

第31回バックエンド夏期セミナー

地上からの断層とその水理特性の 調査・評価に関する技術

2015年8月6日

原子力発電環境整備機構(NUMO)

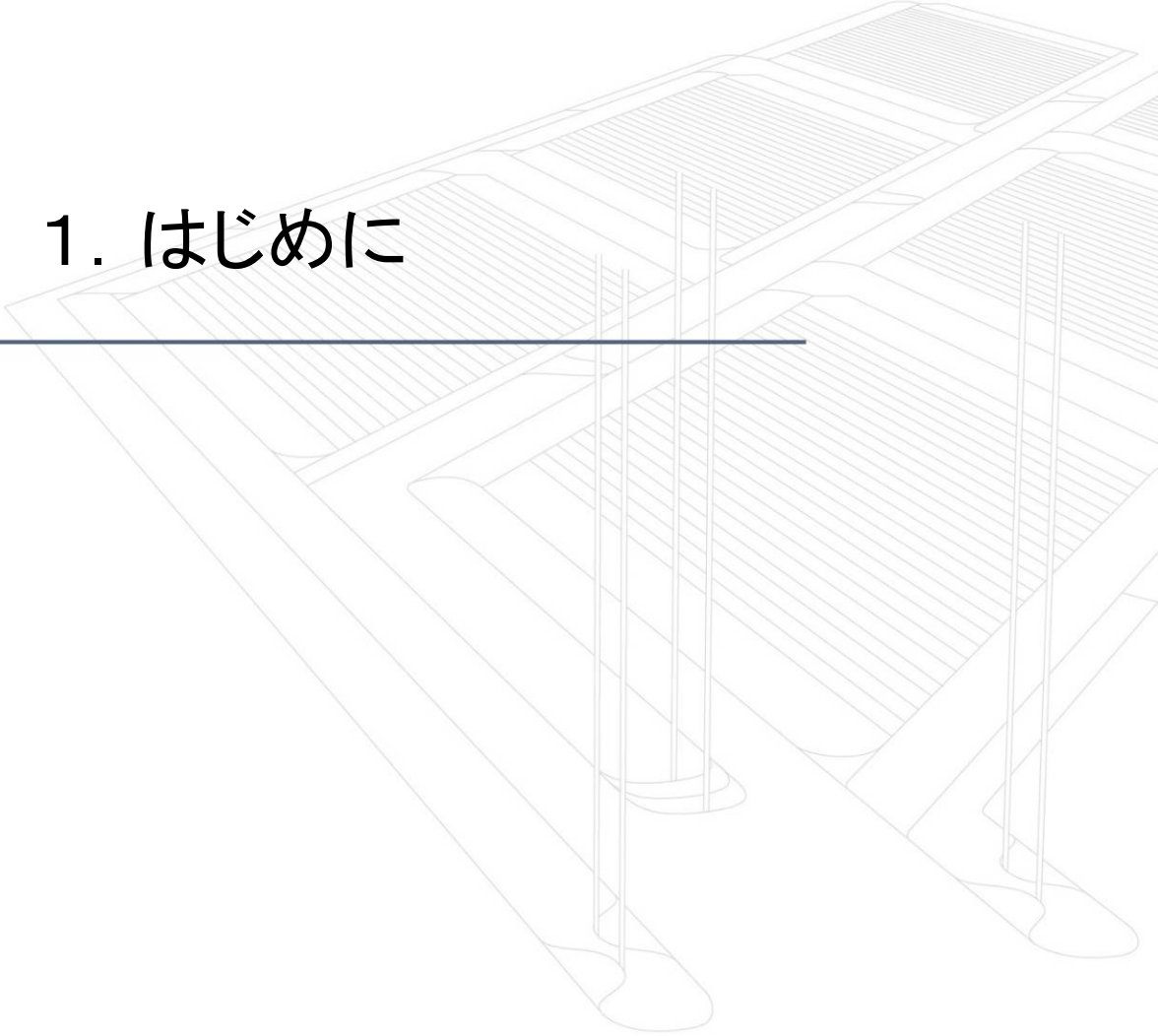
技術部 吉村 公孝



1. はじめに
2. 断層の水理特性に関する要件
3. 断層の水理特性に関する調査・評価技術の実証試験
4. 実証試験における地表調査のフェーズ
5. 実証試験におけるボーリング調査のフェーズ
6. 水理地質構造モデルの構築とその妥当性検討
7. まとめ

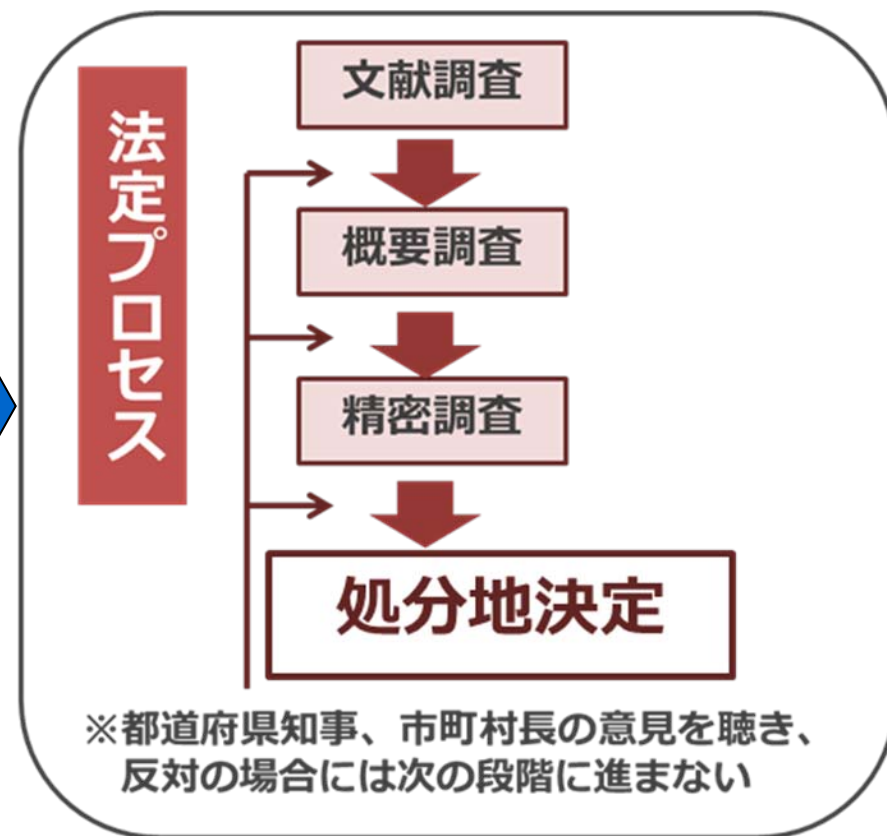
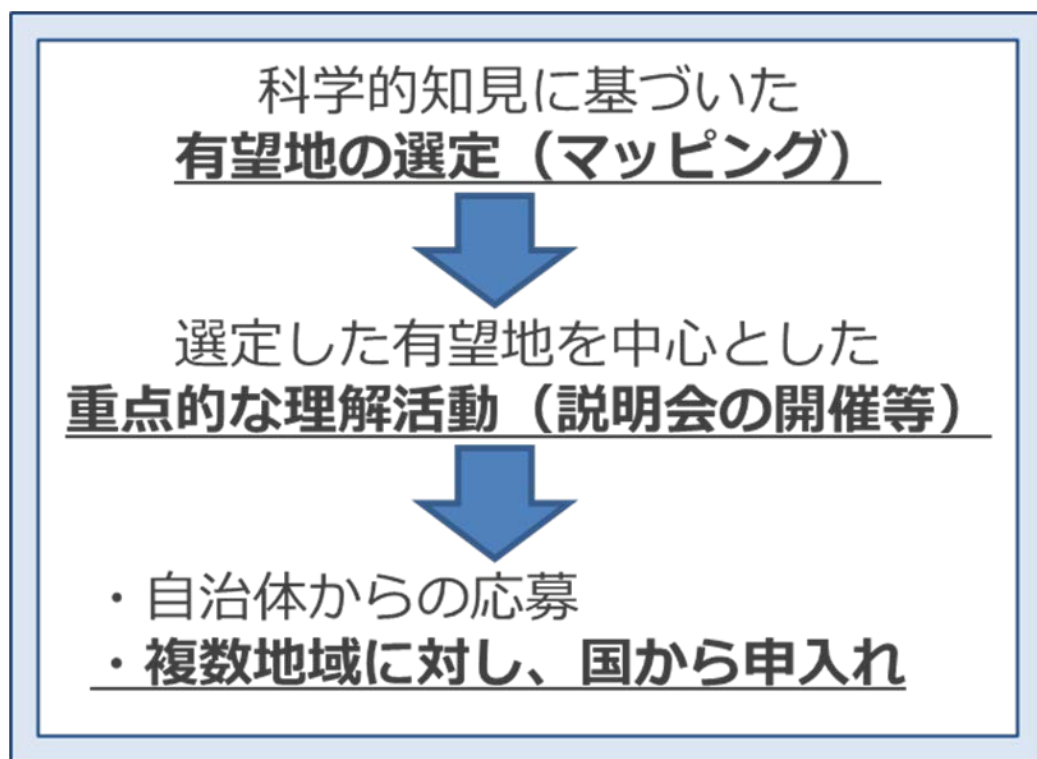


1. はじめに



最終処分施設建設地の選定手順

- 国による科学的有望地の選定を受けて、文献、概要、精密の段階的な調査を実施し、最終処分施設建設地を決定



地質環境に求められる安全機能

■ 隔離機能

- ・ 廃棄物を人間の生活環境から離れた地下深部に保持し、廃棄物の影響を十分小さくする機能

■ 閉じ込め機能

- ・ 放射性核種の浸出および移行を抑制する機能

安全機能	地質環境に求められる要件	
隔離	生活環境から十分離された安定な地下深部に廃棄物を埋設し侵食のような地形変化から防護すること	
	人間が特殊な技術を用いることなしに、廃棄物への偶発的な接近を困難にすること	
閉じ込め	熱環境 (T)	緩衝材が熱変質を受けないようにするため、地温が100℃を大きく超える期間が長期にわたり継続しない、すなわち「地温勾配が小さい」こと
	水理場 (H)	放射性核種の移行時間を増大させ移行率を低減させるため、動水勾配が小さいあるいは岩盤の透水性が低い、すなわち「地下水の流動が緩慢である」こと
	力学場 (M)	オーバーパックの破損を招かないようにするとともに、人工バリアシステムの設計・施工を容易にするため、「岩盤の変形が小さい」こと
	化学環境 (C)	ガラスの溶解、オーバーパックの腐食、緩衝材の変質、緩衝材および岩盤の収着能の低下、放射性核種の溶解度の上昇を抑制するため、地下水は「pHが著しく低くない/高くない」、「酸化性でない」、「炭酸化学種濃度が0.5mol/dm ³ 以下である」こと



自然現象の著しい影響の回避と地質環境の安全機能の確認

- 地質環境への著しい影響(火山・火成活動, 非火山性熱水・深部流体の流入, 断層活動, 隆起・侵食等)を回避
- 地質環境に対して, 気候変動に伴う海水準変動などの緩慢な変化・変動のもとで, 長期的に地質環境特性が安定的に維持されることを確認
- それらを調査・評価して, 地質環境に求められる安全機能を有することを確認

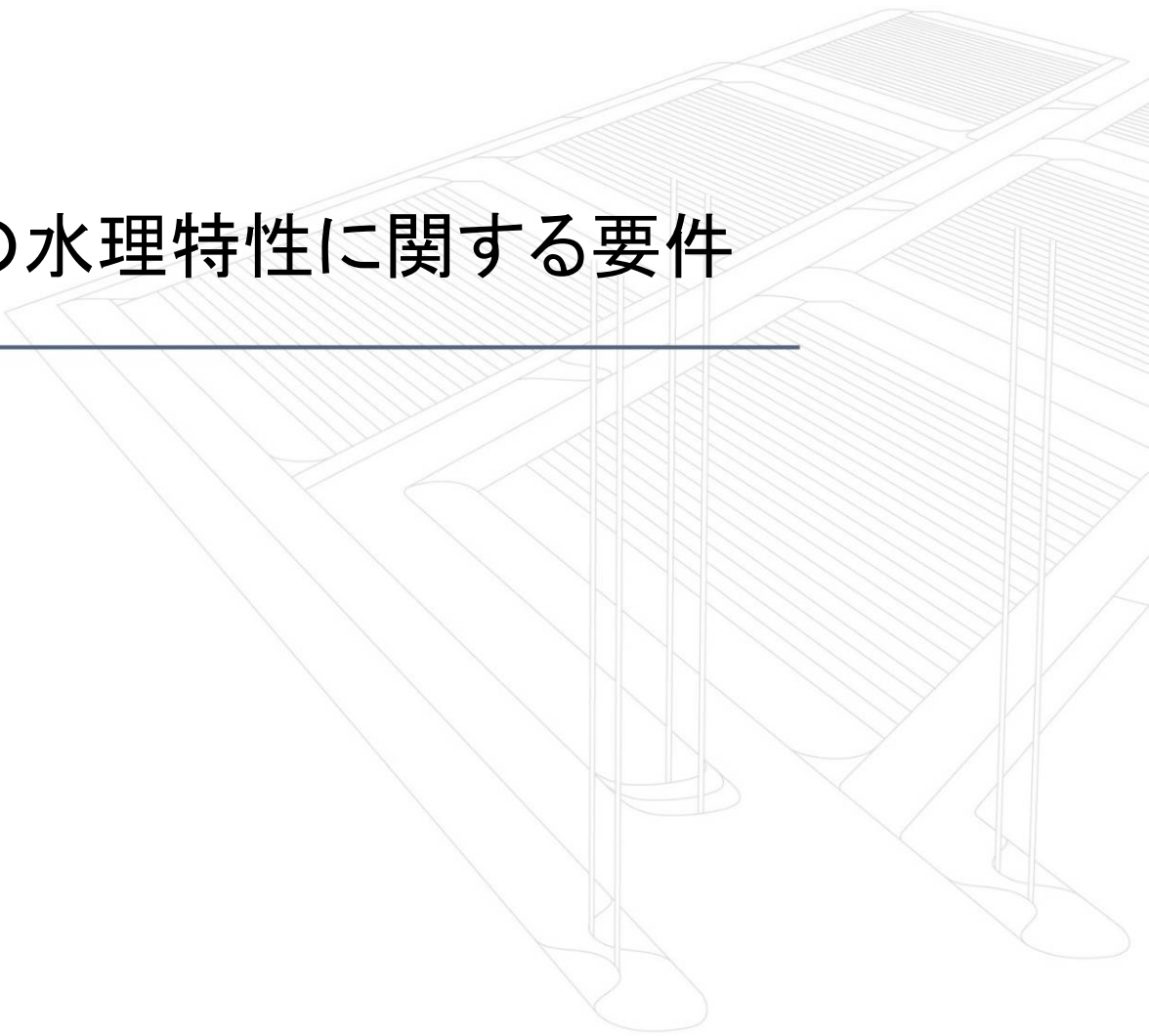
回避する自然現象の著しい影響

自然現象	著しい影響
火山・火成活動	マグマの貫入に伴う処分施設の破壊, 地表への噴出
	火山性の熱・熱水・ガスの流入に伴う熱環境, 化学環境の変化
非火山性熱水・深部流体の流入	非火山性熱水・深部流体の流入に伴う熱環境, 化学環境の変化
断層活動	活断層など※の活動に伴う処分施設の破壊, 透水性の増加 ※数10万年前から繰り返し活動し変位規模の大きな断層, 顕著な活動を継続している活褶曲・活撓曲など
隆起・侵食	著しい侵食に伴う処分施設の地表付近への接近

