

# 地層処分場の坑内湧水量解析 技術の検証と妥当性確認

2026年3月  
原子力発電環境整備機構

2026年3月 初版発行

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

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階  
原子力発電環境整備機構 技術部  
電話 03-6371-4004（技術部） FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Science and Technology Department  
Nuclear Waste Management Organization of Japan  
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構  
(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2026

# 地層処分場の坑内湧水量解析 技術の検証と妥当性確認

2026年3月  
原子力発電環境整備機構



## 地層処分場の坑内湧水量解析技術の検証と妥当性確認

市村哲大\*1, 鈴木覚\*1, 田中達也\*2, 中安昭夫\*1, 尾上博則\*1, 三枝博光\*1

### 要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、大規模な地下施設建設に伴う坑内湧水量や地下水圧の変化を事前に評価し、適切な対策を講じることは重要である。しかし、不均質な地質構造と複雑な地下施設の構造を厳密にモデル化すると計算負荷が膨大となる課題がある。そこで原子力発電環境整備機構 (NUMO) は、空間的なメッシュ分割の制約を緩和し現実的な計算負荷で評価可能な三次元地下水流動解析コード HydroGeoSphere (以下、「HGS」という) を用いた解析技術の開発を進めている。本報告書は、同技術の品質保証に関する技術的根拠を整備するため、検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation) (総称して V&V) を実施したものである。計算負荷の課題に対応するため、空間分解能の異なるモデルを入れ子状に結合する Telescopic Mesh Refinement 法 (以下、「TMR 法」という) と、坑道を線状の排水境界として表現するトンネル境界条件法を適用し、計算効率と精度の両立を図った。

単一水平坑道を模擬したモデルを用いて、HGS と他の解析コード (ConnectFlow など) の比較検証を実施した結果、理論解や他のコードによる解析解と同等の妥当な坑内湧水量を算出できることを確認した。さらに、実測データが豊富な海外・国内の地下研究施設の実測データを用いて妥当性確認を行った。比較的均質な結晶質岩からなるスウェーデンのエスポ地下岩盤研究所では、高透水性構造やプレグラウト施工範囲を適切にモデル校正することで、建設に伴う総湧水量及び地下水位低下の空間的広がりを概ね再現できることを確認した。一方、表層に被覆堆積層を有し水理学的な不均質性が高い日本特有の地質環境に位置する瑞浪超深地層研究所においては、ベースライン解析に基づく非定常解析により総湧水量の経時的な変動傾向を実測値と整合的に再現した。さらに、スキン効果 (覆工コンクリート等による坑道近傍の透水性変化) やグラウト区間の調整といった段階的なモデル校正により、区間湧水量や局所的な水頭低下の再現性も向上することを示した。このような評価は、異なる解析コード (Dtransu-3D・EL) から得られた結果とも調和的な結果であった。一連の V&V を通じて、HGS を用いた坑内湧水量・地下水位変化の解析・評価技術の妥当性が裏付けられ、品質保証の技術的根拠が整備された。TMR 法及びトンネル境界条件を用いた解析アプローチは、複雑なマルチスケールモデルの実用的な評価ツールとして有効であり、実際のサイト環境における解析技術の信頼性向上に大きく寄与するものである。

\*1 原子力発電環境整備機構, \*2 株式会社大林組

# Verification and Validation of Groundwater Inflow Analysis for Geological Repositories

Tetsuhiro Ichimura<sup>\*1</sup>, Satoru Suzuki<sup>\*1</sup>, Tatsuya Tanaka<sup>\*2</sup>, Akio Nakayasu<sup>\*1</sup>,  
Hironori Onoe<sup>\*1</sup>, Hiromitsu Saegusa<sup>\*1</sup>

## Abstract

In the geological disposal of high-level radioactive waste, it is important to evaluate in advance the changes in groundwater inflow into tunnels and groundwater pressure associated with the construction of large-scale underground facilities, and to take appropriate countermeasures. However, strictly modeling heterogeneous geological structures and complex underground facilities poses a challenge as it results in an enormous computational load. Therefore, the Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) is developing an analytical technology using the three-dimensional groundwater flow analysis code "HydroGeoSphere (HGS)," which relaxes the constraints of spatial meshing and enables evaluations with a realistic computational load. This report presents the implementation of Verification and Validation (collectively referred to as V & V) to establish the technical basis for the quality assurance of this technology. To address the issue of computational load, the TMR (Telescopic Mesh Refinement) method, which nests models with different spatial resolutions, and the tunnel boundary condition method, which represents tunnels as linear drainage boundaries, were applied to achieve both computational efficiency and accuracy.

As a result of comparative verification between HGS and other analysis codes (such as ConnectFlow) using a model simulating a single horizontal tunnel, it was confirmed that reasonable groundwater inflow amounts comparable to theoretical solutions and analytical solutions by other codes could be calculated. Furthermore, validation was conducted using actual measurement data from domestic and overseas underground research facilities with abundant observational data. At the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden, which consists of relatively homogeneous crystalline rock, it was confirmed that the spatial extent of the total groundwater inflow and groundwater level drawdown associated with construction could be generally reproduced by appropriately calibrating the model for highly permeable structures and pre-grouting areas. On the other hand, at the Mizunami Underground Research Laboratory, which is located in a geological environment unique to Japan with high hydrogeological heterogeneity and an overlying sedimentary layer at the surface, transient analysis based on baseline analysis reproduced the temporal fluctuation trend of total groundwater inflow consistently with measured values. Furthermore, it was shown that stepwise model calibration, such as adjustments for the skin effect (changes in permeability near the tunnel due to lining concrete, etc.) and grouted sections, improved the reproducibility of sectional groundwater inflows and local head drawdowns. Such evaluations were also harmonious with the results obtained from a different analysis code (Dtransu-3D • EL). Through a series of V & V activities, the validity of the analysis and evaluation technology for groundwater inflow and groundwater level changes using HGS was substantiated, and the technical basis for quality assurance was established. The analytical approach using the TMR method and tunnel boundary conditions is effective as a practical evaluation tool for complex multiscale models, and it will greatly contribute to improving the reliability of analytical technologies in actual site environments.

\*1 Nuclear Waste Management Organization of Japan, \*2 Obayashi Corporation

## 目次

第1章 緒論.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 本技術報告書の目的.....	1
1.3 本技術報告書における検討のアプローチ.....	2
第2章 坑内湧水量に着目した数値解析のV&V.....	3
2.1 V&Vの考え方.....	3
2.2 解析コードの選定.....	3
2.2.1 坑内湧水量解析の概要と解析コードに求められる機能.....	3
2.2.2 解析コードHGSの概要.....	4
2.2.3 ConnectFlowの概要.....	5
2.3 数値解析モデルの妥当性確認に使用した地下研究施設.....	5
第3章 解析コードの検証.....	6
3.1 概要.....	6
3.2 ベンチマーク問題の設定.....	6
3.3 入力パラメータ・境界条件の設定.....	7
3.4 解析結果の比較.....	8
第4章 エスポ地下岩盤研究所を対象とした数値解析.....	10
4.1 エスポ地下岩盤研究所の概要.....	10
4.2 解析方法.....	10
4.3 水理地質構造モデルの構築.....	11
4.3.1 広域スケール.....	11
4.3.2 サイトスケール.....	14
4.4 地下研究施設のモデル化.....	17
4.4.1 地下研究施設の形状.....	17
4.4.2 グラウト区間の設定.....	19
4.5 地下水流動解析.....	21
4.5.1 ベースライン解析.....	21
4.5.2 坑内湧水量解析.....	22
4.5.3 水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルの校正と再解析.....	29
4.6 第4章のまとめ.....	35
第5章 瑞浪超深地層研究所を対象とした数値解析.....	36
5.1 瑞浪超深地層研究所の概要.....	36
5.2 解析方法.....	36
5.3 水理地質構造モデルの構築.....	36
5.3.1 広域スケール.....	36
5.3.2 サイトスケール.....	41
5.4 地下研究施設のモデル.....	44

5.4.1	地下研究施設の形状.....	44
5.4.2	グラウト区間及びスキン効果の設定.....	44
5.4.3	TMR 法によるマルチスケールモデルの統合.....	45
5.5	地下水流動解析.....	46
5.5.1	ベースライン解析.....	46
5.5.2	坑内湧水量解析.....	49
5.5.3	水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルの校正と再解析.....	56
5.5.4	異なる解析コードによる解析結果との比較.....	62
5.6	第5章のまとめ.....	68
第6章	結論.....	69
6.1	各章の検討成果.....	69
6.2	坑内湧水量解析・評価技術の品質保証 (V & V) の確認結果.....	69
6.3	今後の展望.....	69

## 付 録 目 次

付録 1	TMR 法の概要.....	付-1
付録 2	ConnectFlow を用いた地下水流動解析の事例.....	付-5
付録 3	トンネル境界条件法の概要.....	付-8
付録 4	エスポ地下岩盤研究所に関する情報.....	付-11
付録 5	瑞浪超深地層研究所に関する情報.....	付-27

## 図 目 次

図 3-1	解析モデル図.....	6
図 3-2	掘削影響領域 (EDZ) 及びグラウト領域 (GZ) の設定.....	7
図 3-3	数値メッシュ図.....	7
図 4-1	解析手順.....	11
図 4-2	エスポを対象にしたモデルの空間スケール.....	12
図 4-3	水理地質構造モデル概念.....	12
図 4-4	広域スケールの三次元構造格子モデル.....	13
図 4-5	広域スケールにおける HCD の三次元地質構造モデル.....	13
図 4-6	水理地質構造モデル.....	16
図 4-7	X 方向の透水係数分布図.....	17
図 4-8	エスポ地下岩盤研究所の鳥瞰図.....	17
図 4-9	トンネルの断面形状を取得した CAD 図面.....	18
図 4-10	トンネル境界条件法でモデル化したエスポ地下岩盤研究所の鳥瞰図.....	19
図 4-11	地下研究施設モデルのグラウト区間及び坑道周辺の透水係数分布.....	20
図 4-12	エスポ地下岩盤研究所モデルのトンネル沿いの岩盤透水係数分布及びグラウト区間.....	21
図 4-13	Case001 モデルの透水係数分布図 (Z=-150m 水平断面).....	22
図 4-14	水理地質構造モデルの不確実性に関する解析ケースの全水頭の解析値と実測値の比較.....	24
図 4-15	全水頭値の実測点位置.....	25
図 4-16	地下岩盤施設のモデルの不確実性に関する全水頭の実測値と解析値の比較.....	28
図 4-17	Case002-grt2 グラウト設定区間と透水係数の関係.....	30
図 4-18	Case002-grt2-c01 のグラウト設定区間と透水係数の関係.....	31
図 4-19	Case002-grt2-c02 のグラウト設定区間と透水係数の関係.....	31
図 4-20	校正した解析ケースによる全水頭の解析値と実測値の比較.....	32
図 4-21	区間湧水量の解析値と実測値の関係.....	34
図 4-22	総湧水量の経時変化.....	35
図 5-1	瑞浪超深地層研究所周辺の地質概要.....	37
図 5-2	三次元メッシュモデル.....	38
図 5-3	広域スケール水理地質構造モデル.....	39
図 5-4	サイトスケール水理地質構造モデル.....	42
図 5-5	瑞浪超深地層研究所の研究坑道レイアウト及びグラウティング箇所.....	44

図 5-6	TMR 法のインターフェースとバッファゾーン .....	46
図 5-7	ベースライン解析結果：広域スケールにおける実測値と解析値の比較（全水頭値） .....	48
図 5-8	ベースライン解析結果：サイトスケールにおける実測値と解析値の比較（全水頭値） ...	49
図 5-9	総湧水量の比較.....	50
図 5-10	水頭低下量の比較（DH-2） .....	51
図 5-11	水頭低下量の比較（MIZ-1） .....	51
図 5-12	水頭低下量の比較（MSB-1） .....	52
図 5-13	水頭低下量の比較（MSB-3） .....	52
図 5-14	A 工区湧水量の比較.....	53
図 5-15	B 工区湧水量の比較.....	54
図 5-16	区間湧水量の比較.....	55
図 5-17	排水系統図 .....	56
図 5-18	集水区間と水理地質区分・スキン効果設定.....	59
図 5-19	総湧水量の比較（ケース T9） .....	60
図 5-20	水頭低下量の比較（ケース T9：DH-2） .....	60
図 5-21	水頭低下量の比較（ケース T9：MIZ-1） .....	61
図 5-22	水頭低下量の比較（ケース T9：MSB-1） .....	61
図 5-23	水頭低下量の比較（ケース T9：MSB-3） .....	62
図 5-24	主立坑側（A 工区）の湧水量の比較.....	63
図 5-25	換気立坑側（B 工区）の湧水量の比較.....	63
図 5-26	水頭低下量の比較（DH-2） .....	66
図 5-27	水頭低下量の比較（MIZ-1） .....	66
図 5-28	水頭低下量の比較（MSB-1） .....	67
図 5-29	水頭低下量の比較（MSB-3） .....	67

## 表 目 次

表 2-1	数値解析の V&V の考え方と本報告書のアプローチ.....	3
表 3-1	解析モデルの設定値.....	8
表 3-2	透水係数の設定値.....	8
表 3-3	解析ケース.....	8
表 3-4	水平坑道への湧水量算定結果の比較.....	9
表 4-1	広域スケールの水理地質構造モデルの設定値.....	14
表 4-2	確率論的手法により生成する割れ目ネットワークモデルの統計量.....	15
表 4-3	Local_DZ の水理地質構造モデルの設定値.....	16
表 4-4	境界条件.....	21
表 4-5	HCD に設定した水理パラメータ.....	23
表 4-6	水理地質構造モデルの不確実性を考慮する解析ケース.....	23
表 4-7	地下研究施設のモデルの不確実性を考慮する解析ケース.....	26
表 4-8	実測値と解析値の全水頭値の比較.....	27
表 4-9	初期解析ケースにおける湧水量の実測値と解析値の比較.....	29
表 4-10	グラウト設定と解析ケース.....	31
表 4-11	解析結果の湧水量一覧.....	33
表 5-1	水理地質構造モデル（広域スケール）領域及び空間分割サイズ.....	38
表 5-2	広域スケールの水理地質区分と水理特性.....	40
表 5-3	水理地質構造モデル（サイトスケール）領域及び空間分割サイズ.....	41
表 5-4	サイトスケールの水理地質区分と水理特性.....	43
表 5-5	プレグラウチング概要（Grout Thickness = 3 m）.....	45
表 5-6	ポストグラウチング（Grout Thickness = 6 m）.....	45
表 5-7	坑道近傍の水理特性.....	45
表 5-8	ベースライン解析の解析条件.....	47
表 5-9	スキン効果の調整による校正内容と解析ケース一覧.....	58
表 5-10	坑内湧水量の比較.....	63
表 5-11	水頭低下量の比較.....	65

## 第1章 緒論

### 1.1 背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、地下深部に大規模な坑道ネットワークからなる処分場が建設され、その操業期間は数十年に及ぶ。この長期にわたる建設及び操業期間中には、周辺岩盤から坑道内への継続的な地下水の流入（坑内湧水）が発生する。坑内湧水は、作業環境の安全性低下や排水処理施設の負荷増大を招くだけでなく、周辺岩盤の地下水位の低下や、それに伴う浅層の天水あるいは深部の塩水などの引き込みを引き起こし、処分場周辺の水理・地球化学的環境に影響を及ぼす可能性がある。

したがって、処分場の設計及び安全評価においては、坑道掘削に伴う坑内湧水量や水理場の時間的・空間的な変化を事前に評価し、適切な湧水抑制対策（グラウチングなど）や施設計画を立案することが重要である。このような予測評価には、三次元地下水流動解析コードの活用が不可欠である。しかしながら、広大かつ不均質な地質構造と複雑な地下施設の三次元的な配置、さらに長期的な建設工程を同時に考慮して詳細な数値モデルを構築することは、空間的・時間的な離散化（メッシュ分割など）の制約から計算負荷が膨大となる課題がある。

これらの課題に対応するため、原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）は、複数の設計オプションに応じた坑内湧水量を、現実的な計算負荷で迅速かつ適切に評価する技術の開発を進めている。本技術開発においては、空間的なメッシュ分割の制約を緩和し、地下施設の建設から操業、閉鎖に至るプロセスを簡便かつ合理的にモデル化できる、実用性の高い地下水流動解析ツールの整備を目的としている。

### 1.2 本技術報告書の目的

地層処分における数値解析の信頼性確保については、NUMO（2021）にまとめられており、検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）の手続き（以下、これらを合わせてV&Vという）が必要とされている。前項で述べた坑内湧水量解析・評価技術を実際の処分場設計や評価に適用するためには、当該技術の信頼性を客観的に示すV&Vの実施が必要となる。しかしながら、三次元的な広がりをもって配置された複雑な坑道網からの湧水や、それに伴う不飽和領域の過渡的な変化を評価するにあたっては、厳密な理論解が存在しない。そのため、本技術のV&Vは、別途検証が実施されている他の三次元地下水流動解析コードによる解析結果との比較（検証）及び実際の地下研究施設の建設過程における坑内湧水量や地下水圧などの実測データとの比較（妥当性確認）により実施する。以上の背景を踏まえ、本技術報告書は、当該地下水流動解析コードを用いた坑内湧水量解析・評価技術のV&Vを実施し、その品質保証に関する技術的根拠を整備することを目的とする。さらに、これら一連の解析や実測値との比較検討を通じて得られた知見を反映し、水理地質構造モデルの構築から坑内湧水量解析に至る一連の解析手順や留意事項を整理し、同技術の知識化を図ることも目的とする。

### 1.3 本技術報告書における検討のアプローチ

本技術報告書では、三次元地下水流動解析コード HydroGeoSphere（以下、「HGS」という）を用いた坑内湧水量解析・評価技術のV&V及び知識化を以下の手順で実施する。

- ・ 解析コードの検証（Verification）においては、処分場のように三次元的な広がりをもつ複雑な地下施設からの坑内湧水とそれに伴う不飽和領域の変化について、厳密な理論解が存在しないことを踏まえ、単一水平坑道モデルや複雑な坑道網モデルを対象としたベンチマーク問題を設定する。このベンチマーク問題において、HGS と他の三次元地下水流動解析コード（ConnectFlow 及び Dtransu-3D・EL）による解析結果の比較を行い、同等の解析結果が得られることを確認する。
- ・ 解析・評価技術の妥当性確認（Validation）においては、実際の地下研究施設の建設過程において取得された実測データ（坑内湧水量や地下水圧など）を用いた解析を実施し、解析値と実測値を比較する。評価対象としては、海外の地下研究施設としてスウェーデンの Äspö Hard Rock Laboratory（以下、「エスポ地下岩盤研究所」という）及び、わが国特有の複雑な地質環境条件（被覆堆積岩の存在など）を有する国内の地下研究施設である日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）の瑞浪超深地層研究所を選定する。実測値との比較を通じて、必要に応じて解析モデルの校正手法を検討し、本解析技術が実測値を概ね再現できることを確認する。
- ・ 坑内湧水量解析・評価技術の知識化については、上記の一連のV&Vプロセスを通じて得られた知見を反映し、実際のサイト調査結果に基づいて坑内湧水量解析を実施する際の水理地質構造モデルの構築、地下施設のモデル化、及び解析条件の設定において留意すべき事項や解析手順を体系的に整理する。

## 第2章 坑内湧水量に着目した数値解析のV & V

### 2.1 V & Vの考え方

本報告書では、数値解析の信頼性を確保するため、NUMO (2021) の付属書 2-9「数値解析の信頼性確保の考え方」を参照し、坑内湧水量に着目した数値解析の検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation) の考え方と、本報告書におけるアプローチを整理した。整理した内容を表 2-1 に示す。解析コードの検証においては、本検討に用いる解析コードについて、理論解などの厳密解と数値解析解の比較が開発者により実施され、検証レポートが公開されているものを採用する。坑内湧水とそれに伴う周辺の地下水圧の変化は非線形現象であるため、2 種類の解析コードを用いてベンチマーク問題を解析し、解析結果を比較する。計算の検証においては、JANSI-GQA-01 (JANSI, 2021) に準じて解析作業の品質管理を実施するが、本報告書ではその結果の記載を省略する。妥当性確認においては、処分場よりは小さいが深度が同程度で、複数の水平坑道を伴う地下研究所の建設過程における湧水量及び周辺の地下水位の変化を原位置での実測データとして、解析結果との比較を実施する。

表 2-1 数値解析のV & Vの考え方と本報告書のアプローチ

分類	実施項目	実施方法	アプローチ
検証 (Verification)	解析コードの検証	理論解などの厳密解との比較 (主に線形問題)	解析コードの開発者による 検証レポートに基づく確認
	コンピュータプログラムに間違いがないこと、及び解析アルゴリズムに不具合がないことを確認	ベンチマーク問題を用いて、異なる解析コードでの数値解析結果間の比較を行い、同様の解が得られるかを確認するとともに、異なる解が得られる場合はその原因を究明して解析コードを改善する (主に非線形問題)	2 種類の解析コードを用いてベンチマーク問題を解き、同様の解析結果が得られるか確認
	計算の検証	解析結果の数値誤差を推定	実スケールで時間ステップや空間離散化の設定が解析解に及ぼす影響を検証
妥当性 確認 (Validation)	数値解析結果が着目する実現現象を満足できる幅で予測できているかを確認	数値解析結果と実験などの物理モデルや原位置での実測データとの比較によって行う	地下研究所の建設過程における湧水量及び周辺の地下水位の変化を実現現象の実測データとして、解析結果と比較

### 2.2 解析コードの選定

本報告書では、2.2.1 で述べるように、HGS を坑内湧水量評価に用いる解析コードとして採用し、V & V の主対象解析コードとする。解析コードの検証では、比較対象の解析コードとして ConnectFlow を選定した。さらに、これらの解析結果を、岡山大学、三菱マテリアル株式会社及び大日本ダイヤコンサルタント株式会社が開発した Dtransu-3D・EL による解析結果 (尾上ほか, 2016) とも比較した。坑内湧水量解析の概要及び解析コードの概要を以下に述べる。

#### 2.2.1 坑内湧水量解析の概要と解析コードに求められる機能

三次元水理地質構造モデルは複数のスケールで提供され、スケールにより物性情報の詳細さが異なる。浅層から地下深部までの地下水流動を対象とした水理場を評価するには、涵養域から流出域

までの地下水流動系を含む広域モデルが必要である。一方、坑道への湧水量を評価するには、坑道の位置や規模などの具体的な情報が必要となる。本解析の対象は、処分場を含む数十 km 規模の広域スケールに設置された地下施設全体及び数 km 規模の処分場スケールに設置された処分区画の二つである。さらに、掘削に伴う坑内湧水量の時間変化を扱うため、全水頭の空間分布が時間とともに変化することを考慮し、非定常解析を行う必要がある。

広域スケールの中で一部分のみ格子を細分化する場合、従来はネスティングが用いられてきた。ネスティングは、解析領域を粗格子と細格子に分けて連携計算し、大スケールの解析結果に基づいて小スケールの水理境界条件を設定する手法である。一方、非定常解析として境界条件を設定する場合には、境界条件の変化に応じた再計算が必要となる。坑内湧水量解析に適用するには、計算結果を保存して読み込み、境界条件を更新しながら継続計算を行う必要がある点が課題となる。これらの課題を解決するため、Telescopic Mesh Refinement 法（以下、「TMR 法」という）が開発されている（詳細は付録 1 参照）。TMR 法では、粗い空間分解能のモデル内に、より細かい空間分解能のモデルを入れ子状に配置する。各モデルは独立に構築され、それぞれの数値解析結果（境界値）を互いの境界条件として与えることで、物理的な連続性を確保する。さらに、各モデルの数値解析を並行して実行することで、モデル単体に集中する計算負荷（物理メモリ、計算時間）を平準化する。

また、地下構造物のモデル化にあたっては Tunnel Boundary Condition（以下、「トンネル境界条件」という）(Park et al., 2020) を用いた。トンネル境界条件は、坑道に相当する節点に浸出条件を与え、地下研究施設を疑似的にモデル化する方法である。

2.2.2 項に示すように、これらの機能を有しており、適用実績が示されている唯一の解析コードとして HGS を坑内湧水量解析に用いることとした。

### 2.2.2 解析コード HGS の概要

HGS は、カナダ Aquanty 社により開発・販売されている地下水流動解析コードである。HGS は、地表環境（降雨・蒸発散現象、水文環境）と地下環境（地下水流動、物質移行など）を各タイムステップで連成させ、水収支を算出することが可能である。また、開発元より計算の検証レポート (Aquanty, 2015, 2018) が公開されている。

地層処分施設の建設及び操業に伴う地下水流動場の変化は、地層処分施設周辺において水平距離で数十 km 四方以上に及ぶ可能性がある。一方、地層処分施設を構成する坑道断面、坑道支保、掘削損傷領域 (Excavation Damaged Zone : 以下、「EDZ」という) などの要素の大きさは、 $10^2$  m から 10 m の範囲にある。2.2.1 項で述べた TMR 法は、このような処分場スケールと広域スケールの異なる空間解像度間で、境界条件を統合的に引き渡す手法である。Aquanty 社が開発した HGS には TMR 法を実行する機能があり、異なるスケール間の解析を可能としている。

### 2.2.3 ConnectFlow の概要

2.1 節で述べたように、地層処分施設における坑内湧水量解析は非線形な地下水流動問題を扱う必要があるため、HGS を用いた坑内湧水量解析結果の検証には、地層処分施設で想定される地下水流動場の変化を適切に再現可能な別の解析コードを用いて、同様の解が得られるかを確認することが必要である。ConnectFlow は連続体と割れ目ネットワークが混在する複雑な地質環境サイトのモデル化が可能な計算コードである。同解析コードは、国内外の高レベル放射性廃棄物の地層処分プロジェクトに適用されており、スウェーデンの地層処分実施主体である SKB などが参画するワークショップにおいて継続的開発・高度化が行われているなど地層処分事業での地下水流動解析コードとしても実績がある。そのため、本検討で使用する比較用地下水流動解析コードとして、ConnectFlow (ver.12.2) を適用した。ConnectFlow が搭載する計算モジュールは以下の通り (Jacobs, 2020a, 2020b, 2020c)。

- ・ 割れ目ネットワークモデル (DFN モデル) による計算モジュール「NAPSAC」
- ・ 等価不均質/均質連続体モデル (ECPM/CPM モデル) による計算モジュール「NAMMU」
- ・ DFN モデルと ECPM/CPM モデルを同時に扱う計算モジュール「ConnectFlow」

これらのモジュールがパッケージ化された ConnectFlow は、理論解や解析解との比較、また他の計算コードとの比較に基づく検証が行われており、検証レポートの公開及び地下水流動解析に広く適用されている (付録 2 参照)。

### 2.3 数値解析モデルの妥当性確認に使用した地下研究施設

妥当性確認については、原位置での実測データとの比較を行うため、処分場と同程度の深さに建設され、かつ水平坑道を有し、また、施設周辺の地下水位と坑内湧水データ、及び地質構造モデルの詳細な情報が公表されている地下研究施設を対象とした。このような地下研究施設としては、スウェーデンのエスポ地下岩盤研究所及び JAEA の瑞浪超深地層研究所が代表例として挙げられる。妥当性確認のうち、エスポ地下岩盤研究所を対象としたものは第 4 章、瑞浪超深地層研究所を対象としたものは第 5 章で詳述する。

### 第3章 解析コードの検証

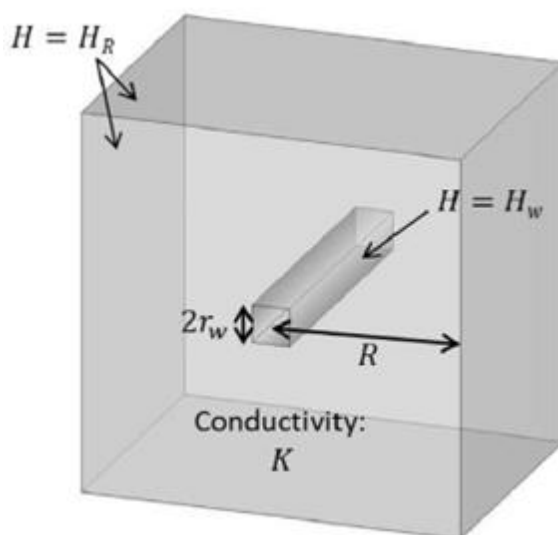
坑内湧水量の解析・評価に使用する HGS の検証を、他の計算コードと比較することで行った。簡易なモデルでは ConnectFlow との比較を実施した。なお、地下研究施設のように複雑な地下構造物を用いた解析コード間の比較については 5.5.4 項に示す。

#### 3.1 概要

処分場の水平坑道を模擬したベンチマーク問題を設定し、HGS 及び ConnectFlow を用いて数値解析を実施し、坑内湧水量を比較した。HGS では、水平坑道を線要素としてモデル化したケース (Implicit モデル) と、水平坑道を陽に数値モデル化したケース (Explicit モデル) を設定した。線要素としてモデル化した場合には、坑道壁面の水頭値と周辺の水頭値の差から湧水量を求め、当該湧水量を対象節点からの排出として扱うトンネル境界条件法 (付録 3 参照) を使用した。

#### 3.2 ベンチマーク問題の設定

Park et al. (2020) に基づいて、ベンチマーク問題を設定する。解析対象となる水平坑道を模擬した解析領域は、1,000 m×1,000 m (奥行き 1 m) であり、モデル領域の中央に 4 m×4 m の断面形状をもつ単一水平坑道を配置したモデルである (図 3-1)。この水平坑道には、図 3-2 に示すように、掘削影響領域とグラウト領域を設定した。この解析モデルを対象に、トンネル境界条件法の場合 (Implicit モデル) は、評価節点が坑道中心を通るように数値メッシュを構築した。また、Explicit モデルの場合は、図 3-3 に示すように水圧低下が生じる水平坑道近傍のメッシュサイズが周囲よりも小さくなるように分割した数値メッシュを構築し、HGS 及び ConnectFlow の解析に用いた。



図中の記号，設置値は，表 3-1 及び表 3-2 参照

図 3-1 解析モデル図



表 3-1 解析モデルの設定値

項目	記号	設定値 [m]
モデル領域 (半径相当)	R	500
水平坑道 (半径相当)	$r_w$	2
外側水理境界条件 (全水頭)	$H_R$	0
坑道水理境界条件	$H_w$	-500

表 3-2 透水係数の設定値

項目	透水係数 (K) [m/s]
岩盤	$2.7 \times 10^{-6}$
掘削影響領域	$2.7 \times 10^{-4}$
グラウト領域	$1.0 \times 10^{-7}$

表 3-3 解析ケース

	モデル条件
ケース 1	岩盤
ケース 2	岩盤 + 掘削影響領域
ケース 3	岩盤 + 掘削影響領域 + グラウト領域

### 3.4 解析結果の比較

Park et al. (2020) に示された水平坑道への湧水量の理論解と HGS による数値解析解との比較結果を表 3-4 に示す。HGS の数値解析結果には、水平坑道を線要素としてモデル化して算定した湧水量 (Implicit Tunnel Boundary Condition) と水平坑道を陽に数値モデル化して算定した湧水量 (Explicit Tunnel) がある。表 3-4 に示すように、ケース 1 とケース 2 の ConnectFlow の数値解析結果は、理論解とほぼ同等の算定値が得られており、HGS の数値解析結果よりも差が小さい結果であった。一方、ケース 3 では、HGS のように数値モデル化して算定した湧水量よりも理論解との差は小さいが、HGS の線要素としてモデル化して算定したトンネル境界条件法による湧水量よりも理論解との差は大きい結果になった。この原因は、Park et al. (2020) に述べられているように、相対的に透水係数が小さいグラウト領域において急に大きな動水勾配が生じているためと考えられる。

表 3-4 水平坑道への湧水量算定結果の比較

解法	グリッド寸法	ケース1			ケース2			ケース3		
		EDZ無し			EDZ有り			EDZ有り		
		グラウト無し			グラウト無し			グラウト有り		
		湧水量	理論解との差		湧水量	理論解との差		湧水量	理論解との差	
理論解	-	48,447			52,245			14,537		
HGS 数値解析 (トンネル境界条件法)	25 m	47,403	-1,044	2.15%	51,033	-1,212	2.32%	14,441	-96	0.66%
	50 m	47,409	-1,038	2.14%	51,040	-1,205	2.31%	14,442	-95	0.65%
HGS 数値解析解 (Explicit tunnel)	-	49,328	881	1.82%	53,252	1,007	1.93%	16,193	1,656	11.39%
Connect Flow 数値解析解 (Explicit tunnel)	-	48,325	-122	0.25%	51,962	-283	0.54%	15,829	1,292	8.89%

単位 [m<sup>3</sup>/y]

このように、HGS のトンネル境界条件法を用いた場合、EDZ の設定及びグラウトの有無に関わらず理論解と比較して、坑内湧水量の差は数%以内であり、水平坑道からの湧水をよく再現できている。水平坑道の構造を忠実にモデル化して、解析した場合 (Explicit モデル)、ConnectFlow は、EDZ 及びグラウトの物性を設定すると理論解と約 9%の差があるという結果になったが、HGS で Explicit モデルを対象に解析しても理論解と約 12%の差がある結果となっており、解析コードごとにどのようなモデル化が適切かを認識することが重要である。

以上の結果により、HGS のトンネル境界条件法により、理論解に近似の値を得ることが可能であり、また、ConnectFlow と Explicit モデルを用いて比較した場合もほぼ同程度の湧水量の結果が得られていることから、HGS は検証されたといえる。

## 第4章 エスポ地下岩盤研究所を対象とした数値解析

第4章では、海外の地下研究施設を対象として取得された実測データを用い、HGSによる解析結果と実測値との比較を通じて、坑内湧水量解析・評価技術及び坑内湧水に伴う地下水位変化解析・評価技術の妥当性確認（Validation）を実施する。本検討では、建設前及び建設・操業期間において取得された水理地質構造、坑内湧水量、地下水圧（全水頭）に関する実測データが整備されているスウェーデンのエスポ地下岩盤研究所を対象とし、解析結果と実測値の整合性を評価する。本章における妥当性確認では、区間ごとの湧水量の厳密な再現性ではなく、坑道全体としての総湧水量及び周辺岩盤における地下水位分布・低下範囲の再現性に着目し、実用的な観点から HGS の適用性を検討する。

### 4.1 エスポ地下岩盤研究所の概要

エスポ地下岩盤研究所は、スウェーデン・オスカーシャム北方のエスポ島に位置する深度 460 m まで掘削された研究所である。スウェーデン放射性廃棄物管理会社（Svensk Kärnbränslehantering AB：以下、「SKB」という）が運営し、使用済核燃料の地層処分技術の研究開発を目的として 1995 年に開設された。この施設では、地下の地質環境の調査技術の開発や処分技術の実用化に向けたフルスケール試験が行われている。同施設は、放射性廃棄物を扱わない研究所であり、Forsmark に建設予定の最終処分場の設計・運用に必要な知見を蓄積する場として重要な役割を果たしてきた（SKB, 2017）。

### 4.2 解析方法

HGS を用いてエスポ地下岩盤研究所を対象として実施した地下水流動解析の手順を図 4-1 に示す。まず、この施設周辺の地形・地質及び同研究所に関する様々なデータに基づき、水理地質構造及び地下研究施設を数値モデル化し、地下水流動解析を実施する。地下水流動解析では、まず施設建設前の初期の地下水流動状態を再現する定常状態の解析（ベースライン解析）を実施する。次に、ベースライン解析で得られた水頭分布を初期条件として、施設建設後の坑内湧水量解析を実施する。続いて、得られた解析結果を、この施設において取得された実測データと比較する。実測値と解析結果に乖離が認められる場合には、水理地質構造モデルや解析条件などに含まれる不確実性を考慮しつつ、モデルパラメータの校正を行い、再解析を実施する。これらの比較・調整を繰り返すことにより、解析結果と実測値との整合性を評価し、坑内湧水量解析及び地下水流動解析に関する HGS の適用性を検討する。

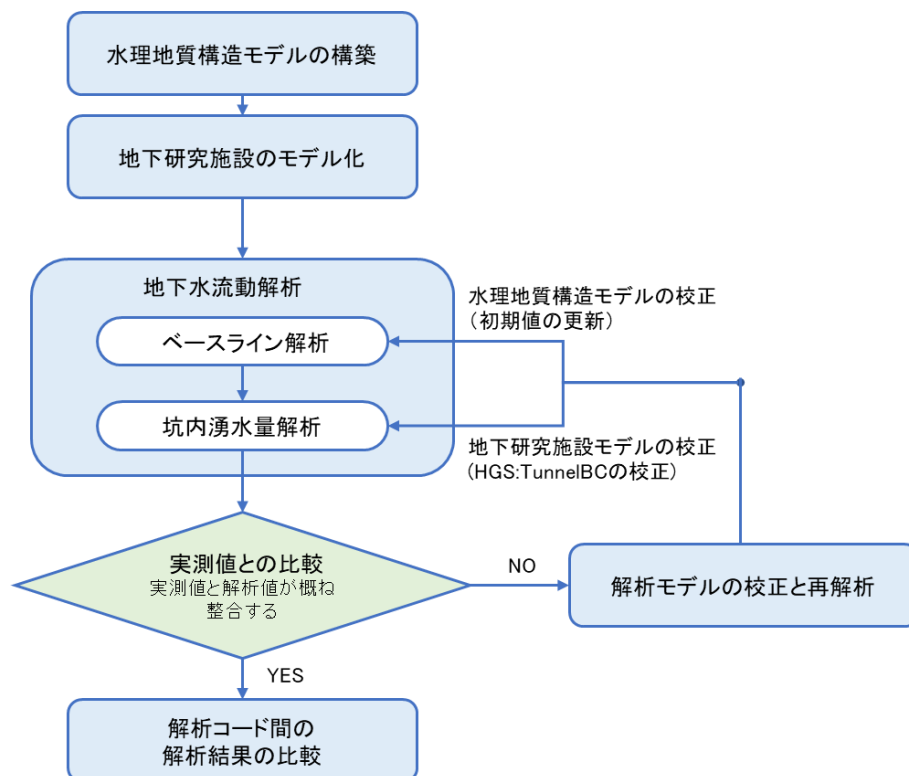


図 4-1 解析手順

### 4.3 水理地質構造モデルの構築

エスポ地下岩盤研究所周辺は主に結晶質岩で構成されている。結晶質岩は緻密かつ透水性が低い岩石であるが、割れ目や断層など、透水係数が相対的に高い変形帯を主な水みちとして地下水が移行する。このため、水理地質構造モデルを構築する際には、変形帯の三次元的な分布などを考慮し、エスポ島を包含する「広域スケール」と地下研究施設周辺を中心とした「サイトスケール」の2段階に分けてモデル化する。なお、エスポ施設周辺の水理地質構造などの実測データを付録4に示す。

#### 4.3.1 広域スケール

広域スケールの水理地質構造モデルは、エスポ地下岩盤研究所周辺における地下水流動場の広域的な特徴を把握し、サイトスケールの地下水流動解析に対して適切な境界条件を与えることを目的として構築した。対象領域は、図4-2に示すエスポ地下研究所周辺で掘削された調査ボーリングが分布する領域を含む範囲とし、南北約3 km、東西約5 km、深度約1.5 kmの矩形領域として設定した。本地域は地形の起伏が小さく、明瞭な分水嶺を抽出することが困難であること、また周囲を海域に囲まれていることから、本検討では矩形領域を解析領域として設定した。周辺が海域に囲まれているという地形条件を踏まえ、地下水流動場は主として海水面により規制され、地形の影響は相対的に小さいと考えられる。このため、境界条件については、広域スケールモデルでは矩形境界を採用した。

広域スケールにおける水理地質構造は、透水性土壌 (Hydraulic Soil Domains : 以下、「HSD」という)、堅硬な割れ目性岩盤 (Hydraulic Rock mass Domains : 以下、「HRD」という) 及び透水性の高い岩盤 (Hydraulic Conductor Domains : 以下、「HCD」という) に区分される (図4-3)。このうち、HSD

は表層付近に分布し、厚さが薄いことから、地下研究施設における坑内湧水量への影響は小さいと考えられるため、本モデルではHRD及びHCDを解析対象とした。

広域スケールモデルは、サイトスケールモデルに対して広域的な地下水流動場の影響を反映する境界条件を与えることを目的としている。このため、HRD及びHCDの内部における詳細な水理特性の不均質性が解析結果に与える影響は限定的であると考え、均質等方性の連続体モデルとしてモデル化した。また、HCDについては、変形帯の三次元幾何形状データを用いて、均質連続体モデルとして表現した。

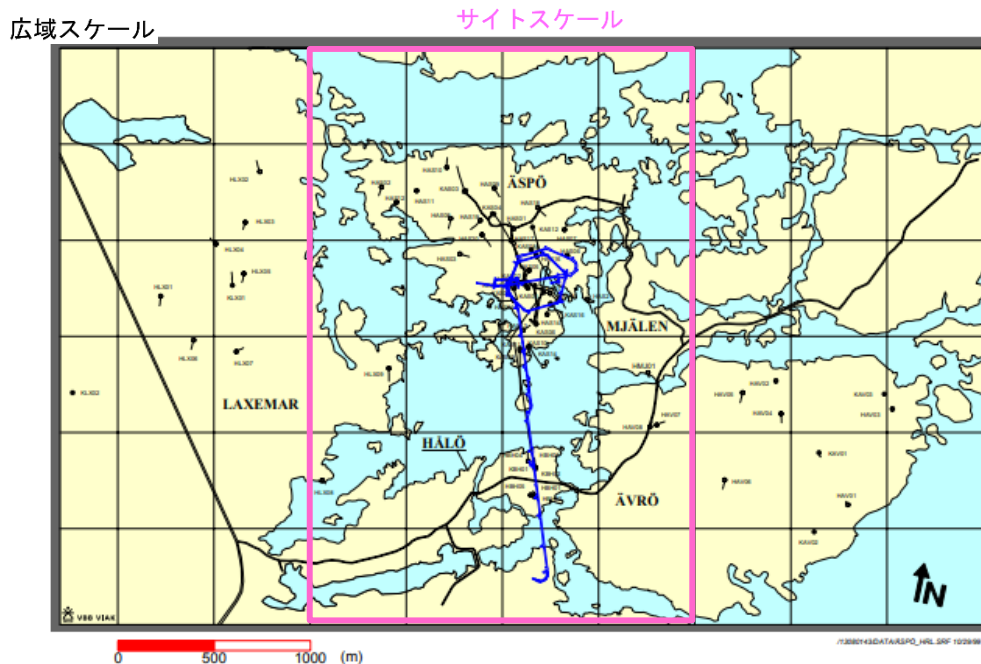


図 4-2 エスポを対象にしたモデルの空間スケール  
(Rhén and Smellie, 2003) に加筆

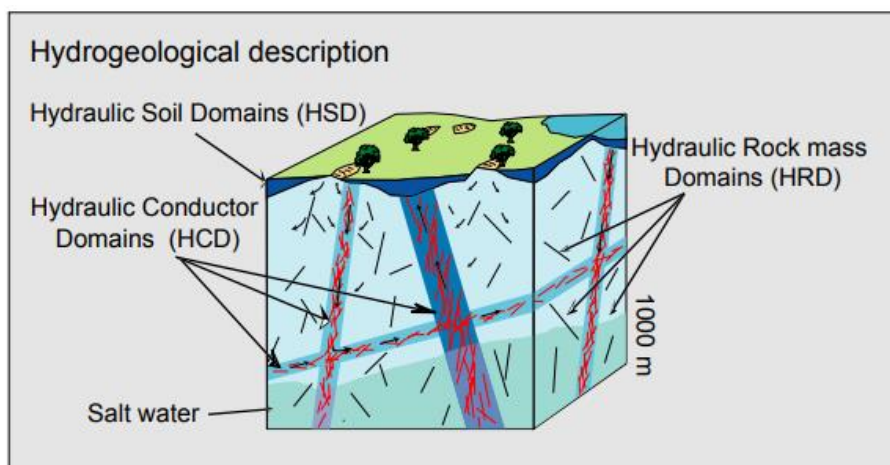


図 4-3 水理地質構造モデル概念  
(Rhén and Smellie, 2003)

### (1) 三次元メッシュの作成

広域スケールの水理地質構造モデルにおける三次元メッシュは、当該地域の地形及び主要な水理地質構造の分布を適切に表現しつつ、数値解析として実用的な計算負荷となるよう設定した。水平方向の空間分割サイズは、複雑な海岸線形状の再現性を考慮し、20 m とした。鉛直方向については、地下水面付近の水理挙動をより詳細に表現するため、標高-150 m 以浅を 10 m 以下の間隔で分割し、それ以深については 25 m 間隔で分割した。この結果、広域スケールモデルの総要素数は約 2,737,500 要素となった (図 4-4 参照)。本メッシュ設定により、広域的な地下水流動場及び主要な高透水性構造の影響を、サイトスケール解析の境界条件として十分な精度で表現できると考えられる。HCD は、Deformation Zone の三次元幾何形状データを用いて広域スケールのモデル領域内に数値モデル化した (図 4-5 参照)。

