

# 地盤環境学： 地下水環境に関する調査・解析の成果と課題

2019年7月17日（水）

竹内 真司（日本大学）

第54回 地盤工学研究発表会 特別セッション（一般開放セッション）  
「福島第一原子力発電所廃止措置への貢献を目的に創設された廃炉地盤工学の概要と活用方法の検討」 1

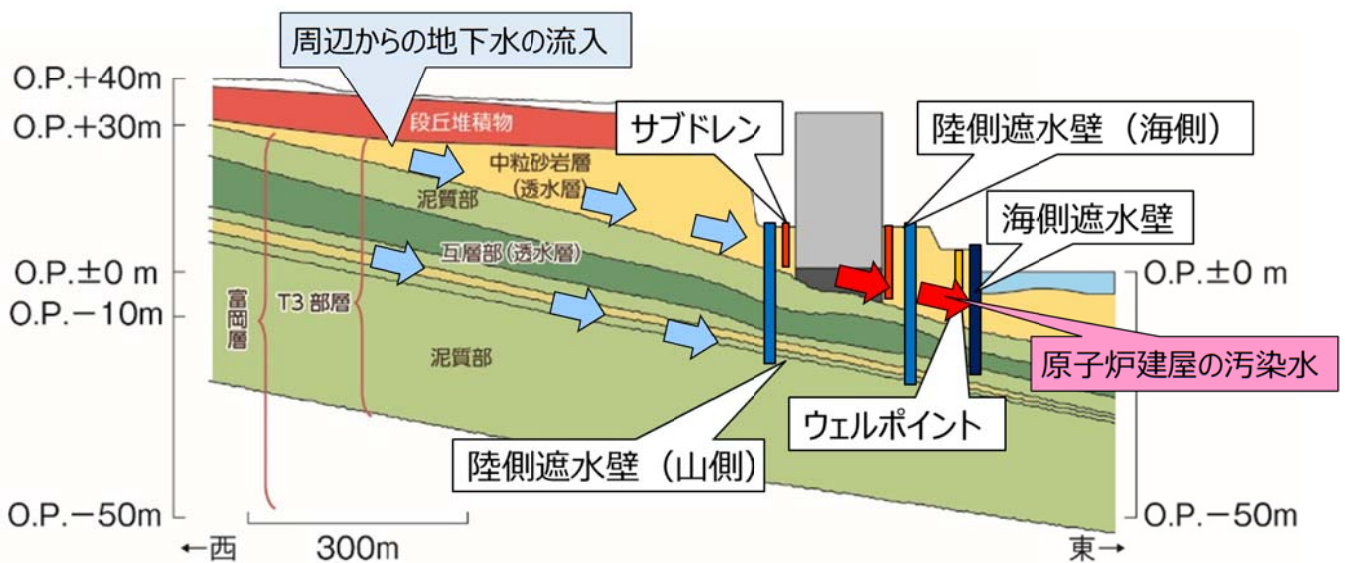
## 背景

- 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長期評価
  - 地下水環境の適切な理解が不可欠
  - 適切なトレーサ試験と解析により、物質移行パラメータを推定
  - 長期予測へ

# サイト周辺の地下水・汚染水の状況



# サイト断面図

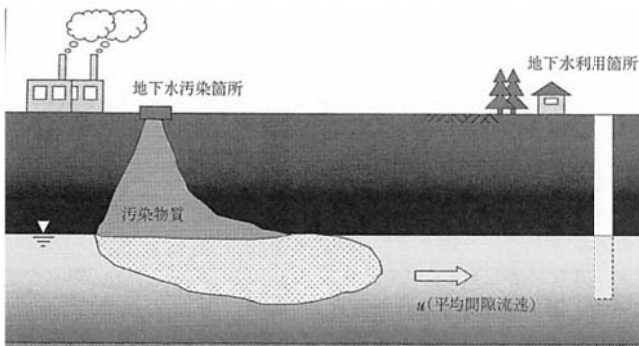


# 背景

- **サイト外のフィールド**でノウハウ（調査手法、結果の解釈など）を蓄積
- 長期の廃炉事業での人材育成

5

## 地下水環境の適切な理解に必要なこと



- 帯水層の特定と広がり
  - 水みちの抽出
  - 透水特性
  - 流向・流速
  - トレーサの移行特性 など
- 孔、試験区間の適切な配置

地下水のトレーサ試験（日本地下水学会、2009）より

6

# 本講演の概要

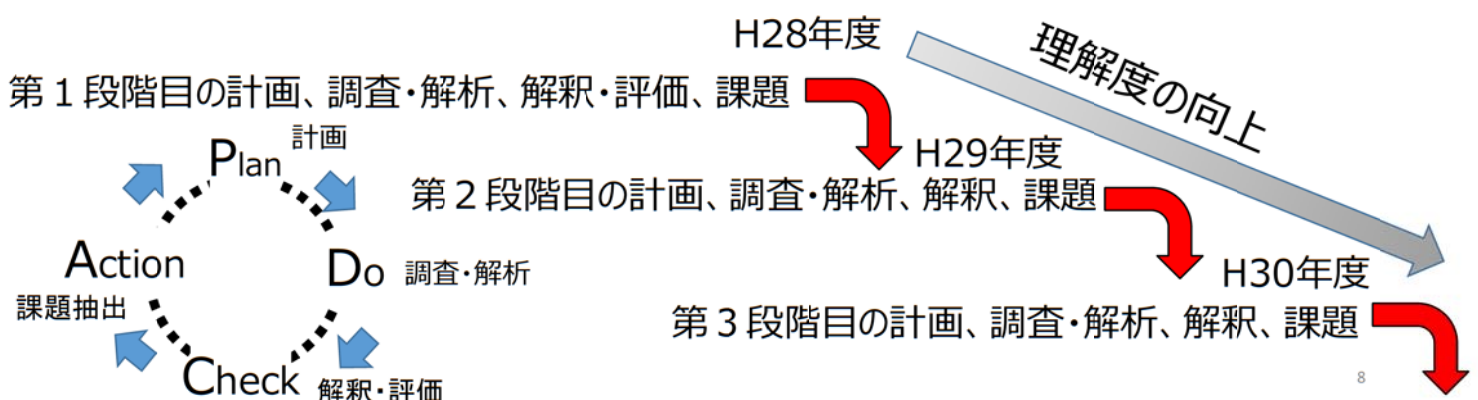
## ●適切な地下水環境の理解のために

- 調査計画の考え方
- 調査・解析結果と解釈
- 調査全体の評価
- まとめ

7

## 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・解析、解釈・評価、課題抽出
2. 第2段階目の計画、調査・解析、解釈・評価、課題抽出
3. 第3段階目の計画、調査・解析、解釈・評価、課題抽出



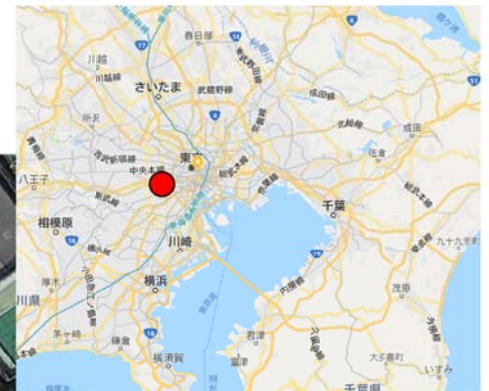
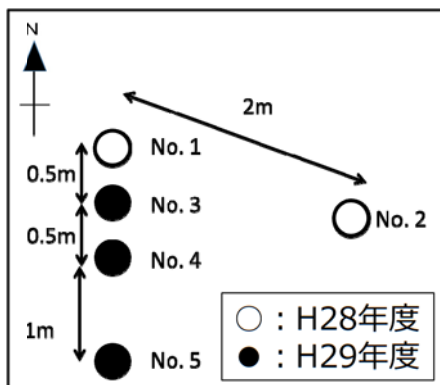
8

# 地下水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：コア観察、高透水性区間の確認
  - ・ 電気検層：比抵抗分布、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：水みち箇所への推定
- ▶ 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（孔掘削中の観測孔への水圧応答観測）
- ▶ 物質移行パラメータ（実流速、有効間隙率、分散長など）の推定
  - ・ トレーサ試験

9

## 試験サイト



日本大学文理学部  
(東京都世田谷区)

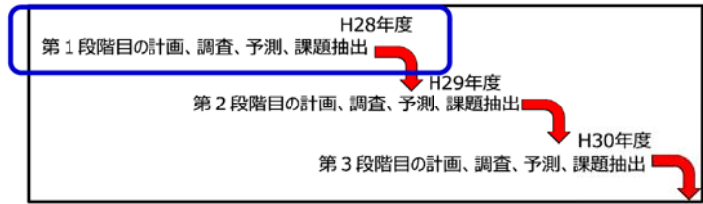
# 調査内容（H28年度）

目的：ボーリング配置、帯水層（トレーサ試験対象層）の決定

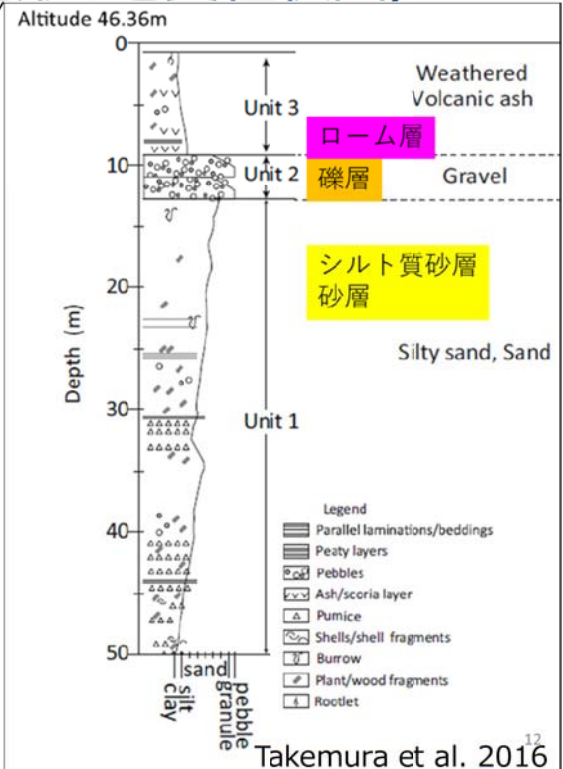
- 既存情報調査
- ボーリング掘削（深度約18m：砂礫層の下位まで）
- 孔内検層（電気検層、フローメータ検層）
- 流向・流速測定
- 孔内検層（電気検層）
- 透水試験（揚水試験）