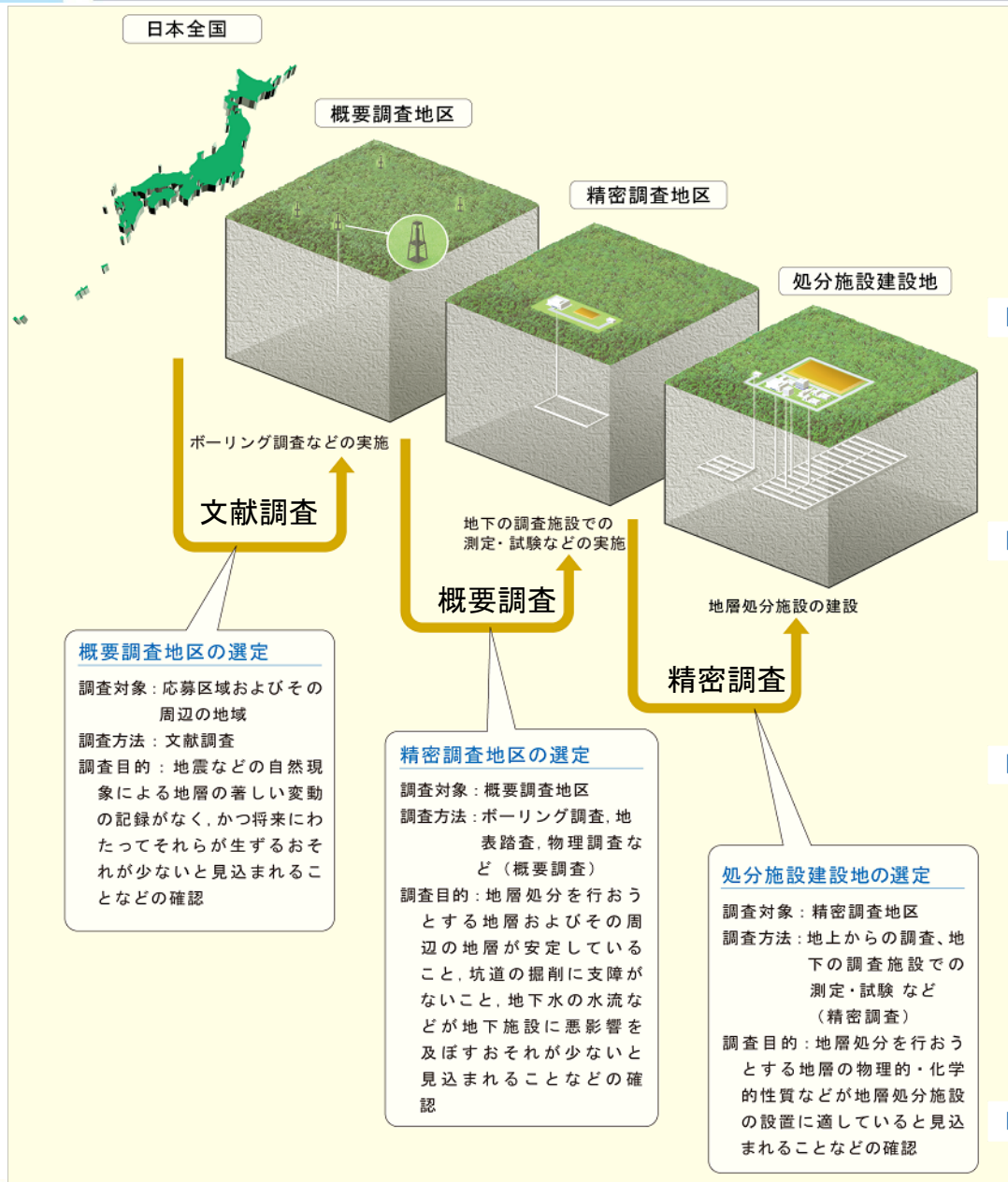
総合資源エネルギー調査会(2014)を編集



2. 断層の水理特性に関する要件



概要調査と精密調査地区選定における法定要件



特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律 第7条第2項

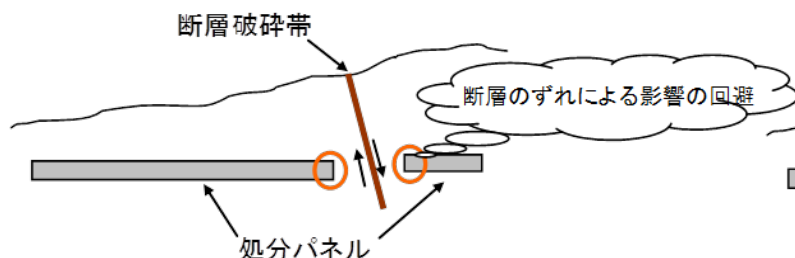
- 地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと
- 地層処分を行おうとする地層が、坑道の掘削に支障のないものであること
- 地層処分を行おうとする地層に活断層、破碎帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること
- その他経済産業省令で定める事項

法定要件に関する事項

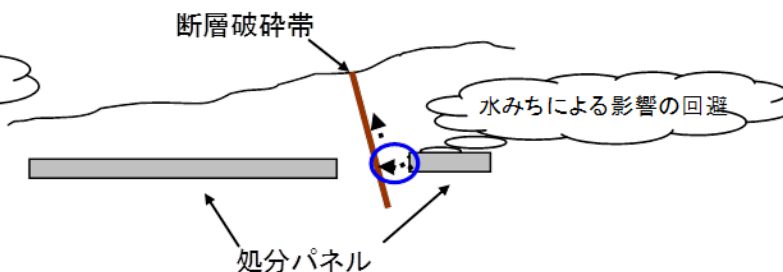
精密調査地区選定に関する法定要件に対する適格性を評価する事項

- 自然現象による地層の著しい変動から隔離機能を確保する上で必要な事項
- 事業期間中の安全性を確保するために、坑道掘削について満たすべき事項
- 活断層、破碎帯又は地下水の水流が地下施設に及ぼす影響を鑑みて満たすべき事項

断層活動による処分場の影響を評価・回避



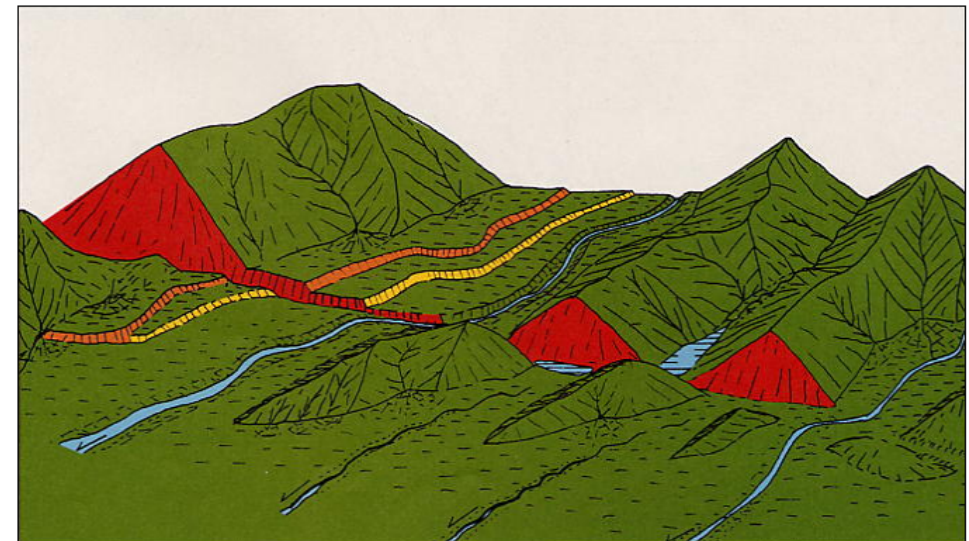
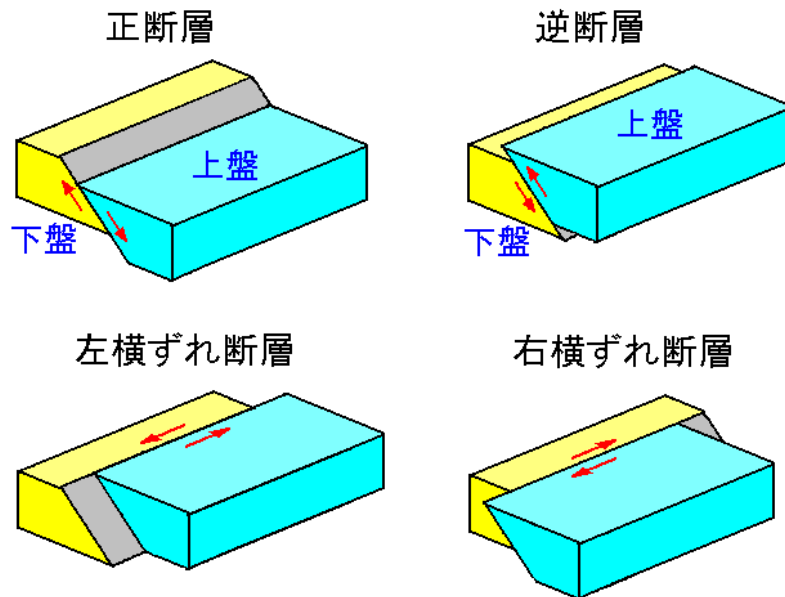
断層が水みちとして核種移行の経路となる影響を評価・回避



法定要件に照らして、断層の将来的な「ずれ」、「水みち」に対する安全評価に資する情報を調査から収集・検討

断層とは

- 地下の地層もしくは岩盤に力が加わって割れ、割れた面に沿ってずれ動いて食い違いが生じた状態のことをいう
- 変形が地上に現れると、地面に段差やしわを生じる
- 堆積物に覆われて、地表に痕跡が残っていないもの(伏在断層)も存在する



活断層のずれによってできた地形

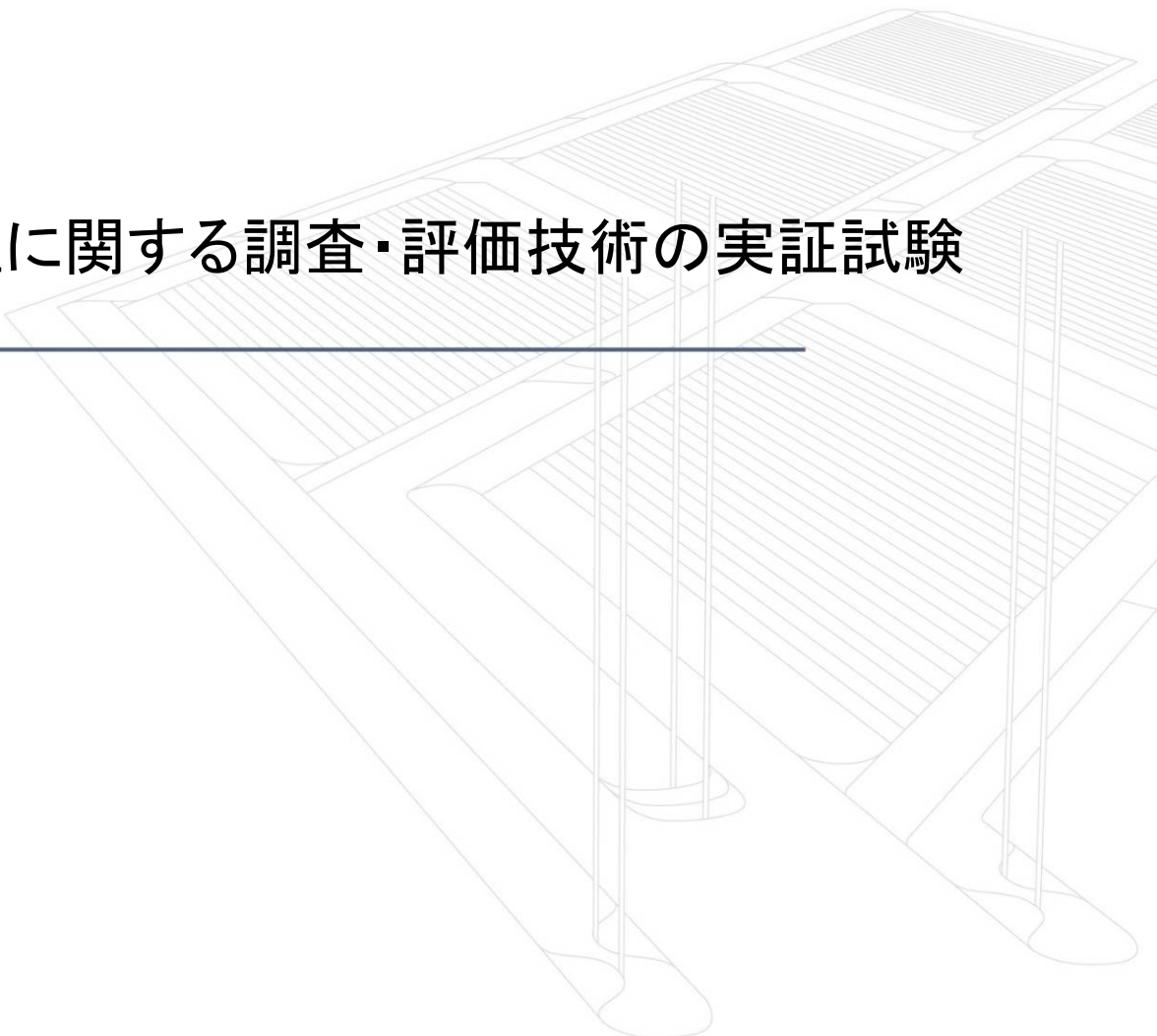
「新編日本の活断層」(活断層研究会編, 1991年)より

(独)防災科学技術研究所HP 「地震の基礎知識とその観測」より引用

- 間欠的な断層活動でずれが生じた結果、地上に特徴的な変位・変形を生じる
- これらの変位・変形を手がかりにして、断層の位置、形状、性状、活動度などを地上からの調査によって推定・評価する



3. 断層の水理特性に関する調査・評価技術の実証試験

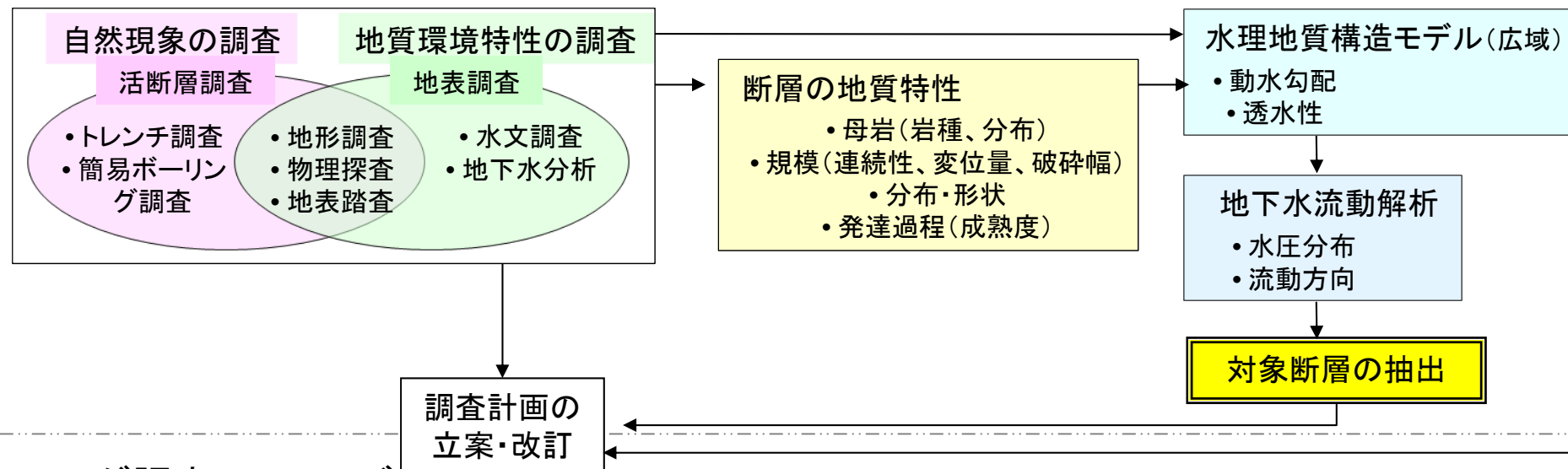


実証試験の実施方針

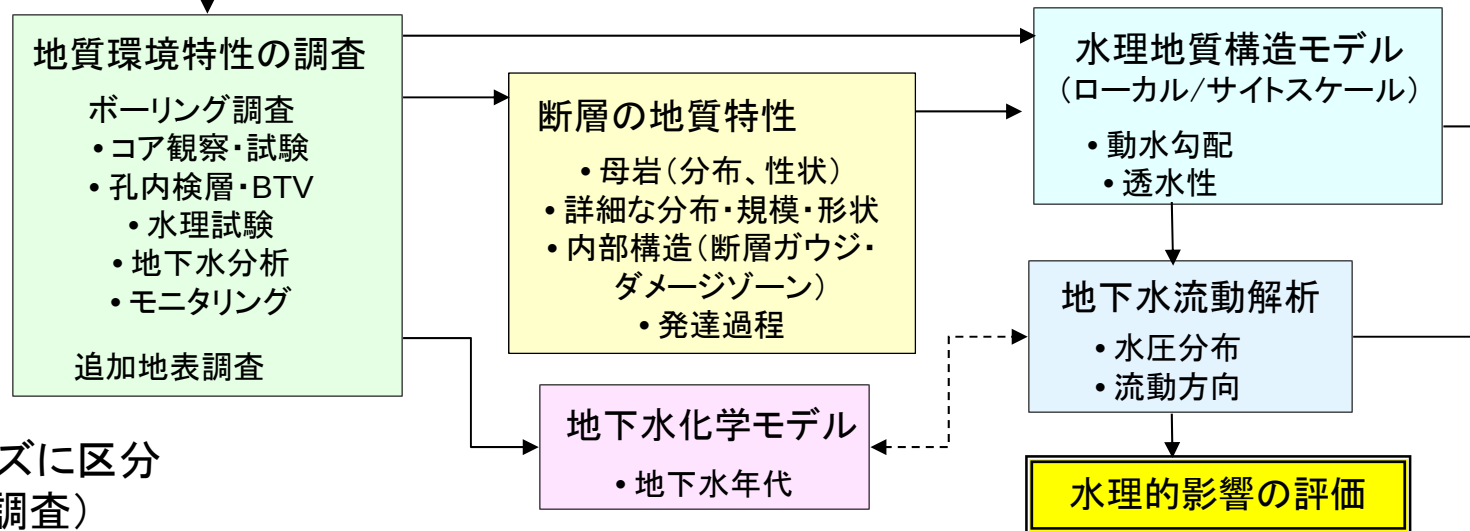
- わが国の地質環境に類似したモデル地域で、断層の水理特性について既存技術による実証試験を行い、技術の適用性について評価する
- 概要調査における断層水理特性の調査・評価の流れを構築し、その流れに沿って実証試験を進め、調査手法の有効性を段階的に確認する
- 必要に応じて、実証試験で得られた新しい知見を反映して、調査・評価の流れを適宜見直す
- 実証試験で得られたノウハウや新しい知見は、概要調査計画策定や、実際の概要調査に反映する

