

「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム」


地盤環境学

地下水環境調査


鈴木 誠(千葉工業大学)

地盤環境学の位置づけ

- 汚染水・地下水環境
 - 放射性物質が周辺に飛散
 - 格納容器から漏れ出した放射性物質が施設内に滞留
 - 降雨や地下水流動に伴って、放射性物質が移動



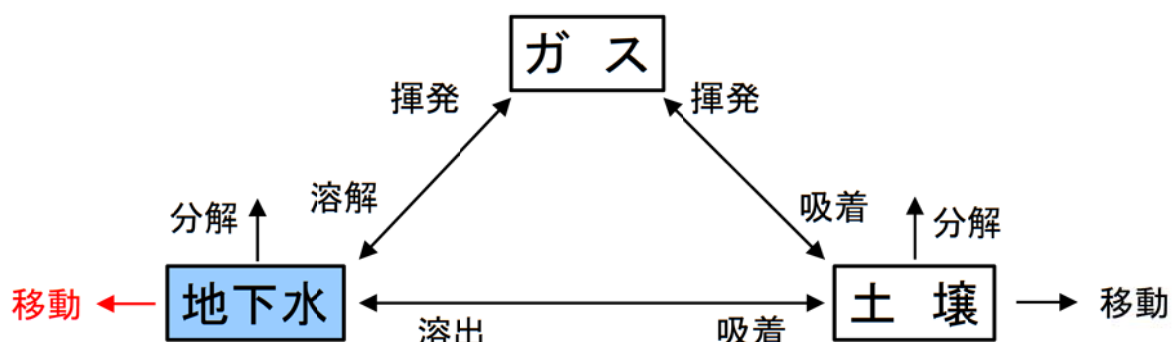
 - 作業環境の暴露リスク
 - 域外への拡散リスク
- デコミッショニング
 - 放射性廃棄物処分における放射性物質が移動



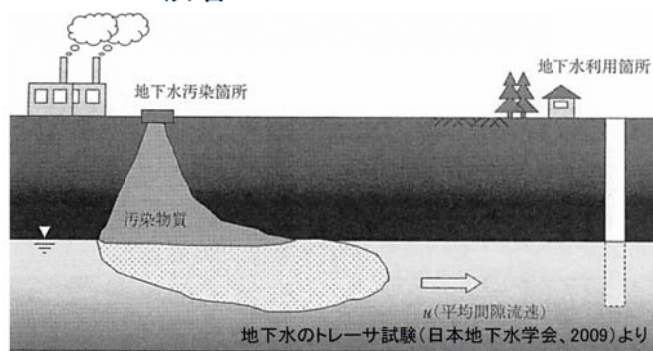
 - 域外への拡散リスク

土壌地下水中の物質の動態

土壌・地下水中の物質は種々の形態で移動する



地下水による物質移行を
対象とする



講義内容

➤ 室内試験

⇒ トレーサー試験方法の検証

➤ 現場試験

⇒ 地下水の水みち調査

⇒ 基本的な水理特性の把握(土層, 透水係数)

⇒ トレーサー試験による実流速の測定(透水係数, 有効間隙率)

⇒ 水理モデルの構築

(透水係数, 分散係数, 流速, 境界条件などの設定方法)

① 室内土層実験による測定精度の検証

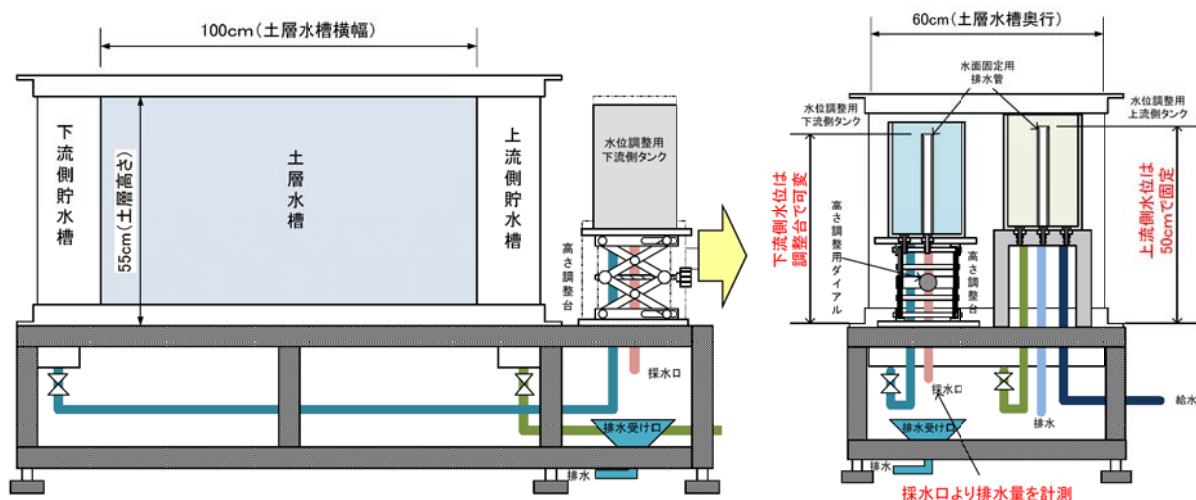
- 放射性汚染物質は地下水流により移動・拡散する？
- 地下水流速とは何か？
- 核種汚染濃度と経過時間の関係は？



放射性汚染物質の移流分散を精度よく予測する。



～実験装置の概要～

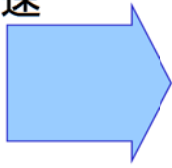


<動水勾配の与え方>

- 土層水槽の動水勾配は、両側貯水槽の水面高さの差と100cmで固定されている土層水槽の横幅より求めることができる。
- 土層水槽の両側の貯水部の水位は、貯水部と連結した水位調整用タンク中央に配置した排水管の高さと同じであり、上流側のタンクの水位(上流側貯水槽)は水槽高さ50cmで固定されているため、下流側のタンク下の高さ調整台のダイヤルを回転することで水位差を作ることができる。
- 水位差は、両貯水槽の水面をスケールで計測することで求める。

～地下水流速とは？～

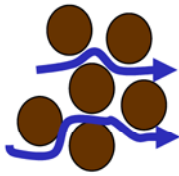
- **ダルシー流速 v** : 全断面が流通可能と仮定した時の見かけの流速



$$v = Q / A$$

A : 土と間隙の両方を合わせた面積

- **実流速 v'** : 有効間隙のみが流通可能の時の流速



$$v' / v = n_e$$

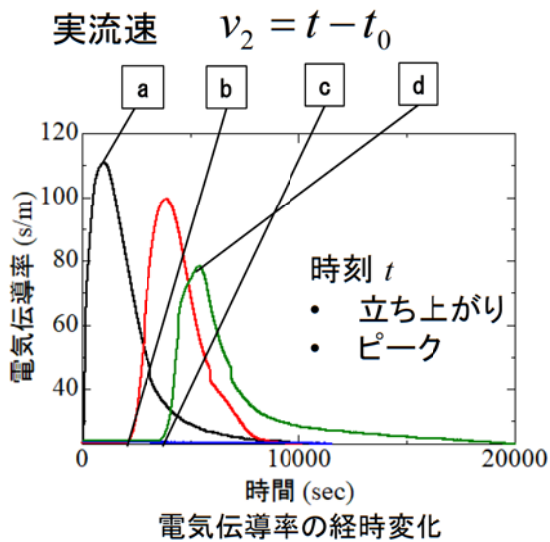
n_e : 有効間隙率

～間隙率 n と有効間隙率 n_e ～

間隙率 n : 土の全体積に対する間隙体積の比

有効間隙率 n_e : 間隙のうち水が動ける部分のみを有効とした間隙率

～移流分散のイメージ～



混合液: 原位置地下水 + NaCl + エタノール

4.6% (重量%)