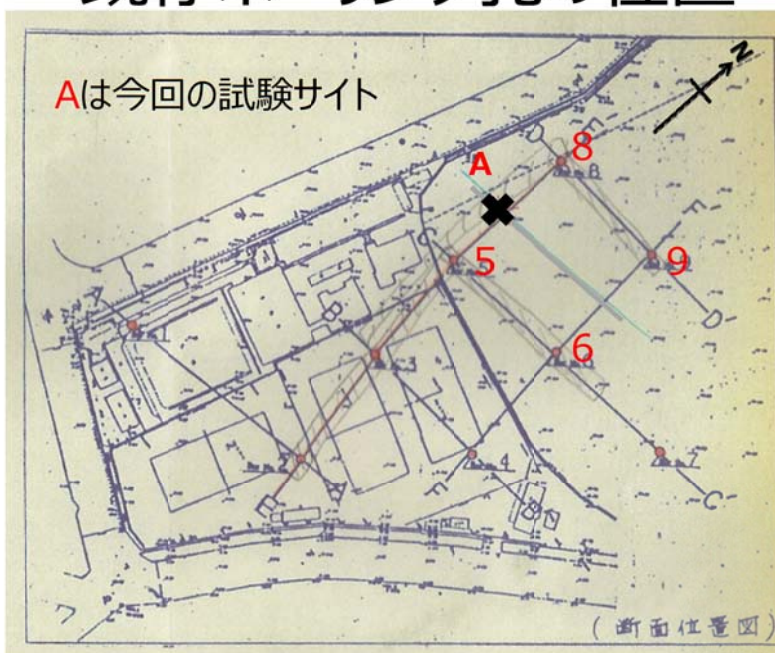
第2段階（H29年度）調査へ



## 既存情報調査（試験サイト周辺の地形と地質柱状図）



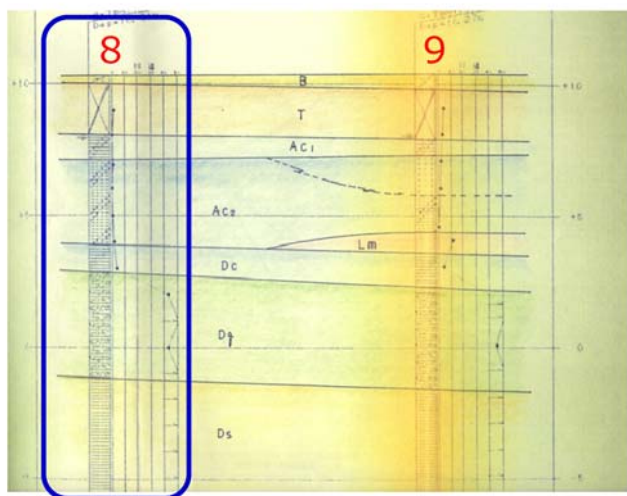
# 既存ボーリング孔の位置



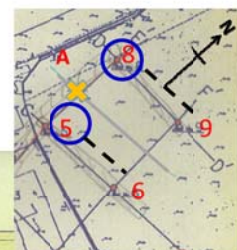
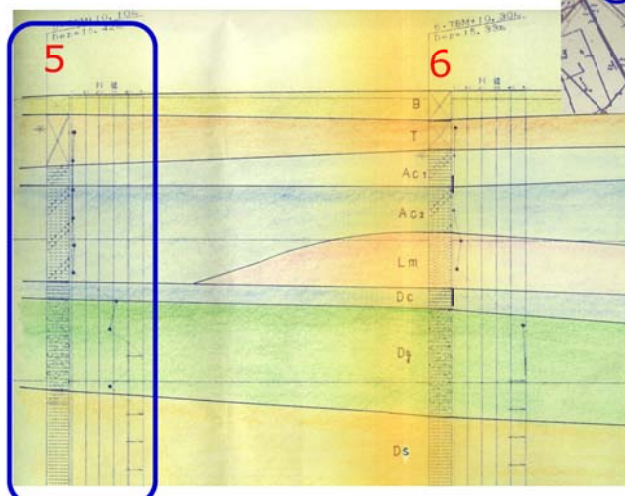
日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査 (1988)

13

## 8孔～9孔間、および5孔～6孔間の地質断面図



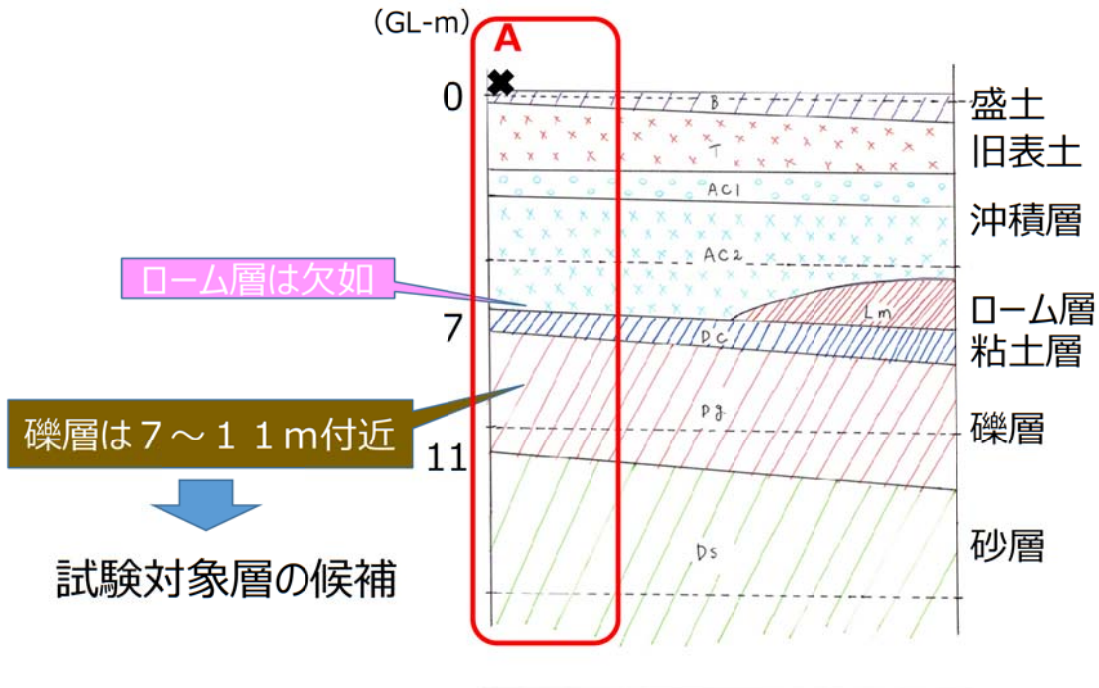
日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査 (1988)



- 5孔、8孔と同様な地質分布？
- ローム層は欠如（ローム層は東側に分布？）
- 下位に礫層（帯水層？）が存在

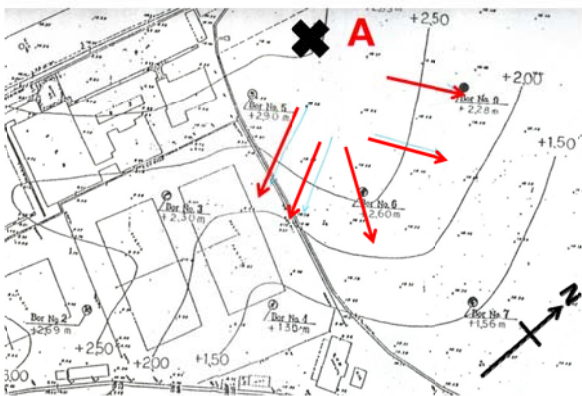
14

# サイトの地質予測

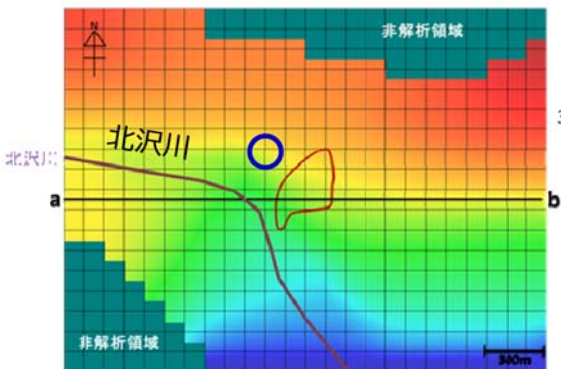


15

# 地下水流向予測



日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査 (1988)



竹内・戸嶋 (2017)

## ●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?

## ●地下水流動解析

➔ 南?

