

## 余裕深度処分の成立性確認に向けた地質環境調査について

石田裕樹\* 守友常雄\* 佐々木泰\*

余裕深度処分の成立性を確認する際に、地質環境の長期安定性を確認する必要がある。もし、地質環境の長期変動によって、施設の直接的な破壊が懸念される場合には、当該位置から施設を避けなければならない。また、直接的な破壊がない場合でも、地形変化等の地質環境の変化が施設設計や安全評価に与える影響を考慮するために、現状の地質・地質構造、透水性、水圧等の地質環境を把握した上で、将来の地形変化を考慮し、地下水流動解析により安全評価パラメータを設定するとともに、施設設計の前提条件を明らかにしなければならない。

ここでは、地質環境調査の考え方と地質環境の長期的な変動を予測する方法を紹介する。また、余裕深度処分施設の候補地点である青森県六ヶ所村の日本原燃における地質環境の長期安定性等の検討例と地質、地下水および地盤に関する現状の地質環境調査結果について紹介する。

**Keywords:** 余裕深度処分, 地質環境調査, 長期安定性, 水理・地化学特性, 岩盤力学特性, 地下水流動解析

For the purpose of the feasibility assessment of the sub-surface disposal for relatively higher LLW, it is necessary to confirm the long-term geological stability. If the direct destruction of the disposal facility may be expected to occur on the site due to the long-term geological changes, it is not favorable for the facility. Even in the case that there may be no direct damage, it is needed that the safety assessment parameters should be set up by groundwater flow analyses and the premises for designing the facility should be made clear to understand their influences of geological changes such as future topographic change, based on the current geological and environmental information of geological structures, hydraulic conductivities, and pore water pressures etc.

This paper introduces the basic concept of the site investigation and the predicting method of long-term geological changes. In addition, we show an example of the long-term geological stability study using data of JNFL Rokkasho site, a candidate site in Aomori Prefecture, as well as the results of geological, hydrogeological and geotechnical investigations.

**Keywords:** sub-surface disposal for relatively higher LLW, geological and environmental investigation, long-term stability, characteristic of hydrogeology and geochemistry, characteristic of rock mechanics, numerical analysis of groundwater flow

### 1 候補地点の概要

余裕深度処分施設の候補地点は、青森県の下北半島南部の太平洋側に位置し、北側は老部川、南側は二又川および尾駁沼で境された台地からなる。台地は、標高 30～60m の海岸段丘面からなり、北西から南東に向かって緩く傾斜している。

北側を流れる老部川は、敷地付近では標高 20～5m の谷間を西から東に向かって流れ、太平洋に流入している。二又川は南西側の標高 5～1m の低地を敷地境界に沿って西から東に向かって流れ、尾駁沼に流入している。尾駁沼は周囲延長 12.5km、面積 3.6km<sup>2</sup>、平均水深 1.8m、流域面積 45.5km<sup>2</sup> の太平洋につながっている汽水性の沼である。

### 2 地質環境調査の考え方

ここでは、地質環境調査の考え方について述べる。地質環境調査では、最終的に地下水流速、移行距離、移行時間といった安全評価のためのパラメータ設定、および施設近傍の岩盤力学特性、水質といった施設設計の前提条件を導き出す必要がある。

具体的には、Fig.1 に示すフローに従い検討を進める。地質環境の長期変動に関する各事象(火成活動、断層活動、

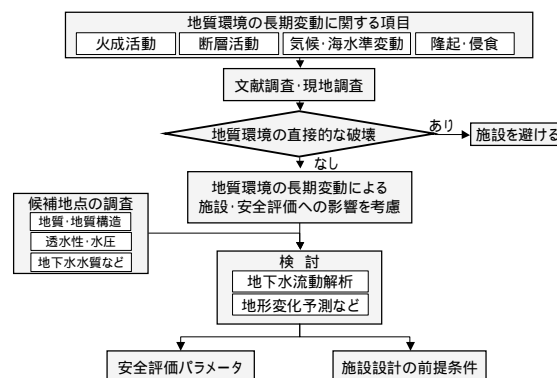


Fig.1 Items and study flow of the geological site investigations

気候・海水準変動、隆起・侵食)について、既往の文献調査および必要に応じて地表踏査等の現地調査を実施し、施設の直接的な破壊が懸念される場合には、当該位置から施設を避ける必要がある。直接的な破壊がない場合は、長期変動が施設設計や安全評価に与える影響を考慮するために、現状の地質・地質構造、透水性・水圧等を把握した上で、地形変化予測等を実施し、地下水流動解析により、安全評価パラメータを設定するとともに、施設設計の前提条件を明らかにする。

### 3 地質環境の長期変動について

余裕深度処分の成立性を確認する上で、地質環境の長期的な安定性を把握することは必要不可欠である。

Fig.2 に地質環境変動事象が施設に与える具体的な影響を示す。例えば、マグマの貫入や断層の活動等が生じた場合には、直接的にバリアが破壊されるため、施設を避ける

Geological site investigations to assess the technical feasibility of the sub-surface disposal for relatively higher LLW by Yuki Ishida (yuuki.ishida@jnfl.co.jp), Tsuneo Moritomo, Tai Sasaki

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第 22 回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

\* 日本原燃開発設計部土木埋設グループ

Civil Engineering For Disposal Group, Development and Engineering Dept., Radioactive Waste Disposal Business Division, JAPAN NUCLEAR FUEL LIMITED (JNFL)

〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駁字野附 504-22

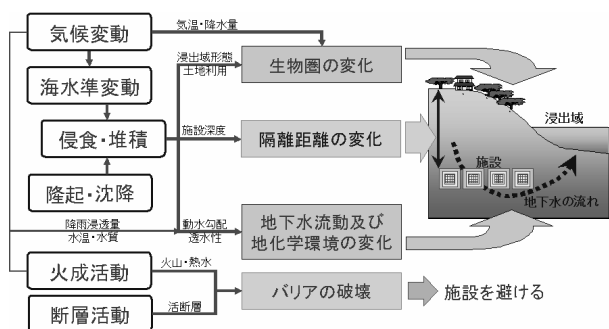


Fig.2 Influence of the geological changes to the facility

必要がある。

また、直接的な施設の破壊がない場合でも、気候変動、海水準変動、隆起・沈降、侵食・堆積等によって、地下水流動、地化学環境、施設の地表からの距離、および施設を通過した地下水の浸出域の環境が変化するため、これらの変化量を把握した検討が必要である。

以下に、候補地点における地質環境の各変動事象について、主な知見を述べるとともに、長期安定性等の検討例を示す。

### 3.1 火成活動

火成活動において、地質環境に影響を与える主なものは火山活動と熱水影響がある。火成活動を検討する際には、火成活動の影響範囲を把握し、候補地点が有意な影響を受けないことを確認することが重要である。

火山活動について、Fig.3 に候補地点周辺である東北日本の第四紀火山の分布と火山フロント（火山分布位置の東

縁）の位置を示す。東北日本において、各時代の火山フロントは脊梁山地の東西 20～30km の範囲内に位置しており[1]、200 万年前以降の火山フロントには顕著な移動は認められない[2]ことが分かる。したがって、10 万年程度の将来において、現在の火山フロントから離れた海溝側の地域では、新たな火成活動の発生は考えられない[3]。候補地点は、火山フロントから東側へ約 30km 以上離れていることから、今後 10 万年程度の将来において、火成活動による直接的な破壊は生じないと考えられる。

