した事例)

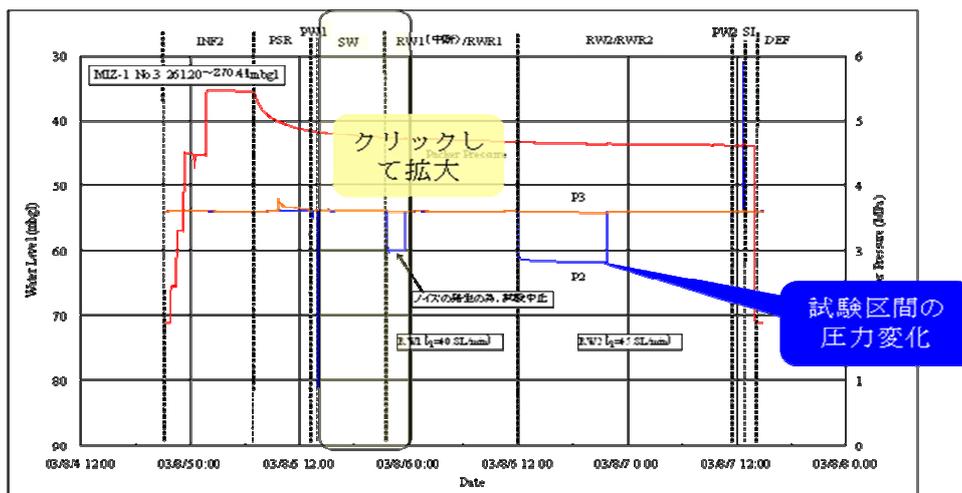


図 5-C(2)-5) パルス試験後に十数分以下で圧力回復する事例

(パルス試験(PW1)とスラグ試験(SW)の結果、水圧が瞬時に回復した事例)

(7) 判断ルール(B): パルス(PW)で圧力回復に要する時間

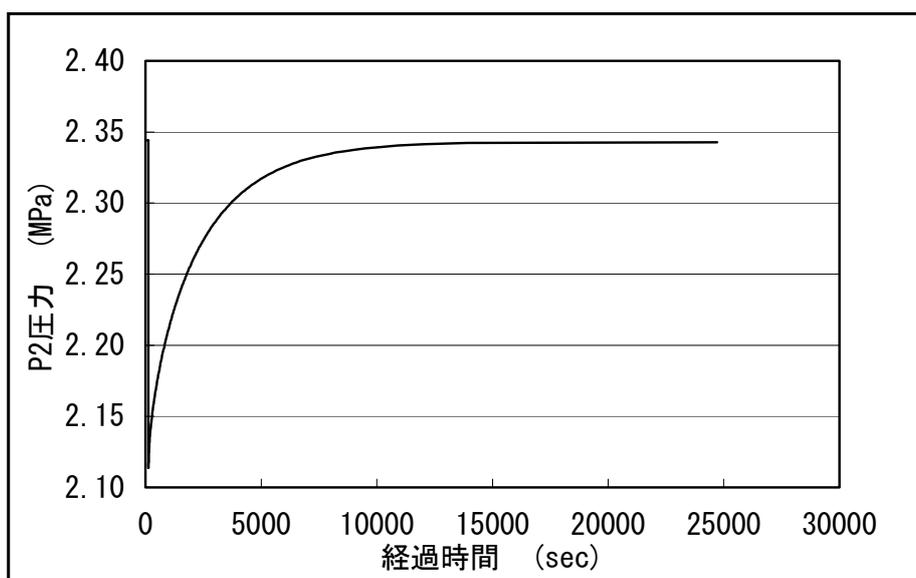


図 5-C (2)-6) 水圧回復までに約 5 時間を要したパルス試験(PW1)の事例
 (「判断ルール(B1)PW の回復に十数分以上要する」に該当)

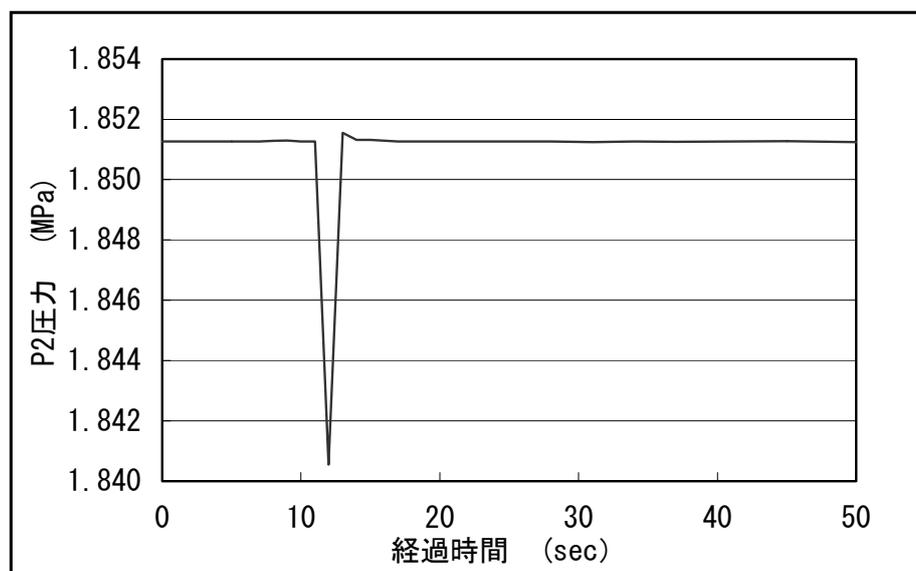


図 5-C (2)-7) 数秒で水圧が回復したパルス試験(PW1)の事例
 (「判断ルール(B2)数十分以下」に該当)

(8) パルス試験

パルス試験は、試験開始時に試験区間から連結するピエゾ管内のバルブを閉鎖して試験区間と遮断した状態で、ピエゾ管内の水圧を試験区間の想定平衡水圧と異なる値に設定し、瞬時にバルブを開閉することによって閉鎖区間内に瞬間的に圧力変化を与える。これにより試験区間の岩盤に与えた水圧差が平衡水圧に回復するまでの時間から透水性を把握する試験である（図 5-C(2)-8 参照）。

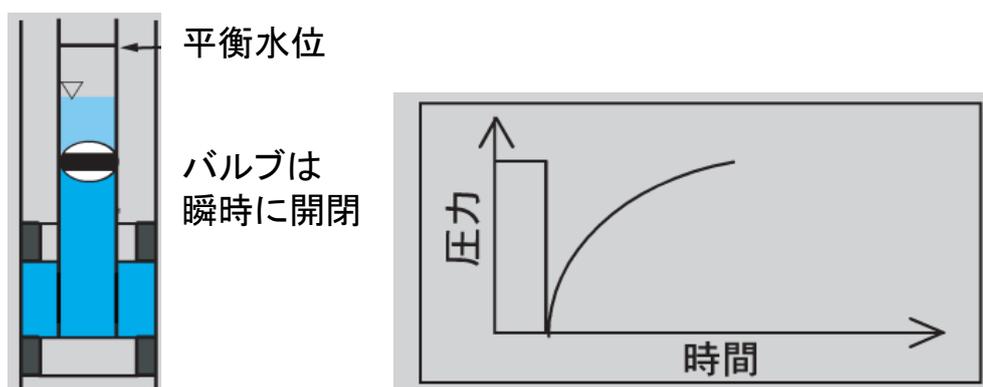


図 5-C (2)-8) パルス試験実施例とその圧力変化曲線

(9) スラッグ試験

スラッグ試験は、ピエゾ管内のバルブを閉鎖した状態で管内のバルブ上位の水圧を試験区間の想定平衡水圧と異なる値に設定した後、バルブを開放することにより回復する試験区間（実際はピエゾ管内）の水圧変化から透水性を把握する試験である（図 5-C(2)-9 参照）。

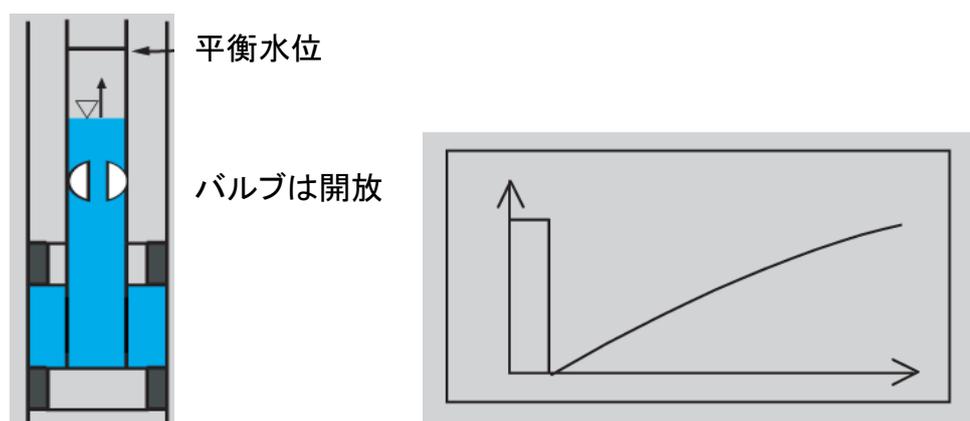


図 5-C (2)-9) スラッグ試験実施例とその圧力変化曲線

(10) 判断ルール(C) : スラグ試験(SW)で圧力回復に要する時間

1) スラグ試験での圧力回復時間の推定

- ・ 圧力の回復曲線から初期状態の間隙水圧への回帰時間を数十分以上要すると推定される場合は、パルス試験を選択する。
- ・ 圧力の回復曲線から初期状態の間隙水圧への回帰時間を数十分以内と推定される場合は、スラグ試験を選択する。

2) ルールの根拠

水理試験に与えられた時間と品質を考慮して経験的に 5~6 時間という制限時間を設定する。

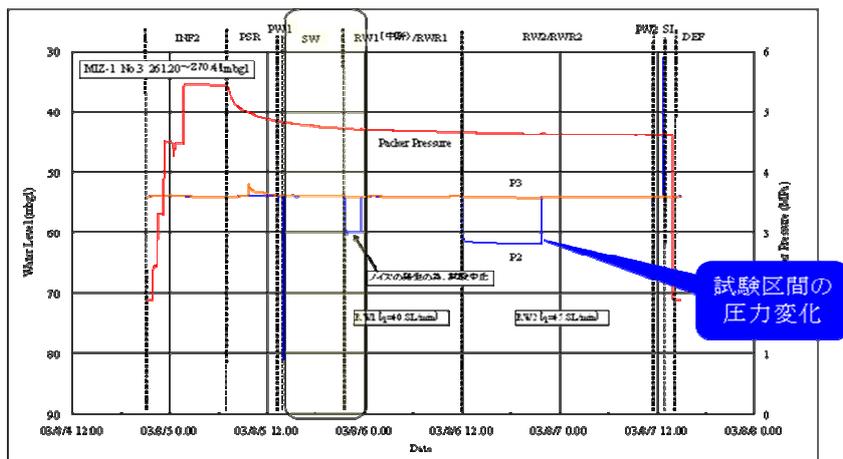


図 5-C (2)-10) 5~6 時間以内で圧力回復するスラグ試験の事例

(パルス試験(PW1)とスラグ試験(SW)の結果、水圧が瞬時に回復した事例)

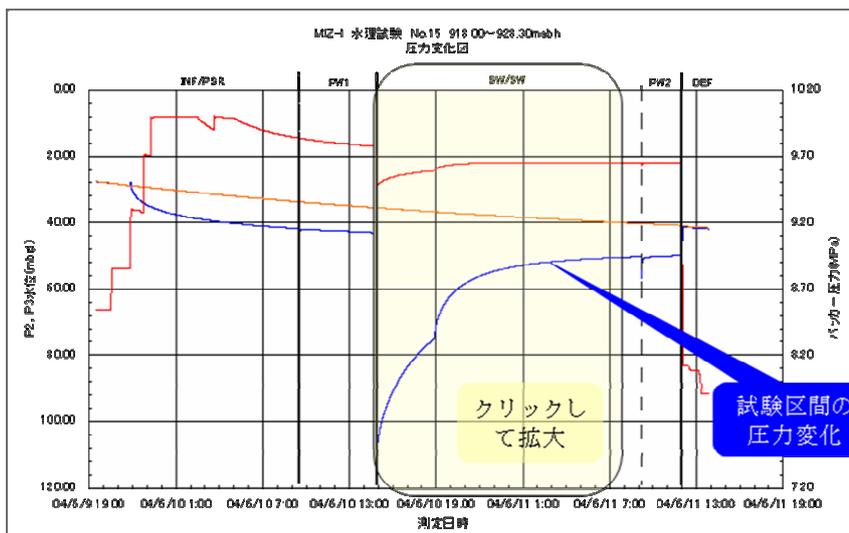


図 5-C (2)-11) 圧力回復が 5~6 時間以上を要するスラグ試験の事例

(スラグ試験(SW)による水圧回復途中で 4 時間程度を要し、初期水圧までの回復にさらに時間を要することが想定されたため、バルブを閉鎖し、シャットインスラグ試験(SWS)に移行を決定した事例)

(11) 判断ルール(C) : パルス試験(PW)で圧力回復に要する時間

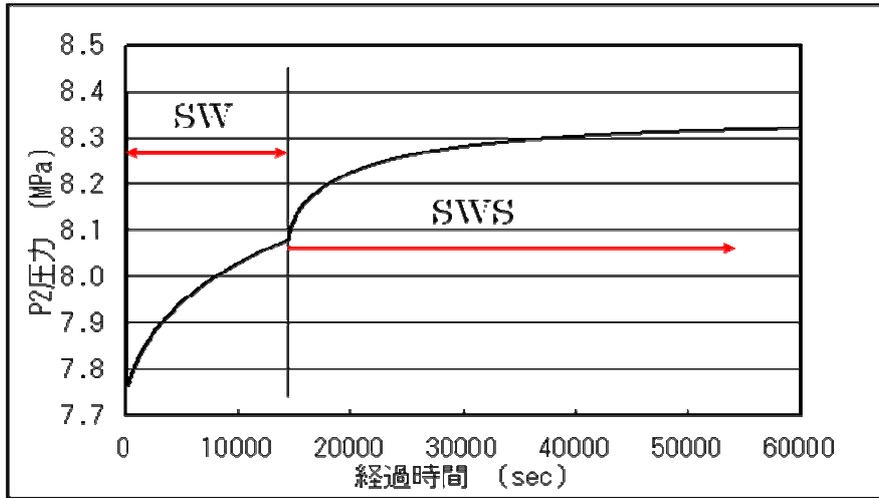


図 5-C (2)-12) シャットインスラグ(SWS)試験の事例

(スラグ試験(SW)の水圧回復途中で4時間程度が経過し、判断Cに基づきバルブを閉鎖してSWS試験に移行した事例)

(12) 判断ルール(D) : 透水量係数は 10^{-7} [m²/s]後半以上か

1) スラグ試験で取得される透水量係数

スラグ試験で得られる概略的な透水量係数が大きい(目安として 10^{-7} [m²/s]後半以上)場合は、揚水試験に移行し、逆に透水量係数が小さい場合は、パルス試験に移行する。

2) ルールの根拠

東濃地域で行われた水理試験で得られた透水量係数に基づいた設定値である。

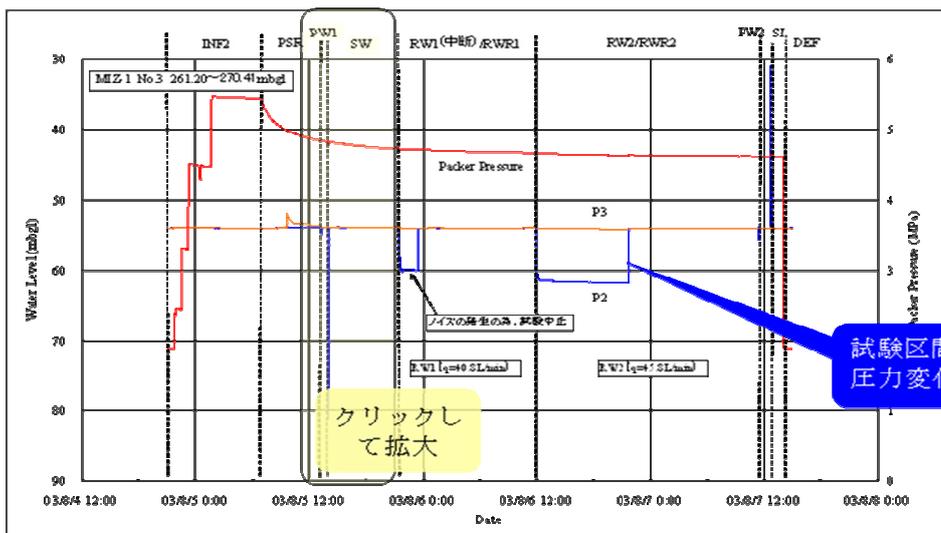


図 5-C (2)-13) スラグ試験により透水量係数 10^{-7} (m²/s)後半以上と計算された事例

(スラグ試験(SW)による透水量係数が 10^{-7} (m²/s)後半以上であったため、揚水試験(RW)に移行した事例)

(13) 判断ルール(D) : スラッグ試験(SW)で圧力回復に要する時間

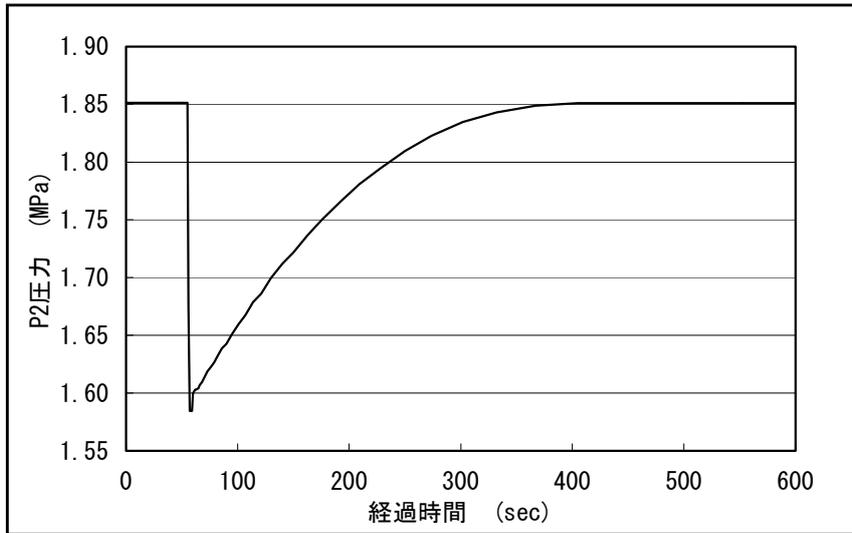


図 5-C (2)-14) スラッグ試験により透水量係数 10^{-7} (m^2/s)後半以上と計算された事例の拡大図

(14) 揚水試験

揚水試験は試験装置にポンプを挿入して揚水に伴う試験区間の水圧変化から透水性を把握する試験である。揚水試験後は水圧の回復過程の挙動から透水性を算出する回復試験を実施する（図 5-C(2)-15) 参照）。

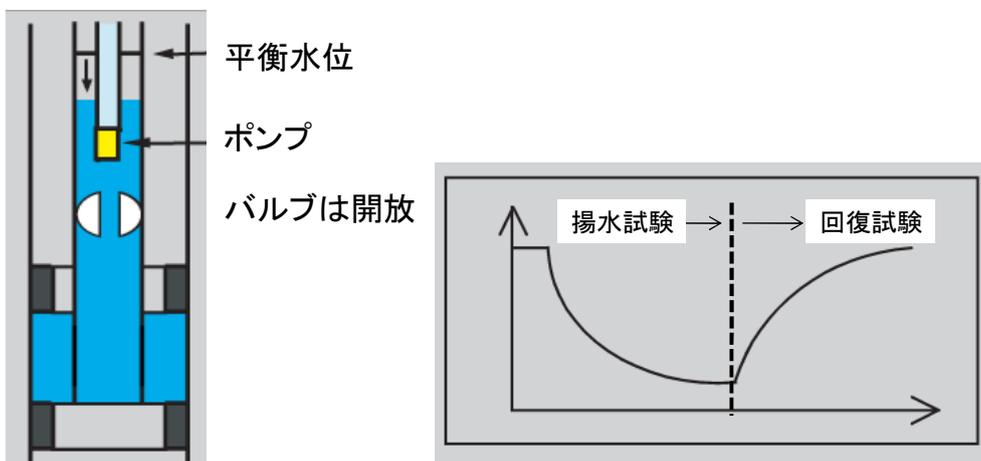


図 5-C (2)-15) 揚水試験の実施例とその圧力変化曲線

(15) 判断ルール(E)：採水は可能か？（試験時間が二日以上あるか？）

1) ルール根拠

ボーリング掘削時に使用する掘削水の排水のためには、掘削時に使用した水量の 5~6 倍以上の排水を行う。この根拠は、掘削水に添加した蛍光染料の量に由来するものである。東濃地域で行った掘削では、蛍光染料が 0.1%未満になった時点で「ボーリングに伴う掘削水が全て排水された」とみなしている。このことから、原位置における経験から算出された値である。また、排水に要する時間が二日かかることから、ボーリング掘削後に採水を行う場合、二日以上必要かどうかについて確認する必要がある。