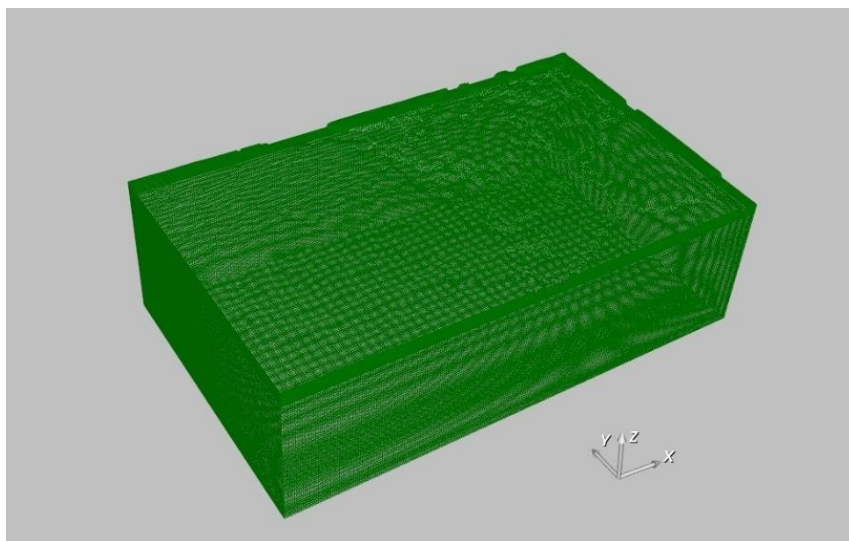


図 4-4 広域スケールの三次元構造格子モデル

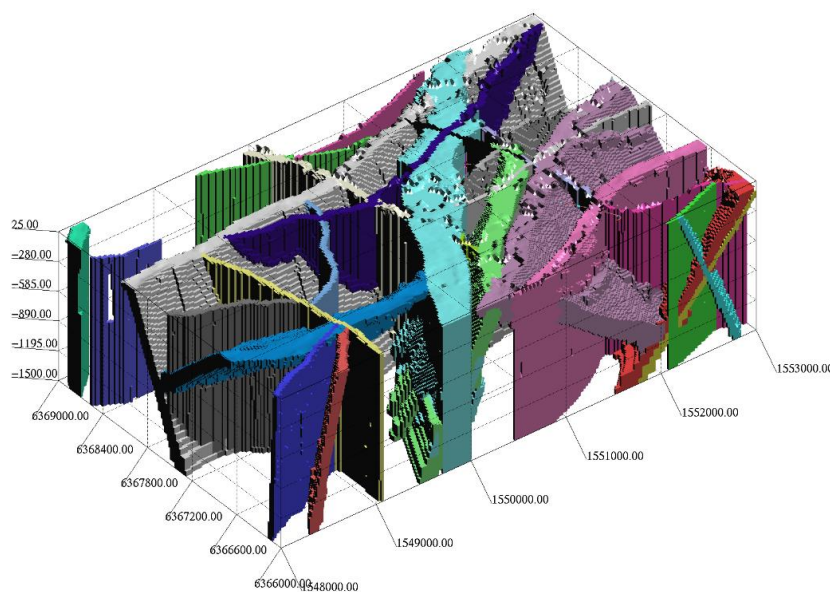


図 4-5 広域スケールにおける HCD の三次元地質構造モデル

## (2) 水理地質区分及び水理特性の設定

広域スケールの水理地質構造モデルにおける水理特性は、HRD 及び HCD それぞれについて、既往の調査結果及び文献情報に基づき設定した。設定した透水係数、比貯留係数及び有効間隙率の一覧を表 4-1 示す。

透水係数については、数値解析モデルの空間分割サイズが 20 m であることを踏まえ、Rhén et al. (2008) に示された試験区間長 20 m の透水試験結果から得られた透水係数の対数平均値を、深度区分ごとに適用した。これは、広域スケールモデルがサイトスケール解析の境界条件を与えることを主目的としているため、局所的な不均質性よりも、広域的な平均的水理特性を表現することを重視したものである。

比貯留係数については、透水係数との関係式及び既往研究に基づくパラメータを用いて算定した。有効間隙率については、原位置トレーサー試験結果に基づき、透水係数との経験的關係式(式 4-1)を用いて算定した。本検討では、これらの値を広域スケールにおける代表的な水理特性として設定した。

$$n_e = 34.87 \cdot K^{0.753} \quad (4-1)$$

表 4-1 広域スケールの水理地質構造モデルの設定値

水理地質区分		透水係数 [m/s]	比貯留係数 [1/m]	有効間隙率 [-]
HRD	> -150 [masl]	$3.09 \times 10^{-8}$	$1.33 \times 10^{-6}$	$7.72 \times 10^{-5}$
	-150~-400 [masl]	$1.26 \times 10^{-9}$	$5.96 \times 10^{-7}$	$6.93 \times 10^{-6}$
	-400~-650 [masl]	$1.66 \times 10^{-10}$	$3.59 \times 10^{-7}$	$1.51 \times 10^{-6}$
	< -650 [masl]	$3.31 \times 10^{-11}$	$2.40 \times 10^{-7}$	$4.48 \times 10^{-7}$
HCD	> -150 [masl]	$9.77 \times 10^{-9}$	$9.94 \times 10^{-7}$	$3.24 \times 10^{-5}$
	-150~-400 [masl]	$1.12 \times 10^{-8}$	$1.03 \times 10^{-6}$	$3.60 \times 10^{-5}$
	-400~-650 [masl]	$3.31 \times 10^{-9}$	$7.59 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-5}$
	< -650 [masl]	$1.02 \times 10^{-9}$	$5.66 \times 10^{-7}$	$5.93 \times 10^{-6}$

HRD : Hydraulic Rock mass Domains (堅硬な割れ目性岩盤)

HCD : Hydraulic Conductor Domains (透水性の高い岩盤)

### 4.3.2 サイトスケール

サイトスケールの水理地質構造モデルは、エスポ地下岩盤研究所周辺における坑道近傍の地下水流動及び坑内湧水挙動を再現することを目的として構築した。本モデルでは、広域スケールモデルで得られた地下水流動場を境界条件として取り込みつつ、地下研究施設周辺の水理地質構造をより詳細に表現した。

水理地質構造モデルの対象領域は、図 4-2 に示す広域スケールの領域内からエスポ島周辺の海域と坑口からアクセス坑道及び研究坑道を中心とした南北 3 km、東西 2 km、深度は 1.5 km の矩形構造とした。サイトスケールモデルの水理地質区分は、広域スケールモデルと同様に HRD 及び HCD を基本とし、これに Local Deformation Zone (Local DZ) を加えて設定した。HRD については、岩盤

内に分布する割れ目に起因する水理的な不均質性を表現するため、確率論的手法に基づく割れ目ネットワークモデル（DFNモデル）を用いて割れ目の幾何学特性及び水理特性を統計的にモデル化した。

DFNモデルにより生成した割れ目ネットワークについては、サイトスケールの数値解析に適用するため、アップスケーリングを行い、等価な透水係数及び有効間隙率を有する等価不均質連続体モデルとして表現した。この手法により、割れ目分布に起因する水理応答の代表的な挙動を連続体モデルとして取り込むことが可能となる。一方で、個々の割れ目の詳細な挙動を直接再現するものではない点に留意が必要である。

HCD及びLocal DZについては、広域スケールモデルと同様に、三次元幾何形状データに基づき均質連続体モデルとしてモデル化した。これらの高透水性構造は、坑道と交差することにより坑内湧水量に大きな影響を及ぼす可能性があるため、サイトスケールモデルにおいて明示的に取り込んだ。なお、Local DZの幾何形状については比較的詳細な情報が得られている一方で、水理特性については不確実性が残ることから、後続の解析において感度解析及びモデル校正の対象とした。

### (1) 三次元メッシュの作成

サイトスケールモデルの空間分割サイズは、広域スケールモデルと同様に平面方向20mとした。これは、モデル領域の規模がTMR法を適用するほど大きくないこと、及び広域スケールモデルとの整合性を確保する観点から、本検討ではTMR法を適用せず、広域スケールモデルにサイトスケールの水理地質構造及びLocal DZを重ね合わせたモデル構成としたためである。

### (2) 水理地質区分及び水理特性の設定

HRDに対して、岩盤内に分布する割れ目に起因する水理的な不均質性を表現するため、確率論的手法によるDFNモデルに基づいた等価不均質連続体モデル（等価な透水係数及び有効間隙率）によりモデル化した。DFNの幾何学特性及び水理特性の統計量は、表4-2に示すデータセットを用いた。これは、エスポ地下岩盤研究所の4本のボーリング調査により取得されたデータを統計処理することで算定した割れ目の方位、密度、長さ、透水量係数に関する統計量である。この統計量を用いてサイトスケールのHRD領域に対して確率論的手法により割れ目ネットワークモデルを生成し、アップスケールすることにより等価不均質連続体モデルを作成した。その際、サイトスケールの数値モデルの平面離散化間隔が10mであることから、DFNモデルの最小割れ目長さを10mに設定した。Local DZの透水係数、比貯留係数及び有効間隙率の設定値については表4-3に示す。

表 4-2 確率論的手法により生成する割れ目ネットワークモデルの統計量

区分	傾斜方位/傾斜 [度]	フィッシャー 係数 [-]	三次元密度 [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	長さ分布 L <sub>0</sub> , L <sub>max</sub> [m], b [-]	透水量係数分布 μ, σ, B [m <sup>2</sup> /s]
1	221/83	9.7	0.38	2.4, 300, 3.6	-9.7, 0.4, 1.5
2	320/85	6.1	0.13		
3	162/12	6.5	0.10		

長さ分布 L<sub>0</sub>: 割れ目の最小長さ, L<sub>max</sub>: 割れ目の最大長さ, b: ベキ指数 (ベキ乗分布仮定)

透水量係数分布 μ: 対数平均値, σ: 対数標準偏差, B: 係数 (割れ目の透水量係数と長さの準相関関係を仮定)

表 4-3 Local\_DZ の水理地質構造モデルの設定値

Local_DZ	透水係数 [m/s]	比貯留係数 [1/m]	有効間隙率 [-]
EW-1(a)	$2.6 \times 10^{-8}$	$1.88 \times 10^{-8}$	$1.82 \times 10^{-4}$
EW-1(b)	$6.0 \times 10^{-7}$	$1.75 \times 10^{-7}$	$4.68 \times 10^{-4}$
NE-1	$2.2 \times 10^{-5}$	$2.76 \times 10^{-6}$	$2.24 \times 10^{-3}$
NE-2	$1.2 \times 10^{-8}$	$1.33 \times 10^{-8}$	$2.35 \times 10^{-4}$
EW-3	$1.7 \times 10^{-6}$	$4.48 \times 10^{-7}$	$1.04 \times 10^{-3}$
NNW-4	$6.5 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-6}$	$1.55 \times 10^{-3}$

構築した水理地質構造モデルを図 4-6 に示す。図中帯状の構造（Zone 4, 5, 6 及び 7）が HCD, 黄色の線状構造（Zone 8）が Local DZ である。透水係数分布図を図 4-7 に示す。

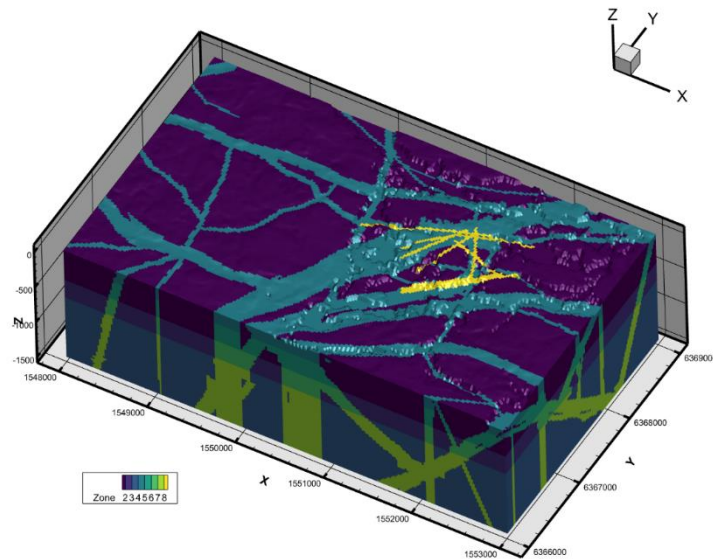


図 4-6 水理地質構造モデル

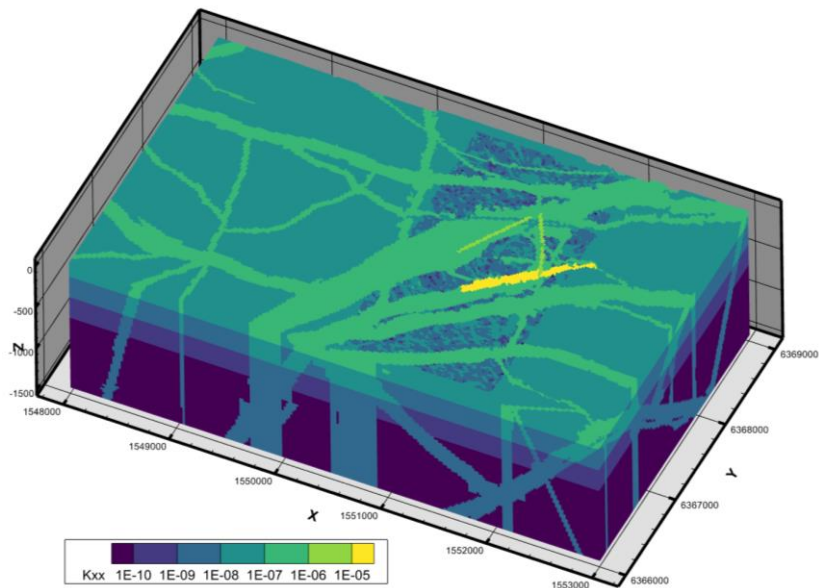


図 4-7 X方向の透水係数分布図

#### 4.4 地下研究施設のモデル化

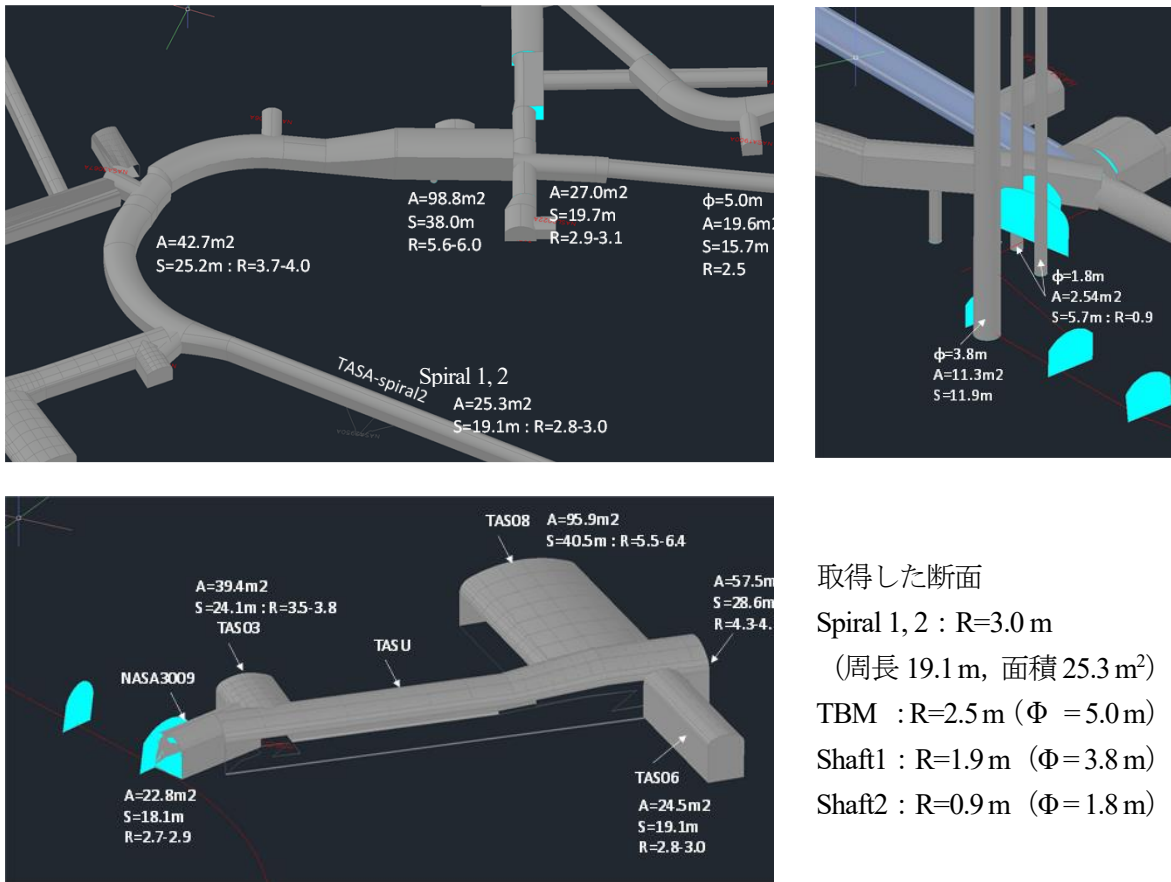
本節では、エスポ地下岩盤研究所の坑道群を数値解析モデルに取り込み、坑内湧水量を算定するための地下研究施設モデルの構築方法について示す。地下研究施設モデルは、水理地質構造モデルと結合することにより、坑道掘削に伴う地下水の流入を境界条件として表現することを目的としている。

##### 4.4.1 地下研究施設の形状

エスポ地下岩盤研究所は、アクセス坑道（斜坑）、螺旋状坑道、立坑及び試験坑道から構成される。これらの施設の形状については、付録4に示した建設に関する資料に基づき、図4-8及び図4-9に示すように三次元CADを用いて3Dモデルとして整理し、坑道線形及び坑道断面形状（面積及び周長）を取得した。



図 4-8 エスポ地下岩盤研究所の鳥瞰図  
(SKBより提供されたデータを可視化)



取得した断面

- Spiral 1, 2 : R=3.0 m  
(周長 19.1 m, 面積 25.3 m<sup>2</sup>)
- TBM : R=2.5 m (Φ = 5.0 m)
- Shaft1 : R=1.9 m (Φ = 3.8 m)
- Shaft2 : R=0.9 m (Φ = 1.8 m)

図 4-9 トンネルの断面形状を取得した CAD 図面  
(SKB より提供されたデータを可視化)

エスポ地下岩盤研究所のモデル化には、HGS に実装されているトンネル境界条件法を適用した。本手法では、坑道を線状の排水境界として表現し、坑道内圧力水頭と周辺岩盤の圧力水頭との差に基づいて、岩盤中から坑道への地下水流入量を算定する。トンネル境界条件法は、坑道周辺の詳細な流れ場を直接解くものではないが、坑道全体としての湧水量や地下水位低下の傾向を把握する上で、計算効率と再現性のバランスに優れた手法である。本検討では、坑内湧水量の総量及びその時間変化に着目した解析を目的として、本手法を採用した。図 4-10 にトンネル境界条件法でモデル化した地下研究施設モデルの鳥観図を示す。施設はトンネル境界条件を設定した点の集まりとして表現される。

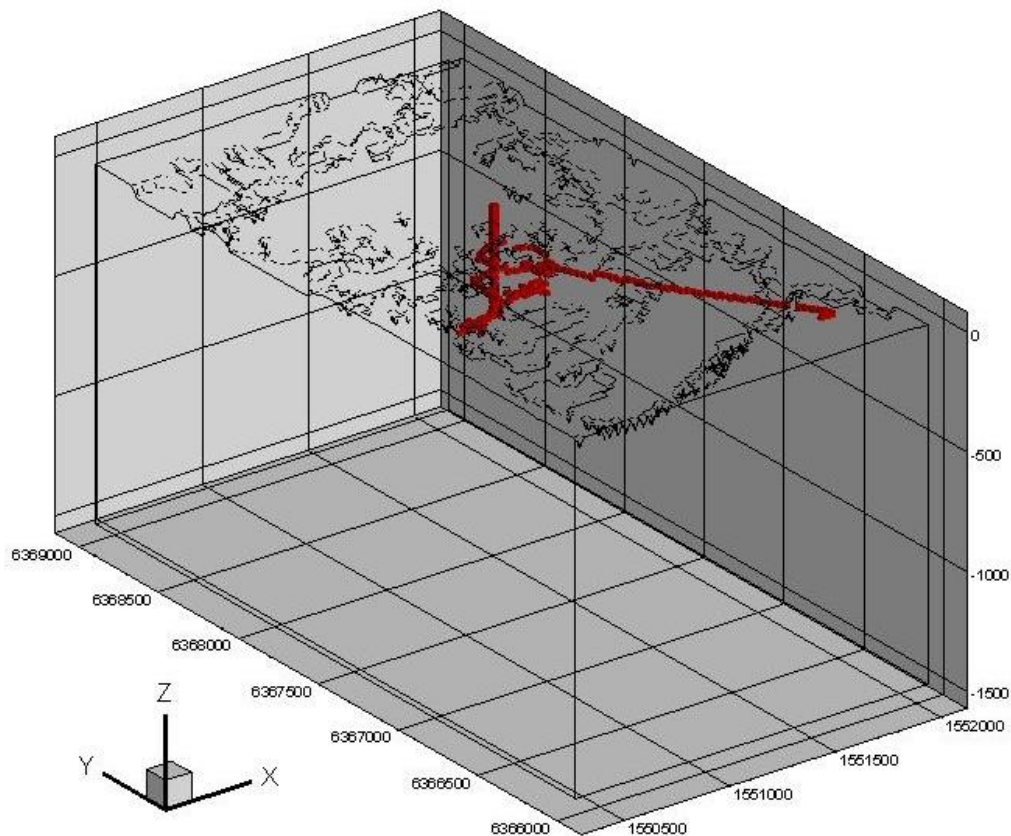


図 4-10 トンネル境界条件法でモデル化したエスポ地下岩盤研究所の鳥観図

#### 4.4.2 グラウト区間の設定

エスポ地下岩盤研究所の建設過程では、坑道掘削に伴う湧水低減を目的として、プレグラウトが施工されている。グラウトの施工位置については、Rhén et al. (1997) 及び Hedman (1999) に基づき整理し、地下研究施設モデルに反映した。

一方で、グラウトによる改良効果の程度や改良幅（岩盤中にグラウトが侵入し改良された範囲）については、詳細な情報が得られていない。このため、本モデルでは、グラウト施工区間の位置情報は考慮するものの、改良後の透水係数については代表値を設定し、不確実性を含んだ条件として取り扱った。これらの不確実性が解析結果に与える影響については、後続の節において感度解析及びモデル校正を通じて考察する。

図 4-11 の左図は、トンネル境界条件の設定セグメントとプレグラウト区間を表しており、右図はトンネル境界条件周りの透水係数を示している。また、図 4-12 はトンネル区間を展開し、透水係数分布とグラウト位置を示したものであり、岩盤区分は、背景として HRD, HCD, Local DZ として色分けして示している。このうち透水係数が高いのは Local DZ (黄色) 及び HCD (緑系色) で、HRD (青系色) は相対的に透水係数が小さい。プレグラウト施工区間は Grouted Segment (ピンク色)、プレグラウト未施工区間は Elemental K (白色) として表している。これらの図より、高透水部とプレグラウト区間が概ね一致していることがわかる。ただし、具体的にプレグラウトによってどの程

度の改良が実施されたかについて情報はなかったため、後述の解析ケースにおいて、改良範囲及び改良期待値を設定した。地下研究施設の建設工程は、付録4に整理した情報に基づいて設定した。

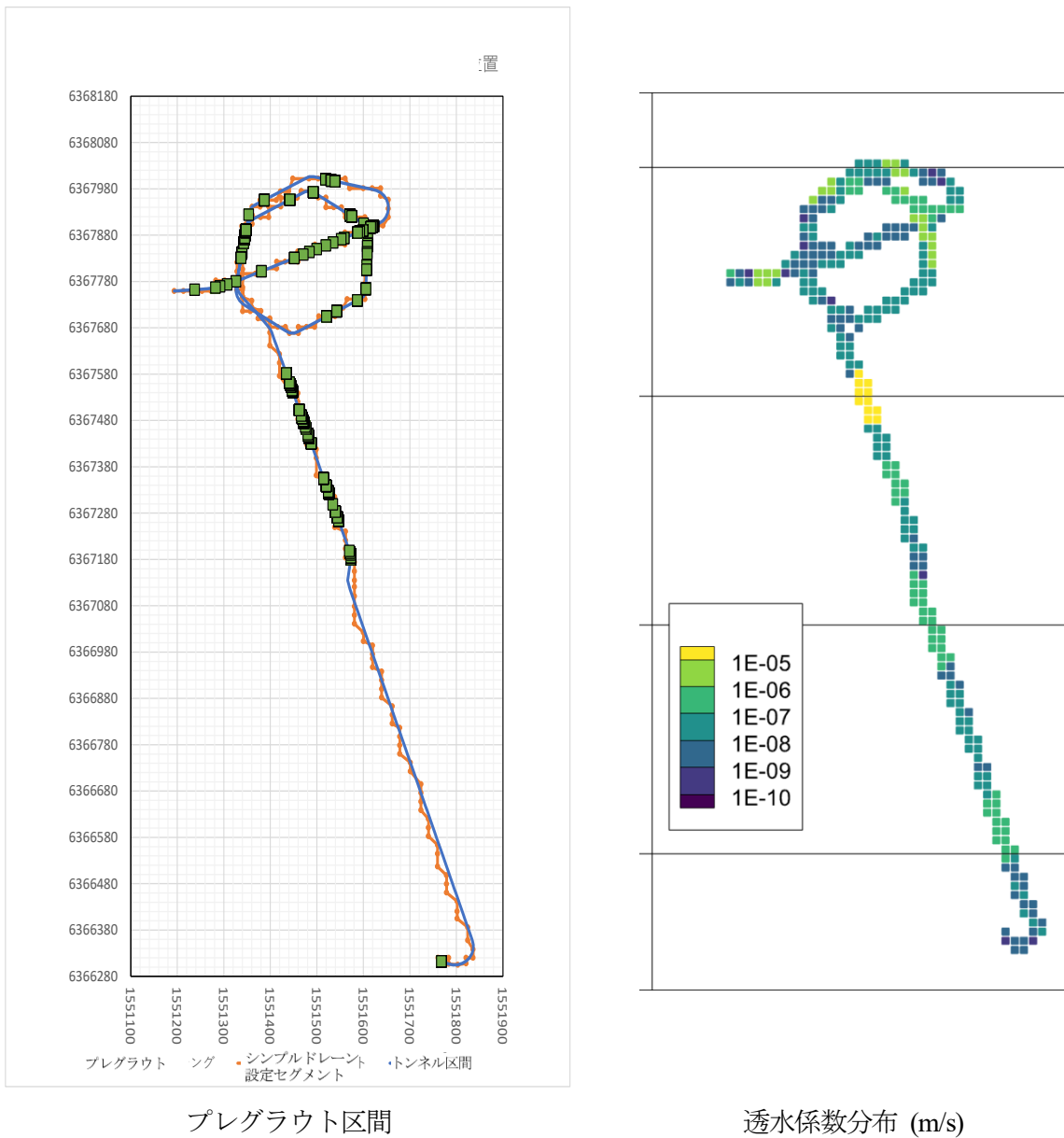


図 4-11 地下研究施設モデルのグラウト区間及び坑道周辺の透水係数分布

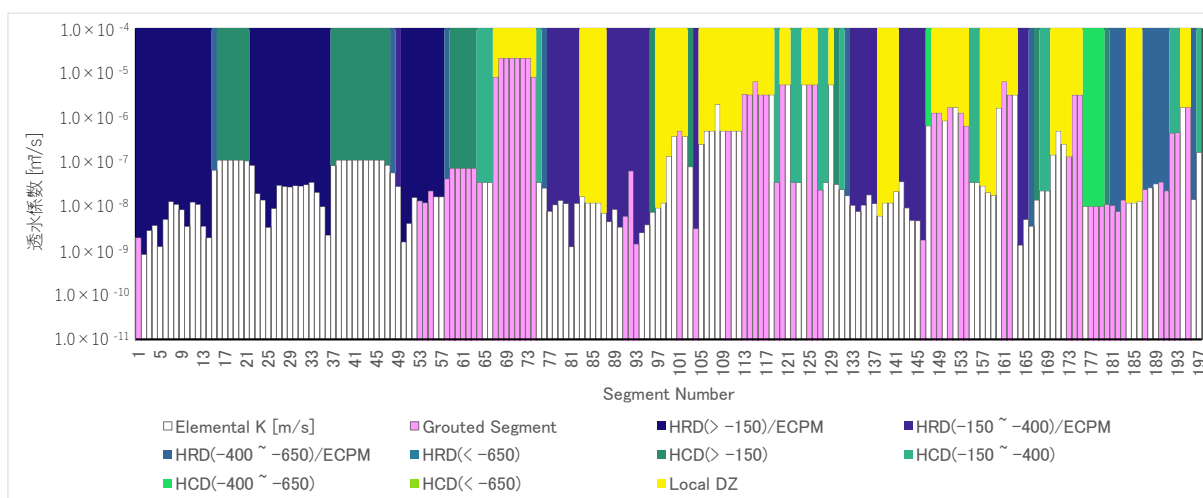


図 4-12 エスポ地下岩盤研究所モデルのトンネル沿いの岩盤透水係数分布及びグラウト区間

#### 4.5 地下水流動解析

本節では、前節までに構築した水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルを用いて、HGSによる地下水流動解析を実施する。解析にあたっては、まず、エスポ地下岩盤研究所建設前の地下水流動状態を再現するための定常状態の三次元地下水流動解析（ベースライン解析）を実施する。次に、このベースライン解析で得られた水頭分布を初期条件として、地下研究施設の建設過程を再現した非定常の坑内湧水量解析を実施する。さらに、得られた解析結果を実測値（坑内湧水量及び全水頭）と比較し、その結果に基づいて水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルの校正並びに再解析を行う。

##### 4.5.1 ベースライン解析

ベースライン解析では、エスポ地下岩盤研究所建設前の地下水流動状態を再現する。この解析においては、初期状態（ベースライン）を再現可能な解析条件を決定するため、エスポ地下岩盤研究所建設前に取得された実測データと解析結果を比較した。本解析における境界条件を表 4-4 に示す。地表面の境界条件は、陸域は降雨涵養量を境界条件とし、海域には海水の密度を考慮した静水圧分布を設定した。陸域は地形面標高、海域は海水密度を考慮した水頭値を設定した。側面及び底面は不透水境界とした。なお密度流は考慮していない。

表 4-4 境界条件

地表面	陸域	降雨涵養量：50 mm/y
	海域	静水圧分布：海水の密度（1,025 kg/m <sup>3</sup> ）を考慮 <sup>※</sup>
側面	不透水境界	
底面	不透水境界	

※例えば、Millero (2010) など

#### 4.5.2 坑内湧水量解析

坑内湧水量解析は、4.2 に示した解析手順に基づいて、以下のように実施した。

- ① 初期解析（定常解析）：ベースライン解析で得られた解析条件及び全水頭分布を初期状態として、エスポ地下岩盤研究所建設後の状態を想定した定常地下水流動解析を実施し、建設後の坑内湧水量及び建設前後の同施設周辺の観測用ボーリング孔内の地下水位の変化を出力する。
- ② モデルの校正：初期解析の結果について、実測値と解析値を比較する。有意な差がある場合には、水理地質構造や同施設のグラウト施工範囲などを調整してモデルを校正する。
- ③ 建設過程の再現解析（非定常解析）：モデルの校正により定常状態での再現性が最も高くなったモデルを選択し、実際の施設の建設・操業工程を考慮した非定常解析を実施し、実測値との比較を行うことで、HGS を用いた坑内湧水量評価技術の妥当性の確認 (Validation) を実施する。

##### (1) 初期解析：水理地質構造モデルの不確実性の評価

図 4-13 に示すようにエスポ地下岩盤研究所は一部で高透水構造に相当する HCD を横切るように建設されており、また施設の北部の領域のほとんどが HCD となっているため、HCD の透水係数の設定が解析結果に影響を与えると考えられる。表 4-5 に示したように、HCD の透水係数は 95% の信頼区間で 1~2 桁程度の分布幅を有している。一方、同じく高透水性構造である Local DZ は、調査や試験が数多く実施されているため、値のばらつきが HCD と比較して小さい。このような高透水構造の透水係数の不確実性が解析結果にどのように影響するかを確認するため、HCD の透水係数を変数として感度解析を実施した。なお、表 4-3 に示すように Local DZ の透水係数のばらつきは表 4-5 に示す HCD の透水係数の範囲より小さいので、各解析ケースで Local DZ の透水係数の設定値は共通の値を設定する。

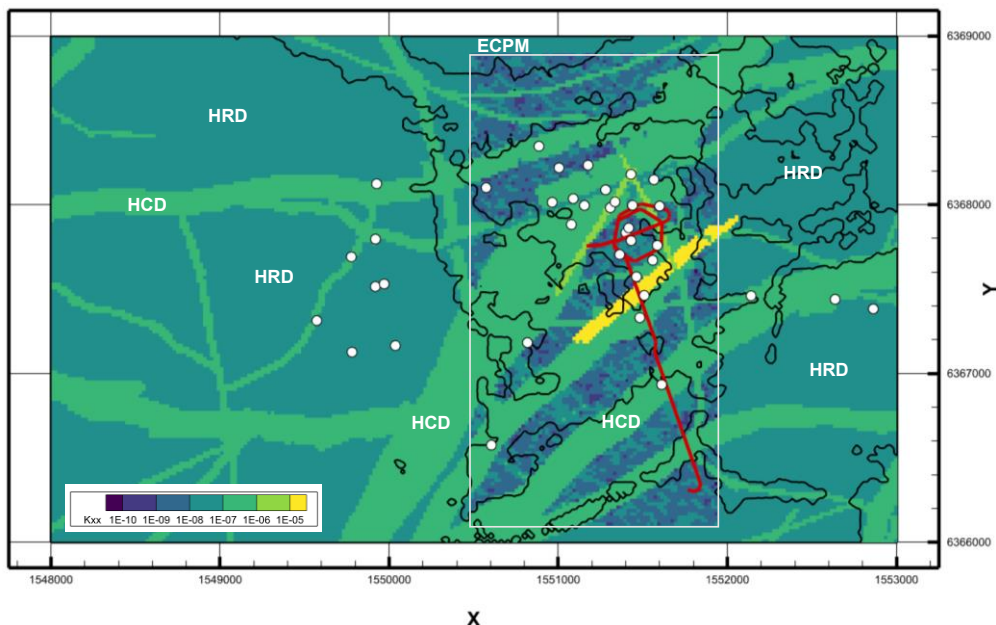


図 4-13 Case001 モデルの透水係数分布図 (Z=-150m 水平断面)

(水圧の実測点は-150 m 以浅に位置し、地下研究施設付近の線形状の構造は Local\_DZ を示す。)

表 4-5 HCD に設定した水理パラメータ

設定の考え方	海拔 [masl]	透水係数 [m/s]	比貯留係数 [1/m]	有効間隙率 [-]
対数平均値	> -150	$1.10 \times 10^{-7}$	$1.82 \times 10^{-6}$	$2.00 \times 10^{-4}$
	-150~-400	$3.47 \times 10^{-8}$	$1.36 \times 10^{-6}$	$8.42 \times 10^{-5}$
	-400~-650	$1.00 \times 10^{-8}$	$1.00 \times 10^{-6}$	$3.30 \times 10^{-5}$
	< -650	$2.69 \times 10^{-9}$	$7.20 \times 10^{-7}$	$1.23 \times 10^{-5}$
95%信頼区間の下限値	> -150	$9.77 \times 10^{-9}$	$9.94 \times 10^{-7}$	$3.24 \times 10^{-5}$
	-150~-400	$1.12 \times 10^{-8}$	$1.03 \times 10^{-6}$	$3.60 \times 10^{-5}$
	-400~-650	$3.31 \times 10^{-9}$	$7.59 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-5}$
	< -650	$1.02 \times 10^{-9}$	$5.66 \times 10^{-7}$	$5.93 \times 10^{-6}$
95%信頼区間の上限値	> -150	$1.23 \times 10^{-6}$	$3.33 \times 10^{-6}$	$1.24 \times 10^{-3}$
	-150~-400	$1.07 \times 10^{-7}$	$1.81 \times 10^{-6}$	$1.97 \times 10^{-4}$
	-400~-650	$3.09 \times 10^{-8}$	$1.33 \times 10^{-6}$	$7.72 \times 10^{-5}$
	< -650	$7.08 \times 10^{-9}$	$9.17 \times 10^{-7}$	$2.54 \times 10^{-5}$

表 4-6 に水理地質構造モデルの不確実性を考慮する解析ケースとして、HCD の透水係数のばらつきに基づいた設定を示す。Case001-grt2 では、HCD の設定を表 4-5 に示した対数平均値とし、Case002-grt2 は同じく 95%信頼区間の下限値、及び Case003-grt2 は同じく 95%信頼区間の上限値とした。グラウト改良値は  $1.0 \times 10^{-9}$  m/s に設定し、高透水性の構造である Local DZ の透水係数（表 4-3 参照）は全てのケースで共通の設定とした。

表 4-6 水理地質構造モデルの不確実性を考慮する解析ケース

解析ケース	HCD の設定値	グラウト改良期待値	備考
Case001-grt2	対数平均値	$1.0 \times 10^{-9}$ m/s	Local DZ の透水係数は各ケースで共通
Case002-grt2	95%信頼区間の下限値	$1.0 \times 10^{-9}$ m/s	同上
Case003-grt2	95%信頼区間の上限値	$1.0 \times 10^{-9}$ m/s	同上

図 4-14 に、水理地質構造モデルの不確実性に関する解析ケースの水圧測定値（全水頭）の解析値と実測値を比較した。全水頭の解析値は一部を除き、実測値よりも低い値を示しており最も差が大きなのは約 150~200 m の差となっている。その傾向は、HCD の透水係数が大きいほど軽減されるが差は残る。

図 4-15 に実測用のボーリング孔の名称のうち、解析値と実測値の差が小さい孔を青字で示し、差が大きい孔を赤字で示した。解析領域内に広く分布する岩盤の透水係数の設定値が問題ならば、場所によらず、施設から離れた位置でも差が大きくなると考えられる。しかし、差が大きい孔は、地下研究施設周辺、特に HCD が広く分布する施設北部で差が大きい結果となっている。このこと

から、このような差は、地下研究施設によるもの、例えば坑道と交差する HCD 部にはプレグラウトが実施されているため、そのプレグラウトの設定条件が要因として考えられる。付録4に示したように SKB から入手した情報ではプレグラウトの位置はわかっているものの、グラウトによる改良効果及びグラウトの改良幅については情報がなく、これらは、地下研究施設の数値モデル化における不確実性の要因となる。このため、次項(2)で地下研究施設モデルの不確実性に関する解析として、グラウトの設定値と全水頭の解析値の関係について検討する。

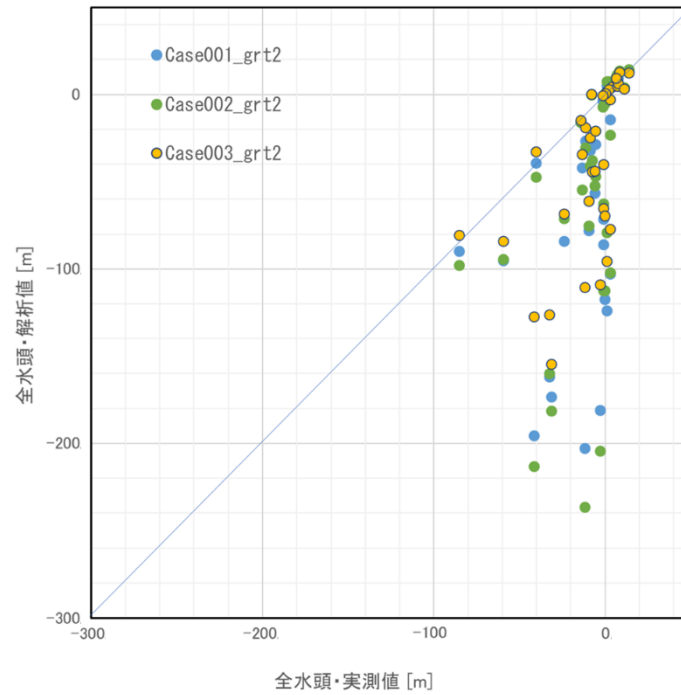


図 4-14 水理地質構造モデルの不確実性に関する解析ケースの全水頭の解析値と実測値の比較

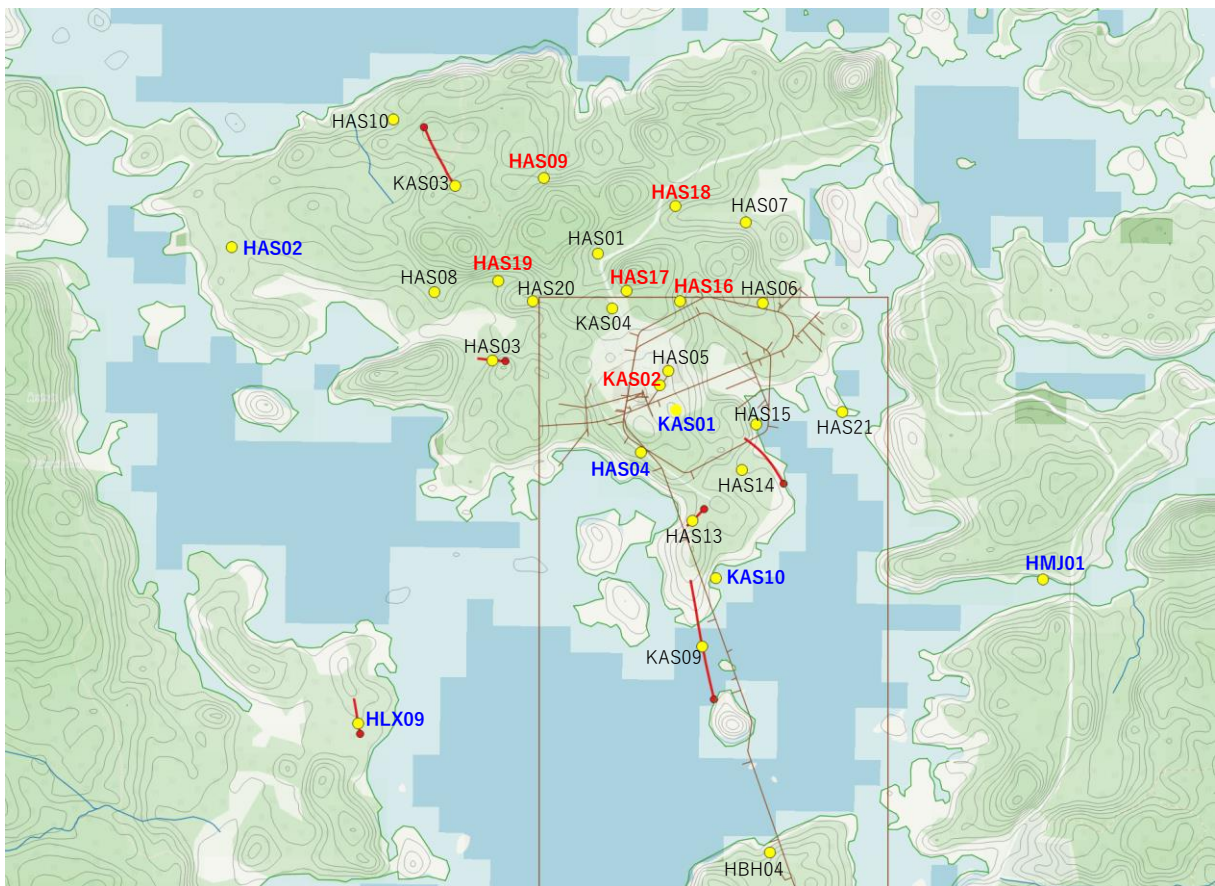
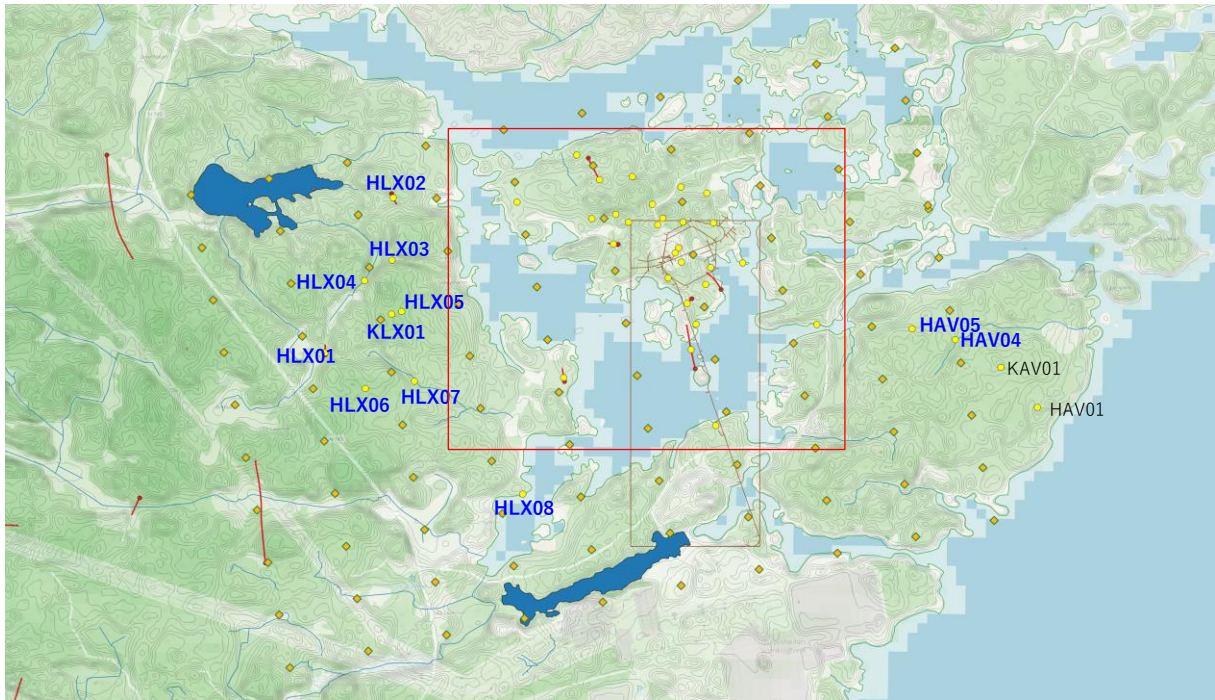


図 4-15 全水頭値の実測点位置  
 (赤字：実測値と解析値の差が大きな実測点，青字：差の小さな実測点)  
 (下図は上図の赤線で囲った領域を拡大した図)