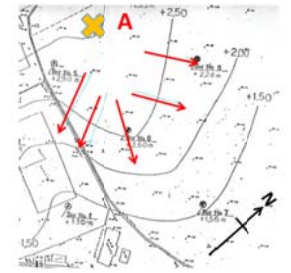
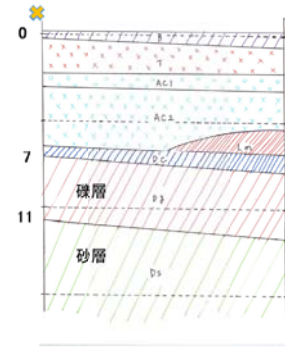
16



# 既存情報に基づく地質環境の予測結果

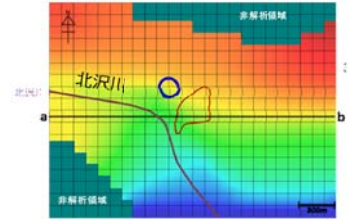
## ●地質

- 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

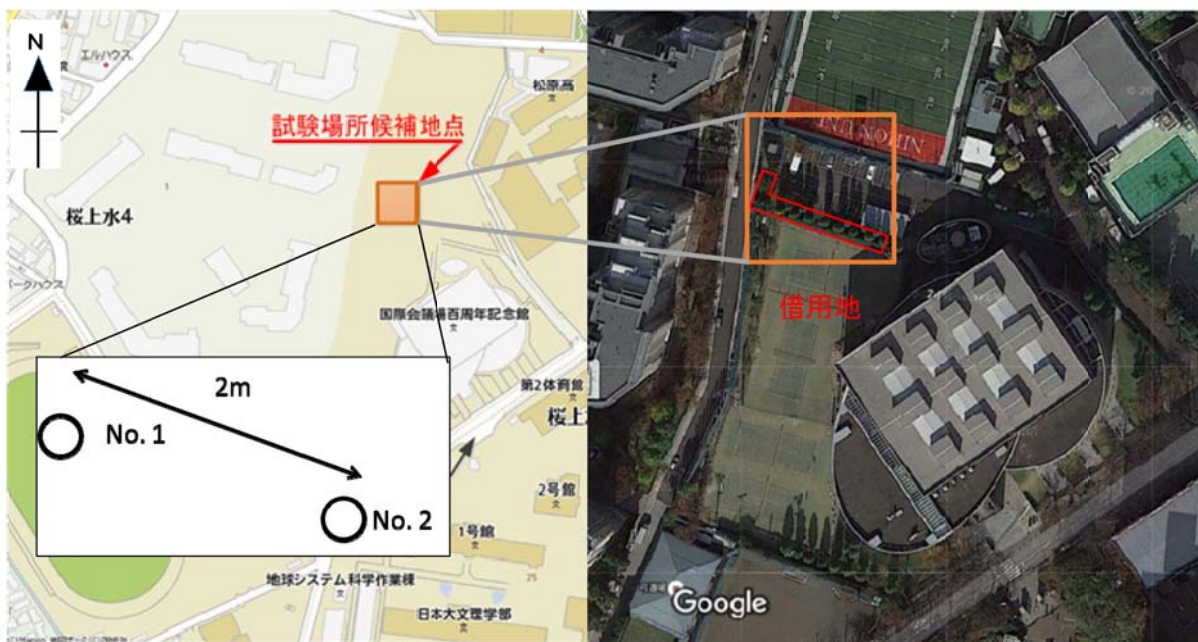
- **北東～南東方向**（地形勾配）、あるいは**南方向**（地下水流動解析）



- 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

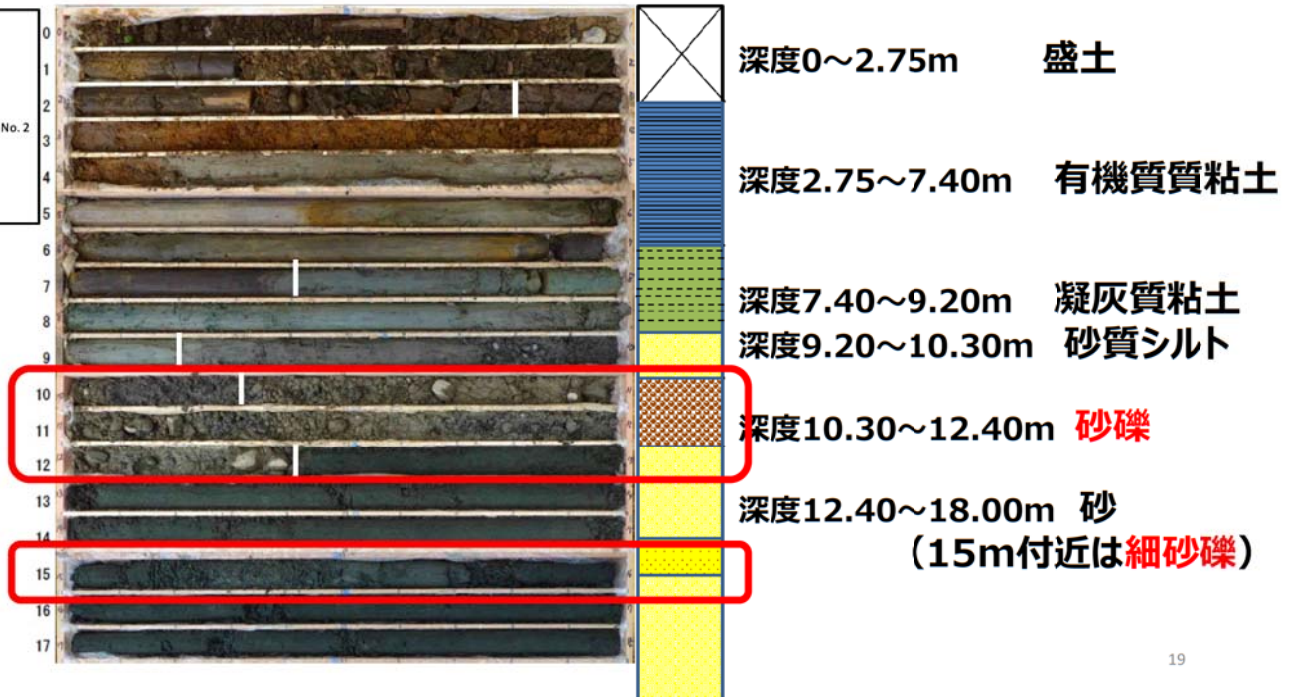
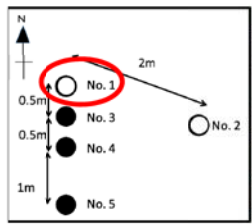
H28年度

## ボーリング孔位置



H28年度

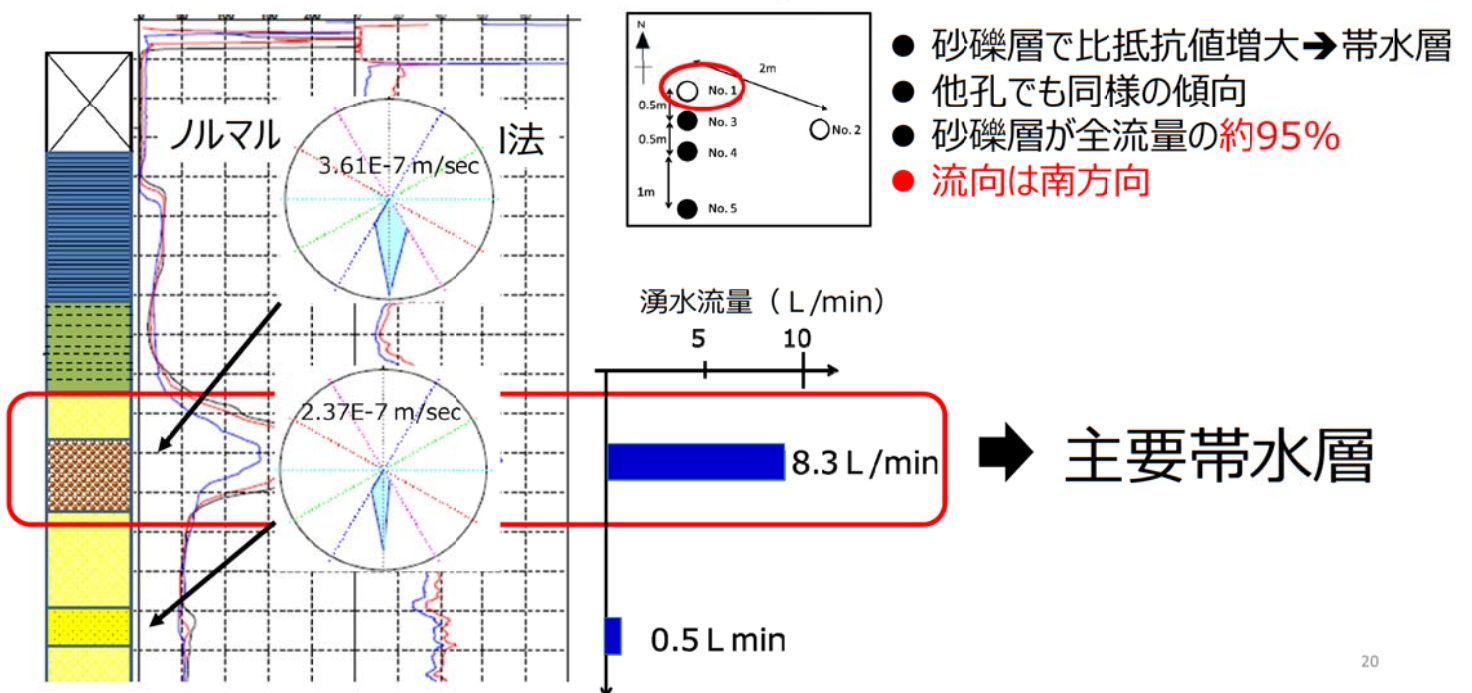
# 地質分布 (No. 1 孔)



19

H28年度

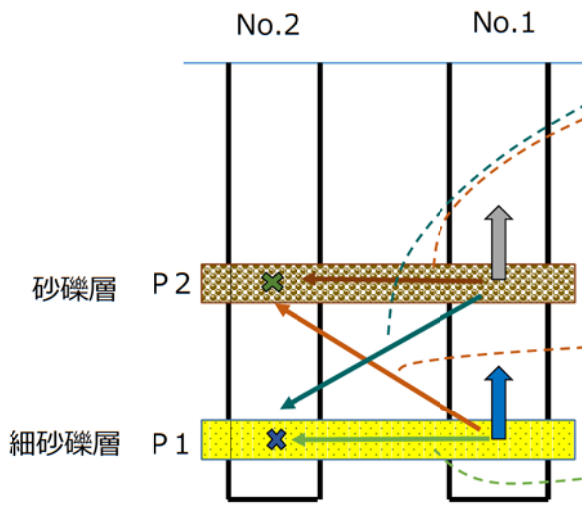
# 電気検層・フローメータ検層・流向流速測定 (No.1孔)



