



地層処分技術に関する研究開発報告会 -第2次とりまとめ以降の研究開発の進展と今後の展開-

地質環境の長期安定性に関する研究

平成27年7月14日

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター
地層科学研究部 次長
梅田 浩司**

- ・ **地質環境の長期安定性に関する研究の概要**
- ・ 第2次とりまとめ以降の研究開発成果
- ・ 土岐地球年代学研究所について
- ・ まとめと今後の取り組み

地層処分の安全確保の考え方と長期安定性研究の必要性

考慮すべきわが国の地質環境の特徴

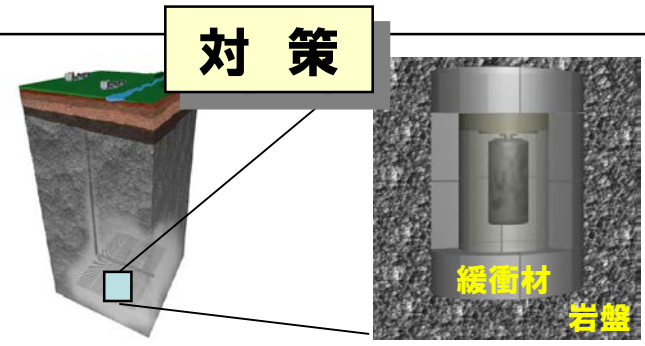
環太平洋変動帯に位置
噴火・地震など地殻変動が活発

・生活環境との離間距離の短縮
(接近シナリオ)
例) マグマ貫入→廃棄体の地表放出

地層処分の長期的な安全性への影響

・自然現象による地下水の変化
(地下水シナリオ)
例) 地殻変動→山地形成→流速増大

地層処分システムの性能が著しく損なわれないよう、
長期にわたって安定な地質環境を選定
(サイト選定)



将来の自然現象の変動を見込んで処分施設を適切に設計・施工および長期的な安全性を評価
(工学的対策・安全評価)

① 調査技術の開発・体系化
過去の自然現象の記録や現在の状況を調査するための体系的な技術の整備

② 長期予測・影響評価モデルの開発
将来の自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価するための手法の整備

③ 年代測定技術の開発
最先端の機器分析装置による放射年代測定技術(世界初)を含めた編年技術の高度化

- ・ 地質環境の長期安定性に関する研究の概要
- ・ **第2次とりまとめ以降の研究開発成果**
- ・ 土岐地球年代学研究所について
- ・ まとめと今後の取り組み

① 調査技術の開発・体系化

⇒ 概要調査等で必要となるデータを取得するための技術

- 変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術
- 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術
- 地殻内のマグマ・震源断層等に係る調査技術
- 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術 等

通常の学術研究とは異なるアプローチ:

(例) 非火山地帯での将来の噴火の可能性

② 長期予測・影響評価モデルの開発

⇒ 変動シナリオに基づく安全評価に必要な技術

- 地形変化シミュレーション技術
- 断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価技術
- 確率論的アプローチによる火山活動の予測モデル
- 地質環境長期安定性評価確証技術開発(METI地層処分技術調査等事業)等

防災の予測とは異なる対象期間:

(例) 安全評価期間は数万~100万年

③ 年代測定技術の開発

⇒ ①, ②の信頼性を向上するための技術基盤

- 宇宙線生成核種(^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al)年代測定法の実用化
- (U-Th)/He年代測定法の実用化
- K-Ar年代測定法の実用化

