

地下水環境の測定と課題

平成30年12月18日（火）

竹内 真司（日本大学）

「福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す『廃炉地盤工学』」に関する講習会

1

背景

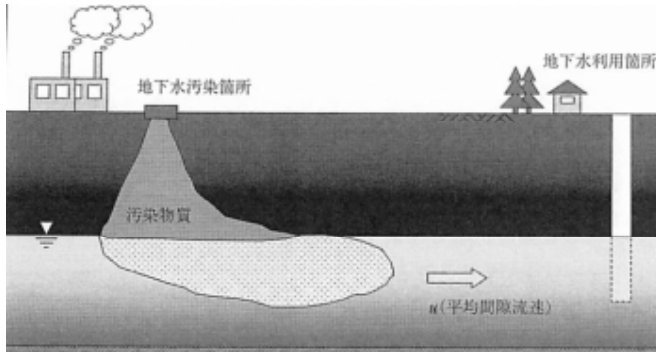
- 東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故による汚染水の地盤中での移行挙動の評価→トレーサ試験
 - 地下環境（地下水環境）の推定
- 長期の廃炉事業での人材育成
- サイト外のフィールドでノウハウを蓄積

2

トレーサ試験の適切な実施のために

●地下環境の十分な理解

- 対象層（帯水層、水みちなど）の特定
- 広がり
- 透水性
- 地下水の流向・流速 など



地下水のトレーサ試験（日本地下水学会、2009）より

➔孔、試験区間の配置

3

講演の概要

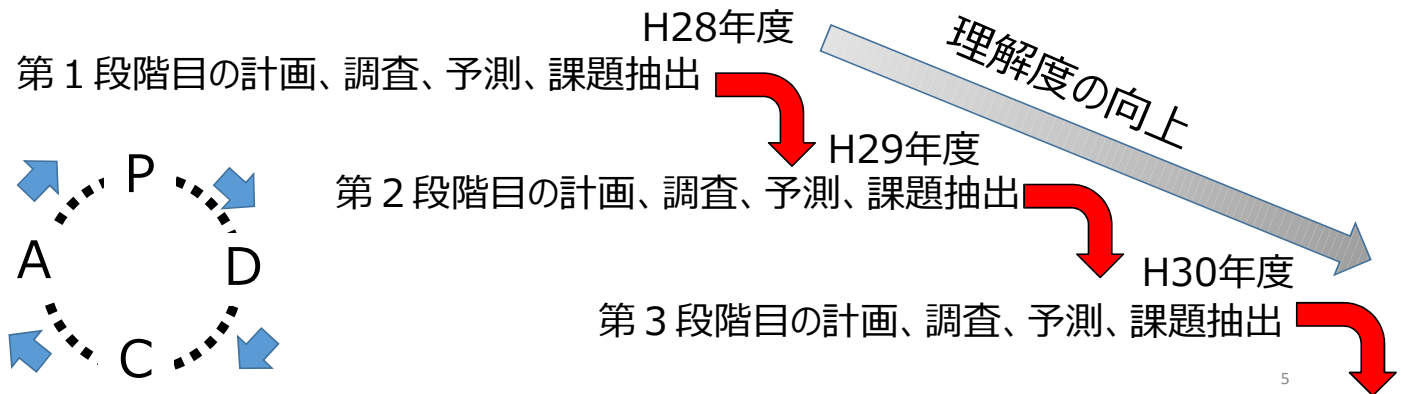
- トレーサ試験実施の前段として重要な、地下（水）環境の理解のための、
 - 調査計画の考え方
 - 調査結果と解釈
 - 調査全体の評価
 - 課題

などを紹介

4

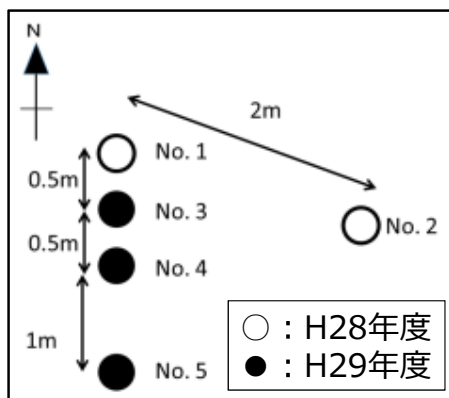
計画策定の基本的考え方 ～繰り返しアプローチ～

1. 第1段階目の計画、調査、場の予測、課題の抽出
2. 第2段階目の計画、調査、場の予測、課題の抽出
3. 第3段階目の計画、調査、場の予測、課題の抽出



5

試験サイト



日本大学文理学部
(東京都世田谷区)

6

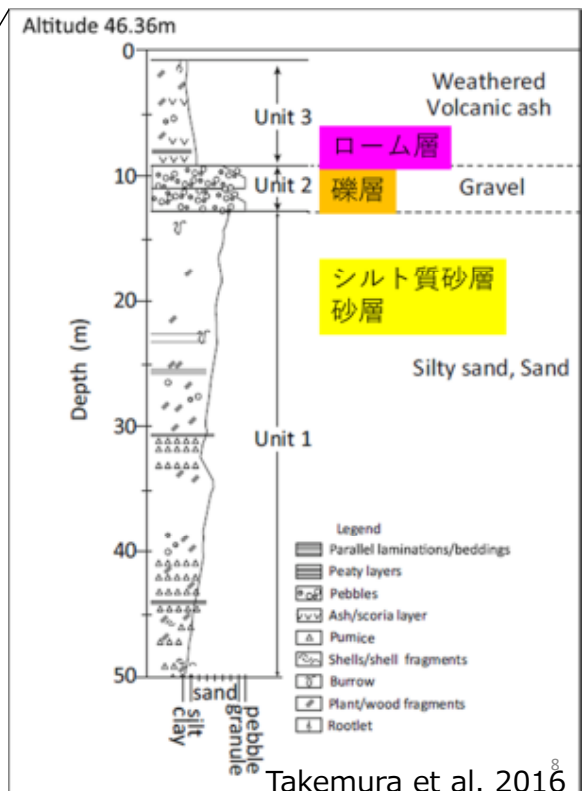
第1段階目の調査 —既存資料調査—

調査—

- 地形・地質
- ボーリング資料
- 地下水流動解析（既存情報 基 構築）

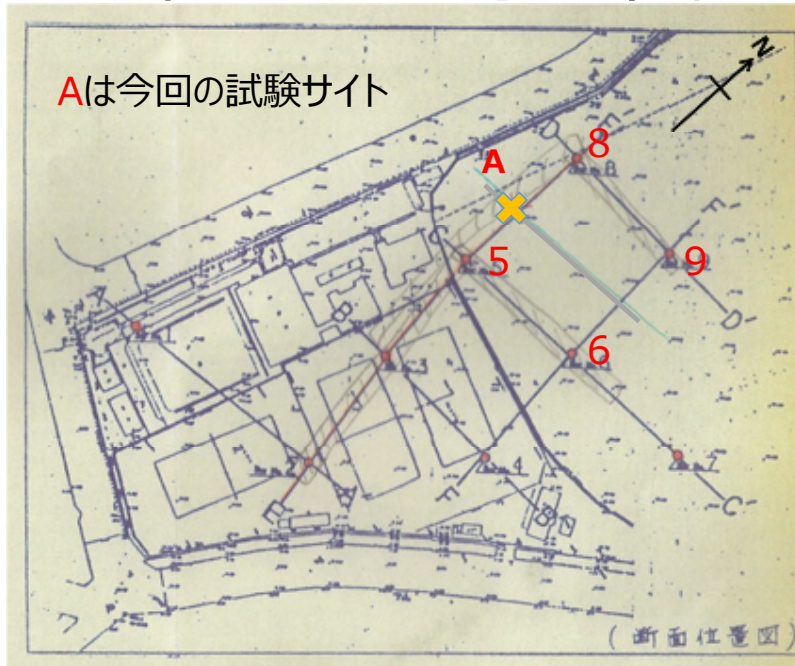
7

試験サイト周辺の地形と地質柱状図



8

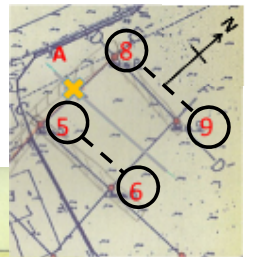
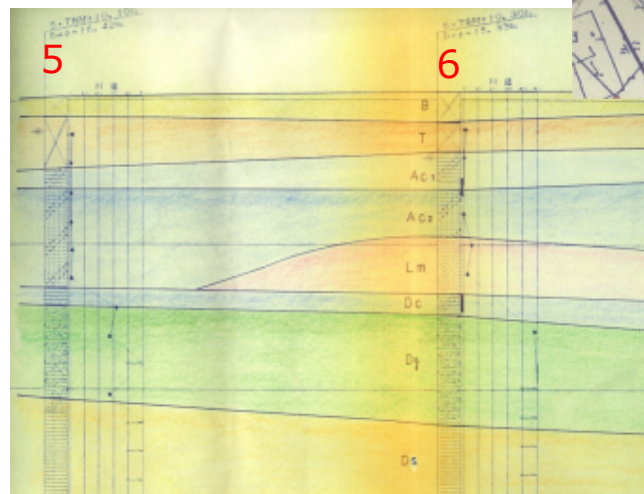
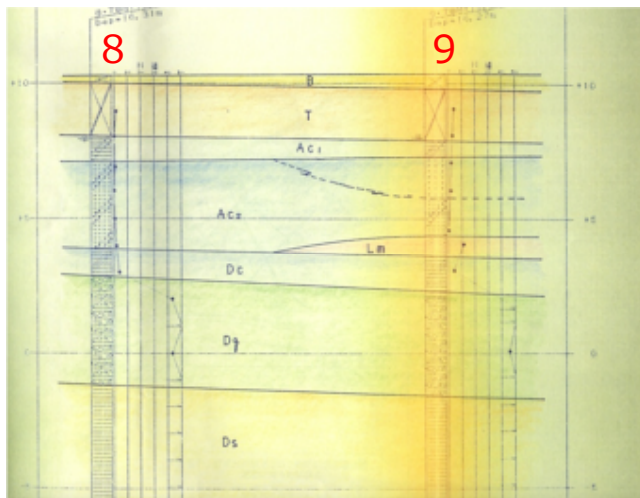
既存ボーリング孔の位置



日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査 (1988)

9

8孔 9孔間、および5孔 6孔間の地質断面図

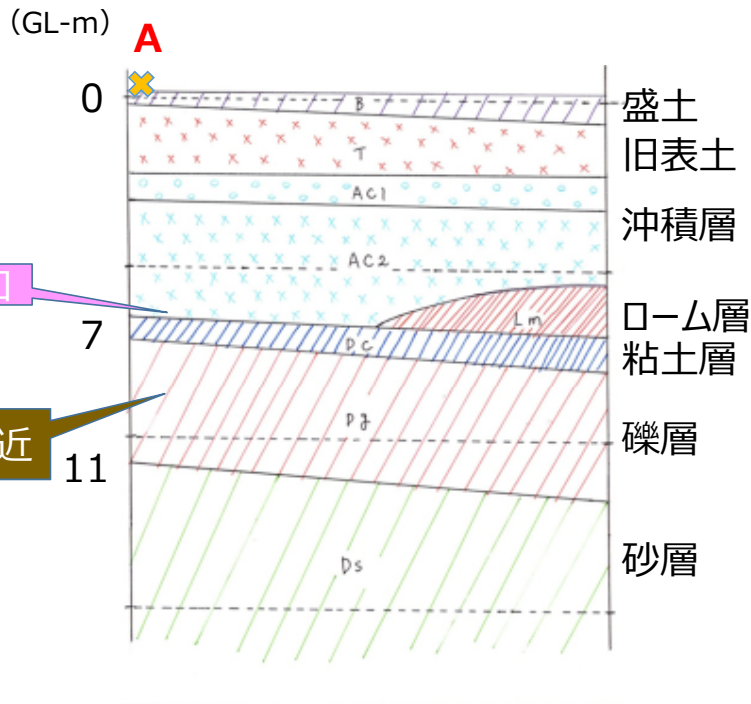


日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査 (1988)