一方、火山活動等の影響を直接的に受けない場合でも、地温影響を受ける場合がある。第四紀火山から離れていても、地温が高く、地下水の粘性低下に伴う地下水流動への影響が懸念される場合には、地温影響を考慮して透水性を設定する必要がある。

### 3.2 断層活動

過去の断層活動に関しては、過去数十万年間にわたって活動した証拠が認められない断層については、今後も活動する可能性が極めて低いと考えることができる[5]。

また、断層の伸展、移動に関しては、テクトニクスに関連する地殻応力場の顕著な変化が想定されない地域においては、活断層が現存していない地域に、新たに断層が発生するとは考え難い[6]。さらに、中央構造線活断層系や糸魚川 - 静岡構造線、あるいは濃尾断層系などの長大な断層系において、具体的に検討すると、断層の末端（両端）が成長し続ける例は全く認められない[7]。

これらの知見を踏まえながら、候補地点および周辺における活構造について、文献調査を実施した上で、必要に

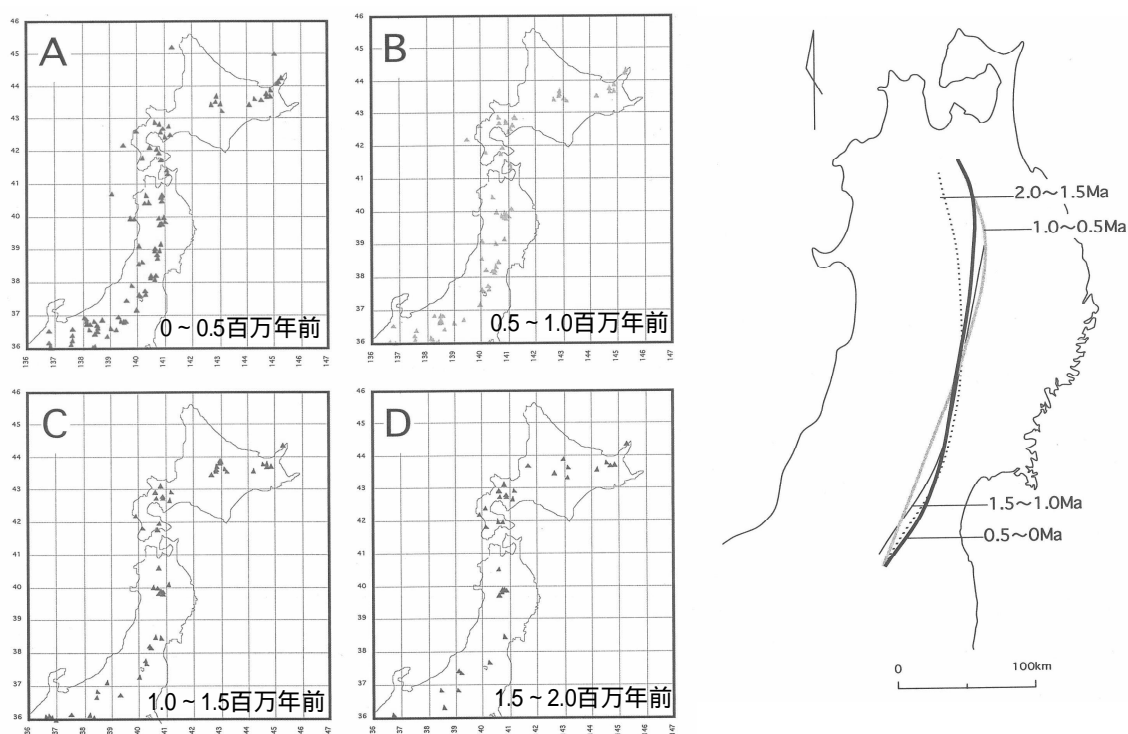


Fig.3 Distribution of Quaternary volcanoes and location of volcanic front[4]

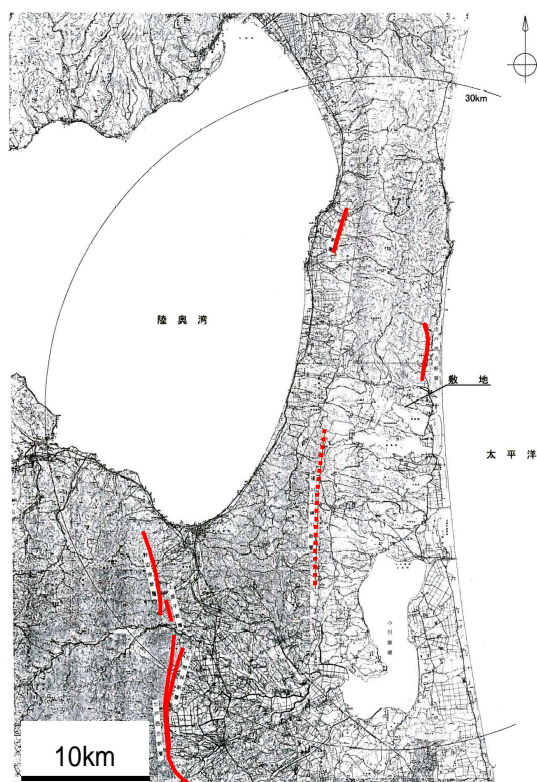


Fig.4 Location of faults around the candidate site[8]

じ空中写真判読,さらには地表地質調査を実施する.具体的には,活構造の分布,性状を把握し,活構造が施設候補地点に分布しないこと,および施設候補地点まで伸展,移動しないことを確認する.

なお, Fig.4 に候補地点周辺の断層位置図を示す.ここで候補地点に最も近い断層は,出戸西方断層であるが,既往調査結果では,断層およびその影響範囲が対象地域まで伸展していないこと,断層周辺に同じような構造の断層は分布していないことが確認されている.

したがって,出戸西方断層が候補地点に直接影響を与える可能性はない.

### 3.3 気候,海水準変動

気候変動に関して, Fig.5 に海洋の酸素同位対比変動曲線を示す.南極の氷床コアの酸素同位体比変動から,過去70万年間では約10万年周期の気候変動があったことが明らかである[4].また,氷期の年平均気温は,酸素同位対比および花粉化石分析結果から,現在より10度程度低く,降水量も現在の5~7割程度であったと考えられている[9].

また,海水準変動については, Fig.6 に過去35万年間の海水準変動を示す.上述した気候変動に起因して,海水準も10万年周期で変動し,現在の海水準比+5m~-120mの範囲で変動していたことが明らかとなっている.