変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術

- 低活動性の断層や未成熟な断層等は、空中写真判読のような変動地形学的な手法を適用することが困難。これらの活断層を識別するための調査技術を提示。

① 伏在断層

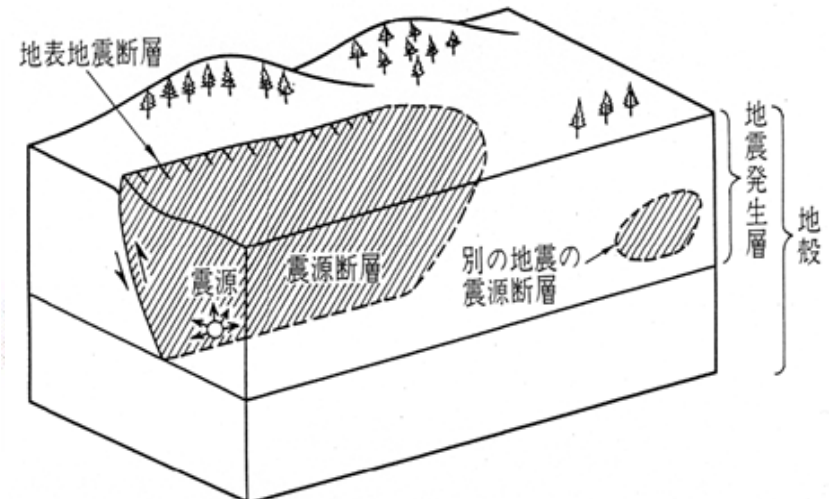
沖積層等に厚く覆われた断層のため、変動地形が地表に現れない断層

② 低活動性の断層

再来間隔が長いため、侵食等によって明瞭な変動地形の特徴を有さない断層

③ 未成熟な断層

震源断層が地表にまで成長していない未成熟な断層



地表にまで断層面が達していない未成熟な断層の例

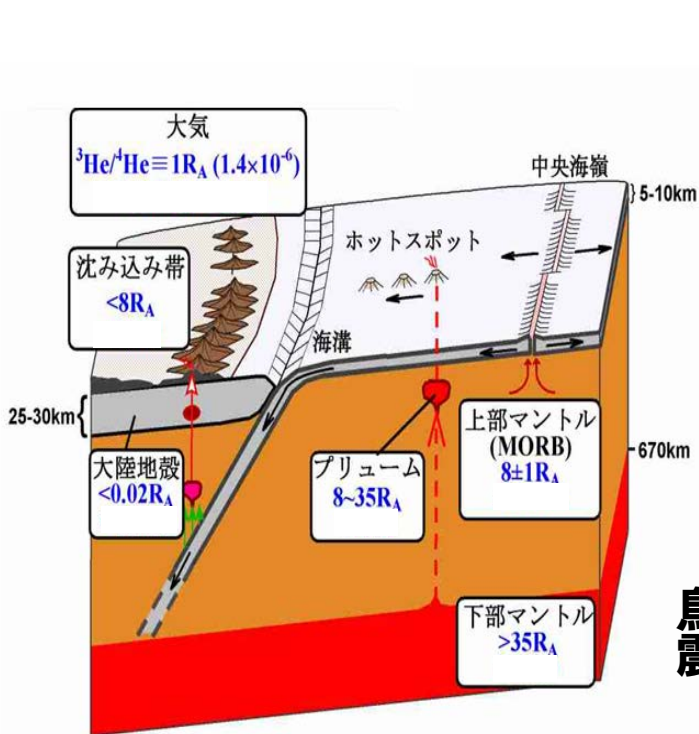
- 空中写真判読等によって、地形発達の原因を考察し、断層が存在する可能性を評価
- トレンチ調査等によって断層の存否および活動性を評価
- 反射法弾性波探査等によって、活断層の存否、形状等を推定

敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド(原子力規制委員会, H25.6)

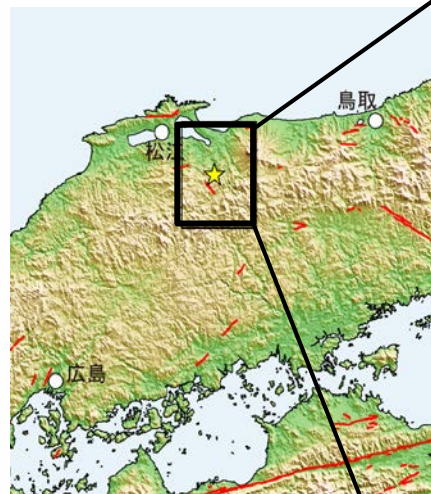
地形、地質、地球物理に加えて地球化学的なアプローチが使えるか？

例えば、Rnガスを用いた活断層調査(加藤ほか, 1981)