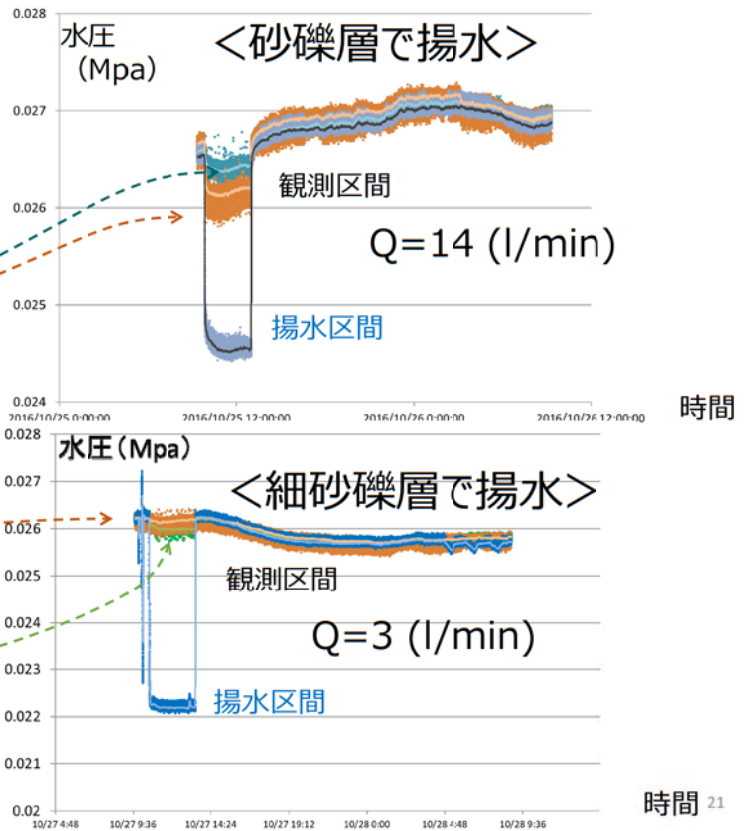
20

H28年度

### 揚水時の応答



砂礫層と細砂礫層は水理的に連結

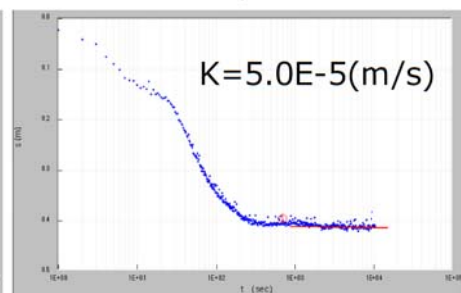
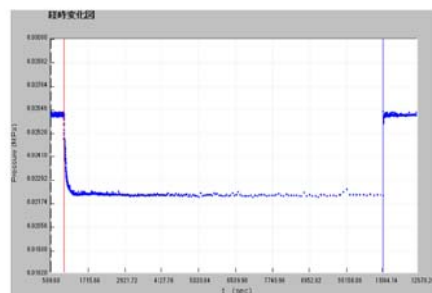
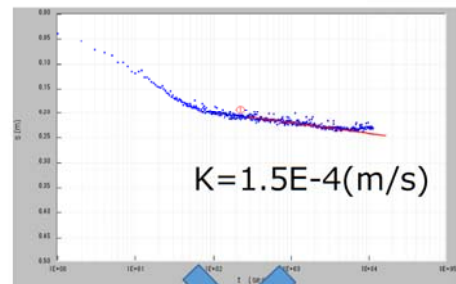
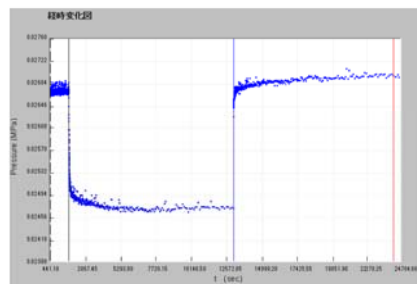
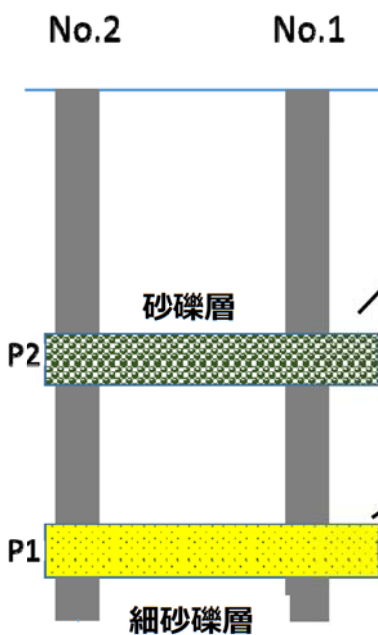


H28年度

### 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年度の結果に基づくH29年度計画—

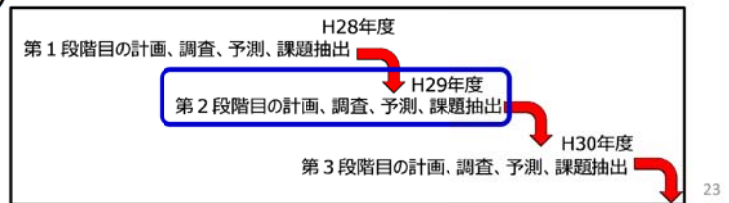
## ●H28年度の調査結果の概要

- 帯水層の特定：砂礫層
- 地下水の流向：南方
- ダルシー流速は $1E-7$  (m/s)オーダー

## 試験対象層の決定

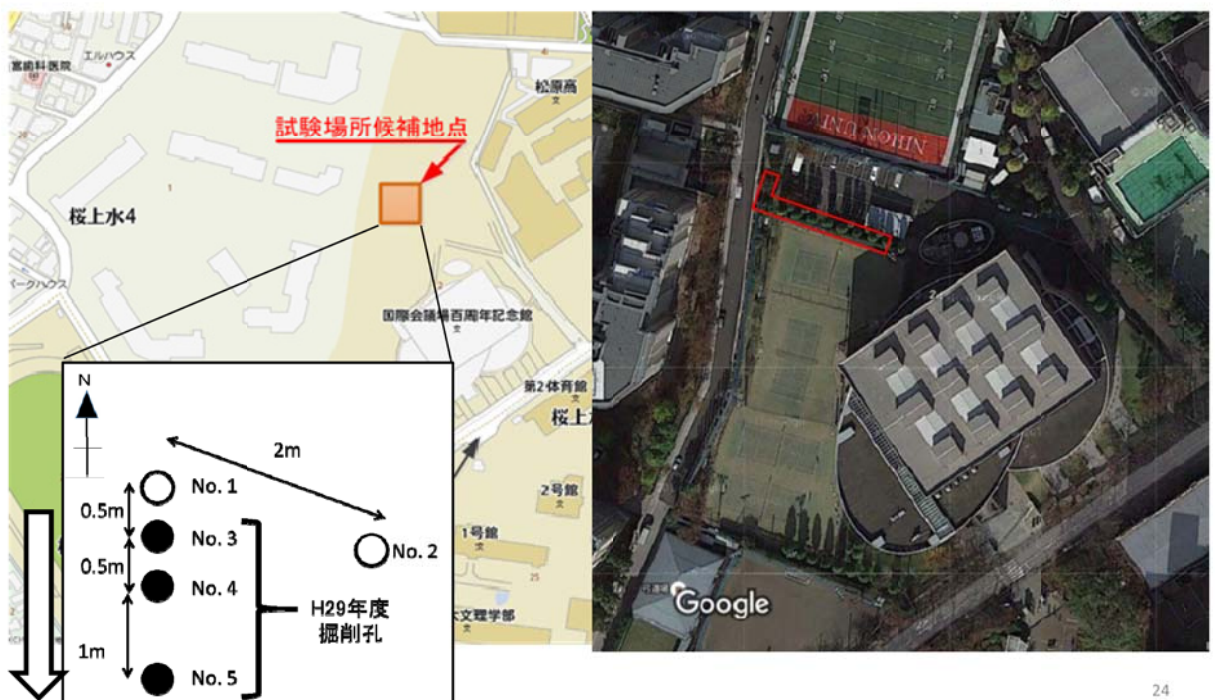
## ●H29年度の調査計画の概要

- 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・ノンコア掘削)
- ボーリング掘削深度は砂礫層まで (深度約13.5m)
- 電気検層 (砂礫層の分布確認)
- 流向・流速測定
- 揚水試験
- 予備的トレーサ試験