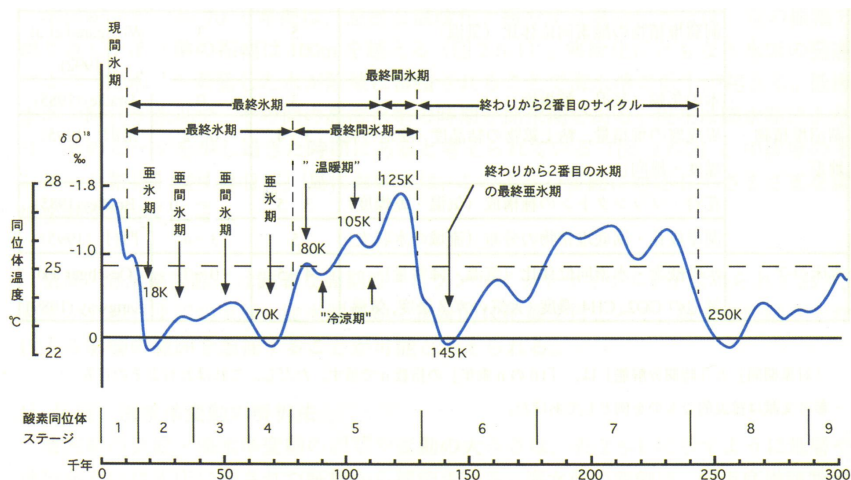


Fig.5 Fluctuation curve of oxygen isotope ratio in ocean[4]

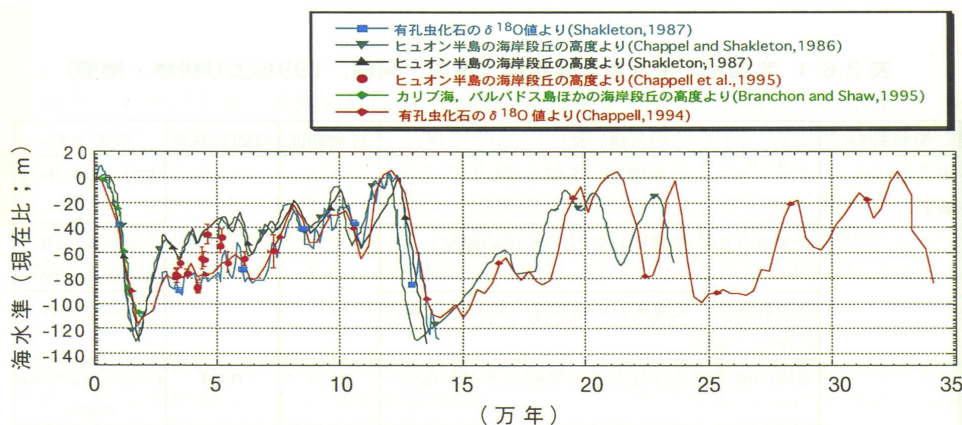


Fig.6 Sea level changes during the past 350,000 years[4]

このような過去の気候、海水準変動が将来も同様に繰り返すと仮定して、将来の気候、海水準変動を予測する。

### 3.4 隆起、侵食

候補地点において推定される隆起量、侵食量、海水準変動に基づき、候補地点の将来地形を予測する必要がある。一般的な知見として、隆起は主にプレート運動により生じていると考えられ、プレートの動きは10万年以内に急激に変わることには考えにくい[10]ことから、今後10万年程度はこれまでの隆起速度が継続すると考えられる。また、海成段丘が分布する地域の場合、その旧汀線高度と形成年代から平均隆起速度を求めることができる。ただし、隆起速度は地域差があるため、推定にあたっては、対象地域やその周辺の類似した地点の複数の観測データに基づくことが肝要である。

Fig.7 に候補地点周辺の海成段丘面分布図を示す。候補

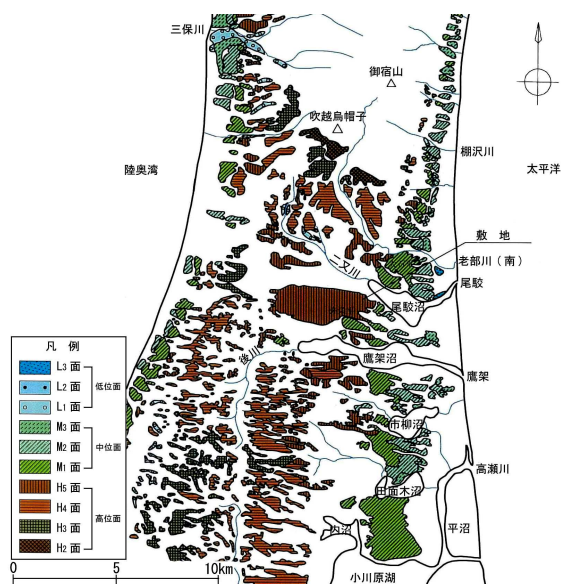


Fig.7 Distribution of marine terraces[8]

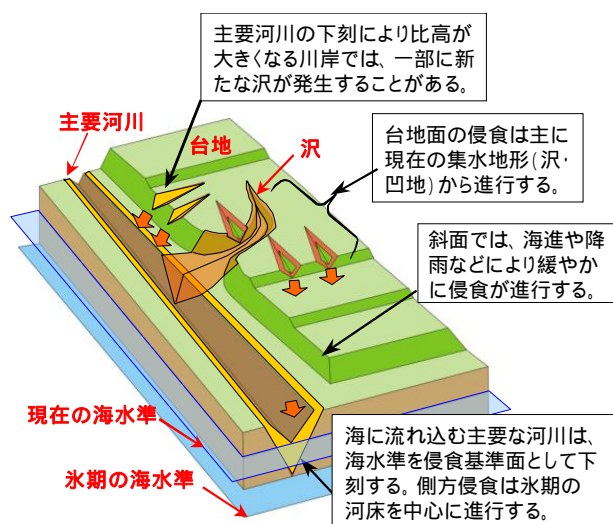


Fig.8 Concept of erosion at the candidate site (coastal area)

地点周辺の過去30万年間にわたる海成段丘面の隆起量は、概ね一定の傾向を示しており、平均隆起速度は約30m/10万年である。

候補位置（沿岸域）における侵食の概念図をFig.8に示す。一般的に、侵食は短期的には降水（表流水）により、長期的には隆起、海水準変動による侵食基準面との比高の拡大により生じる。したがって、海成段丘面における過去の侵食状況を把握した上で、将来の隆起、海水準変動状況を推定することにより、候補地点における将来の地形変化を予測することができる。

## 4 水理・地化学特性について

### 4.1 調査概要

Fig.1 地質環境調査の検討フローにおいて、候補地点の現況を把握するための調査概要について述べる。Fig.9に示すように、余裕深度処分の基本的な概念は、地下50～100m程度の所に空洞を構築し、ベントナイト、コンクリート等の人工構築物により放射性廃棄物を取り囲み、空洞外からの地下水の浸入をできる限り抑え、長期的に人工構築物に変質した場合には、放射性廃棄物に触れた地下水が生活環境圏（河川、湖沼、海等）に浸出するのをできる限り遅くするために、長期間、岩盤内に閉じ込めておくものである。

これらの性能の内、岩盤に関する性能を把握するために、地質環境調査の目的は、以下の3つがある。岩盤の閉じ込め性能を把握するために、高透水層の有無を確認するための地質調査、地下水の流れる速さ、流れる方向、および人工構築物に影響を与える地下水の水質を把握するための地下水調査、さらには、大規模な空洞を構築するために、空洞の安定性を確認するための地盤調査である。

調査位置は、Fig.10に示したとおり、日本原燃の濃縮・埋設事業所敷地内およびその周辺の台地、沢、沼である。台地、沢、沼において、ボーリング調査、調査坑による調査、および物理探査を実施した。ボーリング調査は、地上から合計23箇所実施し、岩盤の分布状況、性状、透水性