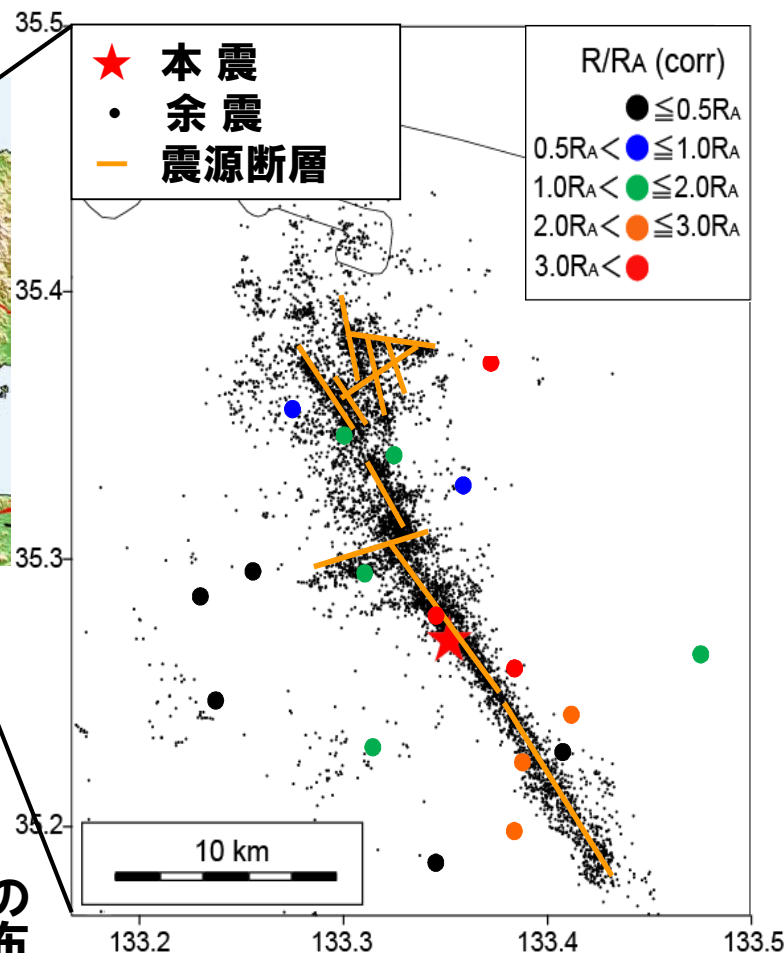
2000年鳥取県西部地震震源域のヘリウム同位体比



地球のHe同位体比(${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比)
(角野ほか, 2005)



鳥取県西部地震
震源と活断層分布



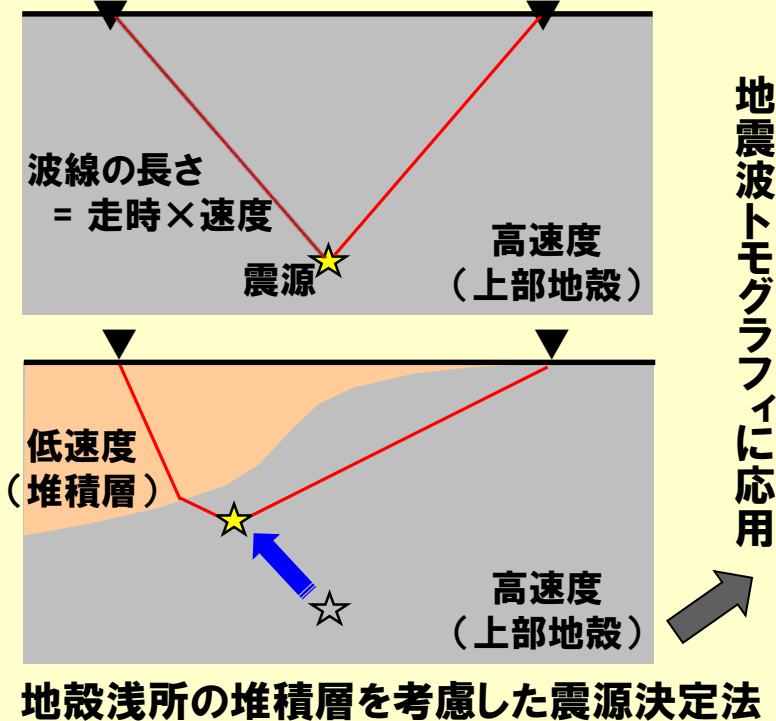
鳥取県西部地震余震域の
He同位体比の分布

- 2000年鳥取県西部地震の震源域で採取した地下水中の溶存ガスのヘリウム同位体比は著しく高い値を示す(マントル起源ヘリウムが断層から放出)。
- 地球化学的手法(He同位体比)は活断層の調査技術として有効である見通しを得た。