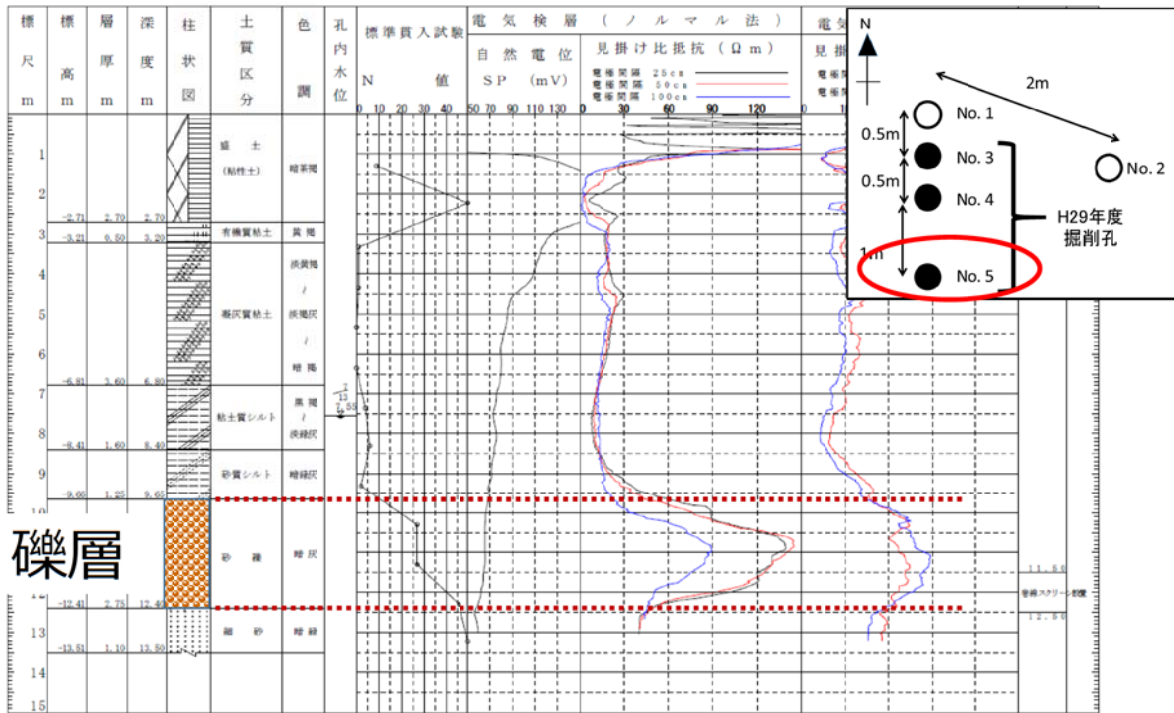
H29年度

## 掘削孔の配置(南方向に3孔)



H29年度

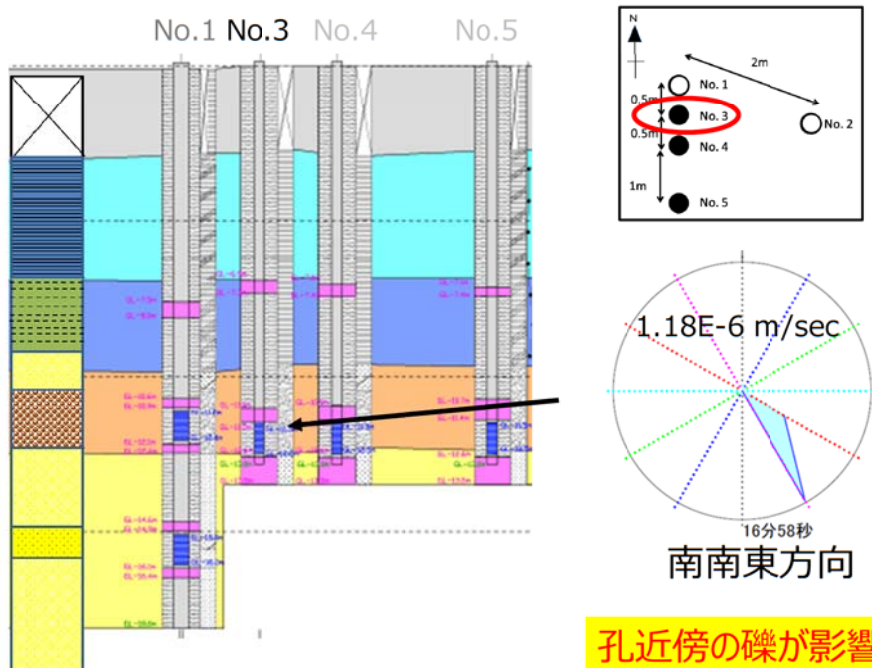
# 電気検層 (No.5)



25

H29年度

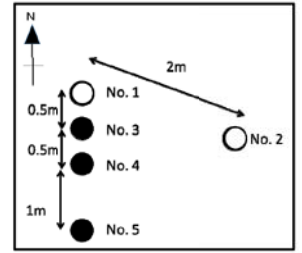
# 流向流速測定 (No.3孔)



26

H29年度

# 揚水試験

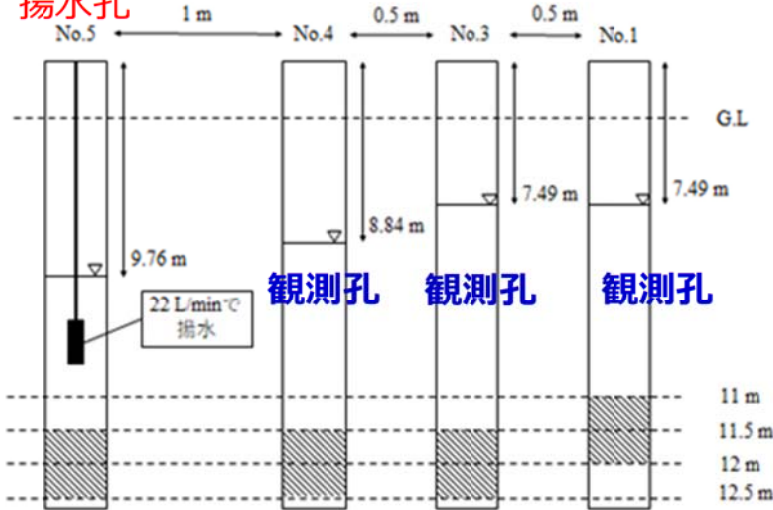


22L/min

テームの式

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

揚水孔



- $T$  : 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
- $\Delta h$  : 水頭差

- =2.06 E-4 (m/s) : No.5-No.4孔間
- =2.21 E-4 (m/s) : No.5-No.3孔間
- =2.18 E-4 (m/s) : No.5-No.1孔間

H29年度

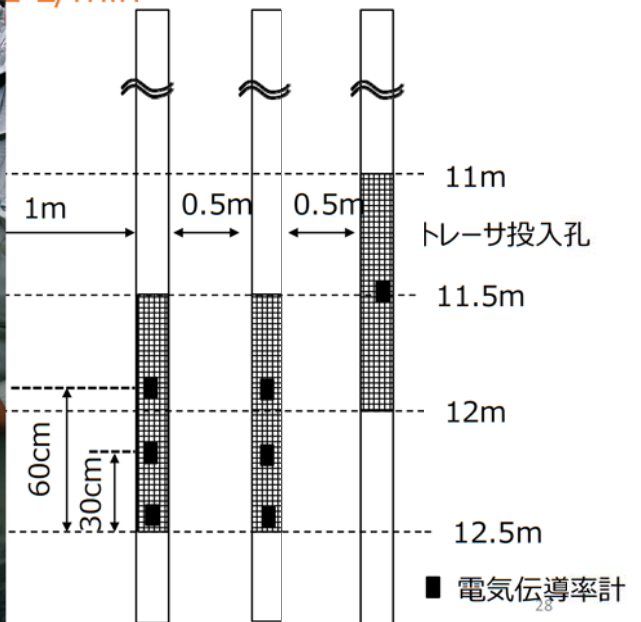
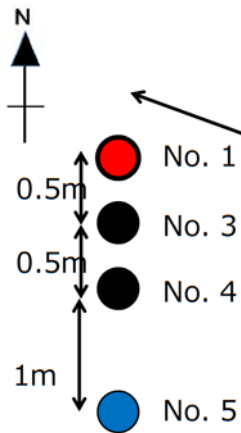
## 予備的トレーサ試験 (孔およびセンサーの配置)

揚水孔

No. 5孔

No. 4孔 No. 3孔 No. 1孔

2 L/min

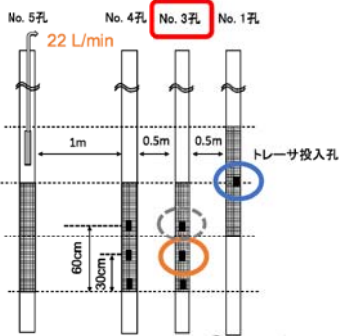
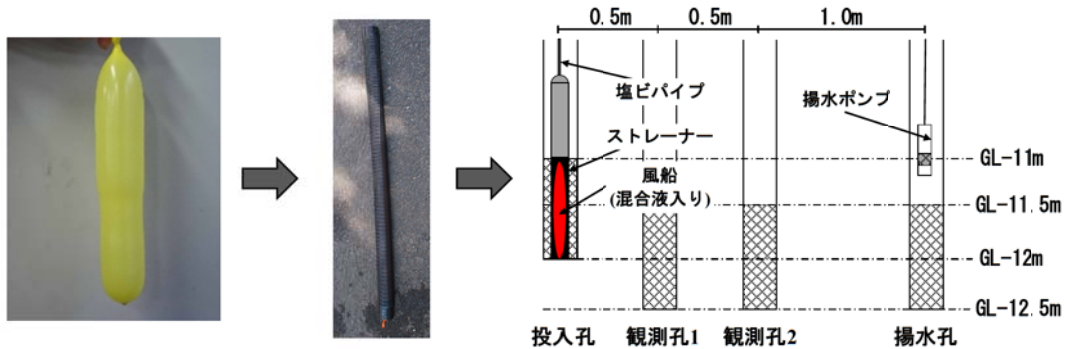