概要調査における断層水理特性の調査・評価の流れ

地表調査のフェーズ



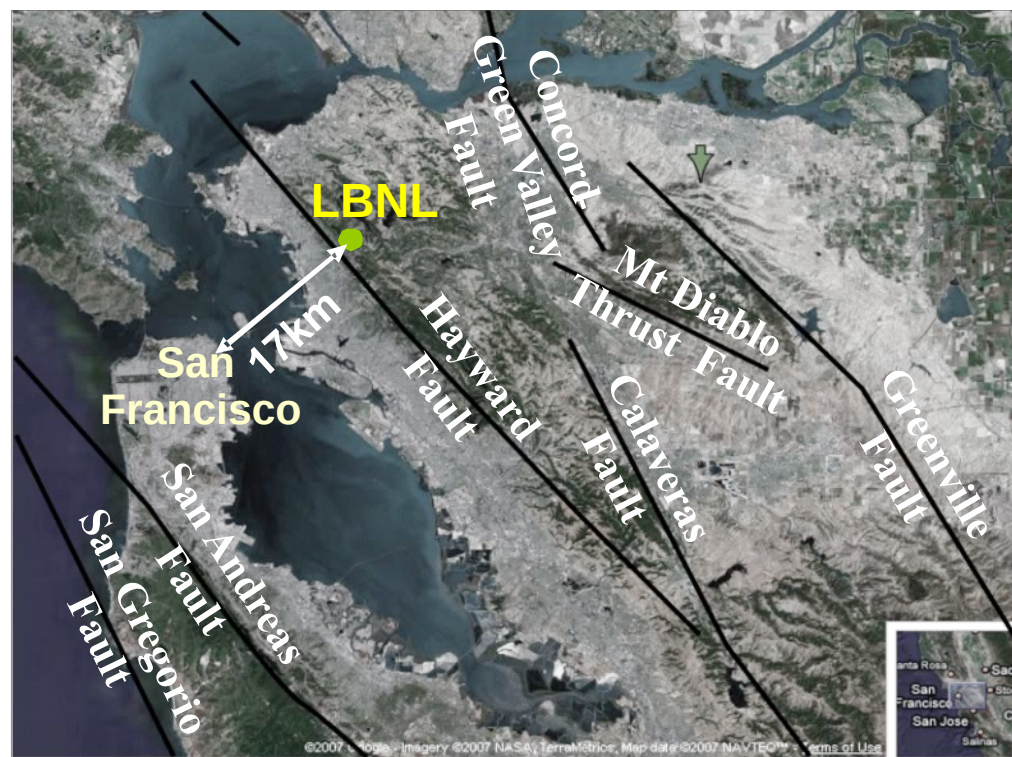
ボーリング調査のフェーズ



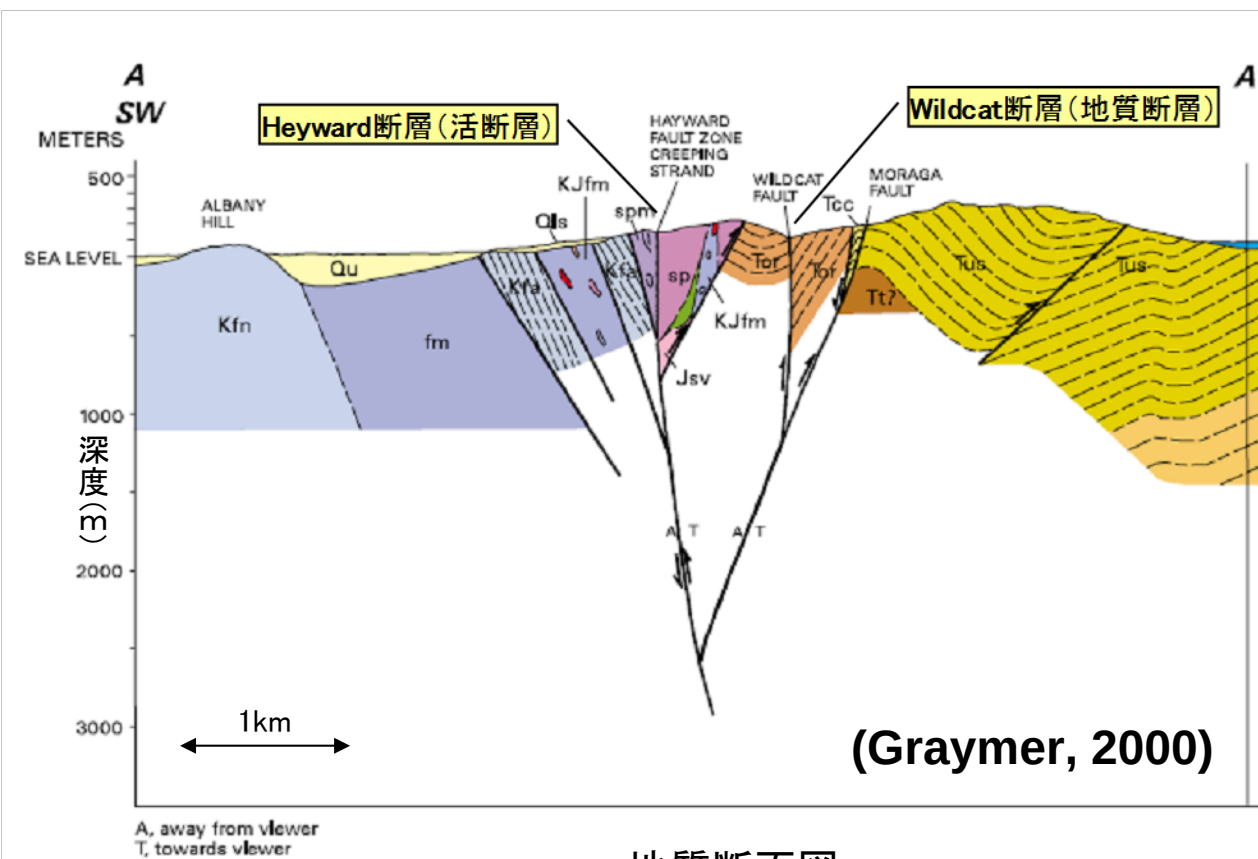
概要調査を2つのフェーズに区分
(地表調査、ボーリング調査)

実証試験の実施場所

- 新生代の付加体堆積岩や断層が分布するアメリカ合衆国西海岸を実証試験の場所として選定
- 2007年度から、NUMO-LBNLの共同研究として、カリフォルニア州バークレー市のLBNL敷地内の断層を対象にした実証試験を開始
- 既存の文献ならびに既往調査の情報を検討し、実証試験の対象となる断層(Wildcat断層)と実施場所を選定した



調査地域の地質断面図、地質分布図



Wildcat断層は、ほぼ垂直に分布する横ずれ断層で、かつてはHeyward断層の分岐断層として左横ずれの運動をしていたが、第四紀には活動していないと考えられている



505

San Pablo
Richmond
El Cerrito
Albany
Berkeley
Emeryville
Oakland
San Francisco Bay
San Francisco
San Leandro
Hayward
Union City
Fremont
Newark

Hayward Fault

サンフランシスコ

10km

実証試験
実施場所

判読範囲

調査対象エリア
の選定

(Northern Part)

Hayward Fault

LENL

Wildcat Fault

(Southern Part)

1 km

Legend

- Rank A
- Rank B
- Rank C
- Non-active

①反射実体鏡

③ステレオミラービューワー

人間の両目は6cmほどあり、二つの視覚的により離れたものを同時に見ることで立体感を得る

① 反射実体鏡

② 簡易実体鏡

③ ステレオミラービューワー

④ アナグリフ用メガネ



断層の位置 を判読

■ 地質分布(下位から)

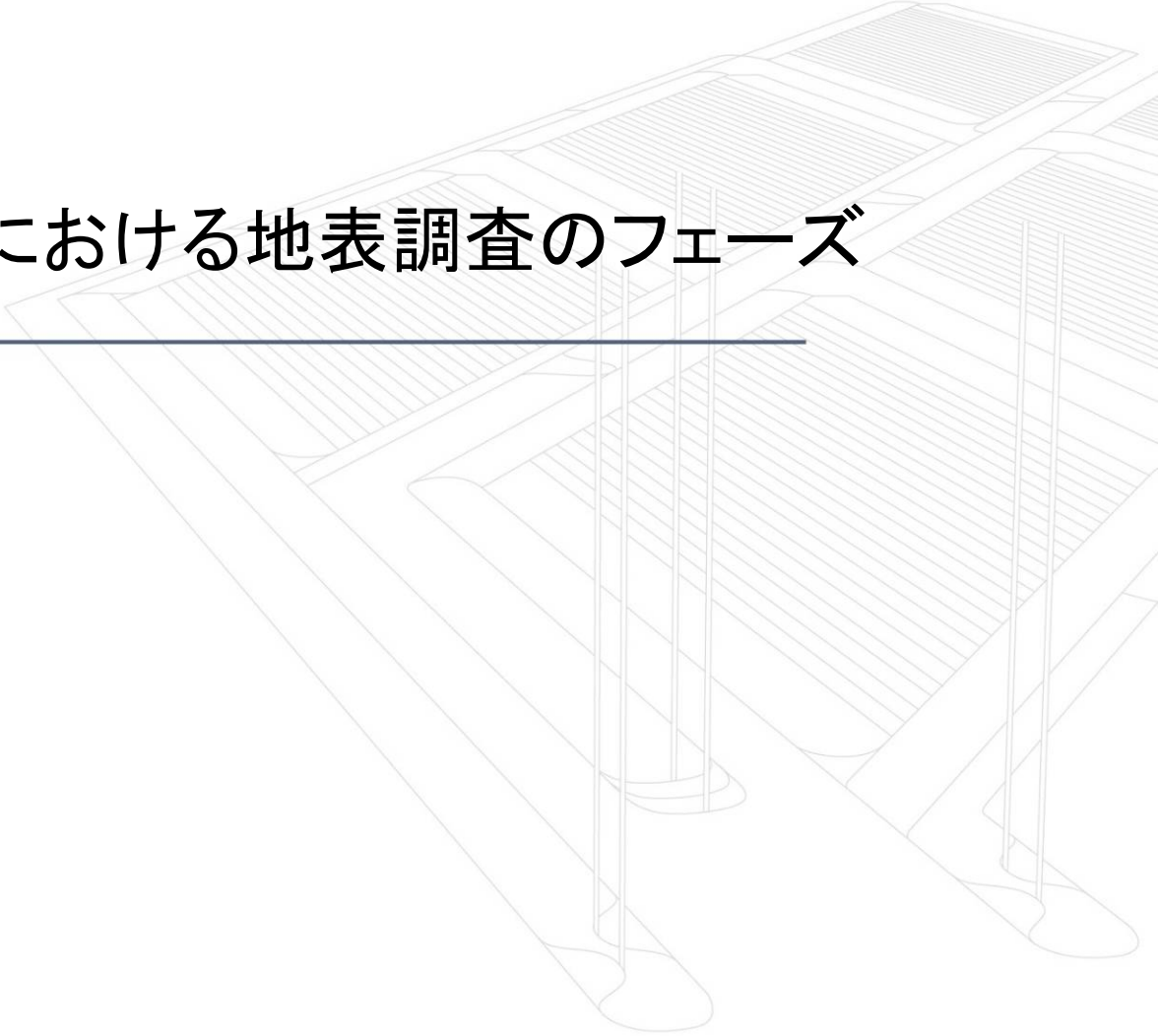
- ジュラ紀～白亜紀の複合岩体(堆積岩、変成岩)
- 白亜紀の砂岩、泥岩
- 新第三紀のチャート・頁岩、新第三紀の砂岩・泥岩
- 新第三紀の安山岩、玄武岩
- 第四紀層、地すべり堆積物

■ Wildcat断層

- 全長20～25km
- 走向:北西～南東
- 鉛直～南西に急傾斜
- 右横ずれ断層(水平変位約7km)
- LBNL付近で、断層分布が直線的な北区間と不明瞭な南区間に区分
- LBNL付近では活動性を示す証拠がない
- 水理特性に関する情報はない



4. 実証試験における地表調査のフェーズ



■ 適用した調査技術

- 地表踏査

 - 地質観察、サンプル採取

- 物理探査(1): 反射法地震探査

 - 3測線(285m、285m、252m)、受振点間隔3m、重錘(200lb)

- 物理探査(2): 電気探査

 - 5測線(336m、336m、252m、350m、480m)、電極間隔4.5m、6m

- トレンチ

 - 5カ所(地質観察、サンプル採取)