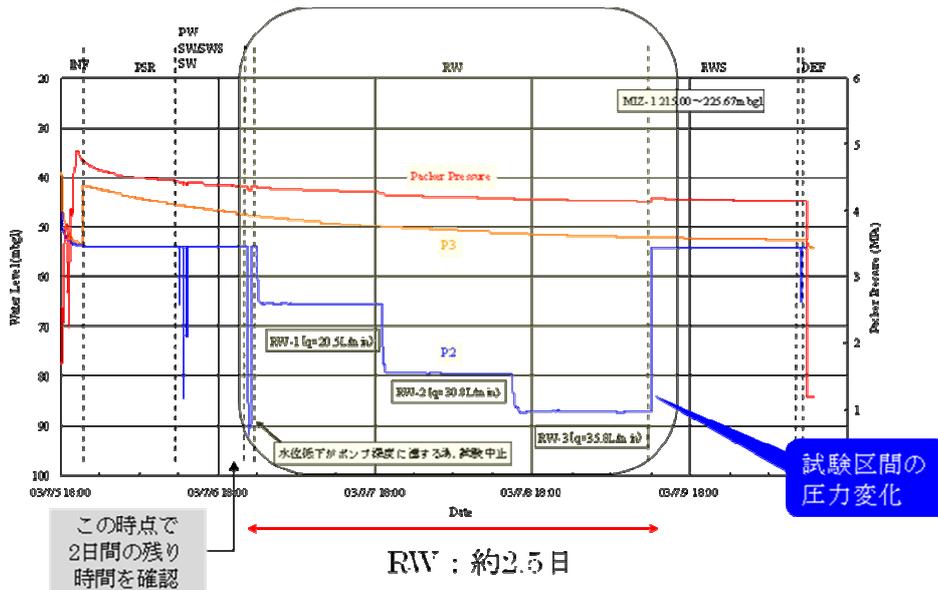


図 5-C (2)-16) 採水の可能性を判断した事例

(16) シャットインスラグ (SWS) 試験

スラグ試験において、開放したバルブを試験途中で閉鎖し回復圧力を測定する方法であり、これをシャットインスラグ (SWS) 試験という (図 5-C(2)-17) 参照)。これにより、試験時間の短縮や揚水試験とみなした透水性の評価などが可能となる。

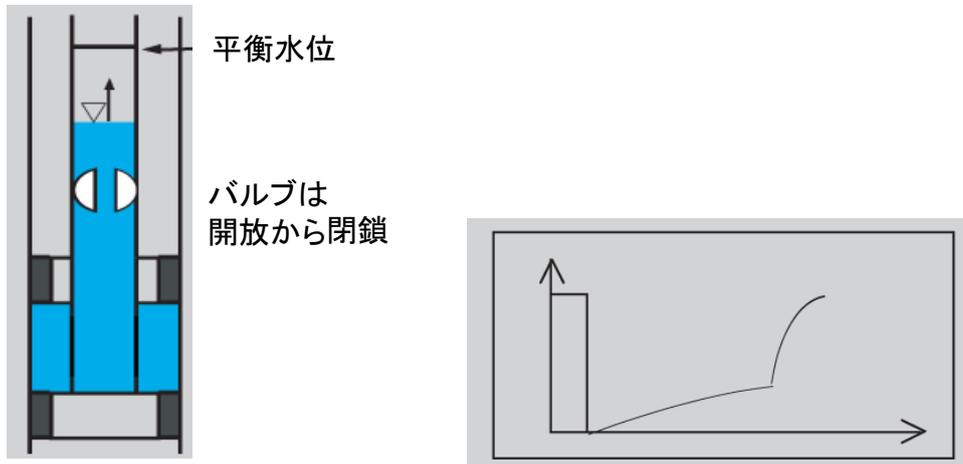


図 5-C (2)-17) 回復試験実施例とその圧力変化曲線

(17) 判断(F)の事例：データの品質が悪い例（揚水試験）

- 試験で得られた圧力変化曲線全体に想定外の変動がないことや、最初と最後のパルス試験の比較などにより試験中の圧力変化に異常がなく（試験区間の水理場に変化がない）、得られた圧力変化データへのフィッティングが良好な場合は試験を終了する。
- 品質が悪ると判断される場合は、試験終了後又は試験中に再試験の判断を行い、実行する。

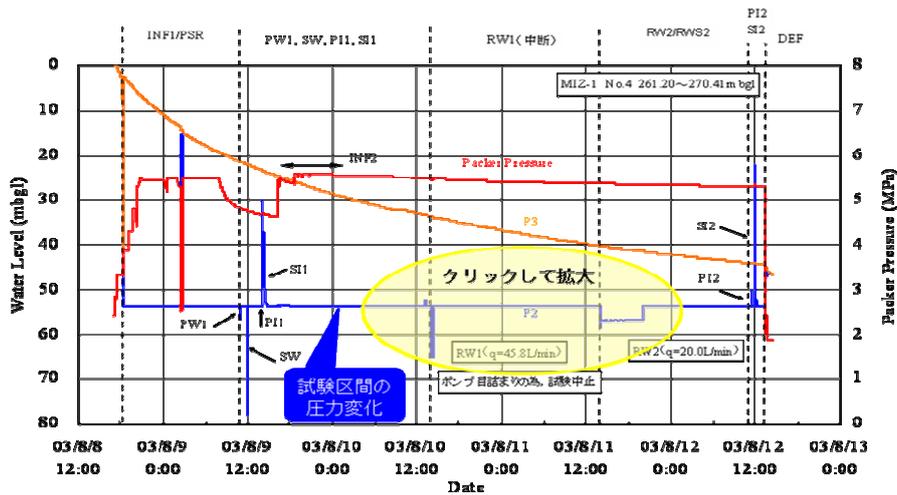


図 5-C (2)-18) データの品質が悪い事例（揚水試験）

(黄色着色部分は、揚水試験(RW1)中にポンプが故障したため再度試験を行った事例)

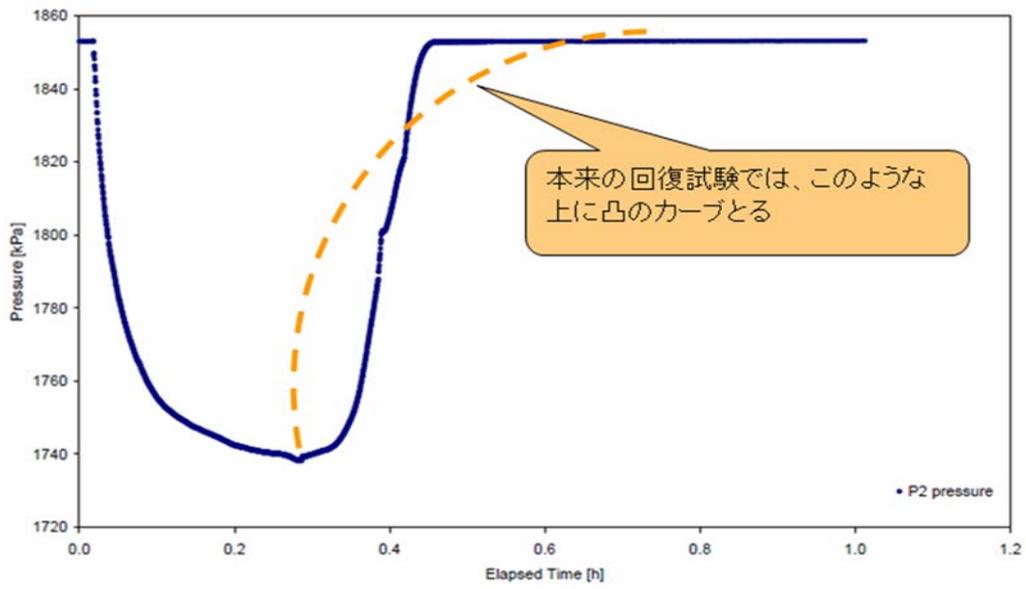


図 5-C (2)-19) データの品質が悪い事例（揚水試験）の拡大図

This is a blank page.

付録 5-C (3)

地下水流動場の概念モデルの構築

- (1) エキスパートシステムについて
- (2) 断層の透水性に与える要因
- (3) エキスパートシステムのルール
- (4) ルール理解のための背景知識①；ファジールール間の演算

This is a blank page.

(1) エキスパートシステムについて

地下水流動場の概念モデルは、地下水流動解析における解析手法の選択や解析条件、解析ケースなどを設定する上で重要な情報となるものである。この概念モデルにおいては、地下水の流動方向や流速の定性的なコントラストを推定する必要がある。

このエキスパートシステムは、地下水流動場に影響を与える可能性がある断層などの不連続構造が分布している淡水系地下水の地下水流動場の概念の構築を支援するものである。このため、不連続構造が地下水流動場に与える影響を推論する必要があるが、不連続構造の分布位置や透水性については、不完全な情報しか入手できないため、ここでの推論はあいまいで定性的なものとなる。そこで、このような不確実性を適切に表現するために、ファジールールを利用する。

ユーザーは、まず、不連続構造の分布位置や透水性、間隙水圧といった条件の様々な組み合わせを選ぶ必要がある。この選択は不確実なので、0 か 1 かという明確なものではなく、中間的な値をとることになる（たとえば、ある不連続構造面に沿った透水性が周囲の岩盤よりも高いことの確からしさが 0.5 であるという様に）。そして、それぞれの条件下での地下水流動のパターンを類別し、その確からしさをファジー化したルールを用いて、地下水流動場がどの様なものになるかという可能性をこの指定に基づき（この場合は複数）推論する。

(2) 断層の透水性に与える要因

1) 断層の構造

断層は断層核 (Fault Core) と損傷帯 (Damage Zone) で構成される。

- ・ 断層核 (Fault Core) : 変位の大半を受け持つ部分。すべり面、ガウジ、変質ゾーン、カタクラサイトゾーン
- ・ 損傷帯 (Damage Zone) : 断層の成長に伴い、主に力学的影響を受けた領域。断層核を挟むように分布小断層、細脈、割れ目、壁開、褶曲

2) 低透水性の特性を有する構造①

高透水層が断層部分でずれていることによって、岩盤全体としての透水性（特に水平方向の透水性）は低下する。

3) 低透水性の特性を有する構造②

高透水層中の低透水層が断層内に取り込まれ、断層は遮水帯を形成する。

4) 高透水性の特性を有する構造

透水性の低い岩盤中に存在する断層が水みちを形成する。

5) 複合的な構造

損傷帯に沿う方向に対しては水みちとなるが、低透水性の断層核が存在することにより、断層を横切る方向に対しては遮水層として機能する。つまり異方性を持つということである。

6) 透水性測定例

断層粘土を有する断層透水性は、 10^{-8} ~ 10^{-5} m/s オーダー、断層角礫が主に充鎮されていた断層では、 10^{-6} ~ 10^{-3} m/s オーダーの透水性を有することが示される。

7) 断層の地下水流動場に与える影響

- ・ 断層部では割れ目帯自体が地下水の流動経路となる場合や、断層粘土を境に遮水的な性質を

(4) ルール理解のための背景知識①；ファジールール間の演算

行列として表現されるファジールール間の演算は、行列の演算における積を min に、和を max に置き換えたものとなる。

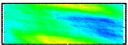
$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 b_1 + a_2 b_3 & a_1 b_2 + a_2 b_4 \\ a_3 b_1 + a_4 b_3 & a_3 b_2 + a_4 b_4 \end{pmatrix}$$

← 通常の行列の場合
← ファジー行列の場合

$$\begin{aligned}
 & \max(\min(a_1, b_1), \min(a_2, b_3)) \quad \max(\min(a_1, b_2), \min(a_2, b_4)) \\
 = & \max(\min(a_3, b_1), \min(a_4, b_3)) \quad \max(\min(a_3, b_2), \min(a_4, b_4))
 \end{aligned}$$

結晶質 岩(酸性)	結晶質 岩(塩基 性)	砂質岩	泥 質・凝 灰岩
			
0.2	0.3	0.5	0.3
当該サイトでの岩種ファジー推定			

○

		亀裂 ネットワーク 	不均質 連続体 	不均質 連続体 	透水性 マトリクス 中亀裂 ネットワーク 
結晶質岩 (酸性)		1	0	0.1	0.2
結晶質岩 (塩基性)		1	0	0.1	0.2
砂質岩		0.2	0.3	0.5	0.7
泥質・ 凝灰岩		0.1	0.4	0.7	0.5
岩種と核種移行概念モデルのファジールール (行列)					

=

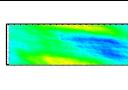
			
0.3	0.3	0.5	0.5

図 5-C (3)-1) ファジー理論を用いた事例

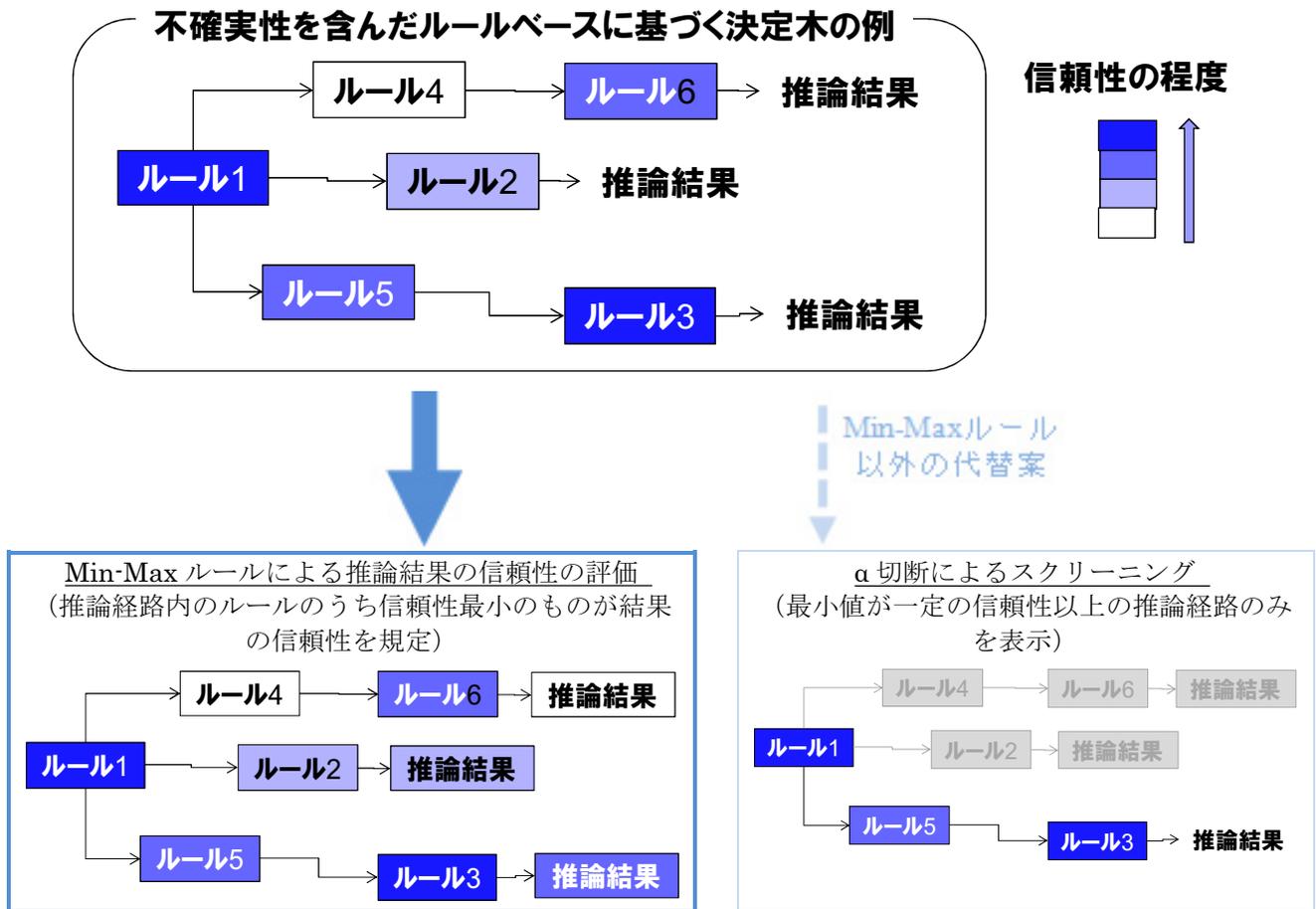


図 5-C (3)-2) Min-Max ルールによる信頼性の表現方法

表 5-C (3)-2) エキスパートシステムのルールの事例
 (ユーザーが入力する断層の分布位置や透水性、間隙水圧条件の組み合わせ)

ユーザーが確信の程度をファジーな数値で設定する↓

A:断層の面方向の透水性	A-1:周囲の岩盤より有意に高い	0.7
	A-2:周囲の岩盤とほぼ同じ	0.3
	A-3:周囲の岩盤より有意に低い	0.1
B:断層の直交方向の透水性	B-1:周囲の岩盤より有意に高い	0.1
	B-2:周囲の岩盤とほぼ同じ	0.3
	B-3:周囲の岩盤より有意に低い	0.7
C:断層と主流動方向の角度	C-1:ほぼ直交	0.7
	C-2:ほぼ平行	0.3
	C-3:それ以外	0.1
D:着目する領域における断層の分布	D-1:断層で囲まれている	0.9
	D-2:断層で囲まれていない	0.1
E:断層上(下)流側の間隙水圧	E-1:静水圧より高い	0.1
	E-2:静水圧と同じ	0.9
	E-3 静水圧より低い	0.1

表 5-C (3)-3) エキスパートシステムで用いるファジールール（地下水流速水平成分の例）

条件の組合せ (断層の分布位置や透水性 についての条件の組合)		代表的な位置での地下水流速のファジー推論											
		断層の上流側			断層の下流側			断層に囲まれた領域			断層内		
		高	周囲 と同 程度	低	高	周囲 と同 程度	低	高	周囲 と同 程度	低	高	周囲 と同 程度	低
B-3-C-1:A-1:D-1	E-1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0.1	0.3	0.9	0.9	0.1	0.1
	E-2	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0.1	0.3	0.9	0.9	0.1	0.1
	E-3	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0.1	0.3	0.9	0.9	0.1	0.1
B-3-C-1:A-1:D-2	E-1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0	0	0	0.9	0.1	0.1
	E-2	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0	0	0	0.9	0.1	0.1
	E-3	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0	0	0	0.9	0.1	0.1
B-3-C-1:A-2/3:D-1	E-1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0.1	0.3	0.9	0.1	0.5	0.3
	E-2	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0.1	0.3	0.9	0.1	0.5	0.3
	E-3	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0.1	0.3	0.9	0.1	0.5	0.3
B-3-C-1:A-2/3:D-2	E-1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0	0	0	0.1	0.5	0.3
	E-2	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0	0	0	0.1	0.5	0.3
	E-3	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.7	0	0	0	0.1	0.5	0.3
B-2/1:A-1	E-1	0.1	0.9	0.1	0.7	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1
	E-2	0.1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1
	E-3	0.1	0.9	0.1	0.7	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1
B-2/1:A-2/3	E-1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1
	E-2	0.1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1
	E-3	0.1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1
B-3-C-2/3:A-1	E-1	0.1	0.9	0.1	0.7	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1
	E-2	0.1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1
	E-3	0.1	0.9	0.1	0.7	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1
B-3-C-2/3:A-2/3	E-1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1
	E-2	0.1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1
	E-3	0.1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1

条件の凡例

A:断層の面方向の透水性	A-1:周囲の岩盤より有意に高い
	A-2:周囲の岩盤とほぼ同じ
	A-3:周囲の岩盤より有意に低い
B:断層の直交方向の透水性	B-1:周囲の岩盤より有意に高い
	B-2:周囲の岩盤とほぼ同じ
	B-3:周囲の岩盤より有意に低い
C:断層と主流動方向の角度	C-1:ほぼ直交
	C-2:ほぼ平行
	C-3:それ以外
D:着目する領域における断層の分布	D-1:断層で囲まれている
	D-2:断層で囲まれていない
E:断層上(下)流側の間隙水圧	E-1:静水圧より高い
	E-2:静水圧と同じ
	E-3:静水圧より低い

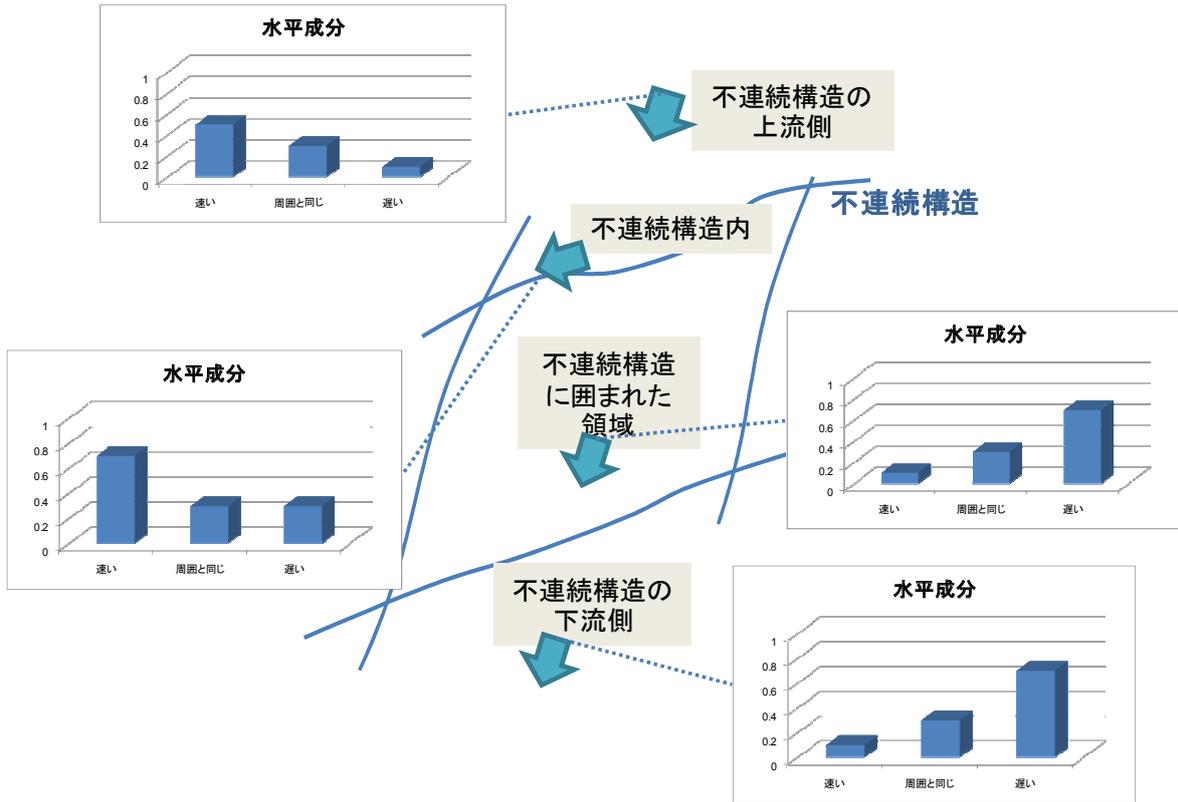


図 5-C (3)-3) エキスパートシステムで求められる地下水流速コントラストの例

This is a blank page.