# トレーサー剤の調整

トレーサー剤：塩水+エタノールの混合液

混合液：原位置地下水+NaCl+エタノール ⇒ 濃度：約3.5%  
 比重：1.0

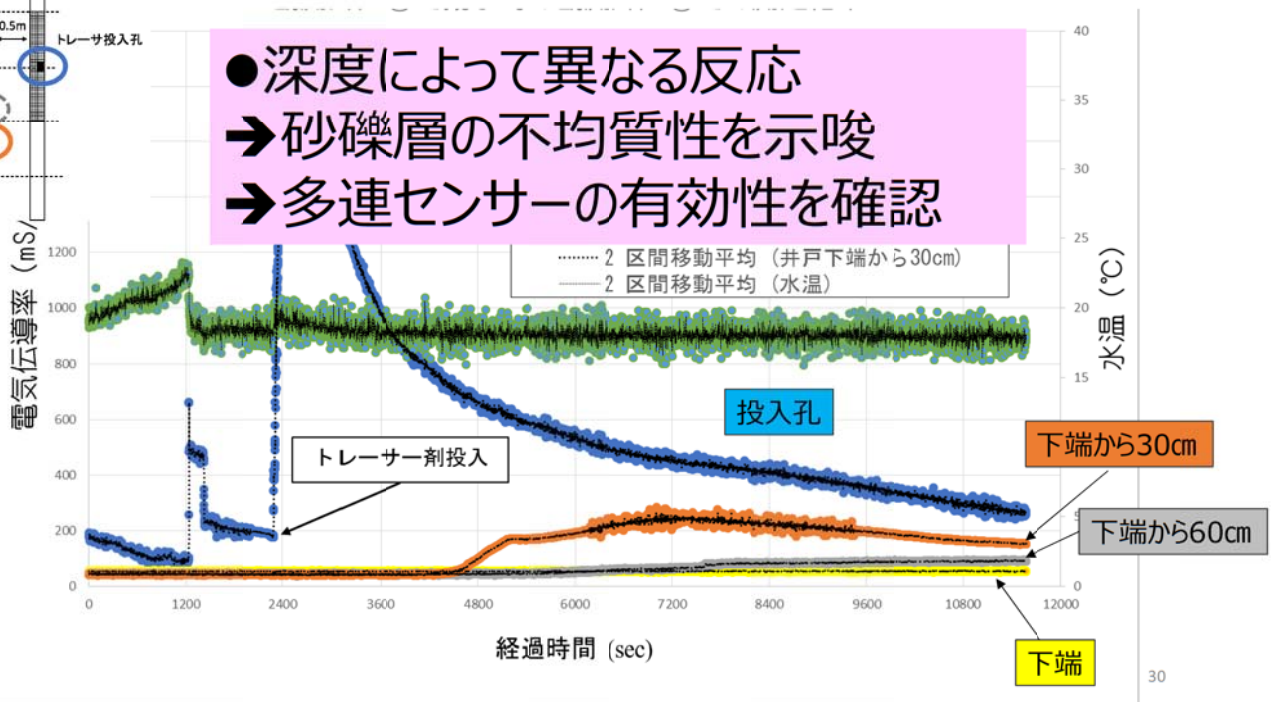
投入方法：ストレーナーに混合液入りの風船を投入孔に設置し試験区間で破裂



## トレーサ試験結果 (No. 3孔)

H29年度

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



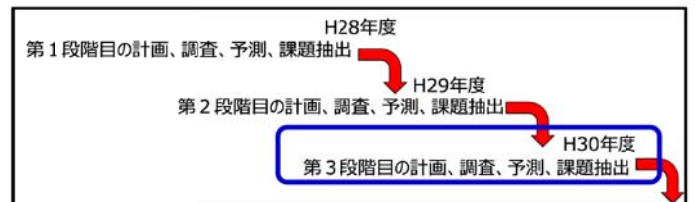
# 第3段階目の調査 —H29年度までの成果とH30年度の実施内容—

## ○H29年度までの成果

- 追加3孔で帯水層(砂礫層)の分布を確認
- No. 3孔での砂礫層の流向は南南東(概ね南方向)
- トレーサ試験により、砂礫層内部の不均質性を確認**

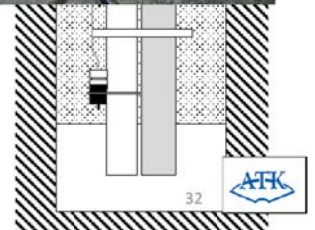
## ○H30年度の実施内容

- 礫層内での**温度検層**による  
詳細な水みちの同定

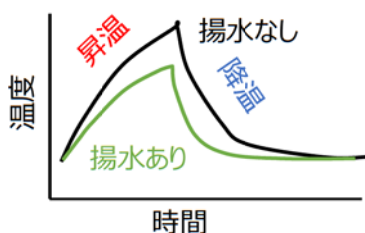


## 温度検層による水みち同定

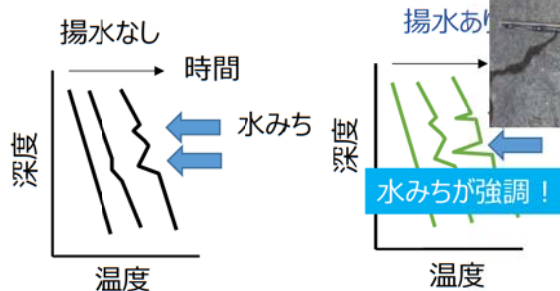
- 地下水との温度差をつけることで水みち同定が容易
- ➔ヒーターによる加熱+多連センサーによる計測
- 水みち箇所は**相対的に低温度**
- 揚水の場合は自然状態より低温



### ●個別センサーの温度変化



### ●孔ごとの温度プロファイル

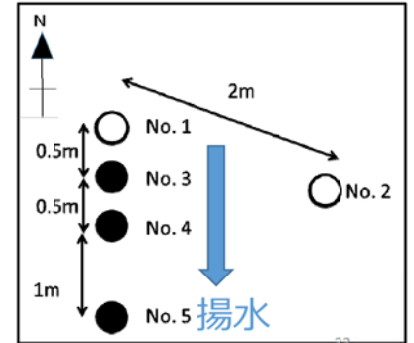
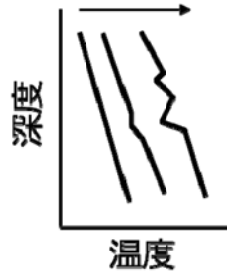
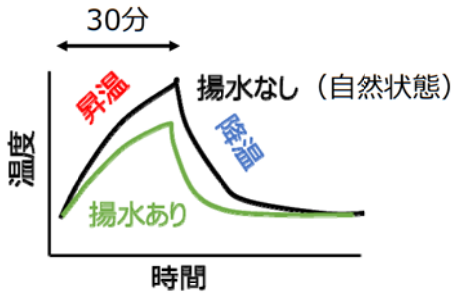


\* 装置は(株)アサノ大成基礎エンジニアリングが開発



# 温度検層の実施方法・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）で30分間加熱→冷却

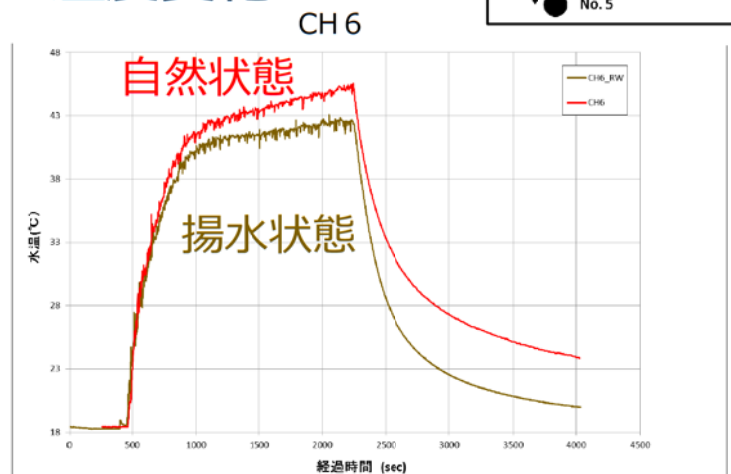
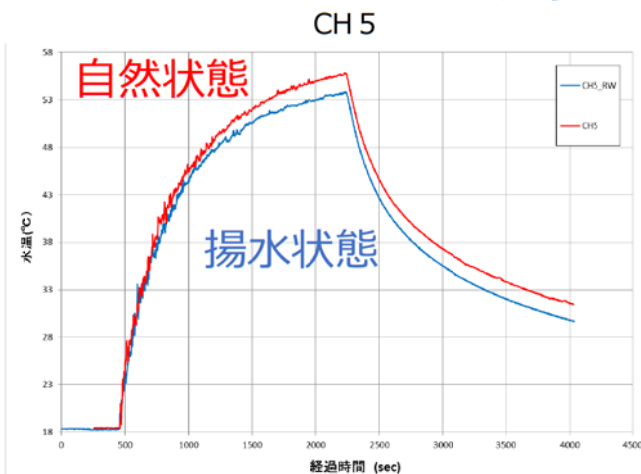
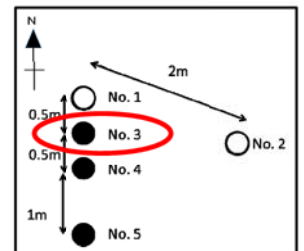


- センサーごとの温度変化
- 深度方向の温度プロファイル
- 自然状態と揚水状態の比較

H30年度

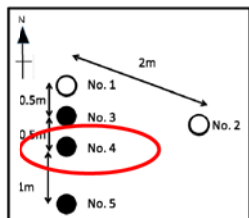
## 温度検層の結果の例（No.3）

### センサーごとの温度変化



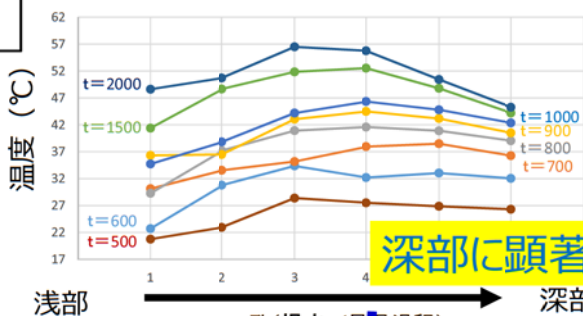
# 温度検層結果の例 (No.4) -深度方向のプロファイル-

H30年度

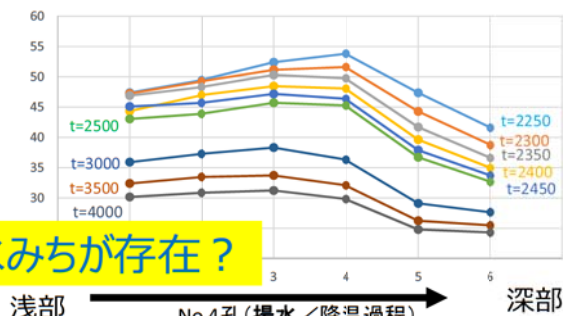


揚水なし  
(自然状態)

No.4孔 (揚水なし/昇温過程)

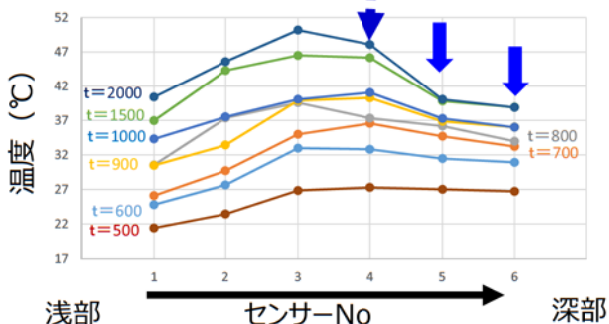


No.4孔 (揚水なし/降温過程)