## (2) 初期解析：地下研究施設モデルの不確実性に関する解析

エスポ地下岩盤研究所の坑道の配置，線形及び断面形状に関して不確実性はないが，グラウトによる改良効果及び改良幅については情報がなく，地下研究施設の数値モデル化における不確実性の要因となる。このため，表 4-7 に示すように地下研究施設のモデルの不確実性を考慮する解析ケースとして，水理地質構造モデルは表 4-6 に示した Case001-grt2 と同一とし，プレグラウトの改良期待値を変数とした解析を実施した。Case001-grt1 では，一般的なプレグラウトの改良基準値となる透水係数として  $1.0 \times 10^{-8}$  m/s を設定し，Case001-grt2 では，実効的なグラウトによる改良期待値  $1.0 \times 10^{-9}$  m/s を設定した（前項 (1) に同じ）。Case001 は，グラウトを全く施工していないという点が実際とは異なるが，上記 2 つの解析結果との比較対象として設定した。

表 4-7 地下研究施設のモデルの不確実性を考慮する解析ケース

解析ケース	HCD の設定値	改良期待値	備考
Case001	対数平均値	(グラウトなし)	Local DZ の透水係数は各ケースで共通の設定
Case001-grt1	対数平均値	$1.0 \times 10^{-8}$ m/s	同上
Case001-grt2	対数平均値	$1.0 \times 10^{-9}$ m/s	同上

地下研究施設のモデルに関する不確実性について，水圧測定値（全水頭）の実測値と解析値を比較したものを表 4-8 に示す。図 4-15 に示した実測点のうち青色と赤色で示した実測孔は表 4-8 の青と赤の網掛けにそれぞれ対応している。表の赤と白の境界は残差の二乗が 1 万，白と青の境界は残差の二乗が Case001 で 300，それ以外は 100 となる場合を表している。

表 4-8 実測値と解析値の全水頭値の比較

実測点	実測値	解析値			残差の二乗		
	Obs.1994	Case001	Case001_grt1	Case001_grt2	Case001	Case001_grt1	Case001_grt2
HAS01	-2.830	-195.439	-184.837	-180.870	37098.2	33126.5	31698.2
HAS02	-0.164	-4.338	-3.584	-3.364	17.4	11.7	10.2
HAS03	-1.123	-92.039	-87.145	-85.977	8265.7	7399.8	7200.2
HAS04	-40.461	-44.639	-39.968	-39.117	17.5	0.2	1.8
HAS05	-59.428	-101.036	-96.573	-95.149	1731.2	1379.8	1276.0
HAS06	-24.071	-91.338	-86.085	-83.856	4524.8	3845.7	3574.2
HAS07	-9.589	-81.609	-79.228	-77.925	5186.9	4849.6	4669.8
HAS08	-0.935	-78.182	-72.732	-71.178	5967.1	5154.8	4934.1
HAS09	0.975	-132.219	-126.253	-123.792	17740.6	16187.0	15566.8
HAS10	2.794	-16.277	-14.749	-14.167	363.7	307.8	287.7
HAS13	-11.724	-45.243	-28.832	-26.582	1123.5	292.7	220.8
HAS14	-8.798	-49.469	-34.462	-31.745	1654.1	658.6	526.6
HAS15	-5.859	-40.676	-31.404	-28.621	1212.2	652.5	518.1
HAS16	-32.516	-175.120	-165.326	-161.613	20335.9	17638.5	16666.0
HAS17	-41.674	-211.196	-199.452	-195.378	28737.7	24893.9	23624.9
HAS18	-12.022	-222.134	-209.248	-202.523	44147.1	38898.1	36290.6
HAS19	2.851	-110.545	-104.539	-102.714	12858.7	11532.6	11144.0
HAS20	-0.468	-124.623	-118.763	-117.148	15414.5	13993.7	13614.2
HAV04	3.842	6.677	6.721	6.738	8.0	8.3	8.4
HAV05	1.016	4.840	4.971	5.022	14.6	15.6	16.0
HBH04	-7.842	-42.956	-42.697	-42.596	1233.0	1214.9	1207.8
HLX01	6.895	9.825	9.837	9.840	8.6	8.7	8.7
HLX02	1.878	5.763	5.826	5.843	15.1	15.6	15.7
HLX03	7.305	8.110	8.173	8.190	0.6	0.8	0.8
HLX04	7.466	9.563	9.598	9.607	4.4	4.5	4.6
HLX05	13.914	13.614	13.662	13.673	0.1	0.1	0.1
HLX06	8.148	13.298	13.313	13.317	26.5	26.7	26.7
HLX07	6.222	9.826	9.874	9.884	13.0	13.3	13.4
HLX08	0.081	0.608	0.641	0.649	0.3	0.3	0.3
HLX09	-1.354	-6.049	-4.054	-3.632	22.0	7.3	5.2
HMJ01	-8.243	-0.486	-0.079	0.080	60.2	66.7	69.3
KAS01	-85.177	-100.810	-91.897	-89.716	244.4	45.2	20.6
KAS02	-31.530	-225.388	-188.125	-173.210	37580.9	24522.0	20073.2
KAS03	-6.140	-61.157	-57.703	-56.554	3026.9	2658.7	2541.6
KAS09	-13.420	-96.756	-55.564	-41.696	6944.9	1776.1	799.5
KAS10	-14.402	-40.842	-17.635	-15.859	699.1	10.5	2.1
KLX01	11.189	2.259	3.529	3.863	79.7	58.7	53.7

図 4-16 に全水頭の実測値と解析値の比較結果を示す。一般的には、グラウト施工後は湧水量が減って全水頭が上昇するが、解析結果ではその効果が小さく、グラウトの有無、改良期待値の違いが全水頭値の変化に寄与していない。このことは、坑道の周辺の岩盤の水利特性の設定やグラウトの施工範囲に関する情報の不確実性に起因する可能性がある。そこで、坑内湧水量とグラウト施工位置の関係について 4.5.2 項 (3) で検討した。

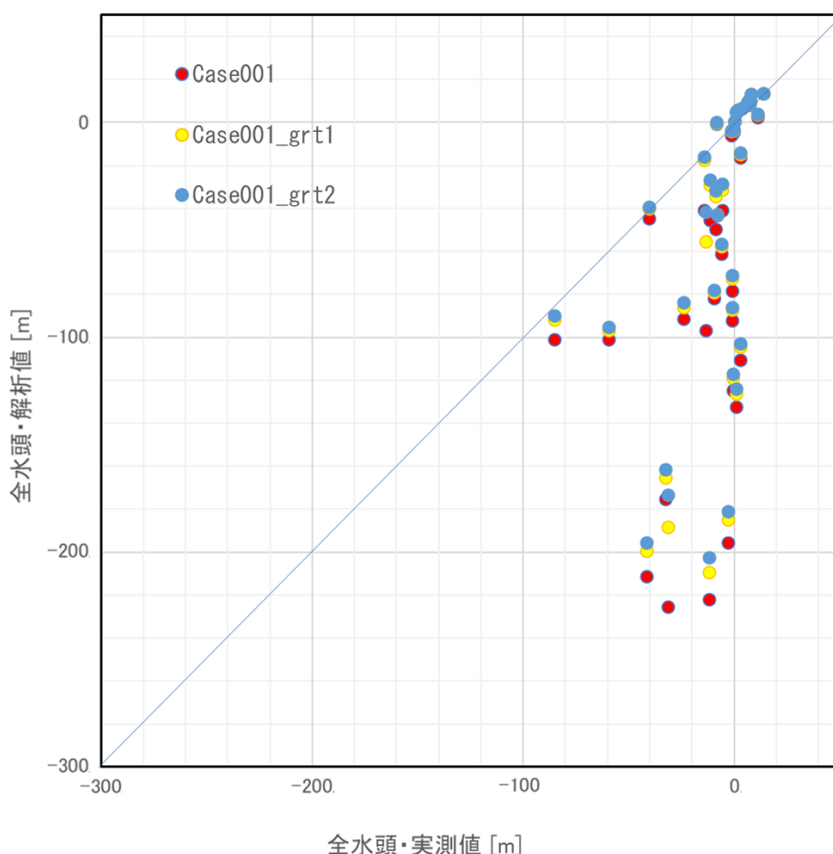


図 4-16 地下岩盤施設のモデルの不確実性に関する全水頭の実測値と解析値の比較

### (3) 湧水量とグラウト施工位置の比較

表 4-9 に示す初期解析ケースにおける湧水量の実測値と解析値を比較する。湧水量の解析値はほとんどの区間で実測値を大きく上回っているが、湧水量の相対的な傾向を区間ごとに比較すると実測値が多い区間は解析値も大きくなる傾向があり、概ね一致している。このことは主要な湧水箇所となる高透水性構造と坑道が交差する位置が適切に設定されていたことを支持する。また、湧水量の解析値の方が実測値よりも多いという傾向は、地下研究施設周辺の観測用ボーリング孔における全水頭の解析値が実測値を大きく下回るという傾向、すなわち湧水量が多いほど全水頭が低下するという一般的な傾向と整合している。

表 4-9 に示した結果のうち、一部は、グラウトの設定の前後で湧水量が、最大で 1/100 程度にまで減少しているが、青色に着色した行は、グラウトの施工によって坑内の湧水量が増えている。このことはグラウトの施工によって、局所的には湧水量が減る一方で水圧が上昇し、周囲の湧水量が増加したことを示唆している。

以上のように初期解析ケースでは、水圧実測値（全水頭）及び区間ごとの湧水量共に実測値と大きく異なる結果となったため、モデルの校正を実施して、再現性の向上に感度のある設定項目を抽出する。

表 4-9 初期解析ケースにおける湧水量の実測値と解析値の比較

単位：[L/min]

堰※	実測値	解析値 (Case001)	解析値 (Case001-grt1)	解析値 (Case001-grt2)
MA0682G	31.7	329.1	329.5	329.6
MA1033G	273.2	245.4	249.9	245.9
MA1232G	82.6	129.7	88.3	40.1
MA1372G	239.7	18932.3	122.2	33.4
MA1584G	52.5	2313.0	65.6	46.1
MA1745G	18.3	0.9	3.6	4.4
MA1883G	12.7			
MA2028G	14.7	1.7	129.7	395.2
MA2178G	20.0	3754.1	2626.0	3090.5
MA2357G	51.9	19960.9	19621.9	20851.6
MA2496G	1.8	98.4	129.1	135.9
MA2840G	22.1	520.8	688.8	766.7
MA2994G	76.0	1951.0	1994.6	2513.4
MA3179G	107.7	5916.2	6942.3	1060.9
MA3411G	67.4	101.5	88.6	81.6
MA3426G	29.6	1732.8	1548.4	1566.6
MA1659G	29.1	3.0	4.6	5.4
MA2587G	11.7	1.7	2.6	3.0
MA3384G	19.4	4.4	7.4	9.0
Total	1162.1	56314.0	34991.6	31552.3

(※堰の位置は付録4.内湧水量モニタリングデータを参照)

#### 4.5.3 水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルの校正と再解析

4.5.2 項までの検討により、初期解析ケースでは、坑内湧水量及び水圧実測値（全水頭）のいずれについても、解析値と実測値との間に大きな乖離が認められた。これらの乖離は、水理地質構造モデル自体の不確実性に加え、地下研究施設のモデル化、特にグラウト施工範囲及び改良効果に関する情報の不足に起因する可能性が示唆された。そこで、全水頭の再現性を主要な評価指標として、水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルの校正を行う。

##### (1) 校正方法

モデルの校正にあたっては、堰で観測される坑内湧水量が坑道壁面の吹付けコンクリートや坑内換気による蒸発散などの影響を受ける可能性があることから、直接的な校正指標とはせず、地下水

流動場全体の応答を反映する全水頭の分布を主な評価指標とした。特に、地下研究施設周辺における全水頭の解析値と実測値の乖離が顕著であったことから、モデルでグラウトを施工した範囲の設定が実際と異なっていた可能性が示唆される。この原因としては、グラウトの施工位置と施工範囲の情報の不確実性が挙げられる。特に後者に関しては、一般には規定量のグラウトを注入するか、湧水量が許容以下になるまでグラウトを施工するため、グラウトがどの程度の範囲まで浸透したかを調べることは容易ではなく、グラウト施工範囲だけでは不十分であった可能性がある。そこで、水理地質構造モデルの校正では、グラウトの施工範囲を変更することで、全水頭分布の再現性がどの程度改善されるかを確認する。

図 4-17 に初期解析ケース (Case002-grt2) において、トンネル境界条件を設定した坑道の各区間の岩盤区分と透水係数の設定値、プレグラウトの施工箇所を示す。岩盤区分は、背景として HRD, HCD, Local\_DZ として色分けして示している。このうち透水係数が高いのは Local DZ (黄色) 及び HCD (緑系色) で、HRD (青系色) は相対的に透水係数が小さい。プレグラウト施工区間は Grouted Segment (ピンク色)、プレグラウト未施工区間は Elemental K (白色) として表している。図 4-17 に示すように、グラウトは HCD や Local DZ のように高透水性の場所に実施されているが、すべての高透水性部がその対象となっていないことが分かる。高透水性の岩盤の一部にプレグラウトを施工すると、その隣の区間から湧水量が増加する可能性があり、実際には黄色い区間にもグラウトが浸透している可能性がある。また、実際には Local DZ の透水係数が解析の設定値よりも小さく、湧水量がなかったため、グラウトを実施しなかった可能性もある。そこで、グラウトの施工区間に着目して、水理地質構造モデルの構成を実施した。

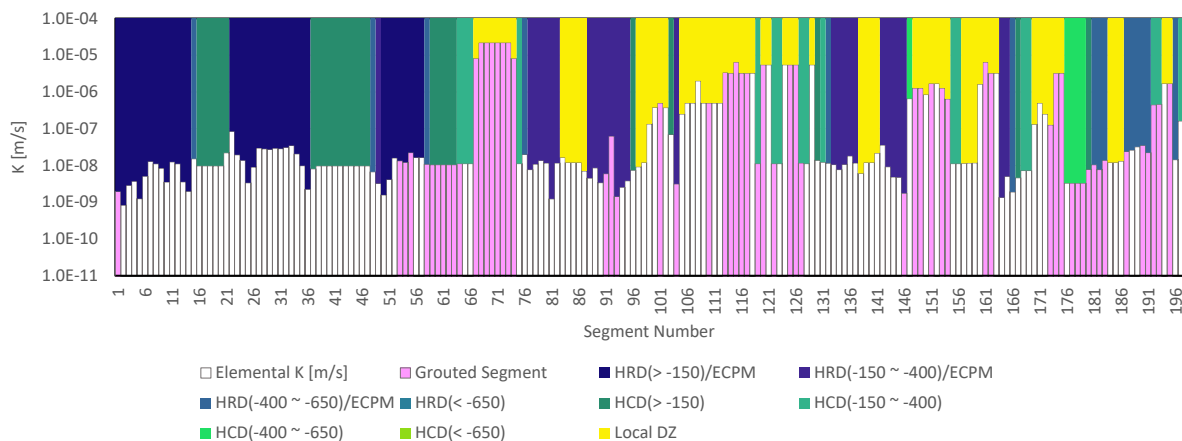


図 4-17 Case002-grt2 グラウト設定区間と透水係数の関係

グラウト区間を変更した解析ケースを表 4-10 に示す。HCD の透水係数が最も小さい 95%信頼区間の下限値で、グラウト施工範囲を初期解析ケースの位置とした Case002-grt2 をリファレンスとして、グラウトの施工範囲を変更した場合を解析ケースとして設定した。Case002-grt2-c01 においては、図 4-18 のグラウト区間に示すように Local DZ の領域は透水係数が高いため、すべての区間にグラウトが浸透するまで施工したことを想定して設定した。Case002-grt2-c02 においては、図 4-19 のグラウト区間に示すように Local DZ の近傍で透水係数が高い領域もグラウトが浸透するまで施工することを想定して透水係数が  $1.0 \times 10^{-8}$  m/s を超える区間に施工した。実際の施工においても、透水

係数が設定値を超える領域には、水理地質構造の岩盤区分によらずグラウトを施工すると考えられるので、この設定は妥当であると考えられる。

表 4-10 グラウト設定と解析ケース

解析ケース	HCD の透水係数	グラウト施工範囲	改良期待値
Case002-grt2	95%信頼区間の下限値	初期解析ケースの位置	$1.0 \times 10^{-9}$ m/s
Case002-grt2-c01	95%信頼区間の下限値	Local DZ の区間に施工 (図 4-18 参照)	$1.0 \times 10^{-9}$ m/s
Case002-grt2-c02	95%信頼区間の下限値	透水係数が $10^{-8}$ m/s を 超える区間に施工 (図 4-19 参照)	$1.0 \times 10^{-9}$ m/s



図 4-18 Case002-grt2-c01 のグラウト設定区間と透水係数の関係

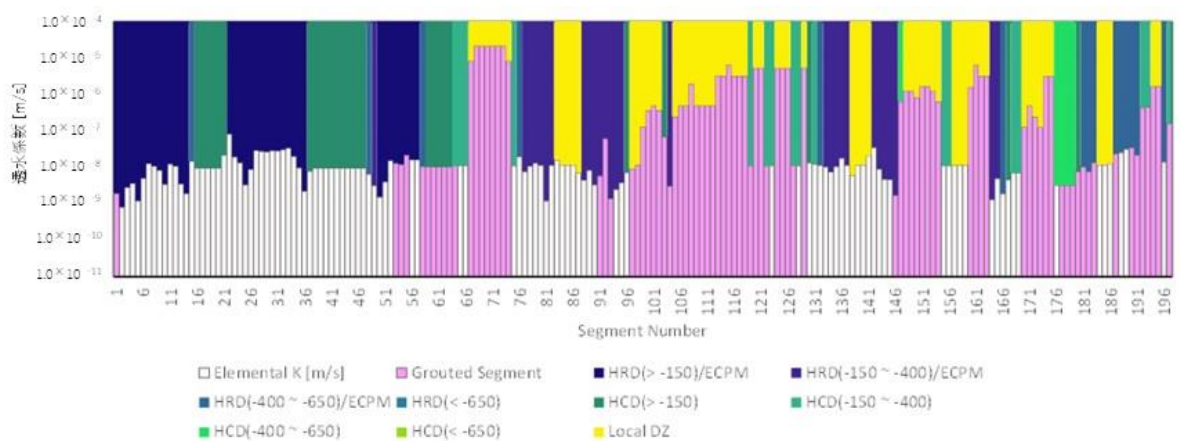


図 4-19 Case002-grt2-c02 のグラウト設定区間と透水係数の関係

## (2) 校正後の解析結果と考察

図 4-20 に校正した解析ケースの解析値と実測値の関係を示す。前述のように Case002-grt2 は、全水頭の解析値は実測値よりもかなり低い値であるが、校正後の解析では、透水係数が高い Local DZ の区間にグラウトによる透水係数の低下を設定したことで、全水頭の解析値と実測値がほぼ一致するまでに改善される。Local DZ の岩盤の区分に限らず透水係数が高い区間にプレグラウトを実施した場合にも、全水頭の実測値と解析値が近い値を取っている。

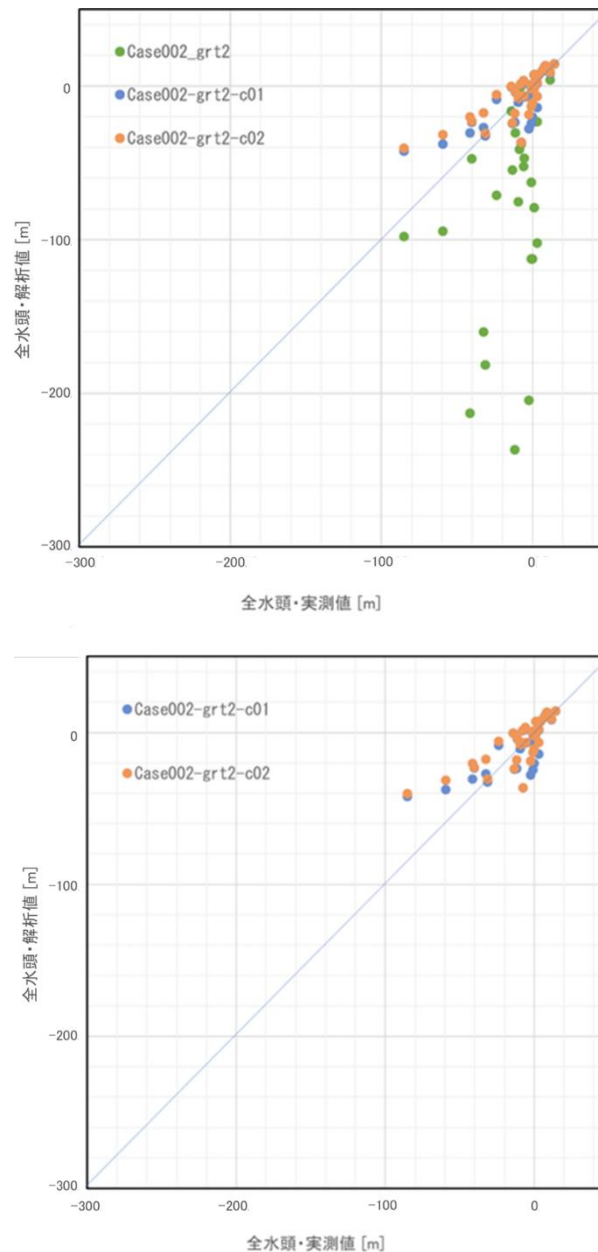


図 4-20 校正した解析ケースによる全水頭の解析値と実測値の比較  
(上図：構成前の解析ケースを含む，下図：校正後の解析ケースのみ)

校正後の解析ケースの坑内湧水量を実測値と比較した結果を表 4-11 に示す。全水頭の解析値が実測値よりも大きく下回った Case002-grt2 は坑内湧水量の解析値が実測値よりも多い傾向がある。

全水頭の解析値が実測値とほぼ同じであった，Case002-grt2-c01 と Case002-grt2-c02 では，総湧水量の解析値は実測値にかなり近い値となった。

図 4-21 に区間湧水量の実測値と解析値の関係を示す。上述のように総湧水量は近い値であったが，区間ごとに比較すると実測値とは異なっていた。このことは区間内にある透水性の高い構造及びグラウトによる改良効果のモデル化に関して不確実性があるためと考えられる。

表 4-11 解析結果の湧水量一覧

単位：[L/min]

堰	実測値	解析値 (Case002-grt2)	解析値 (Case002-grt2-c01)	解析値 (Case002-grt2-c02)
MA0682G	31.7	59.8	61.0	61.0
MA1033G	273.2	40.1	42.8	42.9
MA1232G	82.6	18.9	22.7	22.8
MA1372G	239.7	17.6	24.0	24.0
MA1584G	52.5	25.3	46.6	46.4
MA1745G	18.3	2.5	15.6	23.2
MA1883G	12.7	0.0	48.7	54.0
MA2028G	14.7	300.0	192.9	31.4
MA2178G	20.0	3057.4	24.0	24.2
MA2357G	51.9	20740.2	112.0	112.2
MA2496G	1.8	78.9	155.5	153.2
MA2840G	22.1	607.2	102.5	112.9
MA2994G	76.0	2342.4	30.6	156.8
MA3179G	107.7	1013.0	107.3	107.6
MA3411G	67.4	54.3	53.0	86.4
MA3426G	29.6	1494.5	493.7	97.4
MA1659G	29.1	4.8	21.6	21.4
MA2587G	11.7	2.7	12.5	12.4
MA3384G	19.4	7.9	32.7	31.1
Total	1162.1	29867.4	1599.6	1221.3

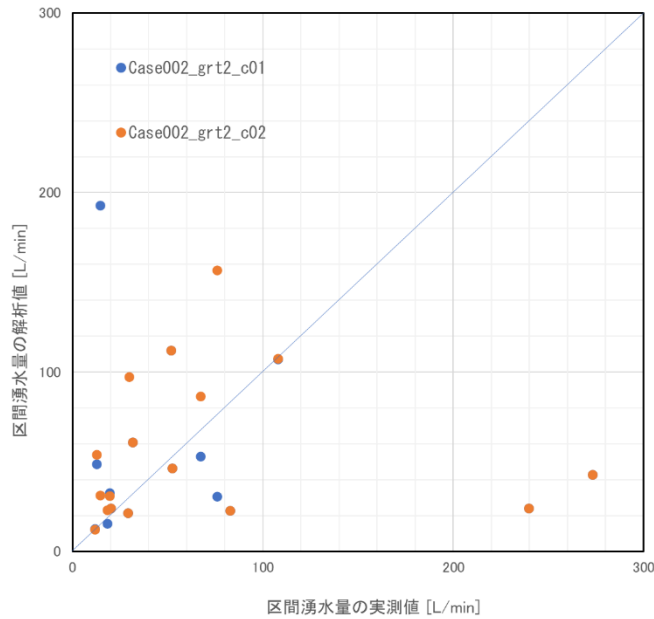


図 4-21 区間湧水量の解析値と実測値の関係

校正後の解析結果では、Local DZ を含む高透水性構造に対してグラウトによる透水係数の低下を設定することで、エスポ地下岩盤研究所周辺における全水頭の解析値が実測値と概ね一致する結果が得られた。このことから、同施設を対象とした坑内湧水量解析においては、高透水性構造の分布とその水理特性、及びそれらに対するグラウト施工範囲の設定が、地下水流動場の再現性に対して支配的な要因であることが示された。

一方で、区間湧水量に関しては、再現することはできなかった。総湧水量が概ね一致していたことから、地下構造全体でみた場合に、解析で設定した改良期待値が、実際のグラウト施工後の平均的な透水係数の値として妥当であったことが示唆される。区間湧水量が一致していないのは、本検討ではプレグラウトの詳細な情報がなく、解析における区間ごとのグラウトの改良範囲や改良の程度が、実際のグラウト施工結果を十分に再現できていないためと考えられる。加えて、尾上ほか(2016)が指摘するように、実際の坑道においては、プレグラウトだけでなく覆工コンクリートなどの人工構造物や坑道掘削に伴う影響により、坑道近傍の透水性が変化する「スキン効果」が生じることが知られている。本解析では、このようなスキン効果を含む局所的な水理特性の不均質性をモデルに十分に組み込めていないことも、区間湧水量の局所的な再現性を低下させた要因として考えられる。スキン効果の検討例については第 5 章に述べる。

### (3) 坑内湧水量の再現解析

全水頭の解析値と実測値の残差二乗和が最も小さかった Case002-grt2-c02 の水理地質構造モデルのデータセットを基に、地下研究施設の建設・操業工程を再現して、非定常解析を実施した。操業工程を再現するためには坑道ごとにその位置、長さ、坑道内圧力水頭の経時変化、坑道半径の経時変化をファイルに時系列の形で記述し、HGS に入力する。坑道の掘削状況は坑道内の圧力水頭と坑道半径で設定する。これらが負の値の時点では、その坑道はまだ掘削されていないことを表す。HGS はトンネル境界条件法を用いて坑道内圧力水頭と岩盤の圧力水頭の差で岩盤中の水が坑道に湧出する量を算出する。図 4-22 に、坑内湧水量の実測値と計測値の経時変化の比較結果を示す。解析値は

1990年10月から1994年9月までの地下坑道の建設に伴う総湧水量の増加傾向を概ね再現できている。1994年以降については、非定常解析ではその後の試験坑道の建設や坑道内での調査・試験を考慮していないため、実測値に見られる短期的な増減ではなく平均的な湧水量に着目すると、解析値は概ね再現できている。

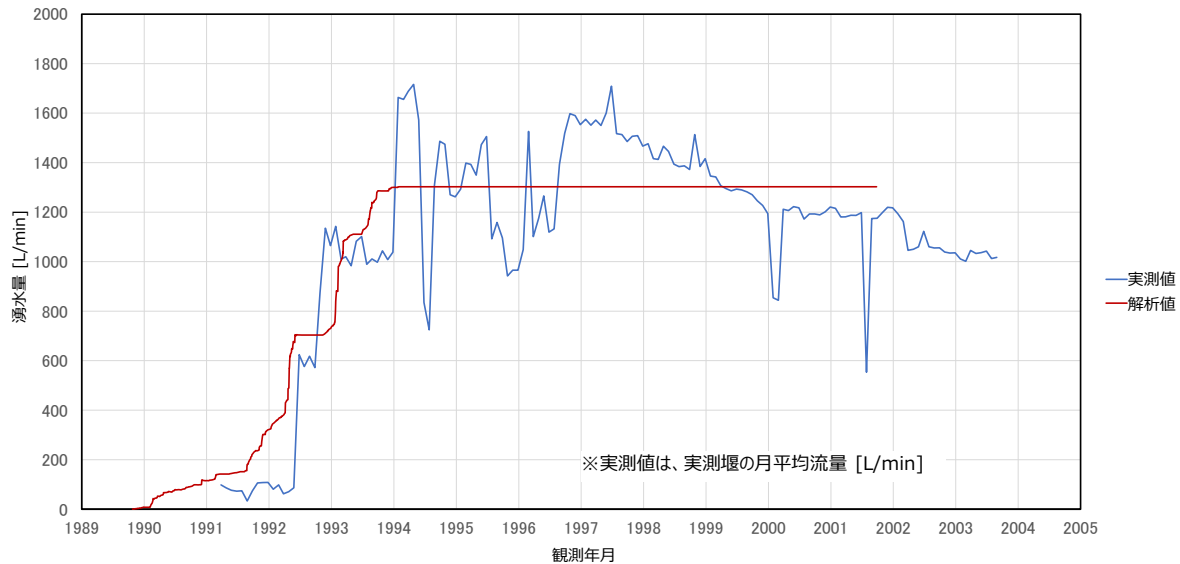


図 4-22 総湧水量の経時変化

#### 4.6 第4章のまとめ

第4章では、エスポ地下岩盤研究所を対象として、施設の建設及び操業期間において取得された水圧測定値（全水頭）及び坑内湧水量の実測データを用い、HGSによる坑内湧水量解析・評価技術の妥当性確認を実施した。その結果、全水頭分布の再現性を重視した段階的なモデル校正を行うことで、地下施設の建設に伴う総湧水量及び地下水位低下量の空間的広がりについて、実測値と整合的な解析結果が得られることを確認した。

一方で、区間湧水量の再現に関しては、グラウト施工位置や改良効果・範囲に関する詳細情報の不足に加え、覆工コンクリートや掘削影響などに起因する坑道近傍の水理特性変化（スキン効果）が十分に考慮されていないことが、主要な不確実性要因となることが示唆された。

以上より、HGSを用いた坑内湧水量解析・評価技術は、高透水性構造及びその改良条件を適切にモデル化することを前提として、地下施設建設に伴う水理的影響を概括的に評価する手法として妥当であることが示された。さらに、局所的な湧水挙動の評価の確からしさを向上させるためには、スキン効果を含めた坑道近傍の局所的な不均質性を適切にモデルに組み込むことが重要であることが示唆された。

## 第5章 瑞浪超深地層研究所を対象とした数値解析

第5章では、坑内湧水量解析・評価技術及び坑内湧水に伴う地下水位変化解析・評価技術について、被覆堆積層を有する結晶質岩類に設置された国内の地下研究施設である瑞浪超深地層研究所を対象として、これら解析技術の妥当性確認（Validation）を実施する。本検討では、エスポ地下岩盤研究所周辺の結晶質岩盤と比較して、一般に水理学的な不均質性が高く地表付近に被覆堆積層を有するわが国特有の地質環境条件下において、地下研究施設の建設・操業過程で取得された実測データを用い、HGSによる解析結果と実測値との比較を行う。本章における検討を通じて、より複雑な水理地質構造に対するHGSの適用性及び実用性を評価する。

### 5.1 瑞浪超深地層研究所の概要

瑞浪超深地層研究所は、岐阜県瑞浪市において地下500mまで掘削された研究所である。JAEAが運営し、地表からの2本の立坑（主立坑、換気立坑）とそれらを結ぶ深度100mごとの予備ステージ及び深度200m、300m、400m、500mで展開される水平坑道により構成される。この研究所は、結晶質岩を対象に、地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究の一環として、深部地質環境の調査・解析・評価技術及び深地層における工学技術の基盤の整備を目的として1996年に開設され、所期の目標を達成したことから2022年1月に坑道の埋戻し及び地上施設の撤去が完了している。

### 5.2 解析方法

瑞浪超深地層研究所を対象とした地下水流動解析の手順は、第4章（4.2節）で示したエスポ地下岩盤研究所を対象とした場合と基本的には同様である。まず、施設建設前の地下水流動状態を再現するベースライン解析（定常解析）を実施し、その結果を初期条件として、施設の建設過程を考慮した坑内湧水量解析（非定常解析）を実施する。続いて、得られた解析値と実測値の比較に基づき、水理地質構造モデルや地下研究施設モデルの校正及び再解析を繰り返し、両者の整合性を確認する。

### 5.3 水理地質構造モデルの構築

水理地質構造モデルの構築 瑞浪超深地層研究所の周辺は主に白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）及びそれを覆う堆積岩類で構成されており、複雑な地質構造に伴う水理学的な不均質性を有している。同研究所周辺の水理地質構造モデルは、第4章と同様に、広域スケールとサイトスケールの2段階に分けて構築した。

#### 5.3.1 広域スケール

広域スケールの水理地質構造モデルは、瑞浪超深地層研究所周辺における広域的な地下水流動場を把握し、サイトスケールの地下水流動解析に対して適切な境界条件を与えることを目的として構築した。同研究所の周辺は、白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）が広く分布している。この花崗岩を基盤として、新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）と固結度の低い新第三紀中新世～鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が分布する（図5-1）。土岐花崗岩は、低角度の割れ目の密度が有意に高い岩盤領域である上部割れ目帯（Upper Highly Fractured Domain：以下、「UHFD」という）と下部の割れ目の分布密度が低い岩盤領域である下部割れ目帯（Lower Sparsely Fractured Domain：以下、「LSFD」という）に区分される。また、上部割れ目帯中には、低角度傾斜の割れ目が集中する岩盤領域である低角度

割れ目集中帯（Low Angle Fractured Zone：以下、「LAFZ」という）が分布する。研究所内及びその周辺には、研究用地内に掘削された主立坑沿いに分布する断層（以下、主立坑断層）をはじめとする複数の断層の存在が確認及び推定されている。

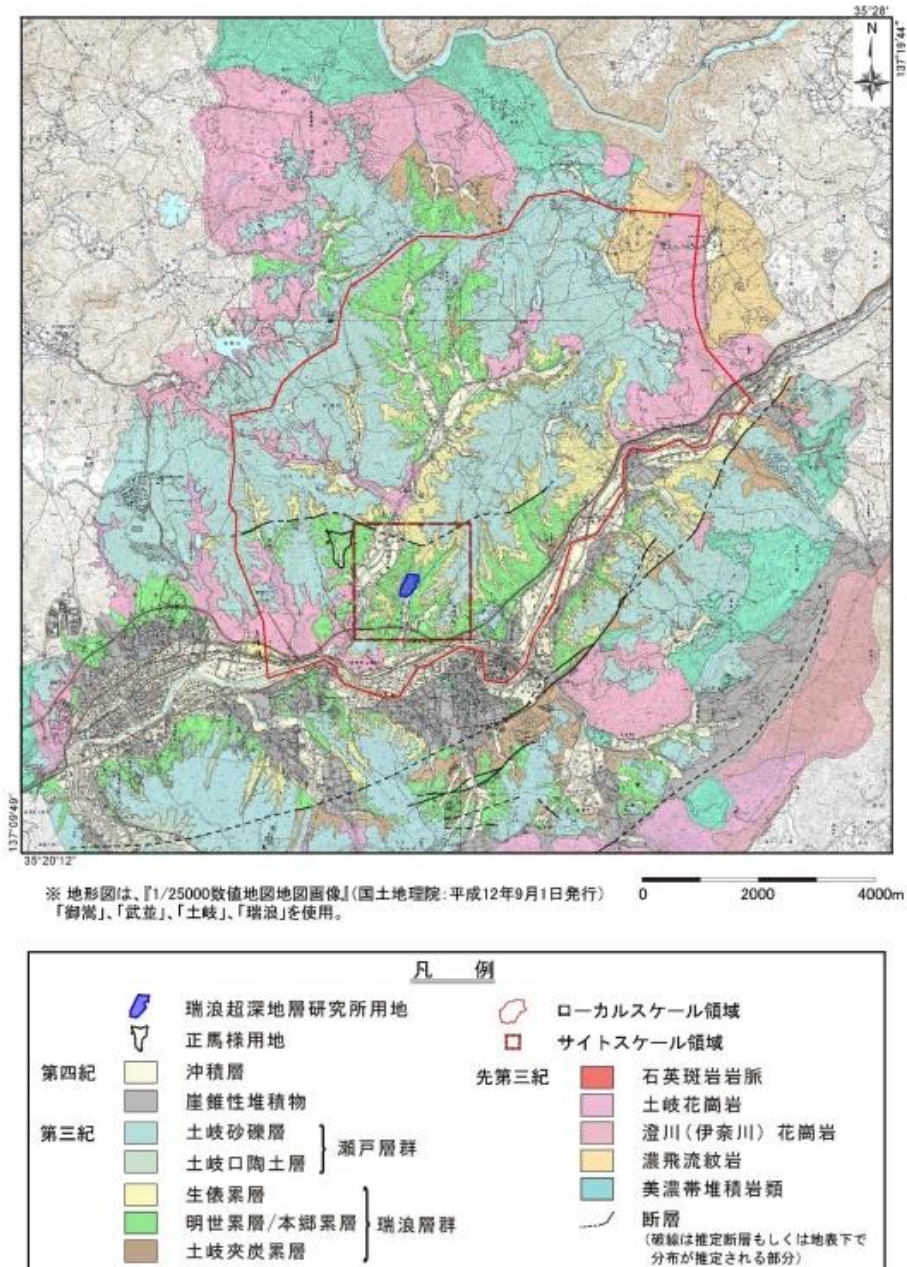


図 5-1 瑞浪超深地層研究所周辺の地質概要  
(野原ほか, 2016)

### (1) 三次元メッシュの作成

水理地質構造モデル（広域スケール）の対象領域は、図 5-1 に示す瑞浪超深地層研究所周辺の地質概要内に示されている赤実線の「広域スケール領域」とし、本領域の底面は標高-2,000m とする。これらは、尾上ほか（2016）で示される既存の広域スケールモデルと同様の領域設定である。表 5-1 に水理地質構造モデル（広域スケール）の領域サイズと空間分割サイズを示す。空間分割サイズは、

水平方向は一律 50 m とした。一方、鉛直方向に関しては、表 5-1 に示すように深度により数種類のサイズを最小 5 m から最大 200 m の範囲で設定した。ここでは、表 5-1 に示す広域スケール領域を包含する矩形範囲を領域の底面の標高-2,000 m から、鉛直方向の空間分割サイズと分割数で押し出し、三次元メッシュを作成する。押し出しにより作成される要素は六面体要素である。なお、表 5-1 に示す深度は地表からの深度であり、尾上、竹内 (2020) の地形データにより設定する。矩形モデルは、3次元地質モデリング・メッシュ生成ソフトウェアである Geo-Graphia (地層科学研究所) を用いて、図 5-2 に示す広域スケールの領域形状となるように抽出した。

表 5-1 水理地質構造モデル (広域スケール) 領域及び空間分割サイズ

設定項目	水理地質構造モデル (広域スケール) の設定			
領域サイズ	図 5-2 に示す広域スケール領域の範囲 ; 底面の標高 -2,000 m 広域スケール領域を包含する矩形範囲は 9.1×9.6 km, 包含範囲の左下座標 (3,228.6001, -71,150.8984) 座標系 : 世界測地系 (7 系)			
空間分割サイズ	水平方向	東西方向の空間分割サイズ : 50 m, 分割数 : 182 南北方向の空間分割サイズ : 50 m, 分割数 : 192		
	鉛直方向	深度の範囲	空間分割サイズ	分割数
		深度 0 m ~ 深度 -20 m	5 m	4 層
		深度 -20 m ~ 深度 -200 m	10 m	18 層
		深度 -200 m ~ 深度 -500 m	20 m	15 層
		深度 -500 m ~ 深度 -1,000 m	50 m	10 層
		深度 -1,000 m ~ 標高 -1,600 m	100 m <sup>*</sup>	6 層
標高 -1,600 m ~ 標高 -2,000 m	200 m	2 層		

※ 深度 - 標高の組み合わせのため、地形なりの空間分割サイズとなり、目安は 100 m 程度。

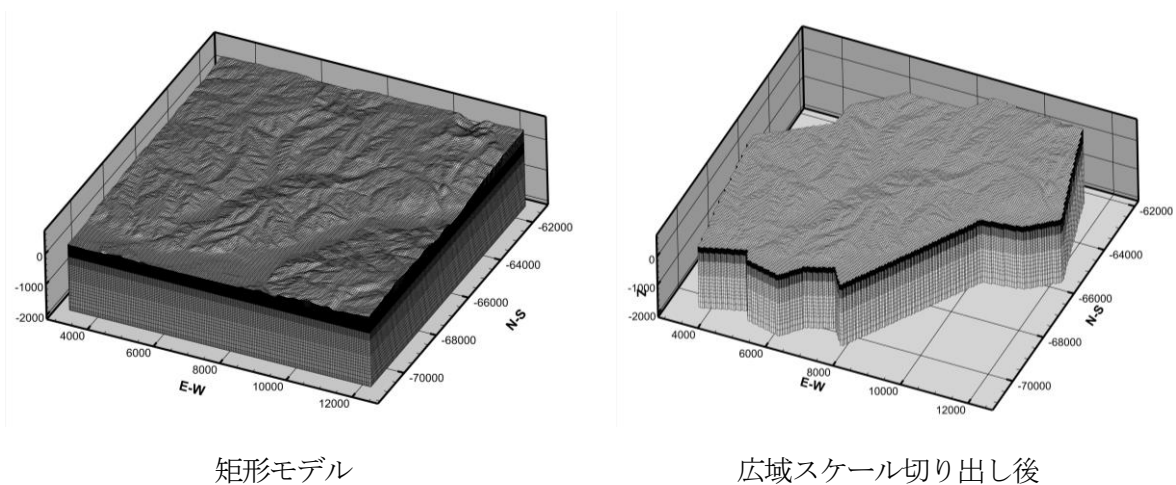


図 5-2 三次元メッシュモデル

## (2) 水理地質区分及び水理特性の設定

三次元メッシュモデルに割り当てる広域スケールの水理地質区分は、図 5-1 に示すように、尾上ほか (2016) 及び尾上、竹内 (2020) を参考に 16 区分とした。堆積岩は、瀬戸層群と瑞浪層群、土岐花崗岩は、上部割れ目帯 (UHFD) と下部割れ目低密度帯 (LSFD) に区分した。材料番号 3 の泥岩層は、既往研究によって堆積岩中の水圧分布の段差を再現する上で必要なキャップ構造であることが示されているため (尾上ほか, 2016), 水理地質区分に加えた。断層に関しては月吉断層の主要部と周辺の割れ目帯, そのほかの断層に区分している。図 5-3 は三次元メッシュに水理地質区分を割り当てた広域スケールの水理地質構造モデルであり、尾上、竹内 (2020) の境界面データを使用して三次元メッシュの要素に表 5-2 に示す 1~16 の材料番号を割り当てた。

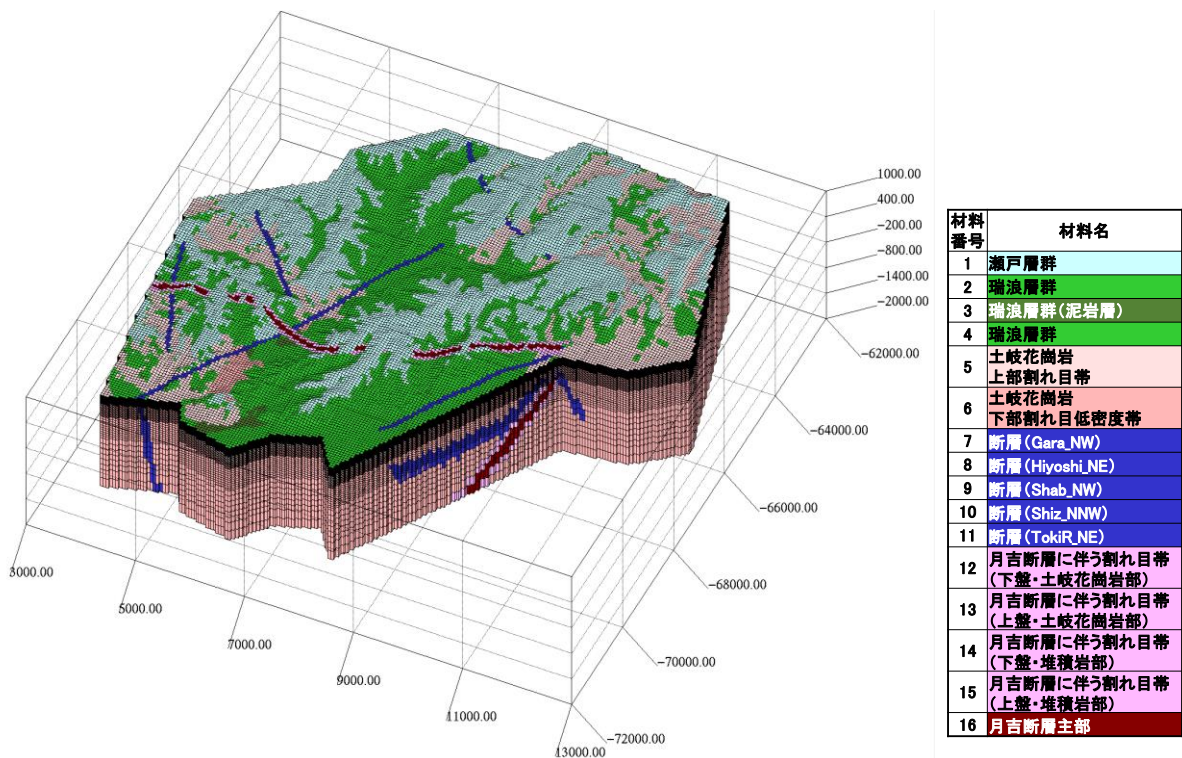


図 5-3 広域スケール水理地質構造モデル

表 5-2 に示す水理特性は、付録 5 を基に設定した。断層に関しては、異方性を考慮し断層のモデル化の幅と断層の走向・傾斜から算出した透水テンソルの主成分 (異方性ありの断層) から算出した。