- 東側 (6孔、9孔) にローム層 (Lm)
- 地層は若干東方向に傾斜

10

サイトの地質予測

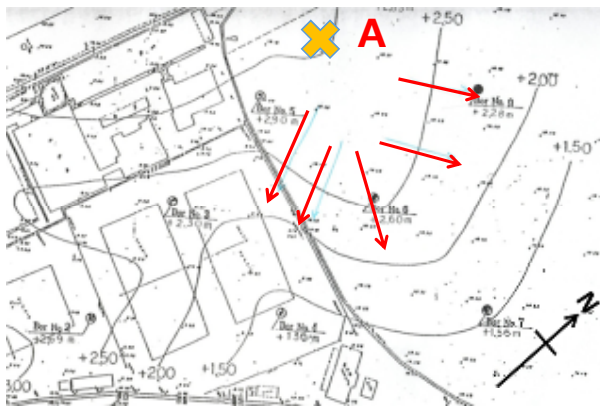


11

地下水流向予測

●地形勾配

➤ 地表面のコンター（基準点からの高さ）

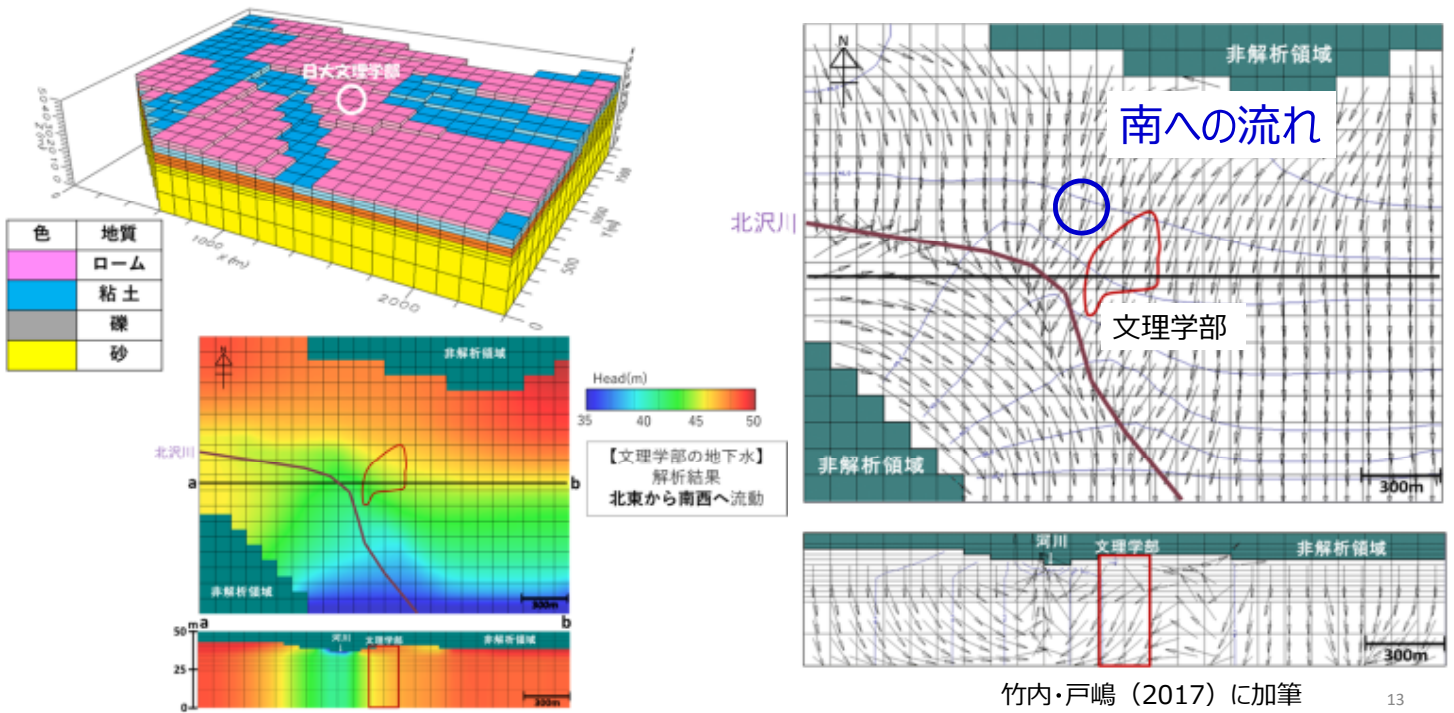


北東～東～南東？

日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査（1988）

12

地下水流動解析結果



13

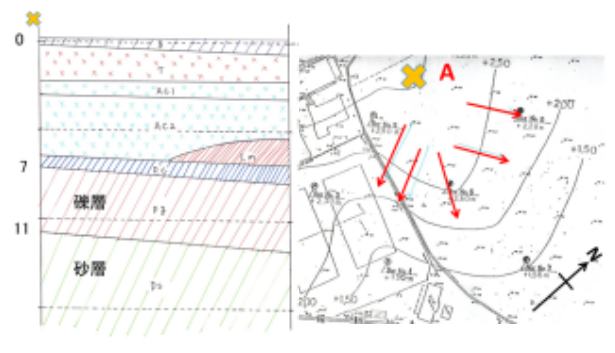
既存情報に基づく地質環境の予測結果

●地質

- 深度10m前後に礫層（厚さ約4m）が存在
- その上位に粘土～シルト層、下位は砂層
- 帯水層は、礫層と下位の砂層と推定

●地下水流動

- 北東～南東方向（地形勾配）、あるいは南方向（地下水流動解析）



- 初年度（H28年度）は、東西方向に約20m（砂層まで）2孔掘削を計画

14

地下環境推定のための調査目的と内容

- 帯水層の深度の特定
 - ・ボーリング（コア）掘削：肉眼（コア観察）による高透水性区間の確認
 - ・電気検層：比抵抗による帯水層の確認
- 地下水流動方向の推定
 - ・流向・流速測定：自然状態での流向・流速（ダルシー流速）の推定
- 地下水流動層の推定
 - ・フローメータ検層：流量の推定
 - ・温度検層：水みちの推定
- 透水性の推定
 - ・水理試験（揚水試験）
- 帯水層の広がり
 - ・掘削応答（掘削中の観測孔への水圧応答観測→掘削中の水圧変動観測）

15

調査内容（H28年度）

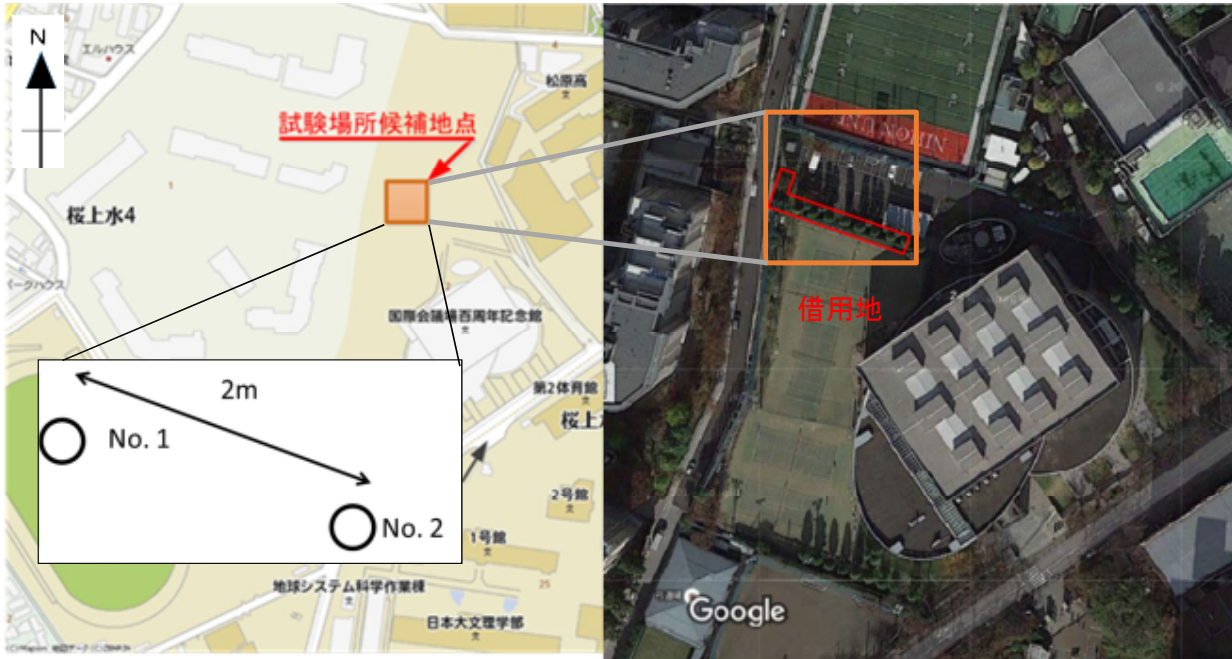
- ボーリング掘削 →地質観察（深度約18m：砂礫層の下位まで）
- 孔内検層（電気検層、フローメータ検層）→比抵抗、流量分布
- 流向・流速測定
- 水位（水圧）計設置（孔間水理試験による水圧応答観測のため）
- 孔内検層（電気検層）→比抵抗分布
- 透水試験（単孔）
- 孔間水理試験（揚水試験）→透水性、応答確認



H29年度調査

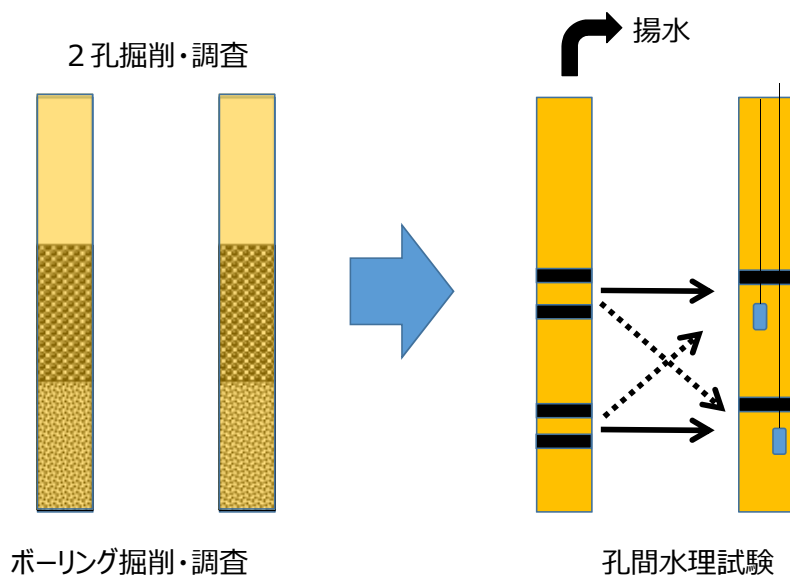
16

ボーリング孔位置 (H28年度)



17

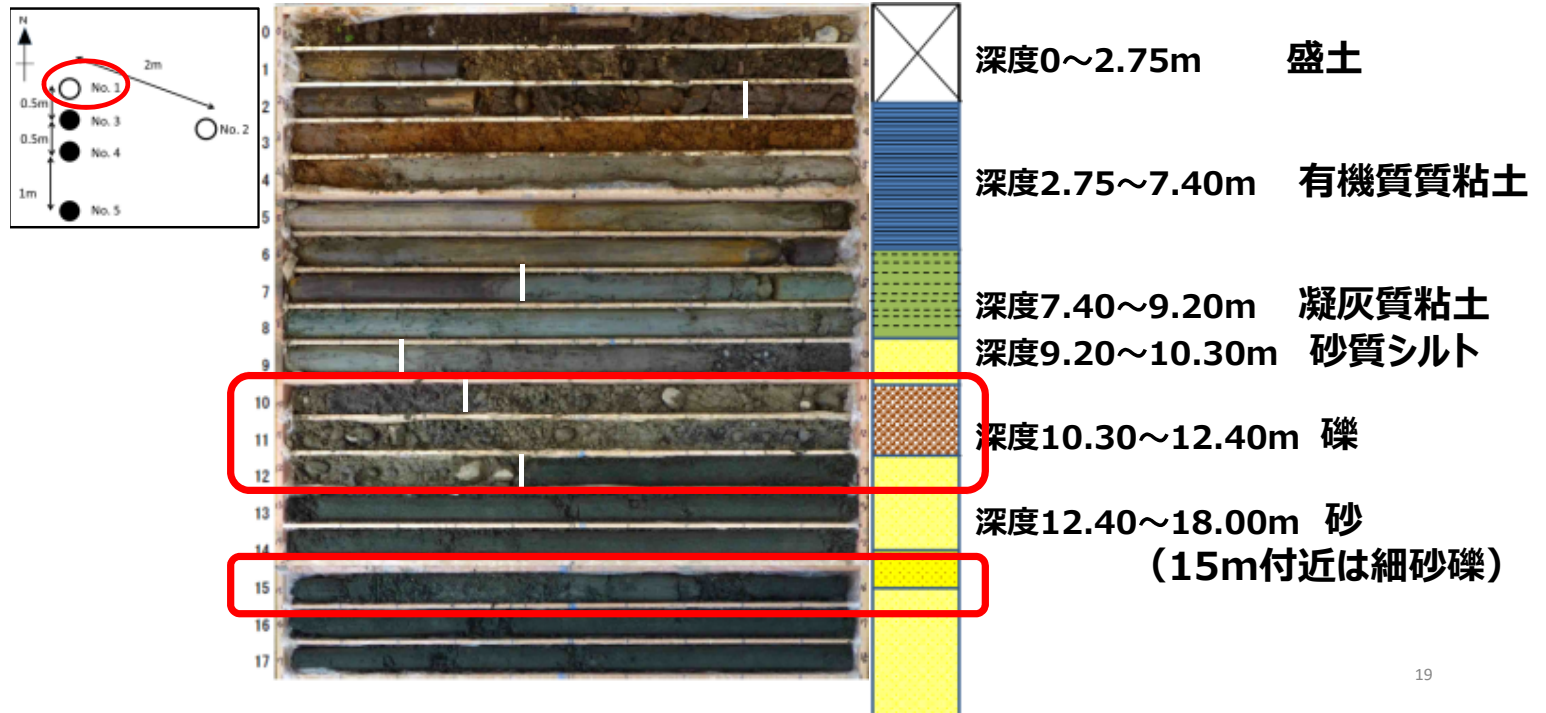
H28年度調査手順 (計画)