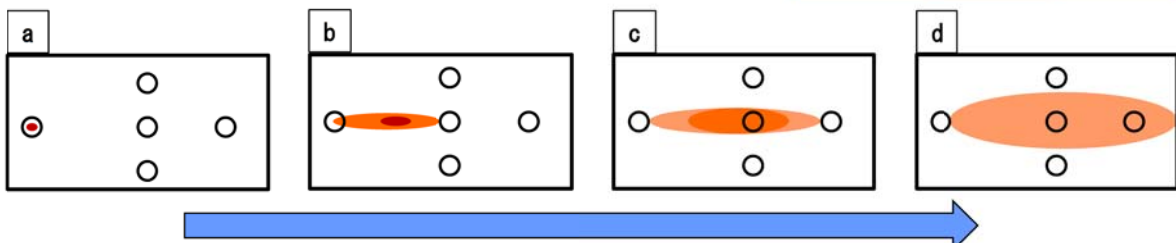
比重 1.0



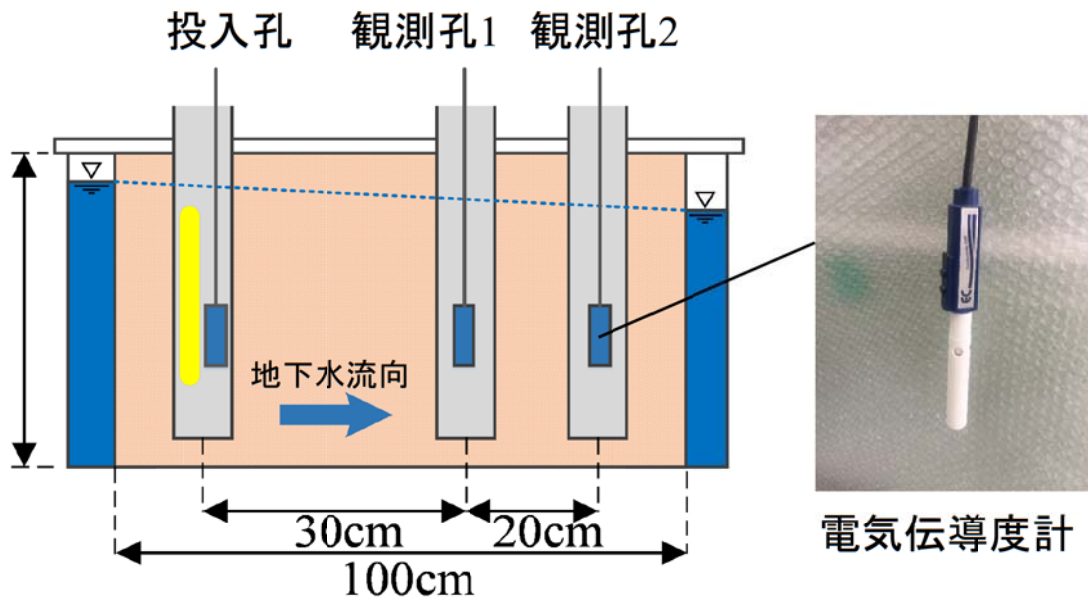
塩水とエタノールの混合液



電気伝導率計



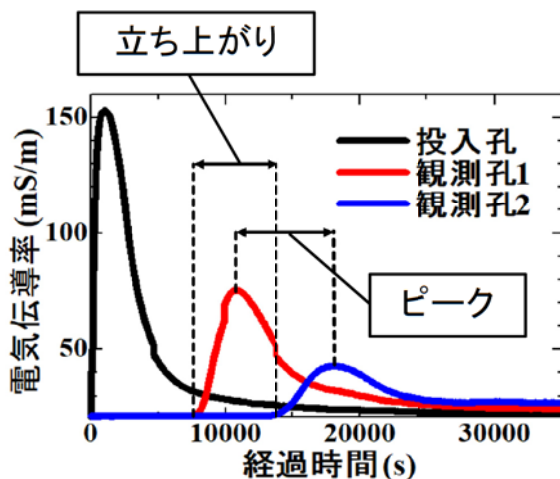
～ 2018年度の試験概要～



<試験孔>

材質:塩化ビニルパイプ 口径(投入孔):VP75
口径(観測孔):VP50 開孔率:30%

～ 2018年度の試験結果～



砂層

間隙率 30～40%

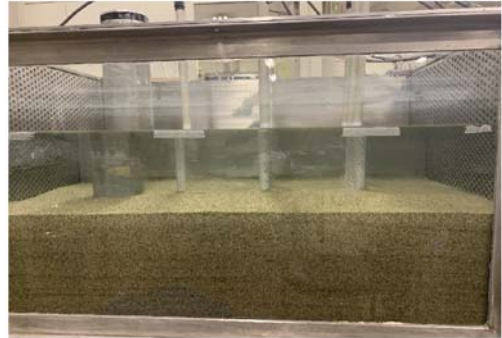
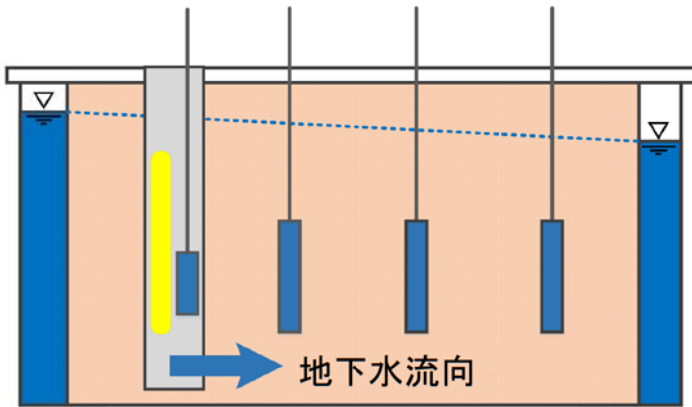
有効間隙率 30%

参考文献
土木学会編(1974):水理公式集,昭和46
年改訂版,365-366

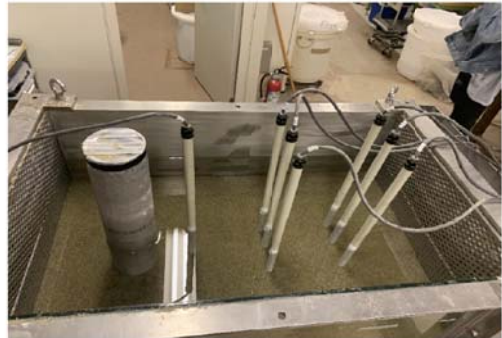
水位差 (cm)	ダルシー流速 (m/s)	実流速(m/s)		有効間隙率(%)	
		ピーク	立ち上がり	ピーク	立ち上がり
4.81	4.59×10^{-5}	1.31×10^{-4}	1.37×10^{-4}	35.04	33.41
3.68	3.12×10^{-5}	9.19×10^{-5}	3.12×10^{-4}	33.95	30.72
2.24	1.35×10^{-5}	4.21×10^{-5}	5.22×10^{-5}	32.07	25.50
1.79	8.46×10^{-6}	2.72×10^{-5}	3.50×10^{-5}	31.83	24.70
0.93	4.98×10^{-6}	1.73×10^{-5}	2.54×10^{-5}	28.71	19.63

～ 2019年度の試験概要～

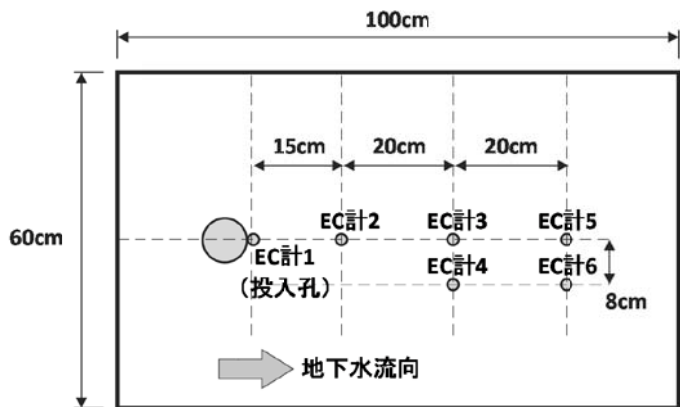
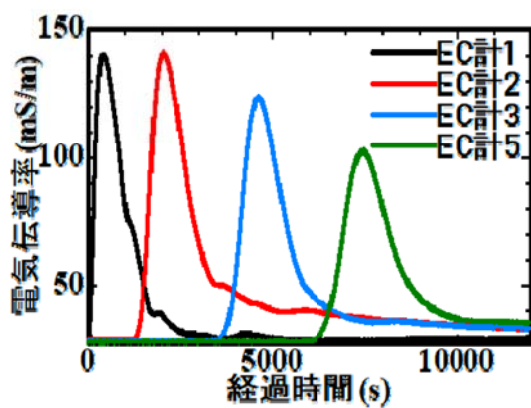
孔内での滞留を検討



＜多点EC計＞
砂層に埋設可能
1本で3点の測定
開孔率:20%



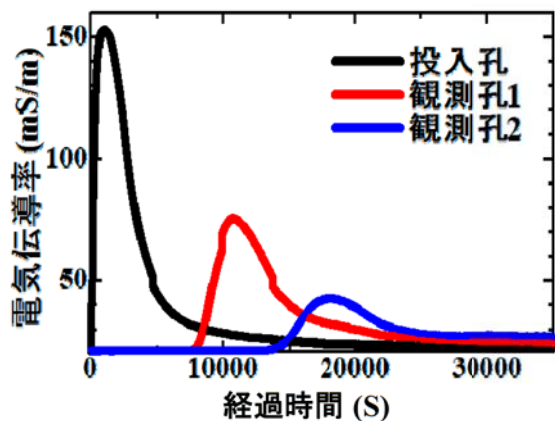
～ 2019年度の試験結果～



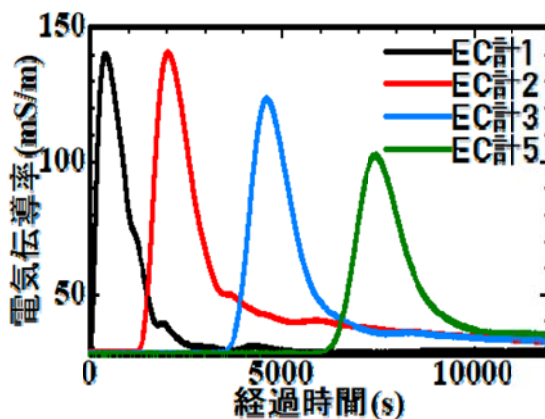
EC計配置図

水位差 (cm)	ダルシー流速 (m/s)	実流速(m/s)		有効間隙率(%)	
		ピーク	立ち上がり	ピーク	立ち上がり
2.95	2.96×10^{-5}	7.42×10^{-5}	8.59×10^{-5}	40.95	35.38
2.20	2.64×10^{-5}	7.33×10^{-5}	7.96×10^{-5}	40.80	37.60
2.00	3.01×10^{-5}	7.65×10^{-5}	8.12×10^{-5}	38.95	36.65

