

JNC TJ7400 2005-046  
PNC ZJ1100 95-003(1)

1  
限定資料

図書室

# 高差圧環境における地質環境条件の 調査手法に関する研究（その2）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

1995年3月

鹿島建設株式会社

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに配布するものです。ついで複製、転載、引用等を行わないよう、また、第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理してください。また、今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意してください。

本資料についての問合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

JNC TJ7400 2005-046

限定資料

PNC-ZJ1100-95-003-(1)

1995年3月

## 高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究（その2）

青木 謙治\* 日比谷 啓介\* 戸井田 克\*  
塩釜 幸弘\* 古市 光昭\*\*

### 要 旨

高差圧環境とは、地下深部に掘削された坑道と周辺岩盤部との間に高い差圧が生じている状況や、地表から立坑等を掘削した際に立坑部と周辺岩盤部との間に高い差圧が生じる状況と考えられる。現在用いられている調査手法がこのような高い差圧環境下へ適用可能か否かについて検討しておく必要があるものの、高差圧環境下での調査手法に関する研究事例はほとんどない。したがって、地下深部に建設された構造物で実施された調査手法を検討し、将来の深地層研究施設の建設に向け高差圧環境下での調査手法の確立に資するものとする。

昨年度は国内外において参考になると考えられる調査研究事例のデータを収集し、高差圧環境への適用性を予備的に調査するという立場から既存文献・資料の整理・分析を行った。本年度は、高差圧環境下における地下水流动解析に参考となる解析・評価・検証手法に関する資料を新たに収集・整理し、それを基に解析・評価・検証に必要なデータの取得を前提とした場合の調査手法に関する取りまとめを行なった。

---

本報告書は、鹿島建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：06D0365

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター環境地質課 課長 湯佐泰久

\*：鹿島建設技術研究所 \*\*：鹿島建設建設総事業本部原子力室

JNC TJ7400 2005-086  
~~COMMERCIAL PROPRIETARY~~  
~~PNC ZJ1100 95-003(1)~~  
MARCH, 1995

Study on the techniques for investigating the geological environment  
under high differential pressure conditions(II)

K. Aoki\*, K. Hibiya\*, M. Toida\*,  
Y. Shiogama\*, M. Furuichi\*\*

### Abstract

High differential pressure condition is usually encountered around the adits and shafts in deep underground rock mass. As the depth becomes larger, the magnitude of differential pressure becomes greater. However, most of the existing investigation techniques are seldom applicable to the high differential pressure conditions. For surveying the hydrogeological and geochemical characteristics of deep underground rock mass, the development of the appropriate investigation techniques is highly encouraged.

The purpose of this preliminary study which was executed the last year was to evaluate the applicability of the existing investigation techniques to the geological conditions in deep underground rock mass. In this year, the purpose is to evaluate the applicability of the existing investigation techniques to the numerical analyses for the hydrogeological structure of deep underground rock mass.

---

Work performed by KAJIMA Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Geological Environment Research Section, Tono Geoscience Center  
Yasuhide Yusa

\* Kajima Technical Research Institute

\*\* Kajima Corporation, Nuclear Power Dept.

## 目 次

<b>1. 研究概要</b>	
1.1 研究目的 .....	1
1.2 研究期間 .....	1
<b>2. 情報収集</b>	
2.1 収集方法 .....	3
2.2 収集結果 .....	3
① 各国の地層処分研究に関わる文献・資料	
a. スウェーデン .....	4
b. スイス .....	7
c. ベルギー .....	8
d. フィンランド .....	9
e. カナダ .....	10
f. 米国 .....	11
② 地下空間を対象とした国内の調査・研究事例の文献・資料	
a. 東濃地域及び釜石原位置試験場 .....	12
b. その他の地下空間構造物 .....	14
<b>3. 調査・解析・検証手法の検討</b>	
3.1 収集情報のとりまとめ .....	16
3.2 領域の規模による検討 .....	36
3.2.1 領域の規模（スケール）の定義 .....	36
3.2.2 解析手法ごとのとりまとめ .....	38
3.2.3 調査手法ごとのとりまとめ .....	46
3.3 わが国を対象とした調査・解析・検証手法の検討 .....	49
3.3.1 広域スケールの手順 .....	49
3.3.2 サイトスケールの手順 .....	63
3.3.3 局所スケールの手順 .....	72
3.3.4 今後の課題 .....	74
3.4 まとめ .....	75

---

卷末資料 : 地下深部掘削に対する法規制

## 表一覧

- 表-1 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（スウェーデン）
- 表-2 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（スイス）
- 表-3 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（ベルギー）
- 表-4 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（フィンランド）
- 表-5 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（カナダ）
- 表-6 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（米国）
- 表-7 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（東濃地域及び釜石原位置試験場）
- 表-8 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（その他の地下空間構造物）
- 表-9 収集情報のとりまとめシート
- 表-10 解析手法、解析条件、解析結果と検証手法のとりまとめ
- 表-11 差分法と有限要素法の比較
- 表-12 連続体解析とフラクチャーネットワーク解析の比較
- 表-13 各スケールにおけるモデル化の対象とモデル例
- 表-14 解析手法ごとの調査項目のまとめ
- 表-15 既存文献資料一覧表
- 表-16 既存文献資料から読み取ることのできる地形地質・土質情報
- 表-17 気象観測データ一覧
- 表-18 既存の航空写真
- 表-19 物理検層とその適用
- 表-20 孔間透水試験法一覧

## 図一覧

- 図-1 研究目的と研究内容
- 図-2 調査研究の対象とした施設の概要（ストリパ）
- 図-3 調査研究の対象とした施設の概要（フィンション）
- 図-4 調査研究の対象とした施設の概要（H R L）
- 図-5 調査研究の対象とした施設の概要（グリムゼル テストサイト）
- 図-6 調査研究の対象とした施設の概要（Veitsivaaraサイト）
- 図-7 調査研究の対象とした施設の概要（U R L）
- 図-8 調査研究の対象とした施設の概要（Yucca Mt.）
- 図-9 調査研究の対象とした施設の概要（東濃）
- 図-10 調査研究の対象とした施設の概要（釜石原位置試験場）
- 図-11 調査研究の対象とした施設の概要（菊間実証プラント）
- 図-12 調査研究の対象とした施設の概要（菊間地下石油備蓄基地）
- 図-13 スケールの定義
- 図-14 わが国を対象とした地下水流动評価に関する調査・解析・検証の流れ
- 図-15 わが国を対象とした調査・解析・検証のフロー（案）（広域スケール）
- 図-16 空中からの調査の流れ
- 図-17 空中からの調査概念
- 図-18 地表地質踏査の概念
- 図-19 地表物理探査の概念
- 図-20 ポーリング調査・物理検層の概念
- 図-21 わが国を対象とした調査・解析・検証のフロー（案）（サイトスケール）
- 図-22 ポーリングを利用した調査
- 図-23 坑道調査の概念(1)
- 図-24 坑道調査の概念(2)
- 図-25 坑道調査の概念(3)
- 図-26 わが国を対象とした調査・解析・検証のフロー（案）（局所スケール）

## 1. 研究概要

### 1.1 研究目的

一般に、地下深部に立坑や坑道などの地下空洞を掘削した場合、空洞内が大気圧に解放されるため、空洞周辺岩盤内の地下水圧と空洞内の圧力差は大きなものとなる。将来的に地下研究施設を建設して地下深部における地下水の水理学的特性及び地球化学的特性を明らかにするためには、こうした差圧の大きな環境（高差圧環境）である地下深部の地下空洞から試錐孔を掘削し、空洞掘削の影響が及んでいない深部岩盤を対象とした調査・観測を行う必要がある。しかしながら、高差圧環境下におけるこのような研究はこれまでほとんど実施された例がないことから、調査手法などについての技術的な検討を行う必要が生じている。

そこで、高差圧環境における調査手法などの研究として、調査機器、水理解析、検証及びそれらをまとめた一連の評価手法についての研究を平成5年度から開始した。初年度である平成5年度は、地下空洞の掘削に関する国内外の研究事例の文献調査を基に、主に調査手法及び調査機器に重点をおいた研究を実施した。その結果、従来の地下構造物では地下水圧を人工的に制御するため、実際に高差圧環境を問題とした研究事例は少ないと、高差圧環境下における調査機器には、適用可能な測定値の範囲が広く、高い精度で測定できる能力が求められていることなどが明らかになった。

本年度は、これまでの研究で触れられていない高差圧環境下における地下水流动解析に着目した研究を実施するために、解析・評価・検証手法に関する資料を新たに収集・整理し、それを基に解析・評価・検証に必要なデータの取得を前提とした場合の調査手法に関する取りまとめを行った。なお、本年度の研究目的と研究方法を図-1に示した。

### 1.2 研究期間

平成7年1月17日～平成7年3月15日

研究目的

将来的な地下研究施設の建設並びに研究実施

施設（立坑・横坑）の掘削に伴う差圧状況の発生



高差圧環境下での建設・研究の進め方の検討



地下研実現のために必要な手順作成と検討課題の抽出

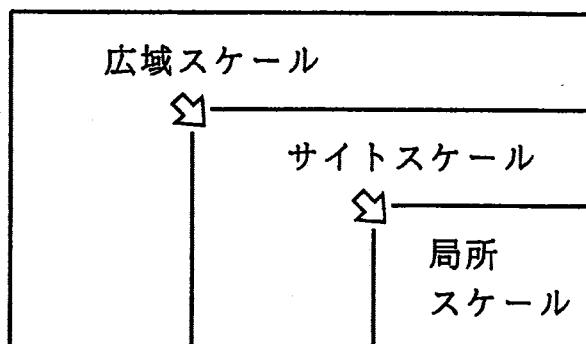
研究方法

海外・国内の地下利用施設に関する文献・資料の分析

- 調査手法
- 解析手法
- 検証手法



わが国における地下研の建設・研究実施の手順立案



高差圧環境の発生に留意した研究手順



図－1 研究目的と研究方法

## 2. 情報収集

### 2.1 収集方法

情報の収集範囲は以下の文献・資料とした。

- ① スウェーデン、スイス、ベルギー、フィンランド、カナダ、米国の地層処分研究に関する文献・資料
- ② 地下空間を対象とした国内の調査・研究事例の文献・資料
  - a. 東濃地域及び釜石原位置試験場に関する文献・資料
  - b. その他の地下構造物
    - 地下発電所
    - 石油備蓄

### 2.2 収集結果

収集した文献・資料は以下のとおりである。

- ① 各国の地層処分研究に関する文献・資料
  - a. スウェーデン (表-1 参照)
  - b. スイス (表-2 参照)
  - c. ベルギー (表-3 参照)
  - d. フィンランド (表-4 参照)
  - e. カナダ (表-5 参照)
  - f. 米国 (表-6 参照)
- ② 地下空間を対象とした国内の調査・研究事例の文献・資料
  - a. 東濃地域及び釜石原位置試験場 (表-7 参照)
  - b. その他の地下空間構造物 (表-8 参照)

分類 海外の地層処分研究に係わる文献・資料（スウェーデン(1)）

表-1-(1) 文 献 ・ 資 料 リ ス ト

番 号	題 名	著 者	出 典
1-1- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月
1-1- 2	広域地下水流动評価に関する研究	鹿島建設 大林組, 清水建設, 大成建設, 同和工営, アジア航測	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC SJ4449 89-009, 1989年6月
1-1- 3	ファーフィールドにおける核種移行研究	財团法人原子力安全研究協会	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, 1990年6月
1-1- 4	高レベル放射性廃棄物地層処分技術 (URL) に関する調査－岩盤水理数値解析手法－	財团法人原子力安全研究協会地層 処分技術調査専門委員会	財团法人原子力安全研究協会, 平成5年3月
1-1- 5	高レベル放射性廃棄物地層処分技術 (URL) に関する調査－岩盤水理調査 ・試験法－	財团法人原子力安全研究協会地層 処分技術調査専門委員会	財团法人原子力安全研究協会, 平成5年3月
1-1- 6	高レベル放射性廃棄物地層処分技術 (URL) に関する調査 (II)	財团法人原子力安全研究協会地層 処分技術調査専門委員会	財团法人原子力安全研究協会, 平成6年3月
1-1- 7	Hydrogeological Characterization of the Stripa Site	J. Gale, R. Macleod, J. Welhan	STRIPA PROJECT TR87-15, 1987年6月
1-1- 8	Preliminary Prediction of Inflow into the D-Holes at the Stripa Mine	J. Long, K. Karasaki, A. Davey, J. Peterson, M. Landsfeld, J. Kennedy, S. Martel	STRIPA PROJECT TR90-04, 1990年2月
1-1- 9	Prediction of Inflow into the D-Holes at the Stripa Mine	J. Geier, W. Dershowitz, G. Sharp	STRIPA PROJECT TR90-06, 1990年4月
1-1-10	Prediction of Inflow into the D-Holes at the Stripa Mine	A. Herbert, B. Splawski	STRIPA PROJECT TR90-14, 1990年8月
1-1-11	A Comparison of Predictions and Measurements for the Stripa Simulated Drift Experiments	D. Hodgkinson	STRIPA PROJECT TR91-10, 1991年2月
1-1-12	Discrete Fracture Modelling For the Stripa Site Characterization and Validation Drift Inflow Predictions	W. Dershowitz, P. Wallman, S. Kindred	STRIPA PROJECT TR91-16, 1991年6月

分類 海外の地層処分研究に係わる文献・資料(スウェーデン(2))

番号	題名	著者	出典
1-1-13	Modelling For the Stripa Site Characterization and Validation Drift Inflow:Prediction of Flow through Fractured Rock	A. Herbert, J. Gale, G. Lanyon, R. MacLeod	STRIPA PROJECT TR91-35, 1991年12月
1-1-14	Prediction of Flow and Drawdown for the Site Characterization and Validation Site in the Stripa Mine	J. Long, A. Mauldon, K. Nelson, S. Martel, P. Fuller, K. Karasaki	STRIPA PROJECT TR92-05, 1992年1月
1-1-15	A Comparison of Measurements and Calculations for the Stripa Validation Drift Inflow Experiment	D. Hodgkinson, N. Cooper	STRIPA PROJECT TR92-07, 1992年1月
1-1-16	Preliminary-Discrete Fracture Network Modelling of Tracer Migration Experiment at the SCV Site	W. S. Dershowitz, P. Wallman, J. E. Geier, G. Lee	STRIPA PROJECT TR91-23, 1991年9月
1-1-17	Modelling Tracer Transport in Fractured Rock at Stripa	A. Herbert, G. Lanyon	STRIPA PROJECT TR92-01, 1992年1月
1-1-18	Simulation of Tracer Transport for the Site Characterization and Validation Site in the Stripa Mine	J. Long, K. Karasaki	STRIPA PROJECT TR92-06, 1992年1月
1-1-19	A Comparison of Measurement and Calculations for the Stripa Tracer Experiments	D. Hodgkinson, N. Cooper	STRIPA PROJECT TR92-20, 1992年3月
1-1-20	Fracture Flow Code Cross-Verification Plan	W. Dershowitz, A. Herbert, J. Long	STRIPA PROJECT TR89-02, 1989年3月
1-1-21	Cross-Verification Testing of Fracture Flow and Mass Transport Codes	F. Schwartz, G. Lee	STRIPA PROJECT TR89-02, 1991年11月
1-1-22	NAPSAC Technical Document	P. Grindrod, A. Herbert, D. Roberts P. Robinson	STRIPA PROJECT TR91-31, 1991年12月
1-1-23	Site Characterization and Validation- Porous Media Modelling of Validation Tracer Experiments	R. MacLeod, J. Gale, G. Bursey	STRIPA PROJECT TR92-10, 1992年1月
1-1-24	OECD/NEA INTERNATIONAL STRIPA PROJECT OVERVIEW VOLUME II NATURAL BARRIERS	Paul Gnik	SRB, 1993年1月

分類 海外の地層凍結研究に係わる文献・資料(スウェーデン(3))

表-1-(3) 文 献 ・ 資 料 リ ス ト

番 号	題 名	著 者	出 典
1-1-25	スウェーデンHRL長期揚水試験とトレーサー試験の評価 ネットワークモデルによる解析とその結果	内田雅大, 澤田淳	第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp 157-162, 1994年1月
1-1-26	スウェーデンHRL長期揚水試験とトレーサー試験の評価 考慮した連続体モデルによる解析とその結果	千々松正和, 小林晃, 西山弘之, 大西有三	第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp 163-168, 1994年1月
1-1-27	スウェーデンHRL長期揚水試験とトレーサー試験の評価 その結果	大澤英昭	第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp 187-192, 1994年1月

### 分類 海外の地層分研究に係わる文献・資料(イス)

トスリリ・資料献文表一2

番号	題名	著者	出典
1-2- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月
1-2- 2	広域地下水流动評価に関する研究	鹿島建設, 大林組, 清水建設 成建設, 同和工営, アジア航測	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC SJ4449 89-009, 1989年6月
1-2- 3	ファーフィールドにおける核種移行研究	財団法人原子力安全研究協会	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, 1990年6月
1-1- 4	Hydrologic Modelling of the Migration Site at the Grimsel Test Site	F. Herzog	Nagra TR89-16, 1989年7月
1-1- 5	Model Calculation of the Groundwater at Oberbauenstein	B. Grundfelt, B. Lindbom, A. Markstrom	Nagra TR85-31, 1987年6月
1-1- 6	Large Scale 3-D Groundwater Flow Modelling in Highly Heterogeneous Geologic Medium	L. Kiraly	Groundwater Flow and Quality Modelling, pp761 -775, 1988

## 分類 海外の地層処分研究に係わる文献・資料(ペルギー)

表-3 文 献 ・ 資 料 リ ス ト

番 号	題 名	著 者	出 典
1-3- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月

分類 海外の地層処分研究に係わる文献・資料(フィンランド)

表-4 文 献 ・ 資 料 リ ス ト

番 号	題 名	著 者	出 典
1-4- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月
1-4- 2	Three Dimensional Groundwater Flow Modelling for a Potensial repository Site	K. Meling, V. Taijassalo	High Level Radioactive Waste Management, Proc. of the Second Annual International Conference, vol. 2, pp1299-1306, 1991年4月
1-4- 3	Groundwater Flow Modelling for the TVO-92 Safety Analysis of Spent Fuel Disposal	L. Koskinen, A. Hautajarvi, T. Vieno	High Level Radioactive Waste Management, Proc. of the Fourth Annual International Conference, vol. 2, pp1595-1601, 1993年4月

## 分類 海外の地層処分研究に係わる文献・資料(カナダ)

表-5 文 献 ・ 資 料 リ ス ト

番 号	題 名	著 者	出 典
1-5- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月
1-5- 2	ファーフィールドにおける核種移行研究	財団法人原子力安全研究協会	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, 1990年6月
1-5- 3	Post-excavation analysis of a revised hydraulic model of the room 209 fracture, URL, Manitoba, Canada A Part of the joint AECL/NEA Characterization of the 240m level at the URL, Manitoba, Canada	A. Winberg, T. Chan, P. Griffiths, B. Nakka	SKB TR87-27, 1988年10月
1-5- 4	URL Drawdown Experiment and Comparison with Model Prediction	C. C. Davison	AECL TR-375, 1986年1月
1-5- 5	Modelling of the Groundwater Flow System Around the URL Excavation Before and After Its Construction	M. Weitzman	AECL TR-233, 1985年6月
1-5- 6	Experimental Activities of the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program to Validate Gepsphere Models	C. C. Davison et. al	GEOVAL, 1987年
1-5- 7	Finite Element Simulation of Groundwater Flow and Heat and Radio-nuclide Transport in a Plutonic Rock	T. Chan	ISRM 6th Congress, 1987年
1-5- 8	Hydrogeological Modelling of the Underground Research Laboratory Site: Characterization and Prediction	INTERA tec. Ltd.	AECL TR-345, 1985年9月

## 分類 海外の地層処分研究に係わる文献・資料(米国)

表-6 文献・資料リスト

番号	題名	著者	出典
1-6- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月
1-6- 2	広域地下水流动評価に関する研究	鹿島建設, 大林組, 清水建設, 大成建設, 同和工務, アジア航測	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC SJ4449 89-009, 1989年6月
1-6- 3	Modeling of Saturated Zone at Yucca Mountain, Nevada	M. P. Ahola, B. Sagar	High Level Radioactive Waste Management, Proc. of the Fourth Annual International Conference, Vol. 2, pp1602-1607, 1993年4月
1-6- 4	Flow and Transport Around a Noncontinuous Horizontal Layer at Yucca Mountain	M. A. McGraw, D. W. Langford, T. B. Miley	High Level Radioactive Waste Management, Proc. of the Second Annual International Conference, Vol. 1, pp513-519, 1991年4月
1-6- 5	Multi-Dimensional Modeling of unsaturated Flow in the Vicinity of Exploratory Shafts and Fault Zones at Yucca Mountain, Nevada	M. L. Rockhold, B. Sagar, M. P. Connely	High Level Radioactive Waste Management, Proc. of the International Topical Meeting, Vol. 2, pp1192-1199, 1990年4月
1-6- 6	Groundwater Flow and Sand Body Interconnectedness on a Thick, Multiple Aquifer System	G. E. Fogg	Water Resour. Res., Vol. 22, No. 5, pp679-694, 1986年5月
1-6- 7	Evaluation of a Groundwater Corrective Action at the Chew-Dyne Hazardous Waste Site Using a Telescopic Mesh Refinement Modeling Approach	D. S. Ward, D. R. Buss, J. W. Mercer, S. S. Hughes	Water Resour. Res., Vol. 23, No. 4, pp603-617, 1987年4月
1-6- 8	Comparison of Three Groundwater Modeling Studies	D. McLaughlin, W. K. Johnson	J. of Water Resour. Planning and Management, Vol. 113, No. 3, pp405-421, 1987年5月
1-6- 9	Modeling Groundwater Flow at Love Canal, New York	J. W. Mercer, L. R. Silka, C. R. Faust	J. of Environmental Engineering -ASCE, Vol. 109, No. 4, pp924-942, 1983年

分類 地下空間を対象とした国内の調査・研究事例の文献・資料(東濃地域)

表-7-(1) 文 献 ・ 資 料 リ ス ト

番 号	題 名	著 者	出 典
2-1- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成績報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月
2-1- 2	立坑掘削の地下水流動影響予測解析	今井久, 柳澤孝一, 大澤英昭, 渡辺邦夫	第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文 集, pp317-321, 1991年2月
2-1- 3	立坑掘削の地下水流動影響予測解析(Ⅱ)	今井久, 柳澤孝一, 渡辺邦夫	第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文 集, pp71-75, 1992年2月
2-1- 4	我が国を対象とした地下水流动解析 その1 中部日本を対象とした地下水 流动解析	柳澤孝一, 今井久, 古屋和夫, 若松尚則, 梅田浩司	動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所, PNC TN7410 92-019, 1992年7月

## 分類

表-7-（2）文献・資料リスト  
（釜石原位置試験場）

番号	題名	著者	出典
2-2- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開拓事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月
2-2- 2	高レベル放射性廃棄物地層処分技術（URL）に関する調査（II）	財団法人原子力安全研究協会地層 処分技術調査専門委員会	財団法人原子力安全研究協会, 平成6年3月
2-2- 3	花崗岩盤における割れ目内流れに関する基礎的研究	新見健, 野口義文, 堀田政國	第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文 集, pp21-25, 1992年2月
2-2- 4	Simulation of Fracture Flow to the Kamaishi Validation Drift	Masahiro Uchida, Thomas W. Doe, William Dershowitz, Peter Wallman	High Level Radioactive Waste Management, Proc. of the Fourth Annual International Conference, vol. 1, pp437-442, 1993年
2-2- 5	釜石原位置試験場KH-7, KH-8孔間ににおけるトレーサー試験	内田雅大, 澤田淳, 高原弘幸, 渡辺邦夫	第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp 181-186, 1994年1月

分類 地下空間を対象とした国内の調査・研究事例の文献・資料リスト

表-8-(1) 文 献 ・ 資 料 リ ス ト  
資料(地下発電所)

番 号	題 名	著 者	出 典
2-3- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月

分類 地下空間を対象とした国内の調査・研究事例の文献・資料(石油備蓄)

番号	題名	著者	出典
2-4- 1	高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究	鹿島建設	動力炉・核燃料開発事業団委託研究成績報告書, PNC ZJ1100 94-003, 1994年3月
2-4- 2	Numerical Simulation for Hydraulic Behavior in the Bedrock of the Zone Surrounding the Cavern	T. Ohkawa, N. Sakaikhara, H. Momota, K. Aoki	Large Rock Caverns, Proc. of the International Symposium Helsinki, Finland, B2. 21, Vol. 2, pp1361-1372, 1986年8月
2-4- 3	降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動に関する解析的検討	百田博宣, 藤城泰行, 青木謙治, 花村哲也	土木学会論文集, 第379号, VI-6, pp74-82, 1987 年3月
2-4- 4	岩盤空洞周辺の水理挙動に対する3次元浸透流解析の適用性について	社本芳明, 手塚康成, 青木謙治	土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, 第 III部門, pp904-905, 1988年10月
2-4- 5	菊間地下石油備蓄基地建設工事での空洞掘削に伴う地下水挙動に関する検討	岡本淳, 有元平, 山本和彦, 大津 宏康	土木学会論文集, No.480, VI-21, pp33-42, 1993 年12月

### 3. 調査・解析・検証手法の検討

#### 3.1 収集情報のとりまとめ

情報収集結果に基づき、各研究事例ごとに環境条件、調査内容及び解析内容を整理した。

##### ① 各国の地層処分研究

###### a. スウェーデン

###### 1) ストリパ

ストリパは、スウェーデン中部に位置する鉄鉱石鉱山であったが、現在は採鉱をしていない。

放射性廃棄物の地層処分場として結晶質岩を利用するため、地質学的、地球物理学的、地球化学的な影響を調査することを目的に、スウェーデンと米国の共同計画が、1977～1980年に360m坑道で行なわれた。

さらにその後、高レベル放射性廃棄物地層処分候補地の調査技術を開発し、長期にわたる放射性廃棄物処分に関する特有の工学的及び環境的現象を調査することを目的に、OECD/NEAの後援のもと、カナダ、フィンランド、フランス、日本、スウェーデン、スイス及び米国の共同でストリパ・プロジェクトが行なわれた。これは、図-2に示すように360～410m付近の坑道を使用するとともに、ここから削孔されたボーリング孔及び新規に掘削された坑道を使用して、1980年から1991年までの間、各種の調査・試験が行なわれた。

ここを対象に行なわれた次の内容を整理対象とした。

- (1) ストリパの広域解析
- (2) ストリパの準広域解析
- (3) SCVサイトDホール湧水量のフラクチャーネットワーク解析(1)
- (4) SCVサイトDホール湧水量のフラクチャーネットワーク解析(2)
- (5) SCVサイトDホール湧水量のフラクチャーネットワーク解析(3)
- (6) SCVサイトValidation Drift湧水量のフラクチャーネットワーク解析(1)
- (7) SCVサイトValidation Drift湧水量のフラクチャーネットワーク解析(2)
- (8) SCVサイトValidation Drift湧水量のフラクチャーネットワーク解析(3)
- (9) SCVサイトトレーサー試験のフラクチャーネットワーク解析(1)
- (10) SCVサイトトレーサー試験のフラクチャーネットワーク解析(2)
- (11) SCVサイトトレーサー試験のフラクチャーネットワーク解析(3)
- (12) SCVサイトの等価連続体解析

## 2) フィンション

フィンションは、図-3に示すようにスウェーデンにおける高レベル放射性廃棄物地層処分場の候補地点のひとつである。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- (1) 準広域3次元解析
- (2) 局所域における3次元解析
- (3) 塩水の存在を考慮した鉛直2次元解析
- (4) トレーサー試験の平面2次元解析

## 3) H R L

H R Lは、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究施設としてエスポ島に建設中のもので、図-4に示すようにオスカーシャム原子力発電所から海底下を通過するアクセス坑道（斜坑）とエスポ島下の六角形螺旋坑道で地下500mまで達するものである。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- (1) 長期揚水試験とトレーサー試験のフラクチャーネットワーク解析
- (2) 長期揚水試験とトレーサー試験の連続体解析

## b. スイス

### 1) グリムゼル

グリムゼルはアルプスの急峻な山地の山腹を貫く既存の水力発電所内に位置する。

図-5に示すように、高レベル放射性廃棄物地層処分に向け、発電所業務用トンネルからTBMで掘削径3.5mの円形断面の約1,000mの実験用トンネルを掘削し、

- ① 機器及び測定技術の開発と手法の確立
- ② スイスにおける処分コンセプトに係わる試験の実施
- ③ 海外での成果をスイスの地質環境にどのように適用するかの研究が行なわれている。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- 移行試験サイトの連続体解析

### 2) Oberbau

Oberbauサイトは、スイスの中央にあるVierwaldstättersee湖の最南端にある、Urnersee湖の西岸に位置し、中レベル放射性廃棄物処分場の建設が予定されている。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- (1) 広域2次元解析
- (2) 広域3次元解析

### 3) Project Gewähr

高レベル放射性廃棄物の地層処分の実現に向けて、スイス北部とフランス、ドイ

ツの一部を対象にしたもので、具体的な地下構造物は存在しない。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- スイス北部の広域解析

c. ベルギー

該当なし

d. フィンランド

Veitsivaaraサイト

フィンランドのTVO社が高レベル放射性廃棄物の最終処分場の候補地として調査中の5つのサイトのうちの1つであり、フィンランドの東方、ロシア国境から西へ約30kmに位置する。

安全性の検証解析のうち、特に処分場が周りの地下水に与える影響や、その地下水に乗って短期間に生態系に漏洩する可能性を研究するため、TVO-92 safety analysisが1987年から1992年にわたり実施され、当サイトはこれらの解析研究に対する検証サイトとして使われている。図-6にサイトの概要とボーリング掘削状況を示す。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- Veitsivaaraサイトモデル解析

e. カナダ

URL

URLは、カナダのほぼ中央部マニトバ州の東部、ウィニペグの北東100kmに位置している。カナダ原子力公社(AECL)が高レベル放射性廃棄物の処分技術の開発及び実証を目的に、1980~2000年の21年間にわたりマニトバ州政府より借用したもので、敷地面積は約4haである。

放射性廃棄物はいっさい持ち込みず、借用期間後に元どおりに復元して変換することになっている。図-7に示すように、深度443mまでの立坑1本と、130m、240m、300m、420mに水平坑道があり、立坑周辺及び坑道内から数多くのボーリングが掘削されている。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- (1) 広域地下水流动解析
- (2) 立坑周辺の地下水流动解析
- (3) Room 209近傍の地下水流动解析

f. 米国

1) Yucca Mt.

ユッカ・マウンテンサイトは、現在米国における商業用原子炉から排出される使用済み核燃料の唯一の処分場予定地である。

処分場は、図-8に示すように、1,200~1,300万年前に噴火したトポパー・スプリング層と呼ばれる1,000tf厚の不飽和凝灰岩中に建設される予定で、諸外国で計画中の処分場とは条件が異なっている。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- (1) 鮫和帯のモデル化
- (2) 処分場周辺の地下水水流動解析
- (3) 調査立坑周辺の地下水水流動解析

2) Oskwood岩塩

East Texas盆地の南西に位置し、高レベル放射性廃棄物処分場候補地として挙げられていた1つである。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- 帯水層内の地下水水流動解析

3) Chem-Dyneサイト

オハイオ州南西に位置する危険物処分場サイトである。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- 広域地下水水流動解析

4) San Andres-Glorieta

ニューメキシコ州北西部に位置し、Plains Electric社がCiniza地域においてプラント操業を行なうため、San Andres-Glorieta帯水層を対象に揚水を行なう予定である。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- 帯水層内の地下水水流動解析

5) Love Canal

アメリカ、ニューヨーク州に位置する。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- 広域地下水水流動解析

② 地下空間を対象とした国内の調査・研究事例

a. 東濃地域

動力炉・核燃料開発事業団では、図-9に示すように、立坑掘削影響試験として岐阜県土岐市中部事業所東濃鉱山敷地内に仕上がり内径6m、深さ150mの立坑を

掘削し、立体掘削に伴う周辺岩盤への水理学的、力学的影響について、実規模の原位置試験により調査研究を進めている。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- (1) 立坑掘削影響解析
- (2) 中部日本を対象とした地下水流动解析
- (3) 東濃地域を対象とした地下水流动解析

b. 釜石原位置試験場

動力炉・核燃料開発事業団では、図-10に示すように、岩手県釜石市の西方約20kmの釜石鉱山の海面から550m レベルにある2本の既存坑道（NW押し出し坑道、NE押し出し坑道）間に、新規にKD-88, KD-89, KD-90の3本の坑道と多くのボーリング孔を削孔して、原位置試験を実施している。KD-88, KD-89坑道とこれに付随するボーリング孔では様々な調査・試験を実施して水理地質構造の把握が行なわれ、KD-90坑道とこれに付随するボーリング孔は解析結果の検証のために用いられる。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- (1) KD-90坑道のフラクチャーネットワーク解析
- (2) KH-7, KH-8孔間のトレーサー試験
- (3) チャンネリング試験の解析

c. 地下発

該当なし

d. 石油備蓄

1) 菊間実証プラント

菊間実証プラントは、図-11に示すように、原油地下備蓄のわが国への適用性を実証するために愛媛県菊間町に建設されたもので、貯油層の規模は幅15m、高さ20m、長さ112mで、空洞の深度は海平面下EL.-42~-62mである。その他に水封トンネル、サービストンネル、立坑、ドライポンプ室、作業トンネルからなる。

ここを対象に行われた次の内容を整理対象とした。

- (1) 鉛直2次元解析
- (2) 3次元鏡像法
- (3) 準3次元解析
- (4) 3次元解析

2) 菊間基地

菊間基地は、愛媛県越智郡菊間町の実証プラントに隣接した地点に建設された、

陸上タンクを含めて150万 kℓ の備蓄容量を有する原油貯蔵施設である。

貯蔵施設は、図-12に示すように幅20.5m×高さ30.0mの砲弾型断面で、長さが230m～448mの7本の燃料貯蔵用空洞と、水封トンネル及び作業トンネルなどの周辺の各トンネルからなっている。

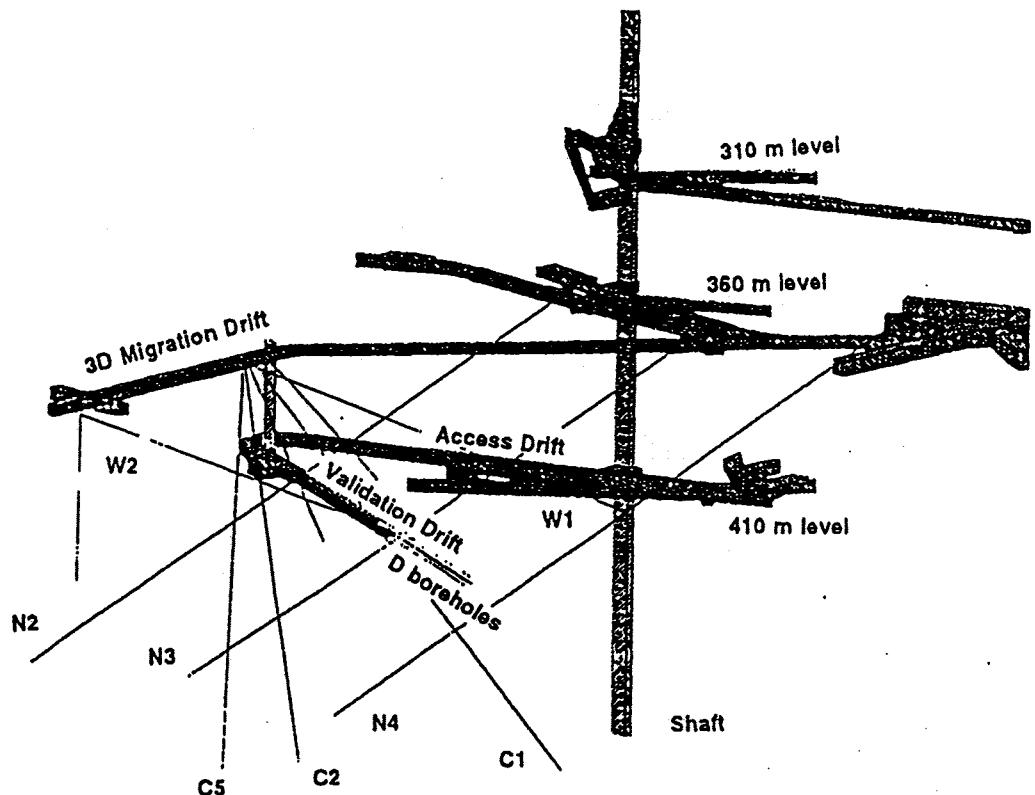
このうち、燃料貯蔵空洞は、EL.-65m～EL.-35mに位置し、地表面からの土被りは80～100m程度である。

ここを対象に、次の内容を整理対象とした。

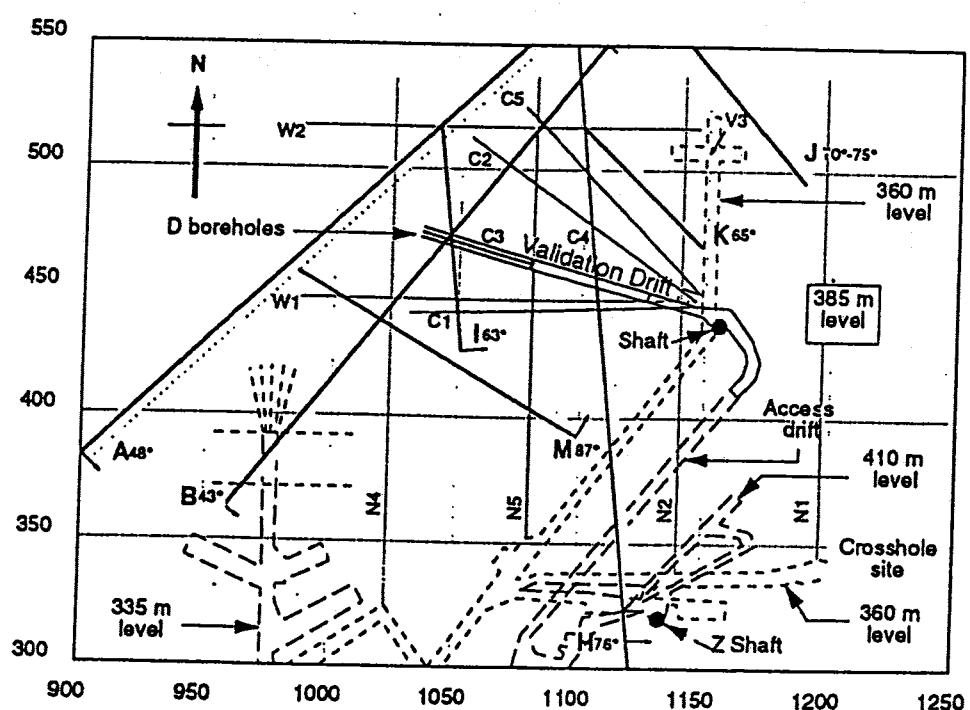
○ 準3次元解析

なお、整理に関しては表-9に示す書式を使用し、下記項目について記述した。調査結果のシート156ページ分は別途の報告書（PNC ZJ1100 95-003(2)）としてとりまとめた。

項目		備考
環境条件	施設名	
	地下構造物の概要	用途、規模などを記載
	土被り	
	地形、地質、地質構造	
	水理学的環境	
	地球化学的環境	
調査	調査項目	
	調査研究の目的	解析とのつながりを記入
	調査手法	
	調査範囲	
	試験装置の構造	
解析	解析モデル	メッシュ図、節点・要素数など
	解析条件の設定方法	境界条件とその設定方法
	解析手法	解析コードおよびその概略内容
	解析結果	
	検証手法	検証方法および検証に用いたデータ



Location of the access drift, the D boreholes, the C boreholes, and the Validation Drift at the SCV site (Olsson, 1992).



Plan view of features contained in the conceptual model of the SCV site at the 385 m level (Olsson, 1992).

図-2 調査研究の対象とした施設の概要（ストリパ）

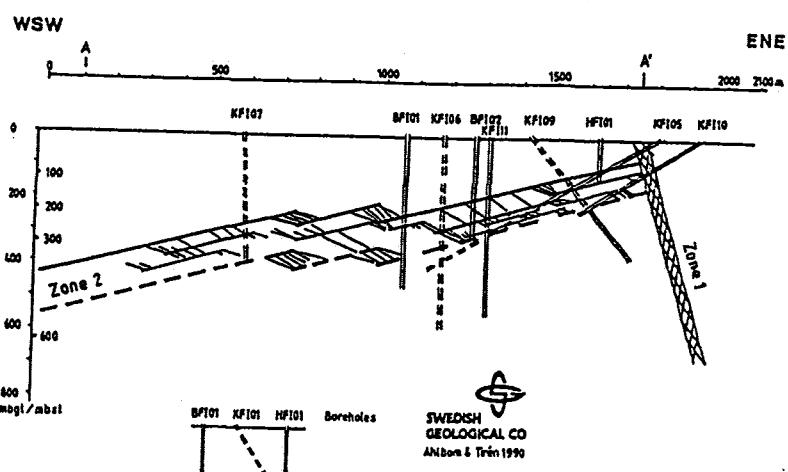
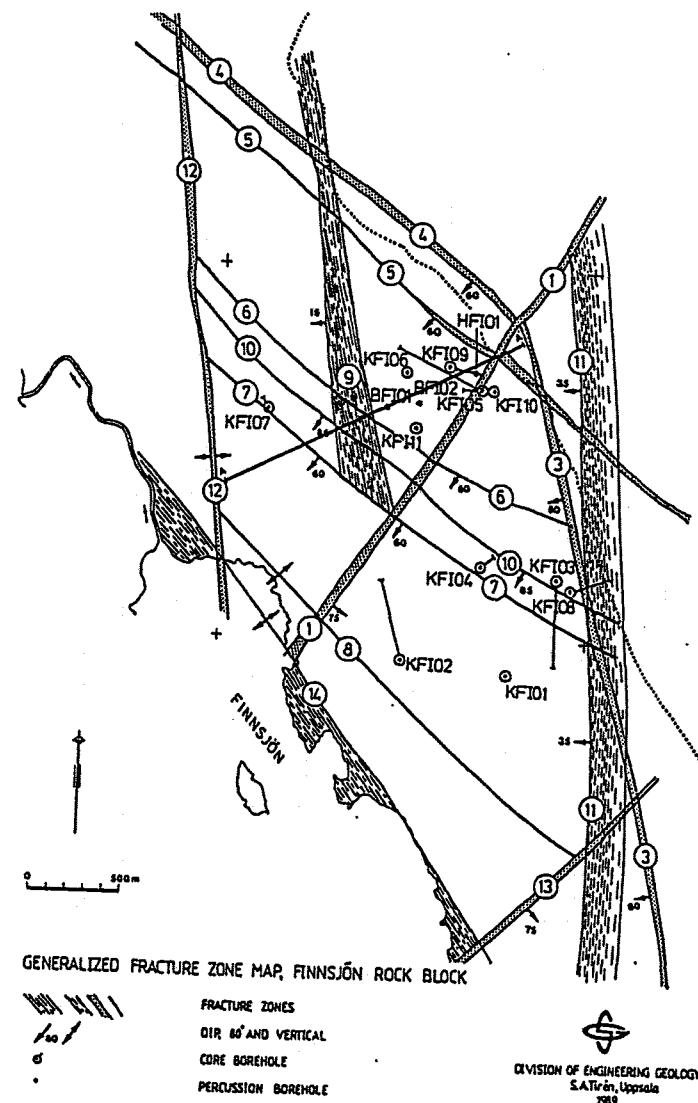
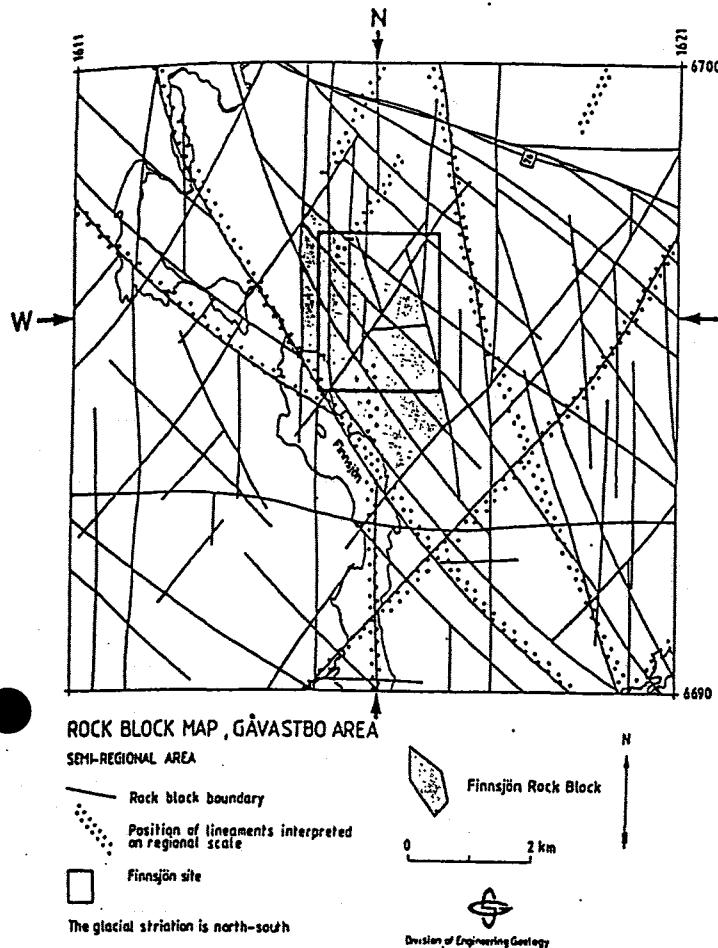


図-3 調査研究の対象とした施設の概要 (フィンション)

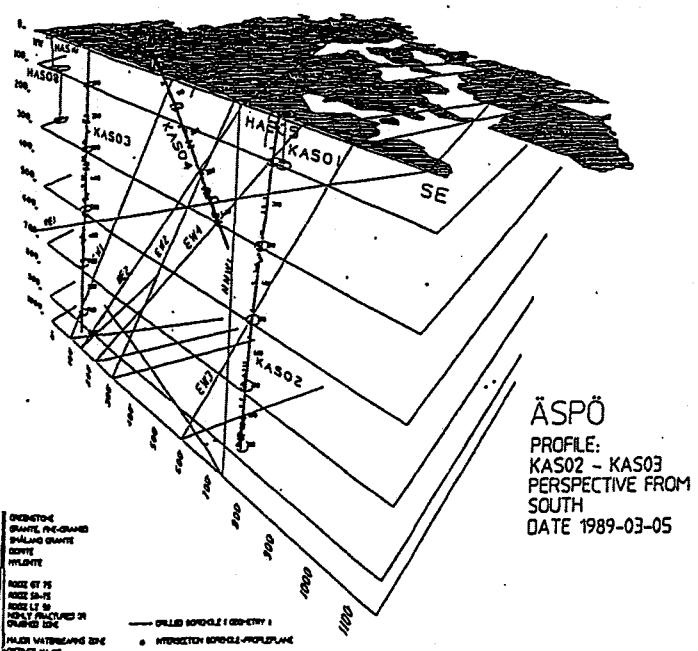
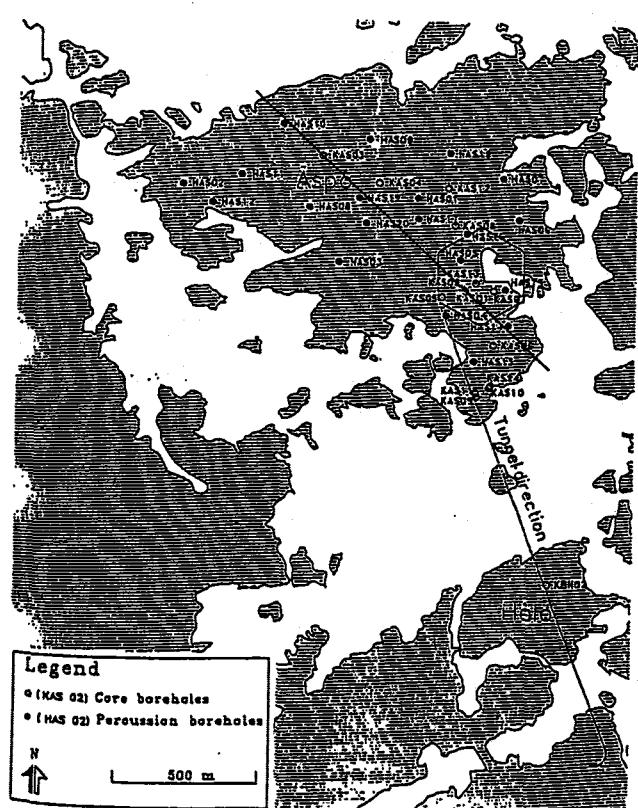
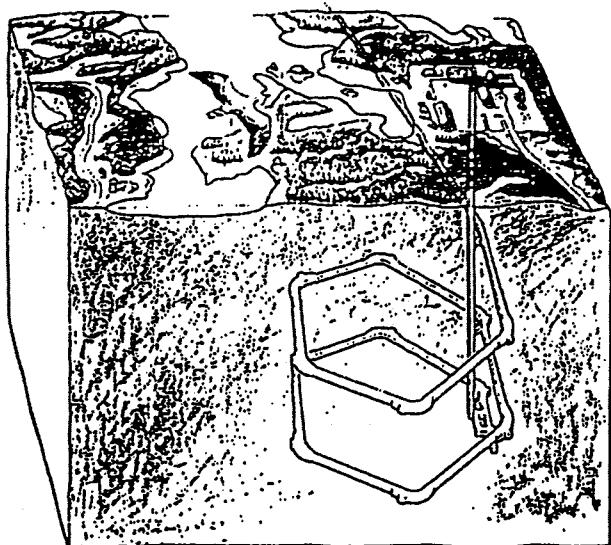


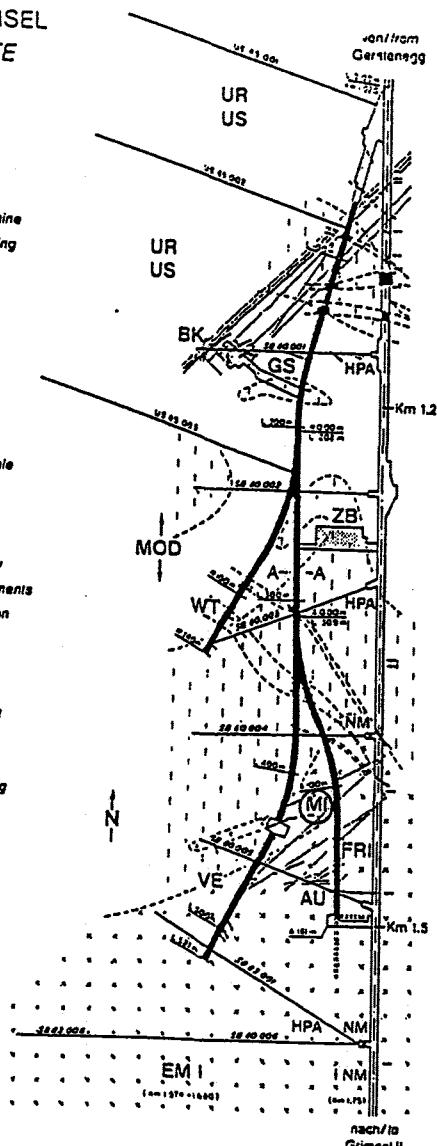
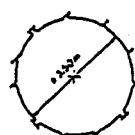
図-4 調査研究の対象とした施設の概要 (H R L)

FLG FELSLABOR GRIMSEL  
GTS GRIMSEL TEST SITE

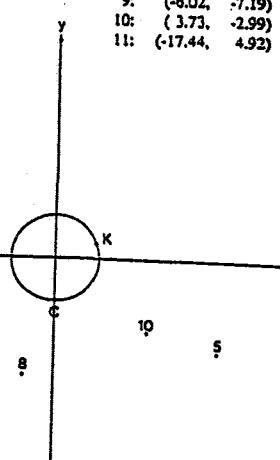
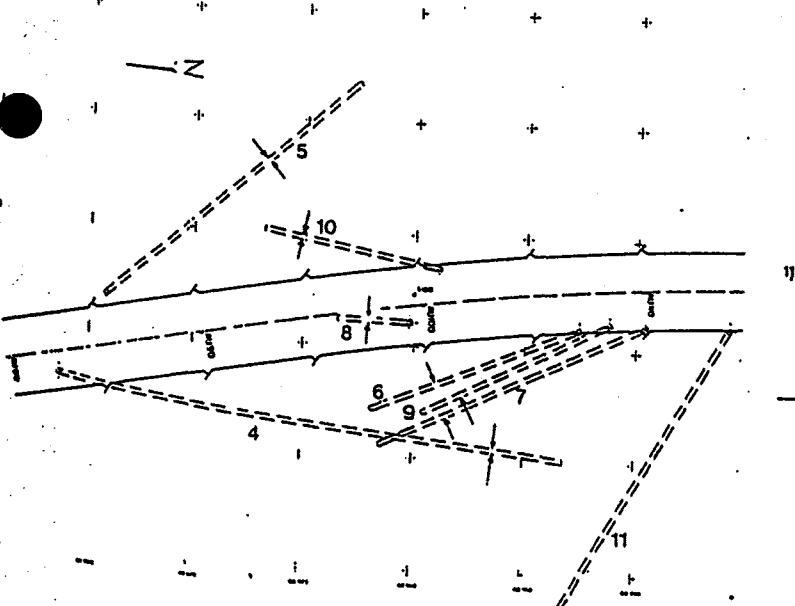
Situation

- Zugangsstollen/Access tunnel
- Fräsvortrieb/by tunnel boring machine
- Sprengvortrieb/excavated by blasting
- Zentraler Aaregranit ZAGR  
Central Aaregranite CAGR
- Biotitericher ZAGR  
CAGR with high content of biotite
- ▨ Grimsel-Granodiorit  
Grimsel-Granodiorite
- Scherzone/Shear zone
- Lamprophyr/Lamprophyre
- Wasserzufluss/Water inflow
- Sondierbohrung/Exploratory borehole
- US Bohrung/US borehole
- ZB Zentraler Bereich/Central facilities
- AU Auflöckerung/Excavation effects
- BK Bohrochkratz/Fracture system /flow
- EM Elmagn. HF-Messungen/-measurements
- FRI Klutzone/Fracture zone investigation
- GS Gebirgsspannungen/Rock stresses
- HPA Hydr. Parameter/Hydr. parameters
- MI Migration/Migration
- MOD Hydrodyn. Modellierung/H. modeling
- NM Neigungsmesser/Tiltmeters
- UR Unterageradar/Underground radar
- US Seismik/Underground seismic testing
- VE Ventilationstest/Ventilation test
- WT Wärmeversuch/Heat test

A — A Schnitt/Section



	x[m]	y[m]
4:	(-9.96,	-3.61)
5:	( 6.60,	-3.72)
6:	(-5.06,	-3.77)
7:	(-6.43,	-4.15)
8:	(-1.19,	-4.90)
9:	(-6.02,	-7.19)
10:	( 3.73,	-2.99)
11:	(-17.44,	4.92)



移行試験（M I）のボーリング孔配置

図-5 調査研究の対象とした施設の概要（グリムゼル テストサイト）

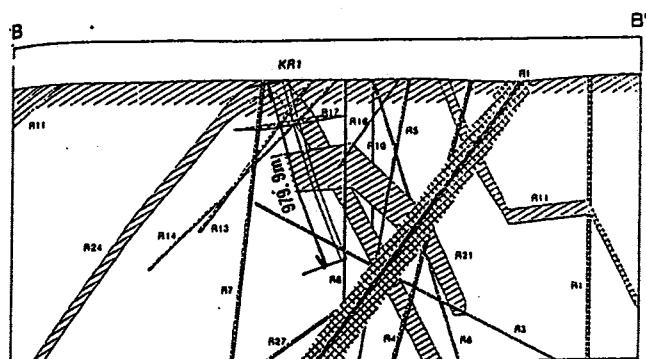
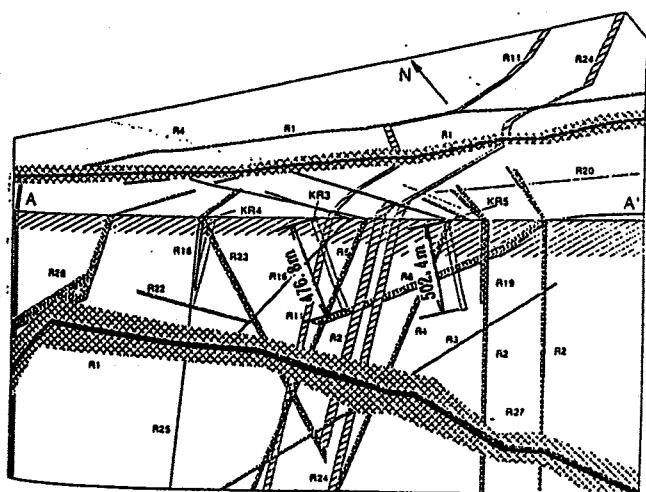
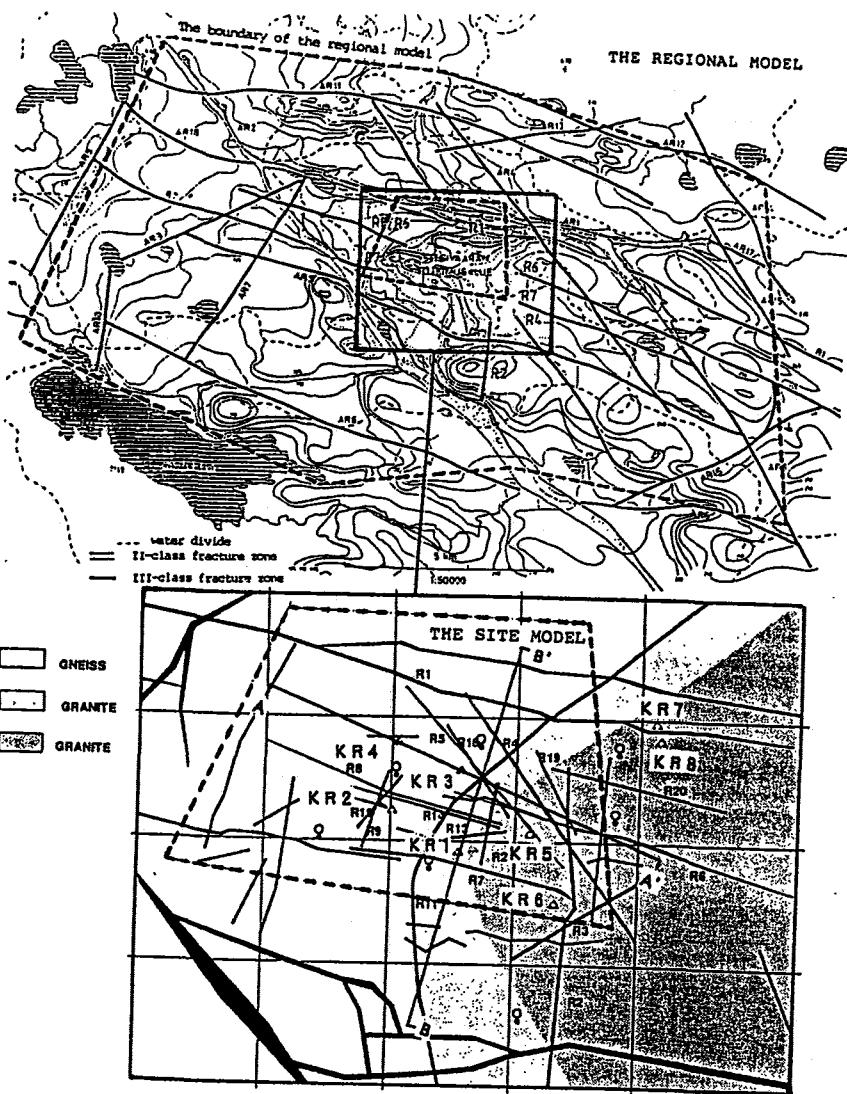


図-6 調査研究の対象とした施設の概要 (Veitsivaaraサイト)

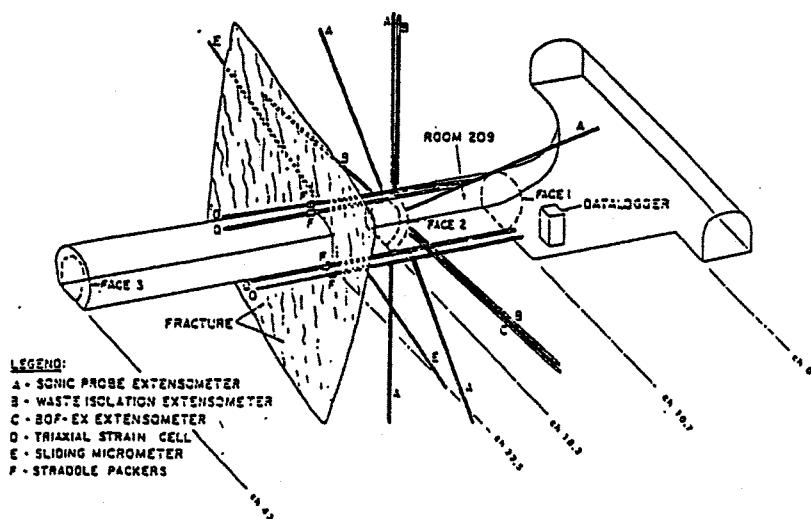
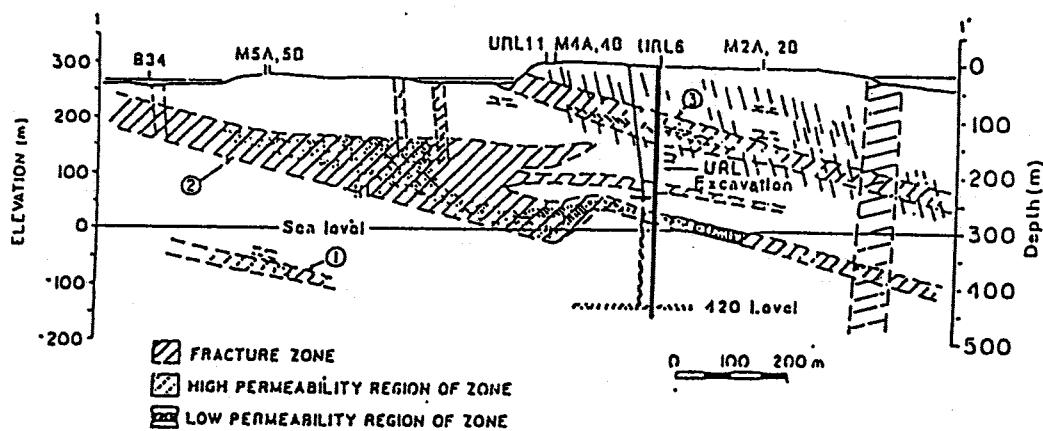
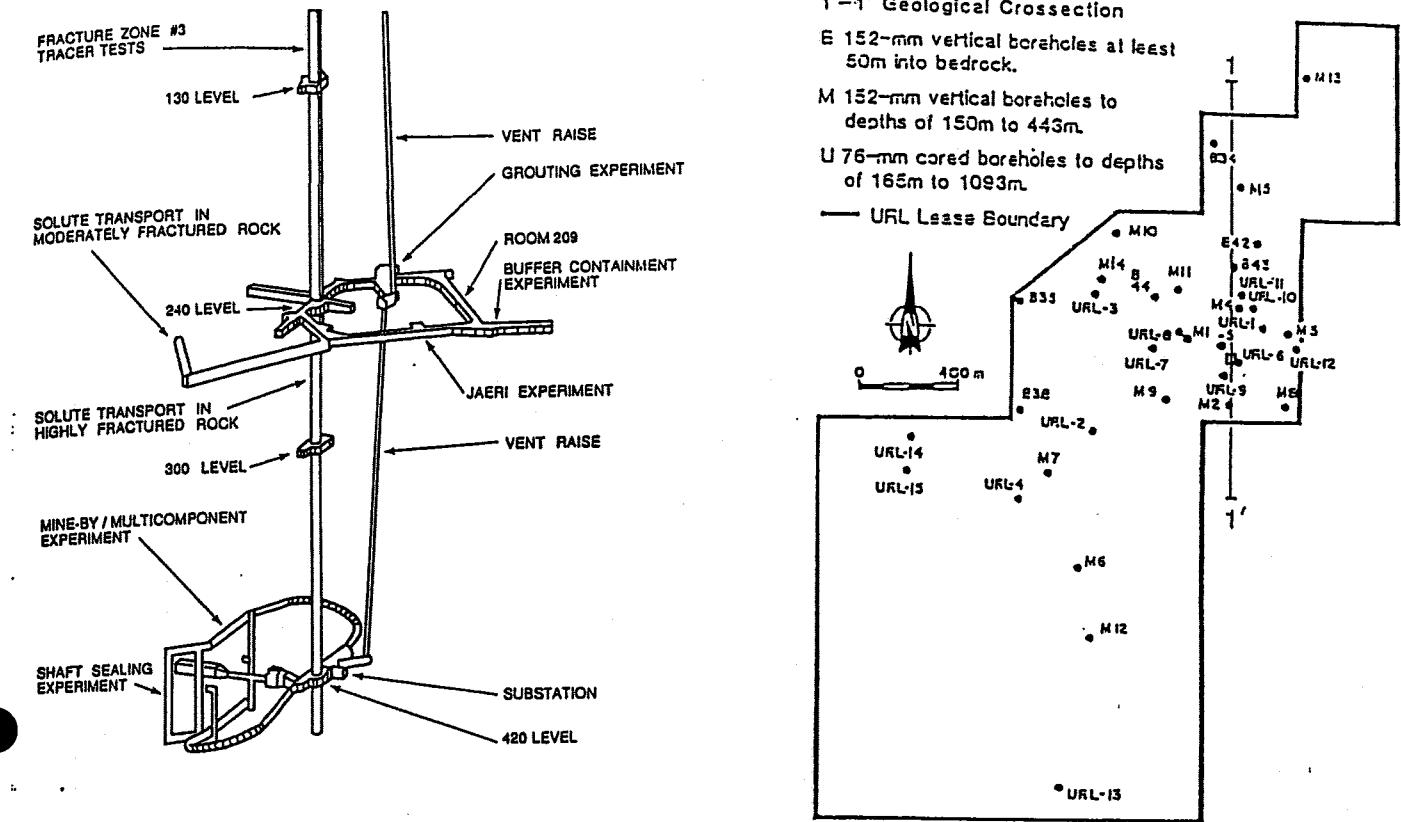


図-7 調査研究の対象とした施設の概要（URL）

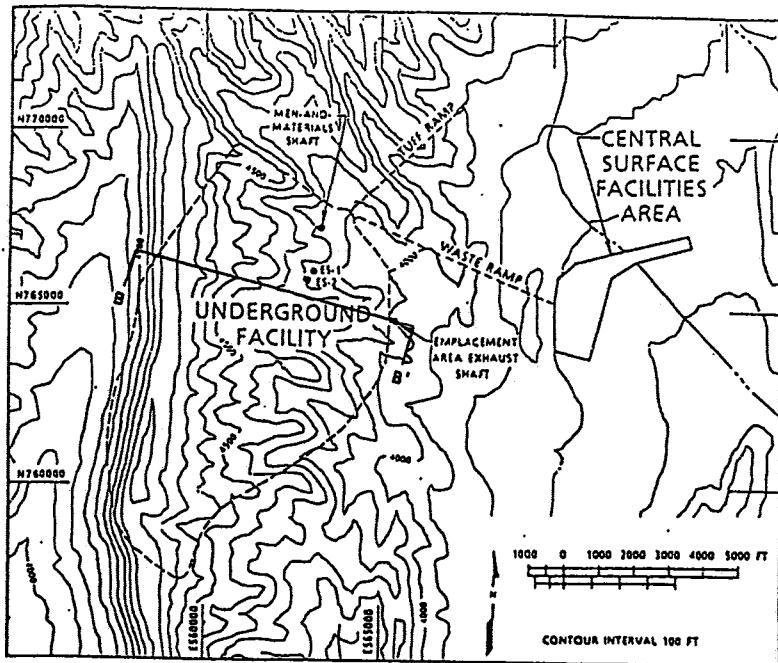


図-7 Topographic map showing the locations of the underground and the central surface facilities of the repository. The locations of the exploratory shafts are indicated by ES-1 and ES-2.

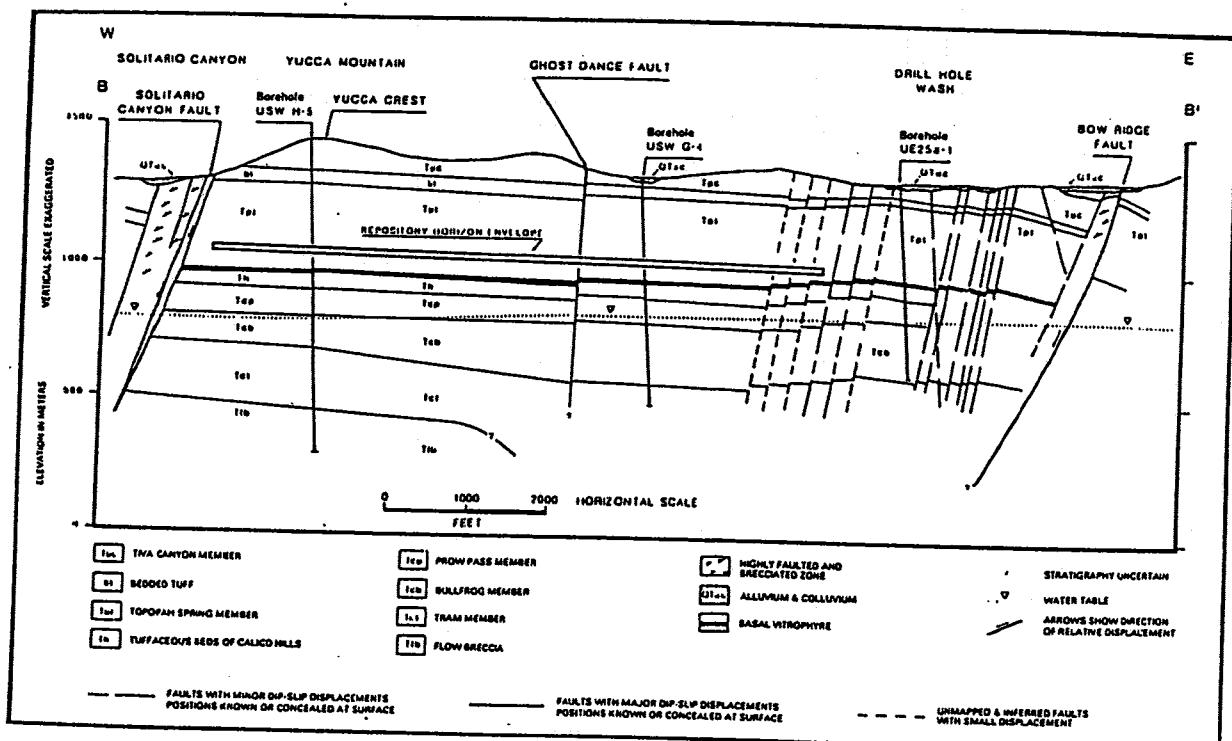


図-8 調査研究の対象とした施設の概要 (Yucca Mt.)

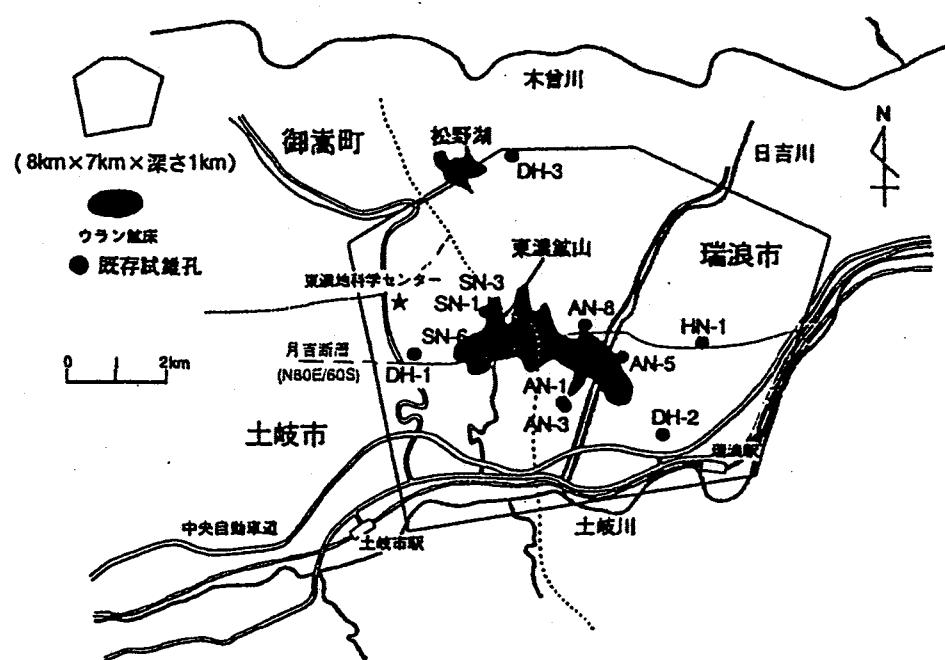
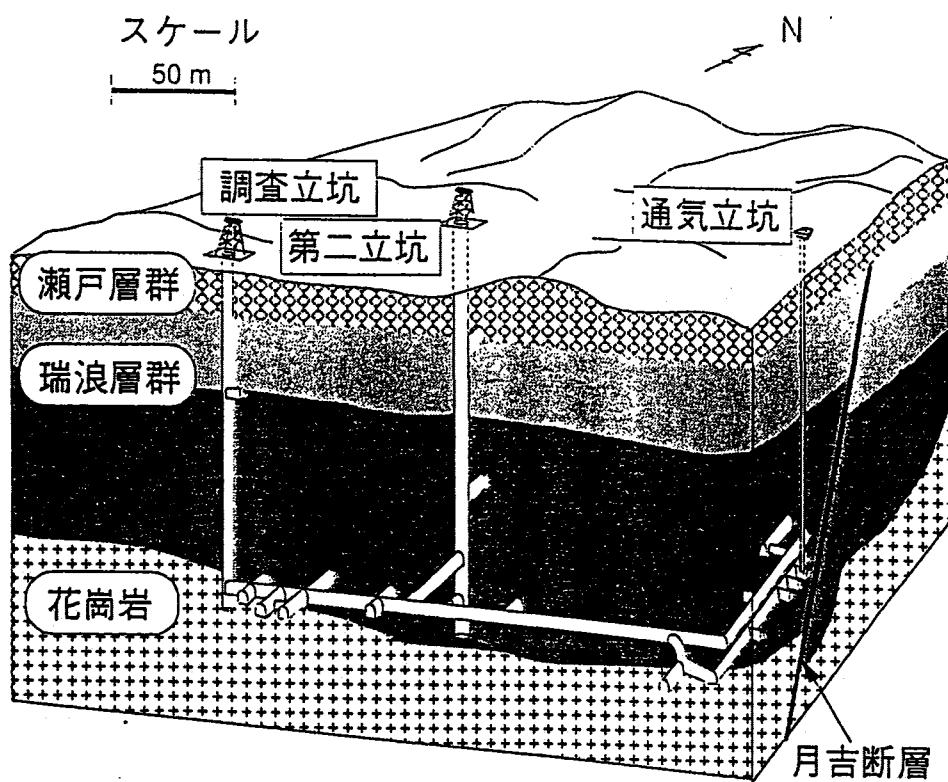
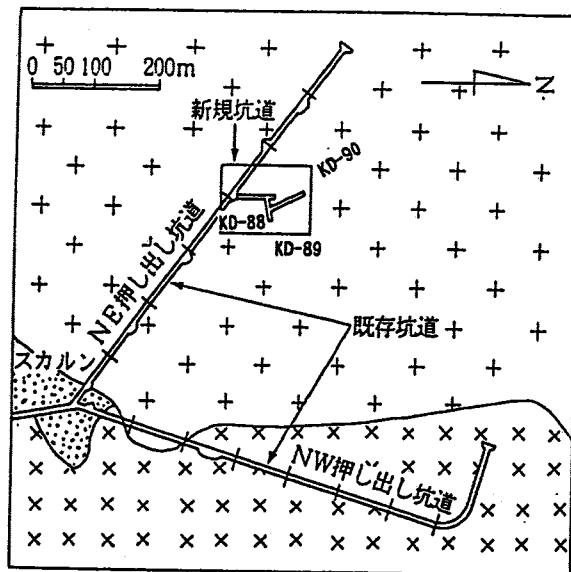


図-9 調査研究の対象とした施設の概要（東濃）

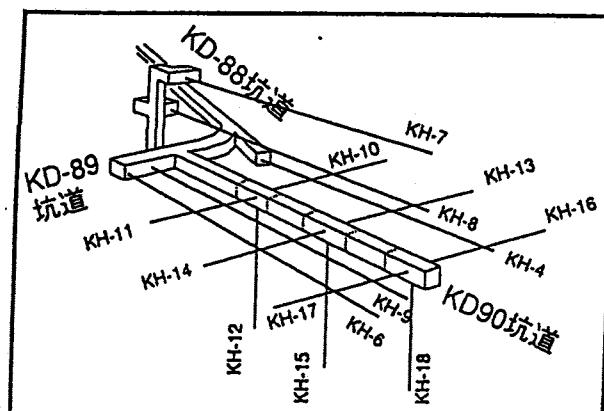


### 凡例

[+] 栗橋岩体 (花崗閃綠岩)

[×] 蟹岳岩体 (花崗閃綠岩～閃綠岩)

[●] スカルン

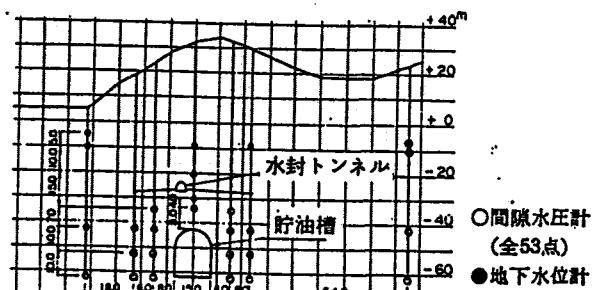
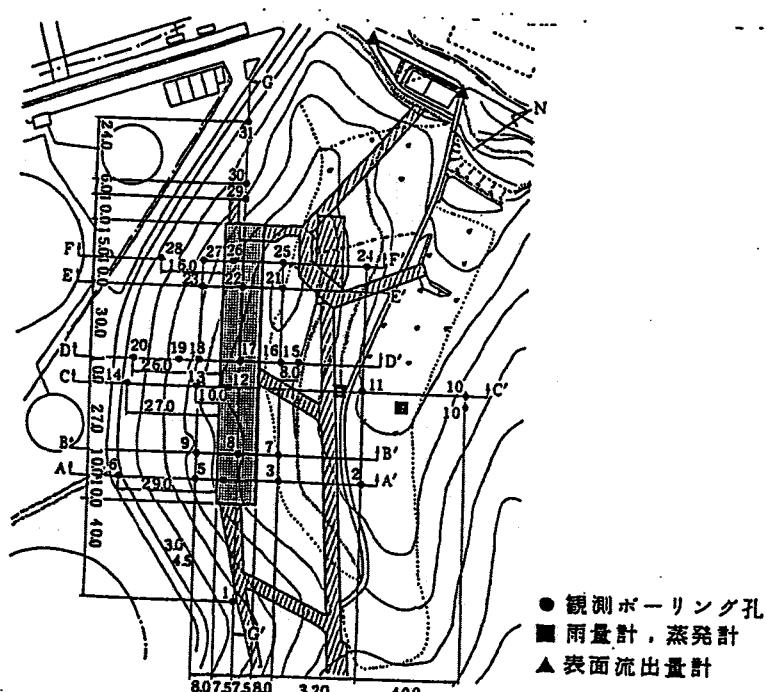
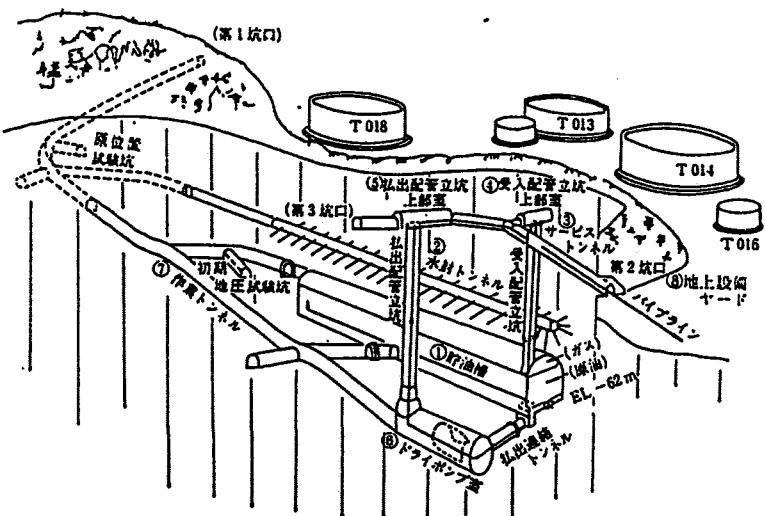


KD-90坑道付近のボーリング孔配置図

図-10 調査研究の対象とした施設の概要 (釜石原位置試験場)

構造概要

番号	名称	規模・寸法	備考
1	貯油槽	巾 高さ 延長 15m×20m×112m	タンク容量 25,000㎘ (原油)
2	水封トンネル	巾 高さ 延長 4.0m×4.0m×2824m	地下水水面の低下を防止し、人工注水効果を実証する。
3	サービストンネル	巾 高さ 延長 4.5m×4.5m×134.6m	配管路を通すためのトンネル
4	受入配管立坑	高さ 4.3m×4.3m×46.5m	原油を受入れるための配管路を通すトンネル
5	派出配管立坑	高さ 6.0mφ×68.8m	原油を派出するための配管路を通すトンネル
6	ドライポンプ室	高さ 8.0mφ×34.0m	原油を派出するためのポンプ頭を置く部屋
7	作業トンネル	巾 高さ 延長 4.5m×4.5m×4427m	貯油槽本体に取付くための作業用斜坑
8	地上設備ヤード		排水処理施設、空氣ガス設備等のヤード



地下水位計、間隙水圧計配置例

図-11 調査研究の対象とした施設の概要（菊間実証プラント）

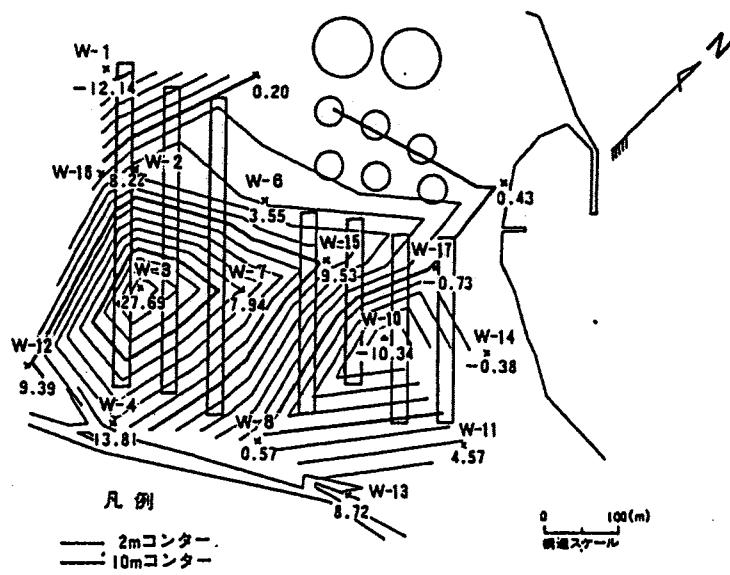
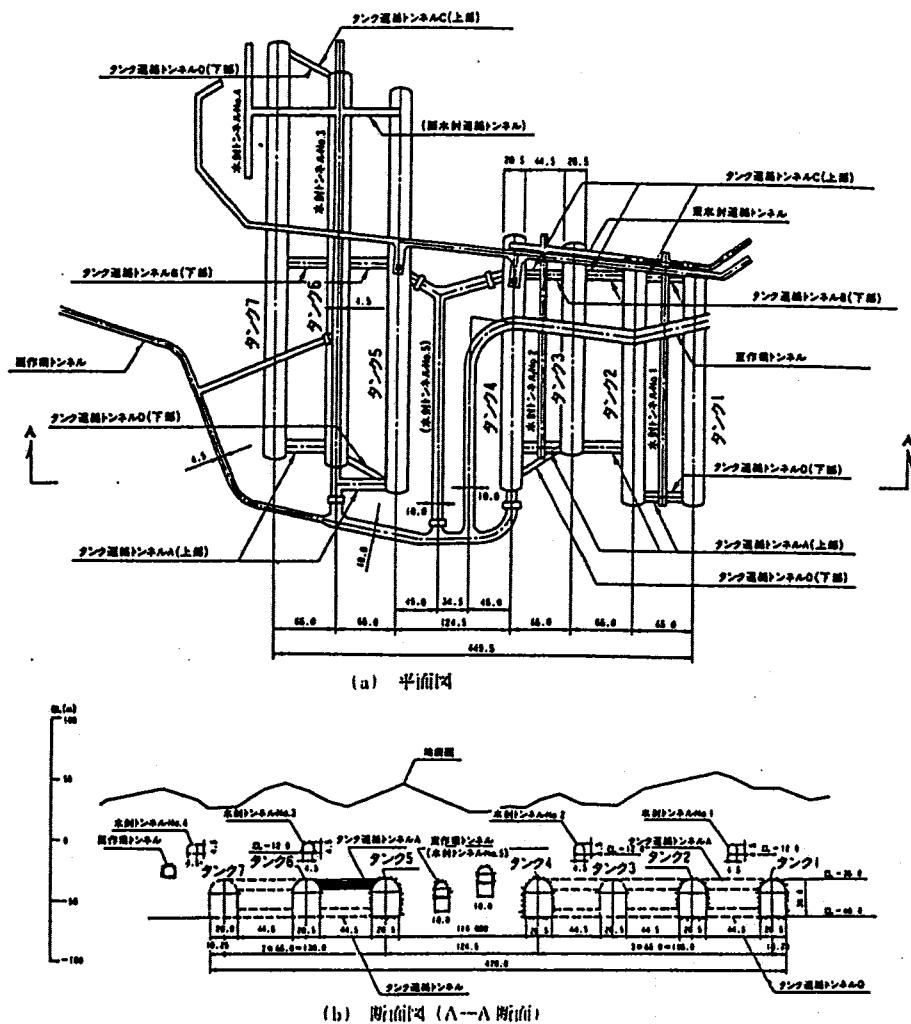


図-12 調査研究の対象とした施設の概要（菊間地下石油儲蔵基地）

表-9(1) 収集情報のとりまとめシート

施設名		土被り	m <th>調査研究の目的</th> <td></td>	調査研究の目的	
地下構造物の概要				調査項目と調査手法	
地形・地質				備考	
地質構造				備考	
水理学環的境				備考	
地球化環的境				備考	

表-9(2) 収集情報のとりまとめシート

施設名

解 析 手 法	コード名			
	コードの内容		解析結果	検証手法
	解析モデル			
解 析 条 件	境界条件			
	水理物性			

表-9(3) 収集情報のとりまとめシート

施設名

施設名	備考
-----	----

### 3.2 領域の規模による検討

調査試験法や数値解析手法においては、個々の調査試験法や数値解析手法が対象とする領域の規模が非常に広範に及んでいる。したがって、調査研究対象の規模（対象領域、深度）に留意して、前項で述べた収集データを解析手法ごとや調査手法ごとに整理した。

#### 3.2.1 領域の規模（スケール）の定義

調査試験法や数値解析手法では対象とするスケールが非常に広範に及んでおり、例えば、調査試験法においては、広域な地下水流动を取り扱うものから亀裂の開口幅を計測して亀裂面内の地下水の浸透状況を探ろうとするものまで、調査試験対象となるスケールは異なっている。一方、数値解析手法においても、断層・破碎帯などの大規模な構造をモデル化するものから、微細な亀裂までをモデル化の対象とするものまでスケールは一様ではない。

本検討では、図-13に示す広域スケール、サイトスケール、局所スケールの3つのスケールを想定したので、その概要を以下に示す。

##### (1) 広域スケール

広域スケールの規模の目安は数km以上であり、本スケールでは人工バリアから漏出してきた核種が最もクリティカルな経路を伝わって生物圏に至るまでの時間や経路の把握が重要となる。したがって、その領域は広範な地下水流动を考慮できるとともに、サイトの掘削や漏出した核種が影響を及ぼし得る領域をすべて含むことが必要であり、このスケールでの調査や解析の主な対象は、主にクリティカルな経路となり得る主要な断層などである。

##### (2) サイトスケール

サイトスケールの規模の目安は数十m～数kmであり、広域スケールに連絡する主要な亀裂群などにおける地下水の流れや核種の移行経路の把握が重要である。すなわち、サイト周辺の最も核種が移行しやすい経路をとらえ、その中をどのように核種が移行するかを把握することが必要になるため、サイトスケールでの調査や解析の主な対象はサイト周辺の高透水性亀裂であり、透水性が大きいほど調査、解析を実施する優先順位は高くなる。

##### (3) 局所スケール

局所スケールの規模は目安として数cm～数十mであり、サイトスケールの調査で判明した高透水性亀裂内の浸透経路やチャンネリング現象、亀裂交差部におけるミキシングなどのメカニズムの把握が重要である。したがって、調査や解析の主な対象は亀裂面の凹凸や亀裂の開口幅とこれに依存する亀裂内の透水性分布などである。

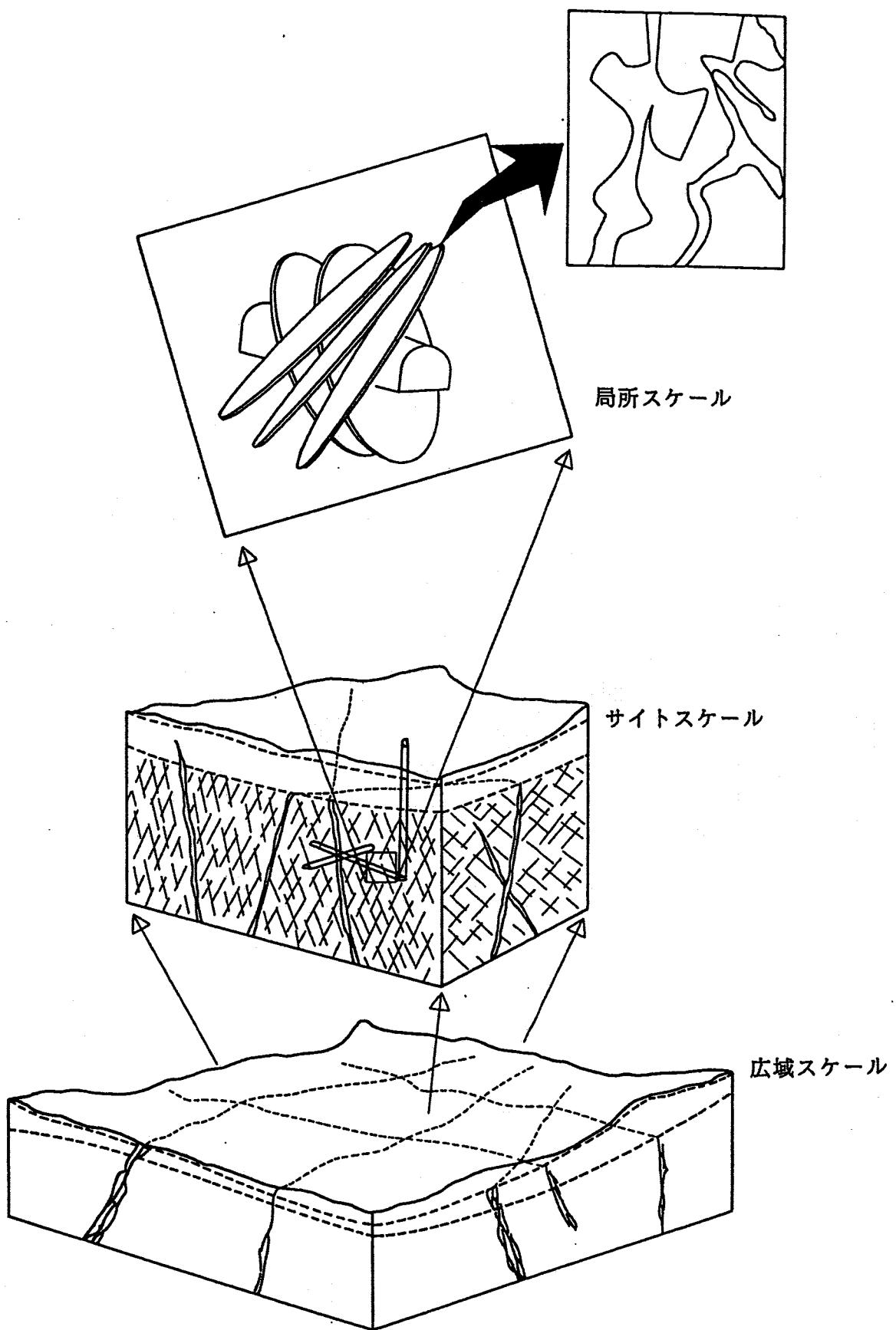


図-13 スケールの定義

### 3.2.2 解析手法ごとのとりまとめ

前項で設定した広域、サイト、局所の3つのスケールを念頭において、3.1項でとりまとめた収集情報の分析を行った。

表-10は、3.1項で挙げた研究事例ごとに、施設名、土被り、地形・地質の特徴、水理学的環境、地化学的環境、調査研究目的、解析手法、解析条件、解析結果並びに検証手法の特徴を整理したものであり、解析条件の項に前項で設定した3つのスケールのどれに該当するかを示した。

#### (1) 解析手法について

解析手法をみると、有限要素法（FEM : Finite Element Method）によるものがほとんどを占めていることが理解される。しかしながら、米国においては（有限）差分法（FDM : Finite Difference Method）によるコードが多くなっている。

一般に考えられる有限要素法と差分法の比較を表-11に示す。差分法はデータ作成の容易性では有利であるが、モデルに組み込む地質状況の不均質性、ボーリング孔、坑道、さらには初期の地下水状況の表現などメッシュ分割の柔軟性に対する精度面においては劣る面がある。また、差分法は、計算上、計算機そのものの容量が小さくてすむという有利さもあるが、最近のコンピュータ技術の進歩においてはきわだった利点といえるものではなくなっている。全体としてみればそれぞれに一長一短があり、どちらが絶対的に優れているとは述べることができない。

地下水を取り扱う解析手法には、この他に境界要素法（BEM : Boundary Element Method）があり、微分方程式を積分方程式に変換し、その積分を離散化して解くものである。この手法は、境界上の未知量だけを取り扱えばよいことから、差分法以上に少ない計算容量で解くことが可能である。しかしながら、不均質性や異方性の考慮が少しくなく、複雑な地盤条件での適用においては制限を有するため、広くは使用されないものと思われる。

また、これらの調査結果を前述のスケールに基づいて整理すると以下のとおりである。

まず、広域スケールでは不均質性を考慮した連続体解析がすべてである。連続体解析において主に考慮すべき不均質性としては、具体的に下記の3項目が挙げられる。

- ① 透水ゾーンや高透水性亀裂をモデル化する
- ② 透水テンソルの異方性を考慮する
- ③ 透水係数の不均質性を考慮する

このうち、①透水ゾーン・高透水性亀裂のモデル化については、

- 要素を用いる手法
  - 透水ゾーン・高透水性亀裂を含む要素の透水テンソルを用いる手法
- の2通りがある。また、②透水テンソルの異方性は、クラックテンソルなどを用いる

ことによって考慮することが一般的であり、③透水係数の不均質性は地質統計学的手法などを用いることによってモデル化することができる。

サイトスケールになると、連続体解析の他に亀裂の幾何学性状を考慮したフラクチャーネットワーク解析手法も用いられている。今回の検証までを含めた解析の調査ではストリバと釜石での例が抽出されているが、将来的な結晶質岩における地下水流动評価においてはサイトスケール程度の規模での亀裂を経路とする評価の重要性がより大きくなると思われる。

局所スケールにおける解析は、今回の調査ではグリムゼル、URLおよび釜石での3件が抽出されており、いずれも亀裂の面内を連続体でモデル化した解析を実施している。ただし、今後、チャンネリングなど面内での地下水流动の現象が十分把握されるようになれば、前述のフラクチャーネットワークモデルを用いた解析などへの移行もあり得よう。

表-12に連続体解析とフラクチャーネットワーク解析を対比した結果を示す。

なお、使用電算機など解析環境に関する情報は得られなかった。

## (2) 解析モデルについて

今回の調査で得られた解析モデルの多くは3次元である。

広域スケールについてみると、モデルの多くは3次元であるが、モデル化の対象となるものは堆積岩の特定の帶水層や地層の不均質性、すなわち大規模な断層・破碎帯などである。したがって、比較的均質な地盤を対象とする場合には2次元解析が用いられていることもある。

サイトスケールについてみると、そのほとんどが3次元解析であるが、モデル化の対象となるのは地下水の流动経路となるような亀裂や断層・破碎帯である。ただし、塩水の流入や特定の破碎帯などを経路とする地下水流动など、流动形態が明らかで3次元で解析を行なわず次元を下げた解析でもモデル化として十分と考えられる場合には、次元を下げて準3次元解析、あるいは2次元解析が行なわれることもある。

局所スケールについては、前述のとおり亀裂内のチャンネリング現象のような面内の流动現象を取り扱っているため、2次元解析が一般的に行われている。しかしながら、亀裂や破碎帯などの不連続面の開口幅などについての情報が得られるようになると、しだいに3次元解析へ移行していくものと思われる。

(3) 解析結果について

個々の研究事例で得られる結果は表-10に示したとおりで、まとめると以下のようないものがある。

解 析 項 目	スケール		
	広 域	サ イ ト	局 所
地下水位分布（水位低下量）	2	—	—
地下水頭分布（ピエゾ水頭分布、間隙水圧分布）	9	7	3
動水勾配分布	—	—	1
流向流速分布	6	2	1
地表などへの湧水量	1	1	—
空洞などへの湧水量	—	10	1
地下水の移動時間	2	1	—
地下水の移動経路	3	—	—
飽和度分布	—	2	—
トレーサーの破過曲線ないしトレーサー回収量	—	7	1
トレーサーの拡散状況	—	—	2

(数字は件数)

上記のように、広域スケールでの解析アウトプットは地下水頭分布（ピエゾ水頭分布、間隙水圧分布）や流向流速分布によることが多い。次いで、地下水の移動経路、移動時間や地下水位分布（水位低下量）によって評価する場合が多い。

一方、サイトスケールを対象とした解析アウトプットでは、空洞などへの湧水量、地下水位分布（水位低下量）、地下水頭分布並びにトレーサーの破過曲線、回収量による場合が非常に多いことが読み取れる。

局所スケールについては、件数自体が少ないこともあるが、地下水頭分布やトレーサーの拡散状況による解析アウトプットが多い。

#### (4) 検証手法について

個々の研究事例で実施された検証項目については前出の表-10中に示したが、これらを広域、サイト、局所のスケールごとに整理すると以下のとおりである。

解 析 項 目	スケール		
	広 域	サ イ ツ	局 所
地下水位分布（水位低下量）	—	7	—
地下水頭分布（ピエゾ水頭分布、間隙水圧分布）	3	4	2
空洞などへの湧水量	2	13	1
トレーサーの破過曲線ないし回収量	—	7	—
トレーサーの拡散状況	—	—	2

（数字は件数）

これらより、広域スケールでの解析結果の検証は地下水頭分布や空洞などへの湧水量によることが多く、サイトスケールでの解析結果に対しては、湧水量測定の他に地下水位分布やトレーサーの破過曲線や回収量によって検証を行うことが多くなる。また、局所スケールについては件数自体が少ないが、地下水頭分布やトレーサーの拡散状況によって解析結果を検証していることがわかる。

表-10-(1) 解析手法、解析条件、解析結果と検証手法のまとめ

施設名	土被り	地形・地質・地質構造の特徴	水理学的環境の特徴	地化学的環境の特徴	調査研究の目的	解析コード名と解析手法	解析条件の特徴	解析結果の特徴	検証項目
ストリバ	360	ストリバ花崗岩	地下水の主要な経路は破碎帯である。	海水起源の地下水でなく、中氷期の涵養と考えられている。	ストリバ周辺の広域地下水流动システムの検証。	C FEST (連続体解析) 3D FEM	100km×3.000m (広域スケール)	水頭分布、流入・流出域、湧水量	坑道湧水量
	360 ~410				坑道周辺の水頭分布を不均質モデルで評価。	"	4km×4km×3.000m (広域スケール) (20km)	水頭分布	
					SCVサイトのDホール湧水量の予測における、フラクチャーネットワーク解析手法の適用性評価と解析手法の開発。	TRINET (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM	(サイトスケール), 決定的手法によるモデル化、実測値をもとにした水頭固定境界の設定、アニーリング手法による透水性の見直し	湧水量 (ボーリング孔総湧水量、フラクチャーゾーン別湧水量)	湧水量 (ボーリング孔総湧水量)
					"	MAFIC (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM	200×200×200m (サイトスケール), 統計的手法によるモデル化、実測値をもとにした水頭固定境界の設定、パッカーテストと亀裂状況から亀裂の透水性評価	"	
					"	NAPSAC (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM	150×150×100m (サイトスケール), 統計的手法によるモデル化より広範な解析による計算値をもとにした水頭固定境界、透水試験結果から亀裂の透水性評価	"	
					SCVサイトのValidation Drift建設による地下水流动と水頭の変化において、フラクチャーネットワーク解析手法の適用性の評価。	TRINET (フラクチャーネットワーク解析) 2D・3D FEM	周辺ボーリング孔の水頭値に合う水頭の設定 (サイトスケール)	湧水量 (Validation Drift湧水量等), 水頭変化の状況	湧水量 (Validation Drift湧水量), 水頭変化の状況
					"	MAFIC (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM	200×200×200m (サイトスケール), 実測値をもとにした水頭固定境界の設定、パッカーテストやクロスホール試験等から評価	"	湧水量 (Validation Drift湧水量等), 水頭変化の状況
					"	NAPSAC (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM	150×150×100m (サイトスケール), 計算値をもとにした水頭の設定	湧水量 (Validation Drift湧水量等)	Validation Driftの亀裂特性湧水量
					SCVサイトで実施されたトレーニング試験をフラクチャーネットワーク解析により予測し、解析手法の適用性を評価する。	TRINET (フラクチャーネットワーク解析) 2D FEM	(サイトスケール)	破過曲線	破過曲線
					"	MAFIC (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM	400×400×400m [修正SDEモデル], 200×200×200m [Validation Driftモデル] (サイトスケール), 実測値をもとにした水頭の設定	"	"
					"	NAPSAC (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM	40×20×5m, 40×20×10m (サイトスケール)	"	"
					SCVサイトで実施されたトレーニング試験を連続体解析により予測・評価する。	C FEST (連続体解析) 3D FEM	1.100×1.800×600m [MINE 2モデル], * * * × 180m [SCVモデル] (サイトスケール)	"	"
フィンション		花崗閃緑岩		花崗岩の透水性は極めて低く、水みちとなる可能性のある破碎帯が存在する。	サイト内部に存在するゾーン2の地下水流動を評価する。	NAMMU 3D FEM	43km×1.500m [準広域モデル], 6.6km×1.500m [局所モデル] (広域スケール)	流動経路、ブラックス分布、水圧分布	-
					塩水の存在が地下水流动に影響を与えるか否かを検討する。	NAMMU 2D FEM	2.500×1.500m (サイトスケール), 不透水境界、静水圧境界	-	-
					サイト内部に存在する、ゾーン2と呼ばれる破碎帯の水理特性を、水理試験結果から評価する。	SUTRA 2D FEM	900×1.000m (サイトスケール), 2.800×1.800m (サイトスケール)	水位低下量	水位低下量
HRL	0~500	緑色岩、中性変火山岩類、細粒花崗岩類、アグロ花崗岩、細粒花崗岩、アブライト、ペグマタイト、輝緑岩、輝綠岩、マイロナイト	花崗岩の透水性は極めて低く、水みちとなる可能性のある破碎帯が存在する。	塩分濃度が高く、海水と淡水の混合を考えられる。	長期揚水試験とトレーナー試験の結果をフラクチャーネットワーク解析により評価する。	MAFIC (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM	1.000×1.000×1.000m (サイトスケール), 周辺境界は静水圧境界	水位低下、揚水孔流入量、破過曲線	水位低下、揚水孔流入量、破過曲線
					長期揚水試験とトレーナー試験の結果を不均一性を考慮した連続体手法により評価する。	3D	900×510×750m (サイトスケール), 全側面水位固定、単孔式透水試験	亀裂特性、水位低下、破過曲線	水位低下、破過曲線
グリムゼル	450	先カンブリア紀の花崗片麻岩/片岩類を基盤とし、花崗岩類が貫入	裂か系や破碎帯が地下水と下水の流動経路となっている。	天水起源の地下水とを考えられる。	トンネルに現れる破碎帯に対する水理試験結果を評価して、後に行われるトレーナー試験を設計する。	PDE /PROTRAN 2D FEM	φ100m程度 (局所スケール)	水圧分布、湧水量、トレーナー回収量	水圧分布、湧水量、トレーナー回収量
Oberbauen	800~1.000	marl, 貫入岩、石灰岩	処分場付近のmarl層の上部にいくつかの高透水ゾーンが存在する。	処分場付近の地下水分布のモデル化	2D FEM	約3.400×約1.700m (広域スケール) 透水係数により10ケース実施	地下水位、marl層への浸透量	-	-
Project Gewähr		アルプス結晶質基盤がアルプス山体から供給された堆積岩により被覆	帶水層4つ、不透水層6つを想定している。	北スイス地方での広域地下水流动評価	3D FEM	約2.500×2.500m×650m (サイトスケール), 透水係数、境界条件により7ケース実施	水圧分布、流動量、流動経路、滞留時間	-	-
Veitsivaara	500	花崗岩、片麻岩		サイトの安全性に関する地下水解析研究に対する検証	FR FLOW 3D FEM	200km×2.000km [広域モデル], 20km×2.000km [サイトモデル] (広域スケール)	水頭分布、流動経路、流動速度	水質計測、揚水試験	

表-10-(2) 解析手法、解析条件、解析結果と検証手法のまとめ

施設名	土被り	地形・地質・地質構造の特徴	水理学的環境の特徴	地化学的環境の特徴	調査研究の目的	解析コード名と解析手法	解析条件の特徴	解析結果の特徴	検証項目
URL	440	先カンブリア紀のLac du Bonnet花崗岩で、地表から240mまでは亀裂の多い桃色花崗岩、下部は灰色花崗岩からなる。緩傾斜の破碎帯が3本あり1本が立坑に現われている。	地質的擾乱、人為的擾乱を受けておらず平均 $10^{-6}$ cm/sec以下の低透水性岩盤である。		URL建設時の地下水挙動を予測する。 仮想の放射性廃棄物処分場近傍の地下水挙動を評価する。 立坑掘削前に作成した地下水流动モデルによる予測値を立坑掘削過程の実測値と比較検討を行う。 立坑掘削前の地下水状況をモデル化し掘削後の地下水挙動を予測する。Room209を対象に水理機構を解析する。	SWIFT 3D FDM	30×38×1.25km [広域モデル] 3×4×?km [サイトスケール] (広域スケール)	水位低下量	-
	240				MOTIF 2D FEM 3D FEM 3D FEM MOTIF 2D FEM	27×4km (広域スケール) 3.8km×500m (サイトスケール) 5×6×2km (サイトスケール) (局所スケール)	流速分布、地表までの移行経路と到達時間 立坑湧水量、水位低下量	立坑湧水量、水位低下量	
Yucca Mt.		800~1,600万年前に起こった噴火で形成された火山岩で、熔結凝灰岩と非熔結凝灰岩からなる。	処分場の予定地は不飽和帯に位置しており、年降水量6インチのうち地盤に浸透するのは0.02インチ以下である。		将来的な涵養量と透水性の変化、及び地質状況の違いによる飽和帯地下水状況の差異を評価する。 処分場を含む不飽和帯を対象に、境界条件の設定を変えた解析でモデル化についての考察を実施する。  調査用立坑が周辺の水分分布にどのような影響を与えるのかを評価し、また、雨水の存在を検出する可能性を評価する。	PORFLOW 2D FDM SUMO 2D FDM PORFLOW-3 2D・3D FDM	250×250km [広域モデル]、50×50km [準広域モデル] (広域スケール) 3,000×290m (サイトスケール) 615×300×550m [3次元]、4,000×668m [2次元] (サイトスケール)	水頭分布、流速・流向分布 流速分布、飽和度分布、地下水面までの到達時間、10万年後のテクネシウム99の濃度分布 流速分布、水頭分布、飽和度分布	掘削前：水頭値、揚水試験結果 (揚水量/水位低下量) 掘削後：水位低下量、揚水量、揚水試験結果
Oskwood		砂岩を中心とする堆積岩、岩塩			岩塩にHLW処分の適応性評価のために広域地下水流动を解析する。	TERZAGI 3D FDM	1,300km×(広域スケール)	流速分布、水頭分布,	-
Chem Dyne		砂礫			危険物処分サイト周辺の地下水流动を評価する。	SWIFT 2D FDM SWIFT 3D FDM SWIFT 3D FDM	16× km [広域モデル] (広域スケール) 3,200× ×55m [局所モデル] (広域スケール) 488×518×24m [サイトモデル] (サイトスケール)	-	-
San Andres-Glorietta	300	石灰岩、砂岩の2つの帶水層で北北東にゆるく傾斜	地表から300mの位置にある100mの帶水層を対象とする。		帶水層からの揚水による広域地下水流动に対する影響を評価する。	2D FDM	157×122km (広域スケール) 138×88km (広域スケール) 65×37km (広域スケール)	地下水位低下量	-
Love Canal					広域地下水流动モデルを設定し、地下水挙動を検証する。		約15×11km (広域スケール)	水頭分布	水頭分布
東濃	0~150	美濃帯の古生層(砂岩、頁岩、チャートなど)が基盤をなし、苗木、上松型花崗岩、新第三紀瑞浪層群、瀬戸層群と第四紀層が被覆する。	立坑周辺の地下水流動は地形形状や水理地質構造により規制されている。		立坑掘削に伴う周辺岩盤の地下水流動を評価する。 中部日本を対象に地下深部の地下水流动を評価する。 東濃地域を対象に地下深部の地下水流动を評価する。	TAGSAC 3D FEM TAGSAC 3D FEM TAGSAC 3D FEM	300×300×300m (サイトスケール) 300×500×10km (広域スケール) 8×7×3km (広域スケール)	ピエゾ水頭分布、立坑湧水量 ピエゾ水頭分布、ダルシー流速、動水勾配、水収支 ピエゾ水頭分布、ダルシー流速、動水勾配、水収支	ピエゾ水頭分布、立坑湧水量 ピエゾ水頭分布、ダルシー流速 ピエゾ水頭分布
釜石	600	花崗閃緑岩		化学分析、安定同位体及びトリチウムの調査から、標高の高い所から浸透した地下水である可能性がある。	湧水量測定結果から、フラクチャーネットワーク解析手法の我が国地質条件に対する適応性を評価する。 トレーサー試験結果から、フラクチャーネットワーク解析手法の我が国地質条件に対する適応性を評価する。 割れ目面上の地下水流动経路の透水性を評価する。	MAFIC (フラクチャーネットワーク解析) 3D FEM " " 2D FEM (局所スケール)	200×200×200m (サイトスケール) 100×100×100m (サイトスケール) (局所スケール)	坑道湧水量 破壊曲線 透水係数分布、ポテンシャル分布、流速分布、トレーサー到達時間、トレーサー浸出量	坑道湧水量 破壊曲線 トレーサー到達時間、トレーサー浸出量
菊間実証プラント	50~70 最大70	領家花崗岩	岩盤全体としては堅硬であり、平均透水係数は $5 \times 10^{-6}$ cm/secである。		合理的な水封システムの設計に関する知見を得る。(地下水位) 合理的な水封システムの設計に関する知見を得る。(間隙水圧)	Q3D FEM 2D FEM 2D FEM 3D FEM Q3D FEM	(サイトスケール) (サイトスケール) 320×123m (サイトスケール) 400×320×123m (サイトスケール) 約650×630m (サイトスケール)	地下水位分布、貯油層湧水量 間隙水圧分布、空洞湧水量	地下水位、貯油層湧水量
菊間地下石油備蓄基地	80~100	領家花崗岩	破碎部を含めて透水係数は $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/secである。		空洞掘削時の地下水挙動の評価への等価多孔質モデルの適用性について検討した。			間隙水圧分布、空洞湧水量 地下水位	地下水位