- ボーリング掘削・調査
- ✓ コア観察
 - ✓ 電気検層
 - ✓ 流向・流速試験
 - ✓ 透水試験 (単孔)

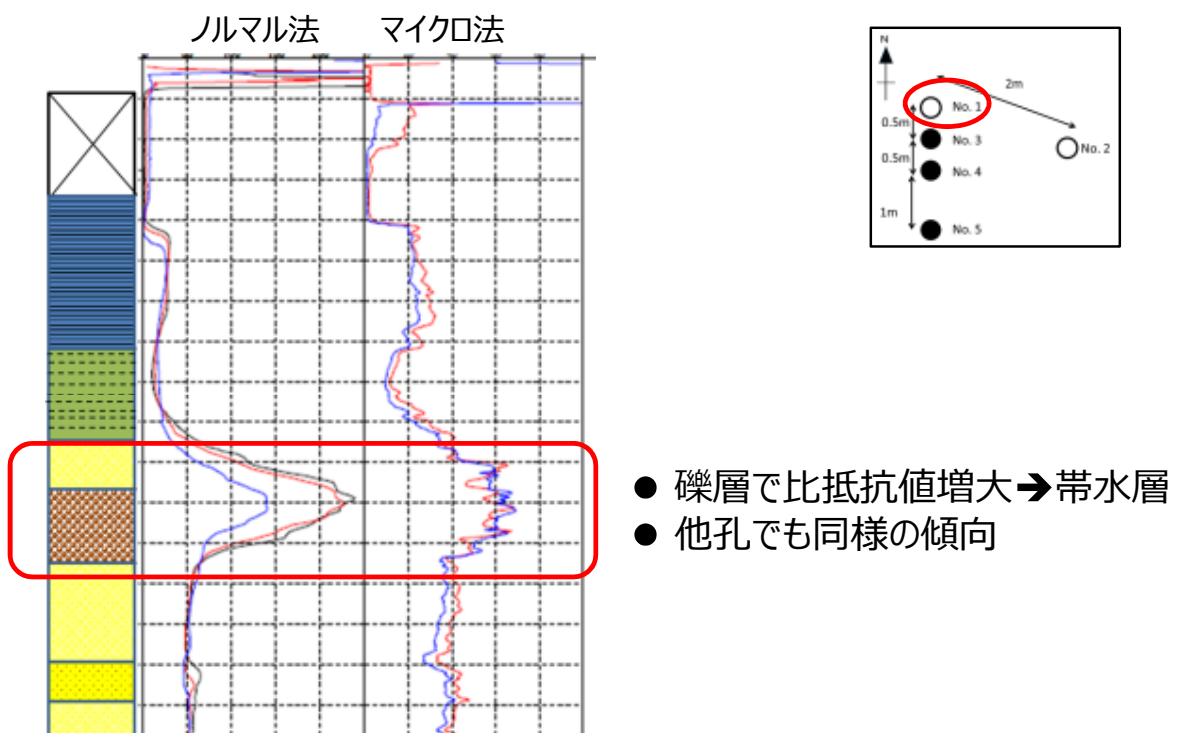
18

H28年度-地質分布 (No. 1 孔 例) -



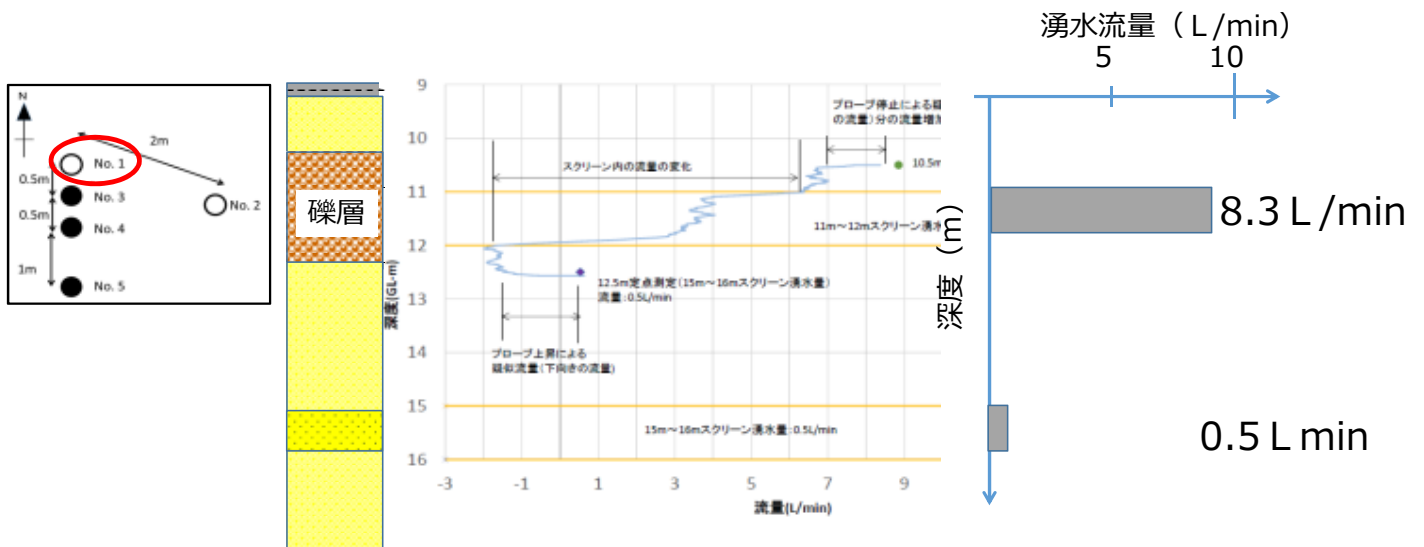
19

H28年度-電気検層 (No. 1 孔) -



20

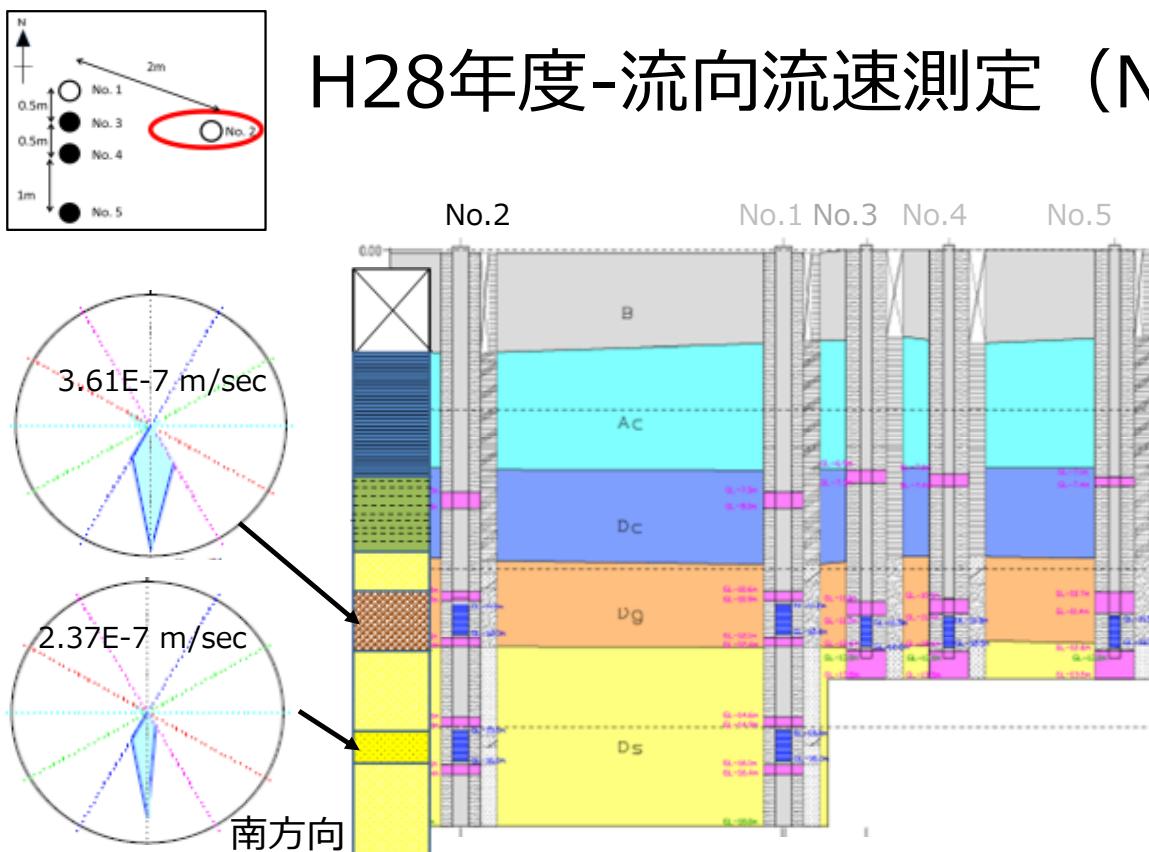
H28年度-フローメータ検層 (No.1孔) -



- ・11~12mスクリーン区間 (礫層) の流量は8.3 L/min ➡ 礫層が主要な帯水層
- ・15~16mスクリーン区間 (砂層) の流量は0.5 L/min