～室内試験のまとめ～



【試験孔あり】

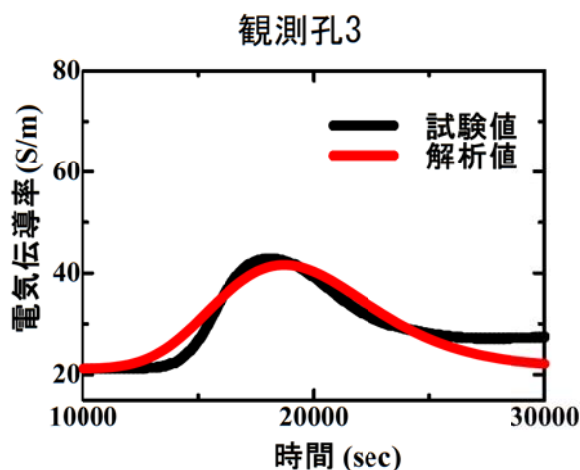
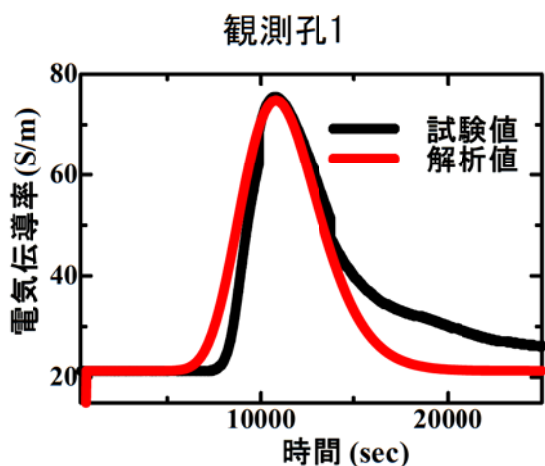


【試験孔なし】

- ◆ テールが延びずに**正規分布形に類似**
- ◆ 投入孔から離れた投入孔においても**濃度低下が小さい**

孔内での滞留の影響 ⇒ 到達時間だけ

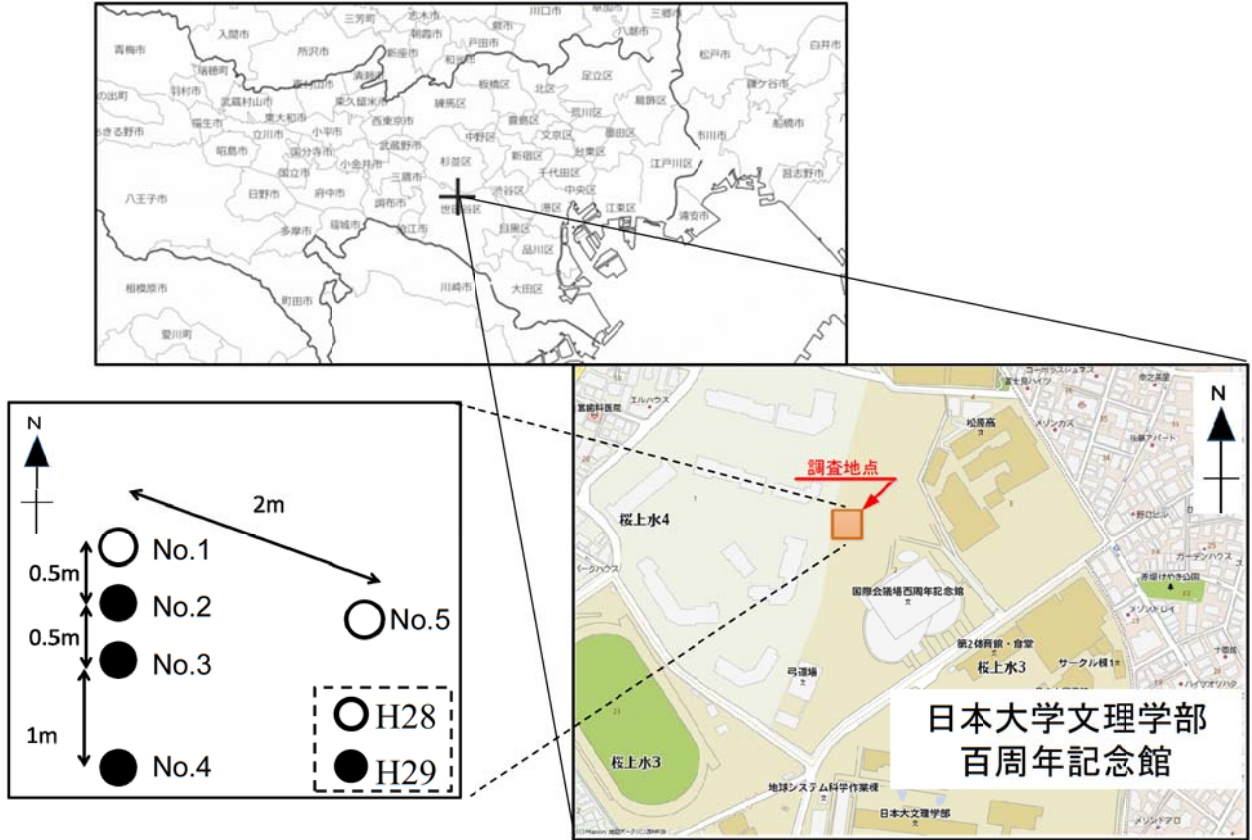
～数値解析との比較～



	透水係数 (cm/sec)	有効間隙率 (%)	非貯留係数	縦分散長 (cm)	横分散長 (cm)
試験から算出	5.64×10^{-2}	0.23	1.70×10^{-2}		
観測孔1の解析	5.64×10^{-2}	0.20	1.70×10^{-2}	6.00×10^{-2}	6.00×10^{-3}
観測孔3の解析	5.64×10^{-2}	0.25	1.70×10^{-2}	2.00×10^{-1}	2.00×10^{-2}

② 実験井戸による現場試験

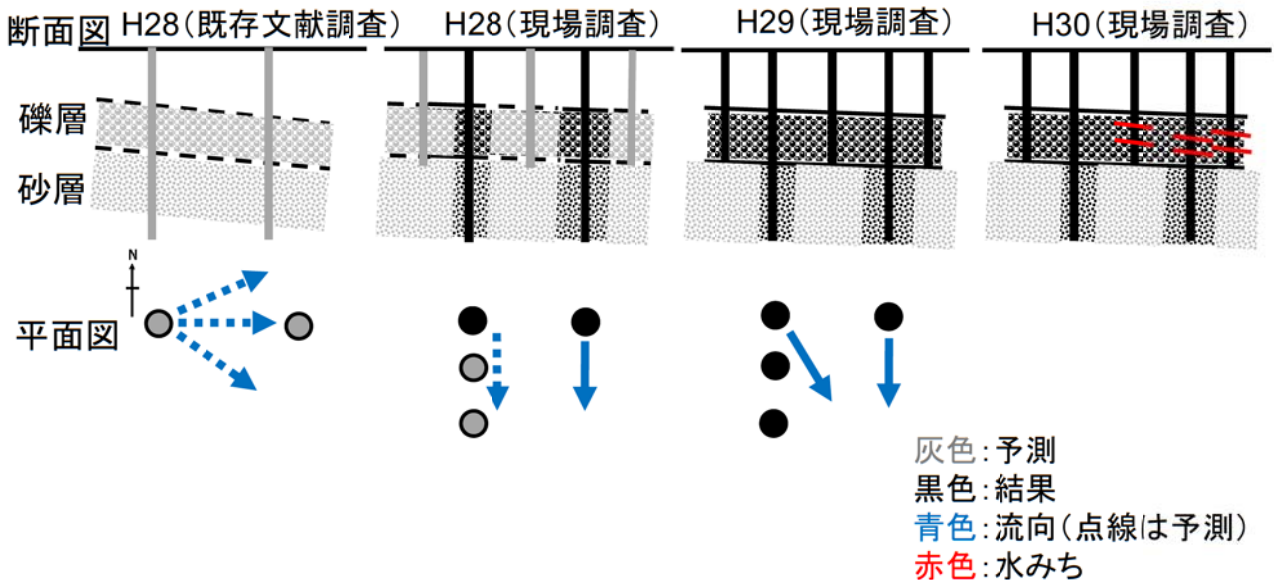
試験地点



～段階的アプローチのイメージ～

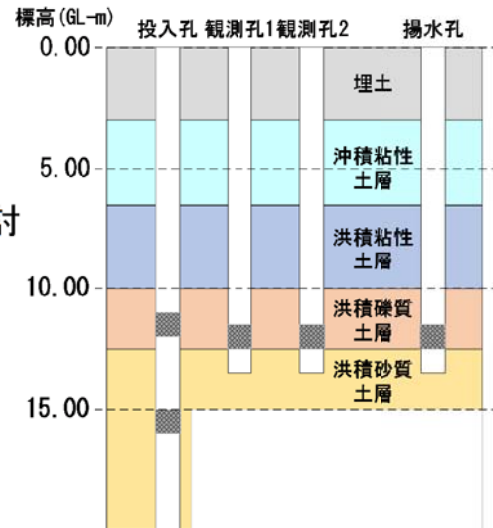
年度ごとに予測，調査，評価，課題抽出を繰り返す

→ 理解度が向上

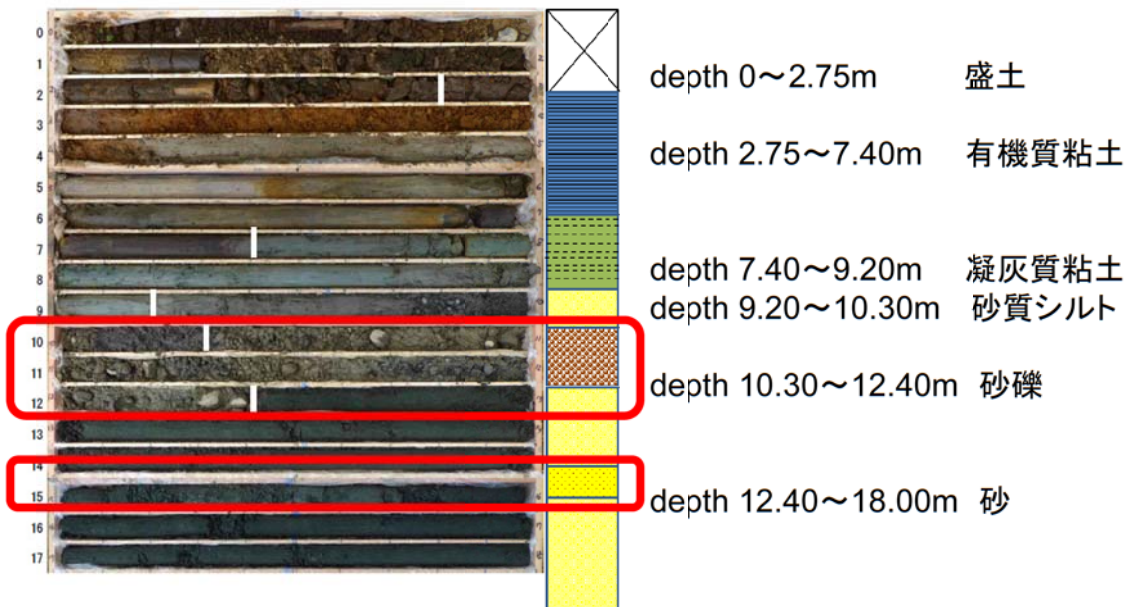
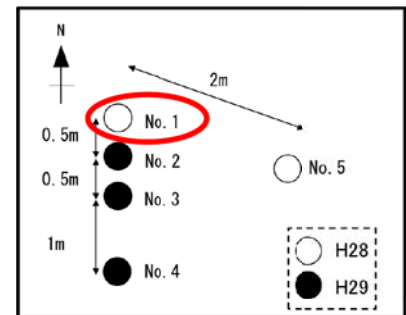