地表踏査による地質分布確認



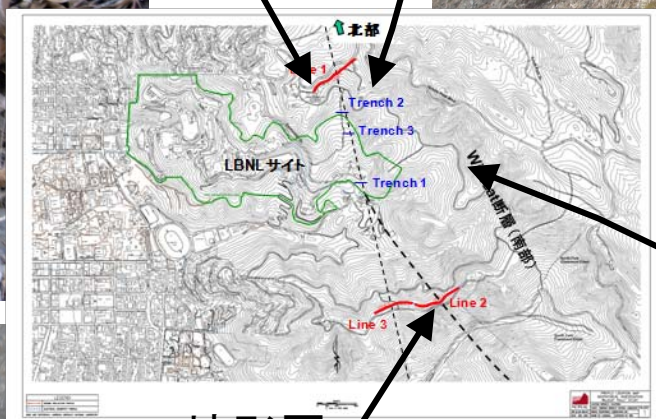
新第三紀安山岩



チャート・頁岩層



チャート・頁岩層中
の小断層

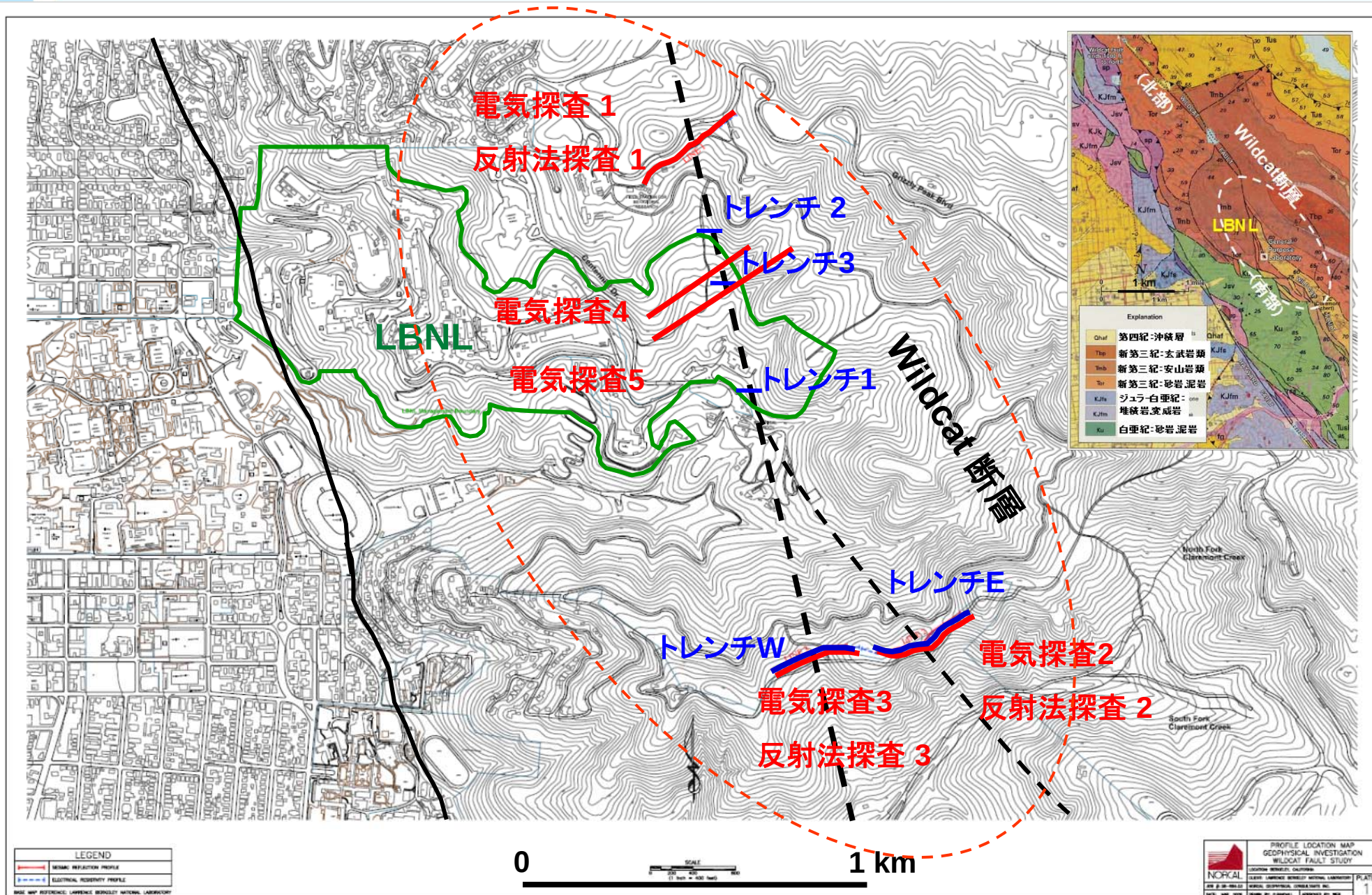


地形図



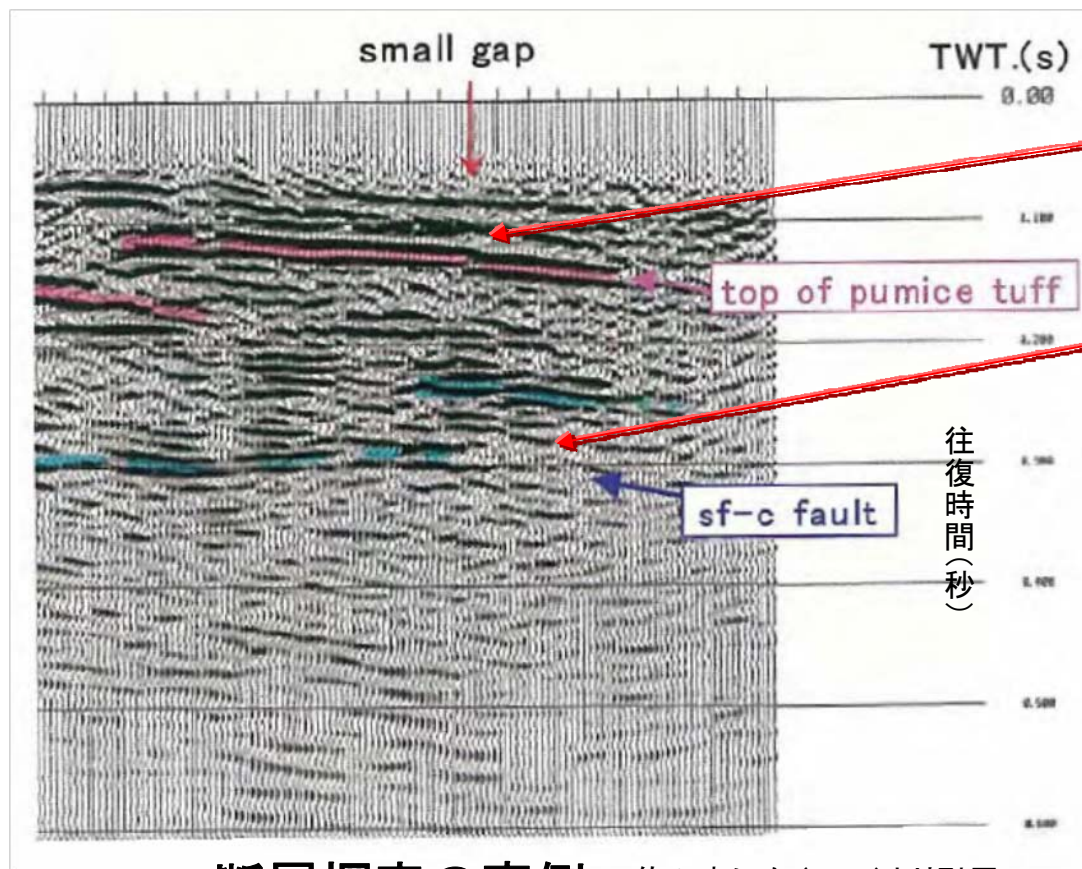
シルト岩・砂岩層

物理探査、トレンチ調査の位置



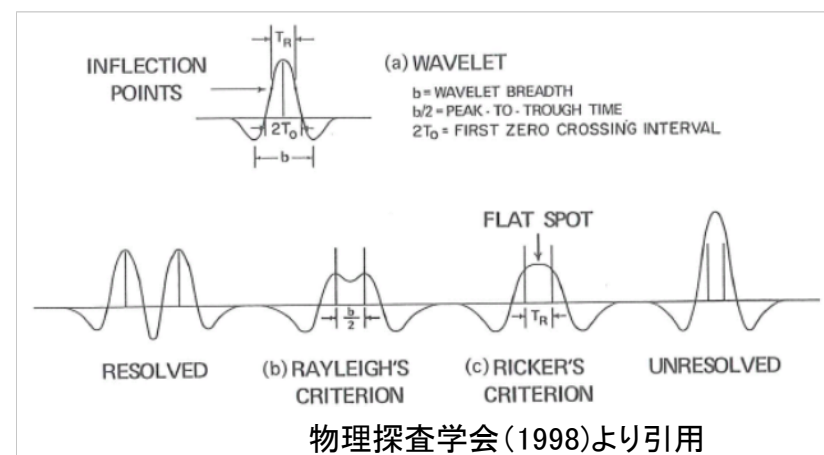
物理探査による断層調査：反射法地震探査の適用限界

反射法地震探査によって地下の変形が確認できるが、技術的に限界が存在する



反射波のずれから確認された
小断層(落差5mと推定)

比較的規模の大きい断層
(落差数10mと推定)



断層探査の事例 佐々木ほか(2009)より引用

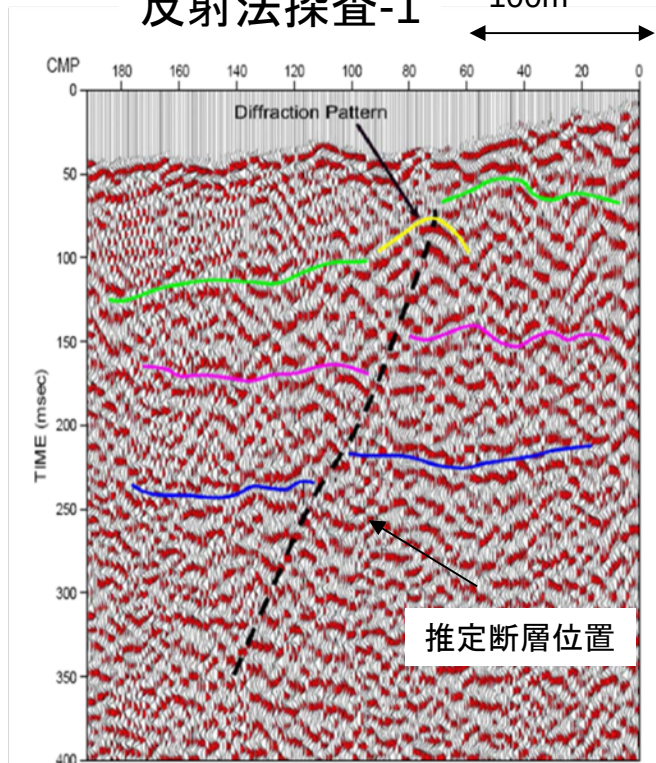
反射波が重なり合う間隔が短いと波形を分解できなくなる

検出限界(反射波の分解能＝波長の1/4)以下の変位・変形は反射法地震探査による調査では確認できない。そのため、調査手法を組み合わせる総合的な調査を実施して、断層の性状を把握することが求められる

物理探査(反射法、電気探査)の結果

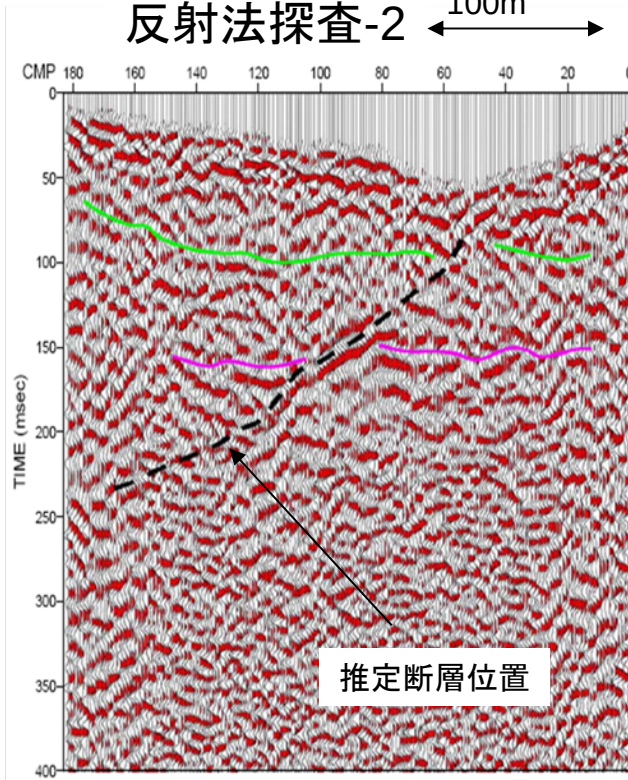
反射法探査-1

100m



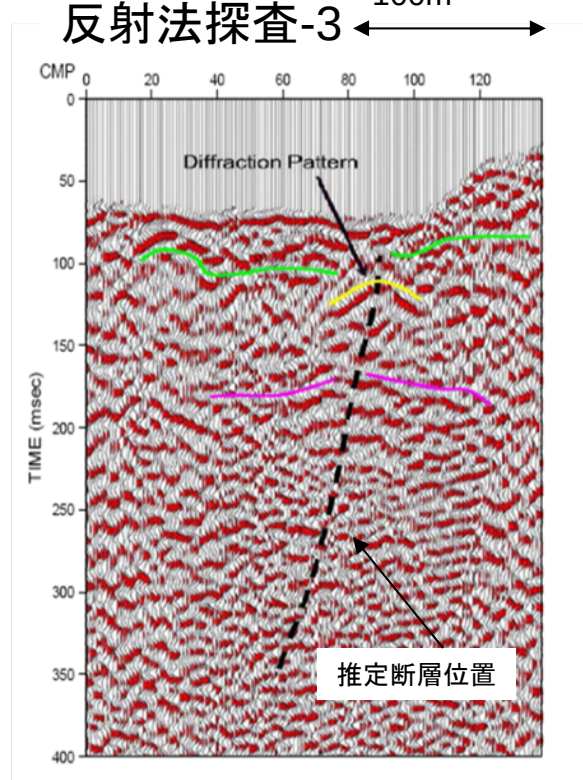
反射法探査-2

100m



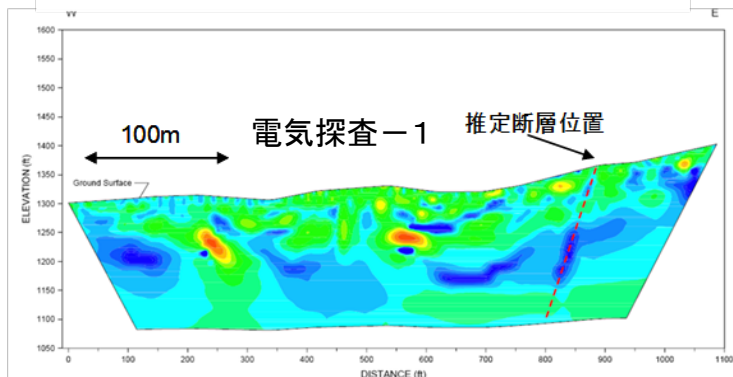
反射法探査-3

100m



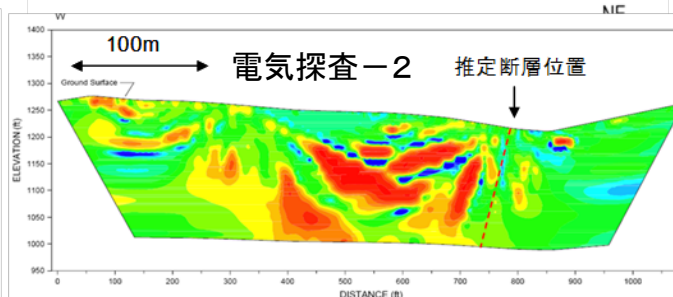
電気探査-1

100m



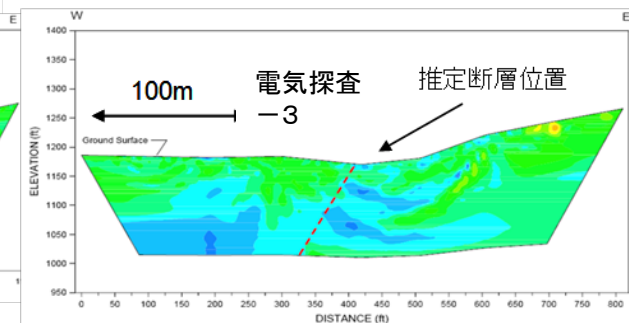
電気探査-2

100m



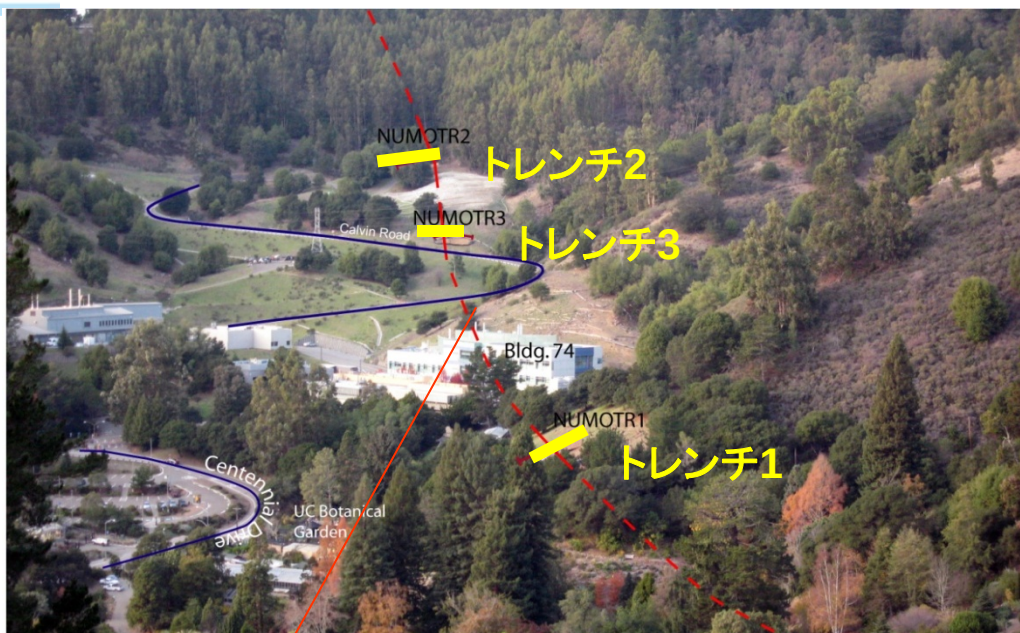
電気探査-3

100m



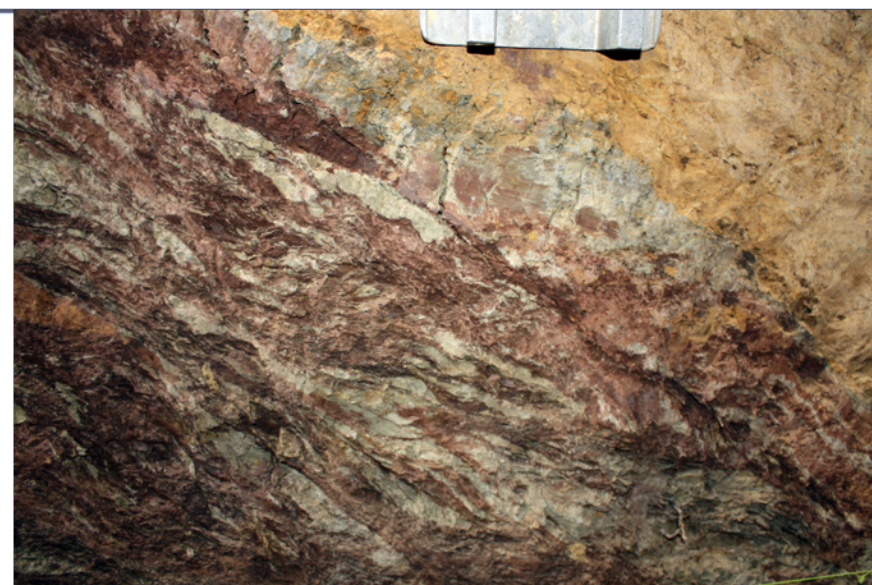
比抵抗値: 暖色系(赤)が高比抵抗値を示し、寒色系(青)が低比抵抗を示す

トレンチ調査結果(トレンチ2)