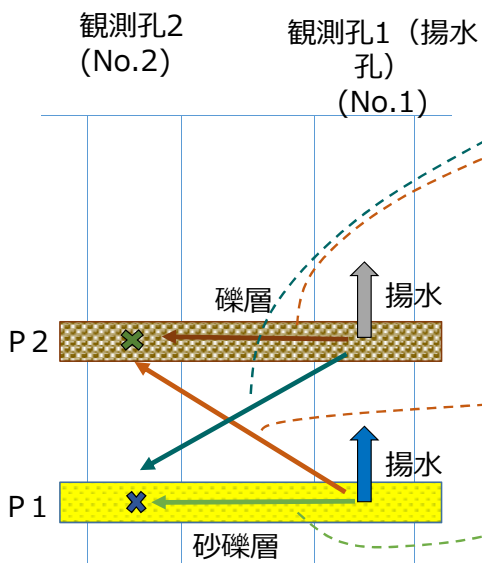
21

H28年度-流向流速測定 (No. 2孔) -

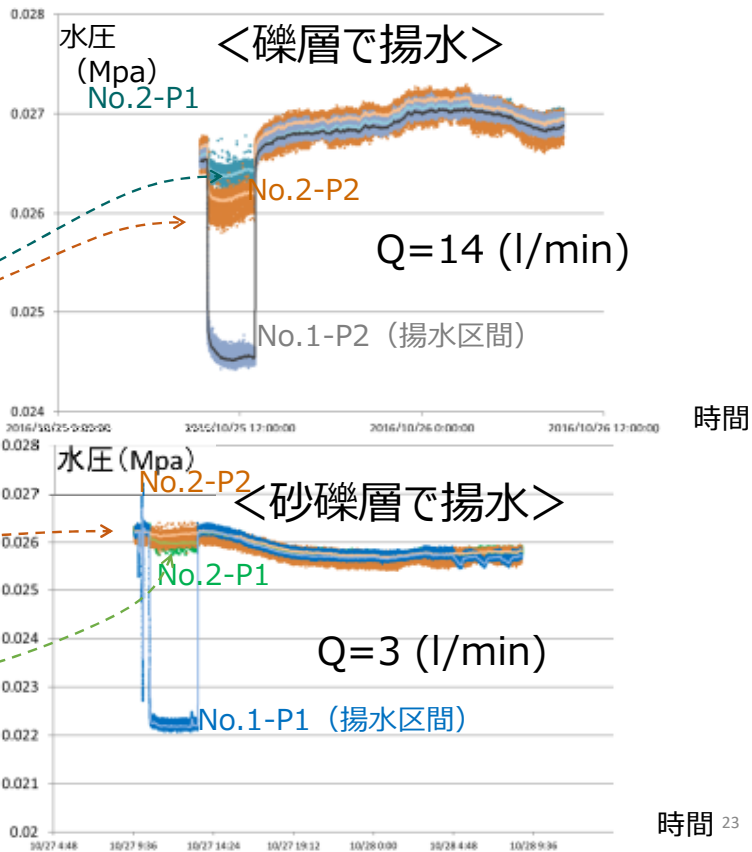


22

揚水による応答



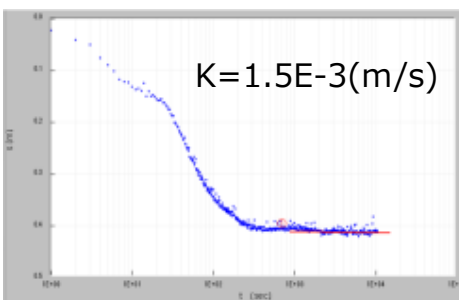
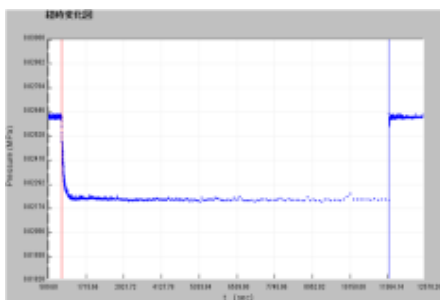
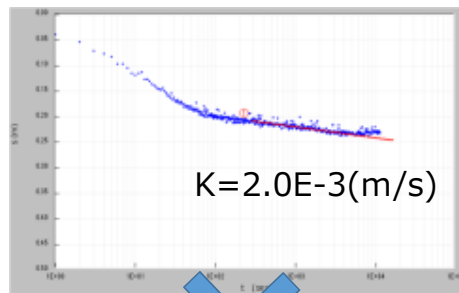
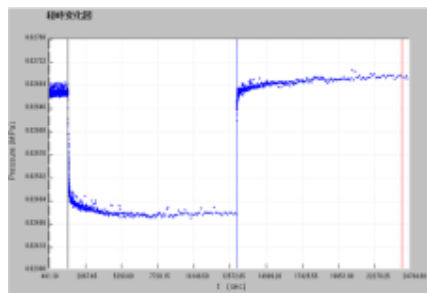
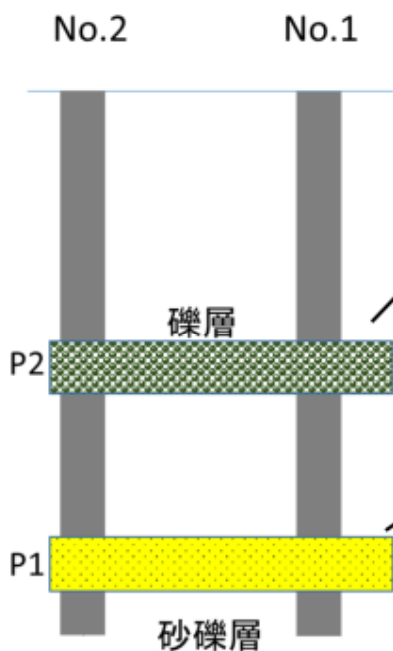
礫層と砂礫層は水理的に連結



H28年度-揚水試験-

圧力変化図

Cooper-Jacobによる
透水係数評価結果



第2段階目の調査 -H28年度 結果 基 H29年度計画-

●H28年度の調査結果の概要

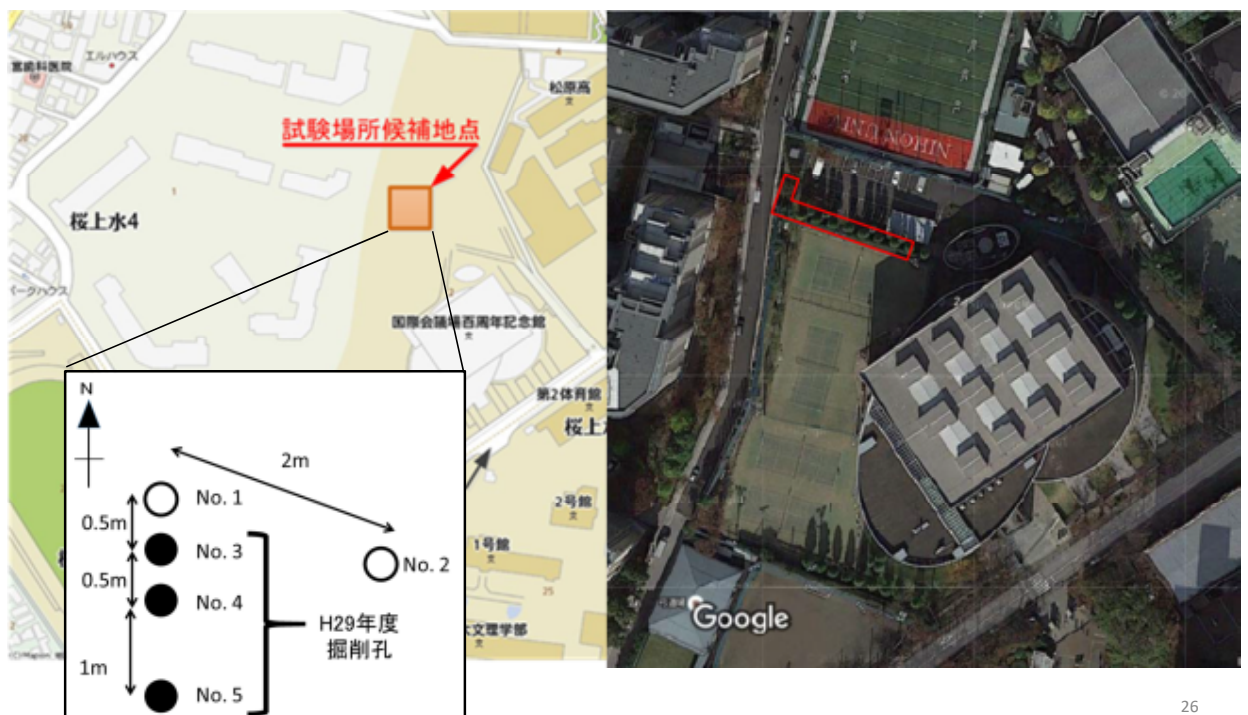
- 帯水層の特定：**礫層**を試験対象区間に
- 地下水の流向は**南方**
- ダルシー流速は $1E-7$ (m/s)オーダー

●H29年度の調査計画の概要

- 南北方向にボーリング孔を配置 (H28のNo.1孔から南方へ3孔)
- ボーリング掘削深度は礫層まで (深度約13.5m)
- 流向・流速の測定を実施
- 揚水試験
- トレーサ試験

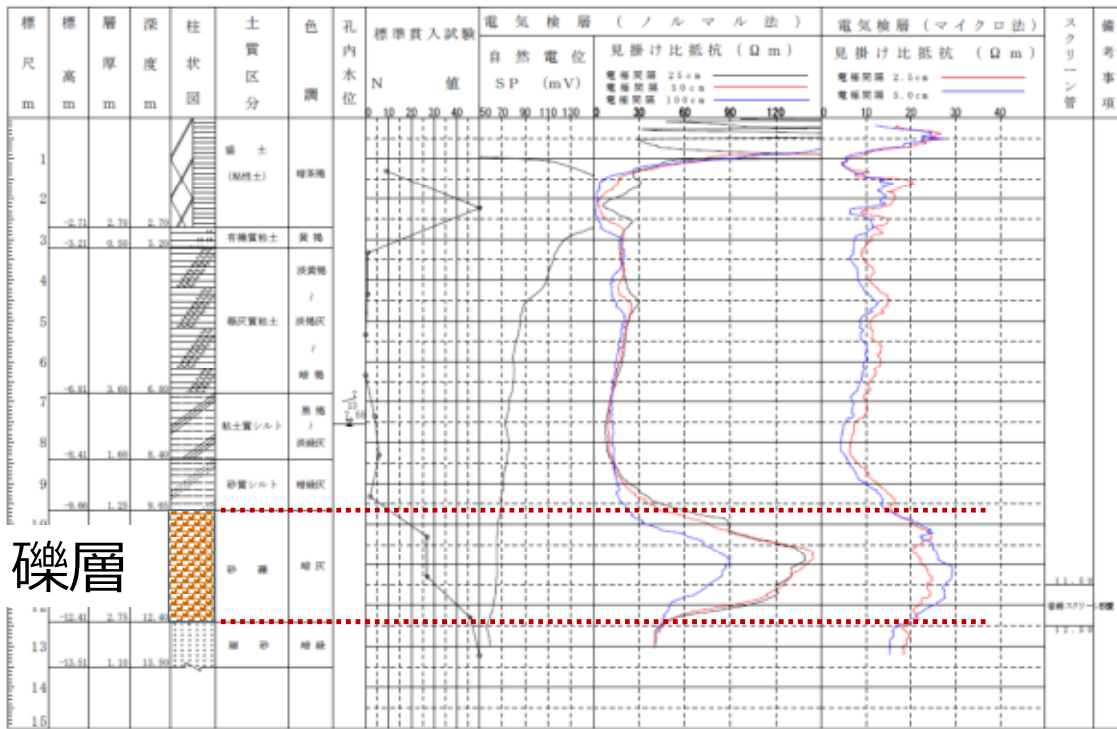
25

H29年度掘削孔 配置



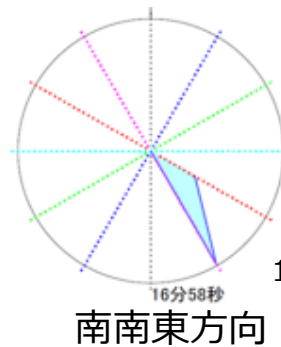
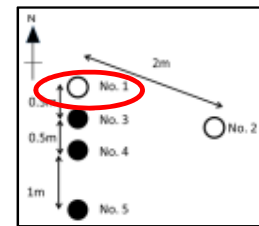
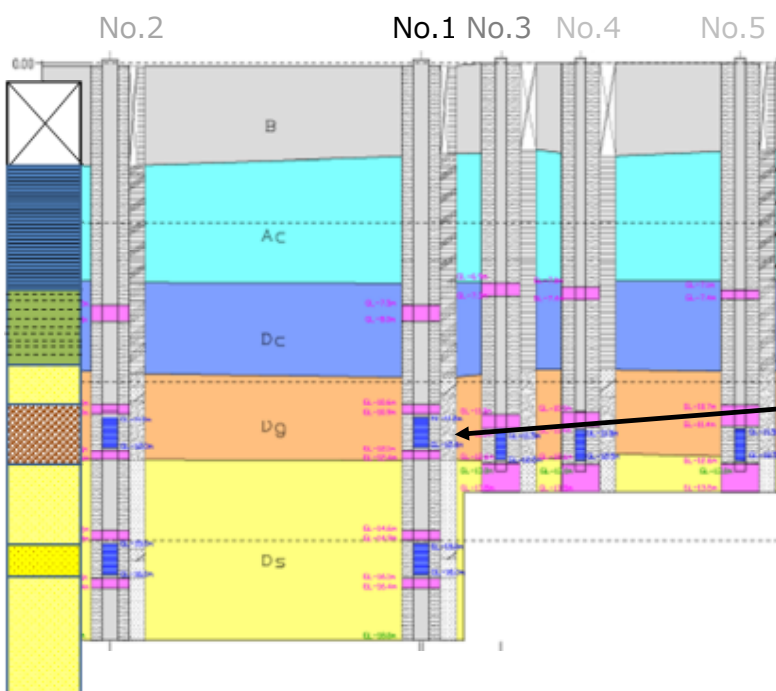
26

H29年度電気検層 (No.5)



27

H29年度-流向流速測定 (No. 1 孔) -



1.18E-6 m/sec

16分58秒
南南東方向

孔近傍の礫が影響？

28

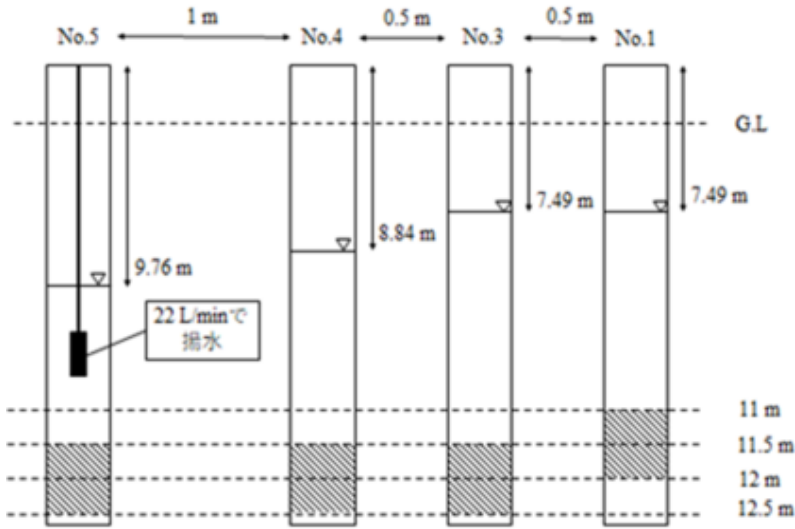
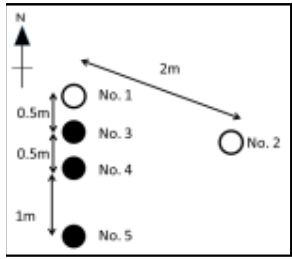
H29年度-揚水試験（孔間） -

テームの式

$$T = \frac{Q}{2\pi(\Delta h)} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right)$$