～現場試験の項目～

- 地下水層の把握：
どこに地下水が卓越して流れるかの選定
(コア, 電気検層, フローメーター検層, 温度検層)
- 流向流速測定：
地下水の方向, 流速を把握
- 透水係数の推定：
 - ✓ 土の粒度分布からの推定
 - ✓ 単孔式透水試験
 - ✓ 孔間透水試験
 - ✓ 揚水試験
 整合性の検討
- 実流速(移流, 分散)の測定
物質移行の評価 (トレーサー試験)

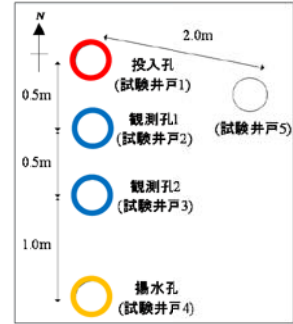


～地質分布(No.1孔)～

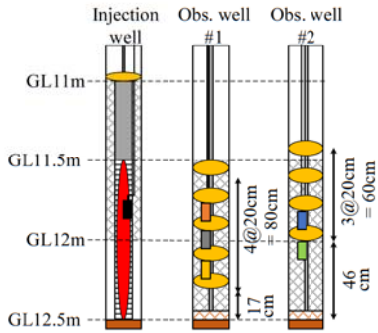


～現場トレーサー試験～

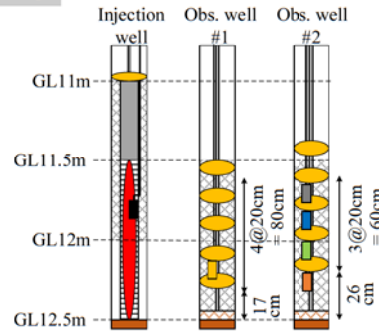
投入方法：ストレーナーに混合液入りの風船を設置し、所定の深度設置後、鋭利な刃物で破裂させる。



20 L/minの時



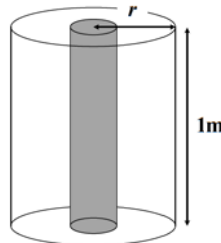
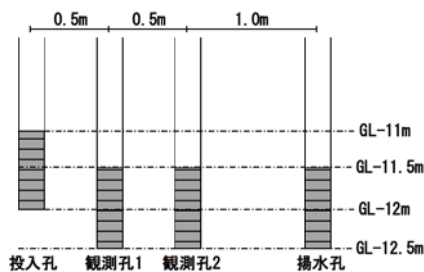
投入孔：GL-11.5 mに1個
 観測孔1：37cm 57cm 77cm
 観測孔2：46cm 66cm



投入孔：GL-11.5 mに1個
 観測孔1：37cm
 観測孔2：26cm 46cm 66cm 86cm

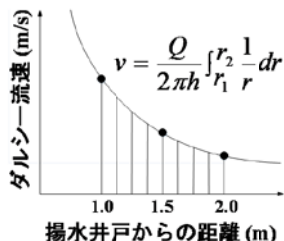
～平均ダルシー流速～

- 揚水孔から各孔までの距離 r を半径として算出した側面積と揚水量から各孔における流速を求める
- 各孔における流速と距離 r から成り立つ関数を距離 r で積分し、各孔間の距離で割ることで各孔間での平均的な流速を求める



$$Q/A = v$$

Q ：揚水量 A ：側面積
 v ：ダルシー流速



20 L/min	
投入孔～観測孔1	3.05×10^{-5} (m/s)
投入孔～観測孔2	3.67×10^{-5} (m/s)

～2018年度の現場トレーサー試験の概要～

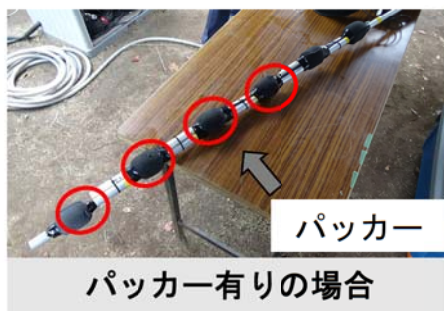
地盤の不均質性 ⇒ 水みちの探査

孔内の温度変化を用いた水理試験から各孔における水みちを探査
(温度検層試験)

孔内の上下流の影響 ⇒ 測定区間を限定させることで確認

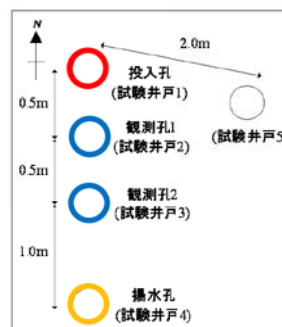
- ・ 測定区間をパッカーで区切らない状態
- ・ 測定区間をパッカーで区切る状態

トレーサー試験を実施

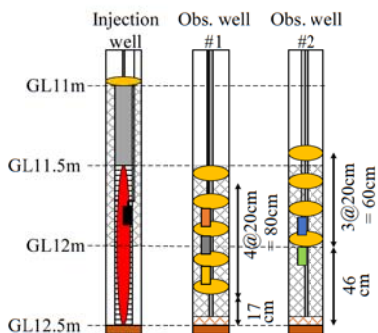


～現場トレーサー試験～

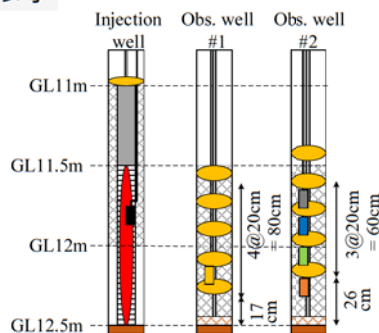
投入方法：ストレーナーに混合液入りの風船を設置し、
所定の深度設置後、鋭利な刃物で破裂させる。



20 L/minの時



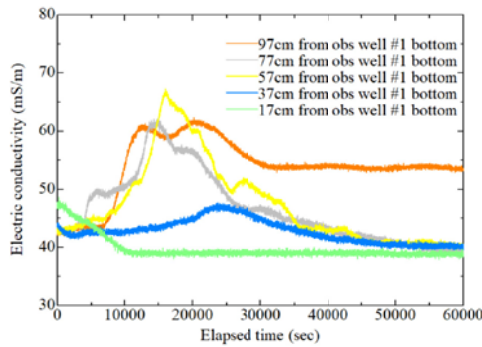
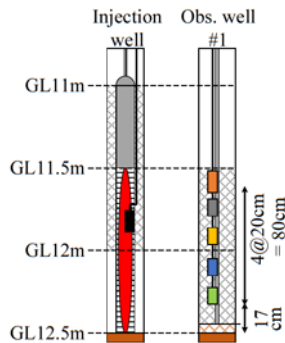
投入孔：GL-11.5 mに1個
観測孔1：37cm 57cm 77cm
観測孔2：46cm 66cm



投入孔：GL-11.5 mに1個
観測孔1：37cm
観測孔2：26cm 46cm 66cm 86cm

～パッカーの影響～

パッカー無し・有りの比較

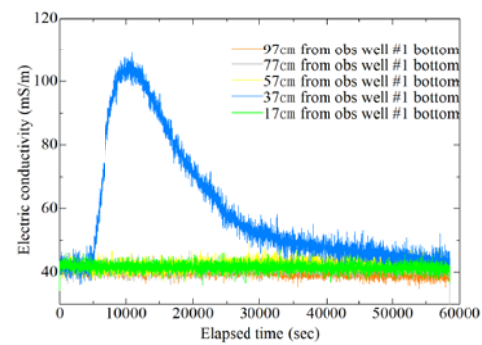
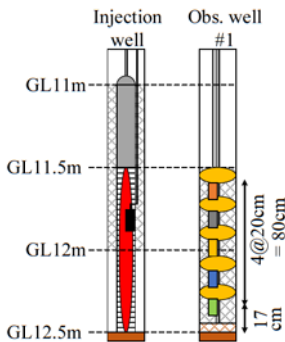


パッカー無し

57cm

77cm

97cm

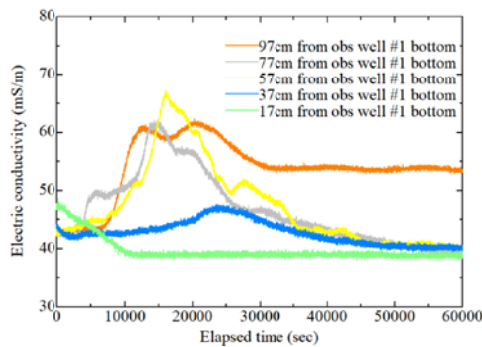
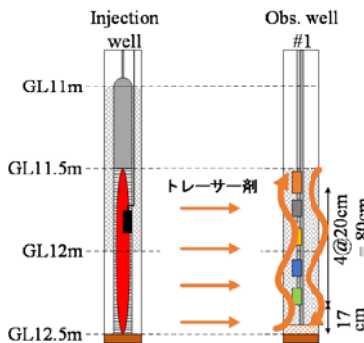