付録 5-C (4)

水質データ品質評価

- (1) エキスパートシステムについて
- (2) 評価手法 (Evidential Support Logic) について
- (3) 水質データの品質評価について

This is a blank page.

(1) エキスパートシステムについて

地層処分における、長期間にわたる処分場の安全性を証明するためには深部地下水の化学的環境（pH、酸化、還元電位、塩分濃度）、形成プロセス、長期的変遷などを示すことが重要である。そのためには、品質の管理された地球化学データに基づき、地球化学解析などを行う必要がある。地層処分または地層処分研究開発以外の目的（例えば、地下資源探査、温泉調査）で取得された地球化学データの中には、品質管理が十分ではないデータや、品質管理がなされているかを確認できるバックデータがないものがある。これらのデータが混在しているデータセットを利用して、地球化学解析を行うと誤った解釈をもたらす可能性がある。それを避けるために、客観的な指標を設定して地下水水質などの地球化学データの品質を評価する手法が構築されている。

このエキスパートシステムは ESL (Evidential Support Logic) を用いることで地下水データの品質を定量的に評価することを目的としたものである。地下水データの品質を決定する様々な命題（たとえば、測定方法が妥当であるか？）の信頼度をユーザーが入力し、それらの信頼度を確率論により統合させることで最上位にある命題（データの品質は保証されているか？）の信頼度を算出することができる。

なお、信頼度の確立論による統合は Tesla というソフトによって自動化されており、このエキスパートシステムではユーザーが各命題の信頼度を決定したのちに Tesla を起動し結果を表示させる仕組みとなっている。

(2) 評価手法 (Evidential Support Logic) について

1) ESL とは

ESL は、個々に見れば不完全あるいは不確実な多様な証拠に基づき、検討の対象とする命題が真であることをどの程度の確信を持って主張することができるか、という意味決定問題を支援するための手法である。ESL の手法は、後述する区間確率の理論に基づくものであり、推論結果を真か偽に二分するのではなく、「どちらとも言えない」という不確かさを許容する点が特徴である。この特徴は、特に、入手可能なデータが限定される状況で有用となる。

ESL は、1990 年代の初頭に資源開発や経営工学などの分野で開発・使用されてきたが、2000 年以降放射性廃棄物地層処分の分野においても適用されており、データや知識の不足に伴う不確実性評価などに用いられている。

2) ESL の適用手順

検討対象とする不確実な命題を、その真偽に影響を及ぼすような複数の補助命題に逐次細分化する。細分化の作業はそれぞれの補助命題の成立性についての確信の程度を判断するときに参照する証拠 (Evidence) と対応づけられるレベルまで繰り返し行う。この作業によって、命題の真偽についての信頼性を判断するプロセスが樹形図として整理される。

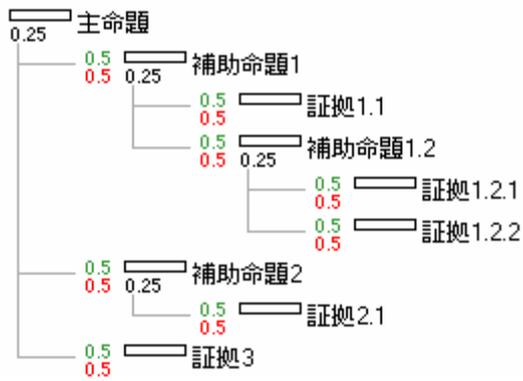


図 5-C (4)-1) 不確実性を有する主命題の信頼性の判断に関する階層プロセスモデルの例

樹形図の末端に位置する補助命題が真であることの確信の程度を、主観確率としてそれぞれに対応する証拠に基づき入力する。

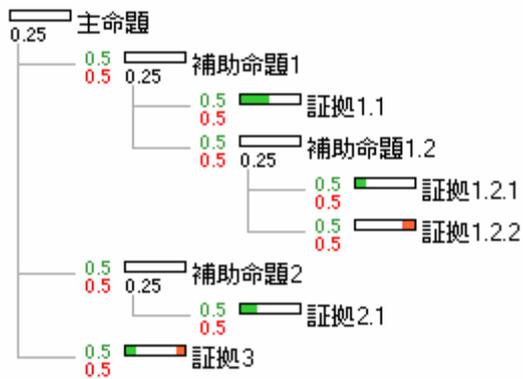


図 5-C (4)-2) 各証拠に基づく末端の補助命題の確信の程度（主観確率）の入力例

樹形図の中の全ての分岐点において、個々の下位命題あるいは証拠についての確信の程度が上位の命題の信頼性に与える寄与の程度を「十分性」、「重複性」、及び「必要性」の三つの指標に基づき設定する。

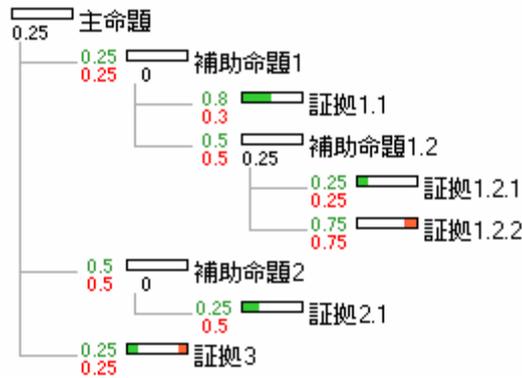


図 5-C (4)-3) 下位の補助命題あるいは証拠の上位命題の信頼性への寄与についての十分性と重複性の入力例

図 5-C(4)-2 と図 5-C(4)-3 の入力に基づき、条件付き区間確率についての演算規則を適用することにより上位の命題についての確信の程度を順次算出していく。

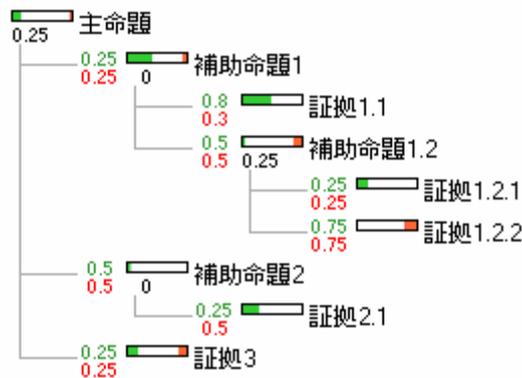


図 5-C (4)-4) 主命題の信頼性の評価例

図 5-C (4)-3 と-4 における主観確率は、区間確率として定義される。区間確率理論は、古典的な確率論とは異なり、主観確率を区間推定として与えるために、その和が 1 となることを要請しない。例えば、ある命題の真偽に関する主観確率を古典的な確率論と区間確率理論のそれぞれで定義した場合、例えば図 5-C(4)-5 のような結果が得られることとなる。

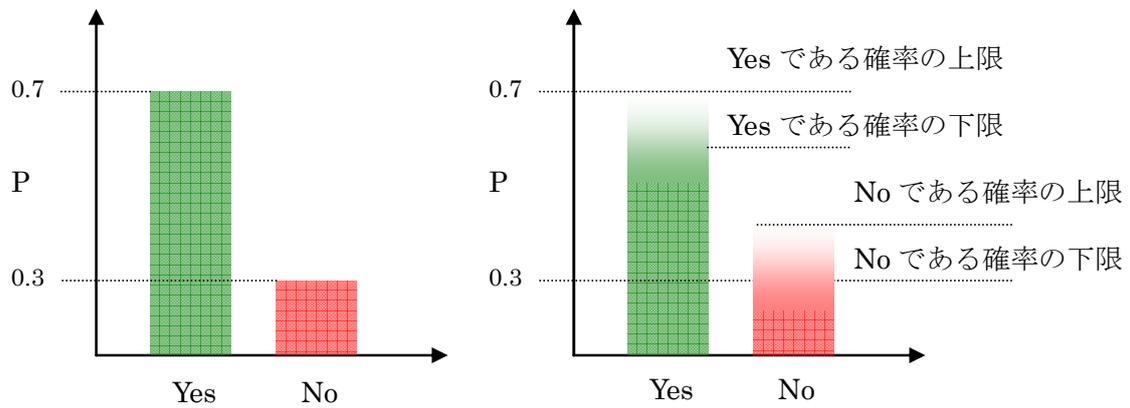


図 5-C (4)-5) 古典的な確率論 (左) と区間確率理論 (右) の比較

古典的な確率理論では、支持 (yes) と否定 (no) の和が1でなくてはならないのに対して、区間確率では、「どちらとも言えない」という不確実な領域が残ることとなる (図 5-C(4)-6参照。)

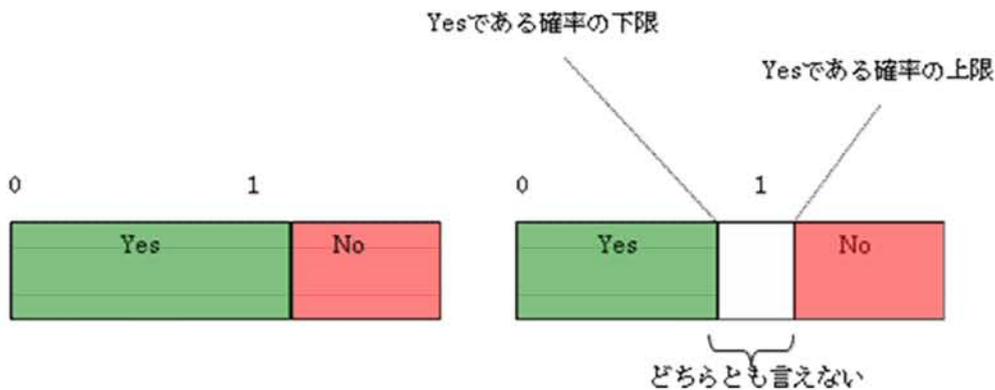


図 5-C (4)-6) 古典的な確率論 (左) と区間確率理論 (右) の比較 (続き)

区間確率において、支持とも否定とも断定することのできない領域が残されることは、ファジー理論におけるメンバーシップ関数や possibility 理論とも共通した性質であり、これは、人間の主観的判断に含まれる曖昧さを表現するための自由度であるとみなすことができる (Ross, et.al., 2002)。実際、検討の初期において関連する情報が少ない状況では、各補助命題に対して「どちらとも言えない」局面が多く、このような状況で敢えて支持あるいは否定に意見を振り分けることは恣意的な検討結果につながる可能性が否定できない。

3) 区間確率の演算内容

ここで、区間確率の演算について述べる。

簡単のため、上位の命題が二つの証拠（あるいは補助命題。以下の例では証拠として説明を進めるが、補助命題についても全く同じ演算規則が適用される）に対応付けられた状況を考え、証拠 1 が命題を支持する程度（主観確率）を $P(y_1)$ 、証拠 2 が支持する程度の主観確率を $P(y_2)$ とする。この時、上位の命題が真である確率 $P(Y)$ の下限は次式によって算出される。

$$P(Y) \geq P(Y|y_1)P(y_1) + P(Y|y_2)P(y_2) - P(Y|y_1 \cap y_2) \quad (1)$$

ここで、 $P(Y|y_1)$ 及び $P(Y|y_2)$ は、それぞれ証拠 1 と 2 が上位命題を 100% 支持している場合に上位の命題が真であることの条件付き確率である。ESL では、この条件付き確率をこれらの証拠の「上位命題が真であること」に対する十分性を示すものとみなす。実際、ある証拠が上位の命題に対して極めて直接的な関連を有している場合には、その証拠が支持している場合に実際に上位命題が真であることの確率は極めて高いものとなり、関連が間接的であったり曖昧であったりする場合にはその条件付き確率は低いものと推定される。また、(1)式は、模式的にはベン図によって表現することができる（図 5-C(4)・7 参照）。求める確率 $P(Y)$ は、同図における 0 の面積で表されるが、その面積を見積もるために証拠 1 と証拠 2 によって支持される領域を用いるということが ESL の図形的な理解である。この図からもわかる通り、互いにあまり重複しないような多くの証拠で $P(Y)$ を覆うことがその確信の程度を向上するためには求められることとなる。また、 $P(y_1)$ と $P(y_2)$ はそれぞれ 1 と 3 の面積に対応しており、これに対して、条件付き確率 $P(Y|y_1)$ 及び $P(Y|y_2)$ は、それぞれ、1 の面積の 0 に対する割合と 3 の面積の 0 に対する割合であり、従って、右辺の $P(Y|y_1)P(y_1) + P(Y|y_2)P(y_2)$ は、2 と 4 の面積の和を示すものと言うことができる。この時、明らかに、2 と 4 の面積の和は、5 の面積を二重に足し合わせていることとなる。そこで、(1) 式の右辺第三項にあるように $P(Y|y_1 \cap y_2)$ つまり 5 の面積を除すことが必要となる。

さて、右辺第三項である $P(Y|y_1 \cap y_2)$ は、二つの証拠が独立なものであっても存在し、その

値は、積 $P(Y|y_1)P(y_1)P(Y|y_2)P(y_2)$ となり最小値をとる。他方、これは、二つの証拠が完全に従属の場合に最大となり、この場合には証拠 1 あるいは 2 のどちらか一方が他を包含することとなるため、 $Min[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)]$ となる。つまり、 $P(Y|y_1 \cap y_2)$ の大きさは二つの証拠の包含関係によって変動することとなり、以下の不等式が成立する。

$$P(Y|y_1)P(y_1)P(Y|y_2)P(y_2) \leq P(Y|y_1 \cap y_2) \leq Min[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)] \quad (2)$$

そこで、 $P(Y|y_1 \cap y_2)$ を次のように書き換えることとする。

$$P(Y|y_1 \cap y_2) = \rho Min[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)]$$

$$\rho \equiv \frac{P(Y|y_1 \cap y_2)}{Min[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)]} \quad (3)$$

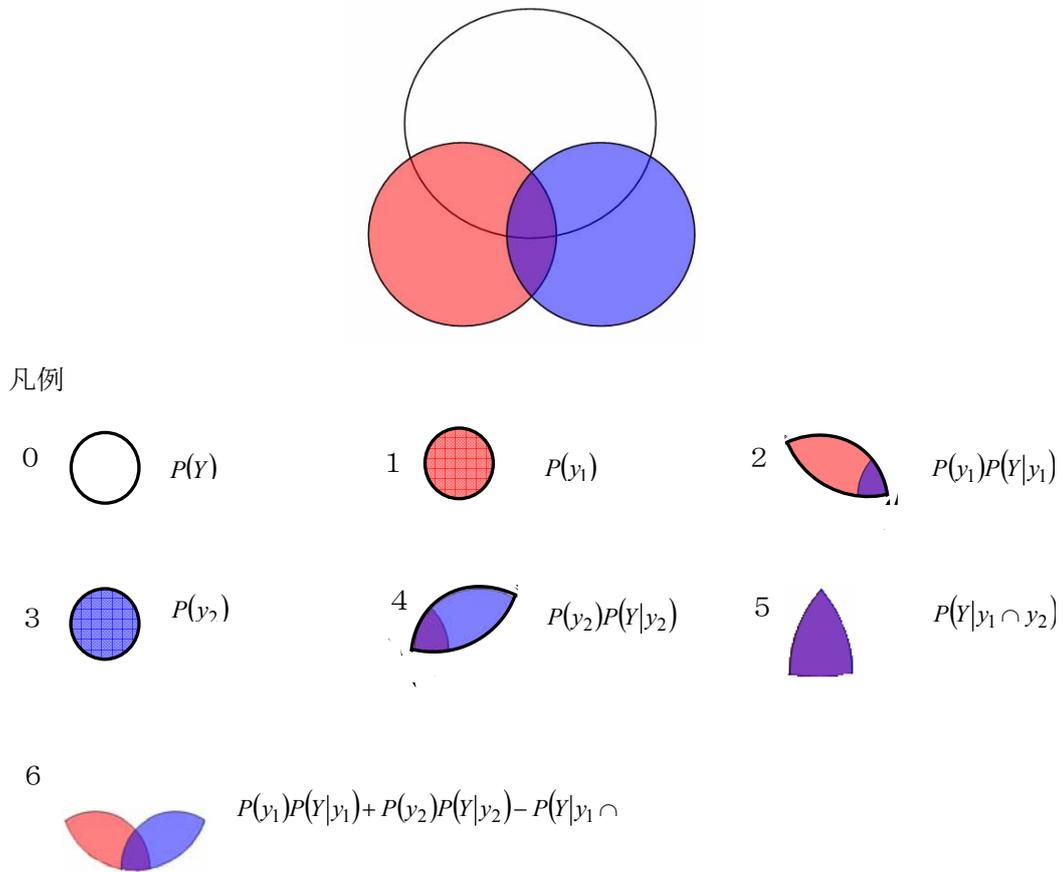


図 5-C (4)-7) ESL 演算規則の図形的表現

すると、明らかに $Max[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)] \leq \rho \leq 1$ が成立するため、さらに、

$$\rho = \lambda_{12} + Max[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)](1 - \lambda_{12}) \quad (4)$$

と書き換えることができる。つまり λ_{12} は証拠 1 と 2 の重複の度をあらわすパラメータ (以下、重複性と呼ぶ) であり、完全に独立な場合に 0、完全に従属な場合に 1 をとる。

以上から、前出の式は次のように書き換えることができる。

$$P(Y) = \mu_1 P(y_1) + \mu_2 P(y_2) - \{\lambda_{12} + Max[\mu_1 P(y_1), \mu_2 P(y_2)](1 - \lambda_{12})\} Min[\mu_1 P(y_1), \mu_2 P(y_2)] \quad (5)$$

但し、 μ_i , $i = 1, 2$ は証拠 i の上位の命題に対する十分性であり、 λ_{12} は二つの証拠の重複性を示す。

上式を、補助命題 i が真である確率の下限 $P(\underline{y}_i)$ 、と上限 $P(\overline{y}_i)$ にそれぞれ適用することによって、上位命題が真であることの確率の上下限 $P(\underline{Y})$ 及び $P(\overline{Y})$ は以下のように算出される。

$$P(\underline{Y}) = \mu_1 P(\underline{y}_1) + \mu_2 P(\underline{y}_2) - \{\lambda_{12} + Max[\mu_1 P(\underline{y}_1), \mu_2 P(\underline{y}_2)](1 - \lambda_{12})\} Min[\mu_1 P(\underline{y}_1), \mu_2 P(\underline{y}_2)]$$

$$P(\overline{Y}) = 1 - \{\mu_1(1 - P(\overline{y}_1)) + \mu_2(1 - P(\overline{y}_2)) - \{\lambda_{12} + Max[\mu_1(1 - P(\overline{y}_1)), \mu_2(1 - P(\overline{y}_2))](1 - \lambda_{12})\} Min[\mu_1(1 - P(\overline{y}_1)), \mu_2(1 - P(\overline{y}_2))]\} \quad (6)$$

なお、この式は補助命題が 3 つ以上存在する場合に対しても容易に拡張することができる。また、必要性は、証拠あるいは補助命題のうちの一つかが、それが真でなければ上位命題が真ではあり得ない。つまり必要条件となっている場合の特例に対する措置である。この規則は、必要条件となっている証拠あるいは補助命題が真であることの確率の上下限が、算出された上位命題が真であることの上下限を下回る場合、必要条件となっている補助命題が真であることの確率の上下限によって置き換えることを要請するものである。