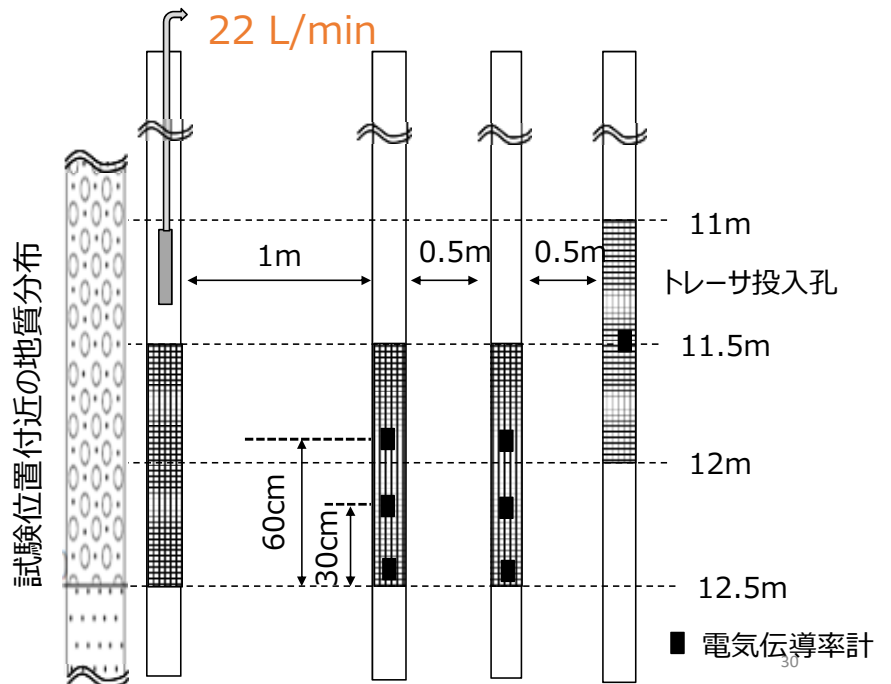
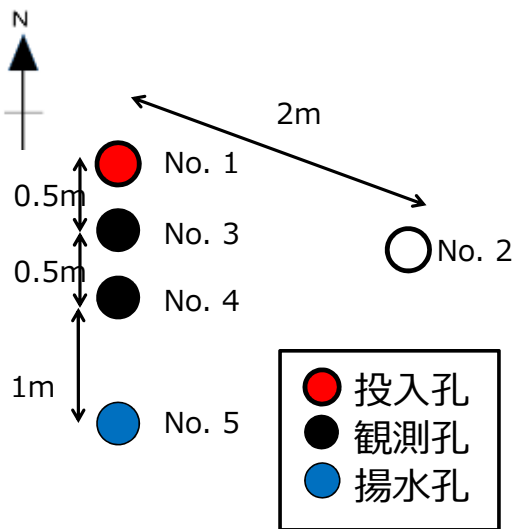
- T : 透水量係数
- Q : 揚水量
- R : 揚水井戸から観測井戸までの距離
- r_w : 揚水井戸半径
- Δh : 水頭差

- $T=2.06 \text{ E-4 (m}^2/\text{s)}$: No.5-No.4孔間
- $T=2.21 \text{ E-4 (m}^2/\text{s)}$: No.5-No.3孔間
- $T=2.18 \text{ E-4 (m}^2/\text{s)}$: No.5-No.1孔間



トレーサ試験による地下環境の把握 - 孔およびセンサーの配置 -

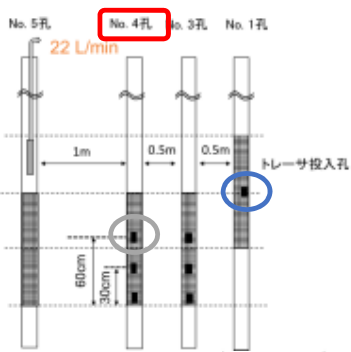
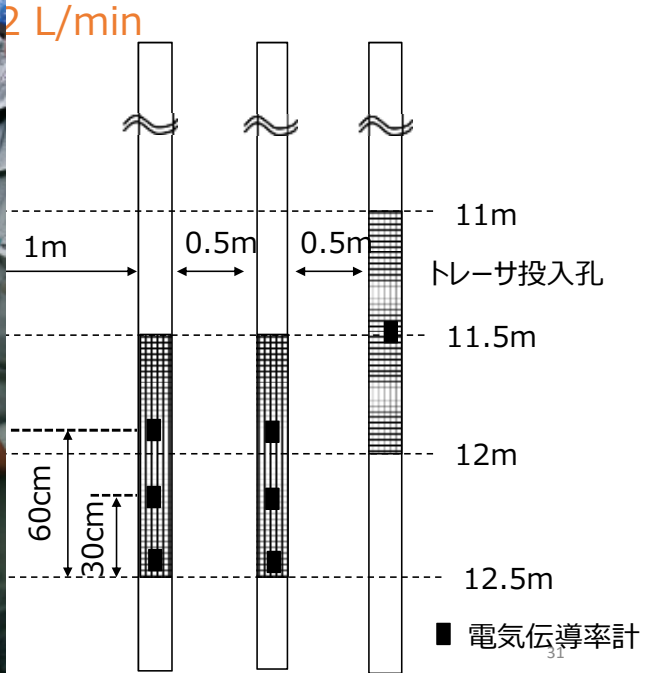
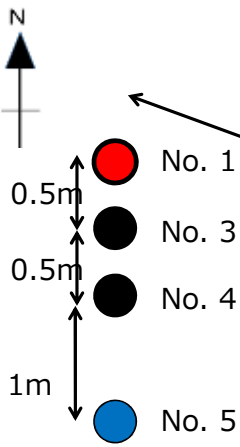
揚水孔 No. 5孔 No. 4孔 No. 3孔 No. 1孔



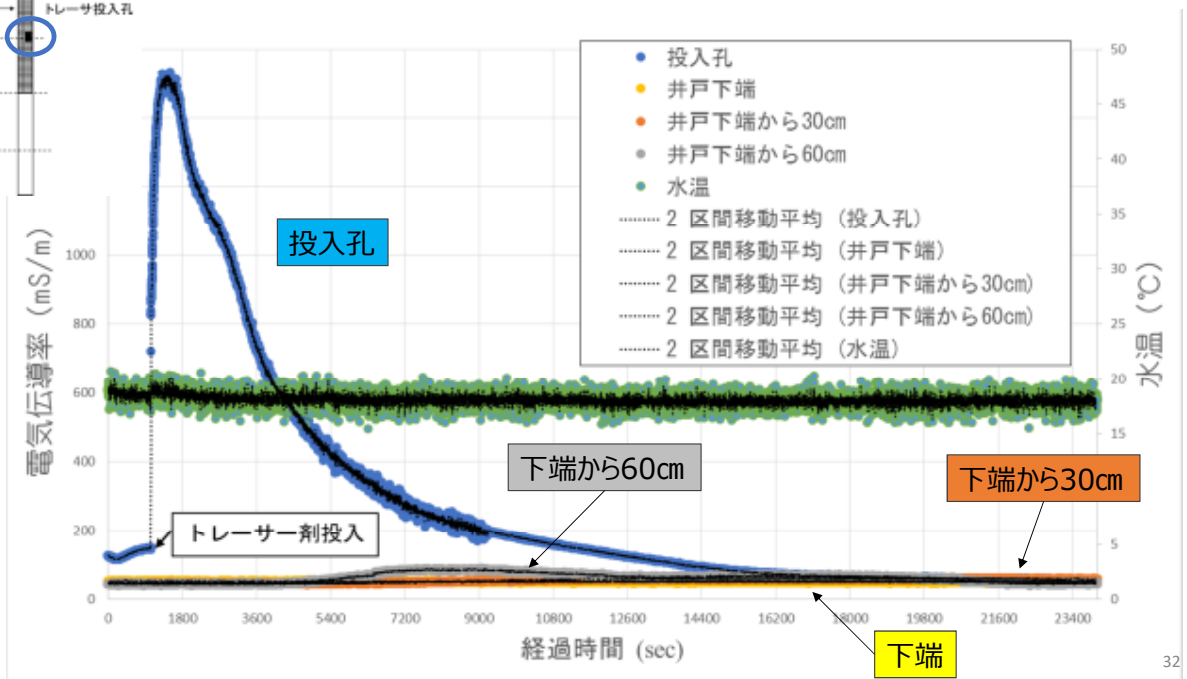
トレーサ試験による地下環境の把握 - 孔およびセンサーの配置 -

揚水孔
No. 5孔

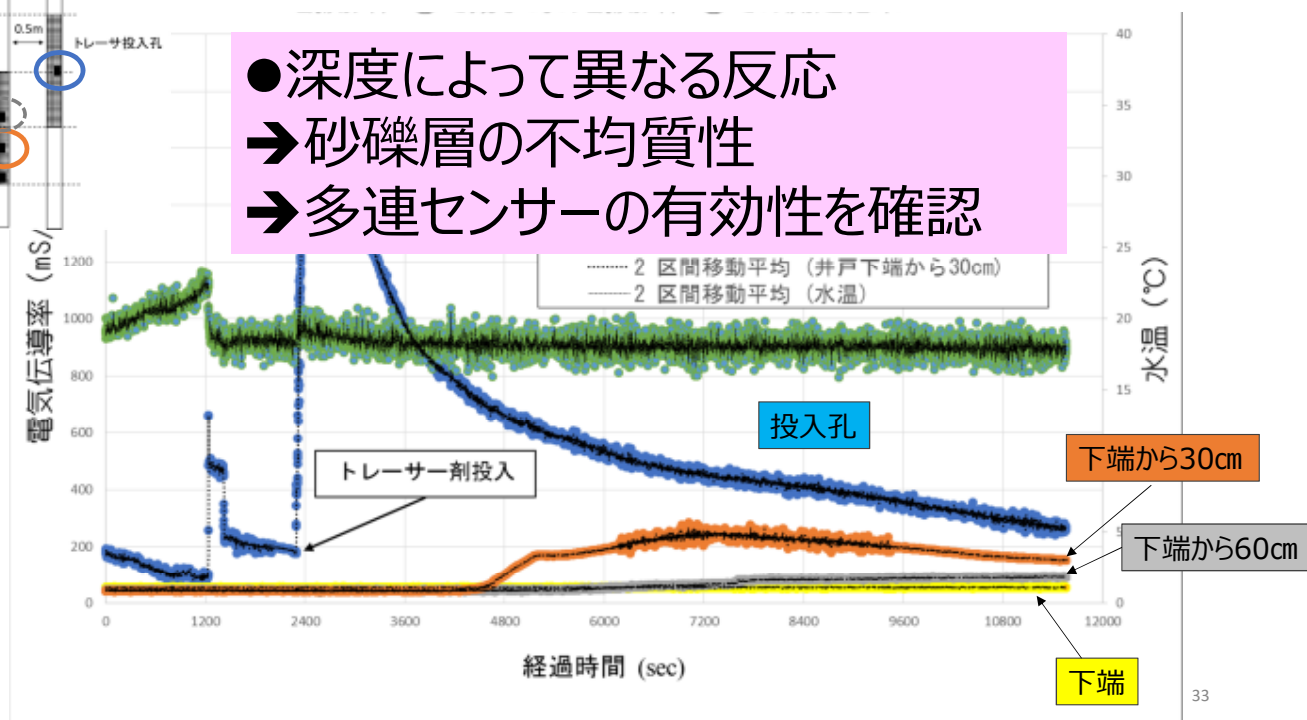
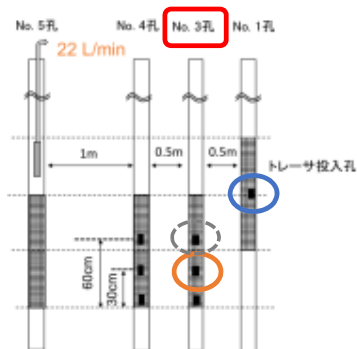
No. 4孔 No. 3孔 No. 1孔



トレーサ試験結果 (No. 4 孔)



トレーサ試験結果 (No. 3 孔)