パッカー有り

37cm

～パッカーの影響～

観測孔1

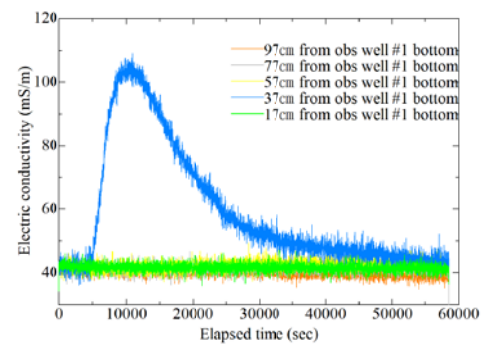
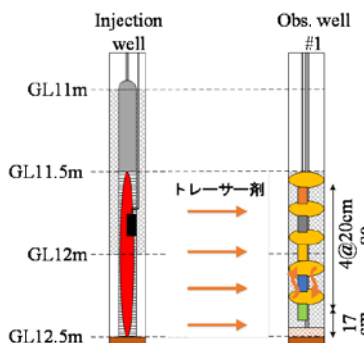


パッカー無し

57cm

77cm

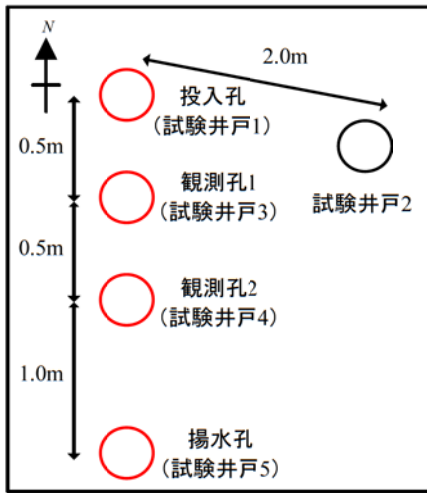
97cm



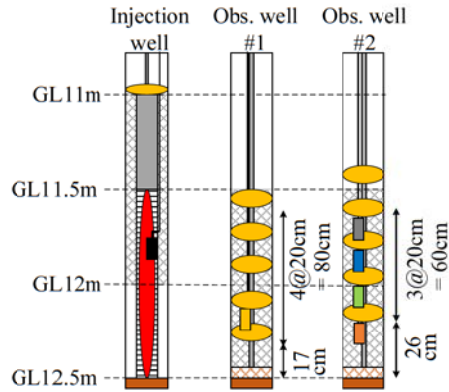
パッカー有り

37cm

～2018年度の試験結果～



観測孔1と2



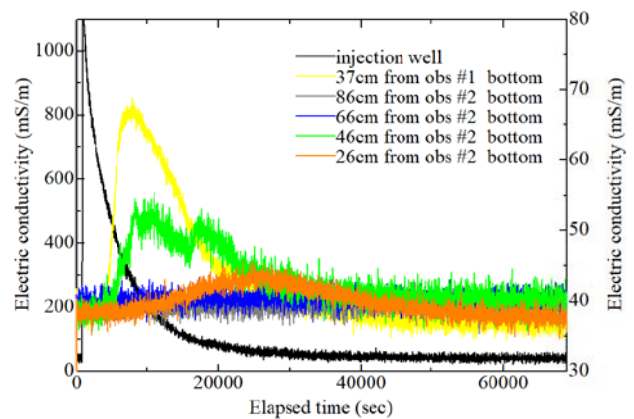
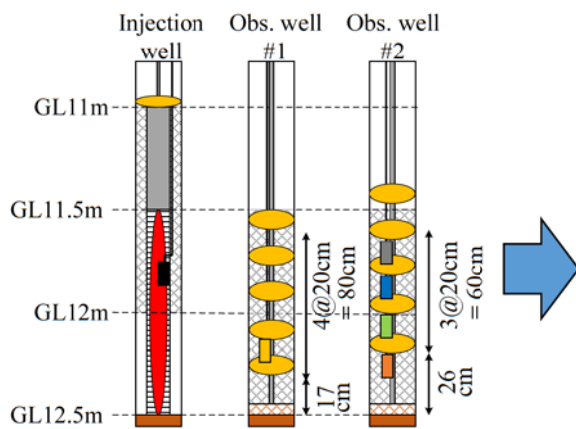
投入孔 : GL-11.5 mに1個

観測孔1 : 37cm

観測孔2 : 26cm 46cm 66cm 86cm

～2018年度の試験結果～

観測孔1と2

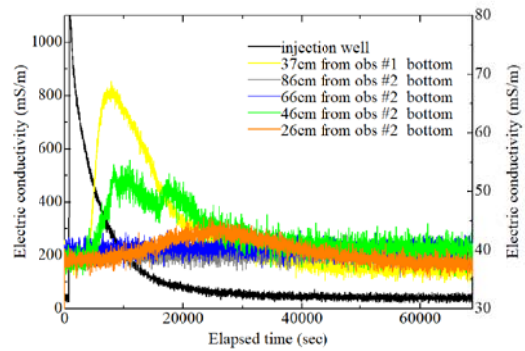
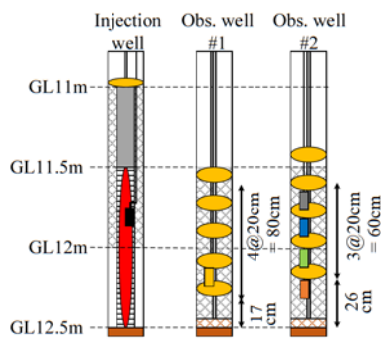


観測孔1 : 有孔管下端から37cmで顕著な反応

観測孔2 : 有孔管下端から46cmと26cmで顕著な反応

⇒ 観測孔1を通過せず到達する水みち・観測孔1にも複数の水みち

～2018年度の試験結果～



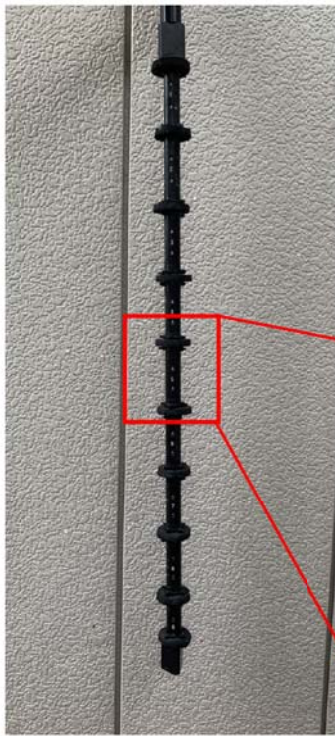
実流速 (m/sec)	立ち上がり		ピーク	
設置位置	37 cm		37 cm	
投入孔～観測孔1	1.54×10^{-4}		7.06×10^{-5}	
設置位置	26 cm	46 cm	26 cm	46 cm
投入孔～観測孔2	1.21×10^{-4}	2.35×10^{-4}	5.55×10^{-5}	9.80×10^{-5}

～2018年度の試験結果～

有効間隙率 (%)	立ち上がり		ピーク	
設置位置	37 cm		37 cm	
投入孔～観測孔1	19.9		43.2	
設置位置	26 cm	46 cm	26 cm	46 cm
投入孔～観測孔2	30.3	15.6	66.1	27.4

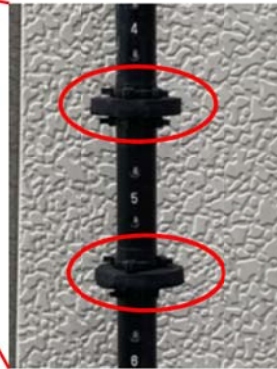
有効間隙率 (%)	立ち上がり		ピーク	
	60 cm	90 cm	60 cm	90 cm
投入孔～観測孔1	15.3	19.7	57.4	33.7
投入孔～観測孔2	16.1	14.5	48.6	54.9

～2019年度の現場トレーサー試験の概要～



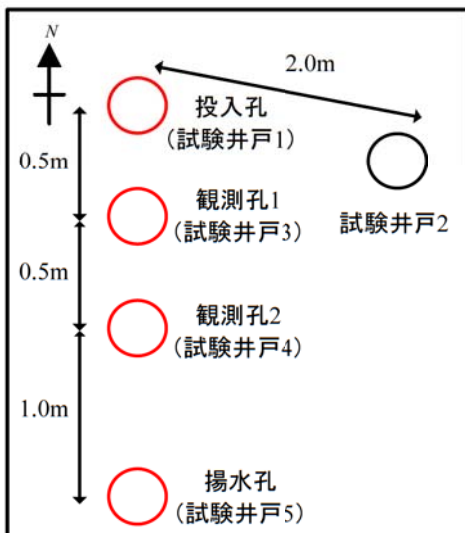
原位置試験でも孔内を珪砂で充填することで孔内流を抑制可能
 ⇒引き抜きが難しい・設置に時間がかかる

