

堆積岩及び花崗岩における水理特性評価手法

唐崎建二

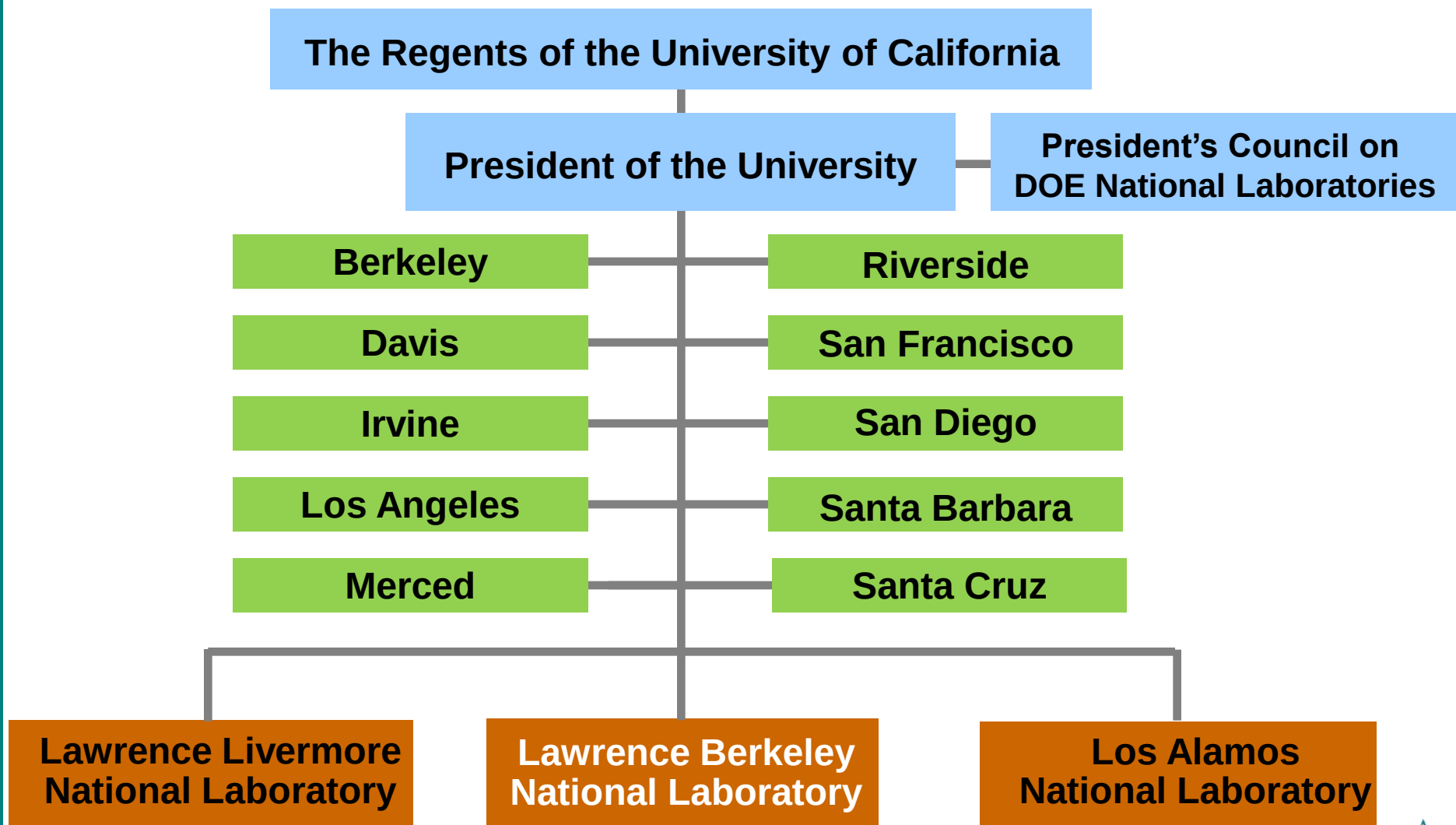
Lawrence Berkeley National Laboratory

平成24年11月28日

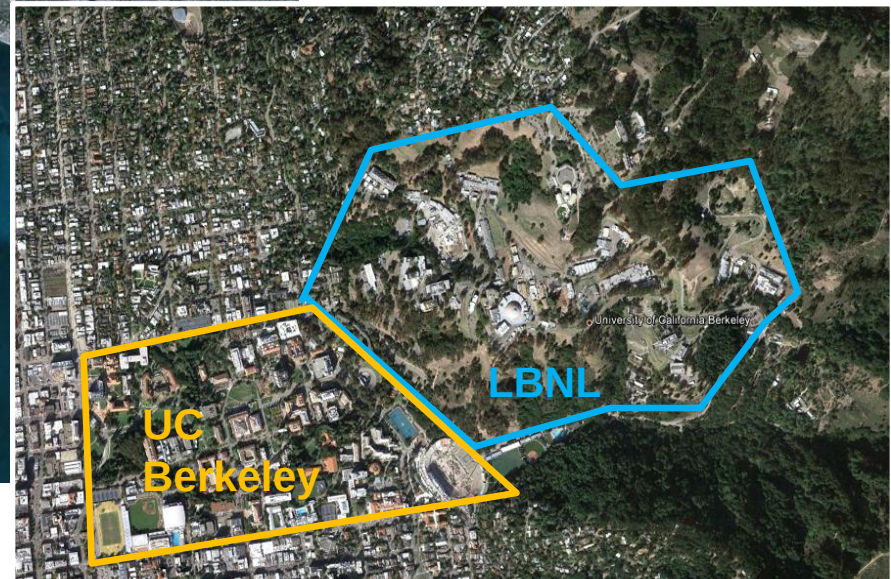
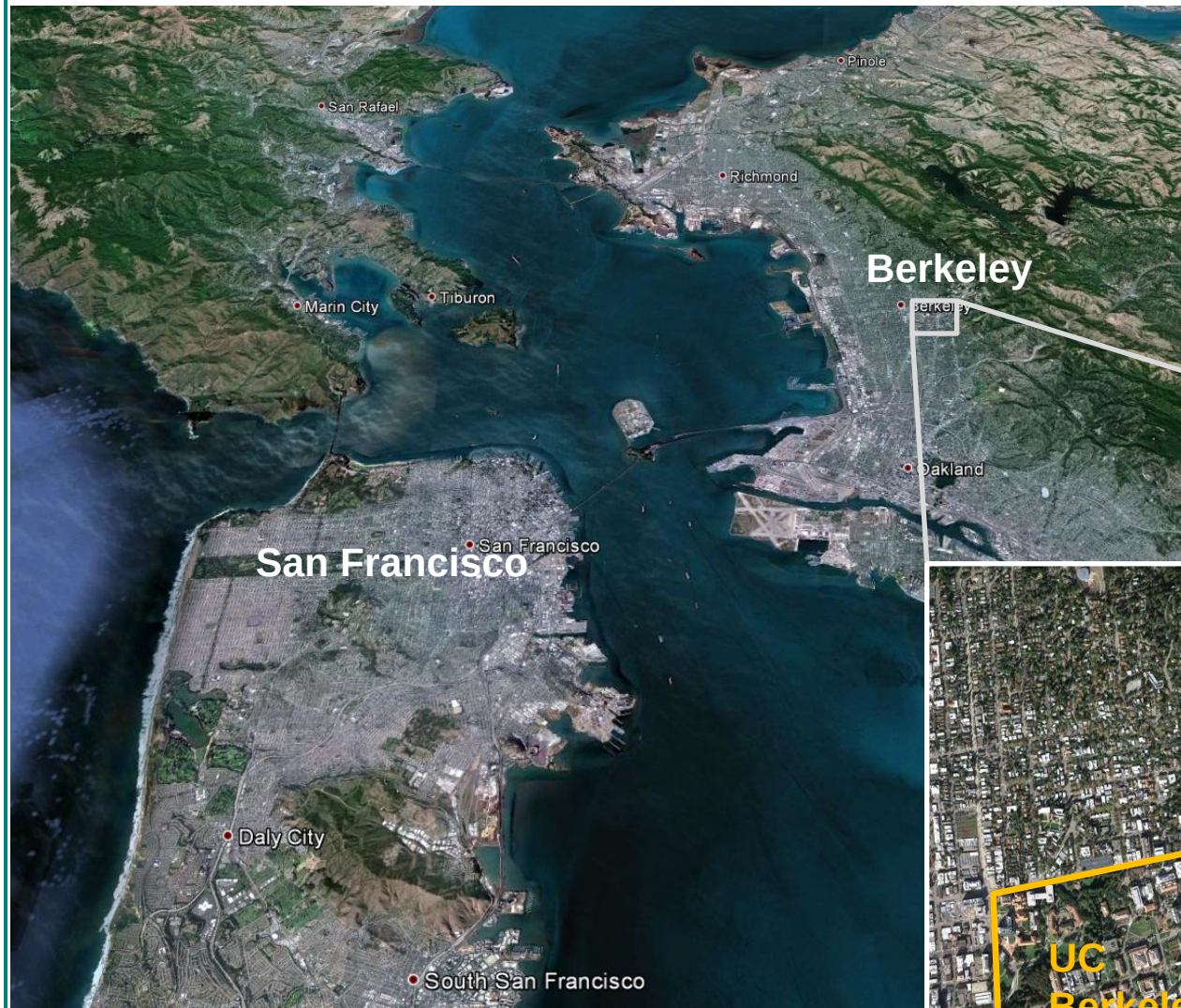
Outline

- LBNLの紹介
- ジオサイエンスと地層処分
- 特性評価のアプローチ
- 解決すべき重要課題
- 断層水理研究事例
- 提案とまとめ

カリフォルニア大学と国立研究所



LBNLと加大バークレー校

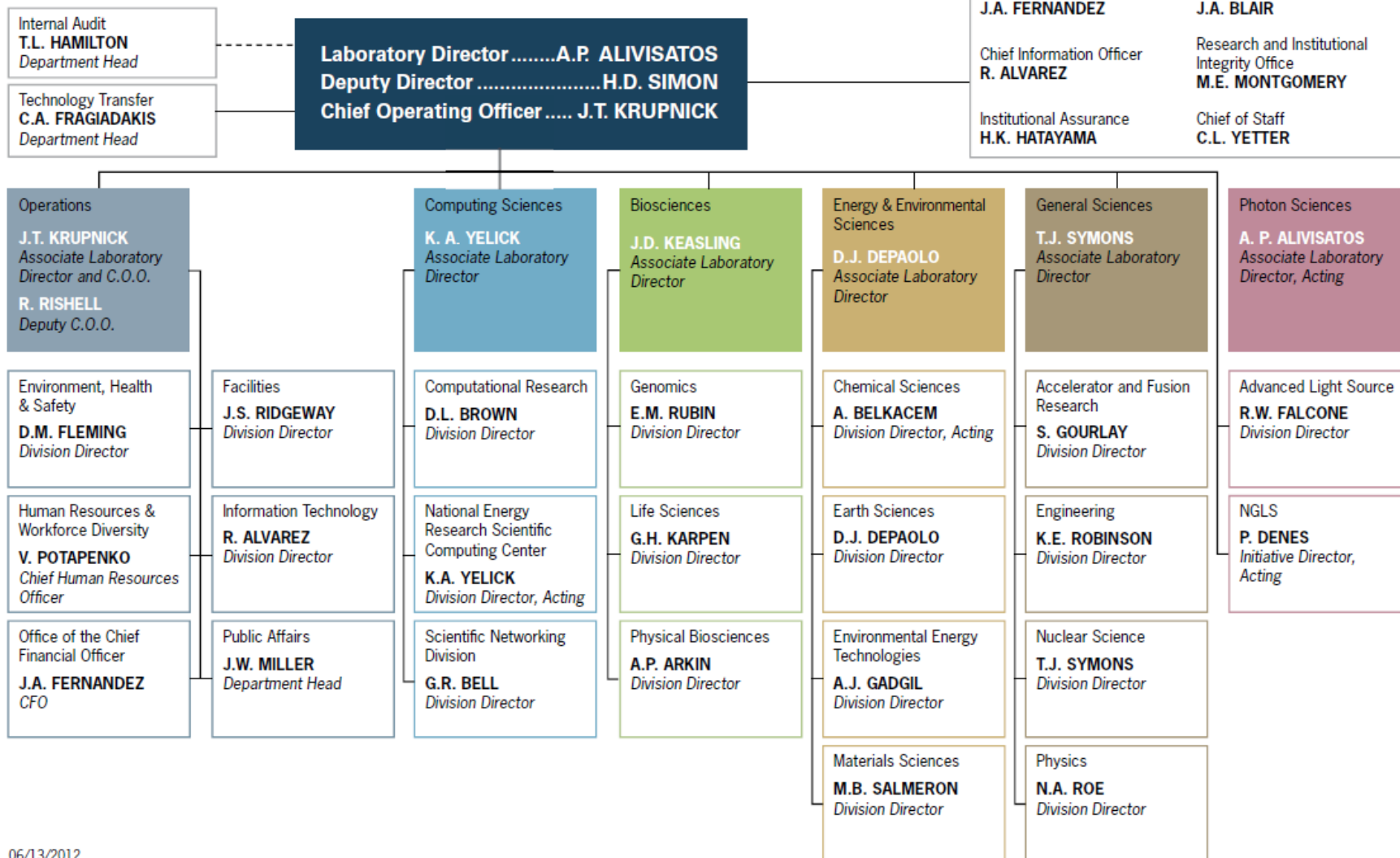


LBNLからの眺望



LBNL 組織図

Lawrence Berkeley National Laboratory University of California

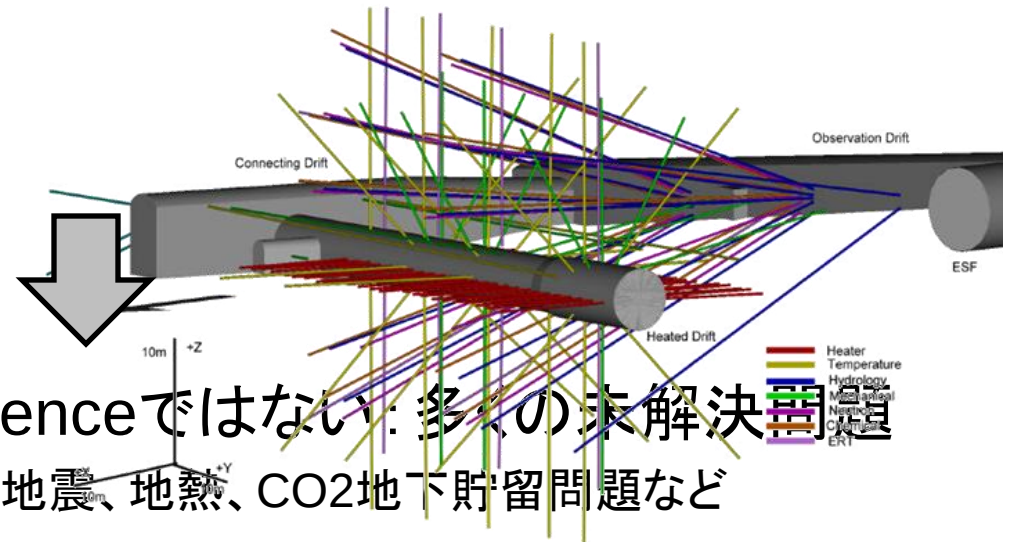


地球科学部門 (Earth Sciences Division)

- 気候科学 (Climate Science)
 - 地球温暖化
- 地化学 (Geochemistry)
 - ナノサイエンス
 - 同位体地化学
- 水理地質 (Hydrogeology)
 - 貯留層工学
 - シミュレーション
- 地球物理 (Geophysics)
 - 地下画像化 (Subsurface Imaging)
 - 岩石物理学 (Rock Physics)
- エコロジー (Ecology)
 - バイオエネルギー
 - カーボンサイクル

何故ジオサイエンスは難しいか

- 境界条件、初期条件の推定が困難
- 物性が不均質
- 断層が普遍的に存在
- 地下は見えない→見えない物は計れない→計ろうとすると場が乱される
- 低いR&D予算



地球科学はExactなScienceではない: 多くの未解決問題

例: シェールガス、地震、地熱、CO2地下貯留問題など

Figure A-1. Perspective View Showing Drifts and Boreholes of the Drift Scale Test.