表-11 有限要素法と差分法の比較 (Wilson, 1980MSを改定) \*

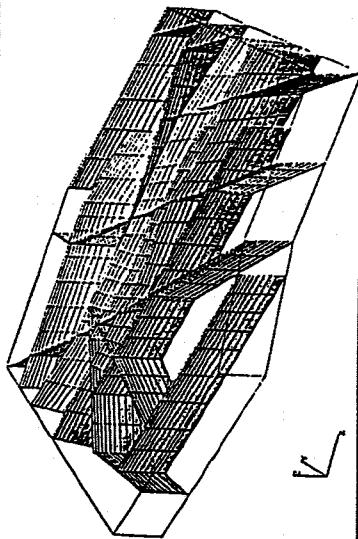
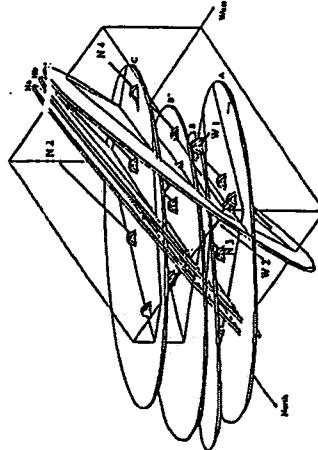
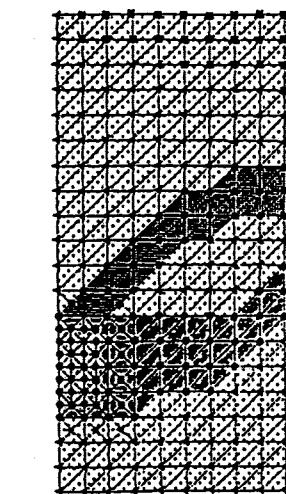
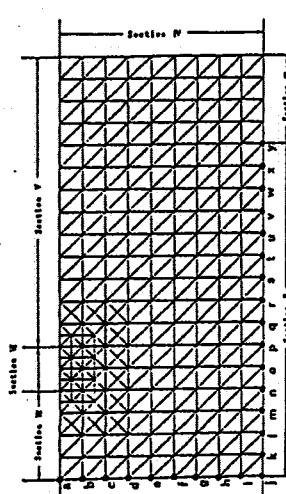
項目	有限要素法	差分法
1. 実用性		
○メッシュ分割	手作業ないし自動作成でやや面倒	容易に自動作成
○データ入力	手作業、複雑な要素分割の場合には煩雑	手作業でも容易、メッシュデータの場合には自動作成可能
2. 精度		
○境界	忠実に表現可能	近似的に再現
○観測井などの位置	忠実に表現可能	近似的に再現
3. プログラム		
○作成の容易さ	やや難しい	容易に作成可能
○普及度	マニュアルの完備したプログラムも多い	マニュアルの完備したプログラムが多い
○計算機容量	大きな係数行列ができるため、大きな容量を必要とする。小容量化のためには特殊な解法が必要	繰り返し解法を利用することで小さな容量しか必要としない。特に3次元計算ではその効果が大きい
○計算時間	計算ステップは少なくてすむが、大次元の連立1次方程式を解くため1ステップの計算時間は長い	多くの繰り返しステップが必要。ただし、1ステップの計算時間は短い

\* 藤崎克博 (1990) : 誌面講座 地下水数値計算法(6)1-5, 差分法の基礎, 地下水学会誌, 第32巻, pp. 285~292

表-12 連続体解析とフラクチャーネットワーク解析の比較

	連続体解析	フラクチャーネットワーク解析
どのような手法でも必要なパラメータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○透水ゾーンや高透水性亀裂の走向・傾斜、位置、大きさや連結性</li> <li>○透水係数</li> <li>○貯留係数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○すべての亀裂の走向・傾斜や大きさ</li> <li>○透水係数（原位置試験結果による）</li> <li>○貯留係数</li> </ul>
手法によっては用いられることがあるパラメータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○透水ゾーンや高透水性亀裂以外の部分に対する</li> <li>●透水テンソルの異方性 (クラックテンソルなどによる)</li> <li>●透水係数の不均質性 (地質統計手法などによる)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○亀裂密度</li> <li>○隣接亀裂間の距離</li> <li>○透水ゾーンの位置、幅、方向、広がりや連結性</li> <li>○亀裂同士の切り、切られの頻度</li> </ul>

表-13 モデル化の対象とモデル例

スケール	モデル化の対象	モ デ ル 例
広 域	<ul style="list-style-type: none"> <li>○高透水地層などの地質不均質性</li> <li>○大規模な断層・破碎帶</li> </ul>	<p><u>Veitsivaara</u></p> 
サ イ ト	<ul style="list-style-type: none"> <li>○地下水の流动経路となる亀裂</li> <li>○断層・破碎帶</li> </ul>	<p><u>ストリバ</u></p> 
局 所	<ul style="list-style-type: none"> <li>○亀裂内のチャンネリング現象</li> </ul>	<p><u>釜 石</u></p>  

### 3.2.3 調査手法ごとのとりまとめ

前項では、収集した情報を、対象とするスケールを念頭においた上で、解析・検証の面から解析手法、解析におけるモデル化、解析結果、検証方法について分析した。本項では、収集情報に対して調査の面から分析を行った。具体的には、用いられた調査手法や数量を表-14に整理し、調査項目のとりまとめに際しては、下記の4つの分類に従った。

- モデル評価のための調査
- 物性評価のための調査
- 境界条件評価のための調査
- 検証のための調査

また、これらの結果を広域、サイト、局所の各スケールごとに整理した結果の概要を以下に示す。

#### 広域スケール

広域スケールにおけるモデル評価のための調査としては、「地質調査」「地表からのボーリング調査」「物理探査」「物理検層」などが見られる。物性評価のための調査としては、「単孔式透水試験」や「トレーサー試験」が用いられており、境界条件評価のための調査は「水収支調査」のみであった。解析結果の検証のための調査としては、「湧水量測定」や「地下水位、地下水圧測定」が行われている。

#### サイトスケール

今回の研究範囲では、サイトスケールに関する事例が最も多い。モデル評価のための調査としては、「ボーリング調査」「物理検層」「坑道からのボーリング調査」や「坑道からの物理検層」などが実施されており、物理評価のための調査としてはボーリング孔を利用した「透水試験」「湧水圧測定」「流向流速測定」「孔間透水試験」が実施されている。

また、境界条件評価のための調査としては、「地下水位・地下水圧測定」のみであるが、検証のための調査としては「ボーリング孔・坑内湧水量測定」「地下水位・地下水圧測定」「トレーサー試験」と多岐にわたる試験が行われている。

#### 局所スケール

局所スケールにおけるモデル評価のための調査としては、今回の研究範囲では「ボーリング調査」のみであり、物性評価のための調査も「単孔式透水試験」と「坑道湧水量測定」だけであった。また、境界条件評価のための調査についての記述は見当たらず、解析結果の検証用調査としては「湧水量測定」「トレーサー試験」などが実施されている。

表-14-(1) 解析手法ごとの調査項目のまとめ

サイト名	モデル評価のための調査	物性評価のための調査	境界条件評価のための調査	検証のための調査
ストリバ(1), (2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 地表からのボーリング孔</li> <li>◦ 坑内からのボーリング孔</li> <li>◦ ボーリング孔の亀裂頻度調査</li> <li>◦ 水理試験実施時の地表、坑内ボーリングの間隙水圧測定と地表ボーリングの地下水位測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 注水法ないし揚水法による水理試験1,000以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 地表からの深層ボーリング削孔時の間隙水圧測定</li> <li>◦ 地表からの浅層ボーリングの地下水位測定</li> <li>◦ 坑内ボーリングの間隙水圧測定</li> <li>◦ 降水量測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 坑内湧水量測定</li> </ul>
ストリバ(3)～(5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング孔6孔(W1, 2, N2～4, V3)</li> <li>◦ ボーリング孔(Dホール)6孔 計600m</li> <li>(Cホール)3孔</li> <li>◦ 孔間定流量揚水試験 ◦ 孔間定圧揚水試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 単一孔試験(圧力パルス試験、スラグ試験、定圧試験、定流量試験)</li> <li>◦ 孔間定流量揚水試験</li> <li>◦ 孔間定圧揚水試験</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング孔(Dホール)湧水量測定</li> </ul>
ストリバ(6)～(8)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Validation Drift調査50m</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Validation Drift湧水量測定</li> <li>◦ ボーリング孔(Dホール)湧水量測定 (Validation Driftの奥の部分50m)</li> </ul>
ストリバ(9)～(11)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング孔(T孔)2孔</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 第1次レーダー・塩水トレーサー試験 (Validation Drift掘削前)</li> <li>◦ 第2次レーダー・塩水トレーサー試験 (Validation Drift掘削後)</li> <li>◦ トレーサー移行試験</li> </ul>
ストリバ(12)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング(N, W, Cホール)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 単孔水理試験</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Dホール湧水量測定</li> <li>◦ Validation Drift湧水量測定</li> <li>◦ 第1次レーダー・塩水トレーサー試験</li> <li>◦ 第2次レーダー・塩水トレーサー試験</li> </ul>
フィンション	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング コアボーリング(<math>\ell=100\sim700m</math>)11孔 パークッシュンボーリング(<math>\ell=100m</math>)16孔 <math>\ell=288m, \ell=459m</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 単孔定圧注水試験</li> <li>◦ トレーサー試験(純粹トレーサー試験、パルストレーサー試験、トレーサー希釈試験)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 干渉試験</li> </ul>
HRL(1), (2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング</li> <li>◦ スピナー検層</li> <li>◦ 地表踏査</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 長期揚水試験</li> <li>◦ トレーサー試験</li> </ul>
グリムゼル	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング(<math>\phi 86mm</math>)8孔</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 単孔試験</li> <li>◦ 坑道湧水量測定</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 坑道湧水量測定</li> <li>◦ ボーリング孔湧水量測定</li> <li>◦ ボーリング孔湧水圧測定</li> </ul>
Oberbauen				
Project Gewehr	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 間隙水圧測定</li> </ul>
Veitsivaara (Hyrynsalmi)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 地質調査</li> <li>◦ 亀裂調査</li> <li>◦ 地表物理探査(電磁探査、レーダー測定、磁気+放射能探査、電気探査、弾性波探査、反射法)</li> <li>◦ ボーリング(<math>\phi 56</math>)8孔 計3,675.2m</li> <li>◦ 孔内検層</li> <li>◦ 孔間測定</li> <li>◦ 地下水探水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 定水頭注入試験(30m区間、6.8m区間)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 地下水圧測定 7孔各4区間</li> <li>◦ 地下水位測定(コンタクトメーター19孔、MPシステム5孔34区間、測定パイプ内の流出試験)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 地下水圧測定</li> <li>◦ 地下水位測定</li> <li>◦ 揚水試験</li> </ul>
URL(1)～(3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ボーリング130本以上</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ MPシステム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ MPシステム</li> <li>◦ 湧水量測定</li> </ul>

表-14-(2) 解析手法ごとの調査項目のまとめ

サイト名	モデル評価のための調査	物性評価のための調査	境界条件評価のための調査	検証のための調査
Yucca Mt.(1)				○動水勾配(地下水位測定)
Yucca Mt.(2)	○ボーリング4孔			
Yucca Mt.(3)	○ボーリング1孔 (USW G-4)			
Oskwood		○揚水試験30点 ○室内透水試験33点		
Chem-Dyne		○文献調査		
San Andres-Gloria				
Love Canal			○地下水ポテンシャル測定	
東濃(1)	○ボーリング ○物理検層(電気検層, 放射能検層, BH TV, 孔径検層, 密度検層)	○動燃式低水圧制御水理試験 ○低圧ルジオン試験	○水収支調査 ○MPシステム	○MPシステム(間隙水圧計側) ○坑道湧水量測定 既設坑道20点, 試験立坑10点
東濃(2)	○文献資料調査	○文献資料調査	○水収支調査	○文献資料調査
東濃(3)	○地表踏査 ○ボーリング約300孔 ○電気検層	○動燃式低水圧制御水理試験 ○低圧ルジオン試験	○水収支調査 ..	○MPシステムによる間隙水圧測定
釜石(1)	○ボーリング ○坑道調査	○低圧ルジオン試験15点	○間隙水圧測定	
釜石(2)	○ボーリング ○坑道調査 ○ボーリング孔間圧力応答試験 ○染料トレーサー試験	○透水試験2点		○トレーサー試験2回
釜石(3)	○ボーリング2孔			○地下水水流下試験 (定圧注入試験, トレーサー試験)
菊間実証 プラント(1)	○地表ボーリング35孔 2,213m ○坑内壁面割れ目調査	○透水試験(ルジオン試験, 湧水圧試験[JFT]) 35孔 282点 ○流向流速測定	○地下水位測定20孔20点 ○間隙水圧測定15孔53点	○空洞内湧水量測定12カ所 ○間隙水圧測定
菊間実証 プラント(2)			○地下水位測定20孔20点 ○間隙水圧測定15孔53点	○空洞内湧水量測定12カ所 ○間隙水圧測定
菊間地下石油 備蓄基地	○ボーリング27孔 3,252m	○透水試験21孔 438回	○地下水位測定18孔 ○水収支調査(雨量, 蒸発量, 河川流量一式)	

### 3.3 わが国を対象とした調査・解析・検証手法の検討

前節までの調査に基づき、わが国を対象とした地下水流动評価に関する調査・解析・検証の概略の手順（案）について、広域スケール、サイトスケール、および局所スケールの3つに分けて検討した。なお、以下に示す検討結果はスケールごとに整理してあるが、大きなスケールで得られた結果が順次小さなスケールに反映されており、単独に成立しているものでないことも認識しておかなければならない。図-14に検討の全体フローを示す。

#### 3.3.1 広域スケールの手順

広域スケールの規模の目安は数km以上であり、本スケールでは人口バリアから漏出してきた核種が最もクリティカルな経路を伝わって生物圏に至るまでの時間や経路の把握が重要となる。したがって、その領域は広範な地下水流动を考慮できるとともに、サイトの掘削や漏出した核種が影響を及ぼし得る領域をすべて含むことが必要であり、このスケールでの調査や解析の主な対象は、主にクリティカルな経路となり得る主要な断層などである。広域スケールの調査・解析・検証フローを図-15に示し、フロー中で特に留意すべき点がある項目については、その概要を以下に示した。

##### (1) 既存資料調査

既存資料調査では、調査対象領域が広いために調査内容が多岐にわたり、地形・地質資料調査、気象観測資料調査、河川流量資料調査、孔井資料調査が挙げられる。具体的な調査対象となる文献資料を表-15に示す。上記の地形地質資料からは、表-16に示すような地形・地質・土質特性を読み取ることができる。また、気象観測資料のうち、降水量については表-17に示すものを入手することができる。

孔井資料については、以下に示す具体的な資料を得ることができる。

- 建設省 地下水位年表
- 国土庁・経済企画庁（全国）地下水資料台帳
- 農林水産省（地方農政局） 農業用地下水調査特殊地区施設台帳
- 環境庁 地下水揚水量等実態調査報告書
- 各地方自治体 井戸台帳・井戸届出資料

##### (2) 空中からの調査

広域スケールでは調査範囲が広いため、空中からの調査が活用されることも特徴的である。具体的な調査としては、衛星画像解析と航空写真解析がある。衛星画像は航空写真に比べてはるかに広い画角をもつため、広域的な地形・植生状況などを一度に概観することができ、広域的地形・地質状況の解析に有用である。また、航空写真は地形情報を読み取るのに最も効果的で広範囲に使われており、表-18に示すようなも

のがある。2つの解析を合わせた調査の手順を図-16に示すとともに、空中からの調査概念を図-17に示す。

### (3) 広域スケール設定のための地下水流動解析

得られた広域スケールの地形・地質モデルから解析モデルを決定し、気象観測資料、河川流量、孔井資料から境界条件を決定して、広域スケールとしてどの程度の領域を設定すればよいかを判断するために地下水流動解析を実施する。

### (4) 地表からの調査

上述の予備的な解析により、広域スケールとしての適切な領域を設定した後、本解析のためのデータを取得し、モデル評価、物性値ならびに境界条件の設定を行う。この段階では地表からの調査が主体となる。

モデル評価のための調査としては、地表地質踏査、地表物理探査、ボーリング調査およびボーリング孔を利用した物理検層などが有効である。図-18～20にこれらの調査概念を示す。地表物理探査においては、弾性波探査、電気探査および重力探査が主となり、ボーリング調査におけるコアボーリングでは採取コアの観察あるいはボアホールテレビ観察が行われ、パーカッションボーリングではスライム観察、ボアホールテレビ観察などが行われ、地質状況を主体とした評価を行う。ボーリング孔を利用した物理検層については、適用性とともにその概要を表-19に示す。

水理試験は、物性値の設定及び水理地質構造を検証するために行う。物性値設定のための水理試験は、透水係数、貯留係数、間隙率などを求めるために実施する。広域スケールは原則的に等価連続体を仮定できる領域であるが不均質性に富んでいる場合もあり、岩盤の水理特性も高透水性部分から低透水性部分まで幅広く分布する。したがって、実施する試験は地下水流動や水収支に影響を及ぼす領域の水理特性をできるだけ少ない数量で効果的に評価することが必要になる。具体的な試験方法としては、低圧ルジオン試験ないし低水圧制御水理試験（動燃式JFT）がこの条件に適する試験法である。さらに、水理地質構造を検証するための水理試験は、地質学的に抽出された地質不均質性や、大規模な断層・破碎帯などに対し水理学的観点から層別の必要性を判断するために実施する。具体的な試験法としては、揚水試験やトレーサー試験などがある。

また、境界条件評価のための調査としては、水収支観測、ボーリング孔を利用した地下水ポテンシャル測定が行われる。

### (5) 広域スケール地下水流動解析

広域スケールに対する解析は、原則的に地盤を不均質性のある難透水性の多孔質媒体と見なし、地下水の流れがダルシー則に従うものとして、有限要素法による3次元

飽和－不飽和非定常浸透流解析を援用する。

#### (6) 広域スケールにおける解析上の問題点

今回の調査研究内容から、広域スケールを対象とした解析上の問題点についてとりまとめたものを以下に示す。

- 解析結果に最も影響を及ぼす要因となるものは、高透水性の破碎帯や破碎ゾーンである。
- 立坑などの構造物がすでに存在する場合には、実測値と解析値（例えば地下水位など）の差異はその構造物から離れるほど小さくなる。すなわち、既存構造物に近いほど実測値と解析値との差異が大きい。

本項で検討した広域スケールにおける調査・解析・検証のフローについては、坑道（立坑、横坑）の掘削を伴わないため、直接的に高差圧環境が発生し得る状況は少ないと考えられる。しかしながら、広域スケールでの調査結果と解析結果が次工程のサイトスケールの調査内容及び解析範囲や境界条件の設定に果たす役割は大きく、しかもサイトスケールでは高差圧環境が発生する可能性が極めて高いことを考え併せれば、高差圧環境の発生を念頭においたフローにしたがって検討を進めることが肝要である。一例として、地下水位測定や間隙水圧測定のモニタリングにおいては、坑道で差圧が発生することを想定し、これに追従できるものを最初から考慮したものでなければならない。したがって、本検討結果は動燃事業団でこれまでに実施してきた「地層科学的研究」のうち、「深層を含む広域地下水流动調査研究」や「地下水の地球化学的特性に関する研究」に反映することができるものと判断される。

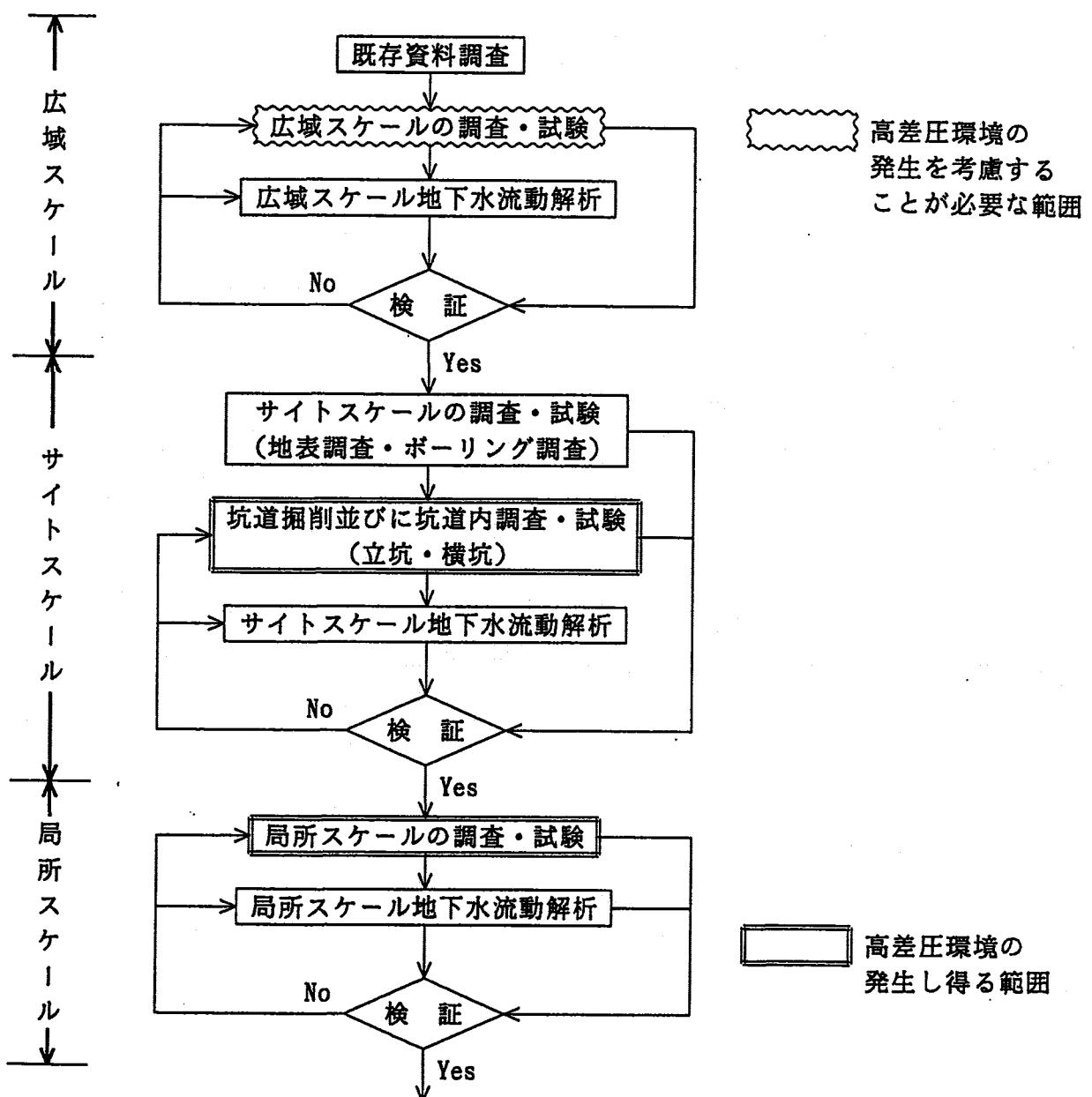


図-14 わが国における地下水水流動の調査・解析・検証の流れ

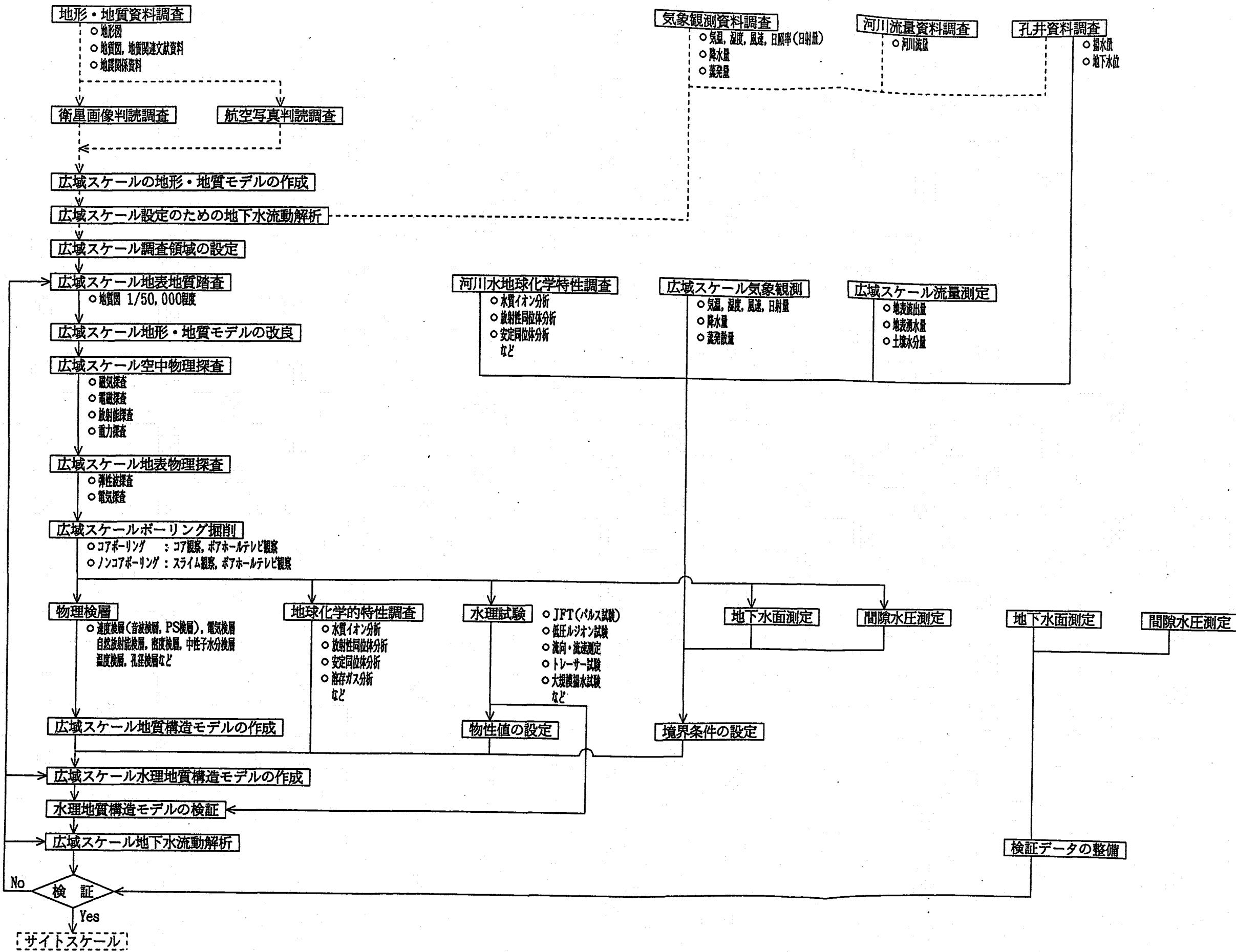


図-15 わが国を対象とした調査・解析・検証のフロー(案) (広域スケール: 約数km四方以上)

表-15 既存文献資料一覧

学会誌名		発行	刊行頻度	発行所
地形	「地理」	古今書院	月刊	東京都千代田区神田駿河台2-10 03-3291-2757
	「地理学評論」	日本地理学会	月刊	東京都文京区弥生2丁目4-16 学会事務センタービル内 03-3815-1912
	「地形」	日本地形学連合	季刊	京都府宇治五ヶ庄京都大学防災科学研究所 地形土壤灾害部門内 0774-32-3141
	「地図」	日本国際地図学会	月刊	東京都千代田区青葉台4-9-6 日本地図センター内 03-3485-5415~5
	「第四紀研究」	日本第四紀会	季刊	東京都文京区弥生2-4-16 学会事務センタービル内 03-3815-1903
地質	「地質調査所月報」	工業技術院地質調査所	月刊	茨城県筑波郡谷田部町東1丁目1-3 0298-54-3521
	「応用地質」	日本応用地質学会	隔月	東京都新宿区西早稲田2-10-11 03-3202-3614
	「地質ニュース」	実業公報社出版部	月刊	東京都千代田区九段北1-7-8 03-3265-0951
	「地質学雑誌」	日本地質学会	月刊	東京都千代田区鍛冶町1-10-4 丸石ビル内 03-3252-7242
	「地学雑誌」	(社)東京地学協会	隔月	東京都千代田区二番町12-2 03-3201-0809
砂防・地すべり	「地球科学」	地学団体研究会	隔月	東京都豊島区南池袋2-32-12 埼玉ビル内 03-3983-3378
	「土と基礎」	土質工学会	月刊	東京都千代田区神田淡路町2-23 (菅山ビル4階) 03-3251-7661
	「地質と調査」	土木春秋社	季刊	東京都渋谷区代々木2-23-1 03-3370-5020
	「砂防と治水」	(社)全国治水砂防協会	季刊	東京都千代田区平河町2-7-5 砂防会館内 03-3261-8386
	「地すべり技術」	地すべり対策技術協会	季刊	東京都港区新橋5-7-2 市村ビル内 03-3438-0493
気象	「地すべり」	地すべり学会	季刊	東京都港区新橋5-7-2 市村ビル内 03-3432-1878
	「新砂防」	砂防学会	季刊	東京都千代田区平河町2-7 03-3261-8386
	「土木技術資料」	(財)土木研究センター	月刊	東京都港区赤坂6丁目4-21 03-3585-8981
	「天気」	日本気象学会	月刊	東京都千代田区大手町1-3-4 気象庁内 03-3212-8341
	「農業気象」	日本農業気象学会	季刊	千葉県松戸市松戸648 千葉大学園芸学部内 0473-63-1221
水	「雪氷」	日本雪氷学会	季刊	東京都千代田区二番町1-2 番町ハイム308号室 03-3261-2339
	「海と空」	海洋気象学会	季刊	清水市折戸1000 東海大学海洋学部杉森研究室内 0543-34-0411
	「気象」	(財)日本気象協会	月刊	東京都千代田区大手町1-3-4 気象庁内 03-3212-8341
	「日本地下水学会誌」	日本地下水学会	季刊	茨城県筑波郡谷田部町東1-1-3 地質調査所水資源課内
	「水」	月刊「水」発行所	月刊	東京都港区西新橋3-6-3 03-3431-2088
環境	「水利科学」	(財)水利科学研究所	季刊	東京都文京区後楽1-7-12 林友ビル内 03-3816-3391
	「下水道協会誌」	(社)日本下水道協会	月刊	東京都千代田区紀尾井町3-6 秀和紀尾井パークビル内 03-3263-4691
	「陸水学雑誌」	日本陸水学会	季刊	東京都文京区弥生2-4-16 学会事務センタービル内 03-3815-1903
	「用水と廃水」	産業用水調査会	月刊	東京都渋谷区千駄ヶ谷5-20-11 第一シリバービル内 03-354-0150
	「水処理技術」	日本水処理技術研究会	月刊	大阪市北区神山町1-24 扇町ビル内 06-361-0316
環境	「環境技術」	環境技術研究会	月刊	大阪市西区京町堀1-14-25 京二ビル内 06-443-6445
	「環境情報科学」	(社)環境情報科学センター	月刊	東京都千代田区五番町4 03-3265-3916
	「産業公害」	(社)産業公害防止協会	月刊	東京都港区虎の門1-21-8 秀和第三虎の門ビル内 03-3580-8808
	「環境と測定技術」	(社)日本環境測定分析協会	月刊	東京都中央区八丁堀2-9-11 03-3553-7207
	「公害と対策」	公害対策技術同友会	月刊	東京都港区赤坂9丁目1-244 秀和赤坂ビル内 03-3404-5714

表-16 既存資料文献から読み取ることができる地形・土質情報

得られる情報		資料	地形図	空中写真	地質図	地盤図	ボーリング 等 土壤試験	地形 分類図	土地 条件図	土地 利用図	工事 記録	災害 記録
地形	形態	中 地 形 小 地 形 微 地 形	◎ ◎ ○	◎ ◎ ◎	○(断面) ○(コンタ- 面図)			◎ ◎ ○(断面図)○	◎ ◎ ○	○ ○ ○		○
	傾斜・起伏量		○	○				○	○	○		
	災害地形	地すべり地形 崩壊地形 土石流地形 (扇状地微地形) 洪水地形 (平野の微地形) 被災状況	○ ○ ○ ○(大観) ○	○ ○ ○ ○ ○ ○	○(災 害 地 質 図) ○(災 害 地 質 図) ○(災 害 地 質 図)		○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	
	岩相(岩種)		○	○	○	○				○		
	未固結堆積物のタイプ		○	○	○	○				○		○
	地質構造	地層の走向・傾斜 断層・破碎帶 その他の割目系 不整合等の不連続性	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○					○		
土質	風化・変質状況			○	○							
	土質のタイプ					○	○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○	
	土の力学的・物理的性質 地表の含水状況 軟弱地盤の分布やタイプ		○	○ ○	○	○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○	

(注) ◎: よく把握できる

○: ある程度は把握できる、あるいは参考になる

無印: ほとんど把握できない

表-17 気象観測データ一覧

項目	公刊資料	観測箇所
日降水量	・気象庁月報 ・雨量年表(建設省)	約 160か所 約 382か所
半旬降水量	・気象庁年報	約 160か所
旬降水量	・気象庁月報	約 160か所
月降水量	・気象庁年報 ・気象庁月報 ・気象要覧 ・雨量報告 ・全国気象年報 ・累年気候表 5年平均値 雨量報告 10年平均値 累年気候表	約 160か所 約 160か所 約 160か所 約1,780か所 約1,560か所 約 165か所 約1,780か所 約 165か所
年降水量	・気象庁年報 ・雨量報告 ・全国気象年報 ・累年気候表	約 160か所 約1,780か所 約1,560か所 約 165か所
平均値	・全国気温降水量月別平均値表 ・日本気候表 その1、その2、その4	約1,500か所 約 156か所
観測開始 ～1970	極値と順位 ・日本気候表 その3	約 163か所
月間1時間最大 雨量及び起日	・気象庁年報 ・気象庁月報 ・気象庁要覧	
月間日最大雨量 及び起日	・気象庁年報 ・気象庁月報 ・気象庁要覧 ・全国気象年報	
年間最大 日降水量	・雨量報告 ・全国気象年報	

○建設省; 雨量年表(昭和13年より)

(財) 日本河川協会にて入手可能

表-18 既存の航空写真

種類	撮影計画機関	撮影区域	撮影年	縮 尺	カメラf/S	照会・頒布申込先
パンクロマティック	米軍	日本全域	1946~1948	約1/4万	メトロゴン15/23	日本地図センター*
	米軍	鉄道沿線	1946~1948	約1/1万	メトロゴン15/23	日本地図センター
	林野庁および都道府県林務部	主要平野部				
	官公庁、公団、民間会社など	山地部	1952~	約1/2万	主としてウイルドRC-5a, RC-8, 21/18	日本林業技術協会** 林野庁計画課 都道府県林務部
	国土地理院 (1/2万5,000地形図用)	日本各地	1952~	約1/1万 ~1/3万	各 種	撮影計画機関もしくは 航空測量会社
	国土地理院 (国土基本図用)	日本各地	1956~	1/3万3000 または 1/4万	ツアイスRMKまたはウイルドRC	日本地図センター
	国土地理院 (国土基本図用)	平野部	1960~	1/1万 または 1/2万	ツアイスRMKまたはウイルドRC	日本地図センター
カラード	国土庁 (国土情報整備事業用)	丘陵・山地 部、平野部	1974	1/1万(一部) 1/1万5000 1/8000	ウイルドRC 10 15/23	日本地図センター

( f は焦点距離 (cm) 、 S は画面サイズ (cm) を示す。 )

\* 東京都目黒区青葉台4-9-6

財団法人 日本地図センター、Tel. (03)-3485-5415~6 ₪153

\*\* 東京都千代田区六番町七番地 日本林業技術協会測量部写真係

Tel. (03)-3261-5281~7 ₪102

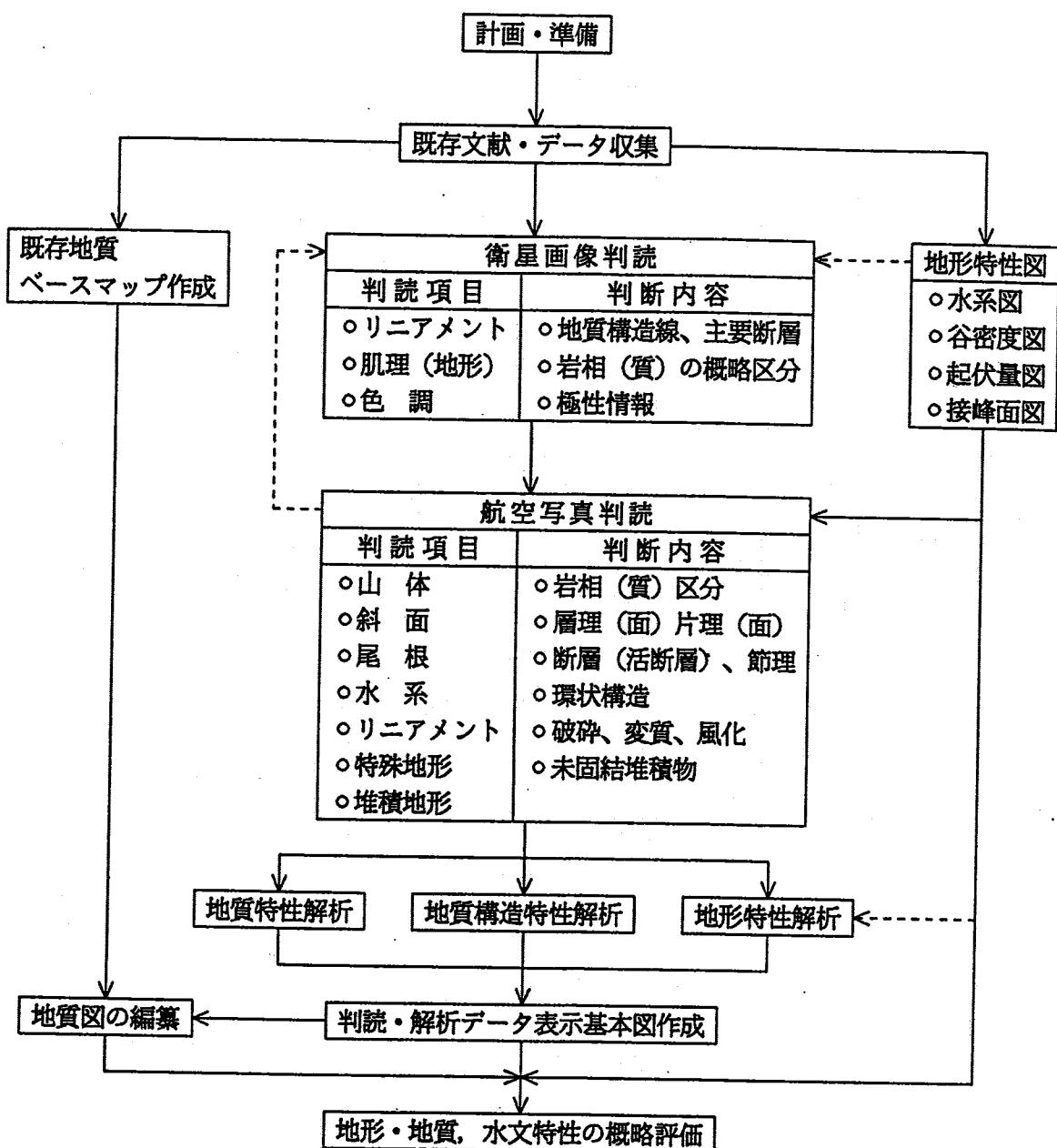


図-16 空中からの調査の流れ

図-17 空中からの調査概念

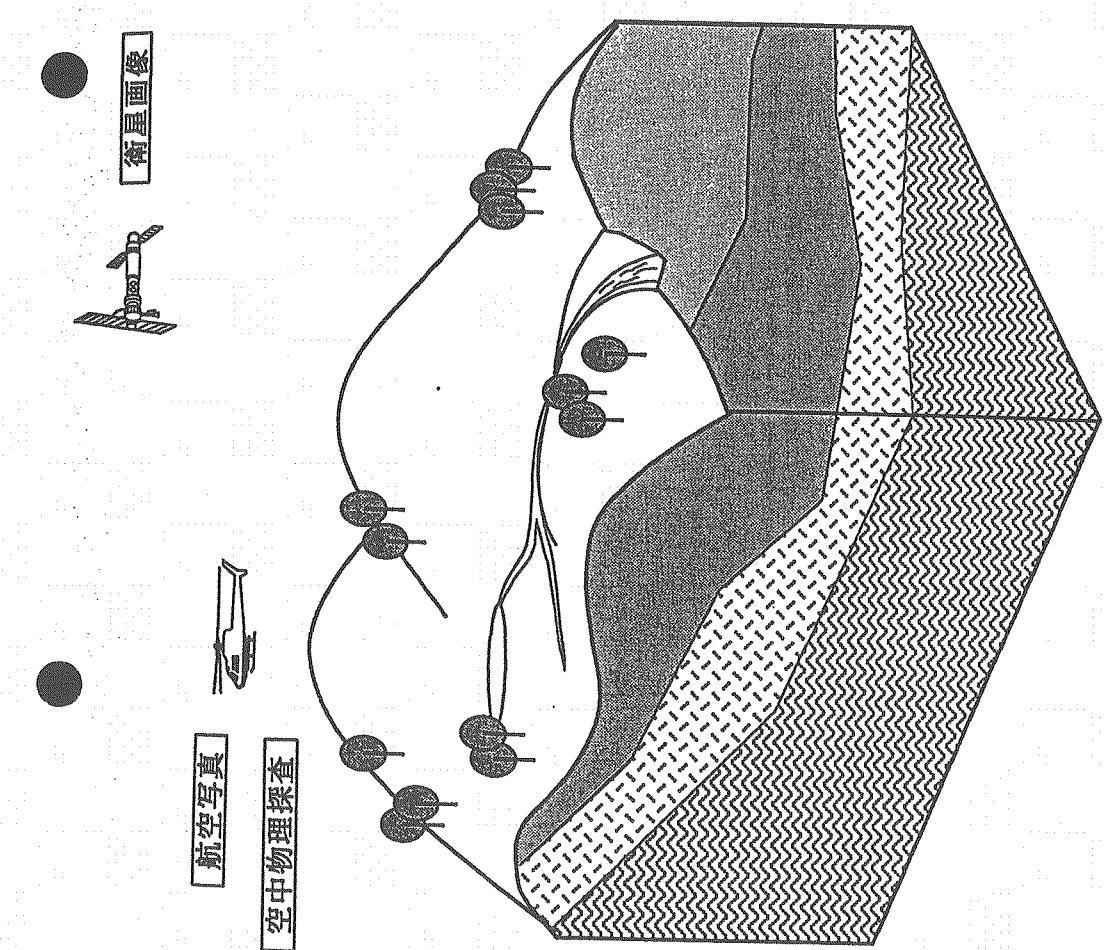


図-18 地表からの調査概念(1)

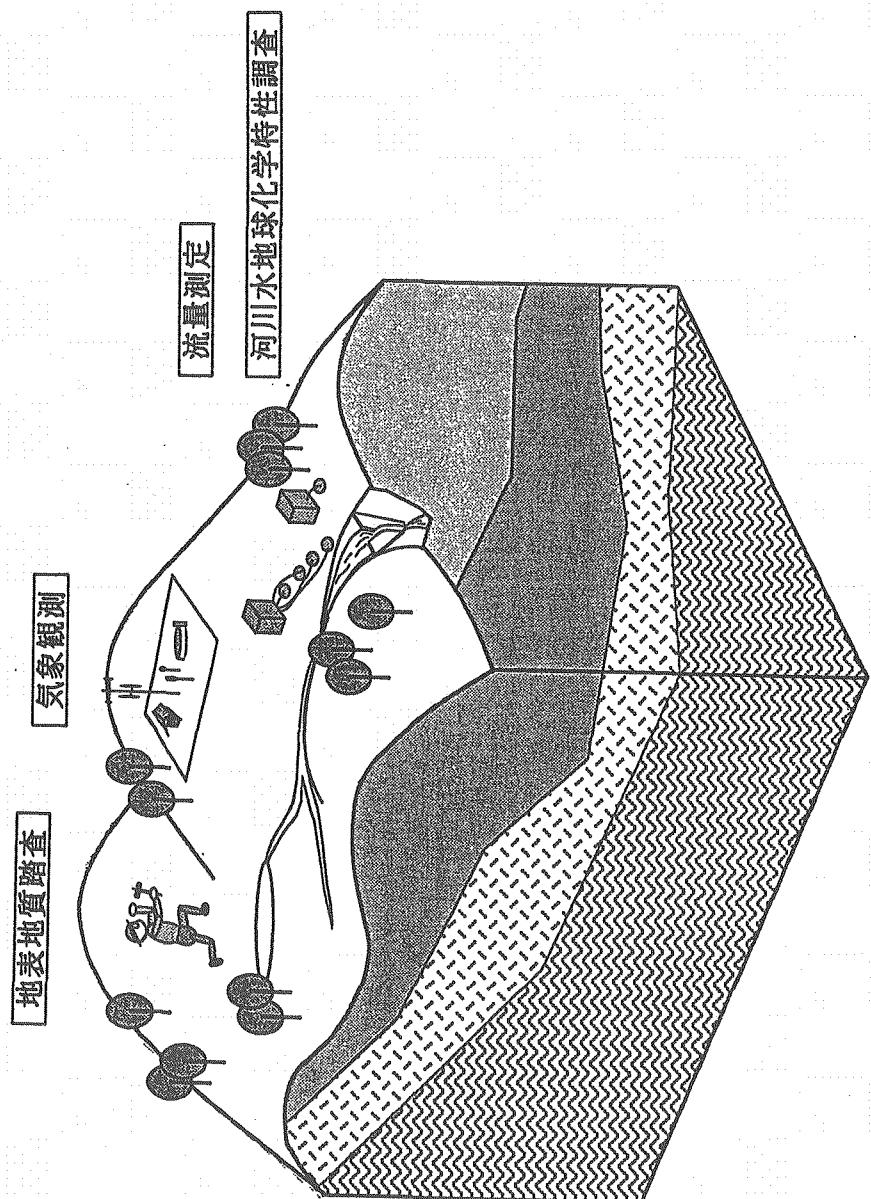
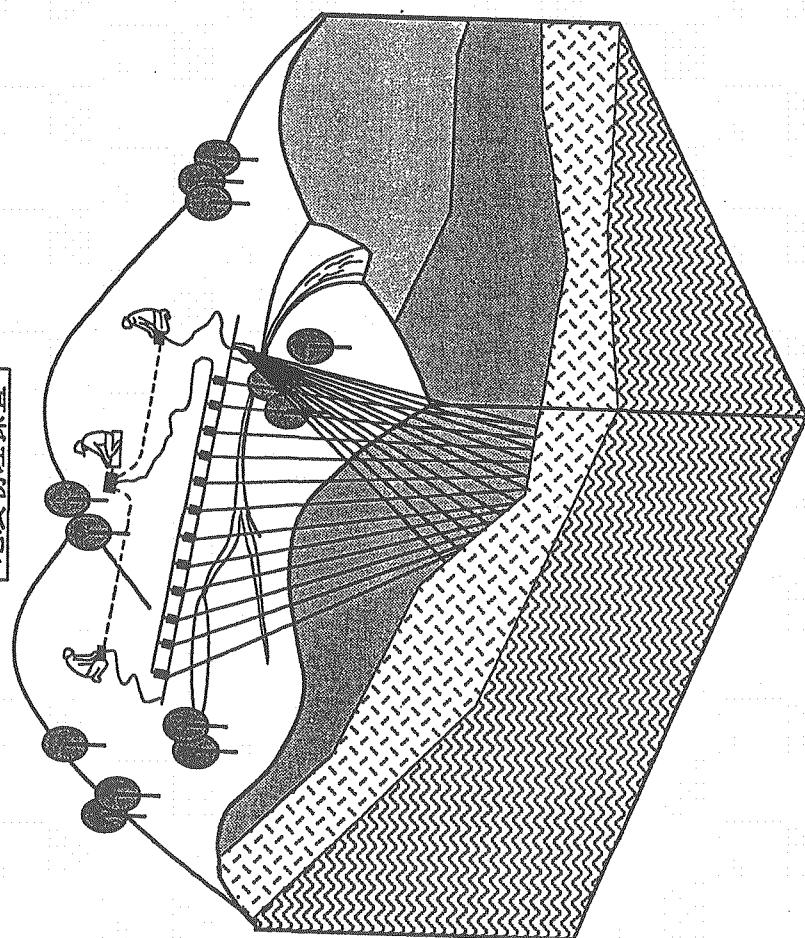


図-19 地表からの調査概念(2)



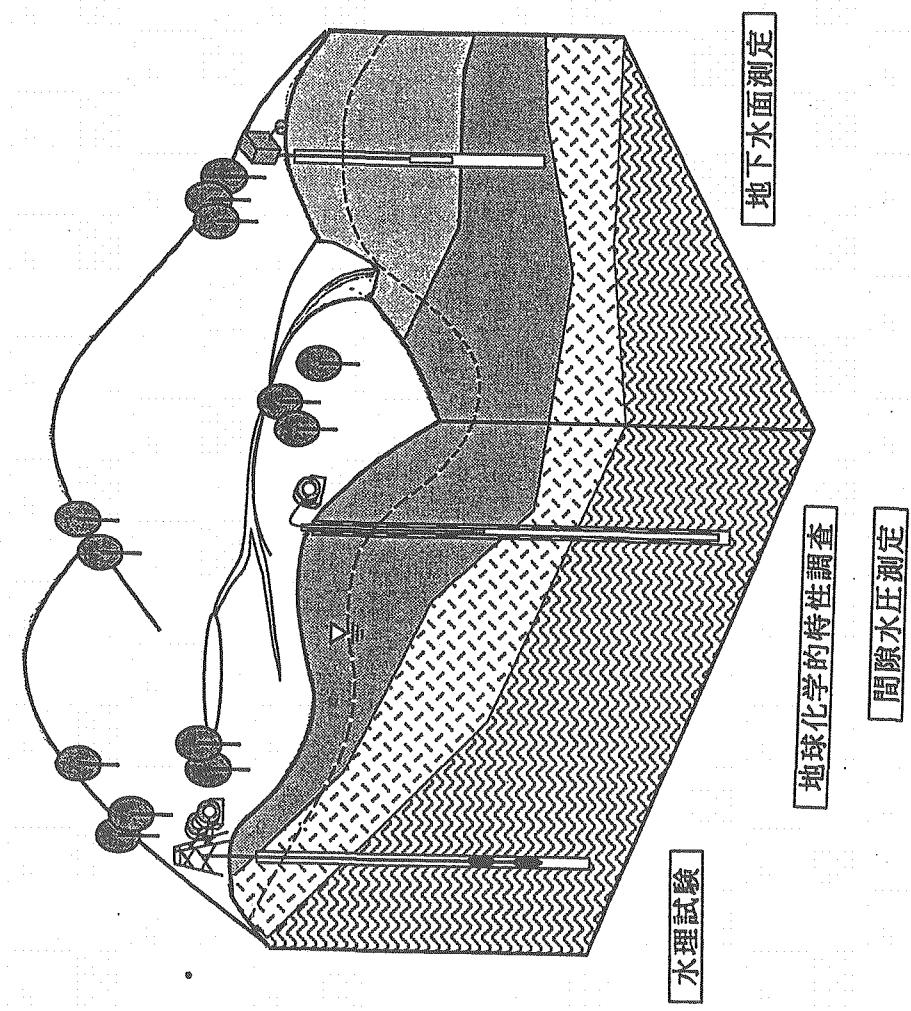


図-20 ボーリングを利用した調査

### 3.3.2 サイトスケールの手順

サイトスケールの規模の目安は数十m～数kmであり、高差圧環境が最も出現し得るスケールである。したがって、広域スケールに連絡する主要な亀裂群などにおける地下水の流れや移行経路の把握が重要であり、具体的にはサイト周辺の卓越した透水経路をとらえ、その中をどのように地下水などが移行するかを把握することが必要になる。したがって、サイトスケールでの調査や解析の主な対象は高差圧環境を発生させるようなサイト周辺の高透水亀裂であり、透水性が大きいほど調査、解析を実施する優先順位は高くなる。サイトスケールにおける調査・解析・検証のフローを図-21に示すとともに、広域スケールにおけるフローと同様、特に留意すべき点がある項目について、その概要を以下に示す。

#### (1) 地下からの調査

サイトスケールでは、断層・破碎帯や割れ目が水理学的に不連続岩盤としてモデル化すべきか、あるいは等価連続体岩盤としてモデル化してよいかの判断が重要である。このため、サイトスケールにおける調査・試験の主たる目的は、不連続性岩盤か等価連続帶岩盤かの判定を行うために、岩盤性状を直接的に確認できる地下からの調査が重要となる。

モデル評価のための調査としては、坑道調査、坑道内のボーリング調査、坑道内物理探査、ボーリング孔を使用した物理検層（表-19参照）が行われる。

物性評価のための調査としては、地表からのボーリング孔で見出された断層などの大きな不連続面の分布性状をより精度よく把握するためのクロスホール・トモグラフィー調査、さらには岩盤中に存在する亀裂の分布性状の把握を対象とした試験が行われる。これらのための調査法として近年、孔間透水試験が注目されており研究開発が進められている。表-20に孔間透水試験の現状を示す。

境界条件評価のための調査としては、坑道での湧水量測定と地表からの調査と同様に坑内ボーリング孔を利用した地下水ポテンシャル測定などが行われる。図-22～25に、代表的な調査手法の概念を示す。

#### (2) サイトスケール地下水流动解析

サイトスケールについては、前述のように地盤を不均質性を有する多孔質媒体みなすか、あるいは個々の亀裂が地下水流动に影響を及ぼす不連続性岩盤みなすかによって選択する解析手法は異なる。前者であれば広域スケールと同じ解析手法となるが、後者であればストリパ、釜石で行われたようなフラクチャーネットワーク解析手法を用いた解析が必要となる。ただし、このフラクチャーネットワーク解析については、これまでの実績が結晶質岩を対象としたもので、実証のない堆積岩を対象とする場合には、モデル化に当つての十分な検討が必要と考えられる。

### (3) サイトスケールにおける解析上の問題点

今回の調査研究内容から、サイトスケールを対象とした解析上の問題点についてとりまとめたものを以下に示す。

- 坑道（立坑、横坑）を掘削した際に生ずる周辺岩盤の水理特性や力学特性の変化に関する実測値については、定性的に解析値と整合するが、定量的には差異がある。
- 海外のURLで地下坑道掘削に伴う水理的応答の予測を行った際に、予測よりも実測値がはるかに下回ったケースも見られ、その原因として水理的な高差圧環境だけでなく、力学的な高差圧環境に起因する亀裂閉合の可能性も示唆された。

本項で検討したサイトスケールによる調査・解析・検証のフローについては、図-21中でも示したように、坑道（立坑、横坑）掘削に伴って直接的に高差圧環境が発生し得る可能性が極めて高い。上述のように、高差圧環境の発生に起因する原位置の岩盤性状の変化は水理的側面のみならず、力学的側面にも係わりが大きい場合もあると判断される。したがって、本検討結果は動燃事業団でこれまでに実施してきた「地層科学研究」のうち、「掘削による岩盤力学的・水理学的挙動に関する研究」などに反映することができるものと考えられる。

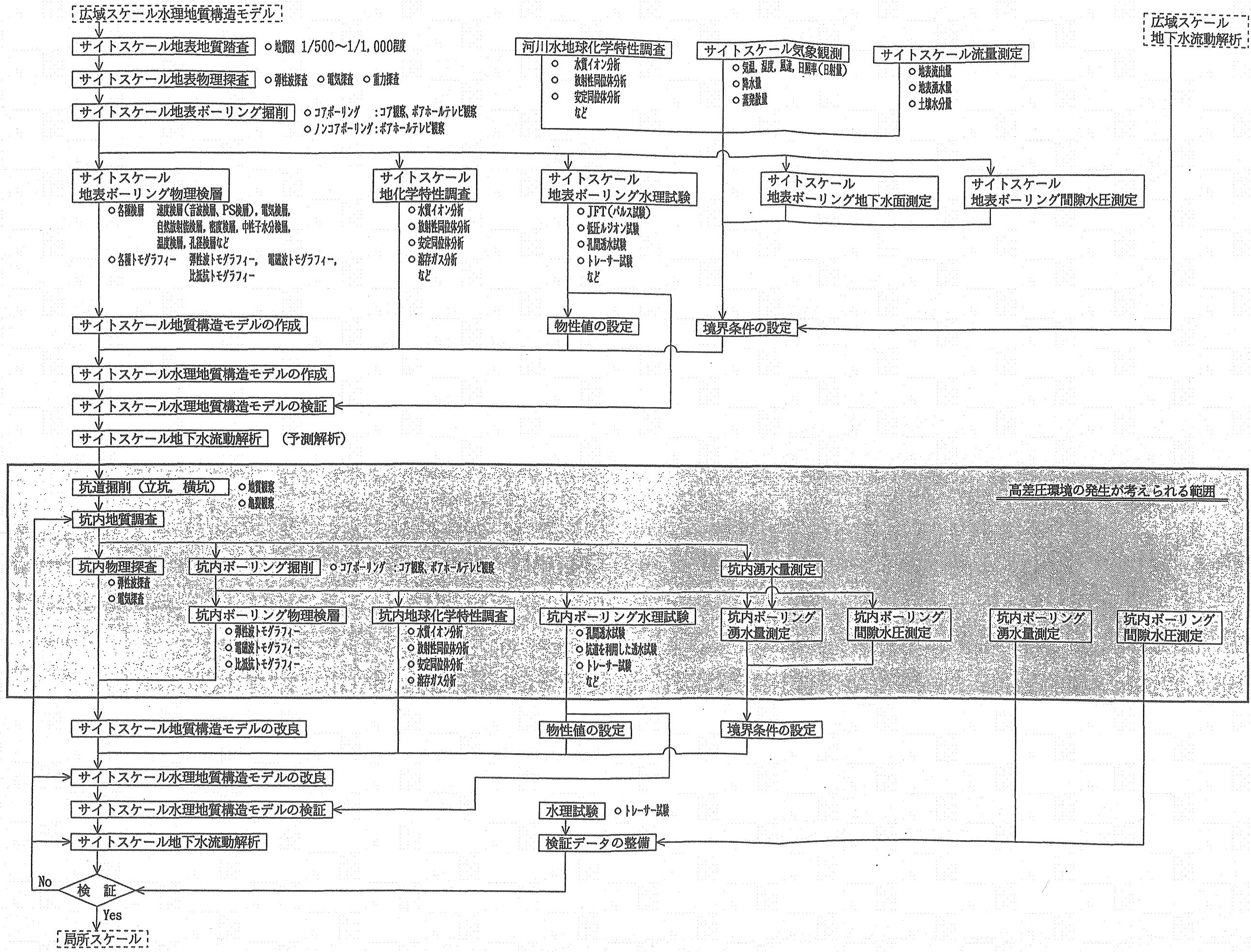


図-21 わが国を対象とした調査・解析・検証のフロー（案）（サイトスケール：数十m～数km四方程度）

表-19 物理検層とその適用

検層法	測定物理量	検査項目										測定範囲			
		き裂	風化変質	粒度組成	固結度	含水量	力学量	透水性	被压水	空隙率	硬軟岩	孔径	ケーンシング	孔径	可能望ましい
電気検査法	2極法 見掛け抵抗 $\rho_s$	○	△	○	△	△	△	△	△	○	○	×	○	○	電離器の3倍
	3極法 見掛け抵抗 $\rho_s$	○	△	○	△	△	△	△	△	○	○	×	○	○	電離器の3倍
音波検層	マイクロ法 見掛け抵抗 $\rho_s$	○	△	△	△	○	◎	△	△	△	○	×	○	○	電離器の3倍
	自然電位法 自然電位SP	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	○	○	○	孔壁附近
音波検層	P波速度Vp	△	△	○	○	△	△	△	○	○	○	○	○	○	孔壁附近
	S波速度Vs	△	△	○	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○	孔壁附近
波長検層	P波速度Vp	○	△	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	孔壁附近
	反射検層 多重反射並 $\rho_V$	○	○	○	△	△	△	○	○	○	○	×	○	○	孔壁附近
放射能検層	自然放射能検層 チ線強度 $I_{\gamma}$	△	△	△	△	△	△	△	△	○	○	△	×	○	孔壁面
	アーチ密度検層 難乱アーチ線強度 $\rho_{DL}$	△	△	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	孔壁附近
水分検層	散乱アーチ線強度、密度 $\rho_{DL}$	△	△	○	○	△	△	○	○	△	○	○	○	○	20~30cm
	温度検層 温度T							◎	○	○	○	○	○	○	水分%により大きく変化
キャリバーメータ	孔径DC								○	○	○	○	○	○	孔内水
									△	○	○	○	○	○	孔壁

表-20 孔間透水試験法一覧

試験項目	試験法の概要
サイナソイダル試験	発振ゾーン中で水圧を正弦波状に変化させ、受振側で振幅の減衰と位相の遅れを測定する。割れ目の幾何形状などに関連させて、流れの次元を推定し、割れ目の透水係数と比貯留係数を求める。
定流量揚水試験	一定流量で長時間揚水し、観測孔での水圧の変化を観測するほか、揚水の停止後の水圧の回復状態を観測する。観測孔の水圧の変化から各観測区間の流れの次元、透水係数および比貯留係数などを求める。
定圧揚水試験	一定水圧で揚水し、観測孔での水圧の低下を観測する。さらに、揚水の停止後の水圧の回復状態を観測する。観測孔の水圧の変化から各観測区間あるいは岩盤全体の流れの次元、透水量係数および比貯留係数などを求める。
注入流量変化法(パルス法)	注水孔からパルス状に注入流量を変化させ、観測孔において水圧の変化を観測する。注入圧力と観測孔での水圧の変化から岩盤内の透水係数および空隙率を逆解析し、それらの分布を求める。
一定流量注入法	注水孔から一定流量で注水し、観測孔において水圧の変化を観測する。注入量と観測孔の水圧変化から試験区間の透水テンソルと比貯留係数を求める。

図-22 ポーリングを利用した調査

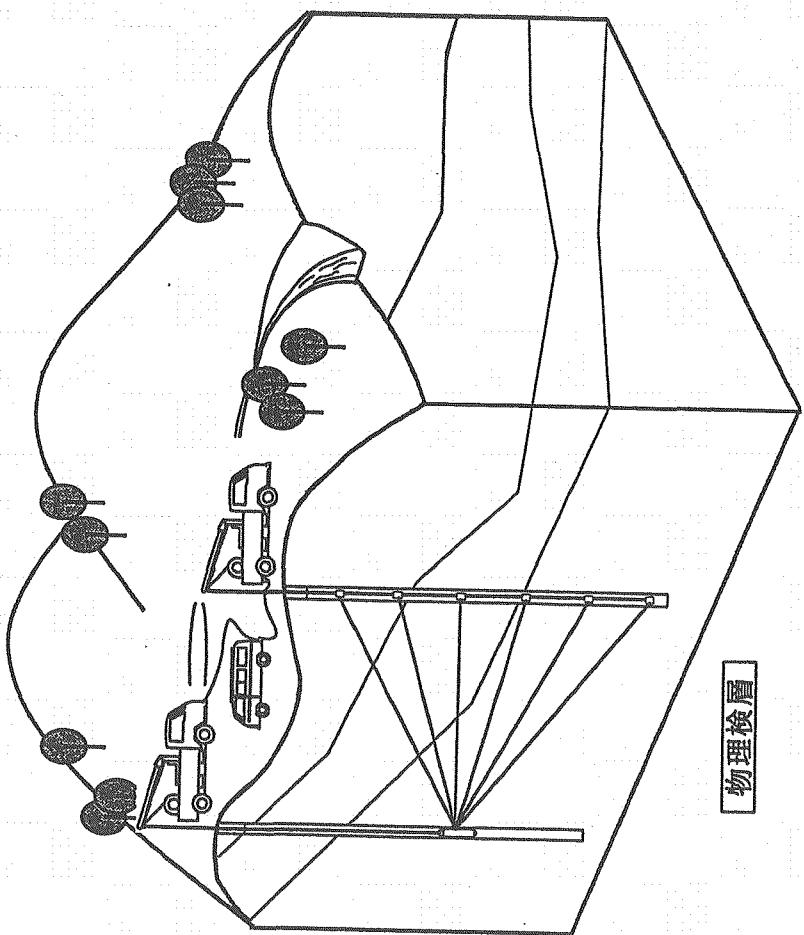


図-23 坑道調査の概念(1)

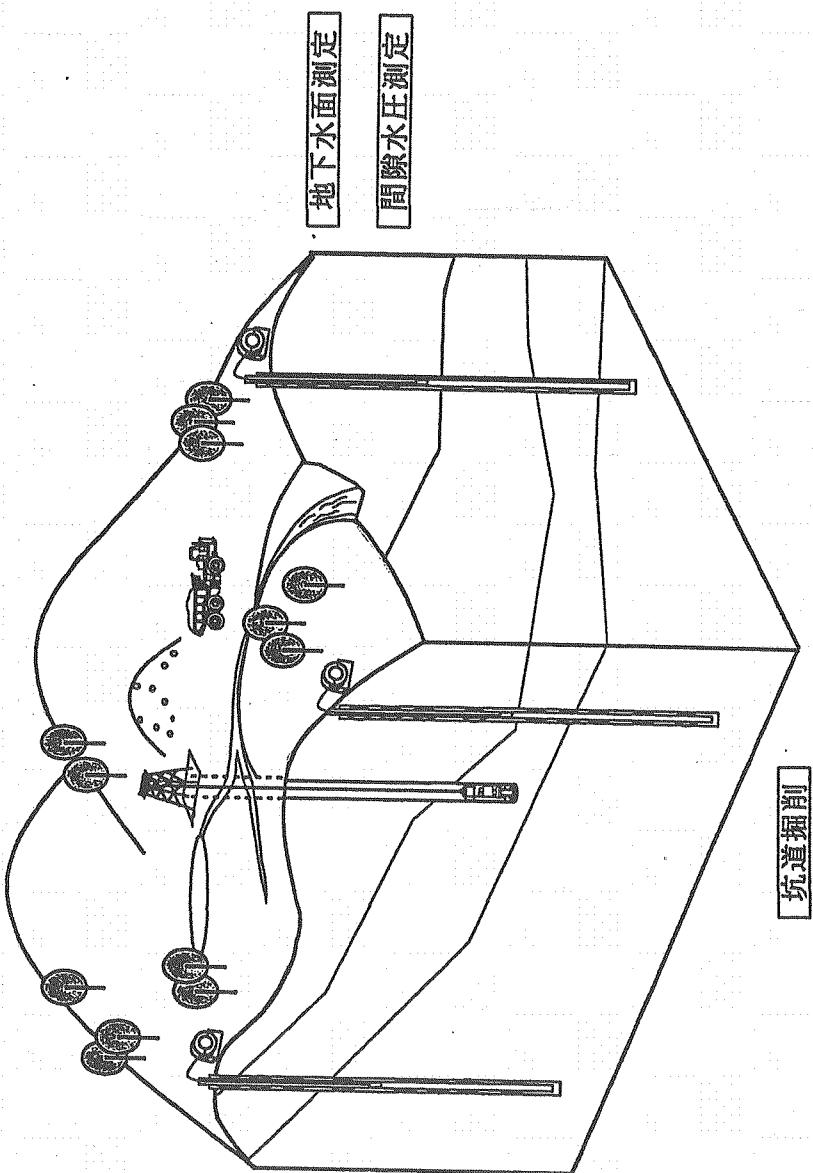


図-24 坑道調査の概念(2)

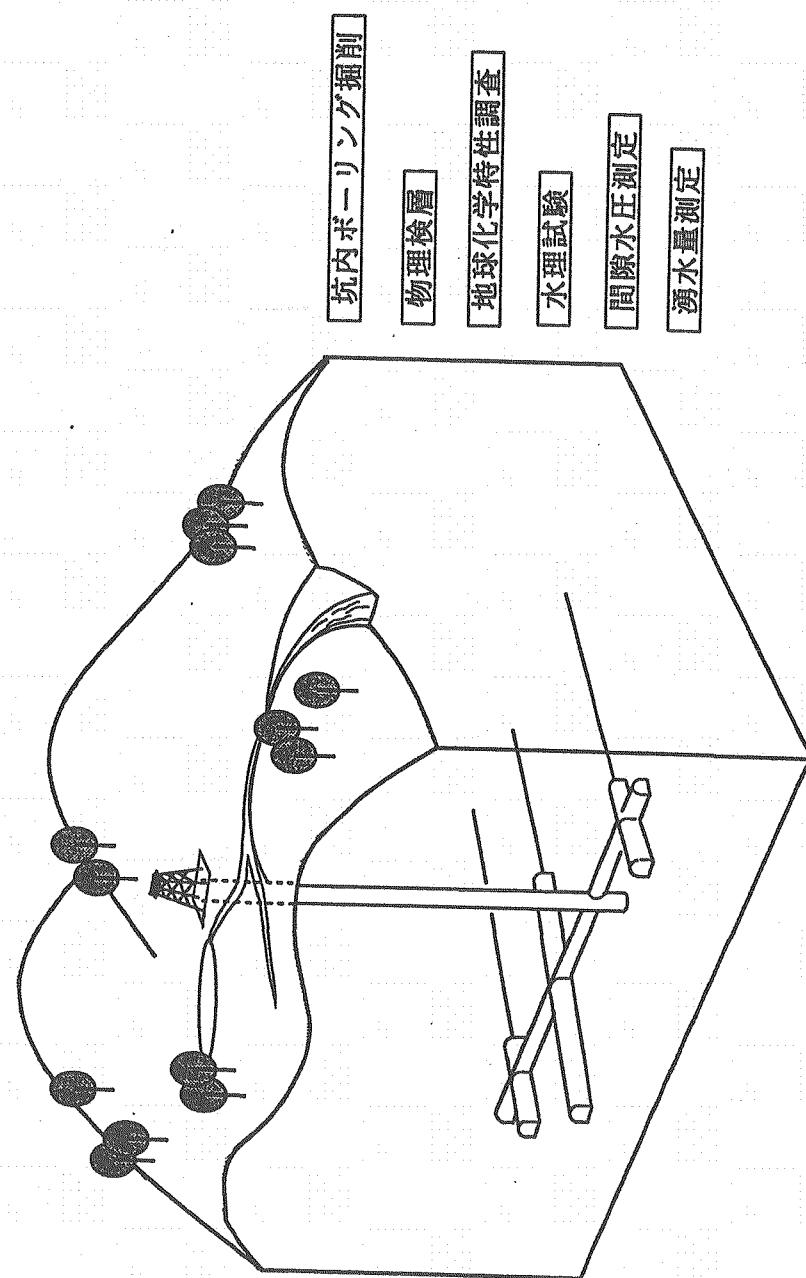
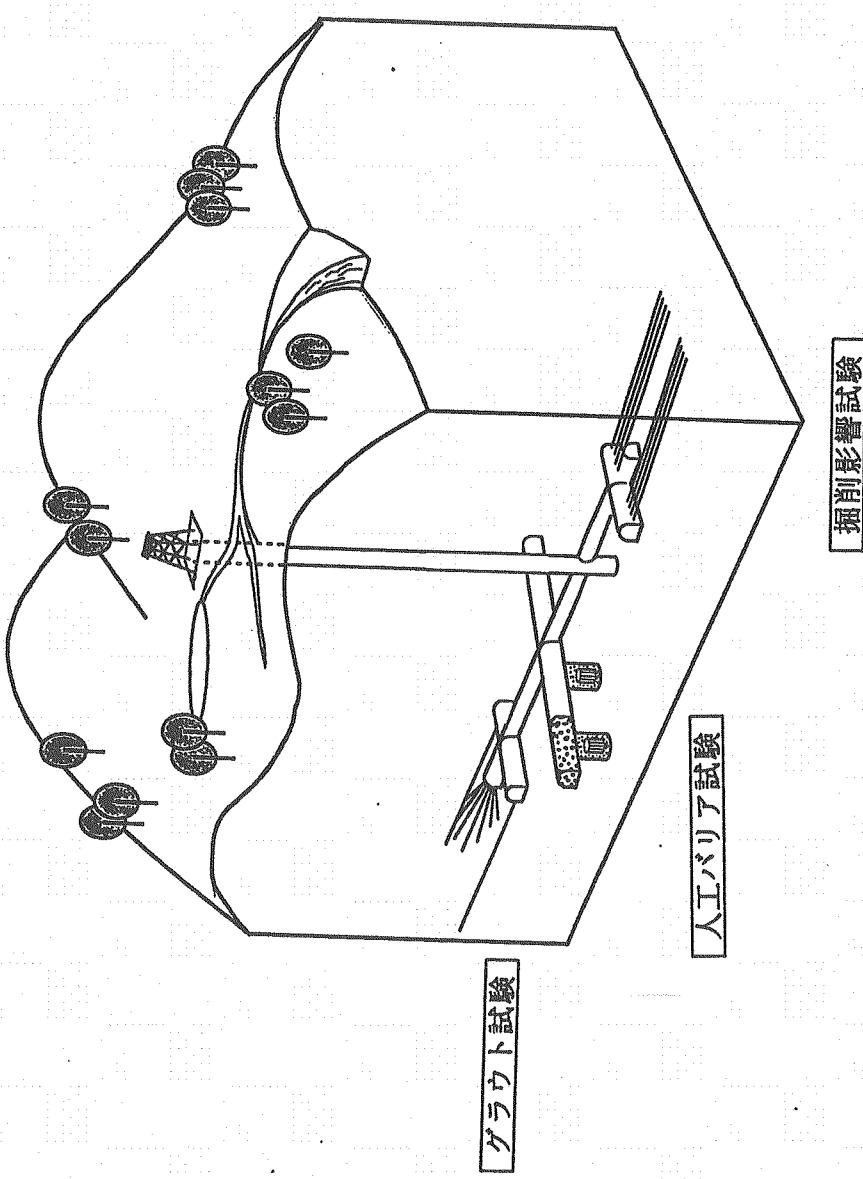


図-25 坑道調査の概念(2)



### 3.3.3 局所スケールの手順

局所スケールの規模は目安として数cm～数十mであり、サイトスケールの調査で判明した高透水性亀裂内の浸透経路やチャンネリング現象、亀裂交差部におけるミキシングなどのメカニズムの把握が重要である。したがって、調査や解析の主な対象は亀裂面の凹凸や亀裂の開口幅とこれに依存する亀裂内の透水性分布などである。局所スケールにおける調査・解析・検証のフローを図-26に示す。広域スケールおよびサイトスケールと同様、フローの中で特に留意すべき項目について、その概要を以下に示す。

#### (1) 岩石コアを用いた試験

局所スケールでは、健全な岩盤の透水性に及ぼす空隙率の影響や、亀裂性岩盤の透水性に及ぼす亀裂面・亀裂ゾーンの物理特性を調べることが必要なため、ボーリングコアを利用した室内での試験の位置付けが重要である。

具体的には、岩石の透水性と岩石中に存在する空隙率や亀裂の特性（開口幅、亀裂面の粗さ）の関係を調べるための試験として、定常流（定水位、変水位）透水試験、トランジエント・パルス透水試験、フローポンプ透水試験などを実施する。

#### (2) 局所スケール地下水水流動解析

局所スケールにおいては、解析の対象となる現象そのものが現時点で不明であるため、解析手法を特定することはできない。しかしながらその現象を最適に評価する解析手法を選定しなければならないことはいうまでもない。

#### (3) 局所スケールにおける解析上の問題点

今回の調査研究内容から、件数は少ないが局所スケールを対象とした解析上の問題点についてとりまとめたものを以下に示す。

- 海外のURLにおける解析結果において、破碎帯ではない岩盤部の水理特性の不均質性を考慮することによって算出した解析値の方が、実測値の地下水圧分布と整合的となるケースがある。
- トレーサー試験に関する解析値と実測値との対比に際しては、浸出位置については概ね一致するものの、定量的な数値については隔たりが大きいことが認められた。

本項で検討した局所スケールにおける調査・解析・検証のフローについては、掘削された坑道（立坑・横坑）内周辺の亀裂や破碎帯を対象とする場合多いため、局所スケールに関しても高差圧環境が発生した状況下に置かれている可能性が高い。したがって、動燃事業団でこれまでに実施してきた「性能評価研究」のうち、「人工バリア周辺の岩盤中の物質移行・水理に関する研究」や「地層科学的研究」のうちの「地質環境中の物質移行・保持に関する調査研究」に反映することができるものと思われる。

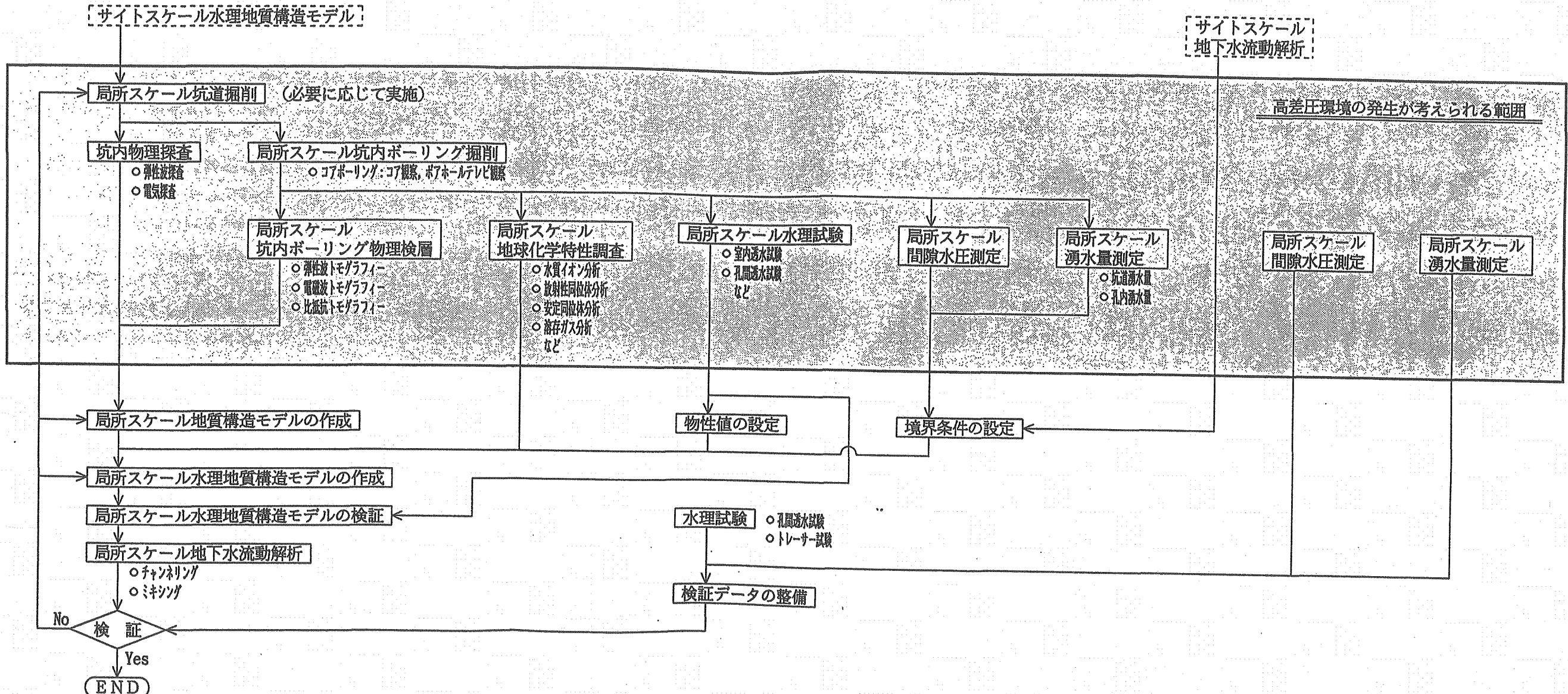


図-26 わが国を対象とした調査・解析・検証のフロー（案）（局所スケール：数cm～数十m四方程度）

### 3.3.4 今後の課題

本年度は、将来的な地下研究施設の建設に際して特に重要と考えられる高差圧環境下における地下水流动解析に着目して国内外の研究事例をもとに解析・検証に必要なデータの取得を前提とした場合の調査手法について整理した。さらに、これらの調査結果に基づいて、わが国を対象とした調査・解析・検証手法について検討を行ない、検討に当っては、検討対象を広域スケール、サイトスケール、局所スケールの3つに分けて実施した。本年度の検討結果から、今後更に高差圧環境下での調査・解析・検証について検討が必要と判断される事項を以下に示す。

調査手法については、後工程となる解析を踏まえて、モデル評価のための調査、物性評価のための調査、境界条件評価のための調査に分類し、既存資料調査、空中からの調査、地表からの調査、地下からの調査の順で行うべき調査内容について検討した。しかしながら、以下の事項について今後さらに詳細な検討を行う必要があると考える。

- 解析におけるモデル化や水理物性の設定に際しての精度向上に資するため、原位置で水理特性をより正確に把握することが求められよう。例えば、モニタリングも含めて地下水流动を直接的に把握することのできる手法である流向・流速測定なども今後検討が必要な項目と考えられる。
- 解析及び検証も踏まえた上で、各調査項目の必要数量の明確化が重要である。
- 空中からの調査、地表からの調査、地下からの調査と調査が変わっていく場合に、これを終了させる判断基準の考え方について検討する必要がある。
- 想定されない高差圧環境に遭遇した場合の代替調査手法を準備しておくことが肝要である。

解析手法については、わが国のある地域全般を対象とする地下水流动系を評価する広域スケール、将来的に掘削される坑道周辺の地下水流动系を評価するサイトスケール、将来的な地下坑道に現れる断層や割れ目を経路とする地下水流动系を評価する局所スケールの3つのスケールごとにその手法が異なるものと考える。

広域スケールにおいては、有限要素法による3次元飽和・不飽和、浸透流解析で対応していくことになると思われるが、サイトスケール及び局所スケールにおいては、フラクチャーネットワーク、物質移行解析手法など新たな解析手法が必要になってくると思われる。これらの解析手法は、現状ではストリパ、釜石の結晶質岩を対象に検討が行われているものであり、わが国のように結晶質岩の上に堆積岩が被覆するような地質環境が見られる地域での地下水流动の評価においては、モデル化に当っての十分な検討が必要であろう。

検証手法においては、量的及び質的な面から調査結果と解析結果の比較が重要であると考える。前者については、どの程度の数量で満足されるのかを検討し、必要に応じて追加調査を計画、実施していくことが肝要である。後者については、解析の妥当性を示すために感度解析などの実施や具体的手順についての検討が求められる。

### 3.4 まとめ

高差圧環境下における地下水流动解析に着目して、海外、国内での研究成果の整理分析を行い、以下の知見を得た。

- ① 用いられた解析手法の多くは有限要素法（FEM : Finite Element Method）であり、一部で（有限）差分法（FDM : Finite Difference Method）が使用された事例があった。
- ② 解析の領域を広域スケール、サイトスケール、局所スケールの3つを想定して解析手法を整理した。広域スケールは、不均質性を考慮した連続体解析がすべてである。サイトスケールでは、連続体解析手法の他に亀裂の幾何学性状を考慮したフラクチャーネットワーク解析手法も使用され始めている。局所スケールによる解析は3件と少なく、連続体解析手法が用いられているが、今後、より多様な解析手法が検討・提案されるものと思われる。
- ③ 解析モデルは、一部2次元で行われているが、多くは3次元である。
- ④ 解析結果の具体的なアウトプットとしては、地下水位分布、地下水頭分布、動水勾配分布、流向流速分布、地表湧水量、空洞湧水量、地下水の移動時間、地下水の移動経路、飽和度分布、トレーサーの破過曲線ないしトレーサー回収量、トレーサーの拡散状況などによることが多い。
- ⑤ 解析結果に対する検証においては、④に示した項目のうち地下水位分布、地下水頭分布、湧水量、破過曲線、トレーサー回収量、トレーサー到達時間などを測定することによって比較されている。
- ⑥ 上記知見に基づき、わが国を対象とした調査・解析・検証手法について、広域スケール、サイトスケール、局所スケールに分けて検討し、概略の手順（案）を示した。

卷末資料

## - 地下深部掘削に対する法規制 -

立坑・坑道等の地下深部掘削においては、図-1に示すように、計画段階、建設段階、試験段階に分けて考えるものとする。

計画段階は、掘削位置選定のための事前調査、調査結果に基づく用地の取得、および施設の設計とそこで実施する試験計画などの施設計画からなる。このため、取得前の土地を調査すること、土地を取得することおよび取得後の土地を開発して施設として使用する計画を立案することに対して許認可が必要となる法律が対象となり、これを表-1に示した。

建設段階は、敷地造成、地上施設建設、地下施設建設に細分され、工事の施工を規制する法律が対象となり、これを表-2に示した。

試験段階は、地下深部で実施する試験を規制する法律が対象となり、これを表-3に示した。

なお、計画段階における施設計画および試験段階においては、これまでの石油備蓄等の新規地下構造物の建設例からみて、構造物と試験の内容が明らかにされた時点で、より明確な法規制が出されるものと思われる。

本検討においては、

- PNC ZJ4449 89-006 結晶質岩における地下研究施設(I)－全断面新規空洞掘削による地下研究施設－、大成建設株式会社、株式会社大林組、鹿島建設株式会社、1989年4月
- PNC SJ4449 89-008 深地層試験場の概念設計(II)、大成建設株式会社、清水建設株式会社、株式会社大林組、鹿島建設株式会社、1989年6月  
をもとに、以下の資料も参考し作成した。
- 計画、設計、施工、維持管理のための地下構造物ハンドブック、建設産業調査会、pp. 895-924、昭和59年3月（添付資料1）
- 地下空間開発利用の現況調査（マスタープラン専門委員会報告書その1）、財団法人エンジニアリング振興協会地下開発利用研究センター、ppI-93-128、平成2年7月（添付資料2）
- 地下貯水池式海水揚水発電の調査補助事業報告書、（社）日本海洋開発産業協会、pp. 299-304、平成7年3月（添付資料3）
- 我が国の石油備蓄（岩盤・地中タンク）技術資料下巻、施設研究センター、pp. 下-483-487（添付資料4）

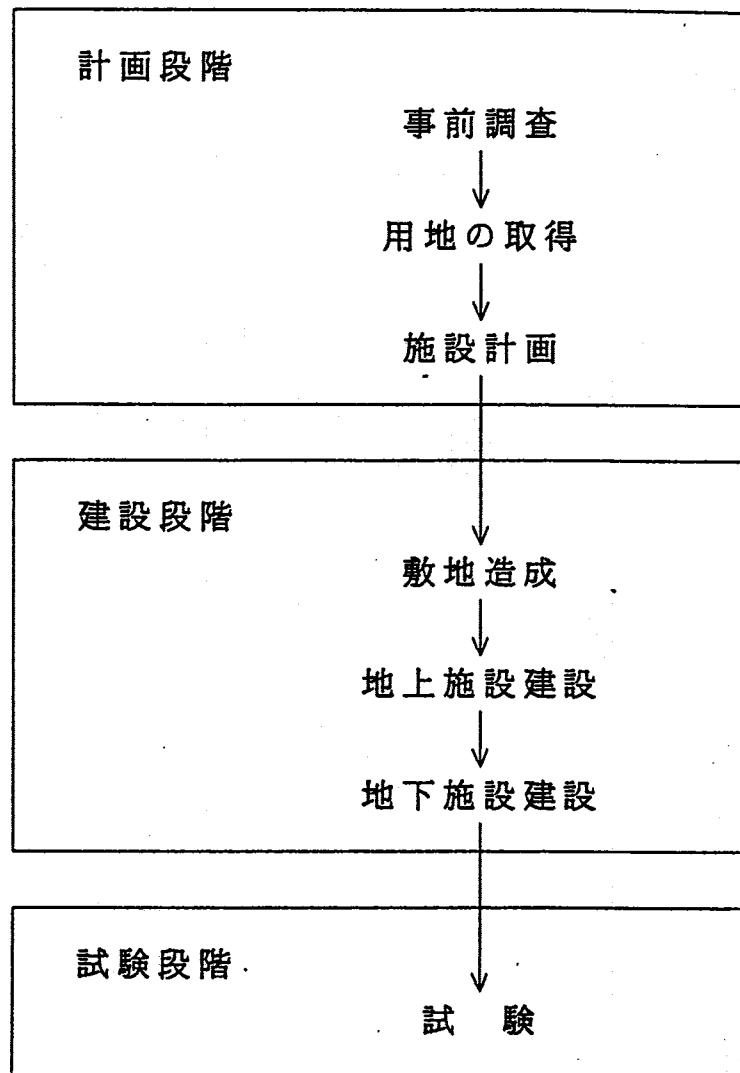


図-1 地下研究施設建設の手順

表一 1 計画段階における関係法規と規制内容

No	法規名称	目的	規制内容	管轄官庁 (提出先)	備考
1	民 法	夫婦、親子、親族、相続、遺言等の、身分と、金銭や不動産の貸借、所有物の売買、その他の取引等の、財産等に関する事項を定めている。公法に対する私法一般をさす。	○土地所有権の範囲(第207条) ○地下の地上権(第269条)		○憲法 事前調査 用地の取得
2	自然環境保全法	自然環境の適正な保全を総合的に推進して、現在及び将来の国民の健康で文化的な生活の確保に寄与する(基本的な自然保護の法制)。	○自然環境保全地域内の行為の制限(第17条、25~28条、45条) ・樹木の伐採 ・土石の採取 ・掘削、切盛土、埋立て等の地形変更 ・工事用建物、施設、看板等の設置	環境庁 (都道府県知事)	事前調査 施設計画
3	自然公園法	優れた自然の風景地を国立、国定または都道府県立自然公園等として保護するとともに、その利用増進を図り国民の保護、休養及び教化に資する。	○国立、国定、都道府県立自然公園内の行為の規制(第17条、18条、20条) ・樹木の伐採 ・土石の採取 ・掘削、切盛土、埋立て等の地形変更 ・工事用建物、施設、看板等の設置	環境庁 (都道府県知事)	事前調査 施設計画
4	鳥獣保護及び狩猟に関する法律	生活環境の改善及び農林水産業の振興のために鳥獣保護事業を実施し、鳥獣の保護繁殖、有害鳥獣の駆除及び危険の予防を図る。	○特別保護地区内の行為の制限(第8条の8) ・水面の埋立て、干拓 ・立木竹の伐採 ・工作物の設置 ・鳥獣の保護繁殖に影響する恐れのある行為	環境庁 (都道府県知事)	事前調査 施設計画
5	森林法	国土の保全と経済の発展のために、森林計画、保安林その他の森林に関する基本的事項を定め、森林の保続培養と森林生産力の増進を図る。	○保安林指定区域内の行為の制限(第34条) ・樹木・竹等の損傷や伐採 ・掘削等土地利用の形態変更 ○地域森林計画の対象となる地域における開発行為(第10条の2) ○保安林の解除(第26条)	農林水産省 (都道府県知事)	事前調査 施設計画
6	国土利用計画法	総合的かつ計画的な国土利用のために土地利用計画の作成、土地取引の規制に関する措置その他、土地利用を調整するための措置を講ずる。	○土地に関する権利の移転等の許可(第14条、23条)	国土庁 (都道府県知事)	用地の取得
7	国有財産法	国有財産の取得、維持、保存及び運用並びに処分について定めている。	○普通財産の貸付け、交換、売払い、譲与等(第20条~第31条)	大蔵省 (各省庁の長)	用地の取得
8	土地収用法	公共の利益となる事業に必要な土地等の収容又は使用に関し、要件、手続、及び効果並びに損失の保障等について規定し、公共の利益の増進と私有財産との調整を図り、国土の適正かつ合理的な利用に寄与する。	○事業準備のための立入(第11条、12条) ○事業の認定等(第16条~18条) ○収容又は使用の手続(第35条~第50条)	(建設大臣、都道府県知事)	事前調査 用地の取得
9	農地法	耕作者の農地の取得の促進、権利の保護及び土地の農業上の効率的利用のための調整により、耕作者の地位の安定と農業生産力の増進を図る。	○農地等の転用許可に関する規定(第4条、5条、37条)	農林水産省 (都道府県知事)	用地の取得
10	農業振興地域の整備に関する法律	農業振興地域を指定し、農業の健全な発展を図るとともに、国土資源の合理的な利用に寄与する。	○農用区地域における開発行為の制限(第15条の15) ○農地等の転用の制限(第17条)	農林水産省 (都道府県知事)	用地の取得
11	温泉法	公共の福祉の増進のため、温泉を保護し、その利用の適正を図る。	○土地の掘削により温泉の湧出量、温度、成分に著しい影響を及ぼす場合(第11条)	環境庁 (都道府県知事)	○都道府県知事による措置命令 施設計画
12	文化財保護法	国民の文化的向上、世界文化の進歩のために文化財を保存しその活用を図る。	○周知の埋蔵文化財包蔵地において土木工事等を行う場合(第57条の2)	文化庁 (都道府県教育委員会)	施設計画
13	河川法	河川を総合的に管理することにより、国土の保全と開発に寄与し、もって公共の安全を保持し、かつ公共の福祉を増進する。	○流水の占用の許可(第23条) ○土地の占用の許可(第24条) ○工作物の新築等の許可(第26条) ○土地の掘削等の許可	建設省 (河川管理者)	施設計画
14	砂防法	山崩れ、河床浸食等による不安定な土砂の発生を抑制し、また発生した土砂については下流に安全に流下させることにより、土石流等の土砂災害、水害を防止し、河川の治水上、利水上の機能を保全する。	○砂防指定地内の行為の禁止・制限(第4条) (この行為の禁止・制限については一般的な基準が定められておらず、すべての都道府県の規則に委ねられている。)	建設省他	施設計画
15	地すべり等防止法	地すべり及びばた山の崩壊による被害を除却しまたは軽減するため、地すべり及びばた山の崩壊を防止して国土の保全と民生の安定に資する。	○地すべり防止区域内の行為の制限(第18条) ・2m以上の掘削 ・地下水を汲み上げる行為 ・ため池用排水路 ・のり切、切り土など	建設省他 (都道府県知事)	施設計画
16	急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律	急傾斜地の崩壊による災害から国民の生命を保護するため急傾斜地の崩壊を防止し、及びその崩壊に対しての警戒避難体制を整備する等の措置を講じ、もって民生の安定と国土の保全を資する。	○急傾斜地崩壊危険区域内の行為の制限(第7条) ・水の浸透を助長する行為 ・ため池、用水路その他防止施設以外の施設及び工作物 ・のり切、切土、掘削、盛土 ・立木竹の伐採 ・木竹の滑下または地引による搬出 ・土石の採取、集積	建設省 (都道府県知事)	施設計画
17	建築基準法	建築物に関する最低基準を定め、国民の生命、財産の保護を図ることを目的とし、建築物の敷地、構造、設備、用途、日陰規制等について定めている。	○建築物の建築等に関する申請(第6条) ○工作物に関する申請(第88条) (工事着手前に、敷地、構造及び設備に関する法律、条例への適合性確認)	建設省 (建築主事)	施設計画
18	鉱業法	鉱物資源を合理的に開発することによって公共の福祉の増進に寄与するため、鉱業に関する基本的制度を定める。	○施業案(第63条)	通商産業省 (通商産業局長)	○施設が鉱山と見なされるとき 施設計画

表一2 建設段階における関係法規と規制内容

No	法規名称	目的	規制内容	管轄官庁 (提出先)	備考
1	文化財保護法	国民の文化的向上、世界文化の進歩のために文化財を保存しその活用を図る。	○遺跡を発見した場合(第57条の5)	文化庁 (都道府県 教育委員会)	敷地造成
2	公害対策基本法	公害対策の総合的推進を図り、国民の健康を保護し、生活環境を保全するため、事業者、国及び地方公共団体の公害の防止に関する責務を明らかにし、公害防止に関する施策の基本方針を定めたもの。	○この法律自体には具体的な規定ではなく、各種公害防止関係の法令の理念上の基礎となるもの	総理府	○地方公共団体公害防止条例 敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
3	大気汚染防止法	生活環境の保全と大気汚染による被害者の保護のため、工場及び事業場における事業活動に伴って発生する煤煙の排出等を規制し、自動車排出ガスに係わる許容限界等を定めているもの。	○粉じん発生施設設置の届出(第18条) ・土石の堆積場 ・ベルトコンベア及びパケットベア ・破碎機及び磨碎機 ・ふるい	環境庁 (都道府県知事)	○大気汚染に係わる 環境基準 敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
4	悪臭防止法	工場その他の事業場における事業活動に伴って発生する悪臭物質の発生を規制し、生活環境を保全し、国民の健康の保護に資する。	○規制基準の遵守(第7条) ○事故時の措置(第10条)	環境庁	敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
5	水質汚濁防止法	公共用水域の水質の汚濁を防止し、水質汚濁による被害者の保護のため、工場及び事業場から公共水域に排出される水を規制する。	○特定施設の設置の届出(第5条) (工場または事業場から公共用水域に水を排水する場合)	環境庁 (都道府県知事)	敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
6	廃棄物の処理及び清掃に関する法律	生活環境の保全及び公衆衛生の工場を図るために廃棄物を適正に処理し、生活環境を清潔にしようとする。	○一般産業廃棄物処理施設設置の届出(第8条) ○産業廃棄物処理施設設置の届出(第15条) (各種建設廃材、建設機械からの廃油、掘削すり、各種の汚水処理により生じた汚泥が対象)	環境庁 厚生省 (都道府県知事)	○掘削残土は対象外 敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
7	騒音規制法	生活環境を保全し、国民の健康の保護のため工場及び事業活動並びに建設工事に伴って発生する騒音について規制を行うとともに、自動車騒音に係わる許容限度を定めている。	○指定地域内における特定建設作業の実施の届出(第14条) (くい打機、くい抜機、びょう打機、削岩機、空気圧縮機、コンクリートブレーカー等を使用する場合)	環境庁 (都道府県知事)	敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
8	振動規制法	生活環境を保全し、国民の健康の保護のため工場及び事業活動並びに建設工事に伴って発生する振動について規制を行うとともに、道路交通振動についても規制を行う。	○指定地域内における特定建設作業の実施の届出(第14条) (くい打機、くい抜機、鋼球による建物等の破壊、舗装破碎機、ブレーカー等を使用する作業)	環境庁 (都道府県知事)	敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
9	建築基準法	建築物に関する最低基準を定め、国民の生命・健康、財産の保護を図ることを目的とし、建築物の敷地、構造、設備、用途、日陰規制等について定めている。	○建築物の建築などに関する申請及び確認(第6条) ○工作物に関する申請及び確認(第88条) (工事着手前に、敷地、構造及び設備に関する法律、条例への適合性確認) ○建築物に関する検査(第7条) ○工事の届出(第15条)	建設省 (建築主事) (第15条は 都道府県知事)	地上施設建設、地下施設建設
10	浄化槽法	浄化槽によるし尿等の適切な処理を図り、生活環境の保全及び公衆衛生の向上に寄与する。	○浄化槽設置届(第5条) ○浄化槽の水質検査依頼(第7条)	(都道府県知事) (保健所)	地上施設建設
11	水道法	清淨にして豊富低廉な水の供給を図り、公衆衛生の向上と生活環境の改善とに寄与する。	○専用水道の確認申請(第32条) ○水質検査及び施設検査(第13条)	厚生省 (都道府県知事)	地上施設建設
12	労働基準法	労働者の保護を目的とする。	○労働契約の締結から終了(解雇・退職)までのすべての面について労働条件の最低基準を規定	労働省	敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
13	労働安全衛生法	労働基準法第42条を受けて、具体的な安全衛生の基準や管理体制等労働者の安全と健康を確保し、更に進んで快適な作業環境を促進するため詳細な規定を設けたもの。	○安全衛生管理制度 ○労働者の危険または健康障害の防止措置 ○機械及び有害物に関する規制 ○労働者の就労に当つての措置	労働省 (労働基準監督署)	○施設が土木工事と見なされる場合 敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
14	鉱山保安法	鉱山労働者に対する危害を防止するとともに鉱害を防止し、鉱物資源の合理的な開発を図る。	○鉱山における人に対する危害の防止 ○鉱山の施設の保全	通商産業省	○施設が鉱山と見なされる場合 地下施設建設
15	火薬類取締法	火薬類による灾害を防止し、公共の安全を確保するため、火薬類の製造・販売・貯蔵・消費等を規制する。	○火薬庫の設置(第12条) ○火薬類の譲渡又は授受の許可(第17条) ○火薬類の消費(第25条) ○火薬類取扱保安責任者及び火薬類取扱副保安責任者の選任(第30条)	通商産業省 (都道府県知事)	敷地造成、地下施設建設
16	消防法	火災の予防・警戒・鎮圧と火災又は地震等の災害による被害を軽減することを目的とし、消防の全般にわたって規定を定めたもの。	○建築物の新築・改築についての消防庁の同意(第7条) ○防火責任者、消防計画の届出(第8条) ○製造所等の設置と変更の許可等(第11条) ○消防用設備等の届出、受検査(第17条)	消防庁 (市長・村長等)	敷地造成、地上施設建設、地下施設建設
17	道路法	道路の整備を図るため、道路に関して路線の指定及び認定、管理、構造、保安、費用の負担区分に関する事項を定め、もって交通の発達に寄与し、公共の福祉を増進する。	○道路占用の許可(第32条) ・工事用板囲、詰所、材料置場の設置 ○道路に関する禁止行為(第43条) ・道路の損傷、汚損 ・土石、竹木等の堆積物 ○車両制限(第47条) ・車両の重量、高さ、長さ等の最高限度を超える車両の通行の許可	建設省 (道路管理者)	○車両制限令 ○道路交通法 敷地造成、地上施設建設、地下施設建設

表—3 試験段階における関係法規と規制内容

No	法規名称	目的	規制内容	管轄官庁 (提出先)	備考
1	公害対策基本法	公害対策の総合的推進を図り、国民の健康を保護し、生活環境を保全するため、事業者、国及び地方公共団体の公害の防止に関する施策の基本方針を定めたもの。	○この法律自体には具体的な規定ではなく、各種公害防止関係の法令の理念上の基礎となるもの。	総理府	○地方公共団体公害防止条例
2	水質汚濁防止法	公共用河川の水質の汚濁を防止し、水質汚濁による被害者の保護のため、工場及び事業場から公共水域に排出される水を規制する。	○特定施設の設置の届出（第5条） (工場または事業場から公共用水域に水を排水する場合)	環境庁 (都道府県知事)	
3	廃棄物の処理及び清掃に関する法律	生活環境の保全及び公衆衛生の工場を図るため廃棄物を適正に処理し、生活環境を清潔にしようとする。	○一般産業廃棄物処理施設設置の届出 (第8条) (各種建設器材、建設機械からの廃油、掘削土、各種の汚水処理により生じた汚泥が対象)	環境庁 厚生省 (都道府県知事)	○掘削廃土は対象外
4	労働基準法	労働者の保護を目的とする。	○労働契約の締結から終了（解雇・退職）までのすべての面について労働条件の最低基準を規定	労働省	
5	労働安全衛生法	労働基準法第42条を受けて、具体的な安全衛生の基準や管理体制等労働者の安全と健康を確保し、更に進んで快適な作業環境を促進するため詳細な規定を設けたもの。	○安全衛生管理制度 ○労働者の危険または健康障害の防止措置 ○機械及び有害物に関する規制 ○労働者の就労に当つての措置	労働省 (労働基準監督署)	○施設が土木工事と見なされる場合
6	鉱山保安法	鉱山労働者に対する危害を防止するとともに鉱害を防止し、鉱物資源の合理的開発を図る。	○鉱山における人に対する危害の防止 ○鉱山の施設の保全	通商産業省	○施設が鉱山と見なされる場合
7	消防法	火災の予防・警戒・鎮圧と火災又は地震等の災害による被害を軽減することを目的とし、消防の全般にわたって規定を定めたもの。	○建築物の新築・改築についての消防庁の同意 (第7条) ○防火責任者、消防計画の届出（第8条） ○製造所等の設置と変更の許可等（第11条） ○消防用設備等の届出、受検査（第17条）	消防庁 (市長村長等)	

JNC TJ7400 2005-086

PNC T  
Z J 1100 95-003(2)

限定資料

図書室

## 高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究（その2）

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1995年3月

鹿島建設株式会社

TNL TJ7400 2005-046

PNC T J 1100 95-003(2)

限定資料

## 高差圧環境における地質環境条件の調査手法に関する研究（その2）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

1995年3月

鹿島建設株式会社

## 目 次

### 調査・解析・検証手法の分析シート

○ スウェーデン .....	1
○ スイス .....	60
○ フィンランド .....	74
○ カナダ .....	77
○ 米 国 .....	93
○ 東濃地域及び釜石原位置試験場 .....	121
○ その他の地下空間構造物 .....	143

施設名	ストリパ (1)	土被り	360 m		
地下構造物の概要	ストリパはスウェーデン中部に位置する鉄鉱石鉱山であったが、現在は採鉱をしていない。放射性廃棄物の地層処分場として結晶質岩を利用するため、地質学的、地球物理学的、地球化学的な影響を調査することを目的に、スウェーデンと米国の共同計画が、1977～1980年に360m坑道で行われた。さらにその後、高レベル放射性廃棄物地層処分候補地の調査技術を開発し、長期にわたる放射性廃棄物処分に関連する特有の工学的および環境的現象を調査することを目的に、O E C D / N E A の後援のもと、カナダ、フィンランド、フランス、日本、スウェーデン、スイスおよび米国の共同でストリパ・プロジェクトが行われた。これは360～410m付近の坑道を使用するとともに、ここから削孔されたボーリング孔および新規に掘削された坑道を使用して、1980年から1991年までの間、各種の調査・試験が行われた。	調査研究の目的	これまでに得られた原位置データから、全領域均一な「均質モデル」、岩盤部と破碎帶部を分けた「Rockモデル」、3種類の岩盤部と2種類の破碎帶の「Rocksモデル」の3つの地質学的、水理地質学的モデルで坑道がある場合、ない場合と主要な破碎帯がある場合、ない場合でストリパ周辺の広域地下水流动システムを検証する。		
地形・地質	鉱石は炭酸塩鉱物に富むレプタイトに胚胎している。このレプタイトには先カンブリア紀のストリパ花崗岩が貫入しており、この岩体が試験場として使用された。ストリパ花崗岩は細粒～中粒、灰色で、石英35%，斜長石30%，微斜長石25%，白雲母5%，緑泥石4%からなる（図-1参照）。	調査項目と調査手法	岩盤および破碎帶の水理特性の評価 ○水理試験：地表および坑内のボーリング孔を使用し、1,000以上のパッカー試験（注水法ないし揚水法）を実施。 地下水流动システムの評価 ○地表からの深層ボーリング削孔時の間隙水圧測定 ○地表からの浅層ボーリングの地下水位測定 ○坑内ボーリングの湧水量測定 ○水理試験実施時の地表、坑内ボーリングの水圧測定 ○水理試験実施時の地表ボーリングの地下水位測定 ○ボーリング孔の亀裂頻度調査 地下水流动を検証するための調査 ○坑内湧水量測定：260m坑道と360m坑道で測定。併せて降水量測定も実施。（ボーリング孔削孔時の孔内湧水量測定）		
地質構造	花崗岩体はN E - S W走向・S E傾斜の境界面を有しており、N W - S E走向・S W傾斜の破碎帶、N E - S W走向・N W傾斜の破碎帶があり、それらの幅は2～12mである。	備考			
水理学環的境	花崗岩基質の透水性は $k = 1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ 、 $S_s = 1 \times 10^{-6} \text{ l/m}$ であるが、割れ目を含む岩盤の平均的な透水係数は $k = 2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 、また破碎帶の平均的な透水係数は $k = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 程度で、地下水の主要な経路となっている。				
地球化環学境的	ストリパの地下水は、300m以浅はC a - H C O <sub>3</sub> 型、700m以深はN a - C a - C l型に分類され、この間は両者の中間型に分類される。全般にM g濃度が低く、C a / M g比が高く、M g / C l比が低くなっている。これは海水起源の地下水ではなく、花崗岩中の流体包有物が漏出しているものと考えられる。 <sup>18</sup> OおよびDから（深部）地下水は中氷期（2万5千年以前）の涵養と考えられる。				

## 施設名 ストリパ (1)

解析手法	コード名	C F E S T (Coupled Fluid Energy and Solute Transport)	解析結果	ROCKモデルでの1層と7層のポテンシャル分布を図-5に示す。均質モデルでは、深度が深くなるにつれてポテンシャルが平均化されてくるが、この結果では上部の地下水水面形状が最下部層（標高-3,000m）まで保たれており、地表水が3,000m以上の深さまで涵養されていることを示している。 <p>ポテンシャルの断面分布を図-6に示す。坑道付近のポテンシャルは、坑道に流入する地下水の影響で標高-3,000m以上までの地下水系に乱れを生じている。</p> <p>隣接する層の水頭差から求めた流入域、流出域を図-7に示す。これによって、深さに伴って地下水の流動状況がどのように変化するかを考察することが可能である。</p> <p>図-8には、特定点からの地下水の流動経路を示した。流動時間は、動水勾配、透水性、流動経路長から算定され、図-8中に示した。この結果は地球化学的、同位体データからの予想値に対して非常に小さいものである。さらに、図-9は流動経路をステレオ図で示したもので、一層、水理特性、境界条件等が理解しやすくなっている。なお、現状では、涵養域からの流動経路を示すことはできない。</p>
	コードの内容	S. K. Gupta, C. R. Cole, C. T. Kincaid, A. M. Montiらによる3次元有限要素法の地下水・エネルギー・溶質移行の連成解析コード。		
	解析モデル	平面的には、図-2に示すように約100km <sup>2</sup> の領域を対象とし、鉛直方向を7層に区分。谷底部や低地の地表付近に存在する粘土や漂礫土（till）は省略。		
解析条件	境界条件	モデルの境界を小河川、河川、湖、地形／流域区分の境界に沿って設定し、水位固定の境界条件を適用。 地下水水面は地形をスムージングした大地形（接峰面図）により求め、涵養量を考慮しない。	検証手法	260m坑道と360m坑道の湧水量の実測結果は450～560ℓ/minである。これに対する解析結果は、均衡モデルが120.8ℓ/min、ROCKモデルが534.0ℓ/min、ROCKSモデルが177.0ℓ/minであり、ROCKモデルが一番実測値に近い値を示した。しかしながら、実測結果には立坑湧水量が含まれておらず、解析結果は過大に評価していることを認識することが必要。
	水理物性	均質モデル：鉛直7層の透水係数、間隙率が一定。k = 1 × 10 <sup>-9</sup> m/s、間隙率0.001。 ROCKモデル：鉛直7層の岩盤の透水係数、間隙率は層単位の深度に対して対数曲線で減少。透水係数は原位置データに基づき k <sub>x</sub> = k <sub>y</sub> = 2.309 × 10 <sup>-9</sup> m/s, k <sub>z</sub> = 5.703 × 10 <sup>-10</sup> m/s（最上層）から k <sub>x</sub> = k <sub>y</sub> = 7.686 × 10 <sup>-12</sup> m/s, k <sub>z</sub> = 6.149 × 10 <sup>-12</sup> m/s（最下層）。なお、各層の厚さは、透水量係数が全層で等しくなるよう調整。 間隙率は、0.000487（最上層）から0.00001（最下層）。 破碎帯に対しては、岩盤の10倍の透水係数、100倍の間隙率。 ROCKSモデル：3種類の岩層（花崗岩、レブタイト、変堆積岩）と2種類の破碎帶（N-S破碎帶とE-W破碎帶）を設定し、ROCKモデルと同様に鉛直層単位の深度に対して対数曲線で透水係数、間隙率を減少（図-3、4参照）。破碎帶幅は一様に5mとした。		

施設名 ストリバ (1)

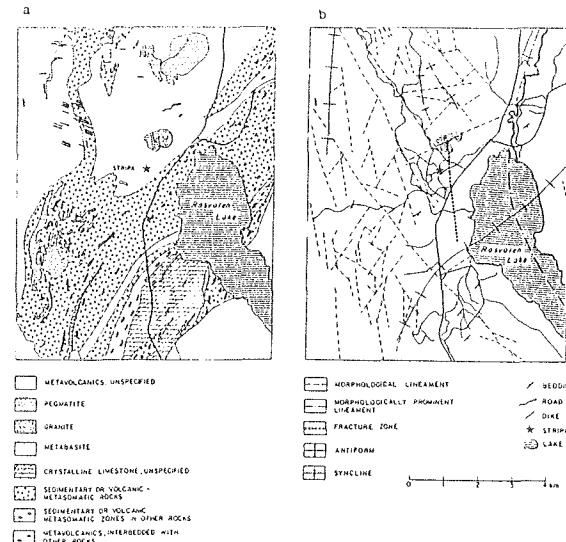


図-1 Regional geology (a) and structural geology (b) of the immediate area around Stripa (after Koark and Lundstrom, [9])

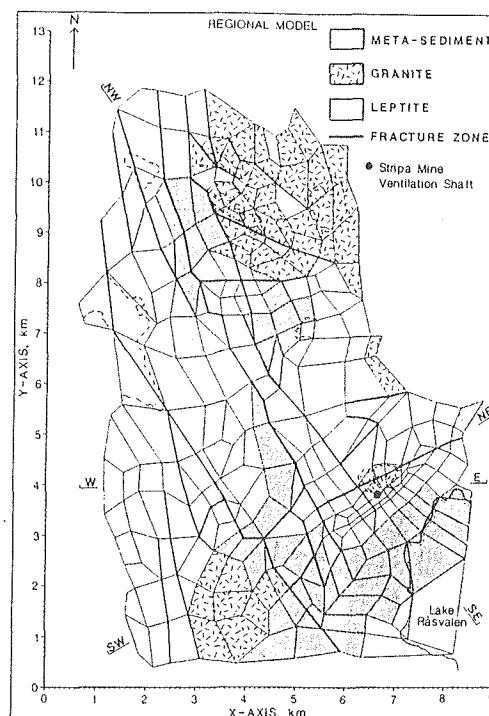


図-2 Finite element mesh and simplified bedrock geology for the regional model showing the location of the major lakes and fracture zones (heavy black lines). The ends of the three referenced cross-sections are indicated by W-E, SW-NE and NW-SE. For reference the Stripa mine ventilation shaft is indicated by the black dot.