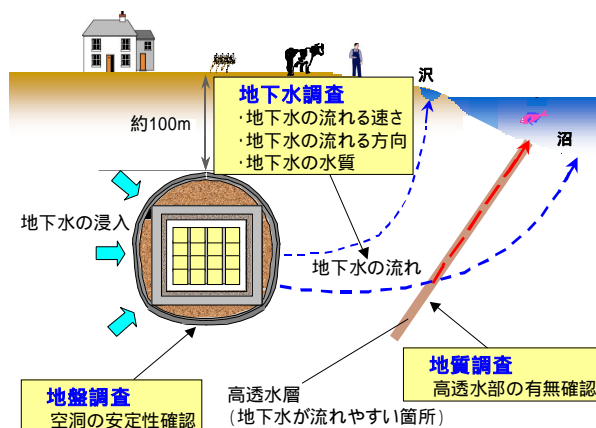


Fig.9 Purpose of the geological site investigations

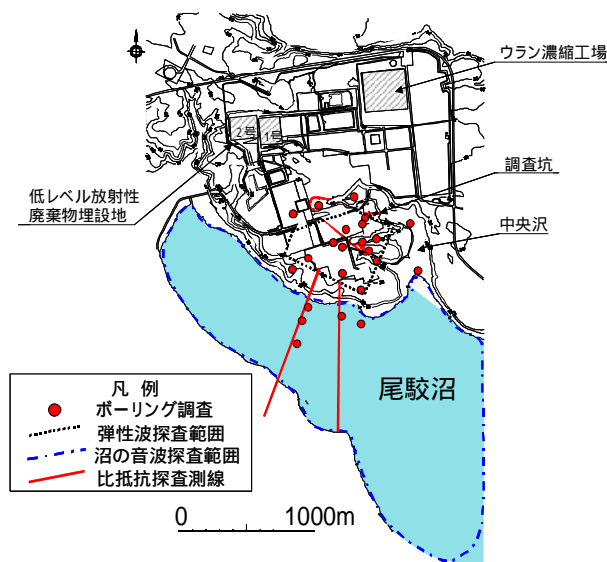


Fig.10 Location of investigations[11]

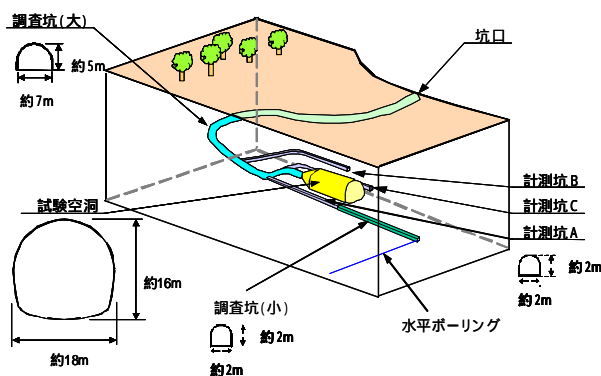


Fig.11 Schematic view of the investigation tunnel[11]

を把握するとともに、地下水位、地下水圧測定、水質調査等を実施した。

また、Fig.11 に示すとおり、幅約 7m、高さ約 5mの調査坑を延長約 1km 掘削し、ボーリング調査で得られた岩盤の分布状況、性状を確認した。さらに、その先端で地表から深度約 100mの位置に幅約 18m、高さ約 16mの試験空洞を掘削し、空洞掘削に伴う周辺岩盤の変化を調べるため、岩盤変位、および地下水圧の測定を実施した。なお、試験空洞掘削前には、空洞の側部、および上部に計測坑を掘削後、計測坑から空洞に向かいボーリング孔を掘削し、岩盤変位測定器、地下水圧測定器を設置した。

## 4.2 調査結果

### 4.2.1 地質調査

ボーリング調査および調査坑による調査から得られた地質分布図を Fig.12 に示す。標高 - 80mにおける地質平面図に示すとおり、この辺りには、新第三紀中新世に形成された鷹架層が分布し、主にピンク色で示す軽石凝灰岩層と緑色で示す軽石混り砂岩層が分布している。また、平面図と南北断面図に示すとおり、いくつかの断層が確認されている。

sf 断層は、鷹架層堆積後、間もない未固結時に海底地すべりにより形成されたものであると考えられる。その根拠は、Fig.13 に調査坑 T.D.987.3mで確認された sf - c 断層の写真を示すが、断層の境界面は固結・ゆ着しており、通常の断層に見られるような破碎部やせん断性割目は認められないこと、また、一部に流動変形した後、固結した跡が認められることからである。

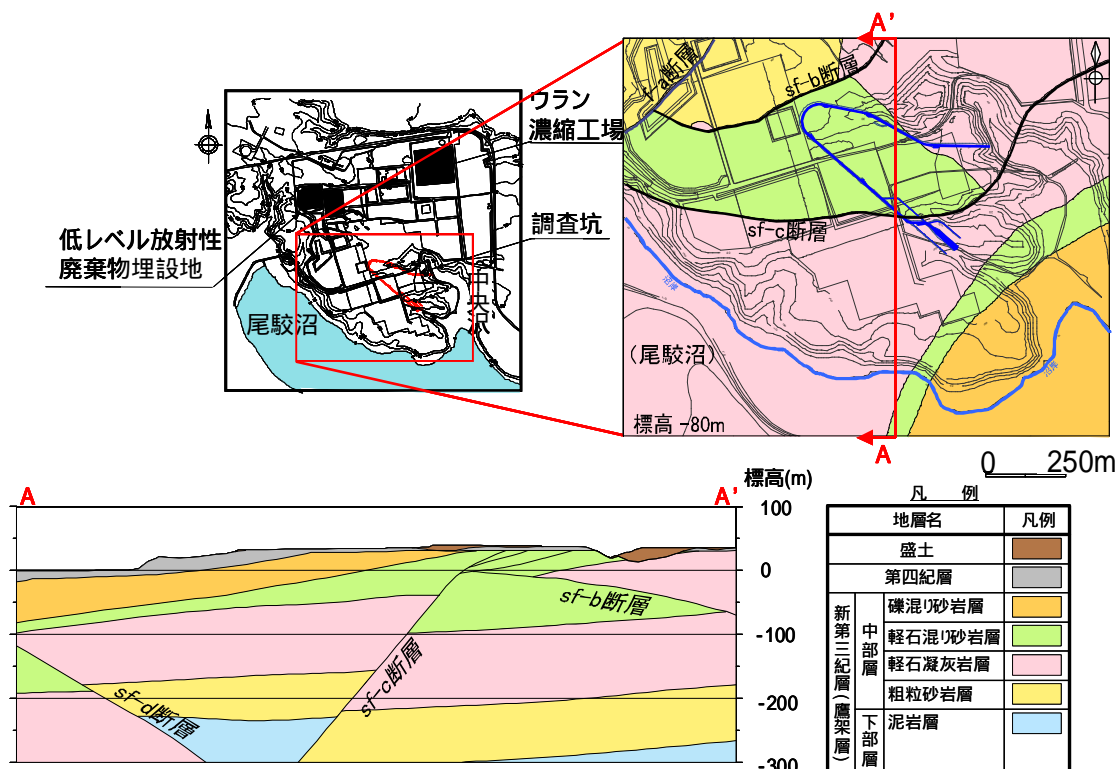


Fig.12 Geological distribution and profile[11]



Fig.13 Photo of sf-c fault at the investigation tunnel (T.D.987.3m)[11]