ヤッカマウンテンESF

過去の教訓

- ヤッカマウンテン
 - 予測移行時間：10万年超 → 40年以下
 - NS→EBS→NS依存
- ストリパのSCV試験
- コンピュータモデルの過信
 - GIGO
 - 2003年アメリカ東部大停電
 - 火星探検機の墜落
- 目的と逆の結果
 - MTBE、古タイヤの魚礁、難燃剤

コンピュータープログラム

- 実データの前ではモデルはひとたまりもない
 - ヤッカマウンテンの例 ($\text{Cl}36$ 、 ^3H)
- Let the data speak for themselves
- GIGO
 - 信頼性は入力データに支配される
- ソフトウェアのバグによる事故
 - 2003年アメリカ北東部大停電
 - 行方不明になった火星探査機(単位の変換ミス)
 - ミサイルの打ち上げ失敗(ビット変換ミス)

地層処分成功の鍵

- 原子力発電（サイクル）と処分を分離して議論
- サイエンスプロジェクト（土木事業ではない）
 - 研究と応用は線引き不能
 - オーナーシップを取る
 - 役割分担、カスケード（連鎖）的アプローチの危険性
- 時間を掛ける
 - 100年超
 - 学会提言とは矛盾しない
- 信頼回復
 - ガチンコ勝負
 - 残された重要課題あり
 - 最先端技術を導入
 - 50%以上の専門家の賛同を得る
 - 不明点からの逃避をしない
 - 不適格要素を探す努力
 - 完全透明化

無くした鍵の話

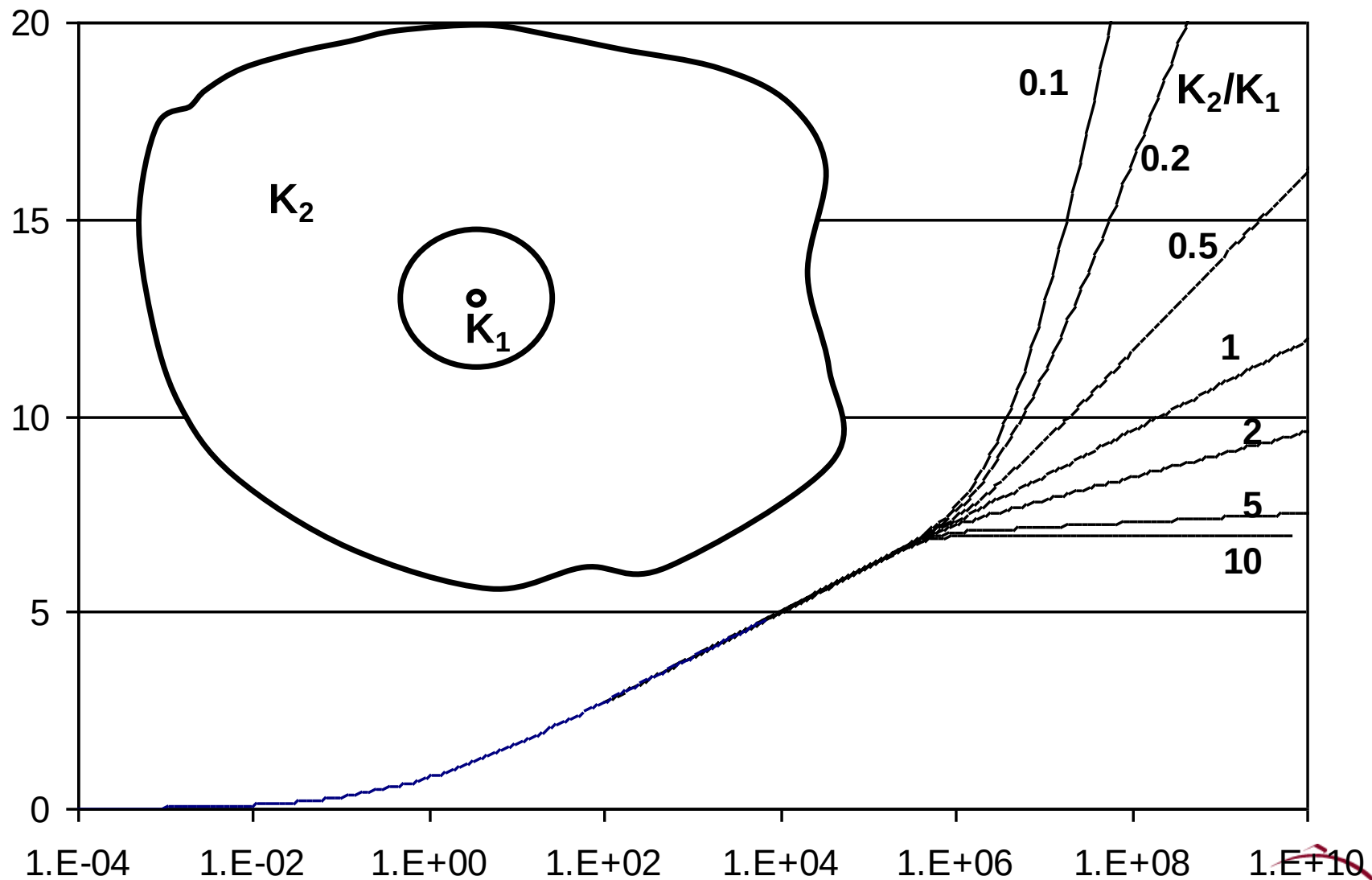


特性評価手法

- 地質調査*
- 物理探査*
 - 地表
 - 地震探査(反射、屈折)
 - ERT
 - ボアホール検層
 - キャリパー
 - SP, g, 電気抵抗
 - 音波, サスペンション
 - BTV, スキャナー
 - 電導度検層
 - 孔間トモグラフィー
 - レーダー
 - 地震探査
 - 比抵抗
- 地化学調査*
- 水理試験*
 - DST, スラグ試験
 - 揚水(ポンプ)試験
 - 単一孔
 - 孔間試験
- トレーサー試験* *
- 水理地質モデル* *

* : 改良の余地あり

長期揚水試験の“透視能力”



Composite Mediumのラプラス領域解

$$\bar{h}_{D_1} = \frac{\sqrt{\alpha_c}}{r_c k_D p \sqrt{p}} \cdot \frac{1}{\Delta} \left[k_D \cdot K_0(\sqrt{p}) \left\{ I_1(\sqrt{p/\alpha_c}) K_0(\sqrt{p/\alpha_c} r_D) + I_0(\sqrt{p/\alpha_c} r_D) K_1(\sqrt{p/\alpha_c}) \right\} + \alpha_c \cdot K_1(\sqrt{p}) \left\{ I_0(\sqrt{p/\alpha_c}) K_0(\sqrt{p/\alpha_c} r_D) - I_0(\sqrt{p/\alpha_c} r_D) K_0(\sqrt{p/\alpha_c}) \right\} \right],$$

where

$$\Delta = \sqrt{\alpha_c} \cdot K_1(\sqrt{p}) \left\{ I_1(\sqrt{p/\alpha_c} \cdot r_c) K_0(\sqrt{p/\alpha_c}) + I_0(\sqrt{p/\alpha_c}) K_1(\sqrt{p/\alpha_c} \cdot r_c) \right\} + k_D \cdot K_0(\sqrt{p}) \left\{ I_1(\sqrt{p/\alpha_c}) K_1(\sqrt{p/\alpha_c} r_c) - I_1(\sqrt{p/\alpha_c} r_c) K_1(\sqrt{p/\alpha_c}) \right\}$$

測りたいものを本当に測っているのか？

- データを先ず疑え
 - トレーサー試験
 - プローブのドリフト
 - 濃度アナリシスは3つの別組織で
 - ボアホールショートサーキット
- ストリパでの流入量予測実験
 - ほぼ同じ実験
 - 二相流効果
- EDZの検証
- ヤッカマウンテンのスラグ試験
 - バルブの“透水係数”

数値シミュレーター

- どのシミュレーターも本質的には同じ。大事なのは入力データである。
- 皆なんらかの等価モデルである。
- スケールが大事
- オールマイティは存在しない。限界を知るべき。
- 物理現象を曲げてモデルにフィットさせるべきでない。
- 総合的な検証が必要。

森を見よう

- フェルミのballpark estimate
- 間違った森は意味が無い
 - ニュージーランドの哺乳類の足の数

重要課題

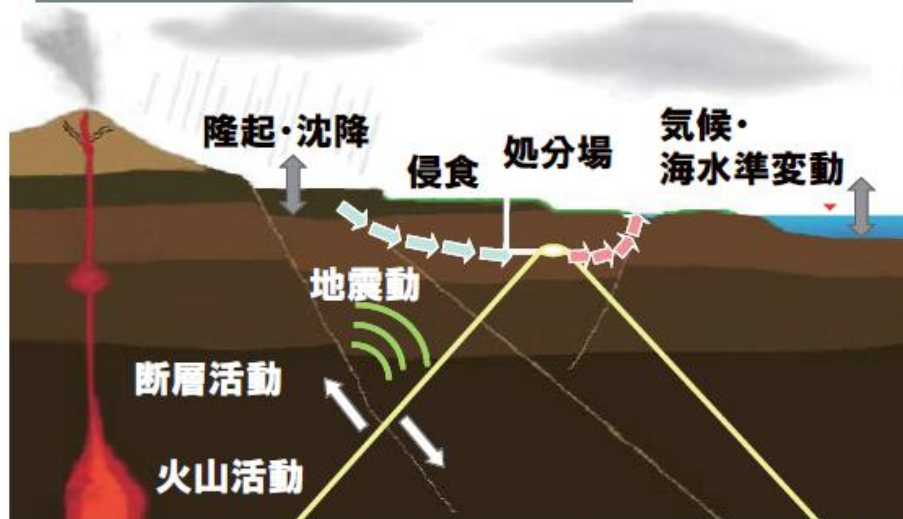
- 断層の水理特性評価
 - 伏在断層の検知
 - 断層を掘り抜かずに評価
 - システマティックアプローチの検証
- セーフティケース内の仮定やモデルの検証
 - フラクチャーからのマトリックスへの拡散
 - 分散
 - DFNモデルの検証
 - 境界条件
- 長期安全性に影響の大きいパラメータの定量的計測
 - URLでのスケール、境界条件の問題を克服
- 物質移行モデルの検証
 - 推定有効孔隙率に数オーダーの開き
- 複数の解釈に対する解決法
- ボーリング孔間の詳細情報取得技術の検証
- スケジュール及びコストの制約がもたらす危険性の低減や回避手法

URLへの期待

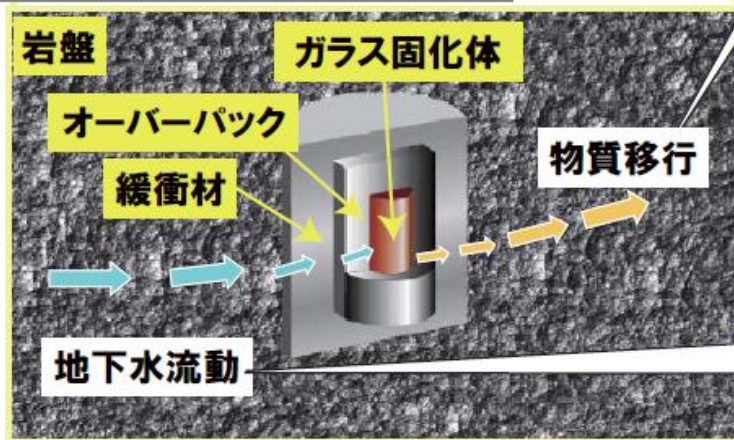
- 未解決問題のブレークスルーを狙え
- 国際共同研究の場に
- 発想の転換
 - 100年超の実験
 - シャフト掘削は最大のディスターバンス
 - 可能な限りのモニタリングを行うべき
 - スケジュールの消化で終わせない
 - データ取得にオーナーシップを

地層処分システムの長期挙動

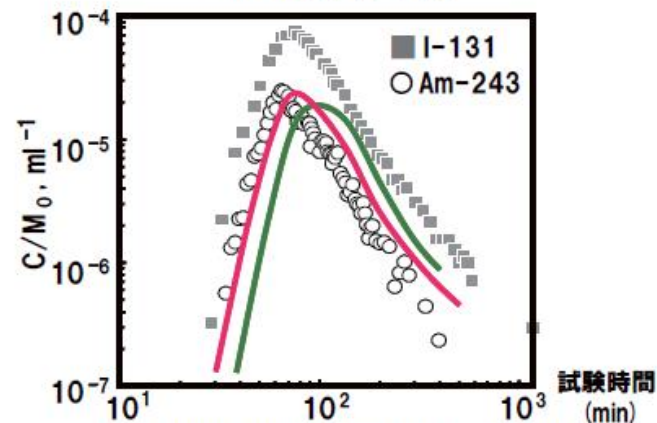
地質環境の長期的変遷の把握



現象理解に基づくモデルの高度化

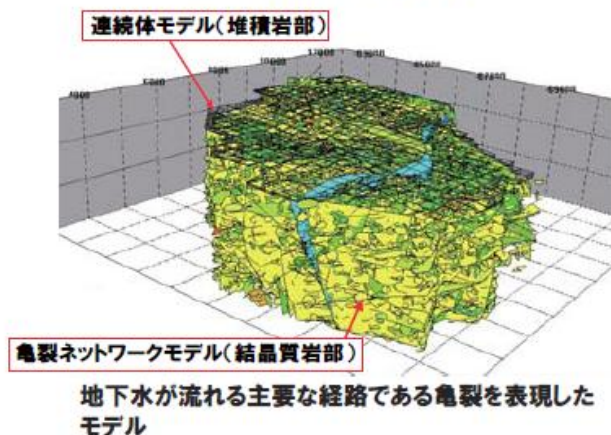


コロイド移行挙動



スイス Nagra との共同研究により、グリムゼル岩盤研究所で行われた原位置核種移行試験結果
コロイドによる影響を考慮した Am の移行モデル
[赤の曲線] が、より実験結果に一致している。

地下水流動モデル



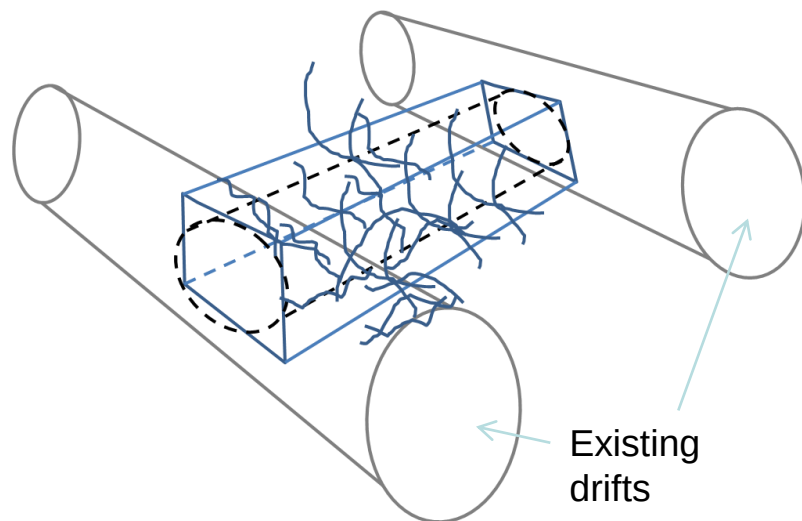
断層水理の研究

断層が処分場の命運を左右

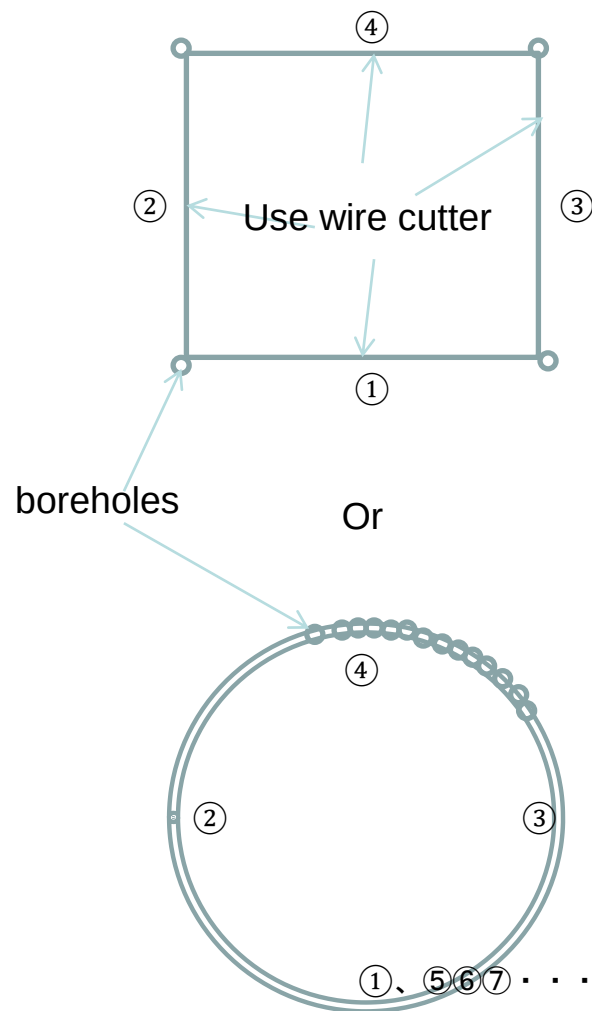
- ユビキタス（普遍的）に存在
- 周辺水理に大きく影響
- 遮水、高透水性の両極端の性状を兼備
- 三次元的構造