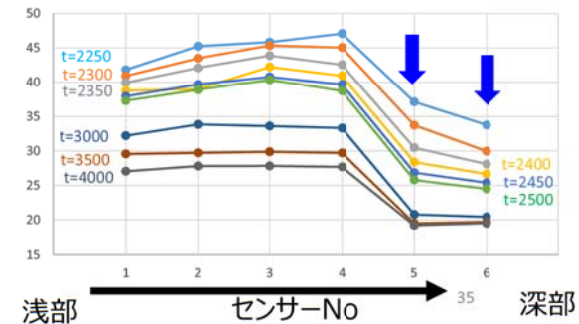


揚水あり

No.4孔 (揚水/昇温過程)



No.4孔 (揚水/降温過程)



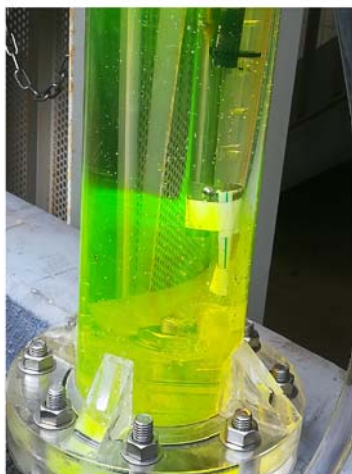
H30年度

## 対流の確認

- 透明アクリル管による対流観察
- 底部にウランを入れ、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



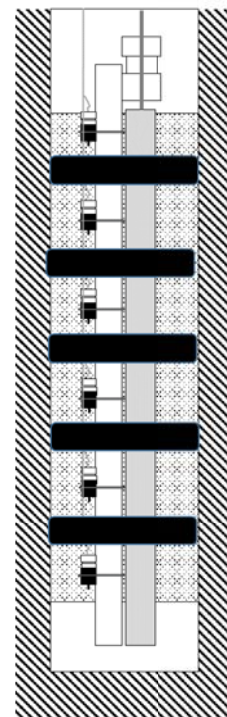
パッカーによる区間閉鎖



H30年度

# 温度検層の改良

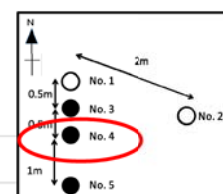
- センサー間に**スポンジパッカー**を設置



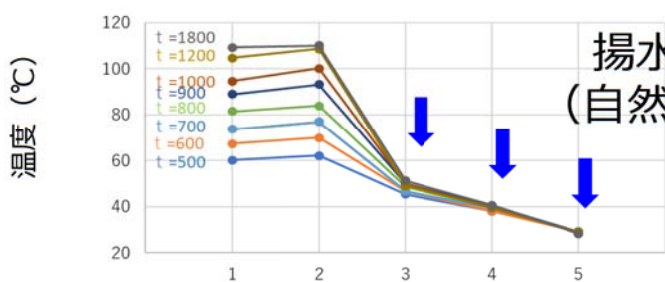
37

H30年度

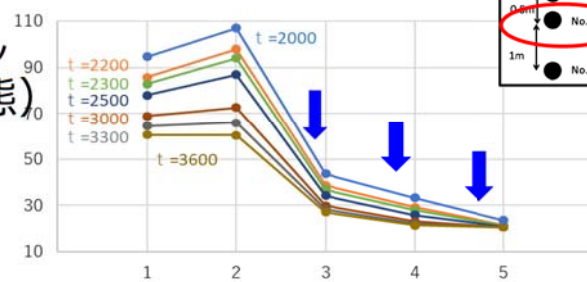
## 温度検層結果 (パッカー設置) No.4



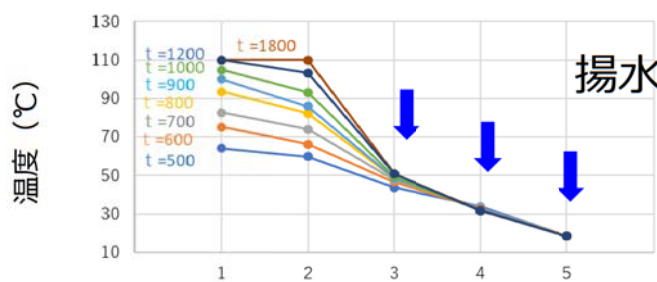
No4.孔 (揚水なし / 昇温過程)



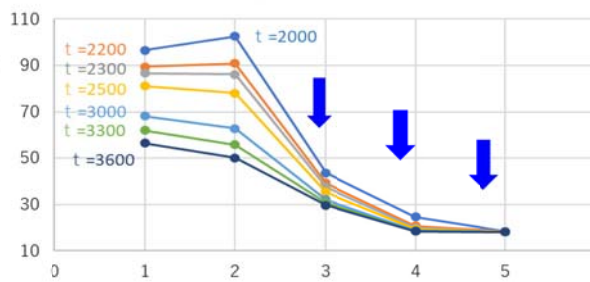
No4.孔 (揚水なし / 降温過程)



No4.孔 (揚水あり / 昇温過程)



No4.孔 (揚水あり / 降温過程)



浅部

センサーNo

深部

浅部

センサーNo

深部

深部に水みちが存在!

38

H30年度

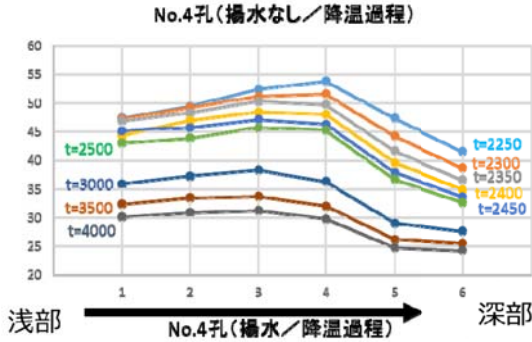
パッカーなし

# パッカーの有無の比較

パッカーあり

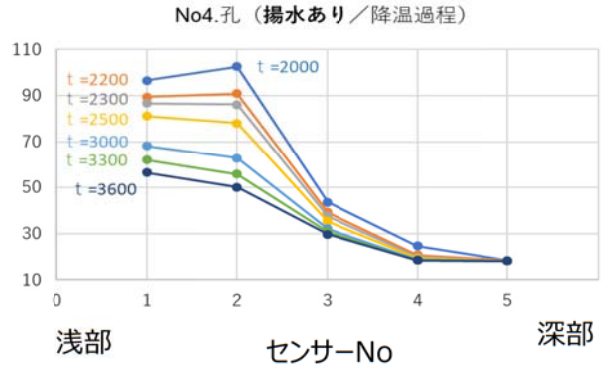
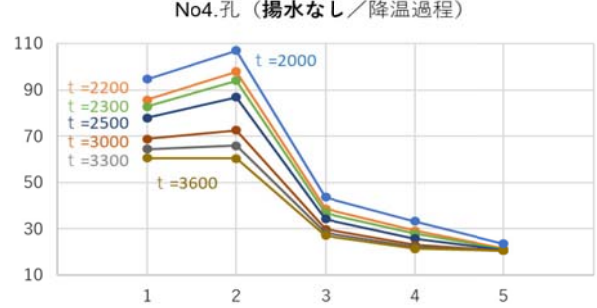
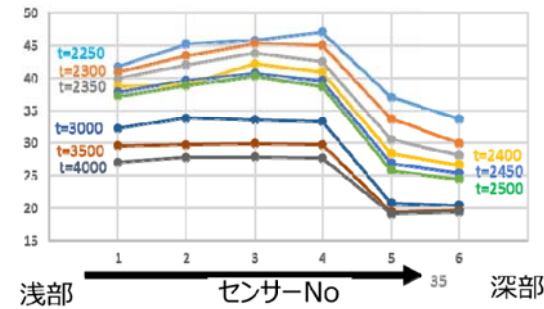
揚水なし

温度 (°C)



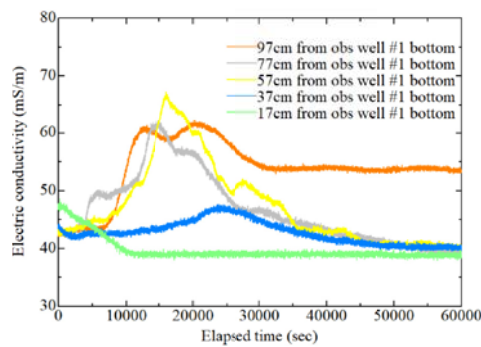
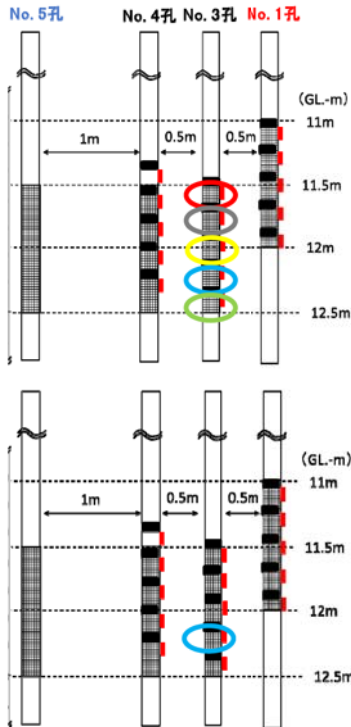
揚水あり

温度 (°C)