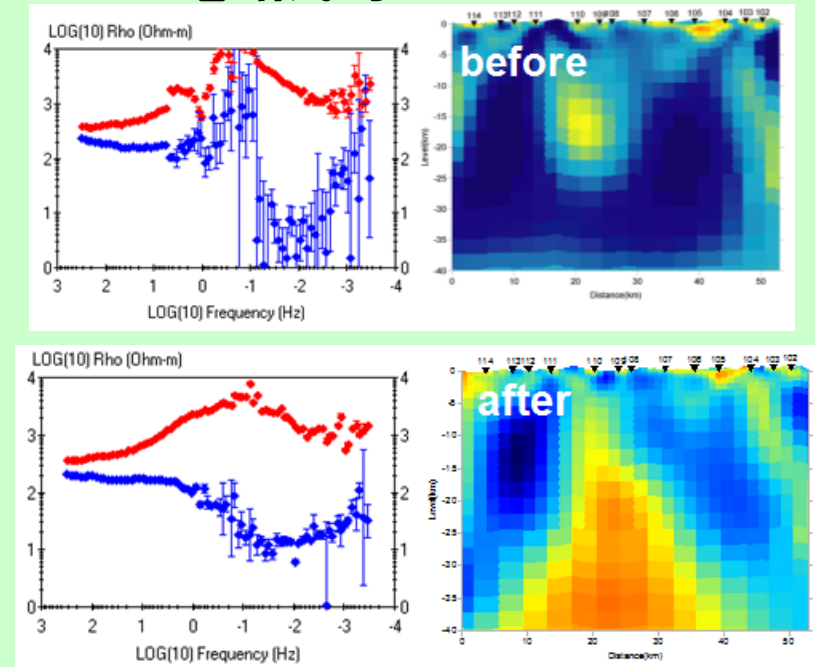
地殻内のマグマ・震源断層等に係る調査技術

- 地層処分システムに著しい影響を与える可能性があるマグマ活動や断層運動等は、概要調査等によって適切に回避することが不可欠。
- 地表踏査では発見できない、地下のマグマ・震源断層等の存否を確認するための地球物理学的手法(精密震源分布, 地殻不均質構造等の把握)を開発する。