- 深度によって異なる反応
- ➔ 砂礫層の不均質性
- ➔ 多連センサーの有効性を確認

第3段階目の調査 —H29年度 成果 H30年度 実施内容—

○H29年度までの成果

- 追加3孔で帯水層(礫層)を抽出し、試験区間として設定
- No. 1 孔での礫層の流向は南南東
- トレーサ試験により、礫層内部の不均質性を確認

○H30年度の実施内容

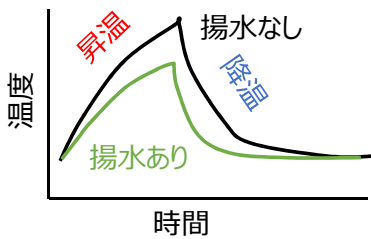
- 礫層内での温度検層による詳細な水みちの同定

温度検層 水 同定

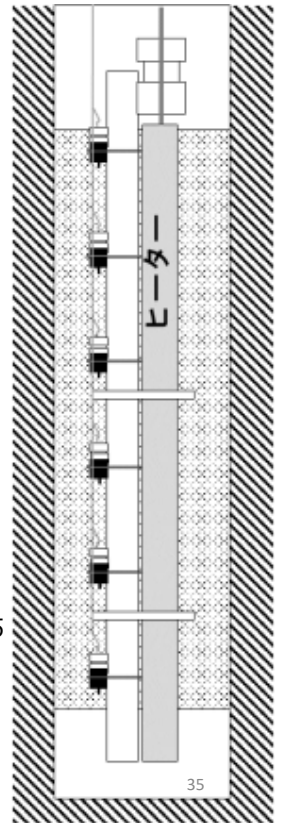
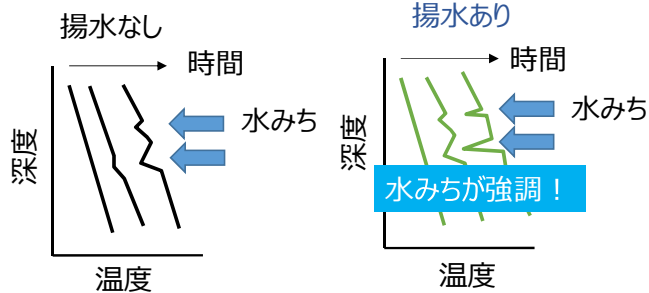
- 地下水との温度差をつけることで水みち同定が容易に
- ➔ヒーターによる加熱 + 多連センサー による計測

➤水みち箇所は暖まり難く、冷めやすい！？

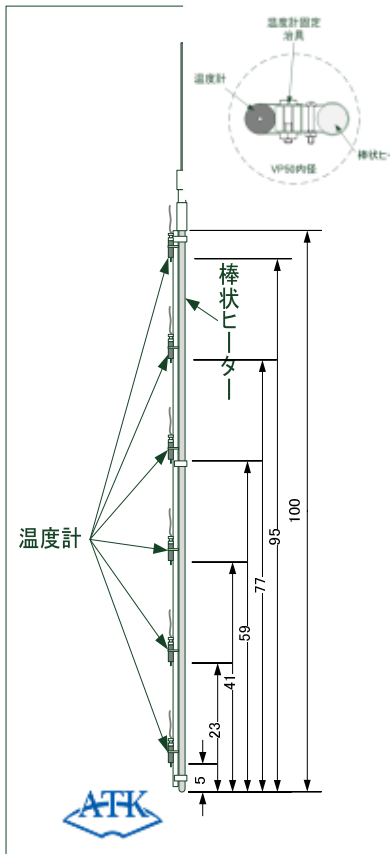
●個別センサーの温度変化



●孔ごとの温度プロファイル



温度検層器 概念図

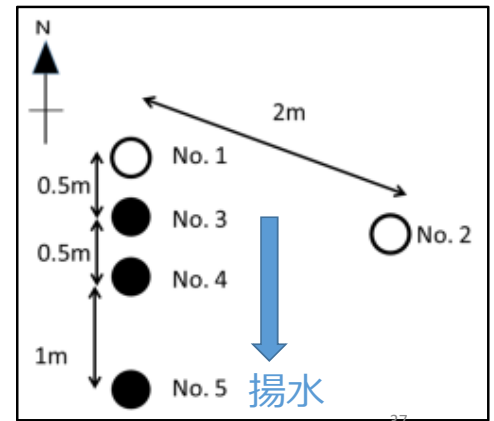


- 棒状ヒーター
 - ・外径 10 mm
 - ・長さ 100 cm
 - ・出力：100V、10A
 - ・防水性能：20m
- 温度計
 - ・外径 10 mm
 - ・センサー部径：1 mm
 - ・型式：Pt100
 - ・温度測定範囲：0～100℃
 - ・出力：0～5V
 - ・防水性能：20m

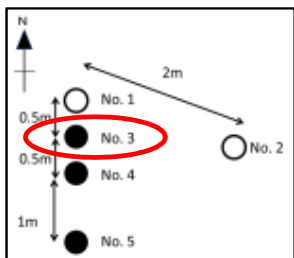
温度検層 実施方法 整理方法

1. 自然状態（揚水なし）で30分間加熱→冷却
2. 揚水状態（@No.5孔、擬似的定常状態）で30分間加熱→冷却

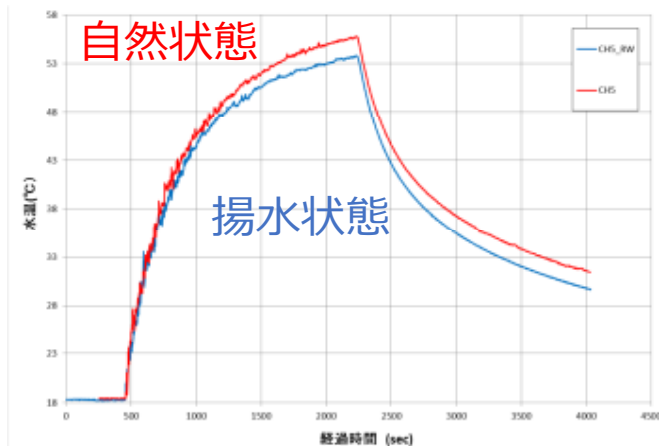
- センサーごとの温度変化
- 深度方向の温度プロファイル
 - 自然状態と揚水状態の比較



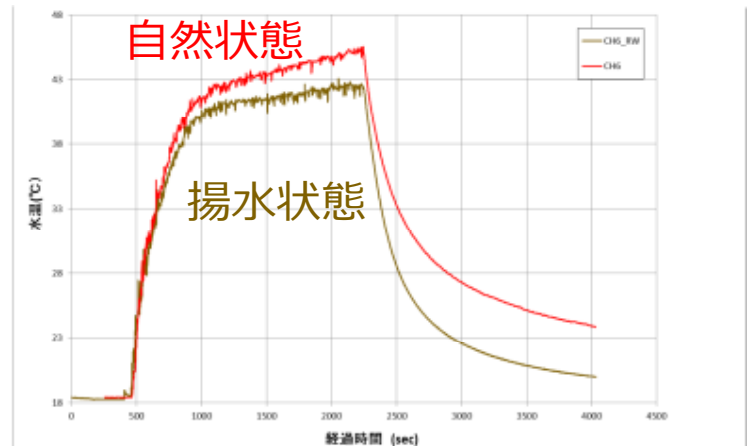
温度検層 結果 例 (No.3) センサーごとの温度変化



CH 5



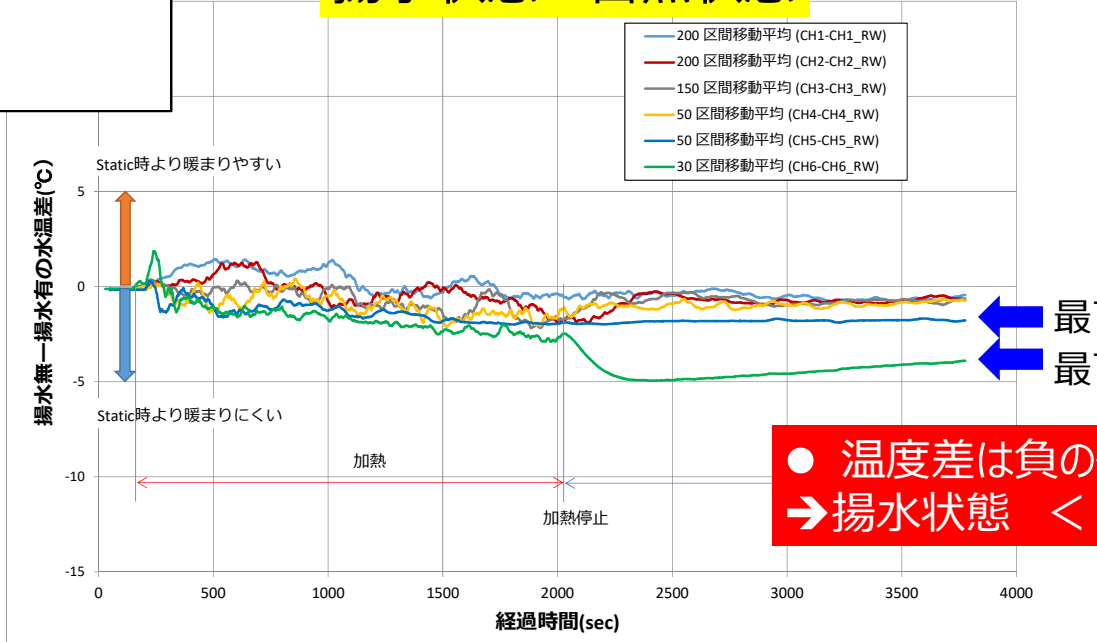
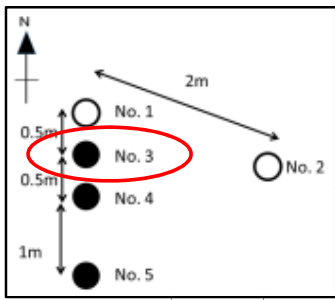
CH 6



温度検層 結果 (No.3)

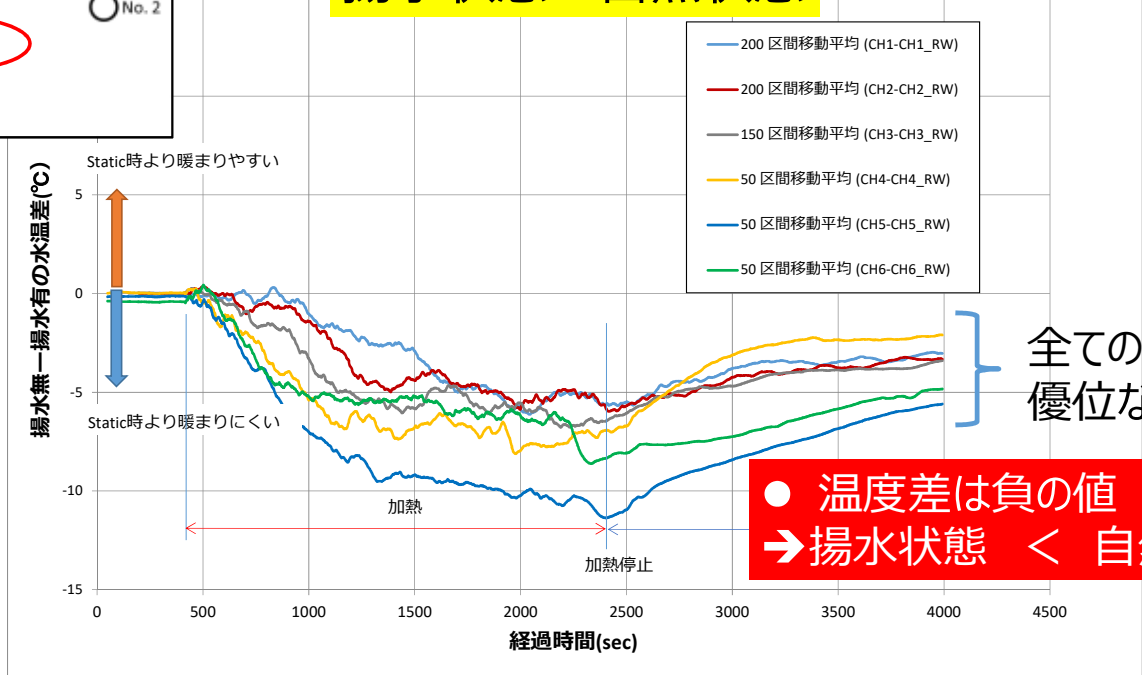
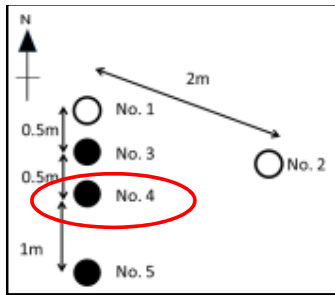
センサーごとの温度変化

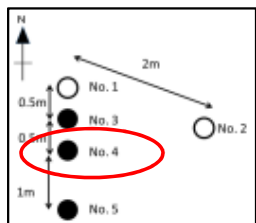
揚水状態 - 自然状態



温度検層 結果 (No.4)