H30年度

# トレーサ試験結果 (No. 3 孔)



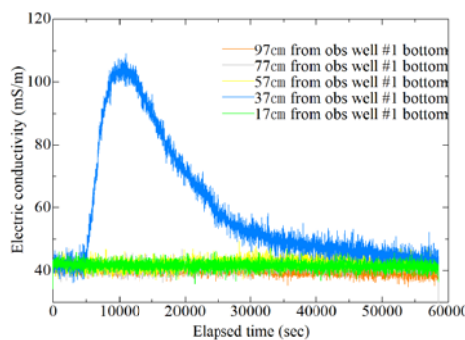
パッカーの有無の比較

パッカー無し

57cm

77cm

97cm

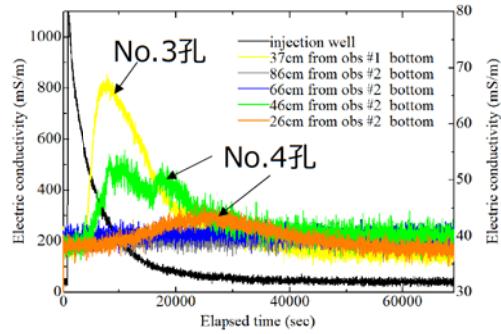
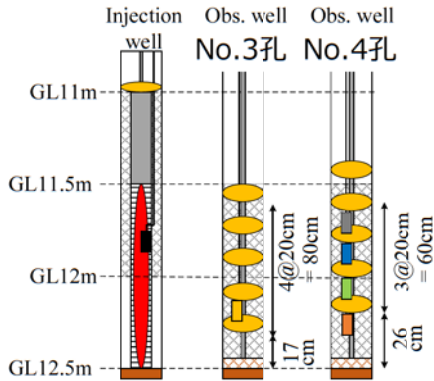


パッカー有り

37cm

H30年度

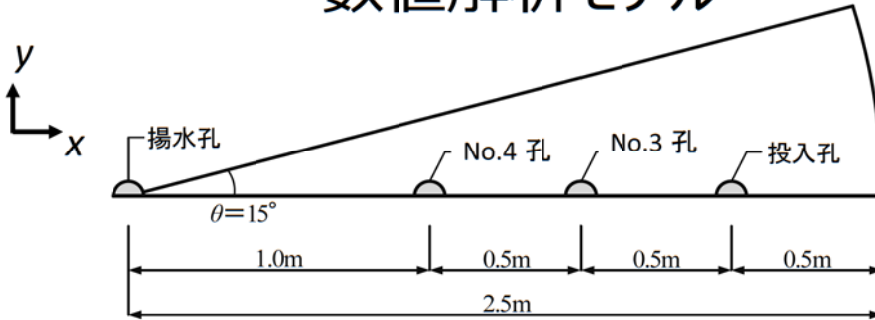
# 試験結果の一例（実流速）



実流速 (m/sec)	立ち上がり		ピーク	
設置位置	37 cm		37 cm	
投入孔~No.3孔	$1.54 \times 10^{-4}$		$7.06 \times 10^{-5}$	
設置位置	26 cm	46 cm	26 cm	46 cm
投入孔~No.4孔	$1.21 \times 10^{-4}$	$2.35 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-5}$	$9.80 \times 10^{-5}$

- 到達時間はNo.3とNo.4で大きく異なる
- 実流速は立ち上がりでの評価の方が早い

## 数値解析モデル

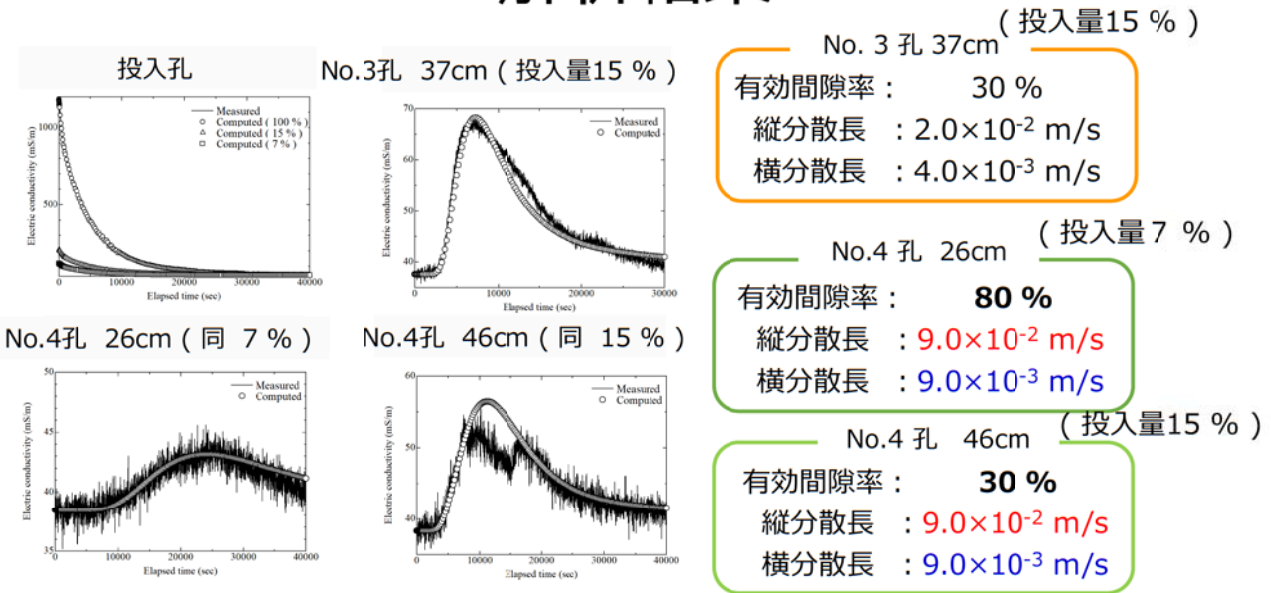


メッシュサイズ：縦方向 0.3 cm 横方向 0.4 cm 間隔  
(ペクレ数が2以下となるように)

水理定数 透水係数 :  $3.39 \times 10^{-4}$  m/sec  
有効間隙率：井戸内 → 100%で固定  
地盤 → 試験結果を再現する値  
分散長 : 試験結果を再現する値

計算方法 試験結果を再現するように濃度変化を設定  
時間刻みはクーラン数が1以下となるよう設定  
電気伝導率の値で比較

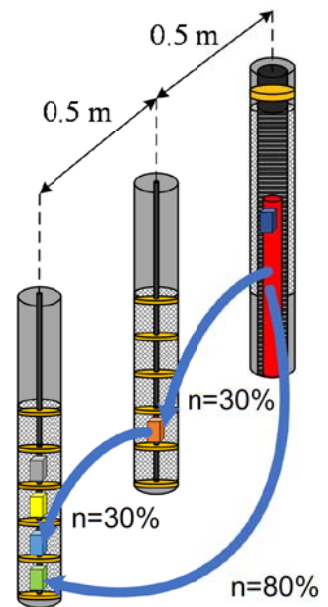
# 解析結果



- 縦分散長・横分散長は観測孔ごとに統一
- 有効間隙率は立ち上がり・ピークで調整

# 考察

- トレーサの到達時間が大きく異なる
- 総投入量は遠方孔の方が多い
- 区間により異なる有効間隙率
- 砂礫層中で迂回した水みちが存在 (不均質性)
- 同一観測孔で同一分散長とすることで再現可能
- 水みちの経路が長くても分散の影響は比較的小さい



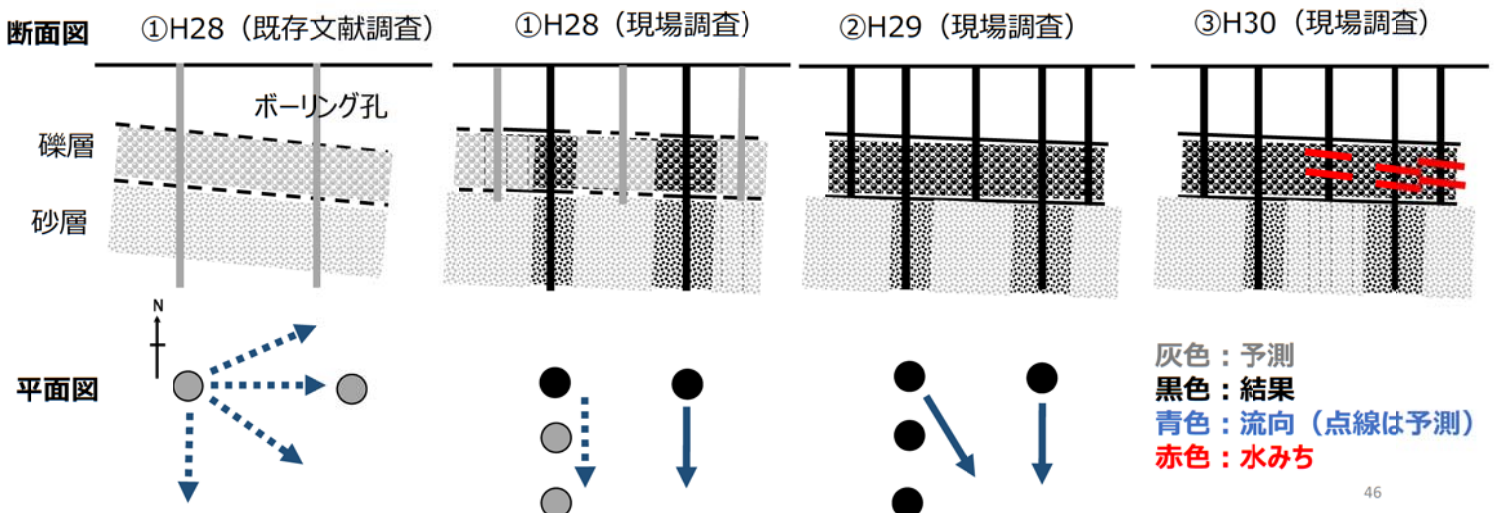
# これまでの実施結果に対する評価

- 対象層の設定（砂礫層で良かったのか？）：段階的なアプローチにより砂礫層の不均質を理解
- 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
- 温度検層：加熱により効果的に水みちを検出可能
- 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）
- トレーサ試験：適切な場の理解により取得された物質移行パラメータにより、信頼性のある将来予測が可能

45

## 段階的アプローチの成果のイメージ

- 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



46

## まとめ

- 段階的アプローチにより効率的に理解度が向上
- 地下環境を合理的に理解するための調査手法を例示
- パッカーによる遮水が重要（温度検層、トレーサ試験）
- 人材育成の機会を提供（調査、解析、結果の解釈）  
→ 手、足、頭を動かす訓練の場が必要

47

## 課題

- 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（厚い帯水層中に薄い難透水層  
→ 地下水環境の不均質性の理解）
  - 被ばく線量管理下での効率的な調査手法 etc.
- 効果的・継続的な人材育成の方法

48