地震学的アプローチ

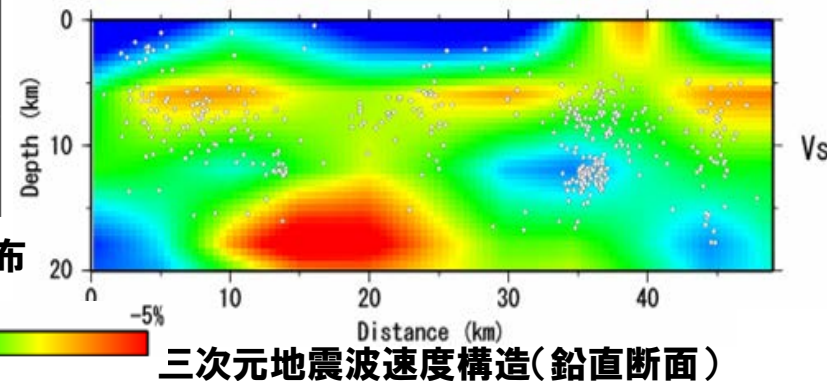
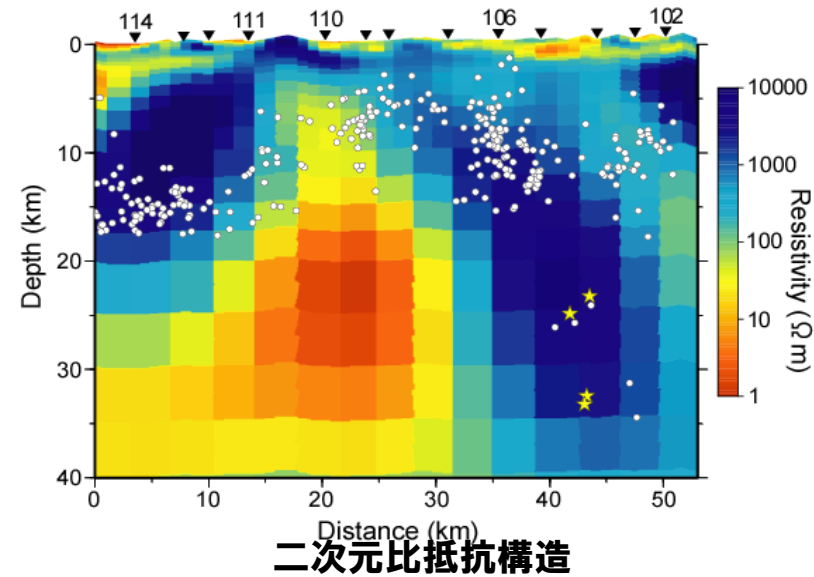
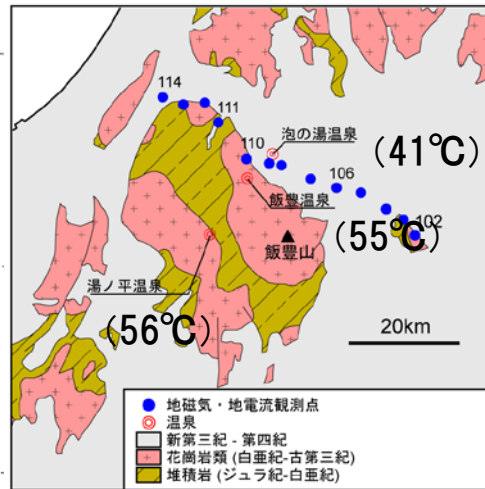
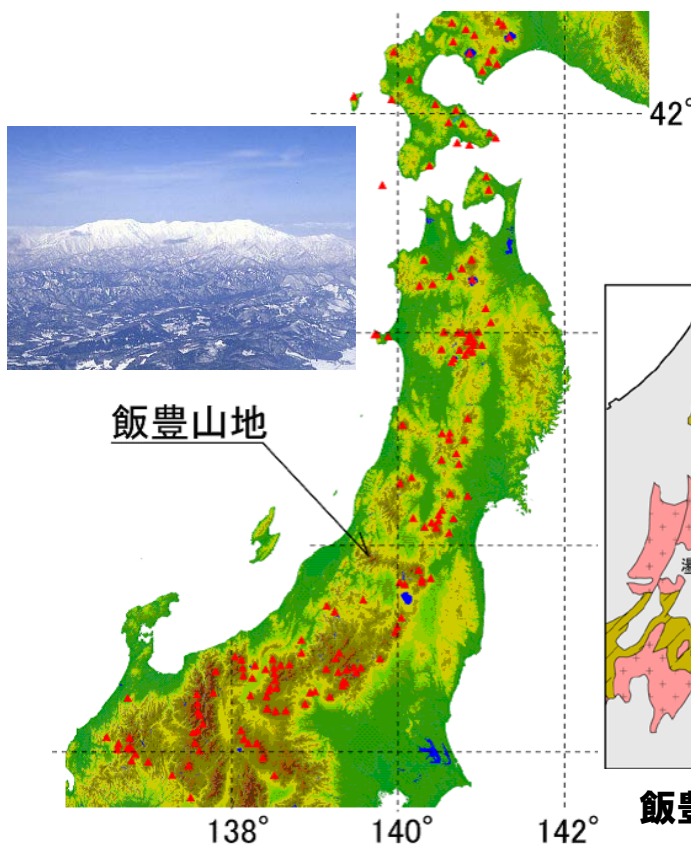