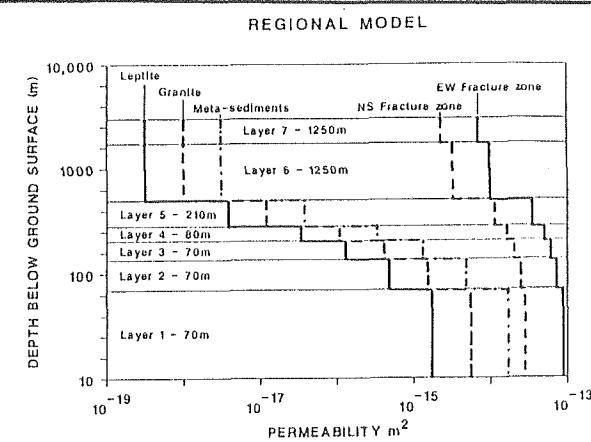


図-3 Permeability values and layer thickness for all elements in each layer of the regional finite element model.

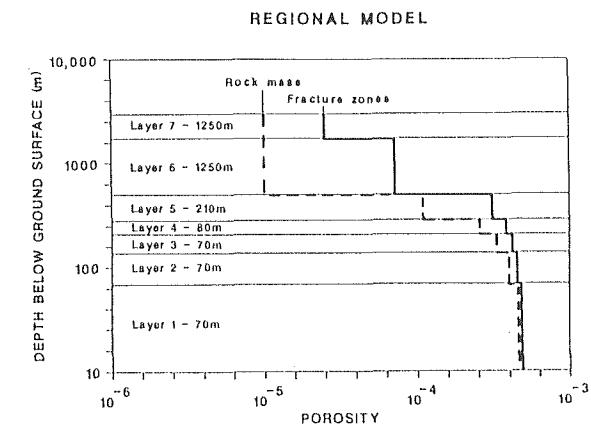


図-4 Porosity values for all elements in each layer of the regional finite element model.

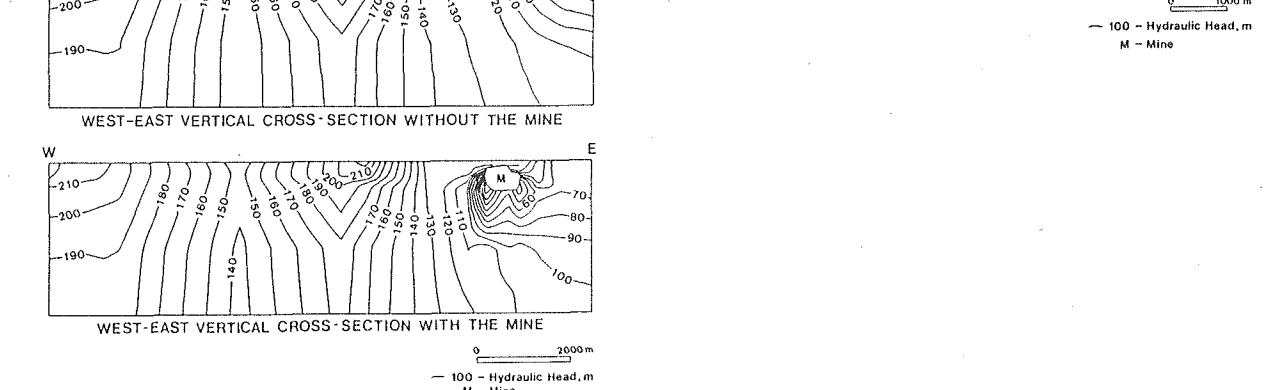
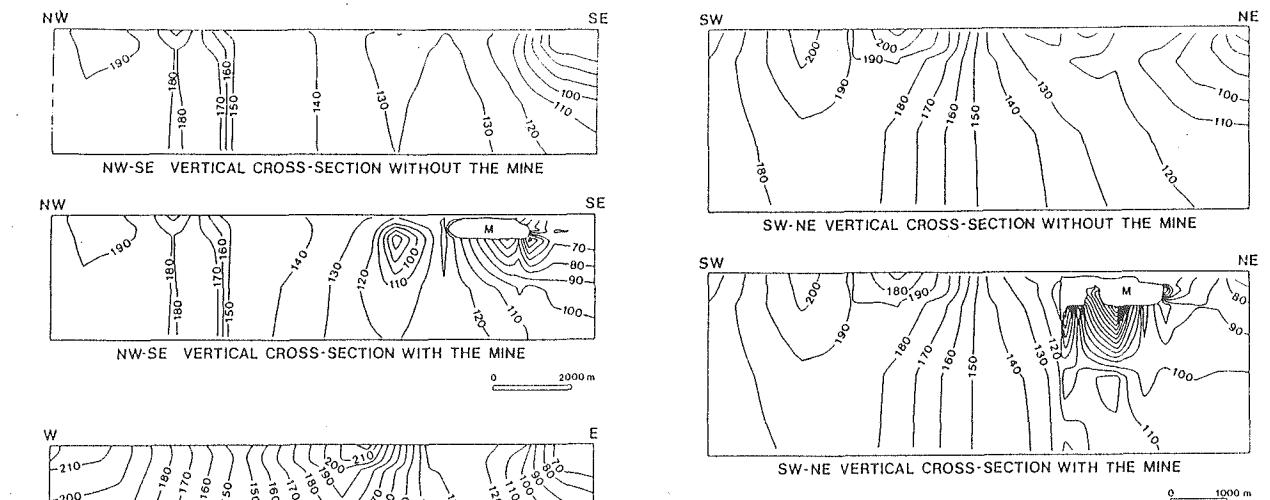


図-6 Three sets of cross-sections (see Figure 5-5 for locations) showing the distribution of isopotentials in the vertical plane for the normal flow system and with the simulated mine.

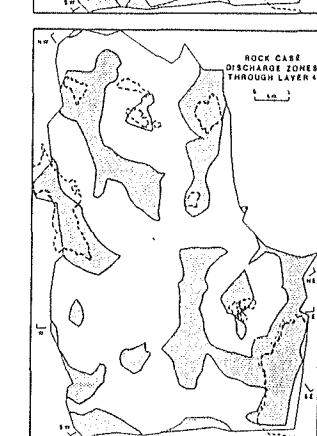
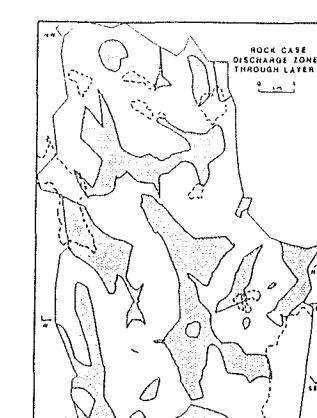


図-7 Distribution of areas of discharge (stippled) and recharge (clear) through layers 1 and 4 for the single rock and fracture zone case. Lake outlines are shown by dashed lines.

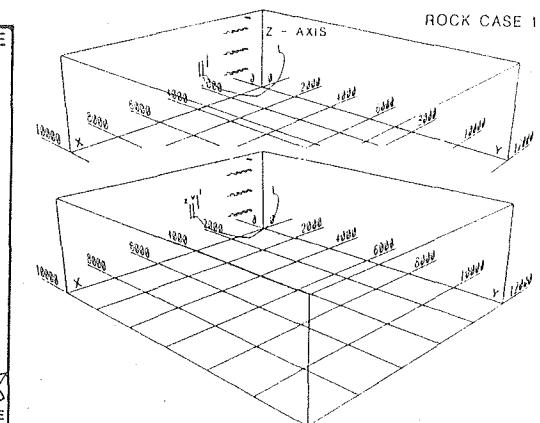
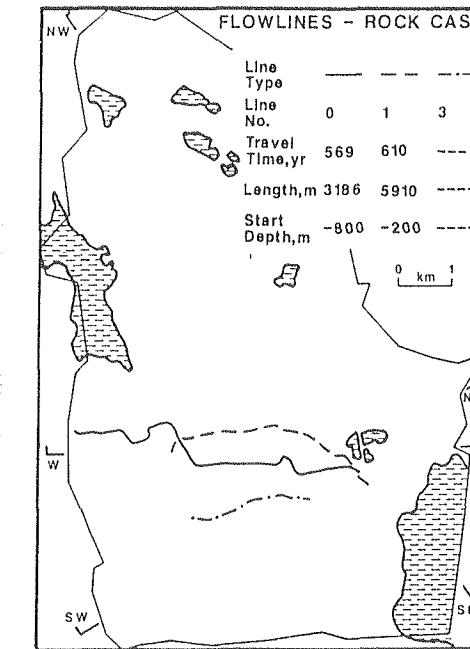


図-9 stereo diagrams showing the three-dimensional shape of selected flow lines discharging into the mine. The three shafts, the main access shaft and the Ventilation and 2 shafts, are shown on one diagram in each stereo pair.

図-8 Plan view of selected flow lines for different depths and different mine discharge points for the rock case.

施設名	ストリパ (2)	土被り	240, 360 m	調査研究の目的	坑道周辺の約20kmの範囲について、定常状態における水頭の分布を「均質モデル」、「ROCKモデル」、「ROCKSモデル」で、坑道のある場合、ない場合と主要な破碎帯がある場合、ない場合について評価
地下構造物の概要	ストリパはスウェーデン中部に位置する鉄鉱石鉱山であったが、現在は採鉱をしていない。放射性廃棄物の地層処分場として結晶質岩を利用するため、地質学的、地球物理学的、地球化学的な影響を調査することを目的に、スウェーデンと米国の共同計画が、1977～1980年に360m坑道で行われた。さらにその後、高レベル放射性廃棄物地層処分候補地の調査技術を開発し、長期にわたる放射性廃棄物処分に関連する特有の工学的および環境的現象を調査することを目的に、O E C D / N E A の後援のもと、カナダ、フィンランド、フランス、日本、スウェーデン、スイスおよび米国の共同でストリパ・プロジェクトが行われた。これは360～410m付近の坑道を使用するとともに、ここから削孔されたボーリング孔および新規に掘削された坑道を使用して、1980年から1991年までの間、各種の調査・試験が行われた。				
地形・地質	鉱石は炭酸塩鉱物に富むレプタイトに胚胎している。このレプタイトには先カンブリア紀のストリパ花崗岩が貫入しており、この岩体が試験場として使用された。ストリパ花崗岩は細粒～中粒、灰色で、石英35%，斜長石30%，微斜長石25%，白雲母5%，緑泥石4%からなる（図-1参照）。	調査項目と調査手法	岩盤および破碎帶の水理特性の評価 ○水理試験：地表および坑内のボーリング孔を使用し、1,000以上のパッカー試験（注水法ないし揚水法）を実施。 地下水流动システムの評価 ○地表からの深層ボーリング削孔時の間隙水圧測定 ○地表からの浅層ボーリングの地下水位測定 ○坑内ボーリングの湧水量測定 ○水理試験実施時の地表、坑内ボーリングの水圧測定 ○水理試験実施時の地表ボーリングの地下水位測定 ○ボーリング孔の亀裂頻度調査 地下水流动を検証するための調査 ○坑内湧水量測定：260m坑道と360m坑道で測定。併せて降水量測定も実施。（ボーリング孔削孔時の孔内湧水量測定）	備考	
地質構造	花崗岩体はN E - S W走向・S E傾斜の境界面を有しており、N W - S E走向・S W傾斜の破碎帶、N E - S W走向・N W傾斜の破碎帶があり、それらの幅は2～12mである。				
水理学環的境	花崗岩基質の透水性は $k = 1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ , $S_s = 1 \times 10^{-6} \text{ l/m}$ であるが、割れ目を含む岩盤の平均的な透水係数は $k = 2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 、また破碎帶の平均的な透水係数は $k = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 程度で、地下水の主要な経路となっている。				
地球化環学境的	ストリパの地下水は、300m以浅はC a - H C O <sub>3</sub> 型、700m以深はN a - C a - C l型に分類され、この間は両者の中間型に分類される。全般にM g濃度が低く、C a / M g比が高く、M g / C l比が低くなっている。これは海水起源の地下水ではなく、花崗岩中の流体包有物が漏出しているものと考えられる。 <sup>18</sup> OおよびDから（深部）地下水は中氷期（2万5千年以前）の涵養と考えられる。				

## 施設名 ストリパ (2)

	コード名	C F E S T	解析結果	ROCKモデルでの坑道なしの等ポテンシャル分布を図-4に示す。また、坑道ありの場合の等ポテンシャル分布を図-5に示す。										
解析手法	コードの内容	S. K. Gupta, C. R. Cole, C. T. Kincaid, A. M. Montiらによる3次元有限要素法の地下水・エネルギー溶質移行連成解析コード。												
	解析モデル	平面的には図-1に示す領域を対象とし、鉛直方向を11層に区分。												
解析条件	境界条件	広域モデル（ストリパ (1)）で求めた等ポテンシャル分布より設定。	検証手法											
	ROCKモデル	ROCKモデル：単一の岩層、単一の破碎帯の物性を有する。ただし、深度方向には以下のように対数曲線で減少。												
	水理物性	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>岩盤部500m以浅</th> <th>岩盤部500m以深</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水平方向透水係数K<sub>x</sub>, K<sub>y</sub></td> <td><math>\log(K_x) = \log(K_y) = -14.0 - 0.008 \times \text{深度(m)}</math></td> <td><math>K_x = K_y = 10^{-18} \text{ m}^2</math></td> </tr> <tr> <td>鉛直方向透水係数K<sub>z</sub></td> <td><math>K_z = 0.5 K_x</math></td> <td><math>K_z = 0.8 K_x</math></td> </tr> <tr> <td>間隙率 n</td> <td><math>n = 5 \times 10^{-4} - 9.8 \times 10^{-7} \times \text{深度(m)}</math></td> <td><math>n = 1 \times 10^{-5}</math></td> </tr> </tbody> </table>			岩盤部500m以浅	岩盤部500m以深	水平方向透水係数K <sub>x</sub> , K <sub>y</sub>	$\log(K_x) = \log(K_y) = -14.0 - 0.008 \times \text{深度(m)}$	$K_x = K_y = 10^{-18} \text{ m}^2$	鉛直方向透水係数K <sub>z</sub>	$K_z = 0.5 K_x$	$K_z = 0.8 K_x$	間隙率 n	$n = 5 \times 10^{-4} - 9.8 \times 10^{-7} \times \text{深度(m)}$
	岩盤部500m以浅	岩盤部500m以深												
水平方向透水係数K <sub>x</sub> , K <sub>y</sub>	$\log(K_x) = \log(K_y) = -14.0 - 0.008 \times \text{深度(m)}$	$K_x = K_y = 10^{-18} \text{ m}^2$												
鉛直方向透水係数K <sub>z</sub>	$K_z = 0.5 K_x$	$K_z = 0.8 K_x$												
間隙率 n	$n = 5 \times 10^{-4} - 9.8 \times 10^{-7} \times \text{深度(m)}$	$n = 1 \times 10^{-5}$												
ROCKSモデル	ROCKSモデル：3種類の岩層と2種類の破碎帶に区分。深度方向は図-2.3に示すように対数曲線で減少。													

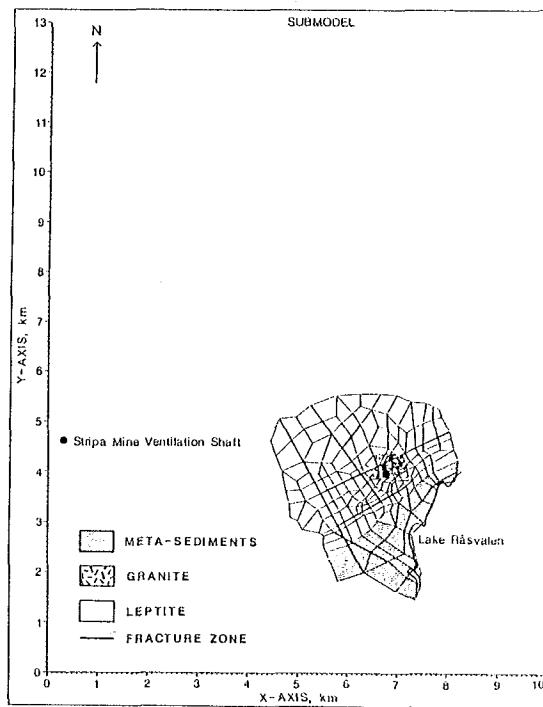


図-1 Finite element mesh and simplified bedrock geology for the sub-region model showing the mine tailings pond, Lake Råsvallen, fracture zones (heavy black lines) and the Stripa mine ventilation shaft (black dot).

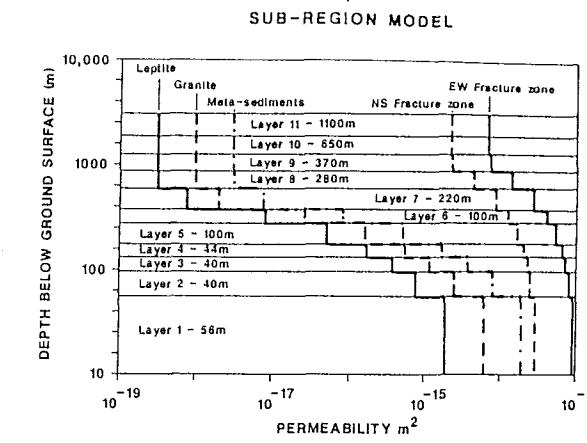


図-2 Permeability values and layer thickness for all elements in each layer of the sub-region finite element model.

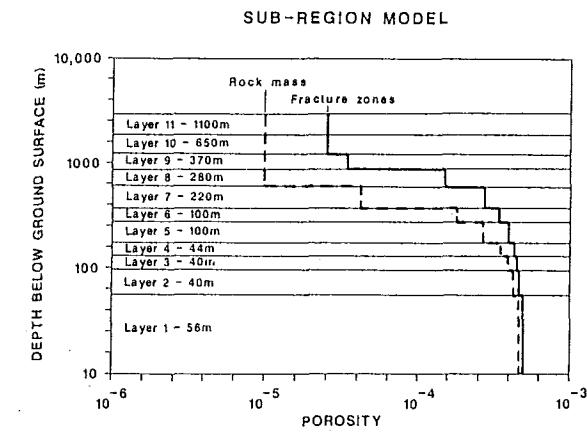


図-3 Porosity values for all elements in each layer of the sub-region element model.

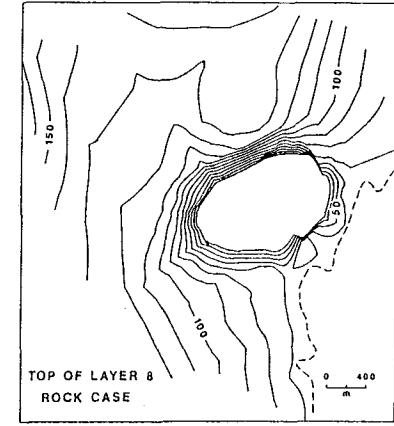
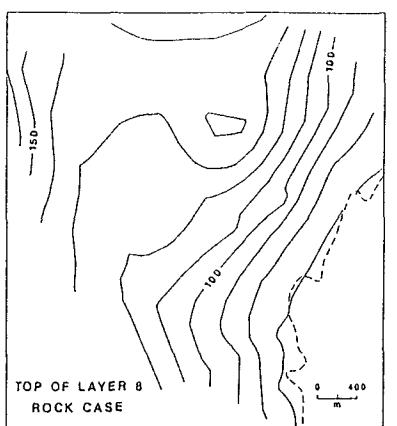
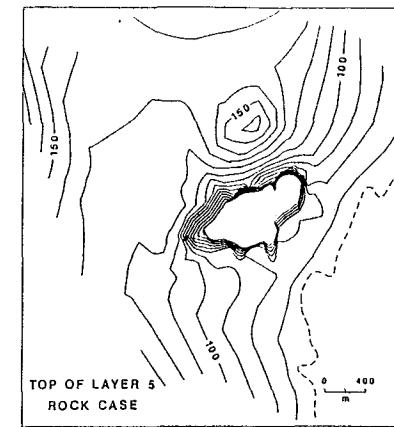
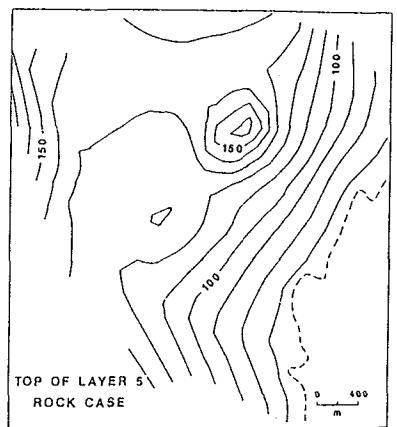
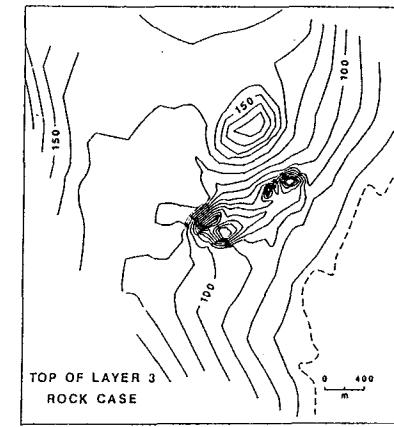
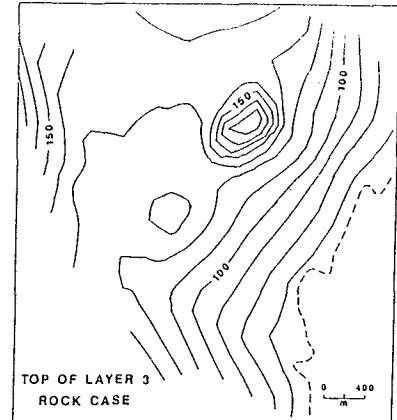


図-4 Distribution of isopotentials on the top of layers 3, 5 and 8 in the submodel for normal boundary conditions. The edge of Lake Råsvallen is shown as a dashed line. Contours are in 10 m intervals.

図-5 Distribution of isopotentials on the top of layers 3, 5 and 8 in the submodel showing the effects of the mining operation. The edge of Lake Råsvallen is shown as a dashed line. Contours are in 10 m intervals.

施設名	ストリパ (3)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	ストリパ・プロジェクトのフェーズ3の目的の一つに、フラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の開発がある。Lawrence Berkley Laboratoryが開発したフラクチャーネットワーク解析を用いてDホールへの湧水量の予測解析を行い、実測値との比較検討を行う。この解析は、Validation Driftへの湧水量予測解析のための予備解析として位置付けられており、ここで得られた知見をもとにモデルを修正し、Validation Driftへの湧水量予測を実施する。
地下構造物の概要	ストリパSCVサイトはストリパ・プロジェクト・フェーズ3の主要研究対象で、ストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である（図-1、2参照）。図-2に示す6本のボーリング孔（N2, N3, N4, W1, W2, V3）を用いて、この領域における地質調査、亀裂特性調査、初期応力、物理探査や単孔式透水試験が行われた。 Dホールは、Validation Driftの掘削前に坑道位置に削孔されたD1~6の6孔のボーリング孔で、図-3に示す配置となっている。	調査項目と調査手法			
地形・地質	SCVサイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。	備考			
地質構造	この領域には、A, B, H, Hb, I, M, Kの大きなフラクチャーゾーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, Hb, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、SCVサイトの外側にも広がっている。I, M, KはおおよそSCVサイトと同等の規模、すなわち一辺100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, Hbのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。				
水理学環的境					
地球化環学境的					

## 施設名 ストリパ (3)

	コード名 TRINET	
解析手法	<p>岩盤内の亀裂を円盤上にモデル化し、複数の円盤の配置によってネットワークを形成し、これに沿った地下水流を有限要素法により解析するコードで、Lawrence Berkley Laboratory (LBL) により開発された。</p> <p>モデル化する亀裂は、破碎帶等の大規模な亀裂ゾーンのみをモデル化する。個々の亀裂ゾーン内では流速は一定であるが、Simulated Annealing手法と呼ばれる逆解析によってチャンネル構造を構築し同定する。このモデル化コードをCHANGEと称する。</p> <p>境界条件によって設定された水頭分布から、領域内の速度分布や湧水量等が産出される。なお、この解析コードではチャンネルフローの他に移流拡散解析も行える。</p>	<p>Dホールにおける総湧水量 N2, N3, N4, W1, W2の5本のボーリング孔の湧水量測定結果をキャリブレーションした透水係数によるDホールにおける湧水量の測定結果を表-2に示す。Dホールの総湧水量は3.1ℓ/min、標準偏差も3.1ℓ/minである。</p> <p>なお、5本のボーリング孔のうちの1孔の湧水量を他の4孔から予測した値と実測値の差をそのボーリング孔の予測誤差とし、5本のボーリング孔の予測誤差の二乗和の平均の平方根をモデルの予測誤差として評価した。その結果は表-3に示すとおりで、モデルの予測誤差は4.6ℓ/minである。</p> <p>湧水量分布 Dホールに供給されるフラクチャーゾーンごとの湧水量を表-4に示す。フラクチャーゾーンごとの供給量の平均値は0.51ℓ/min、標準偏差は0.097ℓ/minである。</p> <p>Dホール間の湧水量分布 ブートストラップ解析により、中心孔を除くD2～6の湧水量の平均値と分散を算定。その手順は次のとおり。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) フラクチャーゾーンの透水性分布から、5本のDホールに各々の透過率の割当て。</li> <li>(2) 各Dホールの流量算出  <math display="block">f(i) = D_{flow} \cdot h(i) / \sum h(i)</math> <math display="block">= D_{flow} \cdot W(i)</math> <p>f(i) : i番目のDホールにおける流量 h(i) : i番目のDホールにおける透過率 W(i) : i番目のDホールにおける透過率の分担率 Dflow : Dホールの総湧水量</p> </li> <li>(3) (1), (2)を1,000回繰り返し計算により、5個のW(i)の平均値、分散の算出</li> <li>(4) Dホール1本あたりの流量の平均値、分散の算定 この結果、平均値0.63ℓ/min、分散0.55ℓ/minとなり、Dホールのうちの1本が総湧水量の約半分を占めていると考えている。</li> </ol>
解析モデル	<p>SCVサイト内のフラクチャーゾーン(A, B, B', C, Ha, Hb, I)と5本のボーリング孔(N2, N3, N4, W1, W2)とDホールをモデル化する。Dホールは1本のボーリング孔として取り扱う。坑道は水理的に影響を及ぼさないので考慮していない。</p> <p>モデルの概略図を図-4に示す。なお、フラクチャーゾーンとボーリング孔の接続を促すために、両者の交差部には半径6mの円盤(チャンネル)を設けてある。実際のチャンネル状況を評価するためにはクロスホール試験でアーニーリングする必要があるが、ボーリング孔の開閉による湧水量測定と水圧測定によって図-5に示す評価を行っている。</p> <p>さらに、フラクチャーゾーン内のチャンネルについては図-6の例に示すように、格子状のネットワークの20%をランダムに並べ、水頭値についてアーニーリング解析を行い、実測値と比較することによって設定している。なお、表-1に実測値とアーニーリング解析による予測値を比較して示す。</p>	
解析条件	観測結果よりSCVサイト内の水頭値は200mであることから、側方境界としてSCVブロックから1,000m離れた地点で水頭200mの固定境界を設定。	Dホール湧水量について、以下の項目を実測値と検証 <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Dホール総湧水量</li> <li>◦ フラクチャーゾーンごとの湧水量分布の算定</li> </ul>
水理物性	<p>N2, N3, N4, W1, W2の5本のボーリング孔の湧水量測定から、ネットワークの透水係数をキャリブレーションして解析に使用。</p> $k = k_a \frac{Q_m}{Q_a}$ <p>k : ネットワークの透水係数 k<sub>a</sub> : アーニーリング解析で用いた透水係数 Q<sub>m</sub> : 測定されたボーリング孔湧水量 Q<sub>a</sub> : アーニーリング解析で得られたボーリング孔湧水量</p>	

施設名 ストリバ (3)

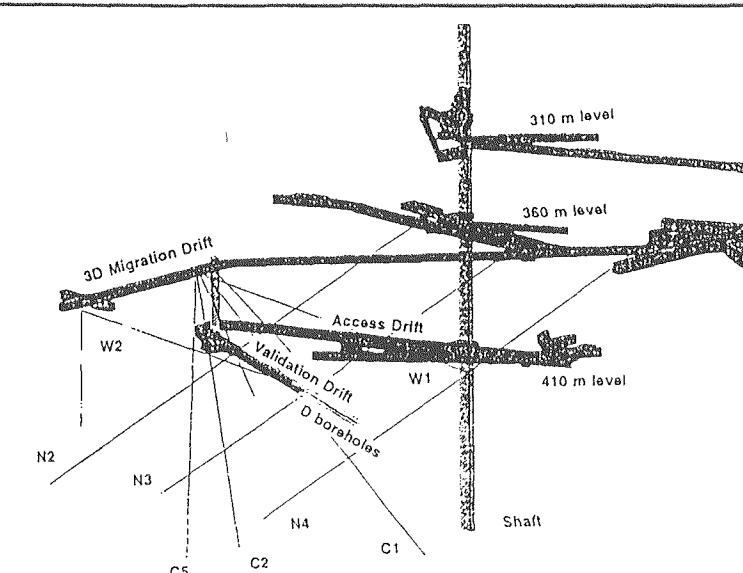


図-1 Location of the access drift, the D boreholes, the C boreholes, and the Validation Drift at the SCV site (Olsson, 1992).

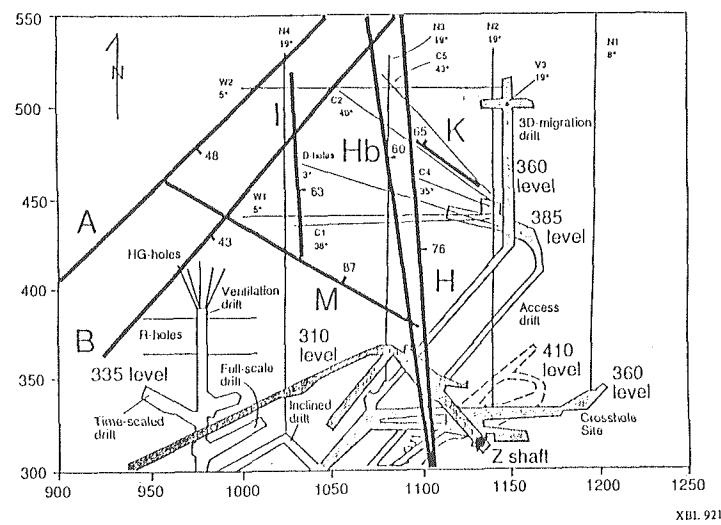


図-2 Conceptual model of the major SCV fracture zones (modified from Black et al., 1990).

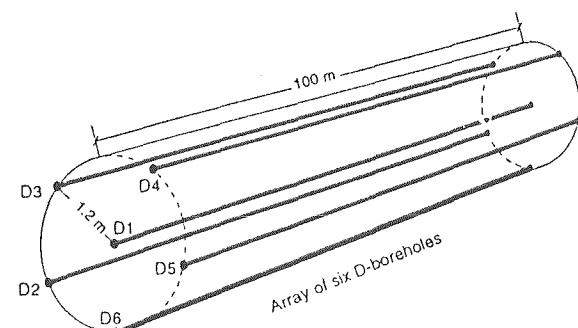


図-3 The simulated drift at the SCV site as outlined by the D boreholes (Olsson, 1992).

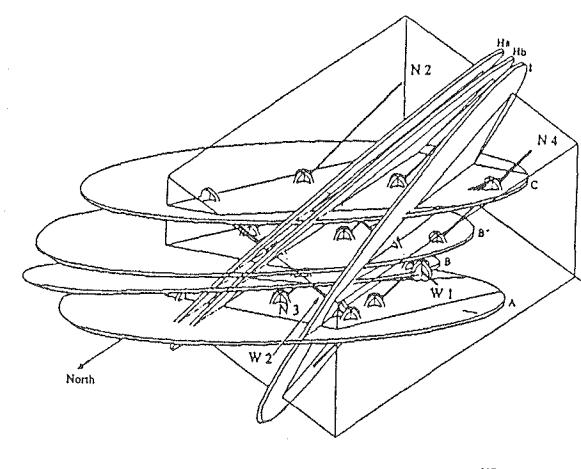


図-4 The hydrologic zone model with the fins that connect the zones to the boreholes.

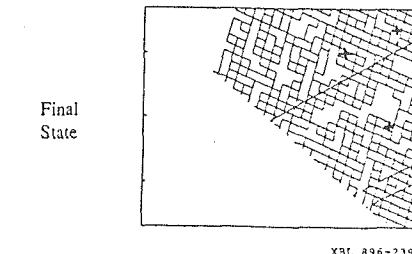
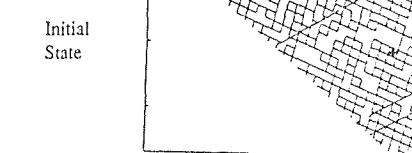
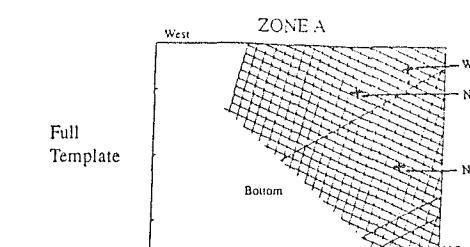


図-6 Grid elements in zone A. The top is the full template, the middle is the initial configuration, and the bottom is the final configuration after annealing.

表-2 Predictions of D-Hole Inflow Based on Annealing and Measured N- and W-Hole Inflows.

Hole	Measured Flow (l/min)	Adjusted Flow (l/min)	$k_i/k_A$ ( $\text{m}^{-1}$ )	Predicted D-hole inflow (l/min)
N2	0.60	0.50	0.16	1.3
N3	0.45	0.37	0.12	0.6
N4	2.6	2.1	0.67	3.4
W1	1.3	1.1	0.35	1.3
W2	12.0	10.0	3.2	8.9
Mean	3.4	2.8	.89	3.1
Standard Deviation	4.9	4.1	1.3	3.1

表-3 Prediction Error

Hole left out	$\langle k_{io} \rangle$	Predicted $Q_i$ (l/min)	Observed $Q_i$ (l/min)	Error (l/min)
N2	1.1	3.4	5	2.9
N3	1.1	3.4	.37	3.0
N4	.96	3.0	2.1	.90
W1	1.0	3.3	1.1	2.2
W2	.33	1.0	10.	9.
Estimated Prediction Error				4.6

表-1 Annealing results at the final iteration = 3749

Hole	Zone	Observed Heads	Predicted Heads
N2	B,B',C	90	90
N3	A,B	80	79
	B'	none	65
	C	none	65
N4	B'	55	55
	C	none	83
	B	none	49
	A	none	49
W1	H <sub>a</sub> ,C	65	65
	H <sub>b</sub>	none	65
	B'	none	65
	B	none	65

表-4 Partition of the Expected Flow into the D-Holes from Each Zones

Zone	Expected inflow (l/min)
A	No intersection
B	0.61
B'	0.49
C	0.44
H <sub>a</sub>	0.44
H <sub>b</sub>	0.64
I	0.41
Mean	0.51
Standard deviation	0.097

施設名	ストリパ(4)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	ストリパプロジェクトのフェーズ3の目的のひとつにフラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の開発がある。 ゴールダー・アソシエイツが開発したフラクチャーネットワーク解析を用いて、Dホールへの湧水量の予測解析を行い、実測値との比較検討を行う。 この解析はValidation Driftへの湧水量予測解析のための予備解析として位置付けられており、ここで得られた知見をもとにモデルを修正し、Validation Driftへの湧水量予測を実施する。
地下構造物の概要	ストリパSCVサイトはストリパプロジェクトフェーズ3の主要研究対象で、ストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。6本のボーリング孔(N2, N3, N4, W1, W2, V3)を用いてこの領域における地質調査、亀裂特性調査、初期応力、物理探査や単孔式透水試験が行われた。 また、Dホールは、Validation Driftの掘削前に坑道位置に掘削されたD1~6の6孔のボーリング孔である。				調査項目と調査手法
地形・地質	SCVサイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。				
地質構造	この領域には、A, B, H, Hb, I, M, Kの大きなフラクチャーゾーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, Hb, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、SCVサイトの外側にも拡がっている。I, M, KはおおよそSCVサイトと同等の規模すなわち一辺100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, Hbのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。				
水理学環的境					
地球化環学境的					

## 施設名 ストリパ(4)

解析手法	コード名 MAFIC	岩盤中の水は主に不連続な亀裂が作り出すネットワーク中を流れるという考え方に基づいており、ゴールダー・アソシエイツによって開発された。 解析システムは、ネットワークをモデル化するFracManとネットワークにおける地下水流解析、拡散解析を行うMAFICからなる。 Frac Manは図-1に示すようにFracSys, FracWorks, MeshMakerから構成される。FracSysは実測データから各亀裂パラメータの確率密度関数を求めるパッケージであり、FracWorksは亀裂モデルの作成と作成された亀裂モデルを用いたサンプリング・シミュレーションを行う。 MeshMakerは作成された亀裂モデルをメッシュ分割し、MAFICへの入力モデルを作成する。 MAFICは有限要素法を用いた解析コードであり、飽和状態の流れの解析及び粒子追跡法による拡散解析を行う。	解析結果	Dホールへの総湧水量は平均で $1.5\ell/\text{min}$ である。 Dホール沿いの湧水量の分布値を図-3に示す。これによるとフランチャーゾーンの近傍で湧水量が多くなっている。これはフランチャーゾーン中の亀裂が必ずしもフランチャーゾーンと平行でないため、比較的大きな亀裂が、フランチャーゾーンと離れたところでDホールと交わったためと考えられる。
	解析モデル	モデルは図-2に示すように $200 \times 200 \times 200\text{m}$ の領域である。この中に坑道、立坑、ボーリング孔がモデル化される。さらに内部にはDホール(Simulated Drift)を中心とした半径10m、長さ100mの円柱状の領域を設け、その内部ではより詳細な亀裂のモデル化を行う。 4つの卓越亀裂について以外の条件で亀裂を発生させる。亀裂の方向については、フィッシャー分布を仮定する。亀裂の形状は円盤(計算では面積が等価な正方形角形を使用)とする。亀裂の半径はトレース長の実測値から対数正規分布に従い、内部領域では最小値1m、最大値50m、外部領域では最小値5m、最大値50mである。 フランチャーゾーンについては、B, B', C, Ha, Hb, Iの6つを設け、亀裂密度を通常岩盤部より大きくすることで内部亀裂を発生させている。 亀裂特性の関する不確実性、フランチャーゾーンの位置に関する不確実性を考慮するモンテカルロシミュレーションを実施		
解析条件	境界条件	モデル境界で実測値とともに水頭固定境界を設定。ただし、深さ方向には静水圧を仮定している。また、坑道、立坑、Dホールは大気圧境界としている。	検証手法	上記のとおり、Dホールへの総湧水量で実測値 $1.71\ell/\text{min}$ を検証している。
	水理物性	亀裂の透水性はパッカ試験の結果に対する比較により求める。亀裂の透水性は対数正規分布を仮定し、パッカ試験の透水性はその区間と交わる亀裂の透水性の和であると仮定。なお、この区間で交差する亀裂の数はポアソン分布を仮定。 透水性の分布パラメータの不確実性に対してもモンテカルロシミュレーションを実施。		

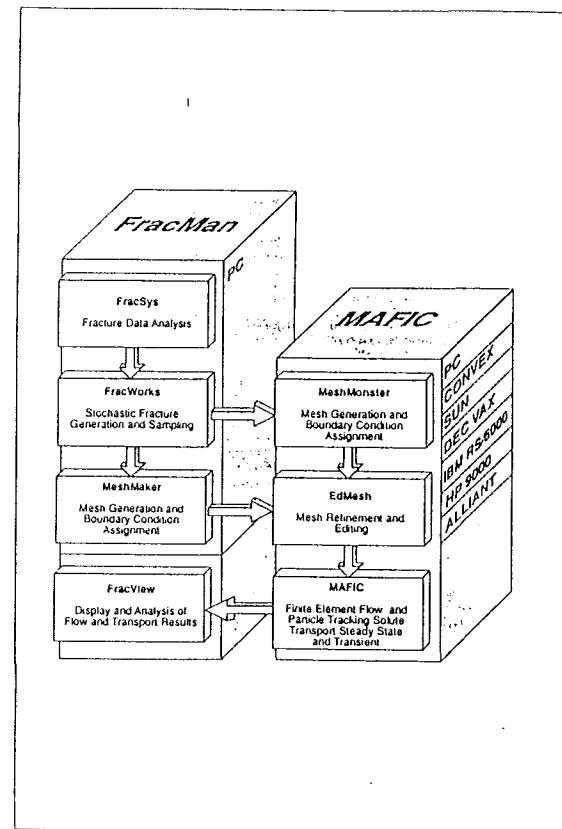


図-1 FRACMAN DISCRETE FRACTURE SIMULATOR

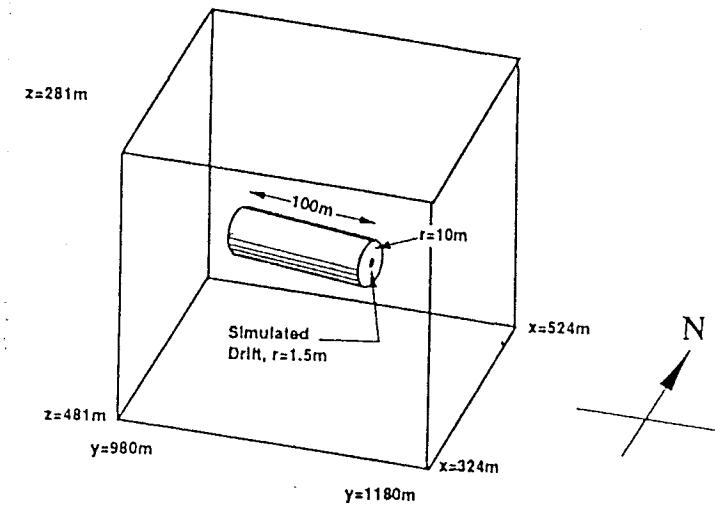


図-2 Boundary of inner and outer subregions

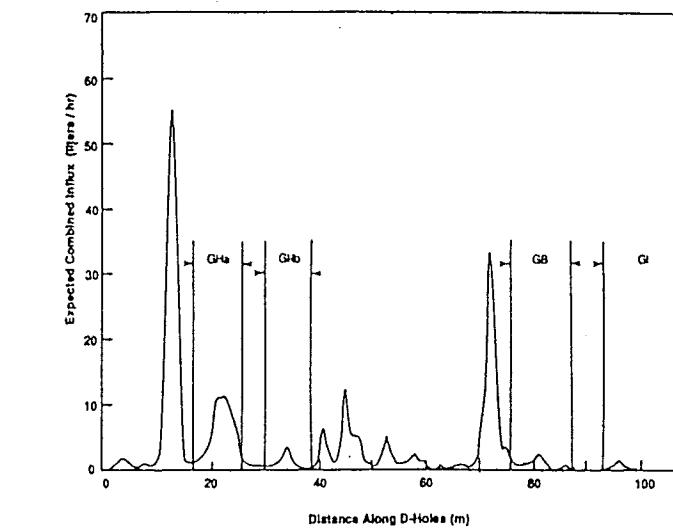


図-3 Predicted spatial distribution of flux into d-holes

施設名	ストリパ(5)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	ストリパプロジェクトのフェーズ3の目的のひとつにフラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の関係がある。 ハウエル研究所が開発したフラクチャーネットワーク解析を用いて、Dホールへの湧水量の予測解析を行い、実測値との比較検討を行う。 この解析はValidation Driftへの湧水量予測解析のための予備解析として位置付けられており、ここで得られた知見をもとにモデルを修正し、Validation Driftへの湧水量予測を実施する。
地下構造物の概要	ストリパSCVサイトはストリパプロジェクトフェーズ3の主要研究対象で、ストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。6本のボーリング孔(N2, N3, N4, W1, W2, V3)を用いてこの領域における地質調査、亀裂特性調査、初期応力、物理探査や単孔式透水試験が行われた。 また、Dホールとは、Validation Driftの掘削前に坑道位置に掘削されたD1~6の6孔のボーリング孔である。	調査項目と調査手法			
地形・地質	SCVサイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。	備考			
地質構造	この領域には、A, B, H, Hb, I, M, Kの大きなフラクチャーゾーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, Hb, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、SCVサイトの外側にも拡がっている。I, M, KはおおよそSCVサイトと同等の規模すなわち一辺100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, Hbのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。				
水理学環的境					
地球化環学的境					

## 施設名 ストリパ(5)

解析手法	コード名 NAPSAC	連続体モデルでの解析結果 Dホールへの総透水量の予測結果を図-3に示す。フラクチャーゾーンからの湧水量として Hゾーン $0.33\ell/\text{min}$ Bゾーン $0.13\ell/\text{min}$ Iゾーン $0.9\ell/\text{min}$ の合計 $1.36\ell/\text{min}$ であり、それ以外からの湧水量も合計して $1.45\ell/\text{min}$ という結果になっている。従って フラクチャーゾーン以外からの湧水量は全体の6.2%となっている。
	コードの内容  非圧縮性流体を対象とした亀裂面内の平行平板流れに基づく定常有限要素法で粒子追跡法を用いた物質移行についても解析を行うことができる。AEA Harwell Laboratoryによって開発された。	
解析モデル	Dホール全体への総湧水量を評価するために、 $150 \times 150 \times 100\text{m}$ の解析領域を設定。その内部にA, B, C, H, Iの5つのフラクチャーゾーン（幅はHのみ10mで、それ以外は5m）を設けた等価連続体モデルを設定。  さらに $8 \times 8 \times 8\text{ m}$ を領域化し、その中に亀裂を発生させ、Dホール内の部分的な湧水量を求めるための不連続体モデルを設定。  亀裂の形状は方形とする。亀裂の長さは、対数正規分布に従うものとし、測定上のバイアスを考慮して平均値、標準偏差を算定。亀裂密度はフラクチャーゾーンとそれ以外の部分についてボーリングコアから決定。解析モデルの例を図-1に示す。なお、下記の水理物性の評価から図-2に示すように亀裂全体の40%をモデル化すればよいとしている。	不連続体モデルでの解析結果 不連続体モデルでの解析結果を図-4に示す。図中の横線が測定限界を示している。解析結果では、 $15\text{ m}$ 区間で $1.1\text{cc}/\text{min} \sim 7.1\text{cc}/\text{min}$ で平均 $2.8\text{cc}/\text{min}$ という流入量を示し、区間中の1ないし2本の割れ目からの流入量が全体の $1/4$ を示しているという結果が得られているが、ほとんどが測定限界以下であるため、検証は困難である。
解析条件	等価連続体モデルではMine Model (Galeほかが提唱) (ストリパ(12)参照)に従って設定。 不連続体モデルではボーリング孔内を大気圧とし、外部境界は連続体モデルの計算値を基にした固定水位境界を設定。	
水理物性	フラクチャーゾーン以外の透水試験結果から、亀裂の透水性分布を算定。この場合、方向で分別した各亀裂グループは同一の分布特性をもつという仮定を設けて、最尤推定法を用いている。  透水テンソルは以下のとおりである。  $k = k_0 \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & -0.3 \\ 0.2 & 1.4 & -0.1 \\ -0.3 & -0.1 & 2.1 \end{pmatrix}$ <p><math>k_0</math>は平均値 <math>1.14 \times 10^{-17}\text{ m}^2</math>、標準偏差 <math>0.17 \times 10^{-17}\text{ m}^2</math>である。</p>	検証手法  Dホール湧水量について検証は次のとおりである。 全体湧水量については、実測結果は水頭が $0\text{m}$ ではなく $17\text{m}$ の段階の結果であるが、 $1.7\ell/\text{min}$ であり、Dホール各孔の範囲は $1.67 \sim 1.75\ell/\text{min}$ である。これに対し、解析結果は平均 $1.45\ell/\text{min}$ 、範囲 $0.36 \sim 5.80\ell/\text{min}$ でほぼ妥当なものと考えている。また、亀裂密集ゾーンからの流入量の割合は、実測値が $79\% \pm 2\%$ であるのに対し、予測では $79\% \sim 98\%$ 、平均 $94\%$ という結果となっている。さらに、亀裂密集ゾーン以外からの流入は、実測はされていないが、全流入量と亀裂密集ゾーンの流入量の差で評価すると、実測値が $0.35 \pm 0.04\text{ml}/\text{min}$ 、予測値が $0.09\text{ml}/\text{min}$ という結果となっている。

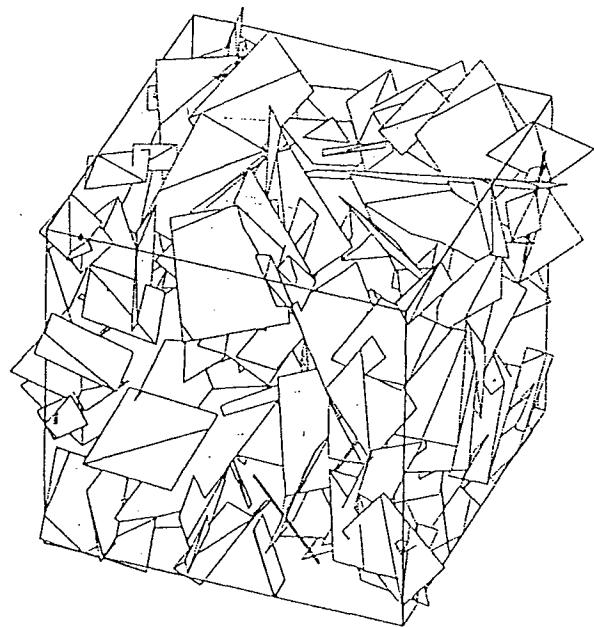


図-1 解析モデル例 (TR 91-31)

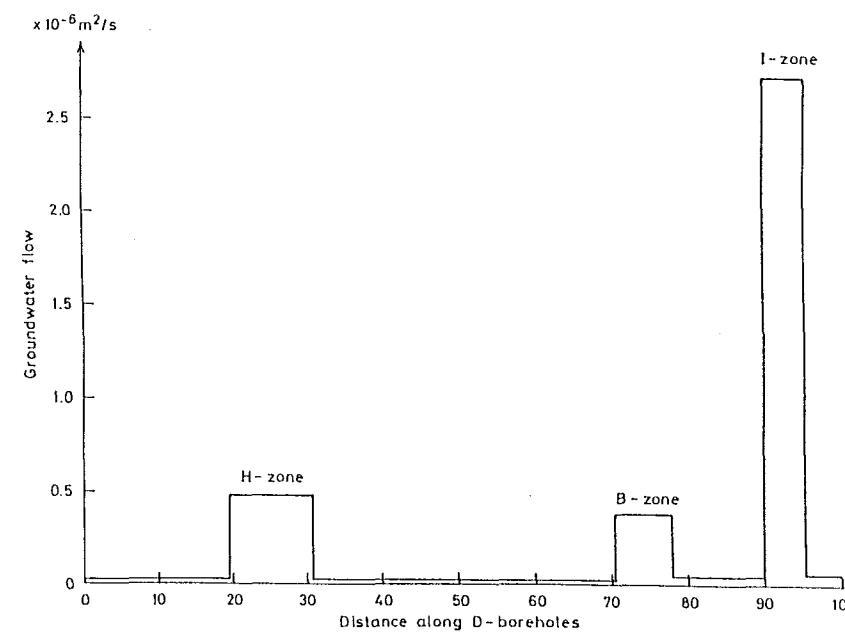


図-3 Summary of SCV model predictions of flux to the D-borehole

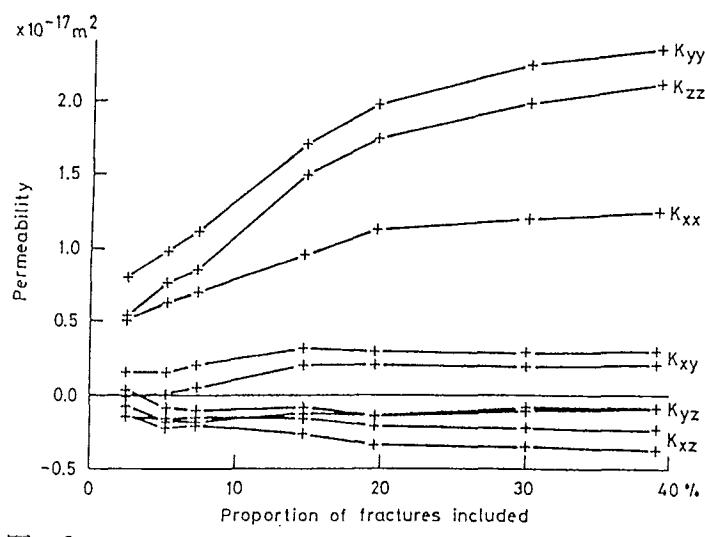


図-2 Permeability tensor components as functions of proportion of fractures simulated in an 8m cube network model of averagely fractured rock

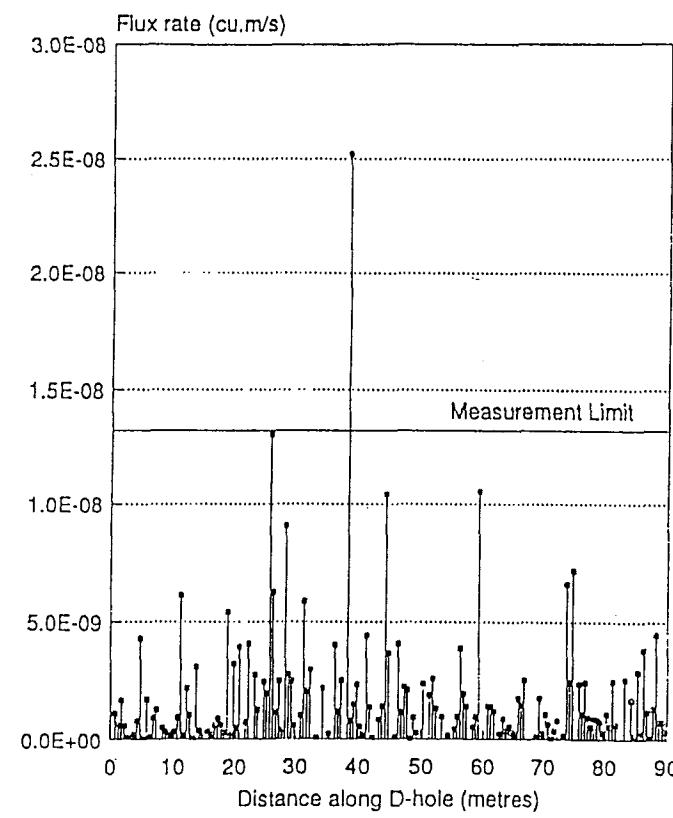


図-4 Distribution of fluxes predicted by AEA Harwell for individual 0.5m sections of a typical D-hole in averagely fractured rock.

施設名	ストリパ(6)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	ストリパプロジェクトのフェーズ3の目的のひとつにフラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の開発がある。 ここで解析はValidation Drift建設による地下水の流動と水頭の変化をLawrence Berkley Laboratoryのフラクチャーネットワーク解析により予測し、解析の妥当性を評価することを目的としている。解析はサイトスケールの規模である。
地下構造物の概要	ストリパS C V (Site Characterization and Validation) サイトは、ストリパプロジェクトフェーズ3の主要研究対象でストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。Validation Driftとは図-1～3に示すようにDホールに沿って掘削された幅3m、高さ2.4mの楕円形状の長さ50mの坑道である。このため、坑道の奥にはDホールが50m残っている。				
地形・地質	S C V サイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。	調査項目と調査手法	備考	調査項目と調査手法	備考
地質構造	この領域には、A, B, H, H b, I, M, Kの大きなフラクチャーゾーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, H b, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、S C V サイトの外側にも拡がっている。I, M, Kはおおよそ S C V サイトと同等の規模すなわち一辺100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, H bのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。				
水理学環的境					
地球化環学的境					

## 施設名 ストリパ(6)

解析手法	コード名 TRINET コードの内容 S. K. Gupta, C. R. Cole, C. T. Kincaid, A. M. Montiによる3次元有限要素法の地下水・エネルギー溶質移行連成解析コード。	二次元モデル (1) Validation Driftの総湧水量 表-1に示すとおりであり、解析上この湧水量はすべてHゾーンからのものである。 (2) 坑道掘削による水頭変化の大きさと分布 解析結果を表-2に示す。W1-5では $k_s/k = 0.25$ の時に極めてよい一致が見られる。一方W2-4の場合には、予測値は誤差内に入っているが、実測値よりも小さめの値になっている。これはC1-2の実測結果においてW2-4の応答が非常に小さかった影響である。 (3) ボーリング孔T-1掘削による水頭変化の大きさと分布 表-3, 4, 5にT-1湧水量とT-1掘削後のDrift掘削前後の水位低下量を示す。湧水量は実測よりもかなり大きな値となっている。のことより、T-1への流入量の小さなスキン効果では表現できないことがわかる。 三次元モデル (1) Validation Driftへの総湧水量とHゾーン及びその他の領域への流入分布 表-6, 7にDホール定常データを用いたアニーリング結果による予測結果とC1-2に対してアニーリングしたモデルによる結果を示す。HゾーンとBゾーンへの流入のみでそれ以外の領域への流入は考慮されていない。 (2) 坑道掘削による水頭変化の大きさと分布 表-8にDホール定常データを用いたアニーリング結果による予測結果、表-9にC1-2に対するアニーリングによる予測結果を示す。なお、Dホールの観測結果を用いてアニーリングした予測結果を表-10, 11に示す。表-8, 9と比較すると実測された水位低下量は掘削により減少していることがわかる。一方、スキン効果を考慮するにつれ、水位低下量が減少していることがわかる。表-7, 8の右側の値は湧水量を最もよく再現したときの値であるが水位低下傾向を再現してはいない。 (3) T-1孔掘削による水頭変化の大きさと分布 この解析ではDホール(SDE)に対してアニーリングし、Validation Driftの結果に対して、キャリブレーションしたモデルを用いている。表-12, 13, 14にT-1掘削によるT-1への湧水量とValidation Drift掘削前後の水位低下量を示す。また表-15, 16, 17にC1-2, Dホール、Validation Driftの3つの結果をもとにアニーリングした結果を示す。2次元モデルと同様に湧水量については、スキン効果のみでは表現できないことがわかる。
	二次元モデル Hゾーンのみを対象としたモデルでボーリング孔C1-2をアニーリングしたモデルとC1-2とDホール(SDE)をアニーリングした結果は図-4, 5に示すようにかなり異なったものになった。また両方のチャンネリングの密度はかなり低いものあり、パーコレーション限界の50%に近いものになった。 さらに坑道掘削によるスキン効果の検討が行われた。Driftの5m以内の要素の透水性( $k_s/k$ )を0.05, 0.25, 0.41等に下げてValidation Drift湧水量と湧水に伴う水位低下の実測と比較すると表-1, 2に示すとおりで、スキン効果を考慮しないケースと考慮したケースの解析が行われた。 三次元モデル 図-6に示すようにSCVサイトに分布するHゾーンを含め7つのフラクチャーゾーンをモデル化している。フラクチャーゾーン内へチャンネルのモデル化は、Dホールを定常と見なした一定流入量の条件でのアニーリングとC1-2の観測結果のみを用いたアニーリングを行い、次にDホールの観測結果を用いて改善し、Validation Drift掘削影響を予測し、最後にValidation Driftの情報をもとにモデルを改良し、T-1孔掘削による応答を予測する非定常条件を用いた検討も行っている。	解析結果
解析モデル	N, W孔及びDホールの各区間で観測された水頭に合うように設定。	実測値と比較検証は下記の項目について行っている。 ① Hゾーンからの湧水量と分布 ② Bゾーンからの湧水量と分布 ③ 坑道掘削による水頭変化の大きさと分布 ④ ボーリング孔T-1掘削による水頭変化の大きさと分布 また、それぞれの解析手法と解析結果を総合的に判断して以下の基準を満足しているかどうかについても検討を行い、次のとおりである。 (1) 定量的評価基準（実測値を反映しているか？、予測値は実測値とおなじオーダーであるか？）についてはスキン効果に依存するが、水頭値の予測には適するとしている。 (2) 定性的評価基準（予測された分布は、観測された分布と十分に等しいか？）については亀裂ゾーンのみをモデル化しているので対象外である。 (3) 有用性評価基準（SCVのようなサイトに適用する際に、十分に有用性があるか？）については、SCVサイトのように亀裂ゾーンが明確な場合には有用であるとしている。 (4) 実用性評価基準（モデルを作成するために必要なデータを容易に得ることができるか？）については対象の亀裂ゾーンが定まれば、逆解析であるので実用性は高いとしている。
解析条件	境界条件	検証手法
	物理物性	

施設名 ストリバ (6)

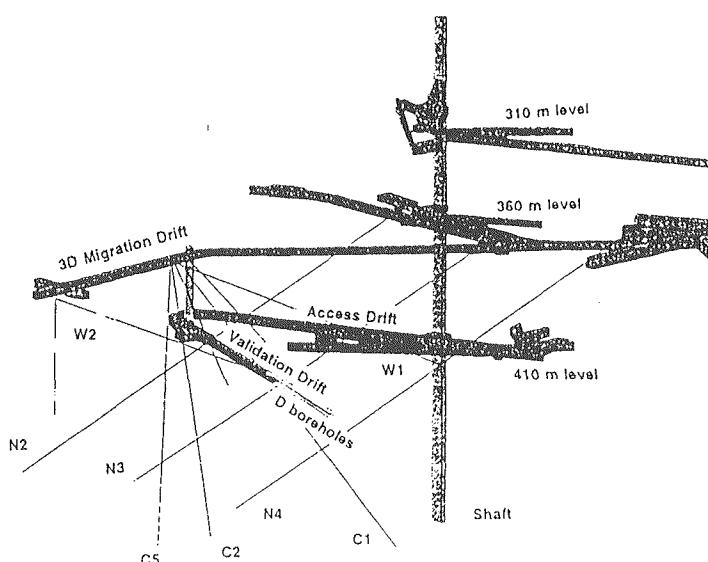


図-1 Location of the access drift, the D boreholes, the C boreholes, and the Validation Drift at the SCV site (Olsson, 1992).

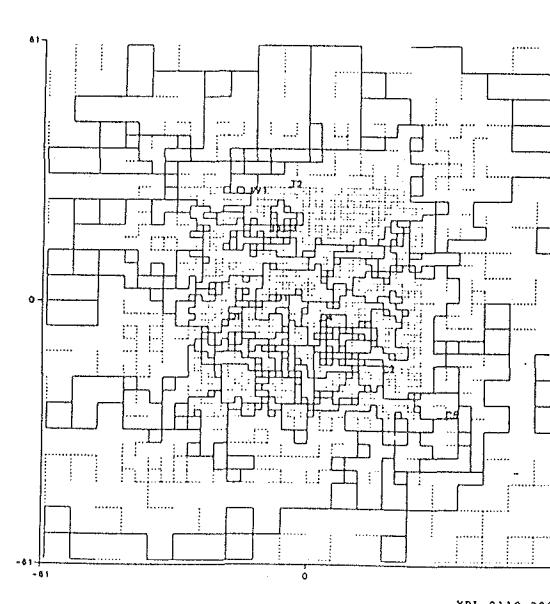


図-4 The two-dimensional model annealed to C1-2.

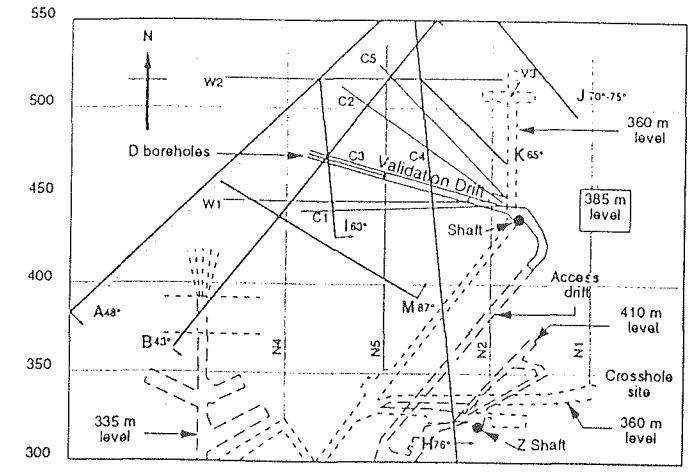


図-2 Plan view of features contained in the conceptual model of the SCV site at the 385 m level (Olsson, 1992).

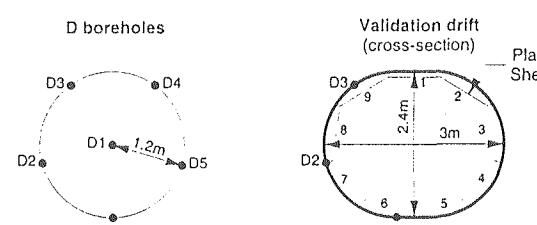


図-3 Relative position of the D boreholes and approximate shape of the Validation Drift after excavation (Olsson, 1992).

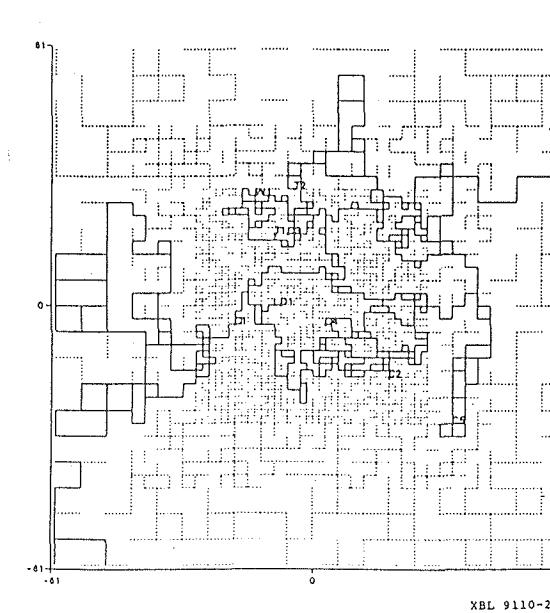


図-5 The two-dimensional model co-annealed to C1-2 and SDE.

表-1 Prediction of flow into to the VD drift using two-dimensional model calibrated to the SDE.

B/H Interval Name	Conceptual Zone in Interval	Measured Flow (l/min) $K_v/K = 0.025^*$	Calculated Flow (l/min) $\pm 0.2$			
			$K_v/K = 1$	$K_v/K = .41$	$K_v/K = .25$	$K_v/K = .05$
D-H 24-27	H (24-26)	0.1 $\pm$ 7	.84	0.66	0.54	0.18

\*Skin required to make the flow equal to 0.1 l/min

表-2 Prediction of drawdown due the VD drift using two-dimensional model calibrated to the SDE.

B/H	Zone	Measured Drawdown (m)	Calculated Drawdown (m)				
			$K_v/K = 1$	$K_v/K = .41$	$K_v/K = .25$	$K_v/K = .05$	$K_v/K = .025$
W1-5	H	60.0 $\pm$ 6	96.5	75	61	21	12
W2-4	H	32.0 $\pm$ 13.5	16.6	12.5	10	3	2

\*Skin required to make the flow equal to 0.1 l/min

表-3 Prediction of flow into to the T1 hole using two-dimensional model based on LSC, SDE and VD results.

B/H Interval Name	Conceptual Zone in Interval	Measured Flow (l/min)	Calculated Flow (l/min)	
			$K_v/K = 1$	$K_v/K = 0.10^*$
T1-H 31-38	H	0.0017	0.64	0.33

\*skin required to reduce flow by a factor of 2

表-4 Prediction of total drawdown due the opening of T1 using two-dimensional model based on LSC, SDE and VD results.

B/H Interval Name	Conceptual Zone in Interval	Measured Drawdown (m)	Calculated Total Drawdown (m)	
			$K_v/K = 1$	$K_v/K = 0.10^*$
W1-5 2-31.0	H (46-50)	not avail.	199.3	148.1
W2-4 48-65	H (50-57)	not avail.	26.0	18.7

\*skin required to reduce flow by a factor of 2

表-5 Prediction of incremental drawdown due the opening of T1 using two-dimensional model based on LSC, SDE and VD results.

B/H Interval Name	Conceptual Zone in Interval	Measured Drawdown (m)	Calculated Total Drawdown (m)	
			$K_v/K = 1$	$K_v/K = 0.10^*$
W1-5 2-31.0	H (46-50)	not avail.	138.5	87.3
W2-4 48-65	H (50-57)	not avail.	15.5	8.2
C2-1 71-86	H(63-9)	not avail.	66.1	34.8
C3-1 1-70	H(59-61)	not avail.	150.7	79.1
C4 1-60.0	H(55-59)	not avail.	65.8	34.6

\*skin required to reduce flow by a factor of 2

表-6 Prediction of flow into the Validation Drift using three-dimensional model annealed to steady state SDE data.

B/H Interval Name	Conceptual Zone in Interval	Flow (l/min)	Calculated Flow (l/min) $\pm 0.2$				
			$H:K_v/H:K = 1$	$H:K_v/H:K = .41$	$H:K_v/H:K = .25$	$H:K_v/H:K = .05$	$H:K_v/H:K = .025$
D-H 24-27	H (24-26)	0.1 $\pm$ 7	0.31	0.63	0.51	0.18	0.09
D5-B 28-100	B (90-2), I (94-6)	0.56 $\pm$ 7	0.80	0.81	0.81	0.83	0.60

表-7 Prediction of flow into the Validation Drift using three-dimensional model annealed to C1-2.

B/H Interval Name	Conceptual Zone in Interval	Measured Flow (l/min)	Calculated Flow (l/min) $\pm 0.2$				
			$H:K_v/H:K = 1$	$H:K_v/H:K = .41$	$H:K_v/H:K = .25$	$H:K_v/H:K = .05$	$H:K_v/H:K = .024$
D2-H 24-27	H (24-26)	0.1 $\pm$ 7	.82	.65	.53	.19	0.10
D5-B 28-100	B (90-2), I (94-6)	0.563	1.05	1.06	1.07	1.1	0.57

\* $H:K_v/H:K$  required to make the D-H flow equal to 0.1 l/min.

$B:K_v/B:K$  required to make the D-B flow equal to 0.56 l/min.

施設名 ストリパ (6)

表-8 Prediction of total drawdown due the Validation Drift using three-dimensional model annealed to the steady-state SDE.

B/H Interval Name	Conceptual Zone	Estimated Drawdown (m)	Calculated Drawdown (m)				
			K <sub>v</sub> /K = 1	K <sub>v</sub> /K = .05	K <sub>v</sub> /K = .25	K <sub>v</sub> /K = .41	H:K <sub>v</sub> /K=.025
N2-1 161-207	B(188-190)	23.4±5.6	60.3	23	44	50.3	14
N2-2 111-160	K(151-153)	24.8±4.2	103.1	97	101	102	70
N2-4 2-75.0	M (29-31)	2.5±3.1	90	28	58	70	16
N3-1 101-189	A(162-170),B(133-4)	41.7±7.5	102.8	97	100	101	70
N3-2 2-100	M (38-39)	43.2±6.5	86.9	29	59	70	17
N4-1 142-219	A (153-156)	28.4±6.5	102.8	97	100	102	70
N4-2 109-141	B (122-126)	29.2±8.5	102.8	97	100	101	70
N4-3 77-108	M (102)	71.4±11.5	102.8	97	100	101	70
W1-1 92-147	B(130-138),I(108-12)	no data	102.8	97	100	101	70
W1-3 55-75	Hb (59-60)	59.0±6	102.5	39	75	87	23
W1-5 2-31.0	H (46-50)	60.0±6	102.5	39	75	87	23
W2-1 110-147	A(124-145),I(116-21)	20.2±7	102.8	97	100	101	70
W2-2 76-109	B (83-91)	31.1±5.0	96.5	92	95	95	67
W2-3 66-75	Hb (67-71)	24.1±8	111.2	106	109	110	77
W2-4 48-65	H (50-57)	32.0±13.5	110.7	106	108	109	76
D2-H 24-27	H (24-26)	no data	124	124	124	124	124
D5-B 28-100	B (90-2), I (94-6)	no data	243	243	243	243	243

\*H:K<sub>v</sub>/K required to make the D-H flow equal to 0.1 l/min

B:K<sub>v</sub>/K required to make the D-B flow equal to 0.56 l/min.

表-9 Prediction of total drawdown due to the Validation Drift using three-dimensional model annealed to C1-2.

B/H Interval Name	Conceptual Zone	Estimated Drawdown (m)	Calculated Drawdown (m)				
			H:K <sub>v</sub> /K=1	K <sub>v</sub> /K=.41	K <sub>v</sub> /K=.25	K <sub>v</sub> /K=.05	H:K <sub>v</sub> /K=.024
N2-1 161-207	B(188-190)	23.4±5.6	13	11	10	7	4
N2-2 111-160	K(151-153)	24.8±4.2	27	23	20	10	6
N2-4 2-75.0	M (29-31)	2.5±3.1	0	0	0	0	0
N3-1 101-189	A(162-170),B(133-4)	41.7±7.5	124	123	123	121	84
N3-2 2-100	M (38-39)	43.2±6.5	71	63	57	41	21
N4-1 142-219	A (153-156)	28.4±6.5	57	57	56	55	24
N4-2 109-141	B (122-126)	29.2±8.5	118	116	116	113	48
N4-3 77-108	M (102)	71.4±11.5	62	59	51	51	26
W1-1 92-147	B(130-138),I(108-12)	no data	70	76	75	66	32
W1-3 55-75	Hb (59-60)	59.0±6	0**	0**	0**	0**	0**
W1-5 2-31.0	H (46-50)	60.0±6	103	88	76	43	22
W2-1 110-147	A(124-145),I(116-21)	20.2±7	70	68	68	65	21
W2-2 76-109	B (83-91)	31.1±5.0	65	63	62	57	24
W2-3 66-75	Hb (67-71)	24.1±8	64	62	60	55	25
W2-4 48-65	H (50-57)	32.0±13.5	23	20	19	4	8
D2-H 24-27	H (24-26)	no data	189	155	131	58	31
D5-B 28-100	B (90-2), I (94-6)	no data	121	101	87	44	24

\*H:K<sub>v</sub>/K required to make the D-H flow equal to 0.1 l/min

B:K<sub>v</sub>/K required to make the D-B flow equal to 0.56 l/min.

\*\*Disconnected by annealing

表-10 Predicted versus measured drawdowns for the SDE after annealing to the SDE.

B/H Interval Name	Interval	Conceptual Zone in Interval	Estimated Drawdown (m)	Calculated* Drawdown (m)
N2-1	161-207	B(188-190)	45.4±5 <sup>t</sup>	34
N2-2	111-160	K(151-153)	75.7±22.5	94
N2-4	2-75.0	M (29-31)	9.2±3 <sup>t</sup>	68
N3-1	101-189	A (162-170), B (133-4)	90.9±22	94
N3-2	2-100	M (38-39)	39.3±6 <sup>t</sup>	63
N4-1	142-219	A (153-156)	78.2±27	94
N4-2	109-141	B (122-126)	74.2±24	94
N4-3	77-108	M (102)	72.1±10 <sup>t</sup>	94
W1-1	92-147	B (130-138), I (108-12)	63.4±18	94
W1-3	55-75	Hb (59-60)	61.1±20	75.9
W1-5	2-31.0	H (46-50)	95.4±21.5	78.3
W2-1	110-147	A (124-145), I (116-21)	70.6±18	94
W2-2	76-109	B (83-91)	53.7±4 <sup>t</sup>	87
W2-3	66-75	Hb (67-71)	36.8±42	104
W2-4	48-65	H (50-57)	70.8±38	103
D2-H	24-27	H (24-26)	220±30	107
D5-B	28-100	B (90-2), I (94-6)	220±30	226

\*using instantaneous drawdown as a substitute for equilibrium drawdown.  
(Error given in the table is much lower than the true error)

表-12 Prediction of flow into the T1 hole using three-dimensional model based on steady-state annealing of SDE and calibrated to VD results.

B/H Interval Name	Interval	Conceptual Zone in Interval	Measured Flow (l/min)	Calculated Flow (l/min)	
				T:K <sub>v</sub> /K = 1	T:K <sub>v</sub> /K = 0.10*
T1-H	31-38	H	0.0017	1.2	0.7

\*T:K<sub>v</sub>/K required to reduce flow by a factor of 2

表-13 Prediction of total drawdown due the opening of T1 using three-dimensional model based on SDE and VD results.

B/H Interval Name	Interval	Conceptual Zone in Interval	Measured Drawdown (m)	Calculated Total Drawdown (m)	
				T:K <sub>v</sub> /K=1	T:K <sub>v</sub> /K= *
N2-1	161-207	B(188-190)			84
N2-2	111-160	K(151-153)			84
N2-4	2-75.0	M (29-31)			105
N3-1	101-189	A (162-170), B (133-4)			85
N3-2	2-100	M (38-39)			84
N4-1	142-219	A (153-156)			84
N4-2	109-141	B (122-126)			84
N4-3	77-108	M (102)			84
W1-1	92-147	B (130-138), I (108-12)			85
W1-3	55-75	Hb (59-60)			172
W1-5	2-31.0	H (46-50)			172
W2-1	110-147	A (124-145), I (116-21)			not available
W2-2	76-109	B (83-91)			85
W2-3	66-75	Hb (67-71)			90
W2-4	48-65	H (50-57)	</		

施設名 ストリパ (6)

表-14 Prediction of incremental drawdown due the opening of T1 using three-dimensional model based on SDE and VD results.

B/H Interval Name	Interval	Conceptual Zone in Interval	Measured Drawdown (m)	Calculated Incremental Drawdown (m)	
				T:K <sub>v</sub> /K=1	T:K <sub>v</sub> /K=.09*
N2-1	161-207	B(188-190)		70	44
N2-2	111-160	K(151-153)		14	34
N2-4	2-75.0	M (29-31)		89	57
N3-1	101-189	A (162-170), B (133-4)		23	34
N3-2	2-100	M (38-39)		107	67
N4-1	142-219	A (153-156)		14	33
N4-2	109-141	B (122-126)		14	33
N4-3	77-108	M (102)		14	33
W1-1	92-147	B (130-138), I (108-12)		15	33
W1-3	55-75	Hb (59-60)		149	92
W1-5	2-31.0	H (46-50)		149	92
W2-1	110-147	A (124-145), I (116-21)	not available	15	33
W2-2	76-109	B (83-91)		11	30
W2-3	66-75	Hb (67-71)		13	35
W2-4	48-65	H (50-57)		13	35
C1-2	40-70	H (45-54)		88	56
C1-3	71-105	B (96-100)		blank	blank
C1-4	106-150	A (138-148), I (105-9)		blank	blank
C2-1	1-70.0	H (63-69)		113	71
C2-2	71-86	B (76-82)		30	36
C2-3	87-124	A (109-113), I (122-4)		15	33
C3-1	1-70.0	H (59-61)		180	144
C4	1-60.0	H (55-59)		136	84
C5-1	83-140	A (118-9)		0	0
C5-2	4-82.0	B (90), H (84-85)		26	34
D5-B	28-100	B (90-2), I (94-6)		0	0
T2-H		H			

\*T:K<sub>v</sub>/K required to reduce flow by a factor of 2

表-16 Prediction of total drawdown due to the opening of T1 using three-dimensional model based on C1-2, SDE and VD results.

B/H Interval Name	Interval	Conceptual Zone in Interval	Estimated Drawdown (m)	Calculated Total Drawdown (m)	
				T:K <sub>v</sub> /K=1	T:K <sub>v</sub> /K=.09*
N2-1	161-207	B(188-190)		7	6
N2-2	111-160	K(151-153)		15	10
N2-4	2-75.0	M (29-31)		0	0
N3-1	101-189	A (162-170), B (133-4)	Not available	86	85
N3-2	2-100	M (38-39)		47	33
N4-1	142-219	A (153-156)		26	25
N4-2	109-141	B (122-126)		54	51
N4-3	77-108	M (102)		35	30
W1-1	92-147	B (130-138), I (108-12)		46	38
W1-3	55-75	Hb (59-60)		0	0
W1-5	2-31.0	H (46-50)		76	45
W2-1	110-147	A (124-145), I (116-21)		36	33
W2-2	76-109	B (83-91)		40	37
W2-3	66-75	Hb (67-71)		41	37
W2-4	48-65	H (50-57)		12	10
C1-2	40-70	H (45-54)		58	43
C1-3	71-105	B (96-100)		110	109
C1-4	106-150	A (138-148), I (105-9)		109	108
C2-1	1-70.0	H (63-69)		85	56
C2-2	71-86	B (76-82)		34	26
C2-3	87-124	A (109-113), I (122-4)		30	28
C3-1	1-70.0	H (59-61)		88	57
C4	1-60.0	H (55-59)		106	68
C5-1	83-140	A (118-9)		25	21
C5-2	4-82.0	B (90), H (84-85)		17	13
T2-H		H		84	46

\*T:K<sub>v</sub>/K required to reduce flow by a factor of 2

表-17 Prediction of incremental drawdown due to the opening of T1 using three-dimensional model based on C1-2, SDE and VD results.

B/H Interval Name	Interval	Conceptual Zone in Interval	Estimated Drawdown (m)	Calculated Incremental Drawdown (m)	
				T:K <sub>v</sub> /K=1	T:K <sub>v</sub> /K=.09*
N2-1	161-207	B(188-190)		3	2
N2-2	111-160	K(151-153)		9	4
N2-4	2-75.0	M (29-31)		0	0
N3-1	101-189	A (162-170), B (133-4)	Not available	2	1
N3-2	2-100	M (38-39)		26	12
N4-1	142-219	A (153-156)		2	1
N4-2	109-141	B (122-126)		6	3
N4-3	77-108	M (102)		9	4
W1-1	92-147	B (130-138), I (108-12)		12	6
W1-3	55-75	Hb (59-60)		0	0
W1-5	2-31.0	H (46-50)		54	23
W2-1	110-147	A (124-145), I (116-21)		5	2
W2-2	76-109	B (83-91)		6	3
W2-3	66-75	Hb (67-71)		6	2
W2-4	48-65	H (50-57)		4	2
C1-2	40-70	H (45-54)		31	16
C1-3	71-105	B (96-100)		1	0
C1-4	106-150	A (138-148), I (105-9)		1	0
C2-1	1-70.0	H (63-69)		60	31
C2-2	71-86	B (76-82)		15	7
C2-3	87-124	A (109-113), I (122-4)		3	1
C3-1	1-70.0	H (59-61)		61	33
C4	1-60.0	H (55-59)		79	39
C5-1	83-140	A (118-9)		8	4
C5-2	4-82.0	B (90), H (84-85)		8	4
T2-H		H		60	1

\*K<sub>v</sub>/K required to reduce flow by a factor of 2

表-15 Prediction of flow into the T1 hole VD and remaining D-holes (D-B) using three-dimensional model based on annealing to C1-2, SDE data and calibrated to VD results.

B/H Interval Name	Interval	Conceptual Zone in Interval	Measured Flow (l/min)	Calculated Flow (l/min)	
				T:K <sub>v</sub> /K=1	T:K <sub>v</sub> /K=.09*
T1-H	31-38	H	0.0017	0.37 .068 .56	0.18 .085 .57
D-H					
D-B					

施設名	ストリパ(7)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	ストリパプロジェクトのフェーズ3の目的にフラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の開発がある。 ここでの解析はValidation Drift建設による地下水の流動と水頭の変化をGolder Associatesのフラクチャーネットワーク解析により予測し、実測値と比較して解析の妥当性を評価することを目的としている。 解析はサイトスケールの規模である。
地下構造物の概要	ストリパS C V (Site Characterization and Validation) サイトは、ストリパプロジェクトフェーズ3の主要研究対象でストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。Validation DriftはDホールに沿って掘削された幅3m、高さ2.4mの楕円形状の長さ50mの坑道である。このため、坑道の奥にはDホールが50m残っている。				
地形・地質	S C V サイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。	調査項目と調査手法	備考	調査項目と調査手法	備考
地質構造	この領域には、A, B, H, H b, I, M, Kの大きなフラクチャーゾーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, H b, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、S C V サイトの外側にも拡がっている。I, M, Kはおおよそ S C V サイトと同等の規模すなわち一辺100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, H bのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。				
水理学環的境					
地球化環学境的					

## 施設名 ストリパ(7)

解析手法	コード名 MAFIC	<p>岩盤中の水は主に不連続な亀裂が作り出すネットワーク中を流れるという考え方に基づいており、ゴールダー・アソシエイツによって開発された。</p> <p>解析システムは、ネットワークをモデル化するFracManとネットワークにおける地下水解析、拡散解析を行うMAFICからなる。</p> <p>Frac Manは図-1に示すようにFracSys, FracWorks, MeshMakerから構成される。FracSysは実測データから各亀裂パラメータの確率密度関数を求めるパッケージであり、FracWorksは亀裂モデルの作成と作成された亀裂モデルを用いたサンプリング・シミュレーションを行う。</p> <p>MeshMakerは作成された亀裂モデルをメッシュ分割し、MAFICへの入力モデルを作成する。</p> <p>MAFICは有限要素法を用いた解析コードであり、飽和状態の流れの解析及び粒子追跡法による拡散解析を行う。</p>	<p>(1) Validation Drift総湧水量 ケース④による結果は図-3に示すとおりで、平均値<math>0.26\ell/\text{min}</math>、最頻値<math>0.12\ell/\text{min}</math>、予測範囲<math>0.00024\sim0.9\ell/\text{min}</math>、標準偏差<math>0.26\ell/\text{min}</math>、90%信頼区間<math>0.05\sim0.8\ell/\text{min}</math>である。</p> <p>ケース④と比較したケース2～5の流量比を図-4に示す。④の最頻値が実測値(<math>0.1\ell/\text{min}</math>)に近く、②と③の結果より坑道建設の応力による影響がほとんどみられないことがわかった。</p> <p>(2) Hゾーンへの湧水量分布 モデルで設定したHゾーン(Geometric H zone)に対し図-5に示すように近傍(hydrogeologic H zone)も含めて検討を行っている。ケース④の場合の平均湧水量は<math>0.20\ell/\text{min}</math>、標準偏差<math>0.23\ell/\text{min}</math>であり、Validation Driftへの総湧水量の<math>98.3\%\pm3.1\%</math>で実測値の<math>97\%\pm2\%</math>とよく一致している。また、Geometric H zoneの湧水量は<math>77\%\pm31\%</math>を占めている。</p> <p>Validation Drift内への湧水量(図-6)の大きさはモデルにより異なるが、基本的なパターンはスキン効果の違いに拘らず実測値のパターンとよく一致している。</p> <p>(3) Hゾーン以外の湧水量分布 図-7に示すようにケース④の場合、平均湧水量<math>0.0016\ell/\text{min}</math>(標準偏差<math>0.0034\ell/\text{min}</math>)、予測範囲<math>0.1\sim0.0125\ell/\text{min}</math>となり、総湧水量に対し、<math>1.69\%\pm3.09\%</math>、<math>0.0\sim10.43\%</math>に相当する。これらは、実測値(<math>0.003\ell/\text{min}</math>、範囲<math>0.001\sim0.006\ell/\text{min}</math>)に近い。クラウンフラクチャーを考慮した場合(ケース⑤)は、偶然にHゾーンと交差した亀裂から湧水が発生するため図-8に示すように湧水量が増加し、平均湧水量<math>0.12\ell/\text{min}</math>(標準偏差<math>0.09\ell/\text{min}</math>)で総湧水量の<math>36\%</math>(予測範囲は<math>6\sim82\%</math>)となる。</p> <p>(4) 坑道内の亀裂特性 解析モデル及び実測の坑道の礫津のトレース長分布を図-9に、そのヒストグラムを図-10に示す。</p> <p>(5) 坑道掘削による水頭変化の大きさ 図-11にDホール掘削前、Dホール掘削時、Validation Drift掘削時の水頭変化をケース④と実測値で示す。</p> <p>(6) Dホールへの湧水量の分布 予測値は<math>1.26\pm0.98\ell/\text{min}</math>でBフラクチャーゾーンへは<math>95.7\pm8.1\%</math>が流入。 実測値は<math>0.56\pm0.25\ell/\text{min}</math>でBフラクチャーゾーンへは<math>99\pm1\%</math>が流入。</p>
	<p>解析領域は図-1に示すように<math>200\times200\text{m}</math>の範囲とした。</p> <p>Validation DriftとDホールを中心とする直径<math>40\text{m}</math>、長さ<math>100\text{m}</math>の円筒状の部分を内部領域としている。ここでは、N, W, C, Dの各孔と坑道壁面の観察結果から得られた亀裂をモデル化している。亀裂の方向はバラツキを考慮して、ブートストラップ手法を用いて、フィッシュ分布を仮定して発生させている。亀裂の大きさは円の半径によって表わし、その半径は対数正規分布に従うものとした。亀裂を発生させた後に原位置での計測結果と比較し、これに近付くまで繰り返しモデルを作成するフォワードモデリング手法も適用した。亀裂交差部については70%の亀裂を発生させた後、残りの亀裂について、亀裂交差部の影響をモデルに反映させている。亀裂頻度についてはポアソン分布を仮定し、オックスフィレット手法でボーリング孔で観察された分布に近くなるように設定した。</p> <p>外部領域については、亀裂はモデル化せず、図-2に示すようにA, B, H, I, K, Mのフラクチャーゾーンをモデル化した。</p> <p>Validation Drift掘削による影響として、坑道周辺<math>3\text{m}</math>について、応力集中による亀裂開口に伴う透水性の低下(スキン効果)及びDrift直上の岩盤ブロックの移動による新規水みちの形成(クラウンフラクチャー)を考慮している。</p> <p>解析は以下の5ケースを実施した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①坑道掘削の影響無し</li> <li>②坑道掘削の影響考慮、McKinnon &amp; Carr応力による補正</li> <li>③坑道掘削の影響考慮、Kirsch応力による補正</li> <li>④坑道掘削の影響考慮、スキン効果の大きさによる補正</li> <li>⑤坑道掘削の影響考慮、スキン効果の大きさとクラウンフラクチャーによる補正</li> </ul>		
解析条件	<p>解析領域の境界の水頭は実測値を基に設定し、深さ方向には静水圧分布としている。また全ての坑道内は大気圧境界、全てのボーリング孔(N, W, C, D)内は流量0とした。</p>	<p>上記のとおり、以下の項目について実測値と比較検証を行っている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①Validation Driftの総湧水量</li> <li>②Hゾーンへの湧水量</li> <li>③Hゾーン以外への湧水量</li> <li>④Validation Driftの亀裂特性</li> <li>⑤坑道掘削による水頭変化の大きさ</li> <li>⑥Dホールへの湧水量の分布</li> </ul> <p>なお、それぞれの解析手法と解析結果を総合的に判断して以下の基準を満足しているかどうかについても検討を行い、次のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1)定量的評価基準(実測値を反映しているか?、予測値は実測値とおなじオーダーであるか?)については、水頭の予測が難しく、予測値のばらつきが大きいとしている。</li> <li>(2)定性的評価基準(予測された分布は、観測された分布と十分に等しいか?)については、Hゾーンからの湧水が支配的である現象をよく捉えている。</li> <li>(3)有用性評価基準(SCVのようなサイトに適用する際に、十分に有用性があるか?)については、空間的な流量分布を求めるのに有用であるとしている。</li> <li>(4)実用性評価基準(モデルを作成するために必要なデータを容易に得ることができるか?)については、十分あるとしている。</li> </ol>	
物理特性	亀裂の透水性は対数正規分布に従い決定し、モンテカルロシミュレーションにより繰り返しモデルを作成し、パッカー区間で測定された透水性分布と比較して最適モデルを作成する。		

施設名 ストリパ (7)

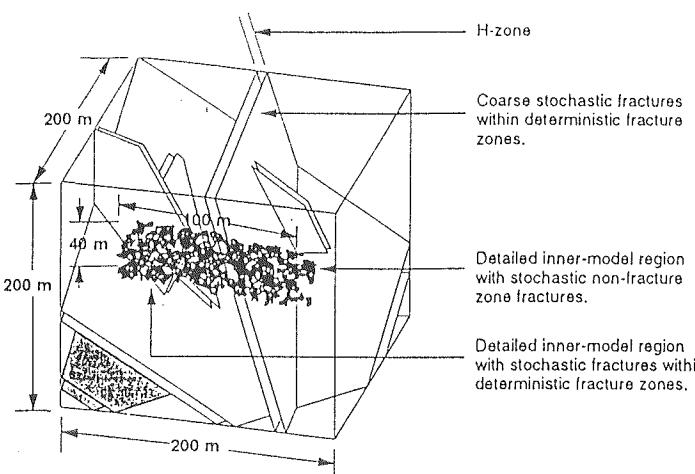


図-1 (a) Schematic view of the conceptualization

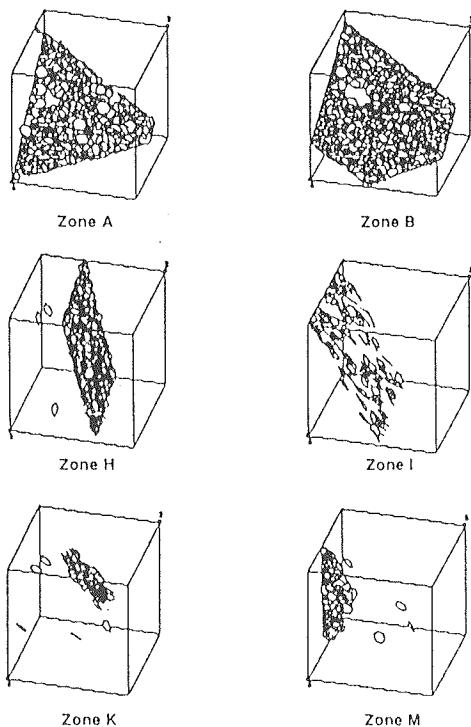


図-2 Fracture Zone Conceptual Model

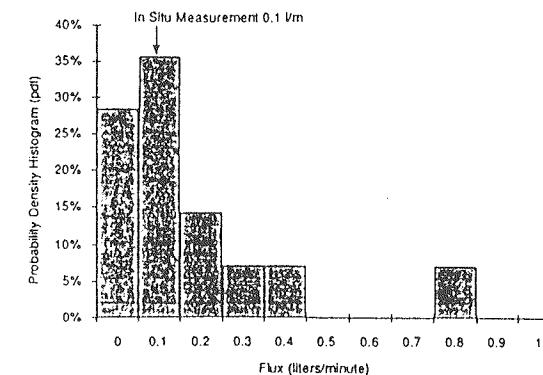


図-3 予測湧水量の分布 (ケース④)

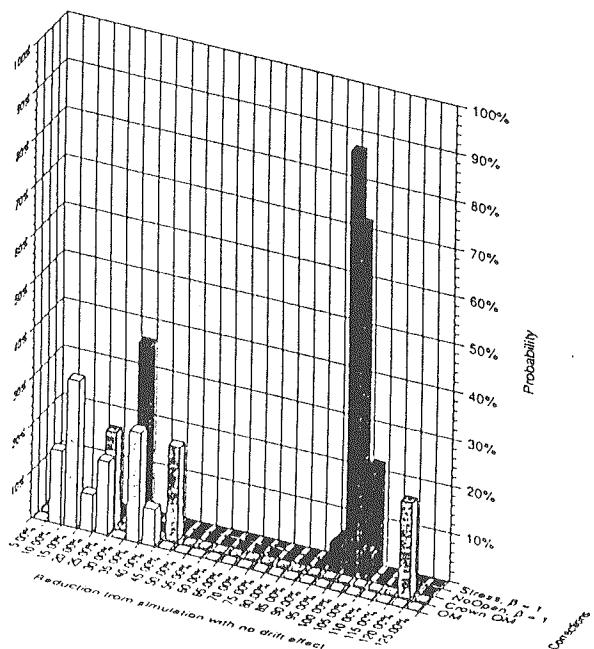


図-4 ②~⑤予測湧水量の分布 (①に対する百分率)

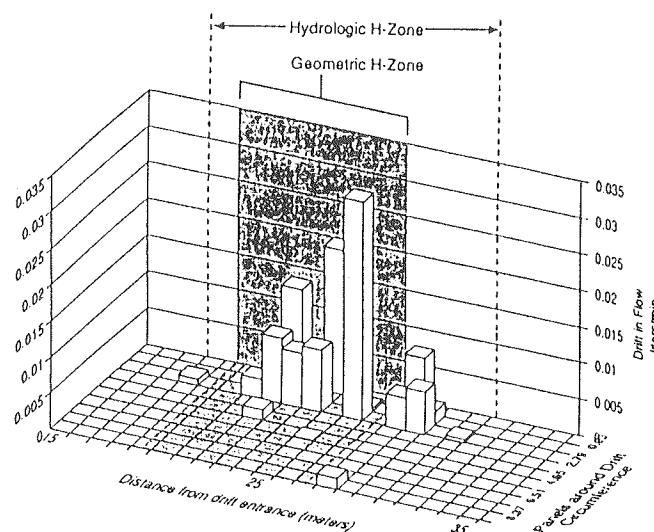
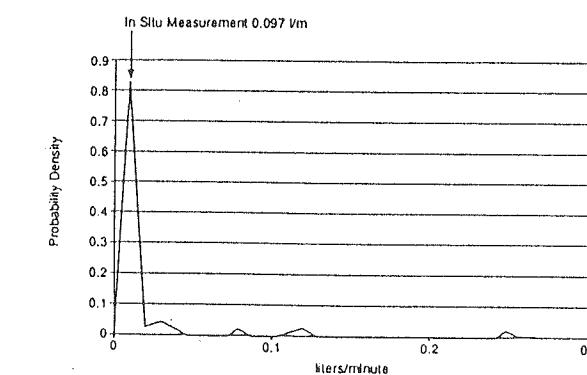
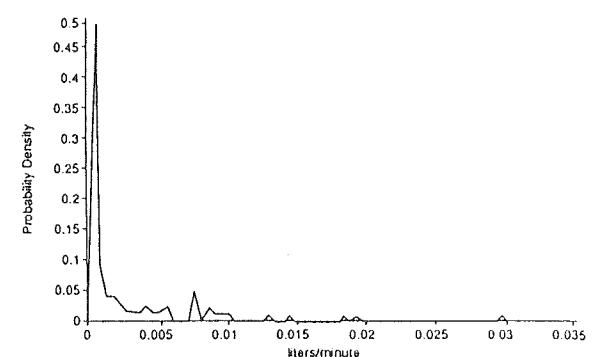


図-5 Hゾーンへの湧水量分布



a. 実測値



b. ケース④

図-6 Validation drift 内の湧水量分布

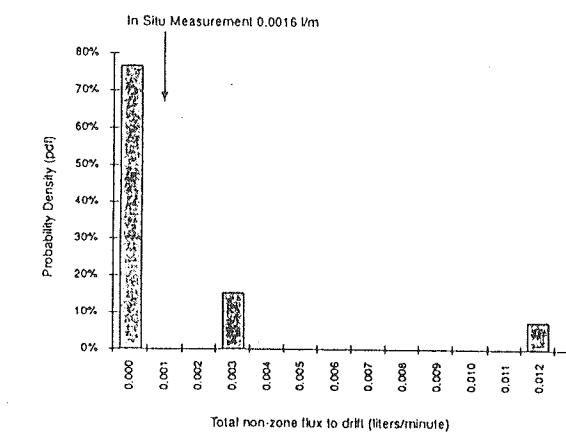


図-7 Hゾーン以外への湧水量分布 (ケース④)

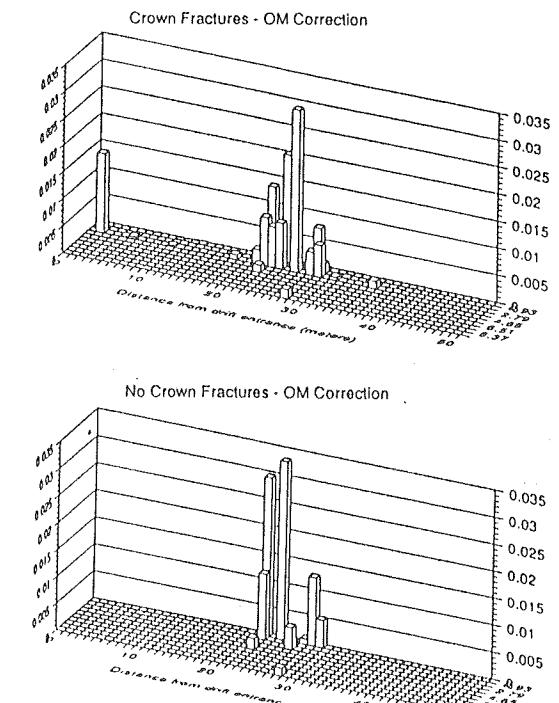
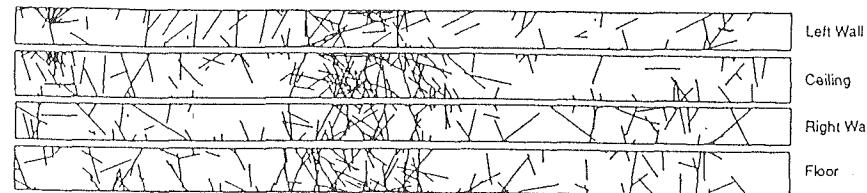
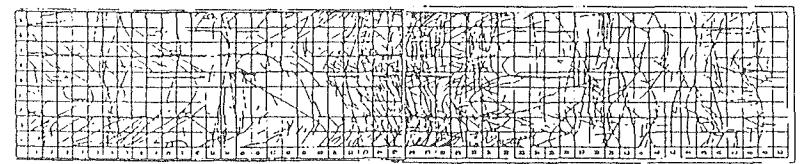


図-8 湧水量分布 (上; ケース⑤、下; ケース④)



Field Trace Planes



(After Gale and MacLeod, 1991)

図-9 坑道内トレース長分布

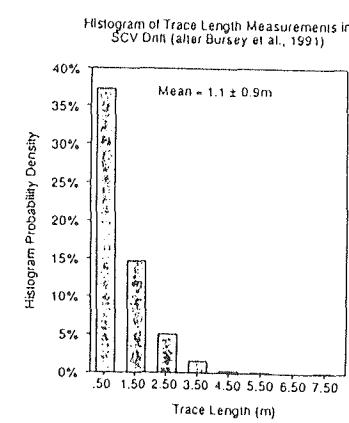
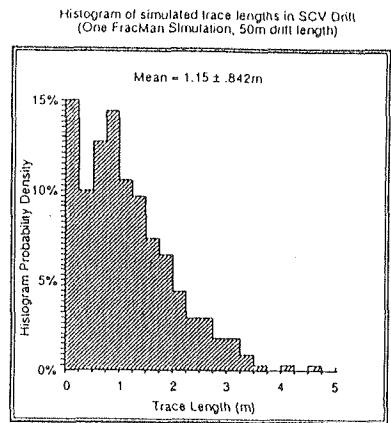


図-10 トレース長ヒストグラム

施設名	ストリパ(8)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	ストリパプロジェクトのフェーズ3のためにフラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の開発がある。 ここでの解析はValidation Drift建設による地下水の流動と水頭の変化をAEA Harwell Laboratoryフラクチャーネットワーク解析により予測し、実測値と比較して解析の妥当性を評価することを目的としている。解析はサイトスケールの規模である。
地下構造物の概要	ストリパSCV (Site Characterization and Validation) サイトは、ストリパプロジェクトフェーズ3の主要研究対象でストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。Validation DriftはDホールに沿って掘削された幅3m、高さ2.4mの楕円形状の長さ50mの坑道である。このため、坑道の奥にはDホールが50m残っている。				
地形・地質	SCVサイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。	調査項目と調査手法	備考		
地質構造	この領域には、A, B, H, H b, I, M, Kの大きなフラクチャーゾーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, H b, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、SCVサイトの外側にも拡がっている。I, M, KはおおよそSCVサイトと同等の規模すなわち一辺100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, H bのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。				
水理学環的境					
地球化環学境的					

## 施設名 ストリパ(8)

解析手法	コード名 NAPSAC	非圧縮性流体を対象とした亀裂面内の平行平板流れに基づく定常有限要素法で粒子追跡法を用いた物質移行についても解析を行うことができる。AEA Harwell Laboratoryによって開発された。 亀裂の大きさの確率密度関数は、実測値である亀裂のトレース長から統計処理コードMULTIを用いて処理する。	解析結果  (1) Dホールの湧水量 D1からの湧水量の30~50%程度になった。Hゾーン以外の部分、Hゾーンにおける湧水量を表-1、2に示す。 (2) Validation Drift Validation Drift掘削による応力を考慮しない場合の解析結果を表-3、4に示す。Driftの軸方向がX軸とほぼ一致しており、CASE18のK <sub>xx</sub> とK <sub>axial</sub> 、K <sub>yy</sub> K <sub>zz</sub> とK <sub>rr</sub> が比較的よく一致している点を考慮すると、Fracture modelとPorous modelの複合はdriftの湧水量予測に有効な手段であると言える。 Validation Drift掘削による応力の変化を透水性に反映させた解析の結果を表-5、6に示す。応力を考慮しないケースと比較して、透水係数が大きくなる結果が得られた。これは実測とは逆の現象である。 実験室における実験では、本解析と同じ手法で、実験値とのよい一致が見られるので、湧水量の低下は他の要因によるのではないかと考えられる。 個別に解析したFracture network modelの結果をつなぎあわせた30m区間の湧水量を図-3に示す。 亀裂に対する鉛直応力の変化と透水性を関係づける本解析の問題点は、今後の検討課題である。
	解析モデル	亀裂のモデル化はHフラクチャーゾーンとその他の部分に分けて行う。Hゾーンは4つの亀裂群、その他の部分は6つの亀裂群とし、亀裂群毎に以下のようにモデル化する。 形状 正方形 大きさ 対数正規分布 亀裂の間隔 対数正規分布 亀裂密度 亀裂間隔の平均値 方向 正規分布 なお、他と交差しない亀裂は無視し、さらにHゾーン以外のその他の部分については開口幅2.5 μm以下の亀裂、Hゾーンについては面積0.15 m <sup>2</sup> 以下、開口幅5 μm以下の亀裂は無視する。 解析領域は、半径10m、厚さがHゾーンで5m、その他の部分10mの円柱でモデル化する。DホールとValidation DriftのHゾーン以外のその他の部分のモデルを図-1、2に示す。	解析結果  (1) Dホールの湧水量 D1からの湧水量の30~50%程度になった。Hゾーン以外の部分、Hゾーンにおける湧水量を表-1、2に示す。 (2) Validation Drift Validation Drift掘削による応力を考慮しない場合の解析結果を表-3、4に示す。Driftの軸方向がX軸とほぼ一致しており、CASE18のK <sub>xx</sub> とK <sub>axial</sub> 、K <sub>yy</sub> K <sub>zz</sub> とK <sub>rr</sub> が比較的よく一致している点を考慮すると、Fracture modelとPorous modelの複合はdriftの湧水量予測に有効な手段であると言える。 Validation Drift掘削による応力の変化を透水性に反映させた解析の結果を表-5、6に示す。応力を考慮しないケースと比較して、透水係数が大きくなる結果が得られた。これは実測とは逆の現象である。 実験室における実験では、本解析と同じ手法で、実験値とのよい一致が見られるので、湧水量の低下は他の要因によるのではないかと考えられる。 個別に解析したFracture network modelの結果をつなぎあわせた30m区間の湧水量を図-3に示す。 亀裂に対する鉛直応力の変化と透水性を関係づける本解析の問題点は、今後の検討課題である。
解析条件	境界条件	円柱の両端は流量0境界とし、円柱側面の境界条件は連続体解析MINE2CASE18からヘッド勾配が一律3.9×10 <sup>4</sup> Pa/mとしている。	検証手法  上記のとおり湧水量で実測との比較検証が可能である。 なお、それぞれの解析手法と解析結果を総合的に判断して以下の基準を満足しているかどうかについても検討を行い、次のとおりである。 (1)定量的評価基準（実測値を反映しているか？、予測値は実測値とおなじオーダーであるか？）については、水頭の予測が難しく、また亀裂以外の岩盤からの湧水量の予測が難しいとしている。 (2)定性的評価基準（予測された分布は、観測された分布と十分に等しいか？）については、Hゾーンからの湧水が支配的である現象をよく捉えているとしている。 (3)有用性評価基準（SCVのようなサイトに適用する際に、十分に有用性があるか？）については、空間的な流量分布を求めるのに有用であるとしている。 (4)実用性評価基準（モデルを作成するために必要なデータを容易に得ることができるか？）については、併せて行った等価連続体の作成上の誤差評価に課題はあるが、実用性はあるとしている。
水理物理	Drift掘削による応力を考慮したケースと考慮しないケースの解析を行う。応力を考慮することによって要素の透水性は次式のように変化する。 $\frac{T}{T_0} = \frac{\sigma_n^\alpha}{\sigma_0^\alpha}$ $\sigma_n$ ：亀裂の各要素における垂直応力 $\alpha$ ：岩石試験から-0.2程度		

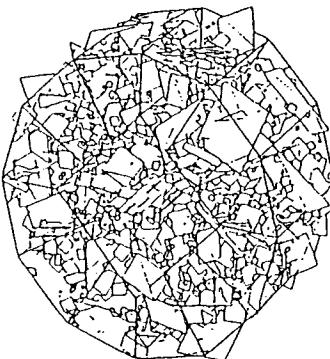


図-1 Averagely fractured rock network geometry for predictions (10% of fractures shown).

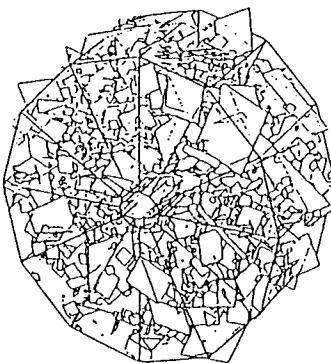


図-2 Averagely fractured rock network geometry for Validation Drift inflow predictions (10% of fractures shown).

表-1 Predicted inflows to the remaining lengths of D-holes in the average rock using  $3.9 \times 10^4 \text{ Pa m}^{-1}$  head gradient, flows in ml/min/m.

Realisation	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Total
1	0.07	0.50	0.51	0.18	0.33	0.27	1.86
2	0.04	0.26	0.16	0.12	0.11	0.42	1.11
3	0.09	0.16	0.42	0.13	0.06	0.23	1.09
4	0.07	0.08	0.27	0.17	0.11	0.13	0.83
Mean (1-4)	0.07	0.25	0.34	0.15	0.15	0.26	1.23
5	0.02	0.05	0.30	0.18	0.19	0.12	0.87
6	0.06	0.35	0.06	0.34	0.17	0.17	1.17
7	0.06	0.27	0.20	0.29	0.20	0.17	1.21
8	0.28	0.13	0.10	0.46	0.12	0.29	1.37
Mean (5-8)	0.11	0.20	0.17	0.32	0.17	0.19	1.16

表-2 Predicted inflows (ml/min/m) to the D-holes during the SDE in H-zone rock using  $3.9 \times 10^4 \text{ Pa m}^{-1}$  head gradient.

Realisation	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Total
1	1.37	2.84	3.53	1.15	3.87	6.19	16.37
2	4.00	5.71	5.10	0.40	2.86	3.19	20.43
3	0.72	2.41	2.42	2.82	0.96	3.44	12.76
4	0.57	7.64	0.46	2.39	1.31	1.10	13.46
Mean (1-4)	1.67	4.65	2.88	1.69	2.25	3.48	15.75

表-3 Predicted inflows (ml/min) to the Validation Drift in average rock using  $3.9 \times 10^4 \text{ Pa m}^{-1}$  head gradient (no drift effects).

Realisation.	Inflow	Inflow per m	$K_{rr}$ ( $\text{m}^2 \times 10^{-17}$ )	$K_{\text{axial}}$ ( $\text{m}^2 \times 10^{-17}$ )
1	92	2.3	3.1	1.7
2	52	1.3	1.7	0.9
3	50	1.2	1.6	

表-4 Predicted inflows (ml/min) to the Validation Drift in H-zone rock using  $3.9 \times 10^4 \text{ Pa m}^{-1}$  gradient (no drift effects).

Realisation	Inflow	Inflow per m	$K_{rr}$ ( $\text{m}^2 \times 10^{-16}$ )
1	195	19.5	2.8
2	190	19.0	2.7
3	186	18.6	2.7
4	482	48.2	7.0

表-5 Predicted inflows (ml/min) to the Validation Drift in average rock using  $3.9 \times 10^4 \text{ Pa m}^{-1}$  gradient, using normal-stress fracture-closure law.

Realisation	Stress model	$\alpha$	Inflow	Inflow per m	$K_{rr}$ ( $\text{m}^2 \times 10^{-17}$ )	$K_{\text{axial}}$ ( $\text{m}^2 \times 10^{-17}$ )
1	BEFE	-0.2	96	2.4	3.3	
1	BEFE	-0.6	112	2.8	3.8	1.8
1	BEFE	-1.5	132	3.3	4.5	
1	BEFE <sub>nd</sub>	-0.2	92	2.3	3.1	
1	KIRSCH	-1.0	92	2.3	3.1	
2	BEFE	-0.6	64	1.6	2.2	1.1
3	BEFE	-0.6	60	1.5	2.0	

BEFE<sub>nd</sub> = BEFE stress model but with no fracture dilation in NAPSAC.

表-6 Predicted inflows (ml/min) to the Validation Drift in the H-zone using  $3.9 \times 10^4 \text{ Pa m}^{-1}$  gradient, showing the change due to applying normal-stress fracture-closure laws.