4) ESL 評価結果の表現

ESL の解析を通じて算出される各命題（特に主命題）の信頼性は、図 5-C(4)-8)に示す Ratio plot として表現することができる。Ratio plot は、「支持」、「否定」、及び「不確実」の主観確率の値に基づき、各命題についての評価結果を、(支持の確率) / (否定の確率) を縦軸（一般にログスケールが用いられる）の座標に、また、(不確実性の程度) を横軸の座標とした二次元座標上の点として表現したものである。Ratio plot において横軸よりも上の領域は各命題が対応する証拠によってどちらかといえば支持されていることを、また、逆に、横軸よりも下の領域は各命題が対応する証拠によってどちらかといえば否定されていることをそれぞれ表す。また、縦軸よりも右の領域は不確実性が存在していることを表し、左の領域は支持と否定の和が 1 を上回っており評価結果に自己矛盾が発生していることを表す。このような自己矛盾が生じている場合には、階層構造や諸パラメータの入力値を見直す必要がある。

Ratio plot の右側の領域は 4 つの小領域に区分されている。例えば、濃い緑と薄い緑の領域の境界線は、(支持の確率) - (否定の確率) = (不確実性の程度) となる部分であり、濃い緑の領域では (支持の確率) - (否定の確率) > (不確実性の程度) が成立しており、この領域に含まれる命題は不確実性と比較して顕著に証拠によって支持されているものと考えられる。他方、薄い緑の領域では (支持の確率) - (否定の確率) < (不確実性の程度) であり、どちらかといえば支持されているがその判断には大きな不確実性が含まれることを意味する。同様に、濃い赤と薄い赤の領域についても、それぞれ、そこに含まれる命題は、「不確実性と比較して顕著に証拠によって否定されている」と「どちらかといえば否定されているがその判断には大きな不確実性が含まれる」ものと考えられる。

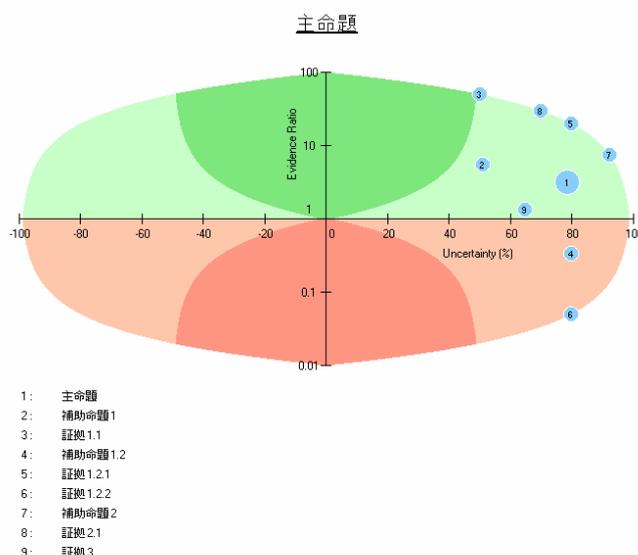


図 5-C (4)-8) 各命題の信頼性の ratio plot による表示例

5) ESL による感度解析

ESL による命題の評価結果は、ある調査・研究段階での知識や証拠に基づくものであり、その後の進捗によって情報の質や量が改善されればその結果は変化することとなる。そこで、リスクマネジメントにおける不確実性低減の観点からは、次段階においてどのような調査あるいは研究を行えば、最も効率的に主命題の信頼性を向上（あるいは不確実性を低減）することができるかを知ることが重要な意味を持つこととなる。この目的のためには、図 5-C(4)(3)-9)に例示する Tornado plot を用いることができる。Tornado plot は、末端に位置する各証拠についての判断結果に含まれる不確実性（特に、未入手の証拠については100%不確実なもののみなされる）を単位量（例えば 1%）減らすことができたとして、最上位の主命題の評価結果に含まれる不確実性がどの程度低減されるかを比として表したものである。

検討の初期段階では多くの証拠は未入手であり、ESL の評価結果もほとんど不確実性が支配するような場合が多くなる。しかしながら、そのような状況でも、十分性や必要性といった（未入手の）証拠の本来の特徴が把握できれば Tornado plot による感度解析を行うことは可能であり、この結果に基づき、次段階の調査・研究計画の優先順位付けをすることができる。ここで注意が必要な点は、Tornado plot は、各証拠の不確実性が低減できた場合の効果を評価するものであり、不確実性低減そのものの難易度や可能性については何ら考慮されていないことである。このため、調査・研究計画の優先順位付けを行うためには、Tornado plot によって表現される不確実性低減への感度（効果）と、各調査・研究項目の実施上の難易度や経費などを併せて考慮に含めることがリスクマネジメントの立場から重要となる。

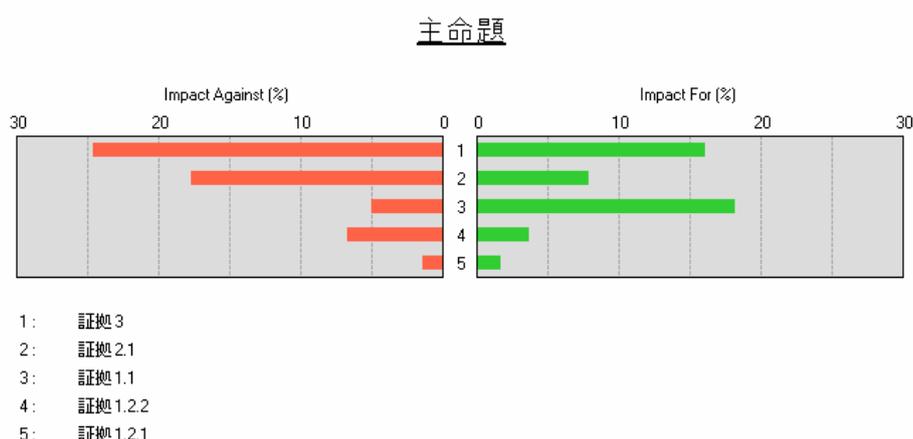


図 5-C (4)-9) Tornado plot による感度解析結果の例

(主命題の支持の確率増大のためには証拠 3 と証拠 1.1 を、また、主命題の否定の確率増大のためには証拠 3 と証拠 2.1 を入手することが有効であることを示す。)

(3) 水質データの品質評価について

1) 地層処分に必要とされる地球化学的知見

地下深部において、放射性核種が溶け出しにくく動きにくい、また、人工バリアとして使用する金属材料などが腐食しにくいといったような「放射性廃棄物の地層処分に適した化学環境」が存在することを証明するためには、以下の点が重要である。

- ・ 化学的環境を支配するプロセス、メカニズムが理解されていること。
- ・ 長期的にそのプロセス、メカニズム、化学的環境が安定であること。

深部地下水の化学的環境（pH、酸化、還元電位、塩分濃度）、形成プロセス、長期的変遷などを示すための、汎用性のある調査研究手法を確立できていること。

このうち特に地下水の酸化還元電位は、アクチノイドなどの主要な放射性元素の溶解挙動に影響を及ぼす地球化学的条件として重要性が高く、調査対象としている場所が、現在、地下深部に多く見られるような還元性の環境であることを確認し、また、将来にわたってもそのような環境が継続する見通しを得ることが重要な研究課題となっている。

2) なぜ品質管理が必要か

様々な研究機関が異なる手法で各地の深部地下水のデータを得ているため、信頼度（品質）の低いデータを用いることによる誤った解釈、研究結果に対する追跡性や再現性の確保が懸念されている。

特に長期間にわたる処分事業では、予測の信頼性が重要であり、各段階でのデータの品質を確認することが必要であることから、品質評価手法の確立は不可欠である。

3) 品質管理と品質評価の違い

品質管理

- ・ 地下水試料もしくは地球化学データなどの成果物を得る過程で、成果物の品質を低下させないための計画を策定することとその計画を遂行すること。

品質評価

得られた同一の成果物の集合において、各成果物の集合内での相対的な品質を決定し、個々の成果物の信頼度（品質）を確成果物の信頼度（品質）を確認すること。

付録 5-C (5)

水質形成プロセスモデル化

- (1) エキスパートシステムについて
- (2) 水質形成プロセスについて
- (3) 水質形成プロセスのモデル化について
- (4) 鉄と硫黄の酸化還元反応について
- (5) 鉄の酸化還元反応について
- (6) 候補となる反応の抽出方法について
- (7) 同位体濃縮に関する図の見方

This is a blank page.

(1) エキスパートシステムについて

このエキスパートシステムは、水-岩石-微生物反応のプロセスを表現する地下水地球化学モデル（プロセスモデル）を構築する際に、水質の実測値や鉱物の顕微鏡写真などの情報を用いて、調査対象領域で地下水水質を規定している酸化還元反応を特定し、また、この結果を前提として地下水の酸化還元電位を確定するというタスクを実施することを目的としたものである。手順としては、まず、酸化還元電位の実測値から地下水中の酸化還元反応を想定し、熱力学解析を実施して酸化還元反応に関わる鉱物の平衡状態を推定する。さらに、平衡状態にあると推定された鉱物について同位体や酸化還元反応に関わる微生物を確認するといった作業にユーザーを誘導するものである。

(2) 水質形成プロセスについて

地下水水質は、放射性核種の移行特性や人工バリア材料の劣化挙動に大きな影響を与える要因であり、調査対象とする地域の特徴に応じて多様なものがある。水質形成に影響を及ぼす要因としては、起源（天水か海水か）、岩石などとの化学反応と異種の水質間の混合が挙げられる。このうち、化学反応に寄与するものとしては、微生物、有機物、コロイド、鉱物がある。このエキスパートシステムで対象とする地下水の酸化還元状態に関しては、マンガン、鉄あるいは硫黄の酸化還元反応とこれらを触媒する微生物活動が水質形成プロセスとして重要と考えられる。

(3) 水質形成プロセスのモデル化について

1) 地下水地球化学モデル

水質形成に関する地下水地球化学モデルには、①pH、②酸化還元電位、③主要イオン濃度、④微生物と有機物濃度などのような空間的な分布を表現する場のモデルと、水-岩石-微生物反応などのプロセスを表現する水質形成プロセスモデルがある。

2) 地下水地球化学モデルの開発

地下水地球化学モデルの構築は、それらのモデルを構築するための概念を表現した概念モデルを構築し、調査の進展に伴い逐次モデルが更新するといった手順で進められている。

具体的には、実測された深部地下水データの熱力学的・速度論的解析をもとに、深部地下水の既存の水質形成モデルを改良し高度化し、微生物、有機物が地下水水質に及ぼす影響、深部地下水でのコロイドの安定性や存在状態に関する検討が行われる。

3) 実測とモデル化の関係

調査対象とする地域における原位置での地下水水質を把握するためには、ボーリング孔内での水質測定または地下で採水したサンプルを地表で測定することになるが、すべての地下水サンプルについてボーリング孔内で測定を行うことは困難であり、大部分の地下水

データは地表で測定することになる。この場合、地表で測定された地下水データの信頼性評価や地表で測定されたデータをもとに原位置での地下水水質を推測するための補正を行うことが課題となる。まず、このような補正を行うためにも、調査時の擾乱に関するモデルが必要である。また、地下水質に関する情報は離散的な点データなので、水質分布がどのような要因によって規定されているのかを地下水地球化学モデルとして明確にした上で内外挿を行うことが必要となる。さらに、地層処分研究においては、将来数万年以上の長期にわたって放射性核種に対する閉じ込め機能の有効性を評価しなければならないが、この目的のためには、過去から現在までの水質形成機構を地球化学モデルによって再現し、この知見に基づき将来の水質変化の予測を行うことが必要となる。

4) 相平衡図の見方

相平衡図は、ある状態における、物質の安定相を示すものである。

このエキスパートシステムでは、地下水の化学条件（pH と酸化還元電位）における各元素（酸素、マンガン、鉄、硫黄、水素）の安定な化学種の安定相を示している。

各線はその上下に示された化学種間の化学種の化学反応が平衡状態になる化学条件を示している。

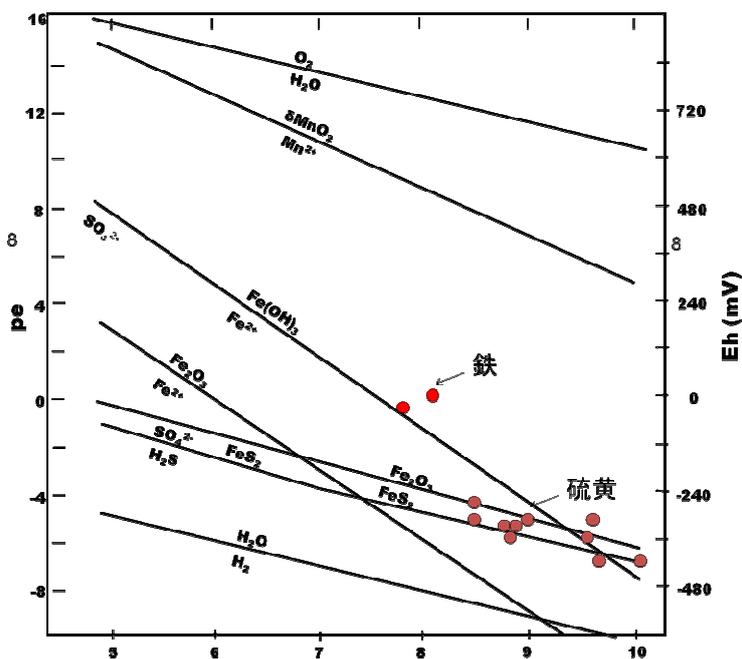
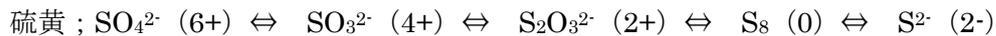
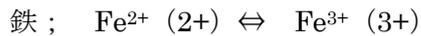


図 5-C (5)-1) 地下水の化学条件における各元素（酸素、マンガン、鉄、硫黄）の安定な化学種

(4) 鉄と硫黄の酸化還元反応について**1) 酸化還元反応とは**

酸化還元反応とは、化学種間で電子のやり取りをする（どちらかの化学種がどちらかを酸化または還元する）ことにより、各化学種の電荷数が変化する反応である。電子を受け取った化学種は「還元された」、電子を与えた化学種は「酸化した」と表現する。

鉄や硫黄の化学種間の酸化還元反応では、鉄の電荷数が 2+ と 3+ の間で変化し、硫黄の電荷数が 2- から 6+ の間で変化する。

**(5) 鉄の酸化還元反応について****1) 鉄の酸化還元反応**

鉄の酸化還元反応では、岩石中に多く存在する鉄鉱物が主要な反応物質となる場合が多いため、その鉱物と地下水中の鉄イオンの反応が酸化還元電位を決めている可能性について、酸化還元反応式から理論的に求められる酸化還元電位と実測値を比較して確認する。

(6) 候補となる反応の抽出方法について**1) 候補となる反応**

地下水水質の実測値が、相平衡図における境界線の近くにある場合には、この相平衡線の両側にある化学種を含む酸化還元反応式を候補として選出する。

(7) 同位体濃縮に関する図の見方

1) 同位体濃縮とは

硫酸イオン濃度が減少する（硫酸イオンが還元されて硫化物イオンになる）と、硫黄の同位体比が大きくなる。

微生物は質量数の小さい同位体を選択的に活用する傾向があり、硫黄の同位体では ^{34}S よりも ^{32}S を活用する。そのため、硫酸イオンが還元される（減少する）につれ、硫酸イオン中の ^{34}S が大きくなることになる。

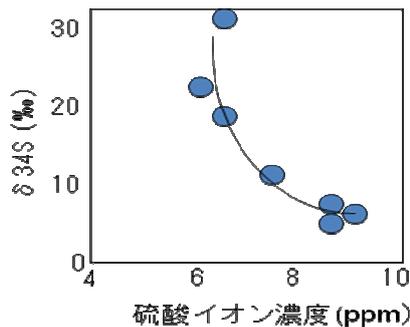
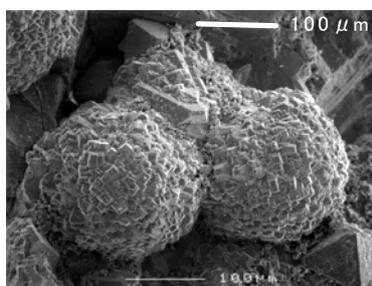
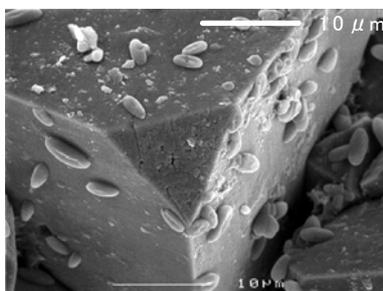


図 5-C (5)-2) 硫酸イオン濃度と ^{34}S の濃度



Framboidal pyrite suggesting microbial reaction (DH 8 / S.L. -373 m bsl)

図 5-C (5)-3) 硫黄酸化還元バクテリアの事例（フランボイタル（球状）黄鉄鉱）



Bacteria on pyrite surface (DH 8 / 81m asl)

図 5-C (5)-4) 硫黄酸化還元バクテリアの事例（黄鉄鉱表面に認められる硫酸還元菌）

付録 5-C(6)

掘削水トレーサの選定

- (1) エキスパートシステムについて
- (2) 掘削水トレーサの使用目的と選定基準
- (3) 1次選定の要件
- (4) 掘削水トレーサの要件
- (5) 必要なる掘削水トレーサの種類
- (6) 背景知識

This is a blank page.

(1) エキスパートシステムについて

ボーリング孔掘削時には、掘削水が地層中に侵入するため、地下水のサンプリングをする際にはその掘削水を十分排水する必要がある。十分に排水ができているかを確認するために、あらかじめ掘削水にトレーサを添加しておく。

使用するトレーサは、期待するトレーサの要件と複数のトレーサを使う場合の両立性に留意して選定する必要があるため、関連する専門知識に基づく判断が必要となる。

このエキスパートシステムは、このような専門的な判断のために必要となる背景知識をユーザーに適宜提供した上で、トレーサ選定にあたってのルールや制約条件を用いることによって、ユーザーが判断を適切に行うことを支援するものである。また、選定した結果に基づき、候補となるトレーサの詳しい特徴や入手先、価格などの付加的情報もユーザーに提供する。

(2) 掘削水トレーサの使用目的と選定基準

1) 掘削水トレーサの使用目的

ボーリング孔掘削時には、掘削水が地層中に侵入するため、地下水のサンプリングをする際にはその掘削水を十分排水する必要がある。十分に排水ができているかを確認するために、あらかじめ掘削水にトレーサを添加しておく（図 5-C(6)-1 参照）。

2) 掘削水トレーサの選定手順

0. 場の概念の構築
1. 候補となりえる化学物質の選定（世の中にある全ての化学物質が対象）
2. 要件の設定
3. 既存情報の調査
4. 要件を満たす化学物質の選定（1次選定）
5. 室内試験
6. 要件を満たす化学物質の選定（2次選定→本エキスパートシステム）
7. 調査への適用

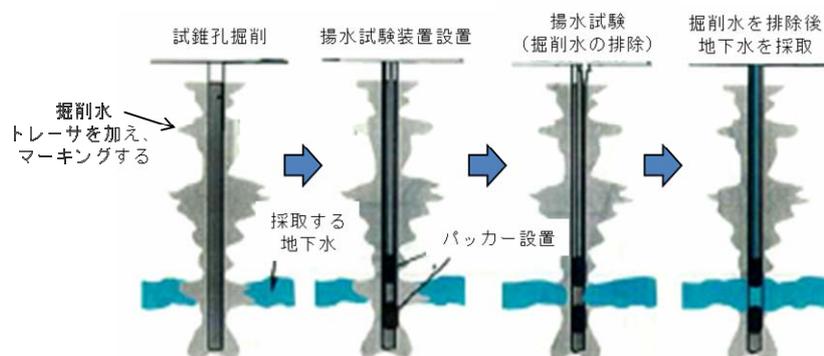


図 5-C (6)-1) 試錐孔掘削時の汚染と掘削水排水過程（揚水試験の例）

(3) 1次選定の要件

1) トレーサ物質選定の要件 (1次選定)

「A. 場の概念に依存しない要件」

- 1.水と挙動を共にする。
 - 1)水に溶解する。
 - 2)水質が変化しても化学的な特性が変わらない
(地下水中の炭酸類濃度が上昇すると炭酸錯体を形成する元素 (e.g.U) は不可)
- 2.環境への負荷が少ない。
 - 3)劇毒物ではない。
 - 4)生物に対する毒性が低い。
- 3.採水継続/停止の判断の拠り所になる。
 - 5)ボーリング現場での分析が可能
(簡易空調設備しかない、予備濃縮設備は置けない。)

「B.実務的な要件」

- 1.分析対象成分 (主要化学成分・微量化学成分・有機物・微生物・・・) 濃度を増加させない。
(地下水中に1%残留しても、主要化学成分濃度などへの影響が無視できる。)
- 2.天然でのバックグラウンドがゼロまたは非常に低い。
- 3.化学物質が相対的に安価である。
- 4.国内で市販されている (受注生産品、海外からの輸入品ではない)。
- 5.定量下限値が低い (感度が高い)。