揚水状態 - 自然状態

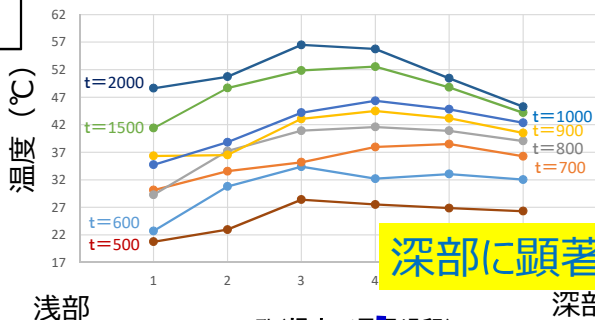




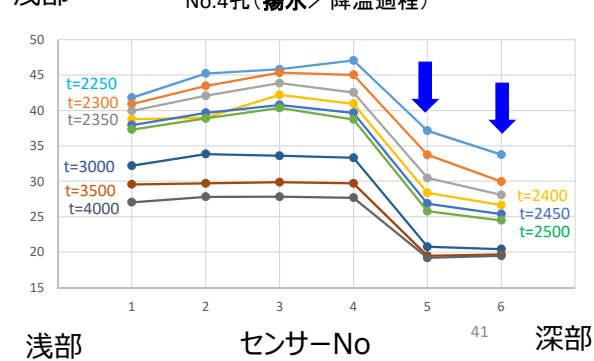
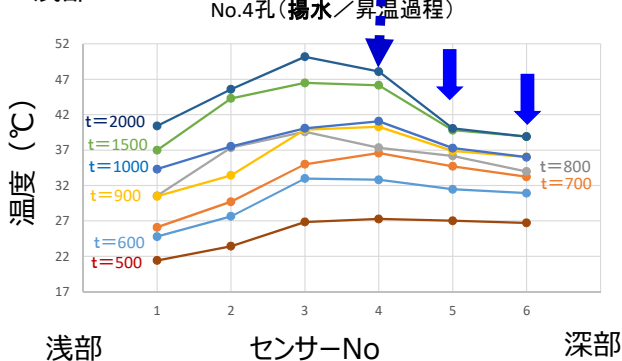
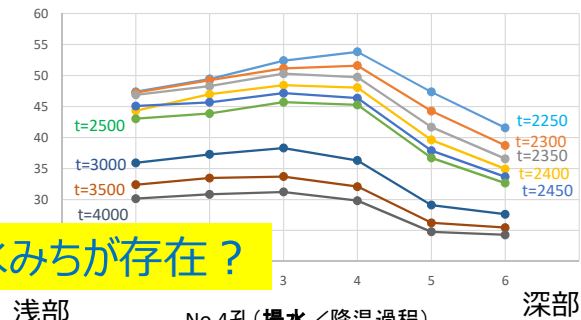
温度検層結果 例 (No.4)

-深度方向のプロファイル-

No.4孔 (揚水なし/昇温過程)

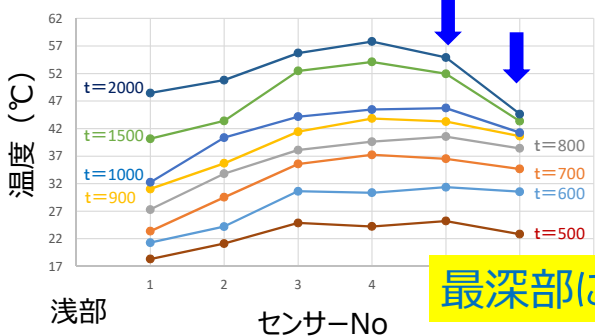


No.4孔 (揚水なし/降温過程)

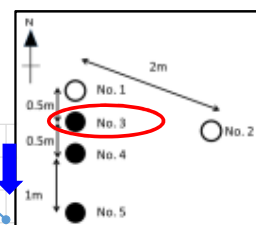
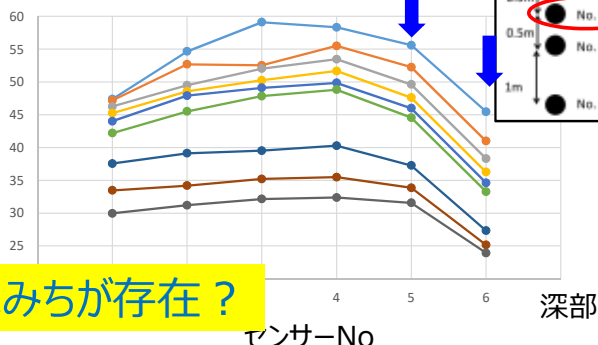


温度検層結果 例 (No.3)

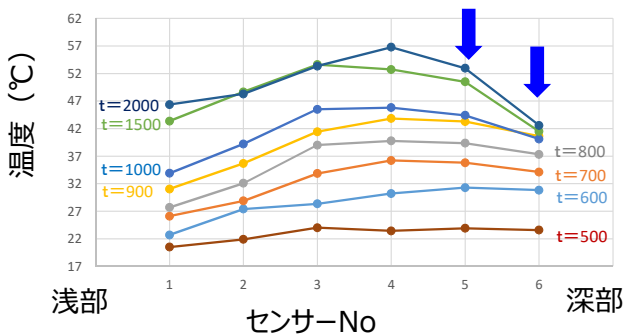
No.3孔 (揚水なし/昇温過程)



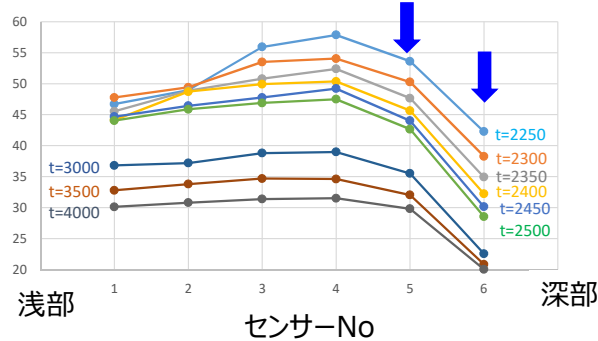
No.3孔 (揚水なし/降温過程)



No.3孔 (揚水/昇温過程)

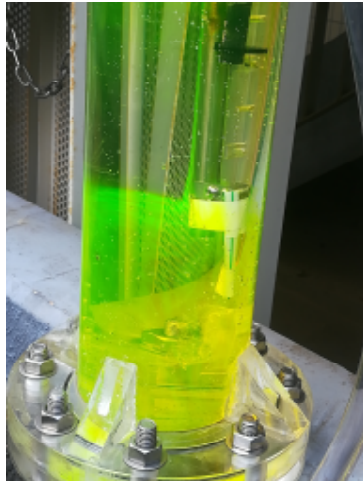


No.3孔 (揚水/降温過程)



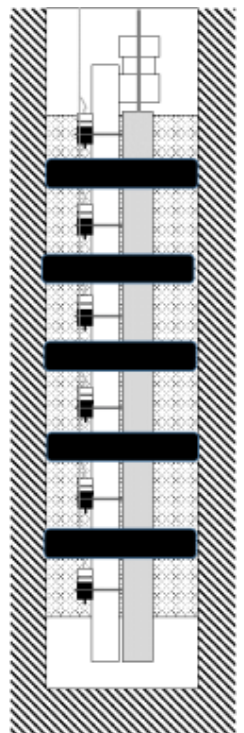
対流 確認

- 透明アクリル管による対流観察
- 底部にウラニンを入れ、加熱
- 水はヒーターのごく近傍を高速で上昇
- その後、対流により混合



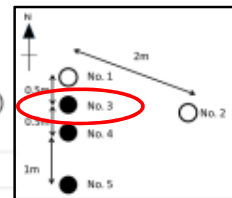
温度検層 改良

- センサー間にスポンジパッカーを設置

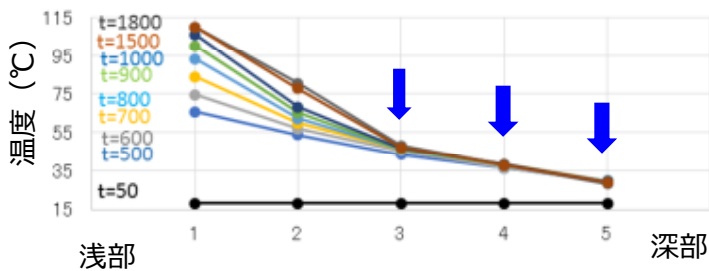


温度検層結果 (

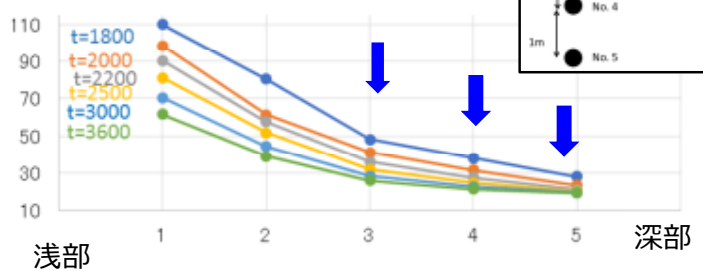
設置) No.3



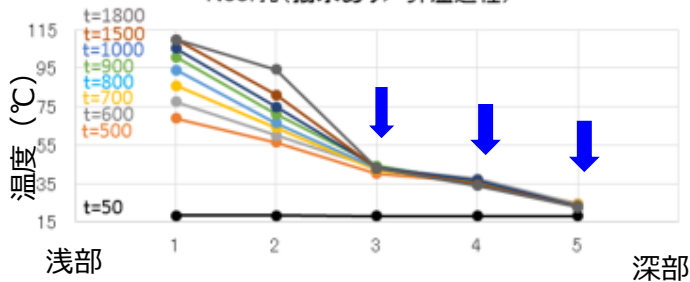
No3.孔 (揚水なし / 昇温過程)



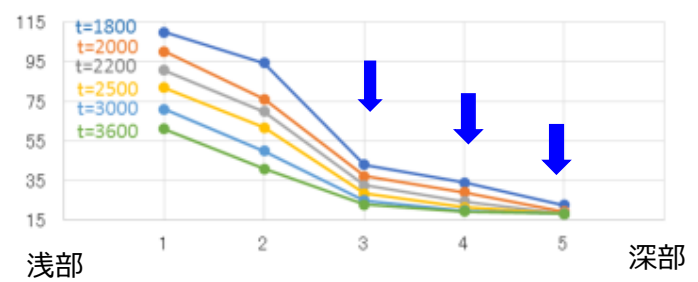
No3.孔 (揚水なし / 降温過程)



No3.孔 (揚水あり / 昇温過程)



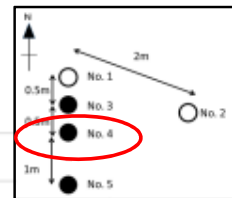
No3.孔 (揚水あり / 降温過程)



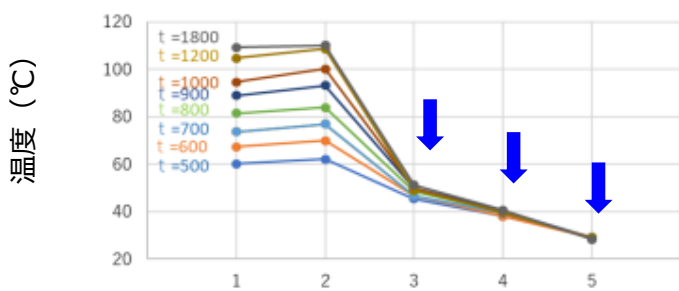
深部に顕著な水みちが存在！

温度検層結果 (

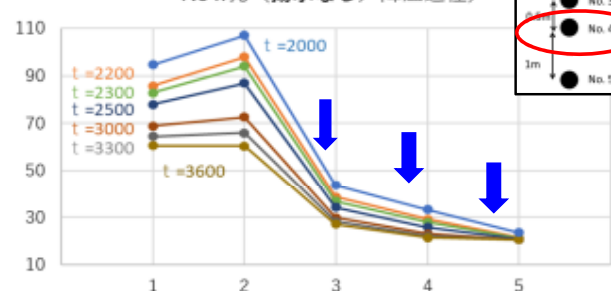
設置) No.4



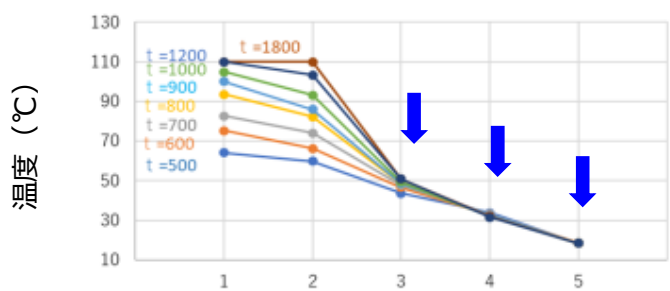
No4.孔 (揚水なし / 昇温過程)



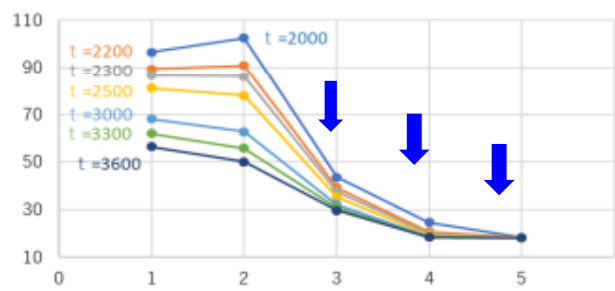
No4.孔 (揚水なし / 降温過程)



No4.孔 (揚水あり / 昇温過程)