推定断層位置

このトレンチで、低角度の断層(2本)を確認

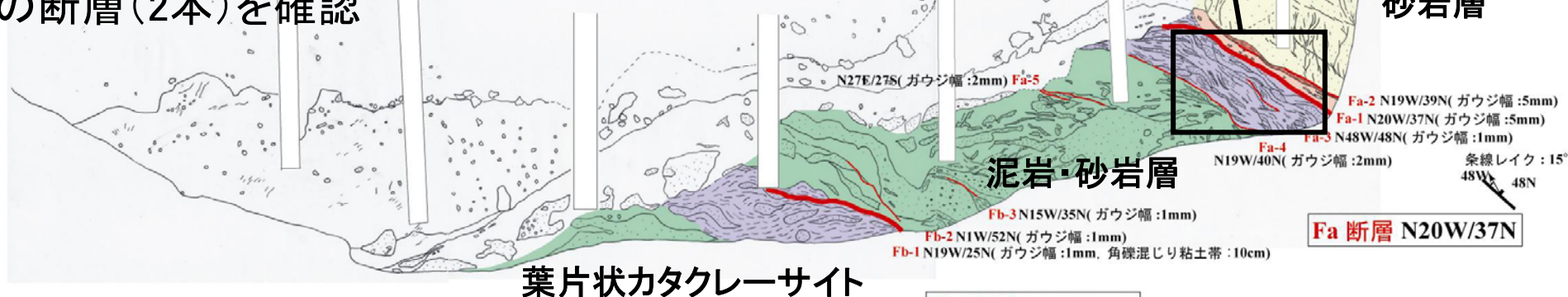
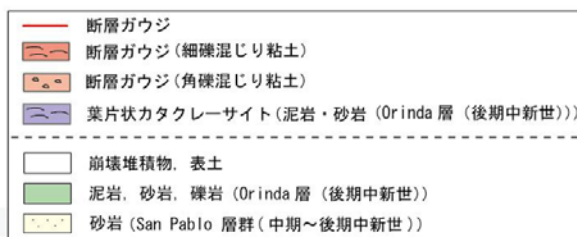


20cm

葉片状構造

主断層面

砂岩



トレンチ調査結果(トレンチ3:壁面写真)

このトレンチで、ほぼ鉛直の断層を確認



地表調査のフェーズで判ったこと

■ 地質構造、断層の位置

- 地表踏査で、新第三紀のチャート・頁岩層、シルト・砂岩層、安山岩層の分布を確認
- 断層の兆候を確認したが、Wildcat断層と判定できていない
- 物理探査により、断層の位置を推定
- トレンチ調査で低角度の断層(2本)とほぼ鉛直の断層(1本)を確認

■ 断層の性状

- 断層面の観察、構造解析から右横ずれ変位の構造を確認
- 角れき※¹混じりの粘土帯が分布するが幅の変化が大きい
- 断層ガウジ※²、カタクレーサイト※³様の分布を確認
- 角れきの分布、断層ガウジなどの分布により透水性は複雑

※1 角れき:断層運動で粉々になった岩片

※2 断層ガウジ:断層運動で粉々になった粘土状の地層

※3 カタクレーサイト:地下深部で岩石が壊れた後固まったもの



5. 実証試験におけるボーリング調査のフェーズ



ボーリング調査のフェーズ

■ ボーリング掘削(5本)

- WF-1 鉛直オールコアボーリング 161m
- WF-2 鉛直オールコアボーリング 154m
- WF-3 鉛直オールコアボーリング 156m
- WF-4 傾斜(30°)オールコアボーリング 221m
- WF-5 傾斜(30°)オールコアボーリング 207m
- 地質観察、鉱物分析、年代測定、溶存イオン、同位体
地下水年代(^3H 、 ^{14}C 、 ^4He)

■ 孔内検層

- 口径、ボアホールTV、自然電位、自然放射線、比抵抗、音波速度、電気伝導度、孔曲がり

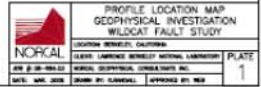
■ 水理試験

- パルス、スラグ、揚水、回復

■ 間隙水圧計測

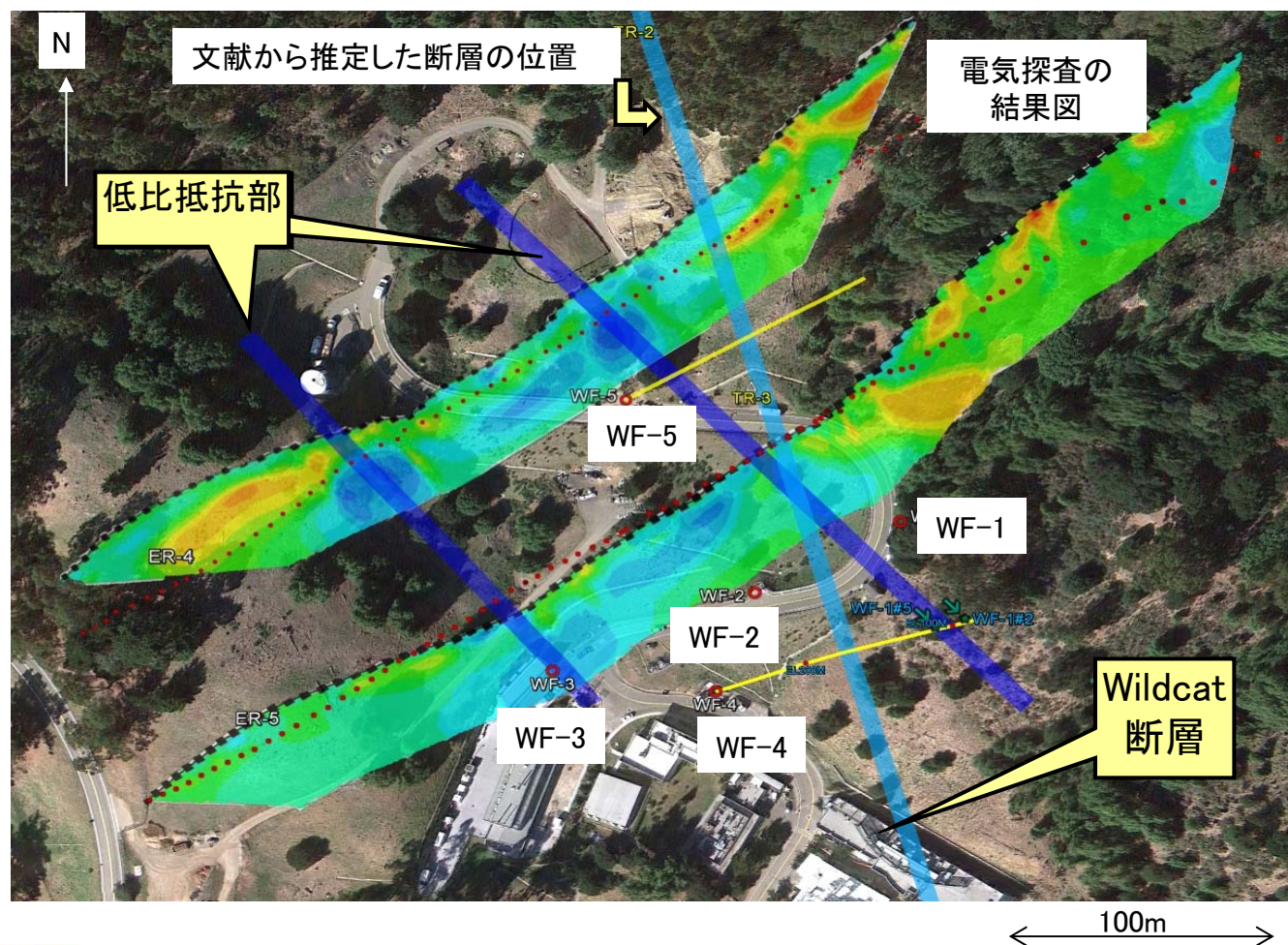


500



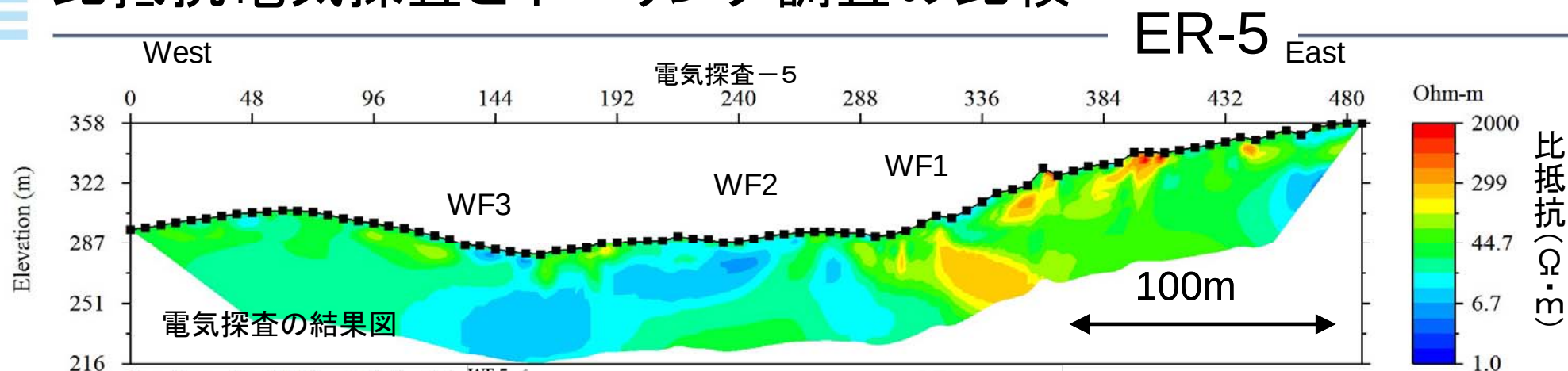
比抵抗電気探査とボーリング調査地点

空中写真判読、地表踏査、物理探査、トレンチ調査の結果から、Wildcat断層の位置を推定し、断層を挟むようにボーリング調査を実施。引き続き斜めボーリングで断層を確認した。ボーリング調査後は、孔内で水圧測定、地下水採取を行った。

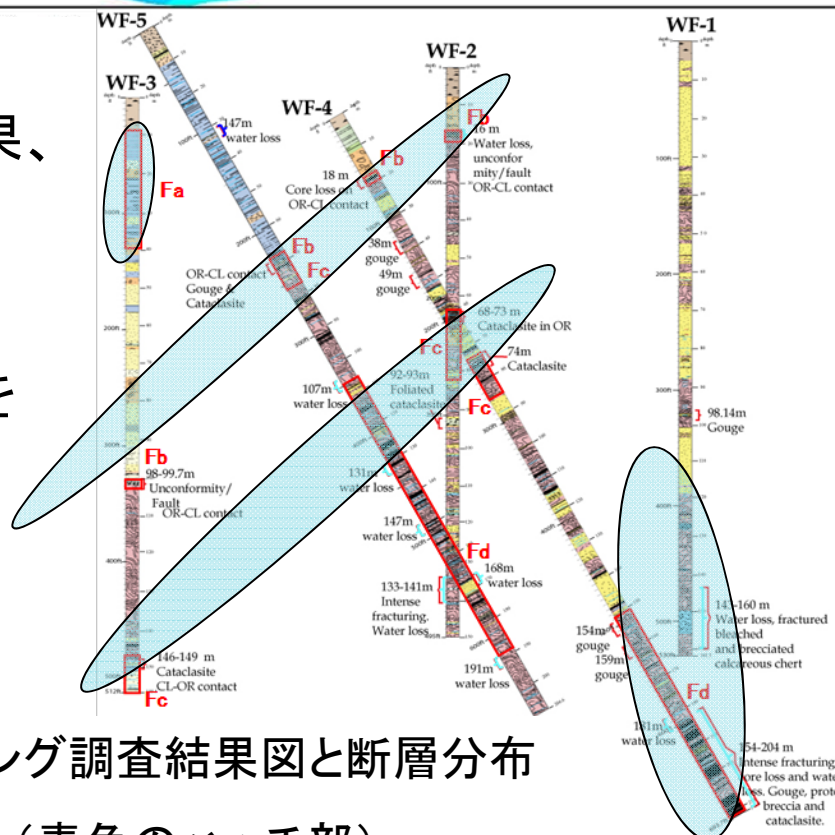


- WF-1～3は鉛直孔
- WF-4、5は傾斜30°の斜め孔

比抵抗電気探査とボーリング調査の比較



ボーリング調査の結果、断層部分の亀裂の傾斜、地層の類似性と、トレンチで確認された断層性状から、断層を4個の部分(Fa~Fd)に区分した



ボーリング調査結果図と断層分布

(青色のハッチ部)

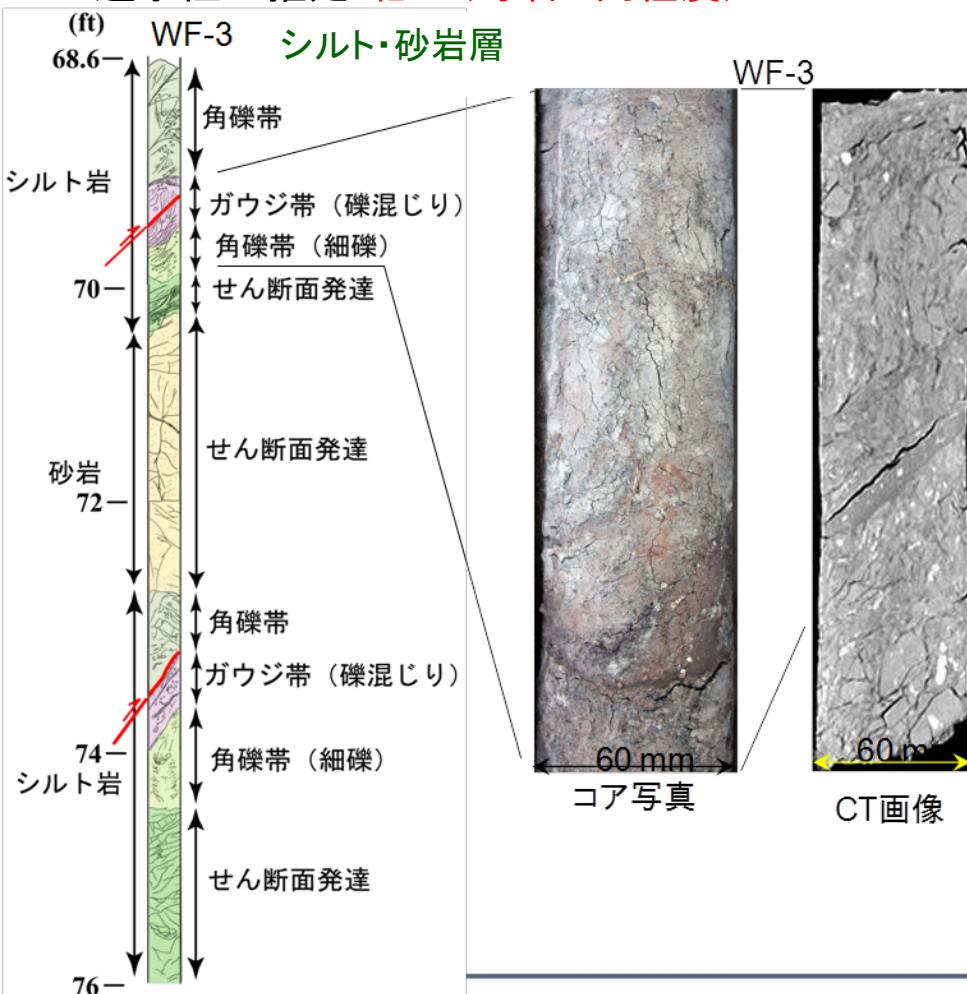
WF-1~WF-3を結ぶ直線上に近接する電気探査の結果と、ボーリング調査で確認された断層を比較

その結果、低比抵抗を示す部分と、断層(Fa~Fd)が調和的に整合する様子が認められる

断層の性状 (Fa断層、Fb断層)

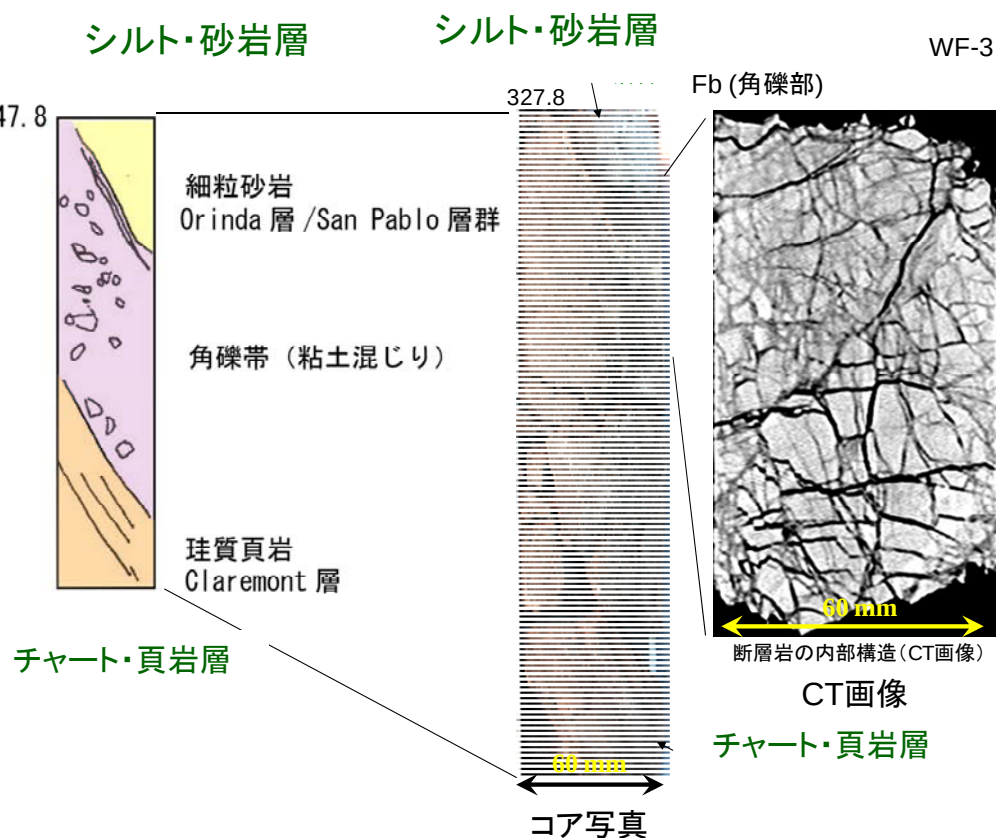
Fa断層

- 母岩: シルト・砂岩層
- 規模・形状: 幅15m以上、急傾斜
- 内部構造: ガウジ少ない、全体的な延性変形組織、**割れ目少ない**
- 透水性の推定: **低い(母岩と同程度)**