Realisation	Stress model	$\alpha$	Inflow	Inflow per m	$K_{rr}$ ( $\text{m}^2 \times 10^{-16}$ )
3	BEFE	-0.2	186	18.6	2.7
4	BEFE	-0.2	480	48.0	7.0

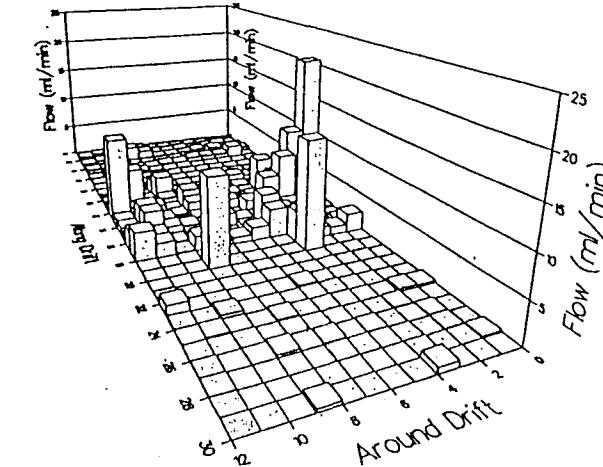


図-3 Pattern of inflow to 30 m section of Validation Drift centred on H-zone.

施設名	ストリパ (9)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	ストリパプロジェクトのフェーズ3の目的のひとつにフラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の開発がある。 Validation Driftの建設前と建設後にSCVサイトで実施されるトレーサー試験をフラクチャーネットワーク解析により予測し、解析の妥当性を評価する。	
地下構造物の概要	ストリパSCVサイトは、ストリパ・プロジェクトフェーズ3の主要研究対象でストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。 Validation Driftはこの領域内にある幅3m、高さ2.4mの楕円形状の長さ50mの坑道であり、Hフラクチャーノーンを対象に以下のトレーサー試験が実施された。 1. レーダー塩水トレーサー試験 (1) Validation Driftの掘削前に塩水トレーサーをC2孔からHフラクチャーノーンに注入し、Drift位置に掘削されたDホールで回収する試験（第1次レーダー塩水トレーサー試験、RSTE1） (2) Validation Driftの掘削後に塩水トレーサーをC2孔からHフラクチャーノーンに注入し、Drift及び周辺のモニタリング孔T1, T2で回収する試験（第2次レーダー塩水トレーサー試験、RSTE2） 2. トレーサー移行試験 ボーリング孔T1, T2, C2, C3から非吸着性の粒種のトレーサーをHフラクチャーノーンへ注入し、Validation DriftとSCVブロック内のボーリング孔で回収する試験（TME）	トレーサー試験 ・第1次レーダー・塩水トレーサー試験 ・第2次レーダー塩水トレーサー試験 ・トレーサー移行試験 T1孔 1カ所から1回、T2孔 3カ所から6回、C2孔 1カ所から1回、C3孔 2カ所から2回トレーサーを注入し、T1孔 2カ所、Validation Driftで回収。				
地形・地質	SCVサイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。	調査項目と調査手法	備考			
地質構造	この領域には、A, B, H, Hb, I, M, Kの大きなフラクチャーノーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, Hb, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、SCVサイトの外側にも拡がっている。I, M, KはおおよそSCVサイトと同等の規模すなわち一辺100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, Hbのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。					
水理学環的境						
地球化環学的境						

## 施設名 ストリパ (9)

解析手法	コード名 TRINET	S. K. Gupta, C. R. Cole, C. T. Kincaid, A. M. Montiらによる3次元有限要素法の地下水・エネルギー溶質移行連成解析コード。 解析には移流一分散方程式を使用しており、溶質の輸送にはオイラー・ラグランジェ法(EL法)を使用している。	第1次レーダー塩水トレーサー試験 有効断面積も分散長も全領域で一様であると仮定し、有効断面積の同定を行った。 まず分散長をゼロとした場合、C1-2孔のみの結果のモデルでの解析では、濃度／注入濃度比(C/C <sub>0</sub> )がかなり小さくなり、逆にD孔も含めたモデルでの解析ではC/C <sub>0</sub> がかなり大きな値となった。これは前者では多くの経路があり、移流による分散が大きくなり過ぎ、後者では経路が少なすぎるために移流による分散が小さくなつたためである。 分散長を考慮して、破過曲線にフィットさせるためには、分散長を大きくとる必要がある。しかしながら、トレーサーが全領域に広がる結果となり、レーダートモグラフィーで観察されたトレーサーの局所的な分布状況とかなり異なつた。このため、分散長を考慮したフィッティングは現実的でないと判断された。 第2次レーダー塩水トレーサー試験 第1次レーダー塩水トレーサー試験で分散長ゼロで同定した有効断面積を用いて計算した破過曲線と実測の比較を図-3, 4に示す。 破過曲線の立上り時間はよく表現できているがC/C <sub>0</sub> の値は実測値より大きくなっている。 トレーサー移行試験 表-1に示す4種類の試験が行われた。 表-2に破過曲線の立上り時間とC/C <sub>0</sub> の値の最大値の一覧を示す。 全ての解析された破過曲線は立ち上がりが鋭すぎている。これは、経路中の流れがplug flowになっているためである。plug flowは経路の透水性が同一であることから起こるのであり、もし、透水性が異なるれば、破過曲線はもっと滑らかになるであろう。 全体的に、到達時間のオーダーは合っていた。これは、interference試験から等価不連続モデルを求めたモデルが妥当であったことを示している。また、以上の解析で最も設定が困難であったのは境界条件である。解析では、単に注入孔から流出孔への流れの強さのみが大きな影響をもつ結果になっている。
	解析モデル	C1-2孔の試験結果からアニーリングしたモデル(図-1)とC1-2孔とD孔の試験結果からアニーリングしたモデル(図-2)とする。両モデルともHフラクチャーズーンを対象とした2次元モデルであるが、C1-2孔のみから求めたモデルよりもC1-2孔とD孔から求めたモデルの方が密度が低く、物質の移行経路が限られている。 流れの場合は定常と仮定して行っており、この仮定から外れそうな状況は避けて解析を行っている。	
解析条件	境界条件	第2次レーダー塩水トレーサー試験 注水量0.2ℓ/min, Validation Driftでの流出量0.13ℓ/min(第1次レーダー塩水トレーサー試験解析の1/3程度に減少)	第1次レーダー塩水トレーサー試験の結果から有効断面積、分散長のパラメータの同定を行い、第2次レーダー塩水トレーサー試験とトレーサー移行試験について破過曲線の立上り時間、C/C <sub>0</sub> 値の検証を行っている。 なお、それぞれの解析手法と解析結果を総合的に判断して以下の基準を満足しているかどうかについても検討を行い、次のとおりである。 (1)定量的評価基準(実測値を反映しているか?, 予測値は実測値とおなじオーダーであるか?)については、有効断面積と分散率を変えることで良好に評価できるとしている。 (2)定性的評価基準(予測された分布は、観測された分布と十分に等しいか?)については、局所スケールの挙動予測に問題があるとしている。 (3)有用性評価基準(SCVのようなサイトに適用する際に、十分に有用性があるか?)については、広域スケールの検討には役立つ可能性があるとしている。 (4)実用性評価基準(モデルを作成するために必要なデータを容易に得ることができるか?)については、今までと異なる独自のデータが必要であるとしている。
水理物理	物理性	領域全体に均一な透水計数を与えて解析。具体的な値は不明。	

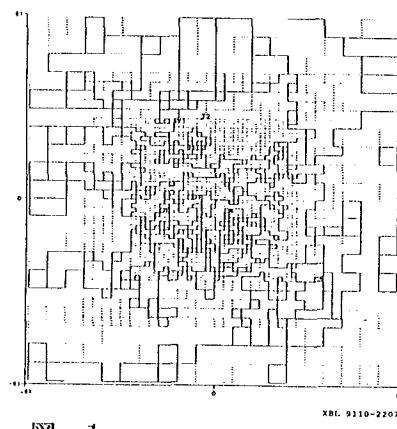


図-1 The two dimensional model annealed to C1-2.

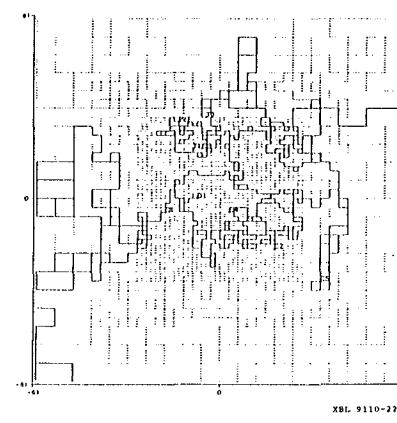


図-2 The two dimensional model co-annealed to C1-2 and SDE.

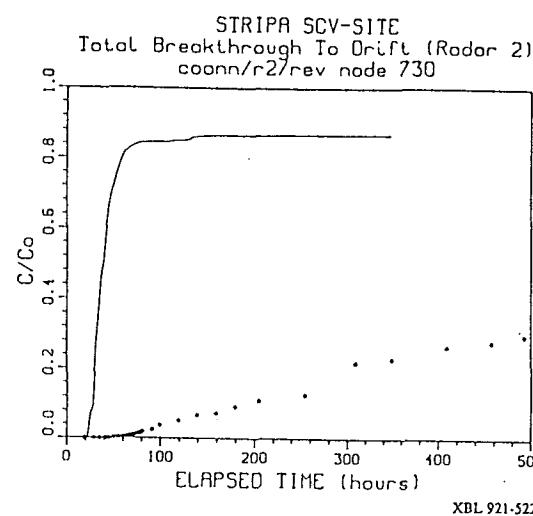


図-3 Simulated tracer breakthrough at the Validation Drift for RSII plotted against the data for the simulation period of 300 hrs calculated using the co-annealed configuration. Dots are data; the line is the simulation.

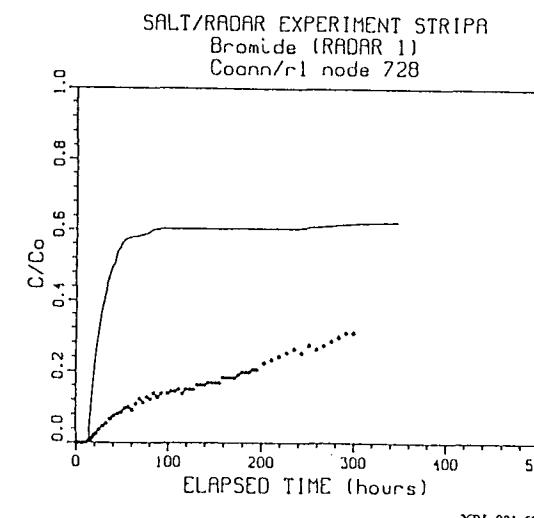


図-4 Simulated tracer breakthrough at the Validation Drift for RSII plotted against the data for the simulation period of 400 hrs calculated using the C1-annealed configuration. Dots are data; the line is the simulation.

表-1 Conditions modeled to predict the Neretnick's tracer tests

Case	Source interval	Sink location	Injection rate (total) ml/hr	Fraction of Conc. modeled	Simultaneous Other Injections		Simulation time hrs.
					Interval	Flow (ml/hr)	
1	T1:2	drift	4	1	T2	47.5	2000
2	T2:1	drift	47.5	30/47.5	T1	4	2000
3	C2	drift	15	1			2000
4	T2	T1, Drift	56.5	30/56.5			1000

表-2 Estimates of first arrival and maximum concentration for the tracer tests.

Case	Source	First arrival (hrs) prediction data		Maximum C/Co prediction data	
		prediction	data	prediction	data
1	T1:2	800 to 2800	400	0.0001 to 0.0005	
2	T2:1	200 to 1400	200	0.0001 to 0.0004	0.002
3	C2	200 to never	300	0 to 0.002	0.002
4	T2	100 (to T1)	100	0.0018	?
4	T2	never (to VD)	200	0	?

施設名	ストリパ (10)	土被り	360~410 m		ストリパプロジェクトのフェーズ3の目的のひとつにフラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の開発がある。 Validation Driftの建設前と建設後にSCVサイトで実施されるトレーサー試験をフラクチャーネットワーク解析により予測し、解析の妥当性を評価する。
地下構造物の概要	<p>ストリパSCVサイトは、ストリパ・プロジェクトフェーズ3の主要研究対象でストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。</p> <p>Validation Driftはこの領域内にある幅3m、高さ2.4mの楕円形状の長さ50mの坑道であり、Hフラクチャーゾーンを対象に以下のトレーサー試験が実施された。</p> <p>1. レーダー塩水トレーサー試験            (1) Validation Driftの掘削前に塩水トレーサーをC2孔からHフラクチャーゾーンに注入し、Drift位置に掘削されたDホールで回収する試験（第1次レーダー塩水トレーサー試験、RSTE 1）            (2) Validation Driftの掘削後に塩水トレーサーをC2孔からHフラクチャーゾーンに注入し、Drift及び周辺のモニタリング孔T1, T2で回収する試験（第2次レーダー塩水トレーサー試験、RSTE 2）</p> <p>2. トレーサー移行試験            ポーリング孔T1, T2, C2, C3から非吸着性の粒種のトレーサーをHフラクチャーゾーンへ注入し、Validation DriftとSCVブロック内のポーリング孔で回収する試験（TME）</p>			調査研究の目的	
地形・地質	SCVサイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。			調査項目と調査手法	<p>亀裂の幾何学形状及びフラクチャーゾーン            SCVの調査結果            水理的特性            SCVステージIIIのサイト特性調査から設定。            亀裂の透水量係数はパッカーパーチャル透水試験（FIL）結果の対数平均に基づいて標準偏差とラフな対数正規分布で評価。            亀裂の貯留係数 クロスホール干渉試験（N2, N3, N4, W1, W2孔）            トレーサー試験            • 第1次レーダー塩水トレーサー試験            • 第2次レーダー塩水トレーサー試験            • トレーサー移行試験            T1孔 1カ所から1回、T2孔 3カ所から6回、C2孔 1カ所から1回、C3孔 2カ所から2回トレーサーを注入し、T1孔 2カ所、Validation Driftで回収</p>
地質構造	この領域には、A, B, H, Hb, I, M, Kの大きなフラクチャーゾーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, Hb, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、SCVサイトの外側にも拡がっている。I, M, KはおおよそSCVサイトと同等の規模すなわち一边100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, Hbのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。			備考	
水理学環的境					
地球化環学的境					

施設名 ストリパ (10)

解析手法	コード名 MAFIC	Validation Driftの破過曲線 Validation Driftのすべての回収位置の合計に対する予測と実測値を図-3に示す。予測値と実測値はよい適合を示している。 T1, T2孔への破過曲線 図-4に解析値と実測値の比較を示す。 Validation Drift内の任意の回収点での破過曲線 図-5に解析値と実測値の比較を示す。 Validation Drift内の回収点のt50と500時間のC/Co 図-6, 7に解析値と実測値の比較を示す。 Validation Drift内の回収点のt5, t50, C/Coのヒストグラム 図-8 トレーサー移行の断層写真 図-9に示す断面のトレーサー移行の解析と実測の断層画像を図-10, 11に示す。
	コードの内容  岩盤中の水は主に不連続な亀裂が作り出すネットワーク中を流れるという考え方に基づいており、ゴールダー・アソシエイツによって開発された。 解析システムは、ネットワークをモデル化するFracManとネットワークにおける地下水流解析、拡散解析を行うMAFICからなる。 Frac Manは図-1に示すようにFracSys, FracWorks, MeshMakerから構成される。FracSysは実測データから各亀裂パラメータの確率密度関数を求めるパッケージであり、FracWorksは亀裂モデルの作成と作成された亀裂モデルを用いたサンプリング・シミュレーションを行う。 MeshMakerは作成された亀裂モデルをメッシュ分割し、MAFICへの入力モデルを作成する。 MAFICは有限要素法を用いた解析コードであり、飽和状態の流れの解析及び粒子追跡法による拡散解析を行う。	
解析モデル	修正SDE (Dホール) モデル  図-1に示すようにDホール周辺の118×48×40mの範囲を内側領域として、亀裂をモデル化し、その外側の400×400×400mの範囲は外側領域として、決定論的なフラクチャーゾーンをモデル化。 Validation Driftモデル  図-2に示すようにValidation Drift, Dホール周辺の長さ100m, 半径20mの範囲を内部領域として亀裂をモデル化し、その外側の200×200×200mの範囲を外側領域として決定論的なフラクチャーゾーンをモデル化。	解析結果
解析条件	外部境界条件 地下水位観測に適合する定水頭境界とし、深さ方向には静水圧を仮定。 立坑、坑道、開放されたボーリング孔 定水頭境界(大気圧境界) トレーサー試験孔 流束境界	上記のとおり、濃度とトレーサー移行の断層画像について実測値との比較を行っている。 なお、それぞれの解析手法と解析結果を総合的に判断して以下の基準を満足しているかどうかについても検討を行い、次のとおりである。 (1)定量的評価基準(実測値を反映しているか?, 予測値は実測値とおなじオーダーであるか?)については、実測の破過曲線を良好に評価できるとしている。 (2)定性的評価基準(予測された分布は、観測された分布と十分に等しいか?)については、広域スケール、局所スケールの両方の挙動予測が可能であるとしている。 (3)有用性評価基準(SCVのようなサイトに適用する際に、十分に有用性があるか?)については、広域スケール、局所スケールの検討に適しているとしている。 (4)実用性評価基準(モデルを作成するために必要なデータを容易に得ることができるか?)については、モデル化に多量のデータが要求されるが、十分に実用性があるとしている。
水理物性	縦方向分散係数0.3m、横方向分散係数0.1m	

施設名 ストリパ (10)

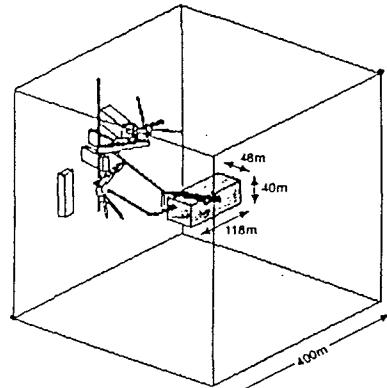


図-1 INNER REGION OF MODEL  
FOR SIMULATION OF RADAR/SALINE  
TRACER EXPERIMENT

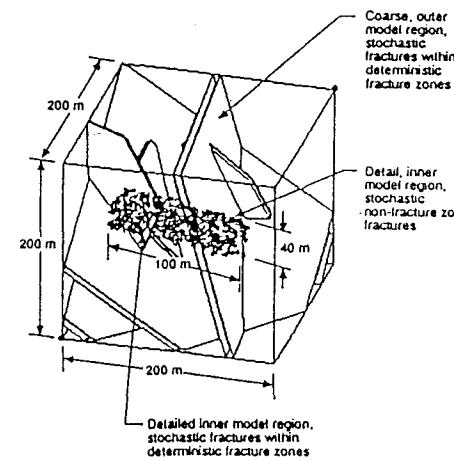
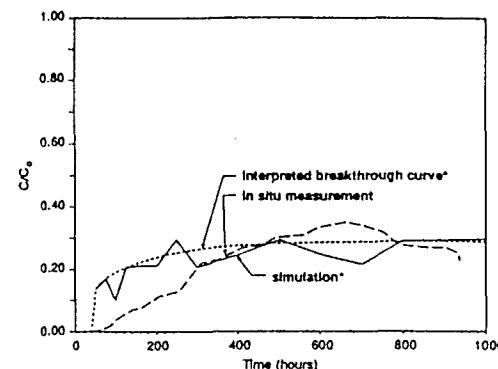


図-2  
VALIDATION DRIFT DISCRETE FRACTURE CONCEPTUAL MODEL



\*Simulation results are coarse due to the limited number of particles used.

図-3 TOTAL BREAKTHROUGH TO VALIDATION DRIFT

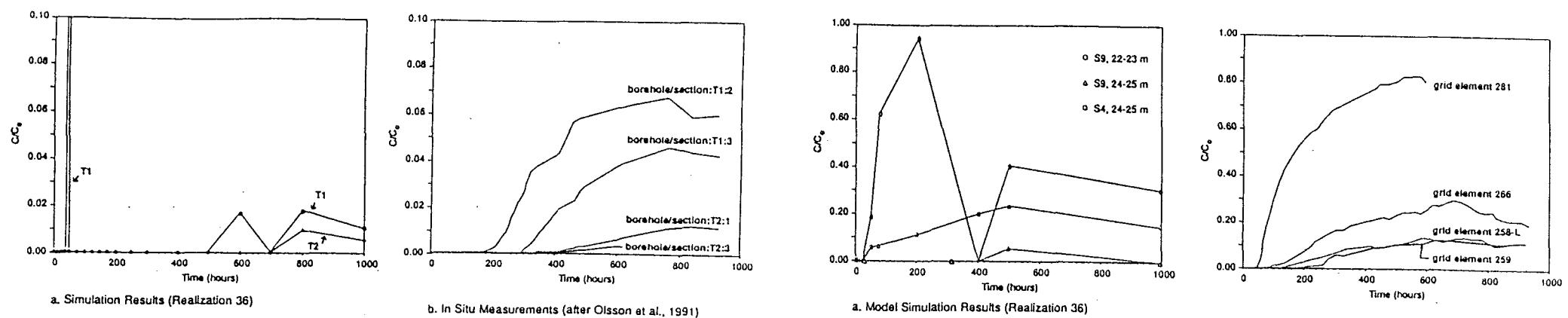


図-4 BREAKTHROUGH TO T1 AND T2 BOREHOLES

a. Simulation Results (Realization 36)  
b. In Situ Measurements (after Olsson et al., 1991)

図-5 BREAKTHROUGH TO "INTERESTING" GRID ELEMENTS

a. Model Simulation Results (Realization 36)  
b. In Situ Measurements (after Olsson et al., 1991)

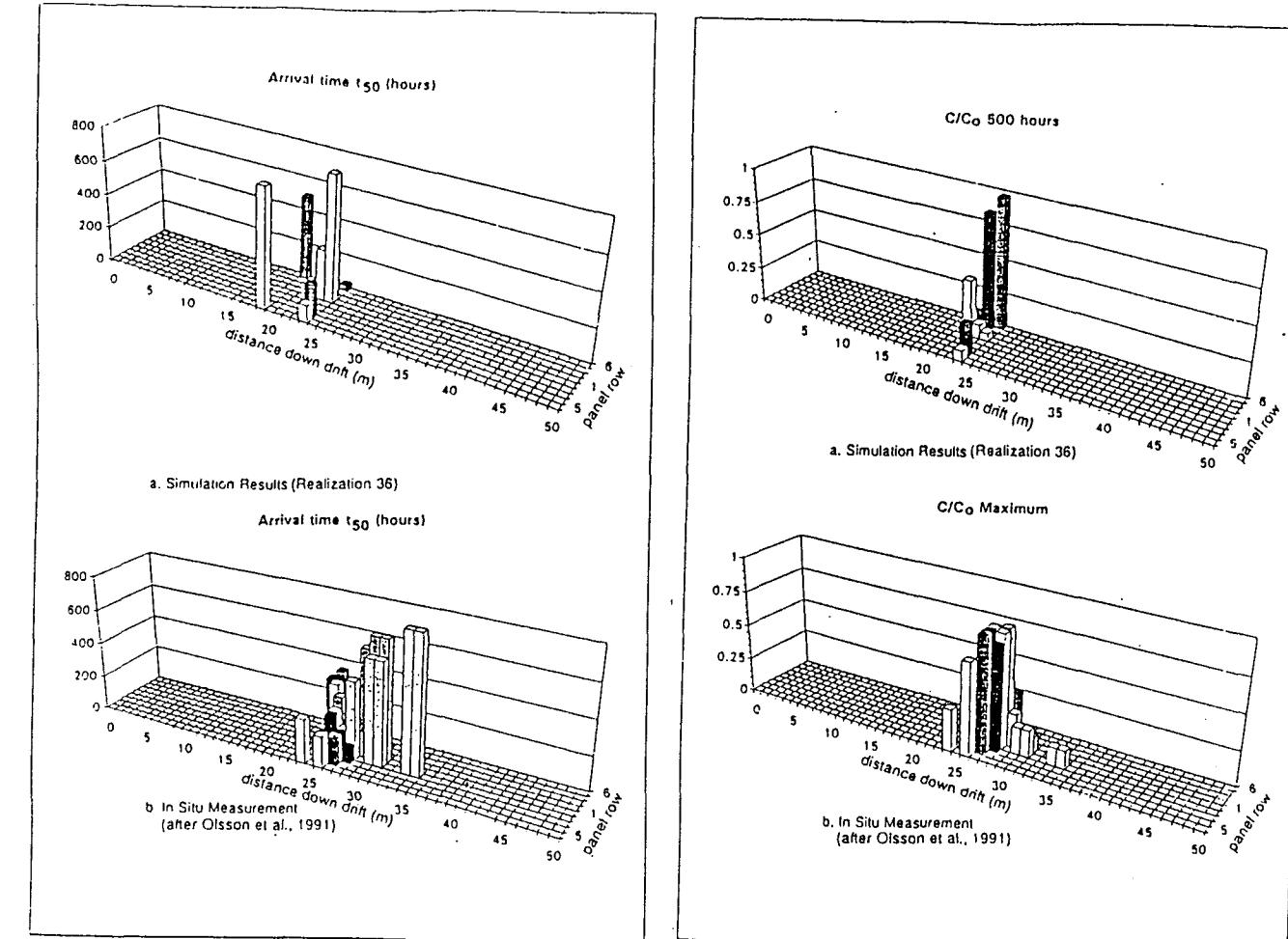


図-6 TIME  $t_{50}$  FOR VALIDATION DRIFT SHEETS

図-7 CONCENTRATION  $C/C_0$  AT 500 HOURS  
FOR VALIDATION DRIFT SHEETS

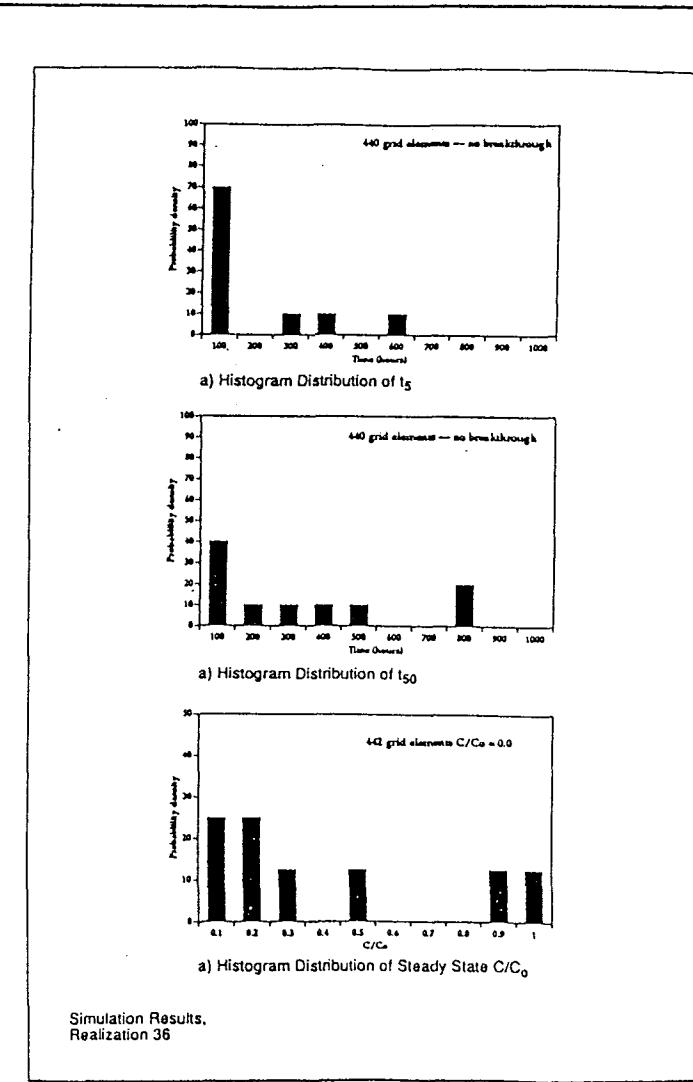


図-8 HISTOGRAM DISTRIBUTION OF  $t_5$ ,  $t_{50}$ , AND  $C/C_0$  STEADY STATE

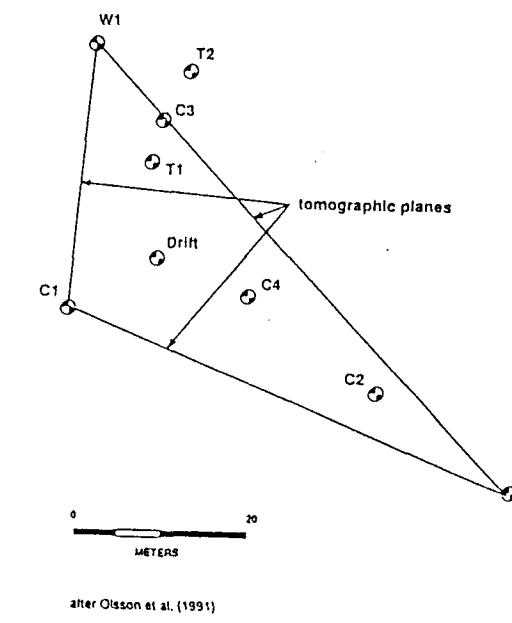


図-9 RELATIVE LOCATION OF BOREHOLES USED FOR RADAR TOMOGRAPHY

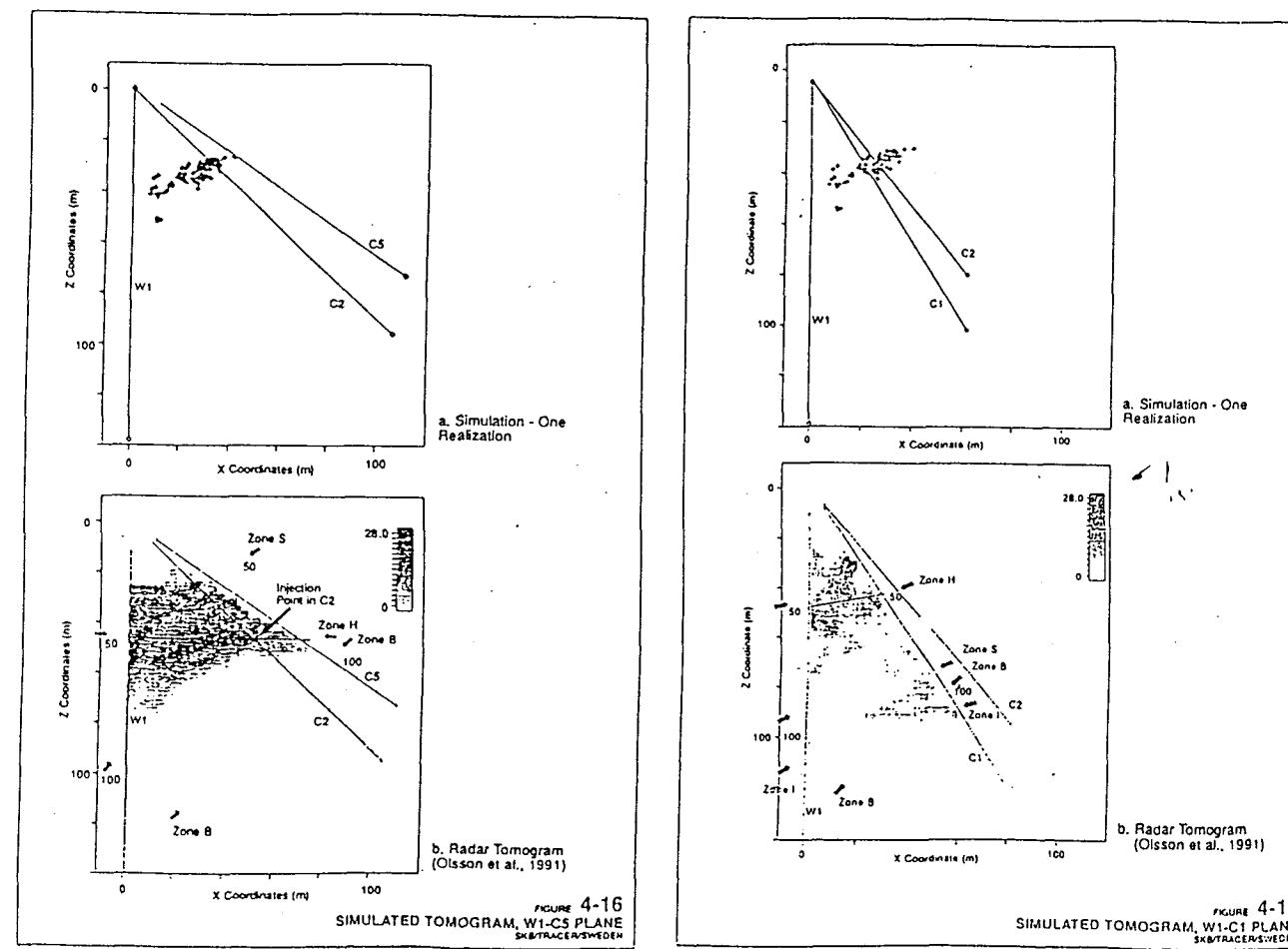


図-10 SIMULATED TOMOGRAF, W1-C5 PLANE

図-11 SIMULATED TOMOGRAF, W1-C1 PLANE

施設名	ストリパ (11)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	ストリパプロジェクトのフェーズ3の目的のひとつにフラクチャーネットワーク解析手法の適用性についての評価と解析手法の開発がある。 Validation Driftの建設前と建設後にSCVサイトで実施されるトレーサー試験をフラクチャーネットワーク解析により予測し、解析の妥当性を評価する。
地下構造物の概要	ストリパSCVサイトは、ストリパ・プロジェクトフェーズ3の主要研究対象でストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。 Validation Driftはこの領域内にある幅3m、高さ2.4mの橢円形状の長さ50mの坑道であり、Hフラクチャーノーンを対象に以下のトレーサー試験が実施された。 1. レーダー塩水トレーサー試験 (1) Validation Driftの掘削前に塩水トレーサーをC2孔からHフラクチャーノーンに注入し、Drift位置に掘削されたDホールで回収する試験（第1次レーダー塩水トレーサー試験、RSTE 1） (2) Validation Driftの掘削後に塩水トレーサーをC2孔からHフラクチャーノーンに注入し、Drift及び周辺のモニタリング孔T1, T2で回収する試験（第2次レーダー塩水トレーサー試験、RSTE 2） 2. トレーサー移行試験 ボーリング孔T1, T2, C2, C3から非吸着性の粒種のトレーサーをHフラクチャーノーンへ注入し、Validation DriftとSCVブロック内のボーリング孔で回収する試験（TME）	調査項目と調査手法			
地形・地質	鉱石は炭酸塩鉱物に富むレプタイトに胚胎している。このレプタイトには先カンブリア期のストリパ花崗岩が貫入しており、この岩体が試験場として使用された。ストリパ花崗岩は細粒～中粒、灰色で、石英35%、斜長石30%、微斜長石25%、白雲母5%、緑泥石4%からなる（図-1参照）。	備考			
地質構造	花崗岩体はNE-SW走向、SE傾斜の境界面を有しており、NW-SE走向・SW傾斜の破碎帯、NE-SW走向・NW傾斜の破碎帯があり、それらの幅は2~12mである。				
水理学環的境					
地球化環学的境					

## 施設名 ストリパ (11)

解析手法	コード名 NAPSAC	非圧縮性流体を対象とした亀裂面内の平行平板流れに基づく定常有限要素法で粒子追跡法を用いた物質移行についても解析を行うことができる。AEA Harwell Laboratoryによって開発された。	解析結果	第1次レーダー塩水トレーサー解析 解析結果と実測結果の比較の一例を図-4に示す。a)は平行平板中の流速とトレーサー移動速度が同じとした場合の結果であり、b)はトレーサー移動速度が流速の1/3として計算した結果である。また、トレーサーをパルス状に注入した場合の実測・解析結果を図-5に示す。移動速度の補正を行わない場合には解析結果については短時間でのブレークスルーは良い一致を示すが、その後急激に低下する。また、補正を行うと全体の回収量は良い一致を示すが、短時間でのブレークスルーは実測と合致しない。 第2次レーダー塩水トレーサー解析 第1次レーダー塩水トレーサー解析と同様の結果を図-6および図-7に示す。パルス状の注入に関するシミュレーションの方が良い一致を示している。 トレーサー移行解析 ブレークスルーを実測と比較した一例として、Dyトレーサーの結果を図-8に示す。他のトレーサーの場合も非常に実測と合致した結果が得られている。以上から本解析手法は現実にあってるものと考えられる。最後にDrift中の各観測点における回収量および50%回収時間を図-9および図-10に示す。
	解析モデル	第1次レーダー塩水トレーサー解析 トレーサー試験の注入点と回収点の間の距離が25mであることから、解析領域はHゾーンの40×20×5mの範囲としている。解析領域内の全割れ目の10%を示したもの図-1に示す。 第2次レーダー塩水トレーサー解析 解析領域は40×20×10mの範囲である。図-2に全亀裂の10%を示したモデルを示す。 トレーサー移行試験解析 全亀裂の10%を示したモデルを図-3に示す。 なお、3つの解析の亀裂のモデル化は間口幅、亀裂面積にしきい値を設けて、それよりも小さい亀裂に関してはネットワークから除外。		
解析条件	境界条件	第1次レーダー塩水トレーサー試験 南北の側方境界、上部境界は固定水頭境界 東西の側方境界、下部境界は不透水境界 注水孔は流量固定 観測孔は水位固定 第2次レーダー塩水トレーサー試験 広域モデルで計算した固定水位。ただし東西境界は不透水境界。 Validation Driftは大気圧境界。	検証手法	上記のとおり、濃度曲線について実測値と解析値の比較を行っている。 なお、それぞれの解析手法と解析結果を総合的に判断して以下の基準を満足しているかについても検討を行い、次のとおりである。 (1)定量的評価基準に対してトラベルタイムの予測は難しいとしている。 (2)定性的評価基準に対して局所的な挙動は予測可能であるとしている。 (3)有用性評価基準に対して局所的な検討には適しているとしている。 (4)実用性評価基準に対して可能性のある処分サイトの特性記述に関して実用性があるとしている。
	水理物性	透水性は三乗則を用いて開口幅より算定。 Validation Driftを含むモデル（第2次レーダー塩水トレーサー解析）では坑道周辺の透水性をスキン効果によって低下させている。（開口幅を1/4に低減）		

施設名 ストリパ (II)

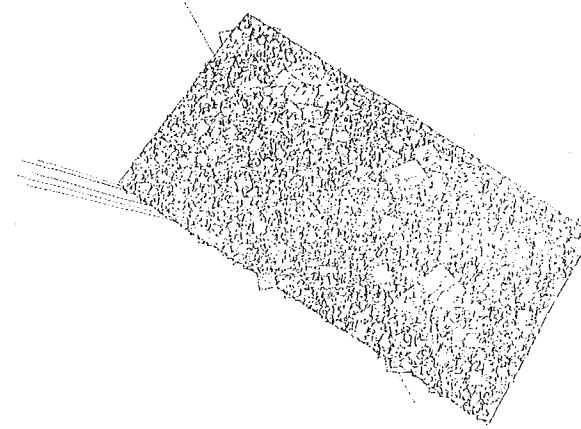


図-1  
Fracture network model used to simulate Radar Saline Experiment 1 phase 1 (10% of modelled fractures shown).



図-2  
Fracture network model used to simulate Radar Saline Experiment 2 (10% of modelled fractures shown).



図-3  
Fracture network model used to simulate tracer experiments with recovery in the Validation Drift from injection in T1, C3 and T2 (10% of modelled fractures shown).

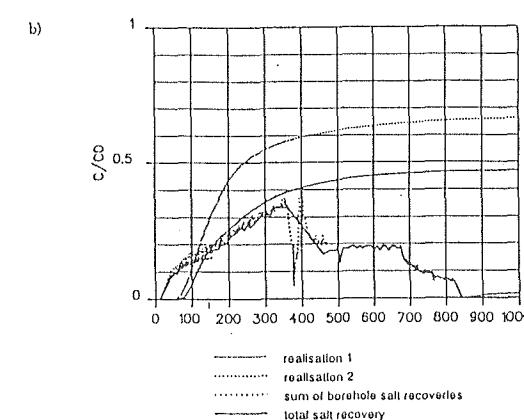
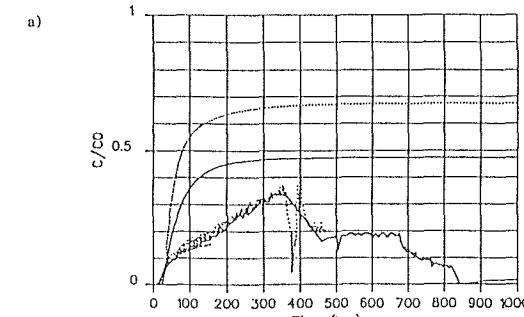


図-4  
Comparison of model and experimental cumulative breakthrough of saline tracer to the D-holes for Radar Saline Experiment 1 phase 1; a) transport velocity equal to parallel-plate flow velocity, and b) transport velocity a factor of three less than parallel-plate flow velocity.

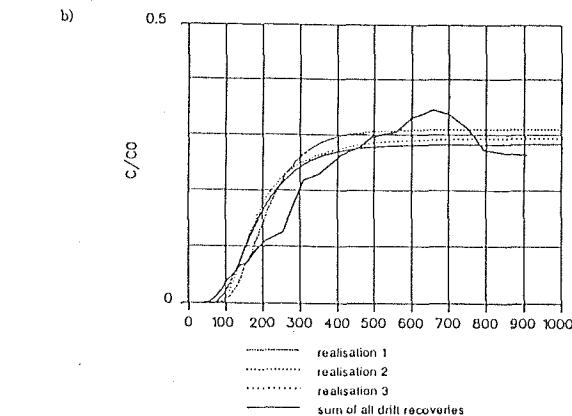
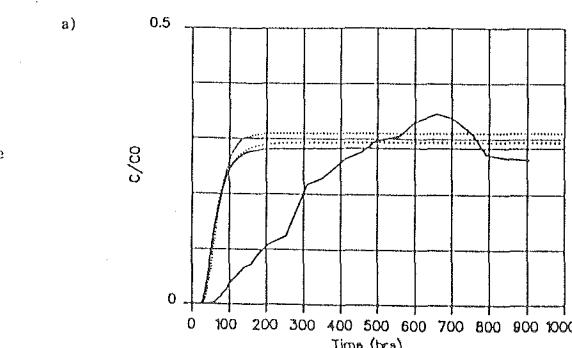


図-6  
Comparison of model and experimental cumulative breakthrough of saline tracer to the Validation Drift for Radar Saline Experiment 2; a) transport velocity equal to parallel-plate flow velocity, and b) transport velocity a factor of three less than parallel-plate flow velocity.

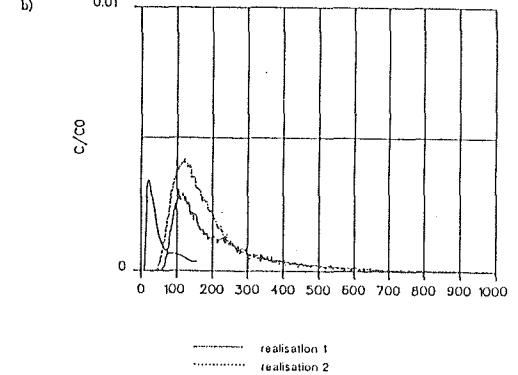
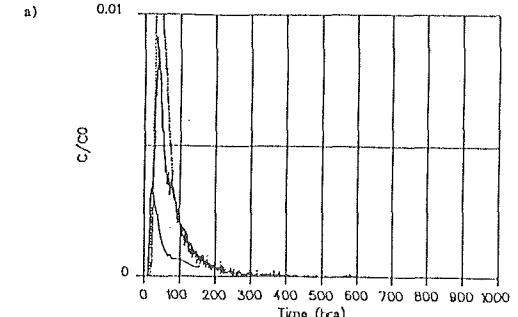


図-5  
Comparison of model and experimental breakthrough for Radar Saline Experiment 1 uranine pulse test; a) transport velocity equal to parallel-plate flow velocity, and b) transport velocity a factor of three less than parallel-plate flow velocity.

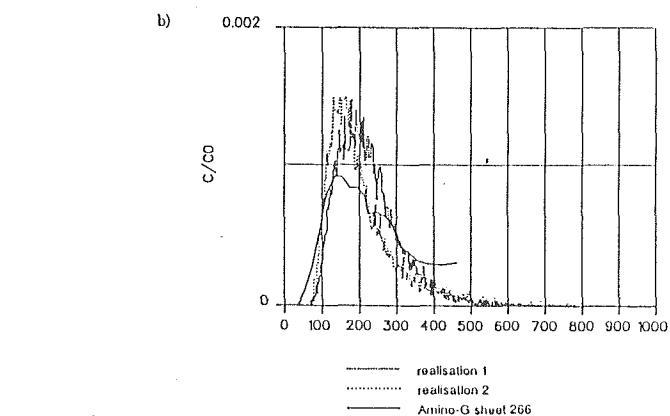
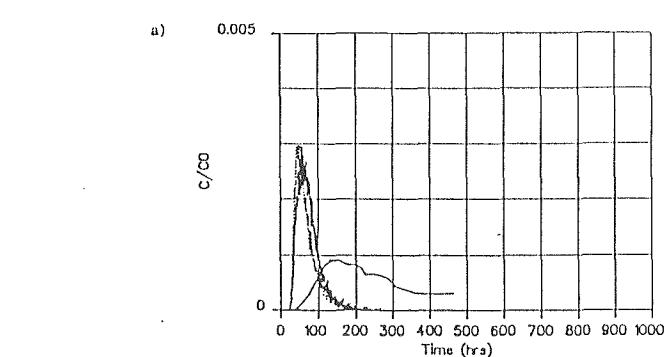


図-7  
Comparison of model and experimental breakthrough for Radar Saline Experiment 1 amino-G pulse test; a) transport velocity equal to parallel-plate flow velocity, and b) transport velocity a factor of three less than parallel-plate flow velocity.

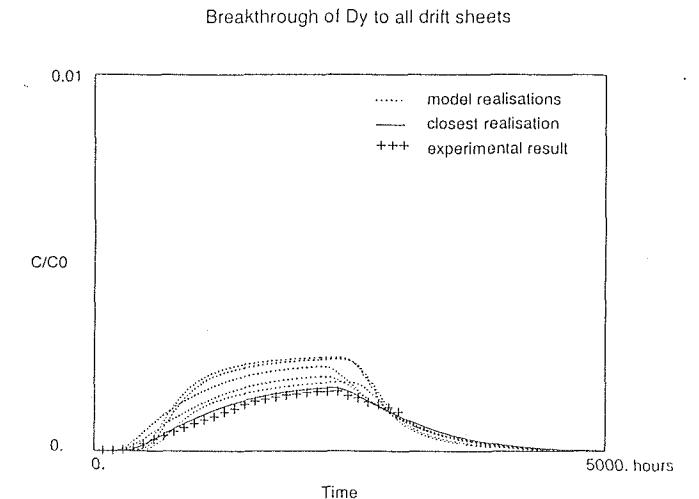


図-8  
Comparison of predicted and experimental breakthrough for Dy tracer experiment: injection in C2 and recovery in the Validation Drift. All realisations of 1m injection intervals shown.

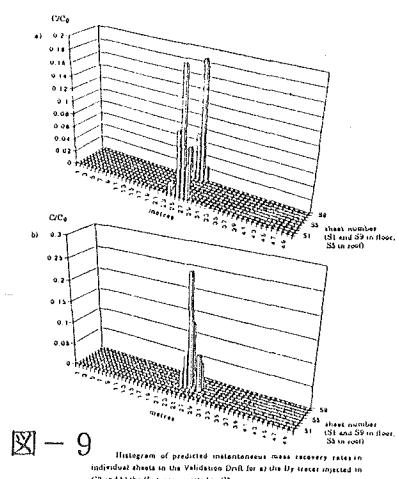


図-9  
Histogram of predicted instantaneous mass recovery rates in individual sheets in the Validation Drift for a) the Dy tracer injected in C2 and b) the Ile tracer injected in C2.

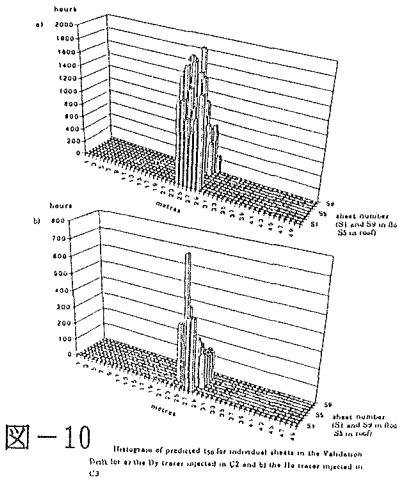


図-10  
Histogram of predicted t50 for individual sheets in the Validation Drift for the Dy tracer injected in C2 and b) the Ile tracer injected in C2.

施設名	ストリパ(12)	土被り	360~410 m	調査研究の目的	SCVサイトの水理特性をモデル化、キャリブレートし、ボーリング孔のパッカー区間から注入されたトレーサー試験を評価する。 サイトスケールの地下水流动系評価である。	
地下構造物の概要	ストリパSCV (Site Characterization and Validation) サイトは、ストリパプロジェクトフェーズ3の主要研究対象でストリパ鉱山の深度360~410mにある長さ125m、幅100mの領域である。Validation Driftとは図-1~3に示すようにDホールに沿って掘削された幅3m、高さ2.4mの橢円形状の長さ50mの坑道である。このため、坑道の奥にはDホールが50m残っている。	水理特性の評価 ・N, W, Cホールでの単孔水理試験				
地形・地質	SCVサイトは花崗岩からなり、亀裂は均一にランダムに分布している。	調査項目と調査手法	備考		キャリブレートのための測定 ・Dホール透水量測定 ・坑道湧水量測定 ・トレーサー試験 { 坑道掘削前の塩水トレーサー試験 坑道掘削後の塩水トレーサー試験	
地質構造	この領域には、A, B, H, H b, I, M, Kの大きなフラクチャーゾーンが推定され、A, Bは北東方向に低角で傾斜しており、H, H b, Iは東に急傾斜している。MとKは北東方向に傾斜している。A, B, Hはかなり大きな拡がりをもっており、SCVサイトの外側にも拡がっている。I, M, KはおおよそSCVサイトと同等の規模すなわち一辺100mほどと推定されている。既存坑道と交差しているのはH, H bのみであり、Hの幅は5~40mの範囲で変化している。					
水理学環的境						
地球化環学境的						

## 施設名 ストリパ(12)

	コード名 C F E S T		
解析手法	コードの内容 Guptaらによって開発された3次元有限要素法の地下水-エネルギー溶質移行連成解析コード	均一モデルの解析結果 ボーリングパッカー区間から注入されたトレーサー試験の結果として、代表的な破過曲線を実測値と比較して図-3に示す。また、表-2には、定常状態の5%濃度の到達時間(T5)、50%濃度の到達時間(T50)、注入濃度で正規化した定常状態の濃度(C <sub>ss</sub> /C <sub>0</sub> )を実測値と比較して示す。T5、T50とも実測値が計算値よりも小さくなっている。計算による到達時間がかなり早いことが分かる。またT1からの注入に対しては計算値は低いピーク値を示している。	解析結果
解析モデル	MINE2モデル 図-1に示すように平面的には約1.1×1.8kmの範囲とし、深さは地表から600mまでを対象に、14層に分割している。 H, I, A-Bの4破碎帯が細かなメッシュによって表現されている。このモデルはSCVモデルの境界条件を与えるために用いられた。 SCVモデル 図-2に示すモデルで、鉛直方向は310~490mレベルを対象として12層に分割している。 Validation Driftは連なる節点で表現されており、H, I, A-Bの4フラクチャーゾーンは細かなメッシュによって表現される。さらにトレーサー試験の解析に用いたメッシュは坑道とボーリング孔の位置をより性格に再現している。	不均一モデルの解析結果 得られた破過曲線を均一モデルと比較して図-4に示す。C2, T2とも不均一性を考慮した結果の濃度は低くなっている。これは不均一性のために流れの方向が坑道に向かわず、坑道での流出濃度が小さくなっているためである。したがって今回の手法で考慮した不均一性の再現では実際の不均一性を合理的に再現できないことがわかる。	解析結果
解析条件	SCVモデル MINE2モデルで得られたポテンシャルを境界条件として使用。	トレーサー試験に至る解析の手順は以下のとおりである。 Dホール湧水量を使用した周辺岩盤の透水係数のキャリブレーション解析 ↓ 坑道湧水量を使用した坑道周辺岩盤の透水係数のキャリブレーション解析 ↓ 坑道掘削前と坑道掘削後のトレーサー試験による間隙率と分散係数のキャリブレーション解析 ↓ ボーリング孔パッカー区間から注入されたトレーサー試験結果との比較	検証手法
物理特性	均一モデル 岩盤部の透水性は以下の値を使用している。 $K_{ij} = \begin{vmatrix} 1.7 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0 & 1 \\ 0 & 0 & 2.1 \end{vmatrix} \times 10^{-17} \text{ m}^2$ Hフラクチャーゾーンの透水性は次式である。 $K_{ij} = \begin{vmatrix} 1.1 & 0 & 0 \\ 0 & 1.8 & 1 \\ 0 & 0 & 1.5 \end{vmatrix} \times 10^{-16} \text{ m}^2$ その他の破碎帯は、測定値を用いて設定している。 なお、透水性には深度方向の変化を考慮している。 不均一モデル N, W, C孔で計測された単孔試験結果をもとに岩盤と破碎帯の透水係数の対数平均と分散を抽出した。その統計量を表-1に示す。岩盤の透水係数については3孔の平均値から乱数を用いて各要素に不均一な透水係数を再現した。		

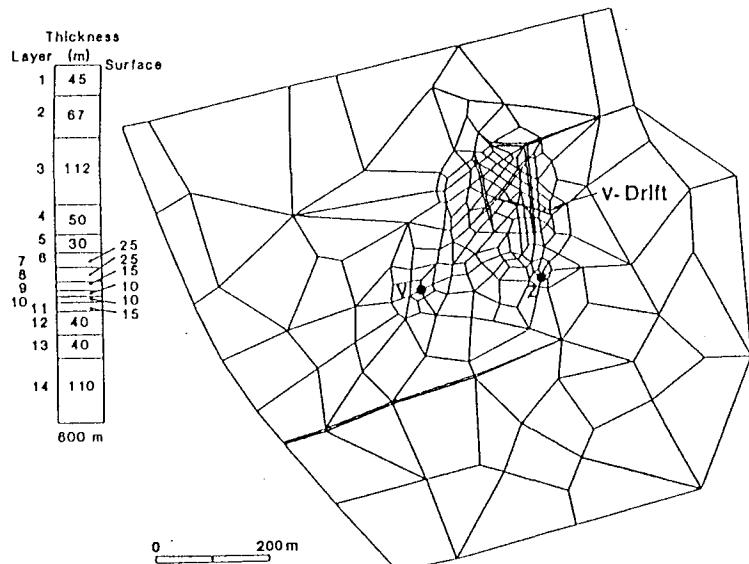


図-1 MINE2モデルのメッシュ図

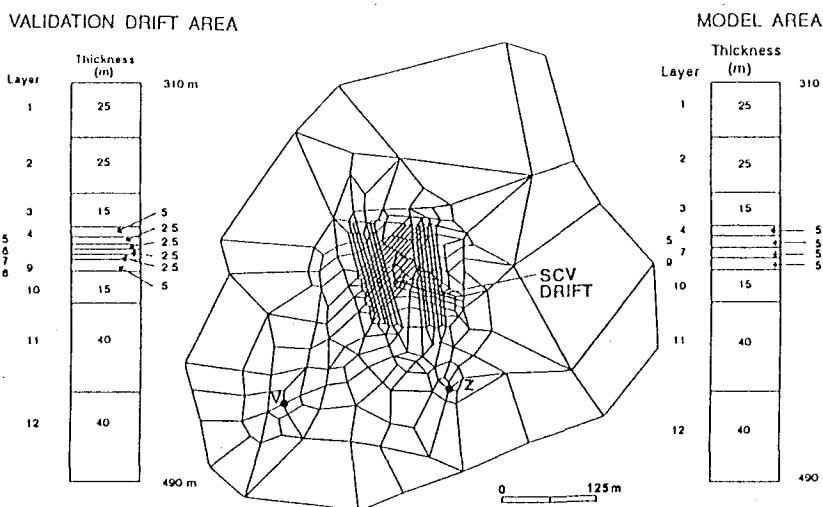


図-2 SCVモデルのメッシュ図

表-1 average rockと亜裂ゾーンの対数透水係数の平均と標準偏差

	Average Rock mean S.D.	H zone mean S.D.	I zone mean S.D.	A+B zone mean S.D.
All Holes	-23.76 2.97	-20.04 3.44	-20.30 3.10	-21.50 2.53
N Holes	-23.86 3.09			
W Holes	-23.18 3.08			
C Holes	-24.52 2.29			

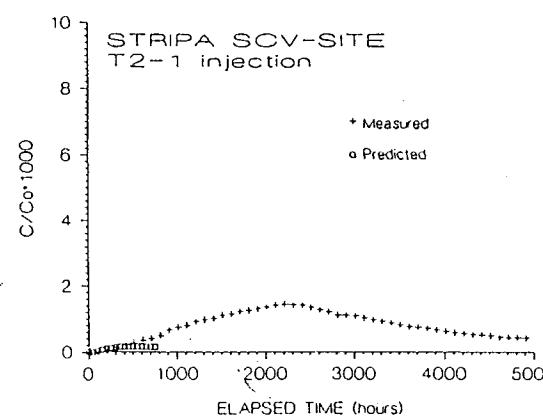


図-3 a 破過曲線の比較 (T2-1区間からの注入)

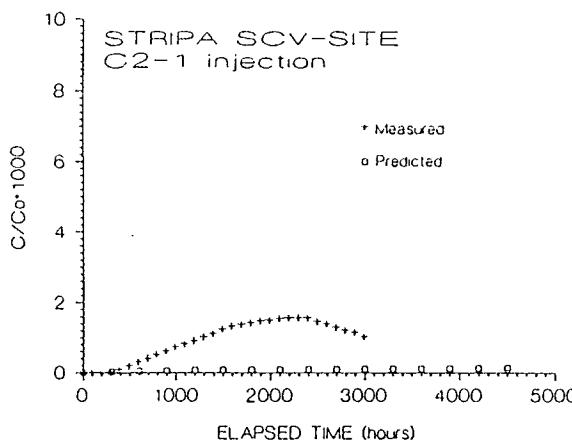


図-3 b 破過曲線の比較 (C2-1区間からの注入)

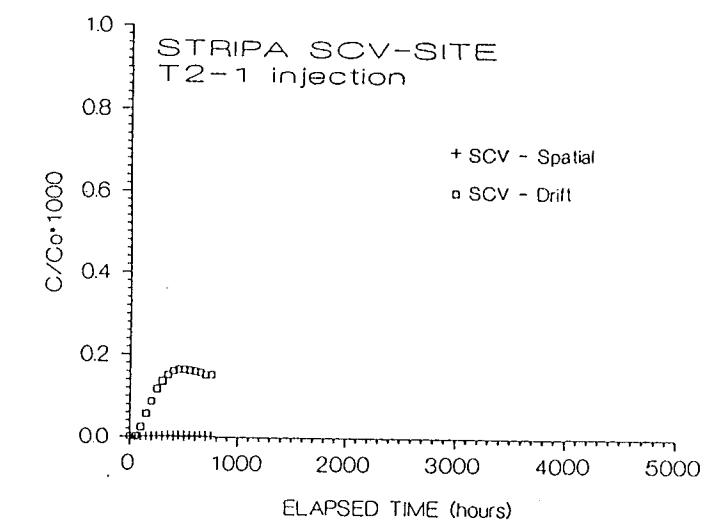


図-4 a 不均一モデルと均一モデルの破過曲線の比較 (T2-1)

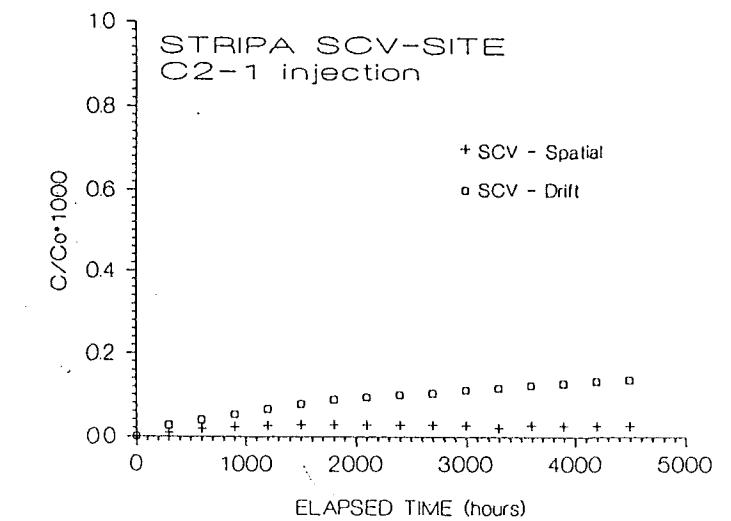


図-4 b 不均一モデルと均一モデルの破過曲線の比較 (C2-1)

表-2 実測値と計算値の比較

注入区間	Cs/C0*100		T5(hours)		T50(hours)	
	測定値	計算値	測定値	計算値	測定値	計算値
T1-2	0.4	0.14	500	50	2000	150
T2-1	1.5	0.09	250	60	2200	200
T2-3	1.75	0.16	700	60	3100	200
C2-1	1.6	0.13	350	125	1150	1100
C3-1	0.16	0.14	350	50	750	150
C3-2	0.09	0.17	1200	250	2800	1000

施設名	フィンション(1)	土被り	m	調査研究の目的	準広域スケールにおける破碎帯の重要性を評価する。特にゾーン2の地下水流动量が大きく、南側にあるフィンション湖からの供給の可能性などを検討する。
地下構造物の概要	スウェーデンにおける高レベル放射性廃棄物地層処分場の候補地点				
地形・地質	[地形] 比高差15m以下の平坦地で、地表は氷堆石、ピートに覆われている。 [地質] 基盤岩は葉片状の花崗閃緑岩から構成され、一部にペグマタイト変塩基性岩、アプライトを伴う。			調査項目と調査手法	調査ボーリング コアボーリング $\ell = 100 \sim 700\text{m}$ の11本 パーカッションボーリング $\ell = 100\text{m}$ の16本, $\ell = 288\text{m}$ , $\ell = 459\text{m}$ 物理探査 物理検層 水理試験 単孔試験 干渉試験 トレーサー試験
地質構造	リニアメントを図-1に示す。南北系、北西-南東系、北東-南西系の3つの卓越方向がみられる。また、図-1の南北方向と東西方向の地質断面を図-2に示す。これによるとゾーン2など傾斜角の小さい地表に現われない破碎帯も存在する。			備考	
水理学環的境	岩盤の水理特性は深度Zに対し、以下のように評価される。 岩盤の透水係数 $K(b) = 4.90 \times 10^{-6} \times C \times Z^{-1.30} (\text{m/s})$ 破碎帯の透水係数 $K(s) = 5.06 \times 10^{-3} \times C \times Z^{-2.15} (\text{m/s})$ C : 仮定した流动条件によって決まる比例定数				
地球化環学的境	地下水は塩分濃度が300mg/ $\ell$ 以上の塩水が多数存在し、Yoldia海及びLitorina海の海水が岩との相互作用で変化した海水起源のものである。				

施設名 フィンション(1)

解析手法	コード名	NAMMU	解析結果	準広域モデル ①準広域モデルでは約45km <sup>2</sup> をカバーし、明瞭にモデル化された広域破碎帯をよく表現している。準広域スケールのモデル化では、岩盤の透水係数と破碎帯に関する仮定を違えたときの全体の流動に与える影響を解析することに主眼をおいている。この解析は、岩盤と破碎帯の透水係数を変えることによってできる。さらに水圧分布の計算結果は、局所スケールのモデルの境界条件を導くのに用いる。 ②圧力分布 水平断面 -200m (地表とゾーン2との間), -500m (仮想処分場の深度) -800m (ゾーン2の200~500m下), -1300m (深部) ・いずれの解析ケースでも-200~-1300mの水頭変化は1~2m程度。 これは破碎帯が岩盤に比べ透水性が大きく圧力を伝えるため。 ・ケースによる違いはなくいずれも地形が地下の圧力分布を支配する。 鉛直断面 ・ゾーン2の重要性を見るために選定した。 ・圧力分布の結果が変わるのは破碎帯を岩盤と同じ透水係数にしたケースのみである。 以上により、準広域スケールでは透水係数の設定値の違いにあまり影響を受けず破碎帯が流動に関して重要であることがわかる。
	コードの内容	有限要素法による多孔質媒体の解析コード。熱と地下水の流動に係る連成問題を1~3次元で解くことができる。		③粒子の軌跡 仮想処分場内 (-500m) に位置する8つの粒子の軌跡を見ると、図-5 (左) ケース3DSB (破碎帯をモデル化) では、軌跡は破碎帯に沿いゾーン1とゾーン4の交差部で集中して排水する。図-5 (右) ケース3DS2 (破碎帯をモデル化せず) では軌跡は平行に排出する。 のことからも破碎帯が重要なみずみちになっていることが示唆される。 ④仮想処分場での流量フラックス分布 X, Y, Z 3方向のダルシー流速よりフラックスを求める。 マトリックスでは100ml/m <sup>2</sup> /年程度、破碎帯ではマトリックスより数オーダー大きなフラックスとなる (図-6 (左))。破碎帯をモデル化しない場合は50~200ml/m <sup>2</sup> /年で全体がほぼ一様となる (図-6 (右))。 ⑤ゾーン2をフィジョン湖まで延長することの評価 (図-7) 従来の報告書によれば、観測結果より算出されるゾーン2での流量は5~10l/s (150,000~300,000 m <sup>3</sup> /年) である。その源としてフィジョン湖からの水供給があるか否かを検討するため、モデルによる計算を行った。 計算方法は、ケース3DS (ゾーン2をゾーン7以北に限定) と3DS3 (ゾーン2をゾーン14に交差するまで南に延長) の2つの解析を行いそれぞれの流量収支により比較検討した (表-5)。 結果は、ケース3DSBとケース3DS3であり違いがないためゾーン2をフィジョン湖まで延長するか否かは水理学的にあまり重要な問題でないことがわかる。また、透水係数に参照値を用いた基本ケース (3DSB) のモデル設定を検証した。 ⑥局所モデルへの適応 ・ケース3DSBとDS3ではあまり結果に違いがないため、3DSBの結果を局所モデルの境界条件に用いる。
解析モデル	解析結果	準広域モデル 図-3に示すように、約43km <sup>2</sup> の深さを対象に破碎帯等の地質学的特徴によってモデル化。要素数は35000で、1要素は8節点のレンガ型で巾は約50~60m。深さ方向は24層に分割。 局所モデル 図-4に示すように、破碎帯で囲まれた約6.6km <sup>2</sup> の深さ1500mを対象にモデル化。要素数は36000で1要素は8節点のレンガ型。深さ方向は24層に分割。	準広域モデル 表面境界は地下水水面 局所モデル 実施した解析の境界条件を表-1に示す。なお、引用としたものは、準広域モデルの結果に基づくものである。	局所モデル ①局所スケールでは約6.6km <sup>2</sup> を対象とする。このモデルの中には、準広域スケールで存在していた破碎帯以外に、局所的な破碎帯の集合体も含まれている。これらの破碎帯は、複数の有限要素にまたがって機械的にその特性を平均することによってモデル化されており、実際の破碎帯の走行や傾斜に必ずしも一致していない。局所スケールでの地下水の流れは地形に支配され、主要な流れは北東部の上部の角にある3つの破碎帯が交差する点に向かっている。
解析条件	解析結果	準広域モデル 岩盤の物性及び破碎帯の物性を変えた各解析ケースの物性を表-2~4に示す。 局所モデル 深度依存性を考慮したKBS3の透水係数データを使用 (詳細不明)。	準広域モデル 岩盤の物性及び破碎帯の物性を変えた各解析ケースの物性を表-2~4に示す。 局所モデル 深度依存性を考慮したKBS3の透水係数データを使用 (詳細不明)。	局所モデル ①局所スケールでは約6.6km <sup>2</sup> を対象とする。このモデルの中には、準広域スケールで存在していた破碎帯以外に、局所的な破碎帯の集合体も含まれている。これらの破碎帯は、複数の有限要素にまたがって機械的にその特性を平均することによってモデル化されており、実際の破碎帯の走行や傾斜に必ずしも一致していない。局所スケールでの地下水の流れは地形に支配され、主要な流れは北東部の上部の角にある3つの破碎帯が交差する点に向かっている。
水理物性	解析結果		局所モデル ①局所スケールでは約6.6km <sup>2</sup> を対象とする。このモデルの中には、準広域スケールで存在していた破碎帯以外に、局所的な破碎帯の集合体も含まれている。これらの破碎帯は、複数の有限要素にまたがって機械的にその特性を平均することによってモデル化されており、実際の破碎帯の走行や傾斜に必ずしも一致していない。局所スケールでの地下水の流れは地形に支配され、主要な流れは北東部の上部の角にある3つの破碎帯が交差する点に向かっている。	

## 施設名 フィンション(1)

解 析 結 果	<p>②今回の解析で表面に与えた境界条件（上部境界条件）の変化に対して、モデル（図-8～10）はかなり感度が鈍い（変化しにくい）。広域モデルと局所モデルとで地下水水面の形状が異なる（局所モデルでは局所的な起伏が現れる）が、それによって局所スケールの流動状が大きく変化することはない。局所スケールでの流動は、伏在する広域地形に支配される。</p> <p>③仮想処分場にあたる地点の北側ブロックから出た粒子の軌跡を見ると、全体的な流動パターンは準広域スケールでのパターンと同様であることがわかる（図-11, 12）。準広域解析の結果に基づいて境界での圧力を設定することによって、局所スケールでの流線の出口は準広域解析での流線の出口に一致する（図-12）。（側方を）不透水境界とした場合の流路は、その境界条件のために、地表面あるいはその近くで流出する。ゾーン1を横切って流出点に至る粒子はなく、対象としたすべての流線は始点も流出点も北側ブロックにあるか、あるいは北側ブロックと南側ブロックの境界部にある。</p> <p>④流域分布の解析結果（図-13, 14）によると、局所的な破碎帯が存在することにより、領域内の流量が増大することがわかる。流量（フラックス）の代表的な値は、処分場レベルの岩盤内で約100ml/m<sup>2</sup>/年であるが局所的な破碎帯を無視した場合、地下水面上500m以深の約90%の領域で流量が100ml/m<sup>2</sup>/年未満になる。局所的破碎帯をモデルに取り入れた場合は、これが65～70%となる（図-15）。また、側方境界を透水境界にしても不透水境界にしても、あるいは、準広域的地形をとっても局所的地形をとっても、いずれもほとんど同じ流量分布の結果が得られている。このことは、本解析においては、側方境界条件のタイプおよび上部境界条件のタイプのいずれも、処分場レベルの流量に対しては局所的破碎帯ほど重要でないことを示している。これまでの解析では、処分場レベルにおける平均動水勾配は0.009であることがわかっている。</p> <p>⑤ゾーン2での水収支計算の結果、ここで行ったどの解析ケースでも、流量の算出値はゾーン2を通った実際の流量の範囲の中にあることがわかる。ゾーン2の上端はおよそ165000m<sup>3</sup>/年（40mm/年に相当）の水が涵養するが、周辺の破碎帯からの涵養はその半分の量しかない。これらの涵養量の値は、機械的にモデル化された局所的破碎帯が約65000m<sup>3</sup>/年の量でゾーン2の上部境界からの涵養に貢献しているケースにおいて確かである。</p> <p>一般に、ゾーン2における水圧分布・流路・流速に関しては、解析ケースによって結果が大きく変わることはない。いずれの解析ケースでも同様の結果となることは、SKB91の枠組みの中で将来どのモデルを用いるのが最適かを決めることが可能となることを示している。もし将来できる限り詳細な知見を解析にとり入れようとするならば、不透水側方境界および局所的地形を設定したケースを優先して行うこととなる。</p>	解 析 結 果	
	<p>解析結果で述べたとおり、解析結果での比較は行われているが、検証はなされていない。</p>	検 証 手 法	

施設名 フィンジョン (1)

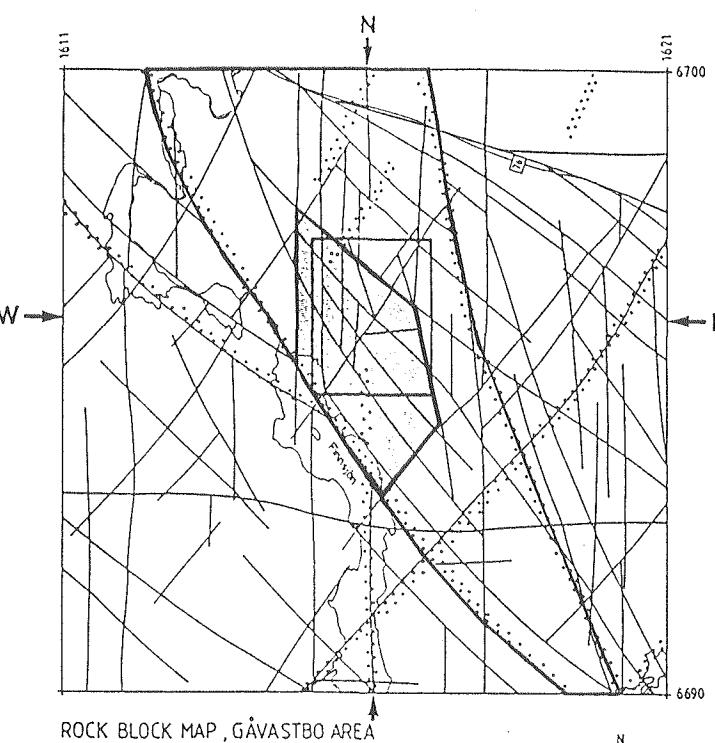


図-1 Rock block map of the Gåvastbo area, semi-regional area. Location of the geological cross-sections in Figure 2 are marked by arrows.

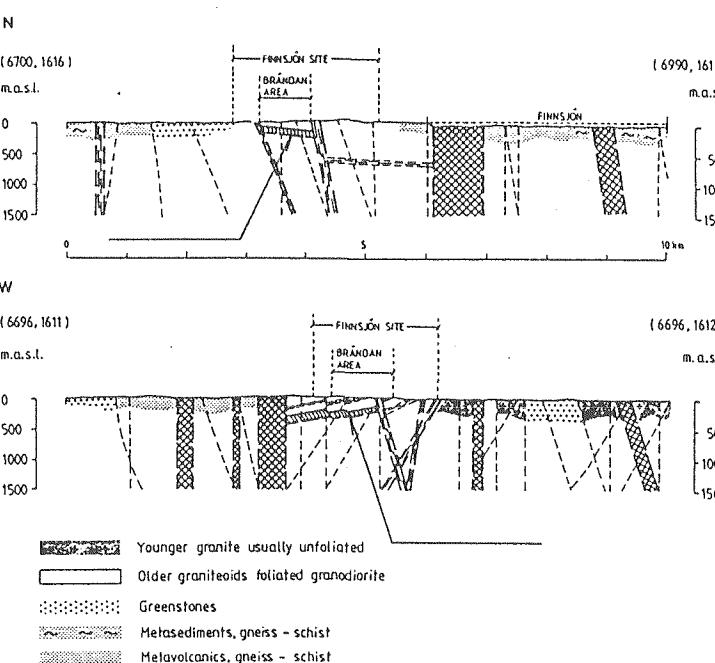


図-2 Vertical geological cross-sections in N-S and E-W through the Gåvastbo area. Arrows mark lineaments identified on the regional map. Legend of rock types is presented in Figure 1.

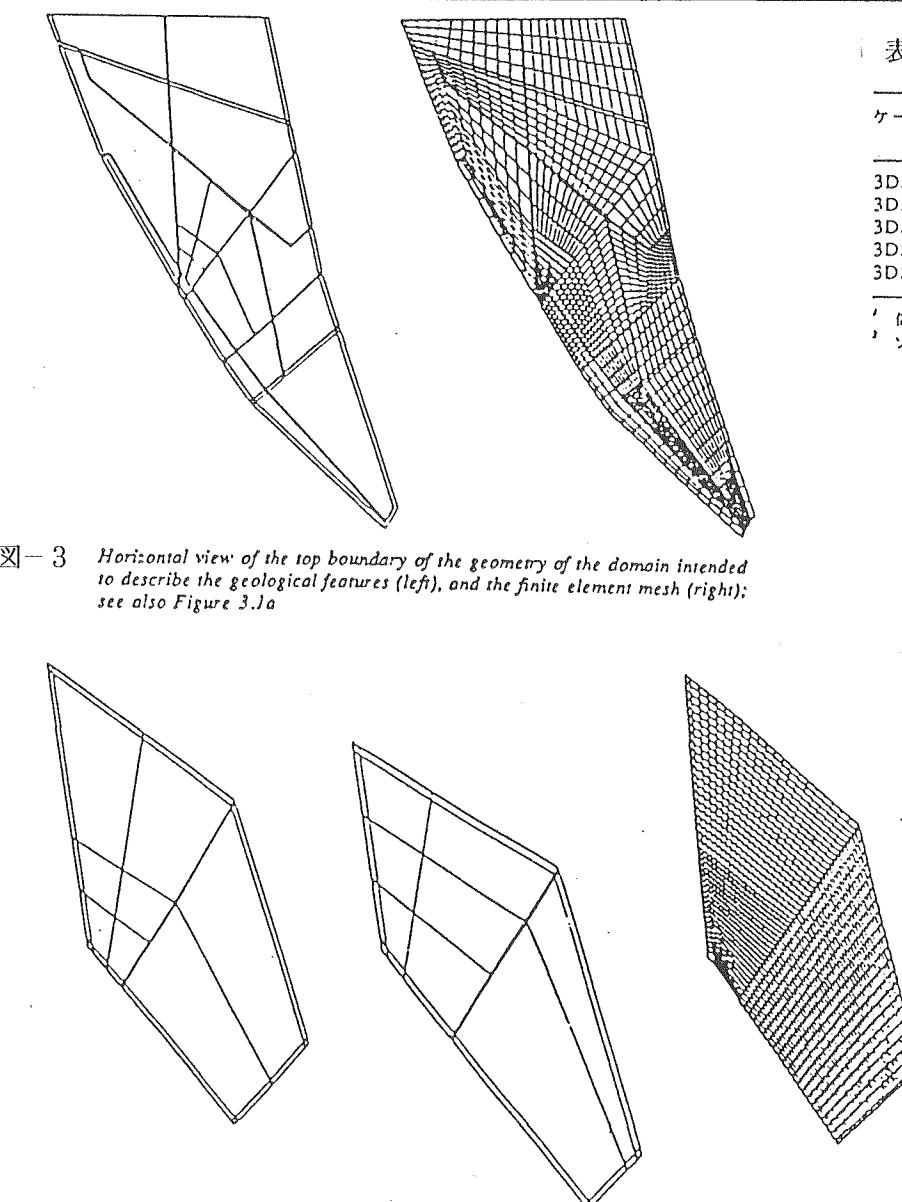


図-3 Horizontal view of the top boundary of the geometry of the domain intended to describe the geological features (left), and the finite element mesh (right); see also Figure 3.1a

図-4 Horizontal view of the top boundary (left) and the bottom boundary (middle) of the geometry of the bounding fracture zones; horizontal view of the top boundary of the finite element mesh (right); compare Figure 3.2a.

表-1 Boundary conditions for the different cases on the local scale.

ケース	側方境界	上部境界
3DLSR*	引用	準広域地形
3DLSB	引用	準広域地形
3DLS1	不透水	準広域地形
3DL1	不透水	局所地形
3DL2	不透水	局所地形

\* 局所的 破碎帶 なし。

表-2 Model set-ups for the cases considered for the semi-regional model.

ケース	岩盤 参照値	上限 <sup>1</sup>	下限 <sup>1</sup>	岩盤 参照値	割れ目帯
3DSB	X				X
3DS1A		X			X
3DS1B			X		X
3DS2	X				X
3DS3 <sup>2</sup>	X				X

<sup>1</sup> は精度 95% の値  
<sup>2</sup> ゾーン 2 をゾーン 14 と交差するように延長したモデル 参照値：統計処理した値

表-3 Hydraulic conductivities (m/s) for the cases on the semi-regional model.

ケース	岩盤	割れ目帯
3DSB	$1.0 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$	Ref. values
3DS1A	$1.0 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-0.11}$	Ref. values
3DS1B	$1.0 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.17}$	Ref. values
3DS2	$1.0 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$	$1.0 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$
3DS3	$1.0 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$	Ref. values

表-4 Reference values of the hydraulic conductivities (m/s) for the fracture zones.

割れ目帯	幅 (m)	傾斜 (°)	透水係数 (m/s)
1	20	75 SE	$1.21 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1.10}$
2	100	16 SW	$1.02 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1.10}$
3	50	80 SW	$5.77 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$
4	50	60 SW	$3.14 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1.10}$
12	50	90	$3.70 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$
13	50	90	$1.21 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1.10}$
14	50	90	$3.70 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$
Skogsbo	100	90	$3.14 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1.10}$
Giboda	100	90	$3.14 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1.10}$
Imundbo	100	90	$3.14 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1.10}$
Gräsbo	100	90	$3.70 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$
Dannemora	100	90	$3.70 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1.10}$
Kullviken	100	90	$1.21 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1.10}$

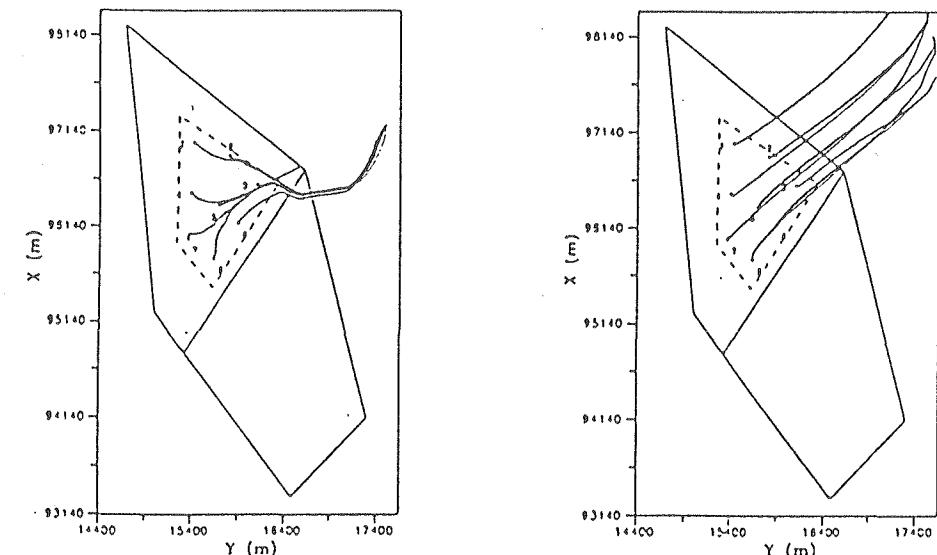


図-5 Horizontal projection of pathlines for Cases 3DSB (left) and 3DS2 (right).

施設名 フィンション (1)

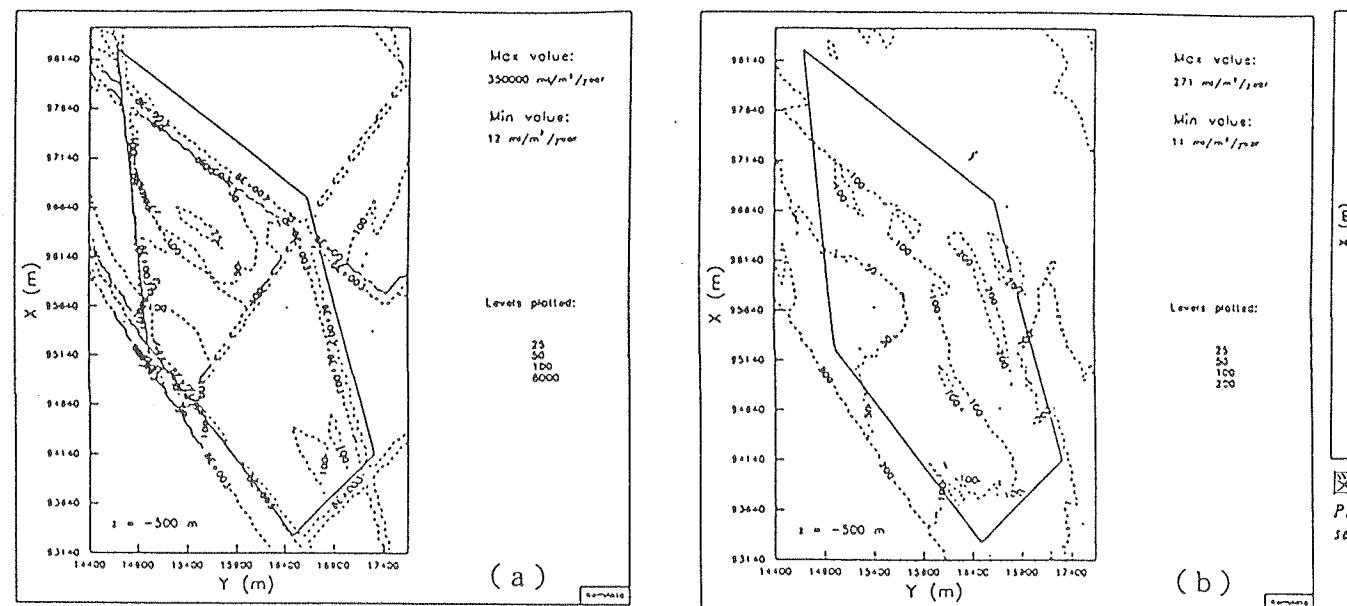


図-6 Flux distribution at a level of  $z=-500$  m; Case 3DSB, the Base Case.  
Flux distribution at a level of  $z=-500$  m; Case 3DS2, homogeneous rock mass properties.

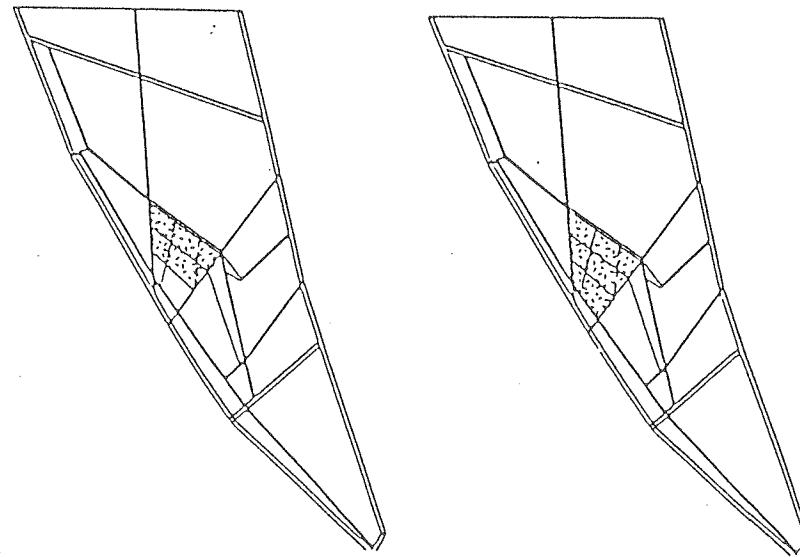


図-7 Horizontal view of the top boundary indicating the areal coverage of zone 2 (screened area) In Case 3DSB (left), and Case 3DS3 (right), as modelled on the semi-regional scale. The dashed line corresponds to the position of the cut through which the natural groundwater flow was estimated.

表-5 The flow ( $m^3/\text{year}$ ) into and out of zone 2 through its confining features for Cases 3DSB and 3DS3.

特徴	3DSB		3DS3	
	流入	流出	流入	流出
TC2	109000	45800	121000	51000
BC2	10100	41900	8750	46100
LC21	49500	14000	57300	15900
LC24	11100	135000	8630	148000
LC212	27600	0	32700	0
LC2S	14600	564	3790	0
	221900	237264	232170	261000
偏差	-15364 (6.7%)		-28330 (11.5%)	

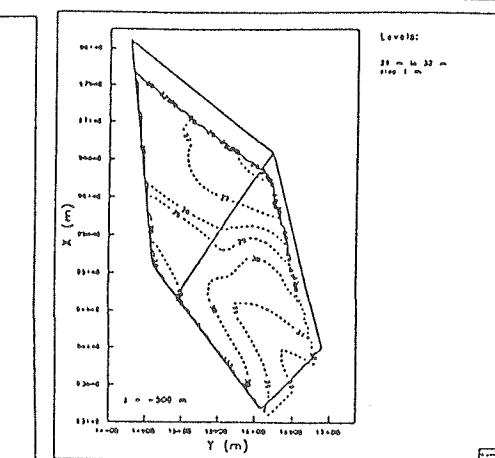


図-8 Pressure distribution at  $z=-500$  m; Case 3DLS1, no-flow lateral boundaries, semi-regional topography, local fracture zones.

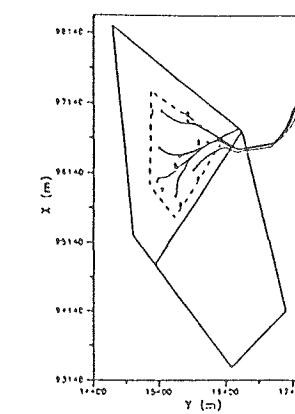


図-11 Horizontal projection of pushlines; Case 3DSB, the Base Case on the semi-regional scale.

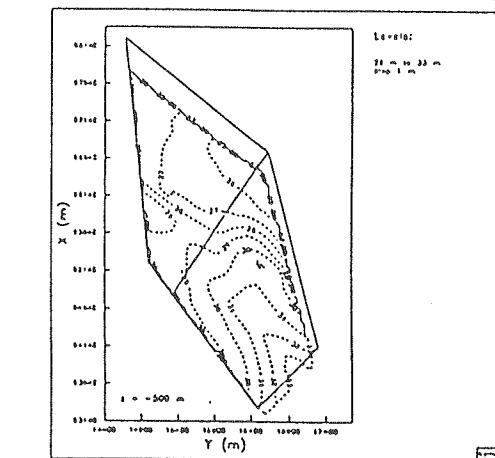


図-9 Pressure distribution at  $z=-500$  m; Case 3DL1, no-flow lateral boundaries, local topography, local fracture zones.

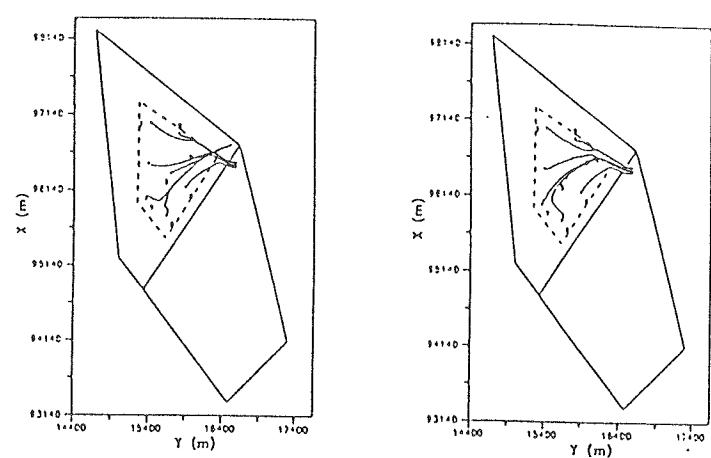


図-12 Horizontal projection: Case 3DL5R, transferred boundaries, semi-regional topography, no local fracture zones (left); Case 3DL5B, transferred boundaries, semi-regional topography, local fracture zones (right).

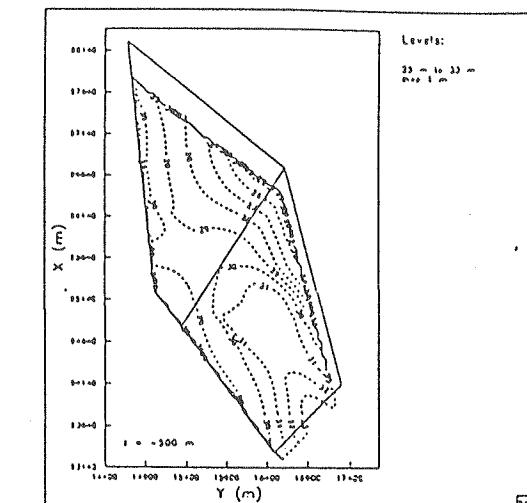


図-10 Pressure distribution at  $z=-500$  m; Case 3DL2, no-flow lateral boundaries, local topography, local fracture zones, KBSJ-like conductivities.

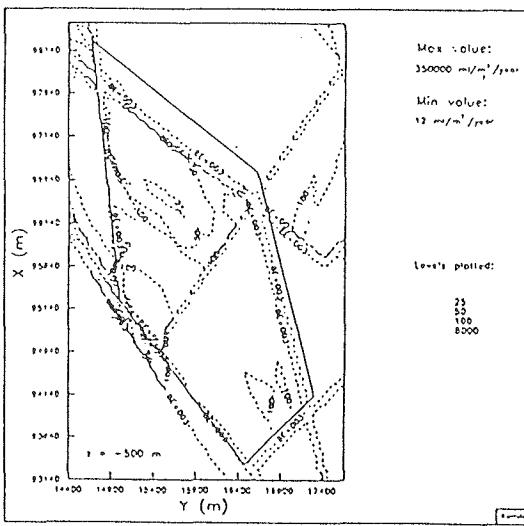


図-13

Flux distribution at  $z = -500$  m; Case 3DSB, The Base Case on the semi-regional scale.

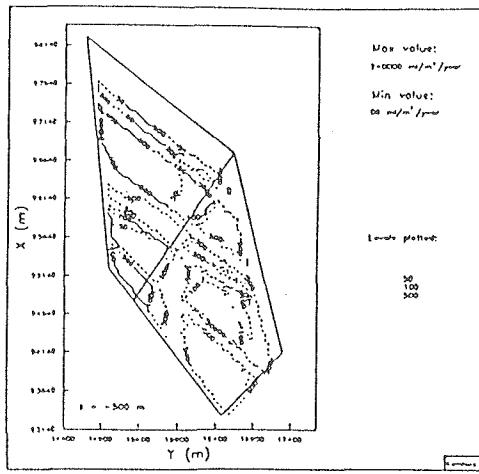


図-14

Flux distribution at  $z = -500$  m; Case 3DLSI, no-flow lateral boundaries, semi-regional topography, local fracture zones.

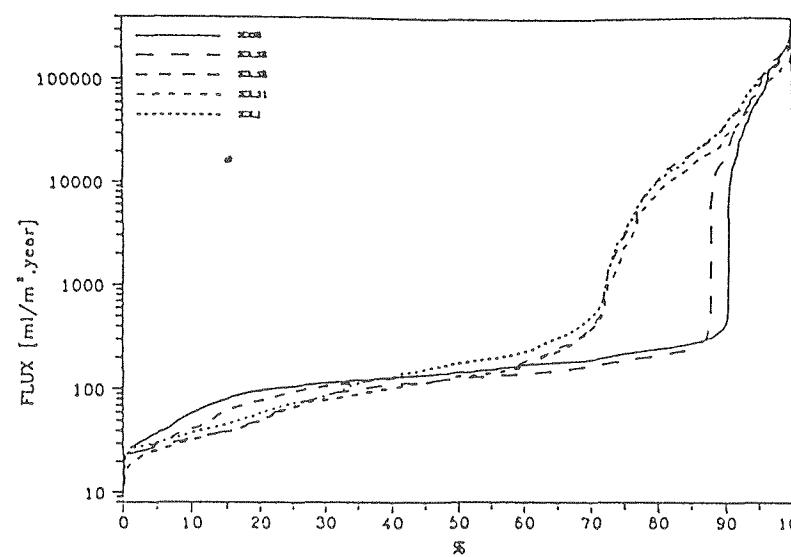


図-15

Frequency diagram of the flux distribution for Cases 3DSB (base case on semi-regional scale), 3DLSR (reference case with transferred lateral boundary conditions and semi-regional topography), 3DLSB (base case on the local scale with transferred lateral boundary conditions, semi-regional topography and local fracture zones), 3DLSI (no-flow lateral boundaries, semi-regional topography and local fracture zones), and 3DLI (no-flow lateral boundaries, local topography and local fracture zones). The diagram has been plotted with the use of the same point values that were used for the calculation of the contoured levels in Figures 7.9a-f. Note, that the scaling of the flux is logarithmic.

施設名	フィンション(2)	土被り	m	調査研究の目的	塩水の存在が地下水流动に影響を与えるか否かを確めるために検討を行う。
地下構造物の概要	スウェーデンにおける高レベル放射性廃棄物地層処分場の候補地点			調査項目と調査手法	
地形・地質	[地形] 比高差15m以下の平坦地で、地表は氷堆石、ピートに覆われている。 [地質] 基盤岩は葉片状の花崗閃緑岩から構成され、一部にペグマタイト変塩基性岩、アプライトを伴う。			備考	
地質構造	リニアメントは南北系、北西-南東系、北東-南西系の3つの卓越方向があり、また、これでは別にゾーン2など傾斜半角の小さい地表に現われない破碎帯も存在する。				
水理学環的境	岩盤の水理特性は深度Zに対し、以下のように評価される。 岩盤の透水係数 $K(b) = 4.90 \times 10^{-6} \times C \times Z^{-1.30}$ (m/s) 破碎帯の透水係数 $K(s) = 5.06 \times 10^{-3} \times C \times Z^{-2.15}$ (m/s) C : 仮定した流动条件によって決まる比例定数				
地球化環学的境	地下水は塩分濃度が300mg/l以上の塩水が多数存在し、Yoldia海及びLitorina海の海水が岩との相互作用で変化した海水起源のものである。				

## 施設名 フィンション(2)

解 析 手 法	コード名	NAMMU	解析結果	① 塩水地下水 (saline groundwater) は、水理学的に重要な低角度の割れ目帯2（ゾーン）の中あるいはそれより下で見られる。塩分の存在する所では密度が増大するとして解析した。解析は準一般的な方法であり、しかも自然状態の境界条件についてはほとんど分かっていないという制約の下で行っている。このため塩水の二次元解析の結果は、（単に）“範囲を示した”（“scoping”）ものとして定性的に解析・評価をすべきである。 <p>② 図-3～6に示すように、ゾーン2の傾斜とともに、塩分の存在による密度の増大はゾーン2以深での密度流 (density-dependent flow) を引き起こす。これに対して、ゾーン2より浅部での流れは、ゾーン2以深の高密度に影響を受けないように見える。よってゾーン2より下での流れは主に地下水の塩分濃度とゾーン2の傾斜に依存し、もしゾーン2が水平ならばそれ以深では地下水は停滞するものと予想される。</p> <p>③ ゾーン2より下での塩水の流れは、ゾーン2が地域全体の傾斜と逆であるために、真水での解析ケースと逆の向きである。このことは、真水の解析ケースにおける側方境界での流出域が領域を越えて下流側（ゾーン2の傾斜する方）に移動し、その結果ここで示した流線に関しては停滞点となることを示す。ゾーン2により下の流域は、塩水を考慮した場合は約10倍に増える。およその流量は、領域中央部の <math>z = -500\text{m}</math> で <math>30 \sim 300\text{ml/m}^2/\text{年}</math> のオーダーである。しかし、側方境界条件が不確かであり塩分の空間分布も明らかでないため、密度流についてはよくわかっていない。よって併せて行った三次元解析では、塩分の存在は考慮していない。</p>
	解析モデル	水平方向2500m、鉛直方向1500mを対象に図-1に示すように2次元要素分割。要素数は1645で、1要素8節点。この中で考慮する破碎帶を図-2に示す。 解析は定常状態とし、密度勾配のみを考え、拡散や分散は考慮しない。密度勾配は塩分濃度で、決定する。		
	境界条件	表-1に示すように、2種類の側方境界（不透水境界と静水圧境界）と塩分の存否の2条件の計4ケースとする。		検証は行われていない。
	水理物性	破碎帶の状況と透水性を表-2に示す。		

施設名 フィンション (2)

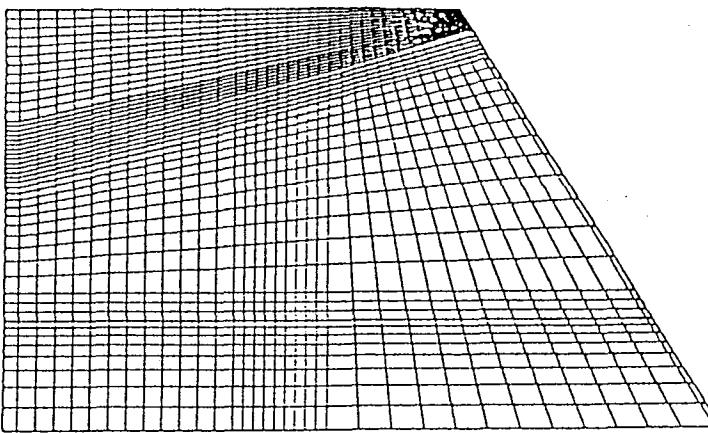


図-1

The finite-element mesh as generated for the two-dimensional modelling of the salt intrusion.

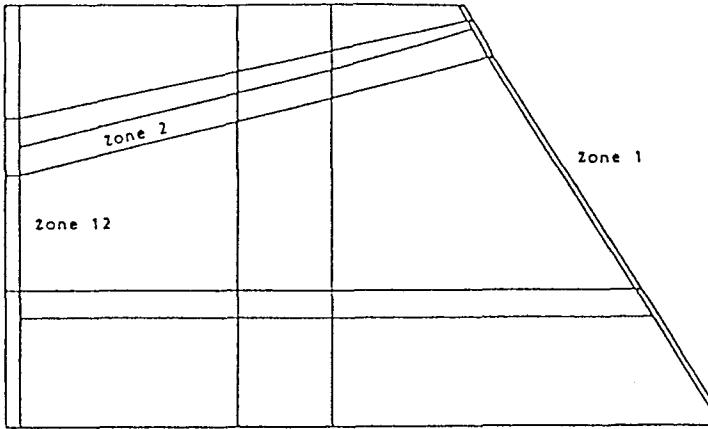


図-2

The geometry describing the vertical cut and the geological features included in the model.

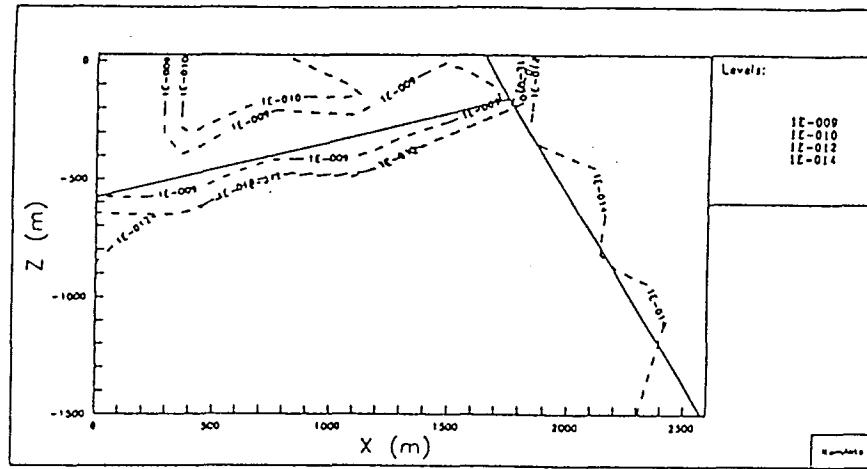


図-3 Flux distribution for Case 2D1; no-flow lateral boundaries, no salt. Flux values are expressed in  $m^3/m^2/s$ .

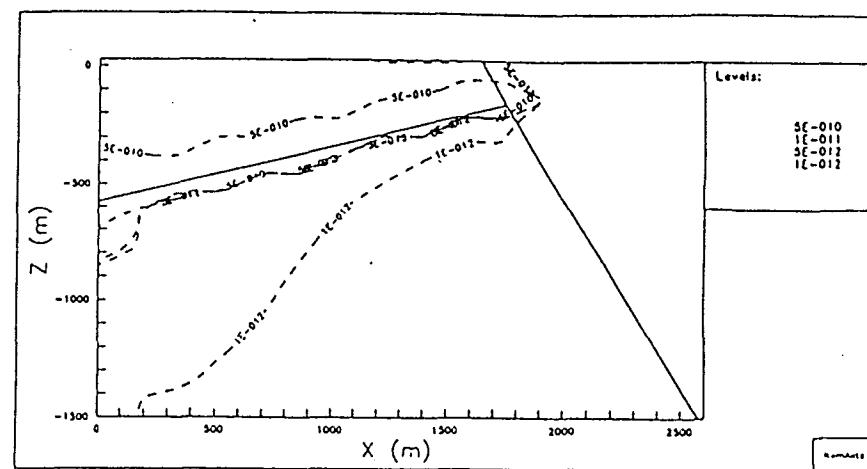


図-5 Flux distribution for Case 2D3; hydrostatic lateral boundaries, no salt. Flux values are expressed in  $m^3/m^2/s$ .

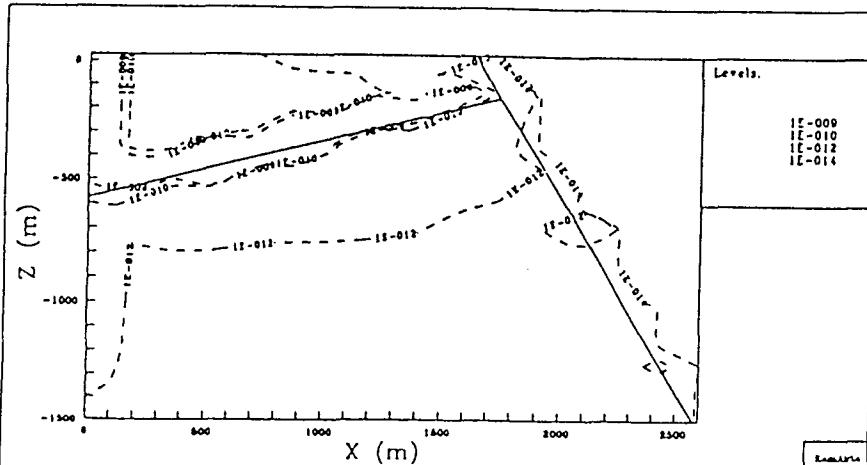


図-4 Flux distribution for Case 2D2; no-flow lateral boundaries, salt below zone 2. Flux values are expressed in  $m^3/m^2/s$ .

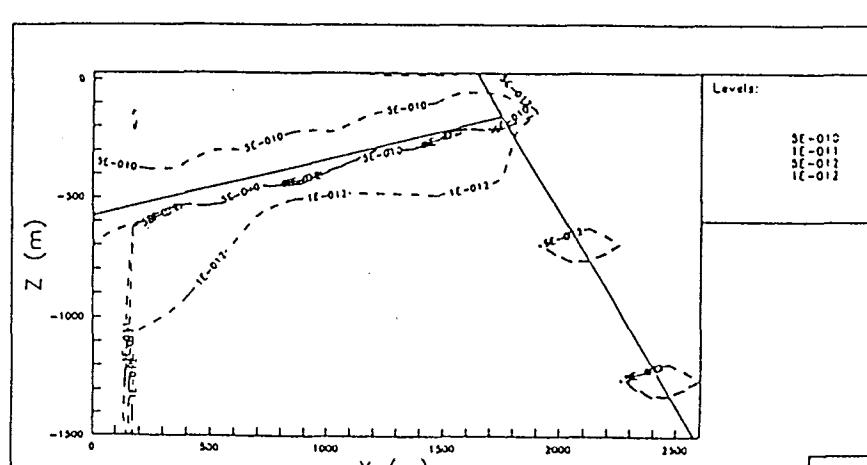


図-6 Flux distribution for Case 2D4; hydrostatic lateral boundaries, salt below zone 2. Flux values are expressed in  $m^3/m^2/s$ .

表-1 Type of boundary condition for the different cases considered within the two-dimensional modelling of the salt Intrusion.

ケース	側方境界不透水	側方境界静水圧	ゾーン2以深での密度勾配
2D1	X		
2D2	X		X
2D3		X	
2D4	X	X	X

表-2 Widths, inclinations, and hydraulic conductivities of the fracture zones for the two-dimensional modelling of the salt intrusion.