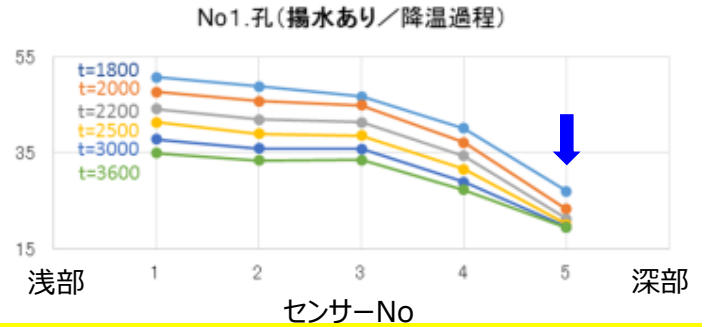
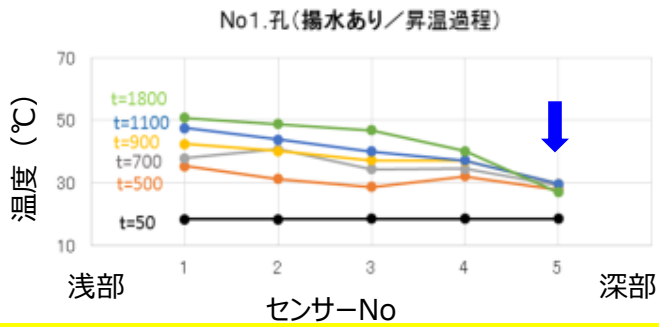
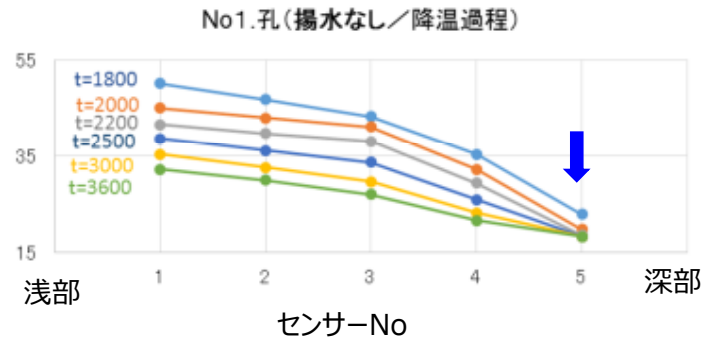
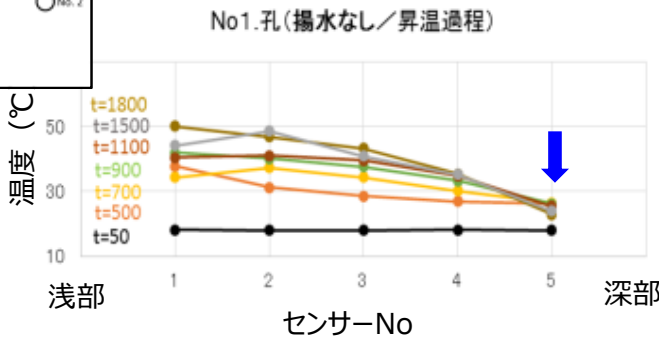
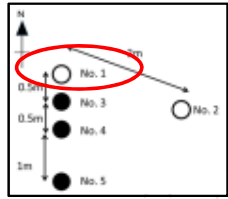


No4.孔 (揚水あり / 降温過程)



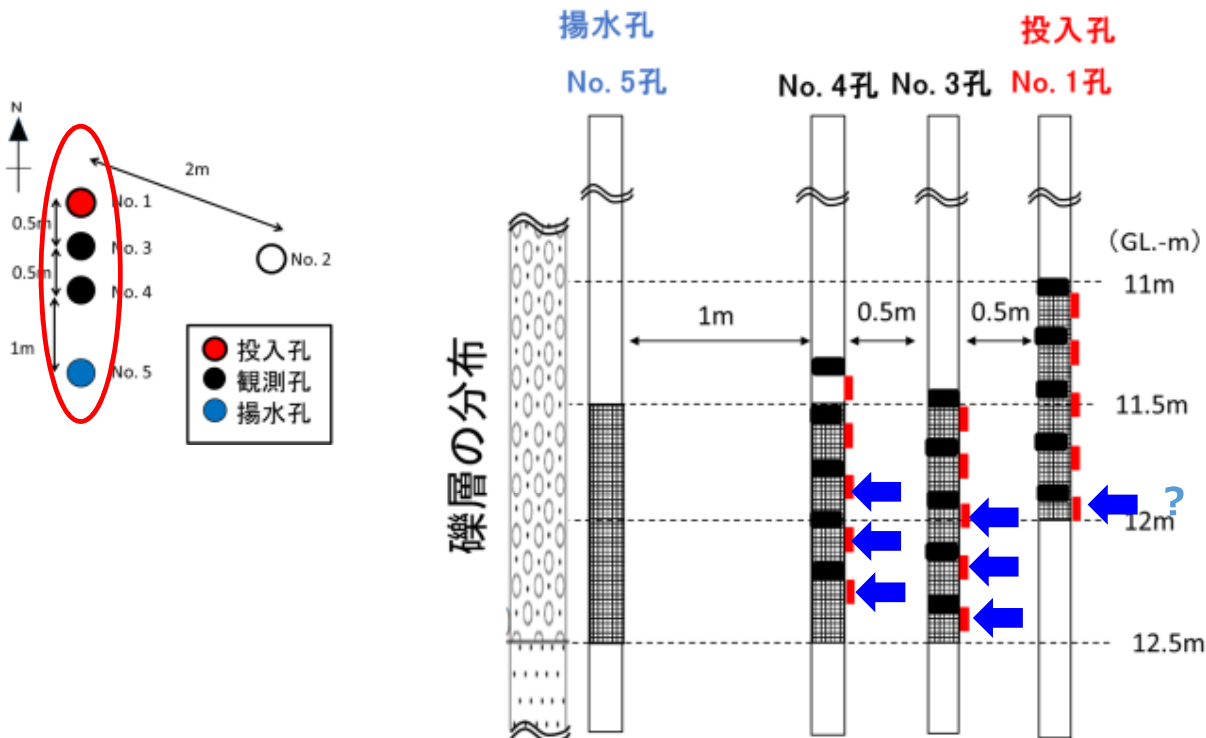
深部に水みちが存在！

温度検層結果 (設置) No.1

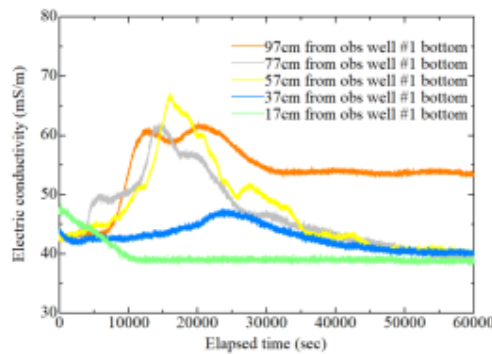
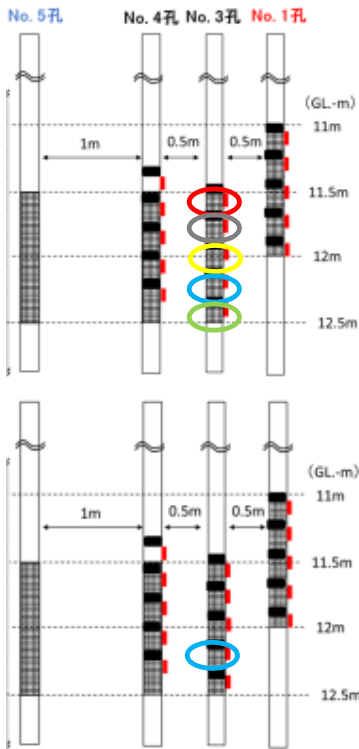


最深部に水みち? / 大孔径のため変化が見えにくい? (VP75 v.s. VP50)

推定される水みちの分布



トレーサ試験結果 (No. 3 孔)



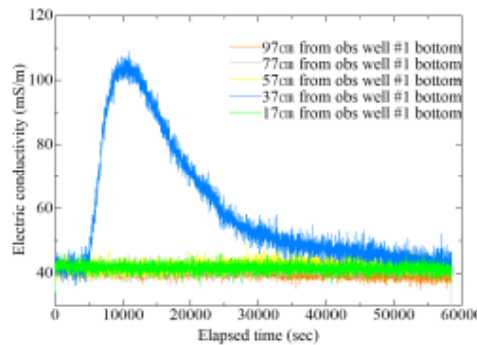
パッカーの有無の比較

パッカー無し

57cm

77cm

97cm



パッカー有り

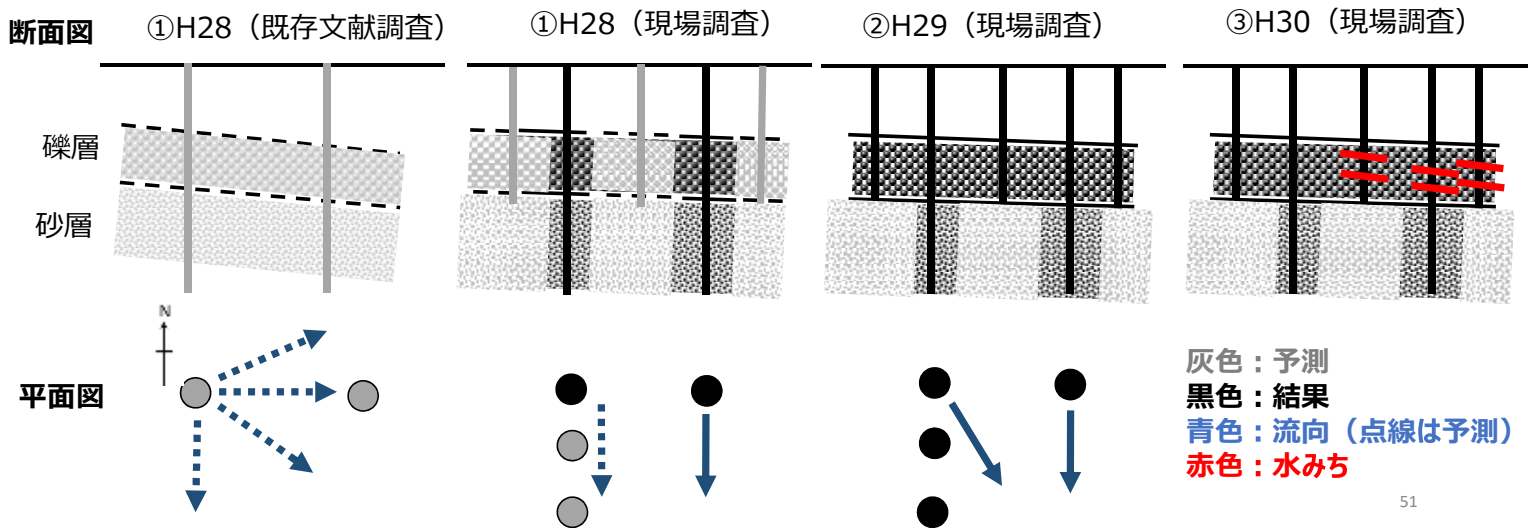
37cm

調査手順 例 調査 目的

- | | |
|----------------|-----------------------|
| ① 既存資料調査 | ➔ 地下水流動状況の予測 (概略) |
| ② ボーリング (コア) | ➔ 地質分布、帯水層の確認 (概略) |
| ③ 電気検層 | ➔ 帯水層の抽出 (定性的) |
| ④ フローメータ検層 | ➔ 帯水層 (水みち) の抽出 (定量的) |
| ⑤ 流速流向測定 | ➔ 地下水流動方向と流速の推定 |
| ⑥ 水理試験 (透水/揚水) | ➔ 帯水層の透水性などの推定 |
| ⑦ 温度検層 | ➔ 詳細な水みちの抽出 |
| ⑧ トレーサ試験 | ➔ 実流速、水理学的有効空隙率の推定 |

段階的アプローチのイメージ

- 年度ごとに、計画、調査、予測評価、課題抽出を繰り返す → 理解度が向上



51

調査全体の評価

- 対象層の設定：礫層で良かったのか？
不均質な礫層で段階的にトレーサ試験を精緻化
- スクリーン深度：投入孔を他孔より50cm上げたことは良かったのか？
- トレーサ：地下水密度とほぼ同等に調整可能であることを確認
(原位置地下水 + NaCl) + エタノール
- 温度検層：多連加熱式 → ヒーター周辺への対流の影響、温水過熱式も
- パッカーの設置：効果絶大！
- 揚水方法：揚水可能量の増加 → 場の変化（細粒成分をくみ上げ）

52

まとめ

- 段階的アプローチにより理解度が向上
- 地下環境を合理的に理解するための調査手順を例示
- パッカーによる遮水が重要（温度検層、トレーサ試験）
- 若手が育成（調査実施、結果の解釈）
 - ➔ 手、足、頭を動かす訓練の場が必要

53

課題

- 温度検層結果の解釈と手法の検証
- 礫層の不均質性の理解（どこまで詳細把握が必要か？）
- 1 Fサイトへの適用方法の検討
 - 対象層の特性（帯水層中に薄い難透水層
 - ➔ 不均質性の理解）
 - 被ばく線量管理下での効率的な調査手法 etc.
- 継続教育の方法

54