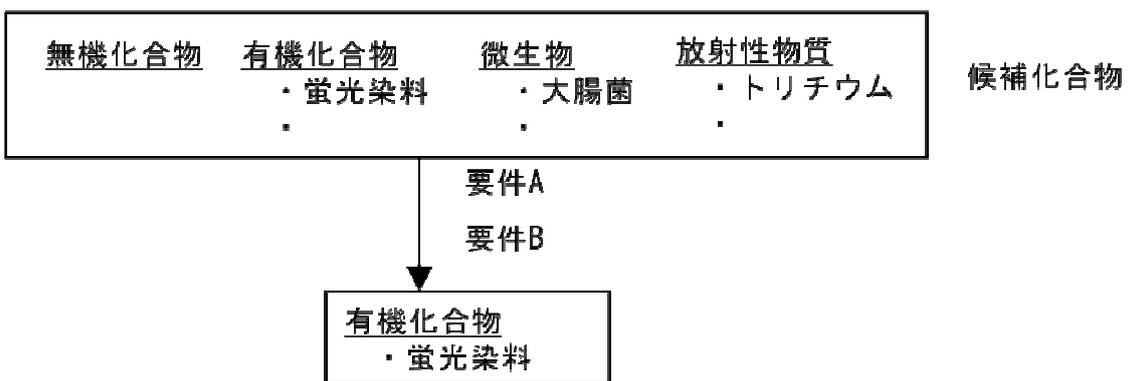


図 5-C (6)-2) トレーサ試験 1次選定の要件

(4) 掘削水トレーサの要件

1) 濃度に対する蛍光スペクトル強度の直線性

各蛍光染料の蛍光スペクトル強度が濃度に対して直線性を持つか否かを確認する試験結果を以下の図 5-C(6)-3)に示す。30 $\mu\text{g/l}$ 以下の濃度領域では、Erythrosine、Bengal roseなどの蛍光スペクトル強度が低く、これらの蛍光染料を使用する場合は、初期濃度を蛍光染料に比べて高く設定する必要がある。また、Rhodamine 6G は濃度に対して蛍光スペクトル強度が直線性を持たない。

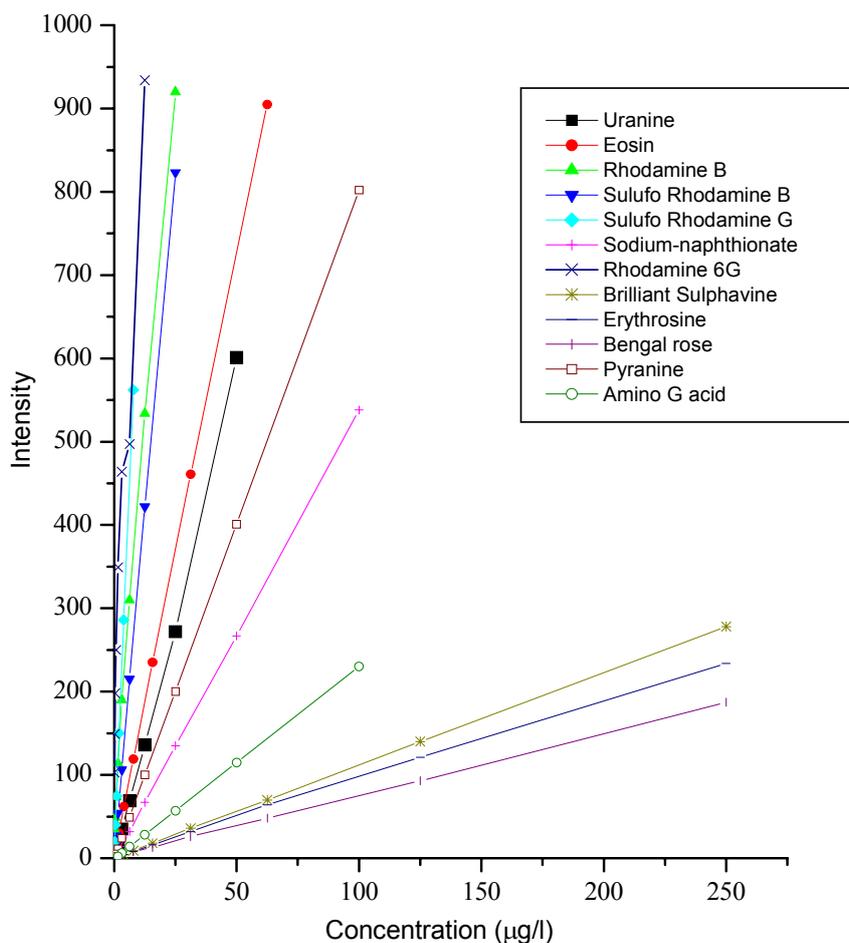


図 5-C (6)-3) 各トレーサ濃度に対する蛍光スペクトル強度の変化 (蒸留水・室温)

2) 蛍光強度の pH 依存性

地下水の pH は表層付近の中性から深度とともに弱アルカリ性、アルカリ性に変化することが一般的である。地下水の pH の変化に伴い蛍光強度が変化すると、蛍光染料濃度の定量値に大きな誤差が生じる。蛍光強度の減衰の有無があるか否かを確認した試験結果を以下の図 5-C(6)-4 と表 5-C(6)-1 に示す。その結果、Uranine と Pyranine (455 nm) の蛍光強度が pH とともに増加し、Rhodamine 6G と Pyranine (405 nm) の蛍光強度が pH とともに減衰する蛍光が見られた。その他の蛍光染料には pH 依存性は確認されなかった。

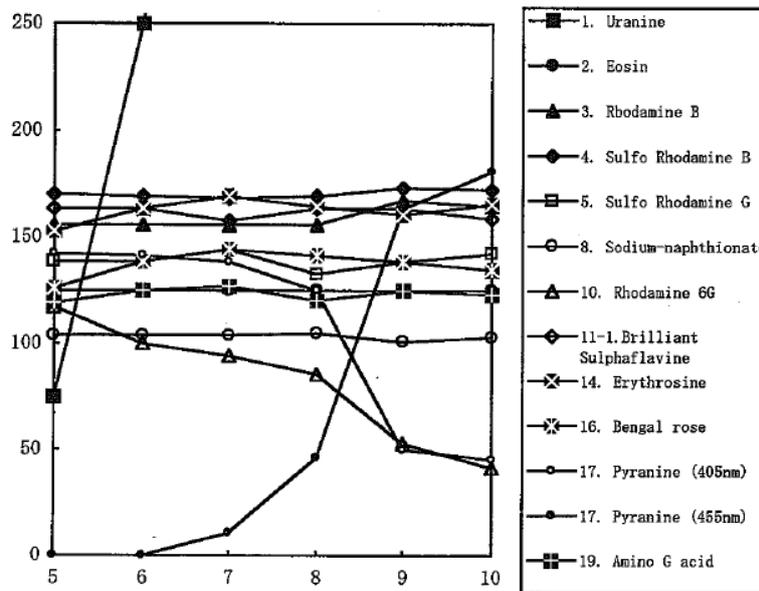


図 5-C (6)-4) 各蛍光染料の蛍光強度の pH 依存性試験の結果

表 5-C (6)-1) 各蛍光染料の蛍光強度の pH 依存性

Tracer	Concentration [μg/l]	Ex./Em max.[nm]	pH Intensity					
			5	6	7	8	9	10
Uranine	10	491/512	75	250	525	656	750	750
Eosin	10	516/538	125	125	125	125	125	125
Rhodamine B	5	554/576	156	156	156	156	167	164
Sulfo Rhodamine B	5	564/583	170	169	168	169	173	172
Sulfo Rhodamine G	2	532/552	138	138	144	133	138	142
Sodium-naphthionate	20	320/420	104	104	104	105	101	103
Rhodamine 6G	2	526/552	117	100	94	86	53	41
Brilliant Sulphaflavine	150	420/514	163	163	158	163	163	159
Erythrosine	150	525/547	153	163	169	164	161	165
Bengal rose	150	547/570	126	138	144	141	138	135
Pyranine	20	405/512	142	141	138	125	50	45
		455/512	0	0	11	46	163	181
Amino G acid	50	355/450	119	125	127	120	125	123

3) 蛍光染料の安定性

掘削水や地下水中での蛍光染料の化学的安定性について知見を得るため、実際の地下水や掘削水などに使用される河川水などを用いて、蛍光染料濃度の時間変化を調査した。

試験条件

- ・ 試験に用いた試験水
 - 蒸留水 (pH 6.2)
 - 河川水 (pH 7.0)
 - 堆積岩中の地下水 (pH 8.4)
 - 花崗岩中の地下水 (pH 8.2)
 - 堆積岩中地下水 7 : 河川水の混合水 (pH 8.0)
 - 花崗岩中の地下水 7 : 河川水 3 の混合水 (pH 7.7)
- ・ 試験温度 : 室温と 40℃
- ・ 試験時間 : 50 日

測定方法 : 試料水をメンブランフィルター (DISMIC-25CS) でろ過し、fp-770 (日本分光) により蛍光スペクトルを測定

表 5-C (6)-2 各蛍光染料の測定濃度

蛍光染料	濃度 (μg/l)	蛍光染料	濃度 (μg/l)
Uranine	10	Sodium-naphthionate	100
Eosin	50	Brilliant Sulphaflavine	100
Sulfo Rhodamine B	20	Pyranine	100
Sulfo Rhodamine G	10	Amino G acid	100

各試験結果を図 5-C (6)-5~16)に示す。試験日数 50 日では、どの試験条件においても蛍光染料の蛍光強度に大きな減少は見られなかった。

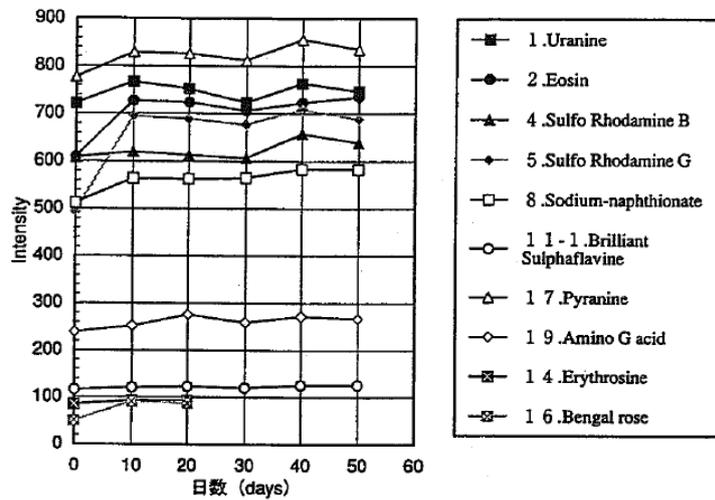


図 5-C (6)-5) 蒸留水 (室温)

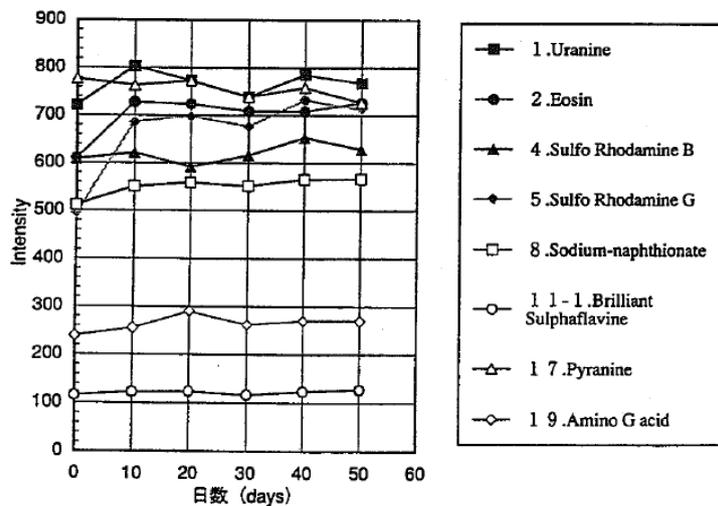


図 5-C (6)-6) 蒸留水 (40°C)

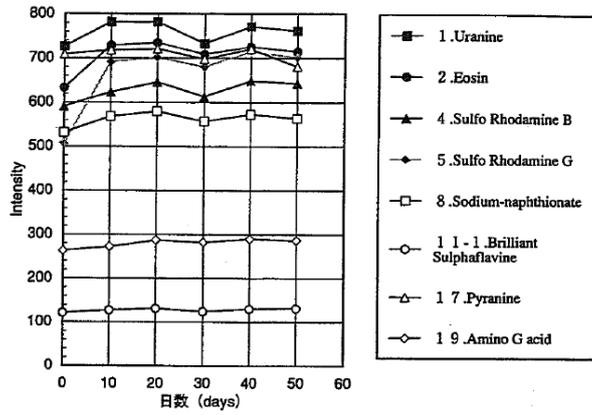


図 5-C (6)-7) 河川水 (室温)

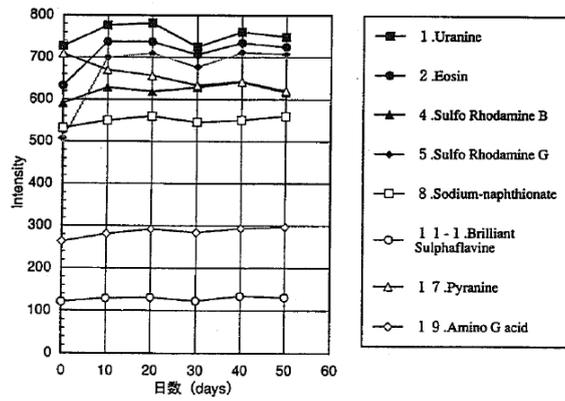


図 5-C (6)-8) 河川水 (40°C)

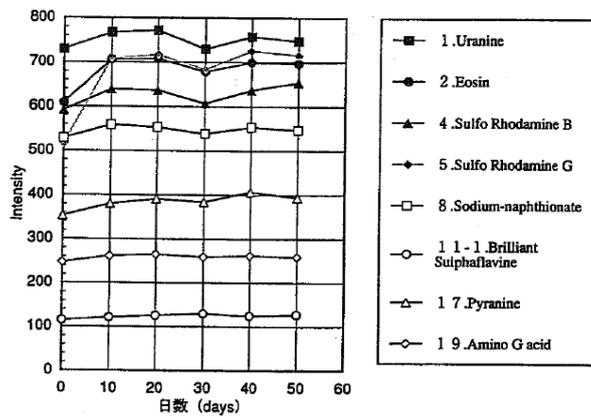


図 5-C (6)-9) 堆積岩中の地下水 (室温)

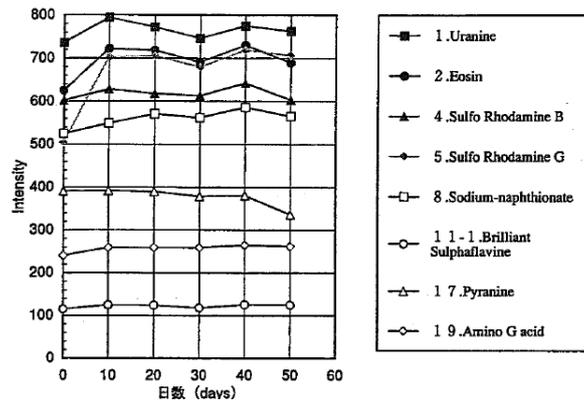


図 5-C (6)-10) 堆積岩中の地下水 (40°C)

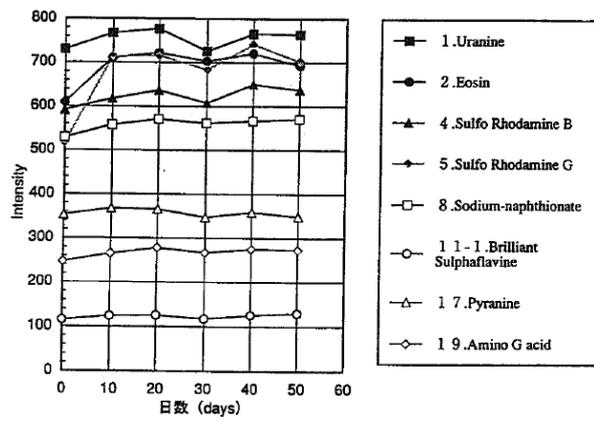


図 5-C (6)-11) 花崗岩中の地下水 (室温)

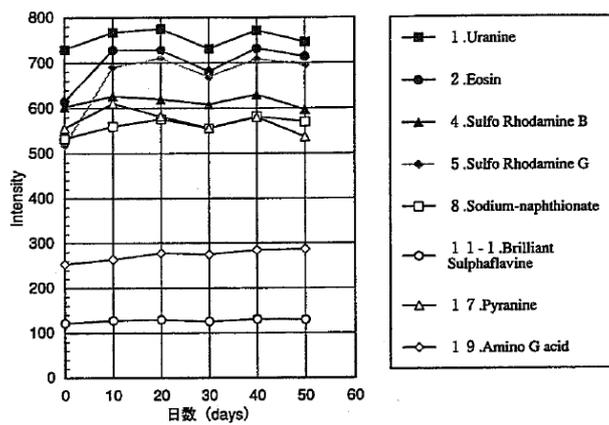


図 5-C (6)-12) 花崗岩中の地下水 (40°C)

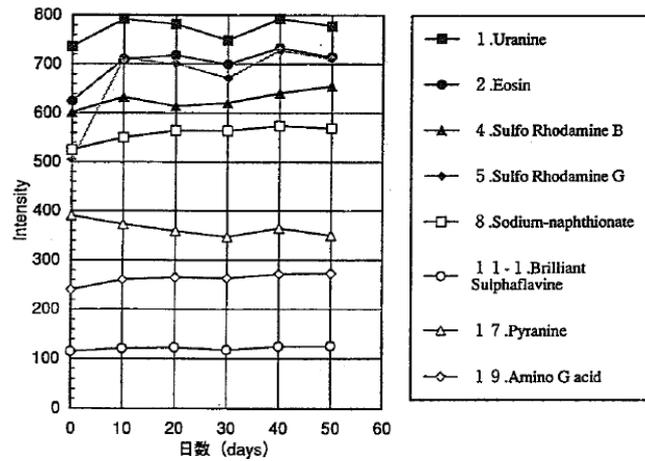


図 5-C (6)-13) 堆積岩中の地下水と河川水の混合水 (室温)

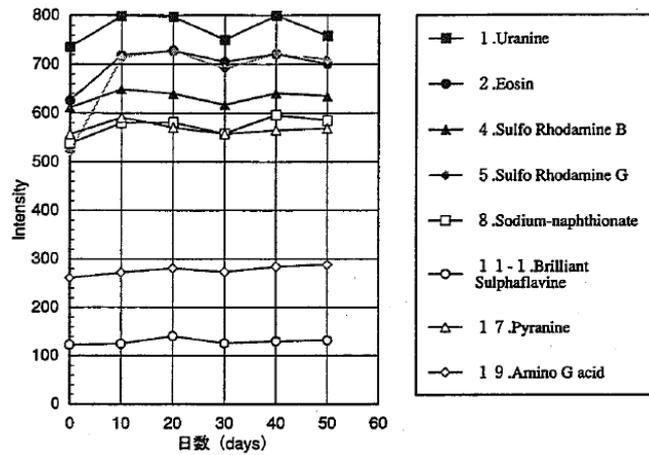


図 5-C (6)-14) 堆積岩中の地下水と河川水の混合水 (40°C)

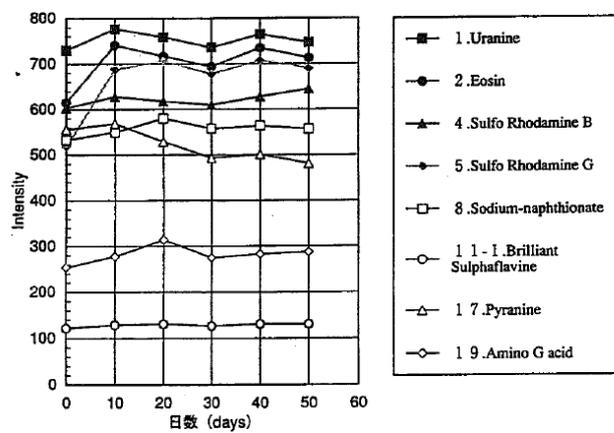


図 5-C (6)-15) 花崗岩中の地下水と河川水の混合水 (室温)

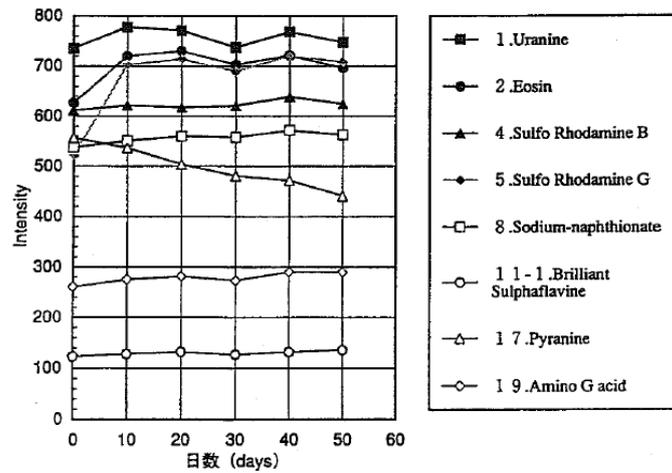


図 5-C (6)-16) 堆積岩中の地下水と河川水の混合水 (40°C)