破碎帯	幅 (m)	傾斜 (°)	透水係数 (m/s)
1	20	75 (SE)	$1.21 \cdot 10^{-3} \cdot z^{1.10}$
2	100	16 (SW)	$1.02 \cdot 10^{-2} \cdot z^{1.10}$
12	50	90	$3.70 \cdot 10^{-4} \cdot z^{1.10}$

施設名	フィンション(3)	土被り	m	サイト地下に存在するゾーン2と呼ばれる破碎帯の水理特性を検討する。
地下構造物の概要	スウェーデンにおける高レベル放射性廃棄物地層処分場の候補地点			<p>調査研究の目的</p> <p>水理試験 単孔低圧注水試験 200kPaで15分間注水とその後15分間の回復を測定。ただし低透水性の部分では数kPaの注水圧とし高透水の部分では2時間の試験。 干涉試験 図-1, 表-1に示すように揚水孔の特定区間から一定流量で排水し、周辺にある複数の観測孔にマルチパッカー境界条件及び外部との水理的相互作用、破碎帯の不均質性などを調査。 トレーサー試験 純粹トレーサー試験 図-2に示すように揚水孔から揚水した地下水にウラニンを投入し、これを注水孔から1.8mの水位差で注水する。radial流とlinear流で透水係数と間隙率を評価(表-2)。 パルストレーサー試験 図-3に示すように3観測孔から50~12.5ℓのトレーサー(BFI01:ウラニン, KFI06:ヨード, KFI11:アミノ酸)を注入し、さらに50~125ℓの地下水あるいは蒸留水を注入。水圧が定常状態になった後BFI02から500ℓ/minで9日間揚水し、トレーサー濃度を測定、破過曲線から透水係数、割れ目幅、間隙率を評価(表-3)。 トレーサー希釈試験 2mもしくは20m区間でトレーサーをパルス状に注入した後、トレーサーの希釈を測定して地下水流入量を求め、地下水流入量を求める(図-4参照)。</p>
地形・地質	[地形] 比高差15n以下の中平坦地で、地表は氷堆積、ピートに覆われている。 [地質] 基盤岩は葉片状の花崗閃緑岩から構成され、一部にペグマタイト変塩基性岩、アプライトを伴う。			
地質構造	リニアメントは南北系、北西-南東系、北東-南西系の3つの卓越方向があり、また、これとは別にゾーン2など傾斜半角の小さい地表に現われない破碎帯も存在する。			
水理学環境的	岩盤の水理特性は深度Zに対し、以下のように評価される。 岩盤の透水係数 $k(b)=4.90 \times 10^{-6} \times C \times Z^{-1.30}$ (m/s) 破碎帯の透水係数 $k(s)=5.06 \times 10^{-3} \times C \times Z^{-2.15}$ (m/s) C : 仮定した流动条件によって決まる比例定数			
地球化環学的	地下水は塩分濃度が300mg/l以上の塩水が多数存在し、Yoldia海及びLitorina海の海水が岩との相互作用で変化した海水起源のものである。			

## 施設名 フィンション(3)

	コード名 SUTRA	
解析手法	コードの内容 2次元有限要素法コード。	軸対象モデル 水位低下量については、遠距離の結果は実測値とほぼ一致するが、近距離の結果は実測値よりかなり大きい。しかし、水位低下曲線の全体的な形は、どの結果も合致していない（図-7）。  平面モデル ・図-6の定数と境界条件の時が実測値と解析値が最もよく一致し、その時の水位センターを図-8に、水位低下曲線を図-9に示した。 ・ゾーン2の異方性についても解析したが、BFI02近傍の圧力挙動はよく対応しているが、領域全体では干渉試験結果を説明しきれない。このことはゾーン2における全体的な異方性と言うよりも、BFI02孔周辺の局所的な不均質性を示すものと解釈できる。
解析モデル	軸対象モデル 図-5に示すようなモデルで干渉試験をモデル化。  平面モデル 図-6に示すようにゾーン2を水平層として干渉試験をモデル化。	解析結果
解析条件	軸対象モデル 不明  平面モデル 図-6に示すように定水頭境界と不透水境界。	検証手法 水位低下について、その量と時間的変化について実測値と比較、検証。
物理物性	軸対象モデル 図-5参照。  平面モデル 図-6参照。なお、設定に当っては試行錯誤で求め決定した。	

施設名 フィンション (3)

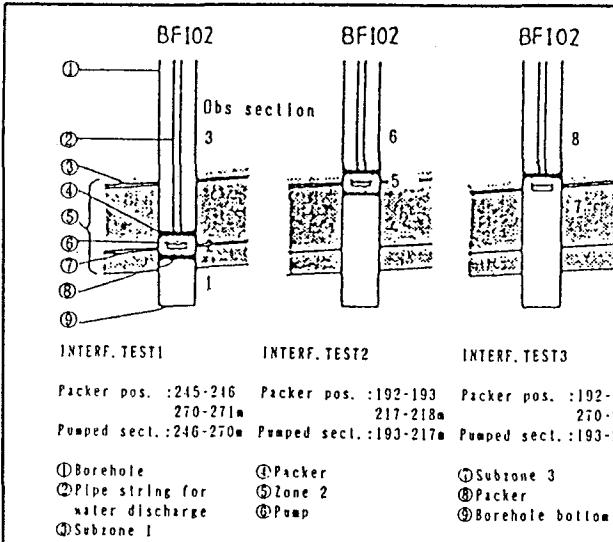


図-1 干渉試験のパッカー位置

表-2 純粹トレーサー試験結果

Flow regime	$K_e$ (m/s)	$\theta_k$
Radial flow	1.5E-1	6.7E-3
Linear flow	3.4E-2	2.9E-2

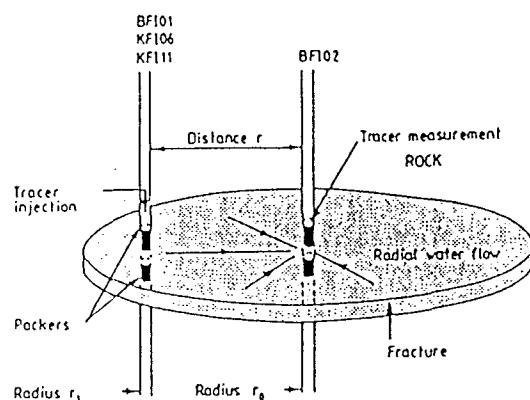


表-1 干渉試験の条件

Test no	Phase	Active section (m)	Discharge rate (l/min)	Duration (days)
1	Drawdown	246-270	500	3.7
1	Recovery	246-270	-	5.2
2	Drawdown	193-217	500	7.8
2	Recovery	193-217	-	10.2
3A	Drawdown	193-289	500-700	0.9
3A	Recovery	193-289	-	0.8
3B	Drawdown	193-289	700	4.0
3B	Recovery	193-289	-	8.2

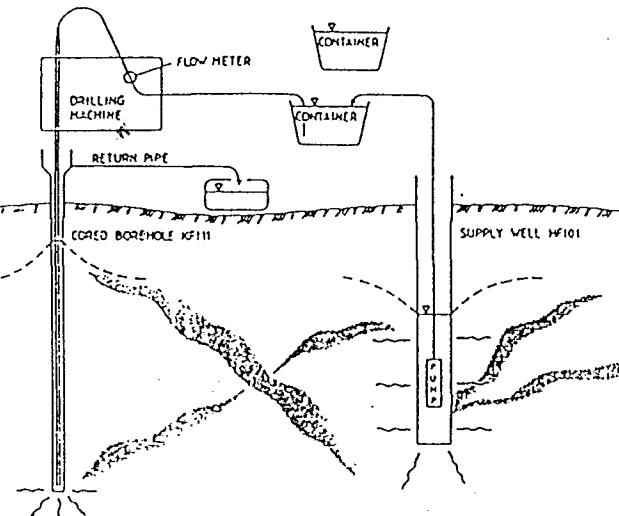


図-2 純粹トレーサー試験

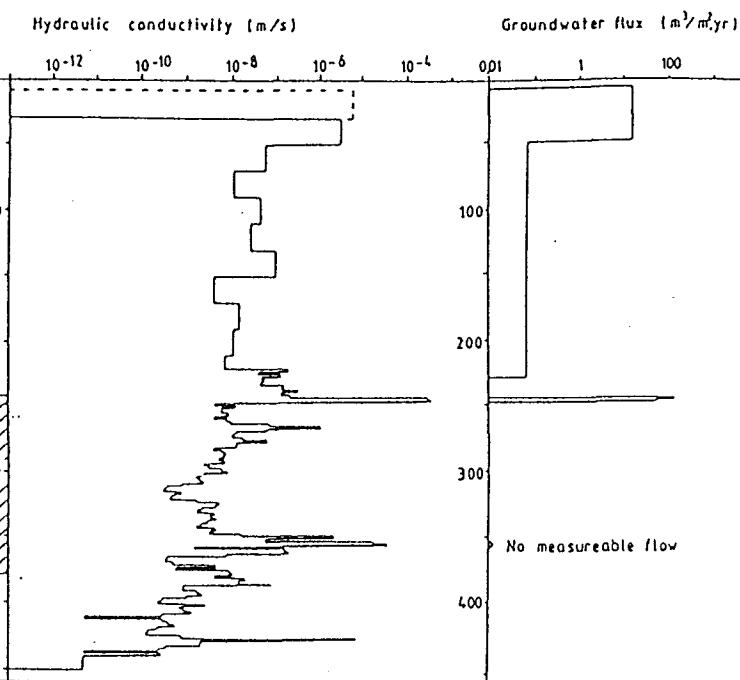


図-4 希釈試験結果と透水性の対比

図-3 パルス・トレーサー試験概念図

表-3 パルス・トレーサー試験結果

Route	BF101-BF102	KF106-BF102	KF111-BF102
Distance (m)	168	189	155
$K_e r$ (m/s)	1.6 E-1	6.1 E-1	9.7 E-1
$e$ (m)	5.1 E-4	9.9 E-4	1.2 E-3
$\theta_k$ (1m section)*	9.4 E-3	1.8 E-3	1.0 E-3
$\theta_k$ (1m section)**	8.8 E-3	2.3 E-3	1.4 E-3
$a$ (m)	2.4	3.9	1.3
$Pe$ ( )	70	49	118
Recovery (%)	68	81	70

\* =  $K$  in Eqn. (3) determined as mean value from Eqn (10)  
\*\* =  $K$  in Eqn (3) determined from hydraulic interference test 2  
 $e$ :割れ目幅  $a$ :透水分散  $Pe$ :ペクレル数

回収率は揚水後188時間後の値

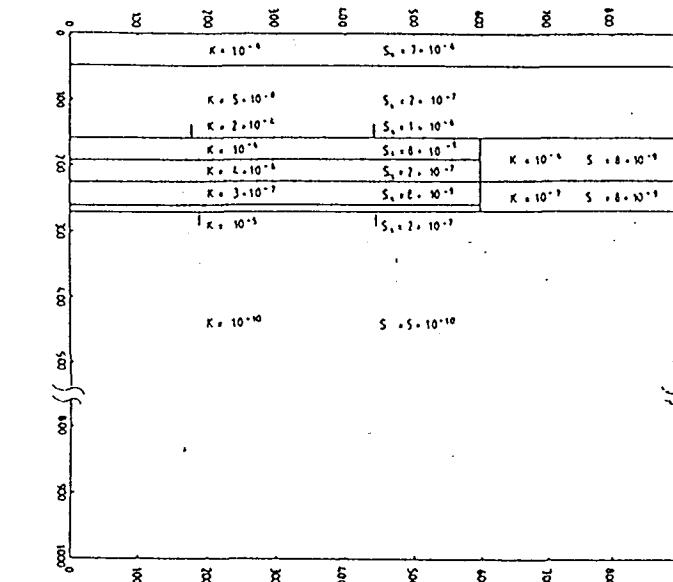


図-5 干渉試験の解析条件と諸定数

施設名 フィンション (3)

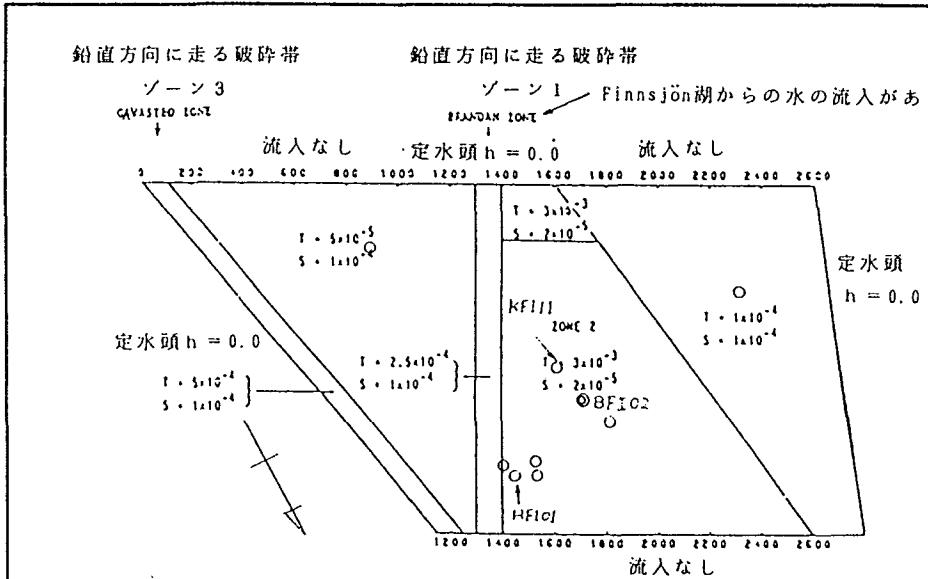


図-6 平面2次元モデルと諸定数

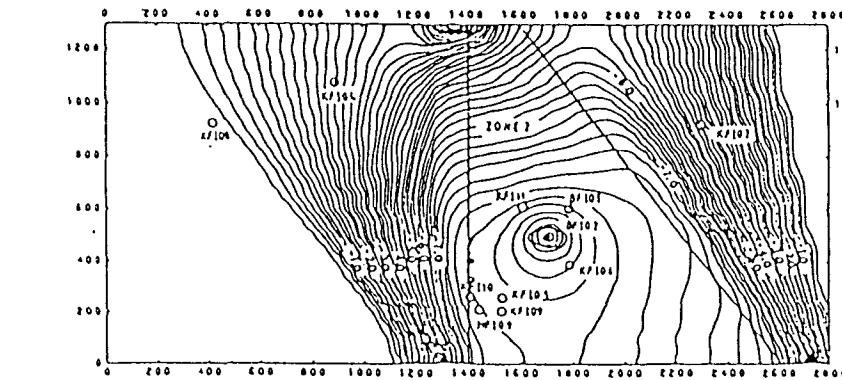
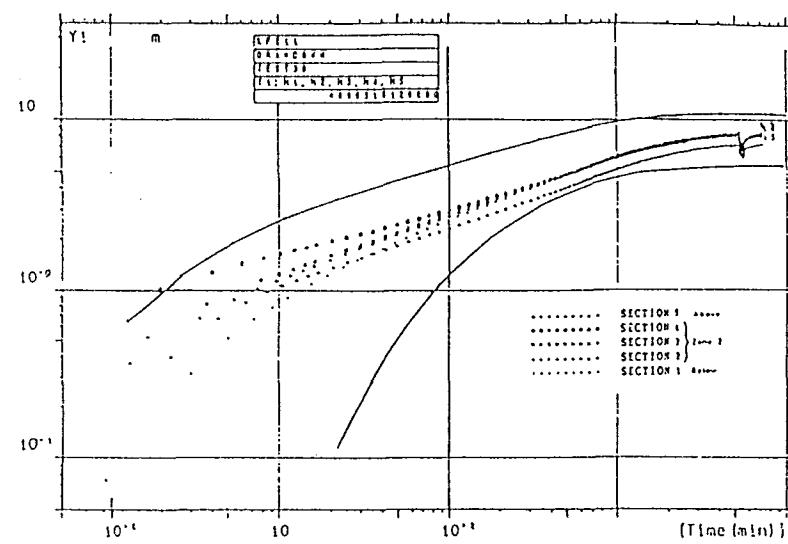
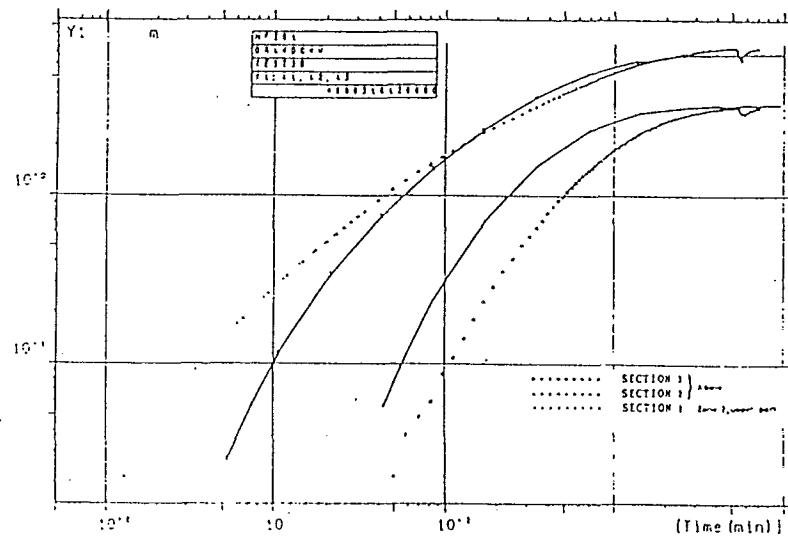


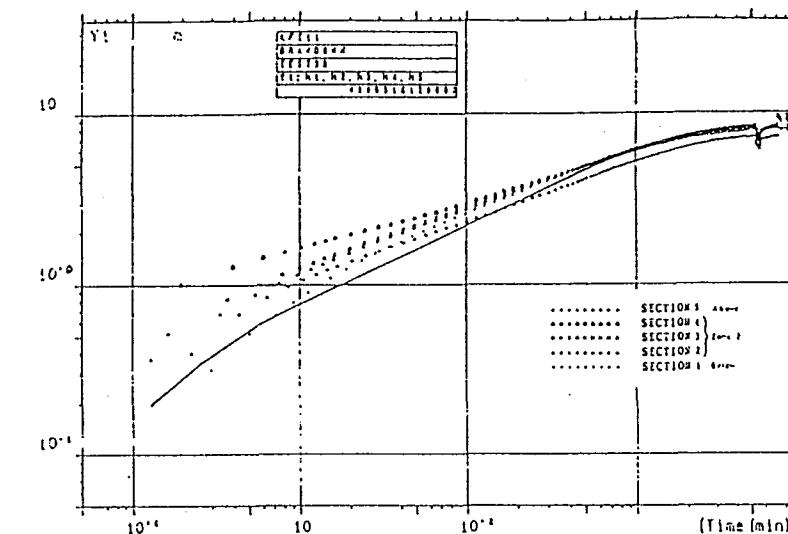
図-8 水位コンター図  
定常状態近く、コンター間隔 0.2m



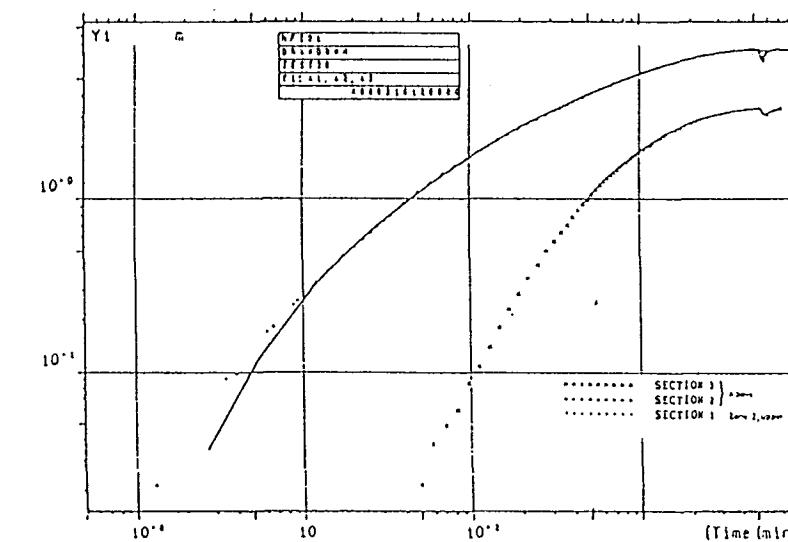
a ) 近距離 (KF1)



b) 遠距離 (HF10)



a ) 近距離 (KF111)



b) 遠距離 (HF101)

図-7 実測値と解析結果（実線）

図-9 修正モデルによる解析結果（実線）と実測値

施設名	HRL (1)	土被り	0~500 m	調査研究の目的	解析コードやモデル化アプローチの開発、将来予定されている試験領域のモデル化のための境界条件と試験研究の計画への反映を目的として、数百mスケールを対象とした長期揚水試験とトレーサー試験結果を評価するためのモデル化を行う。具体的には、個々の亀裂をモデル化する不連続体手法と、岩盤の不均質性を統計的に再現した連続体手法の2つの手法を用いて解析を行ったうちの1つである。
地下構造物の概要	高レベル放射性廃棄物地層処分の研究施設として、エスピ島に建設される。オスカーシャム原子力発電所から海底下を通過するアクセス坑道（斜坑）とエスピ島下の六角形螺旋坑道で地下500mまで達する。この他に試験研究のための派生的な坑道及び換気、給電、避難用の立坑が掘削される。	○ 長期透水試験 揚水孔 (KAS06, 孔長602m) - 地表から60° の斜孔、孔径φ164mm (0~100m) 揚水量135ℓ/分、試験孔で水圧測定 孔径φ 56mm (100m以深) ○ トレーサー試験 ○ 希釈試験 → 注入4区間の決定 ○ トレーサー試験 • トレーサー ( $I_n^{114}$ , $I^{131}$ , $R_e^{186}$ , ウラニン) • トレーサー注入方法 - Intermittent decaying pulse injection ① 4,000mℓのトレーサー溶液を循環システム中の定常流中に注入 ② トレーサー試験区間の地下水の流入量を計算により算出 ③ 注入時の濃度を一定に保つよう、次のトレーサーの量を決定 ④ ①~③の手順で3日、あるいは6日ごとの一定時間間隔で断続的にトレーサー4,000mℓを注入 • 揚水孔でのトレーサーの採取 8つのサンプリング位置 ← スピナー検層で抽出された破碎帶部	調査項目と調査手法		
地形・地質	エスピ島の地質は、古い順から緑色岩、中性変火山岩類、細～中粒花崗岩類、アヴロ花崗岩、細粒花崗岩、アブライト及びペグマタイト、輝緑岩及びマイロナイトからなる。	長期揚水試験 試験孔KAS06で適正な揚水量を決定するため3種類の揚水量で試験を実施 試験孔KAS06において揚水を開始 (揚水量: 135ℓ/分) (揚水はトレーサー試験期間を含め約3ヶ月間継続) (揚水期間中、エスピ島に存在する試験孔で地下水圧をモニタリング) 希釈試験 トレーサー試験 トレーサーを4区間から注入 試験孔KAS06において地下水を採取しトレーサーの濃度をモニタリング 試験孔KAS06における揚水を終了	備考	エスピ島 KAS12 KAS08 KAS02 KAS13 KAS05 KAS07 KAS06 0 200m (○揚水孔 ●トレーサー注入孔)	図-2 試験孔の位置図
地質構造	エスピ島に広く分布するスマランド花崗岩は低角の衝上断層でアヴロ花崗岩と接し、これを覆っている。アヴロ花崗岩はアヴロ島に広く分布し、北方に延びている。スマランド花崗岩は2度の褶曲運動を受けており、いずれも横臥しており、褶曲軸は北にプランジしている。線構造はこれら褶曲の軸面と平行である。				
水理学環境的	花崗岩の透水性は極めて低く、透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-13}$ m/sの範囲にある。 水みちとなる可能性のある破碎帶は、①北東～南西走向（高角度傾斜）、②東～西～東北東～西南西走向（高角度傾斜）、③北北西～南南東走向（高角度傾斜）、④東～西走向（低角度傾斜）の4タイプに区分でき、①タイプの破碎帶の透水量係数は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ m <sup>3</sup> /s、②～④は $10^{-5}$ m <sup>3</sup> /sオーダーを示す。			図-1 長期揚水試験とトレーサー試験の概要	
地球化環学的	塩分濃度が高く、海水と淡水の混合が考えられる。				図-3 トレーサー試験概念図 (Rhén et al., 1992より引用)

解 析 手 法	コード名 FracMan/MAFIC	破碎帶のモデル化の結果を図-6, 7に、通常岩盤部のモデル化の結果を図-9に示す。 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 揚水試験時の各パッcker区間での水位低下 図-10</li> <li>○ 揚水試験時の揚水孔内の各破碎帶からの流入量分布 図-11</li> <li>○ トレーサー試験の破過曲線 図-12~13</li> </ul> <p>トレーサー試験は、6回のうち明瞭な破過が観測されたKAS08-1, KAS12-2と、トレーサーが回収されなかったKAS07-4の3回について解析を行った。</p> <p>トレーサー試験時には縦方向、横方向の分散係数をそれぞれ4m, 1mとし、物質移行上の開口幅を透水量係数との関係式を仮定して設定した。</p>
	コードの内容  FracMan/MAFICは個々の亀裂を多角形で代表し、亀裂を決定論的かつ/又は統計的に発生させ、これらの亀裂が形成する亀裂ネットワーク構造をモデル化することにより、岩盤内の不均質な流れを表現するプログラムである。 FracMan/MAFICは次の5つのコードにより構成されている(図-4)。 ① 原位置亀裂データの統計的解析コード(Frac Sys) ② 亀裂発生コード(Frac Works) ③ 有限要素作成コード(MeshMonster) ④ メッシュ編集コード(EdMesh) ⑤ 行列演算コード(MAFIC)	
解析モデル	図-5に示すようにエスピ島主要部を含む一辺1kmの立方体領域をモデル化領域とする。  破碎帶 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ポーリング孔周辺の小断層は、スピナー検層のanomalyデータを用いてモデル化</li> <li>○ ポーリング孔から離れた破碎帶は、30m要素に分割した不均質性を有する単一の面としてモデル化(図-6, 7)</li> <li>○ ポーリング孔を破碎帶が通過する部分については、半径3.5mの要素を除去し、小断層と破碎帶を6枚の長方形接続亀裂で接続(図-8)</li> </ul> 通常岩盤部 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 地表露頭で測定された亀裂情報を基に、統計的に亀裂を発生(図-9)。</li> </ul> <p>方向 - Bootstrap法(Fisher係数15)  亀裂半径 - Frac Sizeモジュールで解析  透水量係数、透水性亀裂の頻度 - OXFILETモジュールで解析</p>	解析結果
	外部境界条件 上部境界 - 滞留量年間30mm(一定) 側方境界 - 静水圧境界 下部境界 - 海面下1,000mにおいて不透水境界 内側境界条件 揚水孔 - 揚水孔内の節点の合計流量が揚水量と一致するよう設定 注水孔 - 揚水試験時 - パッcker内の節点グループの流量合計がゼロに設定 トレーサー試験時 - 注入区間の節点グループの流量合計が一定になるよう設定	
解析条件	破碎帶 小断層 - スピナーanomalyから得られる透水量係数 破碎帶 - 地球統計的手法に基づき透水量係数の不均質性を与えるため、透水量係数の平均値、標準偏差、影響範囲が必要 接続亀裂 - 透水量係数 $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 通常岩盤部 亀裂半径 - 平均13.7m、標準偏差12.7m(対数正規分布) 透水性亀裂の頻度 - 0.033本/m 透水量係数 - 平均 $8.8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 、標準偏差 $7.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	検証手法  <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 揚水試験は解析と実測値がよく一致した。</li> <li>○ トレーサー試験で、 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ KAS08-1は解析により破過曲線をよく再現できた。</li> <li>○ KAS12-2は破過時刻とピークの致着時間はよく再現できているが、実測の方がより広がった破過曲線になり、解析の透水性の不均質性、あるいは分散係数が小さかったことを示す。</li> <li>○ 水理的開口幅と物質移行上の開口幅の比較から、三乗則に基づく開口幅で求めた流速より、実際のトレーサーの移行速度は1オーダー遅いことが分かる。</li> </ul> </li> <li>○ KAS07-4では、実際にはトレーサーが破過しなかったが、解析では破過した原因について <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 概念モデルでない破碎帶が存在した。</li> <li>・ 破碎帶の交差部において、モデルは溶質の完全混合を仮定しているが、実際は異なっていた。</li> </ul> </li> </ul>

施設名 H R L (1)

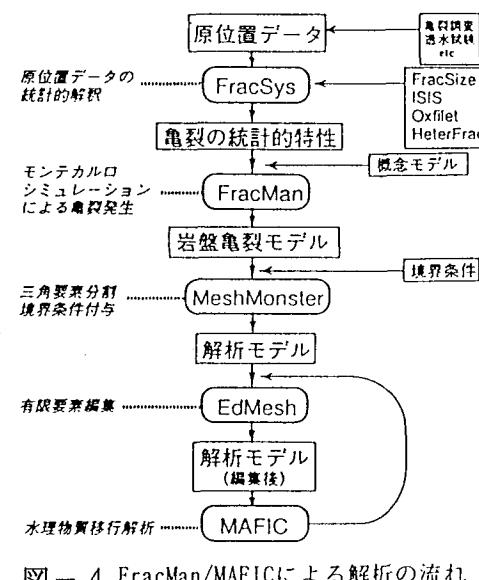


図-4 FracMan/MAFICによる解析の流れ

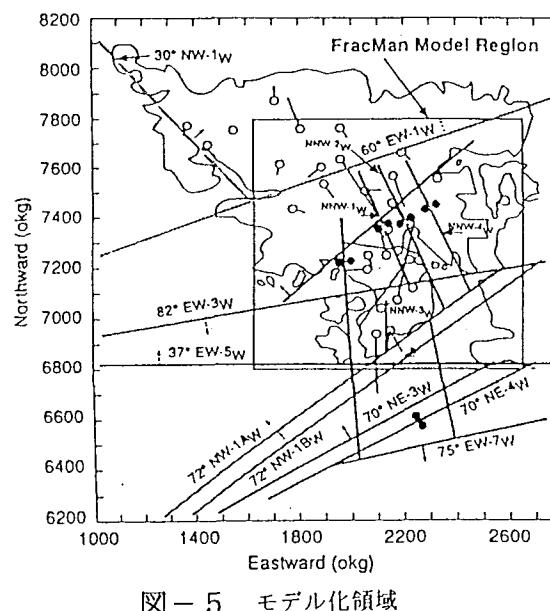


図-5 モデル化領域

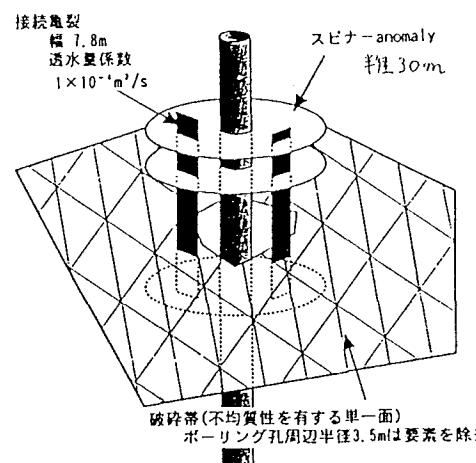


図-8 ボーリング孔周辺のモデル化

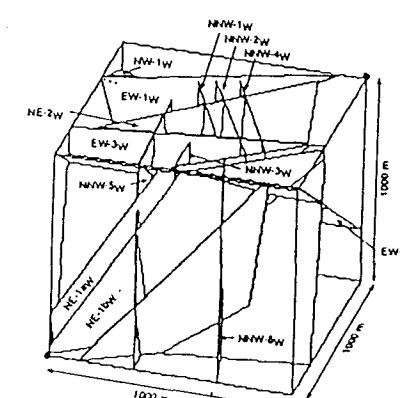


図-6 破碎帯のモデル化

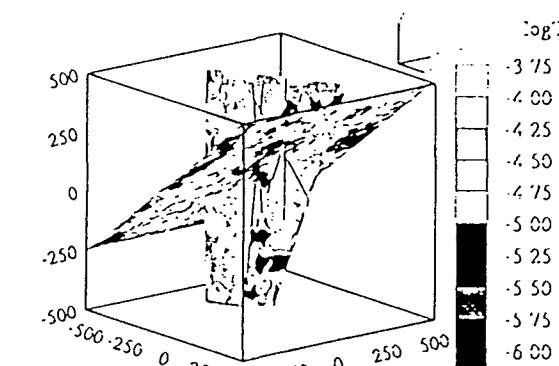


図-7 地球統計学的手法による破碎帯の不均質性のモデル化  
EW-5: 緩傾斜  
NNW-2: 急傾斜

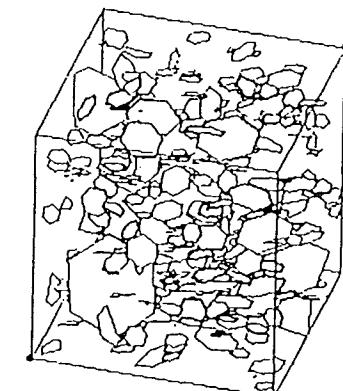


図-9 通常岩盤部中の亀裂のモデル化

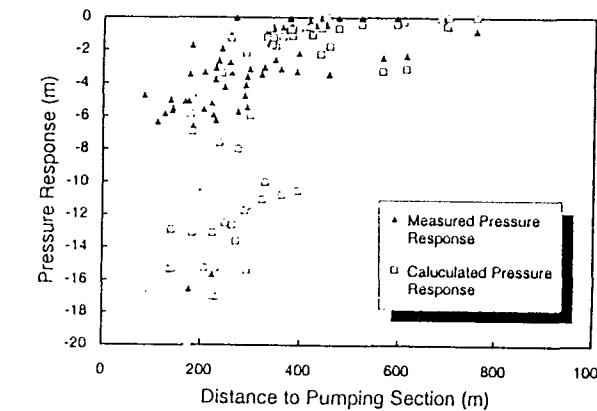


図-10 LPT-2 試験時の水位低下

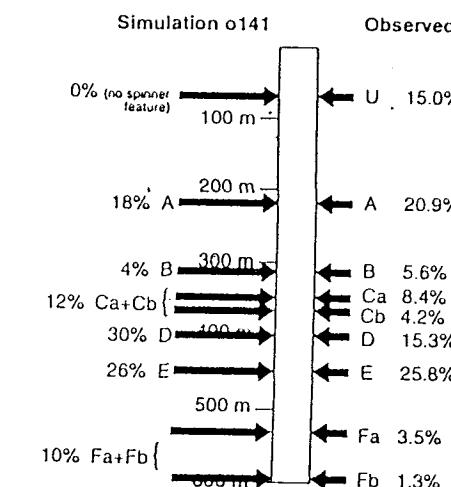


図-11 揚水孔における流入量の分布

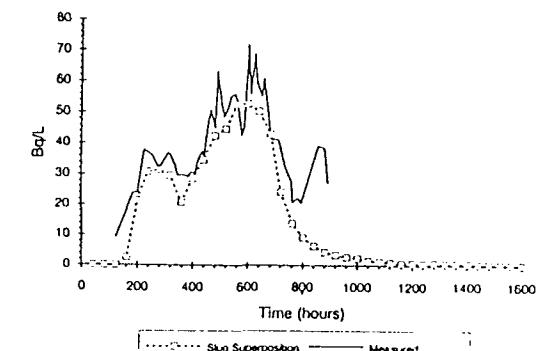


図-12 KAS08-1から投入したRheniumの破過曲線  
(回収率で規格化)

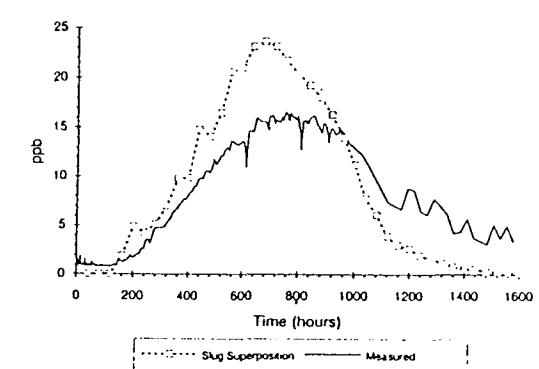


図-13 KAS12-2から投入したウラニンの破過曲線  
(回収率で規格化)

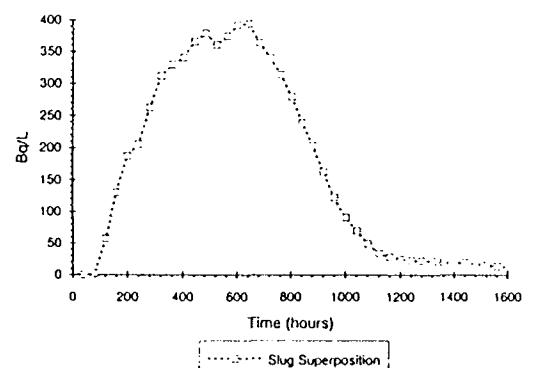


図-14 KAS07-4 から投入したヨウ素の破過曲線

施設名	HRL (2)	土被り	0~500 m	調査研究の目的	解析コードやモデル化アプローチの開発、将来予定されている試験領域のモデル化のための境界条件と試験研究の計画への反映を目的として、数百mスケールを対象とした長期揚水試験とトレーサー試験結果を評価するためのモデル化を行う。具体的には、個々の亀裂をモデル化する不連続体手法と、岩盤の不均質性を統計的に再現した連続体手法の2つの手法を用いて解析を行ったうちの1つである。
地下構造物の概要	高レベル放射性廃棄物地層処分の研究施設として、エスピ島に建設される。オスカーシャム原子力発電所から海底下を通過するアクセス坑道（斜坑）とエスピ島下の六角形螺旋坑道で地下500mまで達する。この他に試験研究のための派生的な坑道及び換気、給電、避難用の立坑が掘削される。	調査項目と調査手法	○ 長期透水試験 揚水孔 (KAS06, 孔長602m) - 地表から60° の斜孔、孔径Φ164mm (0~100m) 揚水量135ℓ/分、試験孔で水圧測定 孔径Φ 56mm (100m以深) ○ トレーサー試験 ○ 希釈試験 → 注入4区間の決定 ○ トレーサー試験 • トレーサー ( $In^{114}$ , $I^{131}$ , $Re^{186}$ , ウラニン) • トレーサー注入方法 - Intermittent decaying pulse injection ① 4,000mℓのトレーサー溶液を循環システム中の定常流中に注入 ② トレーサー試験区間の地下水の流入量を計算により算出 ③ 注入時の濃度を一定に保つよう、次のトレーサーの量を決定 ④ ①~③の手順で3日、あるいは6日ごとの一定時間間隔で断続的にトレーサー4,000mℓを注入 • 揚水孔でのトレーサーの採取 8つのサンプリング位置 ← スピナー検層で抽出された破碎帶部		
地形・地質	エスピ島の地質は、古い順から緑色岩、中性変火山岩類、細～中粒花崗岩類、アヴロ花崗岩、細粒花崗岩、アプライト及びペグマタイト、輝緑岩及びマイロナイトからなる。	備考	長期揚水試験 揚水孔KAS06で過正な揚水量を決定するため3種類の揚水量で試験を実施 揚水孔KAS06において揚水を開始 (揚水量: 135ℓ/分) (揚水はトレーサー試験期間を含め、約3ヶ月間継続) (揚水期間中、エスピ島に存在する揚水孔で地下水圧をモニタリング) 希釈試験 トレーサー試験 トレーサーを4区間から注入 揚水孔KAS06において地下水を採取しトレーサーの濃度をモニタリング 揚水孔KAS06における揚水を終了	試験孔の位置図 エスピ島 KAS12 KAS08 KAS02 KAS05 KAS13 KAS07 KAS06 0 200m ○ 揚水孔 ● トレーサー注入孔	
地質構造	エスピ島に広く分布するスマランド花崗岩は低角の衝上断層でアヴロ花崗岩と接し、これを覆っている。アヴロ花崗岩はアヴロ島に広く分布し、北方に延びている。スマランド花崗岩は2度の褶曲運動を受けており、いずれも横臥しており、褶曲軸は北にプランジしている。線構造はこれら褶曲の軸面と平行である。	備考	トレーーサー注入孔 サンプリング 揚水孔 ポンプ バッカー 揚水ポンプ ドリル		
水理学環境的境	花崗岩の透水性は極めて低く、透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-13} \text{ m/s}$ の範囲にある。水みちとなる可能性のある破碎帶は、①北東～南西走向（高角度傾斜）、②東～西～東北東～西南西走向（高角度傾斜）、③北北西～南南東走向（高角度傾斜）、④東～西走向（低角度傾斜）の4タイプに区分でき、①タイプの破碎帶の透水量係数は $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 、②～④は $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ オーダーを示す。	備考	長期揚水試験とトレーサー試験の概要 図-1		
地球化環境的境	塩分濃度が高く、海水と淡水の混合が考えられる。	備考	トレーーサー試験概念図 (Rhien et al., 1992 より引用) 図-3		

図-1 長期揚水試験とトレーサ試験の概要

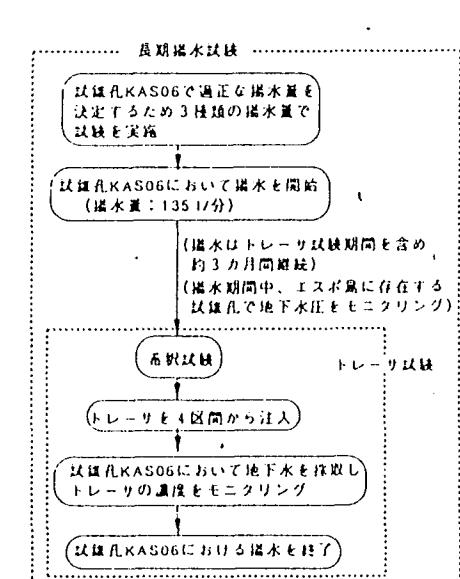


図-2 試錐孔の位置図

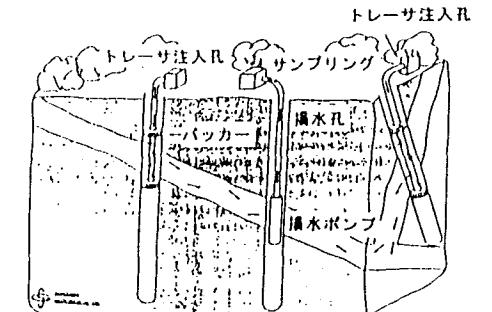


図-3 トレーサ試験概念図  
(Rhén et al., 1992 より引用)

解 析 手 法	コード名		解析結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 亀裂密度、亀裂長さは、対数正規分布が最も実測値に合っていた（表-1）。</li> <li>○ 透水係数テンソルのパラメータ <math>Q_{ij}</math> は30m付近で一定になっているので、REVは30mと決定した（図-6）。</li> <li>○ 不均一異方場においてまず浸透流解析を行い、これにより求められた流速場を用いてParticle tracking methodで物質輸送解析を行う。物質輸送に関する有効間隙率も、亀裂幅パラメータ <math>\alpha</math> により不均一モデルとなる。           <ul style="list-style-type: none"> <li>• 浸透流解析の結果得られた各観測孔での水位低下 図-7</li> <li>• トレーサー試験の破過曲線 図-8～10</li> </ul> </li> </ul>
	コードの内容	不均一性を考慮した連続体手法。 地盤統計学 (Geostatistics) の条件付きシミュレーション手法により不均一場を再現し、それぞれの場で求められた粒子移動経路を足し合わせることにより、力学的な分散を表現する。地盤統計学手法を使う時、REVの概念を用いるため、クラックテンソルの導入を行う。		
解析モデル		図-4に示す手順で亀裂モデルを作成し、解析を行う。 クラックテンソルの導入に必要な亀裂密度と亀裂長さ分布の推定には、確率密度分布を用いて亀裂セットごとに亀裂密度と平均亀裂長さと分散を求め、この情報をもとに再現した3次元亀裂分布が実測値に最もよく合う分布を用いる。 解析領域：900×510×750m 解析メッシュ：REVを30mに決定したため、一辺が30mの立方体を基本格子とする（図-5）。 断層帯EW1, EW3, NE2は2次元平面要素でモデル化。 断層周辺のメッシュは立方体ではなく種々の多面体となる。	検証手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 揚水試験による水位低下量は概ねよく再現できた。</li> <li>○ トレーサー試験についても、KAS08で注入した場合、実測値の2つめの山は再現できていないが、それ以外はよく再現できているといえる。</li> </ul>
	境界条件	全側面水位固定		
水理物理		REVを30mと決定したため、3mごとに単孔式透水試験から求められた透水係数をボアホールごとに30mごとに幾何平均を行う。これを用い、解析で用いる座標系で表された透水テンソルに変換し、亀裂幅パラメーター $\alpha_{ij}$ を求める。これをもとに、地盤統計学の条件付きシミュレーション手法により、要素すべてに異なる $\alpha$ を振り分ける。 断層帯の2次元平面要素には、原位置試験から求められた平均透水係数を用いる。	検証手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 揚水試験による水位低下量は概ねよく再現できた。</li> <li>○ トレーサー試験についても、KAS08で注入した場合、実測値の2つめの山は再現できていないが、それ以外はよく再現できているといえる。</li> </ul>
	物理属性			

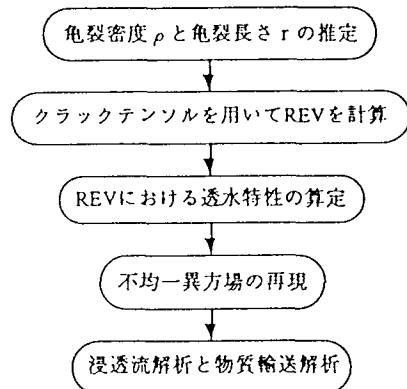


図-4 亀裂モデル作成の手順

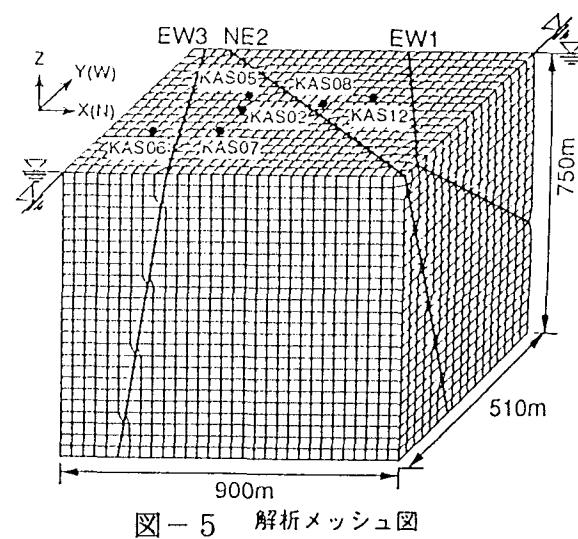


図-5 解析メッシュ図

表-1 実測値との比較結果

水平面を横切る亀裂特性	トレス長さの平均(m)	トレス長さの標準偏差	トレス亀裂の密度(本/m <sup>3</sup> )
対数正規分布	1.83	1.92	2.33
指数分布	1.51	1.42	4.65
ガンマ分布	3.41	3.05	9.11
実測値平均	1.41	3.77	2.64

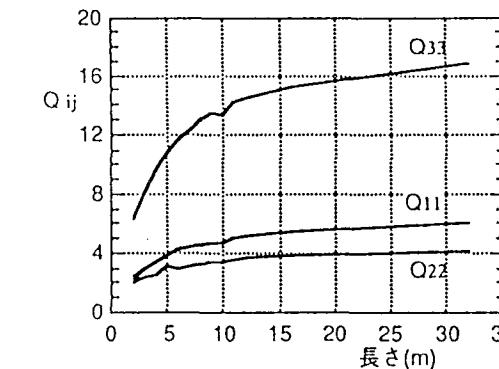


図-6 種々の大きさにおけるQ<sub>ij</sub>

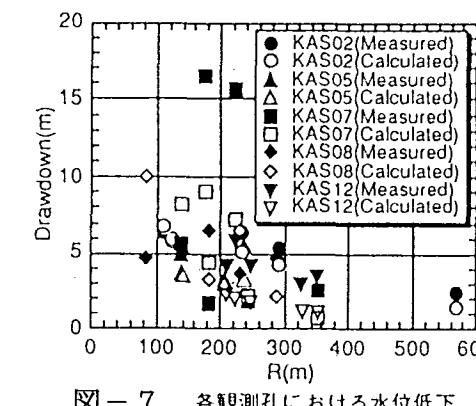


図-7 各観測孔における水位低下

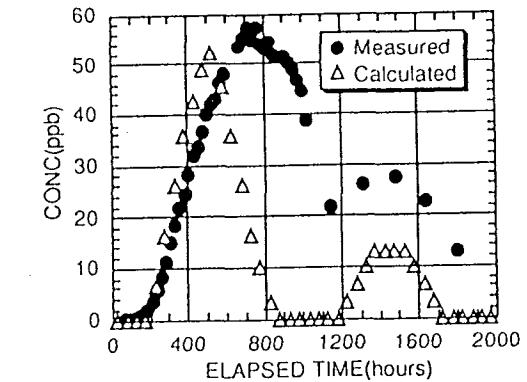


図-8 試錐孔KAS06における破過曲線  
(注入孔;KAS12,サンプル位置;Level 4 (390m))

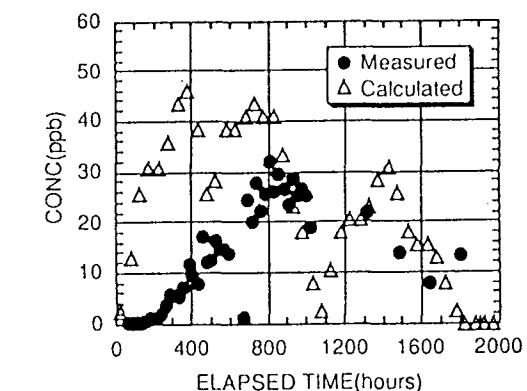


図-9 試錐孔KAS06における破過曲線  
(注入孔;KAS12,サンプル位置;Level 5 (360m))

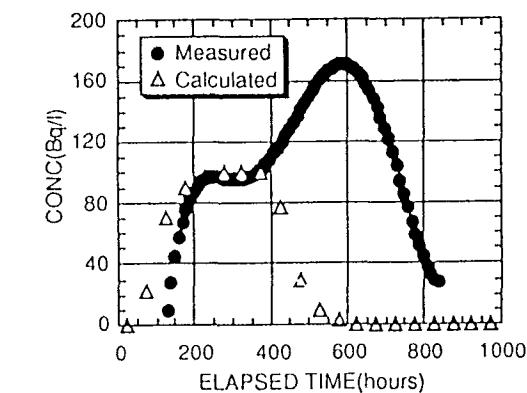


図-10 試錐孔KAS06における破過曲線  
(注入孔;KAS08,サンプル位置;Level 3 (430m))

施設名	グリムゼル テスト サイト (GTS)	土被り	450 m	調査研究の目的	AU坑内にある移行試験サイトに現われるMI-S1破碎帯に対し、水理調査で得た情報を再現し、ここで行われる予定のトレーサー試験を有効に設計する。
地下構造物の概要	中部スイスの北緯 $46^{\circ} 35'$ 東経 $8^{\circ} 19'$ グリムゼル峠の北側、標高1730mに位置する。GTS周辺はアルプスの急峻な山地で、その山腹を貫く既存の水力発電所業務用トンネルからTBMで掘削径3.5mの円形断面の実験用トンネル約1000mを掘削した。(図-1) 高レベル放射性廃棄物地層処分に向け、 ①機器及び測定技術の開発と手法の確立 ②スイスにおける処分コンセプトに係わる試験の実施 ③海外での成果をスイスの地質環境にどのように適用するのかの研究が行われている。	調査ボーリング $\phi 86\text{mm}$ 8孔 図-2, 3参照 水理調査 AU坑湧水量測定 調査ボーリングの湧水量及び湧水圧			
地形・地質	先カンブリアの基盤岩類と古生代のヴァリスカン造山運動に伴う貫入岩からなる。 基盤岩は花崗片麻岩／片岩類である。また貫入岩は、花崗岩あるいは花崗閃綠岩体を形成している。花崗岩体の形成はRb-Sr法年代測定によって2億8千万年前と推定されている。 花崗岩の冷却・固化・収縮により形成された裂か系や破碎帶に沿って花崗岩マグマ最終期のアプライトや更に後期の塩基性岩脈が形成されており、これと花崗岩の接触部は地下水活動に重要な役割をもっている。	備考			
地質構造					
水理学環的境	GTSの地下水は主として、地表の天水や湖水が、花崗岩岩帶の破碎帶や亀裂系を経路に流入しているものと考えられ、その流動経路となる裂か系や片理は高角度で、垂直方向の流れが顕著である。				
地球化環学的境	①地下水化学成分は、一般に季節変動や長期変化が少なく(<5%) 安定している。 ②地下水イオン成分は、一般に $50\text{mg/l}$ 以下の低イオンで、主成分はNa, Ca, F, Cl, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> 等からなる。 Fが高いのが特徴で、これは花崗岩破碎帶などに含まれる萤石を起源とするものであろう。 ③水質はアルカリ性でpH=9.6。 ④トリチウム値は低く、核実験後の高いトリチウム地下水を含まない30年以前の天水起源と推定される。				

## 施設名 グリムゼル

解析手法	コード名 P D E / PROTRAN	均質モデル 水圧分布はトンネル周辺に同心円状に分布するが、大きさについては表-1に示すように実測値より過大に評価している。各調査ボーリング孔を単独に開放した場合の湧水量は実測結果と僅かに異なるものもあるが、大きく違うものもある。 不均質モデル 解析結果は表-2に示すとおり均質モデルに比べ実測値との合致度が良くなっている。 湧水量は実測結果が定常状態に達していないNo.9孔を除いてほぼ再現している。 水圧については一部を除けば相対誤差 $[(P_{exp} - P_{mod}) / P_{exp}]$ が最大でも26%程度と実測値と解析値の差が小さくなっている。 トレーサー試験を想定した結果 i)ある孔で注水を行い、他の観測孔を開放する場合 検討ケースを表-3に示す。 注水孔に対して観測孔が低いポテンシャルにある場合、注水量の約75%が観測孔で回収され、残り25%は坑道方向に流れている。注水孔と観測孔のポテンシャル関係が逆になると回収率は低くなる。 ii)ある孔で注水を行い、他の観測孔で揚水する場合 検討ケースを表-4に示す。 (1), (2), (4)については予備トレーサー試験が実施されており、(1), (2)については予測どおり95%以上が観測孔で回収されたが、(4)については予測に反して70%程度が回収された。
	解析モデル  ニアーフィールドモデル 図-5に示すように、AU坑から100m程度の同心円内の領域を対象。 領域内はAU坑湧水量から求めた透水量係数を使用した均質モデルと、調査ボーリングの単一孔試験から得た透水量係数で各孔周辺の値を設定した不均質モデルを使用。	
解析条件	側方境界（図-4の①, ③）：両側にある湖によって静水圧境界 下方境界（図-4の②）：不透水境界 上方境界（図-4の④）：完全飽和状態 トンネル部（図-5の⑤～⑧）：大気圧状態	上記のとおり、調査ボーリングの湧水圧と湧水量について実測値と比較し、検証を行っている。
水理物性	均質モデル AU坑への湧水量 ( $0.5\ell/\text{min}$ ) から透水量係数 $8.6 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ を設定。 不均質モデル 調査ボーリングの単一孔試験で得られた透水量係数から図-6に示すようにThiessen多角形手法で各孔周辺の値を設定。さらに外側の範囲は均質モデルで使用した値を使用。	検証手法

施設名 グリムゼル・テスト・サイト

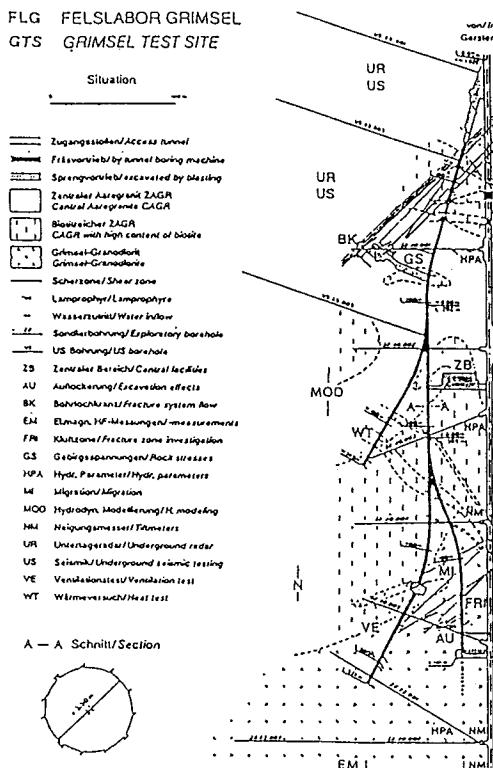


図-1 A detailed map of the Grimsel Test Site. The migration site MI is located at AU 96 m.

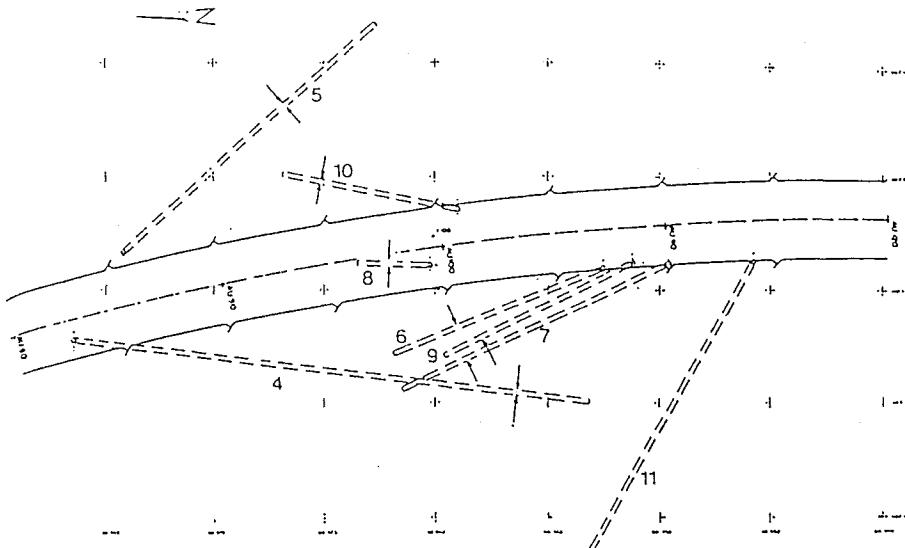


図-2 Projection of the different boreholes drilled into the shear zone MI-S1 ( $144^{\circ} 27', 68^{\circ} 46'$ ) onto a horizontal plane. The intersections of each borehole with the shear zone are indicated by arrows.

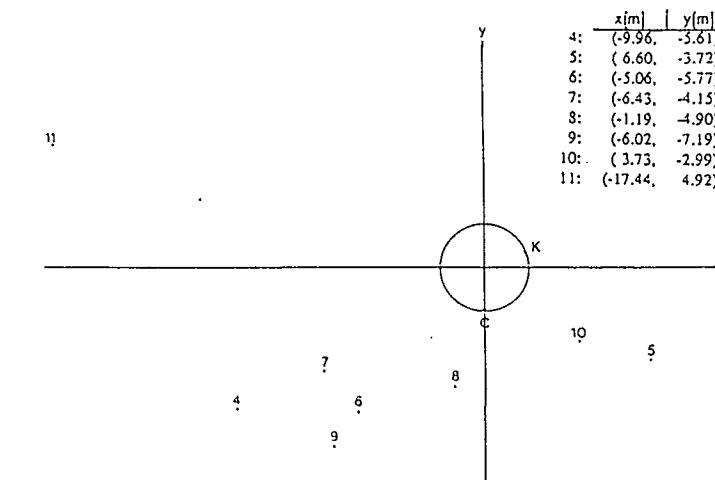


図-3 Location of the intersections of the different boreholes with the MI-S1 fracture plane (x, y-plane). The "Kalone" K and the pump sump C are shown as well.

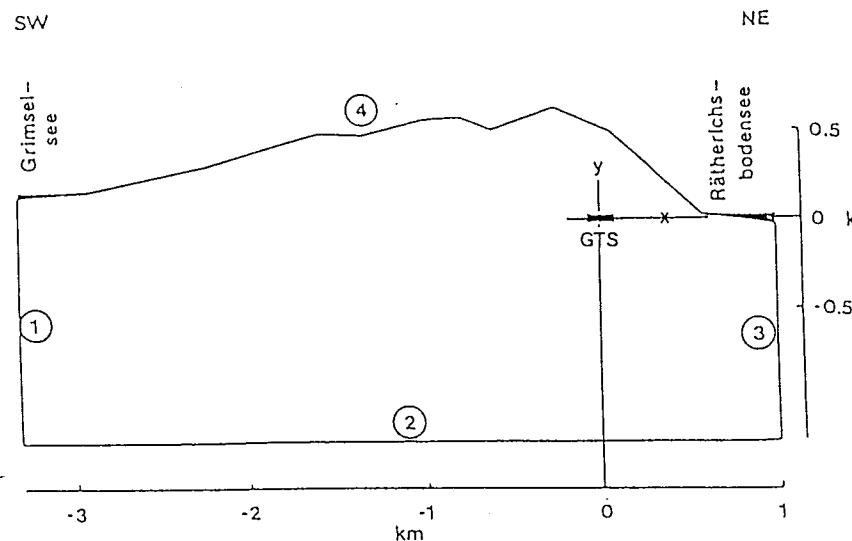


図-4 Far-field model region. Circled number indicate boundaries (eq. 3)

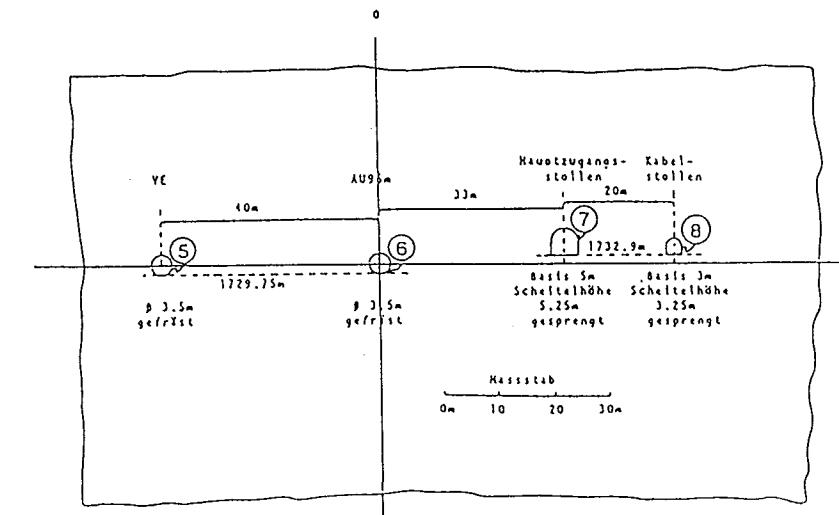


図-5 Near-field model region.

Region	Transmissivity [ $m^2/s$ ]
4	$1.5 \times 10^{-6}$
5	$5.9 \times 10^{-4}$
6	$1.75 \times 10^{-4}$
7	$1 \times 10^{-3}$
8	$8.6 \times 10^{-7}$
9	$2.4 \times 10^{-6}$
10	$5.9 \times 10^{-4}$
11	$1 \times 10^{-3}$
C	$8.6 \times 10^{-7}$
K	$8.6 \times 10^{-7}$
A	$5.9 \times 10^{-4}$
elsewhere	$8.6 \times 10^{-4}$

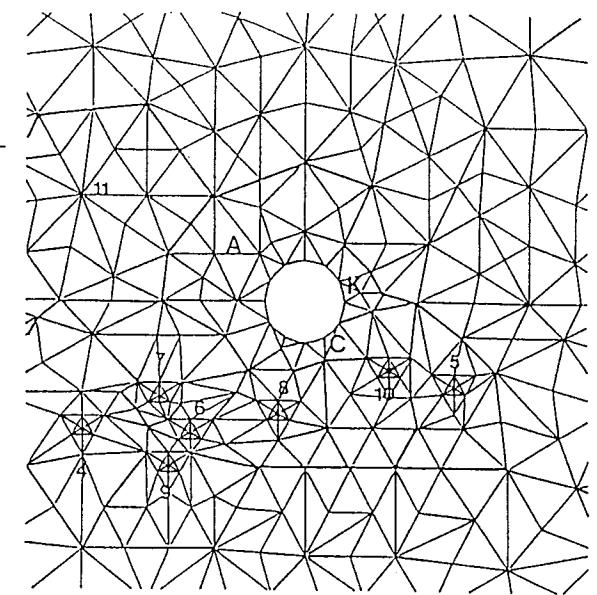


図-6 The transmissivity field  $T(X,Y)$  near the drift as used for the heterogeneous model input. The boundaries of the Thiessen polygon blocks have been adjusted to the existing grid, also shown here.

表-1 Comparison of experimental data with results from the homogeneous model calculation. The discharge rates have been determined by Darcy's law:  
 $Q = b T |\nabla \Phi|$ ,  $T = 8.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . To calculate the natural gradient discharge rates the quantity "b" is given by the diameter of the well ( $b=0.086 \text{ m}$ ); in case of free outflow, "b" is given by the circumference of the borehole ( $b = \pi \cdot 0.086 \text{ m}$ ). Note that  $Q_{exp}$  are short time discharge rates and  $Q_{mod}$  steady state rates.  
Because borehole 11 is not yielding any water and is far from the region of main interest, no efforts were made to model free outflow for this well.  
The notation [a,b] ( $b > a$ ) indicates the range of experimentally observed discharge rates.

well	hydrostatic pressure (all wells closed)		natural gradient discharge rates (all wells closed)		free outflow discharge rates observation well open, rest closed	
	$p_{exp}$ [bar]	$p_{mod}$ [bar]	$Q_{exp}$ [l/min]	$Q_{mod}$ [l/min]	$Q_{exp}$ [l/min]	$Q_{mod}$ [l/min]
4	1.53	3.85	$[1.2] \times 10^{-4}$	$7.35 \times 10^{-4}$	$[0.1, 0.3]$	0.16
5	1.38	2.61	not measured	$1.07 \times 10^{-3}$	$[0.01, 0.02]$	0.11
6	1.46	3.02	$9 \times 10^{-4}$	$1.35 \times 10^{-3}$	$[0.1, 0.3]$	0.13
7	0.32	3.02	not measured	$1.18 \times 10^{-3}$	< 0.001	0.13
8	0.80	2.90	$[4.8] \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$[0.1, 0.3]$	0.10
9	1.50	3.42	$[5.10] \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-3}$	$[1, 3]$	0.15
10	0.81	1.34	not measured	$2.14 \times 10^{-3}$	$[0.01, 0.02]$	0.08
11	0.40	4.42	not measured	$4.93 \times 10^{-4}$	< 0.001	not modelled

表-4 注水試験（観測孔から揚水した場合）の検討ケース

arrangement	injection rate $Q_i(k)$ in well k [l/min]	withdrawal rate $Q_w(j)$ in well j [l/min]
(1): 4 → 6	$Q_i(4) = 0.077$	$Q_w(6) = 0.219$
(2): 4 → 9	$Q_i(4) = 0.259$	$Q_w(9) = 0.618$
(3): 9 → 6	$Q_i(9) = 0.500$	$Q_w(6) = 1.0$
(4): 6 → 4	$Q_i(6) = 0.075$	$Q_w(4) = 0.205$

表-2 Comparison of experimental data with results from the heterogeneous model calculation. The discharge rates were calculated in the same way as mentioned in the caption of Table 3. 2. 3

well	hydrostatic pressure (all wells closed)		natural gradient discharge rates (all wells closed)		free outflow discharge rates observation well open, rest closed	
	$p_{exp}$ [bar]	$p_{mod}$ [bar]	$Q_{exp}$ [l/min]	$Q_{mod}$ [l/min]	$Q_{exp}$ [l/min]	$Q_{mod}$ [l/min]
4	1.53	1.34	$[1.2] \times 10^{-4}$	$2.23 \times 10^{-3}$	$[0.1, 0.3]$	0.294
5	1.38	1.63	not measured	$8.29 \times 10^{-4}$	$[0.01, 0.02]$	0.054
6	1.46	1.12	$9 \times 10^{-4}$	$7.71 \times 10^{-3}$	$[0.1, 0.3]$	0.320
7	0.32	1.16	not measured	$8.48 \times 10^{-4}$	< 0.001	0.001
8	0.80	0.74	$[4.8] \times 10^{-4}$	$8.27 \times 10^{-3}$	$[0.1, 0.3]$	0.249
9	1.50	1.20	$[5.10] \times 10^{-4}$	$5.41 \times 10^{-3}$	$[1, 3]$	0.340
10	0.81	0.65	not measured	$1.14 \times 10^{-3}$	$[0.01, 0.02]$	0.025
11	0.40	3.24	not measured	$6.67 \times 10^{-3}$	< 0.001	not modelled

表-3 Changes in free outflow discharge rates due to injection at a different location. In the last column  $\Delta Q$  is defined as  $\Delta Q = Q(0) - Q(0')$  with injection -  $Q(0)$  | without injection where o refers to the open well o.

	injection rate $Q_i(k)$ at well k	free outflow discharge rate $Q(o)$ in open well o ( $\Delta Q/Q_o$ ) · 100 [%]
well 6 open; injection in 4	$Q_i(4) = 0.04 \text{ l/min}$	$Q(6) = 0.35 \text{ l/min}$ 75%
well 6 open; injection in 9	$Q_i(9) = 0.01 \text{ l/min}$	$Q(6) = 0.39 \text{ l/min}$ 70%
For comparison: well 6 open; no injection	-	$Q(6) = 0.32 \text{ l/min}$ (see Table 4)
well 9 open; injection in 4	$Q_i(4) = 0.26 \text{ l/min}$	$Q(9) = 0.33 \text{ l/min}$ 73%
well 9 open; injection in 4	$Q_i(4) = 0.04 \text{ l/min}$	$Q(9) = 0.37 \text{ l/min}$ 75%
well 9 open; injection in 6	$Q_i(6) = 0.1 \text{ l/min}$	$Q(9) = 0.40 \text{ l/min}$ 60%
well 9 open; injection in 6	$Q_i(6) = 0.5 \text{ l/min}$	$Q(6) = 0.65 \text{ l/min}$ 62%
For comparison well 9 open; no injection	-	$Q(9) = 0.34 \text{ l/min}$ (see Table 4)

施設名	Oberbauenサイト (1)	土被り	800~1,000 (?) m	調査研究の目的	Swiss Project Gewähr 1985における性能評価の一環として、Oberbauen処分場予定サイトにおける広域地下水流动モデル解析を実施。 解析方法として、① marl層上層部の石灰岩中の地下水位分布のモデリング ② marl中の地下水流动の解析 の2段階に分けて実施した解析結果のうちの一つ。
地下構造物の概要	Oberbauenサイトはスイスの中央にあるVierwaldstättersee湖の最南端にあるUrnersee湖の西岸に位置し、中レベル放射性廃棄物処分場の建設が予定されている（図-1）。				
地形・地質	処分場付近の地質はmarlで、その上下にmarlに近い特性を持つ石灰岩が分布。			調査項目と調査手法	
地質構造	処分場の南側には第三紀の頁岩及び石灰岩からなるAxen nappeが存在しており、北側のmarlはDrusberg nappeのOberbauen褶曲を形成している。			備考	
水理学環的境	処分場付近のmarl層の上部にいくつかの高透水性ゾーンが存在している。このため、地表から浸透した水が側方に移動し、母岩の浸透量を軽減しているものと推測される。				
地球化環的境					

## 施設名 Oberbauensait (1)

解析手法	コード名		解析結果を図-3、図-4、表-2に示す。 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 地下水位は400~700mに存在。</li> <li>○ 地下水位は母岩層 (Valanginian marl) より上の層の透水係数が大きい場合低く、逆に透水係数が小さい場合に高くなる。特に地下水位に影響を与えるのは最上部のSchrattenkalk帶水層の透水係数である。</li> <li>○ 母岩層への上部からの浸透量は、Schrattenkalk帶水層の透水係数にはほぼ比例する。</li> </ul>
	コードの内容	Galarkin法を用いた有限要素法による2次元定常飽和-不飽和浸透流解析	
	解析モデル	<p>地層は全体的にわずかながら西側に傾斜しているため、一部は西側に流出しているものと考えられるが、ここではすべての地下水が東側のUrnersee湖に流れ込むものと仮定。</p> <p>母岩層 (Valanginian marl) の上部には3つの帶水層と2つの難帶水層が存在する。地層はすべて水平とモデル化(図-2)。</p> <p>解析メッシュ 8節点四角形要素 272 節点数 889</p>	
	境界条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 西側側方境界、下部境界 - 不透水境界</li> <li>○ Schrattenkalk帶水層上部境界 - 降雨量420mm/yr (年間降雨量の30%)</li> <li>○ 東側斜面部-浸出面境界 (浸出面は2層の高透水性を有する薄層要素でモデル化)</li> <li>○ 東側湖面下-静水圧分布境界</li> </ul>	
水理物性		<p>表-1に10個の解析ケースに用いた透水係数の値を示す。</p> <p>透水係数は過去の同地層の透水係数に関する経験、及び母岩中に掘られたトンネルでの計測データに基づき設定。</p> <p>なお、石灰岩層の不飽和部においては、亀裂が発達しているためサクション圧が小さく、透水性の飽和度依存性はないものと仮定。</p>	解析結果
			検証手法

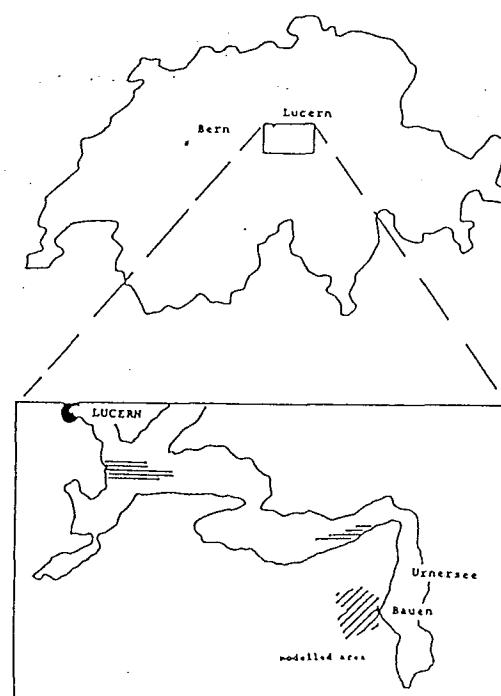


図-1 Location of the modeled area at Oberbauen stock in central Switzerland.

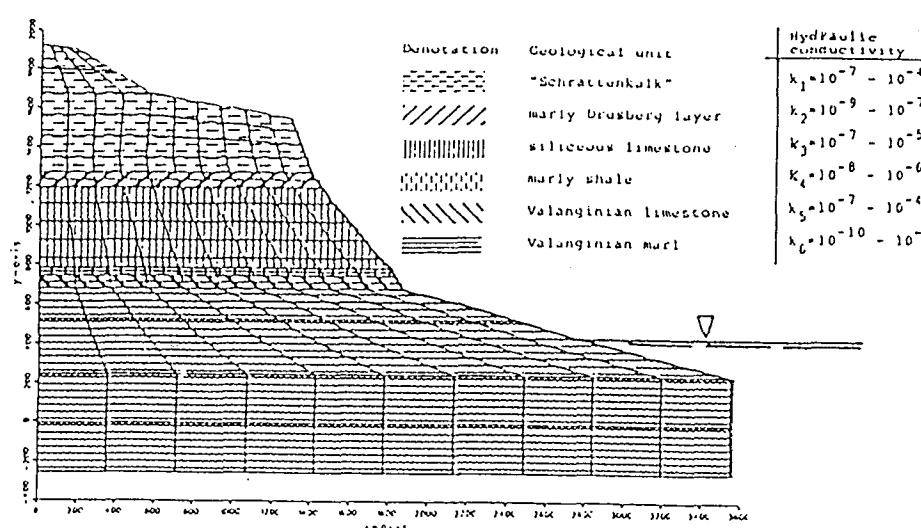


図-2 The modeled domain showing the finite element mesh and the material property areas.

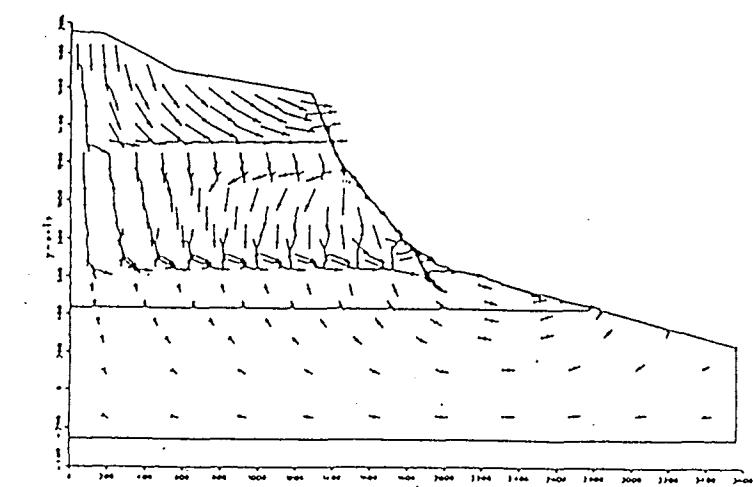


図-3 Calculated groundwater table and flow field for case 3.

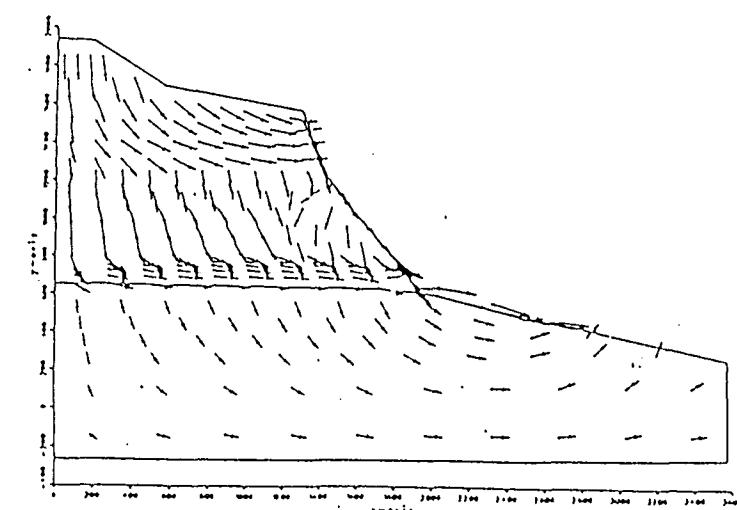


図-4 Calculated groundwater table and flow field for case 10.

表-1 Variation of the hydraulic conductivities for the different layers and runs. For explanation of K1-K6 see 図-2

X m/s Case no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_1$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$
$K_2$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-9}$
$K_3$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$
$K_4$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$
$K_5$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
$K_6$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-8}$
$x_{sep}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-2}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$

表-2 Calculated infiltration rates into the aquitards in the sedimentary series and into the host rock.

Infiltration (mm/yr) to unit

Case no.	"Schattenkalk"	Marly Drus-	Marly shale	Valanginian
	berglayer			Marl
1.	420	382	296	242
2.		235	138	134
3.		7	13	0.02
4.		24	9	0.003
5.		65	7	0.003
6.		1	3	0.002
7.		1	3	0.003
8.		81	245	0.2
9.		75	88	0.3
10.	420	79	141	23

施設名	Oberbauenサイト (2)	土被り	800~1,000 (?) m	調査研究の目的	Swiss Project Gewähr 1985における性能評価の一環として、Oberbauen処分場予定サイトにおける広域地下水流動モデル解析を実施。 解析方法として、① marl層上層部の石灰岩中の地下水位分布のモデリング ② marl中の地下水流动の解析の2段階に分けて実施した解析結果のうちの一つ。
地下構造物の概要	Oberbauenサイトはスイスの中央にあるVierwaldstättersee湖の最南端にあるUrnersee湖の西岸に位置し、中レベル放射性廃棄物処分場の建設が予定されている(図-1)。				
地形・地質	処分場付近の地質はmarlで、その上下にmarlに近い特性を持つ石灰岩が分布。	備考	調査項目と調査手法	調査項目と調査手法	調査項目と調査手法
地質構造	処分場の南側には第三紀の頁岩及び石灰岩からなるAxen nappeが存在しており、北側のmarlはDrusberg nappeのOberbauen褶曲を形成している。				
水理学環的境	処分場付近のmarl層の上部にいくつかの高透水性ゾーンが存在している。このため、地表から浸透した水が側方に移動し、母岩の浸透量を軽減しているものと推測される。				
地球化環学的境					

## 施設名 Oberbauenサイト (2)

解 析 手 法	コード名		地下水圧分布(図-3, 4) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 処分場からの地下水流動方向 marl岩体下部の高透水層部(石灰岩他)における水頭は、周辺の地層内の地下水位に大きく影響を受ける。このためケース1~4に比べ、ケース5~7では低い水頭値が得られた。この部分の水頭はmarl岩体内の水頭と比べ小さいので、処分場からの地下水の流動方向は下向きになっている。ただし、南部の台地のため北に向かう成分もある。</li> <li>○ 処分場上部の地層中の地下水位の処分場水頭に与える影響 ケース3と5については、地下水位を700mに上げたため処分場内の水頭も大きくなっている。処分場内の水頭とmarl岩体下部の水頭差は、ケース5では上昇したのに対し、ケース3ではほとんど変化していない。</li> <li>○ 第三紀頁岩の影響 marl層下部にmarl層と等しい透水係数を有する頁岩の存在を仮定したケース6では、この部分で北向きの流動成分が生じている。</li> </ul>
	コードの内容	Galarkin法を用いた有限要素法による3次元定常飽和浸透流解析	
解析モデル	母岩層の広がり、透水係数、境界条件などをえた7ケースについて解析を実施(表-1)。 図-2に示す領域でモデル化する。母岩中には処分場、アクセストンネル、その換気トンネルが存在。 母岩のmarl岩体は、処分場の下方、標高300mまでモデル化。アクセストンネルの標高は500mで、周囲に厚さ11mのゆるみ域をもつ22×22mの矩形断面でモデル化。なお、処分場は高さ12mの薄い平板でモデル化。 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析メッシュ ケース1, 2 要素1,584(12層), 節点7,775 ケース3, 4 アクセストンネル要素を省く。要素1,569, 節点7,775 ケース5~7 周辺部の地下水位をモデル化するため、モデルの北側、西側において、標高460m以上の要素を省く。要素1,458, 節点7,279</li> </ul>	解析結果  処分場内の地下水流動量 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 標高450mレベルにおける処分場を通過する地下水流動量は処分場部分の透水性が大きいほど増加するが、透水係数の違いほどには変化しない。これは透水係数の増加に伴い、動水勾配が低下することによる。</li> <li>○ 地下水流動量に与える境界条件の影響は、今回の解析では少ない。</li> </ul> 処分場からの地下水流動経路及び滞留時間 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 処分場からの地下水流動経路は、ほとんどの場合、真下に向かったのちに、東西いずれかの境界に向って浸出する。処分場下部における地層内の流動方向は、境界条件に大きく左右される。</li> <li>○ 処分場下部に低透水性の頁岩を仮定することにより、地下水流動経路はより深部まで到達するが、滞留時間にはそれほど大きく影響を与えない。</li> <li>○ どの地下水流動経路もアクセストンネル内に到達しない。</li> <li>○ 処分場より下部のmarl層の厚さは実際より深い所まで存在するため、地下水滞留時間は今回の解析結果の約3倍になると予想される。</li> </ul>	
解析条件	最上面 大気圧境界 側 方 東側: Urnersee湖の水面標高433mを基準とした静水圧境界 北側: 不透水境界 ケース3~5ではmarl層北部の地下水位を標高700mに設定。 ケース5~7では標高460m以上の石灰岩要素を省く。 西側: 不透水境界 ケース5~7では標高460m以上の石灰岩要素を省く。 南側: 不透水境界 アクセストンネル ケース1, 2では $10^{-2}$ m/sの高透水ゾーンでモデル化。 ケース3~7ではトンネル部の要素を除き大気圧境界条件を与える。		
物理物性	各ケースに、以下の部分について表-1に示す透水係数を与える。 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ marl岩体及びアクセストンネルの埋戻し部</li> <li>○ アクセストンネル、換気トンネル</li> <li>○ 処分場及びトンネルのゆるみ</li> <li>○ 周辺の高透水ゾーン</li> <li>○ 南部の第三紀頁岩</li> </ul> <p>marl岩体の透水係数は、換気トンネルの空気に含まれる湿度から逆算して求められた<math>10^{-10}</math>m/sを用いる。アクセストンネルの透水係数は、ケース1, 2についてのみ<math>10^{-2}</math>m/sを用いる。</p>	検証手法	

施設名 Oberbauen (2)

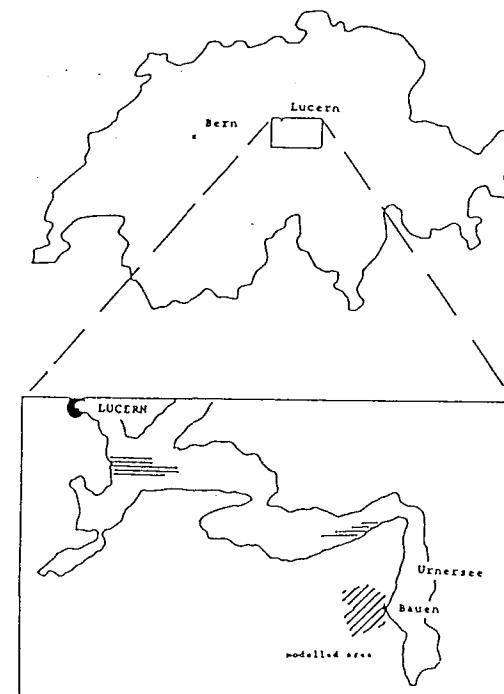


図-1 Location of the modeled area at Oberbauen stock in central Switzerland.

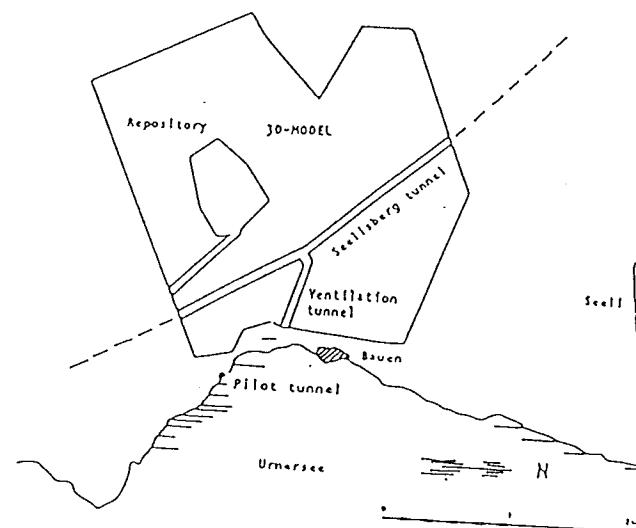


図-2 Plan view of the modeled area at Oberbauen.

表-1 Boundary condition versions and parameter variations.

	run 1	run 2	run 3	run 4	run 5	run 6	run 7
<hr/>							
Hydraulic conductivity [m/s]							
marl and access tunnel	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-10}$
decompressed zones	-	$10^{-7}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$
Drusbergkalk	$10^{-3}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$
Tertiary shale	-	-	-	-	$10^{-10}$	$10^{-10}$	-
Seelisberg tunnel	$10^{-2}$	$10^{-2}$	-	-	-	-	-
<hr/>							
Boundary conditions							
elevation of the water table, (m.s.l.)							
marl	x*	x	700	x	700	x	x
surrounding limestone layers	x	x	700	x	160	160	160
* - the groundwater table coincides with the topography of the marl/limestone surface.							
1) the inner surface of the Seelisberg tunnel is assigned atmospheric pressure.							
2) -the northern and western elements at the boundary above 160 m.s.l. are omitted							
-the hydraulic head assigned to the western marl surface can be somewhat lower in this run compared to runs 1-6, because of differences in the mesh topography, Fig. 5.c.							
-the elements at the southern boundary above 350 m.s.l. are assigned a conductivity of $10^{-8}$ m/s.							

- 1) the inner surface of the Seelisberg tunnel is assigned atmospheric pressure.
- 2) -the northern and western elements at the boundary above 160 m.s.l. are omitted
- the hydraulic head assigned to the western marl surface can be somewhat lower in this run compared to runs 1-6, because of differences in the mesh topography, Fig. 5.c.
- the elements at the southern boundary above 350 m.s.l. are assigned a conductivity of  $10^{-8}$  m/s.

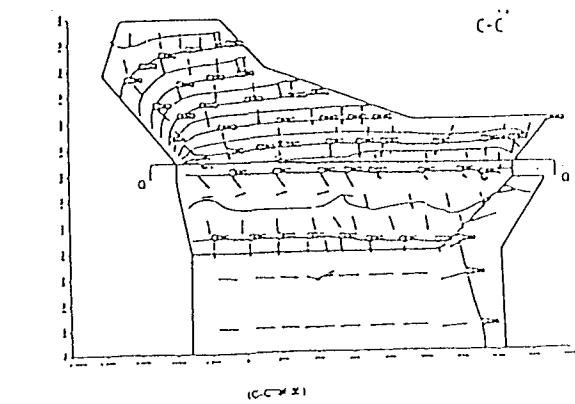
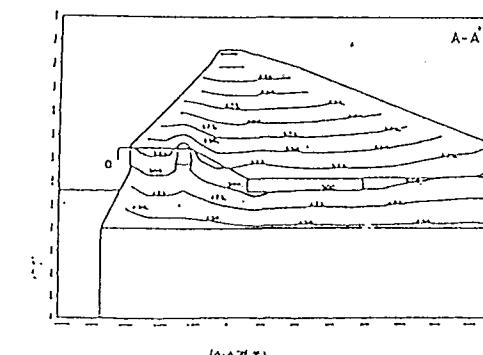
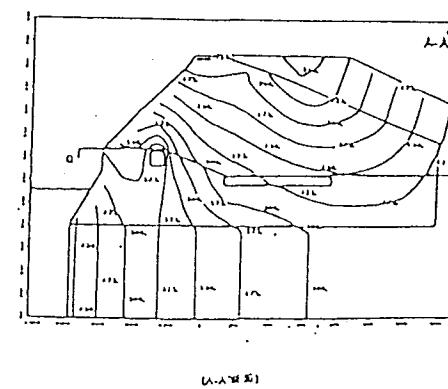
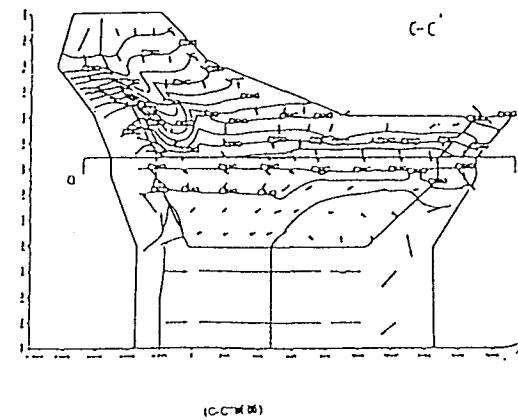
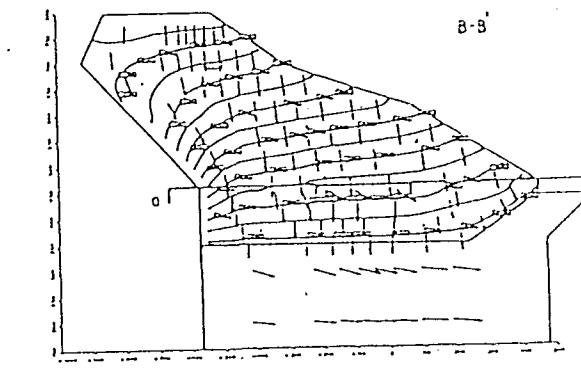
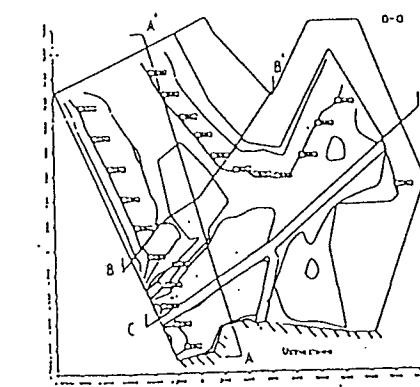
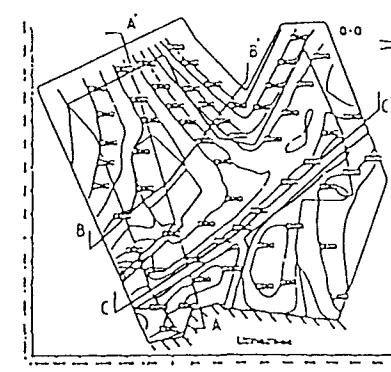
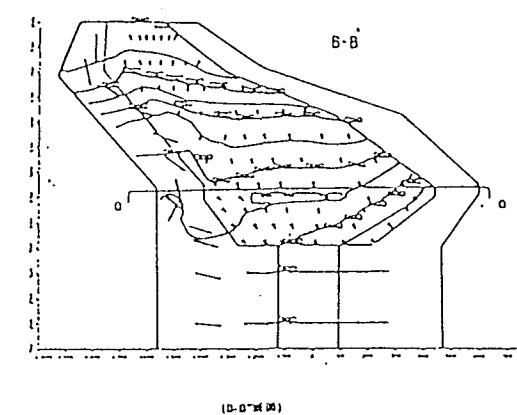


図-3 Isopotentials from run 4.

図-4 Isopotentials from run 7.

施設名	Project Gewähr	土被り m	北スイス地方の広域地下水流动を評価する。
地下構造物の概要	高レベル放射性廃棄物の地層処分の実現に向けて、図-1に示すようにスイス北部とフランス、ドイツの一部を対象に広域の地下水流动を検討したもので、地下構造物は存在しない。		調査研究の目的
地形・地質	アルプス結晶質基盤がアルプス山体から供給された堆積物により被覆されている。結晶質基盤は対象地域の南部 (Aar Massive) と北部 (Black Forest) に露頭している。		調査項目と調査手法
地質構造	図-2に示すように、南からalpine地域, molasse basin, folded Jura, tabular Juara, ライン地溝といった非常に異なった地質ユニットが分布している。		備考
水理学環的境	上部地質ユニットは、地下水流动モデルにおいて、以下のように設定した。 帶水層 : helvetic nappes, 上部Malm limestone, 上部Muschekalk, 上部結晶質岩 (500mまで, それ以深は低透水性岩体とみなす。) 不透水層 : 下部Malm, dogger, Lias, Keuper limestone, 下部Muschekalk		
地球化環学境的			

解析手法	コード名		解析結果	図-6～8参照。 ○ 結晶質岩体において、大深度に至る広域的な地下水流动システムが存在する可能性が示された。 ○ Local Model地域は、広域的にみると流出域であることがわかった。 ○ ライン川から数km離れた結晶質岩体中においても上向きの導水勾配が存在することが示唆された。また、これは、N A G R Aが行った大深度ボーリング内においても観測された。 ○ 間隙水圧の実測値と解析値の差は、最もよいモデルの場合、10m～60mの範囲にあった。 ○ 本解析結果を実測された間隙水圧値や降雨量と比較することにより、モデルに用いるパラメータの存在範囲を絞りこむことができた。
	コードの内容	“nested model”を用いた三次元有限要素法 この手法は、三次元要素の中に一次元・二次元要素を埋め込むことにより、断層や連続性の高い空隙をモデル化する方法である。いわゆるdiscrete fracture modelとequivalent continuos modelを融合したモデルと考えてよい。		
解析条件	解析モデル	Regional Model：スイス北部とフランス、西ドイツの一部にまたがる23,000km <sup>2</sup> の地域（図-1）。不透水層や厚い帶水層は、三次元要素でモデル化した（図-3）。薄い帶水層や断層は、二次元要素でモデル化した（図-4）。Regional Modelの総節点数は14,768で、要素数は3,635（3D）、1,738（2D）、258（1D）である。 Local Model：スイス北部のライン川を北縁とする約900km <sup>2</sup> の地域（図-1）。図-5にモデル図を示す。ただし、深度は両モデルとも-8kmまでとした。解析領域の形状は、地層境界、水理境界（主な谷）を考慮して決定した。	検証手法	
	境界条件	○ 下部境界は不透水境界とする。 ○ 側方境界は不透水境界（谷部で、一部水頭固定境界）とする。ただし、Local Modelの側方境界は、Regional Modelの解析結果を用いる。 ○ 地表部では、河川はすべて水頭固定境界、その他は降雨量または一定水頭を与える。		
水理物性		結晶質岩だけについてみても、測定された透水係数は10 <sup>-11</sup> ～10 <sup>-6</sup> m/sの広い範囲に及ぶ。また、透水係数データの全くない地域もある。そこで、平均、外挿により、モデルの物性値を設定した。實際には、本モデルをsensitivity analysisのために用いた。	検証手法	

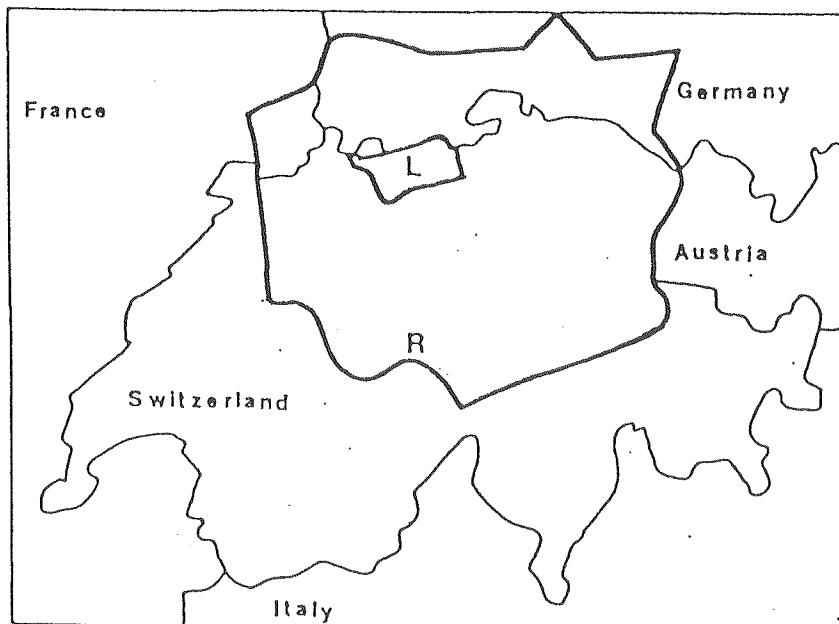


図-1 regional model と local modelの位置

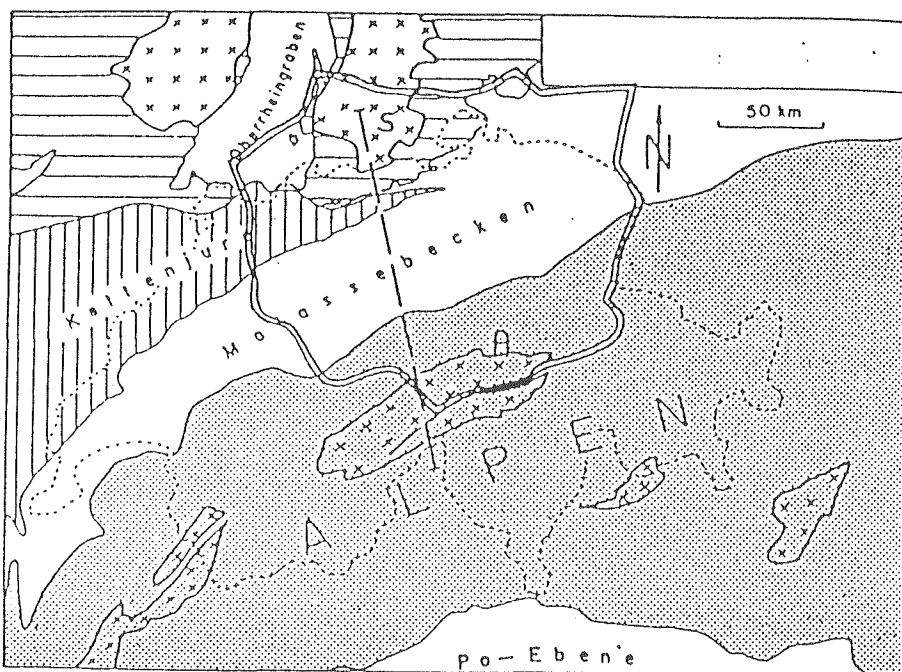


Figure 3. Regional model between Aar Massive (A) and Schwarzwald (S).

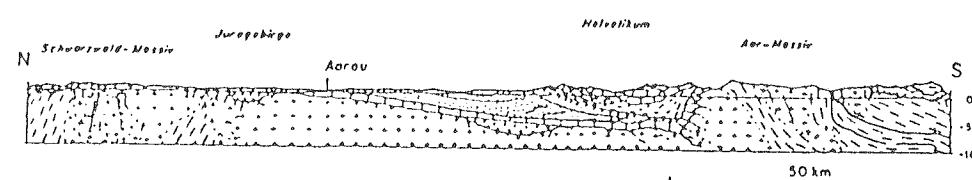


図-2 対象地域の地質分布

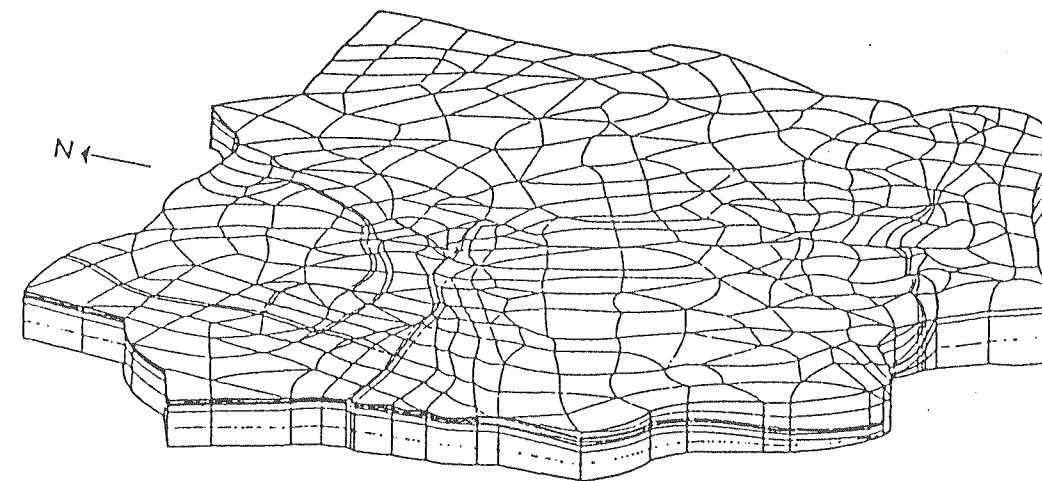


図-3 regional modelの有限要素

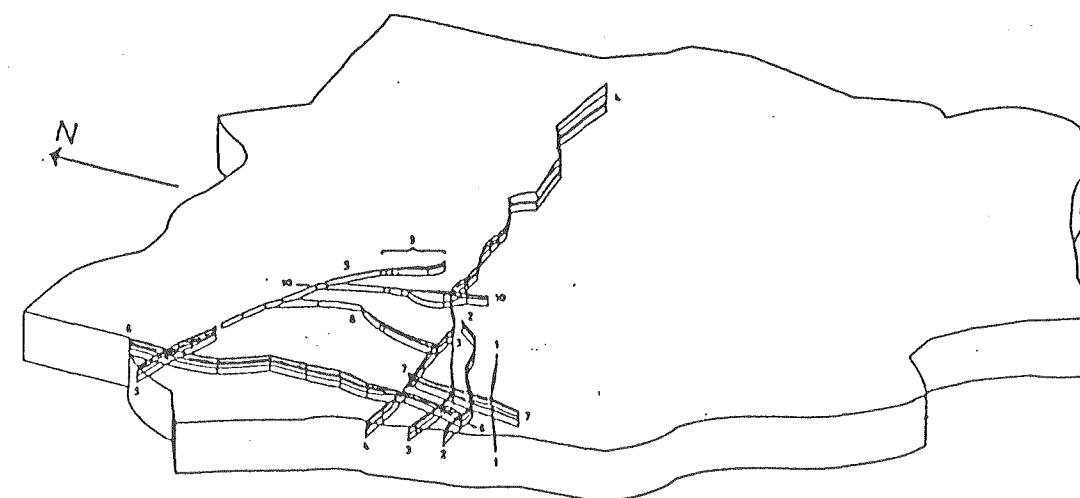


図-4 三次元要素による断層のモデル化

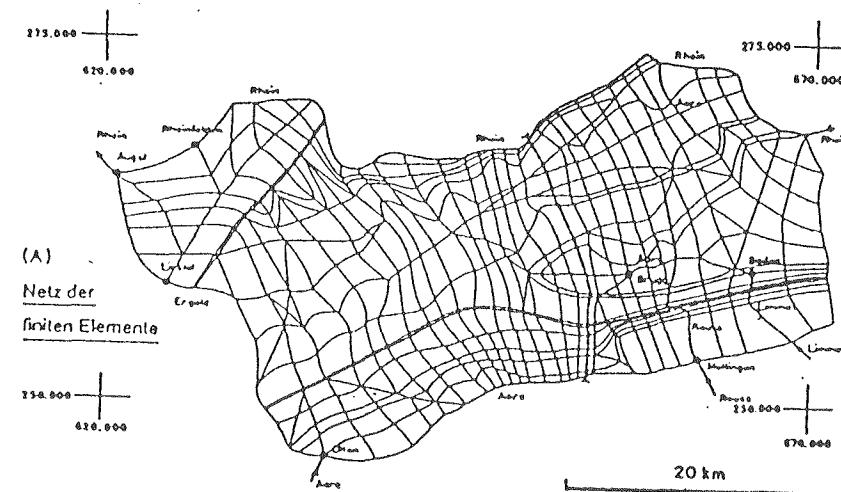


図-5 local modelの有限要素

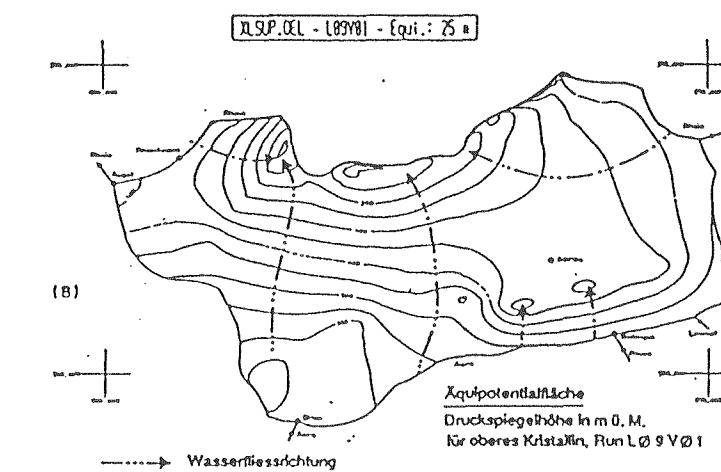


図-7 local modelの解析結果の例  
(上部結晶質岩中の水頭分布)

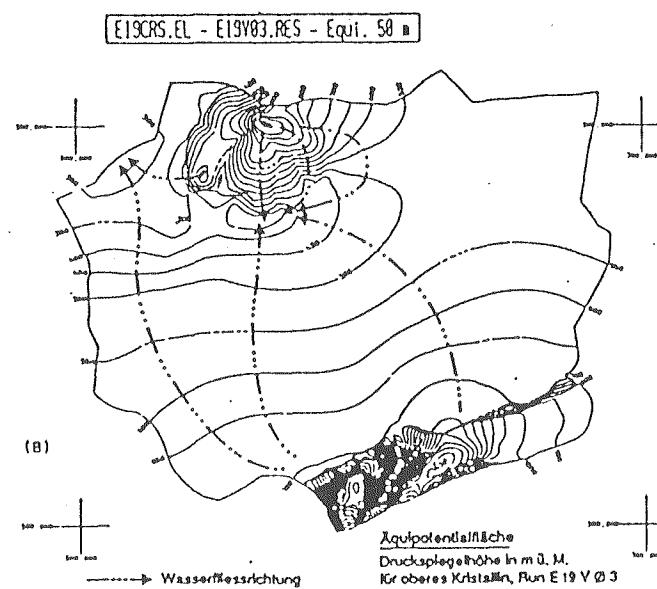


図-6 regional modelの解析結果の例  
(上部結晶質岩中の水頭分布)

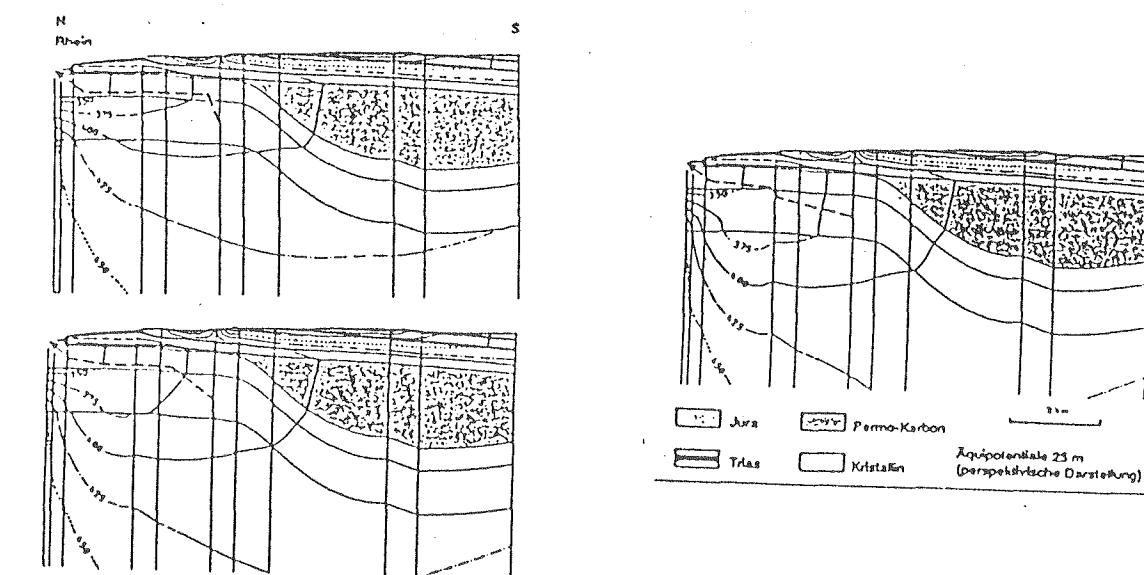
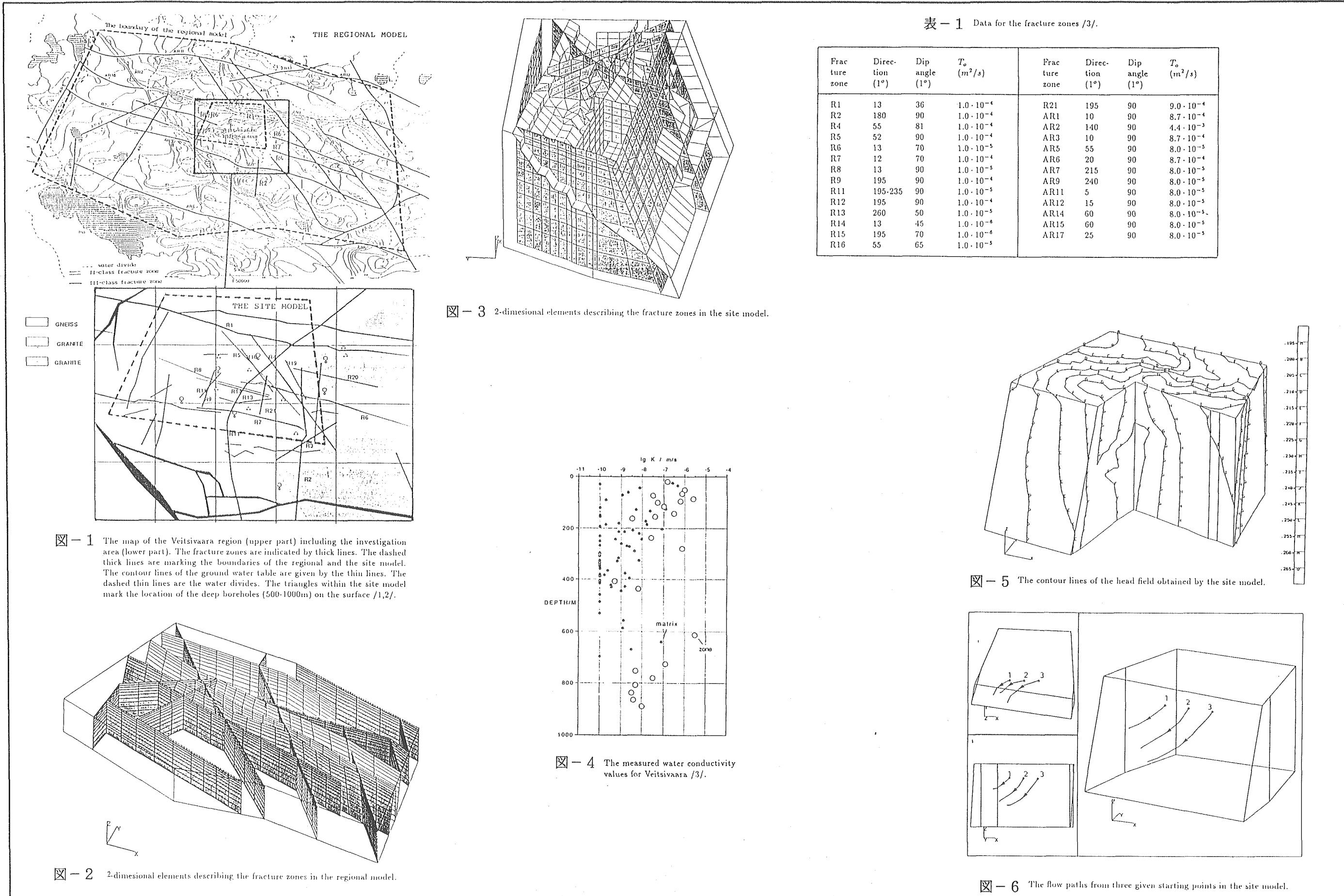


図-8 ライン川付近の間隙水圧分布  
(三つの異なる透水係数分布データについて)

施設名	Veitsivaaraサイト	土被り	500 m	調査研究の目的	Veitsivaaraサイトにおいて、広域、サイトスケールの3次元浸透流解析を実施し、定常の水頭分布、流速、処分場の深度付近の水の流动経路を解析し、実測値と対比させる。より正確な境界条件を求めるため、初めに広域モデルにより水頭分布を求め、これを境界条件としてサイトスケールの解析を行う。
地下構造物の概要	フィンランドのTVO社が高レベル放射性廃棄物の最終処分場の候補地として調査中の5つのサイトのうちの1つ。 安全性の検証解析のうち、特に処分場が周りの地下水に与える影響や、その地下水に乗って短期間に生態系へ漏洩する可能性を研究するため、TVO-92 safety analysisが1987年から1992年にわたり実施された。Veitsivaaraサイトはこれらの解析研究に対する検証サイトとして使われている。 Veitsivaaraサイトの位置は、フィンランドの東方、ロシア国境から西へ約30kmの所にある。				
地形・地質	地形は、西側にVeitsivaara hill、北側に東西に走るTakupuro川、Varpujoki川が谷を形成している。東側は標高250mのMetsokangasから西へゆるやかに傾斜している。 地質は花崗岩と片麻岩からなる。	調査項目と調査手法	広域、サイトスケールの母岩の特徴を知るため、多くの調査・試験が行われている。 <ul style="list-style-type: none"><li>○ 地質調査</li><li>○ 亀裂調査</li><li>○ 地表物理探査 電磁探査7測線32.2km、レーダー測定20km、磁気+放射能探査87測線492km、電気探査6測線12.6km、弾性波反射法3測線3.3km</li><li>○ 深層ボーリング <math>\phi 56\text{mm}</math> 8孔 計3,675.2m</li><li>○ 孔内検層 中性子、キャリパー、P波速度（以上1孔1,002.2m）、流体比抵抗、温度、電気、シングルポイントの抵抗、自然<math>\gamma</math>線、密度、自然電位、磁化率（以上5孔3,032.8m）</li><li>○ 孔間測定 VSP測定5孔3,032.8m、チューブウェーブ測定5孔3,032.8m、ボアホールレーダー反射法4孔2,529.2m</li><li>○ 地下水採水 周辺地域地下水11試料、孔内地下水7孔から35試料、雪の採取4試料、雨水11試料</li><li>○ 30mごとにパッカーによる定水頭注入試験</li><li>○ 透水性大の箇所6.8m区間にによる定水頭注入試験</li><li>○ 揚水試験 干渉試験</li><li>○ マルチレベルピエゾメーターによる地下水圧測定 7孔各4区間</li><li>○ コンタクトメーターによる地下水位測定 19孔</li><li>○ マルチパッカーシステムによる地下水位測定 5孔34区間</li><li>○ 測定パイプ内の流出試験による地下水圧測定 5孔</li></ul>	備考	
地質構造					
水理学環的境	調査地域内には、21の主要な破碎帯（R1～R21）が存在。その外側に17の破碎帯（AR1～AR17）が存在（図-1）。				
地球化環学境的					

## 施設名 Veitsivaaraサイト

解析手法	コード名	F E L O W	解析結果	○ 水頭分布を図-5に示す。y軸が北を示す。大局的に西側へ流動がみられる。 ○ 深度500m付近(処分場付近)の流動経路を図-6に示す。
	コードの内容	○ 均質体3次元有限要素法 ○ 破碎帯を2次元要素に設定する。 ○ フラックスや流動経路も計算可能。 ○ メッシュジェネレーター PAAWI		
解析モデル		○ 広域モデル(図-2) 2,000km <sup>2</sup> , 4,400要素 ○ サイトモデル(図-3) 20km <sup>2</sup> , 4,897要素		
解析条件	境界条件	○ 広域モデル 側面境界は分水嶺、川、湖に一致しており、不透水境界。 底盤境界は-2,000mレベルで不透水境界。 表面境界は水位分布図から求まる水頭境界。 ○ サイトモデル 側面境界は広域モデルから求めた水頭値を設定。 底盤境界、表面境界は広域モデルと同じ。		水頭計測と揚水試験によって、解析結果の検証、校正を行う。
物理物性		孔内透水試験(図-4)から、深度と透水係数に $T(h) = T_0 \cdot 10^{A \cdot \log(h+1)}$ の関係を仮定。 [ $T_0$ :地表における透水係数(m/s), $h$ :深度(m)] 岩石のマトリックス部では、 $T_0 = 1.0 \times 10^{-8}$ (m/s) (広域モデル), $T_0 = 3.5 \times 10^{-9}$ (m/s) (サイトモデル)。 破碎帶部では表-1に示す $T_0$ をとる。A値はマトリックス部で $-2.5 \times 10^{-3}$ , 破碎帶部で $-1.3 \times 10^{-3}$ とする。	検証手法	