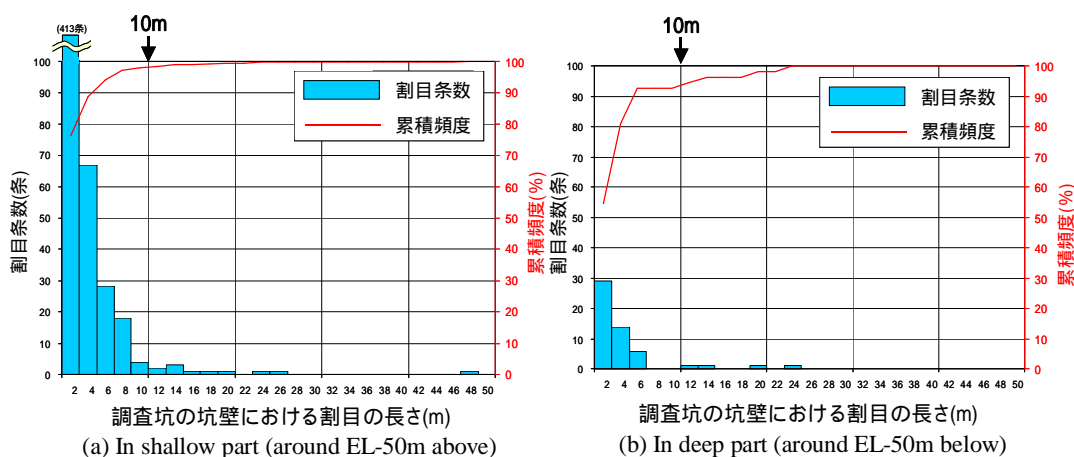


Fig.14 Distribution of fracture trace lengths[11]

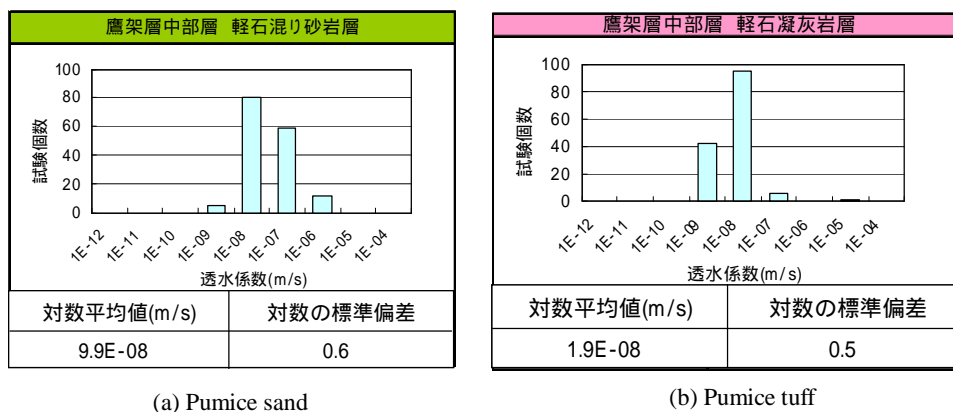


Fig.15 Hydraulic conductivities[11]

一方、f-a 断層は、構造的な断層であり、日本原燃(1989)[12]に記載のとおり、断層を境して接する岩石が混在した部分が幅 10~160cm に渡って認められ、固結・密着している部分と鏡肌を有する部分とがある。また、11.2~11.5 万年前に形成された洞爺火山灰[13]に覆われる段丘堆積層に変位・変形を与えていないことを確認している。

Fig.14 に調査坑で観察された割目トレース長分布を示す。標高 -50m 以浅と以深とで比較すると、深度が深いほど、割目が少なくなっていることが分かる。また、各グラ

フにおいて累積頻度に着目すると、10m 以内の割目が 9 割あるいはそれ以上を占め、大きな割目はほとんどないことが分かる。

#### 4.2.2 地下水調査

ボーリング孔において実施した原位置透水試験から得られた地層ごとの透水係数を Fig.15 に示す。Fig.12 の地質分布図で示した標高 -80m 付近に主に分布する軽石混り砂岩層、軽石凝灰岩層ともに、透水係数の平均値は  $10^{-8}$  m/s のオーダーである。

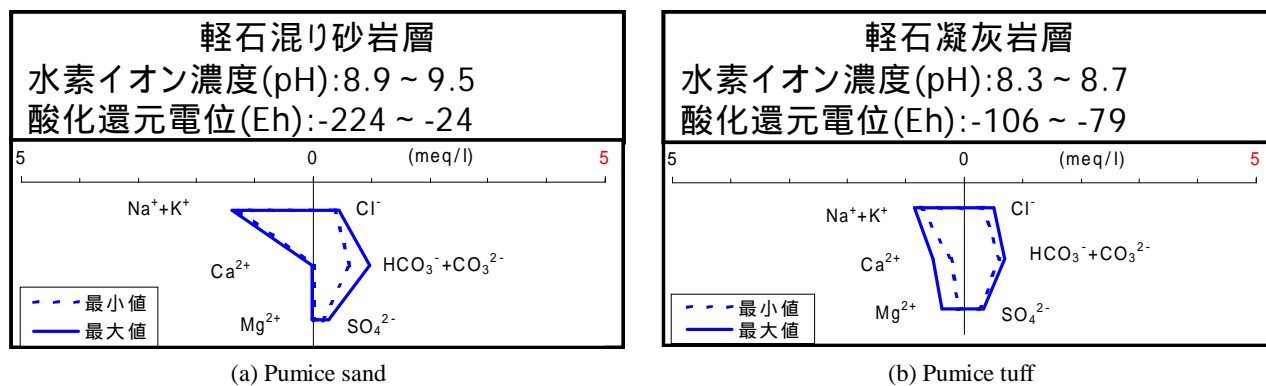
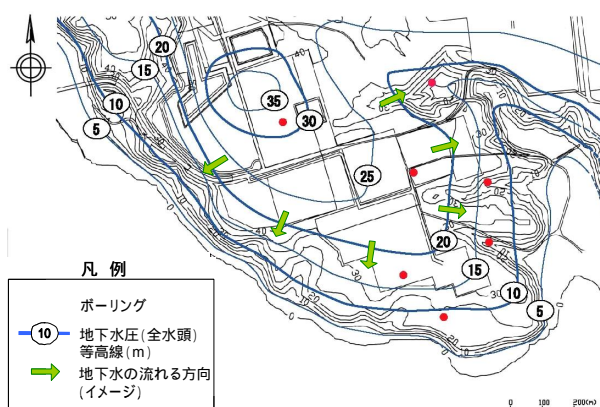


Fig.16 Water quality (around the test cavern)[11]



注) 地下水位分布図に重ねて地表面の地形等高線を記載

Fig.17 Pore water pressure distribution (EL-80m) before excavation of the investigation tunnel (June 2002)[11]

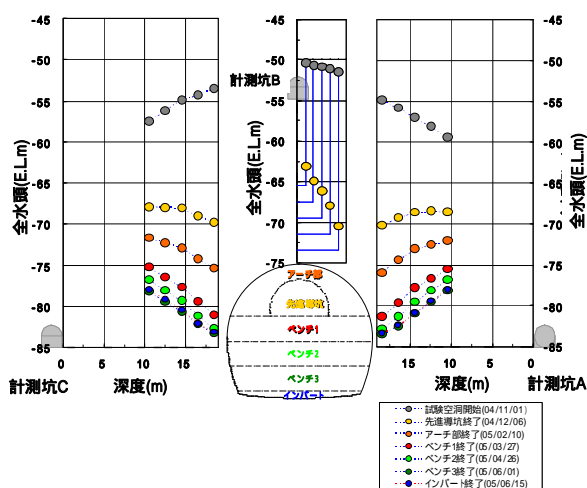


Fig.18 Pore water pressure changes (during excavation of the test cavern)