表 5-2 広域スケールの水理地質区分と水理特性

材料 番号	地質区分		透水係数			比貯留係数 [1/m]	有効間隙率 [-]	
			[m/s]					
			水平方向		鉛直方向	Ss	Po	
Kxx	Kyy	Kzz						
1	瀬戸層群		$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$7.9 \times 10^{-5}$	0.20	
2	瑞浪層群	瑞浪層群	$1.6 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-5}$	0.20	
3		瑞浪層群 (泥岩層)	$1.0 \times 10^{-11}$	$1.0 \times 10^{-11}$	$1.0 \times 10^{-11}$	$7.9 \times 10^{-5}$	0.20	
4		瑞浪層群	$1.6 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-5}$	0.20	
5	土岐花崗岩	上部割れ目帯	$3.2 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-6}$	0.01	
6		下部割れ目低密度帯	$2.0 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-6}$	0.01	
7	月吉断層以外の 断層	GARA_NW	$3.1 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^{-7}$	$6.2 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-7}$	周辺岩盤と同じ 有効間隙率を設定	
8		HIYOSHI_NE	$1.7 \times 10^{-7}$	$4.7 \times 10^{-7}$	$6.2 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-7}$		
9		SHAB_NW	$3.4 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-7}$	$6.3 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-7}$		
10		SHIZ_NNW	$9.8 \times 10^{-8}$	$5.7 \times 10^{-7}$	$5.9 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-7}$		
11		TOKIR_NE	$6.3 \times 10^{-7}$	$6.3 \times 10^{-7}$	$6.3 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-7}$		
12	月吉断層に伴う 割れ目帯	花崗岩部	下盤側	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6}$		$3.2 \times 10^{-7}$
13			上盤側	$5.3 \times 10^{-7}$	$5.3 \times 10^{-7}$	$5.3 \times 10^{-7}$		$3.2 \times 10^{-7}$
14		堆積岩部	下盤側	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6}$		$3.2 \times 10^{-7}$
15			上盤側	$5.3 \times 10^{-7}$	$5.3 \times 10^{-7}$	$5.3 \times 10^{-7}$		$3.2 \times 10^{-7}$
16	月吉断層主要部		$1.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-9}$	$3.2 \times 10^{-7}$		

黒字：尾上ほか（2016），尾上ほか（2015）を参照

橙字：断層のモデル化の幅と断層の走向・傾斜から算出した透水テンソルの主成分（異方性ありの断層）

### 5.3.2 サイトスケール

サイトスケールの水理地質構造モデルは、瑞浪超深地層研究所周辺における坑道近傍の地下水流動及び坑内湧水挙動を再現することを目的として構築した。三次元水理地質構造モデルは、同研究所周辺の基盤である土岐花崗岩に対して、割れ目の分布に伴う水理学的不均質性を考慮した等価な水理特性を有する連続体モデルとして構築する。そのため、土岐花崗岩中の割れ目の幾何学特性及び水理特性に関する統計量を用いた確率論的なアプローチによる DFN モデル（割れ目ネットワークモデル）を構築した。構築にあたっては、三枝ほか（2015）に示された地表からの調査及び研究坑道内での調査結果に基づいて求められた統計量を参照した。

#### (1) 三次元メッシュの作成

サイトスケールにおける水理地質構造モデルの対象領域は、図 5-1 に示されている赤四角枠と、その外側を幅 100 m で囲む重複区間を加えた領域として設定した。領域及び空間分割のサイズを表 5-3 に示す。重複区間は、TMR 法においてサイトスケールと広域スケールの空間分割サイズの違いによる影響を緩衝するための区間である。対象領域の底面は広域スケールと同様に標高-2,000 m とする。水理地質構造モデル（サイトスケール）の空間分割サイズは、地下研究施設のモデル化において適用するトンネル境界条件により定まる分割サイズ<sup>1</sup>とする。水平方向の分割サイズは、一律 25 m とし、鉛直方向の分割サイズは、表層から深度 20 m までを 5 m、深度 20 m から地下研究施設モデル化範囲を包括する深度 600 m までを 10 m とし、それより以深は 20~100 m の範囲で、深度が大きくなるにつれ空間分割サイズを大きく設定した。

表 5-3 水理地質構造モデル（サイトスケール）領域及び空間分割サイズ

設定項目	水理地質構造モデル（サイトスケール）の設定			
領域サイズ	図 5-4 に示すサイトスケール領域の範囲：平面領域 2.0×2.0 km （TMR 法における広域スケールモデルとの重複区間として上記領域の外側に 50～100 m の区間を設ける） 底面の標高-2,000 m 左下座標（5,378.6001, -69,800.8984） 座標系：世界測地系（7系）			
空間分割サイズ	水平方向	東西方向の空間分割サイズ：25 m，分割数：80 南北方向の空間分割サイズ：25 m，分割数：80		
	鉛直方向	深度の範囲	空間分割サイズ	分割数
		深度 0 m ～ 深度 -20 m	5 m	4 層
		深度 -20 m ～ 深度 -600 m	10 m	58 層
		深度 -600 m ～ 深度 -1000 m	20 m	20 層
		深度 -1000 m ～ 深度 -1,600 m	50 m <sup>*</sup>	12 層
深度 -1,600 m ～ 標高 -2,000 m	100 m	4 層		

<sup>\*</sup> 深度 - 標高の組み合わせのため、地形なりの空間分割サイズとなり、目安は 50 m 程度。

<sup>1</sup> HGS のトンネル境界条件では、条件を設定するメッシュの分割サイズをモデル化するトンネル坑道半径の 5 倍以上とする必要がある。水平方向の空間分割サイズは換気立坑の半径（2.25m）及び主立坑の半径（3.65 m）の 5 倍以上、かつ広域スケールモデルのメッシュサイズ 50 m の公約数である必要があり 25 m と設定。鉛直方向は研究アクセス坑道の坑道断面（半径 2 m 程度）より、10 m 以上と設定した。

## (2) 水理地質区分の水理特性の設定

三次元メッシュモデルに割り当てるサイトスケールの水理地質区分は、表 5-4 に示すように、尾上ほか (2016) 及び尾上, 竹内 (2020) を参考に 29 区分とした。堆積岩は、瀬戸層群と瑞浪層群 (7 層), 土岐花崗岩は、UHFD, LAFD, LSFD に区分した。断層に関しては月吉断層の主要部と周辺の割れ目帯, 主立坑断層とその他の断層に区分した。広域スケールの水理地質構造モデルと同様に尾上, 竹内 (2020) の境界面データを使用して三次元メッシュの要素に、表 5-4 に示す 1 ~29 の材料番号を割り当てた。図 5-4 は三次元メッシュに水理地質区分を割り当てたサイトスケールの水理地質構造モデルであり、主立坑を通る断面を示している。

表 5-4 に示す水理特性は、付録 5 を基に設定した。断層に関しては、異方性を考慮し断層のモデル化の幅と断層の走向・傾斜から算出した透水テンソルの主成分 (異方性ありの断層) から算出した。

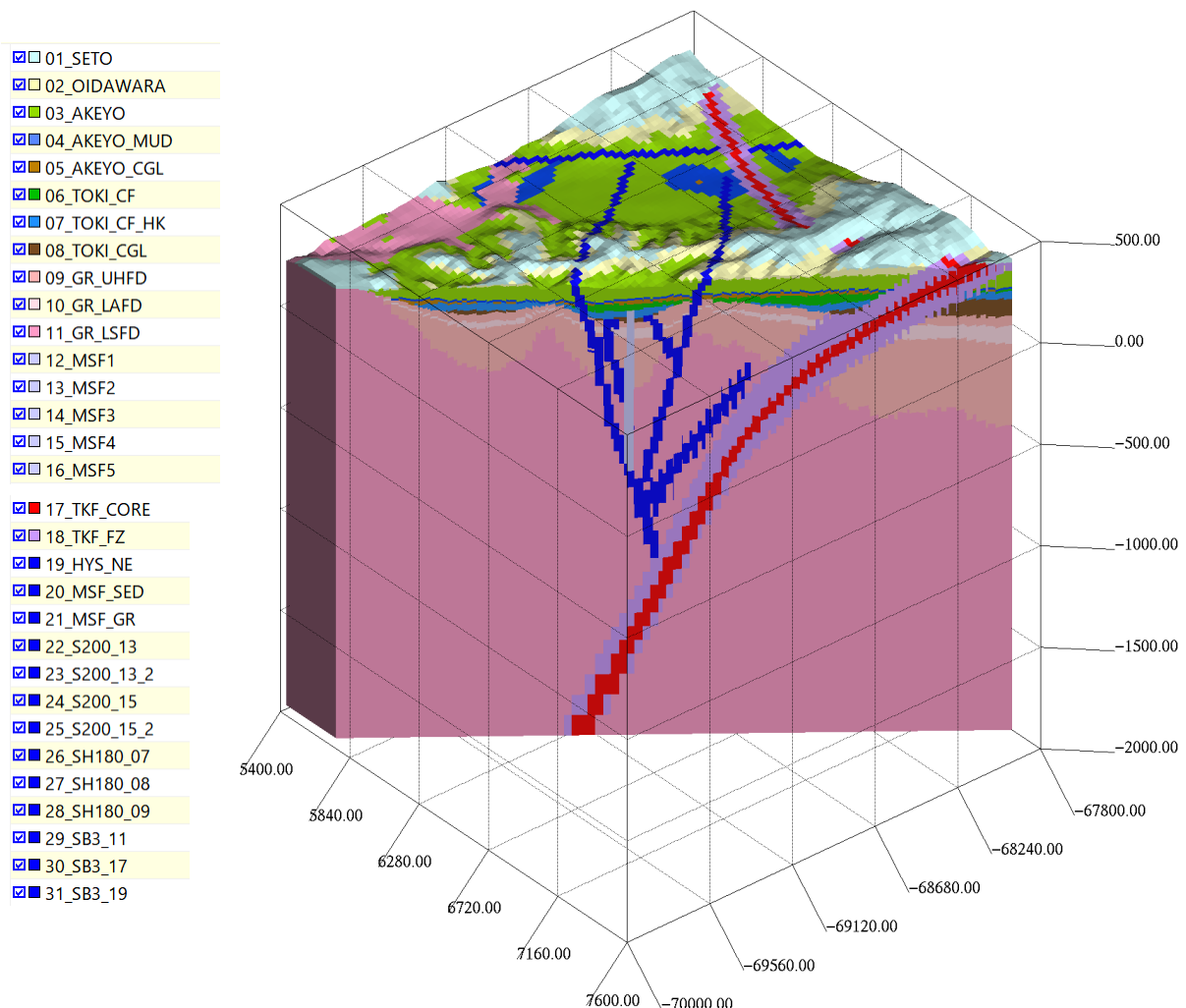


図 5-4 サイトスケール水理地質構造モデル

表 5-4 サイトスケールの水理地質区分と水理特性

材料 番号	地質区分 (サイトスケール)		透水係数 [m/s]			比貯留係数 [1/m]	有効間隙率 [-]
			水平方向		鉛直方向		
			Kxx	Kyy	Kzz		
1	瀬戸層群		1.0×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	7.9×10 <sup>-5</sup>	0.20
2	瑞浪層群	生俣累層	3.2×10 <sup>-9</sup>	3.2×10 <sup>-9</sup>	3.2×10 <sup>-11</sup>	7.9×10 <sup>-5</sup>	0.20
3		明世累層/本郷累層 (本体)	2.5×10 <sup>-8</sup>	2.5×10 <sup>-8</sup>	2.5×10 <sup>-10</sup>	7.9×10 <sup>-5</sup>	0.20
4		明世累層/本郷累層 (泥岩)	1.0×10 <sup>-11</sup>	1.0×10 <sup>-11</sup>	1.0×10 <sup>-11</sup>	7.9×10 <sup>-5</sup>	0.20
5		明世累層/本郷累層 (基底礫)	5.0×10 <sup>-7</sup>	5.0×10 <sup>-7</sup>	5.0×10 <sup>-7</sup>	7.9×10 <sup>-5</sup>	0.20
6		土岐夾炭累層 (本体)	2.5×10 <sup>-7</sup>	2.5×10 <sup>-7</sup>	2.5×10 <sup>-9</sup>	2.5×10 <sup>-5</sup>	0.20
7		土岐夾炭累層 (高透水層)	1.0×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	2.5×10 <sup>-5</sup>	0.20
8		土岐夾炭累層 (基底礫)	5.0×10 <sup>-6</sup>	5.0×10 <sup>-6</sup>	5.0×10 <sup>-6</sup>	7.9×10 <sup>-6</sup>	0.20
9		土岐花崗岩	上部割れ目帯	3.2×10 <sup>-8</sup>	3.2×10 <sup>-8</sup>	1.6×10 <sup>-7</sup>	4.0×10 <sup>-6</sup>
10	上部割れ目帯中の低角度割れ目集中帯		1.0×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	4.0×10 <sup>-7</sup>	0.01
11	下部割れ目低密度帯		2.0×10 <sup>-8</sup>	2.0×10 <sup>-8</sup>	2.0×10 <sup>-7</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	0.01
12	主立坑断層 (低透水性領域)	土岐夾炭累層 (高透水層)	1.0×10 <sup>-7</sup>	1.0×10 <sup>-7</sup>	1.0×10 <sup>-7</sup>	2.5×10 <sup>-5</sup>	0.20
13		土岐夾炭累層 (基底礫)	1.3×10 <sup>-6</sup>	1.3×10 <sup>-6</sup>	1.3×10 <sup>-6</sup>	7.9×10 <sup>-6</sup>	0.20
14		上部割れ目帯	1.0×10 <sup>-9</sup>	1.0×10 <sup>-9</sup>	1.0×10 <sup>-9</sup>	2.0×10 <sup>-6</sup>	0.01
15		上部割れ目帯中の低角度割れ目集中帯	1.0×10 <sup>-7</sup>	1.0×10 <sup>-7</sup>	1.0×10 <sup>-7</sup>	4.0×10 <sup>-7</sup>	0.01
16		下部割れ目低密度帯	1.0×10 <sup>-9</sup>	1.0×10 <sup>-9</sup>	1.0×10 <sup>-9</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>	0.01
17	月吉断層	月吉断層主要部	1.4×10 <sup>-12</sup>	2.0×10 <sup>-10</sup>	4.7×10 <sup>-11</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	周辺岩盤と同じ 間隙率を設定
18		月吉断層に伴う割れ目帯	5.3×10 <sup>-7</sup>	3.4×10 <sup>-7</sup>	4.9×10 <sup>-7</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
19	その他の断層	Hiyoshi_NE	7.6×10 <sup>-7</sup>	1.8×10 <sup>-6</sup>	2.5×10 <sup>-6</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
20		IF_S200_13	1.5×10 <sup>-10</sup>	9.9×10 <sup>-11</sup>	2.7×10 <sup>-11</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
21		IF_S200_13_2	2.2×10 <sup>-5</sup>	8.6×10 <sup>-6</sup>	8.9×10 <sup>-7</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
22		IF_S200_15	2.2×10 <sup>-10</sup>	1.9×10 <sup>-10</sup>	1.6×10 <sup>-10</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
23		IF_S200_15_2	9.8×10 <sup>-5</sup>	4.9×10 <sup>-5</sup>	1.2×10 <sup>-5</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
24		IF_SH180_07	8.6×10 <sup>-6</sup>	1.8×10 <sup>-4</sup>	1.5×10 <sup>-5</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
25		IF_SH180_08	1.2×10 <sup>-6</sup>	8.8×10 <sup>-6</sup>	2.5×10 <sup>-6</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
26		IF_SH180_09	4.6×10 <sup>-7</sup>	2.1×10 <sup>-5</sup>	3.2×10 <sup>-6</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
27		IF_SB3_11	1.7×10 <sup>-6</sup>	6.1×10 <sup>-7</sup>	1.7×10 <sup>-6</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
28		IF_SB3_17	3.7×10 <sup>-5</sup>	2.0×10 <sup>-6</sup>	8.3×10 <sup>-7</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	
29		IF_SB3_19	2.1×10 <sup>-7</sup>	6.0×10 <sup>-8</sup>	2.3×10 <sup>-7</sup>	3.2×10 <sup>-7</sup>	

黒字：尾上ほか (2016), 尾上ほか (2015) を参照

橙字：断層のモデル化の幅と断層の走向・傾斜から算出した透水テンソルの主成分 (異方性ありの断層)

## 5.4 地下研究施設のモデル

本節では、瑞浪超深地層研究所の坑道群を数値解析モデルに取り込み、坑内湧水量を算定するための地下研究施設モデルの構築方法について示す。地下研究施設モデルは、水理地質構造モデルと結合することにより、坑道掘削に伴う地下水の流入を境界条件として表現することを目的としている。

### 5.4.1 地下研究施設の形状

瑞浪超深地層研究所を構成する坑道群の形状は、尾上、竹内（2020）の地下研究施設の三次元形状データ及び付録 5 に示す CAD データから取得した坑道線形の座標値に基づき設定した。地下研究施設モデルは、第 4 章と同様に、HGS の機能であるトンネル境界条件を適用して構築した。また、建設・操業工程に伴う湧水や地下水圧の変化を再現するため、JAEA（2022）をもとに作成した建設工程データを解析モデルに反映した。

### 5.4.2 グラウト区間及びスキン効果の設定

坑道周辺の水理特性などの再現性を向上させる観点から、坑道にグラウト区間の設定を行った。図 5-5 に瑞浪超深地層研究所の研究坑道レイアウト並びにプレグラウチング及びポストグラウチングの実施箇所を示す。また、表 5-5 と表 5-6 にそれぞれのグラウチングの概要（改良区間及び注入材料など）を示す。

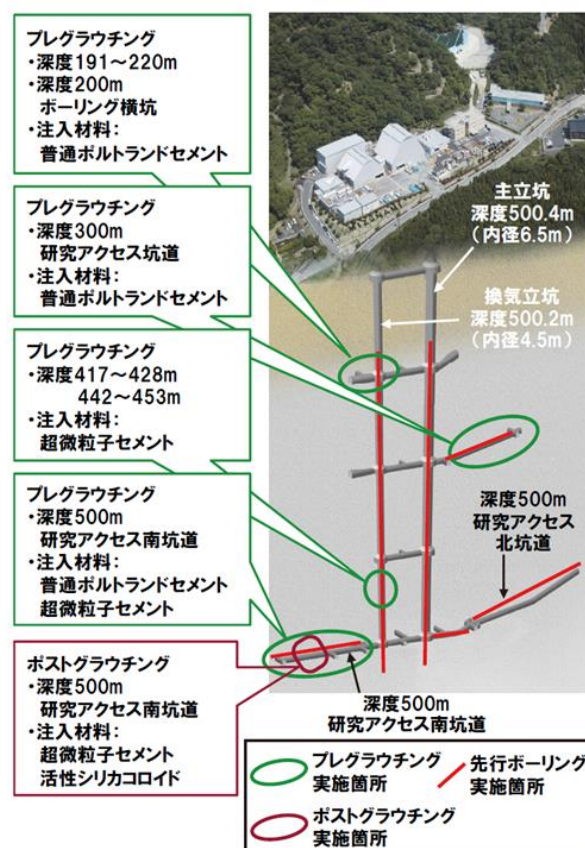


図 5-5 瑞浪超深地層研究所の研究坑道レイアウト及びグラウチング箇所  
 (見掛ほか, 2018)

表 5-5 プレグラウチング概要 (Grout Thickness = 3 m)

区間	改良区間深度 [m]	場所
①	191~220	換気立坑
②	200~200	深度 200 m ボーリング横坑
③	300~300	深度 300 m 研究アクセス坑道
④	417~428	換気立坑
⑤	442~453	換気立坑
⑥	500~500	深度 500 m 研究アクセス南坑道

表 5-6 ポストグラウチング (Grout Thickness = 6 m)

区間	改良区間換気立坑 壁面より [m]	場所
①	77.6~93.8	深度 500 m 研究アクセス南坑道

第 4 章の検討課題として抽出したように、坑内湧水量の局所的な再現性を向上させるため、スキン効果（覆工コンクリートなどの人工構造物が、地下研究施設の坑道近傍の透水性に影響を及ぼす効果）の設定を行う。スキン効果の設定は、トンネル境界条件周りの透水係数に応じて、表 5-7 の設定値よりも高い部分に設定する。また、スキン効果はトンネル境界条件のグラウト機能を適用し、スキン効果の厚さは、尾上ほか（2016）と同様に 5 m に設定した。

表 5-7 坑道近傍の水理特性  
(尾上ほか, 2016)

水理地質区分		水理特性 (第 2 段階の推定結果)				
		透水係数 (m/s)		比貯留係数 (1/m)	不飽和 特性曲線	有効間隙率
		水平方向 (断層面方向)	鉛直方向 (断層面直交方向)			
坑道近傍 スキン効果 ※	瑞浪層群部	1.0 × 10 <sup>-7</sup>		周辺岩盤と同様		
	土岐花崗岩部	1.0 × 10 <sup>-8</sup>				
	主立坑断層部	5.0 × 10 <sup>-8</sup>				
	グラウト区間	1.0 × 10 <sup>-9</sup>				

※スキン効果：設定値より岩盤の透水係数が高い場合にのみ適用

#### 5.4.3 TMR 法によるマルチスケールモデルの統合

第 4 章で対象としたエスポ地下岩盤研究所の解析では、広域スケールモデルとサイトスケールモデルの格子間隔を同一としたため TMR 法は使用しなかった。しかし、瑞浪超深地層研究所の解析においては、前節で述べたようにサイトスケールモデルの格子間隔を狭く設定しているため、両スケールの統合には TMR 法を用いて地下水流動解析を行った。TMR 法における広域スケールとサイトスケールの統合は次のように行う。サイトスケールモデルの外周には広域スケールモデルと重複するバッファゾーンを設け、当該領域の水理地質区分には広域スケールの水理地質区分を設定した。これによって、空間分割サイズの違いに起因する物性の不連続性を緩和し、両モデル間で水理

学的な境界条件（全水頭値）を適切に引き継ぐ構成とした。図 5-6 に、TMR 法のモデル間のインターフェースとサイトスケールモデルに設けたバッファゾーンを示す。

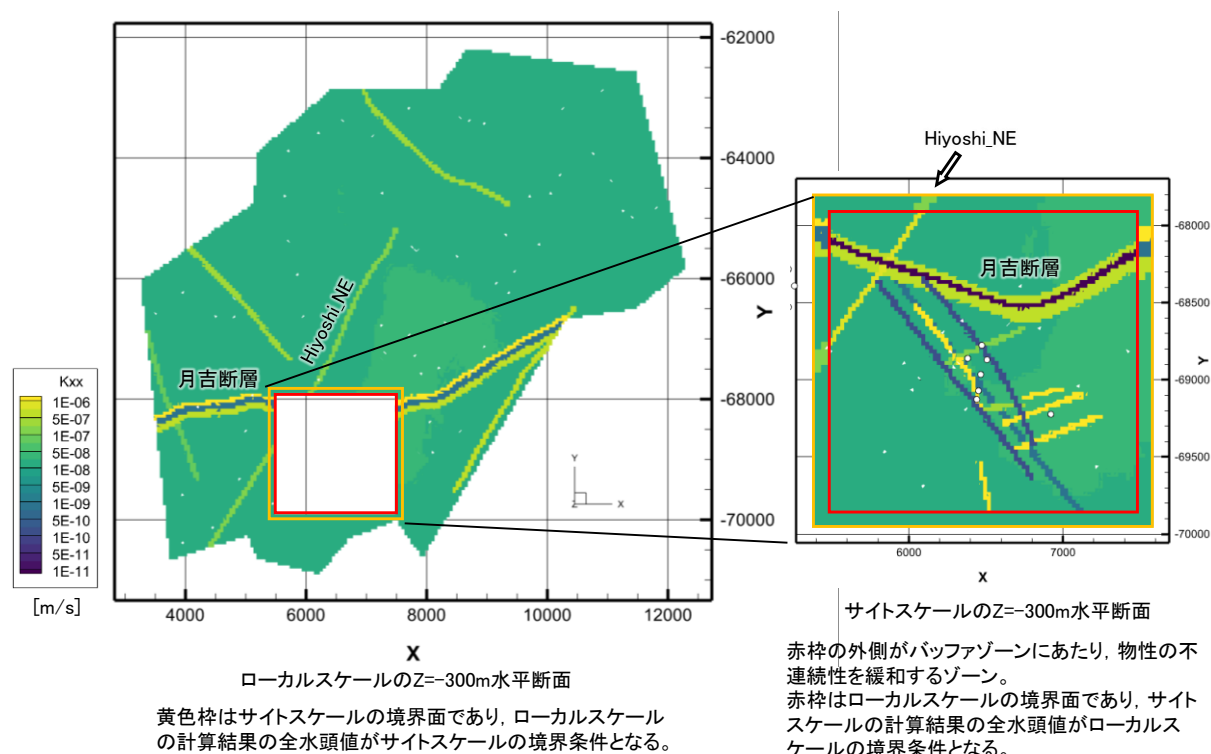


図 5-6 TMR 法のインターフェースとバッファゾーン

## 5.5 地下水流動解析

本節では、これまでに構築した水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルを用いて、HGS による地下水流動解析を実施する。解析は、施設建設前の地下水流動場を再現する定常解析（ベースライン解析）と、その結果を初期条件として施設の建設過程に伴う水理応答を評価する非定常解析（坑内湧水量解析）の 2 段階で行う。

### 5.5.1 ベースライン解析

ベースライン解析は地下研究施設建設前の地下水流動場の再現と位置付けられることから、経時的な擾乱のない安定した状態を想定し、定常の飽和-不飽和地下水流動解析を実施した。ただし、HGS で不飽和地下水流動解析を実施する場合は、非定常解析が必要であるため、後述の初期条件と境界条件のもとで定常状態に至ると判断される十分な時間までの非定常解析を行う（以降、疑似定常計算）。初期条件の設定値は、飽和状態から対象節点の直上の地形面標高を与え、飽和状態を初期状態とする。ただし、土岐川にあたる側方境界面は固定水頭境界とし、尾上、竹内（2020）で公開されている全水頭値を参照した。

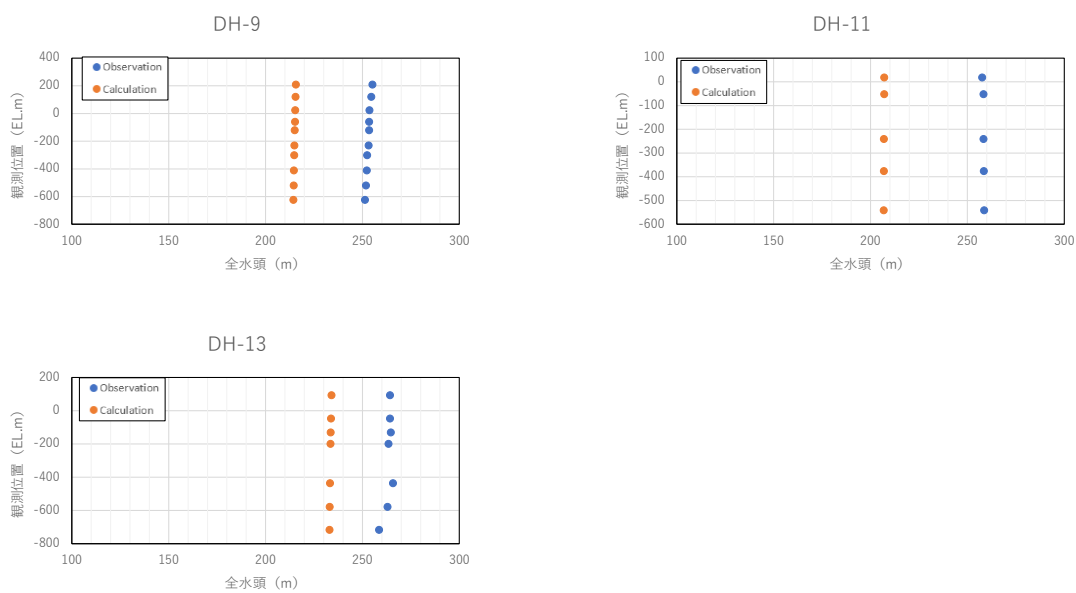
表 5-8 に水理地質構造モデル（広域スケール及びサイトスケール）の境界条件を示す。地表面の境界条件は水の流入出のある自由浸出境界とし、岩盤浸透量は、尾上、竹内（2020）を参考に 10 mm/y とした。また、土岐川にあたる側方境界は固定水頭条件とし、尾上、竹内（2020）で公開されている側方境界面の全水頭値とした。その他の側方境界と底面境界は不透水境界条件である。また、広

域スケールモデルとサイトスケールモデルの境界条件については、TMR法に基づき、相互の解析結果の全水頭値を固定水頭境界として引き継ぐ設定とした。

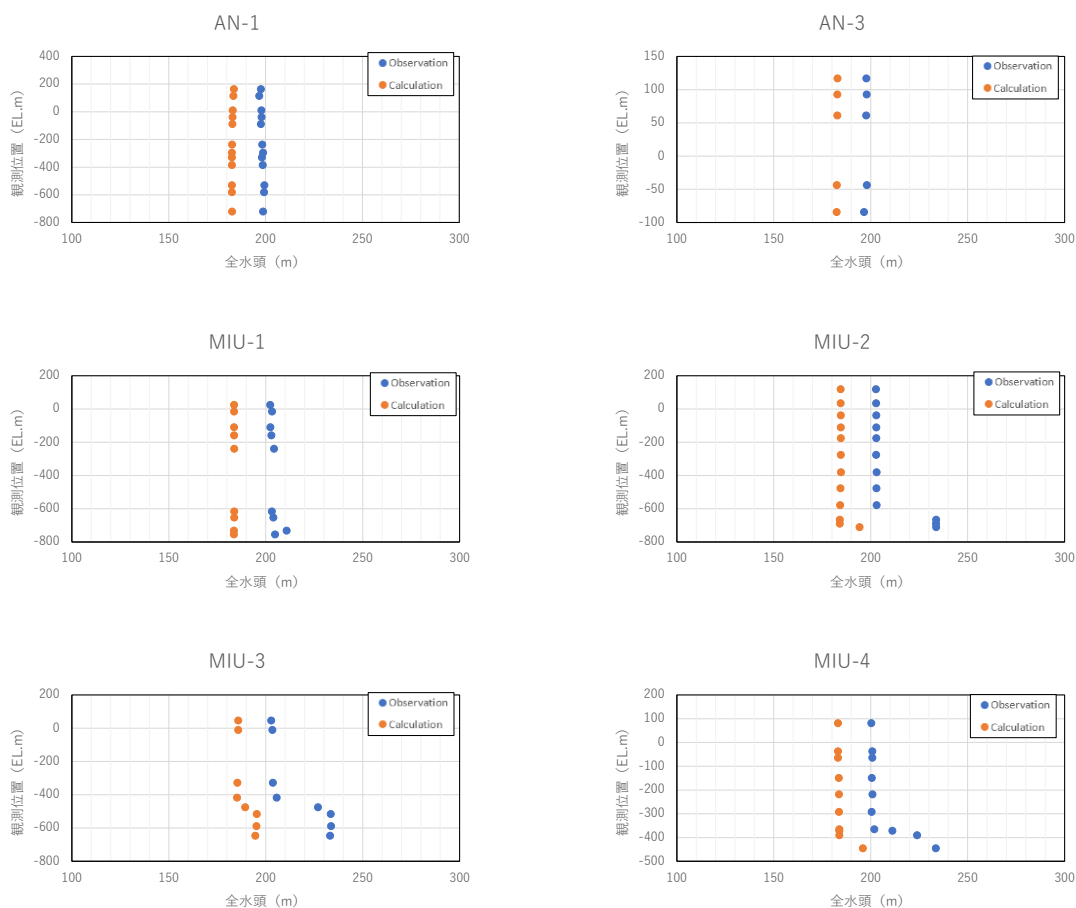
表 5-8 ベースライン解析の解析条件

項目	説明	
水理地質構造モデル	HGS・TMR法：広域スケールモデル	
	HGS・TMR法：サイトスケールモデル	
水理特性	広域スケール	
	サイトスケール	
解析方法	三次元飽和-不飽和地下水流動解析 疑似定常解析	
初期条件	水分状態：飽和	
境界条件 (外部境界面)	地表面	自由浸出境界 岩盤浸透量 (10 mm/y)
	側面	土岐川にあたる側面は固定水頭境界 (尾上, 竹内 (2020) で公開されている側方境界面の全水頭値を使用)
		上記以外の領域境界は不透水境界
	底面	不透水境界
境界条件 (TMR法インターフェース)	広域スケール	固定水頭境界： (サイトスケールのバッファ内側境界の解析結果の全水頭値)
	サイトスケール	固定水頭境界： (広域スケールのバッファ外側境界の解析結果の全水頭値)

ベースライン解析は地下研究施設建設前の地下水流動場を再現することを目的とするため、解析値と比較する実測値には、付録 5 (地下水圧力実測データ) に示した地下水圧実測データを使用した。図 5-7 及び図 5-8 に、全水頭値の解析値と実測値の比較結果を示す。図 5-7 の (a) 広域、及び (b) 正馬様用地の実測値と広域スケールの解析値を比較した結果、全水頭値の解析値は実測値よりも 20~50m 程度低い値となっている。一方で、図 5-8 の研究所用地付近 (サイトスケール) の解析値と実測値を比較すると、実測値の方が解析値よりも全水頭値で 10~25m 程度低くなっている。例えば、図 5-8 の MSB-3 では、地表付近では実測値と解析値は概ね同程度の水頭値となっているが、標高 Z=150m 以深では 20m ほど解析値が高くなっている。



(a) 広域スケール：広域の実測値と解析値の比較



(b) 広域スケール：正馬様用地の実測値と解析値の比較

図 5-7 ベースライン解析結果：広域スケールにおける実測値と解析値の比較（全水頭値）

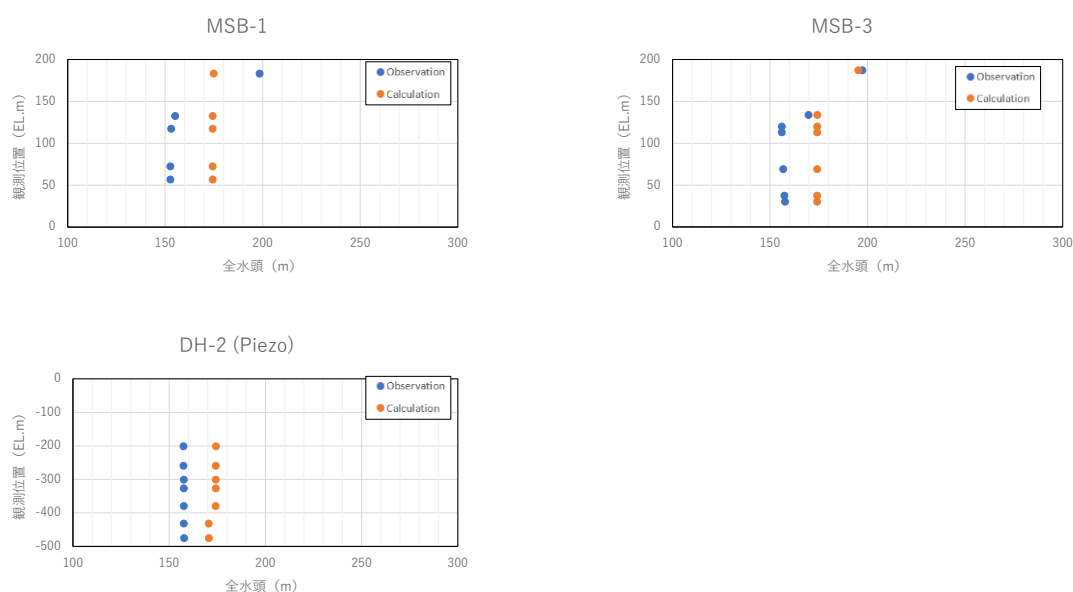


図 5-8 ベースライン解析結果：サイトスケールにおける実測値と解析値の比較（全水頭値）

このように、広域スケールでは解析値が低めになり、サイトスケールでは高めになるという傾向が見られた。この差異は、モデル上面に一律で設定した岩盤浸透量（10mm/y）の不確実性や、局所的な断層・割れ目構造の透水性のばらつきを、等価連続体モデルで完全に表現しきれていないことに起因すると考えられる。しかしながら、地表の地形に沿った大局的な地下水流動場や、瑞浪層群の低透水層（泥岩層など）を境界とした水圧分布の急激な変化（キャップロック構造による段差）といった、当該サイト特有の全体的な水理特性の傾向は概ね再現できていることが確認された。したがって、本ベースライン解析によって得られた全水頭分布を、後続の坑内湧水量解析の初期条件として適用することは妥当であると判断した。

### 5.5.2 坑内湧水量解析

前項のベースライン解析で得られた全水頭分布を初期条件として、瑞浪超深地層研究所の建設過程を反映した非定常の三次元飽和-不飽和地下水流動解析を実施する。解析結果から得られる坑内湧水量及び周辺岩盤の水頭低下量について、施設の建設開始から得られている長期的な実測データと比較・評価を行う。この比較を通じて、初期設定モデルにおける局所的な再現性を確認し、次節のモデル校正に向けた課題を抽出する。

#### (1) 解析条件

坑内湧水量解析は、表 5-8 のベースライン解析の境界条件に、付録 5（瑞浪超深地層研究所の建設工程）で設定した地下研究施設の建設工程をモデル化したトンネル境界条件を加え、ベースライン解析結果の全水頭値を初期値とした非定常の三次元飽和-不飽和地下水流動解析として実施した。解析の時間設定は、地下研究施設建設開始日の 2003 年 7 月 17 日から、湧水量や地下水圧の実測期間を超える 2022 年 4 月 1 日までとした。可視化のための非定常解析結果の出力（全水頭、飽和度、流速など）は、上記の期間を 75 に分割し、概ね 180 日ごとに出力した。坑内湧水量、及び実測点位置の解析結果は、可視化のための出力とは別に、非定常計算収束計算の時間刻み（ $\Delta t$ ）ごとに自動

で出力される。地下研究施設の建設工程モデルには、HGSのトンネル境界条件のグラウト機能を使用して尾上ほか(2016)で設定されているグラウチング及びスキン効果を考慮し、湧水量及び水圧測定値の変化に着目した解析を実施した。

## (2) 初期解析：解析結果と実測値の比較

図 5-9 は、主立坑側 (A 工区) と換気立坑側 (B 工区) の湧水量を合わせた総湧水量を示している。実測値は排水再開後の 500 m<sup>3</sup>/day から徐々に上昇し、深度 500 m ステージの掘削完了後より徐々に低下し、建設開始から 6,000 日目の湧水量は 750 m<sup>3</sup>/day である。一方、解析値は排水再開時に 500 m<sup>3</sup>/day 程度を示し、実測値と同様に徐々に上昇し、深度 500 m ステージの掘削完了前から徐々に低下した。建設開始から 6,000 日目における湧水量は 930 m<sup>3</sup>/day であり、実測値との差は 180 m<sup>3</sup>/day となっている。

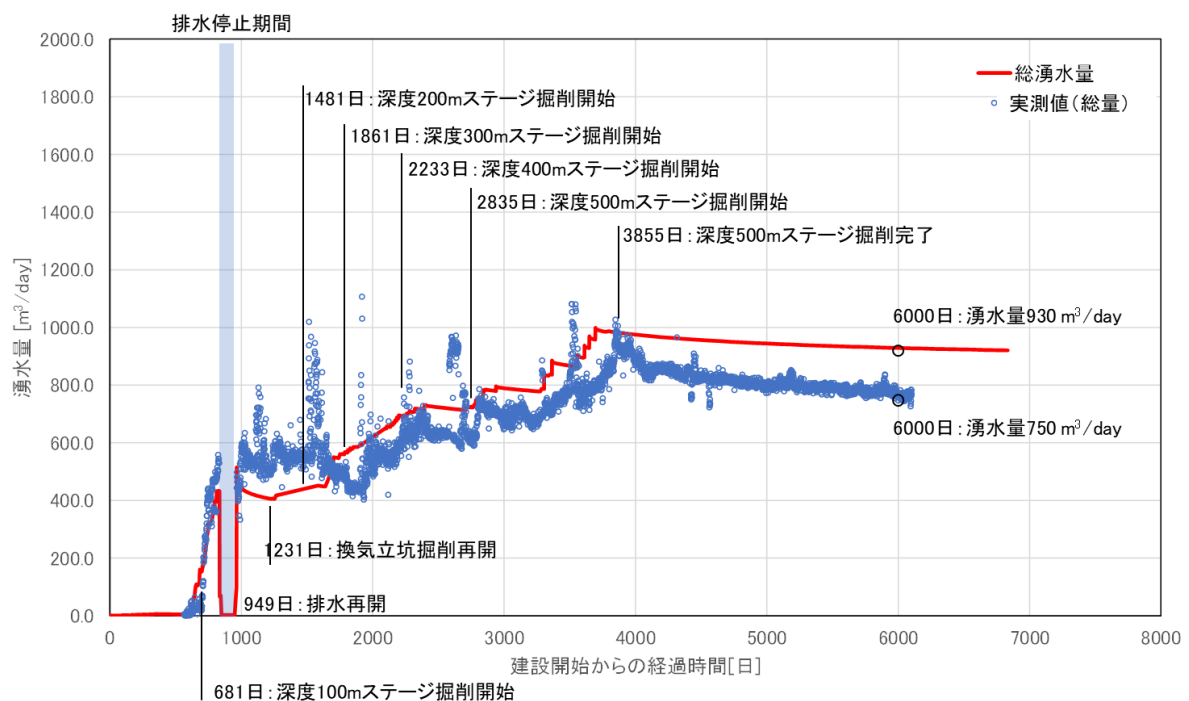


図 5-9 総湧水量の比較  
(赤線は HGS の解析値, 青丸は実測値)

図 5-10 から図 5-13 に水頭低下量の実測値と解析値の比較結果を示す。図中の実線は HGS の解析値, 点線は実測値を表している。DH-2 (図 5-10) の解析値は、深度 500 m ステージ掘削開始の 2,835 日頃まで、No.5, No.12 とともに同じような水頭低下量で推移した。その後 No.12 の水頭低下量が大きくなり、建設開始から 6,000 日時点で、No.5 は約 55 m, No.12 は約 65 m の低下量となり、実測値 (約 100 m) よりも低下量が小さい結果となった。MIZ-1 (図 5-11) の解析値も DH-2 と同様に 3,600 日頃まで、No.1, No.3 とともに同じような水頭低下量で推移した。その後、No.3 の水頭低下量が急激に増加し、建設開始から 6,000 日時点で、No.1 は約 40 m に対し、No.3 は約 145 m の低下量となった。実測値は No.1 が約 60 m, No.3 が約 70 m であり、No.3 については解析値が実測値の約 2 倍の低下量を示している。MSB-1 (図 5-12) では、No.1 の実測値はほとんど水頭低下がないのに対

し、解析値は約-13mの低下を示した。No.2 から No.4 に関しては、排水再開後に解析値が急激に低下し、実測値よりも低下量が多い傾向を示した。建設開始から 6,000 日時点で解析値は No.2 で -42m, No.3 で-45m, No.4 で-46m となっている。MSB-3 (図 5-13) の解析値は、No.3 から No.5 で同じような水頭低下量で推移しており、建設開始から 6,000 日時点で、いずれも約-50 m の水頭低下量となっている。実測値は、No.3 が-20 m, No.4 が-40 m, No.5 が約-85 m 程を示しており、No.5 以外は実測値よりも解析値の低下量が多い。

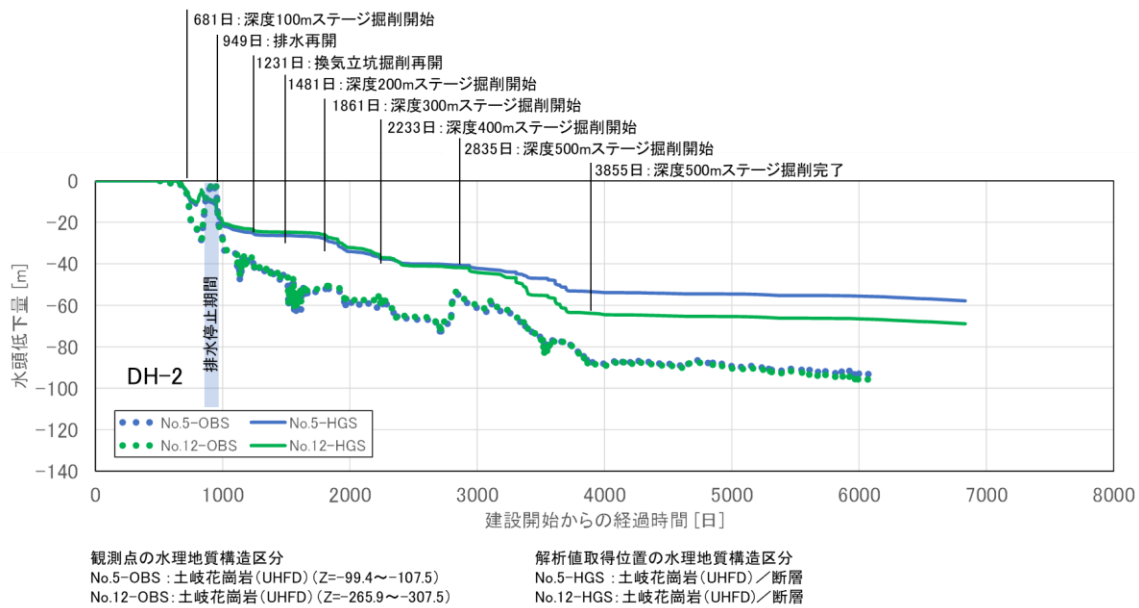


図 5-10 水頭低下量の比較 (DH-2)  
 (実線は HGS の解析値, 点線は実測値)