瑞浪URL

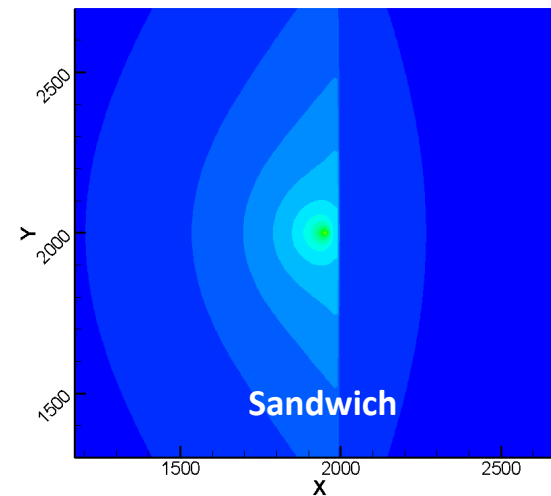
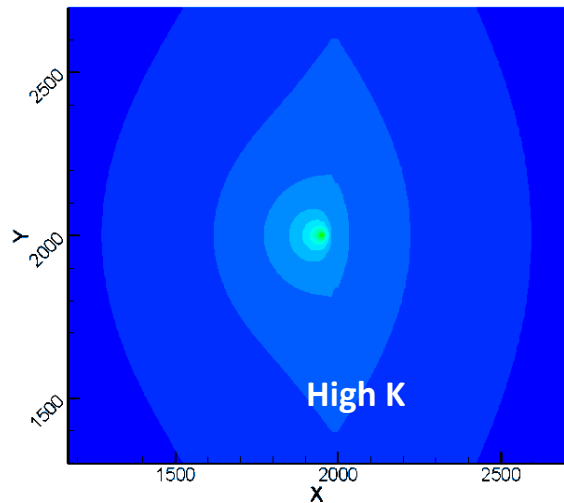
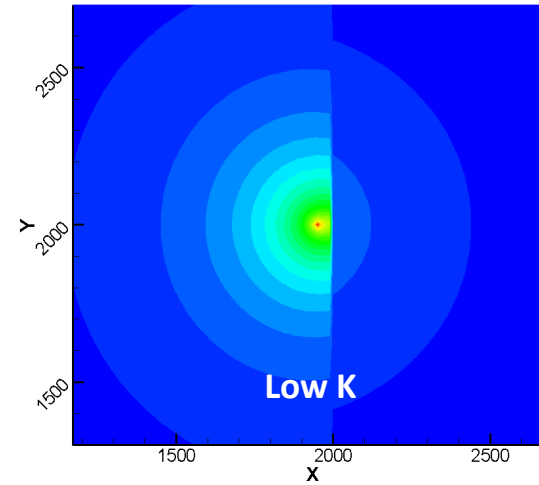
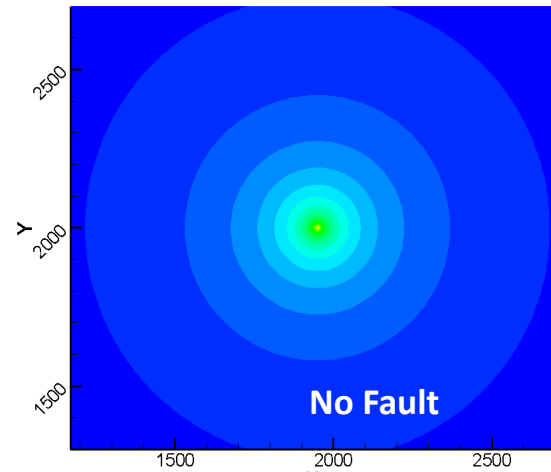
- 亀裂性岩盤の有効空隙率の予測と測定
 - 孔間トモグラフィー（4次元）
 - 亀裂データ→DFNモデル
 - 大規模一次元物質移行実験
- 断層とVertical fracture
- 大スケール予測モデルの構築と検証



1. 4隅にコアホールを貫通させる
2. 種々の孔間物理検層
3. 孔間水理試験
4. 予測モデルの構築
5. 箱型（ワイヤーカッター）又はボアホール（円筒形）で輪郭を取る
6. グラウト注入により1次元場の確立
7. 1次元水理試験、トレーサー試験、ボリューム置換試験
8. モデルとの比較
9. 片面から着色樹脂の注入
10. 掘削による水みちの確認

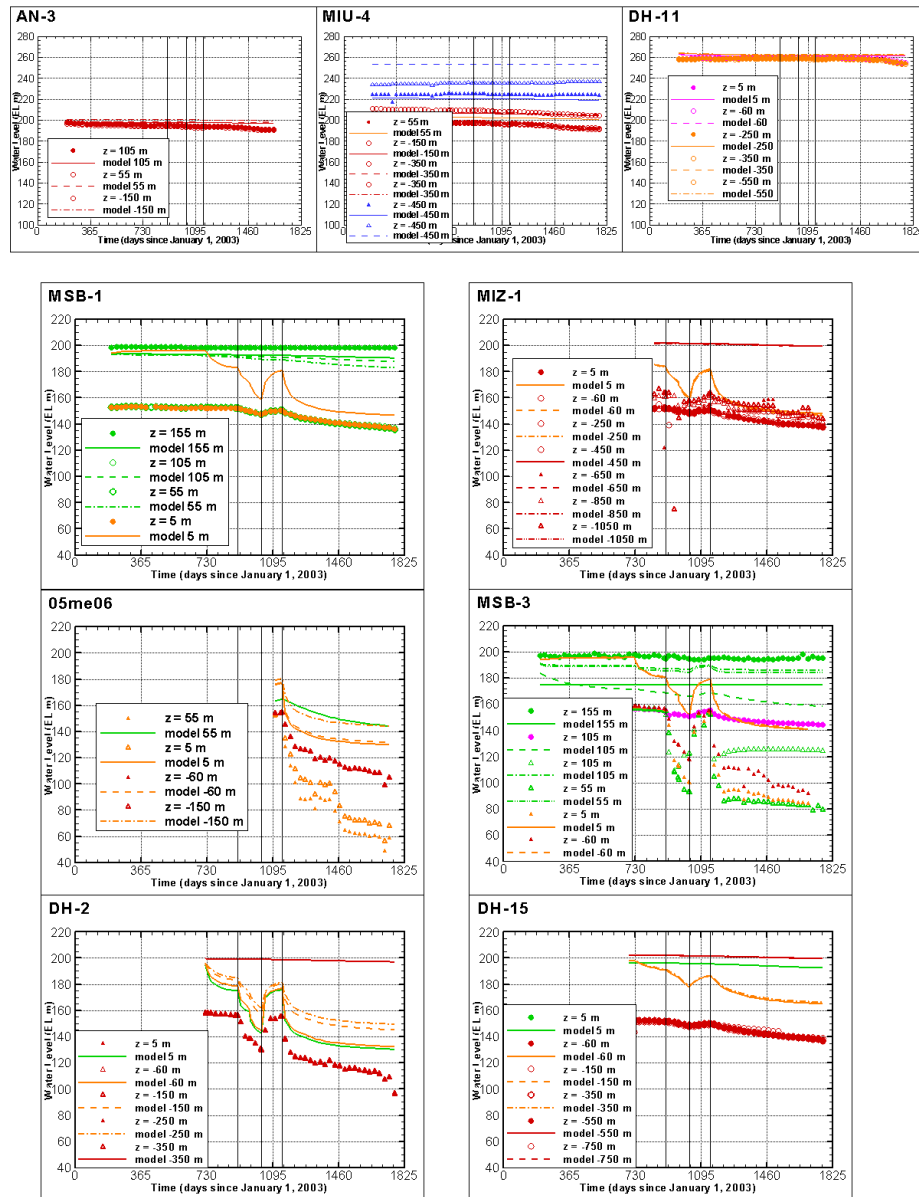


断層を跨いだ圧力伝播

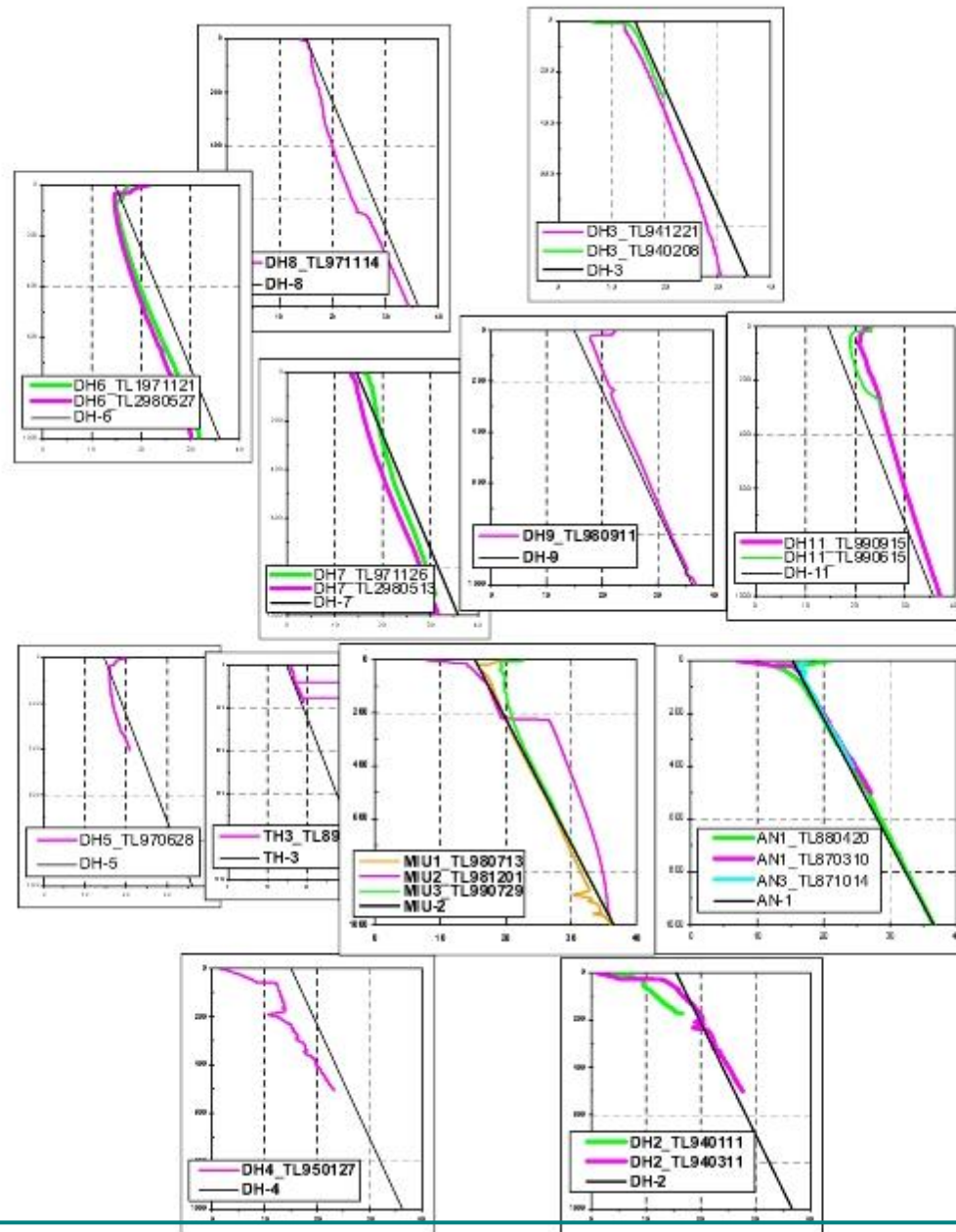


(Un)Match to the transient data

P16CJ



東濃地域温度分布データとモデル予測

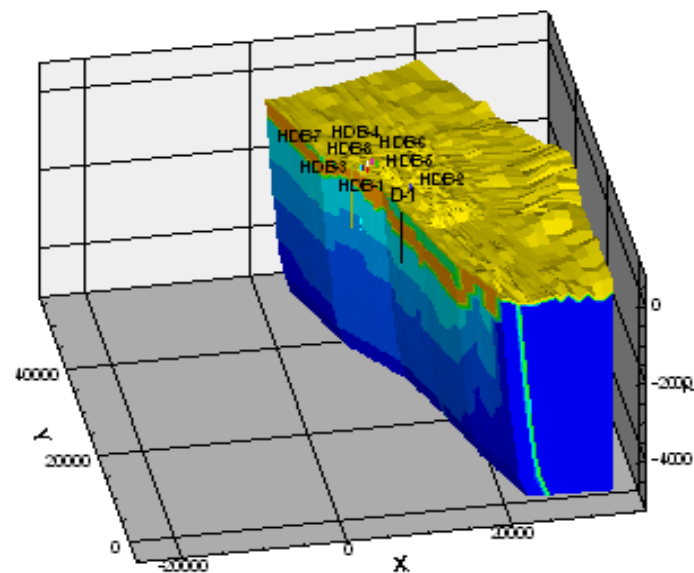
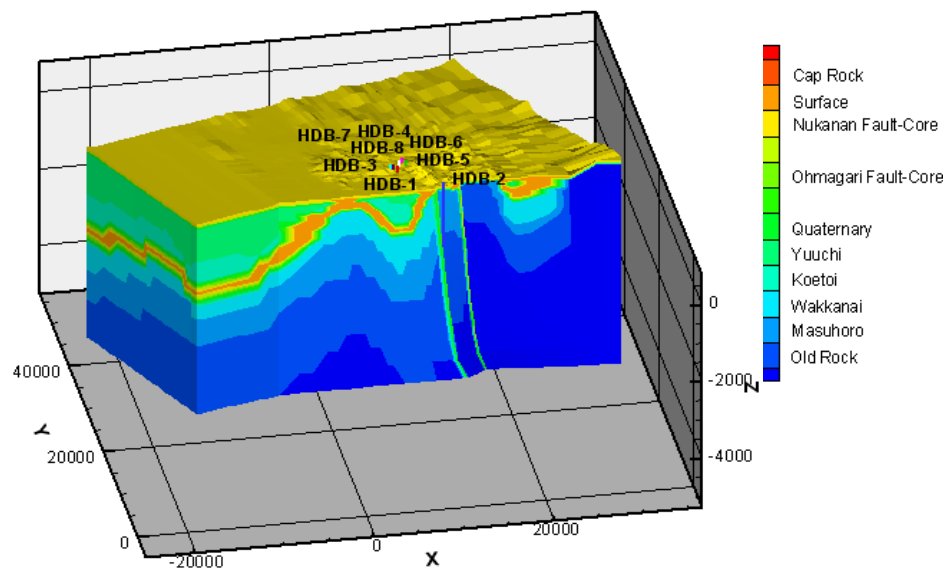
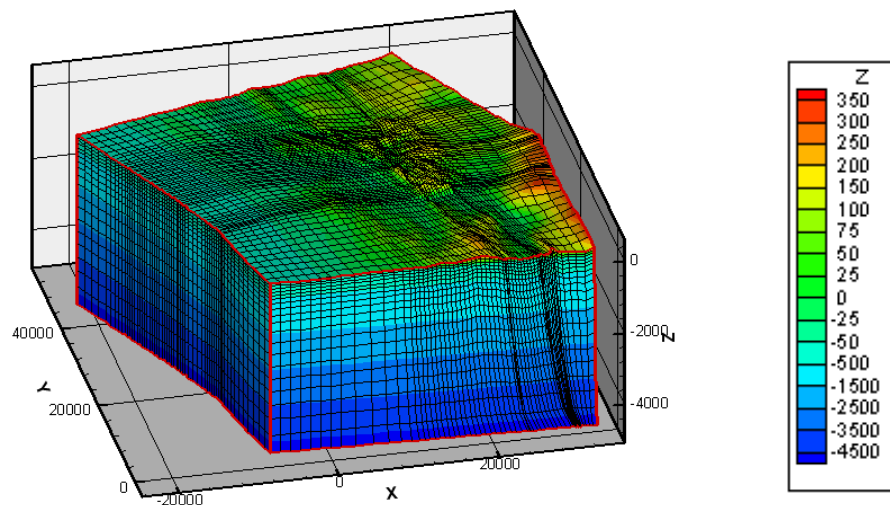