4) 岩石に対する吸着特性

蛍光染料の岩盤への収着の有無は、トレーサの重要な選定要件の一つである。ここでは、東濃地域に分布する花崗岩（土岐花崗岩）と堆積岩（瑞浪層群）を用いて、各蛍光染料について行った岩石への吸着特性を確認する試験結果を示す。

試験条件

- 試験に用いた試験水と岩石試料、及び水/岩石比
 - 堆積岩中の地下水：河川水=7：3の混合水（80ml）：堆積岩（8 g）
 - 花崗岩中の地下水：河川水=7：3の混合水（80ml）：花崗岩未変質部（8 g）
 - 花崗岩中の地下水：河川水=7：3の混合水（80ml）：花崗岩破碎部（8 g）
 - 花崗岩中の地下水：河川水=7：3の混合水（35ml）：花崗岩破碎部粘土充填物（3.5 g）
- 試験温度：室温
- 試験時間：30 日
- 測定方法：試料水をメンブランフィルター（DISMIC-25CS）でろ過し、FP-770（日本分光）により蛍光スペクトルを測定。

表 5-C (6)-3) 各蛍光染料の測定濃度

蛍光染料	濃度 (μ g/l)	蛍光染料	濃度 (μ g/l)
Uranine	10	Sodism-naphthionate	50
Eosin	50	Brilliant sulphaflavine	100
Sulfo Rhodamine B	20	Pyranine	100
Sulfo Rhodamine G	10	Amino G. acid	100

試験結果を図 5-C(5)(4)-15)~18)に示す。岩相によって特定の蛍光染料に蛍光強度の減少が認められる。堆積岩、花崗岩破砕部粘土充填物を用いた試験では、Pyranine、Sulfo Rhodamine B、Sulfo Rhodamine G に試験時間とともに顕著な蛍光強度減少が観察され、花崗岩破砕部についても Pyranine、Sulfo Rhodamine G に蛍光強度減少が確認される。蛍光強度の減少が起こった試料は粘土鉱物を多量に含む岩相であり、花崗岩破砕部の試料についても割れ目表面に粘土鉱物が存在するために、蛍光強度がわずかに減少したものと推測される。天然の岩盤には粘土鉱物は普遍的に観察されるため、Pyranine、Sulfo Rhodamine B、Sulfo Rhodamine G は試験孔掘削水に加える蛍光染料として不適と考えられる。

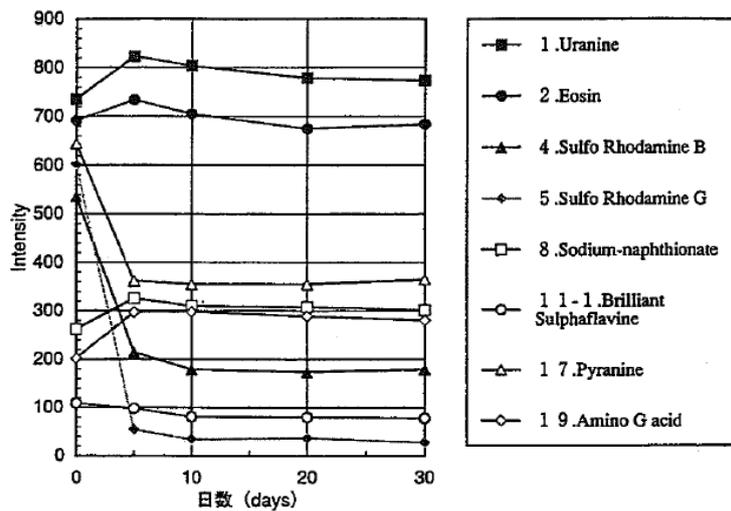


図 5-C (6)-17) 堆積岩部 (花崗岩中の地下水と河川水の混合水)

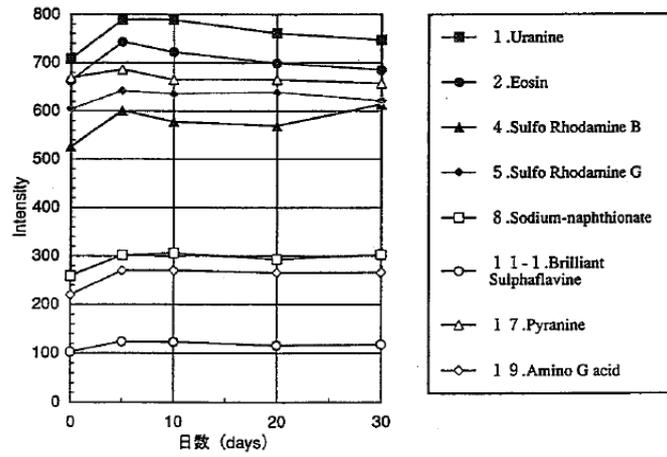


図 5-C (6)-18) 花崗岩未変質部 (花崗岩中の地下水と河川水の混合水)

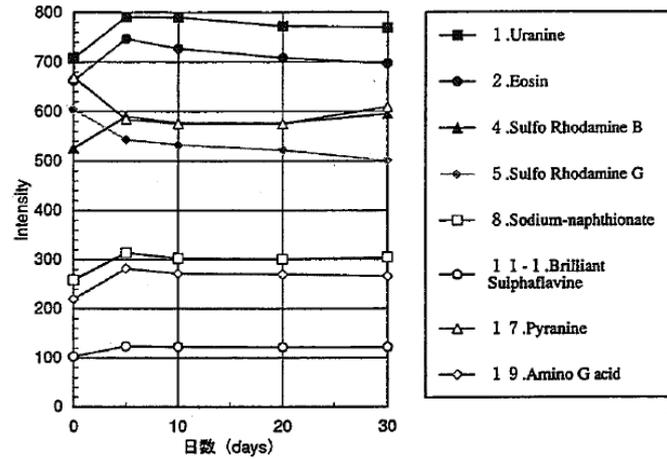


図 5-C (6)-19) 花崗岩破碎部 (花崗岩中の地下水と河川水の混合水)

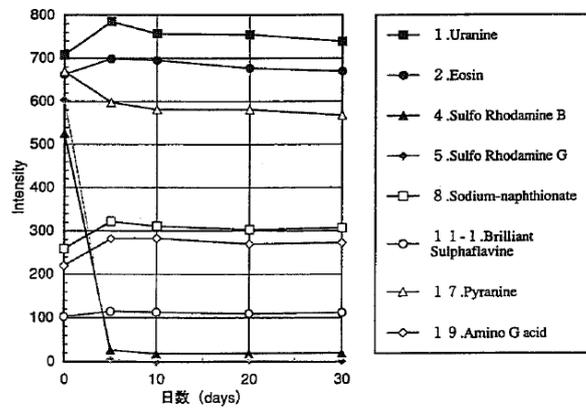


図 5-C (6)-20) 花崗岩破碎部粘土充填物 (花崗岩中の地下水と河川水の混合水)

(5) 必要なる掘削水トレーサの種類

1) 掘削水トレーサの使用数の決定方法

地下水流動や地下水圧分布を支配するような大規模な不連続構造の前後でトレーサを変えることにより、岩盤を介した掘削水の回りこみの可能性を排除できる。不連続構造としては、地層の境界、断層があるが、これらの構造の全てが地下水流動に影響を与えるわけではないことから、重要なものの分布を推定することが必要である。

ただし、10個(本)の不連続構造が見つかったとしても10種類のトレーサを使用することではなく、3種類程度までの使用が実務上一般的である。

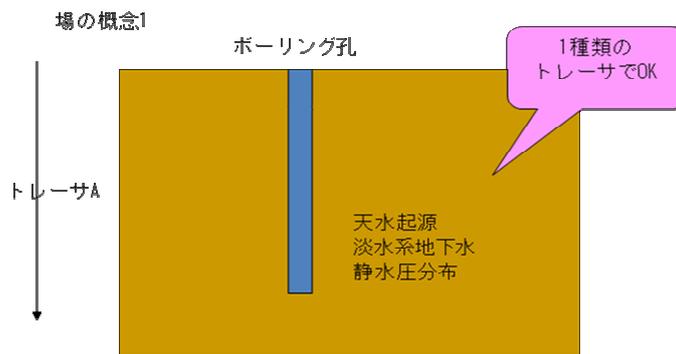


図 5-C (6)-21) 場の概念 1

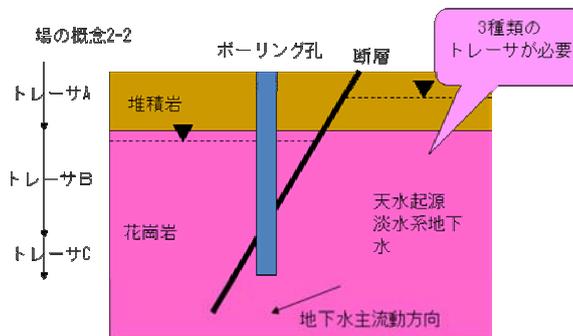
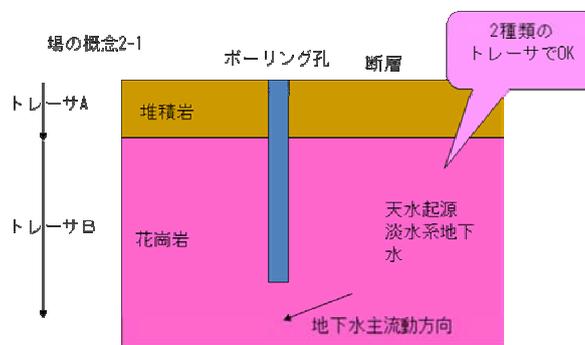


図 5-C (6)-22) 場の概念 2-1 と 2-2

(6) 背景知識

1) 併用不可である掘削水トレーサの組み合わせ

蛍光染料には濃度が高くなると消光が起こりやすくなり、複数の蛍光染料を使用した場合、一方の蛍光波長ともう一方の励起波長が一致して消光が顕著となることがある。併用不可となる組み合わせを表 5-C(6)-4)に示す。

表 5-C (6)-4) 併用不可の組み合わせ

	併用不可の組み合わせ
Eosin	Sulfo Rhodamine G, Rhodamine 6G, Erythrosine
Rhodamine B	Sulfo Rhodamine B, Bengal rose
Sulfo Rhodamine B	Rhodamine B, Bengal rose
Sulfo Rhodamine G	Eosin, Rhodamine 6G, Erythrosine
Rhodamine 6G	Eosin, Sulfo Rhodamine G, Erythrosine
Brilliant sulphaflavine	Pyranine
Erythrosine	Eosin, Sulfo Rhodamine G, Rhodamine 6G
Bengal rose	Rhodamine B, Sulfo Rhodamine B
Pyranine	Brilliant sulphaflavine

付録 5-C (7)

掘削計画概要図の作成

- (1) エキスパートシステムについて
- (2) ボーリング調査について
- (3) ボーリング孔掘削に付随する各調査について
- (4) 大規模な崩壊、逸水の可能性のある地質要素と注意点
- (5) 掘削フェーズ
- (6) ワイヤーライン工法
- (7) トリコンビット掘削
- (8) リーミング掘削
- (9) ケーシング
- (10) 掘削水

This is a blank page.

(1) エキスパートシステムについて

原子力機構が高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の一環として実施している深地層の科学研究においては、地表から地下深部における地質環境特性調査を調査・解析・評価するための体系的な技術の構築を主な目的とした研究開発が行われている。その内、内陸に分布する結晶質岩を対象とした超深地層研究所計画においては、亀裂性岩盤としての挙動を把握するため、地下水や物質の移動経路と機能している不連続構造（断層や節理）の分布や性状に着目した地質環境特性調査が展開されている。超深層研究所計画の地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）では、地質環境特性の不確実性を効果的に低減させるために繰り返しアプローチと段階的精緻化アプローチに基づく 4 つの調査ステップ（ステップ 0：既存情報の収集、ステップ 1：地表地質調査・地上物理探査、ステップ 2：浅層ボーリング調査など、ステップ 3：深層ボーリング調査、ステップ 4：孔間トモグラフィ探査・孔間水理試験）を計画し、それぞれの調査ステップにおいて重要な地質環境特性を特定するとともに、それらの不確実性を低減させるための調査計画の策定が行われた。

本エキスパートシステムは、地表からの調査予測研究段階において、最も重要な調査の一つである深層ボーリング調査計画のうち、調査データの品質を規定するボーリング掘削計画の策定を目的として、上記ステップ 3 の深層ボーリング（MIZ-1 号孔）調査計画で得られた技術的な経験やノウハウを収集・整理、解析を行い構築された。MIZ-1 号孔は、地下水流動の観点から重要と推定された 3 条の大規模な断層とこれまで情報が全く得られていなかった深度 1,000 m 以深の基盤花崗岩の地質環境特性を単独のボーリング孔において把握することを目的として計画された。具体的な調査計画の策定に際しては、まず調査目的を達成するために必要なデータ項目と品質が決定され、その結果に基づき、ボーリング工法の選定や安定した孔壁状態での掘削を行うための保孔対策が設定された。

このエキスパートシステムは、MIZ-1 号孔計画策定時の技術者の経験やノウハウに基づき、掘削計画の流れや判断のタイミング、判断根拠を改めて整理、再構築して作成されたもので、深層ボーリング調査の掘削計画の構築を支援するものである。

本エキスパートシステムでは、まず、ユーザーが調査品質（岩芯の必要性）を設定した上でボーリング掘削地点で予想される土壌や基盤岩、被覆層、大規模な崩壊の可能性のある断層、コントロールボーリングの開始深度についての入力を行うことにより、掘削フェーズと呼ばれる掘削が継続して行われる時間単位が決定される。次に、主に安定した孔壁状態の確保を目的した保孔対策を行うために、リーミング径、トリコンビット掘削径、ケーシングプログラムが決定される。さらに、ユーザーは掘削において掘削水選定支援エキスパートシステムにより、掘削水トレーサの選定や掘削水トレーサを変更する深度を選択することができる。

このエキスパートシステムによって決定された事柄はすべて、掘削計画概要図の中に図示され、ブラウザ上での閲覧や、印刷して一枚の紙面上で見ることができる。

(2) ボーリング調査について

1) ボーリング調査技術について

ボーリング調査は地上からの調査の中で、地下深部の地質環境情報を直接取得できる調査で、地質環境調査の中で特に有効な調査手法の一つと考えられている。ボーリング調査で取得されるデータは安全評価や地下施設の設計・建設などに使用されることから、調査結果の信頼性を確保するためには、調査の品質を管理しつつデータを取得することが重要である。さらにボーリング調査は掘削深度と調査量の増加に伴って高価となっていくため、1本のボーリング調査でより多くの地質環境情報を取得していくことが必要であることから、品質を管理しつつ調査データを合理的に取得するためのボーリング調査に関する技術開発が進んでいる。

ボーリング調査では、上述したように取得データが非常に重要であり、調査に要する費用も高価であるため、トラブル時の対応などを考慮した詳細な調査計画の策定が必要である。

具体的には、この段階までに得られた地質環境に関する知見に基づいて調査対象を特定し、調査目標を明確にするとともに、調査対象の地質環境の予測結果や時間や予算などの制約条件を踏まえて、ボーリング孔のレイアウトや個別の調査項目・手法などの最適化や合理化を図ることが必要となる。

2) ボーリングの基本仕様

これまでの経験から、近年、東濃地域に分布する土岐花崗岩を主な研究対象としたボーリング調査における掘削の基本仕様は表 5-C(7)-1) のように設定されている。この表は掘削孔径の考え方、ボーリング位置の選定、掘削水の管理並びにボーリングコアの管理について紹介したものである。

表 5-C (7)-1) ボーリングの基本仕様

孔径	5 1/2"以上	
ケーシングプログラム	多段掘削	
掘削水	原則として清水	
掘削水管理	染料濃度と逸水量の管理による循環水監視	
コアリング	アクリルパイプを内包した三重管工法	
保孔技術	逸水時	逸水防止剤による閉塞
	崩壊	部分セメンチング
	大規模崩壊	ケーシング保孔

3) 東濃地域におけるボーリング調査の孔径とその技術的背景

現在、東濃地域でのボーリング調査の孔径は原則として 5 1/2" (約 135 mm) 以上とされているが、この基本仕様は調査地域の地質環境特性と調査目標に基づいて設定されている。その技術的背景は以下のようなものである。

- ・ 不連続構造が発達し孔内崩壊や大規模な逸水（掘削中に掘削水が岩盤中に浸透する現象）などがしばしば発生するため、ケーシングやセメントによる保孔や逸水防止剤による逸水対策の簡便性を考慮する必要がある。
- ・ 岩盤が高透水から低透水までの幅広いレンジを有する。特に、高透水性の岩盤を対象とした水理試験においては圧力損失の発生に伴うデータの品質低下が懸念されることなどから、試験装置内の配管径の拡張などの対策が必要である（結果として試験装置の直径が大きくなる）。
- ・ 岩盤の透水性が高い部分が存在することにより、比較的短期間で採水調査が可能である。その一方で、逸水などの発生により掘削水の岩盤中への浸透も早く、品質の担保された地下水の地球化学特性に関わる情報を取得するためには、岩盤へ浸透した掘削水を迅速に回収する必要がある、高揚程・高流量のポンプの設置や配管径の拡張のため、試験装置の径の拡大が必要である。
- ・ ボーリングコアからの多くの地質学的情報が必要である。掘削孔径を大きくすることにより、孔内崩壊の発生可能性や掘削コストの増加といったデメリットもあるが、崩壊や逸水の発生に伴う保孔対策の経験に基づく頻度やそれに必要なコスト、さらには限られた時間内で目標を達成するための調査計画とのバランスを考慮したうえで上記の孔径を採用している。

4) ボーリング位置の選定

ボーリング位置の選定においては調査目的に応じた技術的な根拠に加えて、社会的な側面を考慮した最適な位置とレイアウトを決定しなければならない。例えば、正馬様用地で実施した MIU-4 号孔ボーリング調査の目的は、それまでのボーリング調査では把握できていなかった用地北東部の地質環境や高角度の不連続構造の特性を把握することであった。従って、用地中央部から北東方向に向け、水平から 60 度斜めに傾けた斜孔というレイアウトとなった (Ota et al.,1999b)。

5) 孔内崩壊への対応

ボーリング孔沿いの諸特性を効率的に把握するために、掘削中に孔内崩壊が発生した場合には一旦掘削を中断し、計画した孔内での検層や試験を当該深度まで実施する。崩壊箇所までの検層と試験が終了した後は崩壊箇所をセメンチングし、さらに深部の掘削と調査を継続する。なお、セメンチングの際は蛍光染料を添加することにより、セメントの溶脱成分による地下水汚染の程度を定量化しなければならない。セメンチング箇所において崩

壊が継続する場合は、当該箇所までケーシングパイプを挿入し、セメント保孔したうえでさらに深部の掘削を継続する。崩壊箇所が浅部の場合は、ケーシングパイプ挿入前に径の大きなビットで拡孔をした後にケーシングパイプを挿入しセメント保孔することで、崩壊前と同一の孔径で掘削を再開できる。一方、崩壊箇所が深部の場合は、掘削孔径を小さくすることで掘削を継続することも可能である。この際、後に実施する検層や試験などで使用する装置の径を考慮したうえで掘削孔径を決定することが必要である。なお、掘削中に発生する可能性のある孔内崩壊や孔径拡大などのトラブルを低減するためには、スライム（掘削によって生じた掘りくず）の排除が重要となる。このため、掘削水の配管経路の途中に固液分離装置を設置することによって、スライムと水分を分離しながら掘削を行うことが大切である。

6) 掘削水の管理

掘削中の掘削水の管理には主に掘削水の濃度管理と掘削水の逸水量の管理がある。

掘削水の濃度管理では、掘削水として用いる清水（孔壁を保護するための泥材を混ぜていない水）中に添加する蛍光染料の濃度の管理を行う。これは別途実施される地下水の採水調査において、採水した地下水中に残留している掘削水の割合とその不確実性を定量的に把握するために、初期の染料濃度を一定に管理することが不可欠なためである。このため、掘削水中の染料濃度を所定の濃度に対して $\pm 10\%$ の範囲に維持できるよう、地上部で循環水を1時間程度ごとに採取し、その蛍光染料濃度を測定した。

一方、逸水量の管理では、掘削中に発生する逸水（掘削水の送水圧力が岩盤の間隙水圧よりも大きくなった場合に透水性の高い割れ目（帯）などにおいて発生する掘削水が岩盤中に浸入する現象）の割合とその深度の把握を行う。逸水の管理は亀裂性岩盤を評価するうえで重要な透水性割れ目の深度と採水区間を特定する観点で重要である。逸水の割合は循環水用のタンク水位の定期的な測定値から算出する。掘削中に有意な量の逸水が発生し、回収されたボーリングコアに逸水に関連すると推定される開口割れ目などが観察された場合は必要に応じて掘削を中断し、揚水試験による当該区間の岩盤の透水性の把握と採水を実施する。揚水試験と採水を終了した後は、逸水した割れ目を逸水防止剤により閉塞することが有効であるが、一旦発生した逸水は逸水防止剤で閉塞した後も再発する可能性があり、新たな逸水の検出を困難にするため注意深い逸水量の計測とボーリングコアを利用した詳細な割れ目の観察が重要となる。