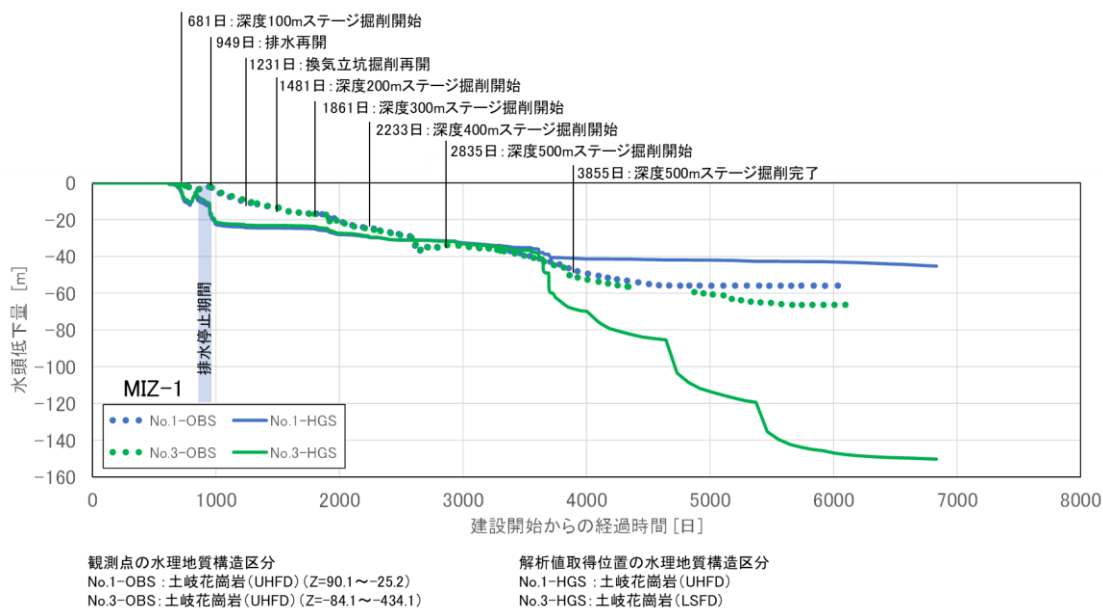
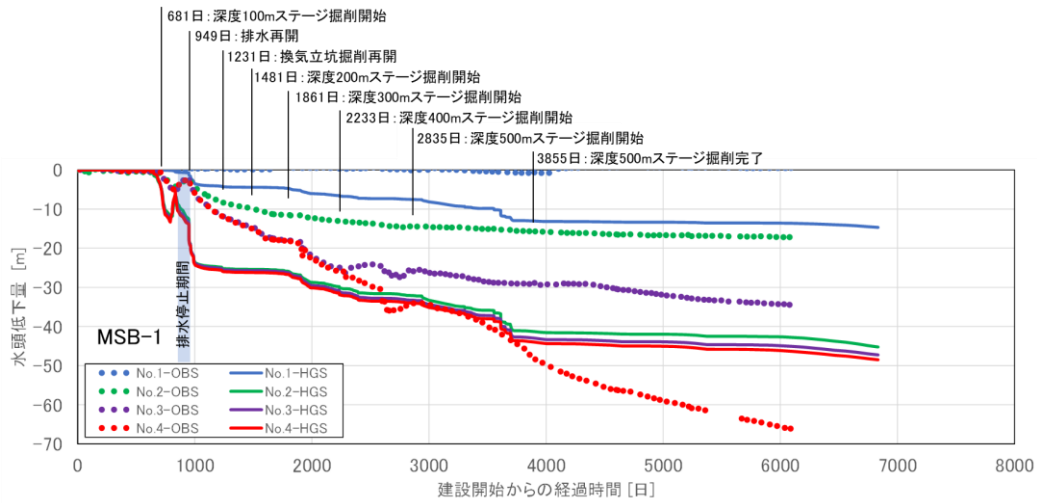
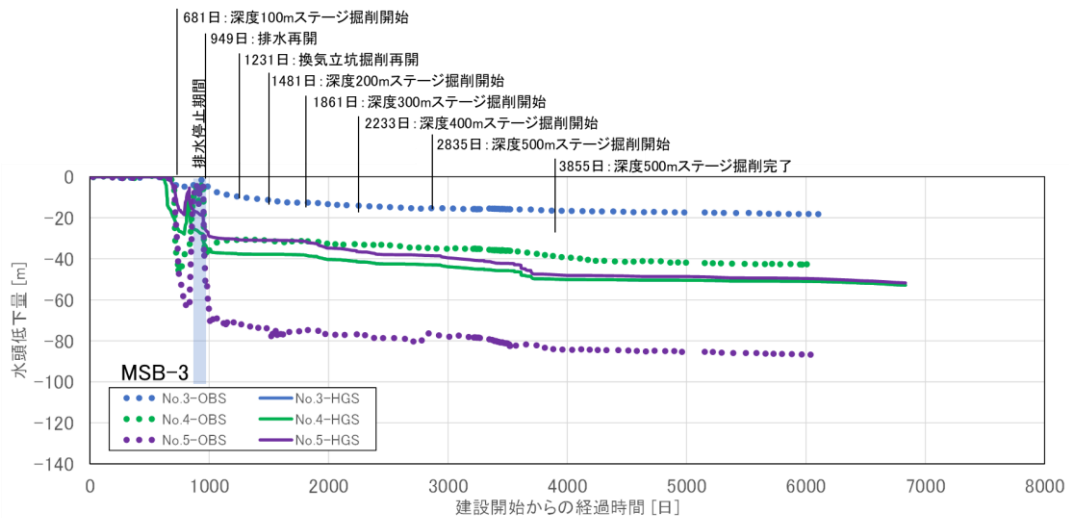


図 5-11 水頭低下量の比較 (MIZ-1)  
 (実線は HGS の解析値, 点線は実測値)



観測点の水理地質構造区分	解析値取得位置の水理地質構造区分
No.1-OBS: 明世/本郷累層 (Z=186.7~136.8)	No.1-HGS: 明世累層(本体)
No.2-OBS: 明世/本郷累層(基底礫層) (Z=135.9~121.5)	No.2-HGS: 明世累層(基底礫層)
No.3-OBS: 土岐夾炭累層(本体) (Z=120.6~76.8)	No.3-HGS: 土岐夾炭累層(本体)
No.4-OBS: 土岐夾炭累層(基底礫層) (Z=75.9~58.0)	No.4-HGS: 土岐夾炭累層(高透水層)

図 5-12 水頭低下量の比較 (MSB-1)  
(実線は HGS の解析値, 点線は実測値)



観測点の地質区分	解析値取得位置の水理地質区分
No.3-OBS: 主立坑断層 (Z=123.0~117.0)	No.3-HGS: 明世累層(基底礫層)/土岐夾炭累層(本体)
No.4-OBS: 土岐夾炭累層(本体) (Z=116.2~73.0)	No.4-HGS: 明世累層(基底礫層)/土岐夾炭累層(本体)
No.5-OBS: 土岐夾炭累層(基底礫層) (Z=72.2~36.8)	No.5-HGS: 主立坑断層

図 5-13 水頭低下量の比較 (MSB-3)  
(実線は HGS の解析値, 点線は実測値)

図 5-9 の総湧水量の比較図では、建設開始初期の排水停止前後の湧水量に大きな違いは見られないが、総湧水量の内訳をみると、排水停止前後の湧水量が、主立坑側 (A 工区 : 図 5-14) は解析値が実測値より高く、換気立坑側 (B 工区 : 図 5-15) は解析値が実測値より低くなっている。図 5-16 は、図 5-17 に示すウォーターリングにより区間ごとに分けて実測されている区間湧水量と解析値の比較図であるが、換気立坑 GL-100~200m の WR (V) 7 の湧水量が実測値よりも解析値が低くなっている。その他の顕著な違いは、主立坑 GL-200~300 m 区間の WR (M) 10 と WR (M) 11 の湧水量が実測値よりも解析値が高くなっており、区間湧水量ごとに見ると、実測値と解析値の乖離がみられた。

### (3) 解析結果の考察

上記の解析結果から、グラウチング及びスキン効果を考慮することにより、総湧水量及びその経時的な変動傾向については、概ね実測値を再現できていることが確認された。一方で、区間ごとの湧水量や個別の観測孔における水頭低下量に着目すると、解析値と実測値の間に局所的な乖離 (A 工区での過大評価や、B 工区での過小評価など) が存在している。これは、本解析において一律のスキン効果や初期設定のグラウチング条件を適用しているため、主立坑断層部などの複雑な不連続構造に伴う局所的な水理学的不均質性が、モデル上で十分に表現しきれていないことが原因と考えられる。したがって、局所的な地下水流動場の再現性を向上させるためには、実際の地質構造 (瑞浪層群や低角度割れ目集中帯など) と実測された区間湧水量を基に、対象区間ごとのスキン効果やグラウチングの設定を微調整する必要がある。これらの検討について、次節 (5.5.3) における解析モデルの校正にて実施する。

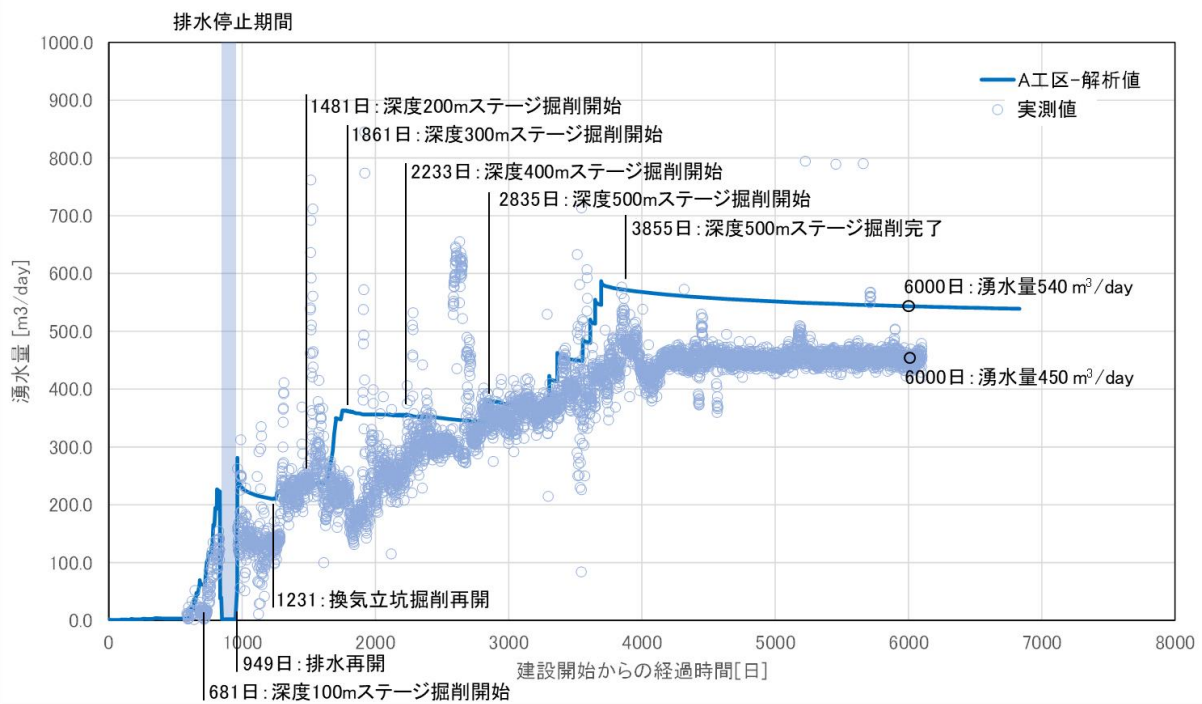


図 5-14 A 工区湧水量の比較  
(実線は HGS の解析値, 丸は実測値)

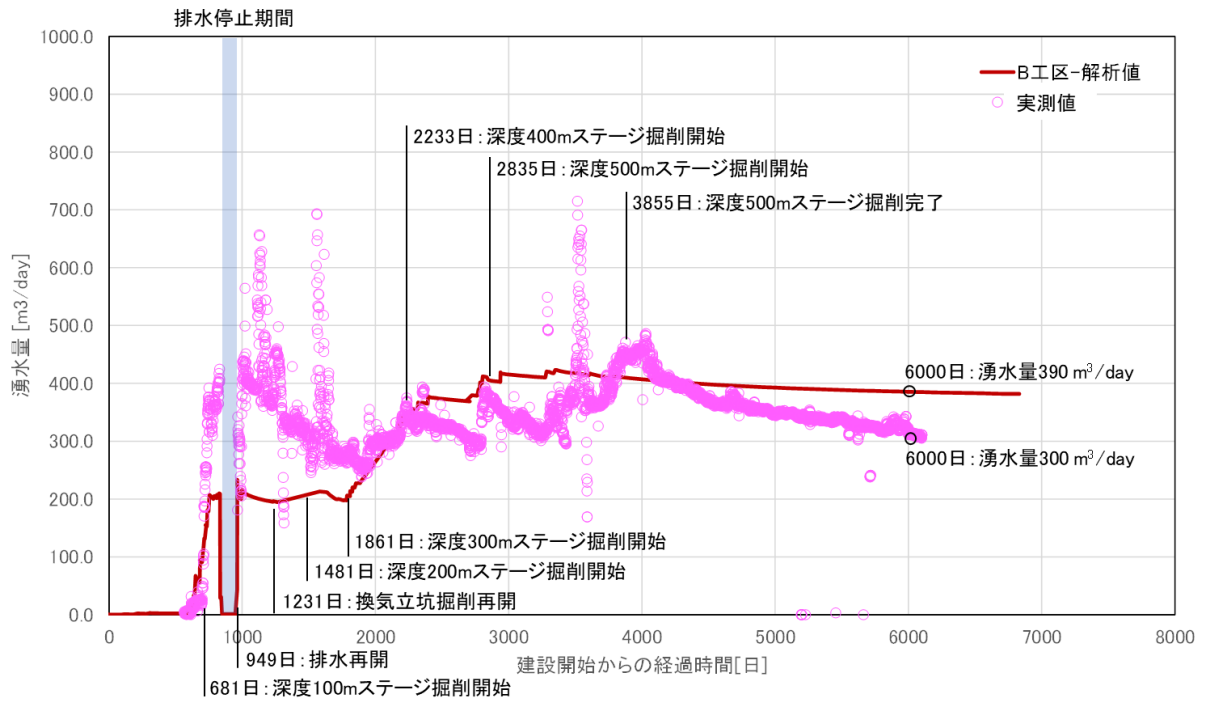


図 5-15 B工区湧水量の比較  
(実線はHGSの解析値, 丸は実測値)

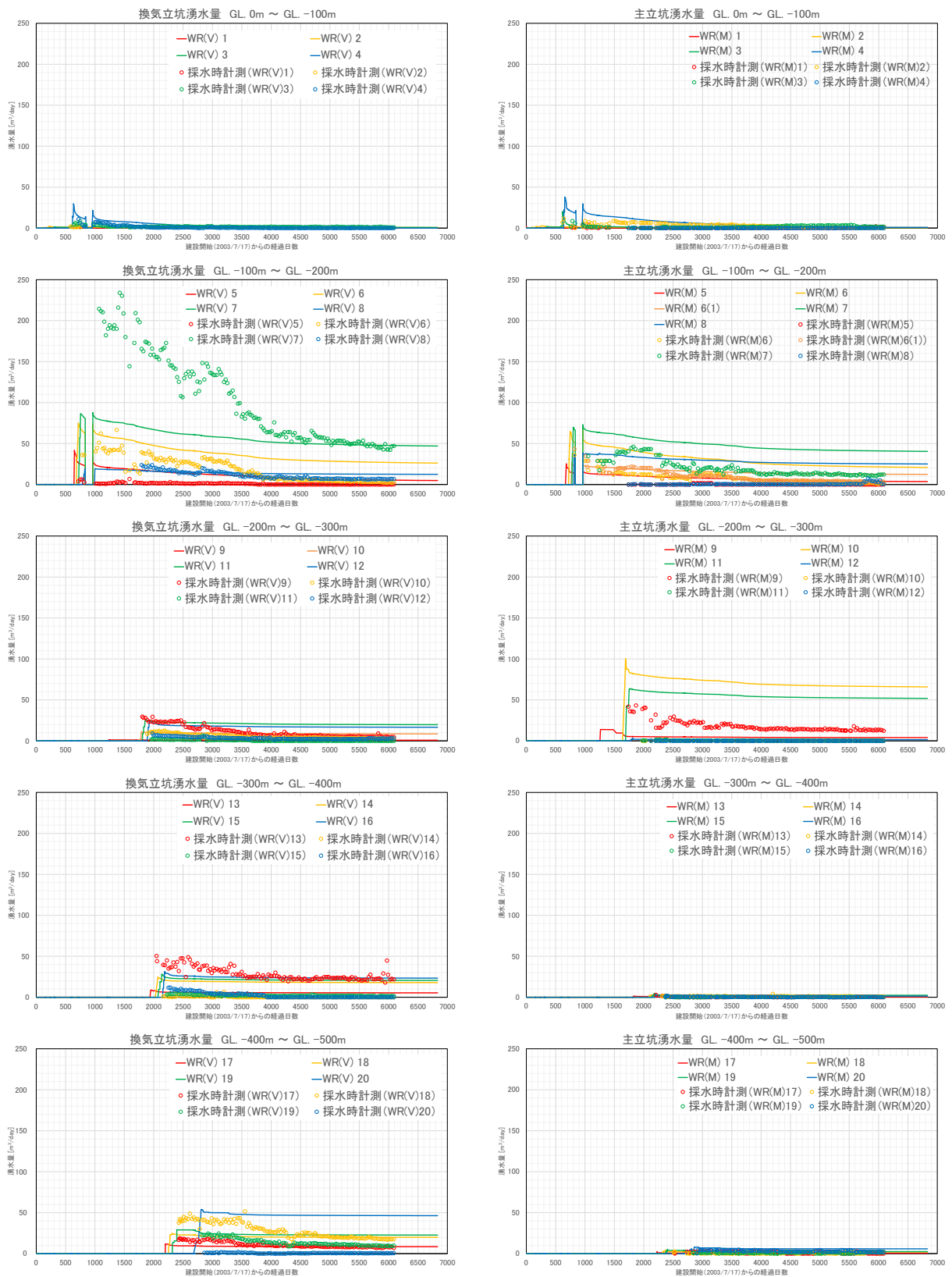


図 5-16 区間湧水量の比較

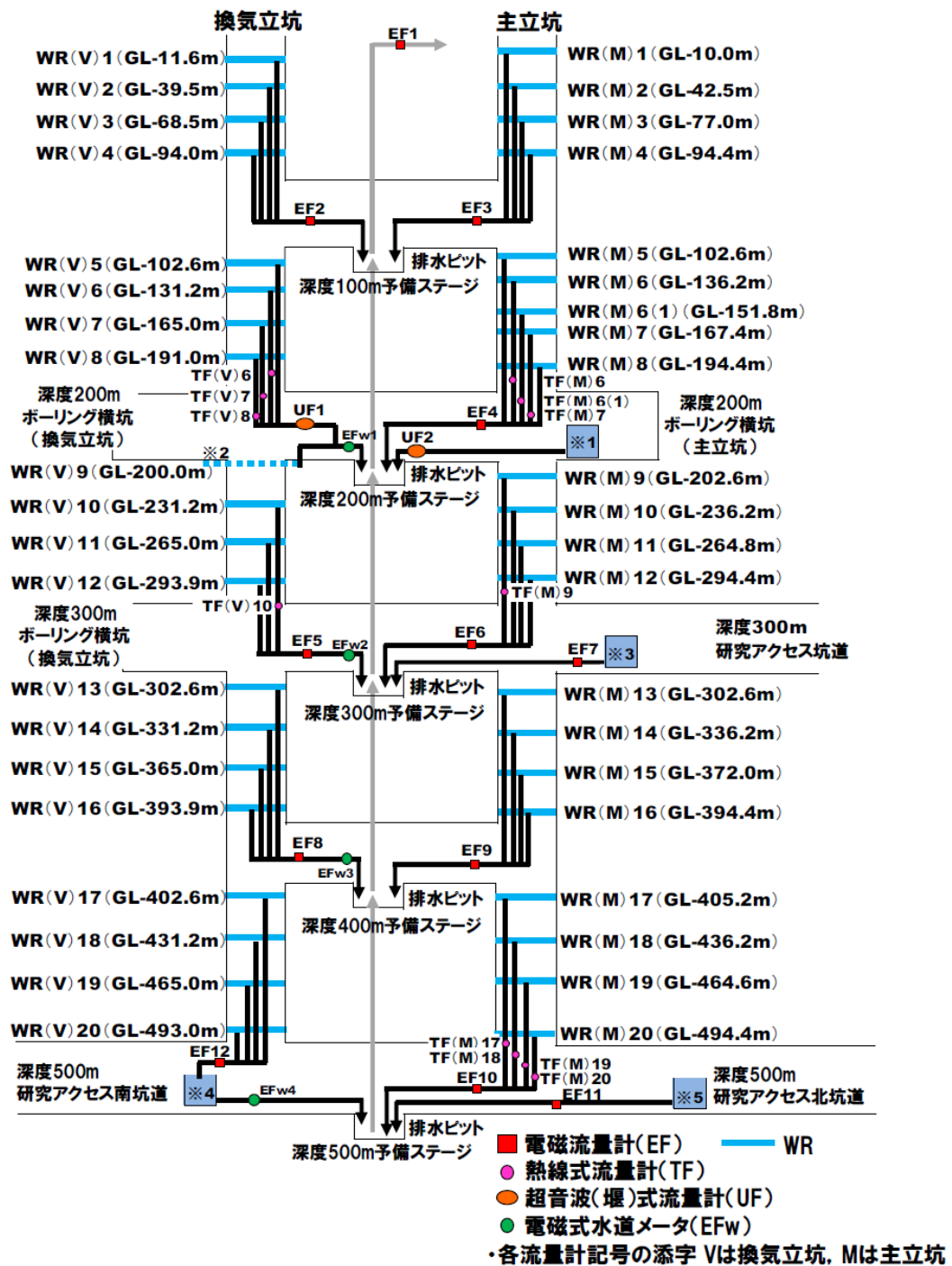


図 5-17 排水系統図

(WR : ウォーターリング, 尾上・竹内, 2020)

### 5.5.3 水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルの校正と再解析

前節の初期モデルによる坑内湧水量解析では、総湧水量の経時的な変動傾向は概ね実測値を再現できたものの、区間湧水量や個別の観測孔における水頭低下量については、局所的な乖離が認められた。これらの乖離は、モデルの空間分割サイズに起因する坑道近傍の水理地質区分の不整合や、一律に設定したスキン効果及びグラウチング条件では、主立坑断層やLAFZなどの複雑な不連続

構造に伴う局所的な水理学的不均質性を表現しきれていないことが主な要因と考えられる。そこで本節では、区間湧水量及び全水頭の局所的な再現性を向上させることを目的として、水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルの段階的な校正と再解析を実施する。

### (1) 校正方法

解析モデルの校正にあたっては、JAEA (2016) に示されている水理地質構造モデル更新の考え方(更新ステップ①)を参考に、立坑近傍の水圧分布及び研究坑道からの湧水量に着目したモデルのキャリブレーションを実施する。尾上ほか(2016)の検討では、主に地下研究施設坑道近傍の地下水圧観測データの分布によりキャリブレーションが行われている。しかし、本検討で HGS に適用しているトンネル境界条件は、坑道近傍の水圧分布を補間して処理する特性があるため、局所的な水圧変動よりも区間ごとの湧水量にキャリブレーションの主眼を置くこととした。

具体的な校正は、以下の段階的なアプローチで実施する。第一に、HGS モデルの空間分割サイズ(メッシュ解像度)に起因して、実際の地質構造(特に高角度傾斜の断層など)とトンネル境界条件の取り合いに不整合が生じている箇所(例えば、立坑周辺の土岐夾炭累層や主立坑断層の分布など)の水理地質区分を修正する。第二に、第4章のエスポ地下岩盤研究所の解析で得られた知見も踏まえ、グラウト施工区間の設定に関する不確実性について検討する。第三に、実測値と解析値の挙動が異なる具体的な湧水区間(主立坑断層部など)を抽出し、覆工コンクリートなどに起因するスキン効果の影響を評価する。対象区間ごとにスキン効果の透水係数やグラウチングの適用範囲を変動させる感度解析(試行ケースの設定)を実施し、実測値との整合性が最も高くなる条件を特定する。

### (2) 最適モデルの選定と坑内湧水量の再現解析

前項の校正方法に基づき、実測値と解析値の挙動が異なる区間(主立坑断層部の瑞浪層群及びLAFZなど)を抽出し、スキン効果の透水係数やグラウチングの適用範囲を変動させる感度解析を実施した。設定した試行ケース(ケース T1~T9)の一覧を表 5-9 に示す。ケース T1~T8 では、対象区間ごとのスキン効果の有無や透水係数の値を段階的に調整し、湧水量への感度を確認した。さらに、ケース T8 をベースとしたケース T9 では、換気立坑における土岐花崗岩・低角度割れ目集中帯(LAFZ)に対するプレグラウト区間の調整を行った。これは、HGS モデルの空間分割サイズの影響により、モデル上のLAFZと換気立坑との遭遇深度が実際の地質構造(実測値)と異なっていたため、LAFZからの湧水低減というグラウト本来の目的を解析モデル上で正しく表現できるよう、グラウトの適用範囲を拡張したものである。

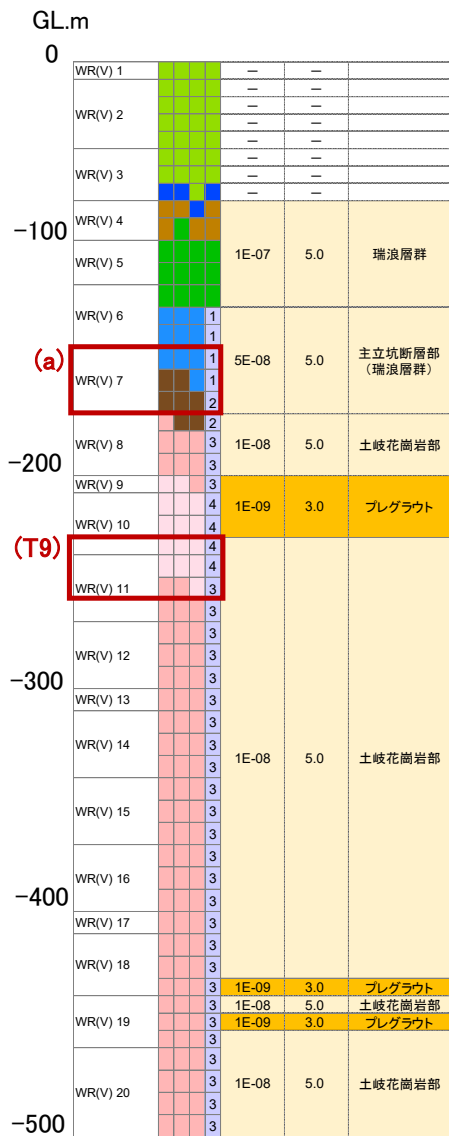
各解析ケースによる非定常解析の結果、地下研究施設の建設開始から6,000日時点における総湧水量の解析値が、実測値(750 m<sup>3</sup>/day)に最も近づいたのはケース T9(925 m<sup>3</sup>/day)であった(表 5-9)。総湧水量の観点だけで見れば、校正前のモデル(ケース B2 など)とケース T9 の間に極端な大差はないものの、主立坑側(A工区)及び換気立坑側(B工区)という工区ごとの区間湧水量の内訳を比較した結果、実測値との局所的な整合性はケース T9 が最も高いことが確認された。

図 5-19 総湧水量の比較(ケース T9)に、ケース T9 における総湧水量の経時変化の比較結果を示す。この結果から、スキン効果及びグラウト区間を適切に校正したケース T9 の水理地質構造モデル及び地下研究施設モデルが、当該サイトの複雑な地下水流動場を最も妥当に説明できるモデルで

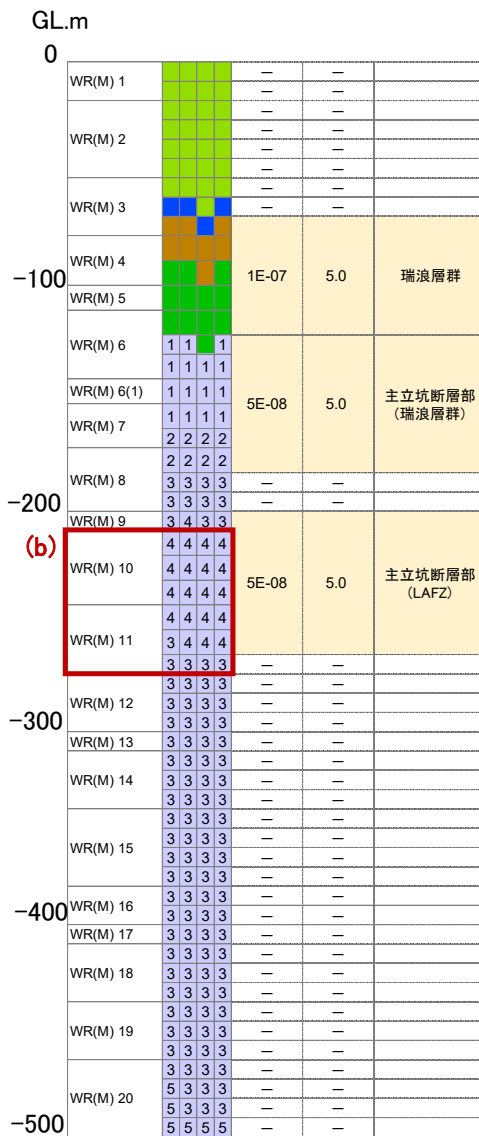
あると判断した。なお、ケース T9 における各観測孔の水頭低下量の比較結果（図 5-20～図 5-23）についても、大局的な水圧変化の傾向を概ね再現できていることを確認した。

表 5-9 スキン効果の調整による校正内容と解析ケース一覧

ケース	校正内容	グラウチング・スキン効果	総湧水量 6,000 日時点 [m <sup>3</sup> /day]
T1	感度解析 (a) 土岐夾炭累層（基底礫層）のスキン効果の透水係数の感度解析	対象：土岐夾炭累層（基底礫層） 透水係数： $1.0 \times 10^{-7}$ m/s 厚さ：5 m	実測値：解析値 750：970
T2		対象：土岐夾炭累層（基底礫層） 透水係数：－ 厚さ：－ ・スキン効果なしとした場合	実測値：解析値 750：1,350
T3		対象：土岐夾炭累層（基底礫層） 透水係数： $5.0 \times 10^{-7}$ m/s 厚さ：5 m	実測値：解析値 750：1,110
T4		対象：土岐夾炭累層（基底礫層） 透水係数： $2.0 \times 10^{-7}$ m/s 厚さ：5 m	実測値：解析値 750：1,010
T5		対象：土岐夾炭累層（基底礫層） 透水係数： $2.0 \times 10^{-7}$ m/s 厚さ：5 m ・区間の最下部には適用せず	実測値：解析値 750：980
T6	感度解析 (b) 主立坑の主立坑断層（土岐花崗岩・LAFZ 部）のスキン効果の透水係数の感度解析	対象：主立坑断層（LAFZ） 透水係数： $3.0 \times 10^{-8}$ m/s 厚さ：5 m	実測値：解析値 750：960
T7		対象：主立坑断層（LAFZ） 透水係数： $2.0 \times 10^{-8}$ m/s 厚さ：5 m	実測値：解析値 750：950
T8		対象：主立坑断層（LAFZ） 透水係数： $1.0 \times 10^{-8}$ m/s 厚さ：5 m	実測値：解析値 750：930
T9	グラウト区間の調整 換気立坑の土岐花崗岩・低角度割れ目集中帯にグラウトを適用  図 5-18 の (T9) 参照。	対象：土岐花崗岩（LAFZ） 透水係数： $1.0 \times 10^{-9}$ m/s 厚さ：3 m	実測値：解析値 750：925



換気立坑



主立坑

瀬戸層群	生俵累層
瑞浪層群	明世累層/本郷累層 (本体)
	明世累層/本郷累層 (泥岩)
	明世累層/本郷累層 (基底礫)
	土岐夾炭累層 (本体)
土岐花崗岩	土岐夾炭累層 (高透水層)
	土岐夾炭累層 (基底礫)
	上部割れ目帯
	上部割れ目帯中の低角度割れ目集中帯
	下部割れ目低密度帯

1	土岐夾炭累層 (高透水層)
2	土岐夾炭累層 (基底礫)
3	主立坑断層 (低透水性領域)
4	上部割れ目帯
5	上部割れ目帯中の低角度割れ目集中帯
	下部割れ目低密度帯
	その他の断層

図 5-18 集水区間と水理地質区分・スキン効果設定  
(主立坑及び換気立坑の水理地質区分はトンネル境界条件に接する4つの6面体要素の水理地質区分を表している)

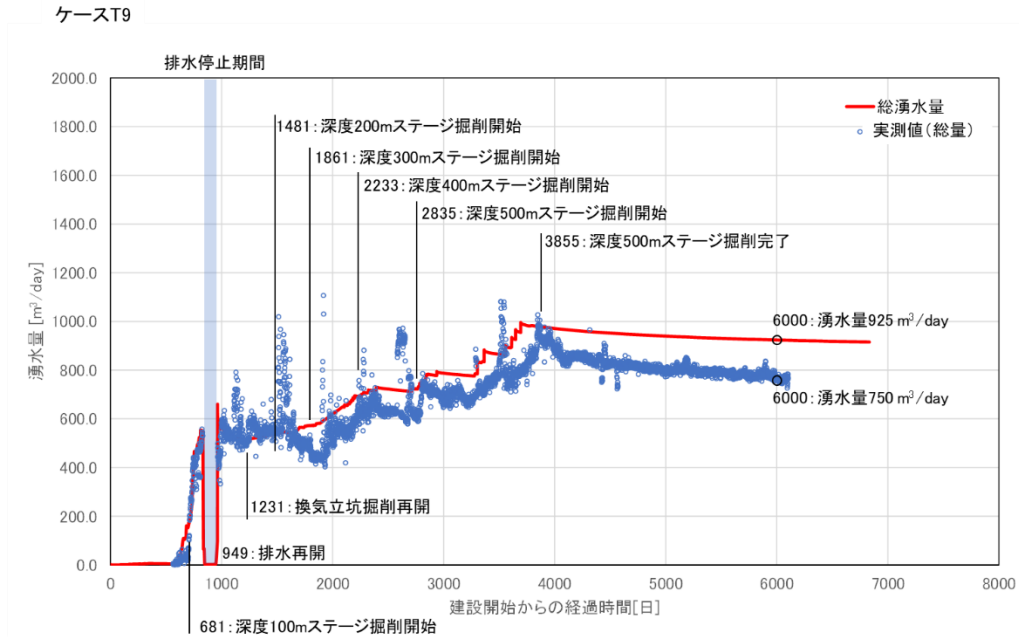
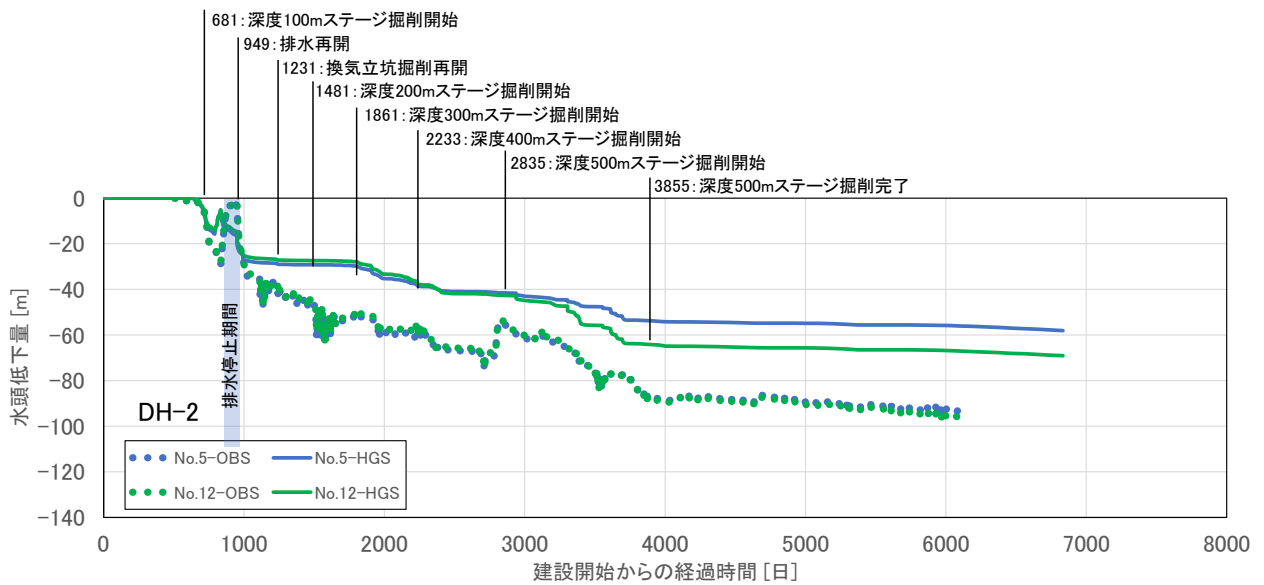


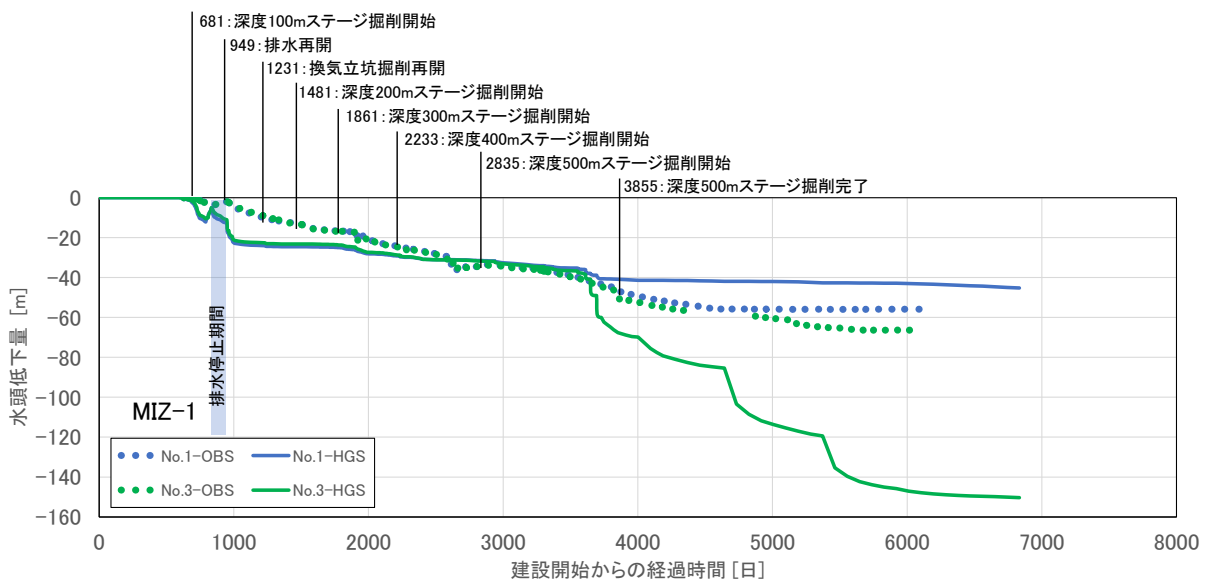
図 5-19 総湧水量の比較 (ケース T9)  
(実線は HGS の解析値, 丸は実測値)



観測点の水理地質構造区分  
No.5-OBS : 土岐花崗岩 (UHFD) (Z=-99.4~-107.5)  
No.12-OBS : 土岐花崗岩 (UHFD) (Z=-265.9~-307.5)

解析値取得位置の水理地質構造区分  
No.5-HGS : 土岐花崗岩 (UHFD) / 断層  
No.12-HGS : 土岐花崗岩 (UHFD) / 断層

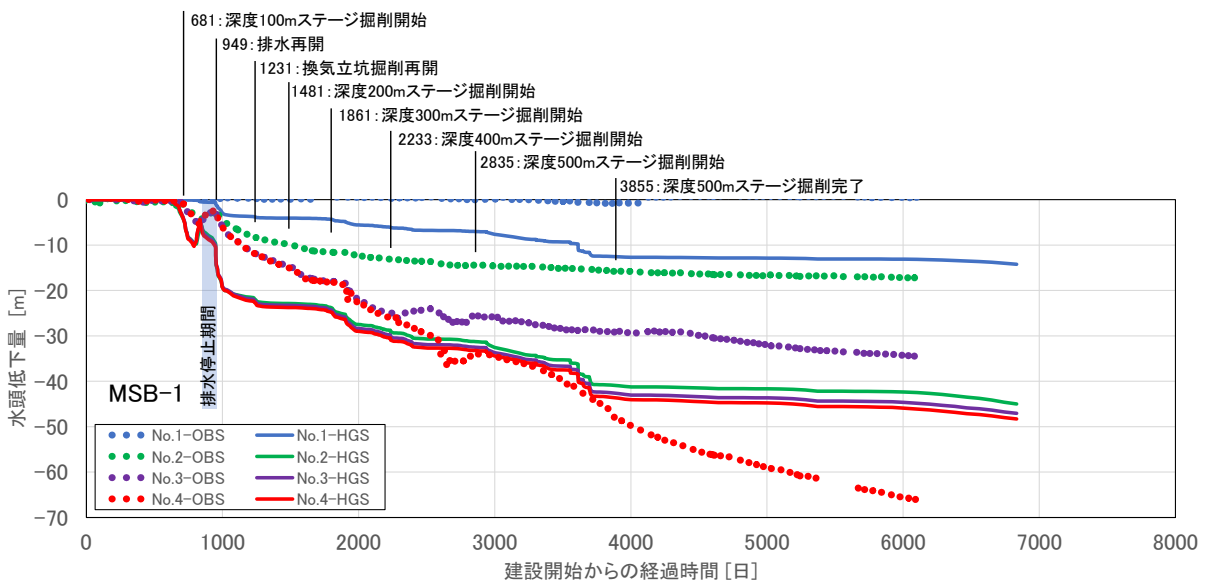
図 5-20 水頭低下量の比較 (ケース T9 : DH-2)  
(実線は HGS の解析値, 丸は実測値)



観測点の水理地質構造区分  
 No.1-OBS : 土岐花崗岩 (UHFD) (Z=90.1~-25.2)  
 No.3-OBS : 土岐花崗岩 (UHFD) (Z=-84.1~-434.1)

解析値取得位置の水理地質構造区分  
 No.1-HGS : 土岐花崗岩 (UHFD)  
 No.3-HGS : 土岐花崗岩 (LSFD)

図 5-21 水頭低下量の比較 (ケース T9 : MIZ-1)  
 (実線は HGS の解析値, 丸は実測値)



観測点の水理地質構造区分  
 No.1-OBS : 明世／本郷累層 (Z=186.7~136.8)  
 No.2-OBS : 明世／本郷累層 (基底礫層) (Z=135.9~121.5)  
 No.3-OBS : 土岐夾炭累層 (本体) (Z=120.6~76.8)  
 No.4-OBS : 土岐夾炭累層 (基底礫層) (Z=75.9~58.0)

解析値取得位置の水理地質構造区分  
 No.1-HGS : 明世累層 (本体)  
 No.2-HGS : 明世累層 (基底礫層)  
 No.3-HGS : 土岐夾炭累層 (本体)  
 No.4-HGS : 土岐夾炭累層 (高透水層)

図 5-22 水頭低下量の比較 (ケース T9 : MSB-1)  
 (実線は HGS の解析値, 丸は実測値)

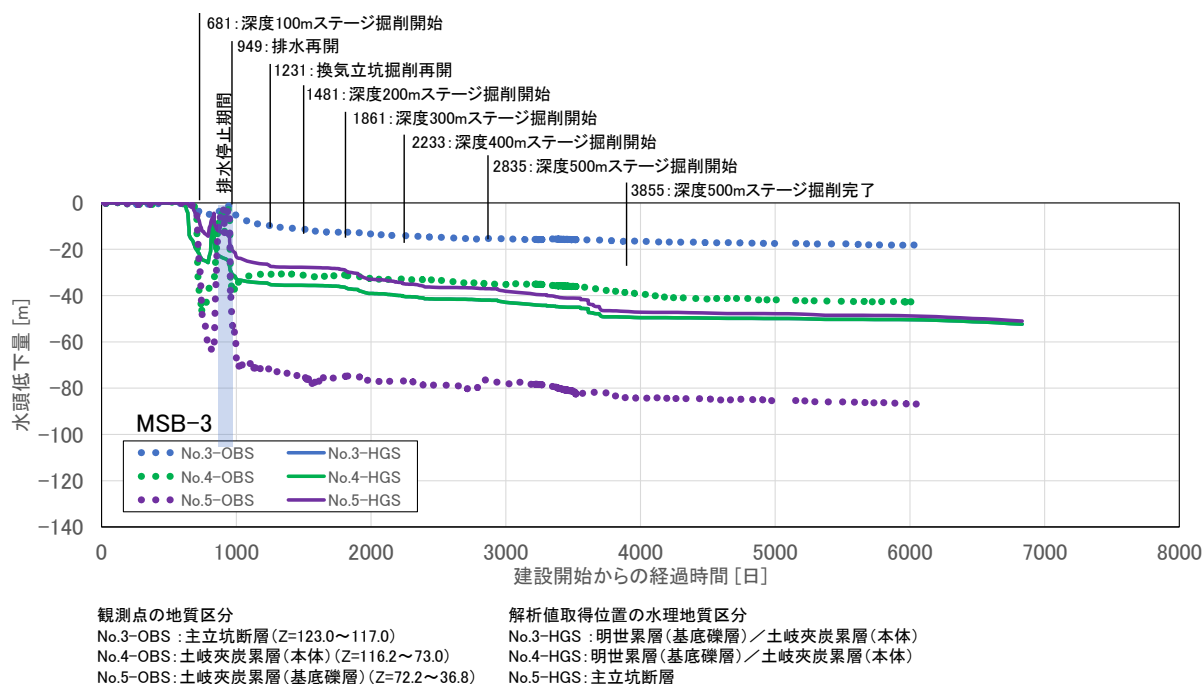


図 5-23 水頭低下量の比較 (ケース T9 : MSB-3)  
 (実線は HGS の解析値, 丸は実測値)