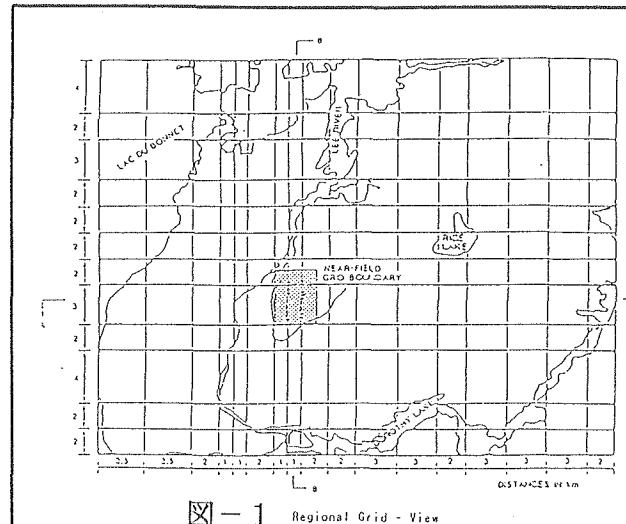


施設名	URL (1)	土被り	440 m	調査研究の目的	カナダ・マニトバ州ホワイトシェル地域にURLを建設した時の地下水流动を予測する。広域モデルによる解析はサイトモデルの境界条件を得るために実施したものである。サイトモデルにおいては、URL建設時の立坑周辺の水位低下について、境界条件、ゆるみ域、健全部の透水係数をパラメータとして感度解析を実施している。	
地下構造物の概要	カナダのはば中央部マニトバ州の東部、ウィニペグの北東100kmに位置している。カナダ原子力公社(AECL)が高レベル放射性廃棄物の処分技術の開発及び実証を目的に、1980~2000年の21年間にわたりマニトバ州政府より借用したもので、敷地面積は約4haである。 放射性廃棄物はいっさい持ち込みず、借用期間後に元どおりに復元して返還することになっている。深度443mまでの立坑1本と、130m、240m、300m、420mに水平坑道がある。	検層 水位観測 透水試験 単一孔試験 孔間透水試験（揚水試験）				
地形・地質	カナダ楯状地の西端に位置し、表土がほとんどなく、先カンブリア紀のLac du Bonnet花崗岩体が分布する平坦な地形をなしている。	調査項目と調査手法	備考			
地質構造	上部（地表から240m付近まで）は亀裂の多い桃色花崗岩、下部は灰白色花崗岩が分布する。 URL敷地内には約20°で東に緩傾斜の破碎帯が3本あり、立坑には1本の破碎帯の分岐を含めた3本が深度120m、210m、270m付近に現れている。					
水理学環境的境	地質的な擾乱及び鉱業活動などによる人為的な擾乱を受けておらず、平均 $10^{-6}$ cm/sec以下の低透水性岩盤である。					
地球化環境的境						

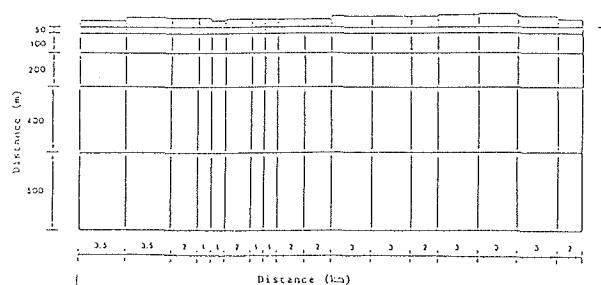
## 施設名 URL (1)

解析手法	コード名	SWIFT	URL建設時の解析を行い、建設後6ヶ月と10年後の結果を検討したところ、10m以上の水位低下が生じるのはURL立坑の近くに限られることがわかった（図-7）。さらに、パラメータの影響を検討するため以下検討を行った。	解析結果
	コードの内容	水-熱連成で塩水くさびも考慮できる3次元有限差分法コード。本検討では水のみを対象としている。		
解析モデル	広域モデル：30km×38km×1,250mを領域とし、解析モデルを図-1、2に示す。 サイトモデル：3km×4km×?kmを領域とし、図-3と以下に示す手順でモデルを作成した。 ① サイトで得られたデータ（検層結果、水位観測結果、透水試験結果）からサイトの特性と比較的傾向の一一致するモデルを作る。たとえば、揚水試験時の水位の低下結果から推定されるフラクチャーゾーンの位置をフェンス・ダイアグラムとして図-4に示した。 ② ①で得られたモデルから数値モデル（図-5）を作成し、要素ごとの地下水補給量を変化させて解析上の水位が実測水位と合うようにする。推定された地下水補給の分布を図-6に示した。 ③ サイトで実施された複数孔での揚水試験や削孔時の周辺孔での水位変動が実測結果と一致するように層ごとの透水係数を決定する。推定された透水係数は表-1に示したとおりである。	以上のように①、②、③について感度解析を行ったところ、一般部の岩盤の透水性が1オーダー変化しても水位低下に及ぼす影響は15%以内であり、より精度の高いモデルを作成するためには高透水性のフラクチャーゾーンの存在を評価することが重要であることがわかった。	解析結果	
解析条件	広域モデル：湖、河川を水頭固定境界とし、地表面に涵養量を与える。 サイトモデル：広域モデルで得られた結果を境界条件として使用。	検証なし。	検証方法	
水理物性	健全部の透水係数は $10^{-11}$ m/secとした。			

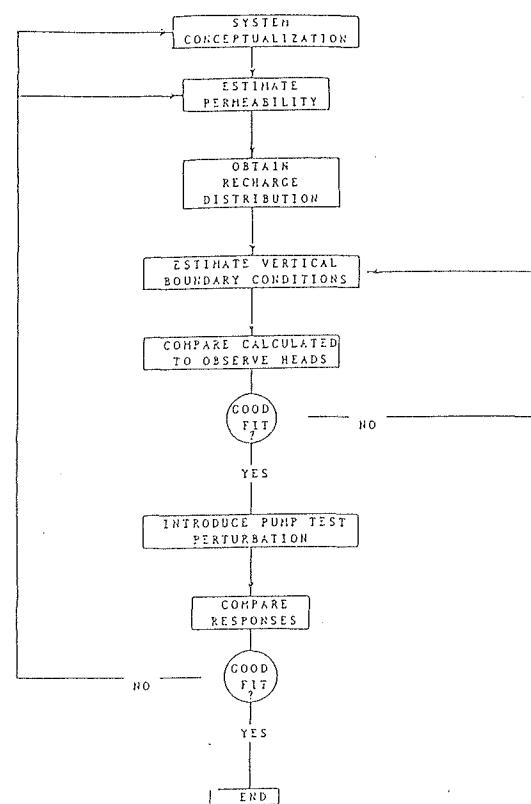
施設名 URL (1)



☒ - 1 Regional Grid - V



**FIG - 2** Regional Grid - Cross - Sectional View (A-A)



**FIG - 3** Flowchart Illustrating Procedure Used in Obtaining Hydrogeological Characterization

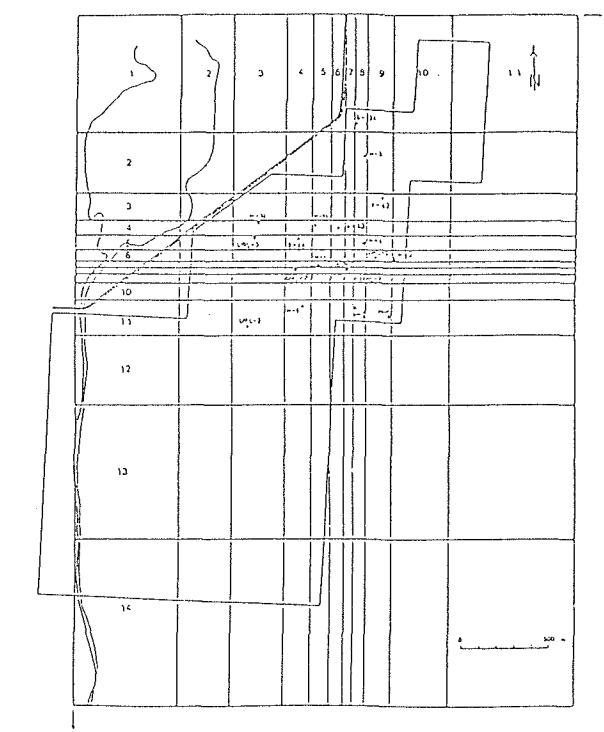
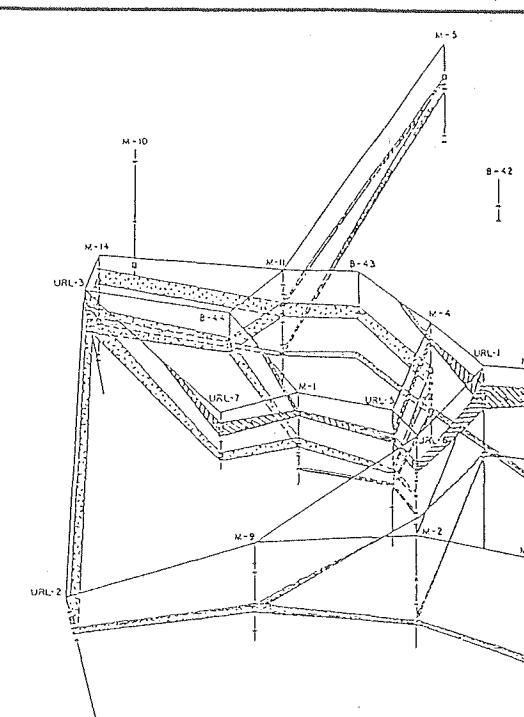
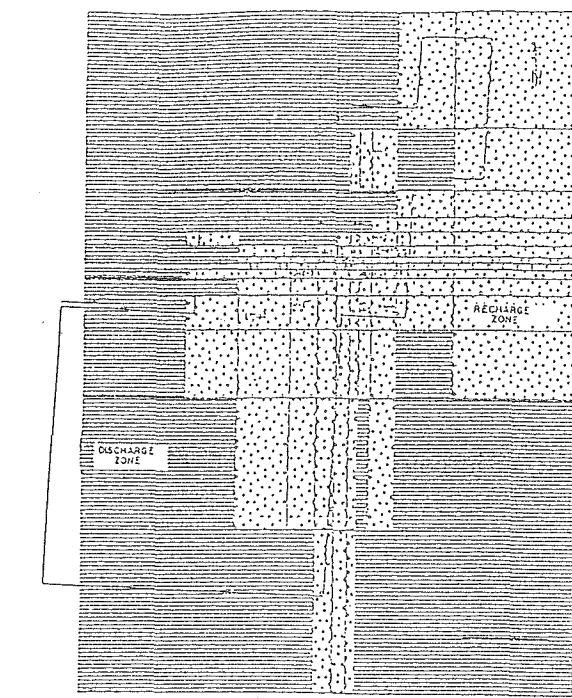


图-5 Nezy-Field Numerical Grid-Plan Vie



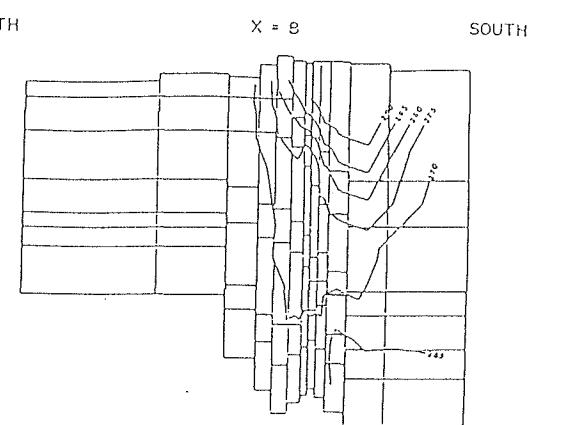
#### - 4 Fence Diagram Showing Conceptualized Fracture Zone System



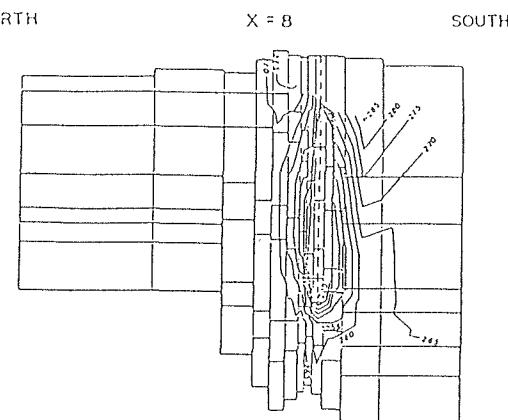
## **☒ - 6 Recharge and Discharge Zones - Near-Field Model**

表-1 RANGE OF HYDRAULIC CONDUCTIVITIES EMPLOYED IN NUMERICAL MODEL

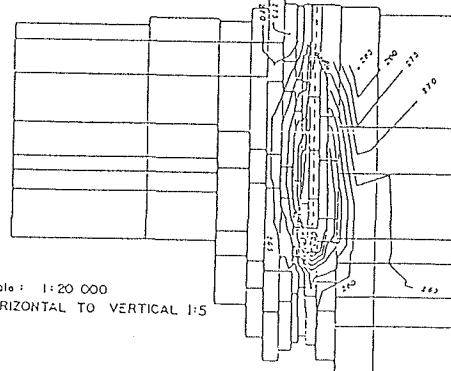
Hydraulic Conductivity Range (m/s)		
	Fractured Rock	Intact Rock
1	$5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$
2	$5 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-9}$
3	$5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$ to $5 \times 10^{-9}$
4	$1 \times 10^{-5}$ to $5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$
5	$1 \times 10^{-7}$ to $5 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-9}$ to $1 \times 10^{-10}$
6	$1 \times 10^{-5}$ to $5 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-9}$ to $5 \times 10^{-10}$
7	-	$1 \times 10^{-11}$



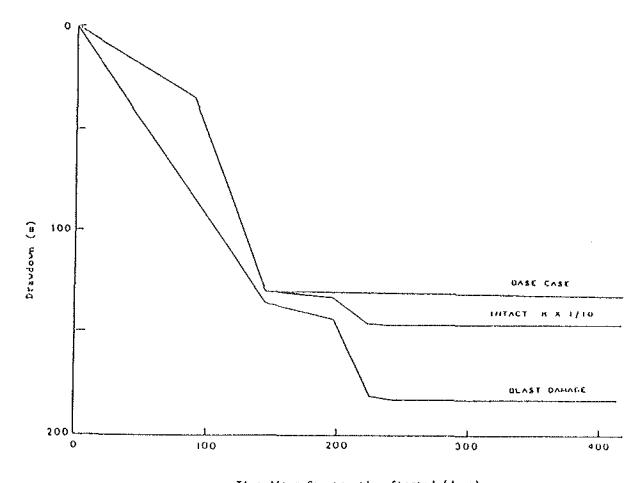
(a) Prior to Construction



(b) 6 Months after Shaft Construction



(c) 10 Years after Drifts Completed  
☒ - 7 Calculated Head Contours ( $\sigma_2 = 1.0$ ,  $R_{\text{eq}} = 6000$ )



- 8 Expected Breakdown at 00L-6

施設名	URL (1)	土被り	m	調査研究の目的	カナダ・マニトバ州ホワイトシェル調査地域(図-1)における、深成岩中の仮想の放射性廃棄物処分場近傍の地下水流动を評価すること。
地下構造物の概要	<p>カナダのほぼ中央部マニトバ州の東部、ウィニペグの北東100kmに位置している。カナダ原子力公社(AECL)が高レベル放射性廃棄物の処分技術の開発及び実証を目的に、1980~2000年の21年間にわたりマニトバ州政府より借用したもので、敷地面積は約4haである。</p> <p>放射性廃棄物はいっさい持ち込みず、借用期間後に元どおりに復元して返還することになっている。深度443mまでの立坑1本と、130m、240m、300m、420mに水平坑道がある。</p>				調査項目と調査手法
地形・地質	カナダ楯状地の西端に位置し、表土がほとんどなく、先カンブリア紀のLac du Bonnet花崗岩体が分布する平坦な地形をなしている。			備考	
地質構造	<p>上部(地表から240m付近まで)は亀裂の多い桃色花崗岩、下部は灰白色花崗岩が分布する。</p> <p>URL敷地内には約20°で東に緩傾斜の破碎帯が3本あり、立坑には1本の破碎帯の分岐を含めた3本が深度120m、210m、270m付近に現れている。</p>				
水理学環的境	地質的な擾乱及び鉱業活動などによる人為的な擾乱を受けておらず、平均 $10^{-6}$ cm/sec以下の低透水性岩盤である。			備考	
地球化環学的境					

## 1 施設名 U R L (1)

解 析 手 法	コード名	M O T I F	解析結果	処分場設置前 図-4 参照 グラウトの影響解析 破碎帯のグラウトを交点の透水係数と間隙率を低下させることにより表現。透水度を $10^{-15} \text{ m}^2$ まで低下 (もとの縦方向の透水係数の 1 %にあたり、破碎帯のもとの横方向の透水係数の 2 %に相当)。間隙率は 0.05の半分まで低下。 破碎帯内の流速は75%まで減少した。図-5 参照。 物質移行モデル 地表までの粒子の到達時間は990~2,000万年と変化する。表-1, 図-6 参照。
	コードの内容	3次元有限要素法		
	解析モデル	図-1 の A-A 断面に対応する 2 次元モデル ( $27\text{km} \times 4\text{ km}$ ) の深さ500mに、 $1.9 \times 1.9\text{km}$ の仮想処分場が破碎帯を横切るように設置 (図-2)。 仮想処分場周辺の要素を図-3 に示す。		
解 析 条 件	境界条件	上部境界: 地下水面 下部境界: 不透水境界 側方境界: 流速 0 境界	検証手法	
	水理物性			

施設名 URL (1)<sup>1</sup>

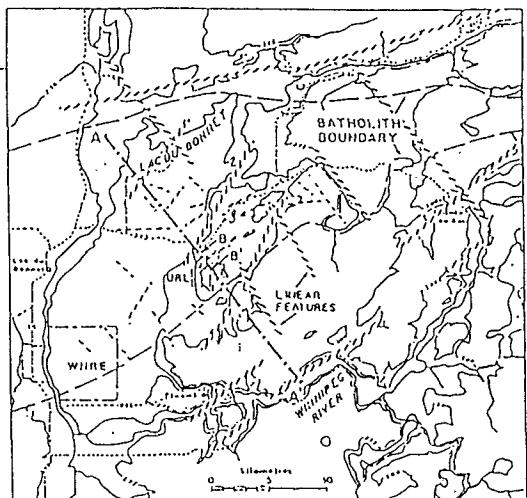


図-1 Whiteshell Research Area.

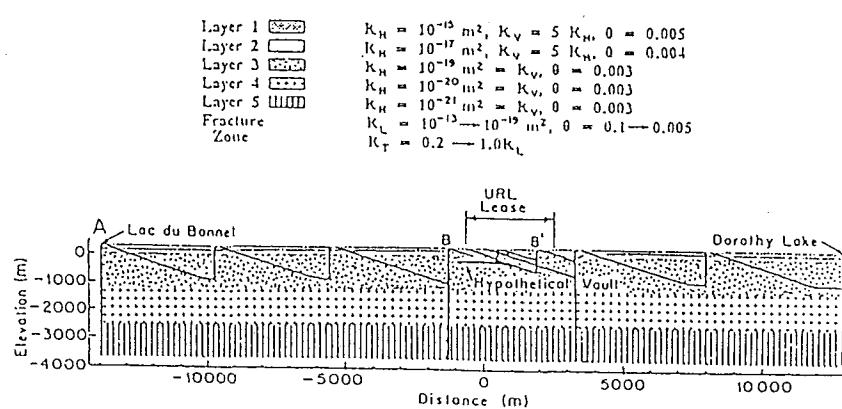


図-2 Conceptualized geology along section AA'.

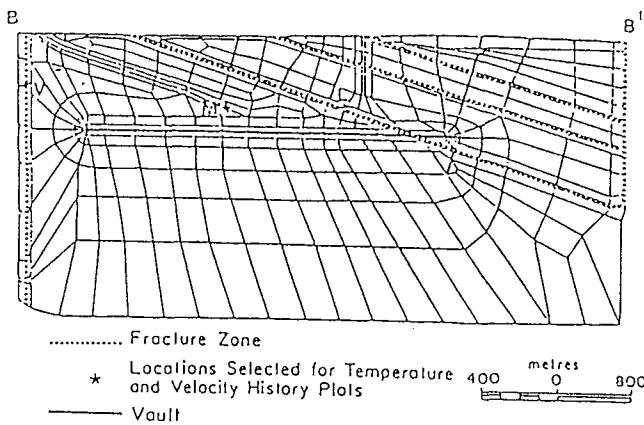


図-3 Two-dimensional, finite-element mesh for vault region.

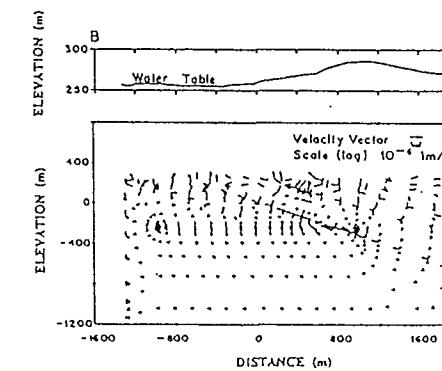


図-4 Water table profile and predicted steady state velocity distribution near the vault.

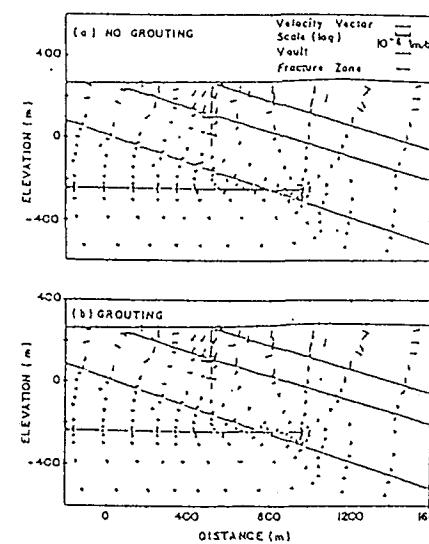


図-5 Impact of grouting the fracture zone/vault intersection on the predicted velocity distribution.

表-1 Impact of grouting the fracture zone/vault intersection on predicted convective transport of particles released from the vault.

Path Segment	No Grouting	Grouting
	Path R	Path R*
Layers 3 & 2		
travel time (s)	$6.2 \times 10^4$	$3.1 \times 10^5$
% of total	98%	99%
Fracture & Layer 1		
travel time (s)	$9.6 \times 10^2$	$1.7 \times 10^3$
% of total	2%	1%
Total		
travel time (s)	$6.3 \times 10^4$	$3.1 \times 10^5$
distance (m)	1405	1634
average velocity (m/a)	$2.2 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-3}$
Path C	No Grouting	Grouting
	Path C	Path C*
Fracture & Layer 1		
travel time (s)	$9.9 \times 10^2$	$1.1 \times 10^3$
distance (m)	1451	1463
average velocity (m/a)	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$
Path L	No Grouting	Grouting
	Path L	Path L*
Layers 3 & 2		
travel time (s)	$2.0 \times 10^7$	$4.1 \times 10^6$
% of total	100%	100%
Fracture & Layer 1		
travel time (s)	$1.0 \times 10^3$	$2.7 \times 10^3$
% of total	0%	0%
Total		
travel time (s)	$2.0 \times 10^7$	$4.1 \times 10^6$
distance (m)	1336	1469
average velocity (m/a)	$7.6 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-4}$

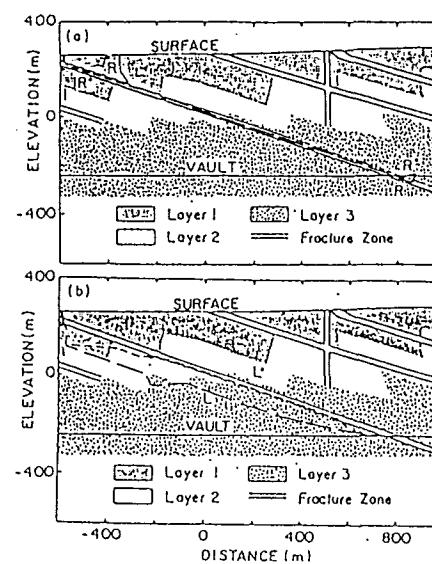


図-6 Impact of grouting the fracture zone/vault intersection on predicted paths for convective transport of particles released from the vault: Paths R and L - no grouting; Paths R\* and L\* - with grouting.

施設名	URL (2)	土被り	440 m	立坑掘削前に作成した3次元地下水流动モデルによる予測値と立坑掘削過程による実測値との比較検討を行う。
地下構造物の概要	カナダのほぼ中央部マニトバ州の東部、ウィニペグの北東100kmに位置している。カナダ原子力公社(AECL)が高レベル放射性廃棄物の処分技術の開発及び実証を目的に、1980~2000年の21年間にわたりマニトバ州政府より借用したもので、敷地面積は約4haである。 放射性廃棄物はいっさい持ち込みず、借用期間後に元どおりに復元して返還することになっている。深度443mまでの立坑1本と、130m、240m、300m、420mに水平坑道がある。	調査研究の目的		
地形・地質	カナダ楯状地の西端に位置し、表土がほとんどなく、先カンブリア紀のLac du Bonnet花崗岩体が分布する平坦な地形をなしている。	調査項目と調査手法	ボーリング調査：130本以上 MPシステム 湧水量測定 5カ所の集水リングを立坑に設置	
地質構造	上部(地表から240m付近まで)は亀裂の多い桃色花崗岩、下部は灰白色花崗岩が分布する。 URL敷地内には約20°で東に緩傾斜の破碎帯が3本あり、立坑には1本の破碎帯の分岐を含めた3本が深度120m、210m、270m付近に現れている。	備考		
水理学環的境	地質的な擾乱及び鉱業活動などによる人為的な擾乱を受けておらず、平均 $10^{-6}$ cm/sec以下の低透水性岩盤である。			
地球化環学的境				

## 施設名 U RL (2)

解 析 手 法	コード名		解析結果	立坑湧水量 図-4に示すように最上部のF Z-3を横切った直後に最大となり、その後徐々に低下して一定の値に近づく。 水位低下量 立坑近傍ではほとんどF Z-3及びそれ以浅で起こり、F Z-3以深では深度とともに減少する。
	コードの内容	ガラーキン法を用いた非定常3次元有限要素法		
	解析モデル	U RL周辺の面積約3.8km <sup>2</sup> 、深度500mを対象とするが、メッシュ図は与えられていない。（参考に地質断面を図-1に示す。） 坑道の掘削工程を図-2に示す。解析上は8カ月間一定の速度で掘削が行われるものとした。		
	境界条件	掘削前の水頭分布を図-3に示すが、明確な水理境界は示されていない。 涵養量は、年降水量に年平均浸透率を用いて一律に与えた。		立坑湧水量 立坑湧水は、F Z-3の他に図-5に示す箇所でみられ、湧水量の経時変化を図-6に示す。F Z-3を横切る時に最大となり、その後徐々に低下して一定の値に近づくという傾向は、解析値と実測が一致していることを示している。ただし、流入の場所については、F Z-3よりも下の割れ目からの湧水量が大きくなっている。 水位低下量 F Z-3による水位低下を図-7に示す。立坑近傍において80mと最も大きく、平面的にはほぼ同心円状の分布を示すが、北東側に低下域が伸びている。F Z-3による水位低下の時間的変化（図-8参照）は、急激に低下した後、「目立った変化は現われない。F Z-2においては、図-9に示すようにわずかな水位変化のみが認められた。水位低下速度、低下量、低下の時間的変動の予測値は、実測値と比較的よく一致している。ただし、実際の水位低下の始まりは、掘削速度の予定との違いや、F Z-3の上下に発達する透水性の割れ目の存在のため、予測よりも20~30日早く現われる。低下量については、立坑に近づくほど予測と実測値のくい違いが大きくなる。F Z-2の枝部において予測値ほどの水位低下が認められなかったのは、割れ目部主部とリムとの水理的連続性が小さいことを示している。
水理物性			検証手法	

施設名 URL (2)

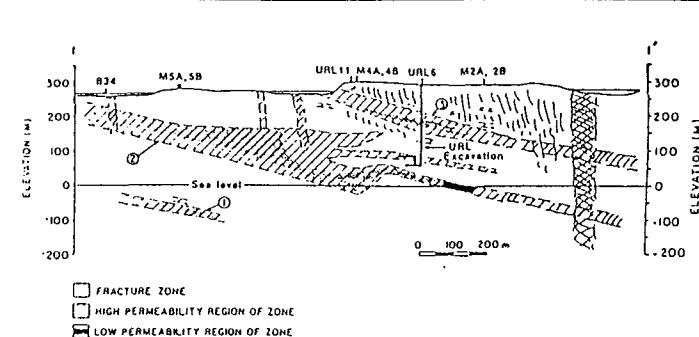


図-1 断面1-1に沿うURLサイトの地質断面図(簡略図)

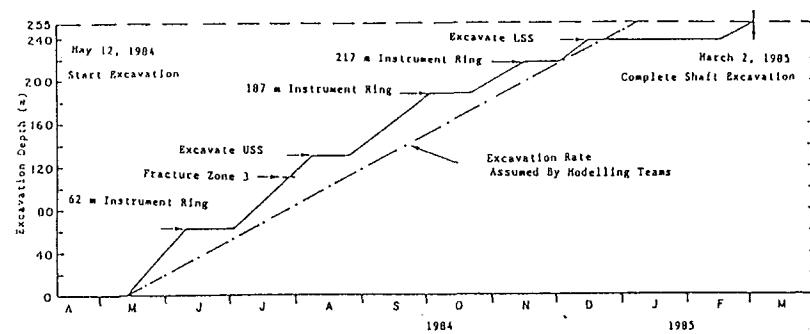


図-2 URLシャフトの掘削速度

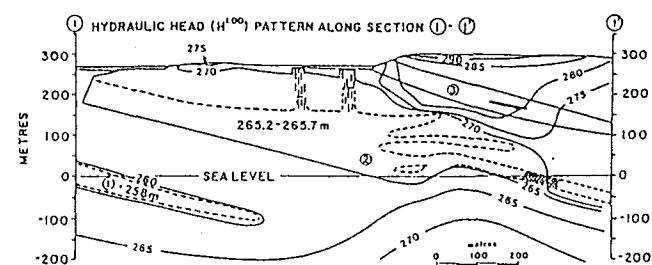


図-3 断面1-1に沿う、掘削前の水頭分布

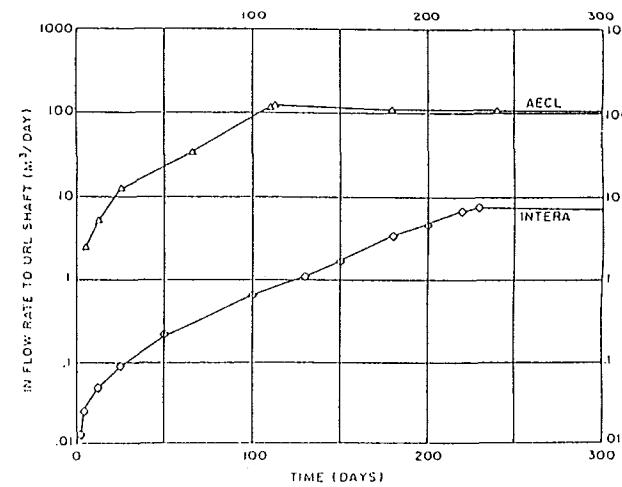
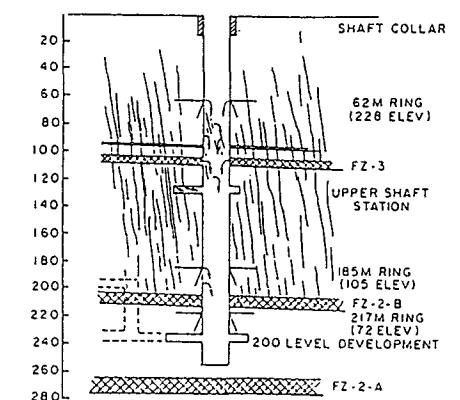


図-4 URL施設への地下水流入量の予測値



HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS IN VICINITY OF SHAFT EXCAVATION  
図-5 URLシャフト掘削中の水理地質学的状況のまとめ

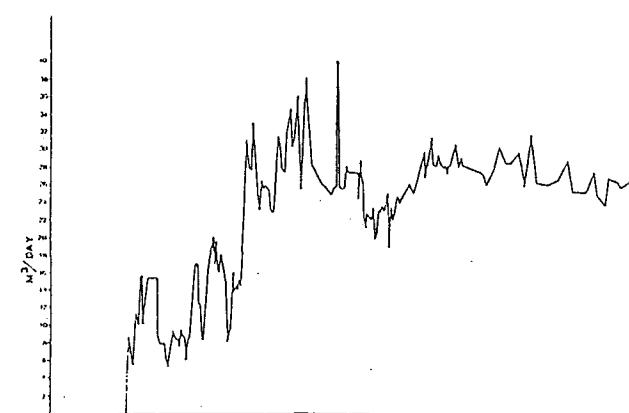
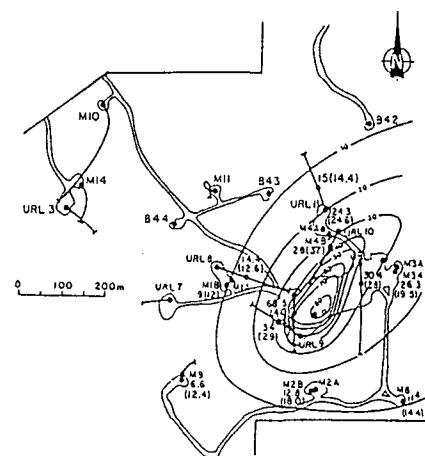


図-6 URL施設への地下水流入量の実測値



施設名	URL (2)	土被り	m	立坑掘削前の地下水状況をモデル化し、立坑掘削後の地下水挙動を予測する。
地下構造物の概要	カナダのほぼ中央部マニトバ州の東部、ウィニペグの北東100kmに位置している。カナダ原子力公社（A E C L）が高レベル放射性廃棄物の処分技術の開発及び実証を目的に、1980～2000年の21年間にわたりマニトバ州政府より借用したもので、敷地面積は約4haである。 放射性廃棄物はいっさい持ち込みます、借用期間後に元どおりに復元して返還することになっている。深度443mまでの立坑1本と、130m、240m、300m、420mに水平坑道がある。	調査研究の目的		
地形・地質	カナダ楯状地の西端に位置し、表土がほとんどなく、先カンブリア紀のLac du Bonnet花崗岩体が分布する平坦な地形をなしている。	調査項目と調査手法	地表踏査 ボーリング 5孔（深度150～1,000m） パッカー透水試験 水頭測定 ピエゾメーター約50本 水文調査	
地質構造	上部（地表から240m付近まで）は亀裂の多い桃色花崗岩、下部は灰白色花崗岩が分布する。 URL敷地内には約20°で東に緩傾斜の破碎帯が3本あり、立坑には1本の破碎帯の分岐を含めた3本が深度120m、210m、270m付近に現れている。	備考		
水理学環的境	地質的な擾乱及び鉱業活動などによる人為的な擾乱を受けておらず、平均 $10^{-6}$ cm/sec以下の低透水性岩盤である。	備考		
地球化環学境的		備考		

## 施設名 URL (2)

解析手法	コード名		解析結果	ケース1 地下水流動は、流域の中心付近の上部100mは下向きの強い鉛直勾配を呈するが、ゾーン2に到達する前にLee川に向かって水平に流れる。Lee川とDead Creekが流出域となることが示される。涵養量は32mm／年（総降水量の6%）となる（図-4, 5）。 ケース2 西端の2つの要素も加え、Lee川直下のゾーン3をゾーン4とし、Lee川とゾーン4とが水理的につながっていると仮定すると、シミュレーション1に比べてすべての場所においてポテンシャルが低下し、動水勾配が大きくなる。流動はLee川へ向う。ゾーン3への流動は極めて遅く、ゾーン4, 5ではほとんど流動しない。流出地点はLee川とDead Creekに限られる（図-6, 7）。 ケース3 ケース1, 2の条件に加え、ほぼ鉛直方向の破碎帯による水流の短絡を想定した場合、ゾーン5より浅い部分では上向きの勾配となる。最大勾配は大きいが、ゾーン3と5での地下水の移動速度は $3.2 \times 10\text{m}/\text{年}$ ときわめて遅い。ゾーン4ではこれより6桁大きな速度（0.3m／年）となる。ゾーン4の地下水の一部はゾーン3及び5に入る。ゾーン4における水頭値の計算結果は実測値と合う。涵養量は37mm／年で、年降水量の6%となる（図-8, 9）。 ケース4 18時間後のポテンシャル分布を図-10, 11に示す。地下水は立坑及び地表の狭い2地点（Lee川の北西とDead Creekの南西）に流出し、Lee川及びDead Creekへの流出量はかなり減少する。立坑へ向う流量は最大 $0.0577 \text{ m}^3/\text{s}$ であるが、深度とともに減少する。流量はほとんどの面上で18時間の間に減少する。18時間後の地下水面の低下量（図-12）は、立坑と浸潤面の合流点で最大85m弱。水位低下の水平分布は各深度でほぼ同様のパターンを示す。すなわち、立坑付近を最大同心円状に分布し、Dead Creekの下では極めて小さい。立坑の直下における低下量の最大値は、第2～4面（ゾーン2）で79～107m、第5～7面で270～239m、第8, 9面では最大700mに達する。不飽和の状況が、立坑付近の第2面および立坑のレベル2の直上、第5面に沿って現われる。
	コードの内容	ガラーキン法を用いた非定常3次元有限要素法で非定常・飽和モデルを使用		結論 掘削前の水位ポテンシャルを説明するには、ゾーン2とゾーン4を鉛直方向の割れ目に沿って短絡させたモデル（シミュレーション3）により実測の水頭値をよく説明できる。 より詳細な解析のためには、さらに多くの原位置データに基づき、鉛直に近い向きの割れ目系について明確にする必要がある。また、ここで使用した有限要素の格子は、地下水の局地的流動と地域流動の両方の解釈に適用できるように設定したため、今後立坑近傍の水理状況をシミュレートするためには、より多くの格子と要素を加えなければならない。
解析モデル	領域はLee川とDead Creekに挟まれた5km×6kmで、深度は標高-700mまでの範囲（図-1参照）。 解析メッシュは55個×8層の計440要素に分割（図-2, 3参照）。 立坑掘削前3ケース ケース1 西端（Lee川）の2つの要素を除いたケース（図-3参照） ケース2 Lee川直下の水理地質ゾーン3をゾーン4とし、Lee川がゾーン4と水理的につながっているケース ケース3 ケース1, ケース2の条件に加え、ほぼ鉛直方向の破碎帯による地下水流の短絡を想定したケース 立坑掘削後 ケース4 自由地下水面の非定常変動とポテンシャル分布を求めるため、Two-part iterative法による繰り返し計算（1ステップ前の水頭値との差が0.0005m未満になるまで行う）			
解析条件	地下水表面は地表面に固定。河川水位も固定。その他の境界は不透水境界。 涵養量は立坑掘削前の解析での値を立坑掘削後の解析で使用。 立坑を浸潤面として扱い、立坑は瞬時に掘削。			
水理物性	水理パラメータを表-1に示す。		検証手法	

## 施設名 URL (2)

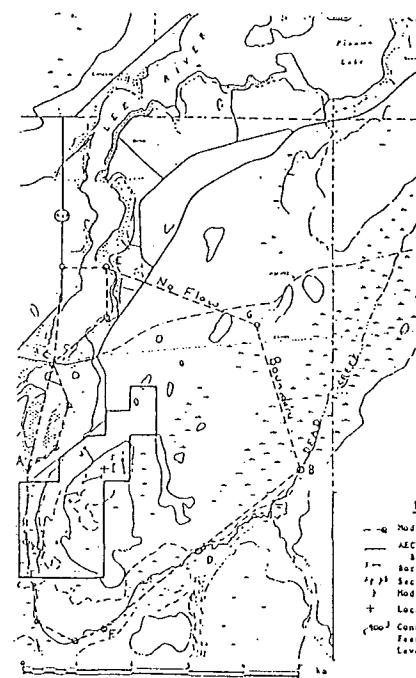


図-1 URL借用地とモデルの境界

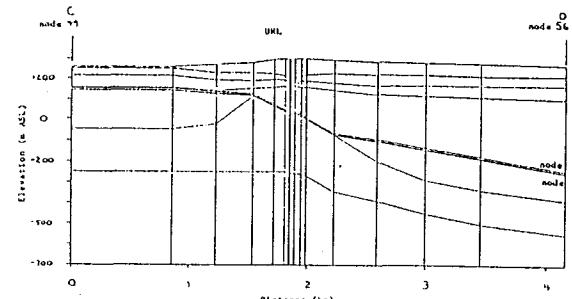


図-2 C-D断面に沿う領域の分割

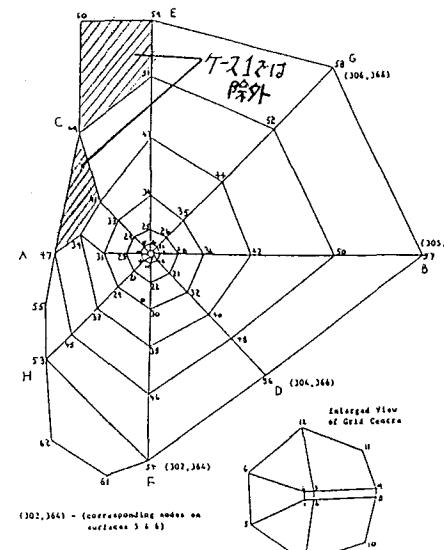


図-3 表層での有限要素の分割と格子のナンバリング

表-1 5つの水理地質学的ゾーンにおける水理地質学的パラメータ

Depth (m)	Borehole	Hydrogeologic Zone	X-Y-Z Hydraulic Conductivity (m/s)	Porosity	Medium Compressibility ( $\text{e}^{-10} \text{Pa}$ )	b factor	Specific Storage ( $1/\text{m}$ )	
0	2 3 5 1	1	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-10}$	1	$5.03 \times 10^{-6}$	Fluid Density = $1000 \text{ kg/m}^3$
100		2	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-3}$	$6.8 \times 10^{-9}$	1	$6.81 \times 10^{-5}$	Gravity = $10 \text{ m/s}^2$
200		3	$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-4}$	$5.30 \times 10^{-11}$	Fluid Compressibility = $5.2 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
300		4	$1 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-9}$	1	$1 \times 10^{-5}$	Zone Specific Yield = $3 \times 10^{-6}$
400		5	$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-5}$	$5.20 \times 10^{-11}$	
500								

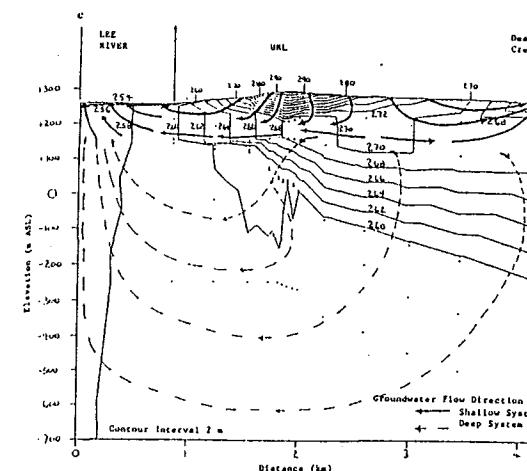


図-6 シミュレーション2で求めたC-D断面に沿う等ポテンシャル線

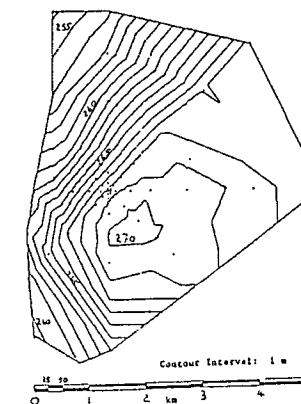


図-9  
シミュレーション3で求めたC-D断面に沿う等ポテンシャル線

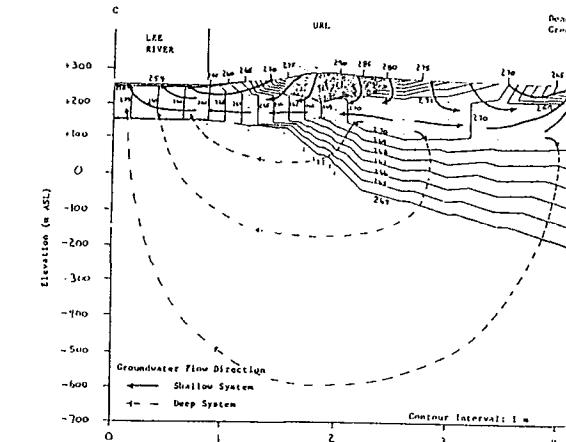


図-4 シミュレーション1で求めたC-D断面に沿う等ポテンシャル線

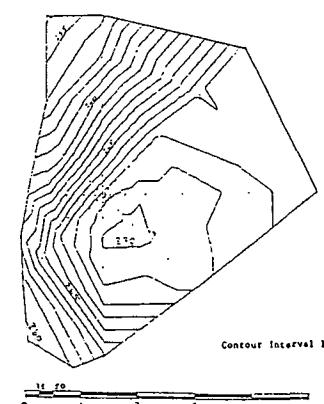


図-7 シミュレーション2で求めた第3面での等ポтенシャル線

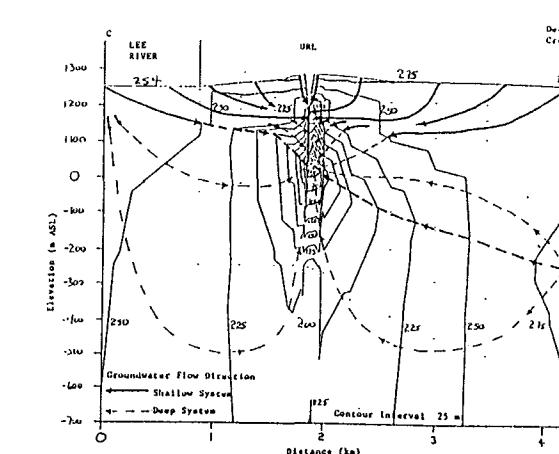


図-10 シミュレーション4で求めたC-D断面に沿う等ポтенシャル線(18時間後)

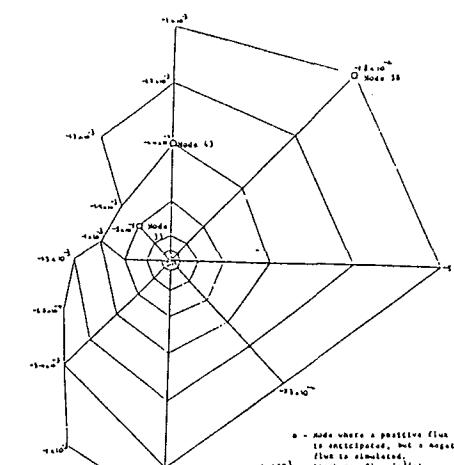


図-5 シミュレーション1で求めた地表からの流出

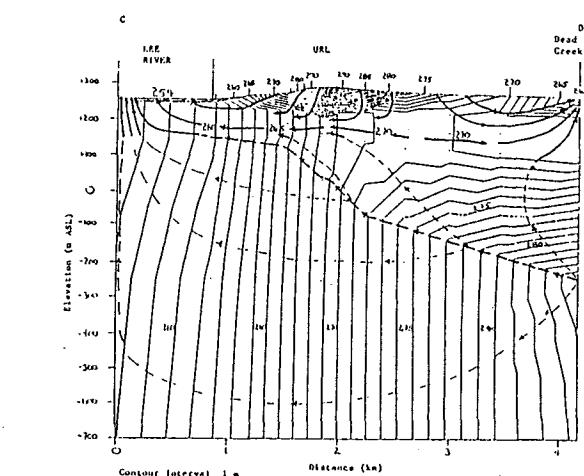


図-8 シミュレーション3で求めたC-D断面に沿う等ポтенシャル線

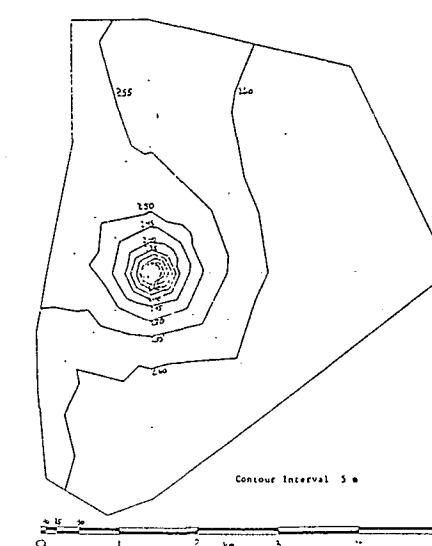


図-11 シミュレーション4で求めた第3面での等ポтенシャル線(18時間後)

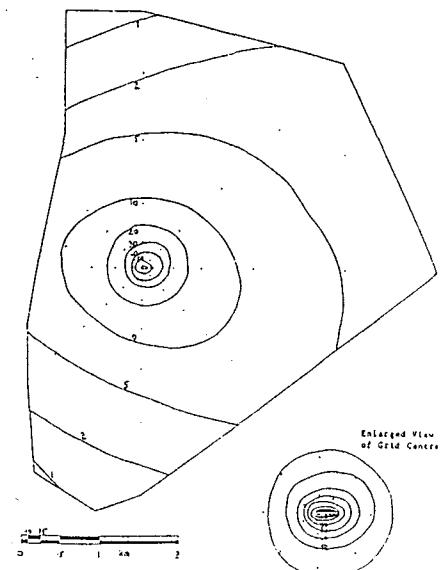


図-12 第3面での地下水位の縮低下層(18時間後)

施設名	URL (3)	土被り	240 m	調査研究の目的	Room209の亀裂を対象に、水理的な坑道掘削応答試験に基づいて水理機構を解析する。以下の2段階の解析を行う。 ① 坑道掘削前における地下水位分布と坑内の地下水流入量のモデリング ② 坑道掘削後における水理的変化の予測解析と実測値の比較
地下構造物の概要	カナダのほぼ中央部マニトバ州の東部、ウィニペグの北東100kmに位置している。カナダ原子力公社（A E C L）が高レベル放射性廃棄物の処分技術の開発及び実証を目的に、1980～2000年の21年間にわたりマニトバ州政府より借用したもので、敷地面積は約4haである。 放射性廃棄物はいっさい持ち込みず、借用期間後に元どおりに復元して返還することになっている。深度443mまでの立坑1本と、130m、240m、300m、420mに水平坑道がある。 Room209は240m坑道にあり、図-1、2にその概要を示す。				
地形・地質	カナダ楯状地の西端に位置し、表土がほとんどなく、先カンブリア紀のLac du Bonnet花崗岩体が分布する平坦な地形をなしている。	調査項目と調査手法	備考	ボーリング調査（図-2参照） トンネル軸に対して放射状のボーリング：9孔 トンネル軸に平行で亀裂を横切るボーリング：8孔 パッカーシステムによる間隙水圧測定 揚水試験	
地質構造	上部（地表から240m付近まで）は亀裂の多い桃色花崗岩、下部は灰白色花崗岩が分布する。 URL敷地内には約20°で東に緩傾斜の破碎帯が3本あり、立坑には1本の破碎帯の分岐を含めた3本が深度120m、210m、270m付近に現れている。				
水理学環的境	地質的な擾乱及び鉱業活動などによる人為的な擾乱を受けておらず、平均 $10^{-6}$ cm/sec以下の低透水性岩盤である。				
地球化環学境的					

解析手法	コード名	M O T I F		モデル I では、水頭値は実測値の 7 %以内の過大評価となり、揚水試験結果では 75 %以内の過小評価となったため、モデル II においては実験室の近傍の透水性を 1.8 倍に増大して計算し実測値との比較を行っている。その結果、水頭値では 5 %以内に、揚水試験値では 30 %以内にそれぞれ改善されたことにより、この段階で透水性パラメータを固定している。さらに坑道周辺のボーリング孔 2 孔 (F, S 孔) で揚水試験値に若干のズレがみられたため、パラメータをやや小さくしてモデル III の計算を行った結果モデル II とほとんど変わらない結果を得た。
	の内容	3 次元有限要素法で連続媒体中での地下水 - 熱 - 核種移行を取り扱うことのできる定常・非定常のコードである。 ここでの解析では 2 次元の定常解析を行っている。		
解析条件	解析モデル	<p>解析モデルの設定に際しては、対象領域が岩体 3 次元空間におけるごく一部の狭い範囲ではあるが 1 つの亀裂を解析の主たる対象としているため、数少ない原位置データと、本研究とは別に実施した解析モデルによる予測結果との整合をはかりながら、亀裂の形状と地質条件に基づいて、解析領域と境界条件の設定を行っている。</p> <p>① 亀裂の形状設定は、「単一の平行板型亀裂モデル」を採用。また、亀裂の水平方向と鉛直方向の広がりについては、ボーリングデータと Room209 周辺の地質概念モデル（図-4）に基づいて設定するとともに、トンネルを横切る花崗閃緑岩の岩脈についても、モデルにおいて透水性の低い部分として考えられている。</p> <p>② 岩石の特性分布状況は、図-5 に示すように、解析領域を 3 区分している。区分の根拠は、トンネル部分とその周辺部は、詳細データがあるか、もしくは過去にモデル解析が行われている領域。残る北側に延長した領域は、パッカ試験に基づいて透水性を推定した領域として設定している。</p> <p>また、トンネル部分については、図-6 に示すように先導坑の縁辺付近の 4 組のボーリング孔の対の影響が予想される範囲を設定している。岩脈の透水性については直接定量的データは得てないが、干渉試験による相対的な透水性を与えていた。</p> <p>③ 解析メッシュは、3 次元空間において解釈された亀裂の幾何形状を单一の平行板型亀裂モデルに変更したことによる 2 次元の亀裂を含み、さらにボーリング孔や坑壁からの地下水流出の計算が可能なメッシュ分割を行って（図-7, 8），最終的には 1,438 個の四辺形と 1,502 の節点からなる。</p>	解析結果	<p>(2) 掘削後の水理状況シミュレーション</p> <p>① 概要</p> <p>ここでは、亀裂を用いて先導坑掘削後の水理状況に関するシミュレーションを 4 ケース（モデル IV, V (1~3)）実施している。モデル IV は、掘削前のモデルを基本にして坑内が解放された状態を再現するものであり、モデル V (1~3) は坑壁にスキン効果を設定して水理状況を再現するものである。なお、計算のプロセスは、掘削前の状況について用いられたものと同様である。</p> <p>② 解析結果</p> <p>モデル IV は、掘削前のモデル III を基本に、先導坑の断面の透水係数を <math>K = 1</math> に、また、坑内の内壁を大気圧境界として予測した。予測結果は表-4, 5 に示すとおり、水位低下量 (<math>\Delta H</math>) は 30 倍もの過大評価となるとともに、トンネル内への地下水流入量も 1 オーダー以上の過大評価となった。</p> <p>こうした状況の原因として、掘削による応力解放に伴う透水性の変化が検討されたが否定された。また、揚水試験の実測値もほとんど変化しなかったことから、坑壁の表面付近 (1 m) に透水性を増す負のスキンと透水性を減ずる正のスキンの領域が示唆された（図-9, 表-6）。モデル V は、モデル IV で想定したスキンゾーンを加えたモデルで、坑壁の天井、側壁、床部に 4 層の要素を加えた以外はモデル III と同一である。モデル V は 3 つのサブモデルからなっており、各ケースでスキンゾーンの透水性を変化させて、定常状態の水位の低下量と坑壁からの地下水流入量について実測値との比較を行った。（表-4, 5）。その結果、モデル V の 3 (8 F-3) で水位低下率、流入量ともに再現性が最も高まった。しかし、流入量の坑壁での分布には不一致がみられた。また、ボーリング孔による揚水試験値 (<math>Q / \Delta H</math>) では、モデル V の 3 ケースのみ実施し、実測値との差が 30 %以内で再現できた。</p>
	境界条件	境界条件の設定に際しては、図-7 より、上端面は水平距離 80 m につき 47 m の急勾配の等水頭境界が、南側の鉛直面と下端面には地質条件に基づいて不透水境界が、さらに遠隔の北側鉛直面は、それ以遠の亀裂の広がりがわかつていないという理由で等水頭境界が適用されている。		
	水物理性	坑道掘削前の透水性は、1986 年 10 月 16 日の値で、表-1 に示すとおり、 $3.83 \sim 0.02 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ の範囲である。		
解析結果	解析は坑道掘削前と掘削後の水理状況のシミュレーションに区分される。		検証手法	<p>Room209 の亀裂を対象とした水理モデルが利用しうるあらゆる情報を取り入れて修正され、坑道掘削前のデータにより較正された後、坑道掘削後の水理応答に関する実測値と予測値の不一致に関する解析に用いられた。</p> <p>掘削前の最終的なモデルでは定常状態の水頭値の分布が実測値の 5 %以内に、モデルを用いた揚水試験では (<math>Q / \Delta H</math>) 値が実測値の 30 %以内の精度で再現できた。これによりモデルの幾何形状、境界条件（上下、側方境界）、透水性パラメータの妥当性が評価された。</p> <p>掘削前の評価モデルによって坑道掘削による水理応答を予測した結果、水頭の水位低下量で実測値の 30 倍以上、地下水の流入量で 1 オーダー以上の過大評価となった。この原因として、応力解放による亀裂の間隙が広がるかを検討したが、高い剛性が作用していること、また、揚水試験の実測値がほとんど変化しないことから、別の要因として、壁面の表面付近に透水性を左右するスキンゾーンの存在が想定された。スキンを想定したモデルにより、地下水位低下量と坑内への地下水流入量の再現性が高まった。</p> <p>スキン効果として、① 掘削による亀裂への岩屑の混入（目詰まり）、② 一時的な部分的な不飽和の形成、③ 坑道床部における爆薬の影響が示唆された。④ よって、必ずしも力学と水理学の複合モデルを考慮しなくても、亀裂に存在しそうな現象を 1 つのスキンというパラメータでまとめることが可能と判断された。</p>
	<p>(1) 掘削前の水理状況シミュレーション</p> <p>① 概要</p> <p>ここでは、Room209 の掘削が開始される前の亀裂内部の水理状況を把握するため、3 つのモデルケースによって乱されていない定常状態の水頭分布の計算と、ボーリング孔における多数の揚水試験のシミュレーションが行われた。3 つのモデルの設定条件は、幾何形状及び境界条件を一定とし、亀裂の透水性を変動パラメータとしていることである。</p> <p>揚水試験によるシミュレーションとは、坑道掘削に先がけて実施されたボーリング孔における揚水試験の実測値とモデル計算値との比較から各ボーリング孔付近の透水性の妥当性を評価しようとするもので、モデル計算では 3 つの異なる水位降下 (<math>\Delta H = 2.5 \text{ m}, 10 \text{ m}</math>) での標準化した流量の形 (<math>Q / \Delta H</math>) で表している。</p> <p>② 解析結果</p> <p>モデル I ~ III の計算結果は表-2, 3 に示すとおりであり、定常状態での水頭値と、揚水試験値について計算した。</p>			

施設名 URL (3)

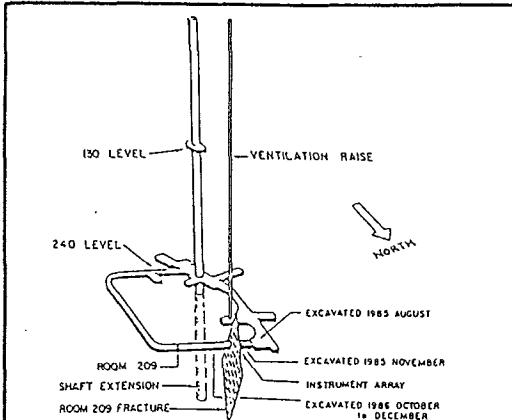


図-1 209号室亀裂を表す立体図

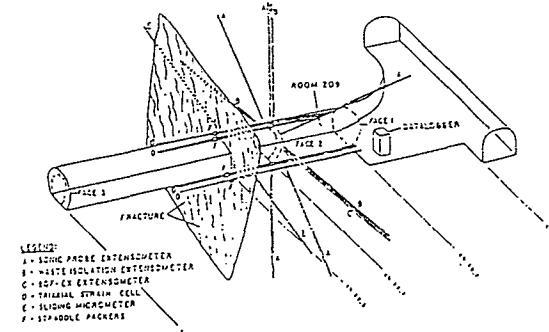


図-2 209号室亀裂と測器の配置

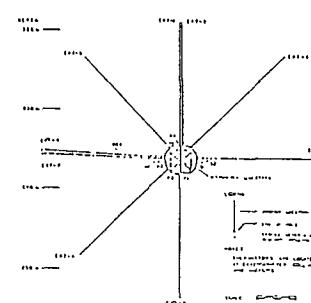


図-3 209号室の鉛直断面に環状に配置されたボーリング孔

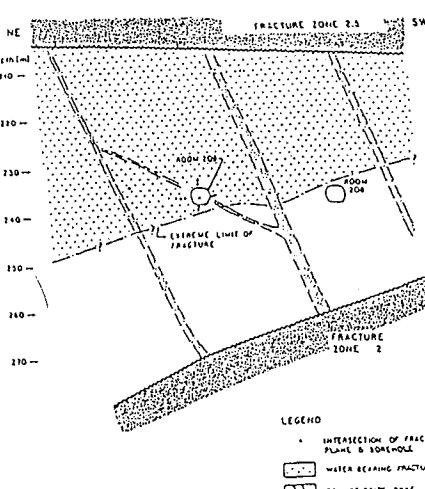


図-4 209号室亀裂とその周辺の地質概念モデル(Everitt (Langら); 1988c).

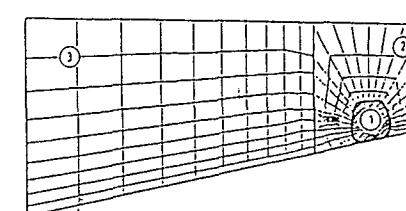


図-5 修正された209号室亀裂のモデルで用いた岩盤の透水性区分  
1トンネルの範囲, 2近傍, 3遠隔部

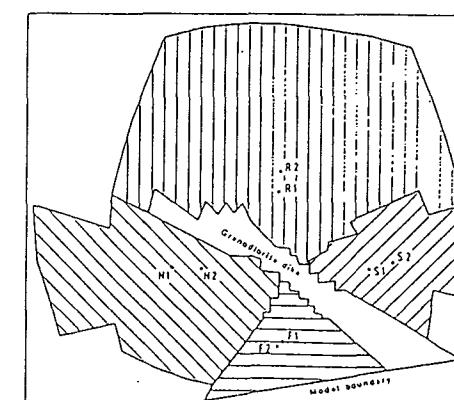


図-6 トンネル部分の詳細図(I)先導坑の縁辺付近の4組のボーリング孔の  
対の影響が予想される範囲を示す。

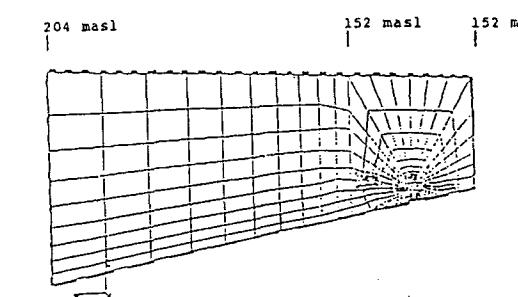


図-7 209号室亀裂の水理モデルに適用した境界条件  
---  $Q = 0$       ...  $\phi = \text{一定}$

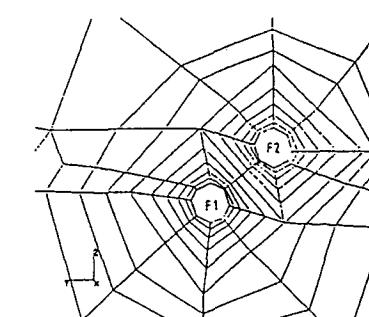


図-8 ボーリング孔F1, F2に関するメッシュ分割  
ボーリング孔の直径は 0.096m

表-1 堀削前のシミュレーションに用いた岩盤の透水性(APPENDIX1)

Model sub region	Permeability $k$ ( $\times 10^{-9} \text{ m}^2$ )		
	FRACT8A	FRACT8B	FRACT8C
Far field	1.0000	1.0000	1.0000
Near field	2.1000	3.8300	3.8300
R1/R2 infl. area	0.9400	0.9400	0.9400
N1/N2 infl. area	0.3500	0.3500	0.3500
F1/F2 infl. area	0.0340	0.0340	0.0284
S1/S2 infl. area	0.0510	0.0510	0.0421
Granodiorite	0.0200	0.0200	0.0200

表-2 各ボーリング地点において、モデルI～IIIによって計算した定常状態の水頭と  
対応する実測値

Borehole	Hydraulic head (masl)*			
	In-situ measured	Calculated FRACT8A	Calculated FRACT8B	Calculated FRACT8C
OC1	156.2	157.9	155.1	155.1
N1	150.5	157.2	154.8	154.8
N2	153.0	157.2	154.8	154.8
F1	147.1	156.9	154.6	154.6
F2	152.1	157.0	154.6	154.6
R1	155.1	155.0	153.5	153.5
R2	153.7	155.0	153.5	153.5
S1	152.7	154.5	153.2	153.2
S2	149.3	154.3	153.1	153.1

\*) corrected to zero pressure at the land surface.

表-3 堀削前の揚水試験に関する実測値と計算結果(APPENDIX2)

Borehole	Normalized flow rate $Q/\Delta H$ ( $\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )			
	In-situ	FRACT8A	FRACT8B	FRACT8C
OC1A	2400.0	890.0	1880.0	1880.0
N1	168.0	117.0	145.0	145.0
N2	168.0	125.0	132.0	132.0
F1	8.7	5.0	6.1	5.0
F2	2.2	6.2	6.4	5.1
R1	760.0	500.0	560.0	562.0
R2	675.0	405.0	576.0	576.0
S1	5.1	11.9	11.9	9.1
S2	13.0	11.7	11.7	8.9

表-4 209号室亀裂を先導坑が横切ることによる水位低下量の計算値と実測値

Bore-hole	Steady state head drop $\Delta H$ (metres)				
	In-situ*	FRACT8E	FRACT8F:1	FRACT8F:2	FRACT8F:3
OC1	0.8	9.7	3.7	3.5	1.2
N1	4.0	38.4	26.0	25.7	7.7
N2	3.9	55.4	37.7	33.6	10.6
F1	104.0	86.4	99.0	99.5	97.8
F2	99.4	82.8	97.2	97.1	94.0
R1	2.5	64.1	3.3	2.0	0.7
R2	2.1	53.4	3.1	2.0	0.7
S1	10.7	57.6	25.6	12.2	11.4
S2	4.6	41.8	14.7	7.0	7.0

\*) Values deduced from revised pressure drops compiled by B. Nakka (May 25 1988) based on data in Lang et al (1986c).

表-5 209号室亀裂に沿って先導坑に流入する地下水量の実測値と計算値

Portion of trace	Inflow to the pilot tunnel (litres/min)				
	In-situ	FRACT8E	FRACT8F:1	FRACT8F:2	FRACT8F:3
Roof	0.1	3.72	0.07	0.002	0.002
Floor	0.1*)	0.09	0.69	0.701	0.302
S wall	0.00	0.02	0.03	0.001	0.001
N wall	0.1*)	0.70	0.03	0.001	0.002
Sum total	0.3	4.5	0.8	0.7	0.3

\*) The total contribution along the northernmost part of the floor and the north wall is estimated at 0.2 l/min (Kozak in Lang et al 1988c).

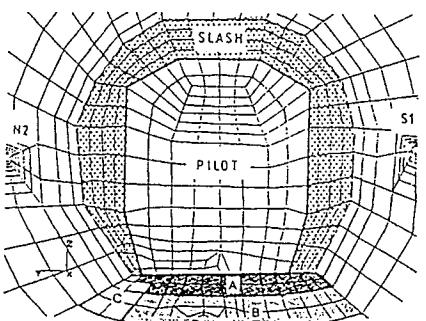


図-9 透水性を変化させた水平坑道の壁面状況

表-6 スキンの発達が想定される先導坑周辺部の透水性 (図3.2.28参照)

Area	Permeability k (* $10^{-8} \text{ m}^2$ )		
	FRACT8F:1	FRACT8F:2	FRACT8F:3
Slash	0.002	0.0002	0.0002
Floor A	0.50	0.50	0.50
Floor B	0.20	0.20	0.20
Floor C	-	-	0.002

表-7 先導坑が掘削された場合の揚水試験に関する実測値と計算結果

Borehole	Normalized flowrate ( $Q/\ell H$ ) (* $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )		
	In-situ*)	FRACT8E	FRACT8F:3
OC1	2340.0	1950.0	1890.0
N1	173.0	160.0	147.0
N2	171.0	182.0	132.0
F1	-	5.7	8.2
F2	-	5.6	7.2
R1	528.0	692.0	540.0
R2	583.0	848.0	568.0
S1	-	9.0	8.6
S2	6.9	9.5	8.7

\*) Average of nine tests following the intercept of the fracture by the pilot tunnel during the period Oct 27-Nov 19 1986, cf. Table 2.1.

施設名	Yucca Mt. (1)	土被り m		調査研究の目的	ここで行う解析の目的は、ユッカ・マウンテンに処分場がある場合に飽和帯で起こり得る地下水位の変動などの壊滅的状況の把握を行なうためのものである。 広域モデルと準広域モデルの2つの解析を行った。広域モデルにおいては、降水量、涵養量の増加に伴う状況と透水性の変化に伴う状況の変化を評価する。準広域モデルにおいては、岩脈の存在に伴う地下水の流动方向、地下水位の上昇状況を評価する。
地下構造物の概要					
地形・地質	[地形] ユッカ・マウンテンは、ベースン・アンド・レンジのグレート・ベースン盆地の南部にあり、北向きの断層地塊の主要グループを構成する。北部の標高は約5,000ftで、東側のジャッカス平地と1,200ft、西側のクレーター平地と1,000ftを越える標高差がある。 [地質] 約800～1,600万年前に起こった噴火で形成された6,500ft以上の火山岩で、熔結凝灰岩と非熔結凝灰岩からなる。			調査項目と調査手法  備考	
地質構造					
水理学環的境	サイト付近の年降水量は6インチで、このうち地盤に浸透するのは0.02インチ以下とされている。 地下水位は地表下2,500ftにあり、処分場予定地は地下水位の上、すなわち不飽和帯に位置する。処分場予定位置から地下水位面までの地下水の移動時間は9,000～80,000年と見積もられている。 飽和帯の地下水は概ね南西方向に流れ、デスヴァレー付近で地表に流出する可能性がある。				
地球化環学境的	非熔結凝灰岩の特性作用により、アクチニド系放射性核種は溶解せず、沈殿する可能性がある。 また、亀裂中の沸石や粘土などの鉱物による吸着によって放射性核種の移動速度が遅くなる可能性もある。				

## 施設名 Yucca Mt. (1)

解析手法	コード名 P OR FLOW コードの内容 有限差分法解析コード	広域モデル 通常降水量による涵養状況での水頭分布を図-3に示す。ユッカ・マウンテンの北と北東に大きな動水勾配があり、既往の調査結果と類似しているが、値に対するキャリブレーションは行われていない。 現在の基底流量の乗数を涵養量の増加を表わす値とし、ユッカ・マウンテンと5km東側のForty Mile Washの節点におけるこの値と地下水位上昇の関係は、図-4に示すとおりで線形に増加する。降水量が100%増加すると、涵養量の増加を表す値は約15となり、ユッカ・マウンテンの地下水位は約65m上昇する。また、Forty Mile Washの小さな涵養量の増加を表わす値は、ユッカ・マウンテンの大きな水位上昇となっていることもわかった。 また、ユッカ・マウンテンの北と北東の動水勾配の大きな原因として、大きな透水性の中に小さな透水性の部分(図-2のゾーン①と②)が存在しているためと考えられた。このため、この部分の透水係数値を大きくした場合の地下水位の状況を図-5に示す。なお、横軸の値は表-1のゾーン①と②の透水係数に対する乗数で、この値を1,000とした時は両部分の透水係数がほぼゾーン⑦と同じになり、この場合Forty Mile Washの地下水位の上昇は200m以上で、ユッカ・マウンテン付近の大きな動水勾配はなくなつた。
	広域モデル 図-1に示すように、約250×250kmの領域を対象とし、18,161要素からなる。要素一辺の大きさは2.5kmで、その面積は6.25km <sup>2</sup> 。 図-2に示すように、領域内は透水性から8物性の領域に区分されている。 準広域モデル 50×50kmの領域を対象とし、18,225要素からなる。要素の一辺の大きさは領域中心の100mから周縁部の2.5kmまである。 両モデルでの解析は準3次元解析と思われる。	
解析モデル	広域モデル 周辺境界は、図-1に示すように不透水境界と定水頭境界からなる。 降雨涵養は、図-1に示す部分に対し設定。 準広域モデル 周辺境界は広域モデルで得られた水頭を設定。	解析結果 準広域モデル 非常に低透水で、長さ約4kmの鉛直の単一岩脈の影響についての検討を行った。 岩脈の走向がN15°Eの場合のユッカ・マウンテンの流速と流動方向を図-6に示す。この付近に岩脈がない場合の地下水は原則的に東か南東に流れるが、岩脈の左側では南に向かって流れ、岩脈の下端付近で北に向かって流れしていくものもある。 図中の丸印は地下水位が一番上昇した場所で、79mであった。岩脈の走向を変えた場合の最大水位上昇を図-7に示した。この図から、岩脈の走向が概ね北から北東の場合に最大水位上昇となることがわかる。 また、上記の岩脈と、これに直交する岩脈がある場合についても検討した。流速と流動方向を図-8に示す。2つの岩脈の影響で渦みができる、最大水位上昇は103.4mとなった。
解析条件		検証手法 現状の解析については、動水勾配の状況が実測値と類似することを確認しているが、地下水位などの値そのものについては検証がなされていない。
水理物性	基本となる8物性の透水係数を表-1に示す。	

施設名 Yucca Mt. (1)

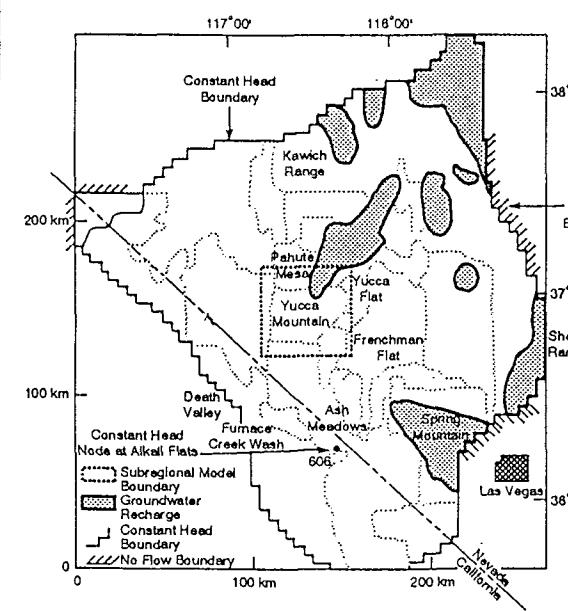


図-1 Regional and subregional models for PORFLOW depicting location of recharge and constant head discharge areas (modified from Rice)<sup>4</sup>

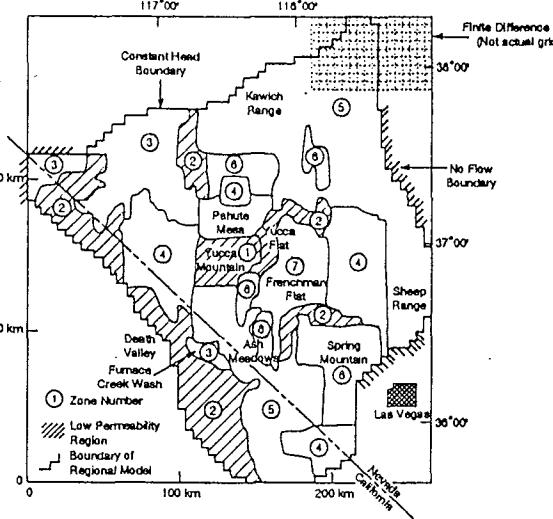


図-2 Regional model for PORFLOW depicting boundary conditions and various hydraulic conductivity zones (modified from Rice)<sup>4</sup>

表-1 Hydraulic Conductivities for the Model

Zone Number	Hydraulic Conductivity (m/sec)
1	5.80E-08
2	6.34E-07
3	3.49E-06
4	8.69E-06
5	3.47E-05
6	1.00E-04
7	6.00E-04
8	3.50E-03

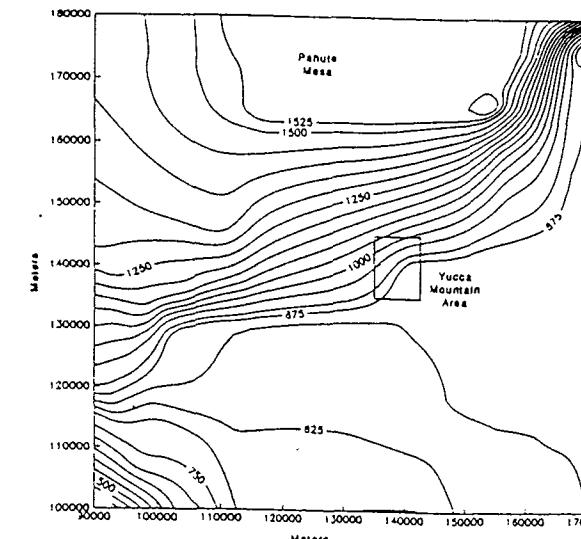


図-3 Simulated hydraulic head distribution in the vicinity of Yucca Mountain under assumed present-day conditions

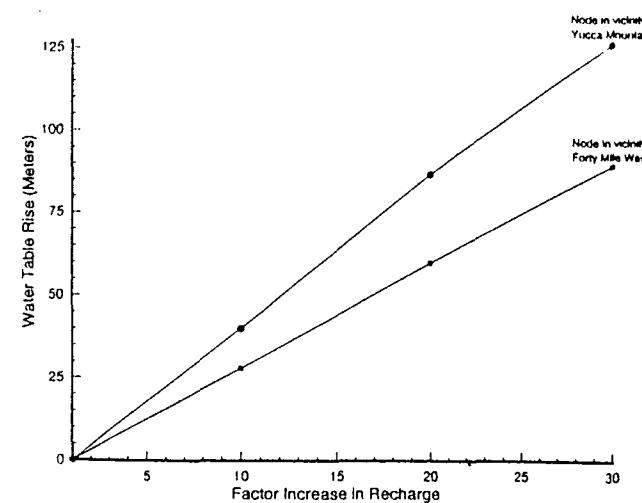


図-4 Water table rise at Yucca Mountain and Forty Mile Wash as a function of recharge rate

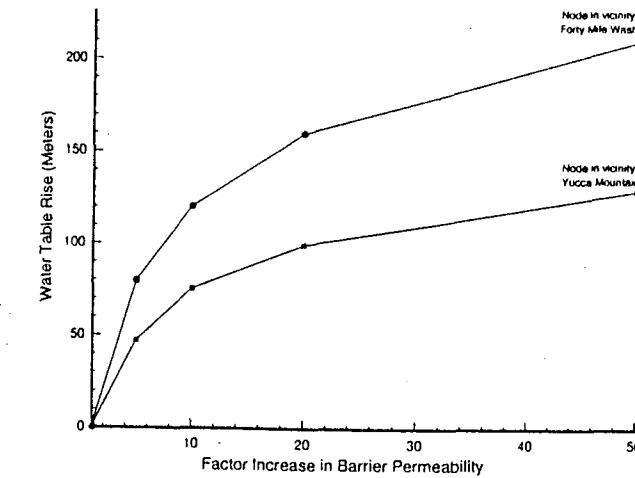


図-5 Water table rise at Yucca Mountain and Forty Mile Wash as a result of increasing the permeability through the barriers north and northeast of the site.

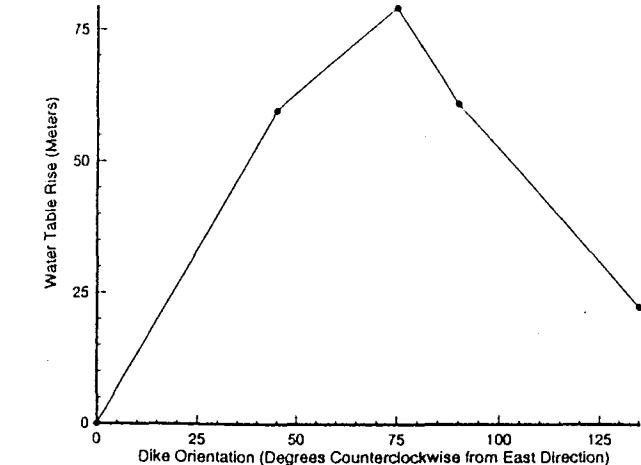


図-7 Maximum water table rise at potential repository site as a function of dike orientation

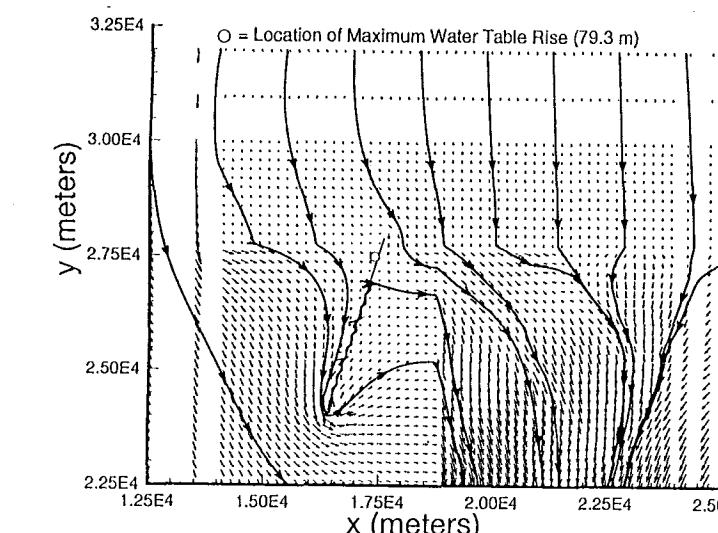


図-6 Impact of the intrusion of a single volcanic dike oriented N15°E on the groundwater flow field directly below the repository. The straight line indicates the location of the dike.

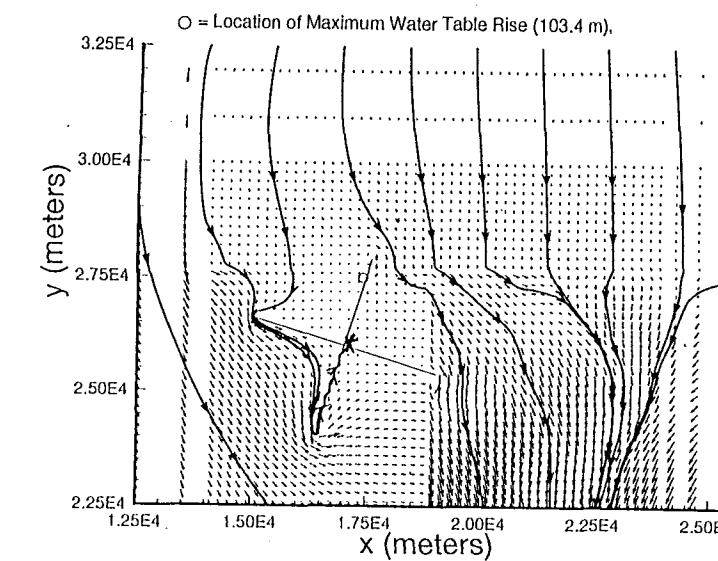


図-8 Impact of the intrusion of multiple volcanic dikes on the groundwater flow field directly below the repository. The straight lines indicate the location of the dikes.

施設名	Yucca Mt. (2)	土被り	m	調査研究の目的	ユッカ・マウンテンの処分場予定地を含む不飽和帯を対象に、境界条件を変えた3種類の解析を行い、その差異から影響を把握し、モデル化にあたっての考察を実施する。
地下構造物の概要	ユッカ・マウンテンサイトは、現在米国における商業用原子炉から排出される使用済み核燃料の唯一の処分場予定地である。 処分場は1,200~1,300万年前に噴火したトポパー・スプリング層と呼ばれる1,000ft厚の不飽和凝灰岩中に建設される予定で、諸外国で計画中の処分場とは条件が異なっている。				
地形・地質	[地 形] ユッカ・マウンテンは、ベースン・アンド・レンジのグレート・ベースン盆地の南部にあり、北向きの断層地塊の主要グループを構成する。北部の標高は約5,000ftで、東側のジャッカス平地と1,200ft、西側のクレーター平地と1,00ftを越える標高差がある。 [地 質] 約800~1,600万年前に起こった噴火で形成された6,500ft以上の火山岩で、熔結凝灰岩と非熔結凝灰岩からなる。			調査項目と調査手法	地質データと水理地質データ 調査ボーリング4孔
地質構造	熔結凝灰岩と非熔結凝灰岩がゆるやかに傾斜し、成層している。				
水理学環的境	サイト付近の年降水量は6インチで、このうち地盤に浸透するのは0.02インチ以下とされている。 地下水位は地表下2,500ftにあり、処分場予定地は地下水位の上、すなわち不飽和帯に位置する。処分場予定位置から地下水位面までの地下水の移動時間は9,000~80,000年と見積もられている。 飽和帯の地下水は概ね南西方向に流れ、デスヴァレー付近で地表に流出する可能性がある。			備考	
地球化環学的境	非熔結凝灰岩の特性作用により、アクチニド系放射性核種は溶解せず、沈殿する可能性がある。 また、亀裂中の沸石や粘土などの鉱物による吸着によって放射性核種の移動速度が遅くなる可能性もある。				

解析手法	コード名	SUMO	地下水流动解析 Case 1 定常状態の流速分布を図-2に示す。透水係数が1オーダー低いトポペースプリング非熔結層(Tpt-TN)周辺で流れの向きを変える。流速の多くは $10^{-6}$ m/yrであるが、 $x=1,000\sim1,500$ mの鉛直方向と、 $x=1,500\sim2,000$ mのTpt-TNの上に1オーダー大きな流速が存在する。流速の増加はTpt-TN上への地下水のビルドアップによる。流れの方向はモデルの要素や層序に影響され、ゆるやかに傾斜する地層を階段状にモデル化することには問題があるかもしれない。 相対飽和度を図-3に示す。Tpt-TN上の地下水のビルドアップを示しており、処分場南東端(右側)で水頭825m、北西端(左側)で630mである。ただし、この水頭値についてはvan Genuchtenモデルでの小さな飽和度の変化で大きな水頭変化を与えるなど不可解である。 Case 2 流速分布を図-4に示す。Case 1に比べて大きな差はないが、唯一異なるのは右側境界付近に領域外への流れが存在することである。 飽和度についても、図-5に示すように右側境界沿いの値の盛り上がりがわずかに小さくなっている。 Case 3 流速分布を図-6に示す。鉛直成分が卓越し、Tpt-TNの影響が小さくなっている。 $x=500\sim1,500$ で $10^{-4}$ m/yrのオーダーで、それ以外は $10^{-5}$ m/yrである 飽和度については、図-7に示すように領域全体が飽和状態に近いものとなっている。処分場付近では、右端で95%、左端で88%とわずかな水圧勾配が残っている。 物質移行解析 粒子追跡アルゴリズムによって計算した処分場中心の標高(962.5m)から地下水面までの到達時間を表-1に示す。なお、表-1中のx座標が水平方向の位置を示す。この結果、以下の2つの事項が明らかになった。 <ul style="list-style-type: none"><li>○ 汚染物質の移行が速い部分がTpt-TNの上に存在する可能性がある。</li><li>○ 処分場の飽和度を変えることによって、物質移行の状況が大きく変わること可能性がある。</li></ul> テクネチウム99で計算した10万年後濃度分布を図-8(Case 1)、図-9(Case 3)に示す。Case 3の方がCase 1に比べて移動が大きく、標高875mのTpt-TNとトポペースプリング熔結層(Tpt-TM)の境界における濃度は、Case 3が $10 \text{ Ci/m}^3$ であるのに対し、Case 1は $0.03 \text{ Ci/m}^3$ である。
	解析モデル	図-1に示すように、水平方向は処分場予定地を中心とする3,000m、鉛直方向は地下水位(EL730m)～予定地の50m上方(EL1,020m)の領域とし、4つの水理地質ユニットからなる。節点は水平方向92点、鉛直方向77点の7,084点である。	
解析条件	境界条件	Case 1 上部境界：定流量境界で $0.01 \text{ mm/yr}$ 下方境界：Dirichlet境界(水頭固定境界、地下水面で0) 側方境界：Neuman境界(不透水境界) Case 2 上部境界：下方境界はCase 1と同じ 側方境界：右側が水頭固定境界で左側は不透水境界 Case 3 上部境界：定流量境界で $0.01 \text{ mm/yr}$ 下方境界：側方境界はCase 1と同じ	地下水流动と物質移行についてのモデル問題であり、検証は行われていない。
	物理物性	有効間隙率は全間隙率×(1-飽和度) 分子拡散係数は $3.15 \times 10^{-3} \text{ m/yr}$ 縦方向分散は最も小さい要素の厚さの10%とし、横方向分散は縦方向分散の10%	検証手法

施設名 Yucca Mt. (2)

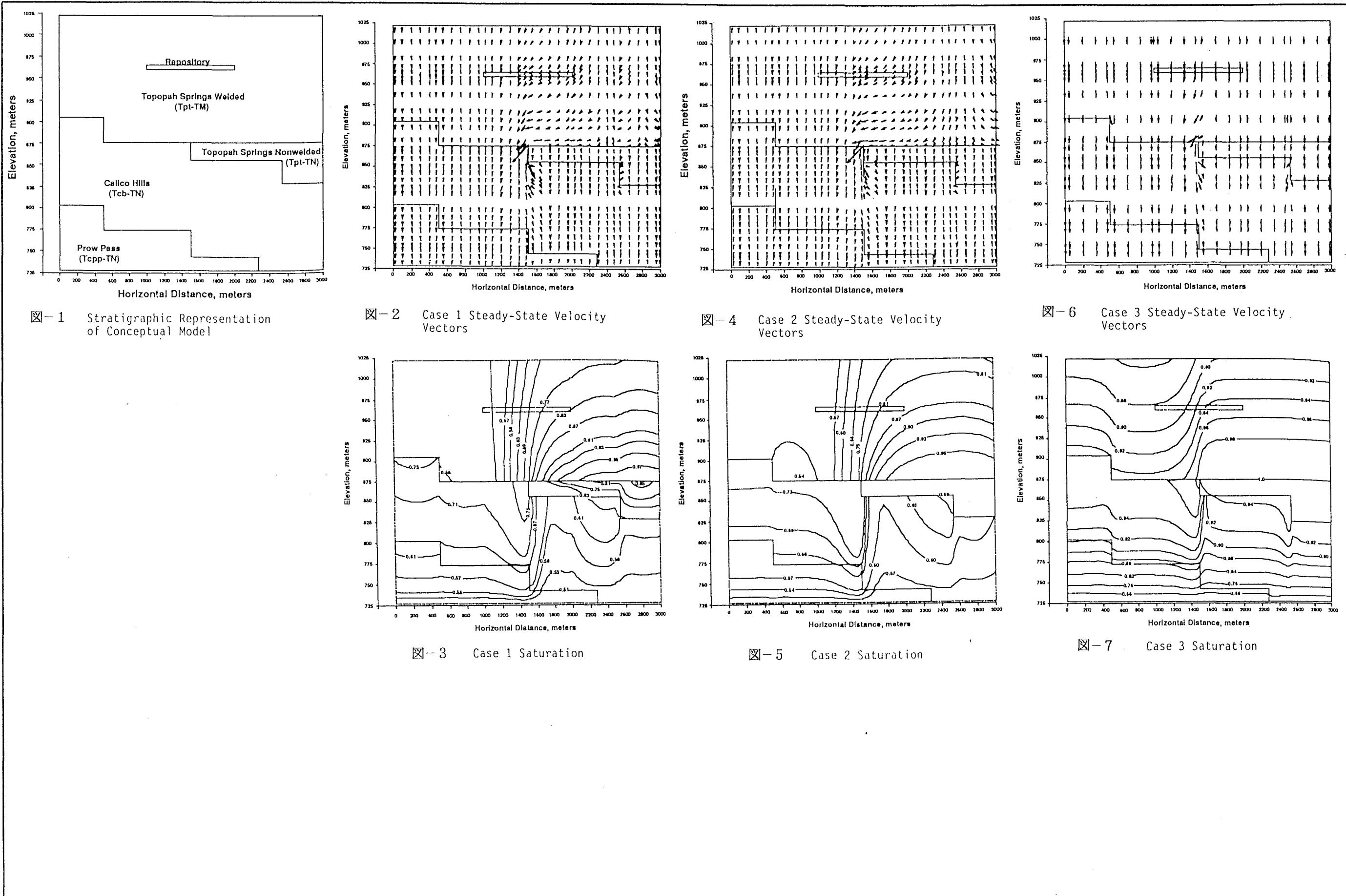


表-1, Unsaturated Zone Travel Times (yr)

	X-Coordinate (m)				
	0	500	1000	1500	2000
Case 1	3.85E6	3.23E6	3.22E6	1.99E6	1.53E6
Case 2	3.23E6	2.75E6	2.77E6	1.56E6	1.12E7
Case 3	4.42E5	3.87E5	3.92E5	3.12E5	4.75E5

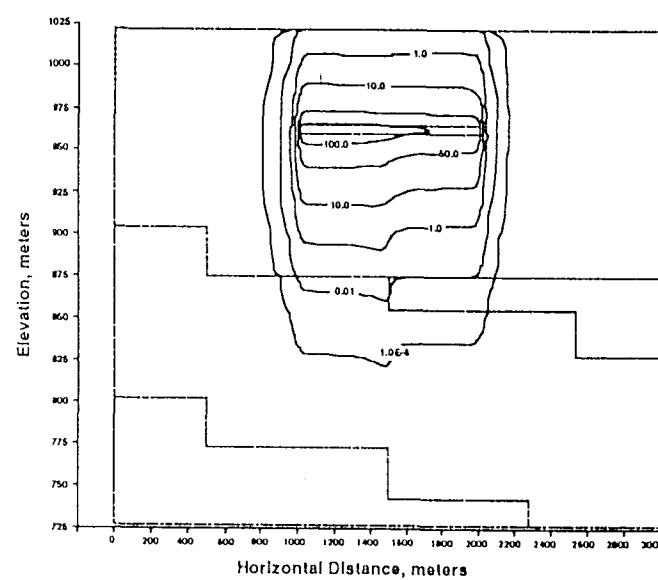


図-8 Case 1 Concentration of  $^{99}\text{Tc}$  at  
100,000 yr ( $\text{Ci}/\text{m}^3$ )

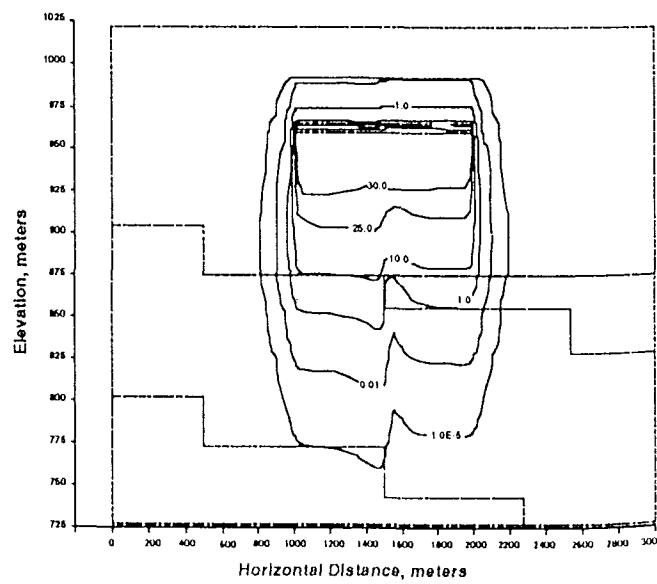


図-9 Case 3 Concentration of  $^{99}\text{Tc}$  at  
100,000 yr ( $\text{Ci}/\text{m}^3$ )

施設名	Yucca Mt. (3)	土被り m		○ 調査坑 (E S-1, E S-2) が周辺の水分分布にどのような影響を与えるのかの評価 ○ 断層周辺の宙水の存在状況を検出する可能性の評価
地下構造物の概要	ユッカ・マウンテンサイトは、現在米国における商業用原子炉から排出される使用済み核燃料の唯一の処分場予定地である。 処分場は1,200～1,300万年前に噴火したトポパー・スプリング層と呼ばれる1,000ft厚の不飽和凝灰岩中に建設される予定で、諸外国で計画中の処分場とは条件が異なっている。 ここには図-1に示すように2本の立坑 (E S-1, E S-2) が計画されている。		調査研究の目的	
地形・地質	[地 形] ユッカ・マウンテンは、ベースン・アンド・レンジのグレート・ベースン盆地の南部にあり、北向きの断層地塊の主要グループを構成する。北部の標高は約5,000ftで、東側のジャッカス平地と1,200ft、西側のクレーター平地と1,00ftを越える標高差がある。 [地 質] 約800～1,600万年前に起こった噴火で形成された6,500ft以上の火山岩で、熔結凝灰岩と非熔結凝灰岩からなる。		調査項目と調査手法	
地質構造	地層は5～7°の傾斜角で東に傾斜している。 処分場予定地内には、急傾斜の断層 (図-1のGhost Dance断層など) とこれに交差する数本の正断層が存在する。		備考	
水理学環的境	サイト付近の年降水量は6インチで、このうち地盤に浸透するのは0.02インチ以下とされている。 地下水位は地表下2,500ftにあり、処分場予定地は地下水位の上、すなわち不飽和帯に位置する。処分場予定位置から地下水位面までの地下水の移動時間は9,000～80,000年と見積もられている。 飽和帯の地下水は概ね南西方向に流れ、デスヴァレー付近で地表に流出する可能性がある。			
地球化環学境的	非熔結凝灰岩の特性作用により、アクチニド系放射性核種は溶解せず、沈殿する可能性がある。 また、亀裂中の沸石や粘土などの鉱物による吸着によって放射性核種の移動速度が遅くなる可能性もある。			

解 析 手 法	コード名	P O R F L O - 3	解析結果	3次元モデル 定常解析結果から、P T n と T S w 1 間の境界より上部に水平方向の流れの可能性がある（図-6）。非定常解析結果からは T C w でフラクチャーフローの発生を示しており、立坑周辺のゆるみ域と Ghost Dance断層も局所的に飽和して、フラクチャーフローが発生することを示している。T S w 1 と T S w 2 - 3 では相対飽和度が0.98以下で、地下水はフラクチャー中では動かないことを示している。 図-7, 8 に示すように、処分場予定地より上では立坑とゆるみ域によると思われる流動場の乱れが生じている。また、この図には境界条件、断層の影響と、西側から涵養されていることが示されている。 なお、図-9, 10 に示すように、処分場予定地の標高では立坑とゆるみ域による影響は認められない。また、表-1 に示した初期飽和度は図-10 の値より小さく、実際の涵養量は4.0mm/yrより小さいものと思われる。 2次元モデル 図-11 に Ghost Dance断層を境に P T n と T S w 1 が接する部分の飽和度を示す。200年までの結果を示したが、T S w 1 の飽和度は宙水が形成されるほど高くないことを示した。
	コードの内容	有限差分法による不完全飽和の多孔質あるいは亀裂媒体を対象とする地下水流动-熱伝導-物質移行解析コードである。		
解析モデル	3次元モデル 領域は東西方向615m、南北方向300m、鉛直方向は地下水表面から上の不飽和帶530mを対象として（図-2参照）、5水理地質ユニットに分割。西側境界近くに存在するGhost Dance断層は鉛直の1m幅で地表から地下水表面の間でモデル化。調査立坑（E S - 1, E S - 2）は地表から約310m深度まで鉛直にモデル化。調査坑道は深度310mで調査立坑と交わる水平要素でモデル化。立坑と坑道は直径4.4mで、周辺1mにはゆるみ域（MP Zゾーン）を仮定。節点数は25,056。 2次元モデル（処分場スケールモデル） 図-1 に示す北西-南東の4,000mの幅、地表から地下水表面までの668mの高さを対象として（図-3参照）、6水理地質ユニットに分割。Ghost Dance断層は1m幅で地表から地下水表面までの間で傾斜角約70°で、節点数は3,888。	解析結果	2次元モデル 図-11 に Ghost Dance断層を境に P T n と T S w 1 が接する部分の飽和度を示す。200年までの結果を示したが、T S w 1 の飽和度は宙水が形成されるほど高くないことを示した。	
	3次元モデル 地表境界は流量境界とし、4ヶ月間は4.0mm/yr、8ヶ月間は0.0mm/yr（ゼロ流量）。 下部境界は定水頭（大気圧？）境界。 西側境界はゼロ流量境界あるいは不透水境界。 北側、南側、東側境界は涵養量4.0mm/yrで表-1 に示す飽和度から計算される初期水頭が領域の中心の水頭になるような定水頭境界。 2次元モデル 地表境界には20.0mm/yrの涵養量。 下部境界は定水頭（大気圧）境界。 側方境界はゼロ流量あるいは不透水境界。		不飽和帶の地下水流动に対する評価であるが、検証は行われていない。	
解析条件	○ 亀裂性の熔結ユニット（T C w, T S w 1, T S w 2 - 3） 亀裂部と基質部の特性を合成したバルク水理特性で評価（例図-4）。 ○ 非熔結ユニット（P T n, C H n v） 岩石基質の特性で評価 ○ ゆるみ域の特性 air-entryポテンシャルについては、それぞれのユニットの基質のair-entryポテンシャルの0.5倍大きく評価。 非熔結ユニットの飽和透水係数は、基質の飽和透水係数の20倍大きな値で評価。 熔結ユニットの飽和透水係数は、堅岩の合成飽和透水係数の40~80倍大きな値で評価。 ○ 断層の特性 飽和透水係数1.0m/dで、砂の特性で評価。 ○ 立坑、坑道の特性 図-5 に示すように砂礫の特性で評価。 飽和透水係数は周辺のゆるみ域の飽和透水係数より1,000倍大きな値で評価。	検証手法		

施設名 Yucca Mt. (3)

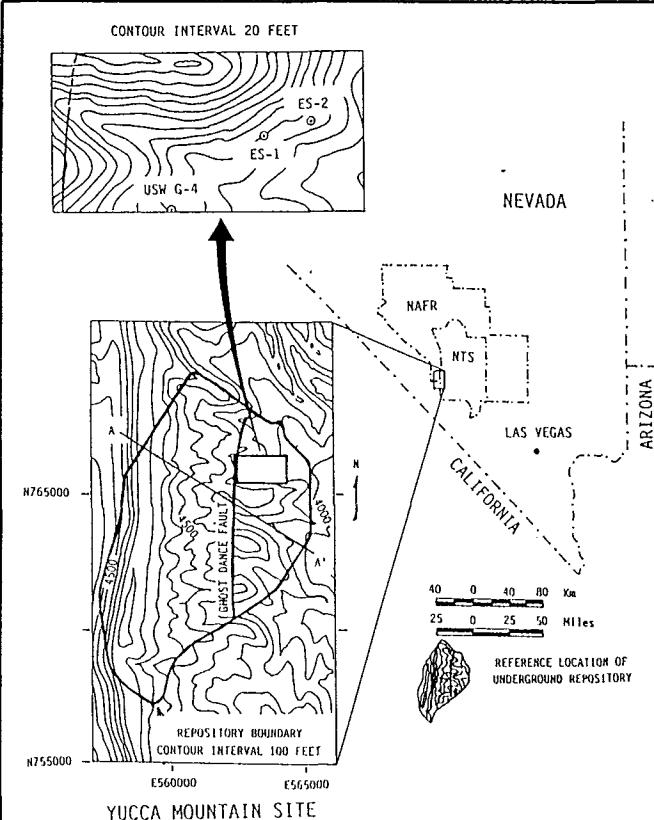


図-1 LOCATION OF PROPOSED REPOSITORY

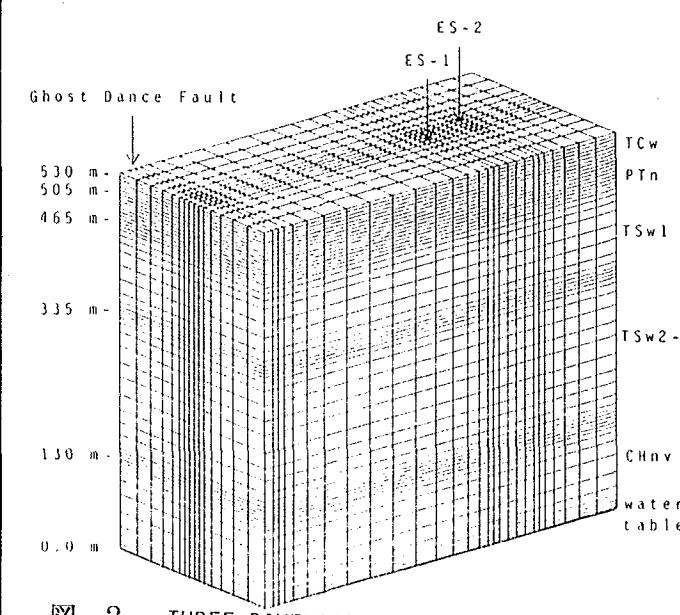


図-2 THREE-DIMENSIONAL COMPUTATIONAL GRID

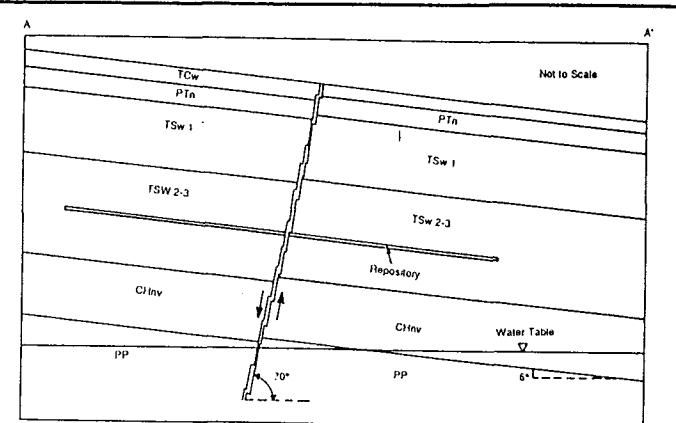


図-3 TWO-DIMENSIONAL CONCEPTUAL MODEL

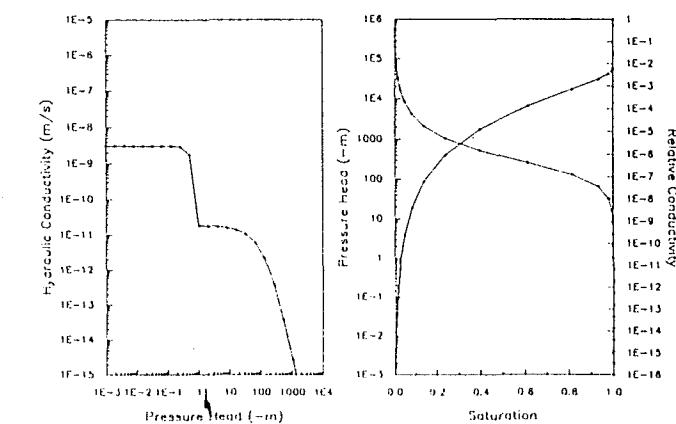


図-4 COMPOSITE HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND SATURATION CURVES FOR UNIT TSW2-3

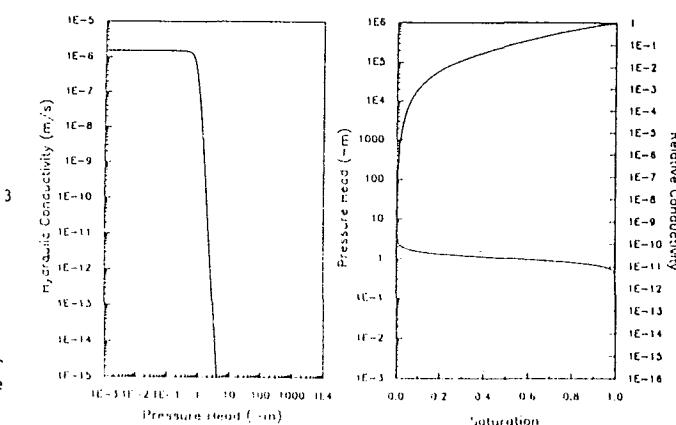


図-5 HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND SATURATION CURVES FOR SHAFTS IN UNIT TSW2-3

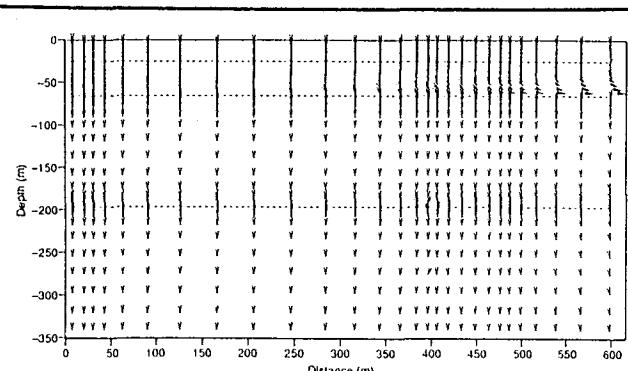


図-6 VERTICAL CROSS-SECTION OF DACY VELOCITY VECTORS FROM STEADY-STATE THREE-DIMENSIONAL MODEL SIMULATIONS

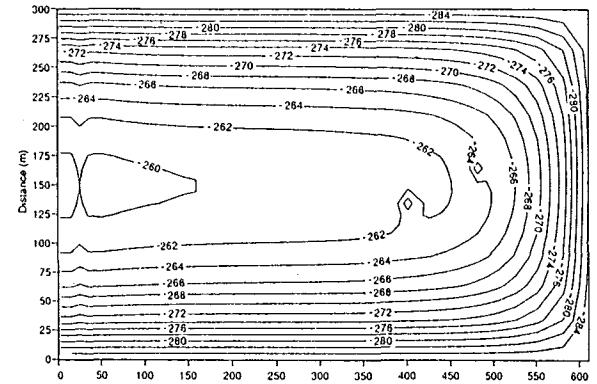


図-7 HORIZONTAL CROSS-SECTION OF PRESSURE DISTRIBUTIONS THROUGH UPPER PART OF UNIT TSW2-3 (202.5 M DEPTH)

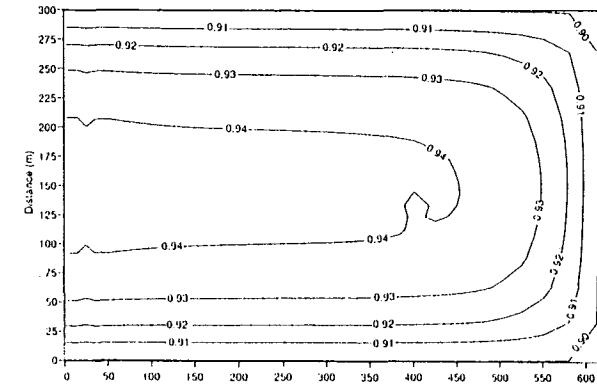


図-8 HORIZONTAL CROSS-SECTION OF RELATIVE SATURATIONS THROUGH UPPER PART OF UNIT TSW2-3 (202.5 M DEPTH)

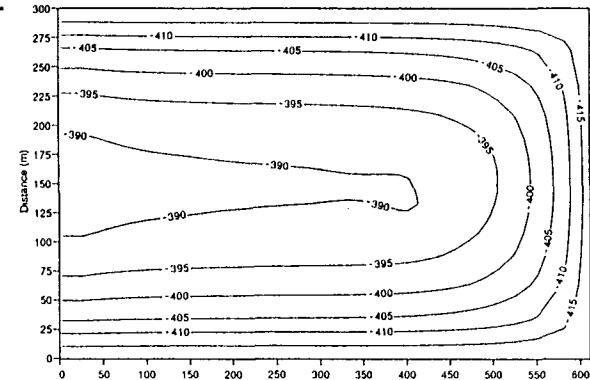


図-9 HORIZONTAL CROSS-SECTION OF PRESSURE DISTRIBUTIONS THROUGH THE PROPOSED REPOSITORY HORIZON IN UNIT TSW2-3 (310 M DEPTH)