パッカーで細かく区切り埋設に近い状態に改良

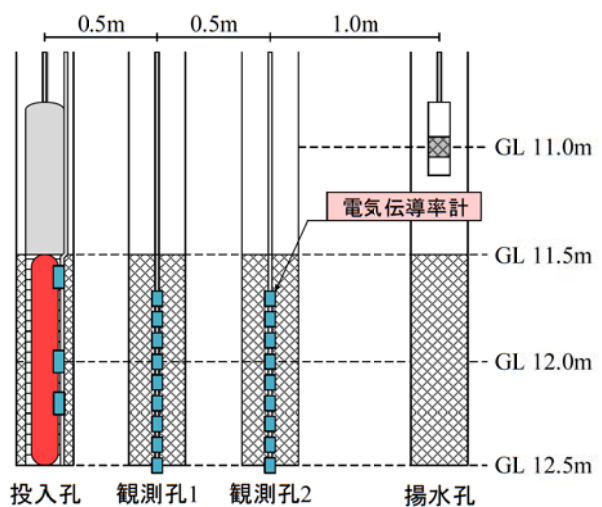


【多点EC計】
 10cmピッチパッカーで区切る
 多点で9点測定可能

～現場トレーサー試験～



投入孔のスリット位置を変更

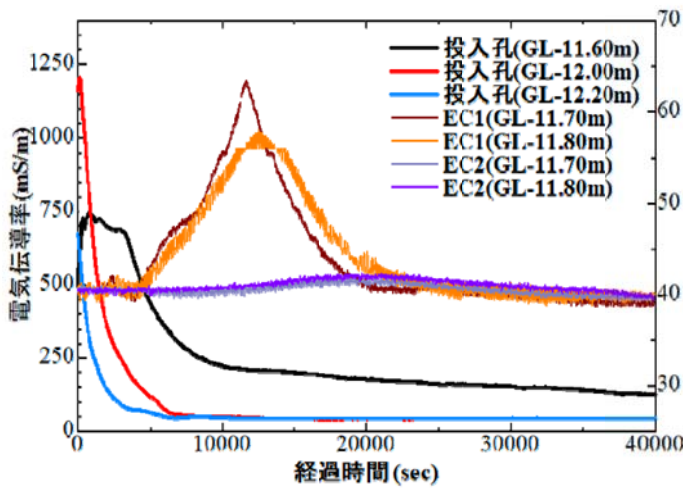


【EC計設置位置】

投入孔: GL-11.6m GL-12.0m GL12.2m

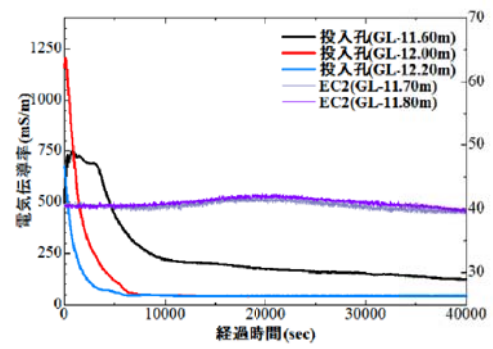
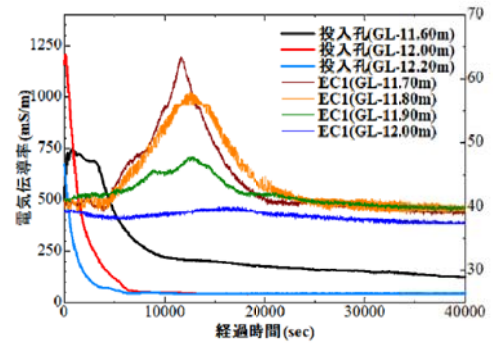
観測孔: GL11.7~GL12.5mまで10cmピッチで9点

～2019年度の試験結果～

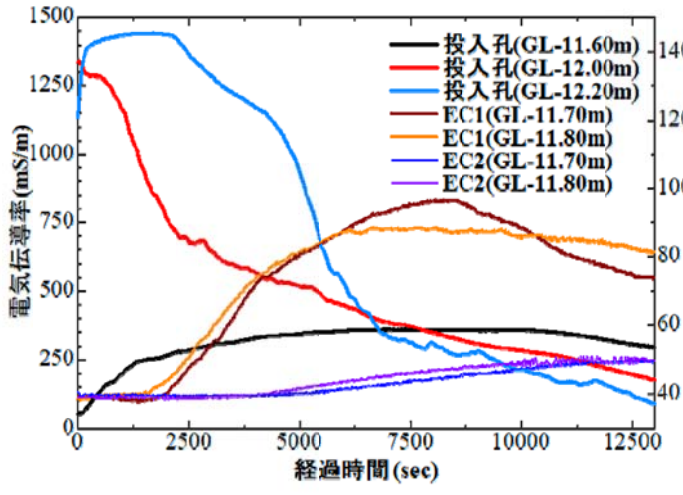


観測孔1→EC1
 観測孔2→EC2
 トレーサー剤の比重:1.001

観測孔の上部のみ反応

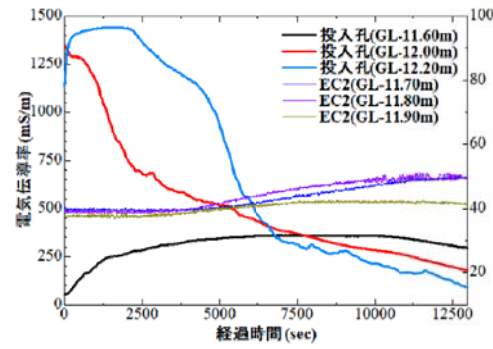
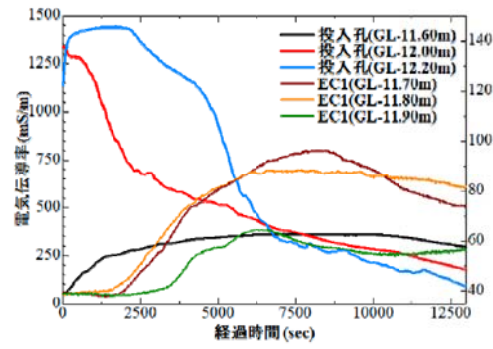