#### 5.5.4 異なる解析コードによる解析結果との比較

本節では、HGS を用いた坑内湧水量解析の結果を異なる解析コードと比較することにより、その信頼性を確認するため、尾上ほか (2016) が実施した地下水流動解析コード Dtransu-3D・EL を用いた解析結果と比較した。ここでは、尾上ほか (2016) と同等の水理地質構造モデル及び解析条件を用いた HGS の解析結果と、Dtransu-3D・EL の解析結果を比較し、HGS が同等の機能を有し、得られた解析結果が妥当なものであるかを確認する。なお、Dtransu-3D・EL の解析結果は、尾上ほか (2016) の文献値から読み取ったものである。

##### (1) 坑内湧水量の比較

図 5-24 及び図 5-25 に、HGS と Dtransu-3D・EL による工区ごとの坑内湧水量の比較結果を示す (実線が HGS, 破線が Dtransu-3D・EL)。また、主要な建設イベント時における両者の湧水量を表 5-10 に示す。主立坑側 (A 工区) における HGS と Dtransu-3D・EL の坑内湧水量の差分絶対値の平均は  $19.4 \text{ m}^3/\text{day}$  (最大  $52 \text{ m}^3/\text{day}$ ) であり、建設期間の全期間を通じて同程度の湧水量で推移していることが確認された。一方、換気立坑側 (B 工区) においては、HGS による解析結果が Dtransu-3D・EL よりも平均  $89.3 \text{ m}^3/\text{day}$  (最大  $130 \text{ m}^3/\text{day}$ ) 少ない結果となった。

表 5-10 坑内湧水量の比較

比較日 [日]	主なイベント	坑内湧水量 [m <sup>3</sup> /day]					
		主立坑側 (A 工区)			換気立坑側 (B 工区)		
		HGS	Dtransu	差分	HGS	Dtransu	差分
681	深度 100 m ステージ掘削開始	63	52	11	55	43	12
1,006	主立坑掘削再開	228	206	22	214	336	122
1,231	換気立坑掘削再開	210	200	10	195	325	130
1,481	深度 200 m ステージ掘削開始	235	245	10	200	322	122
1,861	深度 300 m ステージ掘削開始	358	363	5	227	310	83
2,233	深度 400 m ステージ掘削開始	354	380	26	338	446	108
2,835	深度 500 m ステージ掘削開始	343	395	52	405	453	48

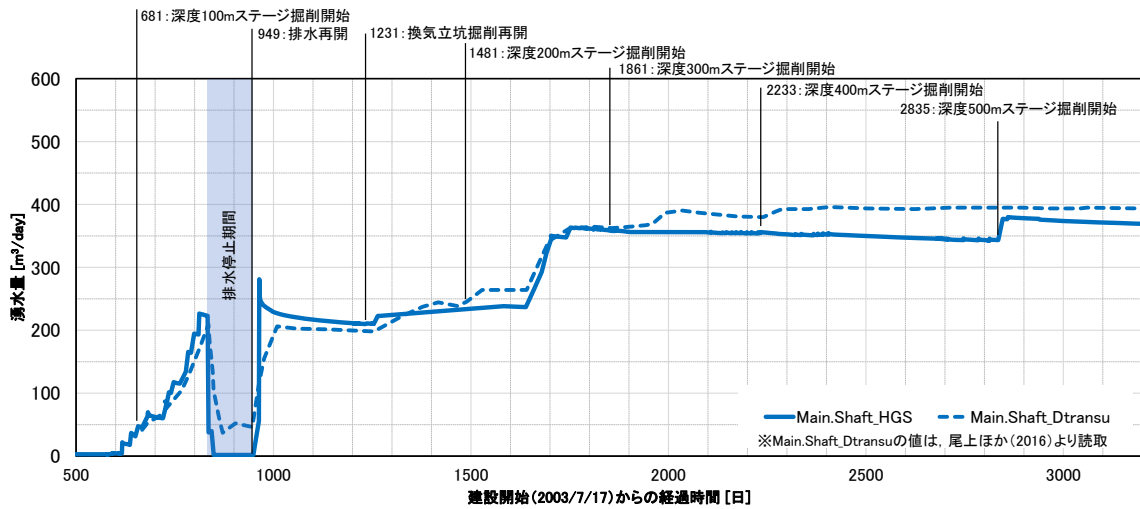


図 5-24 主立坑側 (A 工区) の湧水量の比較

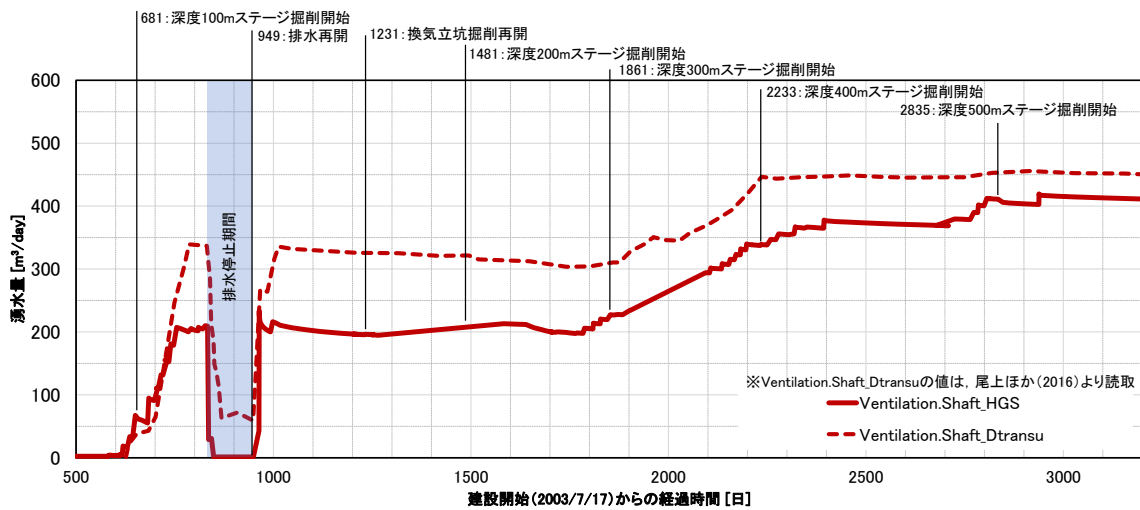


図 5-25 換気立坑側 (B 工区) の湧水量の比較

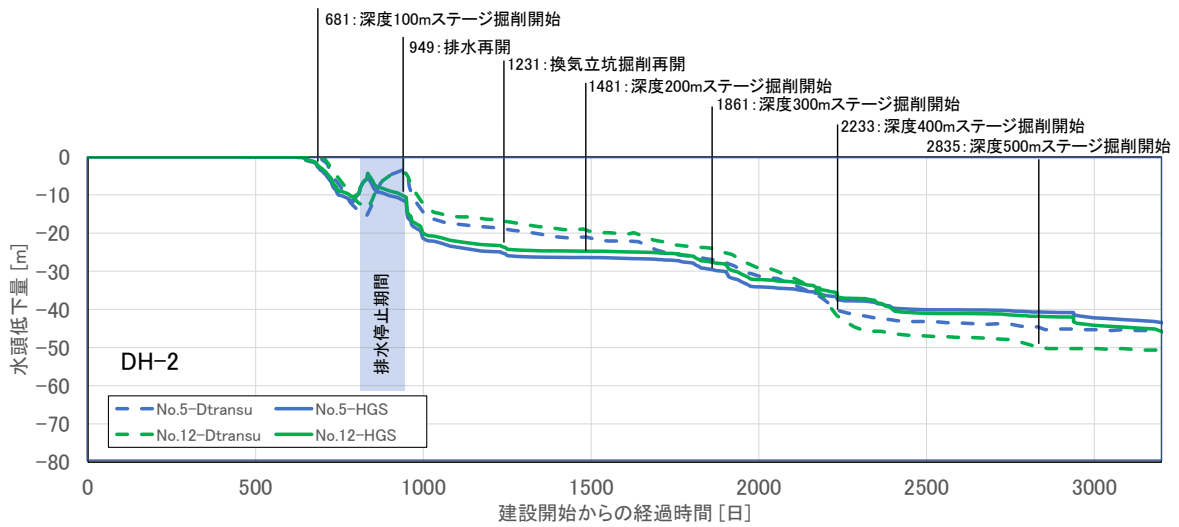
## (2) 水頭低下量の比較

図 5-26 から図 5-29 に、各観測孔（DH-2, MIZ-1, MSB-1, MSB-3）における水頭低下量の比較結果を示す。また、主要イベント時における低下量を表 5-11 にまとめる。HGS と Dtransu-3D・EL による水頭低下量の差分絶対値の平均は 6 m（最大 13 m, 最小 1 m）であり、両者の間にはわずかな差があるものの、建設期間中の各イベントに伴う水頭変化の傾向は概ね同様の挙動を示していることが確認された。ただし、全体的に HGS のほうが Dtransu-3D・EL よりも水頭低下量がやや大きい傾向が見られる。

表 5-11 水頭低下量の比較

単位 : [m]

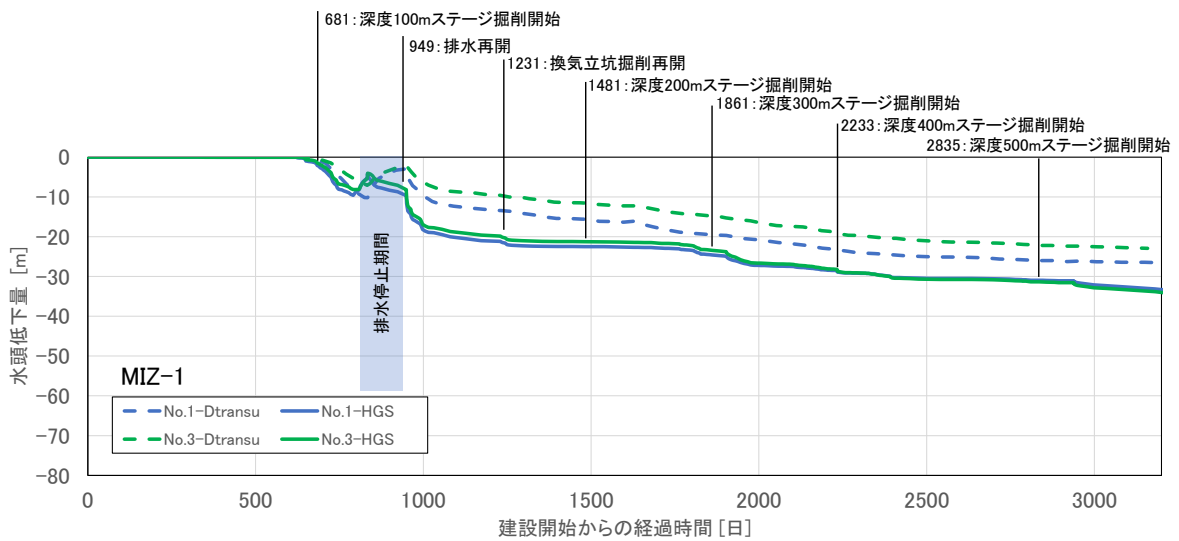
比較日 [日]		681	1,006	1,231	1,481	1,861	2,233	2,835	
主なイベント		深度 100 m ステージ 掘削開始	主立坑 掘削再開	換気立坑 掘削再開	深度 200 m ステージ 掘削開始	深度 300 m ステージ 掘削開始	深度 400 m ステージ 掘削開始	深度 500 m ステージ 掘削開始	
DH-2	No.5	HGS	-3	-22	-25	-26	-30	-37	-41
		Dtransu	-1	-15	-19	-21	-27	-40	-45
		差分	2	7	6	5	3	3	4
	No.12	HGS	-2	-20	-23	-25	-28	-36	-42
		Dtransu	0	-13	-16	-19	-24	-42	-50
		差分	2	7	7	6	4	6	8
MIZ-1	No.1	HGS	-2	-19	-21	-23	-25	-29	-31
		Dtransu	-1	-10	-13	-16	-20	-24	-26
		差分	1	9	8	7	5	5	5
	No.3	HGS	-2	-18	-20	-21	-23	-29	-31
		Dtransu	0	-7	-10	-11	-15	-19	-22
		差分	2	11	10	10	8	10	9
MSB-1	No.1	HGS	0	-3	-4	-4	-5	-6	-7
		Dtransu	0	0	0	-1	-1	-2	-2
		差分	0	3	4	3	4	4	5
	No.2	HGS	-3	-20	-22	-23	-25	-30	-31
		Dtransu	-5	-9	-14	-15	-17	-19	-20
		差分	2	11	8	8	8	11	11
	No.3	HGS	-2	-19	-22	-23	-26	-30	-33
		Dtransu	-5	-11	-14	-16	-16	-20	-22
		差分	3	8	8	7	10	10	11
	No.4	HGS	-2	-20	-23	-24	-26	-31	-33
		Dtransu	-1	-12	-15	-18	-21	-25	-29
		差分	1	8	8	6	5	6	4
MSB-3	No.3	HGS	-17	-33	-35	-36	-37	-40	-42
		Dtransu	-18	-22	-24	-25	-27	-29	-29
		差分	1	11	11	11	10	11	13
	No.4	HGS	-17	-33	-35	-36	-37	-40	-42
		Dtransu	-19	-26	-28	-29	-31	-32	-34
		差分	2	7	7	7	6	8	8
	No.5	HGS	-3	-24	-26	-28	-30	-34	-37
		Dtransu	-1	-21	-24	-27	-31	-37	-40
		差分	2	3	2	1	1	3	3



観測点の水理地質構造区分  
 No.5-OBS : 土岐花崗岩 (UHFD) (Z=-99.4~-107.5)  
 No.12-OBS : 土岐花崗岩 (UHFD) (Z=-265.9~-307.5)

解析値取得位置の水理地質構造区分  
 No.5-HGS : 土岐花崗岩 (UHFD) / 断層  
 No.12-HGS : 土岐花崗岩 (UHFD) / 断層

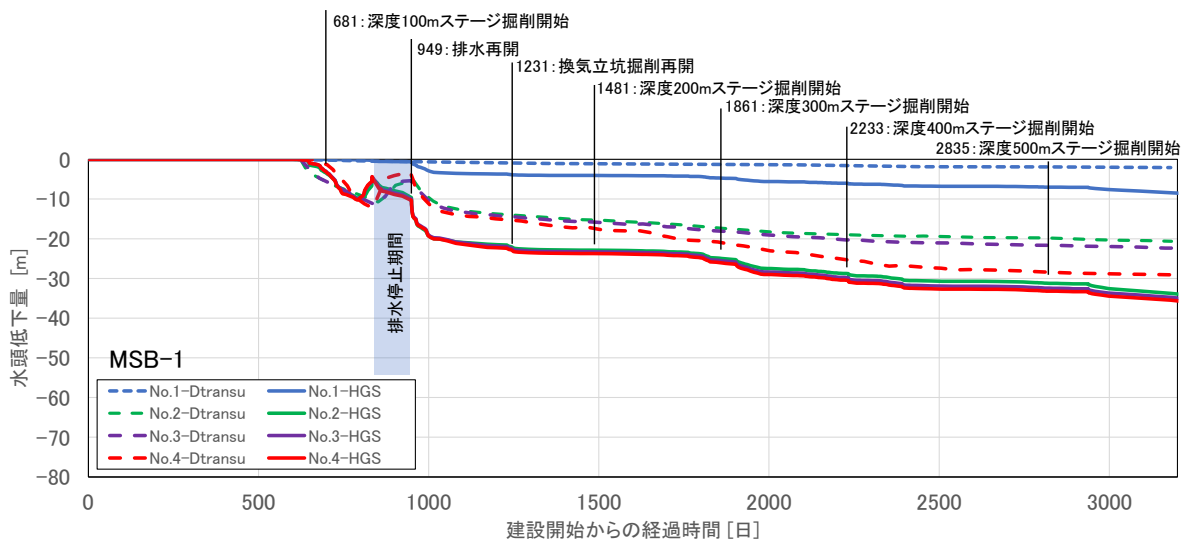
図 5-26 水頭低下量の比較 (DH-2)



観測点の水理地質構造区分  
 No.1-OBS : 土岐花崗岩 (UHFD) (Z=90.1~-25.2)  
 No.3-OBS : 土岐花崗岩 (UHFD) (Z=-84.1~-434.1)

解析値取得位置の水理地質構造区分  
 No.1-HGS : 土岐花崗岩 (UHFD)  
 No.3-HGS : 土岐花崗岩 (LSFD)

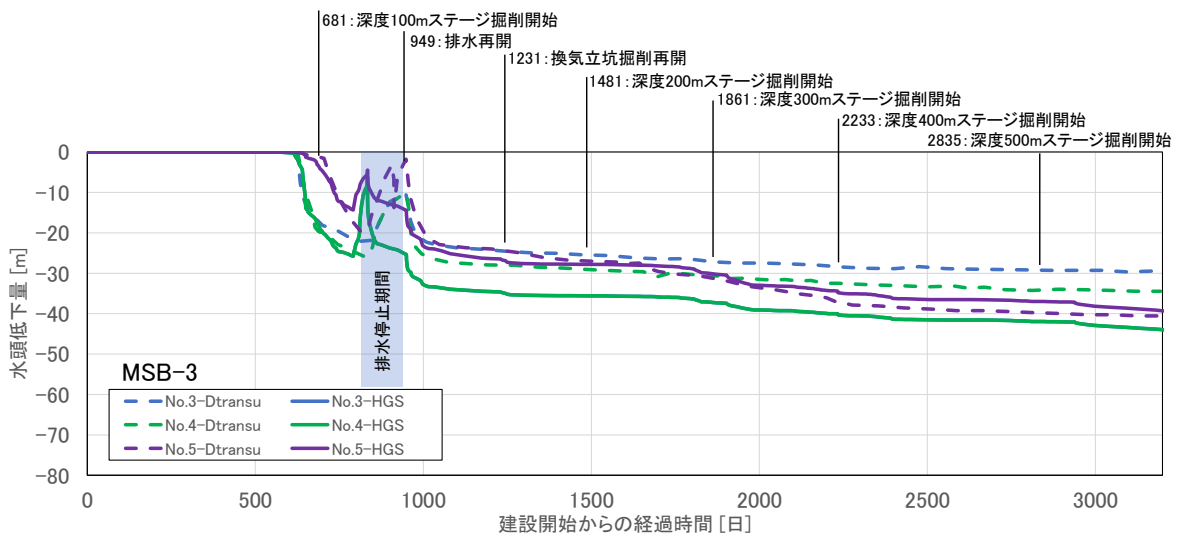
図 5-27 水頭低下量の比較 (MIZ-1)



観測点の水理地質構造区分  
 No.1-OBS: 明世／本郷累層 (Z=186.7~136.8)  
 No.2-OBS: 明世／本郷累層 (基底礫層) (Z=135.9~121.5)  
 No.3-OBS: 土岐夾炭累層 (本体) (Z=120.6~76.8)  
 No.4-OBS: 土岐夾炭累層 (基底礫層) (Z=75.9~58.0)

解析値取得位置の水理地質構造区分  
 No.1-HGS: 明世累層 (本体)  
 No.2-HGS: 明世累層 (基底礫層)  
 No.3-HGS: 土岐夾炭累層 (本体)  
 No.4-HGS: 土岐夾炭累層 (高透水層)

図 5-28 水頭低下量の比較 (MSB-1)



観測点の地質区分  
 No.3-OBS: 主立坑断層 (Z=123.0~117.0)  
 No.4-OBS: 土岐夾炭累層 (本体) (Z=116.2~73.0)  
 No.5-OBS: 土岐夾炭累層 (基底礫層) (Z=72.2~36.8)

解析値取得位置の水理地質区分  
 No.3-HGS: 明世累層 (基底礫層) / 土岐夾炭累層 (本体)  
 No.4-HGS: 明世累層 (基底礫層) / 土岐夾炭累層 (本体)  
 No.5-HGS: 主立坑断層

図 5-29 水頭低下量の比較 (MSB-3)

上記の比較結果から、主立坑側の坑内湧水量及び各観測孔の水頭低下量については、HGS と Dtransu-3D・EL で極端な乖離は認められず、概ね調和的な結果が得られた。換気立坑側の坑内湧水量に見られた HGS の過小評価 (平均 90 m<sup>3</sup>/day の差) については、前節 5.5.3 のモデル校正における検討で示されたように、土岐花崗岩や低角度割れ目集中帯 (LAFZ) に対するスキン効果及びグラウト区間を適切に調整すること (最適モデルであるケース T9 の適用) で、両者の解析結果の整合性をさらに高められることが確認されている。以上の結果を総合的に判断すると、HGS において

TMR 法及びトンネル境界条件を用いて実施した坑内湧水量解析は、Dtransu-3D・EL による解析結果と同等に妥当な結果を導出できる手法であることが確認された。これにより、本検討に用いた HGS の解析コードとしての検証 (Verification) が達成されたと言える。

## 5.6 第 5 章のまとめ

瑞浪超深地層研究所を対象として、施設の建設期間に取得された坑内湧水量及び地下水圧 (全水頭) の実測データと、HGS による解析結果との比較を通じて、坑内湧水量解析・評価技術の妥当性確認を実施した。解析結果は、総湧水量については実測値と概ね整合的な傾向を示しており、地下研究施設の建設に伴う湧水量管理の観点からは、実用上許容できる精度での評価が可能であることが確認された。

一方で、区間湧水量や局所的な水頭低下量については、地質・水理条件の不均質性やモデル化の制約に起因する差異が認められたものの、実際の地質構造に基づくスキン効果及びグラウト区間の適切な調整 (モデル校正) を行うことで、局所的な再現性も向上することが示された。さらに、異なる解析コード (Dtransu-3D・EL) による解析結果との比較により、HGS を用いた解析手法の妥当性が裏付けられ、解析コードとしての検証 (Verification) も達成された。以上より、HGS を用いた段階的なモデル校正と再解析を繰り返し行うことで、坑内湧水量の解析・評価技術の妥当性を示すことができることが確認された。

本業務の実施結果に基づく、今後の展望を以下に整理する。

- ・ 第 4 章で対象とした海外の地下研究施設 (エスポ) は、地表付近の地質環境が比較的均質であったが、本章の検討により、地表付近に被覆堆積層を有し、水理学的な不均質性が高いわが国特有の地質環境条件下 (瑞浪) においても、実測データを用いた HGS の適用性が確認された。この成果は、実際のサイト環境における坑内湧水量及び地下水位解析・評価技術の信頼性向上に大きく寄与するものである。
- ・ 本章で適用した TMR 法及びトンネル境界条件を用いた解析アプローチは、複雑なマルチスケールモデルのシームレスな統合と計算時間の短縮に有効であることが示された。今後、HGS 以外の解析コードにおいても同様の機能が実装されれば適用性がさらに広がると考えられるため、解析コードの開発状況に関する継続的な情報収集が有効である。

## 第6章 結論

本技術報告書では、処分場の建設・操業中の坑内湧水による影響を評価するためのツールのうち、HGS を用いた坑内湧水量解析・評価技術及び地下水位変化解析・評価技術について、その信頼性を担保するための V & V を実施した。具体的には、他の解析コードとの比較による検証 (Verification) と、海外及び国内の地下研究施設を対象に取得された、地質環境条件や建設中の坑内湧水量・地下水位変化の実測データを用いた妥当性確認 (Validation) を行った。これにより、HGS を用いた解析手法の妥当性が裏付けられ、品質保証の技術的根拠が整備されたことが確認された。

### 6.1 各章の検討成果

各章における実施内容と検討成果を以下に整理する。

- ・ 第2章では、数値解析の検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) の考え方と本報告書におけるアプローチを整理し、数値解析に用いる計算コードの特徴及び適用例についてまとめた。
- ・ 第3章では、単一水平坑道モデル及び複雑なモデルを対象とした解析結果を、HGS と 2つの解析コードとの比較により評価した。HGS のトンネル境界条件を用いた場合、理論解及び他コードの解析解と比較して、水平坑道からの湧水を再現できていることを確認した。
- ・ 第4章では、坑内湧水量解析・評価技術に加えて、坑内湧水に伴う地下水位の変化を解析・評価する技術に対して、エスポ地下岩盤研究所の建設前及び建設期間を通じて取得された水理地質構造、坑内湧水量、水圧測定値のデータを活用し、HGS の妥当性を確認した。
- ・ 第5章では、瑞浪超深地層研究所を対象に、施設の建設期間における実測用ボーリング孔を用いた水圧測定値 (全水頭) 及び湧水量を HGS を用いて解析し、実測値との比較を実施した。解析結果と実測値の比較結果を基にした段階的なモデルの校正と再解析を繰り返すことにより、坑内湧水量の解析・評価技術の妥当性を示すことができることを確認した。

### 6.2 坑内湧水量解析・評価技術の品質保証 (V & V) の確認結果

本業務における数値解析の検証 (Verification) では、HGS と ConnectFlow を用いて厳密解と同等の結果が得られることを確認した。さらに、瑞浪超深地層研究所のデータを用いたベンチマーク問題において HGS, ConnectFlow, 及び Dtransu-3D・EL 間の解析結果を比較し、同等の結果が得られることを確認した。また、妥当性確認 (Validation) においては、エスポ地下岩盤研究所及び瑞浪超深地層研究所の建設・運用期間における坑内湧水量の実測データと解析値を比較し、段階的なモデル校正を通じて実測値を概ね再現できることが示された。これらの結果は、HGS を用いた坑内湧水量解析技術の V & V に関する技術的根拠として十分な妥当性を有すると判断される。

### 6.3 今後の展望

本業務の実施結果に基づき、今後の技術的な展望を以下に整理する。

- ・ 第4章で対象とした海外の地下研究施設 (エスポ) は、地下施設へ引き込む地下水の集水域が狭く、地表から地下研究施設を設置する岩盤までの地質環境のうち、特に地表付近 (深度 300 m 以浅) が我が国と比較して均質な地質環境条件下での成果であった。これに対し、地下水の集水域が広く、地表付近に被覆堆積層を有し不均質性が高い我が国特有の地質環境条件

下（瑞浪）において実測データを利用した妥当性確認を実施したことは、実際のサイト環境における坑内湧水量及び地下水位解析・評価技術の信頼性向上に大きく寄与するものである。

- ・ 本検討で適用した TMR 法及びトンネル境界条件を用いた解析アプローチは、複雑なマルチスケールモデルのシームレスな統合と計算時間の短縮に有効であることが示唆された。今後、HGS 以外の解析コードにおいても同様の機能が実装されれば適用性がさらに広がると考えられるため、解析コードの開発状況について継続的な情報収集を実施することが有効である。

## 参考文献

- Aquanty (2015) : HydroGeoSphere Verification Manual Release 1.0, Aquanty Inc., Canada.
- Aquanty (2018) : A Tunnel Boundary Condition in HGS to Improve Numerical Precision in Simulating Groundwater Flow into Underground Openings, Technical note, Aquanty Inc., Canada.
- Hedman, T (1999) : Experience from design and const, International Progress Report, IPR-99-05.
- Jacobs (2020a) : Connect Flow Release 12.2 Technical Summary Document.
- Jacobs (2020b) : NAMMU Release 12.2 Technical Summary Document.
- Jacobs (2020c) : Connect Flow Release 12.2 Verification Document.
- JAEA (2022) : 超深地層研究所計画で得られた研究成果,  
<https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/history/5.html> (2026年3月30日閲覧)
- JANSI (2021) : 原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン,  
JANSI-GQA-01.
- 見掛信一郎, 池田幸喜, 松井裕哉, 辻正邦, 西垣誠 (2018) : 高圧湧水下におけるプレグラウチングとポストグラウチングを併用した湧水抑制効果の評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.74, No.1, pp.76-91.
- 野原壯, 三枝博光, 岩月輝希, 濱克宏, 松井裕哉, 見掛信一郎, 竹内竜史, 尾上博則, 笹尾英嗣 (2016) : 超深地層研究所計画における研究坑道の掘削を伴う研究段階 (第2段階) 研究成果報告書, JAEA-Reserch 2015-026.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03 付属書 2-9 「数値解析の信頼性確保の考え方」.
- 尾上博則, 小坂寛, 竹内竜史, 三枝博光 (2015) : 超深地層研究所計画 (岩盤の水理に関する調査研究) 第2段階におけるサイトスケールの水理地質構造モデルの構築, JAEA-Research 2015-008.
- 尾上博則, 三枝博光, 竹内竜史 (2016) : 超深地層研究所計画の研究坑道の掘削を伴う研究段階における地下水流動のモデル化・解析, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.72, No.1, 13-26, pp.18-19.
- 尾上博則, 竹内竜史 (2020) : 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測データ集 2019年度, JAEA-Data/Code 2020-015.
- Millero, F.J. (2010) : History of the equation of state of seawater. Oceanography, 23, 18-33.

- Park, Y.-J., Hwang, H.-T., Suzuki, S., Saegusa, H., Nojiri, K., Tanaka, T., Bruines, P., Abumi, K., Morita, Y., Illman, W. A. (2020) : Improving precision in regional scale numerical simulations of groundwater flow into underground openings, *Engineering Geology*, Vol.274.
- Rhén, I., Gustafson, G., Wikberg, P. (1997) : ÄSPÖ HRL – Geoscientific evaluation 1997\_4 Results from pre-investigations and detailed site Characterization Comparison of predictions and observations Hydrogeology, groundwater chemistry and transport of solutes, SKB report TR-97-05.
- Rhén, I., Smellie, J. (2003) : Task force on modelling of groundwater flow and transport of solutes, Task 5 Summary report, SKB TECHNICAL REPORT TR-03-01.
- Rhén, I., Hartley, L., Jackson, P., Roberts, D., Swan, D. (2008) : Hydrogeological conceptualization and parameterization Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar, SKB REPORT R-08-78.
- 三枝博光, 尾上博則, 石橋正祐紀, 田中達也, 鏡頭正, 橋本秀爾, Bruines, P. (2015) : 割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法開発に関わる検討, JAEA-Reserch 2015-011.
- SKB (2017) : Äspö Hard Rock Laboratory – Annual Report 2016, SKB TR-17-10.

## 付録1 TMR 法の概要

### 1. 概要

地層処分施設の坑内湧水量解析で取り扱う水理地質構造モデルは、水平方向の広がりがあるが 10 km から 100 km に達するが、地層処分施設を構成する坑道断面及び坑道支保や EDZ などの要素の大きさは 1 cm から 10 m である。坑道からの湧水量を求める際には地下施設の各要素の形状を表すことができるスケールで解析メッシュの要素寸法を設定する必要があるが、同じ要素寸法を広域的な地下水流動の解析に設定すると解析メッシュ数<sup>1</sup>が膨大となる。最先端の計算機技術をもって天文学的な要素数を対象とする地下水流動解析を実施することは不可能であるため、空間スケールが異なる二つの解析領域で適切な要素寸法を設定し、異なるスケール間で圧力、流量、物質質量などを境界条件として引き渡す数学的手法が検討されてきた。このような代表的な方法としては、ネスティング法及び TMR 法が挙げられる。

このうち、TMR 法は、広い領域（広域スケール）と狭い領域（サイトスケール）で異なる要素寸法のモデルを作成し、広域スケールモデルとサイトスケールモデルの、境界条件情報を逐次的に更新、整合したうえで、二つの解析を同時並行に実行することで、水理的な連続性を確保したうえで、地下水流動解析を実施する方法論である。ネスティング法と比較して、TMR 法では広域スケールとサイトスケールモデルの要素寸法の差異の制約がないといった利点がある。

付図 1-1 に、TMR 法適用方法の概念図を示す。広域スケールモデルからデータセットを抽出してサイトスケールモデルを構築するためには、広域スケールモデルから提供される境界条件（値）と共に、サイトスケールモデルの水平及び垂直方向の範囲とグリッドの空間分解能を事前に定義する。それに応じてサイトスケールモデルのグリッドを生成し、広域スケールモデルからの情報を処理して、指定されたサイトスケールモデルに必要な境界条件を適用する（補間法やマッピング法）。

サイトスケールモデルの解析が完了した後、広域スケールモデルの解析結果と比較して、両モデルの再調整の必要性を判断する。

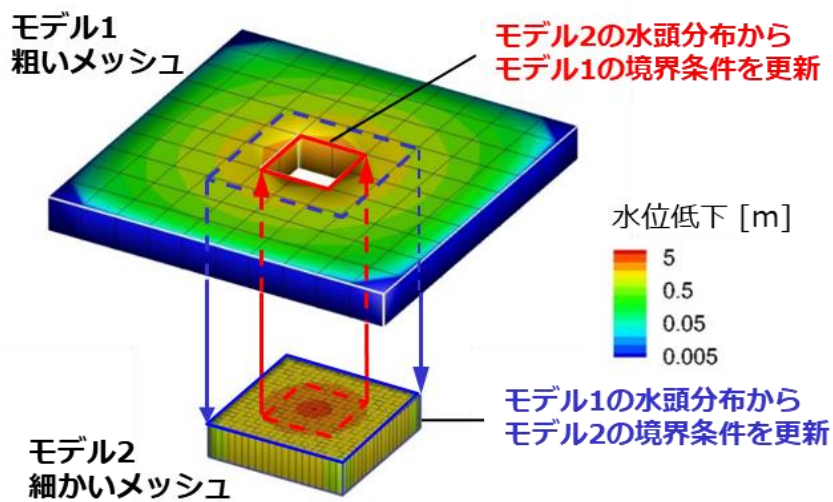
### 2. 数値モデル化、数値解析の原理

#### 2.1. サイトスケールモデルのグリッド生成方法

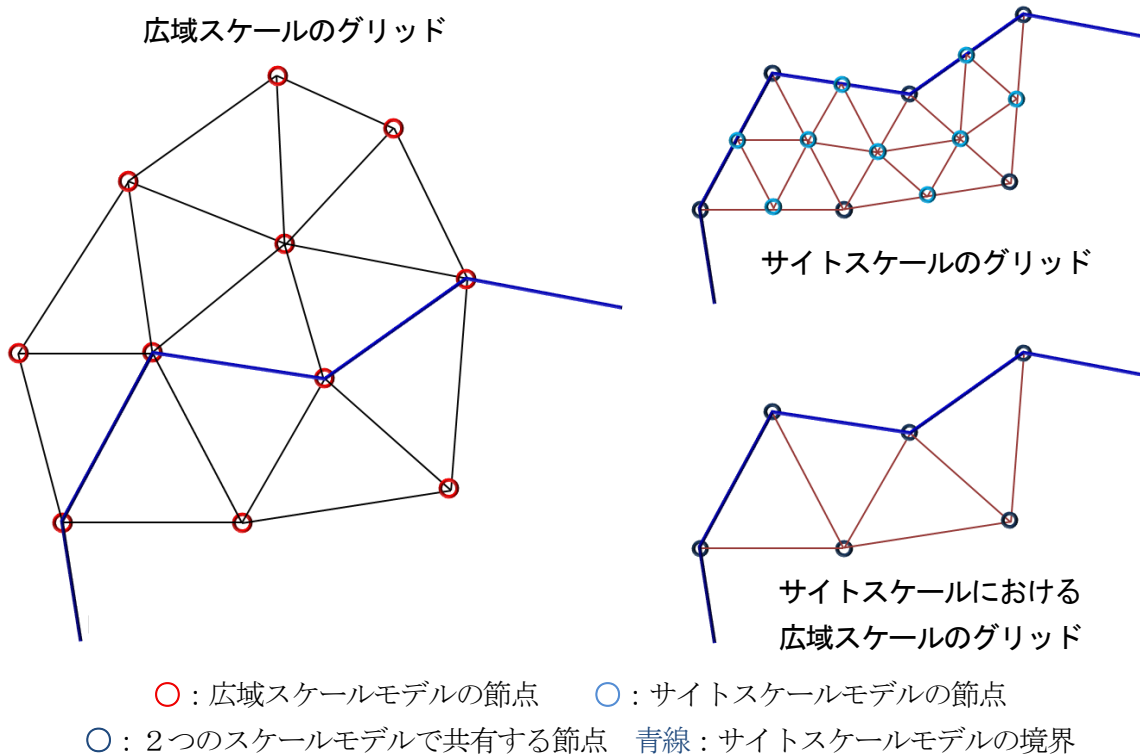
広域スケールモデル内にサイトスケールモデルのグリッドシステムが事前に定義されている場合を除いて、サイトスケールモデルの範囲が与えられていると仮定すると、サイトスケールモデルのグリッドは、広域スケールモデルのグリッドシステムから指定された空間分解能のグリッドに体系的に変換することができる。サイトスケールモデルとそのグリッドの定義を付図 1-2 に示す。

---

<sup>1</sup> 例えば、10 km×10 km×5 km の領域を 1 m の要素寸法で記述すると  $5 \times 10^{11}$  個という要素数になる。



付図 1-1 TMR 法の概念図



付図 1-2 広域スケールモデルとサイトスケールモデルのグリッドの定義

## 2.2. 適用可能な境界条件の定義

広域スケールモデル内に構築するサイトスケールモデルの外側境界に沿って、広域スケールモデルと関連するための境界条件を定義する。TMR法では、境界の節点に従属変数（圧力、濃度）の値を設定する境界条件（第1種 ディリクレ境界）、境界の線、あるいは面に従属変数（圧力、濃度）の微分値を設定する境界条件（第2種 ノイマン境界）、及び境界上に従属変数の値と微分値を組み合わせて設定する境界条件（第3種 コーシー境界）を選定・適用する。

## 2.3. 境界値の補間法、マッピング法

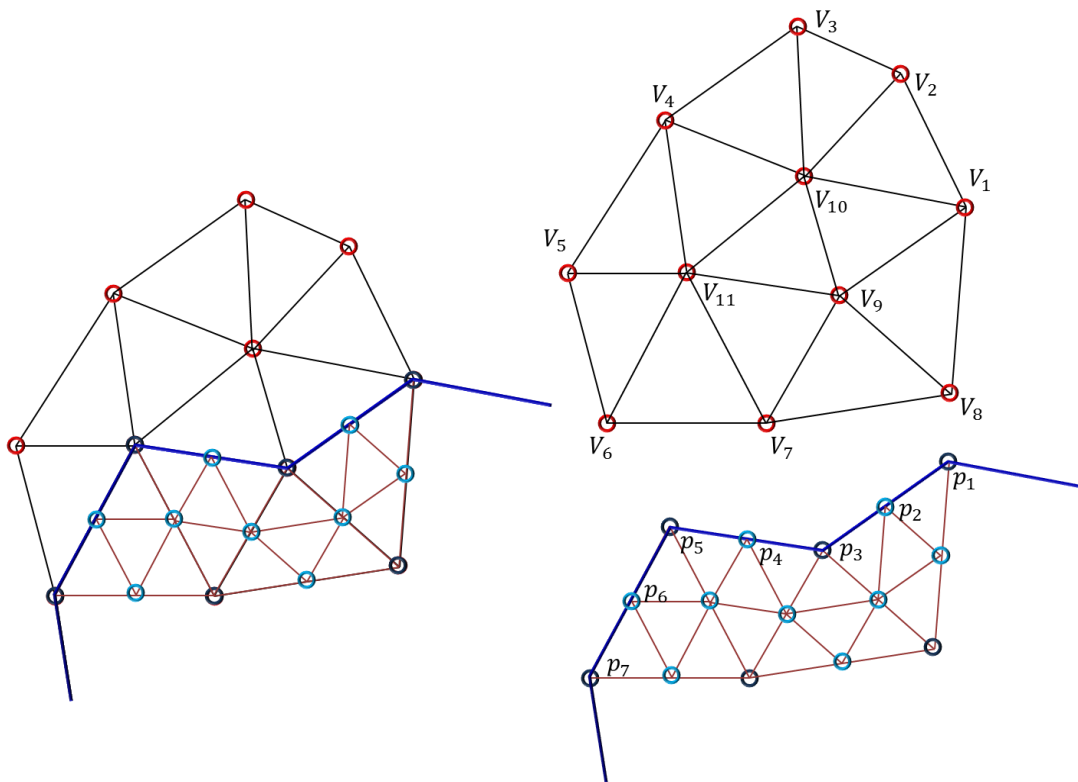
サイトスケールモデルの外周（境界）に沿った従属変数の値を規定するには、広域スケールモデルの出力値を補間する必要がある（付図 1-3）。その際、線形補間を適用すると、その値は次式により求められる。

$$p_j = \sum_i w_i V_i \quad (1-1)$$

ここで、 $p$ は外周（境界）沿いに規定される従属変数、 $V$ は広域スケールから得られる従属変数（既知）、 $w_i$ は $\sum_i w_i = 1$ を満たす既知の値に対する重みを表す。 $w_i$ には幾つかの方法を適用することができる。例えば、逆距離加重法は探索半径（距離）が事前に選択されている最も一般的な方法である。

$$w_i \propto \|x_j - X_i\| \quad \text{when } \|x_j - X_i\| \leq r_s \quad (1-2)$$

$$w_i = 0 \quad \text{when } \|x_j - X_i\| > r_s \quad (1-3)$$



○ : 広域スケールモデルの節点    ○ : サイトスケールモデルの節点

○ : 2つのスケールモデルで共有する節点    青線 : サイトスケールモデルの境界

付図 1-3 広域モデルの出力値 (Vi) に基づいてサイトモデルの境界部の変数 (pi) を補間法により設定する方法 (概念)

サイトスケールモデルの境界に沿ってノイマン型の境界条件を適用するために、従属変数の微分値あるいは値をサイトスケールモデル境界に沿って評価する必要がある (付図 1-4)。

$$\left(\frac{\partial p}{\partial n}\right)_j = f(V_i) \text{ and } p_j = g(V_i) \quad (1-4)$$

従属変数の線形補間と同様に、関数  $f(V_i)$  及び  $g(V_i)$  は、以下のような単純な方法で評価する。

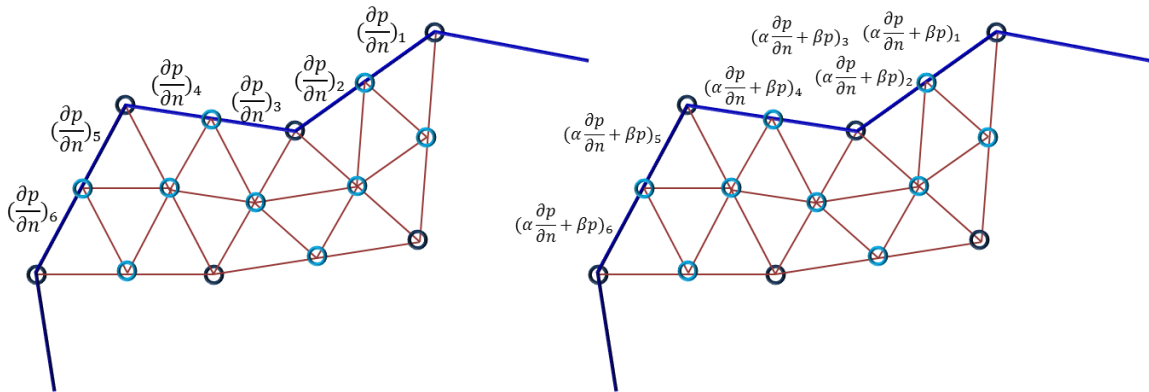
$$f(V_i) = \sum_i w_{fi} \left(\frac{\partial v}{\partial n}\right)_i \text{ and } g(V_i) = \sum_i w_{gi} V_i \quad (1-5)$$

従属変数のある値、または微分値の情報が広域スケールモデルからサイトスケールモデルに移転された場合、一方へ従属変数の値が移転された場合には他方の微分値を、あるいは一方へ微分値が移転された場合には他方の従属変数の値を、解析により確認することで二つのモデル間の境界における一貫性を保証する。

したがって、サイトスケールモデルの境界に沿った広域スケールモデルとの全体的な差を評価することが重要である。一般に、その差は以下のように定量化する。

$$R = \gamma \int_P \|p - V\| dP + \delta \int_P \|\partial p / \partial n - \partial V / \partial n\| dP \quad (1-6)$$

境界条件のマッピング法及び補間法は、残差 R が許容レベルよりも小さくなるまで反復する。



付図 1-4 広域モデルの出力値 (Vi) に基づいてサイトモデルの境界に第 2 種, 第 3 種境界条件を設定する方法 (概念)

## 付録2 ConnectFlow を用いた地下水流動解析の事例

ConnectFlow を用いた地下水流動解析の適用事例を調査した結果と NUMO が過去に実施した適用事例を付表 2-1 及び付表 2-2 に整理した。

付表 2-3 ConnectFlow を用いた地下水流動解析の事例（国外）

文献名 機関 巻数	発行	著者	概要
Regional hydrogeological simulations for Forsmark-numerical modelling using CONNECTFLOW Preliminary site description Forsmark area version 1.2 SKB R-05-32	2005	Hartley, L., Cox, I., Hunter, F., Jackson, P., Joyce, S., Swift, B., Assurance, S.	スウェーデンの Forsmark サイトを対象にした割れ目ネットワークモデルに基づく等価不均質連続体モデルの構築と広域スケールモデルを用いた海水準変動を考慮した長期的な地下水流動・物質移行解析
Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modeling stage 2.2 SKB R-07-48	2007	Follin, S., Levén, J., Hartley, L., Jackson, P., Joyce, S., Roberts, D., Swift, B.	スウェーデンの Forsmark サイトを対象にしたブロックスケールの割れ目ネットワークモデルの構築
Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark SKB R-09-20	2010	Joyce, S., Simpson, T., Hartley, L., Applegate, D., Hoek, J., Jackson, P., Swan, D., Marsic, N., Follin, S.	スウェーデンの Forsmark サイトを対象にした割れ目ネットワークモデルに基づく等価不均質連続体モデルを用いた長期的な海水準変動を考慮した地下水流動・物質移行解析
Calculation of open repository inflows for Forsmark SKB R-13-21	2013	Joyce, S., Swan, D., Hartley, L.	スウェーデンの Forsmark サイトを対象にした連続体モデルと割れ目ネットワークモデルのハイブリッドモデルを用いた処分坑道及び処分孔への湧水量の予測解析
Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes Task 7 - Subsurface flow and transport modelling of hydraulic tests and in situ borehole flow measurements conducted at Olkiluoto Island SKB R-13-42	2015	Frampton, A., Gotovac H., Holton, D., Cvetkovic V.	フィンランドの ONKALO サイトにおけるブロックスケールの亀裂ネットワークモデルを用いた孔間透水試験シミュレーション
Exploring conditioned simulations of discrete fracture networks in support of hydraulic acceptance of deposition holes Application to the ONKALO demonstration area Posiva SKB Report 07	2018	Baxter S., Appleyard P., Hartley L., Hoek J., Williams T.	ConnectFlow を用いた ONKALO 内の Demonstration Tunnel 周辺の割れ目ネットワークモデルの構築及び湧水量の評価