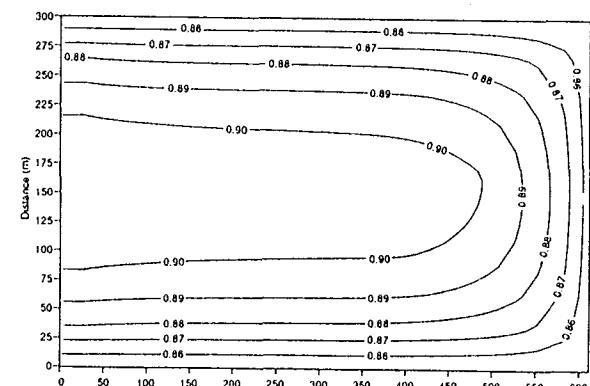


図-10 HORIZONTAL CROSS-SECTION OF RELATIVE SATURATIONS THROUGH THE PROPOSED REPOSITORY HORIZON IN UNIT TSW2-3 (310 M DEPTH)

表-1 INITIAL CONDITIONS

UNIT	AVERAGE SATURATIONS <sup>3</sup>
TCw	0.67 ( $\pm 0.23$ )
PTn	0.61 ( $\pm 0.15$ )
TSw-1	0.65 ( $\pm 0.19$ )
TSw-2-3	0.65 ( $\pm 0.19$ )
CHnv	0.90

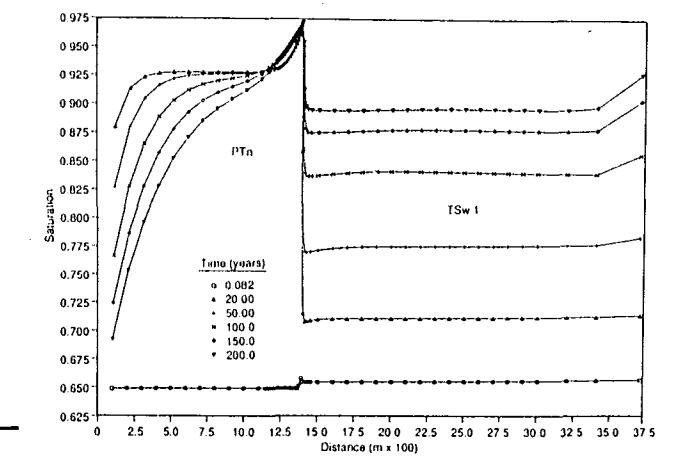


図-11 SATURATIONS ALONG HORIZONTAL LINE EXTENDING THROUGH UNITS PTN AND TSW1 ACROSS THE GHOST DANCE FAULT

施設名	Oskwood岩塩	土被り	- m	調査研究の目的	高レベル放射性廃棄物処分のためのOskwood岩盤の適応性評価のため、その周辺の堆積岩の不均質、多層性をモデル化し、広域地下水流动のシミュレーションを行う。
地下構造物の概要	アメリカ、East Texas盆地の南西に位置。 高レベル放射性廃棄物処分場候補地。				対象堆積岩の透水性評価 ○ 原位置揚水試験 30テスト ○ 室内透水試験 33サンプル
地形・地質	砂岩を主とする堆積岩。			調査項目と調査手法	
地質構造	図-1に示す東へゆるく傾斜した構造。				
水理学環的境	室内試験と解析領域周辺での揚水試験の結果から、図-2に示す透水係数分布が得られている。透水係数はバイモーダルな分布をしており、(A)透水係数 $\bar{k} = 0.002 \text{m/day}$ 、電気比抵抗 $R < 20 \Omega \cdot \text{m}$ 、(B) $\bar{k} = 3.8 \text{m/day}$ 、 $R > 20 \Omega \cdot \text{m}$ の2つに分類でき、(A)はchannel-fill sands、(B)はinterchannel sedimentsに対応する。			備考	
地球化環学的境					

解 析 手 法	コード名 TER ZAG I	表-1に示す6ケースについて解析を実施。結果は図-6~8。 ○ ケースA, B 1, B 2 : 鉛直方向の透水係数について 異方性 ( $k_v' / k_h'$ ) は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ オーダー ○ ケースB 3 : 局部的な鉛直方向の高透水領域の影響について ○ ケースC 1, C 2 : 水平方向の砂層の連続性について 地下水流動解析における地質情報の重要性の確認。
	コードの内容 ○ 3次元IFDM (Integrated Finite Difference Method) ○ 圧密を含んだ飽和-不飽和流動解析コード ○ 1~3次元問題に適用可 ○ TRUSTに非常に似ている ○ IFDメッシュジェネレーターはOGRE	
解析モデル	解析領域のメッシュを図-3, 4に示す。 平均面積: 約1,300km <sup>2</sup> (節点間距離: 1.3~7.4km) 節点数: 425点 鉛直方向: 3層に分割 (Upper, Middle, Lower), 各層ごとに各要素の等価透水係数を設定 (図-5)	解析結果
解析条件	○ 側面境界 (図-3) 不透水境界 - TR-N境界, S境界 水位固定境界 - W-NW境界, SE境界 ただし, Upper Layer (Wilcox層) では深度とともに水頭が変化。 ○ 表面境界 (鉛直方向涵養量) 上部は3層のモデルの上に半加圧層を想定し, その内部の仮想節点に観測された自由水面の水頭値を与える。 下部は不透水境界。	検証手法
水理物性	channel-fill sandsの割合と図-3のデータから, モデルの各要素の等価透水係数 ( $k_h'$ : 水平方向) を計算 (図-5)。	

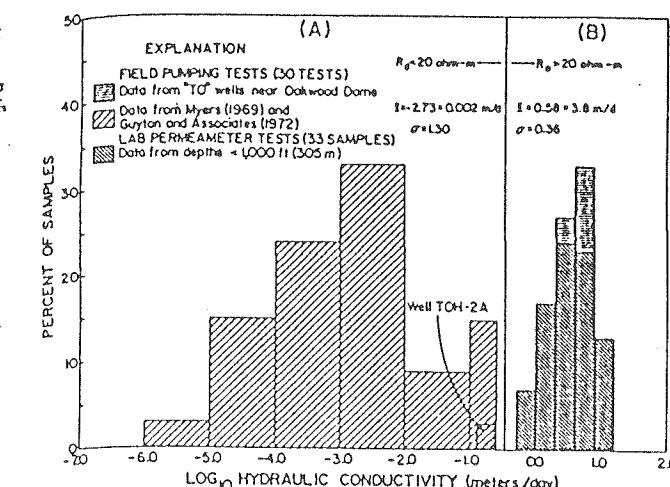
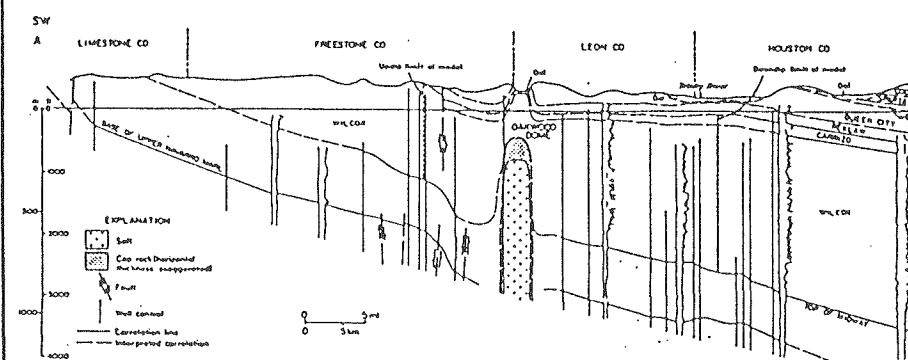


図-2 透水係数データのヒストグラム

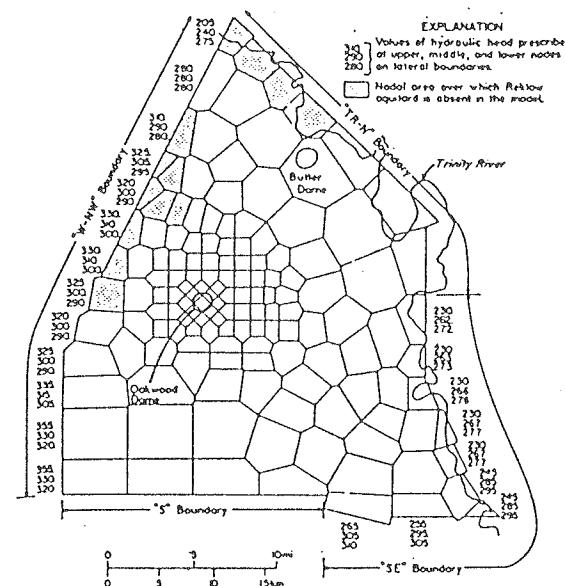


図-3 I FD メッシュ平面図

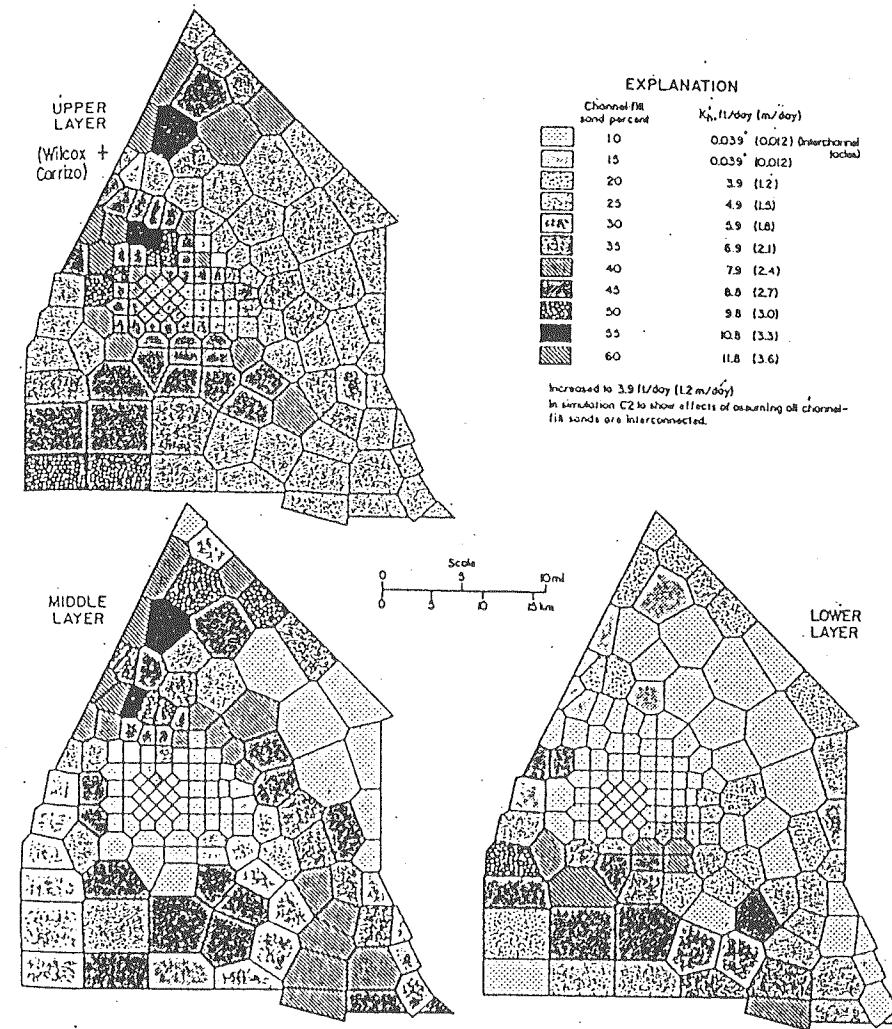


図-5 各層、各節点の透水係数値の分布

$$K_h' = (\text{channel-fill sand \%}) \times (\text{channel-fill sandsの透水係数} K)$$

表-1 解析ケース

Conditions	Simulations					
	A	B1	B2	B3	C1	C2
$K_v'/K_h' = 10^{-3}$		X				
$K_v'/K_h' = 10^{-4}$		X	X	X		
$K_v'/K_h' = 10^{-6}$			X		X	
$K_h'$ homogeneous					X	
All channel-fill sands interconnected						X
Channel-fill sands disconnected in interchannel areas	X	X	X	X		
High $K_v'$ inserted near Butler Dome (i.e., $K_v'/K_h' = 1$ )					X	

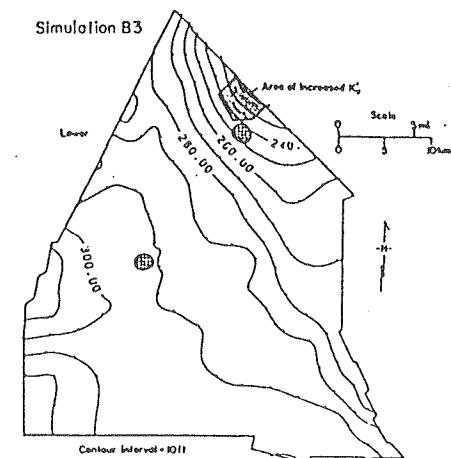


図-7 シミュレーションB 3の解析結果  
 (水頭値)

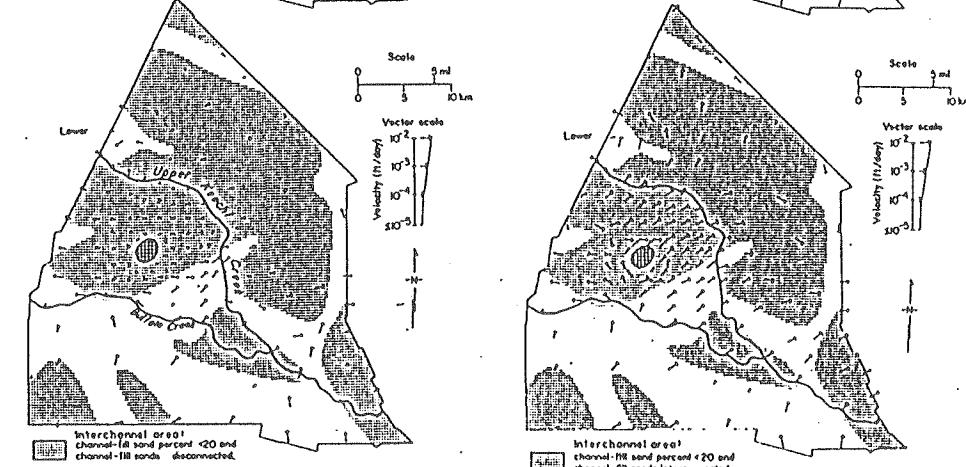
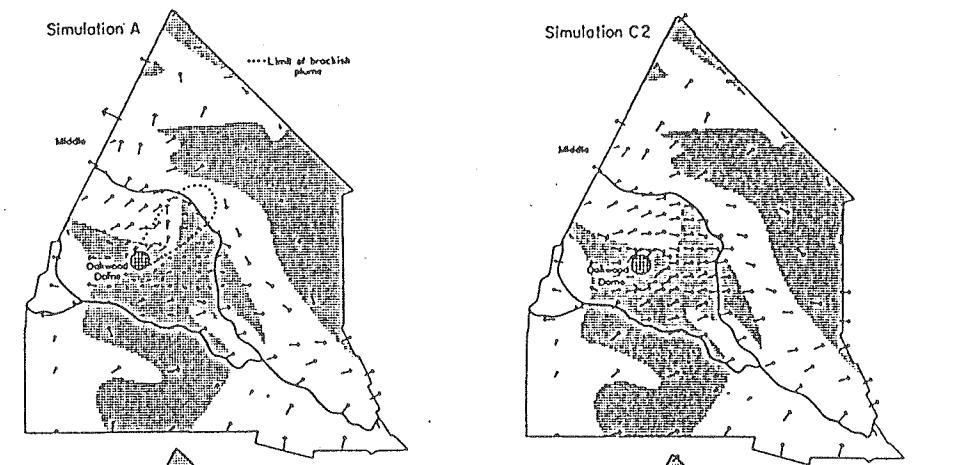


図-6 シミュレーションAの解析結果 図-8 シミュレーションC 2の解析結果  
 (流速ベクトル) (流速ベクトル)

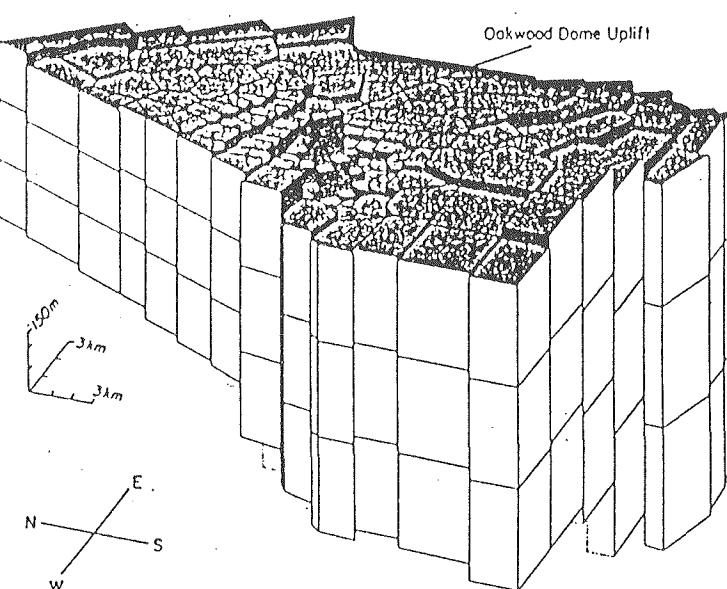


図-4 I FD メッシュ立体図

施設名	Chem-Dyneサイト (1)	土被り	- m	調査研究の目的	処分場サイトとしての評価を行うために、Chem-dyneサイト周辺の地下水流動を広域、中域、局所スケールの3つの異なるスケールで解析を行ったうちの1つ。
地下構造物の概要	アメリカ、オハイオ州南西に位置する危険物処分場サイト。（図-1）				
地形・地質				調査項目と調査手法	
地質構造				備考	
水理学環的境					
地球化環学的境					

## 施設名 Chem-Dyneサイト (1)

解 析 手 法	コード名	SWIFT (Sandia Waste-Isolation Flow and Transport Model)	○ 地下水流動の全体の概略の把握が可能 ○ 全体の水収支の把握が可能(図-4)
	コードの内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2～3次元差分法</li> <li>○ 地下水問題への適用例多数</li> <li>○ モデルの作成、連結はTMR法 (Telescopic Mesh Refinement)</li> </ul>	
解析モデル			解析結果
	解析モデル	Regional Model(図-2) 2次元 1,138要素 長手方向長さ：約16.1km 均質モデル	
	境界条件	図-3に示す境界条件とする。 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 側面 水位固定—モデルの末端、東側境界の一部 不透水境界—その他</li> <li>○ 内部 水位固定—Great Miami River, Ford hydraulic Canal 流量一定—井戸(22箇所)からの揚水</li> <li>○ 底部 不透水境界</li> <li>○ 表面 一定降水量(152.4mm/year)</li> </ul>	
水理物性		文献調査により透水係数 106.7m/day(一定)	検証手法
	水理物性		

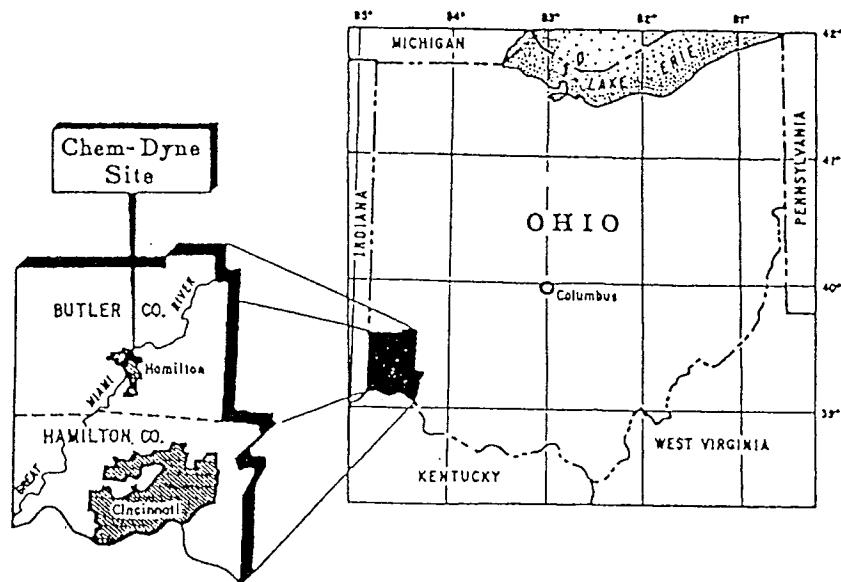


図-1 Chem-Dyne サイトの位置

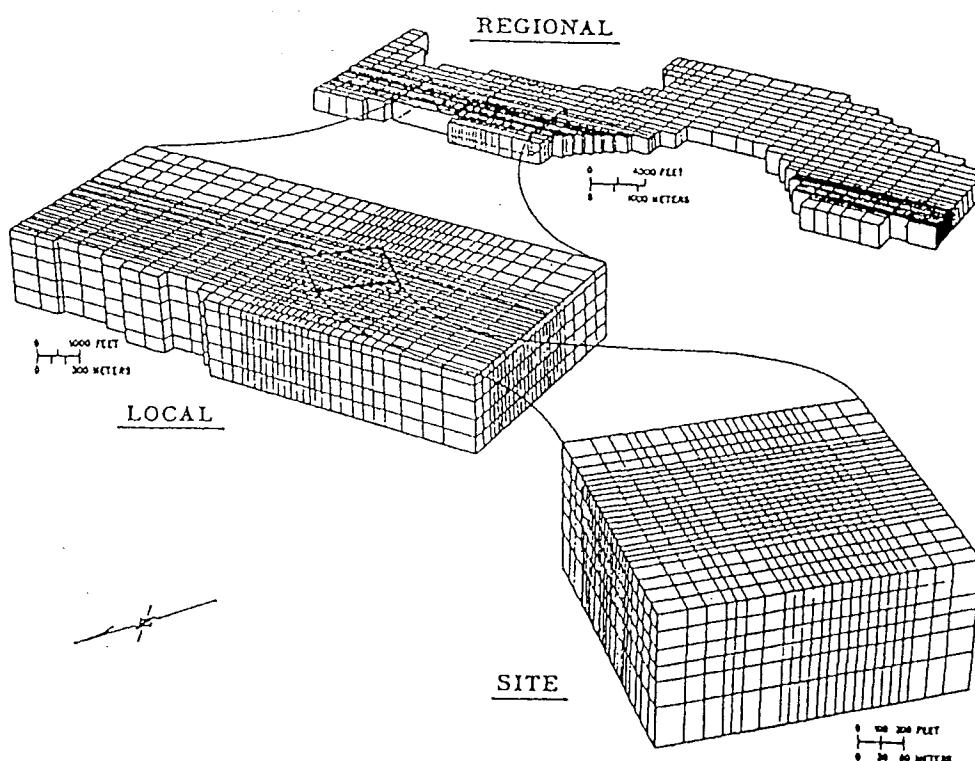


図-2 解析モデル、TMR法の概念図

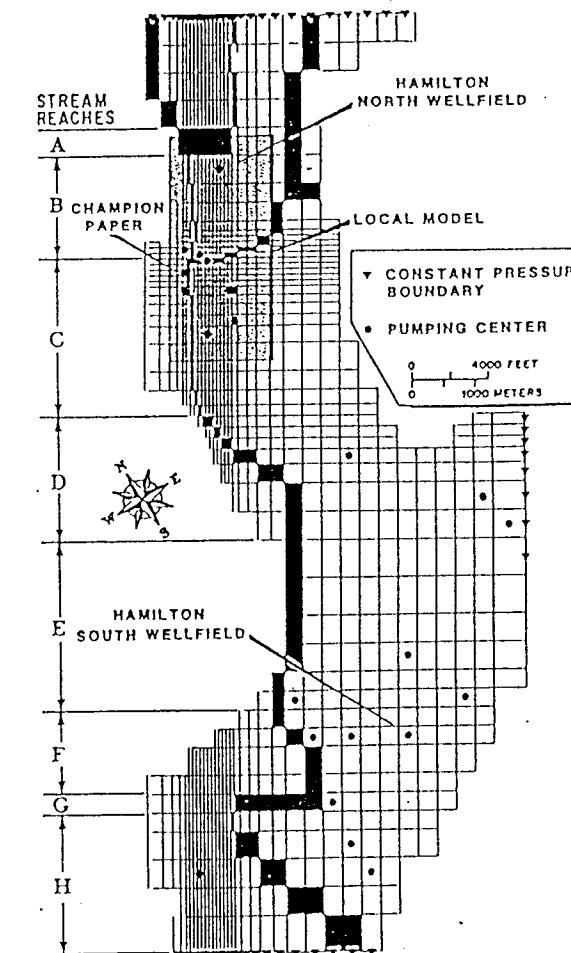


図-3 Regional modelの差分格子と  
境界条件

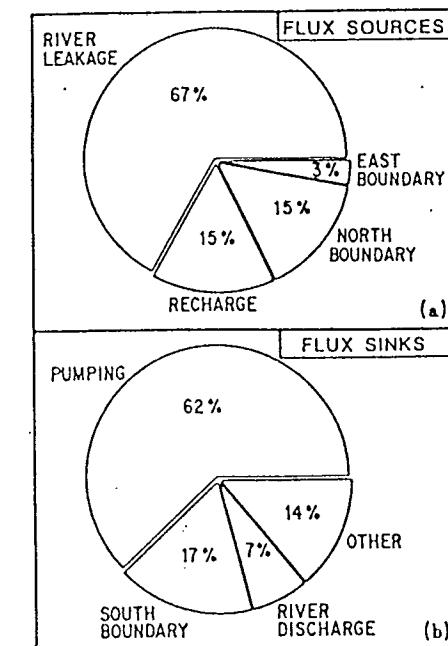


図-4 解析結果 (Regional modelによる水取支)

施設名	Chem-Dyneサイト (2)	土被り	- m	調査研究の目的	処分場サイトとしての評価を行うために、Chem-dyneサイト周辺の地下水流动を広域、中域、局所スケールの3つの異なるスケールで解析を行ったうちの1つ。
地下構造物の概要	アメリカ、オハイオ州南西に位置する危険物処分場サイト。(図-1)				
地形・地質		調査項目と調査手法	備考		
地質構造					
水理学環的境					
地球化環学的					

施設名 Chem-Dyneサイト (2)

解析手法	コード名	コード名 SWIFT (Sandia Waste-Isolation Flow and Transport Model)	解析結果	○ 深度の違いによる地下水流动の变化をとらえることが可能(図-5, 6)。 ○ TRM法により広域の解析を反映した中域、局所解析が可能。
	コードの内容	○ 2～3次元差分法 ○ 地下水問題への適用例多数 ○ モデルの作成、連結はTMR法 (Telescopic Mesh Refinement)		
	解析モデル	Local Model (図-2) 3次元、4,585要素、5層 長手方向長さ：約3.2km、厚さ：54.9m 格子間隔：45.7～228.7m 不均質モデル（異方性考慮）(図-3)		
	解析条件	図-4に示す境界条件とする。 ○ 側面 水位固定-Regional Modelの結果を内挿入力(TMR法) ○ 内部 水位固定-Great Miami River, Ford hydraulic Canal 流量一定-井戸(10箇所)からの揚水 ○ 底部 不透水境界 ○ 表面 一定降水量(152.4mm/year)		
物理物性			検証手法	
	文献調査により入手			

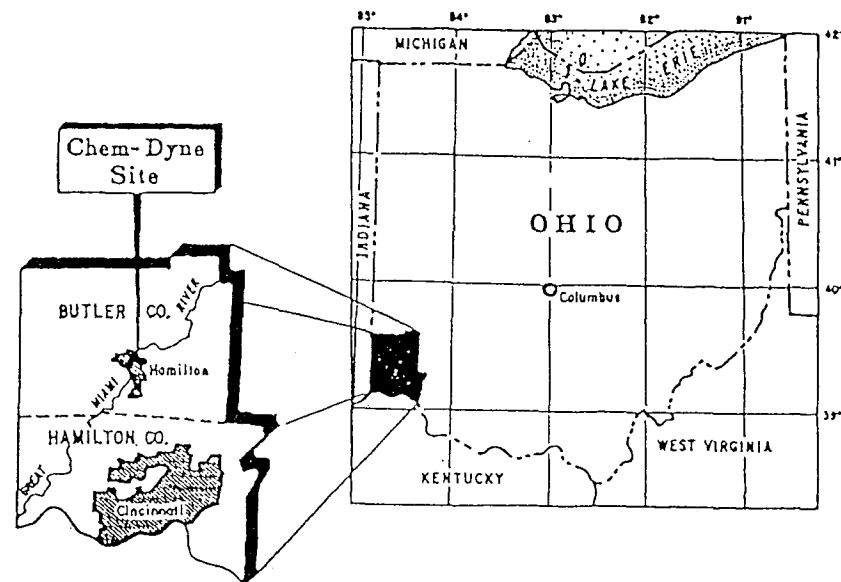


図-1 Chem-Dyne サイトの位置

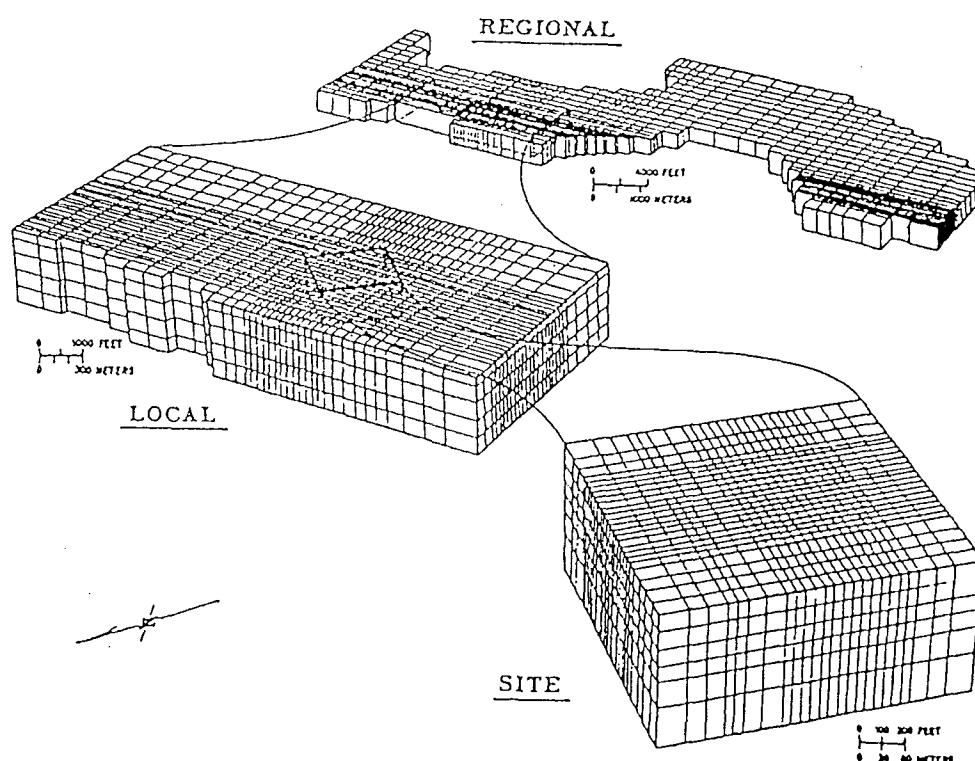


図-2 解析モデル、TMR法の概念図

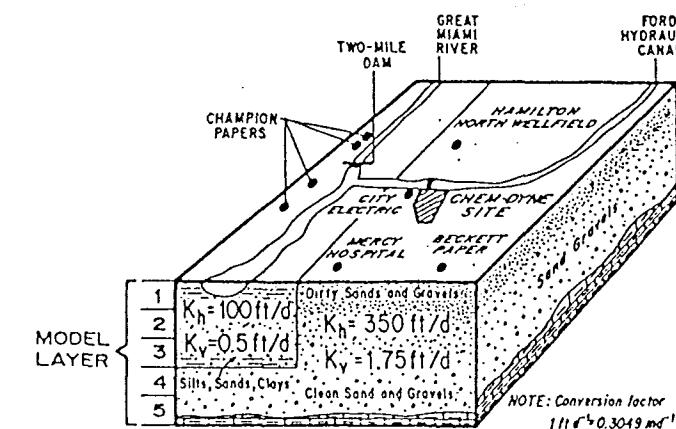


図-3 Local model の概念図と物性値

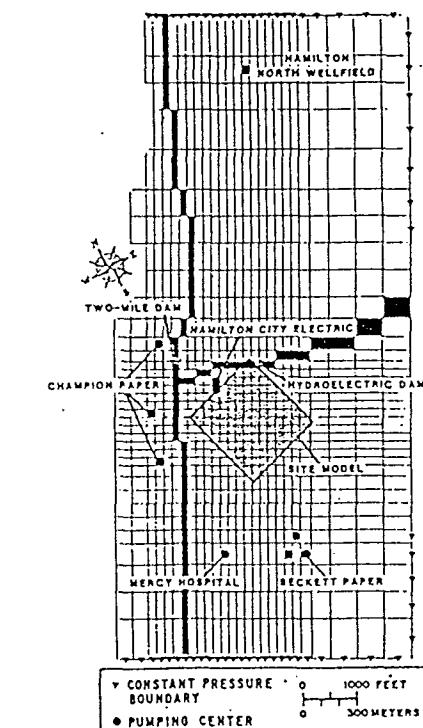


図-4 Local model の差分格子と境界条件

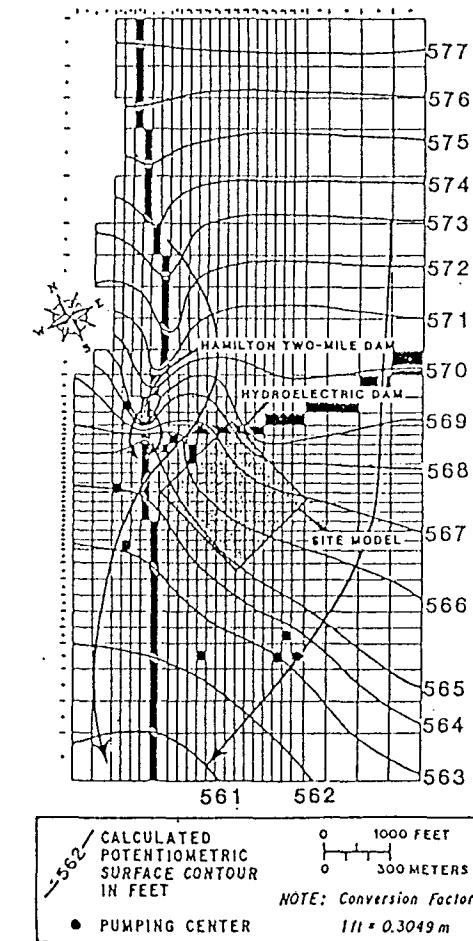


図-5 解析結果 (Local model による水頭値、浅部-1層目)

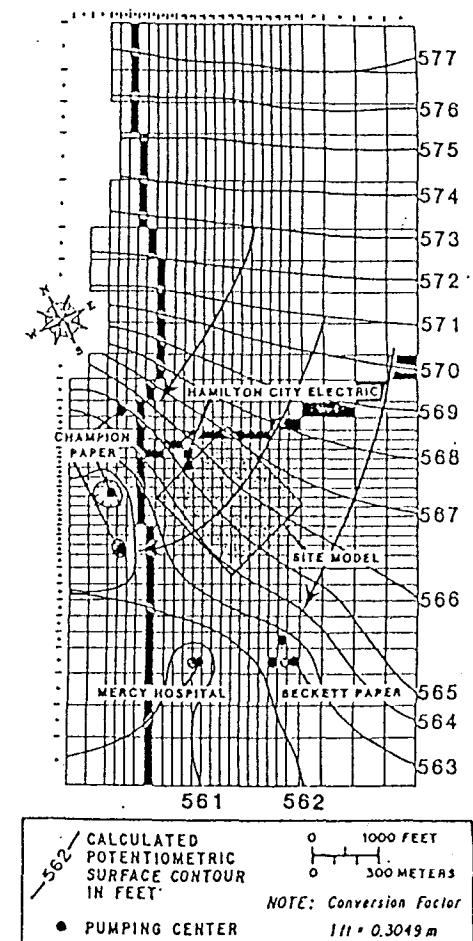


図-6 解析結果 (Local model による水頭値、深部-4層目)

施設名	Chem-Dyneサイト (3)	土被り	- m	調査研究の目的	処分場サイトとしての評価を行うために、Chem-dyneサイト周辺の地下水流動を広域、中域、局所スケールの3つの異なるスケールで解析を行ったうちの1つ。
地下構造物の概要	アメリカ、オハイオ州南西に位置する危険物処分場サイト。(図-1)				
地形・地質		調査項目と調査手法	備考		
地質構造					
水理学環的境					
地球化環学的境					

施設名 Chem-Dyneサイト (3)

解 析 手 法	コード名	コード名 SWIFT (Sandia Waste-Isolation Flow and Transport Model)	解析結果	検証手法	○ 深度の違いによる地下水流动の变化をとらえることが可能。 ○ TRM法により広域の解析を反映した中域、局所解析が可能。
	コードの内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2～3次元差分法</li> <li>○ 地下水問題への適用例多数</li> <li>○ モデルの作成、連結はTMR法 (Telescopic Mesh Refinement)</li> </ul>			
	解析モデル	<p>Site Model (図-2)            3次元            幅：約487.8m、長さ：約518.3m、厚さ：24.4m            不均質モデル（異方性を考慮）</p>			
	解析条件	<p>図-3に示す境界条件とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 側面 水位固定-Local Modelの結果を内挿入力。</li> <li>○ 内部 流量一定-井戸（2箇所）からの揚水と注入。</li> <li>○ 底部 水位固定-Local Modelの4層目下部の結果を内挿入力。</li> </ul>			
水理物性		文献調査により入手			

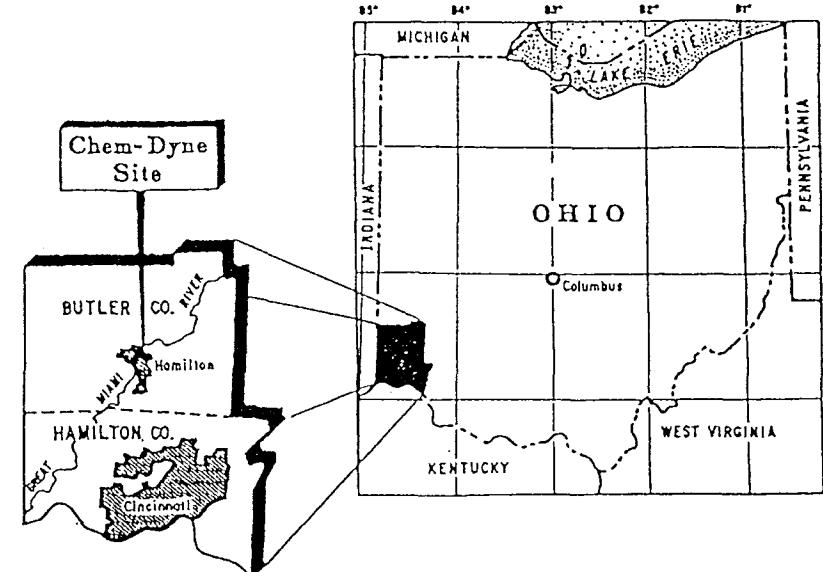


図-1 Chem-Dyne サイトの位置

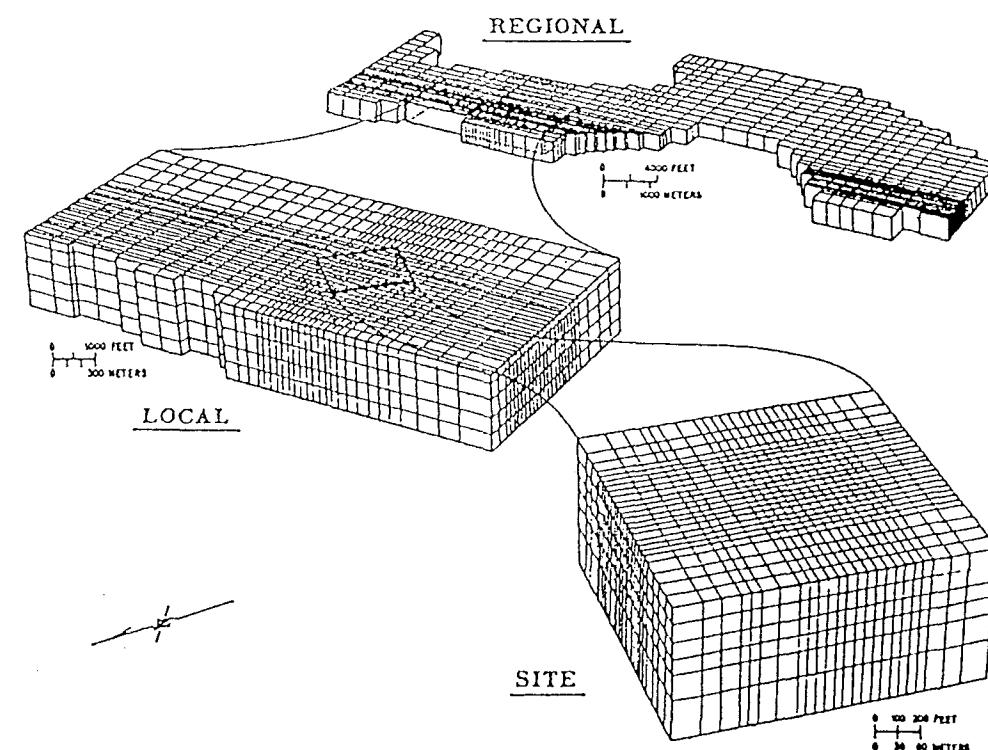


図-2 解析モデル、TMR法の概念図

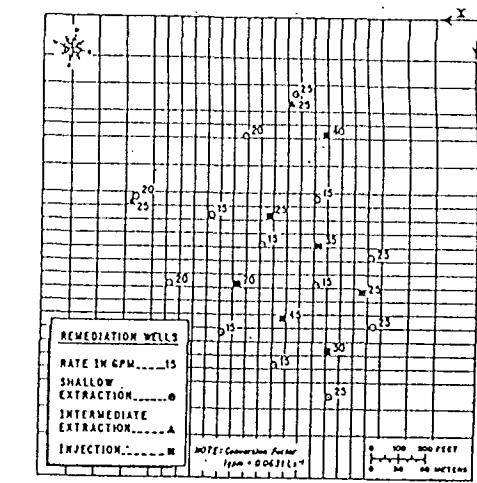


図-3 Site modelの差分格子と境界条件

施設名	San Andres-Glorieta帯水層	土被り	- m	調査研究の目的	地下水の揚水に伴う管理問題について、モデルの異なる3つの広域地下水流动解析結果の比較検討。ただし、同一の計算コード、同一のデータベースに基づいて解析は行なわれた。
地下構造物の概要	アメリカ、New Mexico州北西部。(図-1) Plains Electric 社がCiniza地域においてプラント操業を行なうため、San Andres-Glorieta帯水層を対象とした揚水を行なう予定である。				
地形・地質	San Andres-Glorieta帯水層は、San Andres石灰岩層とGlorieta砂岩層から構成されている。			調査項目と調査手法  備考	
地質構造	図-2に示すように、北北東方向にゆるく傾斜した地質構造。				
水理学環的境	San Andres-Glorieta帯水層は、Zuni山脈の南側斜面を主要な涵養域としており、涵養はほとんど融雪と小川による。揚水地点(Ciniza地域)のこの帯水層は、地表から約300mの位置にある。この帯水層の平均層厚は約100mで、上部の不透水性Chinle頁岩と下部の結晶質Yoso層によって被圧されている。				
地球化環学的境					

施設名 San Andres-Glorieta帶水層

解析手法	コード名		○ いずれの解析結果も、揚水開始後約18年後に地下水位が最も低下するという結果が得られた。 ○ Ciniza地域での水位低下量を図-7に示す。 モデル1-約150m, モデル2-約300m, モデル3-約120m この差異の原因として、Ciniza地域での帶水層パラメータの違いが挙げられる。例えば、この地域の透水量係数は、モデル1-42m <sup>3</sup> /day, モデル2-10m <sup>3</sup> /day, モデル3-150m <sup>3</sup> /day。 ○ 巨視的に見た水位低下量はCinizaの揚水地点を中心とした同心円を描いており、井戸の揚水による水位低下問題と見なせる。 3つのモデルの解析結果とそれぞれのT(透水量係数)とS(貯留係数)を用いてTheisの式から計算した水位低下は、非常によく一致する。したがって、今回の解析に用いた境界条件と多くの仮定は水位低下にそれほど影響を与えないことがわかった。
	コードの内容	合衆国地質調査所 (U.S.G.S.) の2次元有限差分プログラム。	
解析条件	解析モデル	各々のモデル領域は図-3に示すとおり。 ○ モデル1 Zuni山脈北東 157km×122km 南側境界は涵養域北縁に沿う。 ○ モデル2 Zuni山脈北東 138km× 88km 南側境界は涵養域南縁に沿う。 ○ モデル3 Zuni山脈北東 65km× 37km 帯水層全体をカバーしていないが、地下水位の低下が著しいと予想される地域を含む。	解析結果
	境界条件	○ モデル1 南側境界に流量を設定し、涵養を表現。涵養量の増分はゼロ。残り3つの境界は流量を仮定。 ○ モデル2 南側境界を含め全境界で流量をゼロ。涵養域に相当する節点に直接涵養量を代入。 ○ モデル3 南側境界では流量ゼロを仮定。残り3つの境界は定常状態の補正值から推定した水頭値に設定。 Chinle層に含まれるSonselea帶水層への、または帶水層からの鉛直方向の浸透については、モデル1, 2では考慮しているが、モデル3では無視している。	検証手法
	水理物性	○ モデル1 透水量係数は5.0~7,700m <sup>3</sup> /dayの間で変化する。これらは揚水試験及び土質資料から(図-4)推定し、解析領域にブロック状に割当てる。貯留係数は帶水層の被圧部分で $5 \times 10^{-4}$ 、帶水層が露出している不圧地域で0.05。 ○ モデル2 透水量係数は、揚水試験及び定常状態の水頭観察に基づいたキャリブレーションから(図-5)推定。コンタリング法により、解析領域全域にわたって連続的にパラメータを推定。貯留係数は、比貯留率 $1.3 \times 10^{-6}/m$ に地質データから推定される層厚を掛け合わせて求めた。不圧地域ではすべて0.1を仮定。 ○ モデル3 Model 1の初期のバージョンから引用しているが、1968年の水頭観測データによりキャリブレーションを行なった。Model 1と同様、透水係数をブロック状に割当てる。貯留係数は、Model 1と同様、 $5 \times 10^{-4}$ を見積っているが、解析領域が露頭地域まで広がっていないので、不圧貯留係数は不要。	

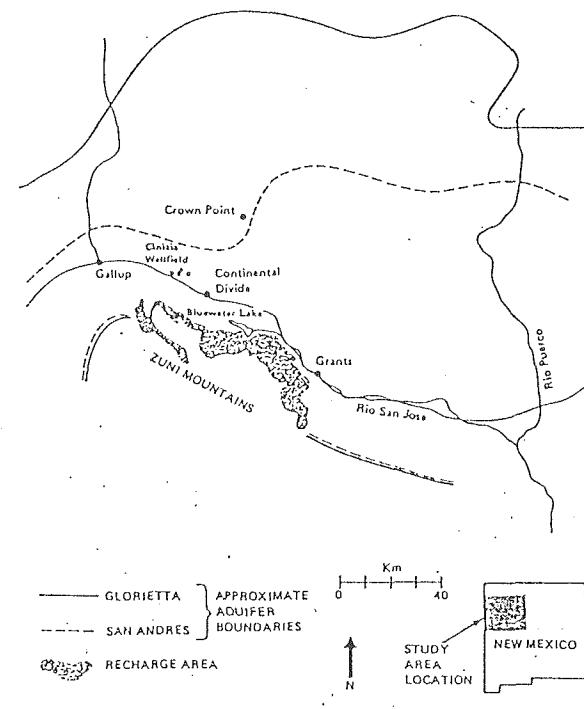


図-1 Location Map of San Andres-Glorietta Aquifer

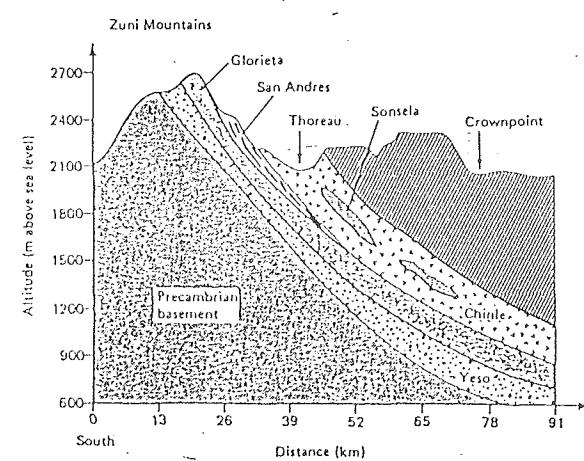


図-2 Typical Vertical Cross Section through San Juan Basin

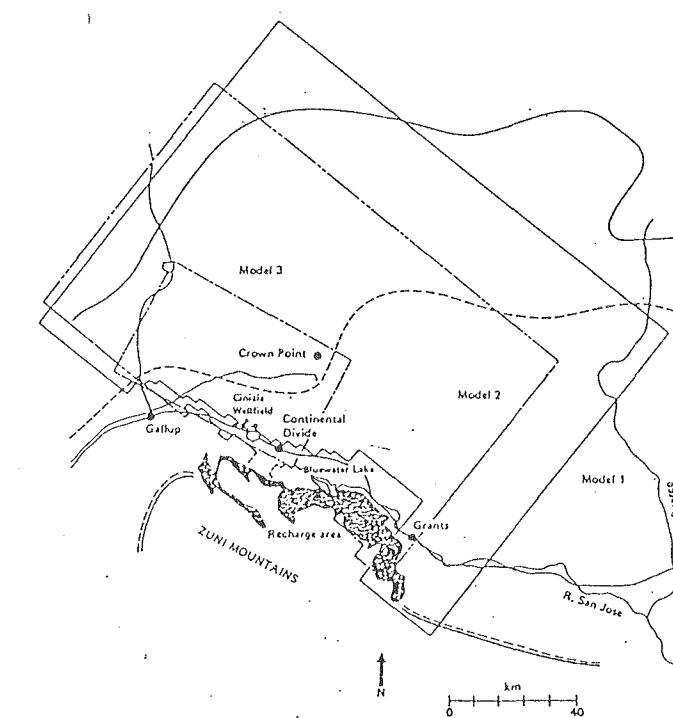


図-3 Comparison of Simulation Networks for Models 1, 2, and 3

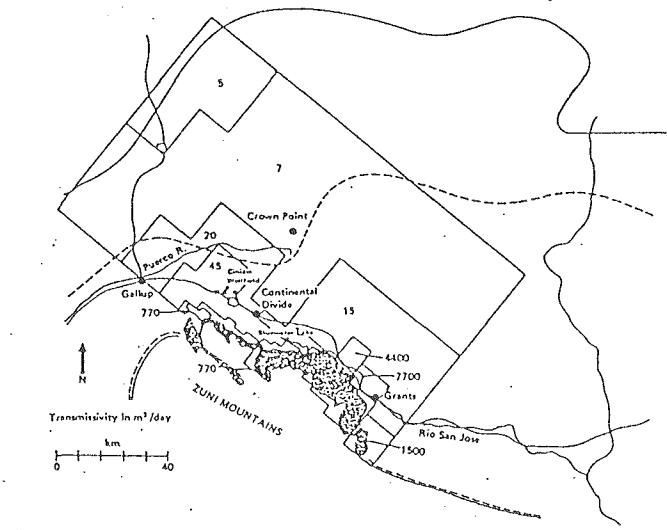


図-4 Transmissivity Regions for Model 1

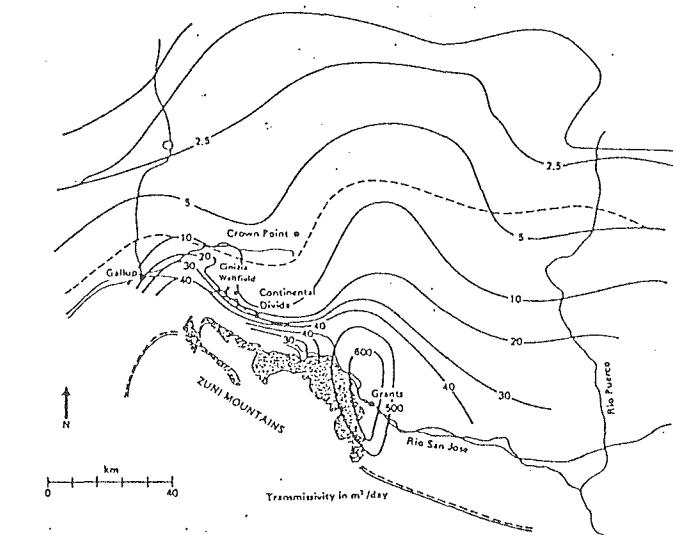


図-5 Transmissivity Contours for Model 2

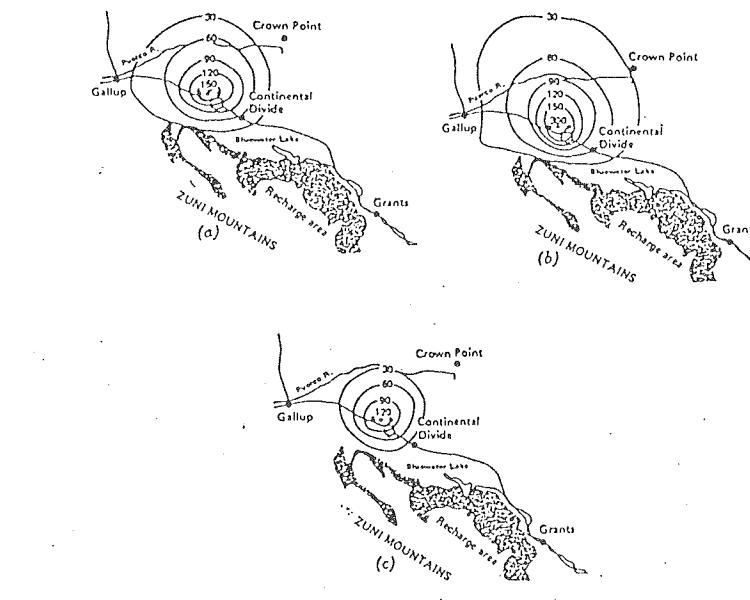


図-7 Maximum Predicted Drawdowns for (a) Model 1; (b) Model 2; and (c) Model 3

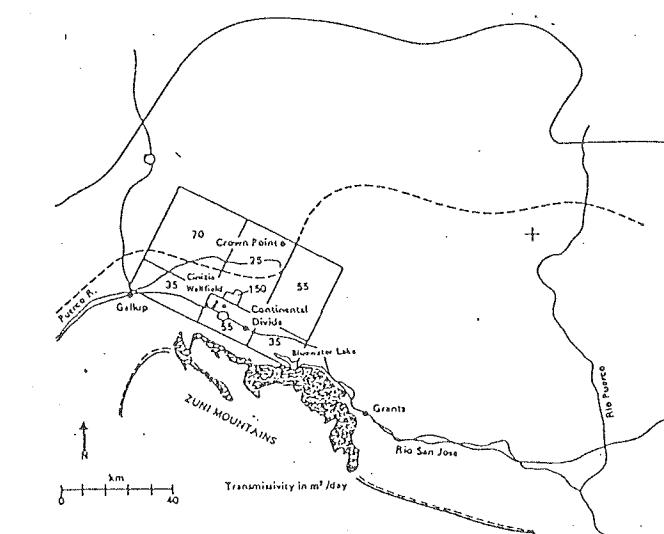


図-6 Transmissivity Regions for Model 3

施設名	Love Canalサイト	土被り	- m	調査研究の目的	広域地下水流动のモデルの設定と検証
地下構造物の概要	アメリカ、ニューヨーク州				地下水ポテンシャルの測定(図-1)
地形・地質				調査項目と調査手法 備考	
地質構造					
水理学環的 境					
地球化環学的 境					

## 施設名 Love Canalサイト

解析手法	コード名		○ ポтенシャルは実際の測定結果と計算結果は同じ傾向を示す。 ○ 季節的変動が大きな要素の一つとなっている。 ○ インプットデータが計算結果に大きな影響を与える。
	コードの内容	○ 有限差分法 ○ モンテカルロ法	
解析モデル	2次元広域モデル 483要素 (21×23) (図-2)		解析結果
解析条件	○ 不透水または水位固定 ○ 鉛直方向は平均して均一化		検証手法
水理物性	○ 均一, 準定常, 坑井データから推定 ○ 透水量係数 $4.58 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \sim 4.58 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (場所により変化) ○ 透水係数 $10^{-10} \text{ m/s} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$ (異方性考慮)		

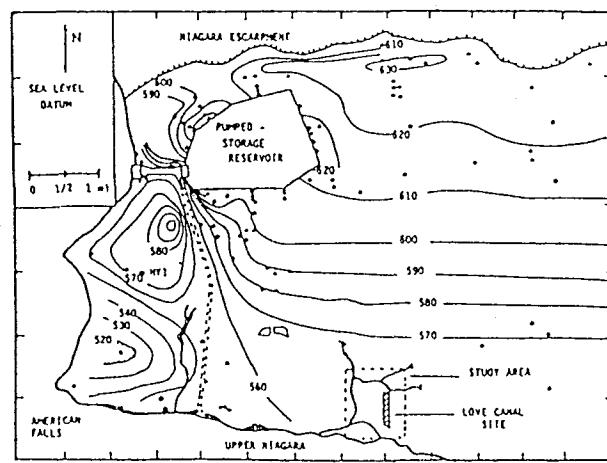


図-1 Generalized Potentiometric Surface for the Lockport Dolomite

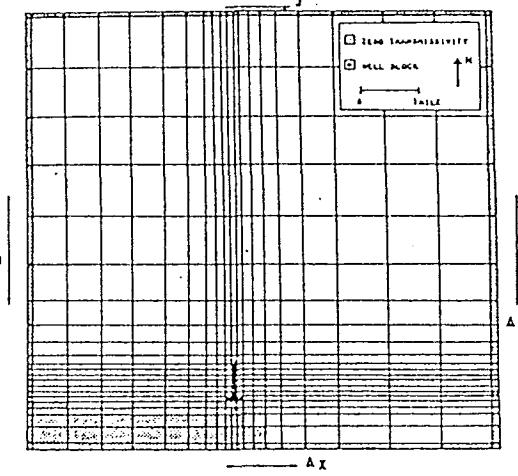
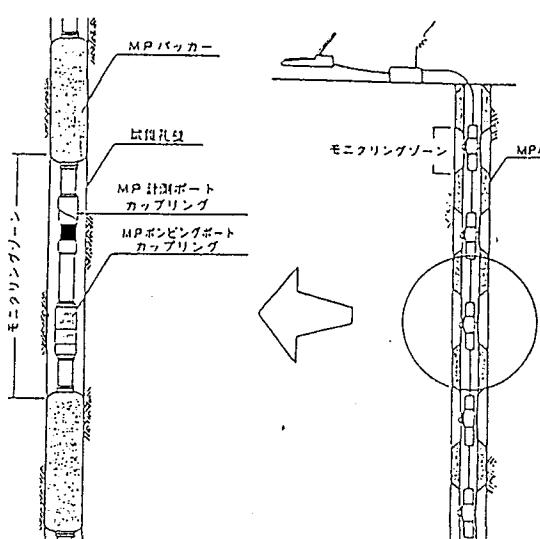
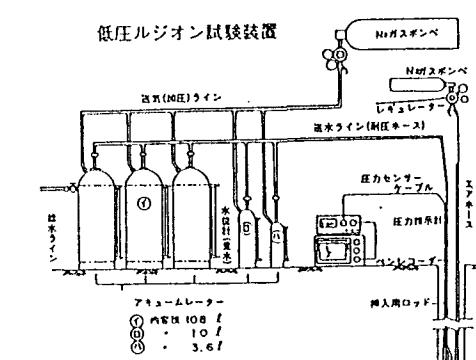
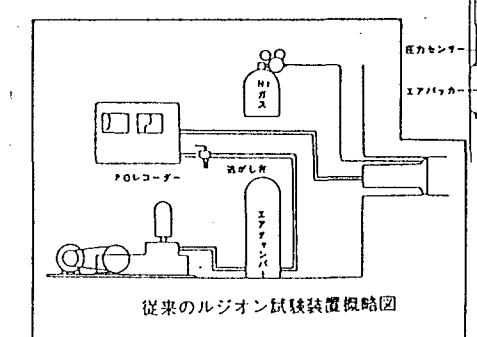


図-2 Finite-Difference Grid for the Lockport Dolomite Model

施設名	東濃(1)	土被り	0~150 m	調査研究の目的	立坑掘削に伴う周辺岩盤内の地下水流动に与える影響を調査解析することにより、断層等の不連続面を有し、不均質性の卓越した岩盤に対して、 1)ダルシー則に基づく非定常3次元飽和浸透流解析による多孔質媒体としてのモデル化の可能性。 2)不連続面を考慮した、水理モデルの構築→地下水流动予測解析→観測値との比較に基づく地下水流动特性評価システムの有効性を確認する。 ただし、割れ目分布、割れ目内の地下水流动特性に不明な点が多い等の理由から1)のみを実施。
地下構造物の概要	地下深部岩盤を対象とした地下空間利用計画に係わる技術的課題の1つとして、地下水流动に関する問題があり、地下施設の設計・建設などを適切に行うためにも、立坑や水平坑道の掘削による周辺岩盤内の地下水への影響を正確に把握することが重要となる。動力炉・核燃料開発事業団では、立坑掘削影響試験として岐阜県土岐市中部事業所東濃鉱山敷地内に仕上がり内径6m、深さ150mの立坑を掘削し、立坑掘削に伴う周辺岩盤への水理学的、力学的影響について、実規模の原位置試験により調査研究を進めている(図-1: 東濃鉱山地質、坑道概要図、調査対象: 第二立坑)。	・表層水理調査 ・水収支観測; 土壌水分計測、河川流量、自由地下水水面観測。 ・深部水理調査(図-2; 水理観測システム位置図、図-3; 調査概念図) ・ポーリングコア地質観察 ・原位置透水試験; ・動燃式低水圧制御水理試験 ・低圧ルジオン水理試験 ・物理検層; 電気検層、放射能検層、BHTV、孔径検層、密度検層(透水試験結果との相関調査) ・間隙水圧計測(MPシステム) ・湧水量測定; ・既設坑道内20箇所 ・試験立坑; 10深度で集水リングを設け測定			
地形・地質	標高300m前後の丘陵性山地 試験地域の基盤をなす領家帯の苗木、上松型花崗岩を被覆する新第三紀中新世の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群、ならびに沖積層からなる。	調査項目と調査手法	備考		 低圧ルジオン試験装置概略図
地質構造	瀬戸層群は花崗岩、瑞浪層群を不整合に覆って分布する。瑞浪層群は花崗岩の旧河川チャンネル凹部を埋めるように分布しており、土岐夾炭累層中にウラン鉱床が胚胎する。花崗岩および瑞浪層群を切るN80° E 60° Sの逆断層が発達しているが、瀬戸層群には影響を与えていない。				
水理学環的境	地質別透水係数は、泥岩・シルト岩・凝灰岩: $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/s、砂岩: $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/s、礫岩: $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-7}$ cm/s。	調査項目と調査手法	備考		從来のルジオン試験装置概略図 低圧ルジオン試験装置の概要
地球化環学境的	pH: 瑞浪層群-深部に行くに従って中性から弱アルカリ性に変化。花崗岩-中性 瑞浪層群中の地下水はほとんど $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}^+$ 型、最上部で $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}^+$ + $\text{Ca}^{2+}$ 型 採取地下水のほとんどがカルシウム、マグネシウムモンモリロン石と平衡関係にある。				

## 施設名 東濃 (1)

解 析 手 法	コード名	TAGSAC	予測解析の主な結果を以下に示す。 ○ 立坑掘削の影響は、立坑から離れるにつれて小さくなり、その顕著な影響範囲は100m以内と推定される。 ○ 試験立坑への湧水量は掘削に伴い増加し、特に断層を過ぎて高透水性部に達した時点で急激に増加し、最大湧水量は30ℓ/minと推定される。 ○ 既存坑道内への湧水量は掘削に伴う顕著な低下は示さず、掘削終了後緩やかな低下を示す。 図-7に鉛直断面ピエゾ水頭センター図を示す。 図-8に計測孔におけるピエゾ水頭分布について、図-9に試験立坑及び既存坑道内への湧水量の経時変化について、それぞれ予測解析結果を実測値と併せて示す。
	コードの内容	非定常3次元飽和不飽和浸透流解析 ・ダルシー則を仮定 ・地下水流动の場：多孔質媒体  TAGSACコード (Three dimensional Analysis of Groundwater flow Saitama university code) の演算能力を高速化したプログラムを使用。	
	解析モデル	解析領域は、調査区域とほぼ等しい約300m四方、深さ方向は、調査立坑の2倍、約300mの領域。水平方向の1層が255要素、モデル全体で15層、全要素数3133、全節点数3924、1次の六面体アイソパラメトリック要素からなる解析モデル（図-4）。 掘削部に相当する要素を掘削工程に従い解析領域から除去し、掘削壁面に対して自由浸出面の条件を与えるながら掘削部底面のピエゾ水頭値を徐々に低下させる方法を採用。	
	解析条件	上部境界条件；涵養量0.5mm/dayを暫定的に設定。飽和部に関しては、自由浸出面条件として表面流出を考慮。 下部境界条件；出入りのない不透水境界条件。 側方境界条件；側部境界上に存在するMPシステムにより観測されたピエゾ水頭分布をもとに設定 既存坑道による内部境界条件；自由浸出面条件	
水理物性	水理地質構造モデル（図-5）における各層の水理定数を表-1に示す。 飽和度と相対透水係数・圧力水頭の関係を図-6に示す。	試験立坑掘削影響予測解析結果の検証を行うため、MPシステムによる試験立坑周辺の試錐孔を利用した間隙水圧および試験立坑への湧水量の長期観測を継続している。試験立坑125m掘削時点でのことが確認された。 ○ 間隙水圧はTH1で最も顕著な低下を示し試験立坑より離れるにつれてその低下は小さい。 ○ 掘削による間隙水圧の影響範囲は今までのところ100m以内である。 ○ 既存坑道内の湧水量はほとんど変化していない。長期観測と予測解析結果の比較により以下のことが確認された。 掘削による間隙水圧への影響は、予測解析結果と実測結果でほぼ一致している。 試験立坑内、既存坑道内への湧水量は予測解析結果が実測値より大きい(1.5~2.0倍)。 しかし、予測解析の湧水量変化傾向は実測による変化傾向と調和的である。	解析結果
			検証手法

施設名 東濃 (1)

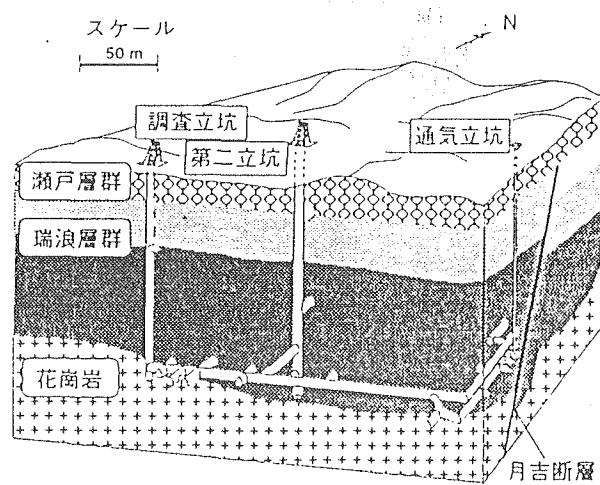


図-1 東濃鉱山地質・坑道概要図

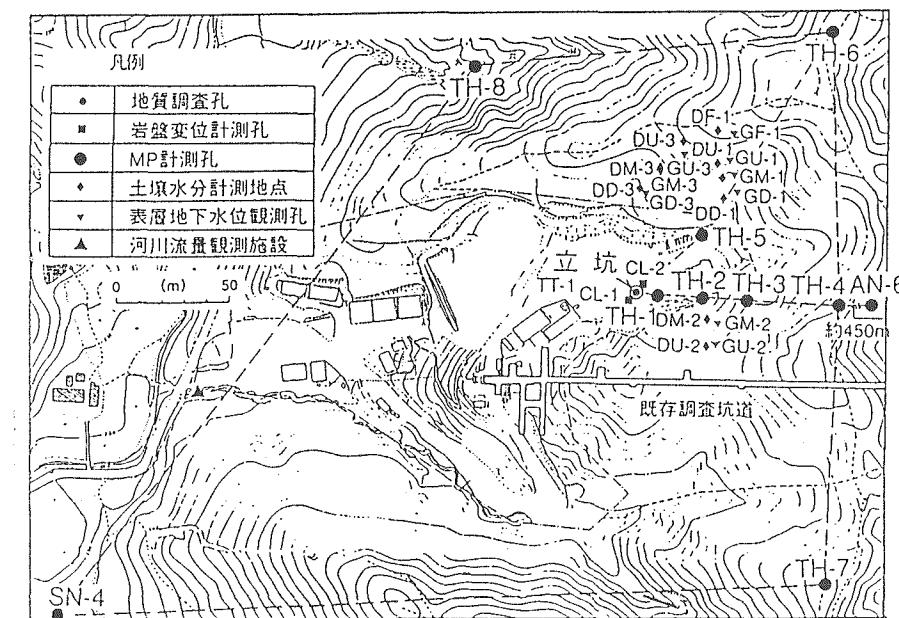


図-2 立坑掘削影響試験鉆孔および水理観測システム図

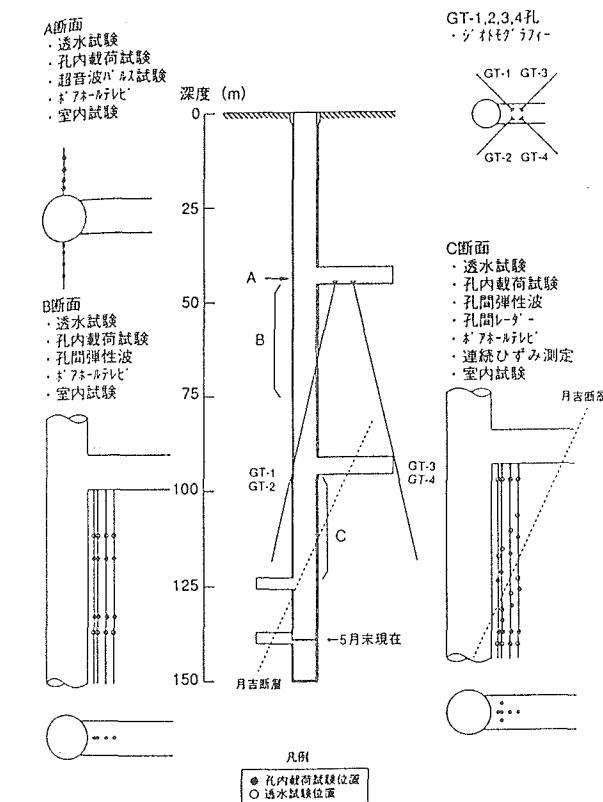


図-3 力学的・水理学的特性変化に関する調査概念図

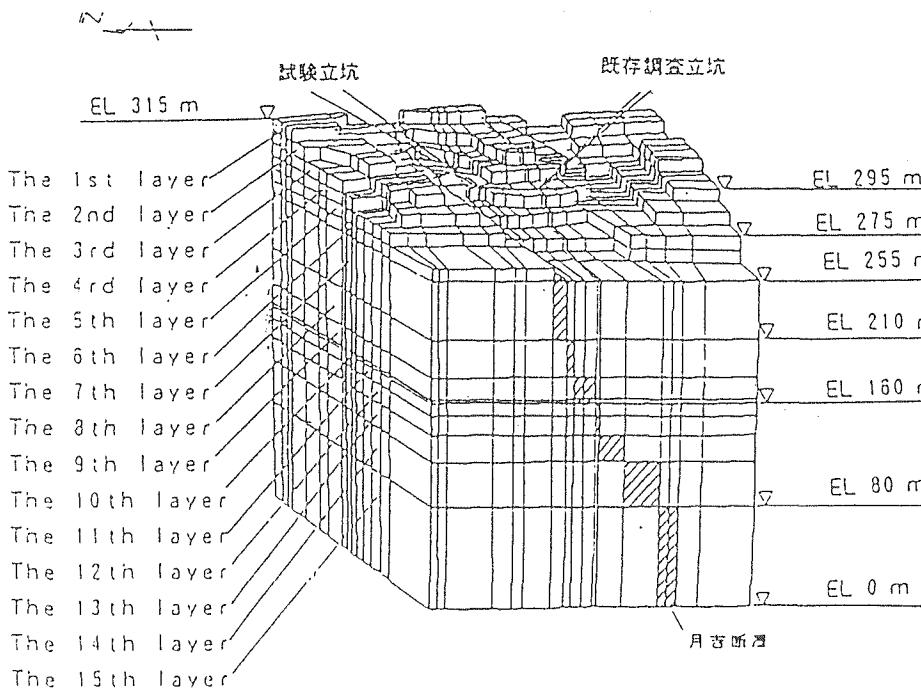


図-4 要素分割図

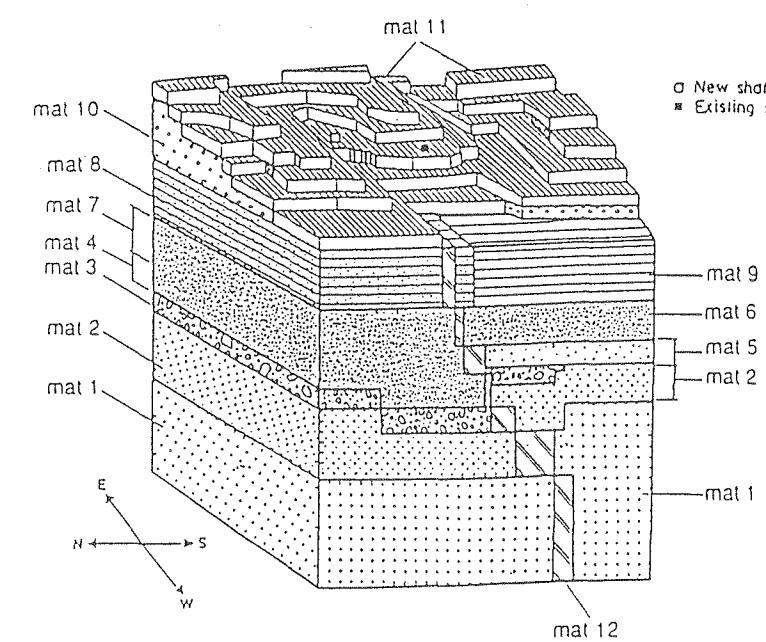


図-5 水理地質構造モデル図

区分	透水俌数 (cm/sec)	高程 (m)	比透水俌 (a')	地質
sat 1	$1.0 \times 10^{-1}$	0.02	$1.0 \times 10^{-1}$	花崗岩
sat 2	$3.0 \times 10^{-1}$	0.1	$1.0 \times 10^{-1}$	風化花崗岩
sat 3	$1.0 \times 10^{-1}$	0.3	$1.0 \times 10^{-1}$	風化花崗岩・隙材
sat 4	$1.0 \times 10^{-1}$	0.3	$1.0 \times 10^{-1}$	砂岩
sat 5	$5.0 \times 10^{-1}$	0.3	$1.0 \times 10^{-1}$	砂岩
sat 6	$1.0 \times 10^{-1}$	0.3	$1.0 \times 10^{-1}$	砂岩・軟岩
sat 7	$1.0 \times 10^{-1}$	0.4	$1.0 \times 10^{-1}$	軟岩
sat 8	$5.0 \times 10^{-1}$	0.4	$1.0 \times 10^{-1}$	砂岩・泥岩
sat 9	$1.0 \times 10^{-1}$	0.4	$1.0 \times 10^{-1}$	砂岩
sat 10	$1.0 \times 10^{-1}$	0.4	$1.0 \times 10^{-1}$	未固結層(瀬戸層)
sat 11	$1.0 \times 10^{-1}$	0.5	$1.0 \times 10^{-1}$	粘土
sat 12	$1.0 \times 10^{-1}$	0.3	$1.0 \times 10^{-1}$	粘土を含む隙材

表-1 水理地質構造モデルにおける各層の水理定数

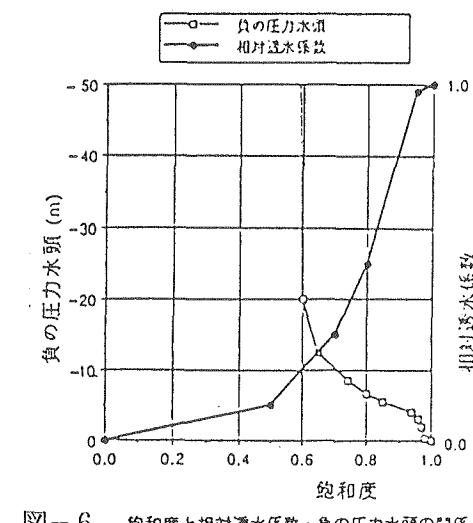
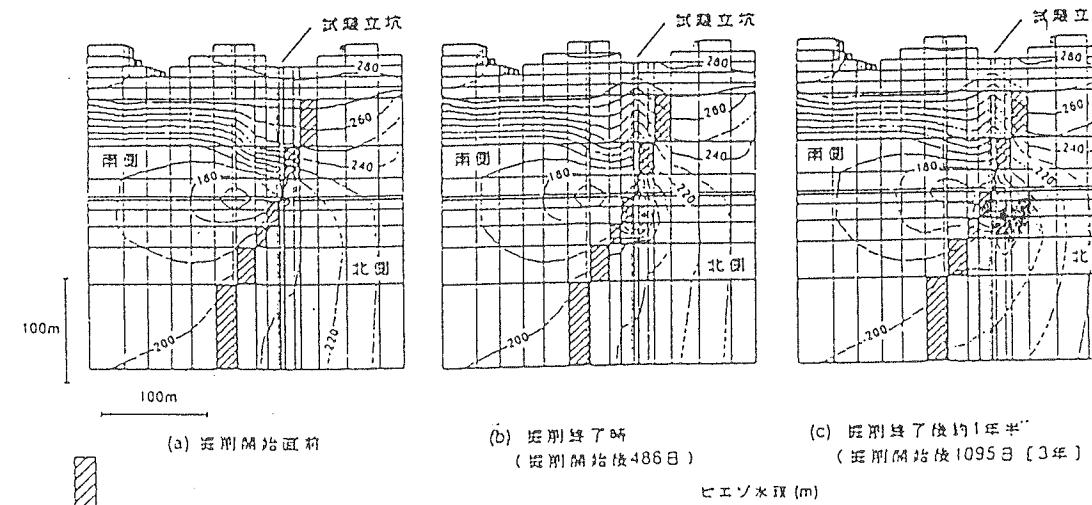


図-6 饱和度と相対透水俌数・負の圧力水頭の関係

施設名 東濃立坑掘削影響



月吉断面

図-7 南北鉛直断面内ピエゾ水頭コンター図

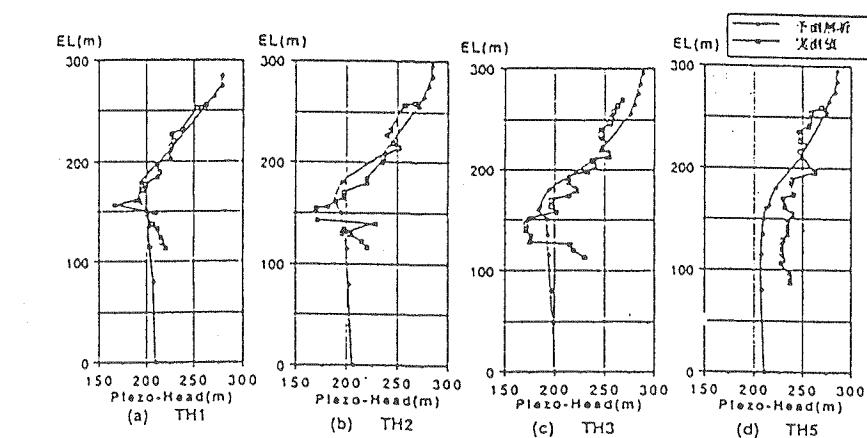


図-8 計測孔TH1, 2, 3, 5における掘削開始300日のピエゾ水頭分布の実測と予測解析結果の比較

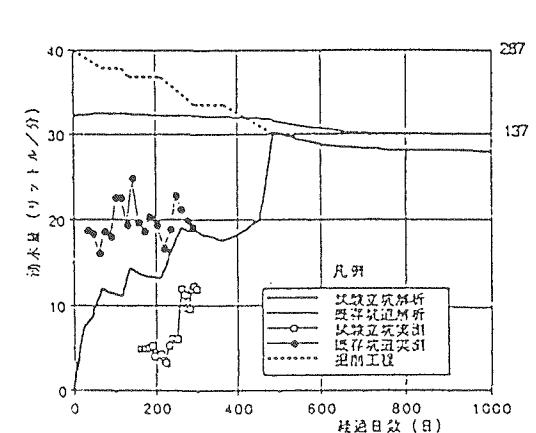
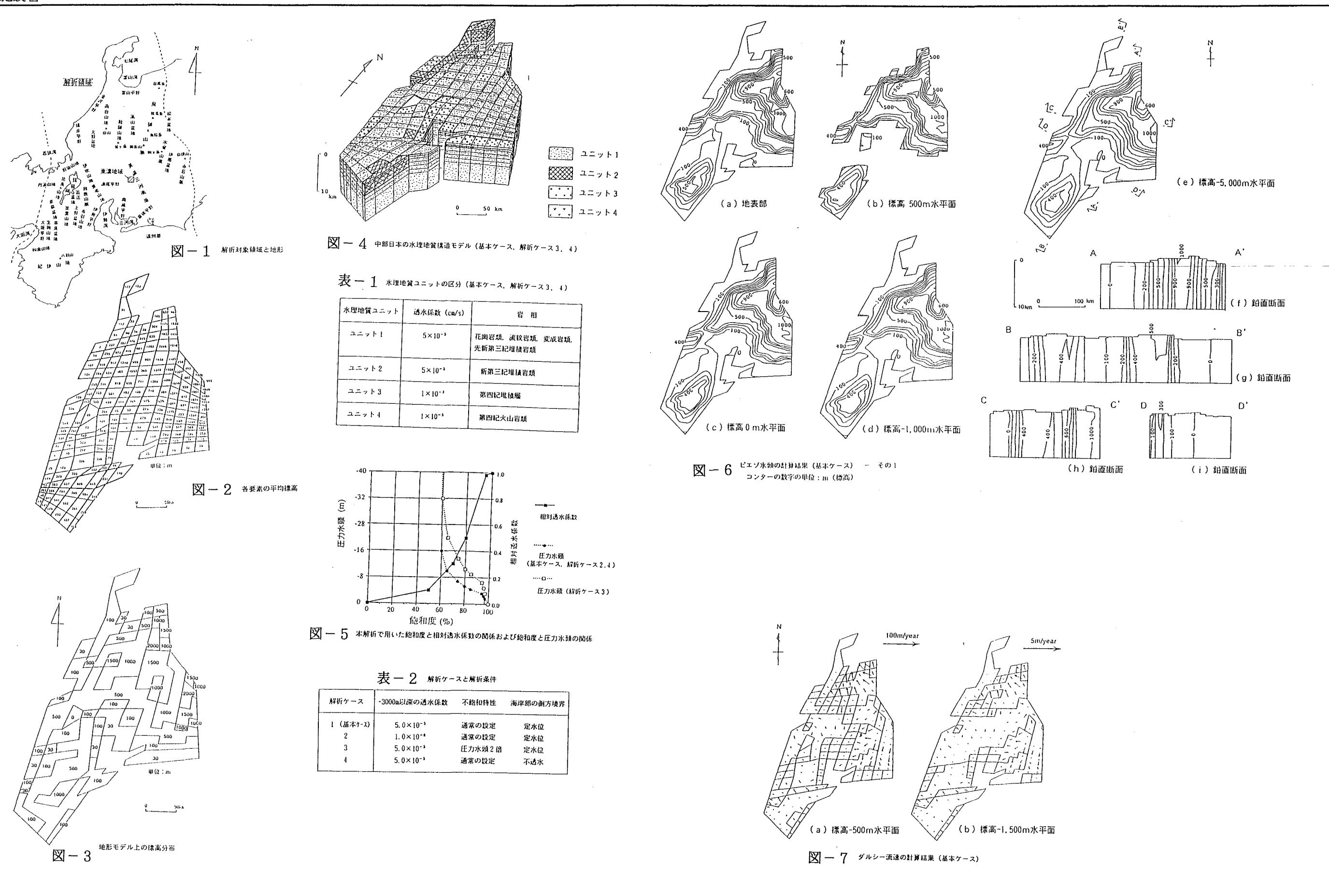


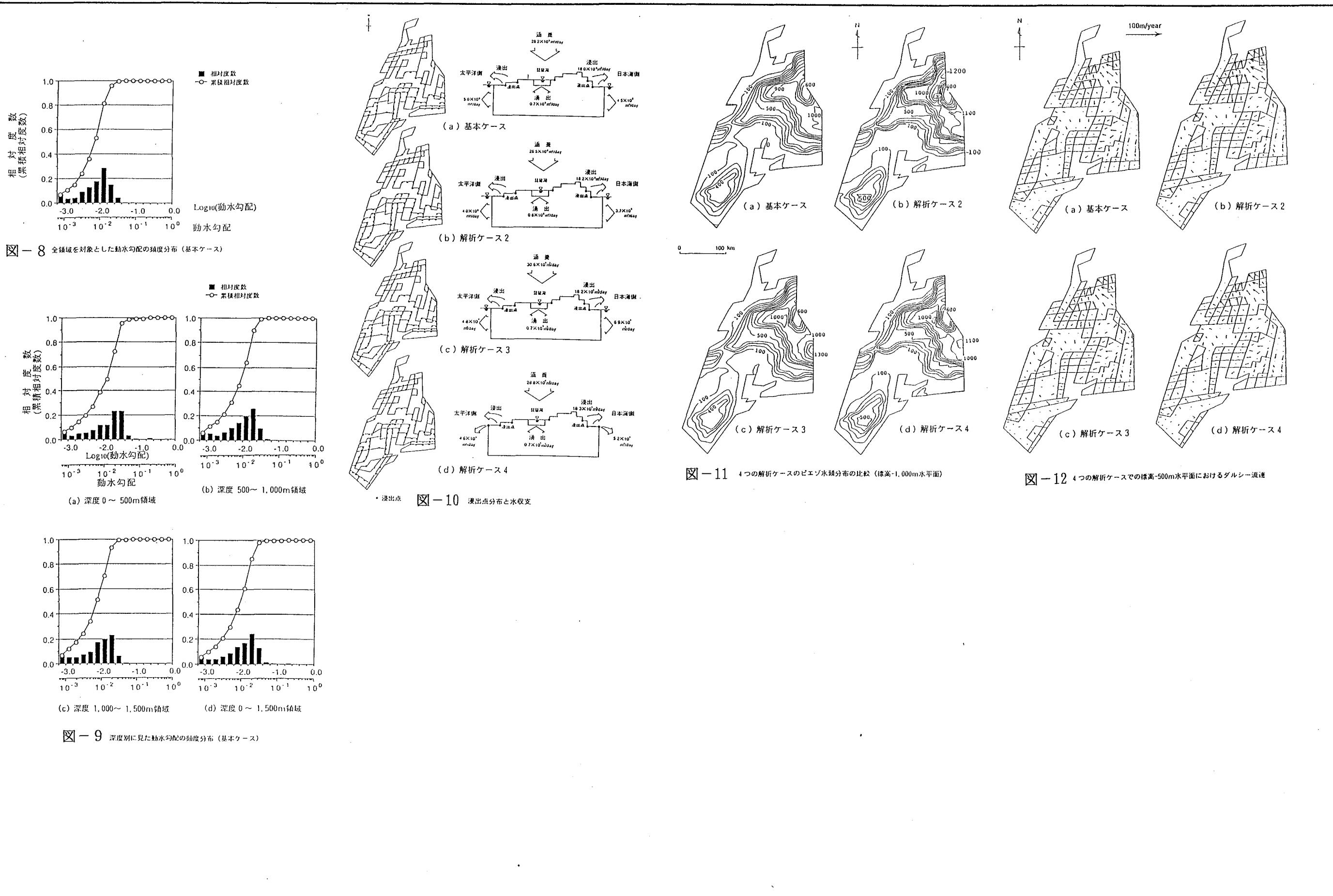
図-9 試験立坑・既存坑道内への湧水量の経時変化の実測と予測解析結果の比較

施設名	東濃(2)	土被り	— m	解析手法	コード名 TAGSAC
地下構造概要物	対象領域は、東側境界を糸魚川-静岡構造線、西側境界を小浜と尼崎を結ぶ直線とする範囲である(図-1)。北側および南側境界は海岸線である。			コード内ドロップ	非定常3次元飽和・不飽和有限要素法解析
地形・地質・地質構造	<p>本地域の地形(図-1)は、大きく見ると中央部の山地部(中部山岳地帯)、山地部の周囲に分布する丘陵部、および太平洋側・日本海側の平野部に分けられる。山地部は標高3,000m級の飛騨・木曽・赤石山脈がほぼ南北方向に延び、その西側に標高1,000~2,000mの飛騨山地・美濃三河高原が、さらにその西側では標高1,500~2,000mの両白山地が分布する。丘陵部は標高300~500m程度の定�性丘陵地~丘陵性山地である。太平洋側・日本海側の平野部は大部分が低地で占められる。</p> <p>本地域の地質は、基盤の深成岩類・変成岩類・古生代~古第三紀堆積岩の上に、一部では中生代の堆積岩や中生代の火山岩(濃飛流紋岩)からなる岩体が分布する。日本海側では基盤上に新第三紀中新世の堆積岩が厚く堆積し、さらにその上部には新第三紀鮮新世~第四紀の堆積物が分布する。太平洋側および内陸部では新第三紀以降の堆積物が伊勢湾周辺、大阪湾周辺、琵琶湖周辺に広く分布する。第四紀火山岩類は領域中~北部の山地(飛騨山脈、両白山地)を中心に分布する。</p>			解析モデル	<p>地形モデルの構築は、100万分の1接峰面図より地形分類上の境界線となるセンター線を選び(地形特性図)、領域内の地形特徴が表現されるように要素分割を行った。国土数値情報の標高データを平均して、各要素の平均標高を算出し(図-2)、低地、台地、丘陵、山地(3段階)にあたる30, 100, 500, 1,000, 1,500, 2,000mに設定した(図-3)。</p> <p>本地域の地質構造モデルは、100万分の1地質図その他に基づいて構築した。本領域のモデル化された地質構造の特徴は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 本地域の山地部には、基盤をなす深成岩類、変成岩類、古生代~古第三紀の堆積岩が分布する。</li> <li>② 丘陵部には、主として新第三紀堆積岩、第四紀層が分布する。基盤の深成岩類、変成岩類、中・古生代~古第三紀の堆積岩も一部露出する。</li> <li>③ 平野部のほとんどの部分は、新第三紀堆積岩、第四紀層よりなる。</li> </ul> <p>水理地質構造モデルは、モデルの構成要素として4つの水理地質ユニットを設定した。それらはそれぞれ、基盤岩類(花崗岩類・流紋岩類・変成岩類・先新第三紀岩類)、新第三紀堆積岩類、第四紀堆積層、第四紀火山岩類よりなるものである。それぞれのユニットの三次元的分布は、地質構造モデルにおける岩石の分布に従って与えた。この水理地質構造モデルを解析モデルとして用い、図-4に示す。解析モデルは6面体8節点の要素1,973個よりなり、節点数は2,768である。</p>
調査研究の目的	<p>本解析の目的は、300×500km×深さ10kmスケールの地下水流动解析を行い、広域的な地下水の流れを推定することである。</p> <p>本解析の主な特徴は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 地形および地質構造のバリエーションに富む地方を対象とすること。</li> <li>② 既存の調査・研究資料に基づき水理地質構造モデルを構築すること。</li> <li>③ 透水係数分布・不飽和特性・側方境界条件の設定を変えた解析も行い、これらの設定が解析結果に与える影響を確かめること。</li> </ul>			解析条件	<p>上部境界条件は、東濃地域の一流域で観測された涵養量0.57mm/日を領域全体に一様に設定した。なお、飽和状態の場合には、表面流出を生じる自由浸出条件を設定した。陸上の側方境界は不透水境界とした。海岸部の側方境界は透水境界とし、標高0m(海水位)の定水位条件を与えた。なお、海岸部の側方境界を不透水境界とする条件での解析(解析ケース4)も実施した。下部境界は不透水境界とした。</p>
調査手項法目と	既存の文献資料を使用。			水理物性	<p>文献資料による中部地方の岩種ごとの透水係数を平均して、4つの水理地質ユニットの透水係数を設定した(表-1)。</p> <p>なお、標高-3,000m以深の透水係数を<math>1.0 \times 10^{-6}</math>cm/secとしたモデル(解析ケース2)を設定した。また、不飽和領域における飽和度と不飽和透水係数の関係、および飽和度と圧力水頭(サクション)の関係は、図-5に示すように、基本のケースと、圧力水頭が2倍となる条件(解析ケース3)を設定した。</p>
備考					

解 析 結 果	<p>解析ケースを表-2に示す。</p> <p>(1) 基本ケースの解析結果</p> <p>① ピエゾ水頭、ダルシー流速</p> <p>基本ケースのピエゾ水頭を図-6に示す。図-6(a)は地表でのピエゾ水頭(起伏にかかわらず領域の表面を真上から描写したもの), (b)~(e)は深度別の水平断面でのピエゾ水頭, (f)~(i)は鉛直断面内のピエゾ水頭を示す。</p> <p>図-6(a), (b)~(e)をみると、領域東部の中北部山岳地帯や南西部の紀伊山地にあたるところにピエゾ水頭の高い部分がみられ、逆に中央部の濃尾平野や西部の大坂平野にあたる部分ではピエゾ水頭が低くその変化も極めて小さい。山地と丘陵の境界部や丘陵と平野の境界部にあたる部分には、ピエゾ水頭センターの密な部分がある。このようなピエゾ水頭分布の特徴はモデルの標高分布(図-3)の傾向に一致しており、ピエゾ水頭は領域の地形に調和した分布を示している。</p> <p>鉛直断面内のピエゾ水頭センター(図-6(f)~(i))は、山地部の下や浅層部の一部の領域を除き、標高0m以深ではほぼ鉛直方向に向いている。これより、地下深部では鉛直方向の流れがほとんどなくほぼ静水圧分布であることを示す。このことは、図-6(f)~(i)に示す標高-500~-5,000m水平面内のピエゾ水頭が深度に関わらずほとんど変わらないことにも示されている。</p> <p>ダルシー流速もピエゾ水頭センターと同様に地形を反映している(図-7)。</p> <p>② 動水勾配の頻度分布</p> <p>動水勾配は場所により異なるが、解析領域における動水勾配の値の範囲やばらつきを知るために、相対度数分布図(ヒストグラム)および累積相対度数曲線を用いて動水勾配の大きさ(対数刻み)の分布傾向を示した。ここでは、動水勾配を解析モデルの各要素ごとに算定し、各要素の体積を度数として表わした。それらを解析領域全体の体積で除して各要素ごとの相対度数とした。</p> <p>図-8に基本ケースにおける領域全体の動水勾配分布を示す。動水勾配は0.01前後をピークに分布し領域のはほとんど(99%以上)の部分で0.04より小さい。</p> <p>図-9には、深度別の動水勾配の頻度分布をみると、深度0~500m(地表~地表下500m), 深度500~1,000m, 深度1,000~1,500m, 深度0~1,500mの4領域ごとの動水勾配分布を示してある。深度500~1,000m領域では分布のピークが0.02~0.03付近にあり、0.04を越える部分が4.5%ある。深度500~1,000mおよび深度1,000~1,500m領域では、深度0~500mよりも全体に分布が小さい方へ移動し、0.04を越える部分の割合は約1%となる。深度0~1,500mについてみた場合は、0.04を越える部分は約2%である。</p> <p>③ 浸出点分布と水収支</p> <p>基本ケースにおける解析領域での浸出点の分布と水収支を図-10に示す。浸出点は山地と丘陵地の境界および平野の周辺部に多く位置する。</p> <p>水収支についてみると、太平洋および日本海への湧出量はいずれもおよそ<math>5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}</math>である。琵琶湖にも地下水が湧出する。涵養量は<math>26.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}</math>、地表での浸出量は<math>18.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}</math>であり、涵養量の約75%が表面から浸出する。</p> <p>(2) 解析ケースごとの結果の比較</p> <p>① ピエゾ水頭、ダルシー流速</p> <p>4つの解析ケースにおける標高-1,000m水平面でのピエゾ水頭分布を図-11に示す。いずれのケースでもピエゾ水頭は基本ケースと同様に地形に調和した分布を示す。解析ケース2および3では、領域東部の中北部山岳地帯でのピエゾ水頭のピークが、基本ケースおよびケース4に比べて200~300m高い。しかし、山岳部以外の部分でのパターンは4つのケースすべてにおいてほぼ同様で、ピエゾ水頭の分布にはほとんど違いがない。このことは他のレベルの水平面や鉛直断面でも同様である。</p> <p>解析ケースごとに標高-500m水平面でのダルシー流速を比較しても、ケースによる違いはほとんどない(図-12)。</p> <p>これらのことから、標高-3,000m以深の透水係数の違いはピエゾ水頭・ダルシー流速にほとんど影響を与える、ここで得られた結果は標高-3,000m以浅の水理地質特性や地形形状を反映していることがわかる。</p>	解 析 結 果
	<p>② 動水勾配の頻度分布</p> <p>図-13には、解析条件が動水勾配分布に与える影響をみるために4つの解析ケースの結果を比較している(いずれも全領域を対象)。この図において、4つのケースで顕著な違いは認められない。解析ケース2は動水勾配が小さな部分(0.01未満の部分)が比較的多いが、0.04以上の部分も約2%と他のケースよりわずかに多い。</p> <p>図-14は、深度別に4つの解析ケースの動水勾配分布を比較したものである(対象領域は深度0~500m, 500~1,000m, 1,000~1,500m, 0~1,500m)。いずれの領域においても解析ケース2は動水勾配が小さな部分が比較的多く、同時に0.04以上の部分の割合が他のケースに比べてやや多い(約2%)。しかし全体の分布傾向は4ケースで大きな差はない。</p> <p>③ 浸出点および水収支</p> <p>図-10には4つのケースの浸出点分布と水収支を示してある。涵養量および側方境界からの海への浸出量(太平洋側と日本海側への合計)はケース3でやや多くケース2で少ないが、他のケースとオーダーで異なることはなく、水収支についても解析ケースによる大きな差はない。</p> <p>④ 沿岸部での湧出量</p> <p>図-15は、海岸部に位置する3地点での深度別の湧出量について、基本ケースおよび解析ケース2の結果を示す。</p> <p>沿岸部での湧出のはほとんどは標高0mの節点で生じており、それより深い部分からの湧出量は非常に小さい。A, B点は表層部に高透水部が存在するところ、C点は深度方向の透水性の変化のないところであるが、3点のいずれにおいても湧出のはほとんどが標高0mの節点で生じていることに違いはない。これらの結果は、側方境界に不透水条件を与えた解析ケース4の結果とほぼ同様となる。</p> <p>解析ケース2では、標高-3,000m以深の透水係数を基本ケースに比べて小さく設定したため、標高-3,000m以深での湧出量がやや小さくなっているが、深度方向の分布傾向には基本ケースと大きな差異は認められない。</p> <p>(3) まとめ</p> <p>以上の解析結果をまとめると次のようになる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① ピエゾ水頭は地形に調和した分布を示す。</li> <li>② ピエゾ水頭の鉛直方向の変化は浅部を除く領域のはどの地点において極めて小さく、ほぼ静水圧分布を示す。</li> <li>③ 動水勾配は解析領域のはどの部分(基本ケース、解析ケース3, 4では99%以上、解析ケース2では98%の領域)で0.04より小さい。</li> <li>④ 深度500m以深における動水勾配は、それ以浅に比べ小さな値を示す。</li> <li>⑤ 本解析では、地下深部の透水係数分布・不飽和特性・海岸部での側方境界条件(淡塩境界)の設定を変えても、ピエゾ水頭、動水勾配分布および地表・海域への浸出量の解析結果に顕著な違いは現れない。</li> </ul>	
	<p>濃尾平野での地下水の取水量は昭和50年前後で約<math>4.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}</math>となっている(環境庁水質保全局企画課編, 1978)。昭和50年前後は、濃尾平野における地盤沈下などの問題に対して取水量制限が加えられ、沈下量が減少しつつある時期であり、この値はほぼ濃尾平野を涵養する水量に匹敵すると考えられる。本解析の結果による太平洋側への湧出量は<math>4 \sim 5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}</math>であり、濃尾平野の取水量にはほぼ相当する。このことは、解析により得られた湧水量の妥当性を示唆するものと考えられる。</p>	検 証 手 法

施設名 東濃 (2)





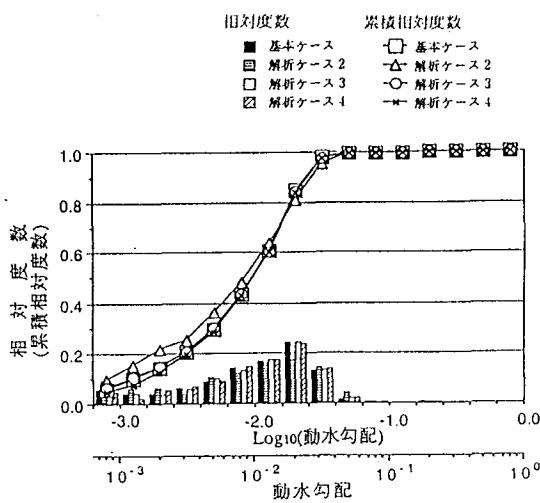


図-13 解析ケース別に見た動水勾配の頻度分布  
いずれのケースも全領域を対象としてある。

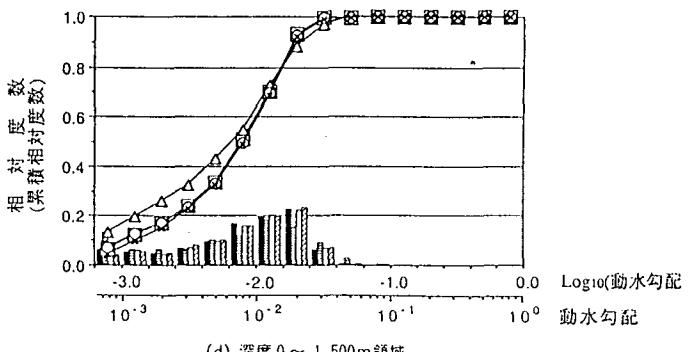
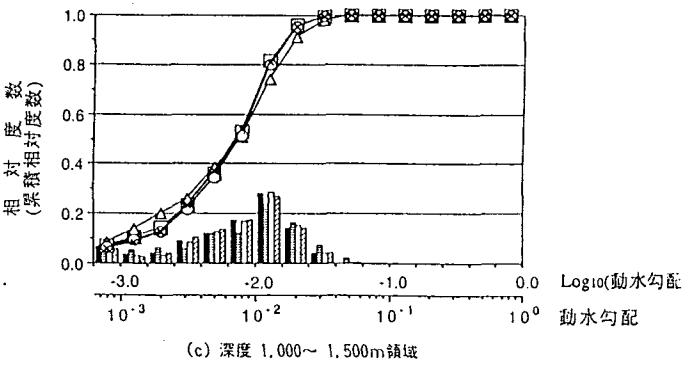
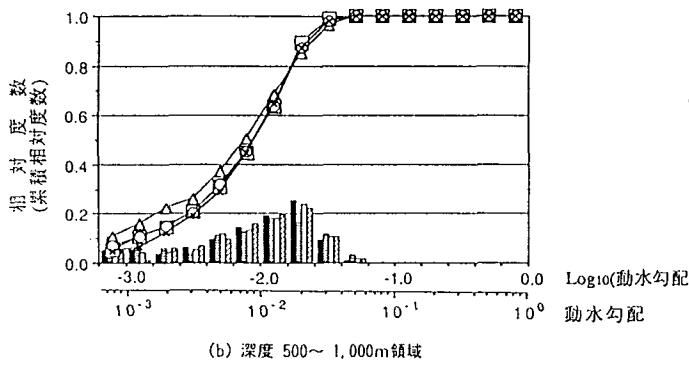
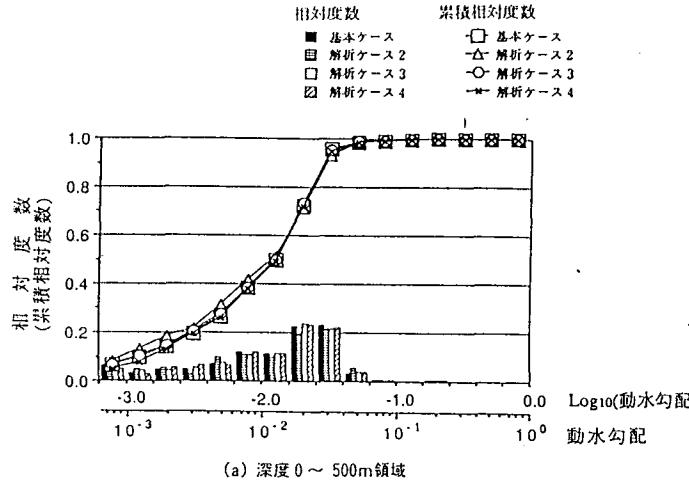


図-14 深度別に見た4つの解析ケースの動水勾配の頻度分布 - その2

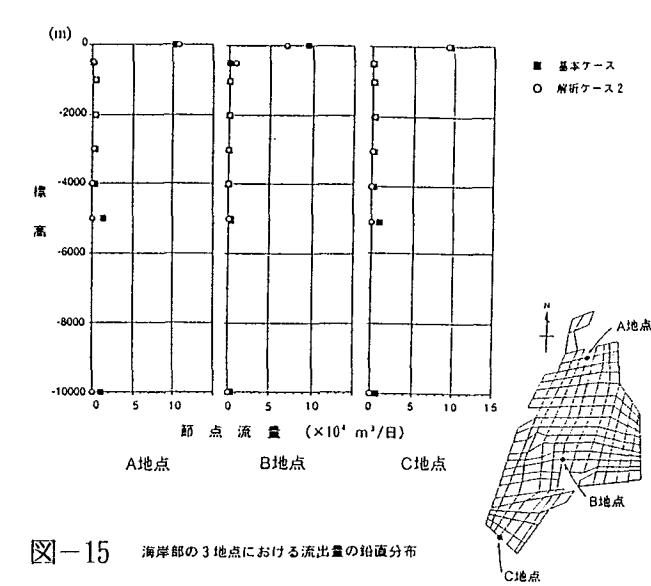


図-15 海岸部の3地点における流出量の鉛直分布

施設名	東濃 (3)	土被り	- m	調査研究の目的	東濃地域の8km×7kmの領域における地下水流动解析を行い、地下1,000mまでの地下水の流れの概要を把握することを目的とする。 主な特徴は次の点である。 ① 花崗岩の基盤上に新第三紀以降の堆積物が分布するという日本の典型的な堆積盆の一部を対象とする。 ② 現地で得られた地質調査結果と水理試験結果を用いて解析を行う。 ③ 中部日本を対象とした解析の結果を考慮して境界条件を設定する。
地下構造物の概要	対象領域は岐阜県土岐市と瑞浪市の境界付近に位置し、いわゆる土岐・瑞浪盆地の北部にあたる東西約8km、南北約7kmの範囲である（図-1）。 本領域は中部日本の領域の一部であり、その中央部近くの丘陵に位置する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 地表踏査</li> <li>○ ポーリングコア観察（約300本）</li> <li>○ 動燃式低水圧制御水理試験</li> <li>○ 低圧ルジョン試験</li> <li>○ 比抵抗値の測定（電気検層）</li> <li>○ 水収支調査</li> <li>○ MPシステムによるピエゾ水頭測定（2孔）</li> </ul>			
地形・地質・地質構造	本領域周辺には標高300～400mの定�性丘陵地・丘陵性山地が広がり、当地域の北方および東方は美濃三河高原に向かって高度を増す。本領域の南縁では土岐川が西～南西に向かって流下し、領域は全体に南に向かってゆるく傾斜する。本領域中央部のやや東寄りには、土岐川支流の日吉川による谷地形がほぼ南北に延びる。 本地域は白亜紀～古第三紀の花崗岩を基盤とし、その上に、現在の土岐・瑞浪盆地を構成する中新統（瑞浪層群）が分布する。さらにその上の地形的高所には、未固結の鮮新～更新統（瀬戸層群）が分布する。	備考			
水理学環的境					
地球化環学的境					

## 施設名 東濃 (3)

解 析 手 法	コード名 TAGSAC	非定常3次元飽和・不飽和有限要素法解析  コードの内容		(1) ピエゾ水頭 ダルシー流速 ピエゾ水頭を図-6に、ダルシー流速を図-7に示す。 地表部でのピエゾ水頭の分布(図-6(a))をみると、ピエゾ水頭は細かく変化し、センター線が密になっている部分もある。これは、モデル標高分布(図-2)に示された尾根・谷などの地形に沿っている。これに対し深度0, -500, -1,000mにおけるピエゾ水頭分布は、いずれの深度においても北部で高く南へゆるく低下する単調な傾向を示し(図-6(b), (c), (d))、地下水はほぼ真南に向かって流れることが示されている(図-7)。このことは、本領域周辺の地形が大局的に南下がりを示すことに調和するものである。 南北断面のピエゾ水頭分布をみると(図-6(e))、北側境界付近を除いて、標高0m以深の深部ではセンター線がほぼ鉛直に向き(すなわち静水圧分布を示す)、地下水は南へ向かってほぼ水平に流れている結果になっている。北側境界付近では地下水が下向きに流れることが示され、涵養域であることがわかる。東西方向のピエゾ水頭断面(図-6(f))では、南北方向に比べてセンター線の密度が低く、東西方向の動水勾配が極めて小さいことが示されている。
解 析 モ デ ル		地形モデルの構築は、2万5千分の1地形図から接峰面図を作成し、この図になるべく沿うよう要素分割を行った。各要素の平均標高は国土数値情報の平均値を基に算出し、モデル化にあたって、ほぼ水平な地層界面の存在する260mと200m、および主な尾根部・谷底部の標高である360, 310, 150mの5つの標高を選び、これらの5つの標高のうち平均標高に最も近いものをもって各要素のモデル上の標高とした(図-2)。 地質構造モデルは、対象領域内で行った地表踏査、ボーリング観察に基づいて構築した。 地形モデルと地質構造モデルを基本とし、図-3に示すように7つの水理地質ユニットからなる水理地質構造モデルを設定した。本モデルの特徴は次のとおりである。 ① 花崗岩最上部には、高透水性の風化岩(ユニット6)が分布する。 ② 花崗岩の直上には高透水性の礫岩(ユニット5:土岐挟炭累層の最下部に相当)が分布する。この礫岩は基盤表面のチャンネル部に分布する。 ③ 標高150~200mの間には、難透水性の凝灰質岩(ユニット3:土岐挟炭累層上部に相当)がほぼ水平に分布する。 ④ 標高260m以上の場所には、高透水性の未固結堆積物(ユニット1:瀬戸層群に相当)が分布する。 こうして構築した水理地質構造モデルを解析モデルとした。モデルは、6面体8節点の要素1,327個からなり、節点数は1,733である。	(2) 動水勾配の頻度分布 動水勾配の頻度分布を図-8、図-9に示す。動水勾配は要素ごとに算定し、各要素の体積を度数として表わした。それらを全体の体積で除して相対度数とした。 解析領域全体の動水勾配(図-8)は、約0.02となる場所が最も多い。また、領域内の大部分(96%以上)において0.04を越えない。 深度別の動水勾配の頻度分布を図-9に示す。対象領域は、深度0~500m(地表下500mまで)、深度500~1,000m、深度1,000~1,500m、深度0~1,500mの4領域である。深度0~500mではピークは領域全体の場合と同様に0.02付近にあるが、0.04以上の部分も約20%あり、ばらつきが大きい。深度500~1,000m及び1,000~1,500m領域でも分布のピークは同様に0.02付近にあるものの、大部分が0.01~0.04の間にあり、0.04を越える部分はほとんどない(1%未満)。このように、深度500m以深での動水勾配分布は、500m以浅を対象とした場合よりも全体に小さくなる。 深度0~1,500mを対象とした場合、0.04を越える部分が約7%あるが、この大部分が深度500m以浅にあることがわかる。	
解 析 条 件	境界条件	境界条件を図-4に示す。		(3) 水収支と浸出点分布 図-10には流量の解析結果より得られた解析領域の水収支と浸出点の分布を示す。 6,300m <sup>3</sup> /日(約2.3×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /年)の水が地表へ浸出し、南側境界からはこの約4倍の水が地下流出することが示されている。 また、浸出点の分布をみると、南部及び東部の斜面下部に多いことがわかる。
水 理 物 性		各ユニットの平均的な透水係数を表-1に示す。 不飽和特性に関しては、飽和度と相対透水係数の関係、および飽和度と圧力水頭の関係を図-5に示すように設定した。		(5) 深度500m以深での動水勾配は、それ以浅に比べて小さくなる。 本領域では、試錐孔を用いて多深度におけるピエゾ水頭の測定(MPシステムによる測定)が行われており、少なくとも地下200m付近までは静水圧分布をしていることがわかっている(図-11)。また、地下1,000m付近での間隙水圧測定においても同様のピエゾ水頭が示され、地下水圧はおよそ静水圧分布であると推定されている。これらの原位置調査結果は、地下深部の地下水圧はほぼ静水圧分布を示すという本解析の結果と調和的であり、本解析の妥当性を示唆するものと考えられる。