Fb断層

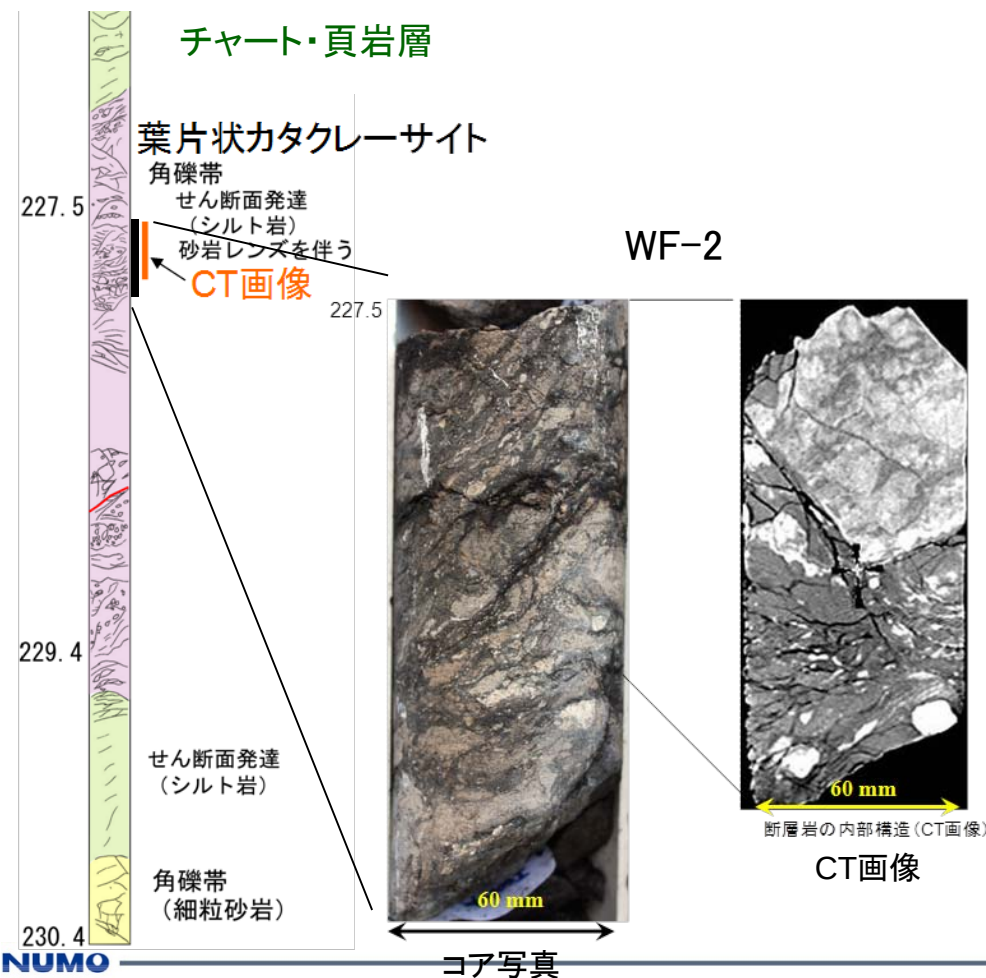
- 母岩: チャート・頁岩層とシルト・砂岩層の**境界部**
- 規模・形状: 幅**約5m**、浅部で緩傾斜/深部で中程度傾斜
- 内部構造: 粘土含む角れき化が主、微細な割れ目発達
- 透水性の推定: 比較的高い



断層の性状(Fc断層、Fd断層)

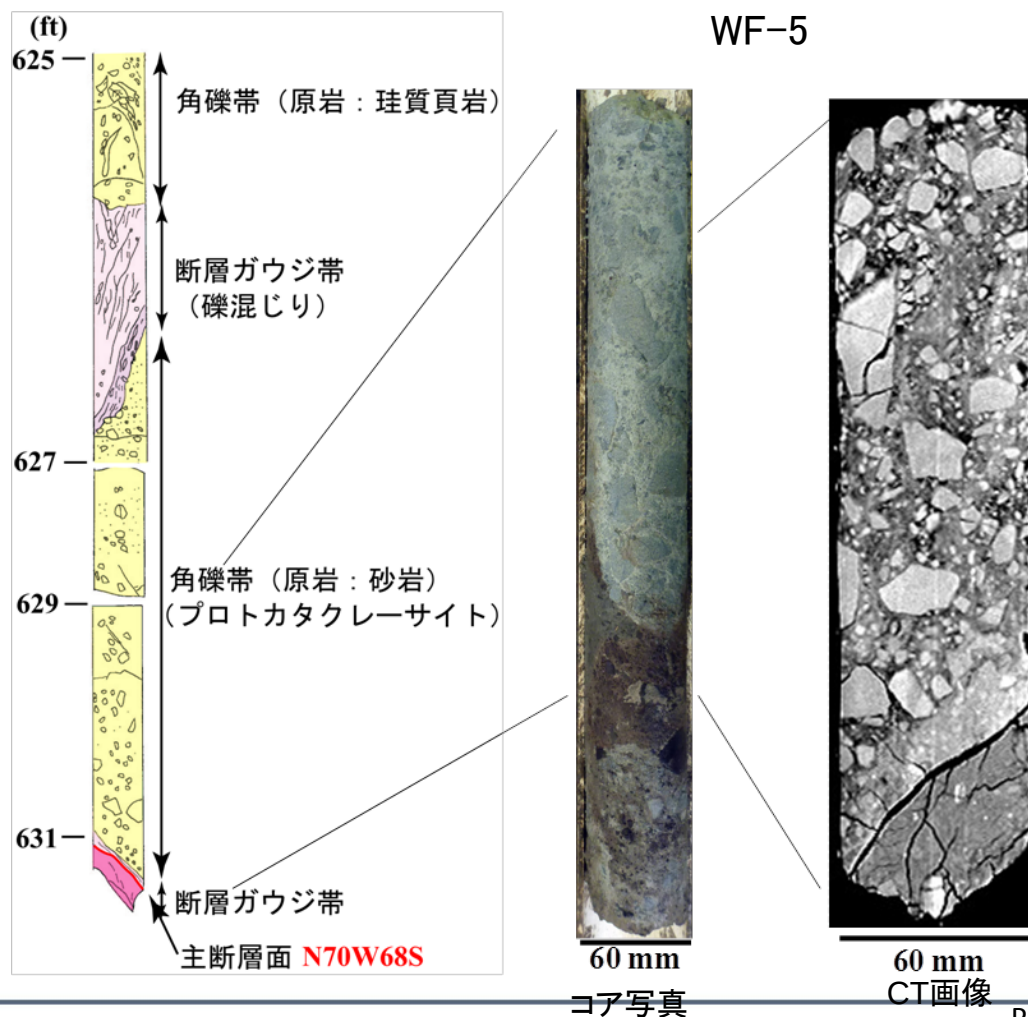
Fc断層

- 母岩: チャート・頁岩層
- 規模・形状: 幅約20m、中程度傾斜
- 内部構造: 角れき化が主、一部カタクレーサイト様の葉片状変形組織が発達
- 透水性の推定: 比較的高い



Fd断層

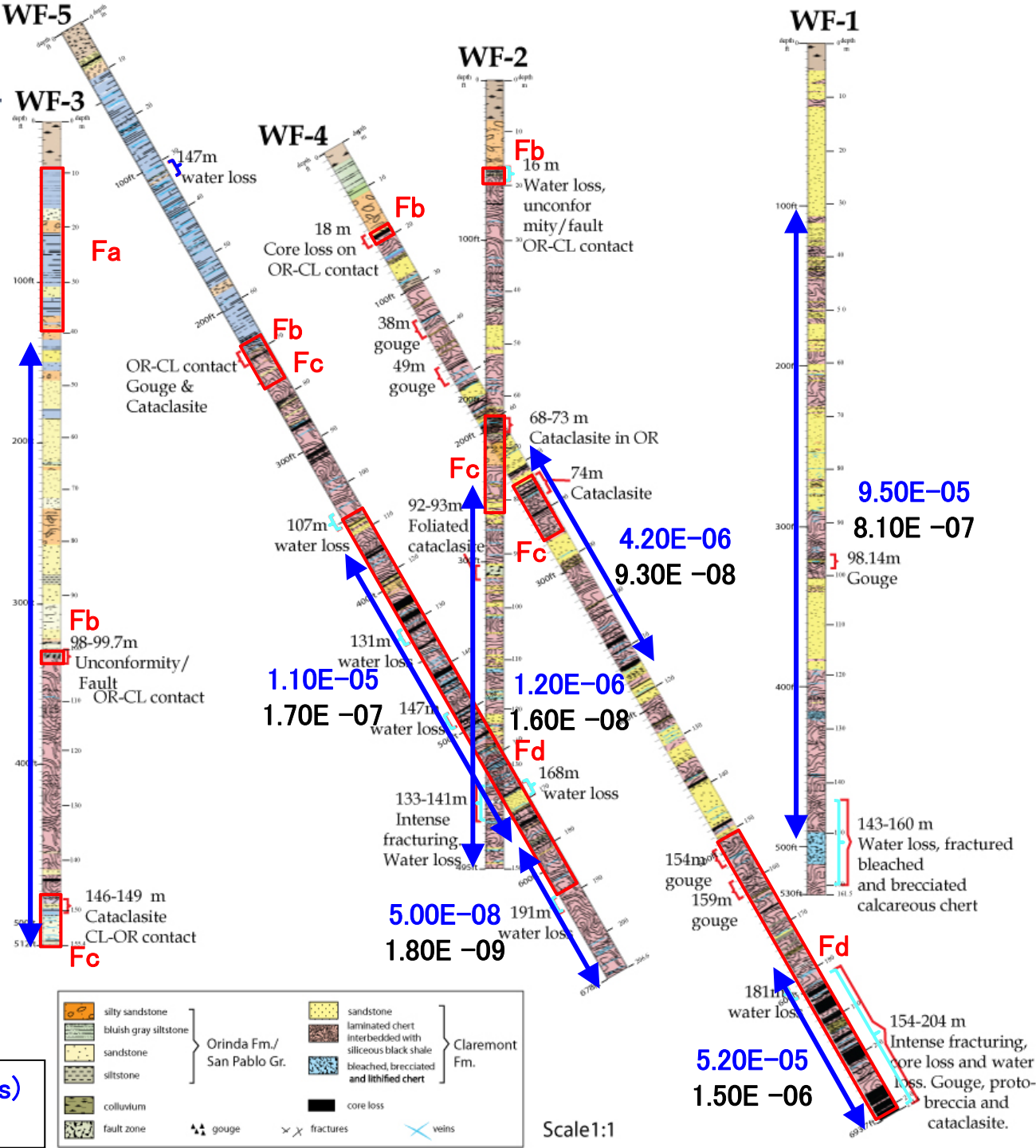
- 母岩: チャート・頁岩層
- 規模・形状: 幅50m以上、鉛直～急傾斜
- 内部構造: ガウジ帯・角れき帯の連続、割れ目発達
- 透水性の推定: 角れき帯は高、ガウジ帯は低い



水理試験

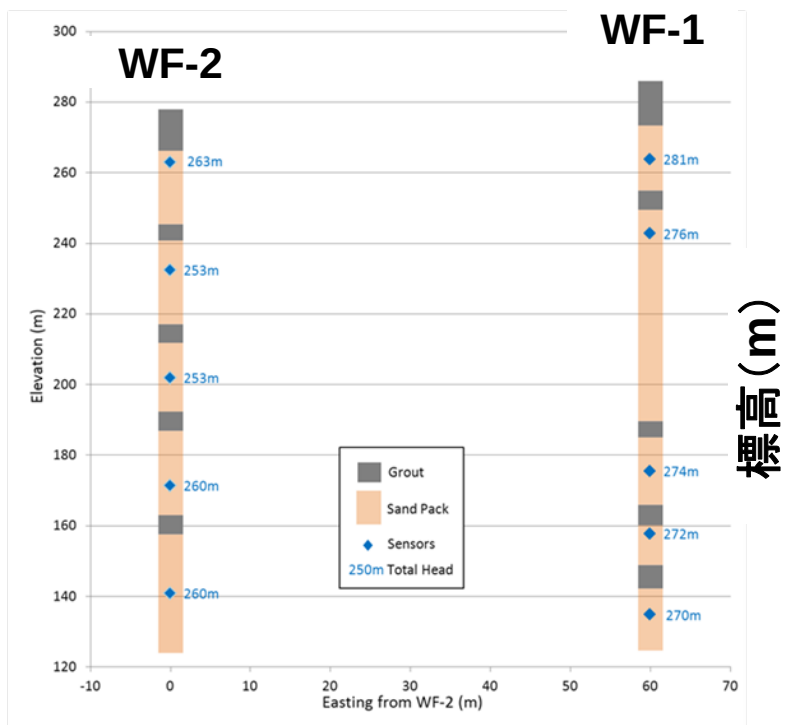
- 地質観察、BTV観察の結果から、主要な4断層を特定
- 水理試験を実施して、水理特性データを取得
- 母岩の透水係数は 10^{-9} ~ 10^{-8} m/secを示し、比較的
低透水性である
- 断層や割れ目発達部を含む部分は1~2オーダー程
度高い透水性を示す

透水量係数(m^2/s)
透水係数(m/s)



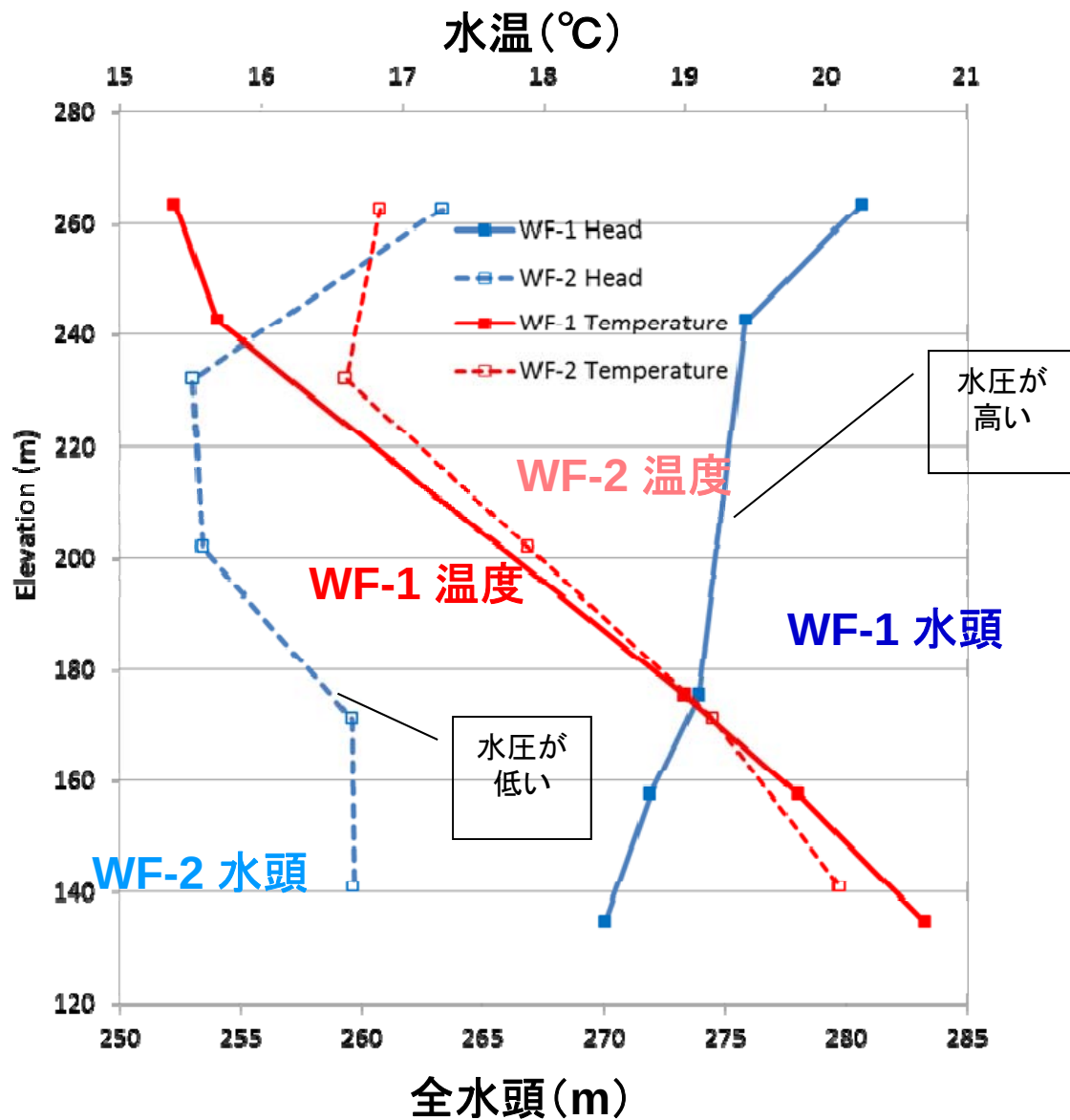
2本のボーリング間での水頭※差

WF-1とWF-2の間で、水圧にギャップが存在



水圧・温度モニタリング
(水圧センサーの位置)