～2019年度の試験結果～



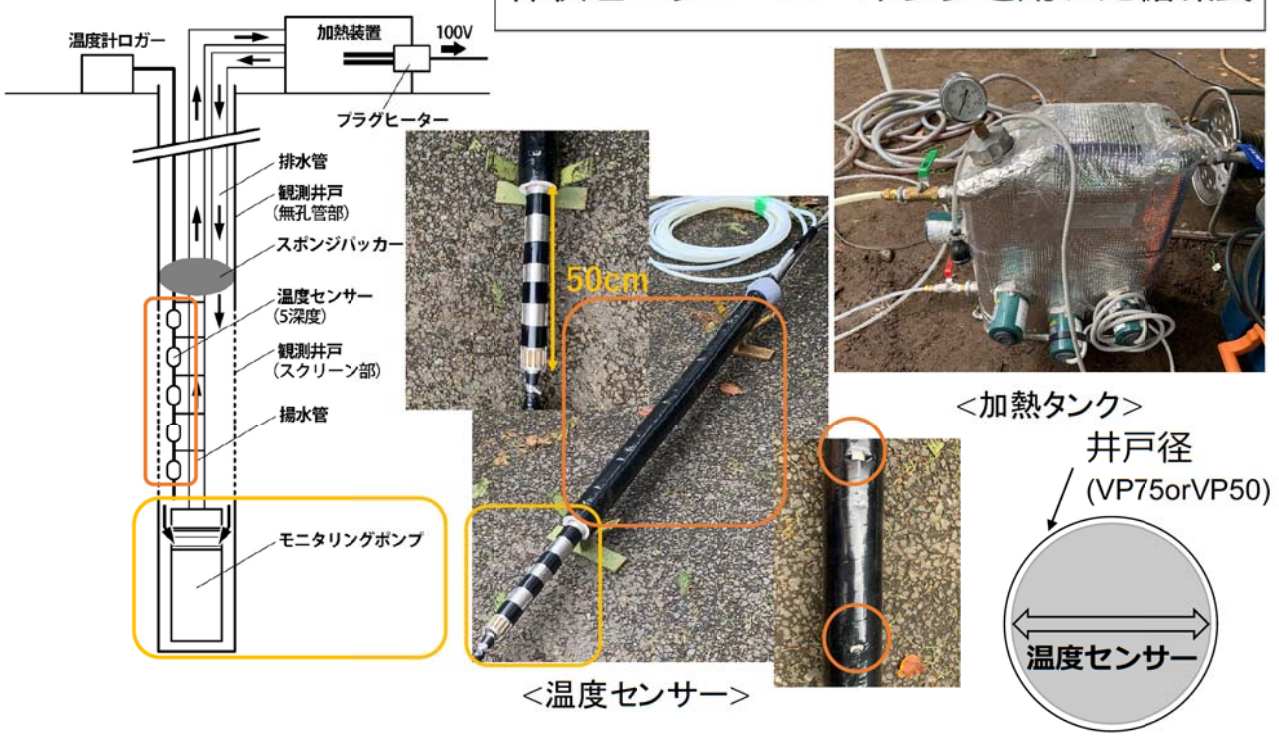
観測孔1→EC1
 観測孔2→EC2
 トレーサー剤の比重:1.003

トレーサー剤の比重を増加 ⇒ これでも？



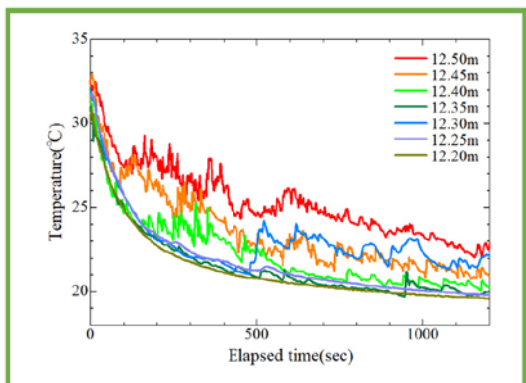
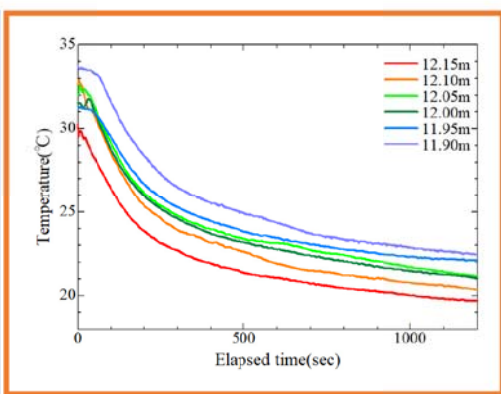
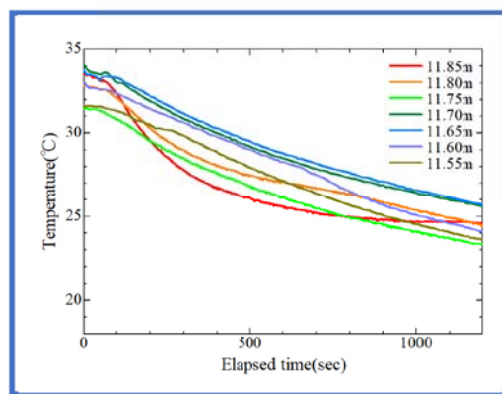
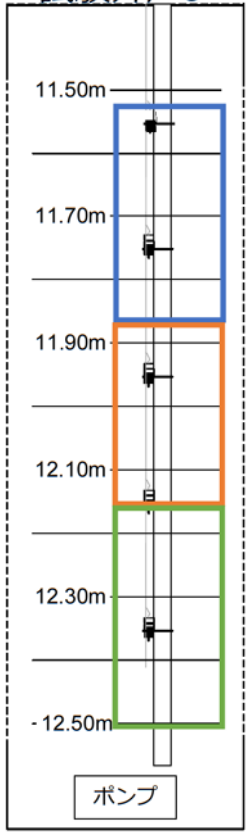
～循環式温度検層(R1)～

・加熱方式を変更
棒状ヒーター ⇒ ポンプを用いた循環式



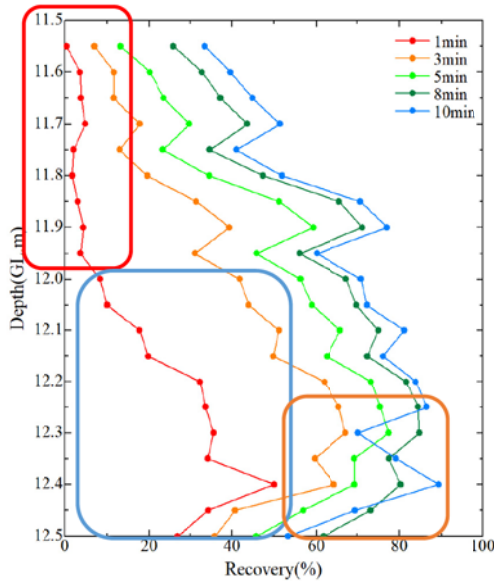
～温度検層の試験結果～

＜試験井戸3＞



～温度検層の試験結果まとめ～

<試験井戸3>



1分後を比較

⇒ **上部(GL.12.00m~GL.11.50m)**
下部(GL.12.50m~GL.12.00m)

10分後を比較

⇒ **GL.12.40m~GL.12.00m/GL.11.90m**

復元率の逆転

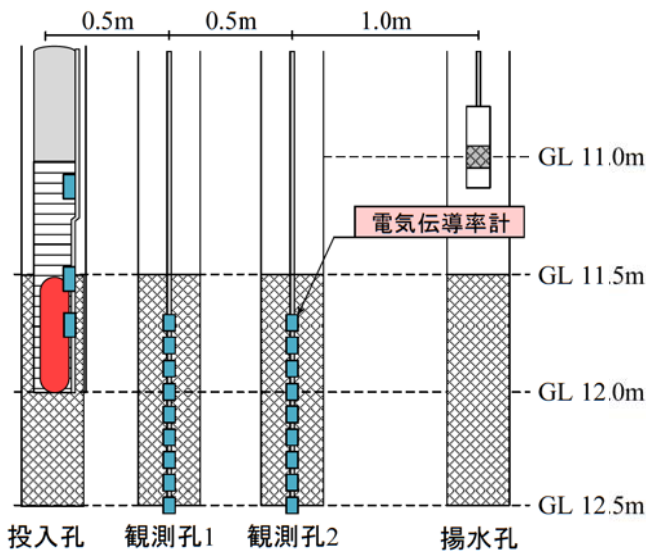
⇒ **GL.12.50m/GL.12.45m/GL.12.30m**

～トレーサー剤の比重検討～

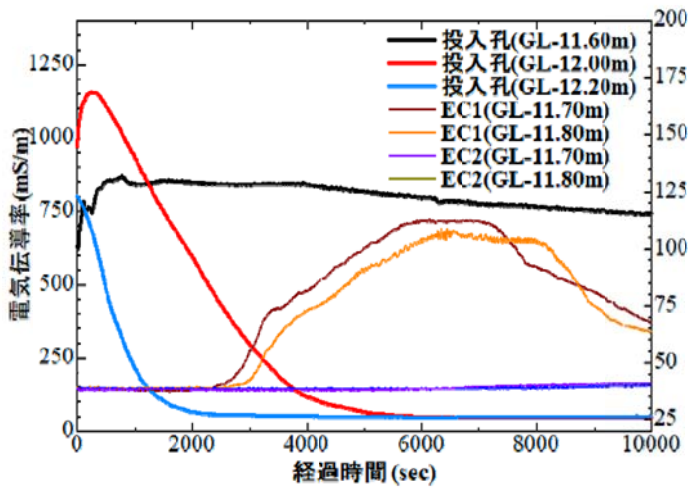
水みちの連続性評価



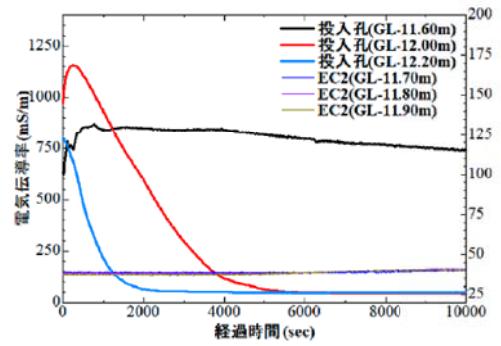
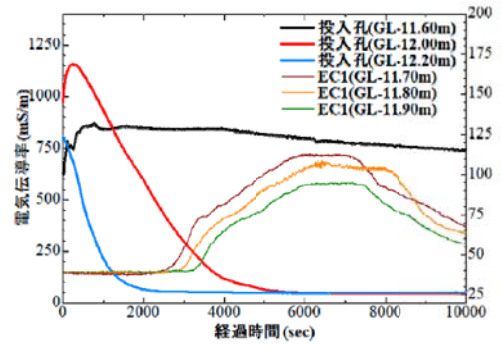
ストレーナーの半分を遮蔽しトレーサーを
GL11.5~12.0m間に投入



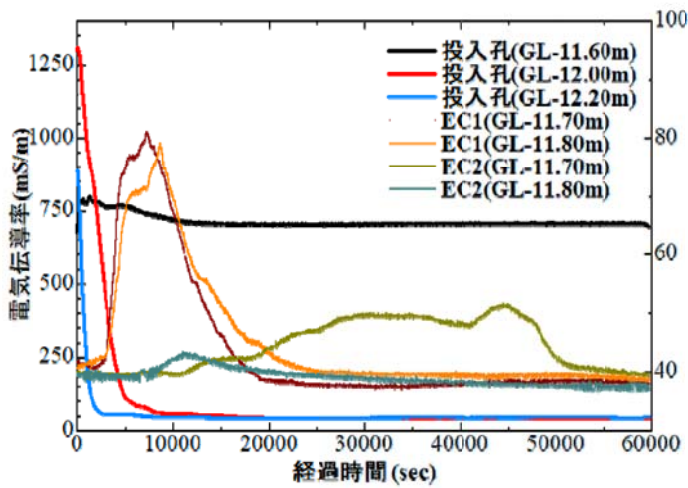
～2019年度の試験結果～



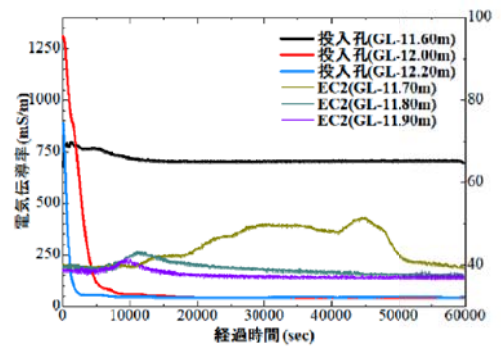
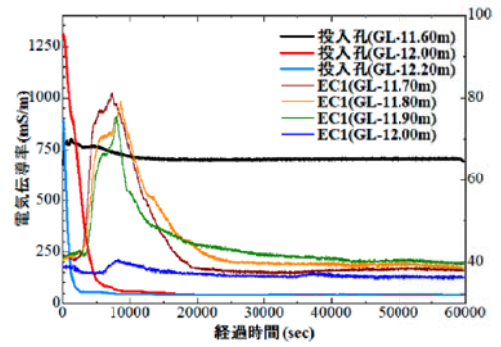
観測孔1→EC1
 観測孔2→EC2
 トレーサーの比重: 1.001
 上部に投入