電磁気的アプローチ



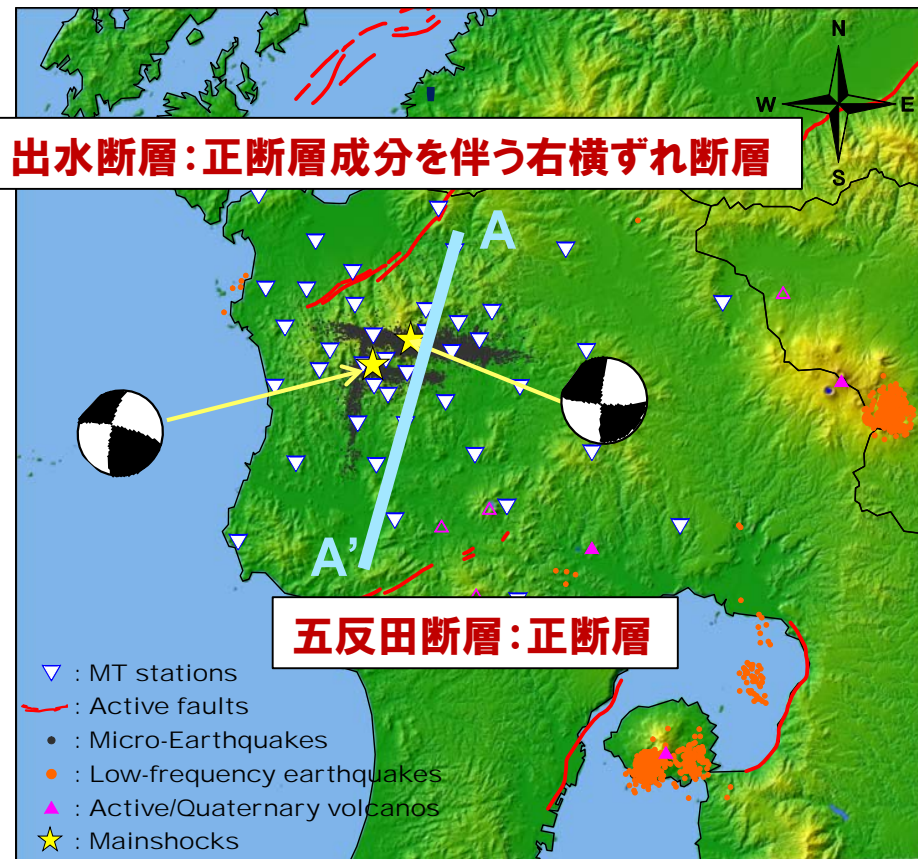
見掛け抵抗と位相の相関によるスタッキング

電磁気学的アプローチによるマグマ・高温流体の推定

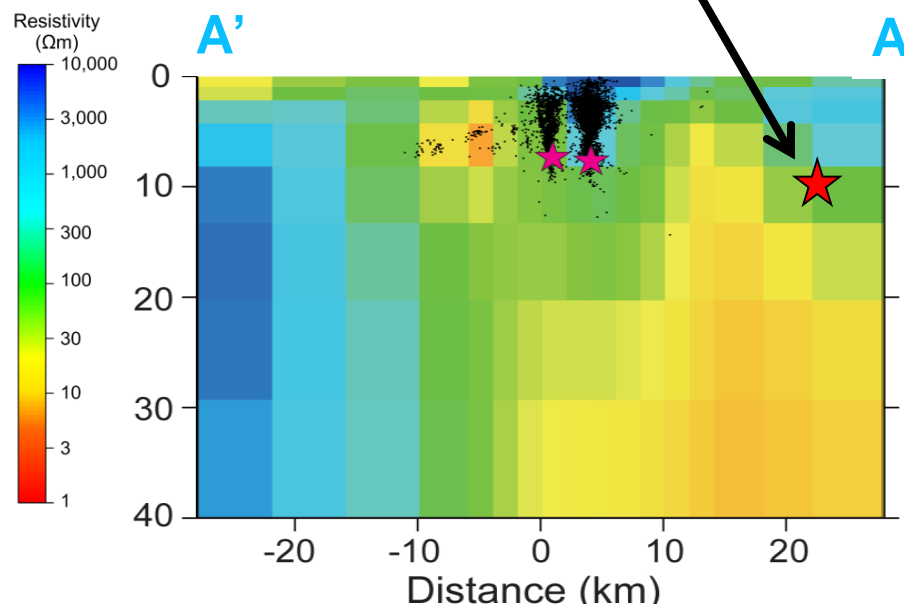


- 飯豊山地の地下15km以深には地震波低速度域と低比抵抗体が存在する。
- 異常体の上面は地殻内地震のcut-off depth(～400°C)と調和的である。
- 地磁気・地電流法はマグマ・高温流体等の調査技術として有効である見通しを得た。

電磁気学的アプローチによる震源断層の推定



1994年鹿児島県北部地震(大口地震)
(M 5.7, Depth = 11 km)