Fig.16 に地下約 100m の試験空洞設置深度付近における地下水の水質調査結果を示す。軽石混り砂岩層、軽石凝灰岩層ともに弱アルカリ性を示し、還元性の地下水であることが確認できている。また、両者とも淡水型の地下水であり、降水とほぼ同じ水質の成分となっていることから、降

水が地表面から涵養し、試験空洞深度まで到達していることが分かる。さらに、この辺りに分布する地下水は、人工構築物の変質を促進するような成分が少ないことを確認した。

ボーリング孔を利用した地下水圧測定から得られた標高 - 80m における地下水圧分布図を Fig.17 に示す。なお、測定時期は調査坑を掘削する前の 2002 年 6 月である。この図で示す数値は、全水頭と呼ばれるもので、地下水圧から求める圧力のエネルギーに位置のエネルギーを加えたものである。この数値の大きい方から小さい方へと、地下水は流れる。したがって、この辺りの地下水は、南側の尾根谷と中央沢の方に流れていることが分かる。また、この地下水圧分布および透水性等から、この深度付近における地下水の流れる速さを求めると、平均して年間 10cm 程度である。

試験空洞掘削に伴う空洞近傍の地下水圧の変化状況を Fig.18 に示す。試験空洞掘削開始時には、計測坑に向かう地下水の流れであったが、最初に先進導坑を掘削した段階で、地下水圧が大きく減少するとともに、試験空洞に向かう流れに変化し、その後、空洞の掘削が進むにつれて、地下水圧が徐々に減少していることが分かる。

試験空洞掘削に伴い、発生した掘削影響領域を把握するために実施したボアホールTVによる観察箇所を Fig.19 に示す。割目観察断面として A, B, C の 3 断面を選定し、アーチ部、側壁部、インバート部において、空洞掘削に伴う新規割目を調査した。アーチ部から側壁部における空洞掘削に伴う新規割目の発生位置を Fig.20(a) に示す。赤線で示している箇所が新規割目を確認した位置である。新規割目が発生した範囲を掘削影響領域とすると、アーチ部においては 1m、側壁部においては 0.4m、インバート部においては 2m の範囲が掘削影響領域と考えられる。

また、インバート部のボーリング孔において、掘削の影響がないと想定されたアーチ掘削後からベンチ 2 掘削後時点と、全断面掘削後時点で透水試験を実施し、空洞掘削に伴う透水性の変化を確認した結果を Fig.20(b) に示す。この図から空洞掘削に伴い透水性が大きく変化しているのは、割目発生箇所およびその近傍のみであることが分かる。

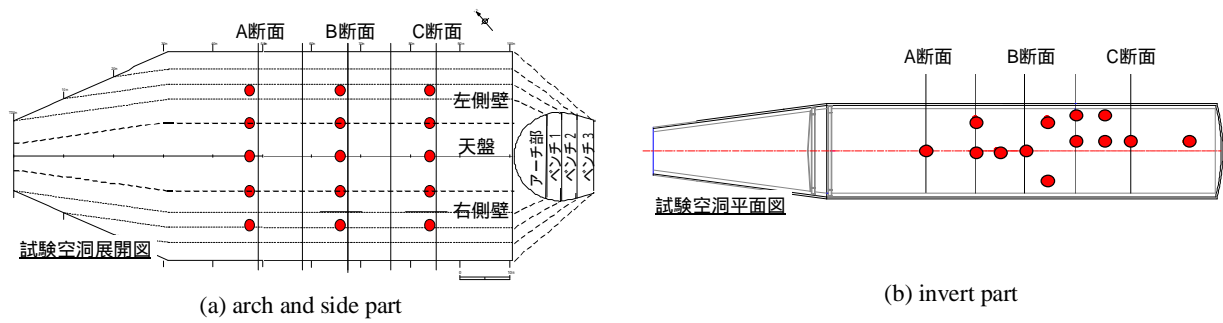


Fig.19 Location of investigation to confirm fractures by borehole TV observations