低透水性堆積岩の特性評価

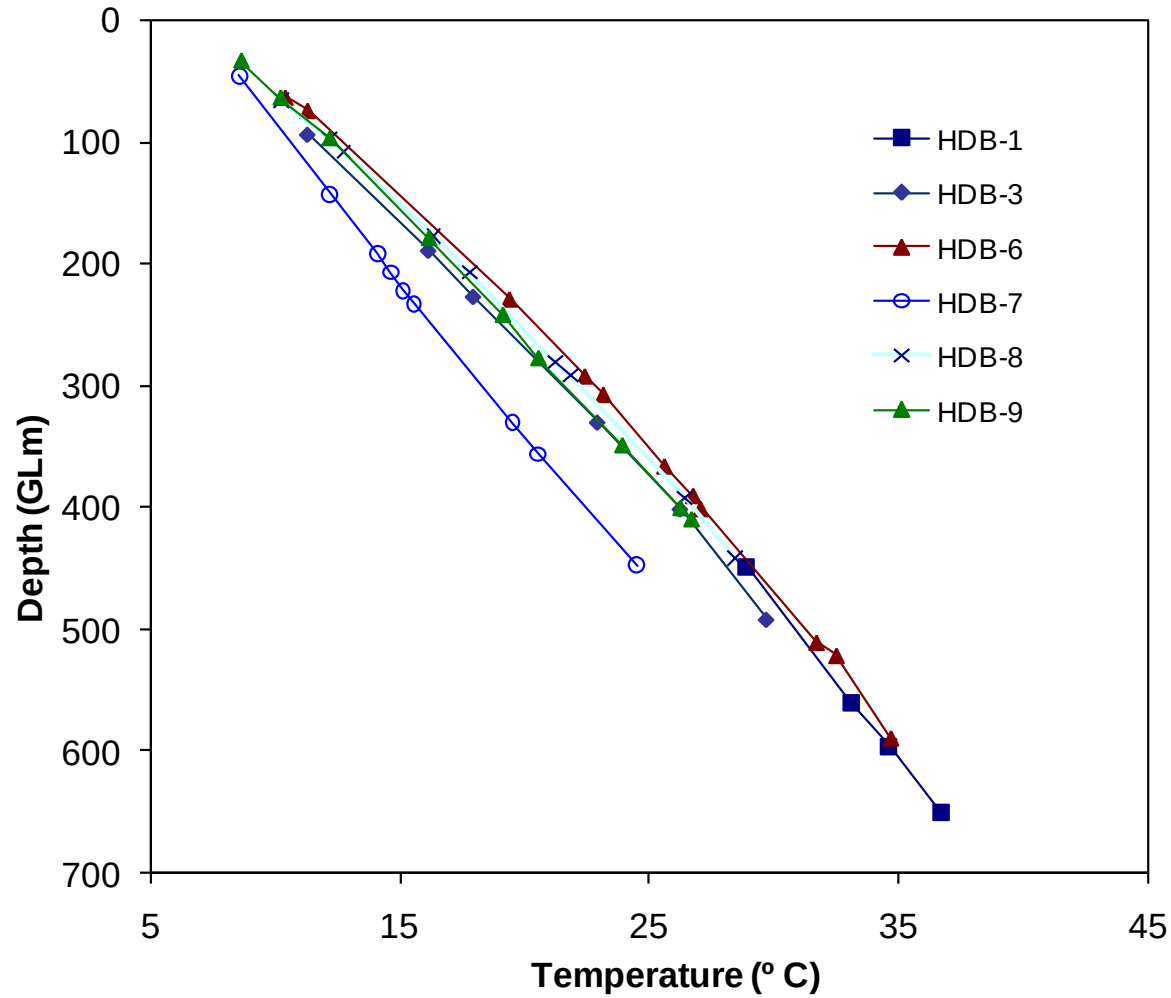
—地下水が何処から何処へ、どれだけの量と速さで流れているのか？—

- 不均質、断層、褶曲、フラクチャー
 - スケールアップは不可能
- 空間的、時間的に限られたデータ
 - 試験時間が長い(low K)
 - 大きなスケールの試験が困難
- 異常高圧
 - 地形
 - Paleo pressure
 - オーバーバーデン
 - ガスの発生

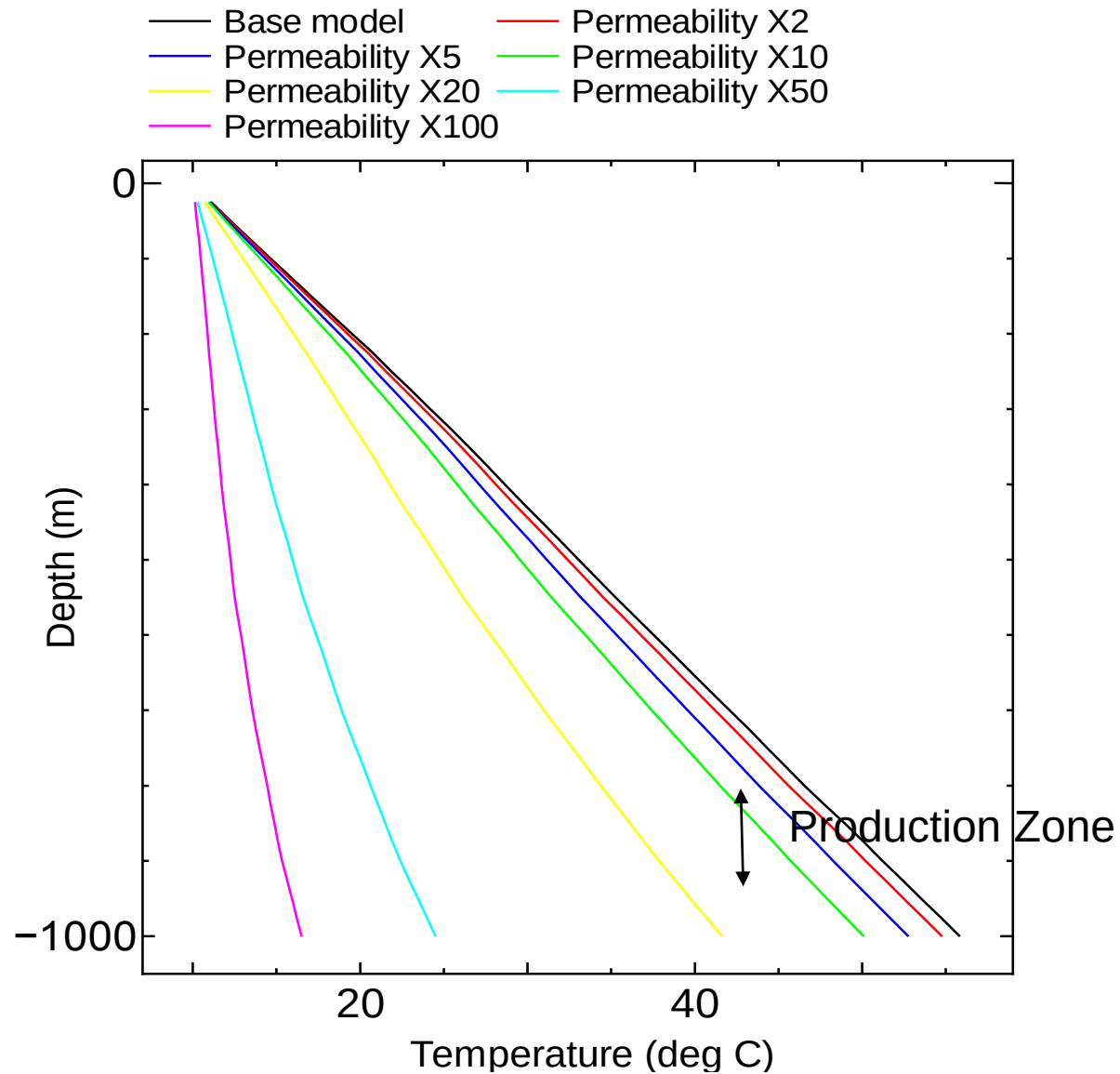
幌延水理地質モデル



HDB孔の温度分布



豊富温泉データ

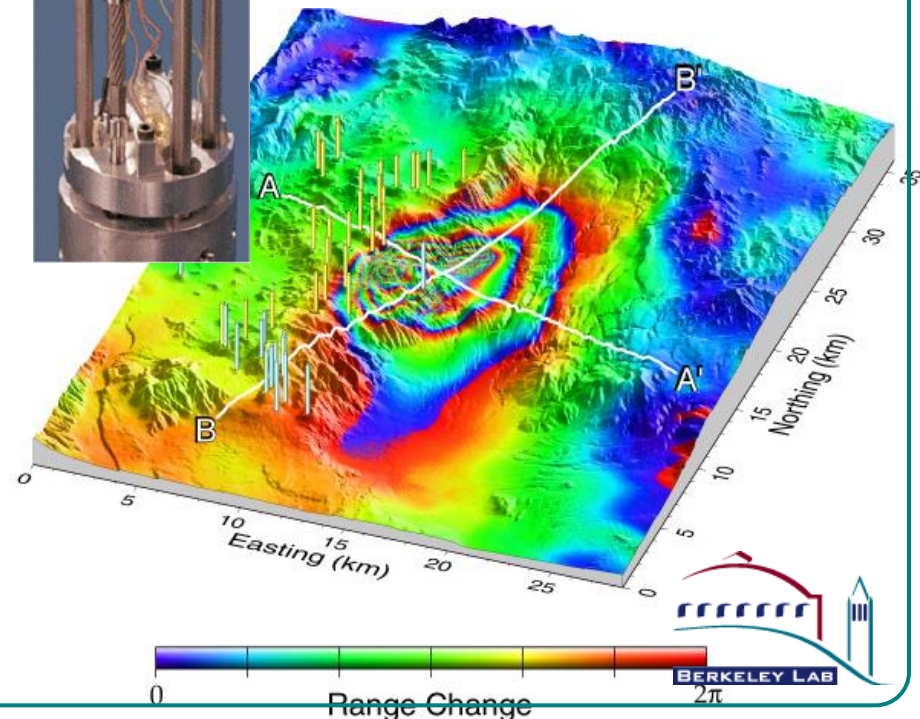
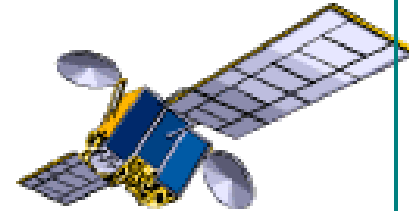


期待される技術

- 長期、広範囲モニタリング技術
 - MEMS
 - 傾斜計
 - ワイヤレス技術
- インバージョン手法
- Independent lines of evidence

表面変位のモニタリング

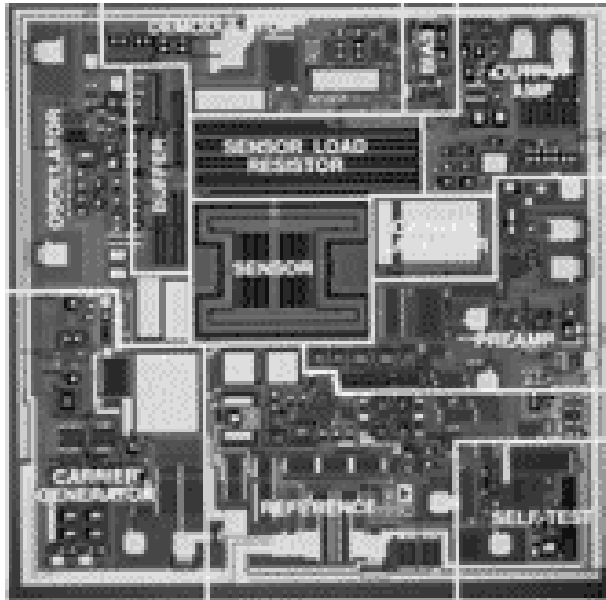
- リモートセンシング的手法
 - 高精度傾斜計
 - GPS
 - 衛星搭載センサー
 - InSAR
 - 重力
- リアルタイム及び長期観測
 - 空間的、時系列的整合と補間
 - ノイズフィルター
 - 可視化
 - コスト、信頼性