付表 2-4 ConnectFlow を用いた地下水流動解析の事例（国内）

文献名 機関 巻数	発行	著者	概要
岩盤中の透水構造分布に着目した水理地質構造モデルの構築手法の検討 JAEA-Research 2012-022	2007	田中達也, 安藤賢一, 橋本秀爾, 三枝博光, 竹内真司, 天野健治	瑞浪超深地層研究所周辺の地表ボーリングデータを用いたブロックスケールの割れ目ネットワークモデルの構築
割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法開発に関する検討 JAEA-Research 2015-011	2015	三枝博光, 尾上博則, 石橋正祐紀, 田中達也, 鏝頭正, 橋本秀爾	瑞浪超深地層研究所周辺の岩盤を対象にした割れ目ネットワークモデル及び等価不均質連続体モデルの構築とサイトスケール領域の地下水流動解析の実施

## 付録3 トンネル境界条件法の概要

### 1. 概要

三次元水理地質構造モデル内に地層処分の地下施設を構成する各坑道を配置したモデルを構築する方法としては、坑道の線形と断面を精緻にモデル化する方法（Explicit法）と、坑道における湧水や排水及びそれに伴う水頭の低下を再現するように内部境界条件を節点に設定することによってモデル化する方法（トンネル境界条件法）がある。

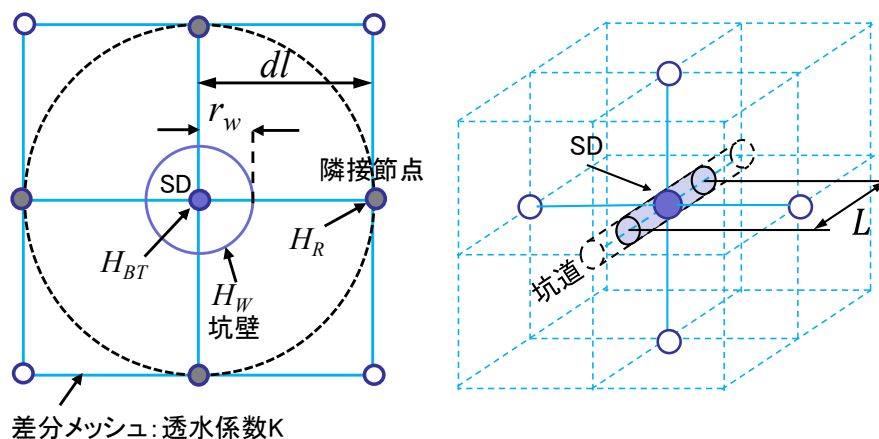
前者は、坑道の断面形状を再現するように複数の要素を用いてモデルを作成する必要があるため、坑道周辺の多くの節点にディリクレ境界条件を設定する必要がある。地層処分の地下施設のように複雑に配置されたすべての坑道を三次元で数値モデル化する場合には、モデル化作業と計算の負荷がともに高くなる。

後者は坑道に相当する境界条件を各節点に設定するため、坑道の断面形状を再現可能な適切な境界条件が設定できれば、前述のような坑道の精緻なモデリングは不要となり、結果として、モデル化作業にかかる時間と共に、計算の負荷も減じることが可能である。この境界条件としては大気圧開放を想定した固定水頭境界条件、または、周辺の水頭分布から湧水量を算出し、この湧水量を境界条件として与える方法がある。本検討で採用するトンネル境界条件法は、後者の方法により、処分場の地下施設の坑道を水理地質構造モデルに反映する手法である。

HGSにおいては、トンネル境界条件法を適用することによって、坑道の掘削による水理場（水圧環境）への影響を考慮した地下水流動解析が可能となる。

### 2. 数値モデル化、数値解析の原理

トンネル境界条件法は、掘削する坑道の線形に基づいて設定する節点（付図 3-1 中の SD）に、放射状流の理論解を適用することで、節点への湧水量を高精度に計算する手法である。付図 3-2 にトンネル境界条件法の原理とトンネル境界条件法に用いられる各坑壁水頭値の関係を模式的に示す。



付図 3-1 トンネル境界条件法の原理

トンネル境界条件法は、着目する節点（付図 3-1 中の SD）の湧水量を、式 (3-1) の隣接節点（付図 3-1 の灰色の点 4 つ）から透水係数と圧力水頭差による湧水量の計算値（QN）と、式 (3-2) の放射状流の理論解の値（QA）が等価とすることで導出される。

$$\frac{Q_N}{L} = -4K(H_R - H_{BT}) \quad (3-1)$$

$$\frac{Q_A}{L} = -\frac{2\pi K(H_R - H_w)}{\ln\left(\frac{dl}{r_w}\right)} \quad (3-2)$$

式 (3-1) と式 (3-2) より  $H_R$  を消去すると、節点 (付図 3-1 中の SD) における流量を表す式 (3-3) が導かれる。

$$Q = -\frac{4\pi KL}{\ln\left(\frac{dl}{r_w}\right) - \pi} (H_{BT} - H_w) \quad (3-3)$$

付図 3-2 は、坑道周辺に掘削損傷領域 (Excavated Damaged Zone : 以下、「EDZ」という) 及び、グラウトにより坑内湧水を抑制した場合に生じる湧水抑制対策工範囲 (グラウトゾーン) (Grouted Zone : 以下、「GZ」という) 及び、岩盤のそれぞれの透水係数、圧力水頭及び坑道からの距離を示す。この、EDZ、GZ 及び岩盤と透水係数の異なる領域が存在する場合に、式 (3-3) を適用する方法を述べる。

$$\frac{Q_R}{L} = -\frac{2\pi K(H_R - H_G)}{\ln(dl/r_G)} \quad (3-4)$$

$$\frac{Q_{EDZ}}{L} = -\frac{2\pi K_G(H_G - H_{EDZ})}{\ln(r_G/r_{EDZ})} \quad (3-5)$$

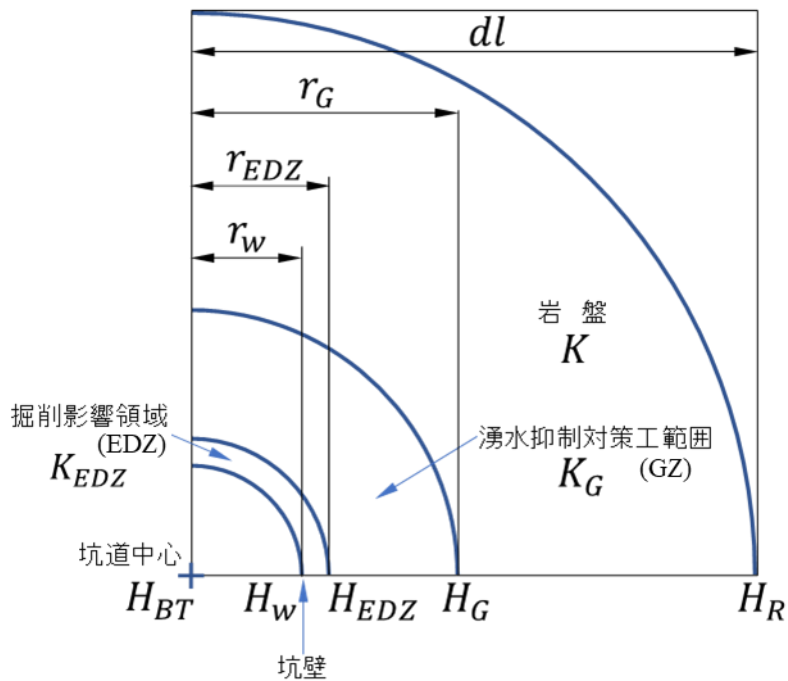
$$\frac{Q_G}{L} = -\frac{2\pi K_{EDZ}(H_{EDZ} - H_w)}{\ln(r_{EDZ}/r_w)} \quad (3-6)$$

式 (3-4) から (3-6) に、岩盤、EDZ、GZ のそれぞれの領域における単位距離当たりの湧水量を示す。これらの式より、 $H_R$ 、 $H_G$ 、 $H_{EDZ}$  を消去し整理することで、式 (3-7) に示す坑道周辺における等価透水係数 ( $\bar{K}$ ) が求まる。

$$\bar{K} = \frac{\ln(dl/r_w)}{\frac{\ln(dl/r_G)}{K} + \frac{\ln(r_G/r_{EDZ})}{K_G} + \frac{\ln(r_{EDZ}/r_w)}{K_{EDZ}}} \quad (3-7)$$

この等価透水係数を用いて、坑道壁面と節点間の圧力水頭差より、トンネル境界条件法による節点の湧水量を求める式 (3-8) が導出される。

$$Q = -\frac{4\pi KL}{2\left[\frac{K}{\bar{K}}\right]\ln\left(\frac{dl}{r_w}\right) - \pi} (H_{BT} - H_w) \quad (3-8)$$



付図 3-2 トンネル境界条件法を適用する坑道と坑道周囲に設定する圧力水頭 (H), 透水係数 (K) 及び半径 (r) の関係

付表 3-1 トンネル境界条件法の数学的定式化において使用する記号

$r$	: 坑道半径 [L]
$q$	: 単位長さあたりの漏水量 [ $LT^{-1}$ ]
$c$	: 漏水抵抗 (コンダクタンス) [ $T^{-1}$ ]
$h$	: 対象節点の水頭値 [L]
$H$	: 坑壁水頭値 [L]
$Q$	: 湧水量 [ $L^3T^{-1}$ ]
$K$	: 岩盤の透水係数 [ $LT^{-1}$ ]
$\bar{K}$	: 掘削影響領域, 湧水抑制対策工を考慮した坑道周りの透水係数 [ $LT^{-1}$ ]
$dl$	: 隣接節点との距離 [L]
$H_{BT}$	: 坑道中心における圧力水頭値 (トンネル境界条件節点の水頭値) [L]
$H_w$	: 坑壁の水頭値 [L]
$H_R$	: 坑道中心から見た隣接節点の圧力水頭 [L]

## 付録4 エスポ地下岩盤研究所に関する情報

### 1. エスポ地下岩盤研究施設の概要

エスポ地下岩盤研究所は、SKB がスウェーデン南西部のエスポに建設した高レベル放射性廃棄物処分のための地下研究施設である。エスポはバルト海の内湾に位置する東西 1.5 km、南北 1 km 程度の島であり、島の最高標高は約 15 m で全体的に平坦である。

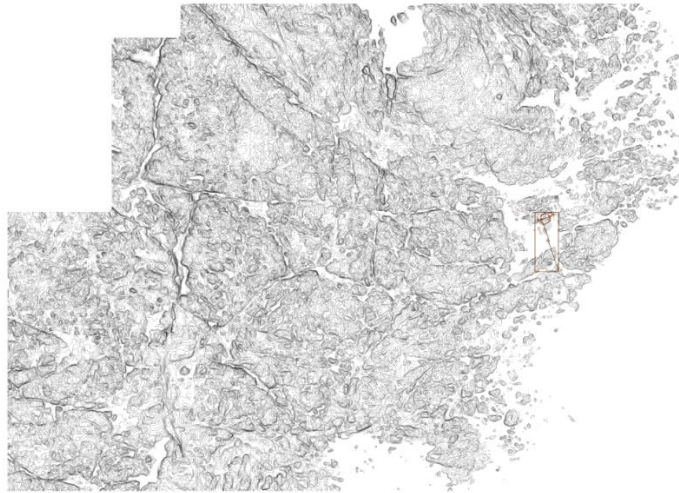
### 2. エスポ地下岩盤研究施設の評価対象データの整理

付表 4-1 エスポ地下岩盤研究施設の評価データ項目一覧表（地形・地質関連）

データ項目	内容	参考文献
地形	陸域の表層地形データ	SKBdoc 1893423: ID 4 Topography data (Digital elevation model)
地表水系	集水域、河川、湖沼の分布データ	SKBdoc 1893423: ID 5 Location of water system (river, lake, pond, coastline and so on)
第四紀堆積岩類 (表層土)	層厚の点群データ	SKBdoc 1893423: ID 6 Distribution of quaternary soil layers
Deformation Zone (広域)	大規模な Deformation Zone のジオメトリデータ (CAD 図面)	SKBdoc 1893423: ID 7 Geometry of large scale fault zone
Local Deformation Zone (エスポ周辺)	エスポ島周辺の Deformation Zone のジオメトリデータ (CAD 図面)	SKBdoc 1893423: ID 8 Geometry of large scale fracture around tunnel
Deformation Zone の水理特性	掘削工事情報が記載された業務レポート	SKBdoc 1893423: ID 10 Transmissivity/ hydraulic conductivity of large scale fault zone and fracture (Vidstrand 2003)

#### 2.1. 地形

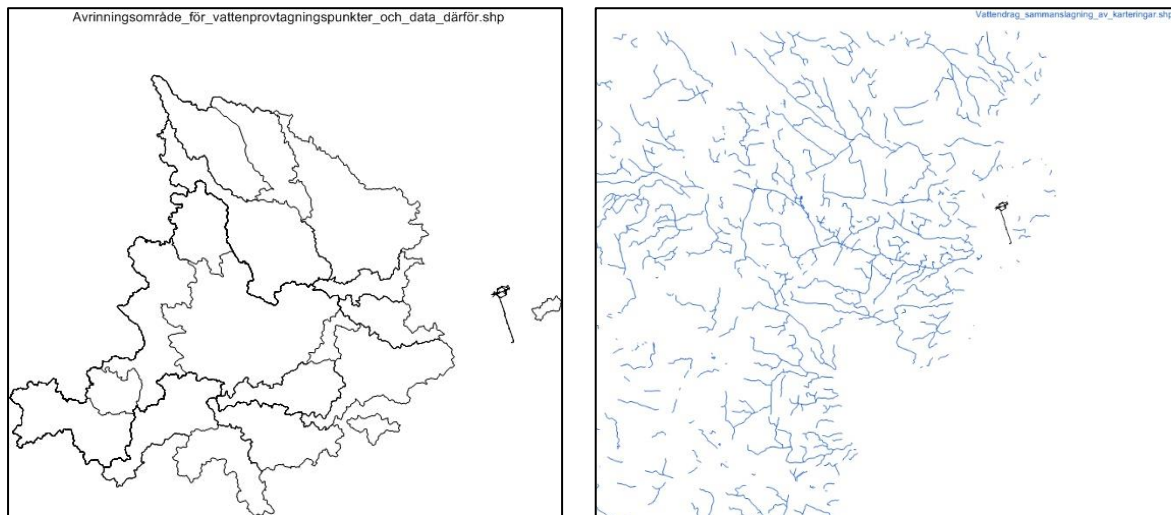
エスポ地下岩盤研究施設を含む地形図を付図 4-1 に示す。入手したデータには、海底地形データが含まれていなかったため、General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) が提供する公開データ ([https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)) より別途、対象領域の海底地形に関するデータを入手した。



付図 4-1 地形データ  
(SKB より提供された shp ファイルを可視化)

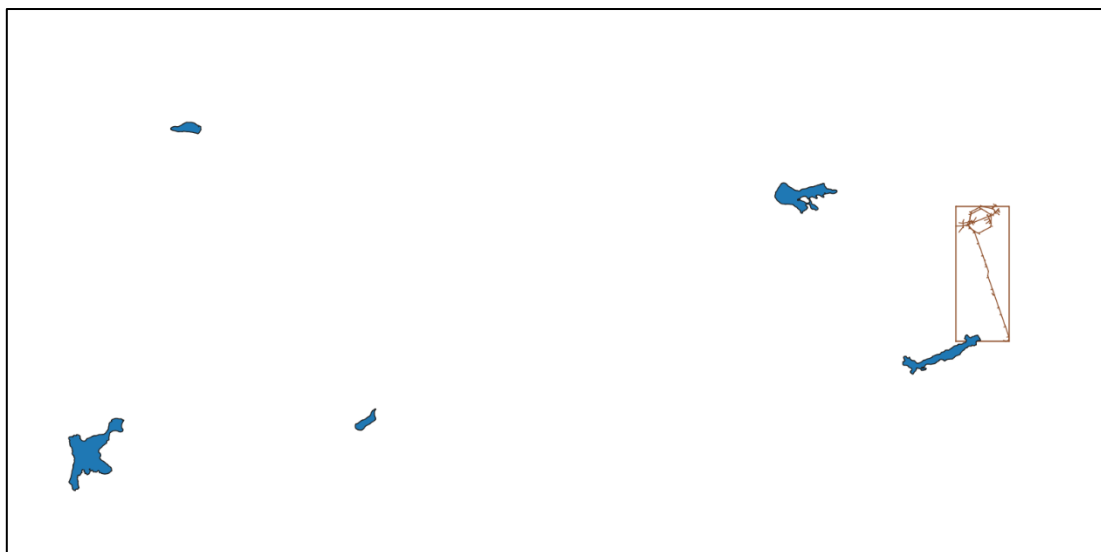
## 2.2. 地表水系

集水域、河川及び湖沼の分布図を付図 4-2 に示す。集水域は複数の領域に分かれているがエスポ地下研究施設周辺は海で囲まれているため、その集水域は図上では境界が示されていない（付図 4-2 (a) 参照）。また、研究施設周辺には河川はほとんど分布しておらず、近くに湖沼も分布していない（付図 4-2 (a) 及び (b) 参照）。



(a) 集水域

(b) 河川



(c) 湖沼

付図 4-2 集水域、河川及び湖沼の分布図  
(SKB より提供された shp ファイルを可視化)

### 2.3. 第四紀堆積岩類（表層土）

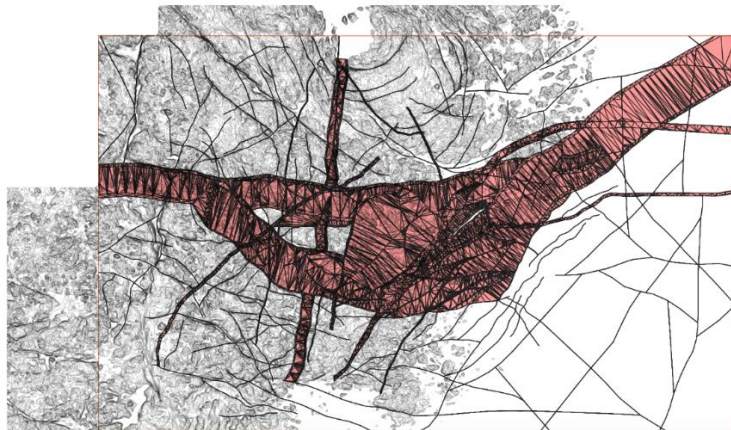
第四紀堆積岩類（表層土）の厚さ分布図を付図 4-3 に示す。同図は、第四紀堆積岩類（表層土）の厚さの点群を可視化したものである。



付図 4-3 第四紀堆積岩類（表層土）の厚さの点群データ  
(SKB より提供された shp ファイルを可視化)

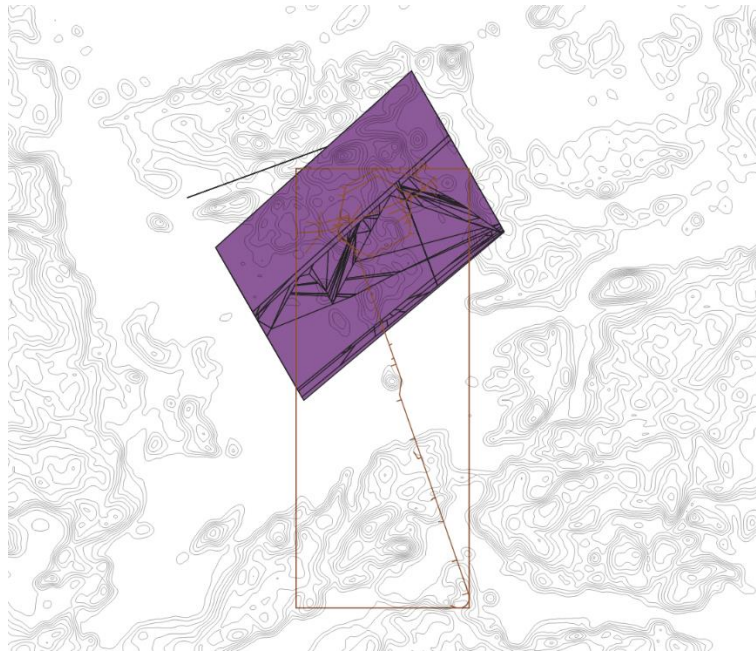
### 2.4. Deformation Zone

広域的に分布する Deformation Zone を付図 4-4 に示す。また、エスポ島周辺に分布する Local Deformation Zone を付図 4-5 に示す。



背景図：地形データ

付図 4-4 広域的に分布する Deformation Zone の分布  
(SKB より提供された dwg ファイルを可視化)



背景図：地形データ

付図 4-5 エスポ島周辺に分布する Local Deformation Zone の分布図  
(SKB より提供された dwg ファイルを可視化)

### 3. 地下岩盤研究施設建設のデータの整理結果

エスポ地下岩盤研究施設の地下岩盤研究施設建設のデータ一覧を付表 4-2 に示す。整理結果の詳細を以下に述べる。

付表 4-2 エスポ地下岩盤研究施設の評価データ項目一覧表（地下岩盤研究施設関連）

データ項目	内容	参考文献
坑道	研究施設（坑道、立坑）の位置、ジオメトリデータ（CAD 図面）	SKBdoc 1893423: ID 1 Location and geometry of Äspö HRL (galleries and shaft)
坑道掘削工事（1）	掘削工事情報が記載された技術レポート	SKBdoc 1893423: ID 2 Äspö HRL construction process
坑道掘削工事（2）	掘削工事情報が記載された技術レポート 湧水量観測堰掘削通過日、イベント	Rhen et al. 1998: SKB INTERNATIONAL PROGRESS REPORT IPR-02-57
坑道グラウトゾーン	グラウト施工情報が記載された技術レポート	SKBdoc 1893423: ID 12 Location and hydraulic conductivity of grouted zone

### 3.1. 坑道掘削工事に関する情報

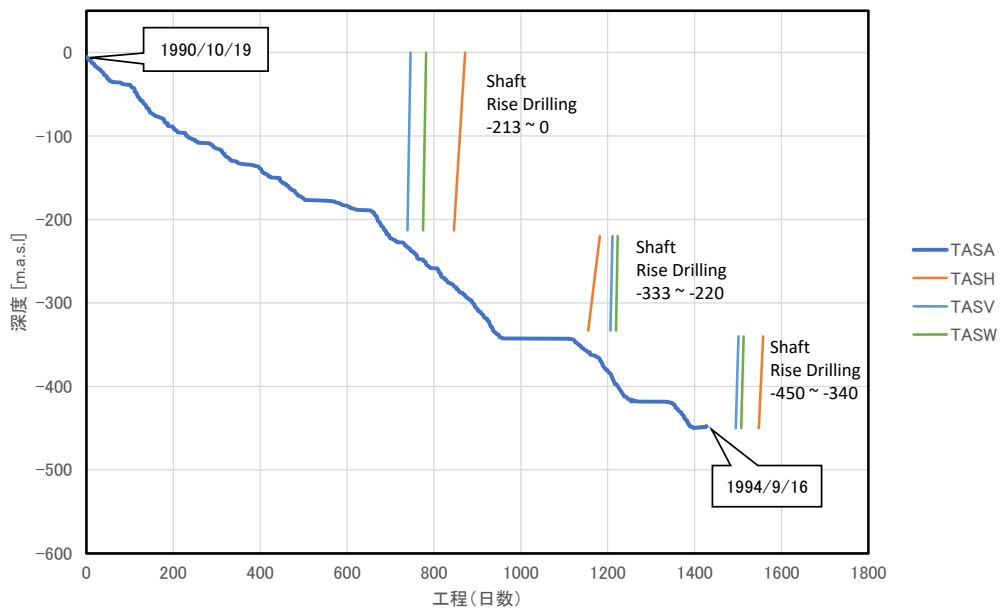
エスポ地下岩盤研究施設の坑道掘削工事は、1990年10月19日から1994年9月16日までの約5年間に実施された。付表 4-3 にシャフトの掘削スケジュールを示し、また、付表 4-4 に主トンネルの掘削スケジュールを示す。これらの情報をもとに付図 4-6 に示す工事の進捗図を作成した。また、付図 4-7 に坑道レイアウトを示す。

付表 4-3 シャフトの掘削スケジュール  
(IPR-02-57 (Rhen et al., 1998) を再構成)

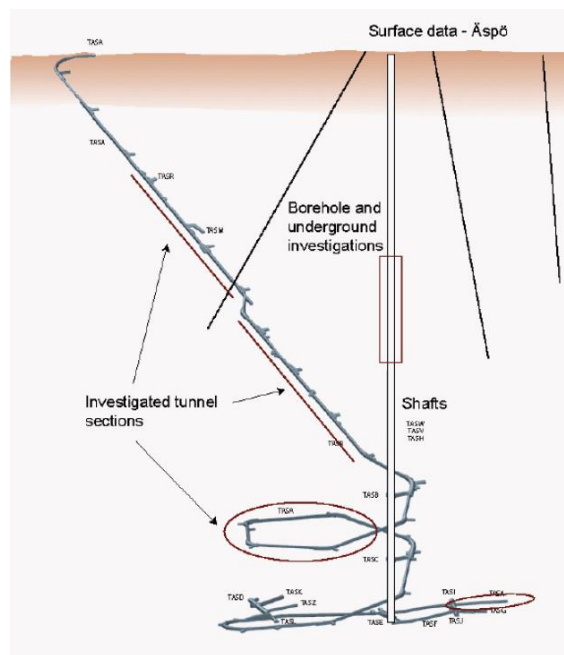
Name	Code	Level(z) secup	seclow	Function	Penetration of pilot hole into tunnel	Rise drilling
RAS01	TASV213	0	-213	Ventilation-in	1992-10-25	1992-10-27
RAS02	TASW213	0	-213	Ventilation-out	1992-12-01	1992-12-02
RAS03	TASH213	0	-213	Elevator	1993-02-05	1993-02-11
RAS01	TASV333	-220	-333	Ventilation-in	1994-02-05	1994-02-06
RAS02	TASW333	-220	-333	Ventilation-out	1994-02-19	1994-02-19
RAS03	TASH333	-220	-333	Elevator	1993-12-15	1993-12-17
RAS01	TASV450	-340	-450	Ventilation-in	1994-11-22	1994-11-22
RAS02	TASW450	-340	-450	Ventilation-out	1994-12-04	1994-12-04
RAS03	TASH450	-340	-450	Elevator	1995-01-14	1995-01-14

付表 4-4 主トンネルの掘削スケジュール  
 (IPR-02-57 (Rhen et al., 1998) を再構成)

Dam/Event	Time	Comment
MA0682G	1991-05-23	
MA1030G	1991-11-26	
MA1232G	1992-02-13	
MA1372G	1992-06-29	
MA1584G	1992-09-09	
MA1745G	1992-11-02	
MA1883G	1992-12-10	
MA2028G	1993-01-21	
MA2178G	1993-03-08	
MA2357G	1993-04-19	
MA2496G	1993-05-11	
	1993-06-15	Stop of excavation at chainage 2600 m.
	1993-11-01	Start of excavation at chainage 2600 m.
MA2694G	1993-12-02	
MA2840G	1994-01-19	
	1994-01-24	Passage of chainage 2870 m.
MA2994G	1994-02-15	
MA3179G	1994-04-21	
	1994-06-16	Start of drilling with TBM.
MA3411G	1994-08-08	
MA3426G	1994-08-15	
	1994-09-16	Stop of drilling with TBM.



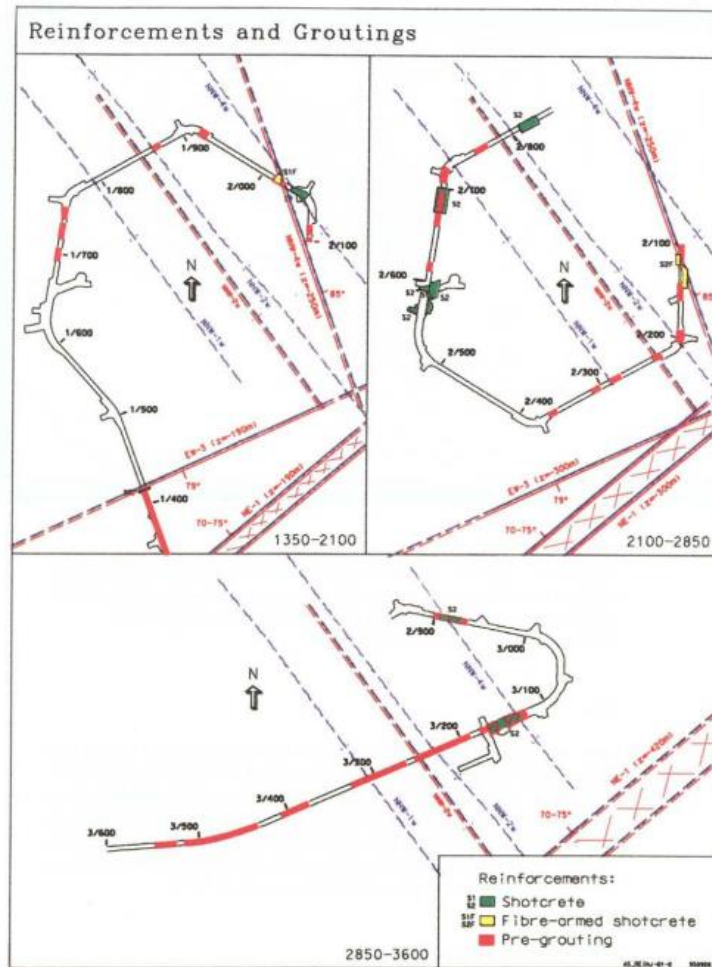
付図 4-6 エスポ地下岩盤研究施設の掘削工事進捗図



付図 4-7 坑道レイアウト  
(Stanfors, 2006)

### 3.2 坑道内グラウト施工

研究坑道内で施工されたプレグラウトの施工位置図を付図 4-8 に示す。プレグラウトの位置が、吹付けコンクリート、ファイバー入り吹付けコンクリートの施工箇所とともに示されている。ただし、グラウトがこれらの示された位置から岩盤内部でどの程度の範囲にまで浸透したかについての情報は得られていない。グラウト施工箇所も含めて坑内の湧水が許容できる範囲に抑制されていたものと推察される。



付図 4-8 研究坑道内のグラウト施工位置  
(Rhén et. al, 1997 より引用)

#### 4. 湧水量、地下水位等のモニタリングデータ

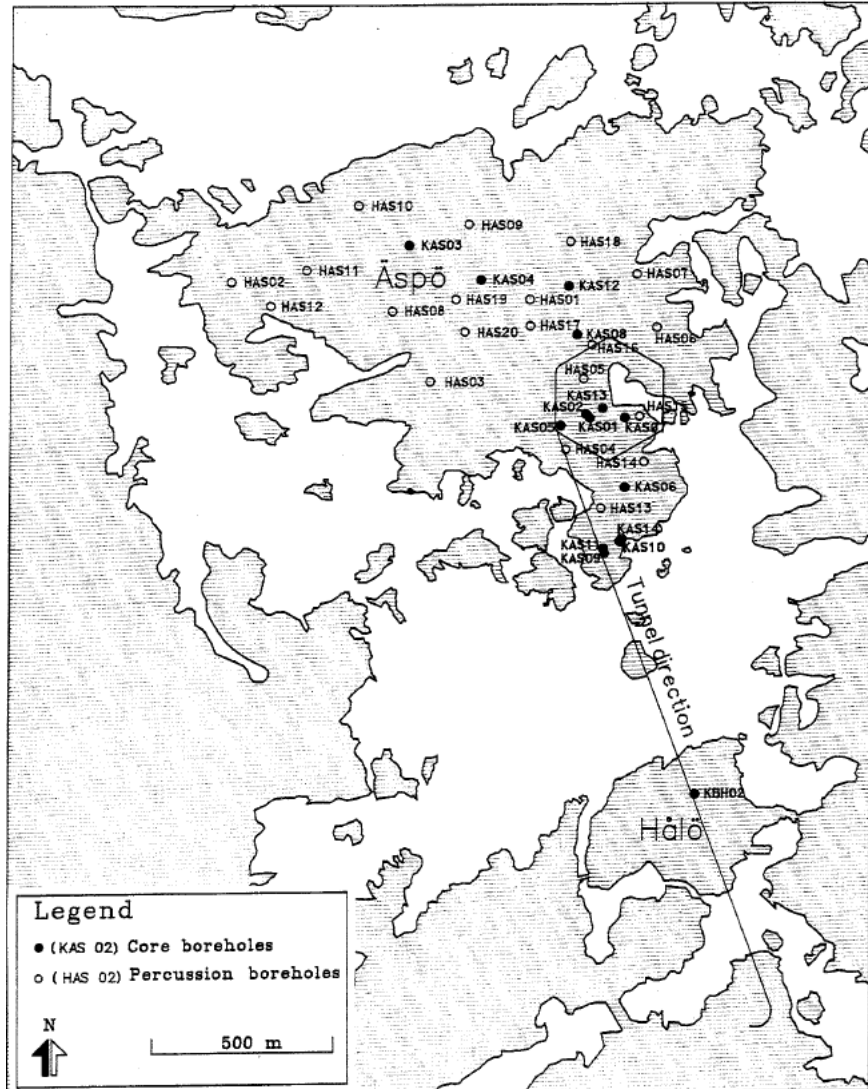
エスポ地下岩盤研究施設の湧水量、地下水位等のモニタリングデータ一覧を付表 4-5 に示す。整理結果の詳細を以下に述べる。

付表 4-5 エスポ地下岩盤研究施設の評価データ項目一覧表（モニタリング）

データ項目	内容	参考文献
地表ボーリング	調査ボーリング孔及びモニタリング孔の位置情報、ジオメトリデータ（CAD 図面）	SKBdoc 1893423: ID 3 Location and geometry of boreholes for investigations and monitoring
地下水位モニタリング (1)	モニタリング孔、区間、期間計測データ（夜間平均値、最大値、最小値）	SKBdoc 1893423: ID 14 Water table distribution ID 15 Hydraulic head
地下水位モニタリング (2)	モニタリング孔、区間、期間計測データ（夜間平均値、最大値、最小値） 1987年～1997年	SKBdoc 1893423: SKB-INT-21-001/ Piezometric levels measured in surface boreholes hms_press_monitoring_day_average.ssv
湧水量モニタリング (1)	坑道内での集水溝位置、モニタリング期間、計測データ	SKBdoc 1893423: ID 19 Inflow rate into Äspö HRL ID 20 Hydrochemistry
湧水量モニタリング (2)	計測データ 1992年～2004年	SKBdoc 1893423: SKB-INT-21-001/ Tunnel Flow rate at weirs object_location.xlsx hms_tunnel_weirs.ssv
地下水化学モニタリング (1)	ボーリング孔での地下水採取日、区間、分析データ 坑道内電気伝導度データ（夜間平均値、最大値、最小値）	SKBdoc 1893423: ID 16 Hydrochemistry ID 20 Hydrochemistry (Tunnel Electrical conductivity)
地下水化学モニタリング (2)	化学種濃度、同位体比当等	SKBdoc 1893423: SKB-INT-21-001/ Ipr-02-58_Data_1_Aug_17_2021.xlsx (Gurban et al. 1998)

#### 4.1. 地表ボーリング

エスポ地下岩盤研究施設周辺における地表ボーリングのレイアウトを付図 4-9 に示す。



付図 4-9 地表ボーリング孔の位置  
(SKB, 1994)

## 4.2. 間隙水圧モニタリング

エスポ地下岩盤研究施設周辺の間隙水圧モニタリング孔を付表 4-6 及び付表 4-7 に示す。SKB より提供されたデータは、各モニタリング孔の長期モニタリングデータにおける夜間の平均値、最大値、最小値のリストとなる (ID 15 Hydraulic head , SKB-INT-21-001/ Piezometric levels measured in surface boreholes)。同表中の全水頭値は、モニタリングデータの年平均値を示している。地下岩盤研究施設の建設期間中に全水頭の低下が認められ、エスポ島内のモニタリング孔で顕著である。付図 4-10 から付図 4-15 にモニタリング孔の位置を示す。

付表 4-6 間隙水圧モニタリング孔・データ一覧 (1)

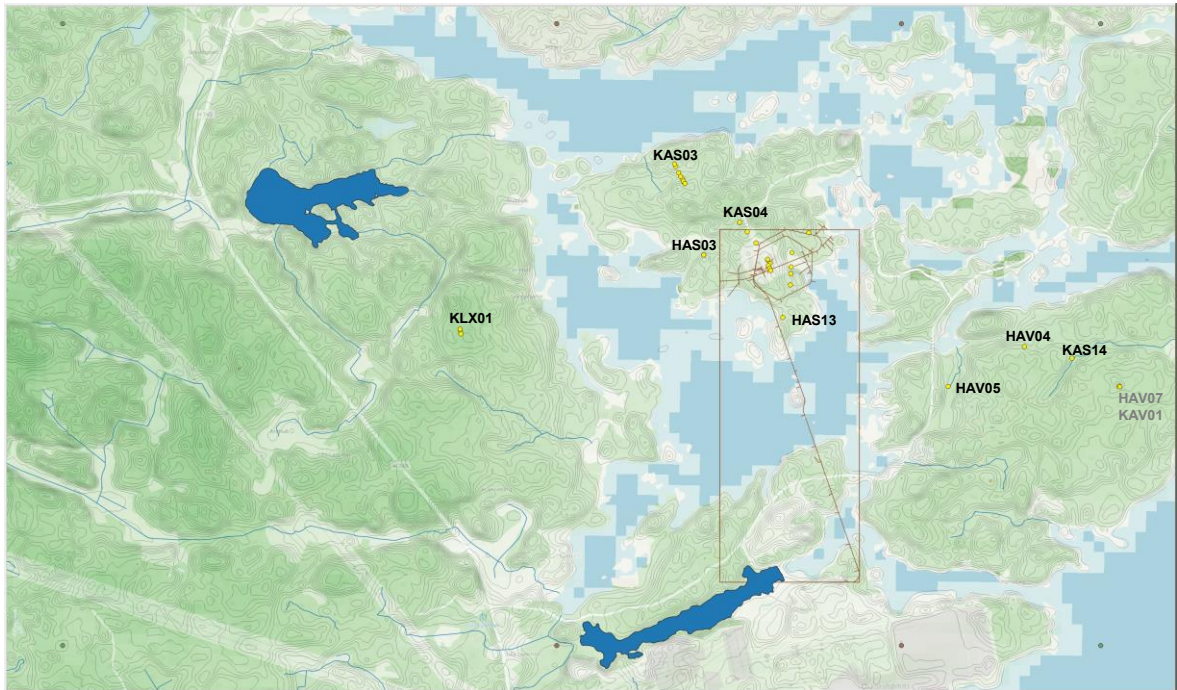
全水頭の年平均値 単位 : [m]

孔名	1987年	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年
HAS01		1.91	2.20	1.86	2.51	1.61	-3.28	-2.83	-2.58	-2.96
HAS02		-1.26	-0.09	0.07	-1.07	-0.06	-0.14	-0.16	-0.10	-0.82
HAS03	-0.48	-0.68	-0.21	0.11	0.18	-0.06	-1.07	-1.12	-0.56	-44.73
HAS04	-1.84	0.57	-0.18	-0.20	0.66	-1.88	-41.52	-40.46	-41.58	-36.28
HAS05			-0.39	-0.94	1.09	0.25	-50.23	-59.43	-63.05	-10.08
HAS06	0.53	0.70	0.38	0.01	0.40	-0.10	-27.08	-24.07	-22.13	-1.51
HAS07			0.22	-0.01	0.44	-0.43	-5.43	-9.59	-9.05	
HAS08		-0.16	0.59	0.65	0.71	0.62	-1.01	-0.94	-1.16	
HAS09			2.46	2.44	2.82	2.89	1.31	0.97	0.96	
HAS10								2.79	3.31	
HAS11		0.35	1.76	2.45	1.14	1.98	1.41	1.52	2.81	1.33
HAS12		-0.33	0.29	0.43	-1.23	0.30	1.41	0.55	0.59	
HAS13			-0.05	-0.08	-0.36	-6.16	0.77	-11.72	-9.87	-10.53
HAS14			-0.12	-0.37	0.32	-0.98	-10.51	-8.80	-8.92	
HAS15			-0.33	0.29	-0.02	-1.07	-1.35	-5.86	-8.02	
HAS16			-4.97	0.09	1.11	-1.35	-10.01	-32.52	-55.03	-39.00
HAS17			1.21	1.57	1.91	-2.80	-25.29	-41.67	-51.07	-59.81
HAS18					0.96	-1.59	-24.07	-12.02	-34.53	-16.81
HAS19				0.75	1.55	4.34	-14.26	2.85	3.01	2.65
HAS20					0.30	0.09	3.13	-0.47	0.11	-0.17
HAS21					-1.84	-2.74	-1.02	-9.54	-10.14	-12.32

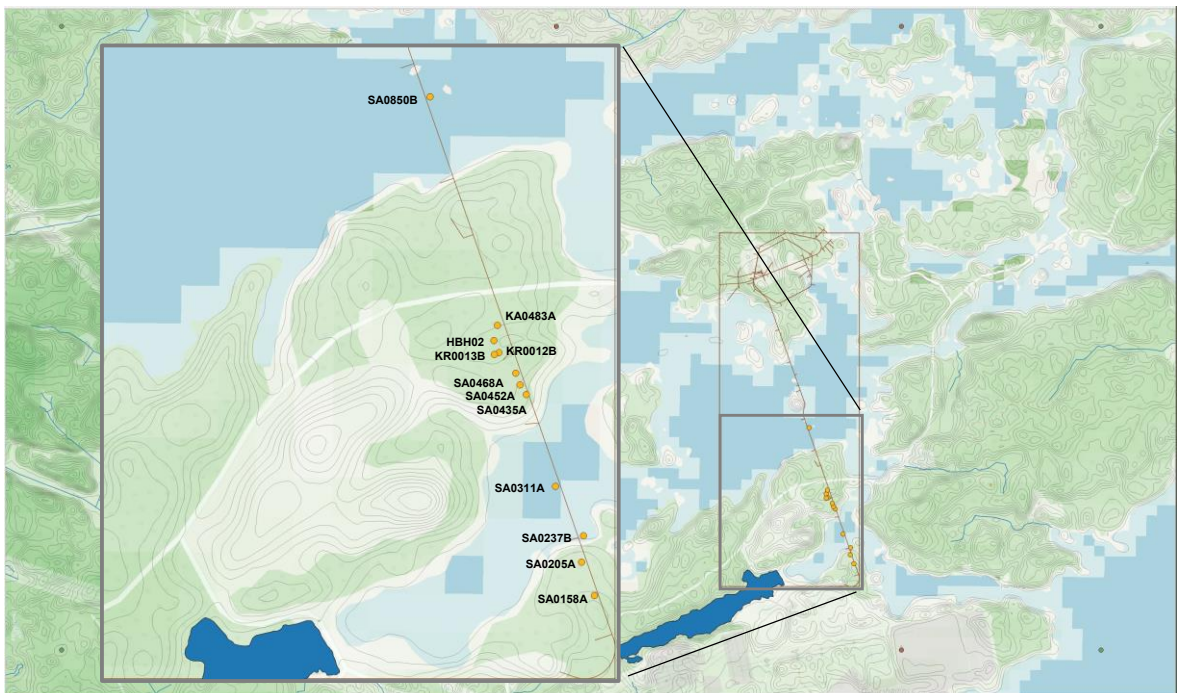
付表 4-7 間隙水圧モニタリング孔・データ一覧 (2)

全水頭の年平均値 単位 : [m]