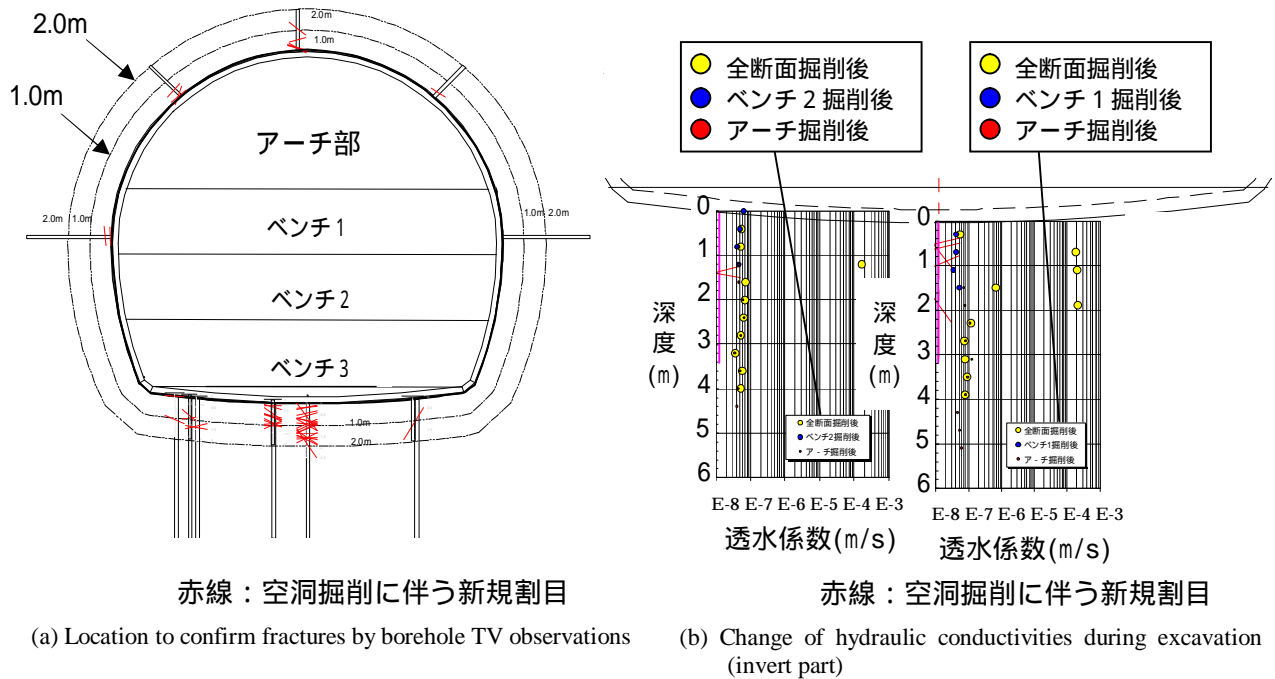


Fig.20 Excavation disturbed zone around the test cavern

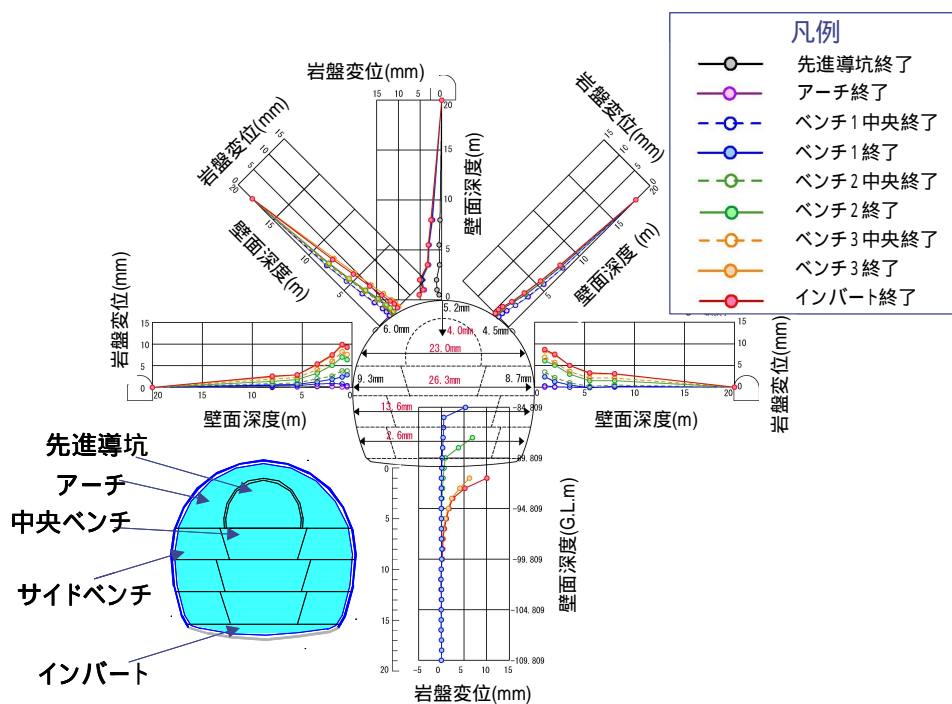


Fig.21 Rock mass deformation measurements[11]

したがって、空洞掘削に伴う割目発生を予測することが、空洞近傍の透水性を予測する上で重要となる。

#### 4.2.3 地盤調査

試験空洞掘削に伴う空洞近傍における岩盤変位測定結果を Fig.21 に示す。幅約 18m、高さ約 16m の大規模な空洞を掘削しているが、岩盤変位は側壁部で最大となり、全断面掘削後時点で 1cm 程度と非常に小さい変位であることが分かる。また、アーチ部においては、掘削の初期段階（アーチ部掘削時）までに変位しており、その後、ほとんど変位していないことが分かる。

なお、深度 50～100m 付近に分布する軽石凝灰岩層を対象に、当該深度相当の拘束圧をかけて実施した三軸圧縮試験による岩石の軸差強度は 4MPa 程度である。

#### 4.2.4 地下水流動解析の試算例

これまでの調査結果から得られたデータを用いて、現状の地下水の流れを試算した例を Fig.22 以降に示す。まず、地下水流動解析を行う際のモデル化の方針を Fig.22(a) に示す。実際の地盤において、連続性の乏しい小規模な高透水性部と、割目等の高透水性がないマトリクス部については平均化し、等価な透水性を与えることによりモデル化する。一方、ある程度の連続性を有する大規模な高透水性部については、基本的に調査によりすべて見つけモデル化する。この両者のモデル化により水理地質区分ごとに透水係数を設定し、構築した解析モデルを Fig.22(b) に示す。また、この解析モデルを用いて、3 次元の定常地下水流動解析を実施した試算例を Fig.22(c) に示す。黒い線で示されているのが、標高 - 80m を始点とした流跡線であるが、Fig.17 の地下水圧分布図で示されたとおり、地下水の流れは沼に向かうものと、沢に向かうものがあることが分かる。

また、Fig.23 に計測坑 A 掘削前後の地下水圧測定結果と地下水流動解析結果との比較を示す。比較した箇所は、沢から台地および沼までの範囲で、試験空洞を横断した北東から南西に向かう鉛直断面である。調査坑掘削前および計測坑 A 掘削後とも、解析結果は実測値をある程度、再現できていることが分かる。このように、現況を精度良く再現することにより、解析モデルおよび境界条件等の妥当性を検証した上で、将来の地下水流動を予測する必要がある。

### 5 まとめ

これまで述べてきた地質環境調査から明らかになった点をまとめると、以下のとおりである。

地質環境の長期的な変動に関しては、候補地点において、火山活動および断層活動による施設の直接的な破壊がないことを確認するとともに、気候・海水準変動、隆起・侵食等、将来の地質環境変動をある程度の精度で予測可能である見通しを得た。

地質調査では、候補地点には、主に鷹架層が広く分布しており、地下水が速く移動するような場所がないことを確認した。

地下水調査では、候補地点の鷹架層は、割目が少なく、地下水の流れる速さは平均して年間 10cm 程度と遅いことを確認した。さらに、人工構築物の変質を促進するような地下水成分が少ないことも確認した。

地盤調査では、候補地点において安定した大規模な空洞を構築できることが確認できた。

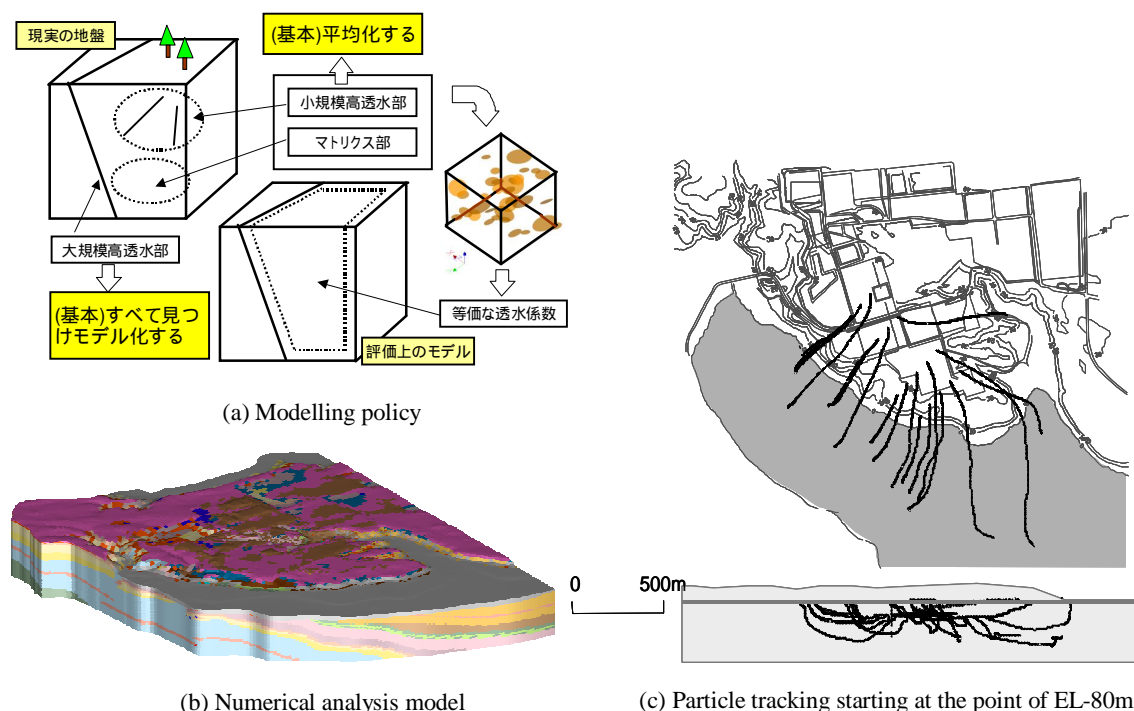


Fig.22 Numerical analysis examples of groundwater flow (1)[14]