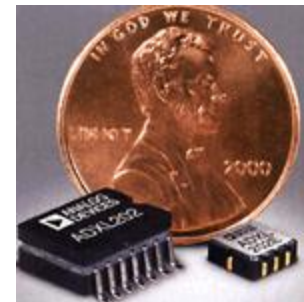
ユビキタス環境モニタリング

- 多点での測定
 - 面的なカバー
- 変化を捉える
 - バックグラウンドデータの取得
 - 精度の向上

MEMS Sensors

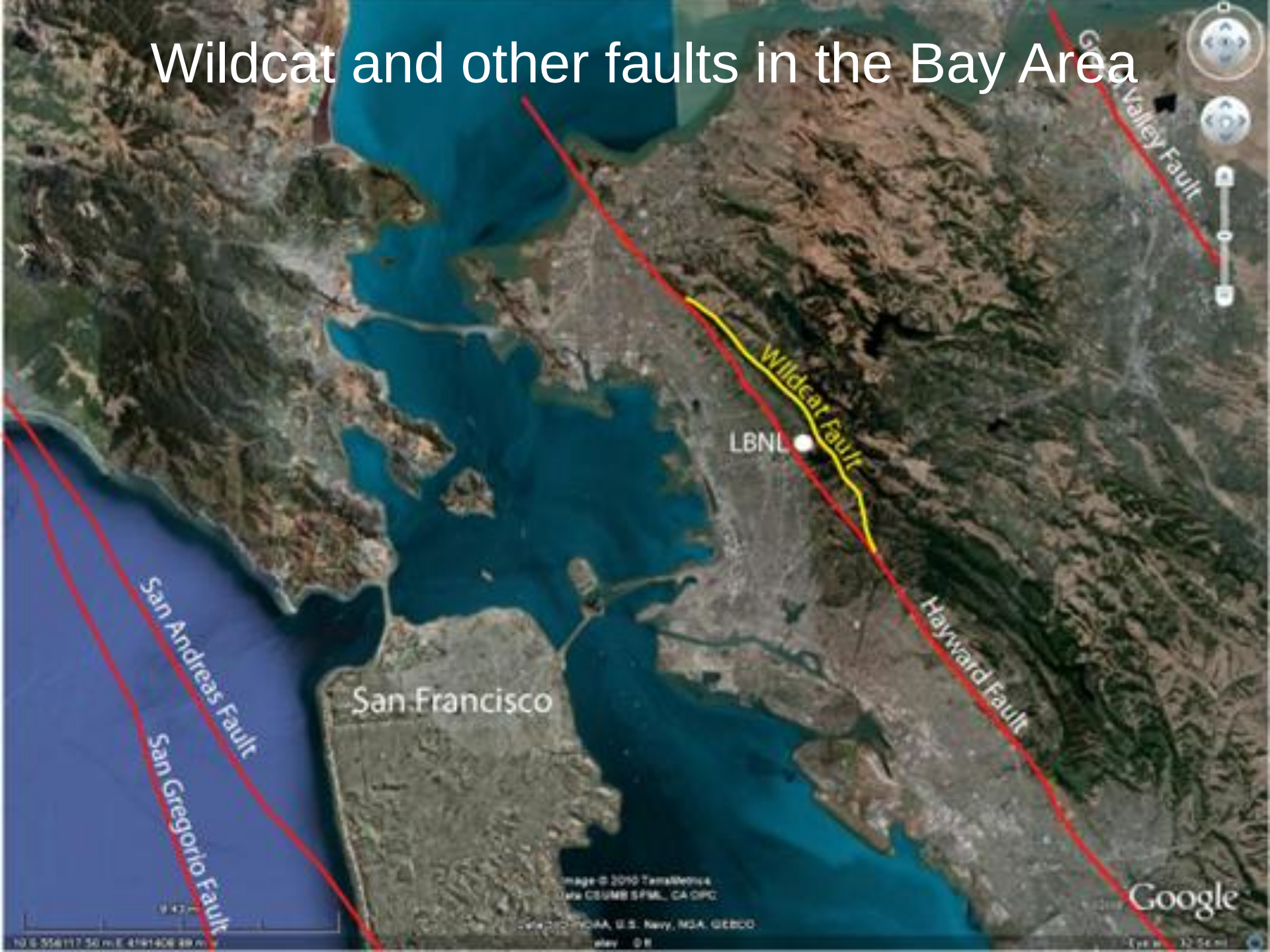


- 安価
- 小さい
- 広いダイナミックレンジ
- 電力消費量が少ない



ワイルドキャット断層の事例

Wildcat and other faults in the Bay Area



3 Reflection Seismics

1 Refraction Seismic

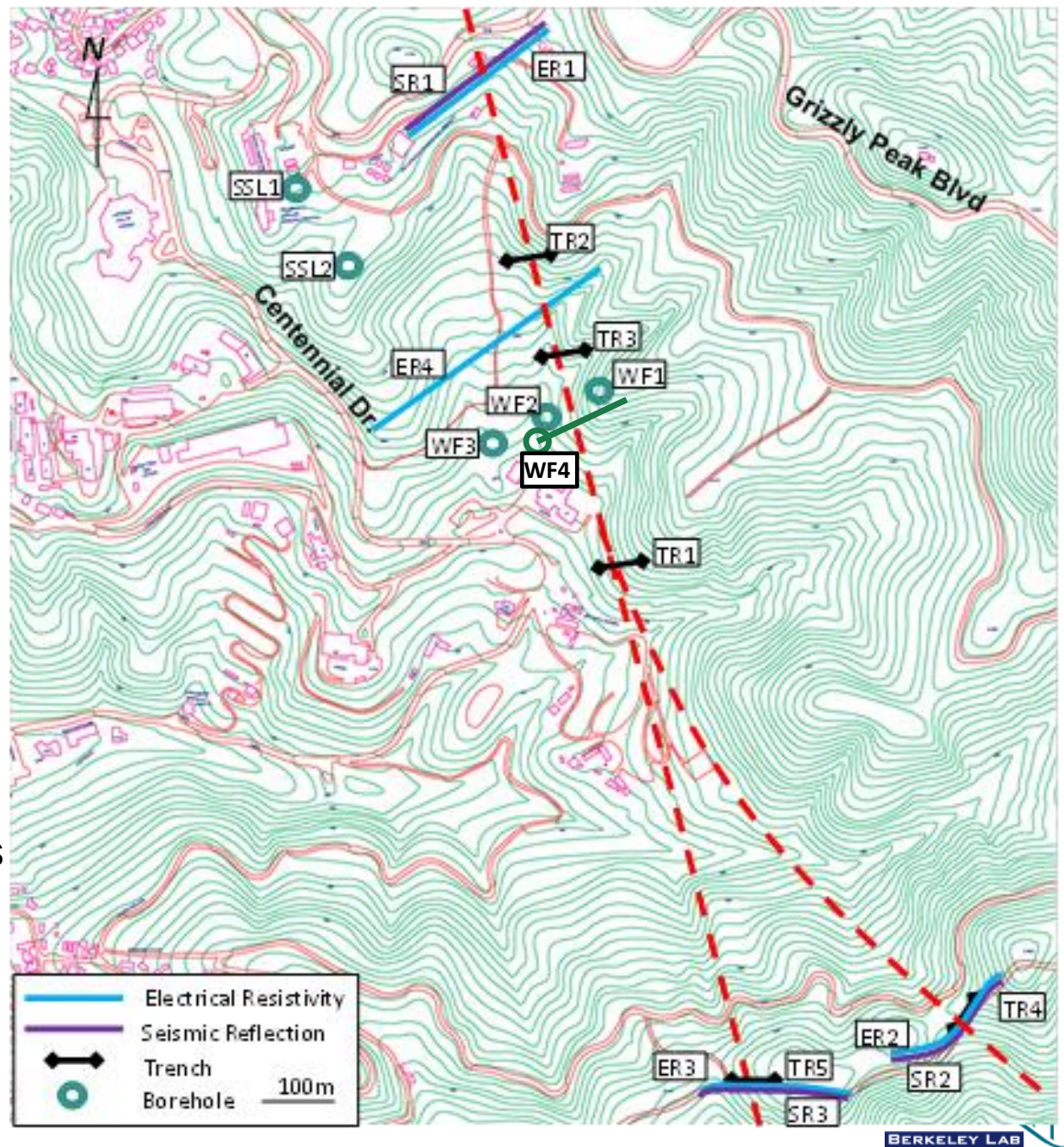
5 ERT Lines

5 Trenches

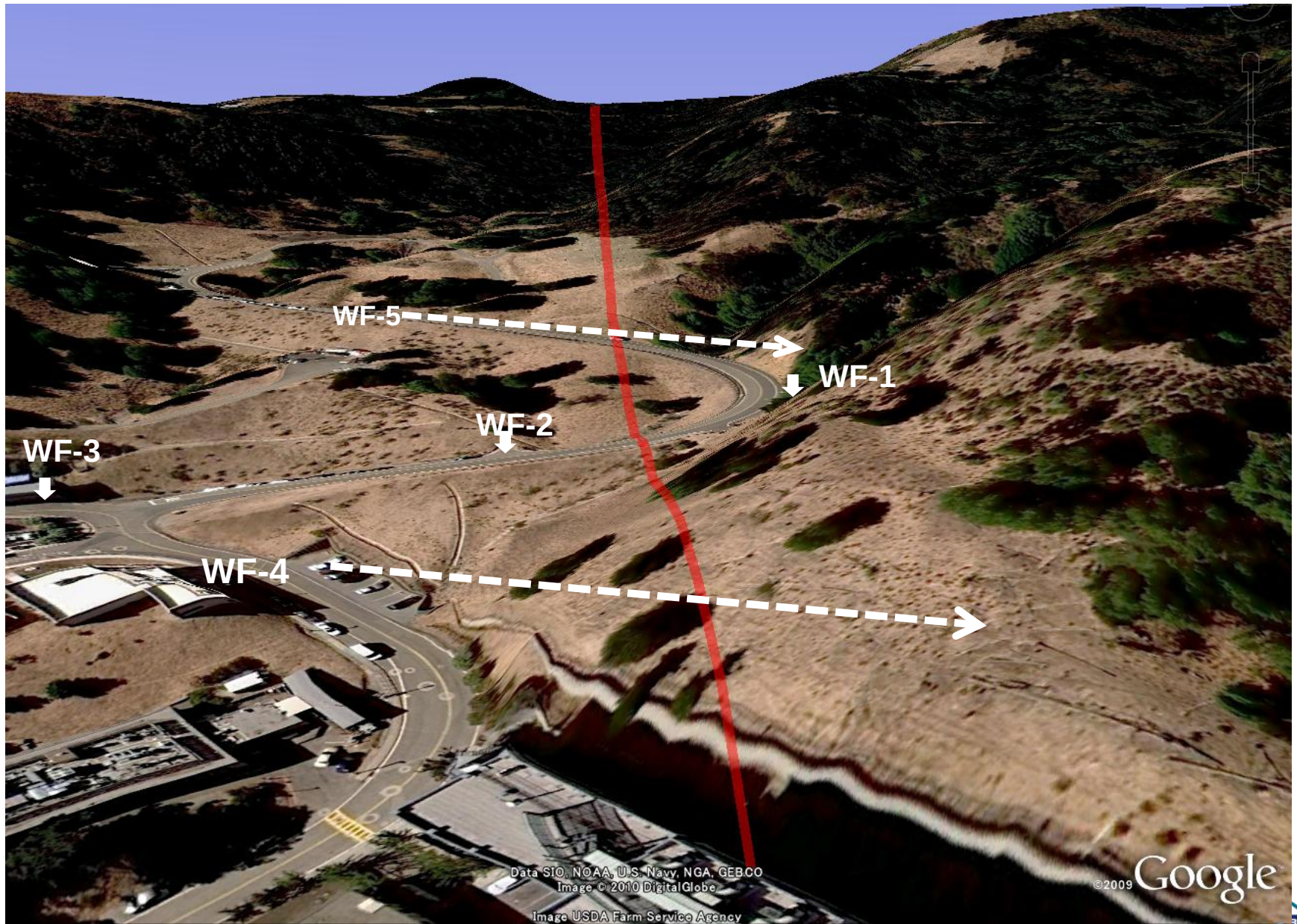
5 Core-drilled
boreholes

5 Borehole Loggings

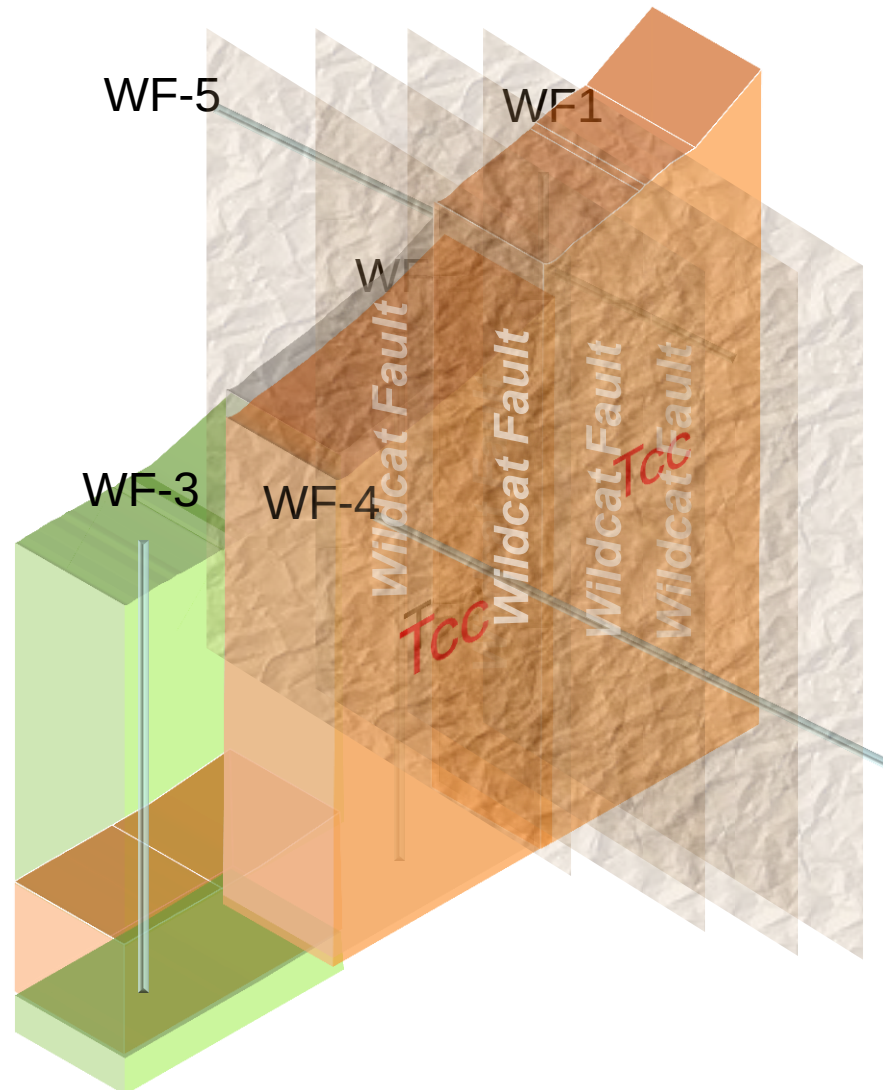
- Caliper
- Acoustic Televiewer
- e-logs
 - + Resistivity
 - + Natural gamma
 - + SP
- Sonic, Suspension Logs
- FFEC Log



ワイルドキャット断層とボアホール



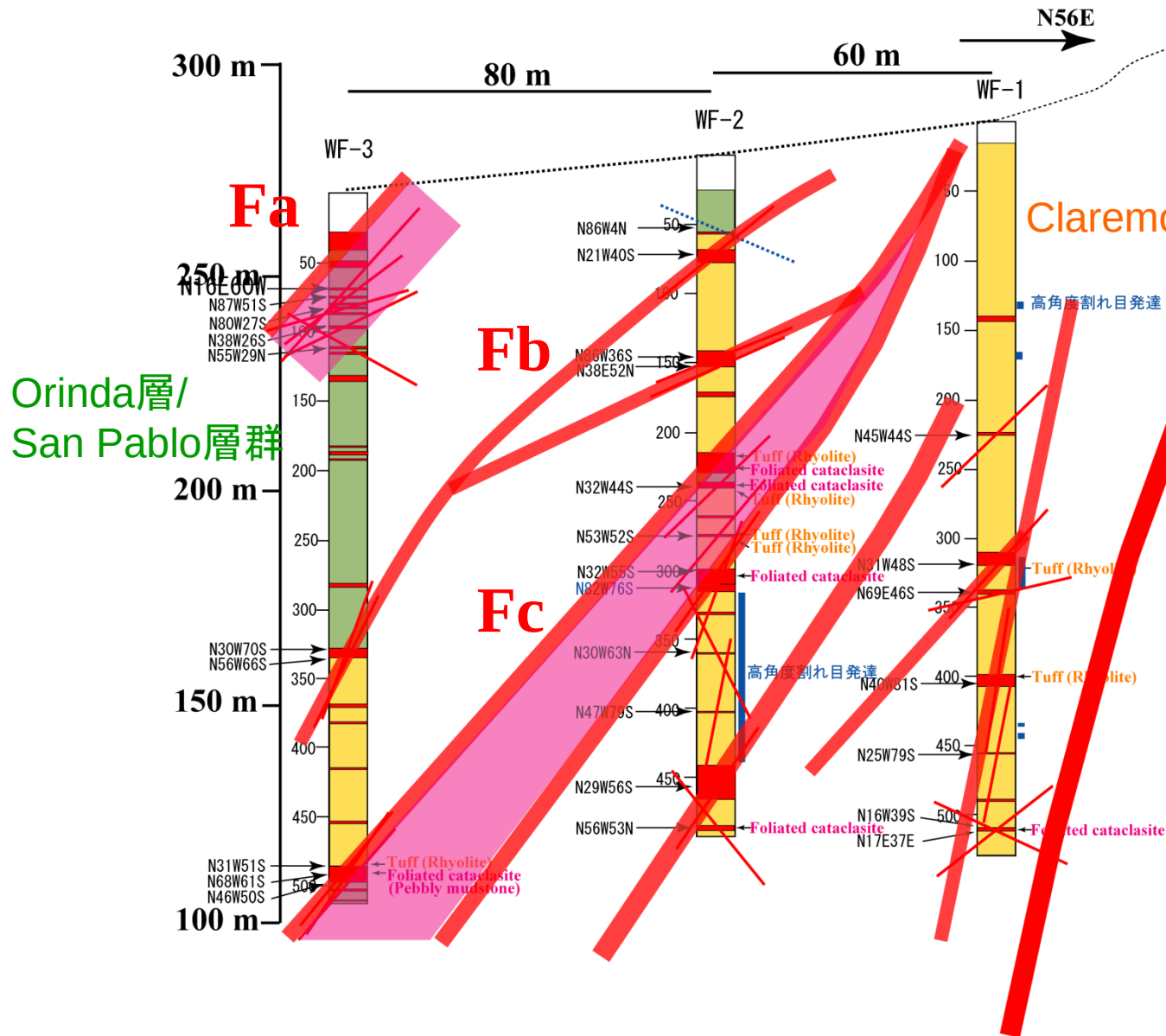
断層モデルの変遷



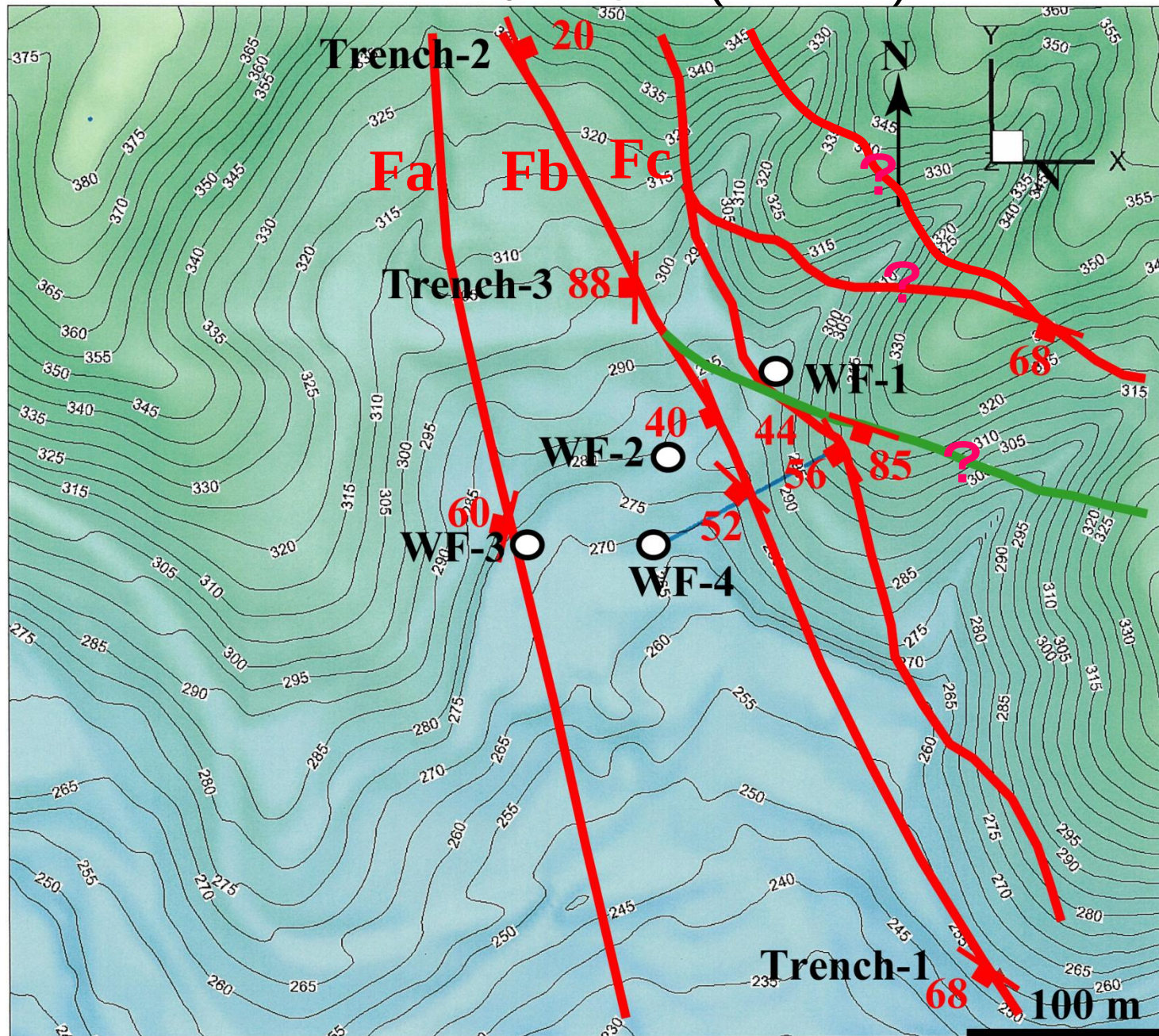
WF1-3断面：断層構造モデル2 (CRIEPI)

N70W68S

Fd?