～2019年度の試験結果～



観測孔1→EC1
 観測孔2→EC2
 トレーサーの比重: 1.003
 上部に投入

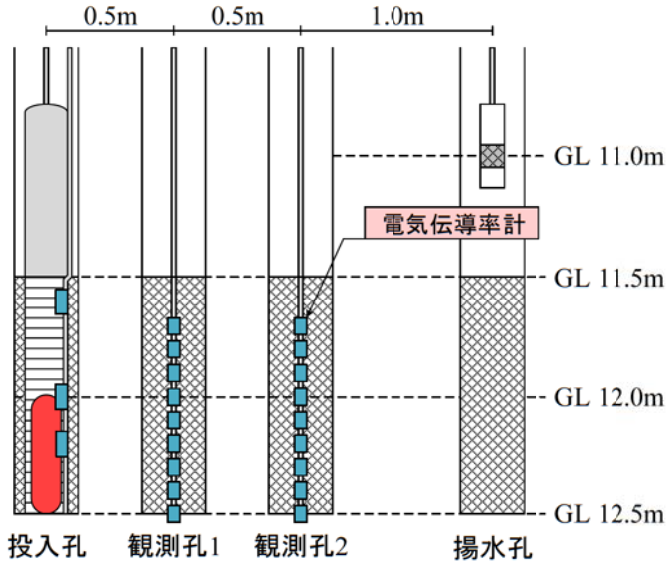


～水みちの検討～

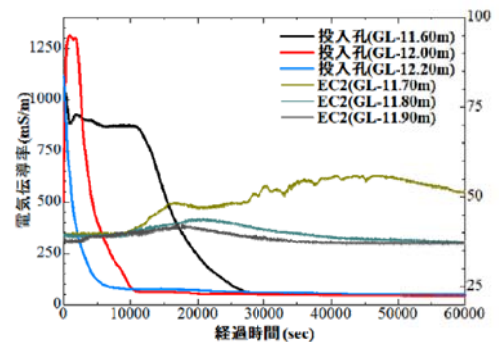
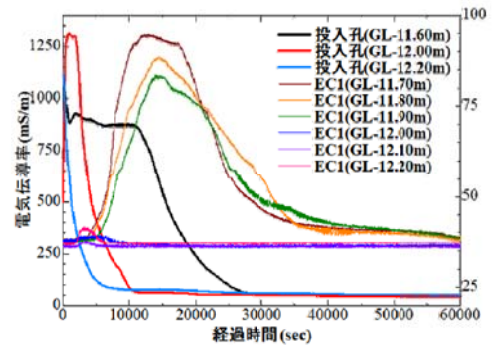
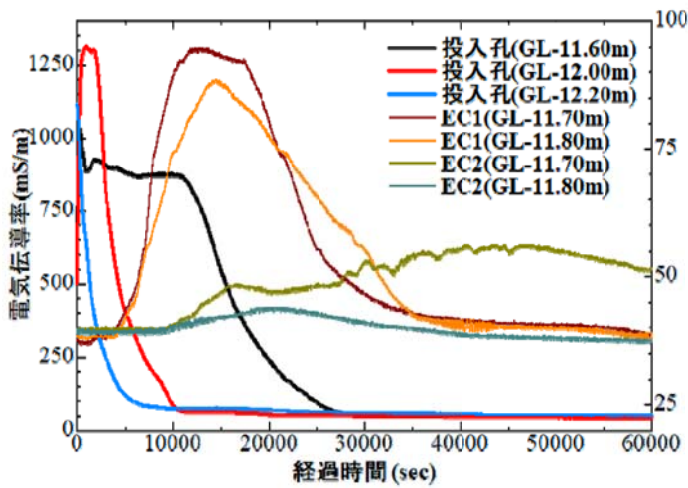
水みちの連続性評価



ストレーナーの半分を遮蔽しトレーサーをGL11.5~12.0m間に投入

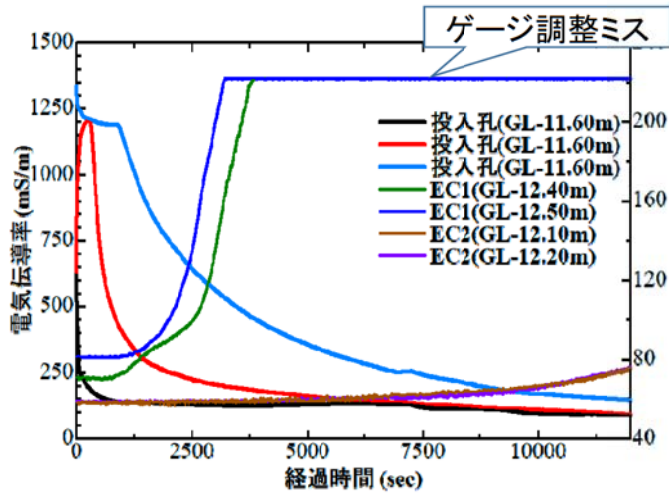


～2019年度の試験結果～

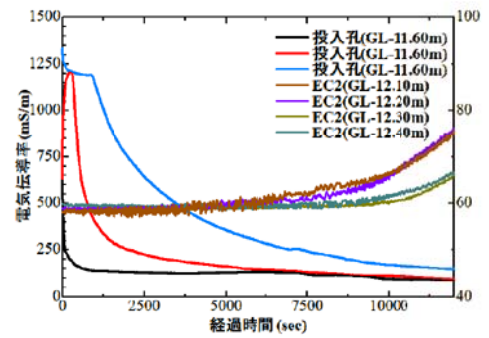
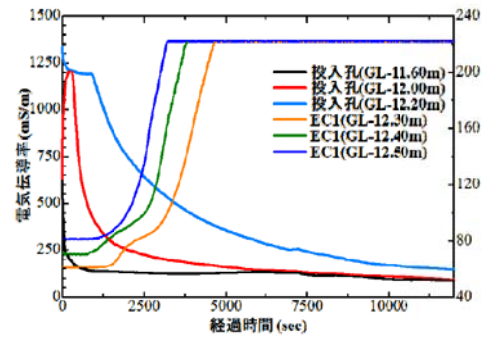


観測孔1→EC1
 観測孔2→EC2
 トレーサーの比重: 1.003
 下部に投入

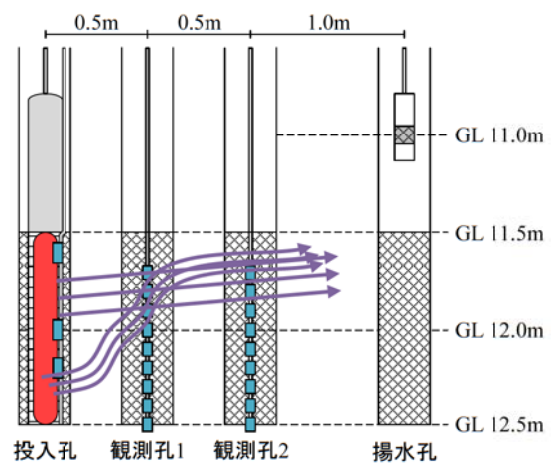
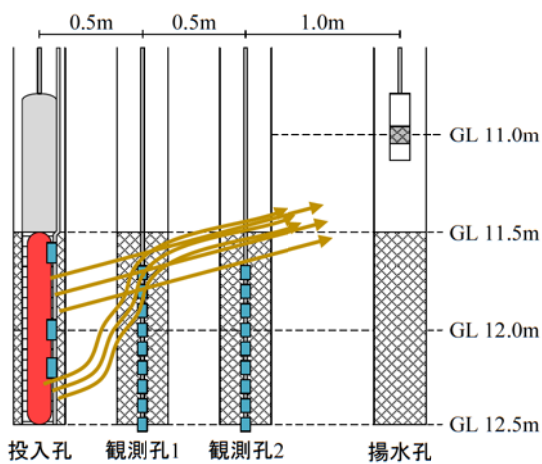
～2019年度の試験結果～



観測孔1→EC1
 観測孔2→EC2
 トレーサーの比重: 1.010
 下部に投入



～2019年度の水みちの推定～

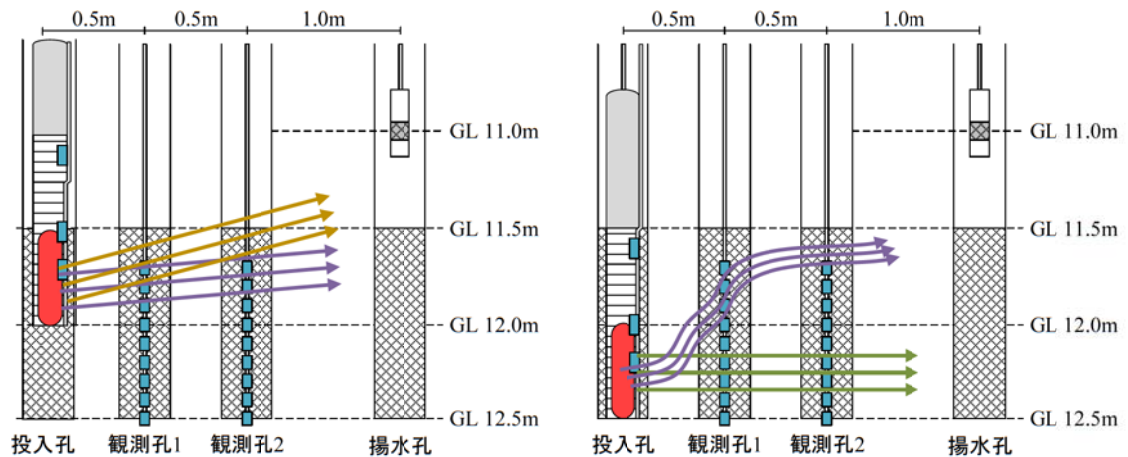


→ : 1.001

→ : 1.003

地下水の比重は1.001

～水みちの整理～



上部に投入



下部に投入



～現場トレーサー試験のまとめ～

水みちの連続性評価 ⇒ 投入の区間を限定してあげる
測定区間をある程度遮蔽した状態で測定 (パッカーなど)
確かなトレーサーの状況を把握可能
(濃度, 到達深度, 到達時間 など)

トレーサーの比重による影響 ⇒ 比重を変化させて測定

- 比重の違いによって通過してくる水みちが異なる可能性
- 孔内での上下流が発生している可能性



原因の解明を継続

FIN