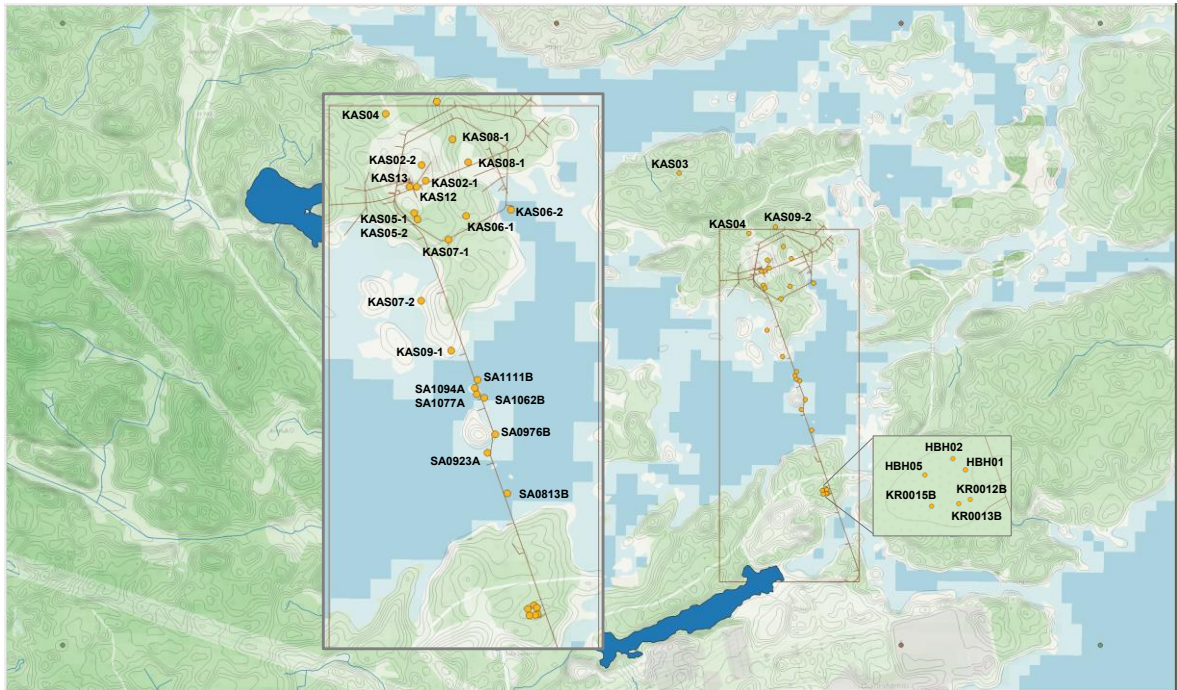
孔名	1987年	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年
HAV01			1.64	1.69	1.66	1.53	-5.93	1.38	1.48	
HAV02	1.38		2.29	2.20	1.79	0.47	1.36	-0.05	0.16	-0.06
HAV04			4.39	4.55	4.38	4.07	0.12	3.84	4.08	
HAV05			3.40	3.52	3.32	1.99	3.92	1.02	1.35	1.05
HAV06			5.25	5.37	5.07	3.74	1.23	1.91	2.17	
HAV07	0.93						2.29			
HAV08	0.99				-1.01	-2.66	-3.51	-3.52	-2.82	-3.49
HBH03					-2.39	-5.95	-7.62	-7.64		
HBH04					-2.30	-5.98	-7.61	-7.84	-5.21	
HLX01			6.29	7.11	6.85	6.87	6.82	6.89	6.98	6.85
HLX02			2.61	2.61	2.40	2.26	1.93	1.88	1.86	1.62
HLX03			6.52	7.11	7.49	7.14	7.11	7.30	7.45	7.22
HLX04			6.52	7.39	7.78	7.37	7.22	7.47	7.60	7.32
HLX05			12.80	12.96	13.56	13.81	13.87	13.91	13.95	13.82
HLX06			7.97	8.22	8.99	8.16	7.95	8.15	8.34	
HLX07			6.00	6.22	6.19	6.15	6.06	6.22	6.24	6.07
HLX08					0.15	0.07	0.04	0.08	0.16	
HLX09					0.03	-0.50	-0.88	-1.35	-1.41	
HMJ01					-2.63	-5.08	-7.27	-8.24	-7.69	-7.81
KAS01			1.73	1.00	1.37	-31.67	-83.58	-85.18	-84.94	-85.43
KAS02		0.25	-1.45	-2.30	-1.29	-7.87	-26.15	-31.53	-33.84	-43.66
KAS03		0.46	0.60	0.34	0.70	-0.21	-3.93	-6.14	-5.53	-8.31
KAS04		0.87	0.07	0.23	1.35	-2.72	-15.94			
KAS09				-0.25	-1.30	-8.69	-12.69	-13.42	-13.30	-13.65
KAS10						-7.78	-12.98	-14.40	-15.08	-15.75
KAV01			5.56	5.69	-1.79	4.64	4.37	4.58	4.34	4.38
KAV02			2.88	2.95	5.59	2.95	2.80	2.93	3.03	
KLX01			8.50	8.35	2.91	11.50	10.66	11.19	10.73	10.46



付図 4-10 間隙水圧モニタリング孔位置 (1)  
 (トンネル掘削前の観測点位置・SKB より提供されたデータ)



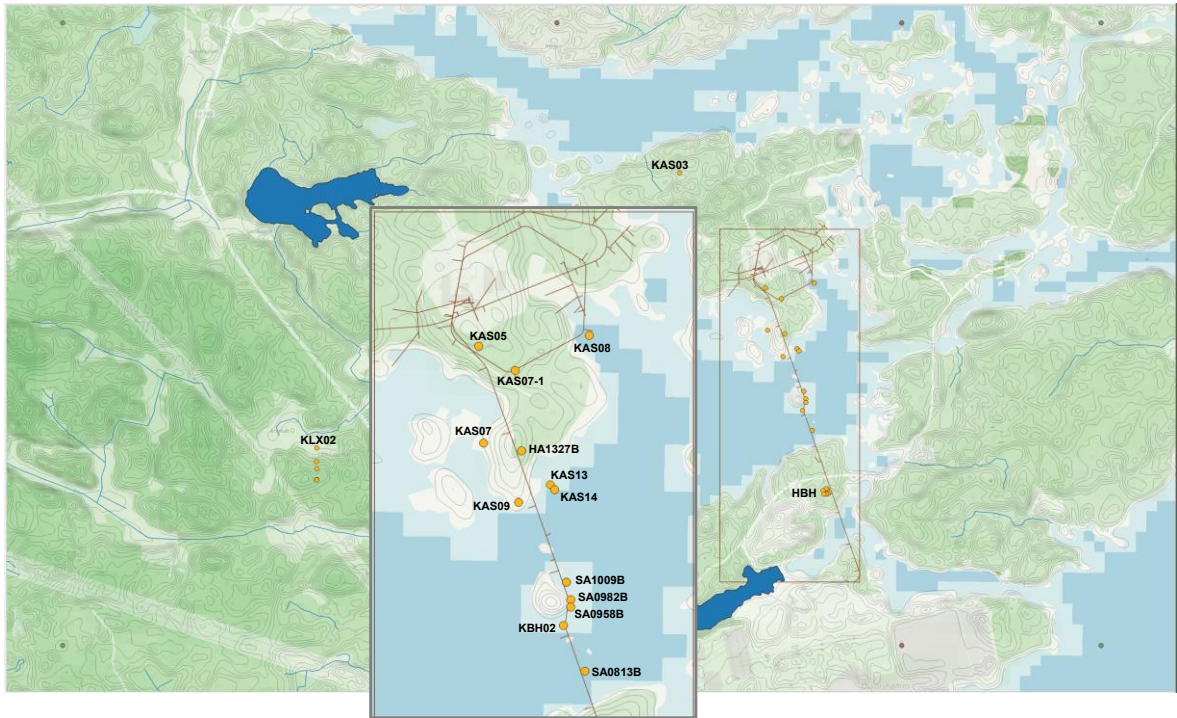
付図 4-11 間隙水圧モニタリング孔位置 (2)  
 (トンネル掘削開始より1年目の観測点位置・SKB より提供されたデータ)



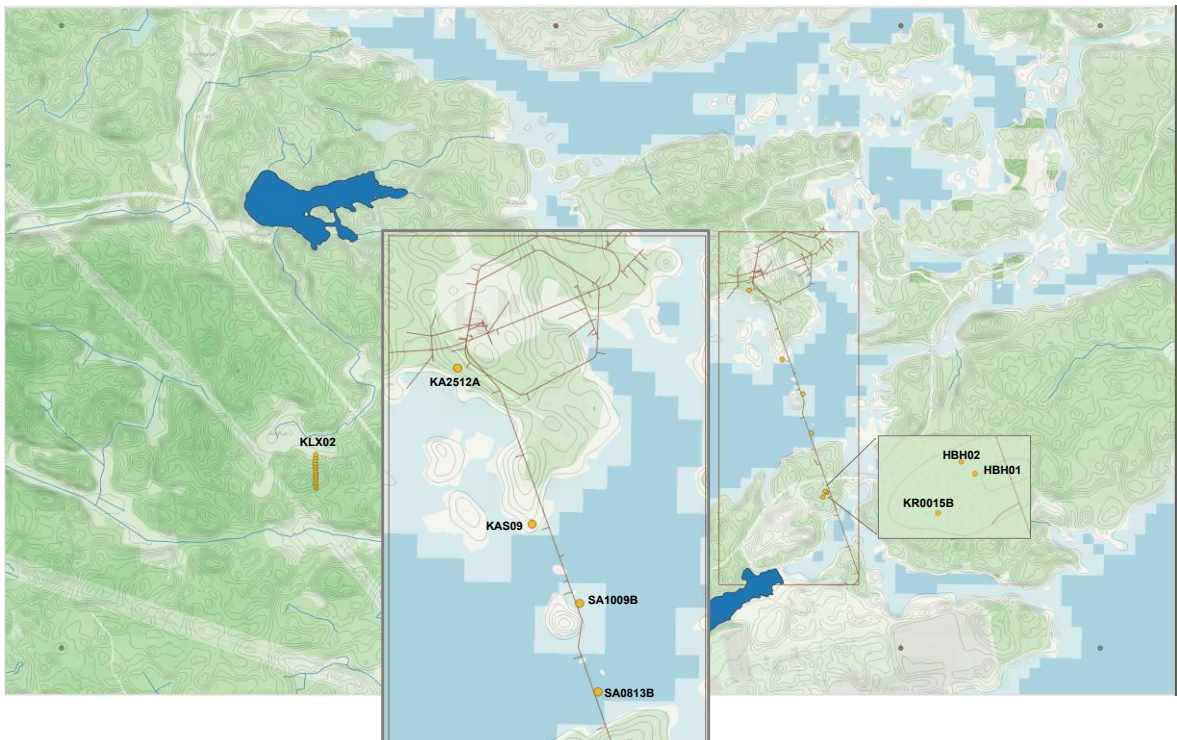
付図 4-12 間隙水圧モニタリング孔位置 (3)  
 (トンネル掘削開始より2年目の観測点位置・SKBより提供されたデータ)



付図 4-13 間隙水圧モニタリング孔位置 (4)  
 (トンネル掘削開始より3年目の観測点位置・SKBより提供されたデータ)



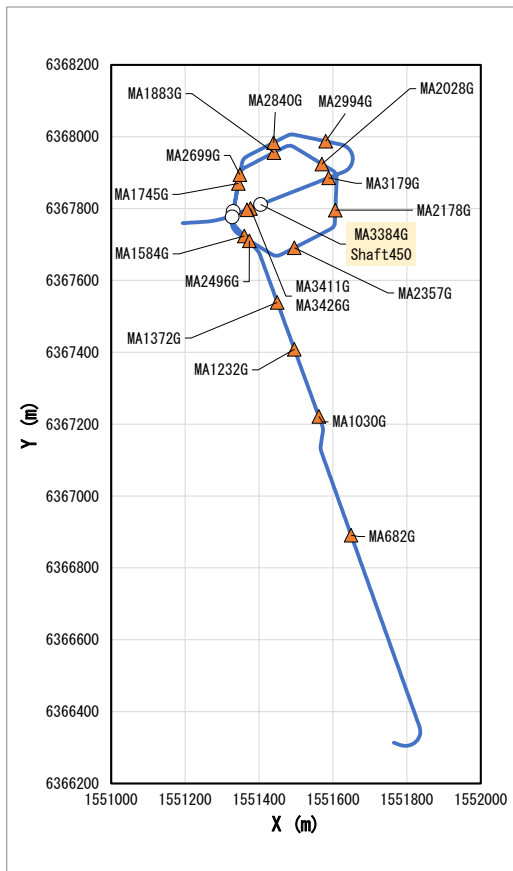
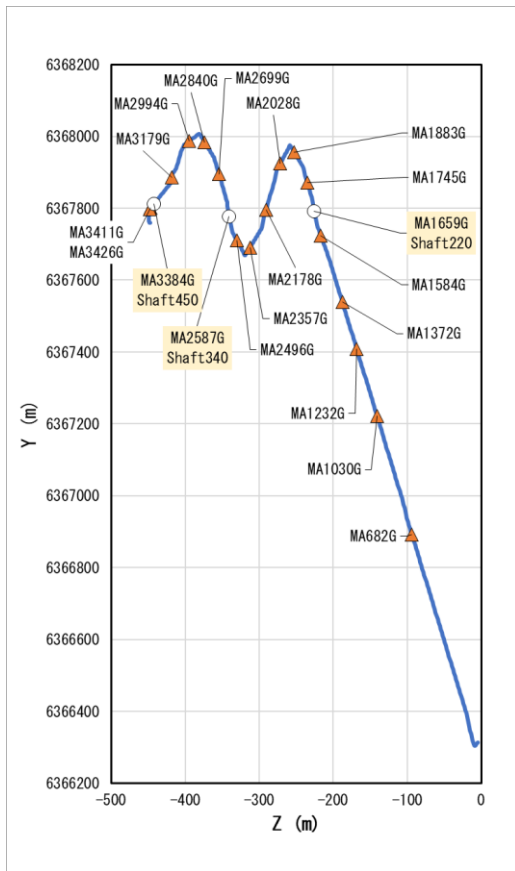
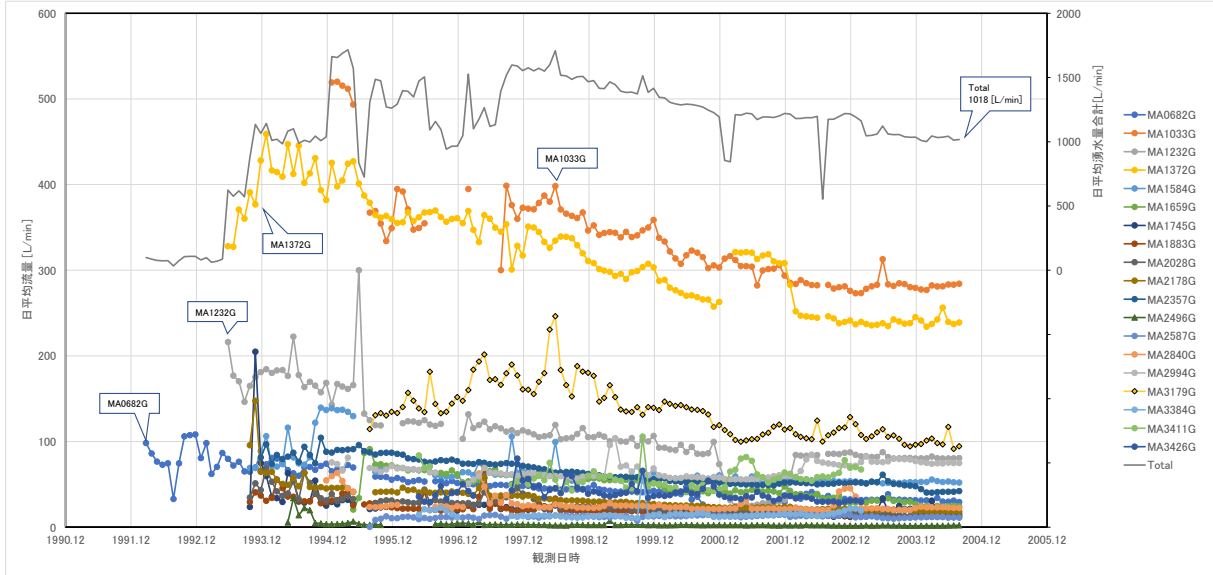
付図 4-14 間隙水圧モニタリング孔位置 (5)  
 (トンネル掘削開始より4年目の観測点位置・SKBより提供されたデータ)



付図 4-15 間隙水圧モニタリング孔位置 (6)  
 (トンネル掘削開始より5年目以降の観測点位置・SKBより提供されたデータ)

### 4.3 湧水量モニタリング

エスポ地下岩盤研究施設の坑道内に設置されたトンネル底盤を横断する集水溝における湧水量のモニタリングデータを付図 4-16 に示す。

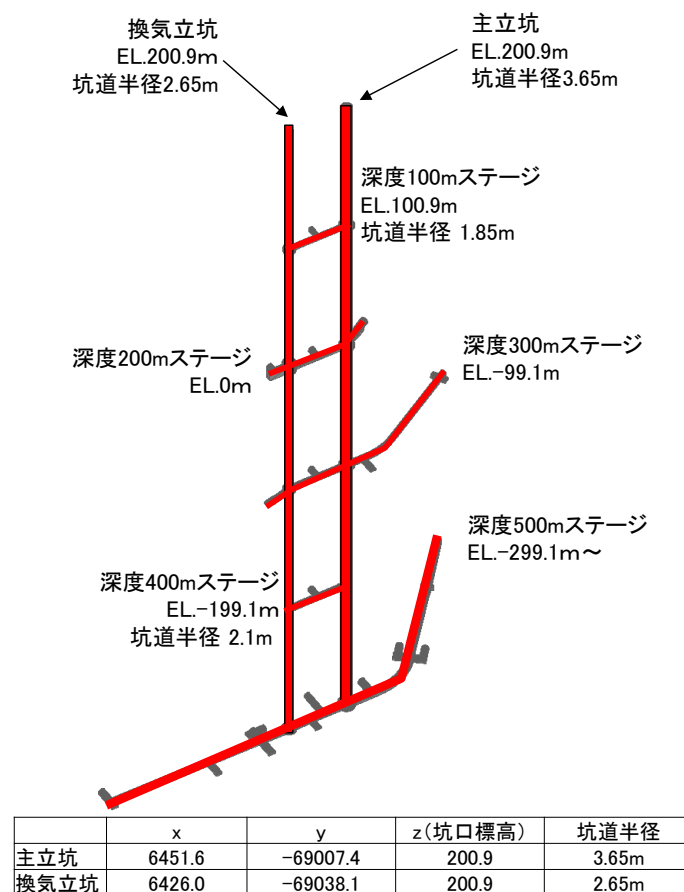


付図 4-16 坑道内湧水量モニタリングデータ  
(上段：モニタリングデータ、下段：観測点の位置)

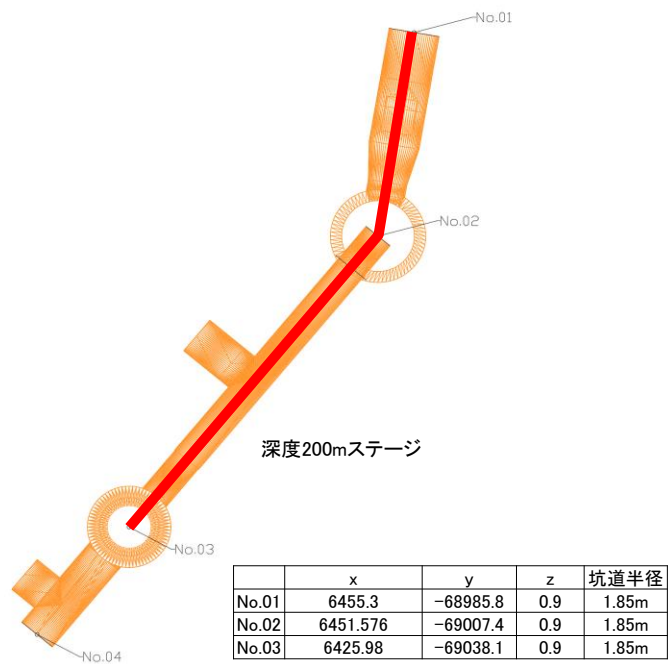
## 付録5 瑞浪超深地層研究所に関する情報

### 1. 瑞浪超深地層研究所を構成する坑道群のデータ

本付録では、瑞浪超深地層研究所を構成する地下施設の坑道配置および各深度ステージにおける坑道形状データについて整理する。付図 5-1 は、主立坑および換気立坑の位置関係と全体構成を示した概要図であり、地下研究施設の基本的な空間配置を把握するための基礎情報を示している。付図 5-2～付図 5-4 は、それぞれ深度 200 m、300 m 及び 500 m ステージにおける坑道形状データを示したものである。これらの図は、各深度ステージにおける研究坑道の配置、分岐状況および立坑との接続関係を示しており、地下水流動解析や坑内湧水量評価において必要となる坑道形状に関する情報を提供するものである。これらの坑道形状データは、地下研究施設の建設過程および運用段階における水理場の変化を解析・評価する際の基礎条件として用いられる。

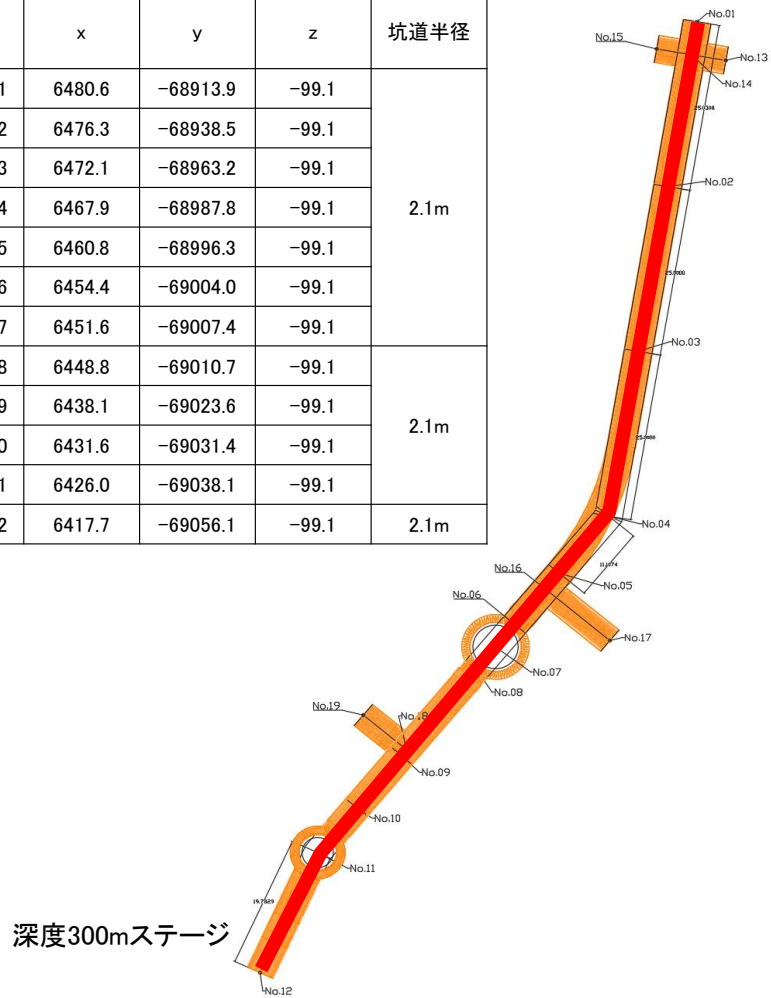


付図 5-1 主立坑・換気立坑の概要図



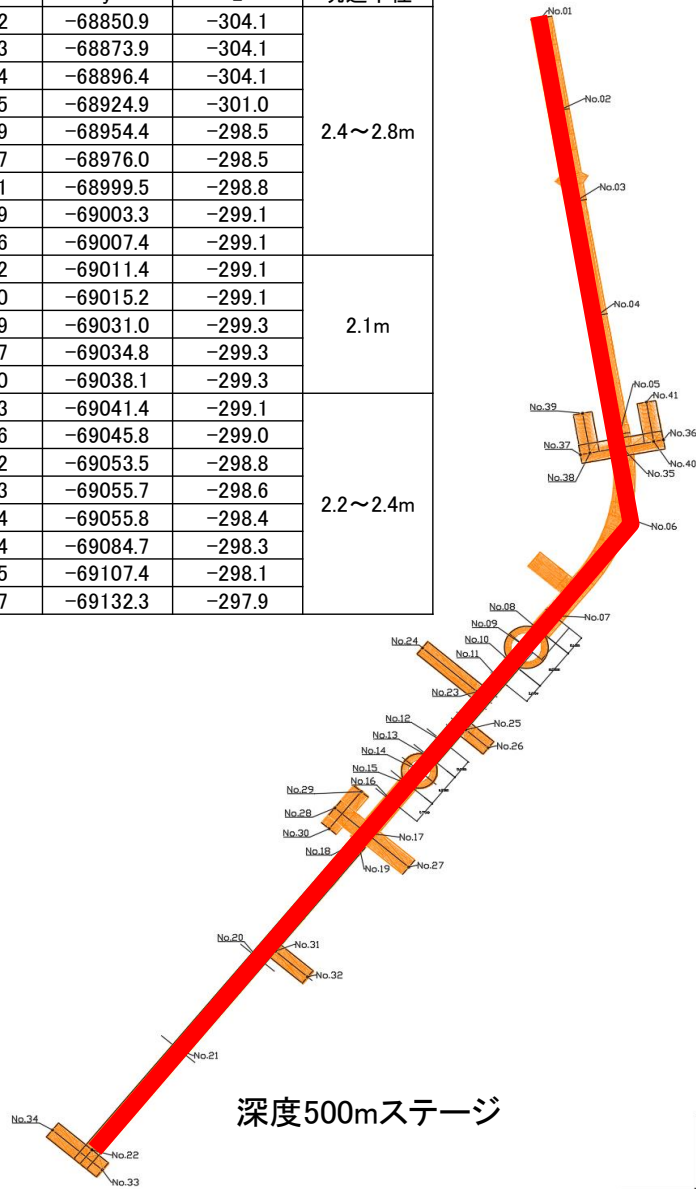
付図 5-2 深度 200 m ステージの形状データ

	x	y	z	坑道半径
No.01	6480.6	-68913.9	-99.1	2.1m
No.02	6476.3	-68938.5	-99.1	
No.03	6472.1	-68963.2	-99.1	
No.04	6467.9	-68987.8	-99.1	
No.05	6460.8	-68996.3	-99.1	
No.06	6454.4	-69004.0	-99.1	
No.07	6451.6	-69007.4	-99.1	
No.08	6448.8	-69010.7	-99.1	2.1m
No.09	6438.1	-69023.6	-99.1	
No.10	6431.6	-69031.4	-99.1	
No.11	6426.0	-69038.1	-99.1	2.1m
No.12	6417.7	-69056.1	-99.1	



付図 5-3 深度 300 m ステージの形状データ

	x	y	z	坑道半径
No.01	6455.2	-68850.9	-304.1	2.4~2.8m
No.02	6459.3	-68873.9	-304.1	
No.03	6463.4	-68896.4	-304.1	
No.04	6468.5	-68924.9	-301.0	
No.05	6473.9	-68954.4	-298.5	
No.06	6477.7	-68976.0	-298.5	
No.07	6458.1	-68999.5	-298.8	
No.08	6454.9	-69003.3	-299.1	
No.09	6451.6	-69007.4	-299.1	
No.10	6448.2	-69011.4	-299.1	
No.11	6445.0	-69015.2	-299.1	
No.12	6431.9	-69031.0	-299.3	
No.13	6428.7	-69034.8	-299.3	
No.14	6426.0	-69038.1	-299.3	
No.15	6423.3	-69041.4	-299.1	
No.16	6419.6	-69045.8	-299.0	
No.17	6413.2	-69053.5	-298.8	
No.18	6411.3	-69055.7	-298.6	
No.19	6411.4	-69055.8	-298.4	
No.20	6387.4	-69084.7	-298.3	
No.21	6368.5	-69107.4	-298.1	
No.22	6347.7	-69132.3	-297.9	



付図 5-4 深度 500 m ステージの形状データ

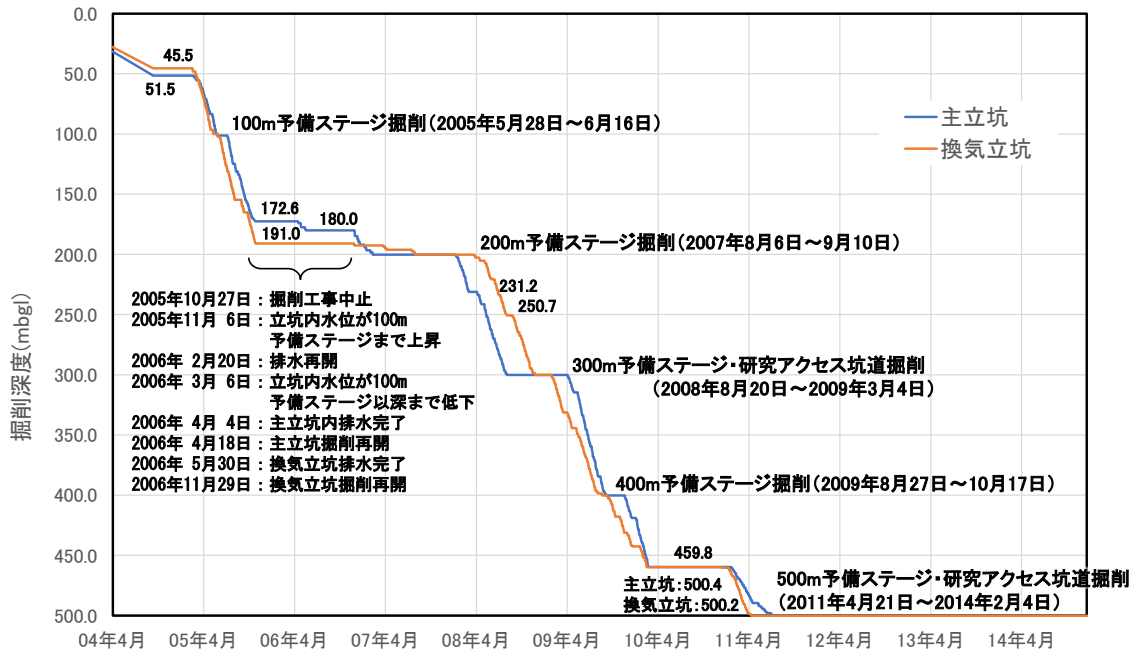
## 2. 瑞浪超深地層研究所の建設工程

JAEA (2022) より抜粋した地下研究施設の建設工程概要を元に、その建設工程をグラフ化したものが付図 5-5 である。

付表 5-1 地下研究施設の建設工程概要  
(JAEA, 2022)

年月日	経過 日数	地下研究施設の建設に関するイベント	掘削深度 [G.L. -m]	
			主立坑	換気立坑
2003 07 17	0	坑口上部工事（地表～深度 50 m）開始	0	0
2004 09 10	421	坑口上部工事（地表～深度 50 m）終了	51.5	45.5
2005 05 28	681	100 m 予備ステージ掘削開始	101.3	100.0
2005 06 16	700	100 m 予備ステージ掘削完了	101.3	100.0
2005 10 27	833	掘削工事中断及びび排水停止	172.6	191.0
2005 11 06	843	立坑内水位が 100 m 予備ステージまで上昇	172.6	191.0
2005 11 17	854~	試験排水（2005 11 17～2006 01 31）	172.6	191.0
2006 02 20	949	排水再開	172.6	191.0
2006 03 06	963	立坑内水位が 100 m 予備ステージ以深まで下降	172.6	191.0
2006 04 04	992	主立坑内排水完了	172.6	191.0
2006 04 18	1006	主立坑掘削再開	174.1	191.0
2006 05 30	1048	換気立坑排水完了	180.0	191.0
2006 07 03	1082	主立坑 PilotBH 調査開始	180.0	191.0
2006 07 20	1099	換気立坑 PilotBH 調査開始	180.0	191.0
2006 10 04	1175	主立坑 PilotBH 調査完了	180.0	191.0
2006 10 05	1176	換気立坑 PilotBH 調査完了	180.0	191.0
2006 11 29	1231	換気立坑掘削再開	180.0	192.6
2007 02 12	1306	主立坑：深度 200 m 到達	200.2	192.6
2007 08 02	1477	換気立坑：深度 200 m 到達	200.2	200.2
2007 08 06	1481	200 m 予備ステージ掘削開始	200.2	200.2
2007 09 10	1516	200 m 予備ステージ掘削完了	200.2	200.2
2008 08 05	1846	主立坑：深度 300 m 到達	300.2	250.7
2008 08 20	1861	300 m 予備ステージ掘削開始	300.2	250.7
2008 09 03	1875	300 m 研究アクセス坑道掘削開始	300.2	254.6
2008 09 22	1894	300 m 研究アクセス坑道の先行ボーリング調査開始	300.2	264.7
2008 10 24	1926	300 m 研究アクセス坑道の先行ボーリング調査終了	300.2	285.1
2008 11 12	1945	300 m 研究アクセス坑道の湧水抑制グラウト工事開始	300.2	294.8
2008 11 24	1957	300 m 研究アクセス坑道の掘削再開（34.8 m～）	300.2	298.6
2008 11 27	1960	換気立坑：深度 300 m 到達	300.2	300.2
2009 01 10	2004	300 m 予備ステージ掘削完了	300.2	300.2
2009 03 04	2057	300 m 研究アクセス坑道の掘削完了	300.2	318.2
2009 08 24	2230	換気立坑：深度 400 m 到達	391.8	400.2
2009 08 27	2233	400 m 予備ステージ掘削開始	395.4	400.2
2009 09 08	2245	主立坑：深度 400 m 到達	400.2	400.2
2009 10 17	2284	400 m 予備ステージ掘削完了	400.2	417.8
2011 03 11	2794	東日本大震災発生	473.8	487.9
2011 04 18	2832	換気立坑：深度 500 m 到達	487.1	500.2
2011 04 21	2835	500 m 予備ステージ掘削開始（換気立坑側）	489.0	500.2
2011 07 12	2917	主立坑：深度 500 m 到達	500.2	500.2
2012 07 30	3301	500 m 予備ステージ掘削完了	500.4	500.2
2014 02 04	3855	500 m ステージ掘削完了	500.4	500.2

JAEA（2022）より，主要なイベントを抜粋



付図 5-5 地下研究坑道の建設工程  
(JAEA, 2022)

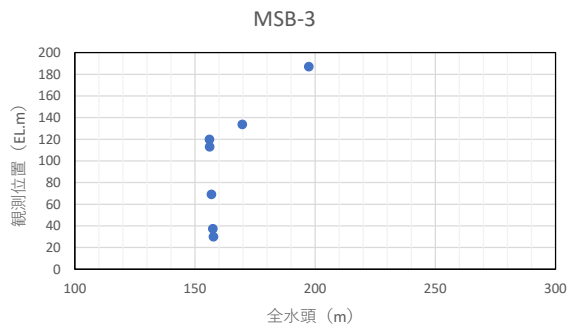
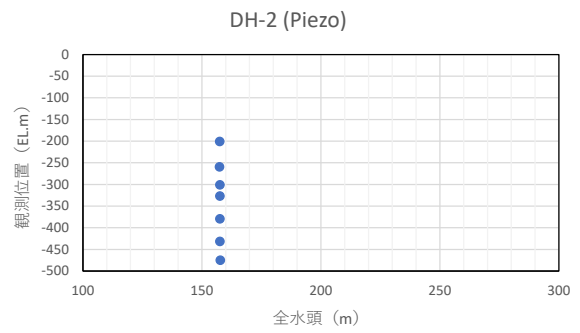
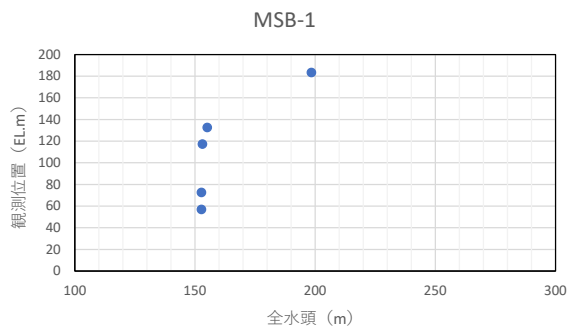
### 3. 地下水圧力実測データ

地下水圧力実測データは、JAEA (2022) の地下水圧実測データ中から広域スケールの水理地質構造モデル領域内に位置し、かつ地下研究施設建設開始時の 2003 年 7 月以前より実測されている実測データを使用した。実測点の一覧を付表 5-2 に示す。実測方法に関しては、毛屋・竹内 (2009) を参照されたい。

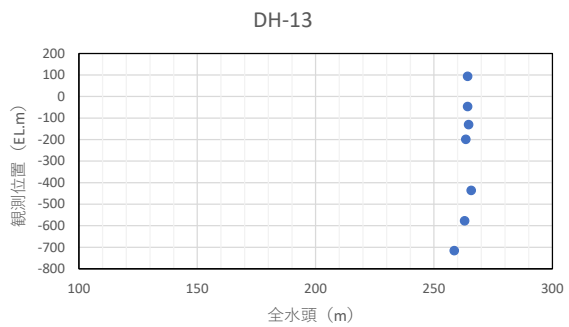
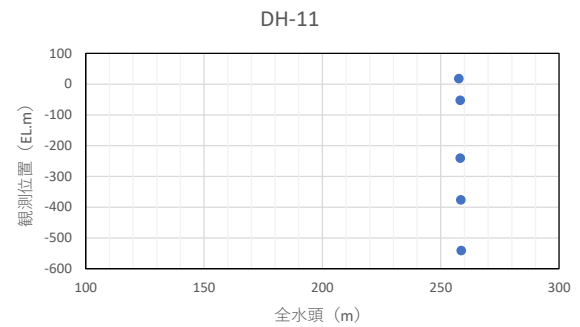
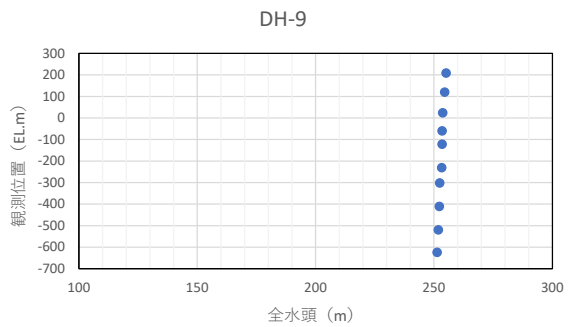
付表 5-2 の一覧に示すデータより、ベースライン解析結果との比較には、地下研究施設建設前の地下水圧実測データのうち、原位置試験等による擾乱が小さいと考えられる期間のデータを採用した。具体的には地下研究施設建設前の地下水圧実測データから安定しているデータに関しては実測期間の平均値を採用し、水理試験などの影響で変動が大きいものに関しては、建設開始 (2003/7/17) 直前のデータを採用した。なお、地下水圧実測データは、JAEA の公開データのことであり、解析値との比較に使用する際は「実測値」として標記し、全水頭値 [m]として表す。抽出した実測値を付図 5-6～付図 5-8 に示す。坑内湧水量解析結果との比較には、地下研究施設建設開始 (2003/7/17) を起点とした全水頭の経時変化と比較を行った。

付表 5-2 解析値との比較可能な地下水圧実測データの一覧  
JAEA (2022) より該当データを抽出

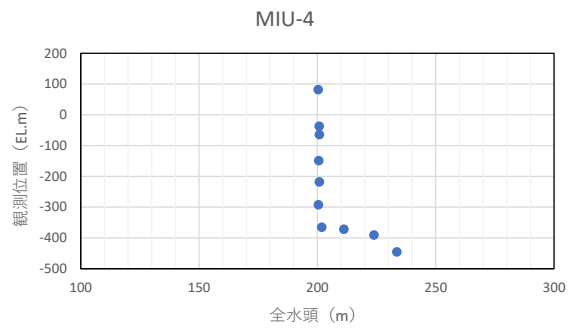
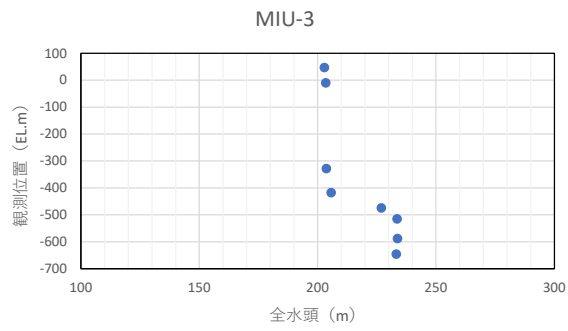
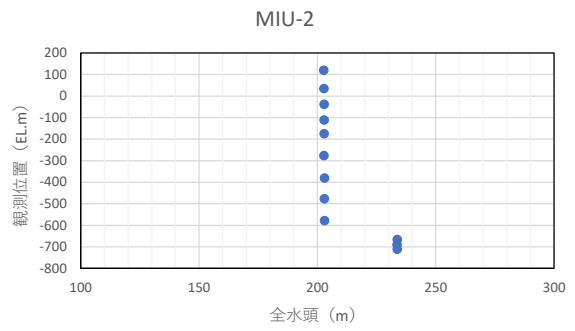
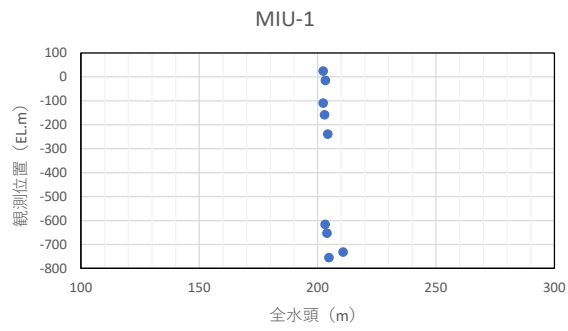
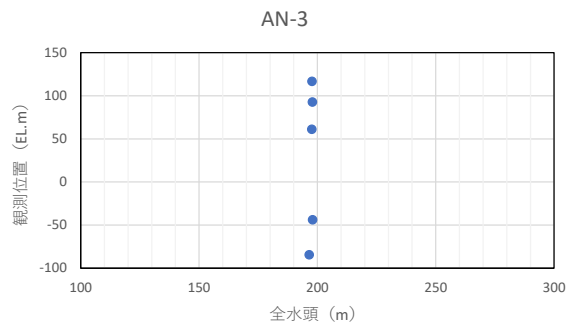
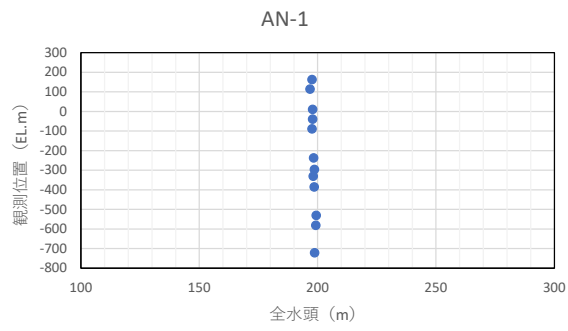
孔名	実測期間 (実測方法 : 実測点数)	備考
DH-2	2002/12/10～2004/09/08 (ピエゾシステム : 7 点) 2004/12/06～2020/03/31 (MP システム : 12 点)	研究所周地
MIZ-1	2005/04/06～2020/03/31 (MP システム : 10 点)	研究所周地・斜坑
MSB-1	2002/12/04～2020/03/31 (MP システム : 5 点)	研究所周地・斜坑
MSB-2	2004/04/13～2011/03/03 (採水時の実測値 : 10 点)	研究所周地
MSB-3	2002/12/05～2020/03/31 (MP システム : 7 点)	研究所周地・斜坑
MSB-4	2004/04/13～2011/03/03 (採水時の実測値 : 7 点)	研究所周地
AN-1	1999/09/03～2020/02/20 (MP システム : 12 点)	正馬様用地
AN-3	2000/04/11～2012/04/19 (MP システム : 5 点)	正馬様用地
MIU-1	2000/05/30～2009/09/02 (MP システム : 9 点)	正馬様用地
MIU-2	2000/02/09～2001/10/29 (MP システム : 10 点) 2003/03/14～2020/03/31 (MP システム : 12 点)	正馬様用地
MIU-3	2000/12/06～2020/03/31 (MP システム : 8 点)	正馬様用地
MIU-4	2001/12/06～2020/03/31 (MP システム : 10 点)	正馬様用地・斜坑
DH-9	2002/09/10～2006/03/03 (手動計測 : 10 点 No.2～No.11) 2009/02/05～2018/05/08 (MP システム : 4 点 No.2, No.5, No.9, No.11)	広域
DH-11	2001/12/12～2020/03/31 (MP システム : 5 点)	広域
DH-13	2002/03/08～2020/03/31 (MP システム : 7 点)	広域
DH-15	2004/11/20～2020/03/31 (SPMP システム : 10 点)	広域



付図 5-6 ベースライン解析比較用実測値 (研究所用地)



付図 5-7 ベースライン解析比較用実測値 (研究所用地)



付図 5-8 ベースライン解析比較用実測値 (広域)

## 参考文献

- 安藤賢一，田中達也，橋本秀爾，三枝博光，尾上博則（2012）：岩盤中の透水性構造分布に着目した水理地質構造モデルの構築手法の検討，JAEA-Research 2012-022.
- General Bathymetric Chart of the Oceans（2026）：  
[https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)（2026年3月30日閲覧）
- Gurban, I., Laaksoharju, M., Andersson, C.（1998）：ÄSPÖ HRL Influences of the tunnel construction on the groundwater chemistry at Äspö Hydrochemical initial and boundary conditions: WP D1, WP D2, SKB International Progress Report IPR-02-58.
- JAEA（2022）：超深地層研究所計画で得られた研究成果，  
<https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/history/5.html>（2026年3月30日閲覧）
- Rhén, I., Gustafson, G., Wikberg, P.（1997）：ÄSPÖ HRL - Geoscientific evaluation 1997/4 Results from pre-investigations and detailed site characterization Comparison of predictions and observations Hydrogeology, groundwater chemistry and transport of solutes, SKB TECHNICAL REPORT TR-97-05.
- Rhén, I., Magnusson, J., Forsmark, T.（1998）：Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö Task Force for modelling of groundwater flow and transport of solutes Task 5. Data compilation: WP A3, WP A4, SKB INTERNATIONAL PROGRESS REPORT IPR-02-57.
- SKB(1994)：SKB TECHNICAL REPORT 94-24.
- SKBdoc 1893423：TO PROJECT AGREEMENT Aspo Regional Scale Modelling NUMO，（エスポ地下岩盤研究所に関する測定データ集）。
- Stanfors, R. (2006)：Review of existing information from the Äspö HRL area, with focus on hydraulically important minor structures, SKB P-06-117.
- Vidstrand, P.（2003）：Äspö Hard Rock Laboratory Update of the hydrogeological model 2002, SKB International Progress Report IPR-03-35.



A decorative graphic consisting of a vertical and a horizontal blue bar that intersect to form a crosshair. The bars have a slight gradient and are centered on the page.

原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)