7) ボーリングコアの採取・管理

ボーリングコアの採取・管理に関しては、ボーリングコアの回収率の向上を目的とした従来方法の適用性評価ならびに改良を行うとともに、ボーリングコアを用いた地質学的調査や室内試験などを考慮した保存管理システムが構築された。ボーリングコアの回収率の向上としては、従来の二重管工法において課題があった断層・破碎帯や割れ目帯、変質帯な

どの脆弱な岩盤の採取について、コアバレルのインナーチューブにアクリル管を用いた三重管工法、及び掘削パラメータのモニタリング結果から適切な数値範囲を原位置で評価しフィードバックする手法がとられている。

(3) ボーリング孔掘削に付随する各調査について

1) 地質学的調査

亀裂性岩盤を対象としたボーリング孔調査では、ボーリングコアにおける割れ目の記載が特に重要な調査項目である。このため、花崗岩を対象としたボーリング調査においては、従来の一般的な土木・応用地質学的調査で用いられている調査手法（建設大臣官房技術調査室、1999）に加えて、断層岩の詳細区分や水みちに関連すると考えられている割れ目の鉱物学的・形態学的特徴を考慮したボーリングコアを用いた地質学的調査の手法を構築し、それらを体系化したマニュアルを整備した。この手法と水理学的調査結果とを組み合わせた総合的な評価により、水みちとして重要な割れ目（帯）や断層を調査者の経験や能力に依存することなく客観的に一定な品質で抽出・区分できるようになったほか、地質構造モデルや水理地質構造モデルの構築に必要なデータセットとして取り扱うことが可能となった。また、水みちに関する割れ目の区分が可能となったことにより、これまで具体的な選定基準に乏しかった水理試験や室内試験の区間選定や地下水流動解析のモデル化において効率的な調査・解析の実施が可能となった。

2) 水理学的調査

i. 電気伝導度検層

亀裂性岩盤においては割れ目（帯）が主要な地下水の経路となることから、地下水流動のモデル化や解析などに反映するうえで、水みちの位置を把握することが重要である。高解像度で水みちを把握する手法として、ボーリング孔内において、電気伝導度検層を適用されることがある。本手法は孔内水を地下水の電気伝導度と異なる水（脱イオン水や塩水など）で置換し、その後、揚水をしながらかの電気伝導度を測定することにより、電気伝導度の有意な変化が認められる亀裂を検出する方法である。

ii. 水理試験手法

水理試験手法に関しては、試験区間の透水性に相応した試験手法を選択可能な試験手法（シーケンシャル試験実施支援エキスパートシステム）が開発されている。

3) 採水調査

ボーリング調査中に水理試験と合わせて地下水の採水を行う場合は、掘削中の逸水発生時に掘削を中断して揚水試験と組み合わせて実施することが合理的である。この際に重要なことは掘削水による汚染に関わる品質管理である。その方法として、揚水試験中に排水される地下水の化学成分濃度、蛍光染料濃度と pH や電気伝導度などの物理化学パラメー

タを定期的に分析・測定し、蛍光染料濃度が十分に低下し、物理化学パラメータが一定になった時点で地下水を採水する方法が有効である。蛍光染料濃度が低下しない場合は、定期的な化学分析結果に基づき、蛍光染料濃度と地下水の化学成分濃度の相関性を把握することで、掘削水による汚染のない地下水の化学成分濃度を外挿により推定することが可能である（掘削水トレーサ選定支援エキスパートシステム）。しかしながら、蛍光染料濃度と相関性のない化学成分や同位体については、その濃度を外挿で推定することができないため、可能な限り掘削水を除去する必要がある。上記の手法を用いた結果、MIU-4 号孔においては 5 点の地下水の水質を把握することができた。

揚水試験に伴う採水手法の欠点は、揚水中の脱ガスにより溶存ガスの濃度や物理化学パラメータを正確に把握できないことである。この問題を解決するためには、揚水試験装置の採水区間のパッカー付近にバッチ式採水ボトルを設け、試験中に昇降可能な構造とする技術開発が必要である。また、ボーリング調査終了後にバッチ式ボトルで採水が可能な地下水長期モニタリング装置を設置する方法もあるが、ボーリング掘削終了後から地下水長期モニタリング装置までの期間に採水区間に異なった深度の地下水が流入する場合もあることから、可能な限り早期に地下水長期モニタリング装置を設置する必要がある。

(4) 大規模な崩壊、逸水の可能性のある地質要素と注意点

1) 孔壁崩壊

孔壁崩壊の要因は、以下に示す 4 つに分類される。

a) 吸水による膨張崩壊

強度の低い粘土質の岩石、例えば、泥岩・凝灰岩などは吸水膨張する。藤井（1976）によると、モンモリロナイトの含有率パターンが 2.5 cm^2 以下の場合、その泥岩の力学的性状が劣化して崩壊すること、また、交換イオンの種類によって異なることが認められている。しかし、膨潤性粘土鉱物を含んだ岩石や造山運動応力が存在する地質を除いては、急激な崩壊現象が見られたという事例は多くはない。それゆえ、一般には良い泥水を使用すればある程度防げると考えられる。また、泥岩の安定性評価については SSI (shale stability index) テストにより判定する。

b) 地質に粘着性がないための自然崩壊

崩壊しやすい粘土分を含まない砂、砂礫、硬岩の破砕帯で砂状化した部分などは、良い泥水の使用により相当に防ぐことができるが、場合によっては崩壊が長く続き、大規模な崩壊となる。更に、これら地質から湧水が伴うときは湧水により崩壊が助長され、止めることが困難などとなることが多い。こういった場合、泥水の比重を上げて湧水を止められるときはよいが、水平ボーリングのように泥水比重で防ぐことのできない場合ではケーシング挿入によるほか対策はない。

c) 機械的原因による孔壁の崩壊

コアチューブの昇降と回転によるロッドの機械的打撃が崩壊の原因となる。しかし、ボーリングではロッドの回転は宿命であるが、一般にコアチューブから 30 m までの範囲の崩壊が多く、それ以上の箇所は比較的崩壊が少ないという傾向がみられる。従って、コアを観察して状態が悪いと考えられる地層がある場合、できるだけ早く掘進してコアチューブとの離れを大きくすることも一つの対策である。こうすることで、一般には掘進速度そのものは低下するが、低回転、低荷重のほうが崩壊は少なくなる。また、崩壊により孔径が広がったままの状態掘進を続けると、ロッドの座屈を助長し、いわゆるロッドのなわ飛び現象を生じて掘進の障害になることが多くある。このため、崩壊層を通過したらセメンチングを行って崩壊部分を保護すると同時に、孔径を元の大きさに戻すことが必要である。

d) その他の崩壊

トンネル掘進中の先進ボーリングでボーリング孔とトンネル壁が近い場合に、トンネル掘削による応力解放圏の影響、及びトンネル内への泥水の流出によって崩壊が助長されることがある。この場合は、ケーシングを挿入しなければ崩壊を止められない。従って、このような状況の調査では、できればトンネル壁から 5~10 m 以上離れた位置でボーリングすべきである。

2) 逸水

逸水は、自然的な要因として、造山運動や火山活動によって生じる断層、または破碎帯などの初性亀裂、または浸透性多孔質岩などの自由空間のほか、人為的亀裂として重泥水による過剰静水圧、またビット降管時坑底に加わる波動圧に生じる二次亀裂などは、裸坑部における破碎圧の低い泥岩層に対し、掘進作業中発生する。

Howard and Scot (1951) は実験を行い、逸泥は泥水固形粒子直径の約 3 倍の空隙が発生すると無限に逸泥現象は継続し、その粒子を押し込むには、ある過剰応力を必要とすると述べている。

一般に泥水全体が地層中に浸入するには、砂岩の浸透率 300 darcy 以上の透水性が必要といわれており、実際には 3~4 darcy 以下の低浸透率の砂岩には逸水は発生しない。

逸水が発生するとスライム（掘屑）排除不十分、帯水層や含油（ガス）層の目詰り発生の原因となる一方で逸水は温泉や地下水の湧出部の認知などに役立つ。深層の逸水は、一時的に全量逸水の発生や、急激な孔内水位の低下を伴うこともある。特に、急激な孔内水位の低下が起こる場合は、上昇中のスライムが一気に沈殿しコアチューブ部分の抑留や、孔内圧力の急激な低下により孔壁が崩壊して抑留する場合があるので、一時掘進を中断し、コアチューブを上方に巻き上げておく必要がある。しかし、一般には送水量の何割かが逸

水する程度の場合が多い。

逸水対策としては以下のようなものがある。

- ・ 清水のときは泥水に切り換える。
- ・ 泥水のときは逸泥防止剤を添加する。
- ・ 逸水層を突破した後は泥水の性質を良くし、残った微量の逸水を完全に止める。

(5) 掘削フェーズ

1) 調査名

掘削フェーズ

2) 目的

掘削フェーズ（掘削を継続する時間単位）を設定する。

3) 解説、調査方法

深層ボーリング調査を計画する際には、孔内の安定性を確保するためのケーシングプログラムの設定やコントロールボーリング掘削を行うために、掘削を一時中断し、必要な保孔対策や調査を行う時機や深度を予め設定しておく必要がある。掘削フェーズの設定は、以下の事項を考慮して実施する。

- ・ 調査実施前に構築された地質環境モデルに基づく地質分布と地質現象の予測により、孔内の自立が困難な地点（特にケーシングの設定が必要な地質分布）を予測し、そこで必要な保孔対策を利用可能な資源（コスト、工期、装置など）を勘案して最大限数設定する。

(6) ワイヤーライン工法

1) 調査名

ワイヤーライン工法

2) 目的

脱着自在の内管内蔵のコアバレルと特殊ロッドを用い、内管のみを引き上げコアを採取する削孔工法。

3) 解説、調査方法

脱着自在の内管内蔵のコアバレルと特殊ロッドを用い、内管のみを引き上げコアを採取する削孔工法。深度による能率低下率は小さく、深度 200 m を超えるボーリングでは有効な工法である。ロッド昇降回数が極端に少なくなるため孔壁の荒廃がなく、また、孔壁とロッドとの間隙が小さいためスライム排除効率が良いなど、孔内条件の悪化防止にも有益で、事故の発生率も低い。しかしながら、掘削用装置が比較的大型であるほか、ロッド、コアチューブなどの掘削用器具にコストを要するため、深度 100 m 以浅に使用されること

は少ない。

ワイヤーラインの工法の選定に際しては、以下の点に留意する必要がある。

- ・ コストの増加
- ・ 対象岩盤に応じたビットの設定
- ・ 裕度のある機材・資材の準備（特に、予備ケーシングの準備）
- ・ 抑留時の回収器具類の準備

超深地層研究所計画では、周辺の既存情報が少ないほか、コスト・工期・掘削可能な場所などの観点からボーリング孔の掘削本数が非常に限られることから、直接的な地質情報を取得することが可能な岩芯の採取と揚水試験を含む水理試験がほとんどのボーリング孔において実施されている。岩芯を採取し、かつ揚水試験を行う場合、岩芯径の規格にはPQサイズ～HQサイズの選定が可能となる。これは、PQサイズがワイヤーライン工法の中で最大径であり、揚水ポンプを内蔵する水理試験装置は通常HQサイズ以上の孔径が必要とされるためである。PQサイズの最大径は85 mm、HQサイズの最大径は63.5 mmである。

PQとHQというサイズの径の選択を考えた場合、ボーリング調査全体を通して、HQよりもPQの方が得られる地質情報が格段に多い上に、水理試験の品質も高く、より大容量の揚水可能なポンプを設置することができるため、揚水試験が可能となり、採水時間も短くなる。また、ツールスと孔壁との隙間が拡大するため、抑留などのトラブル回避にもつながる。

スウェーデンやフィンランドにおける深層ボーリング調査では、リスクの要因となる断層などが少ないほか、採水調査に特化した調査（長期間揚水）を別調査として実施しているため、ワイヤーライン掘削を行う場合、HQサイズが代表的なコアリング掘削径となっている（周辺に多数のボーリング孔が存在している場合は、岩芯を必要としないパーカッション工法も多用）。一方、超深地層研究所計画では、崩壊の可能性のある断層の分布が多く想定されるとともに、品質の高い調査を行う必要があるため、PQサイズを標準的な掘削径として用いる。

(7) トリコンビット掘削

1) 調査名

トリコンビット掘削

2) 目的

トリコンビットを使用して掘削する工法

3) 解説、調査方法

トリコンビットは、油井、地熱、温泉、地下水などの掘削に広く使われている。軟岩から硬岩まで掘削地質も範囲が広い。構造は、ボディから出ている3本のレグにコーン形の Cutter を取付け、このCutterの外周には互いに干渉しないように配列された歯が切っである。また、歯切りせず超硬メタルを圧入した硬岩用、極硬岩用のものがある。Cutter内面

は、ローラ、ボール、及びすべり軸受によるベアリング機構により、カッタはジャーナルの周りを円滑に回転する構造になっている。ローラとすべり軸受は主にラジアル荷重を、ボールはラジアル荷重およびスラスト荷重を受け持つ。トリコンビットは岩質に応じて歯形、ジャーナルアングル、オフセットなどが変えてあり、その歯形に対して適正な荷重と回転数で使用しないとビットの特性を十分に発揮できない。通常、歯切りしたビットをツータイプ、超硬チップを圧入したビットをインサートタイプ（ボタンビット）と呼ばれている。

(8) リーミング掘削

1) 調査名

リーミング掘削

2) 目的

既に掘削されたボーリング孔に対して特別なビットを用いて、孔径を大きくする掘削。

3) 解説、調査方法

既に掘られた孔に対して拡孔ビットを用いて、孔径を大きくする掘削。拡掘。ビットの形状はビット中央部に棒状の案内を付けている。リーミングは保孔対策として実施されるケーシング設置時に、より深部への掘削を安全に実施することに加えて、岩芯サイズの維持など調査品質を確保するために実施される。大孔径では精度が低下する検層器を使用する場合、はじめに小孔径で掘削・調査を行い、その次にリーミング掘削（拡掘）を行った方が、工期やコストが抑えられる場合がある。

(9) ケーシング

1) 調査名

ケーシングプログラムの設定

2) 目的

ボーリング孔に挿入する銅製バルブ（ケーシング）による保孔対策。

3) 解説、調査方法

掘削の進行に伴い、裸孔部の内側にパイプなどを差し入れることをいい、ケーシング材料として強度のある鋼管が使用される。通常、ケーシングと孔との間はセメントによってセメンチングされる。ケーシングを行うことによって、孔壁の崩壊の防止、逸水、湧水流入の防止などの効果がある。ケーシングプログラムの設定に際し、以下のような点に留意する必要がある。

- ・ 段落とよばれるケーシングの段階的挿入により、ケーシングの設置ごとに孔径が小さくなり、掘削用器具や装置の変更の可能性が生じる。
- ・ ケーシング挿入と回収に時間を要する。特に、大規模な孔壁崩壊に対しては、ケーシングが孔内に滞留し、回収が困難となるケースがある。

- ・ ケーシング挿入と回収のための機材を必要とし、ケーシングの数（自立困難な地質分布や大規模な孔壁崩壊の発生が予想される構造）が多いほど、コストが増加する。
- ・ 孔壁が防護されるため、孔壁画像調査や物理検層、水理試験などの実施が困難となる。ケーシング区間での重要な構造を把握する際には、パーフォレーション（火薬によるケーシングの打ち抜き）などの措置が取られる。
- ・ ケーシングの設置は、岩芯など実際の地質分布の詳細な観察のほか、掘削中の観測情報（回転数、トルク、掘削水の流量）に基づいて決定される。

(10) 掘削水

1) 調査名

掘削水の選定

2) 目的

ボーリング掘削時にボーリング孔内を循環させる最も適切な流体を孔壁の安定性や開削時における掘削屑の回収、ビッドと孔壁間の温度低下の観点から選定する。

3) 解説、調査方法

深層ボーリング孔の調査計画立案時において、溶存成分濃度の低い地下水の水質の評価を目的の一つとして選定する場合、掘削水は人工的な添加材料を用いない水（清水）が望ましい。一方で、孔内の自立が困難な地質分布や大規模な崩壊・押し出し・湧逸水などの地質リスクを発生させる現象が想定される際には、ベントナイトやポリマーなどを主成分とする泥材を添加した掘削水（泥水）が用いられる。掘削水の選定の際には、以下の事項に留意する必要がある。

- ・ 掘削水には、水質・同位体組成が安定している周辺の地下水を（可能であれば脱酸素処理後に脱ガス処理を行ったもの）用いることが望ましい。河川水は、降雨・降雪などに伴う水質・同位体組成変化が著しく、原位置採水試料に対する掘削水の影響評価がやや不正確となる。
- ・ 掘削水には岩石への吸着性の低い物質をトレーサとして一定量混入し、原位置採水試料への混入率を算定できるようにする。
- ・ 掘削水に添加剤を用いた場合においては、添加剤による原水の水質・同位体組成の変化を考慮する必要がある。添加剤を加えた後の掘削水を遠心分離し、さらにフィルター径を小さくしながら圧力濾過を行い、孔壁や割れ目などから浸透した流体成分の水質・同位体組成を分析する必要がある。

This is a blank page.

付録 6

地質環境総合評価技術高度化開発委員会

- コメントとその対応 -

This is a blank page.

	時期	コメント	対応
2. 次世代型サイト特性調査情報統合システム (ISIS) の開発			
2-1	第1回委員会	過去のエキスパートシステム構築における失敗事例を収集し、ISIS 開発に反映する必要がある。	土木分野をはじめ、1980 年代後半以降、多くのエキスパートシステムが構築されたが、その後、現在でも稼働しているものはわずかであるとされている。これらの第一世代エキスパートシステムの衰退の原因として、知識獲得の困難さ、知識の更新の困難さ、既存システムとの統合の困難さが挙げられる。その後の知識工学分野での技術的進歩により、専門家がルールを比較的容易に入力でき、また他の解析ツールとのリンクが可能なソフトウェアの開発が行われて、これらを適用した第二世代のエキスパートシステムが利用されている。本事業においても、これらの技術を活用するなど、第一世代エキスパートシステムの失敗要因を考慮しながら、本事業における ISIS の開発を進める。
2-2	第1回委員会	ISIS における地質環境特性調査と性能評価及び設計のリンクについて検討する必要がある。	ISIS は、その全体構成にも示すとおり、地質環境の調査・評価を対象としたものであるが、ISIS 開発にあたっては地層処分場の設計及び性能評価との連携を明確にすることが必要である。ISIS と処分場の設計・性能評価との連携については、別途、原子力機構で行っている知識マネジメントシステム (KMS) の開発との関係を具体化することで、処分場の設計及び性能評価からの要求などを地質環境の調査・評価へ反映するとともに、地質環境の調査・評価から得られた情報を処分場の設計及び性能評価にフィードバックする構造とする。
2-3	第2回委員会	2章で提示される課題と3章で提示される実施内容との対応関係(どの部分に注視し、どの部分の整理を行ったのか)が明確になるように記述する必要がある。	拝承
2-4	第2回委員会	安全評価などを含む地層処分技術全体といった大きなフレームワークの中での本事業の位置づけを明確する必要がある。	本事業の位置づけに関しては、ISIS の全体構成の図を用いて説明するとともに、今後、KMS との関係具体化していきたい。報告書では、「2.2.4 処分場設計・性能評価との連携」という項を設けて基本的考え方を記述する。
2-5	第2回委員会	データの品質や不確実性の許容の程度は性能評価や施設設計により異なる。ルール化にあたってはこの点を考慮することが重要である。安全性の確認のために必要なデータを、どのような基準に基づいて決めるのかといったルール化が必要である。	今後、ISIS 開発と、別途、原子力機構で行っている KMS の開発との連携をとることで、本課題に対応する計画である。
2-6	第2回委員会	これまで土木分野で構築されてきたエキスパートシステムが利用されなかった原因の一つとして、社会における利用の仕組みが整わなかったことがあげられる。今後、この点についても検討が必要である。	原子力発電環境整備機構が進める処分事業に不可欠な技術として開発を進めるのは当然だが、安全規制(技術基準や指針)の策定にも反映できるように開発を進める。また、利用の仕組み作りについても、今後、検討していきたい。
2-7	第3回委員会	調査段階が進むにしたがい、後続の調査で初めて確認される「見落としていた情報」の影響が大きくなる。見落としている可能性のある情報を、調査段階の初期から不確実性として考慮していく考え方についても、ISIS の開発に取り込んでいく必要がある。	「見落とされている可能性のある情報」に関しては、その不確実性を考慮した感度解析(性能評価)を行い、地質環境の調査・評価にフィードバックするといったプロセスが重要と考える。非常に難しい課題であるが、今後検討していきたい。深地層の研究施設計画でも取り入れられている繰り返しアプローチの中には、不確実性の扱いに関する概念も含まれており、これら全体を今後、ISIS の開発の中では取り扱っていくことになる。
2-8	第3回委員会	本年度構築されたプロトタイプは、個々の調査に関するものである。今後、調査計画を最適化するような高次の意思決定の知識を取り入れながら、ISIS の開発を行うことが必要である。	本計画には、人の関与が必要な高次の意思決定から、個々の要素技術のノウハウ・判断根拠までを対象としている。本年度は、初年度ということから、ルールベース化しやすい部分を対象に行ってきた。今後は、高次の意思決定に関する部分についても検討を進めていく。
2-9	第3回委員会	ISIS は、実施主体と安全規制のそれぞれが求める内容やレベルに応じて開発されることが重要である。実施主体には判断の支援が必要であるのに対して、安全規制には判断のための基準や根拠が必要となり、安全規制の方が、より深い知識を必要とする。このような観点からの整理が早い時期に必要である。安全規制に関しては、例えば、あるテーマに焦点を当てて、機能要件の確認などのトライアルを行うといった機会を設けることを考えるとよい。	拝承。今後の課題とする。
2-10	第3回委員会	実施主体としてもドライランを早期に行うことが必要である。実施主体も国の基盤研究開発の成果を活用することにしており、関与の仕方について検討したい。	拝承。今後の課題とする。