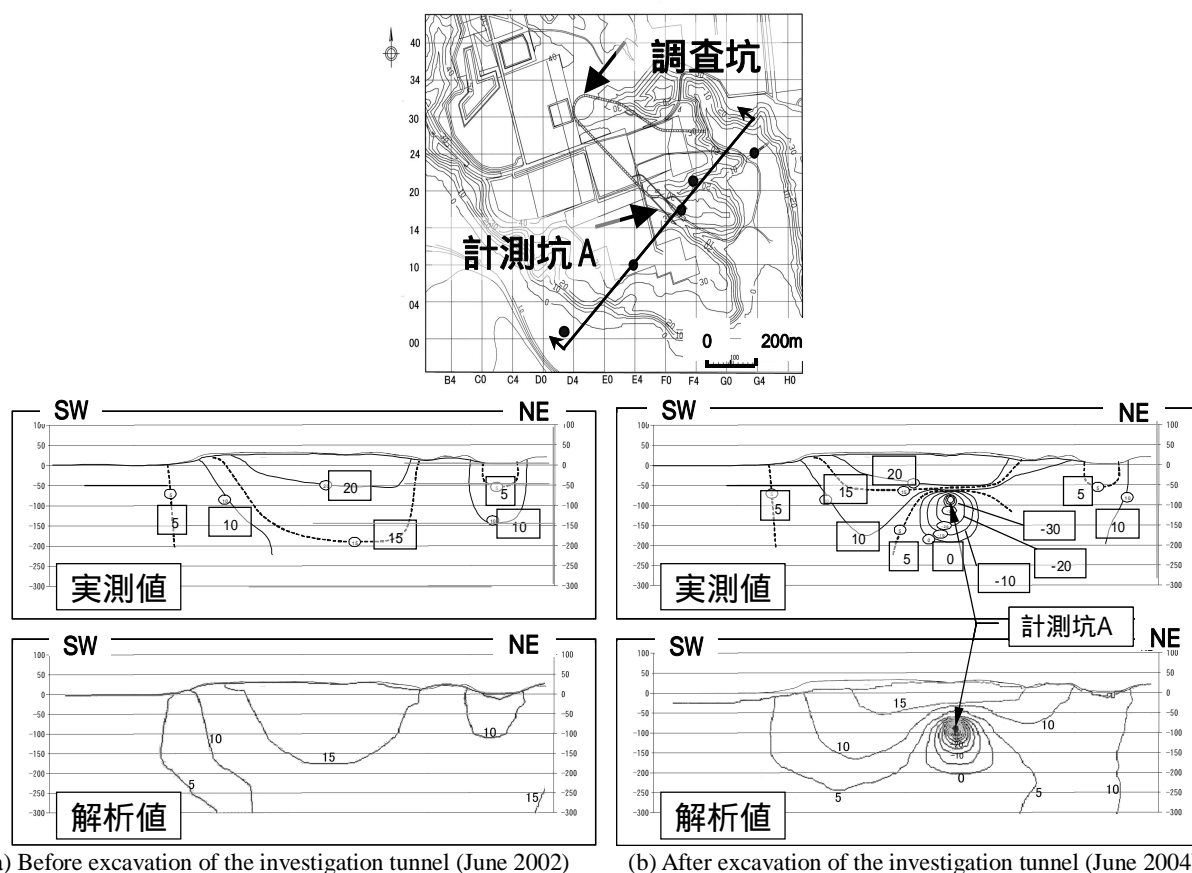


Fig.23 Numerical analysis examples of groundwater flow (2)[14]  
(Comparison of observations and analyses)

なお、地質環境調査結果については、当社ホームページの以下の URL に掲載されているので、参照していただきたい。

<http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2006/pr060901-1.html>

今後、地質環境調査結果に基づき、地下水流動解析の妥当性の検証を進め、さらに精度を向上させるとともに、専門家の意見も聞きながら地質環境の長期的な変動予測の精度を向上させ、長期変動予測の妥当性を示していく予定である。

#### 謝辞

本稿での検討にあたり、(株)ダイヤコンサルタントの矢島一昭氏、杉俊二氏にご協力いただいた。また、バックエンド夏期セミナーにおいて、座長を務めていただいた(独法)日本原子力研究開発機構の梅木博之氏をはじめとして、東北大学の朽山修教授、原子力発電環境整備機構の北山一美氏など多くの方々からご意見をいただいた。本稿の執筆にあたり、それらの貴重なご意見を参考にさせていただいた。ここに、ご協力およびご助言いただいた方々に深く感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

[1] 大口健志，吉田武義，大上和良：東北本州弧における

新生代火山活動域の変遷．地質学論集 32，431-455 (1989)．

[2] 梅田浩司，林信太郎，伴雅雄，佐々木実，大場司，赤石和幸：東北日本，火山フロント付近の 2.0Ma 以降の火山活動とテクトニクス推移．火山 44(5)，233-249 (1999)．

[3] 土木学会原子力土木委員会地下環境部会：精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方 (2006)．

[4] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次とりまとめ - 分冊 1 わが国の地質環境．JNC TN1400 99-021 (1999)．

[5] 原子力発電環境整備機構：概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠．NUMO-TR-04-02 (2004)．

[6] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次とりまとめ - 総論レポート．JNC TN1400 99-020 (1999)．

[7] 活断層研究会 200 万分の 1 活断層図編纂ワーキンググループ：200 万分の 1 日本列島活断層図 - 過去数十万年前の断層活動の特徴 - ．活断層研究 19，3-12 (2000)．

[8] 日本原燃：核燃料物質加工事業許可申請書 (MOX 燃

料加工施設) (2005) .

- [9] 日本第四紀学会：百年・千年・万年後の日本の自然と人類 - 第四紀研究にもとづく将来予測 - , 古今書院, 231 (1987) .
- [10] 松末和之, 藤原治, 末吉哲雄：日本列島における最終氷期最寒冷期の気候 . サイクル機構技報 6, 93-103 (2000) .
- [11] 日本原燃：低レベル放射性廃棄物の次期埋設に関する本格調査結果について . (2006) .
- [12] 日本原燃：低レベル放射性廃棄物貯蔵センター廃棄物埋設事業許可申請書 一部補正 . (1989) .
- [13] 町田洋, 新井房夫：新編 火山灰アトラス - 日本列島とその周辺 - , 東京大学出版会, 98-100 (2003) .
- [14] 守友常雄, 佐々木泰, 白石知成, 細谷真一：地下水解析のモデル化の方法 . 日本地下水学会 2005 年秋季講演会, 青森, 10 月 20,21 日, 76-81 (2005) .