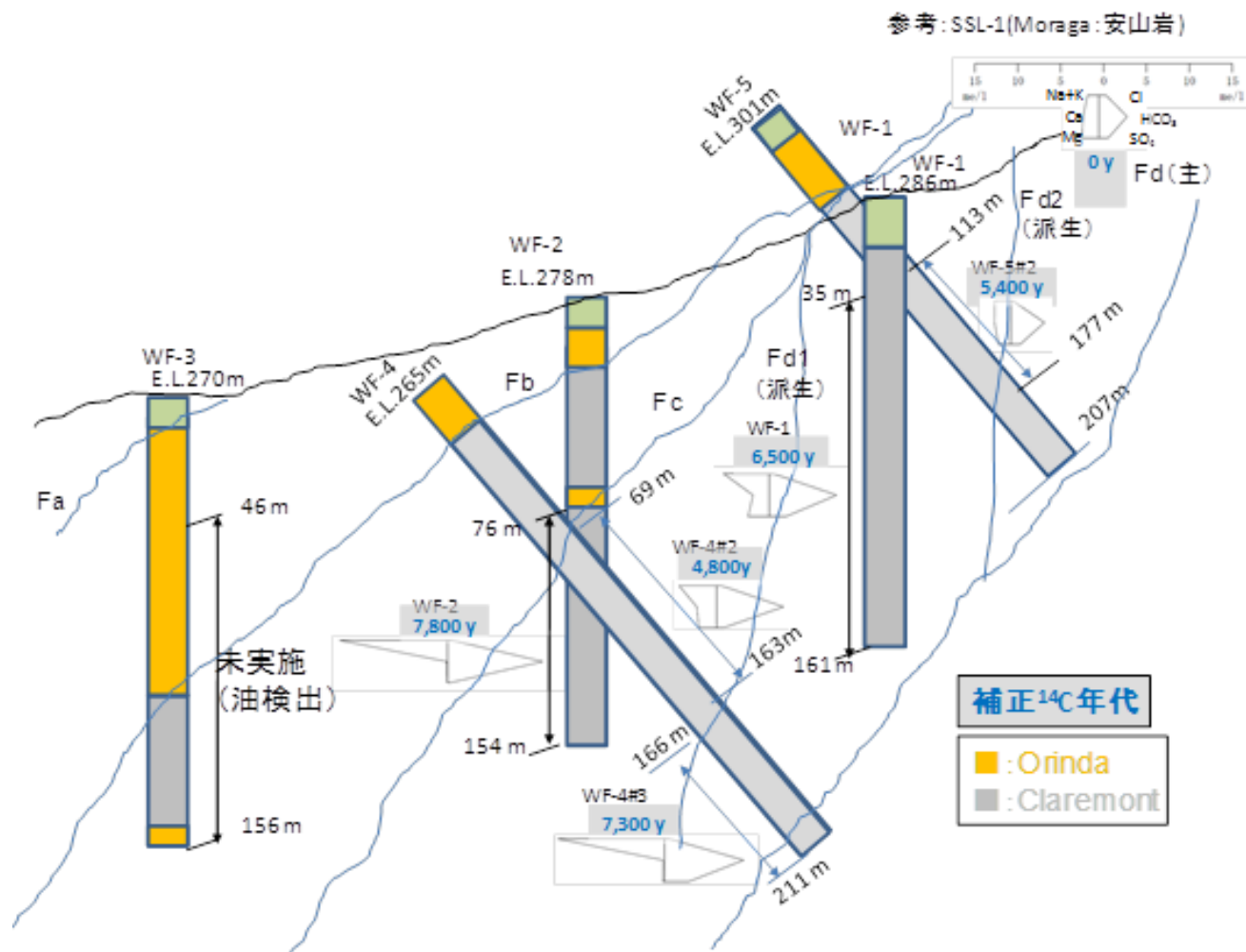


断層分布图 (CRIEPI)



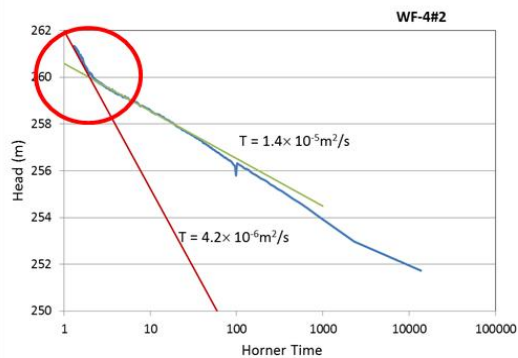
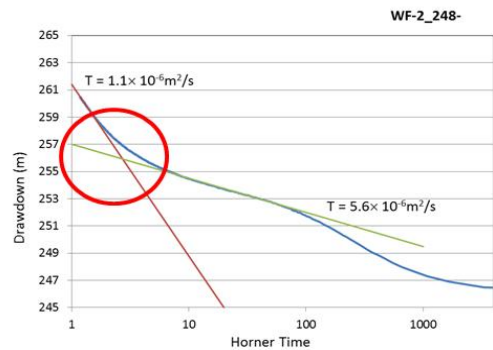
Fd?

^{14}C 年代と水質の進化（ Ca-HCO_3 型 $\rightarrow\text{Na-HCO}_3$ 型）

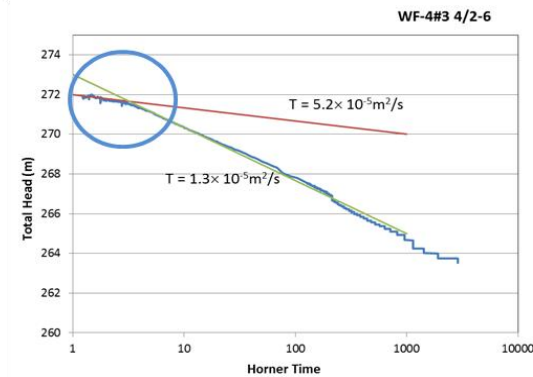
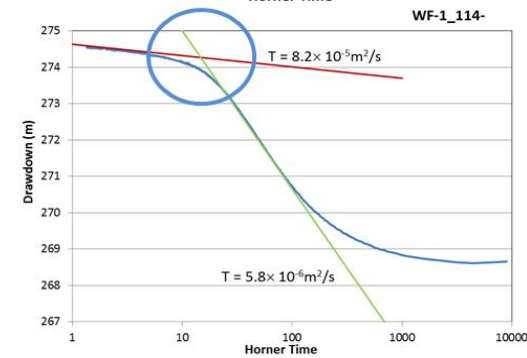
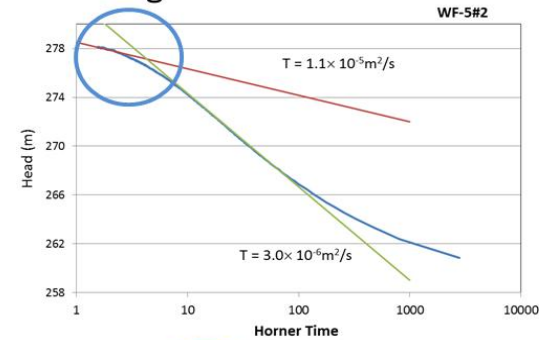


断層の両側の水理性状の違い

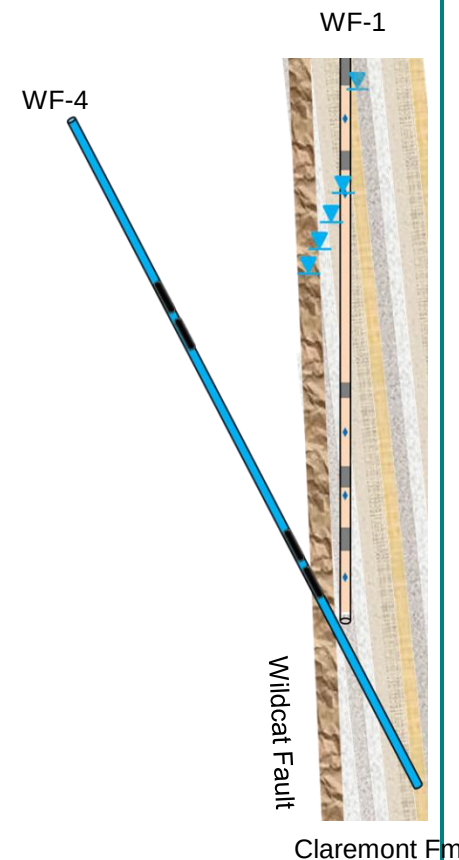
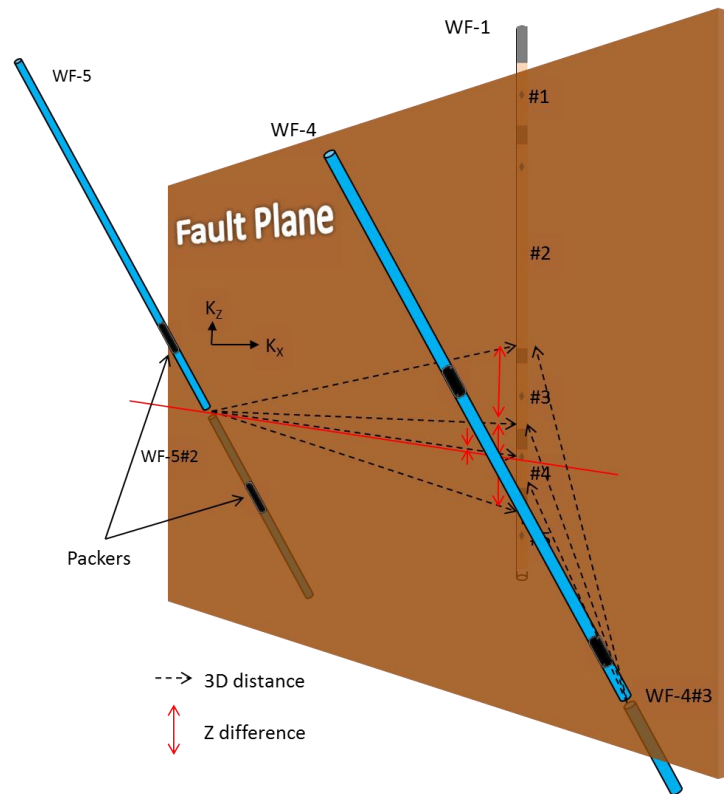
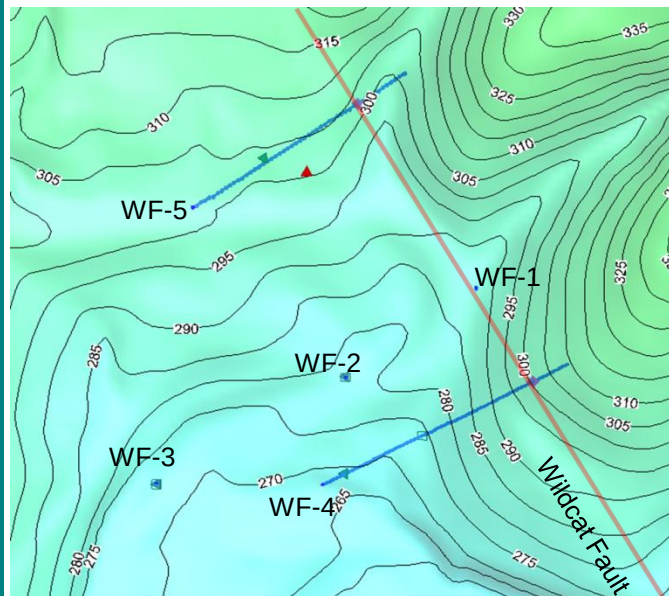
West side: Decreasing K