	時期	コメント	対応
2-11	報告書 コメント	性能評価とのリンクをどう取っていくかが重要な観点である。地層処分は多分野の集合分野であることから、一人がすべての領域を深く理解することが困難であることから、このようなシステムが実施側・規制側かかわらず処分にたずさわる者の理解をより深めることに寄与するものと考ええる。	拝承。今後の課題とする。
3. 地質環境調査評価情報の分析・整理			
3.1 基本的考え方			
3-1-1	第2回 委員会	本事業では、教科書でまとめられているような純技術的なものとは異なる部分での成果が期待される。例えば、地質構造モデルの構築においては、それぞれの地質条件に応じたたくさんの判断がなされており、それら暗黙的な情報をきちんと整理することによってこれまでにない知見が導き出されるのではない。	ご指摘のようなポイントを軸に作業を進めている。地質環境のモデル化には境界条件の与え方などにも多くのノウハウが含まれているので、それらを盛り込むことも考えていきたい。瑞浪や幌延での地表からの調査での経験に基づき、調査や解析を行う上での判断や解釈の理由を可能な限り抽出し、ルールベースのIf~Then...形式で整理していく。また、ルールベースはあくまで支援ツールなので、全ての問題に解答を与えることはできないが、様々な経験を有する技術者からのノウハウの聴取により、ある程度の一般化はできると考えている。
3-1-2	第2回 委員会	実際は、多次元的な情報が集約されている上、If（前件）部に対してThen（後件）部の量が膨大と推測されるため、システムの構築は単純ではない。これまでの純技術的な観点では達し得なかった判断プロセスが実用的なレベルで追跡できるようなシステムを構築し、次の世代に知識や技術を継承することが本事業の本質的な意義である。	現場で合理的に判断できる技術者をいかに育てていくが将来的な課題となっている。現場で経験を積むのが最も良いが、本システムで仮想的な問題を作り、それを解いていくことで訓練期間が短縮できるかも知れない。いずれにしても、完璧なものを目指すのではなく、判断プロセスを明確にできるようなシステムを作りたい。
3-1-3	第3回 委員会	ルールベース化のための分析整理のフォーマットの整理項目については、早めにレビューを行う必要がある。	拝承。今後の課題とする。
3.2 東濃地域の地質環境調査事例を対象とした情報の抽出及び分析			
3-2-1	第3回 委員会	If-Then形式で分析・整理した情報を、他の人がレビューできるようにまとめておくことが必要である。	フォーマットを決めて整理している。付録に添付する。
3-2-2	第3回 委員会	統合化データフローダイアグラムの履歴分析については、可能な限り社会的・経済的・時間的条件などとの関係を盛り込み、後のプロジェクトで利用できるようにすることが重要である。	社会的・経済的・時間的条件との関係は、高次の意思決定を支援する上で重要であると認識している。これらの情報はあまり残されておらず、またいろいろな問題が複雑に関係しており分析・整理が困難な部分もあるが、可能な限り努力する。
3-2-3	第3回 委員会	ISISの汎用化を目指し、各々の条件下に対応した判断根拠（例えば、「この条件の下ではこうする必要がある」といった内容）についても分析が必要である。	瑞浪の事例の分析では、特定の条件における判断根拠が対象となっている。今後は、「本来はこうあるべき」あるいは「この条件下ではこうする必要がある」といった分析を進め、汎用化を目指す。
3-2-4	第3回 委員会	制約条件あるいは地質環境条件に影響を受ける水理試験のシーケンシャルフローなどのルールを、どこかで検証することが必要である。手順（フロー）は同じであっても、判断根拠などが異なる場合もあるため、判断根拠を分析しておくことも重要である。今後、海外の専門家によるレビューなどの機会も利用しながら、平成19年度に整備したルールと諸外国の事例で採用されているルールを比較・分析する必要がある。	拝承。今後の課題とする。
3.3 諸外国の地質環境調査事例を対象とした情報の抽出及び分析			
3-3-1	第2回 委員会	海外の処分候補地などのオンサイトの計画（サイトスペシフィック）と瑞浪や幌延などのオフサイトの計画（ジェネリック）では、データの取り方が異なるのではないかと。知識化に際して、それらの間の整合性の取り方と沿岸域特有の事項について得られた知見を教えてください。	今回調査を行った国のうち、フィンランドとスウェーデンは、オンサイトでかつ事業が進展している段階での情報が多く、オフサイトでかつ場の理解の段階にある原子力研究開発機構の情報とは制約条件をはじめとして大きく異なる。個別の要素技術に関してはルールベース化などが可能であると考えられるものの、調査計画全体の立案などに対しては、調査の目的、反映先など、基本的な違いを明確にした上で、得られた情報を整理・分類する必要がある。沿岸域特有の事項については、手法や装置などハード的な部分において陸域調査のそれと大差ないものの、調査の考え方などソフト面において、①海域に連続する地質構造を事前予測しておくこと、②ボーリング孔掘削時に孔内へ海水が浸入する可能性を想定しておくこと、などが挙げられる。また、沿岸域プロジェクトで予定されている浅海域での物理探査に関連して、例えば、ハイドロフォンを用いた浅海域での弾性波探査時に注意すべき点などの情報を得ることができた。

	時期	コメント	対応
3-3-2	第2回委員会	オンサイトの調査では、事業計画に間に合わせるために各段階での判断が省略されている可能性がある。一方、本システムでは瑞浪や幌延など網羅的な（詳細な段階に分けられた）情報を主体としている印象を受けるが、それらを一体的に取り扱う際に海外事例の判断基準に引きずられないか。	違いを比較・分析しつつ、本システムに反映する必要がある。例えば、瑞浪や幌延においても、調査計画の中では現象解明の比重が大きいものの、工期やコストの制約条件を受けて判断がなされている。最終的な目標（例えば、性能評価）と制約条件の間で、どのようなトレードオフがなされ、何故そうしたのかを知ることにより最適化が可能になる。海外調査では、そのような観点に着目していきたい。
3-3-3	第2回委員会	本システムは今後の瑞浪や幌延の計画策定にも用いられていくのか。	その予定である。沿岸域プロジェクトの計画策定において、限られた調査量で最大限の情報を引き出すにはどうしたら良いのかといった問題の一つ練習台にしたい。
3-3-4	第2回委員会	海外に多くの経験があり、日本に経験が少ないといった技術（の量）の問題ではなく、判断基準の問題ではないか。ノウハウをいかに本システムに持ち込むのが課題である。	その通りである。地下水の品質管理を例にとると、日本原子力研究開発機構では掘削水の汚染程度を1%以下と設定しているが、これも技術的な問題だけではなく、時間などの制約条件も含まれている可能性がある。最終的な反映先と制約条件とのトレードオフにより判断基準を設定することが本来合理的であり、そのような情報が判断の支援に際して特に重要と考えている（例えば、掘削水の汚染程度が性能評価上10%以下という値で許容されれば、コストの削減につながる）。
3-3-5	第2回委員会	個々の担当者が、統合化データフローを見ながらどの程度まで最終的な成果を意識して調査を実施していたのかも重要である。調査結果フィードバックとして、得られたノウハウや失敗事例などの知識を収納・引き出す仕組み作りを検討してみようか。	ご指摘のような情報を引き出すような仕組み作り（①統合化データフローを参照した詳細なノウハウ情報の整理、②知識協働ダイアグラム活用した調査間の連携、③標準的なデータフローとそれに基づく沿岸域を対象としたデータフローの作成）を検討中である。
3-3-6	第2回委員会	聞き取り調査に際して、調査方法と判断根拠との関係をどのようにして対応づけて整理していくのか。判断根拠に応じて調査方法も変わる可能性がある。	コストなどの制約条件や最終目的（地質環境調査だけでなく性能評価や施設設計までを見据えた）などの背景情報を可能な限り詳細に吟味し、適用した調査方法とその判断根拠とを関連づけていきたい。
3-3-7	第2回委員会	表面的にルールとされていたものが、そのサイトに特有の判断基準であることも多い。ルールの認定に際しては注意が必要とされる。	拝承
3-3-8	第2回委員会	過去のプロジェクトにおいて、コストを優先した調査計画により、目的とする成果を達成できないことがあった。本システムは、そのような問題を技術的に回避できるものであり、実際の現場で活用されることを期待したい。	拝承。今後の課題とする。
3-3-9	第3回委員会	諸外国の事例と日本の事例を比較し、諸外国の事例の経験は日本に適用できそうか。	要素技術に関しては概ね共通している。日本で適用されている手法は海外でも評価されているものが適用されている。
3-3-10	第3回委員会	スウェーデンとフィンランドは技術的な進展がめざましい。その技術の時間的な進展についても情報を分析し整理する必要があると考えられる。	拝承。今後の課題とする。
3-3-11	第3回委員会	今年度は、水理試験などの個別の調査について、情報の分析・整理が行われているが、今後は調査全体を最適化するための知識の分析が必要である。	調査計画の最適化に関しては、技術的知見だけでなく、社会的・経済的・時間的条件も含めた判断根拠などを抽出・分析することが今後必要と考えている。特に、技術的品質とコスト・工程などといったトレードオフの関係について、何を重視しどのように判断するのかといったノウハウが重要になると考えられる。この様な、ある条件の下、個々の要件を満たすために必要な判断の支援を可能とするシステムの構築が必要であると考えている。
3-3-12	第3回委員会	既存の統合化データフローダイアグラムを利用しているというが、細かい作業の流れなどを示す必要がある。	統合化データフローダイアグラムを活用しながら、タスクブロックごとに更に詳細なフローを構築している。
3.4 沿岸域プロジェクトを対象としたノウハウ・判断根拠等の抽出・分類・整理			
3-4-1	第2回委員会	原子力環境整備促進・資金管理センターの調査システムフローは、今回のプロジェクトにどう反映されるのか。段階的にフローが更新されることになり、判断根拠を整理するための良い練習問題になるのではないか。フローの更新プロセスを意識して、取りまとめを行ってほしい。	幌延・第1段階の統合化データフローダイアグラムを出発点として、沿岸域を対象とした統合化データフローダイアグラムを構築する際、項目の網羅性を確認するために、原子力環境整備促進・資金管理センターの調査システムフローを（基盤的な情報として）参考にする。ご指摘のとおりであり、フローの更新に合わせて、調査や解釈、解析などの項目に漏れがないかなどについて確認していきたい。
3-4-2	第2回委員会	重要な特性として挙げた「塩淡境界分布」（Ghyben-Herzbergで示される塩淡境界の概念）については、水理学的にいえば塩水と淡水は連続的に変化することから、現在では技術的に適当な概念とはいえない。適切な表現に改める必要がある。	「塩淡境界分布」は、具体的には塩水が卓越する領域と淡水が卓越する領域の分布ということであり、水質分布や塩分濃度分布などとする。

	時期	コメント	対応
3-4-3	第2回委員会	沿岸域プロジェクトでは、沿岸域における地層処分を想定した際の設計・性能評価へのインプットを意識した調査計画にするとともに、その中で主要な調査評価技術の適用性を確認していくことが重要である。	沿岸域プロジェクトでは、設計・性能評価との連携を念頭に置いて地表からの調査評価技術の体系化や適用性の確認を行うこととしている。本事業では、その計画立案の支援が目的の一つとなっている。沿岸域プロジェクトでは、主要な地質構造と（いわゆる）塩淡境界の把握だけを対象としているのではなく、沿岸域での地層処分を想定した際の安全評価や施設の設計・施工へのインプットを意識して調査計画を立案している。
3-4-4	第2回委員会	沿岸域プロジェクト全体の目標や留意点の中から、個別の調査評価対象が設定されているのか。	沿岸域での地層処分を想定した際の安全評価や施設の設計・施工を意識して、地質環境を調査評価する際の対象や技術的課題を抽出している。
3-4-5	第2回委員会	全体のデータフローはあるのか。また、沿岸域プロジェクトでは、その中の一部の調査の適用性を確認するという事か。	全体のデータフローは現在作成を進めている。また、ご指摘のとおり、沿岸域プロジェクトでは一部の主要な調査評価技術の適用性の確認を行う。
3-4-6	第2回委員会	データフローは調査が進んだある段階から汎用性がなくなっていくのではないか。	ご指摘のとおり、調査の進展に応じてサイト特有のデータフローになっていくものと考えている。
3-4-7	第3回委員会	沿岸域に関しては、処分場を海側に想定するのか、陸側に想定するのかで調査計画も変わってくる。沿岸域プロジェクトはオフサイトの研究開発ではあるが、それらをどのように扱っているのか。	ご指摘のあった2つのケースを想定し、検討を行っている。
3-4-8	第3回委員会	仮説としてのノウハウ・判断根拠とはどのような意味でいっているのか。まだ100%保障されていないノウハウ・判断根拠ということであれば、検証に引き続き、それらを形式知に変換するというプロセスが含まれる。	「まだ確認・検証されていない仮のノウハウ・判断根拠」という意味で使用している。ご意見のとおり、仮のノウハウ・判断根拠は、今後行う調査試験で確認されるとともに、それらを形式知化し、ルールベースなどに反映するというプロセスが行われる。
3-4-9	第3回委員会	沿岸域・統合化データフローダイアグラムに含まれる「地形・地質・地質構造の時間変化」は過去の地質環境の変遷を把握することであるが、性能評価では将来を予測することが必要となる。長期変遷の予測に関しては、専門家のノウハウや判断根拠がより重要になる。	長期安定性の予測評価に関しては、専門家のノウハウ・判断根拠がより重要になると考えている。来年度以降、長期安定性に関する情報の分析・整理を行いたいと考えている。
3-4-10	第3回委員会	「幌延・沿岸域の調査・評価の課題と解決策の提示」に関しては、プロジェクトの時間スケール（例えば、来年、数年先など）を考慮に入れながら、成果を反映させつつ、段階を追って課題を網羅的に細分化し、それに対応する解決策を示していくことが重要である。	今後、調査段階なども考慮に入れながら、課題をより詳細にブレークダウンした分析し、解決策を示していく。
4. ISIS の開発			
4.1 システムの基本コンセプト			
4-1-1	第1回委員会	ルールの信頼性を分類し、エキスパートシステムを通じて提示される計画に信頼性を明示できるよう工夫する必要がある。	ルールの信頼性の表現方法として、「 α 切断によるスクリーニング」（最小値が一定の信頼性以上の推論経路のみ表示）や、「Min-Max ルールによる推論経路の信頼性の評価（推論経路のうち信頼性最小のものが結果の信頼性を既定）」という表現方法を検討しているところである。
4-1-2	第2回委員会	断層の地下水流動への影響に関するファジー推論は、事前に情報を与えた上で、調査で得られたデータを加えて解析を行うという手順か。	基本的にそのような手順で行っている。
4-1-3	第2回委員会	ここでなされたエキスパートジャッジメントとは具体的にどのようなものか。	ある研究者がこれまで解析を行ってきた中で蓄積されてきた断層の水理特性が周辺の地下水流動に与える影響に関する知見に基づいた判別するルールを設定したものである。
4-1-4	第2回委員会	断層の有無といった地質学的な判断も含まれるのか？	今回は、断層の水理特性に関するものである。
4-1-5	第2回委員会	ファジー推論の結果は、確率分布を入力情報にして確からしさの不確実性を表した分布図であるが、それよりも、例えば汚染物質の危険予測の観点から最も重要なターゲットが何かを抽出することの方が必要とされるのではないか。	今回の解析では、順番に積み上げていった推論の結果を示したが、こういった推論のネットワークを構築することで、逆方向の推論も可能と考えられる。
4-1-6	第2回委員会	絶対取得しなければならないデータをどのような基準に基づいて決定してのかが重要である。安全がそれを考える上での観点の一つとなりうる。	先ほど申し上げた逆方向の推論などを活用することにより今後検討していきたい。
4.2 知識構造のモデル化			
4-2-1	第3回委員会	現状では事例の分析結果に基づき知識構造のモデル化を行っている印象を受ける。ISIS の汎用的な活用を可能にするためには、それぞれ判断根拠や基準の背景情報を明確に示すことが必要である。	誰が、何のために使用するのかも検討しながら、深い知識として判断根拠などの知識をサポートすることを考えている。

	時期	コメント	対応
4.3 プロトタイプの構築			
4-3-1	第3回委員会	過去の知識をデータベース化していくために、早めにどのような情報を蓄積していく必要があるのかを明確にしなが、知識ベースを早期に設計することが必要である。	来年度以降、事例ベースとして知識を蓄積していく必要があると考えている。これらの情報を分析しつつ、知識ベースの設計を行っていきたい。
4-3-2	報告書コメント	当初、サイト特性調査情報システムについては、概念的な考え方は十分理解できるものの、具体的にどのようにまとめて行かれるのか、正直なところ疑問があった。第3回委員会や報告書ドラフト案で具体例が提示され、当初の疑問に対する答えが可視化されてきたように思える。特に、今回まとめられた水理試験や地球化学部分のタスクフローの構築は、感覚的にわかりやすく、具体例がうまく表示できた例であり、担当の方の努力の成果である。当然例示しやすい分野からタスクフローへの取り組みがなされたと理解しているが、今後、やや難しい分野へどう展開し、それらをまとめていくか、その展開を期待する。	拝承。今後の課題とする。
5. まとめと今後の課題			
5-1	第1回委員会	電力中央研究所が横須賀で実施しているポーリング調査における経験の ISIS の開発への適用可能性について検討する。	今年度、「判断エキスパートシステムの構築」において、いくつかの事例について知識構造のモデル化を指向することになっており、これに基づいて、来年度以降、横須賀での調査の経験をどのように反映するかを具体的に検討する。
5-2	第1回委員会	TRU 廃棄物の併置処分への適用性を検討する。	TRU 廃棄物処分概念や性能評価上の特徴を踏まえつつ、必要に応じて現在の統合化データフローの変更点を明らかにし、関連する知識のルール化について検討する。
5-3	第1回委員会	付加体については情報が不足している。付加体を本研究のスコープに含めるべきである。	今年度、「判断支援エキスパートシステムの構築」において、地質構造モデル構築、水理地質構造モデル及び地下水流動解析、地球化学モデル構築などを対象に知識構造のモデル化を試行する。これらの成果に基づき、付加体を視野に入れた場合、今後どのような知識が必要かを検討し課題として明らかにする。

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
物質の量	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	平方メートル	m ²
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	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	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	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

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	エクサ	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	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	エクスト	y

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	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ⁻¹ = 1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² · m ⁻² = 1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N	N/m ²	m · kg · s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa		m ⁻¹ · kg · s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N · m	m ² · kg · s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² · kg · s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s · A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² · kg · s ⁻³ · A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² · kg ⁻¹ · s ⁴ · A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² · kg · s ⁻³ · A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² · kg ⁻¹ · s ³ · A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V · s	m ² · kg · s ⁻² · A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg · s ⁻² · A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² · kg · s ⁻² · A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd · sr ^(c)	m ² · m ⁻² · cd = cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² · m ⁻⁴ · cd = m ⁻² · cd
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	m ² · s ⁻²
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	J/kg	m ² · s ⁻²

- (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った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。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号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	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	m ¹ · kg · s ⁻¹
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg · s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m · m ⁻¹ · s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m · m ⁻¹ · s ⁻² = s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg · s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² · kg · s ⁻² · K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg · K)	m ² · s ⁻² · K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² · s ⁻² · K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	m · kg · s ⁻³ · K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ · kg · s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m · kg · s ⁻³ · A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ · s · A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² · s · A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ · kg ⁻¹ · s ⁴ · A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m · kg · s ⁻² · A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² · kg · s ⁻² · mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	m ² · kg · s ⁻² · K ⁻¹ · mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ · s · A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² · s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ · m ⁻² · kg · s ⁻³ = m ² · kg · s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² · sr)	m ² · m ⁻² · kg · s ⁻³ = kg · s ⁻³

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 = 60 s
時	h	1 h = 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, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t = 10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np = 1
ベル	B	1 B = (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	1 eV = 1.60217733 (49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u = 1.6605402 (10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua = 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	海里	1 海里 = 1852 m
ノット	ノット	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
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar = 0.1 MPa = 100 kPa = 1000 hPa = 10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b = 100 fm 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
ダイン	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P = 1 dyn · s/cm ² = 0.1 Pa · s
ストークス	St	1 St = 1 cm 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
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd/cm ² = 10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph = 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal = 1 cm/s ² = 10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位系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
キュリー	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 = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv
X線単位	lx	1 lx unit = 1.002 × 10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	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
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