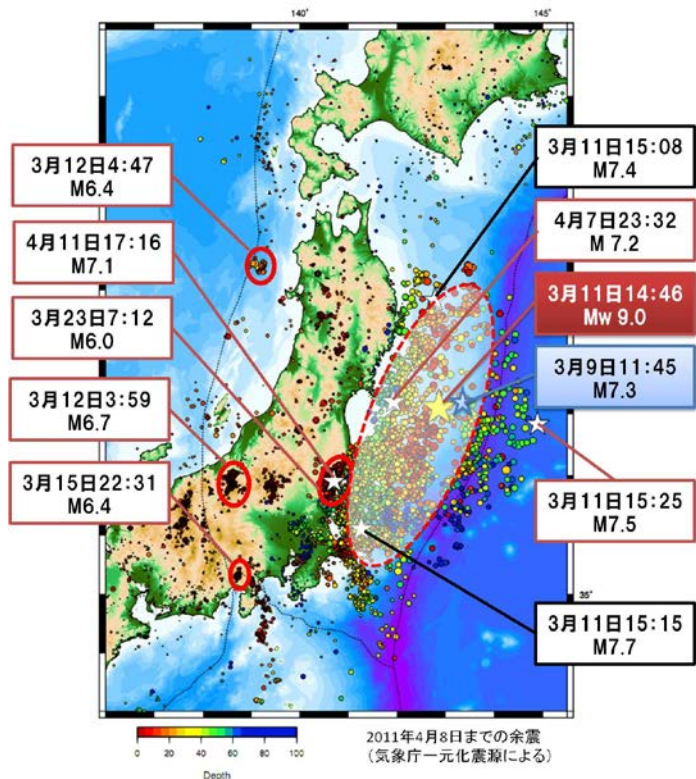


第1北西部地震(3月26日)深さ7.6km, Mj6.6 (最大震度5強)
第2北西部地震(5月13日)深さ7.7km, Mj6.4 (最大震度6弱)

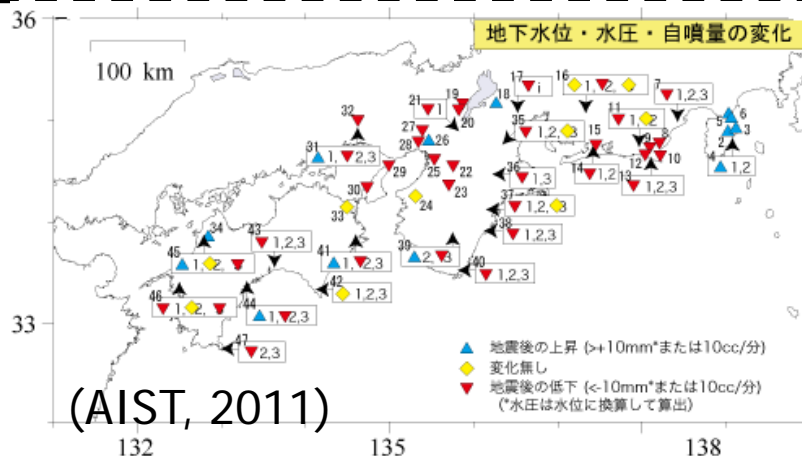
三次元比抵抗構造解析(A-A'断面)

- 1997年鹿児島県北西部地震の震源域の近傍には上部マントルから延びる低比抵抗体が存在する(比抵抗境界には震源断層が存在する可能性を示唆)。
 - 地磁気・地電流法は震源断層の調査技術として有効である見通しを得た。