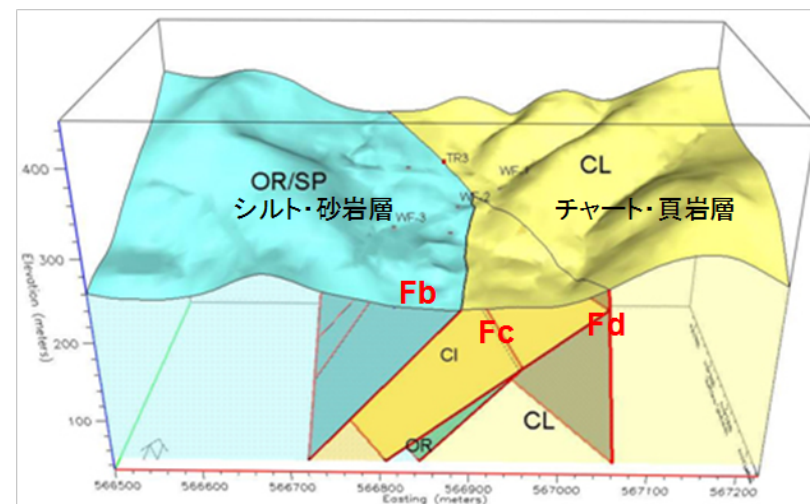
※水頭: 被圧された地下水面の高さ



ボーリング調査で判ったこと

■ 断層分布・性状

- 断層はボーリング地点で4本分布することを確認
- シルト・砂岩層内の断層は、割れ目が少なくガウジも少ない
- チャート・頁岩層内の断層は粘土を含む角れきが主体
- チャート・頁岩層内の断層で、ガウジ帯、角れき帯が連続する構造も確認



ボーリング調査までの結果で構築した地質構造モデル

■ 岩盤の透水性

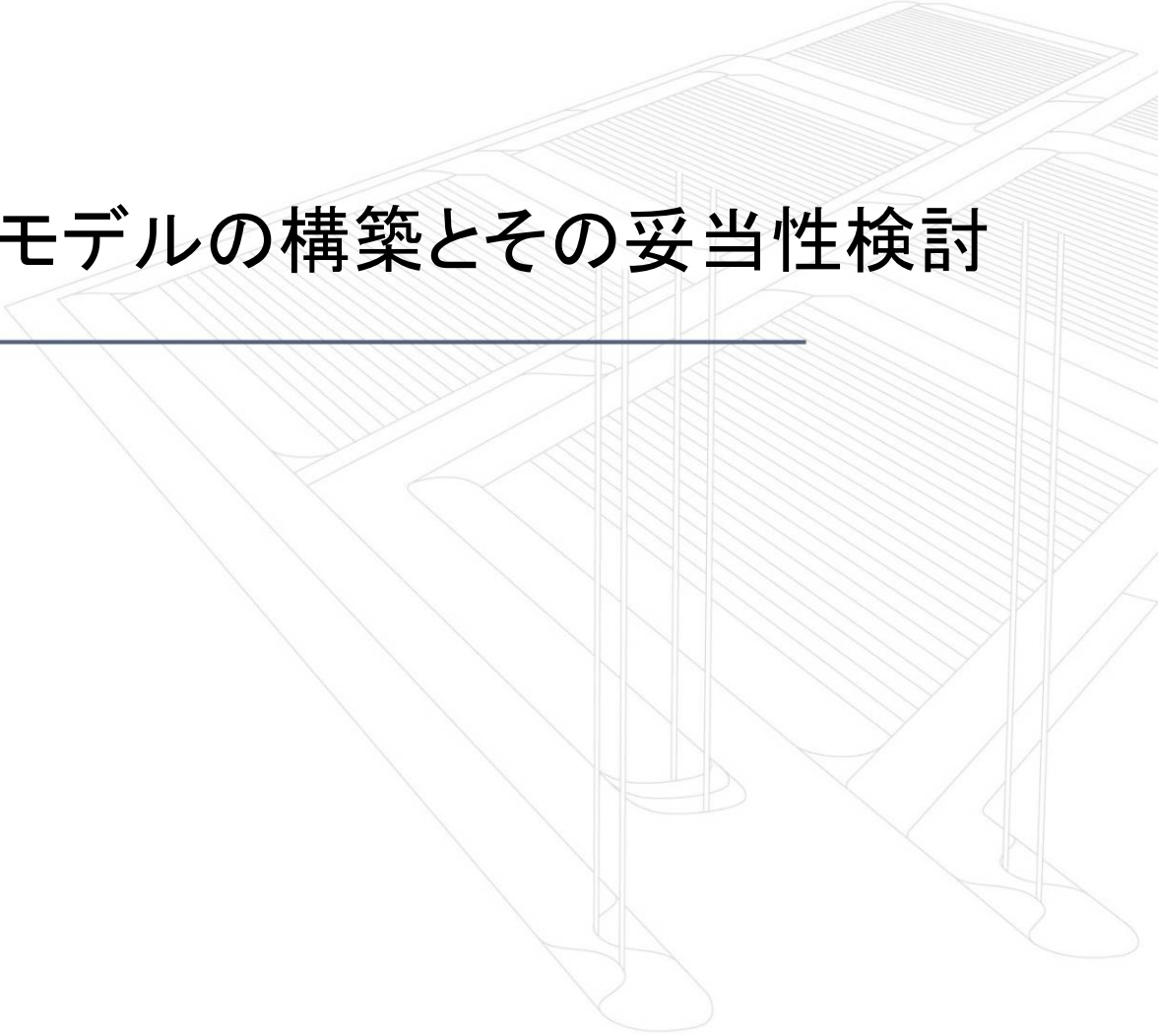
- チャート・頁岩層、シルト・砂岩層とも母岩は透水性が低い

■ 断層の透水性

- 断層や割れ目の発達した部分は母岩よりも1～2オーダー透水性が高い
- WF-1とWF-2の間に遮水性の水理境界が推測される



6. 水理地質構造モデルの構築とその妥当性検討



■ 地下水流動解析

- 断層の透水異方性を考慮した水理地質構造モデルによる地下水流動解析

■ 間隙水圧モニタリング

- 断層を挟んだ間隙水圧モニタリング

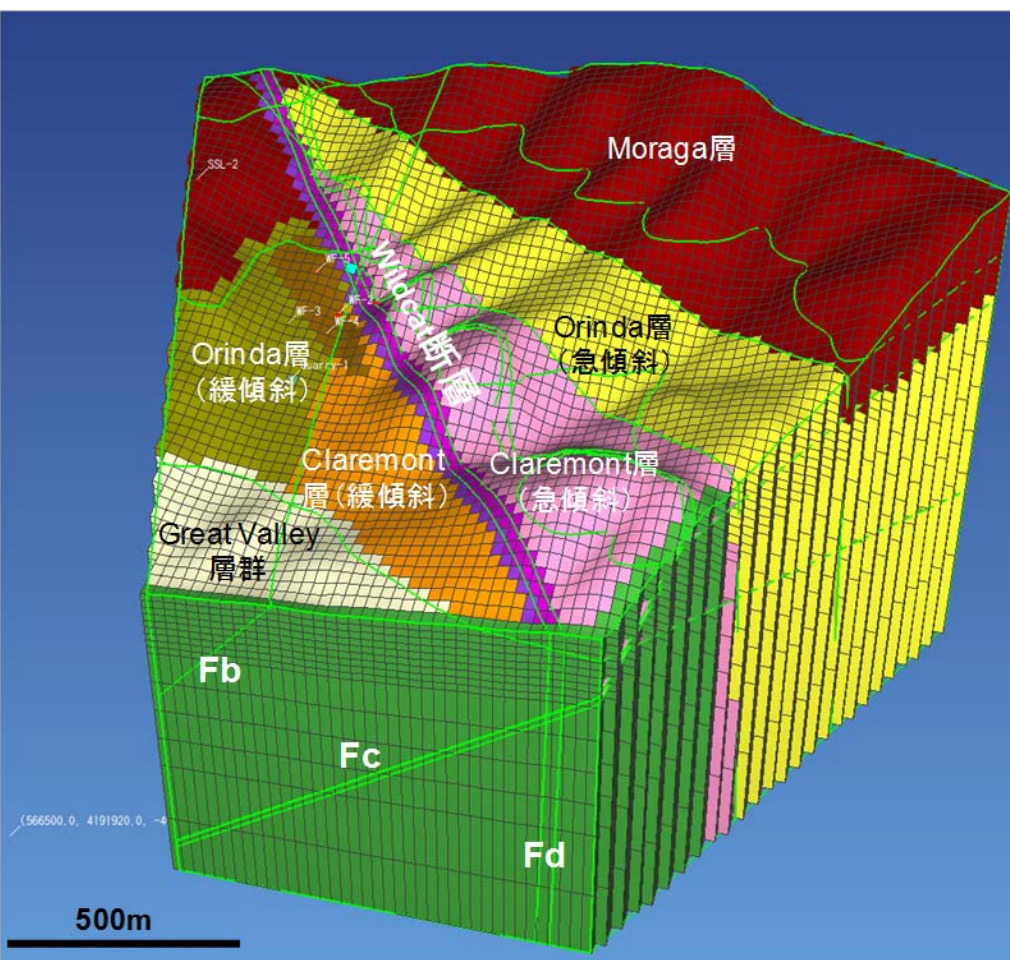
■ 地下水年代測定

- 放射性同位体 (^3H 、 ^{14}C) を用いた地下水年代測定

■ 地下水成分分析

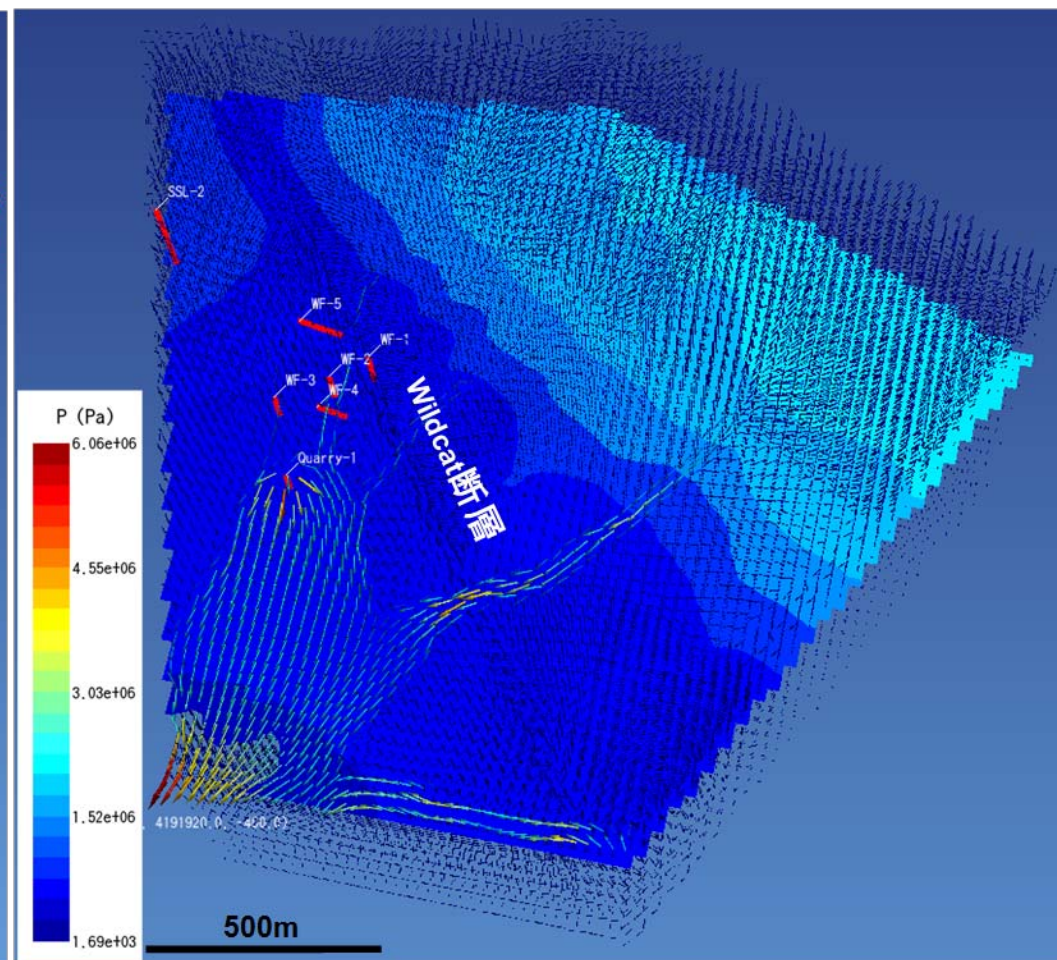
- 主要な溶存イオンから地下水流動を推定

水理地質構造モデル、地下水流動解析



水理地質構造モデル

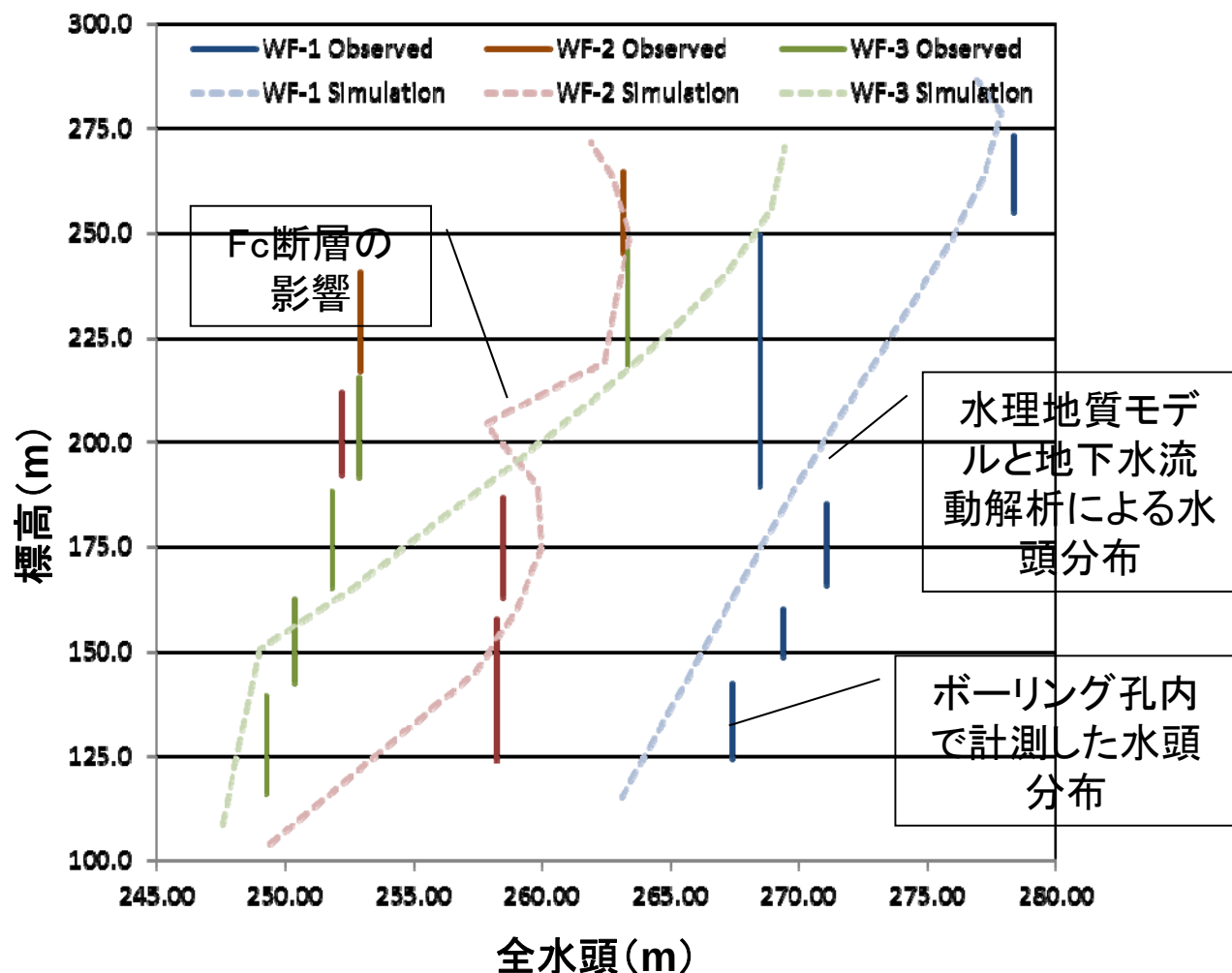
- 地質構造モデル、断層の地質特性および水理特性のデータに基づき、各地層、各断層の透水性・異方性などのパラメータを設定