East side: Increasing K

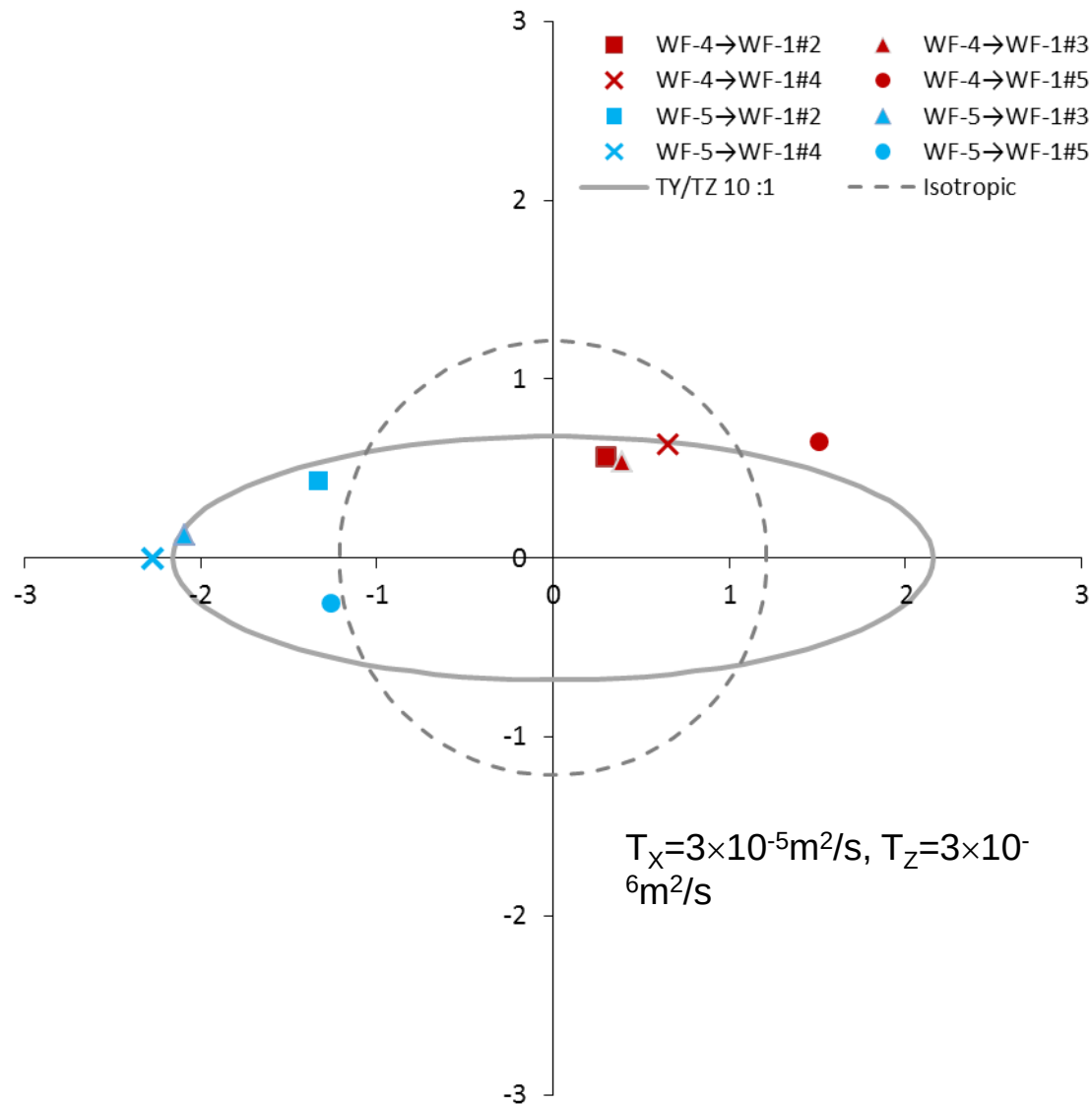


WF-1、4、5孔とワイルドキャット断層面の位置関係

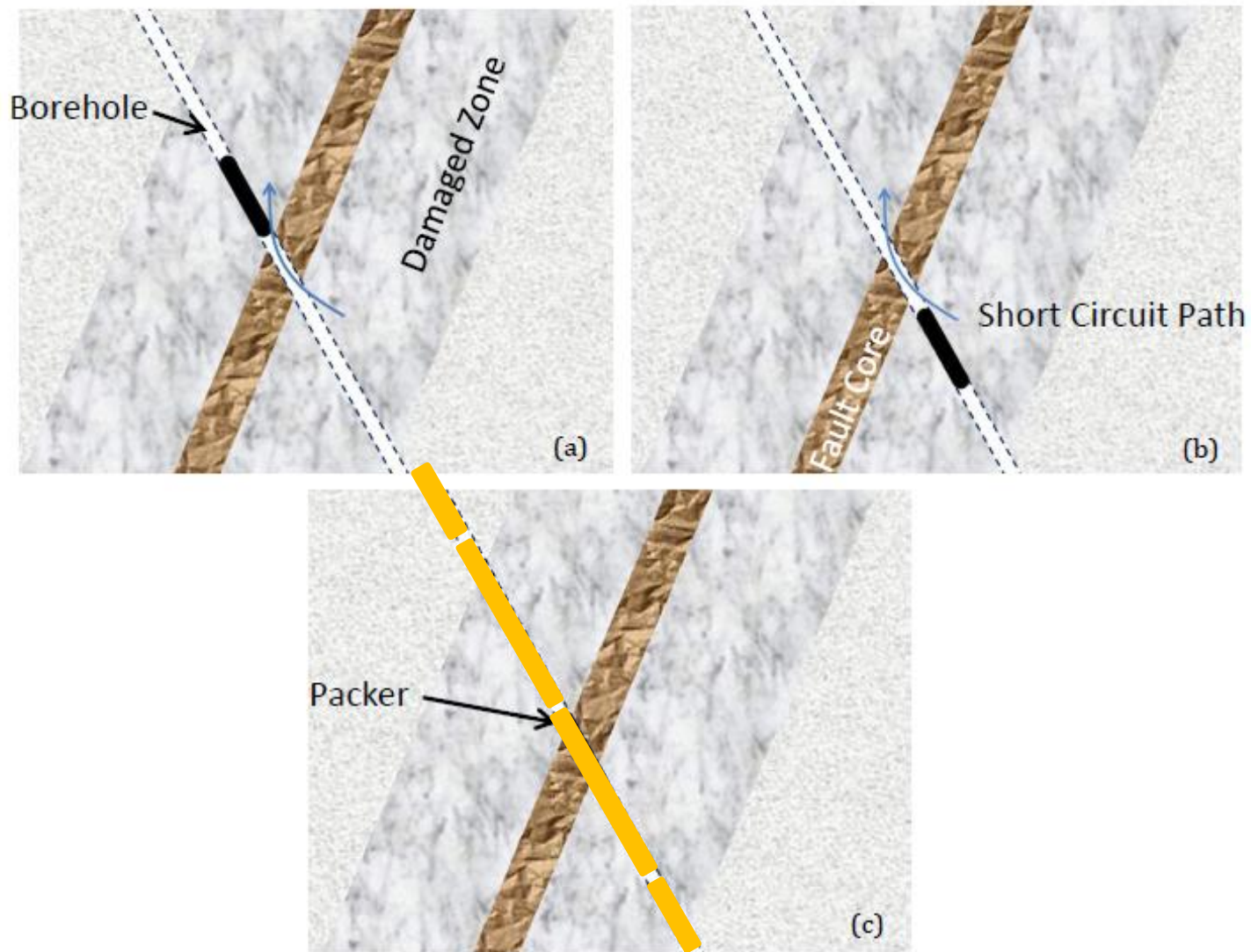


側面図

横滑り断層（ゾーン）の水平方向に卓越した透水性



ボアホールによる水理的短絡

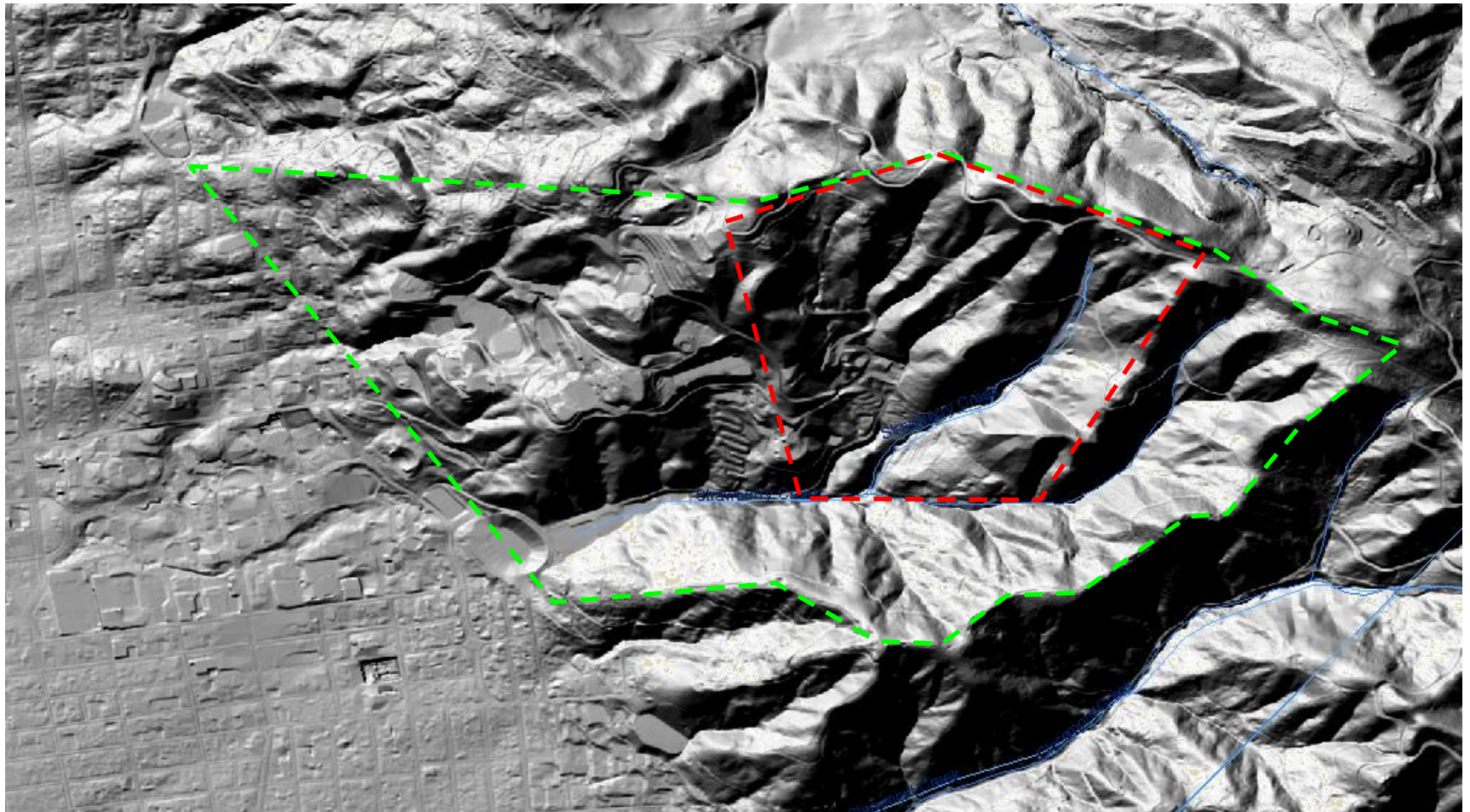


ボアホールシーリング、モニタリングシステム

- ボアホールの連続的シーリング
- 全て同一セクション(3.3m)
- 全周平坦な表面
- 全体的に水と同比重
- 知的センサーのデージーチェーン
- HQパイプを通して設置
- 水を使って加圧

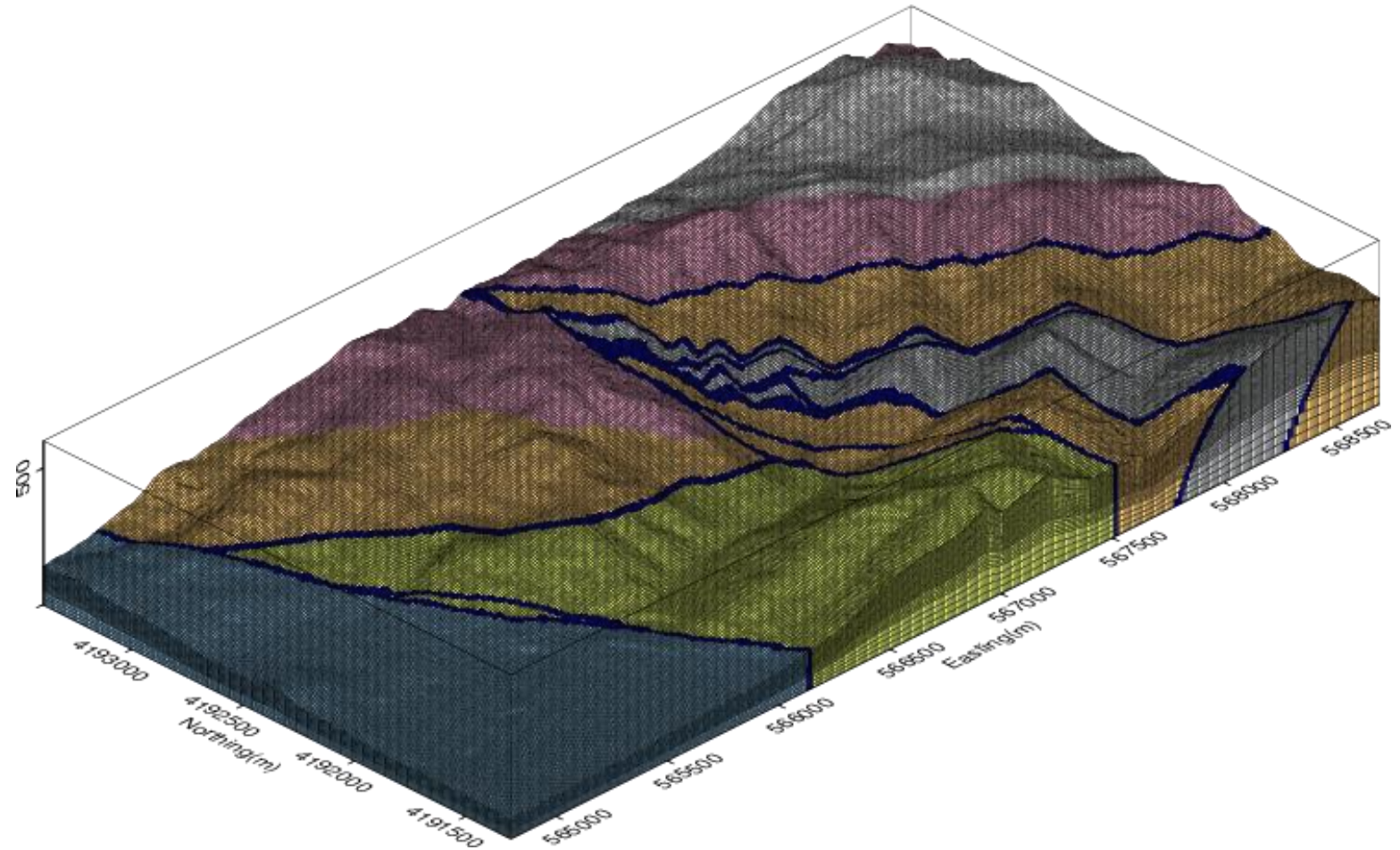


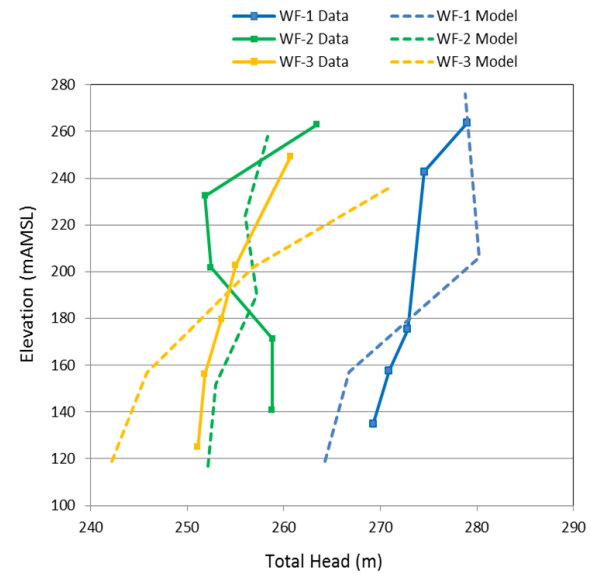
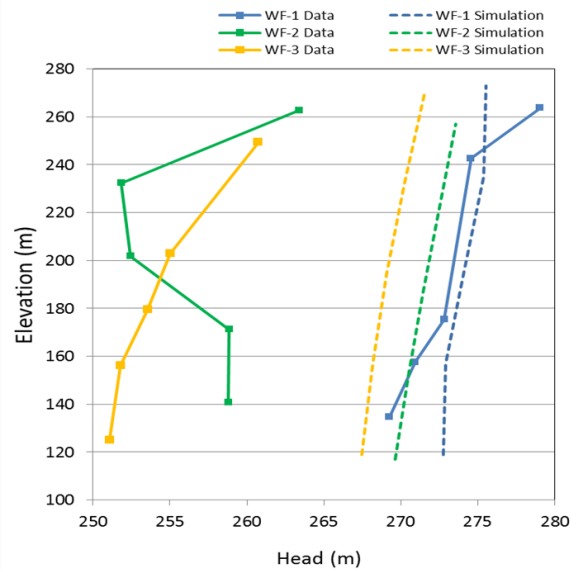
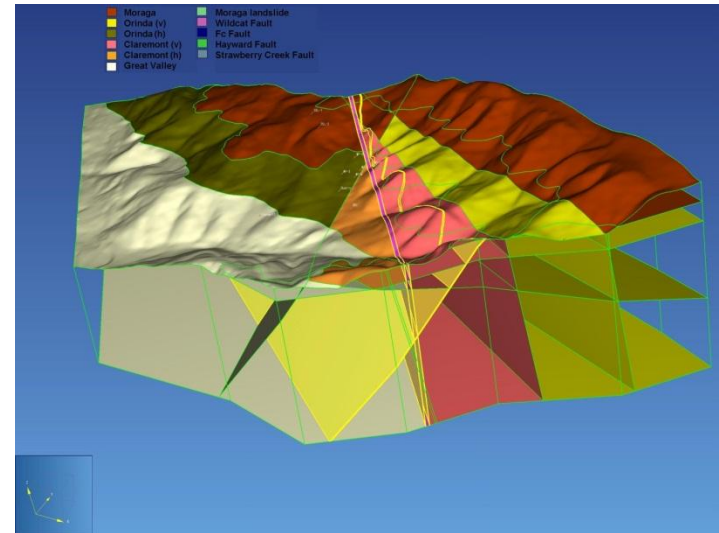
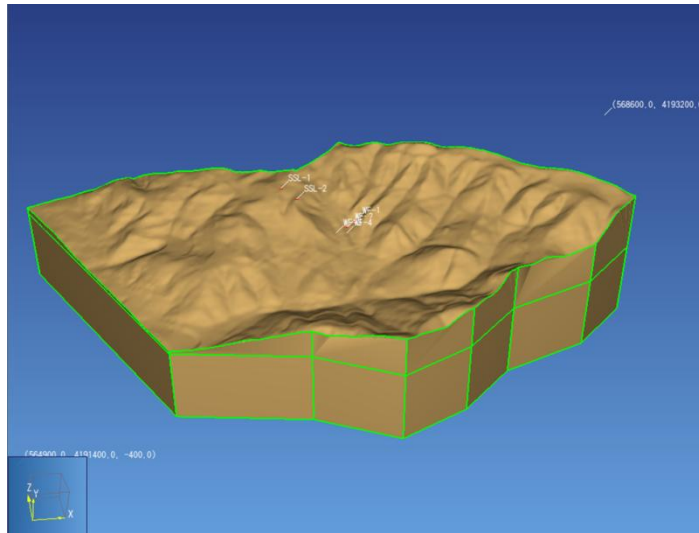
地形図とモデル境界



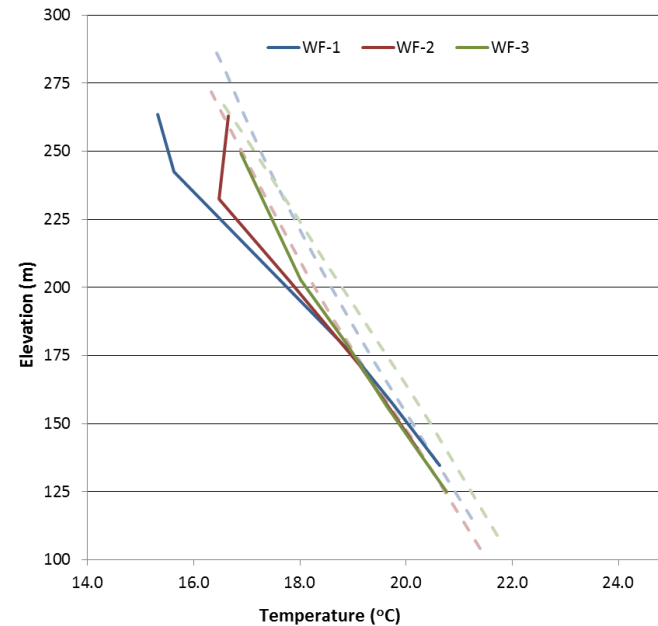
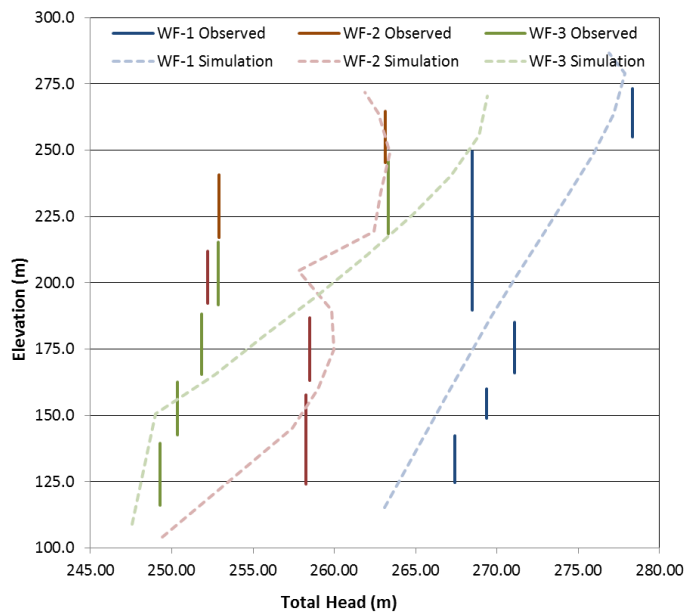
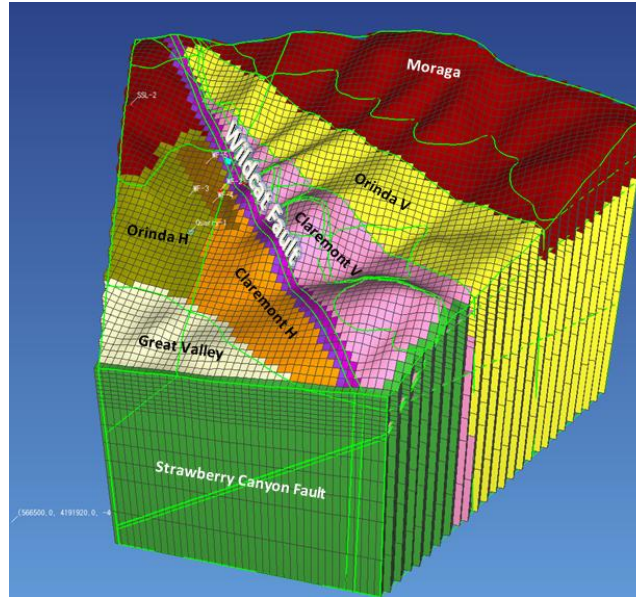
Full Model
Sub-model