### 施設名 東濃 (3)

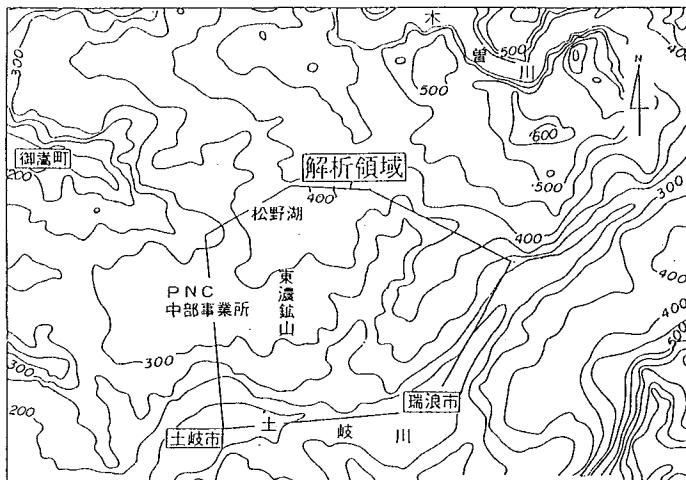


図-1 東濃地域の接縫面図と解析領域

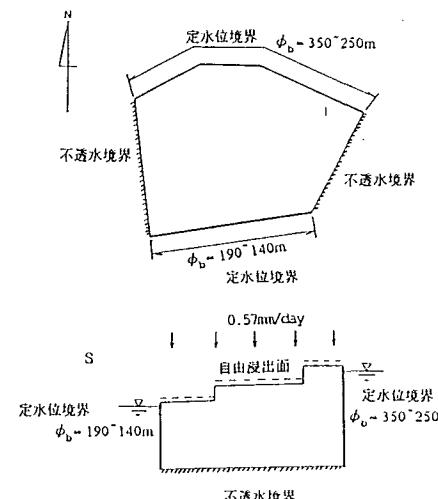


図-4 境界条件

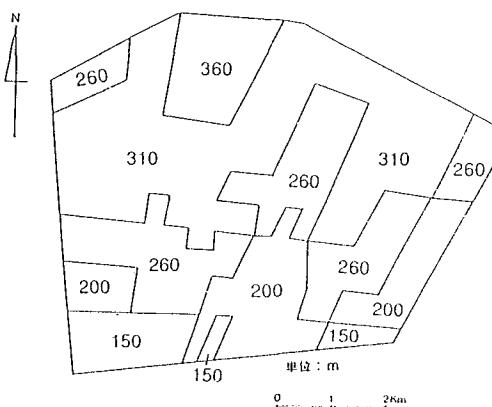


図-2 モデル上の標高

表-1 水理地質ユニットの区分

水理地質ユニット	透水係数 (cm/s)	岩相
ユニット1	$1.0 \times 10^{-4}$	未固結堆積物
ユニット2	$1.9 \times 10^{-4}$	砂岩 (中～粗粒)
ユニット3	$5.4 \times 10^{-4}$	砂岩 (基底質、細～中粒)
ユニット4	$2.1 \times 10^{-4}$	疊岩 (細～中粒)
ユニット5	$6.6 \times 10^{-5}$	疊岩 (中～粗粒)
ユニット6	$2.4 \times 10^{-5}$	風化花崗岩
ユニット7	$6.3 \times 10^{-6}$	花崗岩

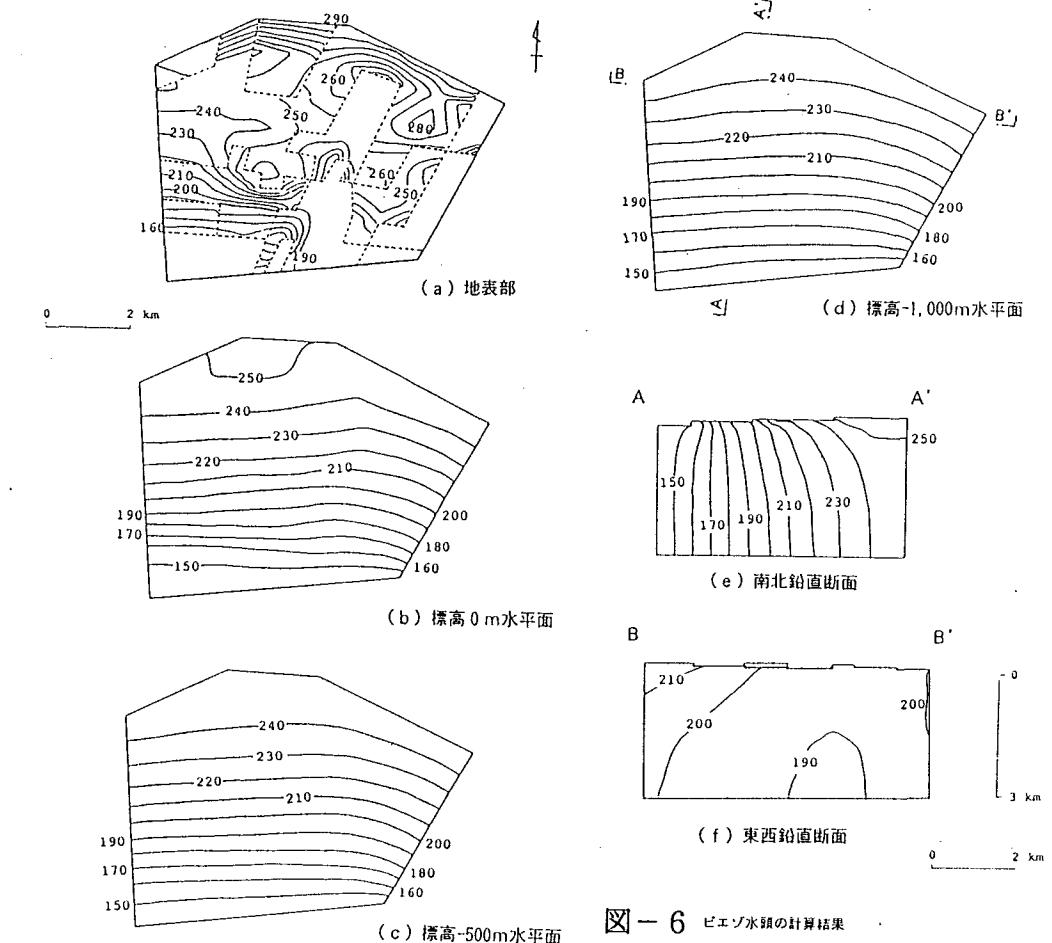


図-6 ピエゾ水頭の計算結果

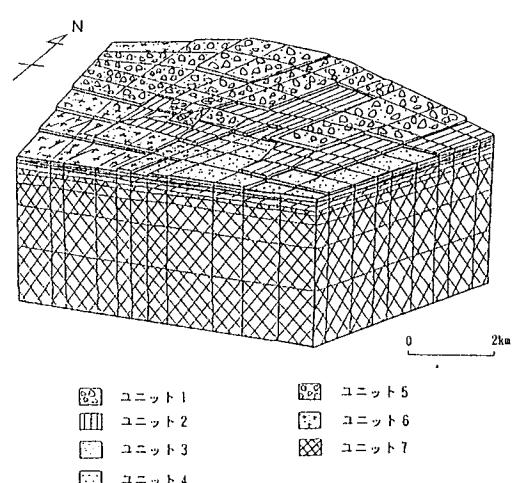


図-3 東濃地域の水理地質構造モデル

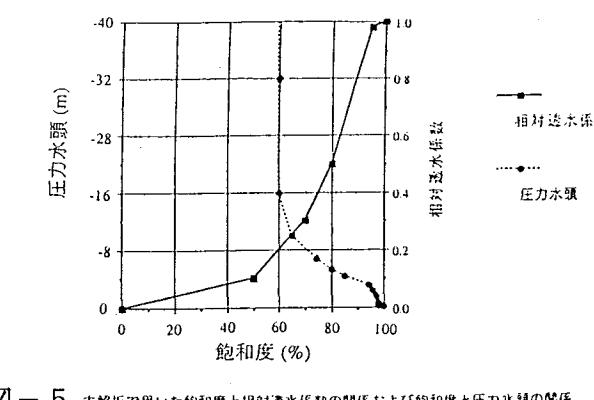


図-5 本解析で用いた飽和度と相対透水係数の関係および飽和度と圧力水頭の関係

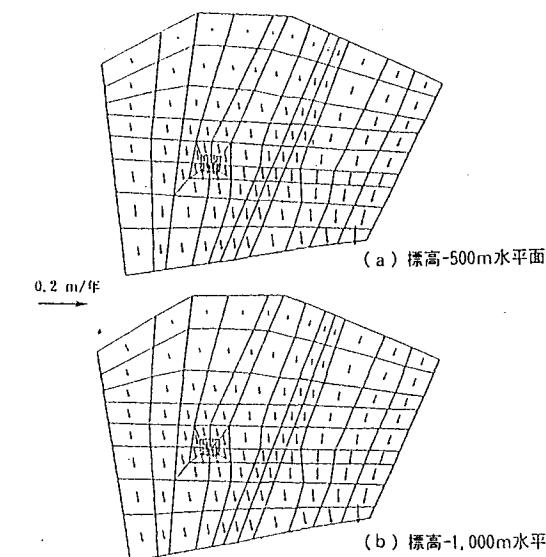


図-7 ダルシー流速の計算結果

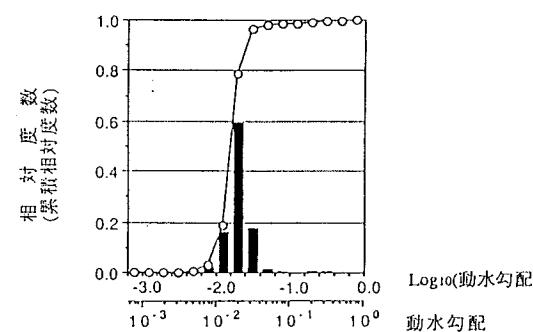


図-8 全領域を対象とした動水勾配の頻度分布

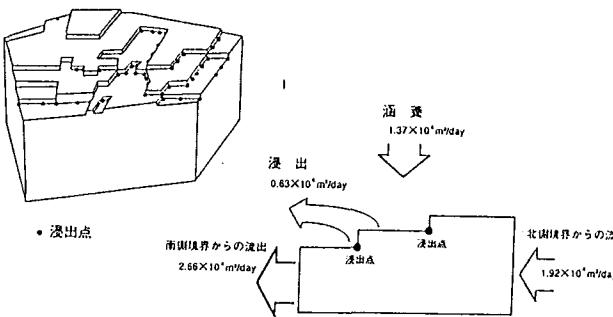
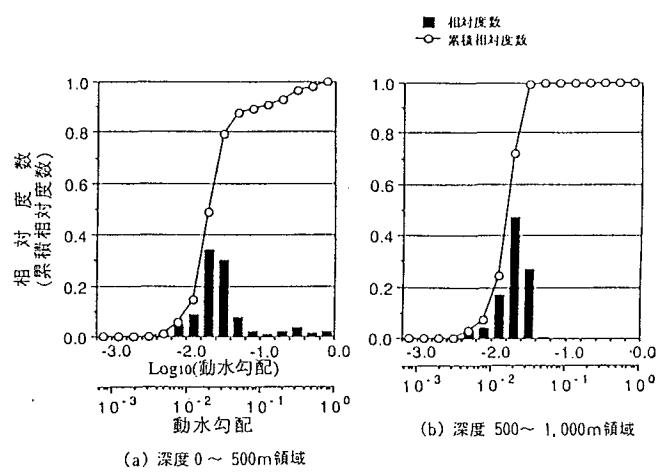
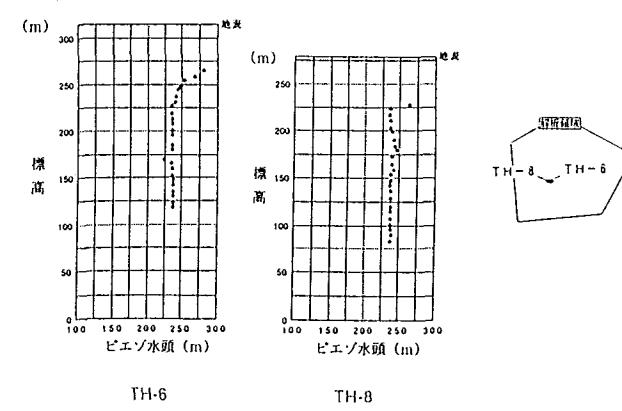


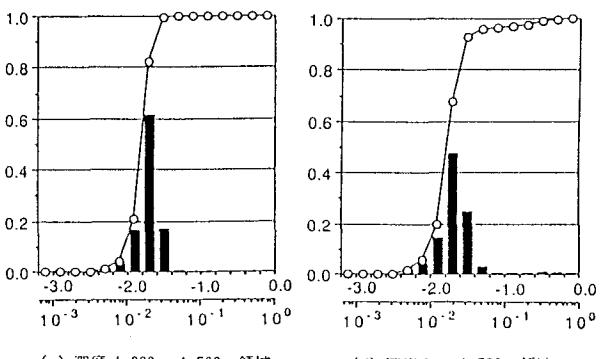
図-10 浸出点分布と水収支



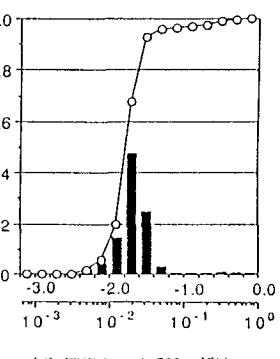
(a) 深度 0 ~ 500m 領域



(b) 深度 500 ~ 1,000m 領域



(c) 深度 1,000 ~ 1,500m 領域



(d) 深度 0 ~ 1,500m 領域

図-9 深度別に見た動水勾配の頻度分布

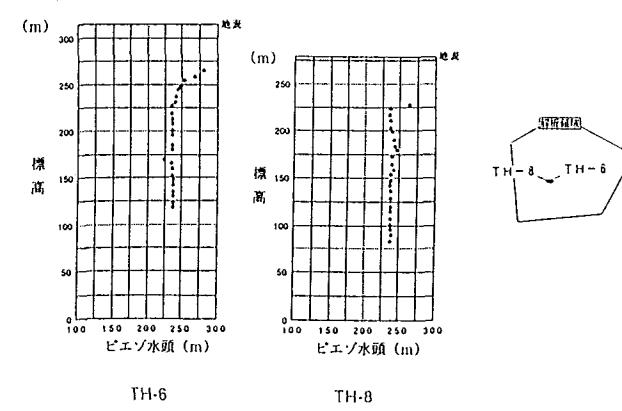


図-11 MP システムによるピエゾ水頭の測定結果  
TH-6 号孔, TH-8 号孔での結果

施設名	釜石原位置試験場(1)	土被り	600 m	調査研究の目的 ストリパプロジェクトでゴールダーアソシエイツが採用したフラクチャーネットワーク解析を用いて、ストリパで行われた手法と同様の手順で解析を実施し、わが国の地質条件に対する適用性の検討を行う。
地下構造物の概要	岩手県釜石市の西方約20kmの釜石鉱山の海面から550mレベルにある2本の既存坑道(NW押し出し坑道、NE押し出し坑道)間に新規にKD-88、KD-89、KD-90の3本の坑道と多くのボーリング孔を削孔して、原位置試験を実施している(図-1、2参照)。KD-88、KD-89坑道とこれに付随するボーリング孔では様々な調査・試験を実施して水理地質構造の把握が行われ、KD-90坑道とこれに付随するボーリング孔は解析結果の検証のために用いられる。			
地形・地質	前期白亜期花崗岩類に属する栗橋花崗閃緑岩で、N65~75°E走向の亀裂が多くみられ、亀裂頻度は、0.8~1.8本/m。	調査項目と調査手法 亀裂調査 ボーリング孔調査 坑道観察  間隙水圧測定  低圧ルジオン試験 2.5mの試験区間長で15点	備考	
地質構造				
水理学環的境	透水係数は、 $1.5 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-8}$ cm/sの範囲、平均値は $10^{-6}$ のオーダーで、割れ目の分布に依存する異方性がある。透水性に関するREVは20数mである。			
地球化環学境的	坑道における地下水の採水と化学分析、安定同位体及びトリチウムの調査などが行われ、原位置試験場周辺の地下水は、6つに分けられ、標高の高い所から浸透した地下水が地下深部に浸透している可能性がある。			

## 施設名 釜石(1)

解 析 手 法	コード名 MAFIC	岩盤中の水は主に不連続な亀裂が作り出すネットワーク中を流れるという考え方に基づいており、ゴールダー・アソシエイツによって開発された。解析システムは、ネットワークをモデル化するFracManとネットワークにおける地下水水流解析、拡散解析を行うMAFICからなる。Frac ManはFracSys, FracWorks, MeshMakerから構成される。FracSysは実測データから各亀裂パラメータの確率密度関数を求めるパッケージであり、FracWorksは亀裂モデルの作成と作成された亀裂モデルを用いたサンプリング・シミュレーションを行う。MeshMakerは作成された亀裂モデルをメッシュ分割し、MAFICへの入力モデルを作成する。MAFICは有限要素法を用いた解析コードであり、飽和状態の流れの解析及び粒子追跡法による拡散解析を行う。	流入解析結果を図-5, 6に示す。これらの結果より、ほとんどの流量はいくつかの場所に存在する亀裂から得られていることを示している。この解析によって得られた統計量は以下のとおりである。 平均流入量 : $1.2\ell/\text{min}$ 流入量の標準偏差 : $1.2\ell/\text{min}$ 最尤流入量 : $1.0\ell/\text{min}$ 流入量の幅 : $0.15 \sim 4.80\ell/\text{min}$ 90%信頼区間 : $0.30 \sim 3.80\ell/\text{min}$
	解析モデル	解析領域はKD-90坑道を中心とし、他の空洞を含む一辺200mの立方体である。亀裂については、次のようにモデル化されている。(図-3) KD-90坑道を中心とする半径40mの円柱部について亀裂の大きさは、KD-90坑道床部、側壁、天井部における亀裂端部の統計処理によって推定され、亀裂サイズの初期値は平均半径7m、標準偏差10mの亀裂半径の対数正規分布によってモデル化されている。図-4は亀裂半径壁面交差の関係を示したものである。また、壁面交差の比率は一面のみの亀裂17%，二面の亀裂46%，3面すべての亀裂37%となっている。 その外側の領域については、10~50mの亀裂半径を有する2つのフラクチャーゾーンと30~50mの半径の亀裂からなる。	
解 析 条 件	境界条件	KHボーリング孔の水圧と水位の計測値から、KD-90坑道の底部から30m上方に自由水面があるものと考え、静水圧分布を仮定している。	上記湧水量に対し、1991年10月時点の観測データによれば、KD-90坑道の流入量は $1.4\ell/\text{min}$ である。また、流入分布は天井及び側壁の17点に集中しており、最尤流入量は350ml/minであった。
	水理物性	亀裂の透水性は0xfiletアプローチと呼ばれる手法で評価されている。この手法は、低圧ルジョン試験で得られるパッカーワークの透水量係数とこの区間の亀裂特性から亀裂の最適な透水量係数を求めるものである。	

施設名 釜石(1)

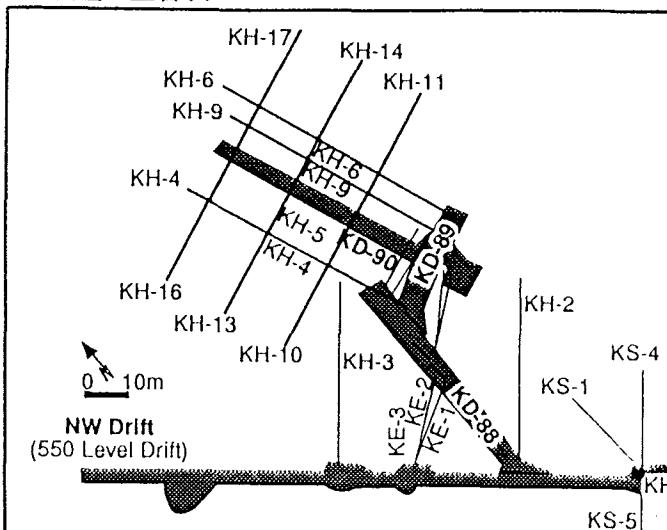


図-1 Map of Kamaishi Experimental Area.

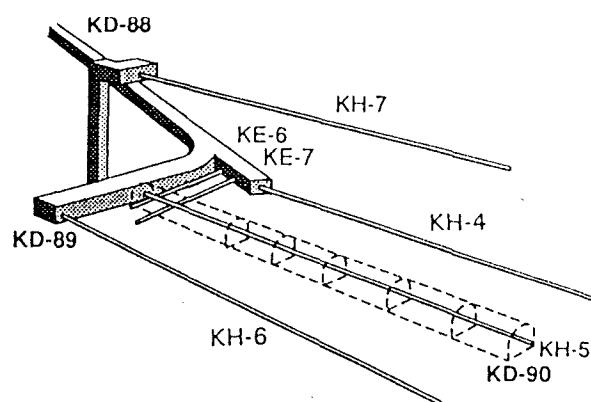


図-2 Initial Set of Boreholes Around KD-90.

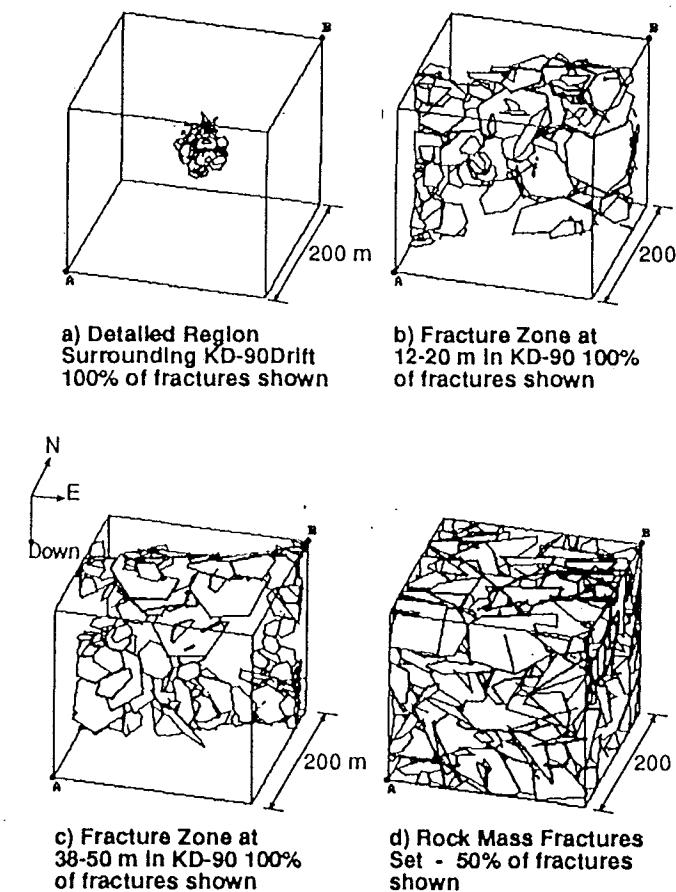


図-3 Drift Simulation Regions

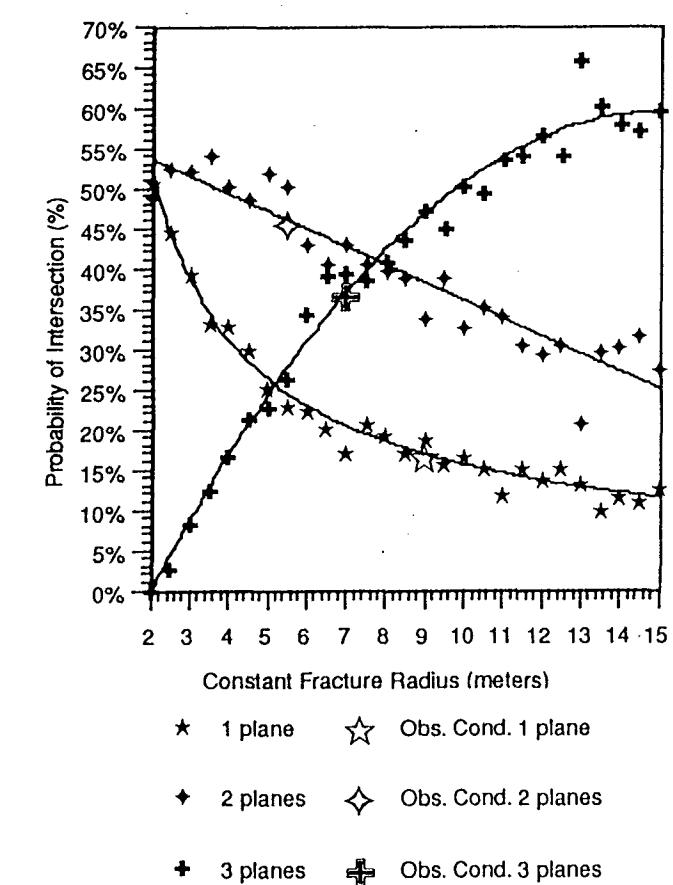


図-4 Simulated probabilities of intersecting 1, 2, or 3 panels of drift KD-90 with constant radius fractures. Values for 1, 2, and 3 panel fracture intersections for conductive fractures are shown by single large symbols.

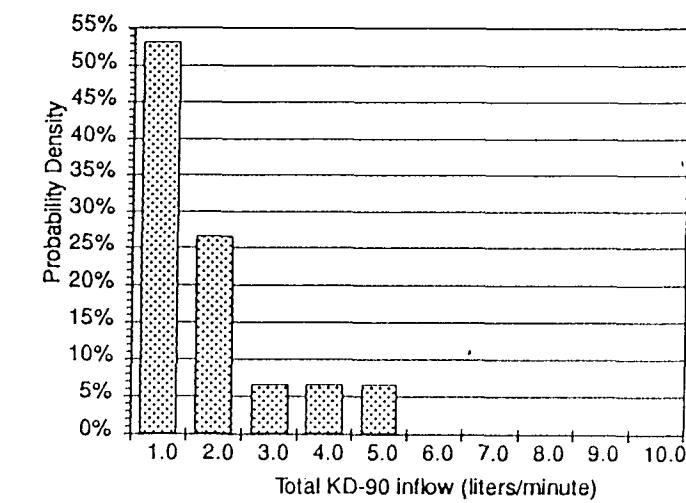


図-5 Histogram of Simulation Inflows.

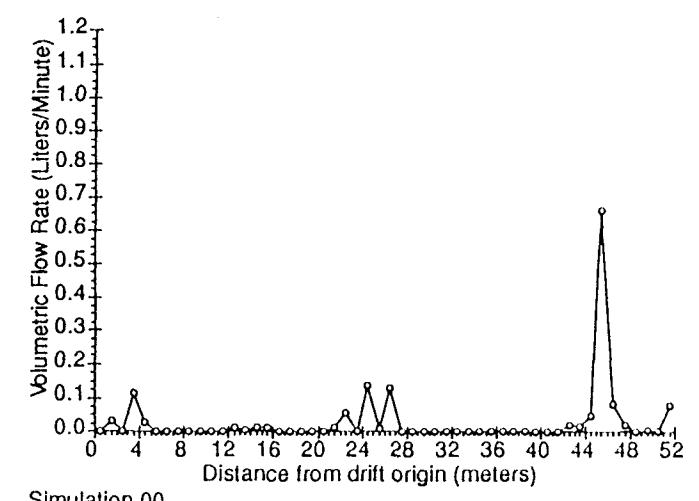


図-6 Inflow to 1-m Panels Around Drift.

施設名	釜石原位置試験場(2)	土被り	600 m	調査研究の目的	ストリパプロジェクトでゴールダーアソシエイツが採用したフラクチャーネットワーク解析を用いて、ストリパで行われた手法と同様の手順で解析を実施し、わが国の地質条件に対する適用性の検討を行う。																					
地下構造物の概要	岩手県釜石市の西方約20kmの釜石鉱山の海面から550mレベルにある2本の既存坑道(NW押し出し坑道、NE押し出し坑道)間に新規にKD-88、KD-89、KD-90の3本の坑道と多くのボーリング孔を削孔して、原位置試験を実施している。KD-88、KD-89坑道とこれに付随するボーリング孔では様々な調査・試験を実施して水理地質構造の把握が行われ、KD-90坑道とこれに付随するボーリング孔は解析結果の検証のため用いられる。 トレーサー試験は図-1に示すようにKD-90坑道とこの中心から上方約7.4mと約12.5mにKD-90坑道と平行に鋸進されたボーリング孔(KH-7、KH-8)を利用した。																									
地形・地質	前期白亜木花崗岩類に属する栗橋花崗閃緑岩で、N65~75°E走向の亀裂が多くみられ、亀裂頻度は、0.8~1.8本/m。	調査項目と調査手法	亀裂調査 KH-5、7、8のボアホールテレビ観察とボーリングコア調査 KD-90坑道の亀裂調査 ボーリング孔間圧力応答試験 KH-7孔の3m区間から定圧注水し、KH-8孔のパッカー区間で圧力応答を観察し、高透水性ゾーンを選定(図-3)。さらにKH-7孔のパッカー区間を0.72mに縮め、KH-8孔の圧力応答を観察(図-3)。 染料トレーサー試験 KH-7孔の23~23.72m区間から染料(エオシンG)を2.5kg/cm³で注入し、KH-8孔にボアホールテレビを挿入して染料の湧出状況を観察。 トレーサー試験 図-5に示すKH-7孔から約1g/lの塩水を注入し、KH-8孔で回収した。試験に当っては両区間で圧力、電気伝導度、温度を測定した。試験状況を備考欄に示す。試験結果を図-6、7に示す。 透水試験 トレーサー終了後にKH-7、KH-8の試験区間において実施。																							
地質構造	KH-5、7、8の亀裂調査データとKD-90坑道の亀裂調査データによる割れ目分布を図-2に示す。	備考	トレーサー試験の状況																							
水理学環的境	透水係数は、 $1.5 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ の範囲、平均値は $10^{-6}$ のオーダーで、割れ目の分布に依存する異方性がある。透水性に関するREVは20数mである。		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">回数</th> <th colspan="2">KH-7孔</th> <th colspan="3">KH-8孔</th> </tr> <tr> <th>注入圧力 (kg/cm²)</th> <th>注入量 (ml/min)</th> <th>区間内圧力 (kg/cm²)</th> <th>排出量 (ml/min)</th> <th>トレーザー回収率 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1回目</td> <td>2.4</td> <td>170</td> <td>0.7</td> <td>90</td> <td>29.6</td> </tr> <tr> <td>2回目</td> <td>1.5</td> <td>57</td> <td>0.5</td> <td>124</td> <td>71.6</td> </tr> </tbody> </table>	回数	KH-7孔		KH-8孔			注入圧力 (kg/cm²)	注入量 (ml/min)	区間内圧力 (kg/cm²)	排出量 (ml/min)	トレーザー回収率 (%)	1回目	2.4	170	0.7	90	29.6	2回目	1.5	57	0.5	124	71.6
回数	KH-7孔		KH-8孔																							
	注入圧力 (kg/cm²)	注入量 (ml/min)	区間内圧力 (kg/cm²)	排出量 (ml/min)	トレーザー回収率 (%)																					
1回目	2.4	170	0.7	90	29.6																					
2回目	1.5	57	0.5	124	71.6																					
地球化環学境的	坑道における地下水の採水と化学分析、安定同位体及びトリチウムの調査などが行われ、原位置試験場周辺の地下水は、6つに分けられ、標高の高い所から浸透した地下水が地下深部に浸透している可能性がある。																									

## 施設名 釜石(2)

解析手法	コード名	FracMan/MAFIC	解析結果	トレーサー試験1回目をParticle Tracking法で解析した。解析12ケースの解析結果から、透水量係数について2点間の相関性がなく、標準偏差が平均値と同じで、 $a = 1$ のケースが実測値に最も近い結果となつた。その結果を図-9に示す。 対象亀裂の透水量係数の平均がほぼ $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $a = 1$ から物質移行に係わる亀裂の開口幅 $A_t$ は、約 $3.2 \times 10^{-4} \text{ m}$ となる。一方、亀裂の透水量係数に対応する水理学的間隙幅 $Ac$ は、
	コードの内容	<p>岩盤中の水は主に不連続な亀裂が作り出すネットワーク中を流れるという考え方に基づいており、ゴールダーリ・アソシエイツによって開発された。</p> <p>解析システムは、ネットワークをモデル化するFracManとネットワークにおける地下水水流解析、拡散解析を行うMAFICからなる。</p> <p>Frac ManはFracSys, FracWorks, MeshMakerから構成される。FracSysは、実測データから各亀裂パラメータの確率密度関数を求めるパッケージであり、亀裂サイズの確率密度関数から亀裂モデルの作成と作成された亀裂モデルを用いたサンプリング・シミュレーションを行う。</p> <p>MeshMakerは作成された亀裂モデルをメッシュ分割し、MAFICへの入力モデルを作成する。</p> <p>MAFICは有限要素法を用いた解析コードであり、飽和状態の流れの解析及び粒子追跡法による拡散解析を行う。</p>		$T = \frac{\rho \cdot g \cdot Ac^3}{12\mu}$ <p><math>\rho</math> : 流体密度  <math>g</math> : 重力加速度  <math>\mu</math> : 流体の動粘性係数</p> <p>で示され、これにより<math>Ac</math>を求めると約<math>4.6 \times 10^{-5} \text{ m}</math>となり、<math>A_t</math>は三乗則から求められる<math>Ac</math>の約7倍程度大きいことがわかった。</p>
解析モデル		解析領域はKD-90坑道を中心とする $100\text{m} \times 100\text{m} \times 100\text{m}$ の範囲を対象。 亀裂はKH-7, 8の既存のデータから染料トレーサー試験において観察された亀裂の走向、傾斜を求め、決定論的に発生させている。KH-7の孔口から23.2mに位置する亀裂はFrac-7, KH-8の孔口から34.6mに位置する亀裂はFrac-8と呼ばれ、亀裂の大きさはともに半径6mを仮定している。さらに内部領域については、KH-7, 8の既存の亀裂データから湧水亀裂と充填鉱物幅が10cm以上の亀裂を抽出し、それらの位置と方向のConditioning（原位置で得られた亀裂の位置と方向データを亀裂発生条件に加えること）が行われている。 外部領域の状況を含めて、モデル化に用いたパラメータを表-1に示す。また亀裂モデルの概念図図-8に示す。	解析結果	
	境界条件	外部境界条件については、KD-90坑道中心を基準面として全水頭20mを設定。		図-9に示したようにNaClの濃度曲線で実測値との比較が行われている。
解析条件			検証手法	
	物理物性	透水試験結果からFrac-7の透水量係数は $6.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 、Frac-8の透水量係数は $1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ と仮定され、これを平均値とし、標準偏差に平均値の0倍、0.1倍、1倍の3ケースを用いて、地質統計手法によって透水量係数の不均質性を以下の共分散 $C(r)$ を用いて与えた。 $C(r) = \sigma^2 \cdot e^{-(r/b)}$ <p><math>\sigma</math> : 標準偏差  <math>r</math> : 2点間の距離  <math>b</math> : 影響範囲で2点間の透水量係数に相関を持たせる場合 (<math>b &gt;</math>要素の大きさ) と、そうでない場合 (<math>b &lt;</math>要素の大きさ) の2通りを与えた。</p> <p>その他の亀裂の物性については表-1に示した。</p> <p>物性移行に係わる亀裂の間隙幅<math>A_t</math>は次式で表現した。</p> $A_t = a \times \sqrt{T}$ <p><math>T</math> : 透水量係数  <math>a</math> : 比例定数で<math>a = 1</math>と<math>a = 5</math>の2通りで行った。</p>		

施設名 釜石(2)

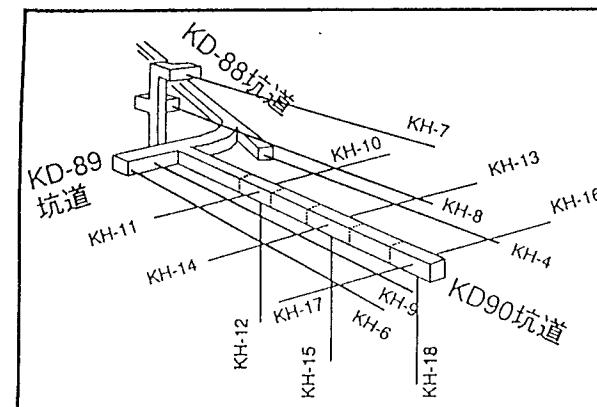


図-1 KD-90坑道付近のボーリング孔配置図

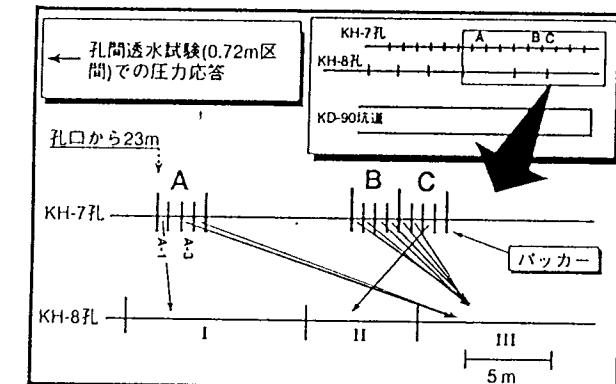


図-4 圧力応答試験(0.72m区間)結果

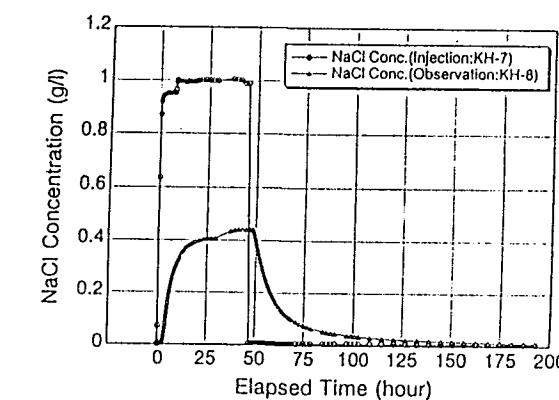


図-6 NaClトレーサー試験1結果

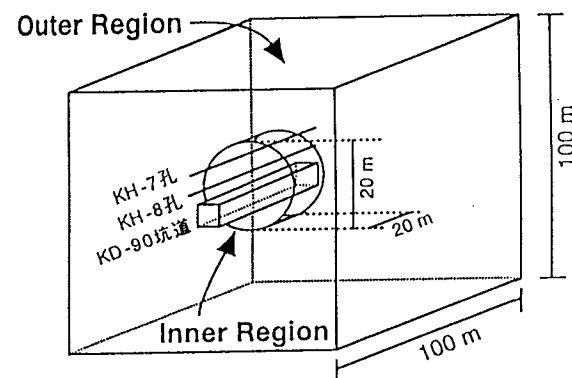


図-8 モデル概念図

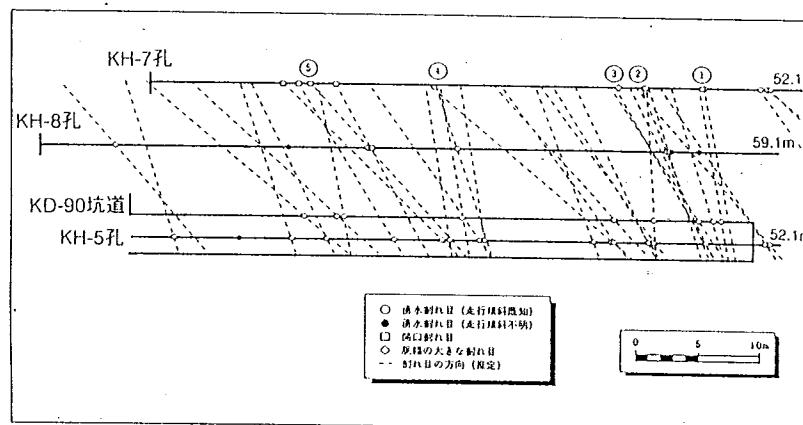


図-2 割れ目分布の推定図  
(KH-7~KH-8~KD-90坑道垂直断面)

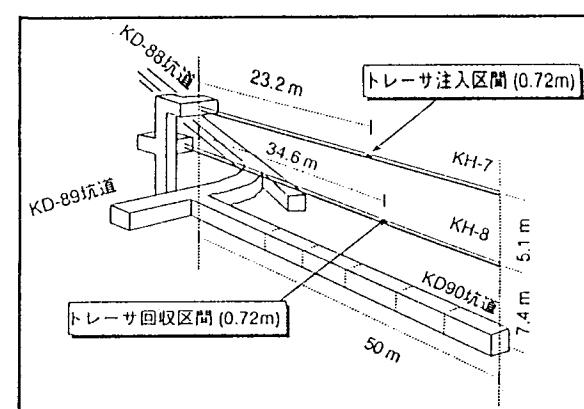


図-5 NaClトレーサー試験の注入区間と回収区間

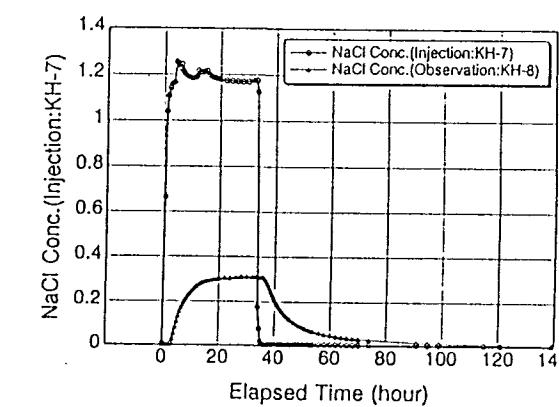


図-7 NaClトレーサー試験2結果

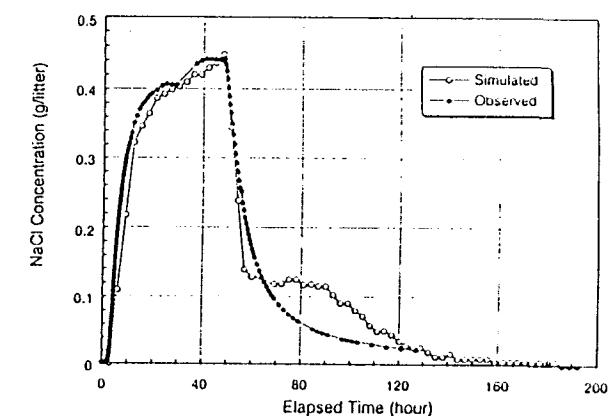


図-9 NaClトレーサー試験1の解析結果

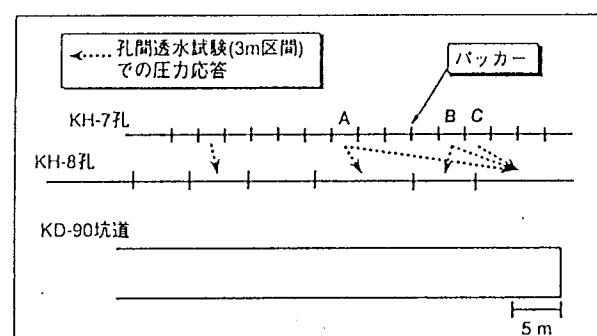


図-3 圧力応答試験(3m区間)結果

表-1 解析に用いたパラメータ

	Frac-7	Frac-8	Inner Region	Outer Region
走向・傾斜	N73E 63NW	N60E 76NW	bootstrap+conditioning	bootstrap
亀裂半径分布 m	6	6	対数正規分布 平均: 7 標準偏差: 1.25 範囲: 5~25	対数正規分布 平均: 25 標準偏差: 10 範囲: 30~50
透水量係数分布 $m^2/s$	$6.8 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-7}$	対数正規分布 平均 $4.05 \times 10^{-7}$ 標準偏差 $2.82 \times 10^{-6}$ 範囲 $3 \times 10^{-9} \sim 1$	対数正規分布 平均 $4.05 \times 10^{-7}$ 標準偏差 $2.82 \times 10^{-6}$ 範囲 $3 \times 10^{-9} \sim 1$

施設名	釜石原位置試験場(3)	土被り	600 m	調査研究の目的	割れ目系岩盤における地下水の流れは岩盤に発達する割れ目を主たる経路としていると考えられる。特に空洞のごく近傍における地下水の挙動については、位置によっては湧水がない割れ目があること、湧水している割れ目でも湧水量の位置的な偏りがあることなど均質な媒体とは考えられない現象が多い。 上記のような空洞近傍の地下水流动現象を明らかにするための基礎的な試験として、割れ面上の地下水の流路を実際に観察することを試みた。また、そこで透水係数の分布を推定するために、有限要素法による解析も行った。	
地下構造物の概要	岩手県釜石市の西方約20kmの釜石鉱山の海面から550mレベルにある2本の既存坑道(NW押し出し坑道, NE押し出し坑道)間に新規にKD-88, KD-89, KD-90の3本の坑道と多くのボーリング孔を削孔して、原位置試験を実施している(図-1, 2参照)。KD-88, KD-89坑道とこれに付随するボーリング孔では様々な調査・試験を実施して水理地質構造の把握が行われ、KD-90坑道とこれに付随するボーリング孔は解析結果の検証のために用いられる。	地下水水流下試験 図-1に示すように坑道壁面に現れた単一の割れ目の上下に注入孔と観測孔を穿孔し、水を定圧で注入してその割れ目の透水特性を試験した。観測孔では観測区間毎に浸出量を測定した。 また、トレーサーにエオシンを用い、注入孔から観測孔の各位置への到達時間を測定した。 その後、エオシンをエポキシ樹脂に溶き、注入後割れ目をはさむ岩盤の片方を切り出して、割れ面における流路をトレース(図-2参照)するとともに割れ目面の粗さ(図-3参照), 流路の厚さ(図-4参照)を測定した。				
地形・地質	前期白亜期花崗岩類に属する栗橋花崗閃緑岩で、N65~75°E走行の亀裂が多くみられ、亀裂頻度は、0.8~1.8本/m。	調査項目と調査手法	備考			
地質構造						
水理学環的境	透水係数は、 $1.5 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-8}$ cm/sの範囲、平均値は $10^{-6}$ のオーダーで、割れ目の分布に依存する異方性がある。透水性に関するREVは20数mである。					
地球化環学境的	坑道における地下水の採水と化学分析、安定同位体及びトリチウムの調査などが行われ、原位置試験場周辺の地下水は、6つに分けられ、標高の高い所から浸透した地下水が地下深部に浸透している可能性がある。					

## 施設名 釜石(3)

解析手法	コード名	MAFIC	解析結果	割れ目③における試験結果を用いて、割れ目内における流路および透水係数の分布を推定した。まず、最初の浸出位置と注入区間とを直線で結び、設定した境界条件のもとに到達した時間が同じになるまで割れ目内部の飽和透水係数を変化させて繰り返し計算を行い、透水係数の分布を計算した。その結果、図-6に示すように、飽和透水係数は、最初に浸出した位置と注入区間を結ぶ要素で $4.6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 、2番目に浸出した位置と注入期間を結ぶ要素で $6.9 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 、それ以外の要素内で $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ となった。この時のポテンシャル分布、流速分布は図-7のようである。流路にあたる部分では流速が他の領域に比べて非常に大きくなっている。到達時間の試験結果を表-1、計算結果を表-2に示す。ここで、試験で得られた坑道壁面からの距離が80~85cm、118cmの2箇所に着目して計算結果を比較する。上記の2箇所には節点rおよびuがほぼ対応するが、到達時間は両者できわめてよく対応している。観測孔において測定された各区間の浸出量を表-3、計算で得られた5節点の各浸出量を表-4に示す。なお、浸出量は試験値および計算値とも注入量で正規化した値で表している。表より、試験で得られた最も浸出量が多い区間と計算で得られた浸出量が最も多い節点位置は概ね一致しているが、浸出量比については両者の対応は得られなかった。
	コードの内容	有限要素法による飽和不飽和解析コード		なお、割れ目④においても同様の計算を実施し、図-8に示すように流路にあたる部分で $1.7 \times 10^{-2} \sim 3.6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、それ以外の要素内で $10^{-6} \text{ cm/sec}$ のオーダーが得られた。以上のように飽和不飽和浸透流解析によって流路の透水係数は $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ cm/sec}$ のオーダーであり、流路でない部分とは2~4オーダーの違いがあると推定された。
	解析モデル	解析に用いた要素分割は図-5に示すとおりで、要素数400、節点数400である。同図は割れ目の鉛直断面に相当し、左側が坑道壁面側である。		上記のとおり、トレーサーの到達時間および浸出量比で試験値と解析値を比較している。
	解析条件	図-5中のSection I, Section IIにおける節点a~yが浸出境界、Section III, Section IVが圧力水頭を1.0mとした一定圧力水頭境界、Section V, Section VIが不透水境界、注入区間のSection VIでは注入圧力を水柱5.0mとした一定圧力水頭境界である。		検証手法
水理物性		岩盤奥側では飽和状態にあるものと仮定し、岩盤奥側での初期飽和度を1.0、それ以外の節点は飽和透水係数に対応して0.95、0.75とした。これらの値は、実際のデータが全くないため、解の収束性を主に考慮したものである。不飽和特性曲線、間隙率および比貯留係数については京谷他(1990)日科技連不連続性岩盤ワーキンググループ資料によった。		

施設名 釜石(3)

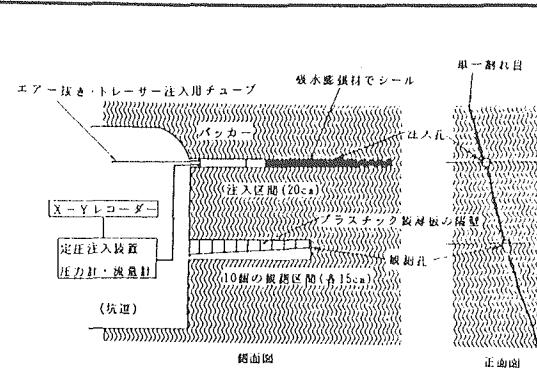


図-1 地下水流下試験の模式図

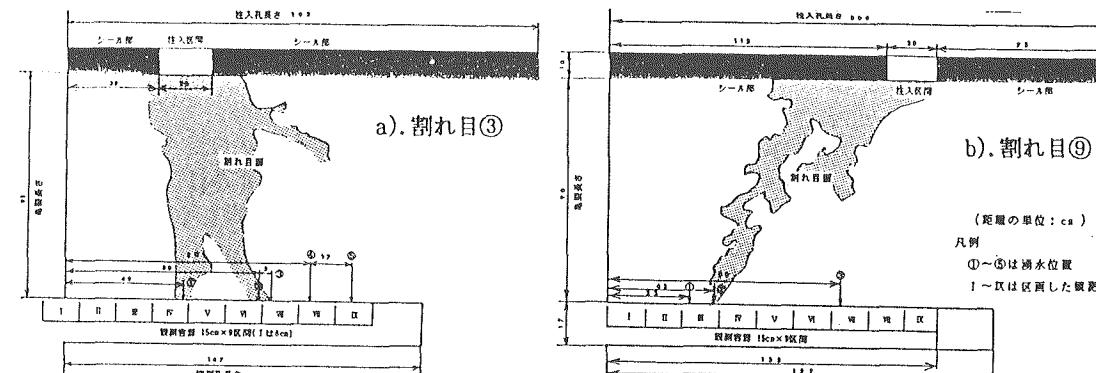


図-2 試験の諸元とトレーサーにより復元した流路

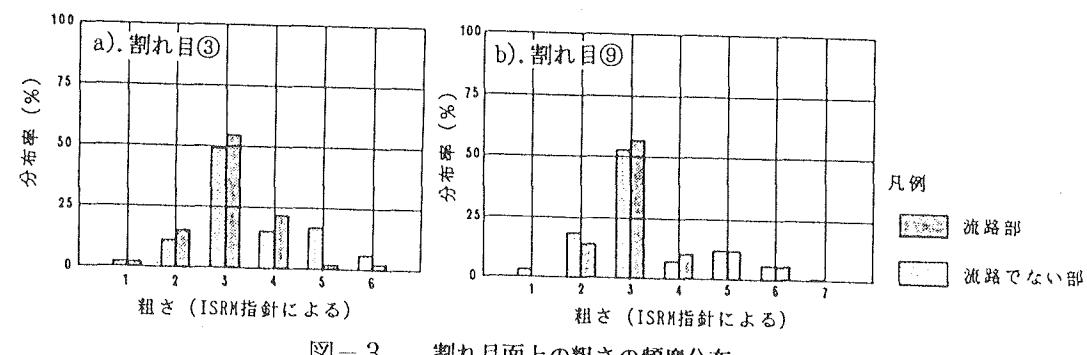


図-3 割れ目面上の粗さの頻度分布

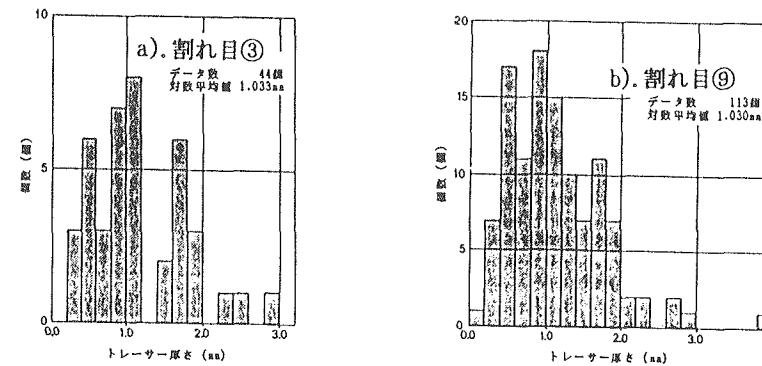


図-4 割れ目面上の流路におけるエポキシ樹脂の厚さの頻度分布

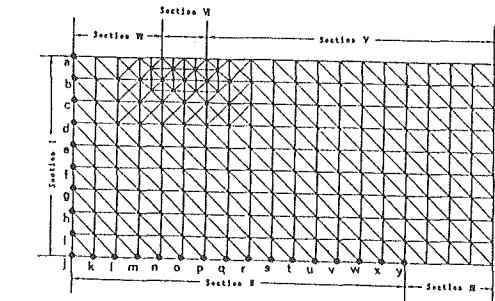


表-1 到達時間（試験結果）表-2 到達時間（計算結果）

坑壁からの距離(cm)	到達時間(sec)	節点	坑壁からの距離(cm)	到達時間(sec)
80 ~ 85 118	732 840	q	70	729
		r	80	732
		s	90	887
		u	110	849
		v	120	959

図-5 メッシュ図と境界条件

表-3 トレーサー浸出量比（試験結果）表-4 トレーサー浸出量比（計算値）

区間	坑壁からの距離(cm)	浸出量比	節点	坑壁からの距離(cm)	浸出量比
IV	36 ~ 51	0.000	q	70	0.13
V	51 ~ 66	0.000	r	80	0.19
VI	66 ~ 81	0.003	s	90	0.06
VII	81 ~ 96	0.040	u	110	0.19
VIII	96 ~ 111	0.010	v	120	0.09
IX	111 ~ 126	0.190			

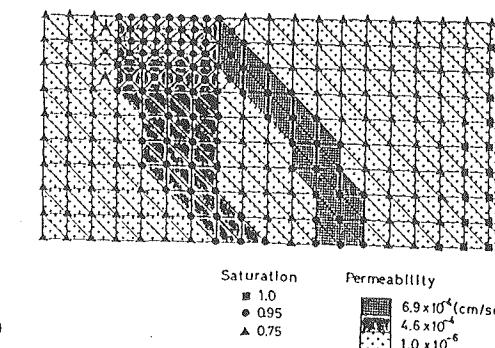
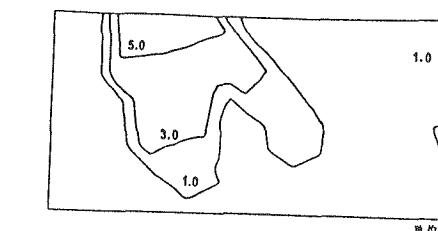
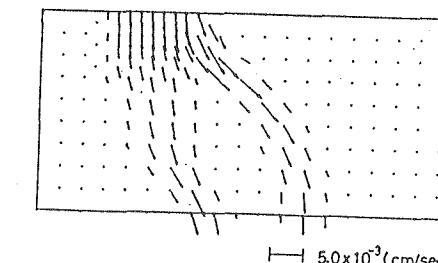


図-6 解析による透水係数の分布



a). 5400sec後のポテンシャル分布



b). 5400sec後の流速分布

図-7 ポテンシャルと流速の分布

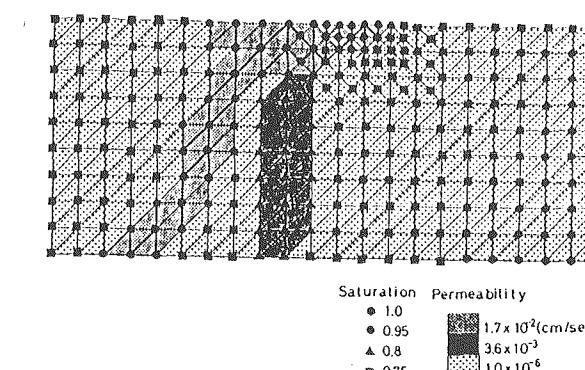


図-8 割れ目⑨における透水係数の分布

施設名	菊間実証プラント (1)	土被り	最大 70 m 50~70	調査研究の目的	原油地下備蓄の我が国への適用性の実証（サイト、局所）
地下構造物の概要	① 貯油槽 貯油槽の規模は、幅15m、高さ20m、長さ112mで、空洞の深度は海面下 EL-42~-62mである。				
	② 水封トンネル 地下水位の低下を防止し、人工注水の効果を確認するために、水封トンネル、水封ボーリングを設ける。水封トンネルは幅4.0m、高さ4.0mで、下面深度は海面下 EL-25.8mである。				
	③ サービストンネル 地上と地下の貯油槽を結ぶ受入拠出配管を中心に全ての配管類を通すためのトンネル（幅4.5m、高さ4.5m）である。				
	④ 立坑 地下施設と地上（サービストンネル）を連結し、配管類を通すための鉛直坑道であり、受入配管立坑及び拠出配管立坑よりなる。				
	⑤ ドライポンプ室 原油拠出用ポンプ及び水封排水用ポンプが設備される。				
	⑥ 作業トンネル 地表より貯油槽本体へ取付くための約440mの作業用斜坑であり、断面は幅4.5m、高さ4.5m、勾配は20%（約11°）である。貯油槽本体完成後、コンクリートプラグにより閉塞して水没させた。				
地・形地・質地構質造	貯油槽設置区域の岩盤は、新期領家花崗岩類に属する花崗岩ないし花崗閃緑岩からなり、これらの岩体は高縄半島の大部分を占めている。割れ目の走向は、高縄半島全体では中央構造線の方向にほぼ対応し、地形にも東北東～西南西のリニアメントが見いだせる。実証プラント近傍では北東～南西走向の割れ目が多く確認された。作業トンネル掘削時の坑内観察から得られた平均節理間隙は0.3～0.4mであった。	調査項目と調査手法	水理学的調査 ○ 透水試験（ルジオン試験、湧水圧試験）ルジオン35孔、282点 ○ 流向流速測定 ○ 地下水位測定 20孔で20点 ○ 間隙水圧測定 15孔で53点 ○ 空洞内湧水量測定 12箇所（貯油槽、作業トンネル、ドライポンプ室） ○ 水封水位・水封供給量測定（水封トンネル、受入立坑、拠出立坑） ○ 降雨量・蒸発散量測定（貯油槽上部丘陵1箇所） 地球化学的調査 ○ 水質分析（化学組成、pH、水温、電気伝導度） • イオン8成分      • nヘキサン抽出物質      • pH • COD              • 全硬度              • 蒸発残留物 • SS                • C I                • 電気伝導度 • DO [周辺ボーリング孔5孔、地表湧水7箇所、底水排水 頻度：1回／月]	備考	(図-1)
水理学的環境	2次調査の際の予備調査ボーリング3孔、実証観測ボーリング31孔でルジオン試験により測定した透水係数の頻度分布は、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sが主体である。対数平均により求めた平均透水係数は、予備調査ボーリングが $1.1 \times 10^{-6}$ cm/s、実証観測ボーリング $3.5 \times 10^{-6}$ cm/sとなる。なお、空洞周辺のゆるみ域判定用ボーリング孔で測定した平均透水係数は、1桁小さい $3.86 \times 10^{-7}$ cm/s～ $7.05 \times 10^{-7}$ cm/sの値を示している。以上の数值を参照して、本域岩盤全体の平均透水係数は $2.5 \times 10^{-6}$ cm/sと判定した。 また、貯油槽完成後における湧水量測定により、岩盤の全体的な透水性が徐々に低下する傾向が見られた。これは、節理の目詰まりの進行によるものと考えられる。				
地球化環学的					

施設名 菊間実証プラント (1)

解 析 手 法	コード名		解 析 結 果	① 菊間実証プラントの準三次元解析では、実測の降雨透水量を時間依存性でモデル化し、地下水位の経時変化傾向を求めた。この結果、モデル化に応じた合理的な変動傾向が得られ、実現象を明快に説明できた。 ② 同プラントの鉛直二次元解析では、降雨浸透下の地下水位変動と貯油層湧出量を算出した。これによれば、本解析の顕著な有効性は、複雑な境界条件下でも実測湧水量の経時変化傾向を的確に追跡できる点であつた。 ③ 準三次元解析は、複雑な岩盤水理定数の分布を加味した条件下で広域の地下水挙動を簡単に解析でき、降雨浸透を考慮した検討に適するものと判断できた。
	コードの内容	1) 飽和-不飽和の準3次元解析  2) 飽和-不飽和の鉛直2次元解析		
解 析 モ デ ル	解析モデル	1) 飽和-不飽和の準3次元解析(図-2)  2) 飽和-不飽和の鉛直2次元解析(図-3)	解 析 結 果	1) 飽和-不飽和の準3次元解析 観測ボーリング孔の平均水位(実測値)と計算結果を比較(図-5) 2) 飽和-不飽和の鉛直2次元解析 ○ 観測ボーリング孔の実測値と平均値との比較 ○ 貯油層湧水量の実測値と平均値との比較(図-6)
	境界条件	1) 飽和-不飽和の準3次元解析 ○ 下部不透水層 : EL-120m(設定) ○ 初期水面 : 実測結果をモデル化 ○ 降雨浸透量 : 平均値(3年間, 年平均, 月平均, 0) ○ 地下空洞などからの湧水量: 実測値の折線近似値 2) 飽和-不飽和の鉛直2次元解析 ○ 初期水面 : 実測結果をモデル化 ○ 側方境界の静水圧 : 実測結果をモデル化 ○ 貯油層内ベーパー圧力と液面高 : 実測値 ○ 水封及び水封作業トンネル水位 : 実測値 ○ 降雨浸透量 : 平均値(3年間)		
水 理 物 性	地質調査結果からの推定	① 飽和透水係数 : [岩盤] $K = 2.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (空洞周辺における全ルジョン試験結果の対数平均) [風化帯] $K = 5.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (岩盤中の高透水性部分の値を参考にして仮定) ② 比貯留量 : 無視 ③ 不飽和浸透特性 : 駒田の推定法を参考に仮定(図-4)	検 証 手 法	1) 飽和-不飽和の準3次元解析 観測ボーリング孔の平均水位(実測値)と計算結果を比較(図-5) 2) 飽和-不飽和の鉛直2次元解析 ○ 観測ボーリング孔の実測値と平均値との比較 ○ 貯油層湧水量の実測値と平均値との比較(図-6)

施設名 菊間実証プラント (1)

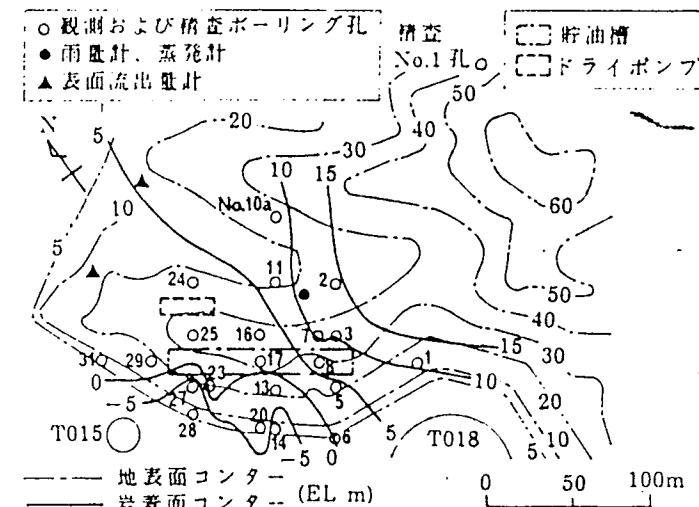
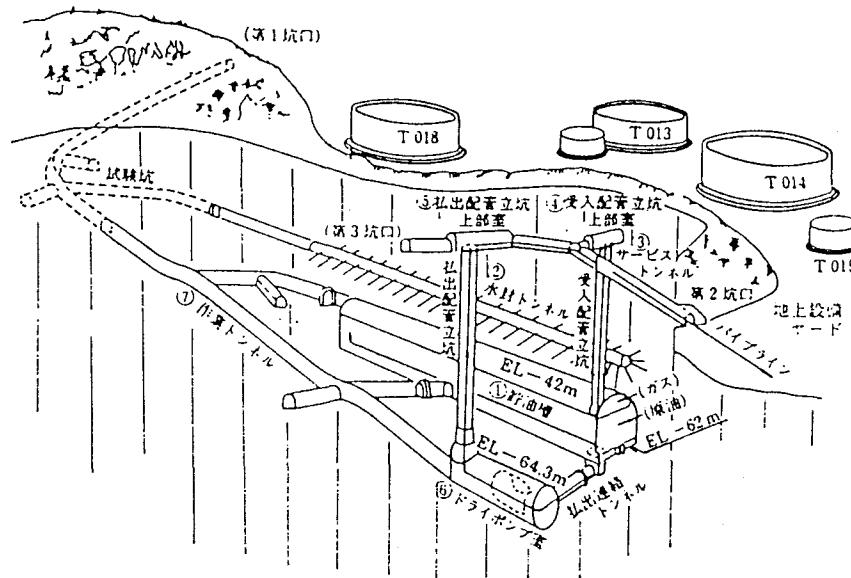


図-1 地下水位、水文量測定位置と地質状況

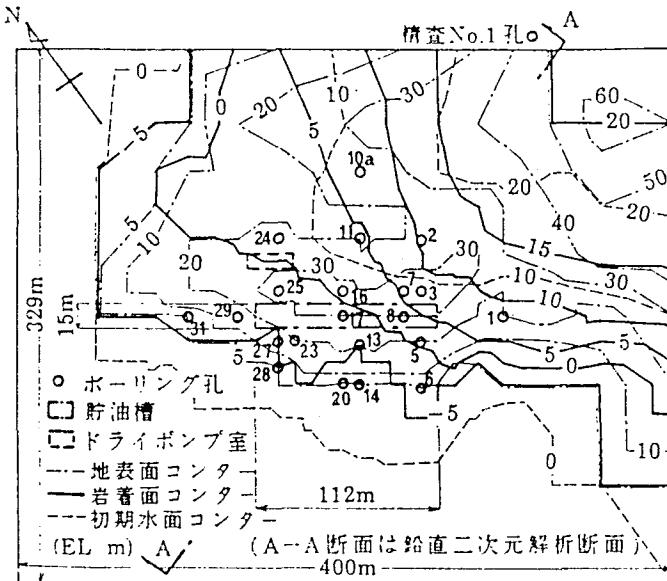


図-2 菊間実証プラントの準三次元解析モデル

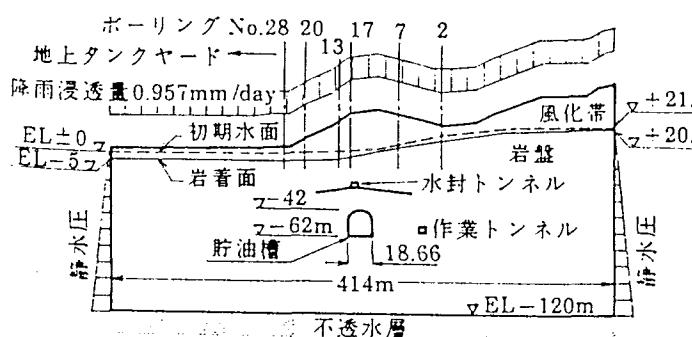


図-3 菊間実証プラントの鉛直二次元解析モデル

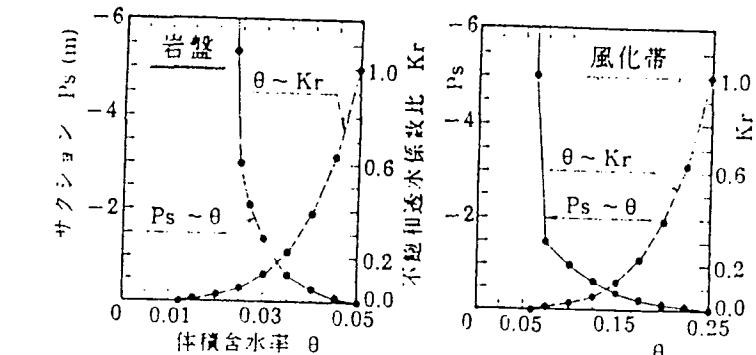


図-4 実証プラントの解析に用いる不飽和浸透特性

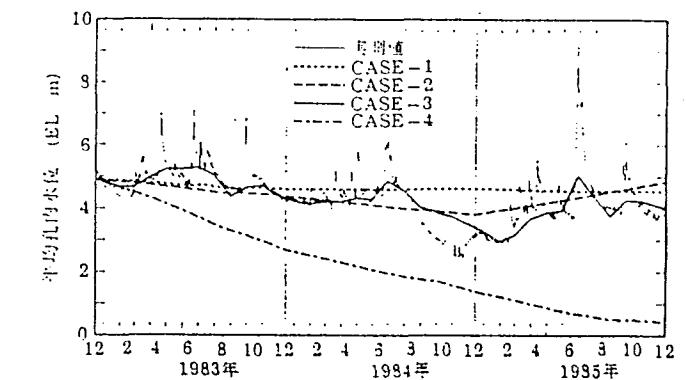


図-5 観測ボーリング平均水位の計算値と実測値の比較

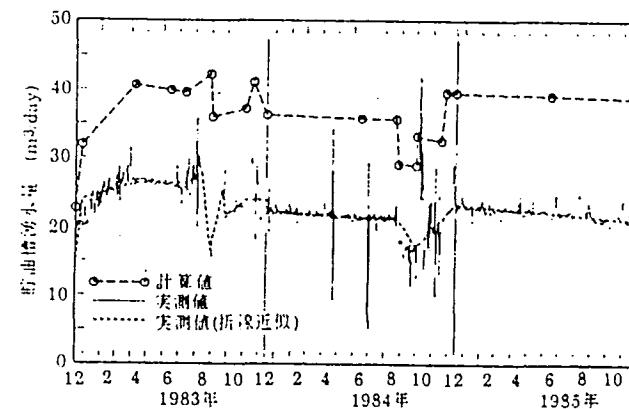


図-6 鉛直二次元解析による貯油槽満水量  
と実測値の比較

施設名	菊間実証プラント (2)	土被り	最大 70 m 50~70	原油地下備蓄の我が国への適用性の実証（サイト、局所）												
地下構造物の概要	<p>① 貯油槽 貯油槽の規模は、幅15m、高さ20m、長さ112mで、空洞の深度は海面下 EL-42~-62mである。</p> <p>② 水封トンネル 地下水位の低下を防止し、人工注水の効果を確認するために、水封トンネル、水封ボーリングを設ける。水封トンネルは幅4.0m、高さ4.0mで、下面深度は海面下 EL-25.8mである。</p> <p>③ サービストンネル 地上と地下の貯油槽を結ぶ受入拠出配管を中心に全ての配管類を通すためのトンネル（幅4.5m、高さ4.5m）である。</p> <p>④ 立坑 地下施設と地上（サービストンネル）を連結し、配管類を通すための鉛直坑道であり、受入配管立坑及び拠出配管立坑となる。</p> <p>⑤ ドライポンプ室 原油拠出用ポンプ及び水封排水用ポンプが設備される。</p> <p>⑥ 作業トンネル 地表より貯油槽本体へ取付くための約440mの作業用斜坑であり、断面は幅4.5m、高さ4.5m、勾配は20%（約11°）である。貯油槽本体完成後、コンクリートプラグにより閉塞して水没させた。</p>	調査研究の目的														
		調査項目と調査手法	<p>水理学的調査</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 透水試験（ルジオン試験、湧水圧試験）ルジオン35孔、282点</li> <li>○ 流向流速測定</li> <li>○ 地下水位測定 20孔で20点</li> <li>○ 間隙水圧測定 15孔で53点</li> <li>○ 空洞内湧水量測定 12箇所（貯油槽、作業トンネル、ドライポンプ室）</li> <li>○ 水封水位・水封供給量測定（水封トンネル、受入立坑、拠出立坑）</li> <li>○ 降雨量・蒸発散量測定（貯油槽上部丘陵1箇所）</li> </ul> <p>地球化学的調査</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 水質分析（化学組成、pH、水温、電気伝導度）           <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>• イオン8成分</td> <td>• nヘキサン抽出物質</td> <td>• pH</td> </tr> <tr> <td>• COD</td> <td>• 全硬度</td> <td>• 蒸発残留物</td> </tr> <tr> <td>• SS</td> <td>• Cl</td> <td>• 電気伝導度</td> </tr> <tr> <td>• DO</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> </li> </ul> <p>[周辺ボーリング孔5孔、地表湧水7箇所、底水排水 頻度：1回／月]</p>	• イオン8成分	• nヘキサン抽出物質	• pH	• COD	• 全硬度	• 蒸発残留物	• SS	• Cl	• 電気伝導度	• DO			
• イオン8成分	• nヘキサン抽出物質	• pH														
• COD	• 全硬度	• 蒸発残留物														
• SS	• Cl	• 電気伝導度														
• DO																
地盤・形質地構質造	貯油槽設置区域の岩盤は、新期領家花崗岩類に属する花崗岩ないし花崗閃緑岩からなり、これらの岩体は高緯半島の大部分を占めている。割れ目の走向は、高緯半島全体では中央構造線の方向にほぼ対応し、地形にも東北東～西南西のリニアメントが見いだせる。実証プラント近傍では北東～南北走向の割れ目が多く確認された。作業トンネル掘削時の坑内観察から得られた平均節理間隙は0.3～0.4mであった。	備考														
水理学的環境	<p>2次調査の際の予備調査ボーリング3孔、実証観測ボーリング31孔でルジオン試験により測定した透水係数の頻度分布は、<math>10^{-7} \sim 10^{-8}</math> cm/sが主体である。対数平均により求めた平均透水係数は、予備調査ボーリングが<math>1.1 \times 10^{-6}</math> cm/s、実証観測ボーリング<math>3.5 \times 10^{-6}</math> cm/sとなる。なお、空洞周辺のゆるみ域判定用ボーリング孔で測定した平均透水係数は、1桁小さい<math>3.86 \times 10^{-7}</math> cm/s～<math>7.05 \times 10^{-7}</math> cm/sの値を示している。以上の数值を参照して、本域岩盤全体の平均透水係数は<math>2.5 \times 10^{-6}</math> cm/sと判定した。</p> <p>また、貯油槽完成後における湧水量測定により、岩盤の全体的な透水性が徐々に低下する傾向が見られた。これは、節理の目詰まりの進行によるものと考えられる。</p>															
地球化環学的																

## 施設名 菊間実証プラント (2)

解 析 手 法	コード名		解析結果	① 3次元及び2次元解析結果のうち空洞周辺の間隙水圧分布については、周辺トンネルの影響で実測値が小さくなっている点を除けば3次元、2次元ともに実測値とよく合致している。 ② 地下水位の変動については、2次元解析では均質な等方体を仮定しており、周辺トンネルや破碎帯などの存在を考慮していないため等高線の細部の凹凸は一致していないものの、水位が西から東に向かってなだらかに低下していく地下水水面形状は表現されている。 ③ 湧水量の実測値と計算値を比較した結果、2次元解析結果、3次元解析結果ともに実測値とほぼ近い値が得られている。ただし、2次元解析結果が3次元解析結果よりも小さくなっているのは空洞端部からの3次元的な水の回りこみを考慮できないためと考えられる。このことは、表-2に示したように3次元解析結果のうち地下空洞の①～⑤の各断面での湧水量を比較してみると、空洞中央部にあたる③断面での湧水量が最も小さく、空洞端部にいくにつれて湧水量が大きくなっていることから判断される。 また、3次元解析結果のうち3次元的な影響が最も小さいと考えられる空洞中央断面での解析結果から空洞の単位長さあたりの湧水量を求め、その値に空洞の全長をかけると空洞全体の湧水量は39.5m <sup>3</sup> /dayとなり、2次元解析結果とほぼ一致する。
	コードの内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 飽和ー不飽和の2次元解析</li> <li>◦ 飽和ー不飽和の3次元解析</li> </ul>		
	解析モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 2次元解析モデル</li> <li>◦ 3次元解析モデル</li> </ul>		
解析条件	境界条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 降雨涵養量：1年間の平均値</li> </ul>	検証手法	実測値と計算値との比較 ① 空洞周辺の間隙水圧水分 ② 空洞周辺の地下水位分布 ③ 空洞への湧水量
	物理物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 透水係数（ルジオン試験結果の対数平均値） 新鮮岩盤：<math>2.5 \times 10^{-6}</math>cm/s            風化帶：<math>5.0 \times 10^{-4}</math>cm/s</li> </ul>		

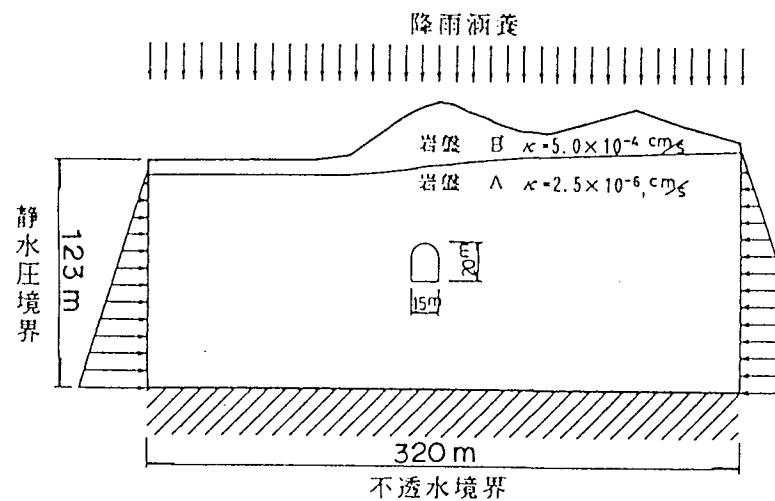


図-1 解析モデルの空洞中央断面

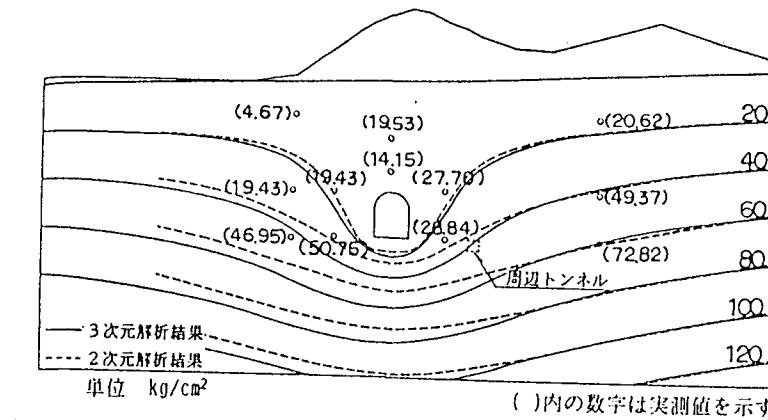


図-3 間隙水圧分布図(空洞中央断面)

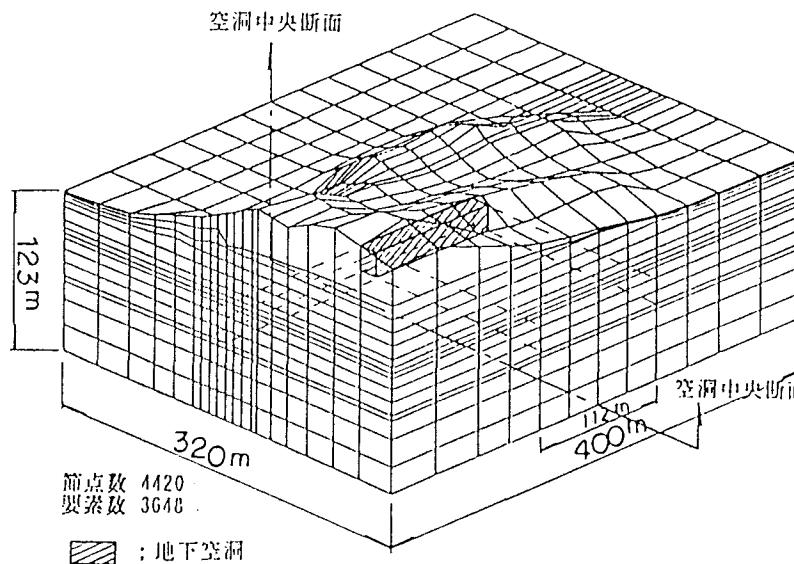


図-2 解析モデル

表-1 空洞への湧水量の比較

	湧水量 (ml/day)
実測値	45.3
2次元浸透流解析	38.0
3次元浸透流解析	55.5

表-2 空洞断面別湧水量の比較

	湧水量 (ml/day)	断面位置図
①	12.0	中央断面 12m 112m
②	10.4	
③	9.9	
④	10.6	
⑤	12.6	

施設名	菊間実証プラント (3)	土被り	最大 70 m 50~70	調査研究の目的	原油地下備蓄の我が国への適用性の実証（サイト、局所）
地下構造物の概要	① 貯油槽 貯油槽の規模は、幅15m、高さ20m、長さ112mで、空洞の深度は海面下 EL-42~-62mである。				
	② 水封トンネル 地下水位の低下を防止し、人工注水の効果を確認するために、水封トンネル、水封ボーリングを設ける。水封トンネルは幅4.0m、高さ4.0mで、下面深度は海面下 EL-25.8mである。				
	③ サービストンネル 地上と地下の貯油槽を結ぶ受入拠出配管を中心に全ての配管類を通すためのトンネル（幅4.5m、高さ4.5m）である。				
	④ 立坑 地下施設と地上（サービストンネル）を連結し、配管類を通すための鉛直坑道であり、受入配管立坑及び拠出配管立坑よりなる。				
	⑤ ドライポンプ室 原油拠出用ポンプ及び水封排水用ポンプが設備される。				
	⑥ 作業トンネル 地表より貯油槽本体へ取付くための約440mの作業用斜坑であり、断面は幅4.5m、高さ4.5m、勾配は20%（約11°）である。貯油槽本体完成後、コンクリートプラグにより閉塞して水没させた。				
地・形地・質地構質造	貯油槽設置区域の岩盤は、新期領家花崗岩類に属する花崗岩ないし花崗閃緑岩からなり、これらの岩体は高緯半島の大部分を占めている。割れ目の走向は、高緯半島全体では中央構造線の方向にほぼ対応し、地形にも東北東～西南西のリニアメントが見いだせる。実証プラント近傍では北東～南西走向の割れ目が多く確認された。作業トンネル掘削時の坑内観察から得られた平均節理間隙は0.3～0.4mであった。	調査項目と調査手法	水理学的調査 ○ 透水試験（ルジオン試験、湧水圧試験）ルジオン35孔、282点 ○ 流向流速測定 ○ 地下水位測定 20孔で20点 ○ 間隙水圧測定 15孔で53点 ○ 空洞内湧水量測定 12箇所（貯油槽、作業トンネル、ドライポンプ室） ○ 水封水位・水封供給量測定（水封トンネル、受入立坑、拠出立坑） ○ 降雨量・蒸発散量測定（貯油槽上部丘陵1箇所） 地球化学的調査 ○ 水質分析（化学組成、pH、水温、電気伝導度） • イオン8成分      • nヘキサン抽出物質      • pH • COD              • 全硬度              • 蒸発残留物 • SS                • C I                • 電気伝導度 • DO [周辺ボーリング孔5孔、地表湧水7箇所、底水排水 頻度：1回／月]	備考	
水理学的環境	2次調査の際の予備調査ボーリング3孔、実証観測ボーリング31孔でルジオン試験により測定した透水係数の頻度分布は、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sが主体である。対数平均により求めた平均透水係数は、予備調査ボーリングが $1.1 \times 10^{-6}$ cm/s、実証観測ボーリング $3.5 \times 10^{-6}$ cm/sとなる。なお、空洞周辺のゆるみ域判定用ボーリング孔で測定した平均透水係数は、1桁小さい $3.86 \times 10^{-7}$ cm/s～ $7.05 \times 10^{-7}$ cm/sの値を示している。以上の数值を参照して、本域岩盤全体の平均透水係数は $2.5 \times 10^{-6}$ cm/sと判定した。 また、貯油槽完成後における湧水量測定により、岩盤の全体的な透水性が徐々に低下する傾向が見られた。これは、節理の目詰まりの進行によるものと考えられる。				
地球化環学的					

施設名 菊間実証プラント (3)

解析手法	コード名			
	コードの内容	① 鉛直2次元解析 岩盤タンク内が空の状態 : 気体圧力 = $-0.36 \text{kgf/cm}^2$ 岩盤タンク内が原油で満たされた状態 : 気体圧力 = $+1.83 \text{kgf/cm}^2$ の2状態で解析 ② 3次元鏡像法 ③ 準3次元解析 降雨浸透量 $i = 0.96 \text{mm/day}$ (CASE-1) 降雨浸透量 月ごとの平均値 (CASE-2)		
解析モデル		① 鉛直2次元解析 図-1参照	② 3次元鏡像法 図-4参照 岩盤タンクや周辺トンネル立坑を円筒形にモデル化	③ 準3次元解析 図-6参照
解析条件	境界条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 降雨浸透は考慮しない。</li> <li>○ 地下水位は海面と同じに固定した。</li> <li>○ 水封トンネル及びアクセストンネルにおける圧力は常に静水圧と同じとした。</li> </ul>		合理的な水封システムの設計に関する知見 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 空洞に対する地下水位が問題となる場合 : ①と③の組合せが有効と考えられる。</li> <li>○ 空洞周辺の間隙水圧が問題となる場合 : ①と②の組合せが有効と考えられる。</li> </ul>
物理特性		透水係数 $k = 2.5 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ (基岩部) $k = 5.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ (風化部)	透水係数 $k = 2.5 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ (基岩部)	実測結果との対比 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 間隙水圧</li> <li>○ 岩盤タンク及び周辺トンネルへの湧水量</li> </ul> 実測結果との対比 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 間隙水圧</li> <li>○ 岩盤タンク及び周辺トンネルへの湧水量</li> </ul> 実測結果との対比 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 間隙水圧</li> <li>○ 岩盤タンク及び周辺トンネルへの湧水量</li> <li>○ 地下水位</li> </ul> 図-8中の実測値の変動を解析結果でとらえられないのは岩盤の透水係数を一様に設定したためと考えられる。 (降雨浸透量の細かい変動を考慮したCASE-2の方がCASE-1より実測値に近い)

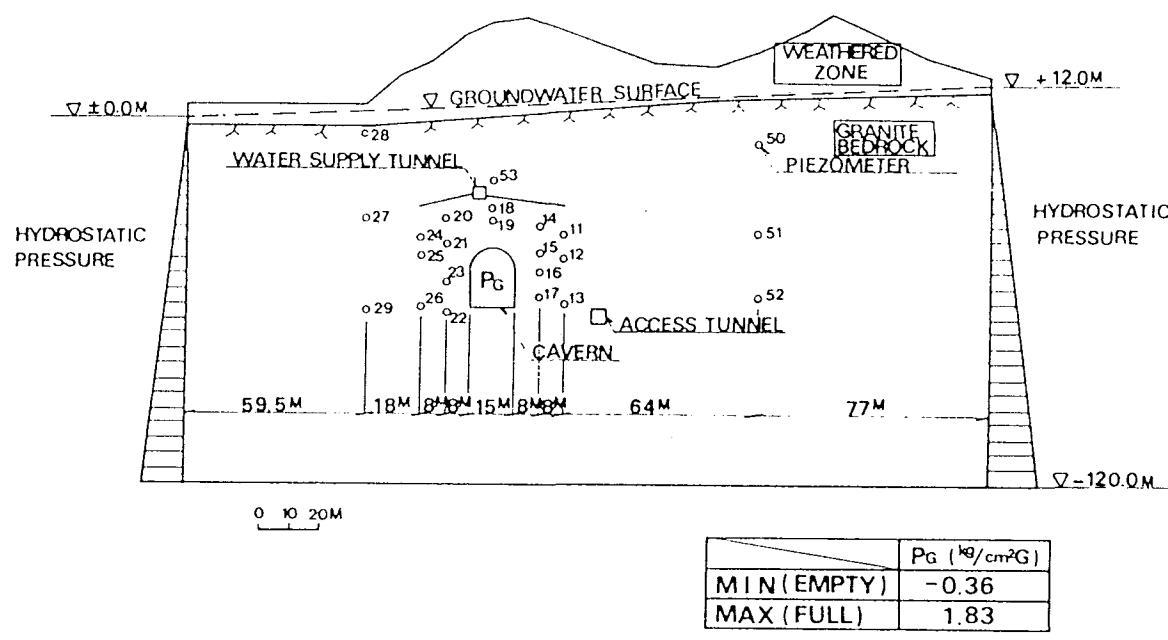


図-1 Calculation model (vertical two-dimensional F.E.M.).

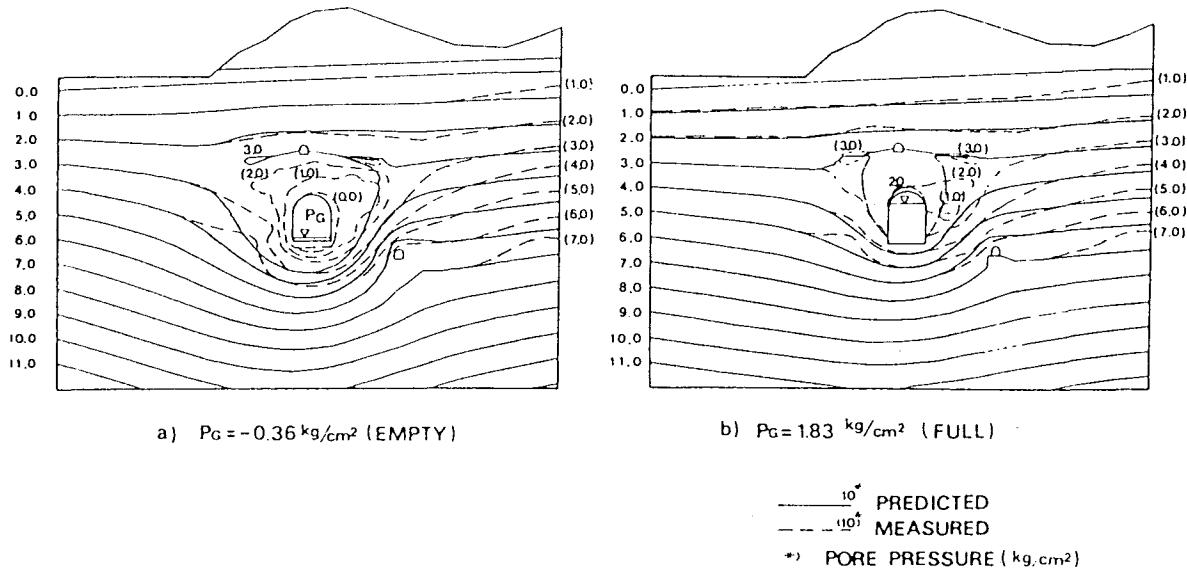


図-2 Predicted pore pressure distribution.

表-1 Comparison between Predicted and Measured Inflow Volume

Location	1) $p=-0.36 \text{ kg}/\text{cm}^2$		2) $p=+1.83 \text{ kg}/\text{cm}^2$	
	Predicted	Measured	Predicted	Measured
Cavern	49.7	41.8	27.2	22.4
Water Supply Tunnel and Access Tunnel	30.2	23.0	16.0	11.2

(Unit: t/day)

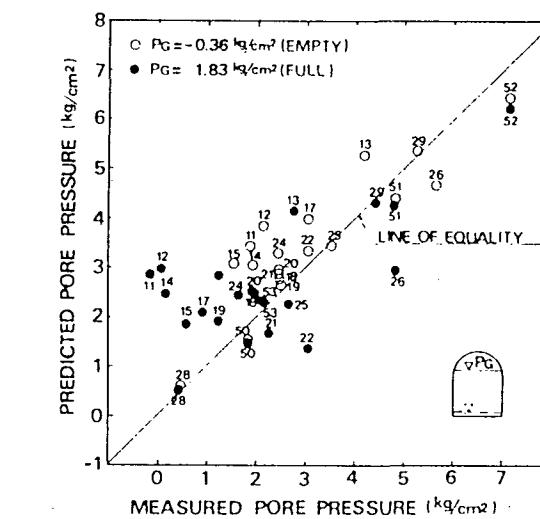


図-3 Comparison of predicted and measured pore pressure around the cavern.

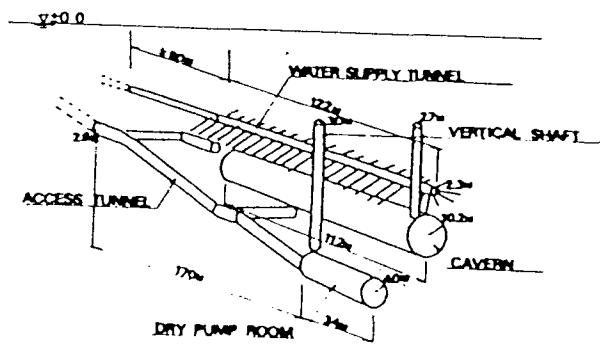


図-4 Calculation model (method of images).

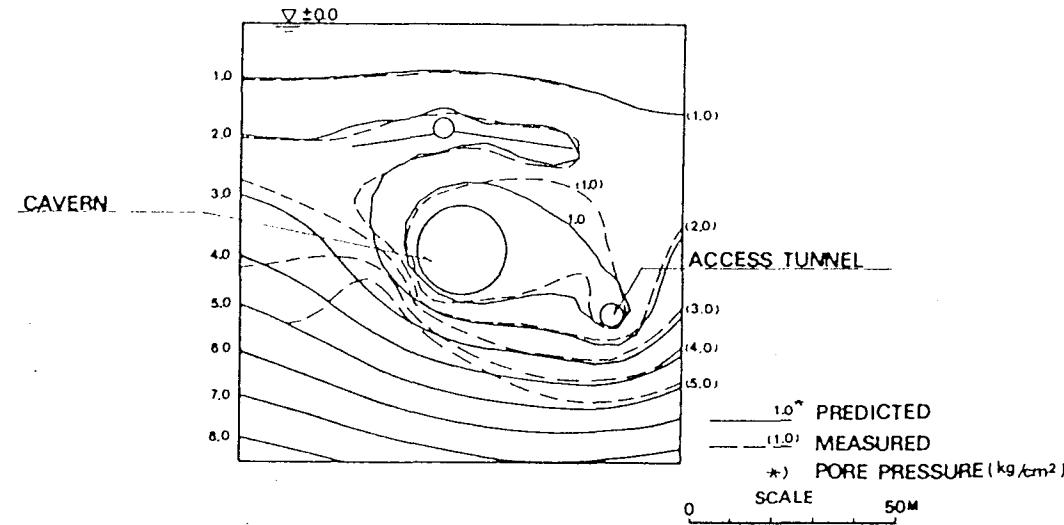


図-5 Predicted pore pressure distribution.

表-2 Comparison between Predicted and Measured Inflow Volume

Location	Predicted	Measured
Cavern	31.7	14.9
Water Supply Tunnel	11.2	11.3
Dry Pump Room	30.2	22.1

(Unit: t/day)

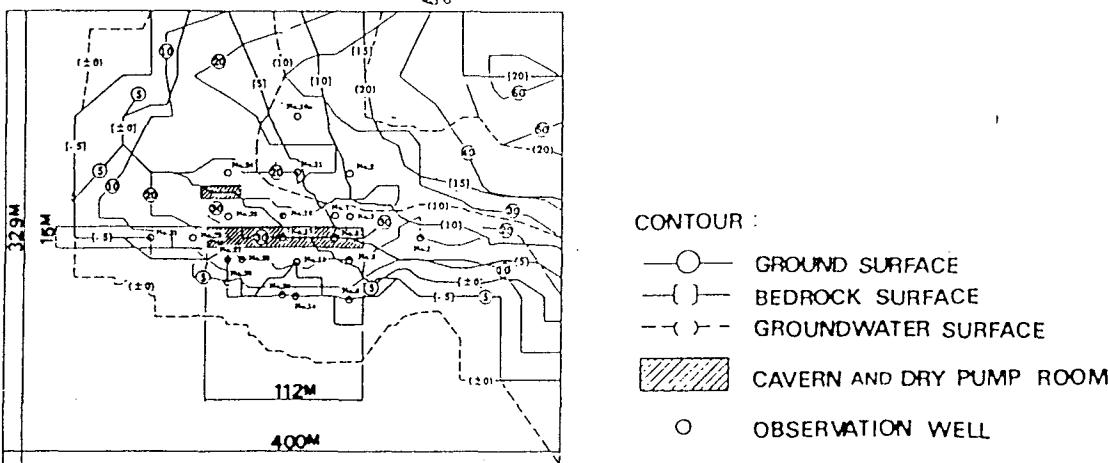
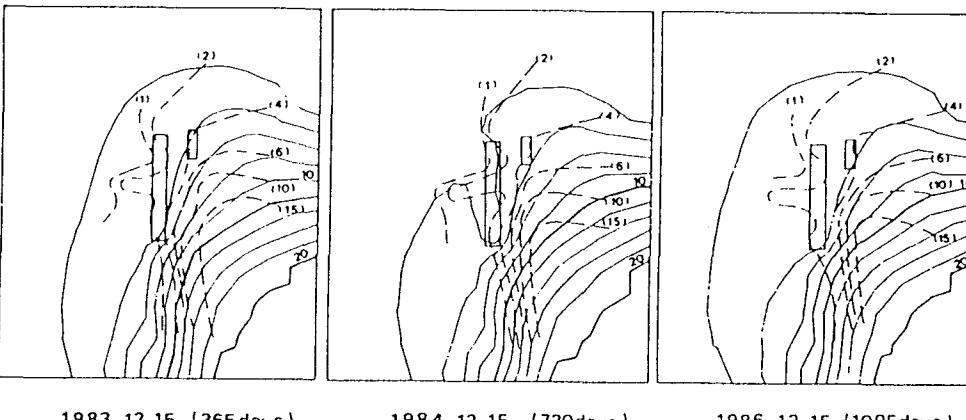
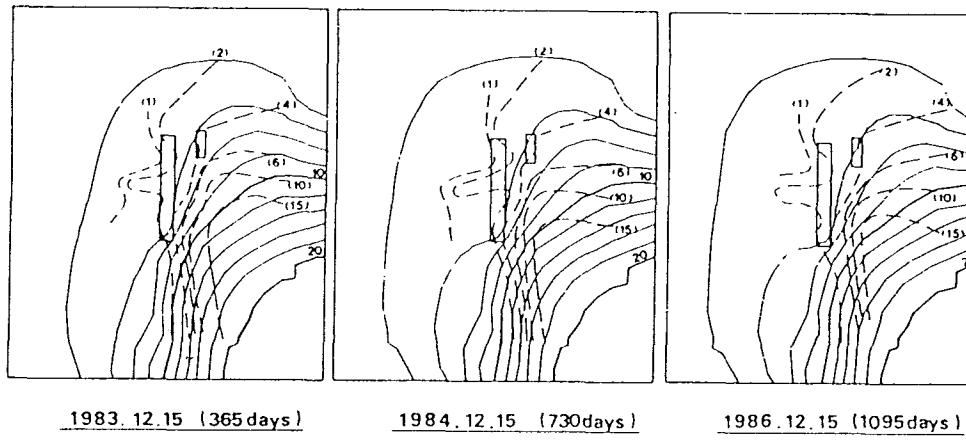


図-6 Calculation model (quasi-three-dimensional finite element method).



— PREDICTED  
 - - - MEASURED  
 \* AVERAGE  
 GROUNDWATER LEVEL (m)

図-7 Predicted contour of groundwater surface.

表-3 Predicted and Measured Groundwater Level above the Cavern

Time	Predicted		Measured
	Case-1	Case-2	
1982. 12. 16 (initial)	3.0	3.0	3.0
1983. 12. 15 (365days)	3.8	3.7	2.5
1984. 12. 15 (730days)	3.8	2.0	2.0
1985. 12. 15 (1095days)	3.8	2.5	2.5

(Unit:m)

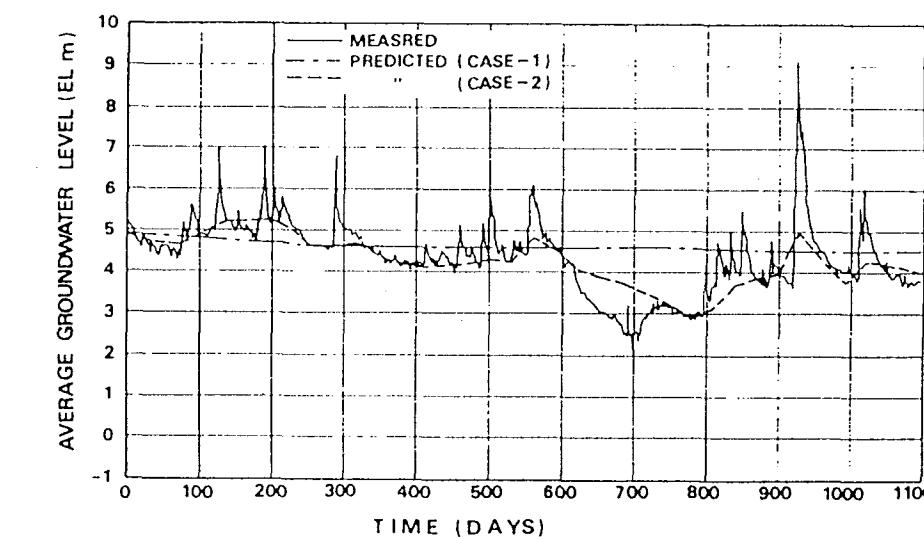


図-8 Predicted average groundwater level fluctuation as function of time.

施設名	菊間地下石油備蓄基地	土被り	80~100 m	調査研究の目的	
地下構造物の概要	菊間基地の建設工事概要は、陸上タンクを含めて150万 kℓ の備蓄容量を有する原油貯蔵施設を建設するものである。菊間基地は愛媛県越智郡菊間町に位置し、実証プラントに隣接した地点に建設された。 水封式燃料貯蔵施設は、幅20.5m×高さ30.0mの砲弾型断面で、長さが230m~448mの7本の燃料貯蔵用空洞と、水封トンネル及び作業トンネルなどの周辺の各トンネルからなっている。 このうち、燃料貯蔵空洞は、EL-65m~EL-35mに位置し、地表面からの土被りは80~100m程度である。				
地形・地質・地質構造	地形は瀬戸内海斎灘に面した標高10~70mの丘陵地であり、河谷による開析は小規模である。河川は、東側を南北に流れる種川、西側を南東から北西方向に流れる高田川などがあり、周辺に沖積低地が発達している。 水封式燃料貯蔵施設の建設サイトの地質状況は、上部風化帯と下部岩盤に区分される。燃料貯蔵用空洞が構築される下部岩盤は、新期領家花崗岩と呼ばれる白亜紀後期の花崗岩ないし花崗閃緑岩に属し、一部にアプライト及びペグマタイトが貫入しているが、全般に青灰~灰色を呈し堅硬緻密である。この下部岩盤の力学的特性についての事前調査結果は、次のように要約される。 1) 岩盤等級は電中研式岩盤区分で C <sub>H</sub> ~ C <sub>M</sub> 級（岩盤タンク岩盤等級区分では H ~ M 級に相当）に属し、コアでの一軸圧縮強度は 800 ~ 1,000 kgf/cm <sup>2</sup> の範囲にある。 2) 岩盤の不連続性を表す指数である R Q D は 80 ~ 85 % であり、割れ目は比較的少ない。また、その割れ目に沿った風化変色もほとんど認められない。 3) 空洞の安定性の検討段階で、岩盤は亀裂の分布状況などを考慮した等級に区分され、その平均的な巨視的变化係数は 65,000 kgf/cm <sup>2</sup> と設定された。	調査項目と調査手法	備考		
水理学環的境	破碎部を含めた岩盤の透水係数は、ボーリング孔を用いた透水試験結果で、 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/sec 程度である。				
地球化環学的境					

施設名 菊間地下石油備蓄基地

解 析 手 法	コード名		解析結果	1) 空洞掘削に伴う地下水挙動の計測結果で、空洞掘削に伴う地下水位の低下は、特定の領域に集中する傾向にあった。そして、その空洞掘削に伴い明確な水位低下及び湧水などが発生した箇所の地下水挙動は、亀裂帯の影響を強く受けていることが明らかになった。 2) 亀裂の分布がどのような状況にある場合に地下水挙動に影響を及ぼすかの因果関係について定量的に評価するための一手法として、クラックテンソルの考え方を適用し、原位置で観測された亀裂分布の解析を実施した。この結果より、亀裂性岩盤中の空洞掘削に伴う地下水挙動評価で、事前調査結果での亀裂分布の幾何学的な情報をクラックテンソルの概念を適用し解析することにより、概略的に高い透水性を示す領域を特定できる可能性があることが明らかになった。 3) 本検討では、高透水性の亀裂帯の影響を等価多孔質体モデルにより表現するため、亀裂帯を高透水性ゾーンとしてモデル化した。この結果として、等価多孔質体モデルによる解析結果は、計測結果と概ね良好な一致を示した。この結果より、亀裂性岩盤での地下水挙動解析に等価多孔質体モデルを適用する場合に $F_0$ 値が7.0以上の領域を高透水性ゾーンと仮定することにより、ある程度の精度で顕著な地下水挙動の発生する範囲が推定できる可能性があることを明らかにした。(図-2, 3)
	コードの内容	準3次元定常浸透流解析		
解 析 条 件	解析モデル	解析メッシュ(図-1)	検証手法	地下水位の実測値と計算値の比較
	境界条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 解析領域の外周部を水位固定境界とする。 (外周部に近い地下水位観測井のデータの線形補間結果)</li> <li>○ 高透水ゾーンの設定 (クラックテンソルの <math>F_0</math> 値の分布で <math>F_0 &gt; 7.0</math> で、アーチ部からの湧水が顕著な領域を高透水ゾーンとした)</li> <li>○ 降雨浸透流：過去3年間の降雨の平均値 <math>0.957 \text{ mm/day}</math> を基に、降雨が地下に浸透する割合を表す地盤の浸透能 <math>\alpha</math> (<math>0.0 &lt; \alpha \leq 1.0</math>) を <math>\alpha = 0.5</math> とし、降雨による単位面積当たりの地下水涵養量を <math>0.479 \text{ mm/day}</math> とし、解析領域全域に供給されるものとして与えた。</li> </ul>		
	水理物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 風化部の透水係数は、測点点数が少なく透水性を評価することが困難であるため、設計に用いた <math>1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}</math> とした。</li> <li>② 新鮮岩盤部の透水係数は、透水係数の傾向を表す確率紙から求めた <math>5.0 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}</math> とした。</li> <li>③ 亀裂の存在による高透水ゾーンの透水係数は、実測の地下水位分布に基づくパラメータスタディーの結果に基づき、それぞれタンク1～タンク4側で <math>4.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}</math>、タンク5～タンク7側で <math>1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}</math> と設定した。</li> </ul>		

施設名 菊間地下石油備蓄基地

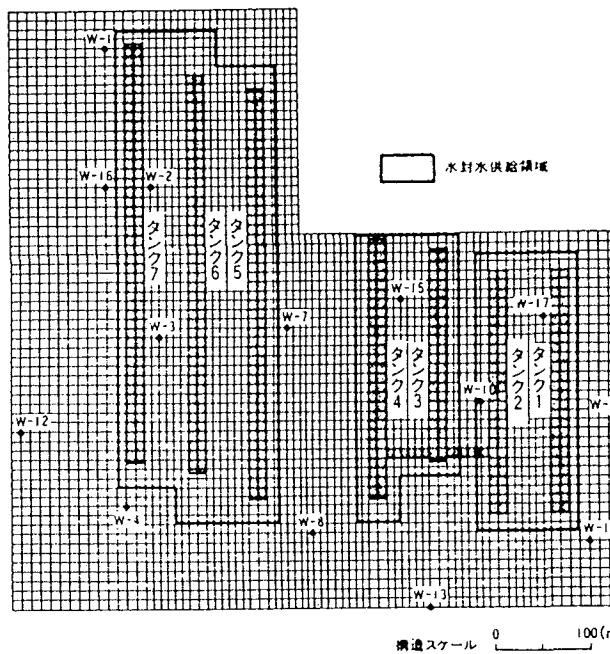


図-1 解析メッシュ図

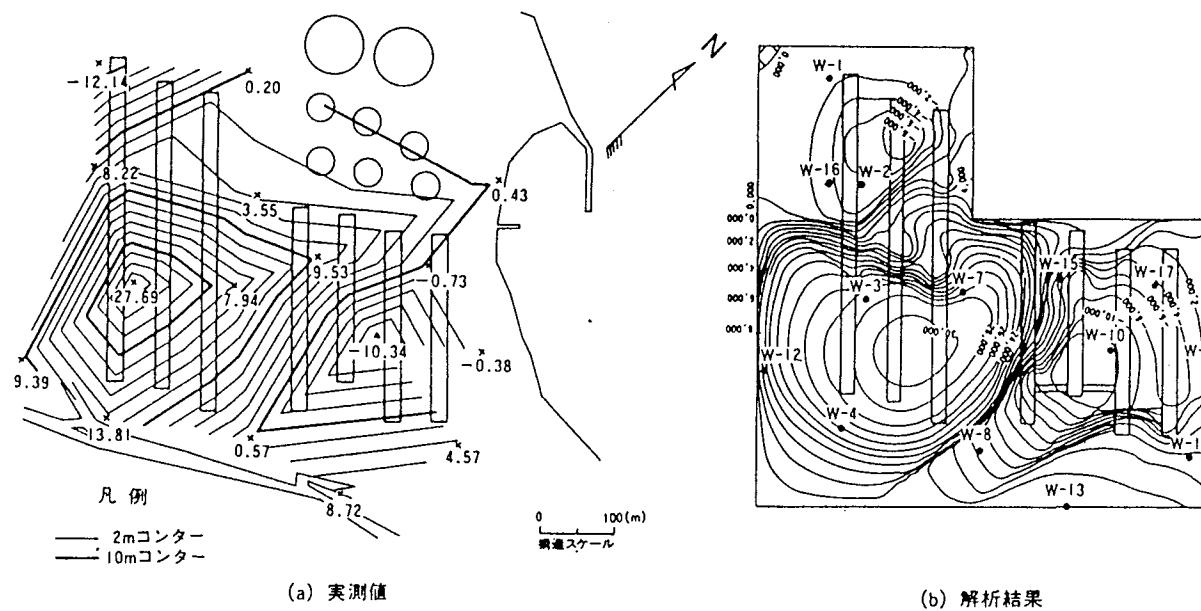


図-2 地下水位コンター図

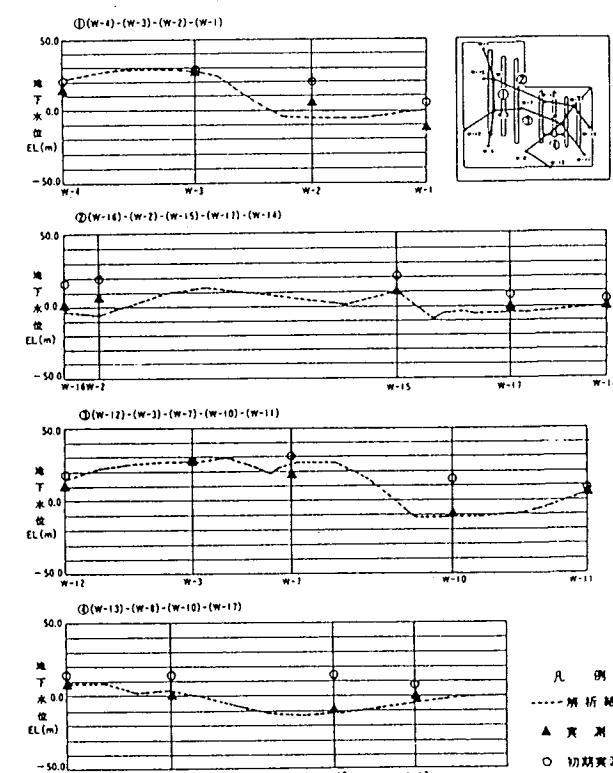


図-3 地下水位断面図