流線ベクトルと標高200mの水圧分布

- 大局的には流動は地形に支配されている
- Wildcat断層で流線が収束し、断層沿いに向きを変える

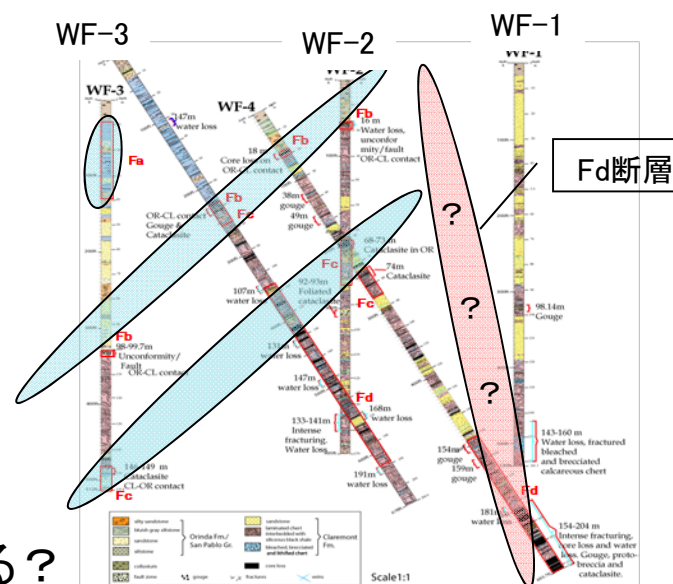
地下水流動解析結果と実測値の整合性



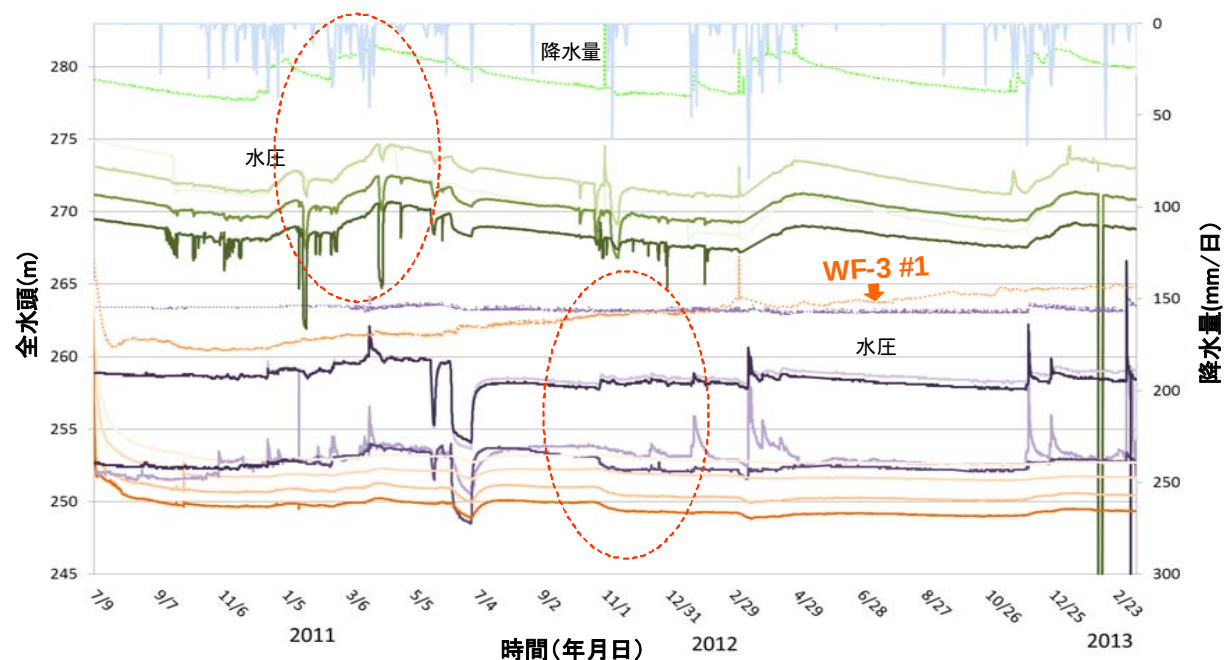
右: WF-1～WF-3の地質構造推定図

Fd断層が、WF-1とWF-2の間に分布する？

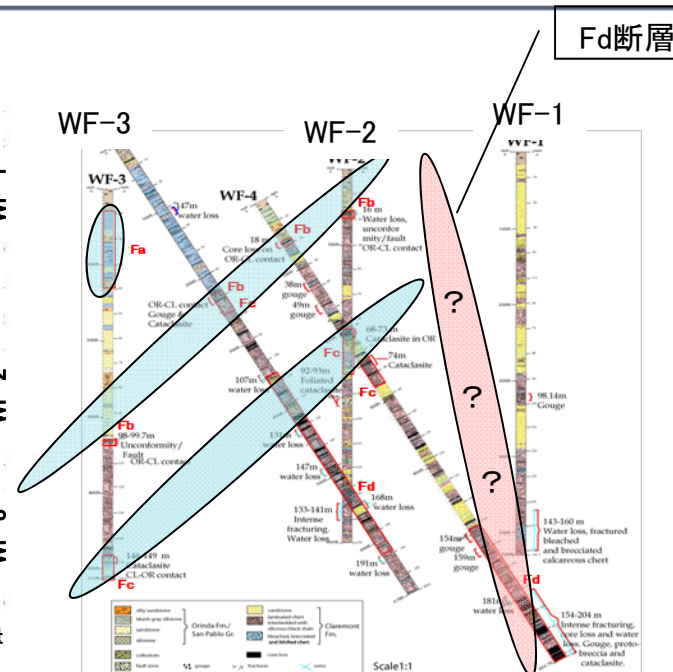
- 全体的に深部に向って水頭が低下する傾向
- 断層東側のWF-1と西側のWF-2、WF-3の水理学的なギャップ
- WF-2中央部の水頭低下 (Fc断層が透水性が高いことの影響)



地下水圧モニタリング



- WF-1(上流側)では降雨の影響が大きく、WF-2とWF-3(下流側)では小さいことから、WF-1とWF-2、3は水理的に隔離された場にあると解釈できる
- WF-1とWF-2、3の間に、遮水性の断層の存在が考えられる



上: WF-1～WF-3の地質構造推定図

Fd断層が、WF-1とWF-2の間に分布する？



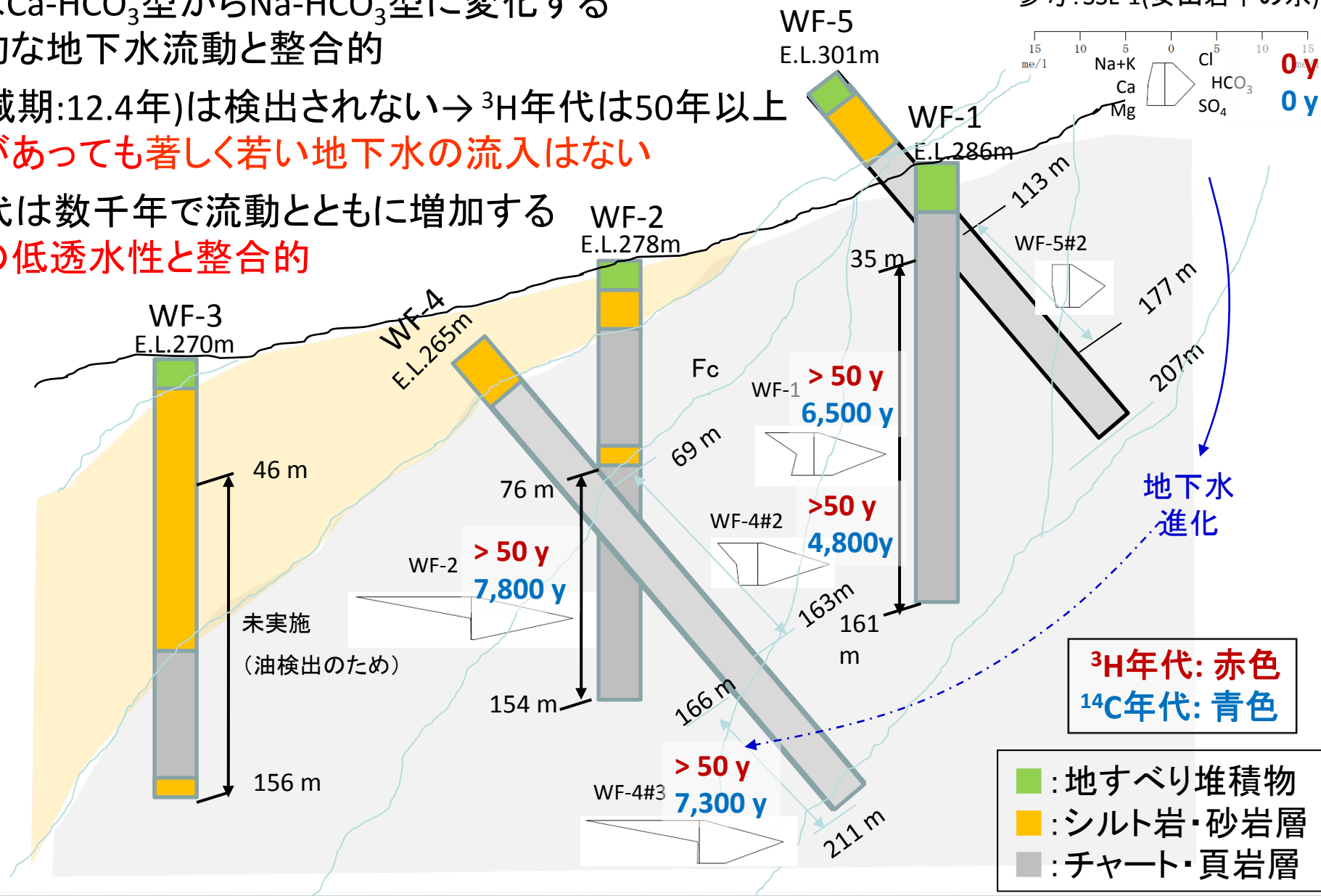
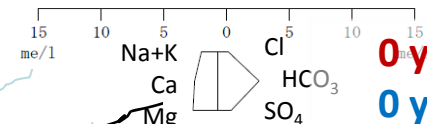
地下水化学モデル(水質+放射性同位体)

➤ 水質はCa-HCO₃型からNa-HCO₃型に変化する
→ 大局的な地下水流動と整合的

➤ ³H(半減期:12.4年)は検出されない→ ³H年代は50年以上
→ 断層があっても著しく若い地下水の流入はない

➤ ¹⁴C年代は数千年で流動とともに増加する
→ 母岩の低透水性と整合的

参考: SSL-1(安山岩中の水)

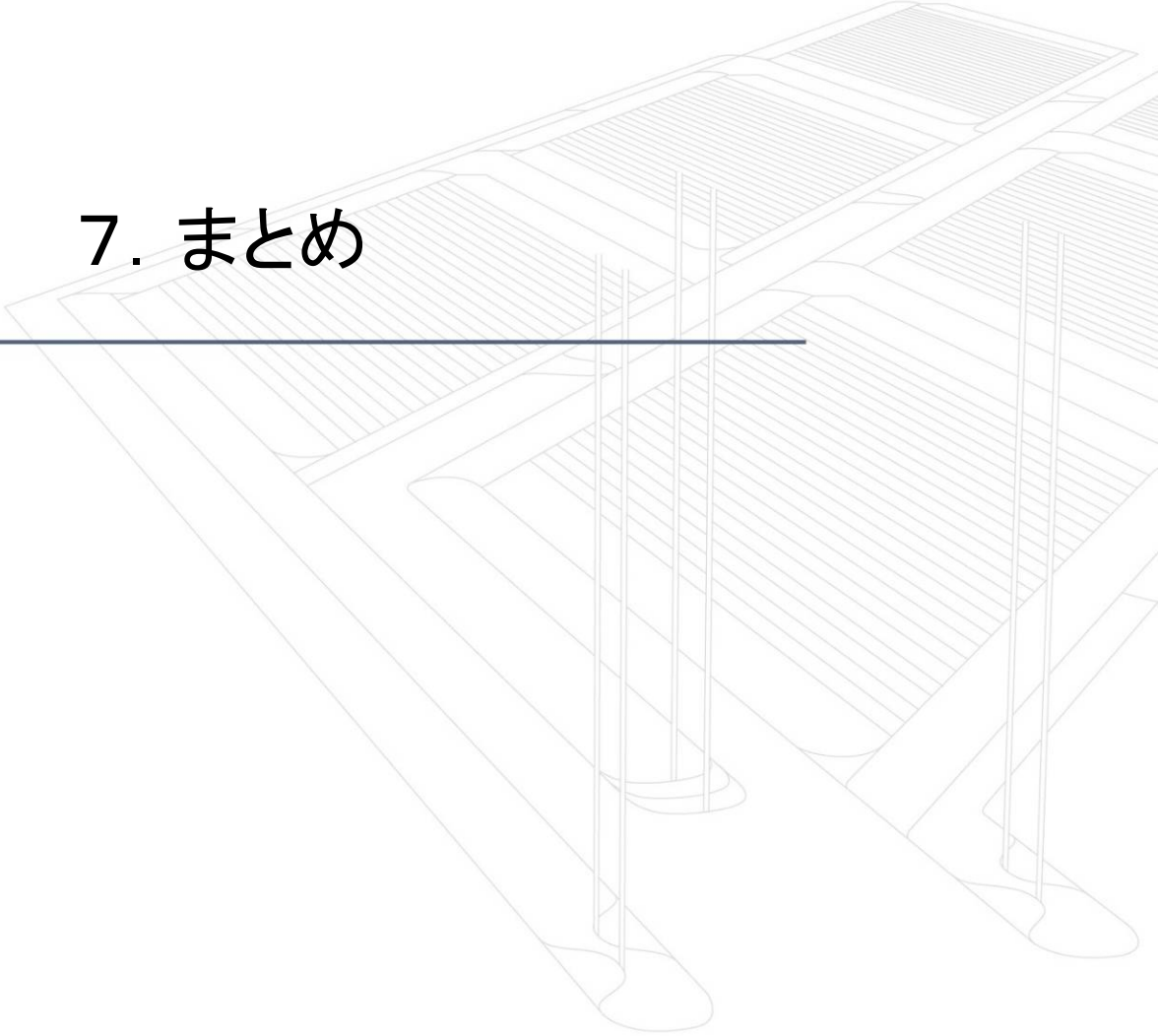


モデルの検証過程で判ったこと

- 地下水流動解析の結果とボーリング孔の実測値の整合性
 - ・ 全体的な水頭の低下傾向、断層を挟んだ水頭のギャップ、長期水圧モニタリングによる水頭のギャップが認められた
 - ・ 季節変動(降雨量の変化)の影響に基づき、断層が遮水性の性状を示すことを推定
- 地下水化学組成・年代との整合性
 - ・ 組成変化は大局的な地下水流動に整合的
 - ・ 断層に沿った年代の若い地下水の流入がなく、水平方向の流れに整合する
- Wildcat断層の評価
 - ・ 透水性および遮水性の両方の水理的性状を有すると考えられるFd断層を主断層とする断層帯(Fa～Fcを含む)で、傾斜が異なる断層が複数存在するものと評価
 - ・ 横ずれ断層運動の結果、断層ガウジが生成し、全体的には、上流側と下流側を2つに区分する水理境界として考えられる



7. まとめ



- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律で示された法定要件に照らし合わせて、精密調査地区を選定することを念頭に、既存の概要調査技術によって断層の水理特性を調査・評価する知見が得られた
- 事前に断層の水理特性把握に向けた調査・評価の流れを構築し、その流れに沿って実証試験を実施した結果、既存の文献による断層が分岐することを把握し、各断層の透水性異方性に関する情報を取得した
- 断層水理特性の異方性を考慮した地下水流動解析、ボーリング孔で採取した地下水の年代測定、ボーリング孔内で計測した水圧分布から得られた情報から、断層の水理特性概念モデルや水理地質構造モデルの妥当性を検討し、調査・評価の流れが有効であったことを確認した
- それぞれの技術には長所と欠点があり、単独使用では効果的な調査成果を出すことができていないが、長所を生かして相互補完しつつ総合的な解析を行うことで断層の水理特性の推定に至るまでの成果を出すことが重要である
- 既存の調査・評価技術は、断層の位置特定およびその水理特性調査に有効であったことが確認できた。今後の概要調査において、断層の水理特性の評価に関する情報を取得できる見通しを得た