Hydrogeologic Model by CRIEPI

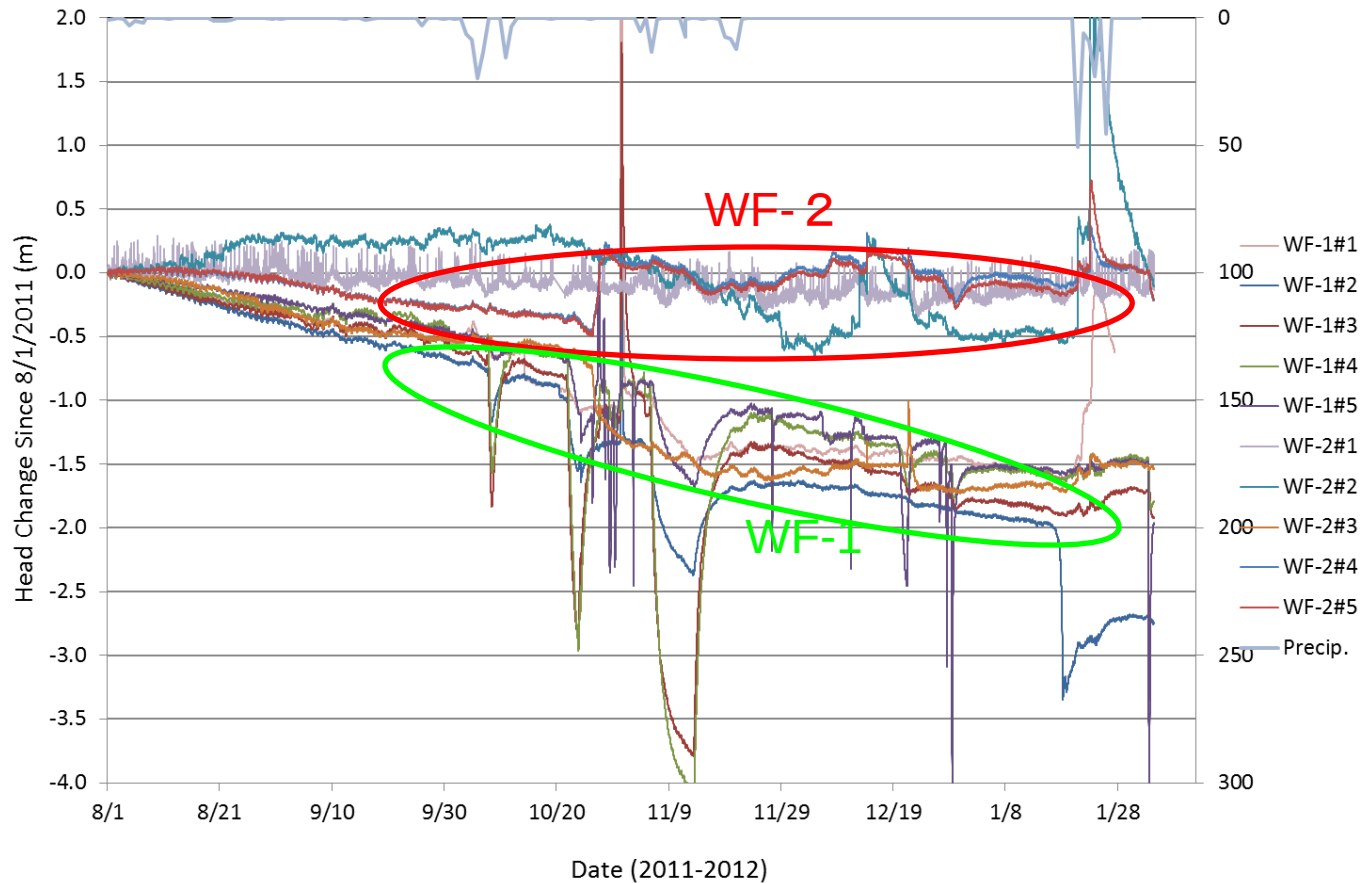




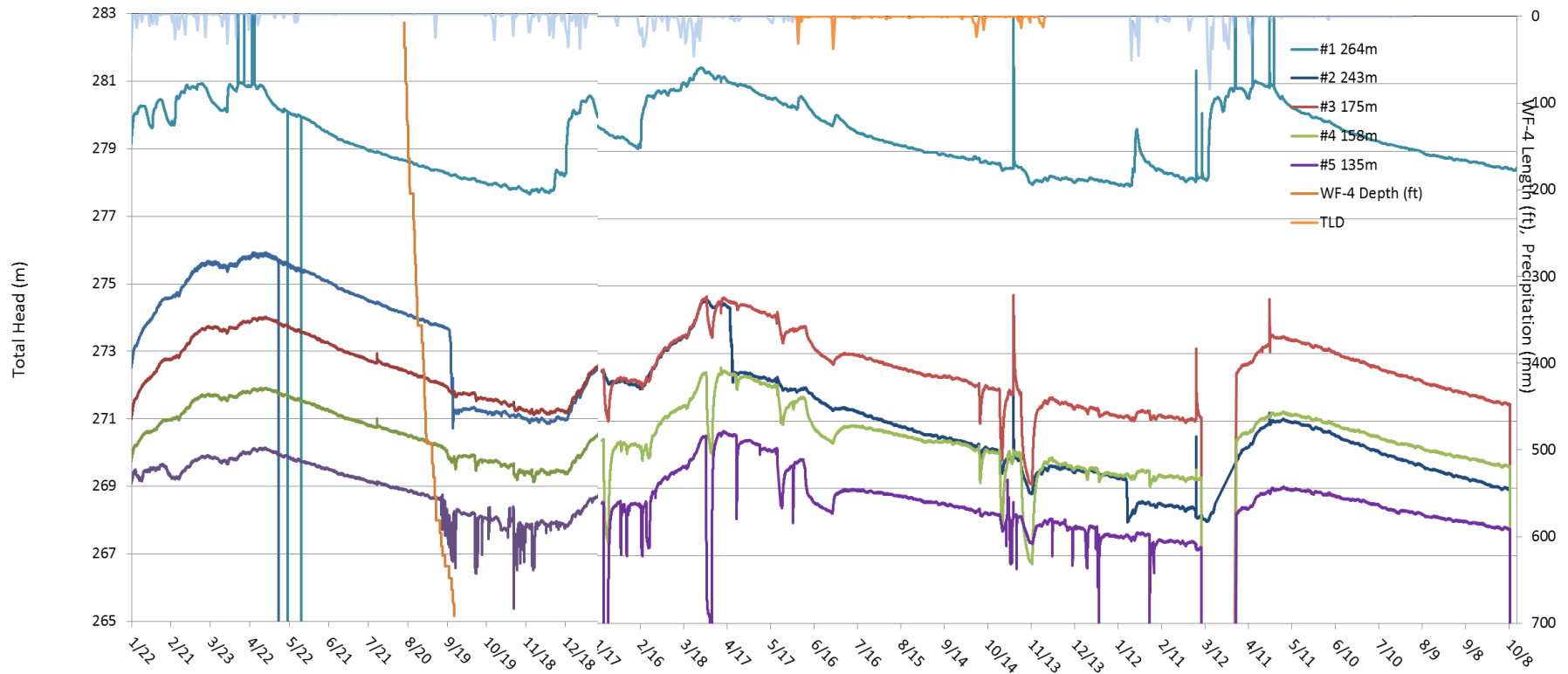
2 相流、温度-圧力連成サブモデル



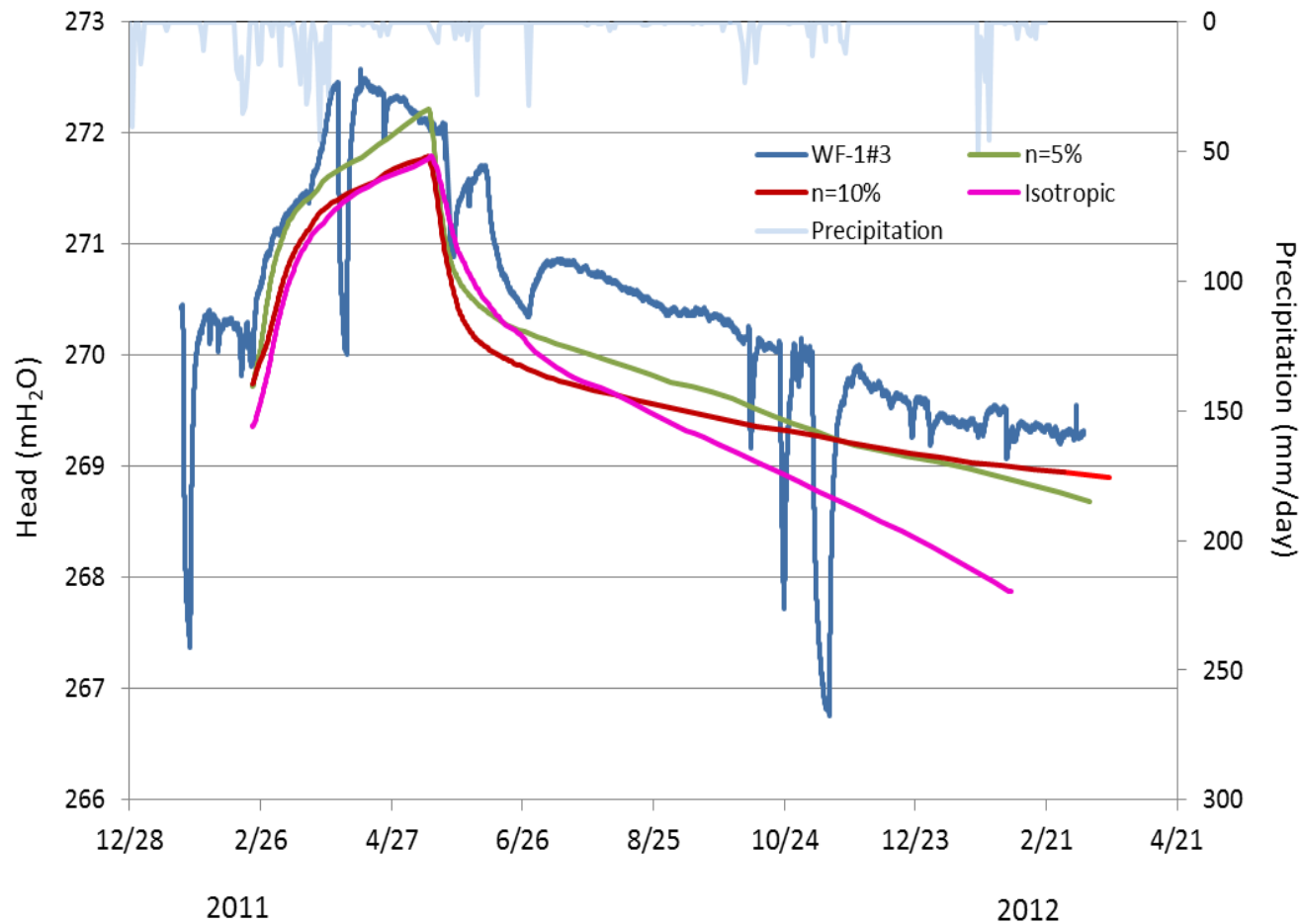
長期モニタリングから推定される水理系統の区分



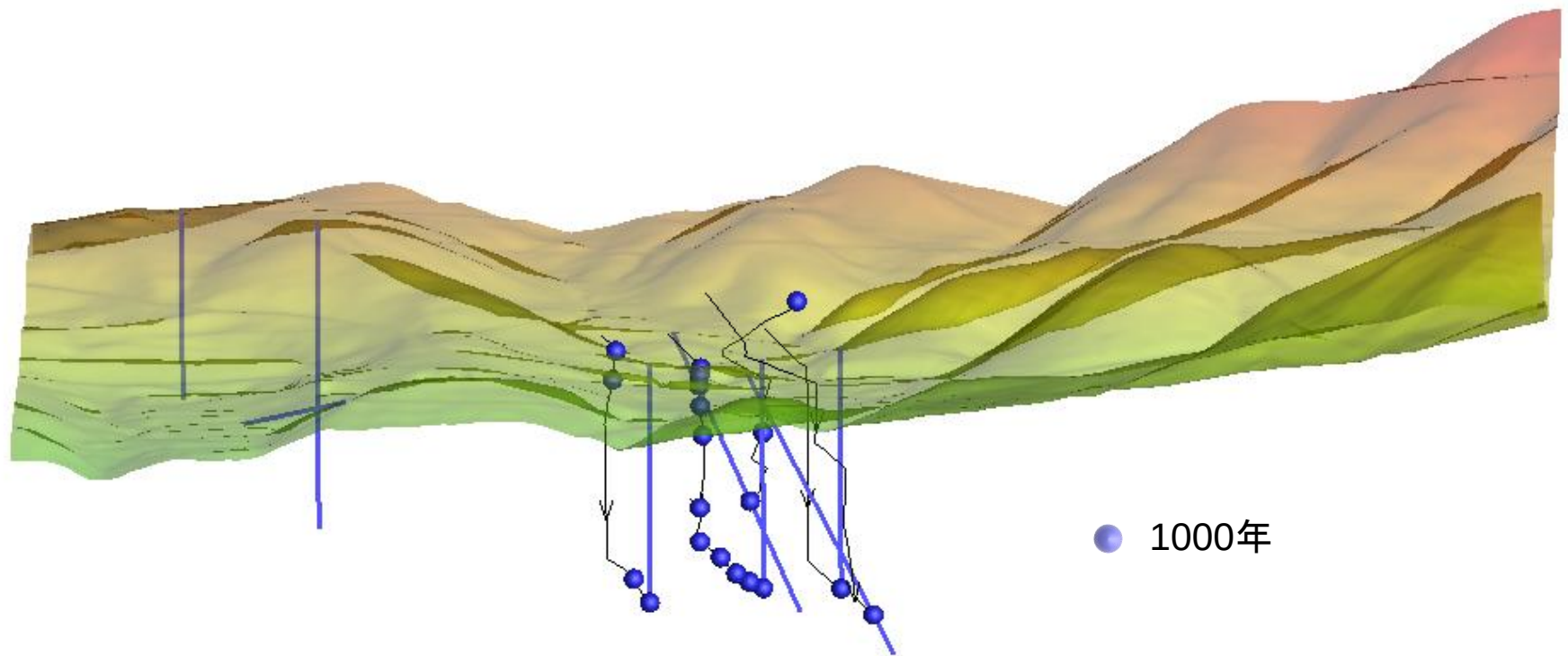
Long-term Monitoring (WF-1)



Dry-Season Head Decline and Model Calibration



粒子追跡法による移行時間



Now what?

- キャリブレーションで終わらせない
- 予測モデルが必要
- 大スケールのデータが必要
- モデルの検証が必要

Wildcat断層水理

- トレンチ調査、物理探査には限界
- 若い断層は粘土ガウジが無い
- 複数の断層面、複数のステージで動いた可能性
- 主断層面の位置には複数の説
- 断層はサンドイッチ構造
- 10 : 1の水平方向の透水異方性
- 長期水理試験が重要
- 連続ボアホールシーリングシステムの開発
- 長期モニタリングによる大スケールのパラメーター推定

Take Home Messages

- マーフィーの法則!
- 既存情報、先入観を検証せよ
- 特性評価プロジェクトは最適化問題
- 時間を掛ける (>100年)
- スケールアップは不可能
 - DFN?
 - 森を見よ
 - 大きなスケールの試験/観測を行う