● 3.11の海溝型巨大地震等の稀頻度自然現象に伴う地質環境条件の変動幅(地下水流動の変化など)を予測するための手法を提示。



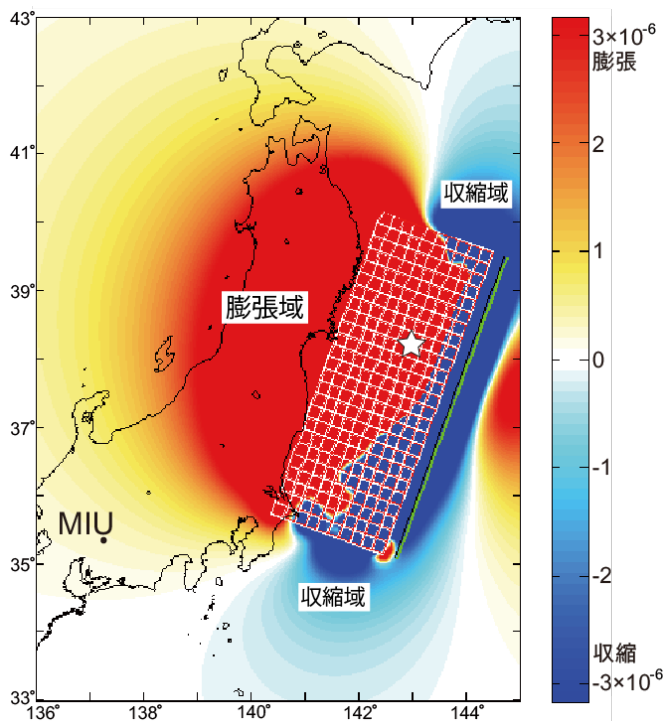
- ・ほぼ東西の圧縮軸を持つ低角逆断層
(断層面の形状は、約400×100km)
- ・最大で水平方向に約5.3m(東南東)、上下方向に約1.2m(沈下)の地殻変動を観測
- ・各地で地下水や温泉水の変化を観測



地球潮汐による変動からの推定によれば、被圧地下水の水位変化に対する体積歪応答感度は、**～数mm/n strain(1 n strainは10の-9乗の歪)**

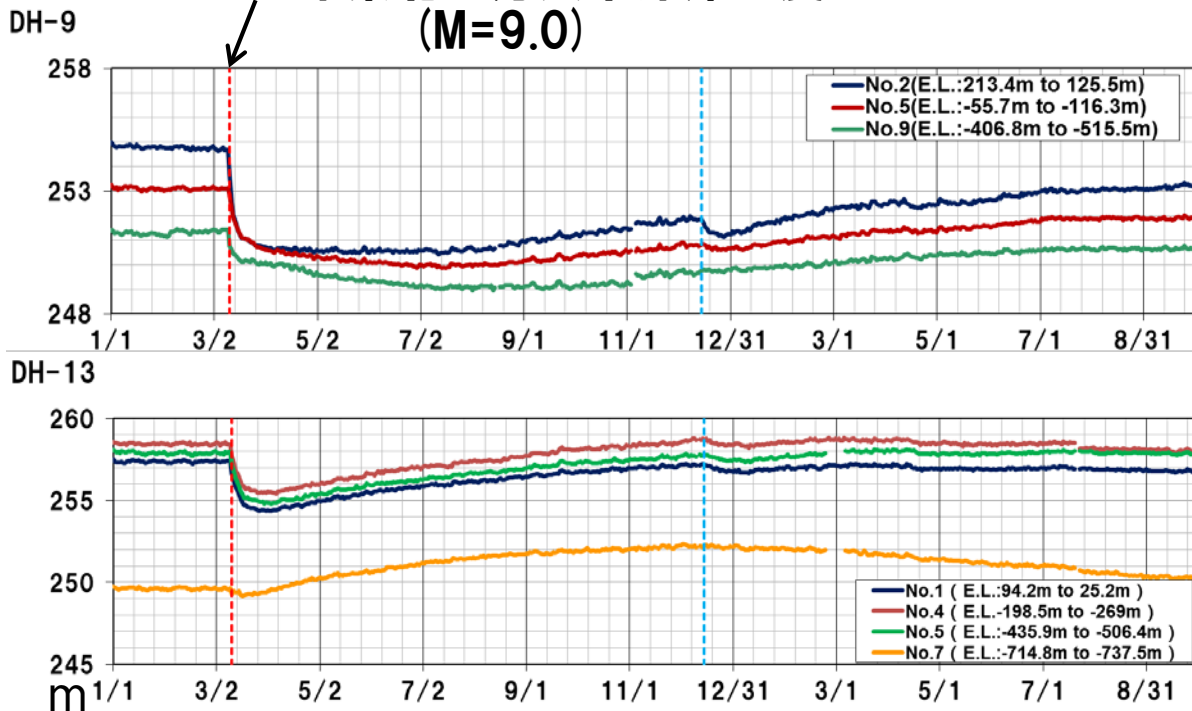
断層モデルによるディスロケーション解析(Coulomb3.1)によって体積歪の分布は推定可能

シミュレーションによる地下水位の変化と観測値



2011東北地方太平洋沖地震に伴う体積歪のシミュレーション結果

2011年東北地方太平洋沖地震 (M=9.0)



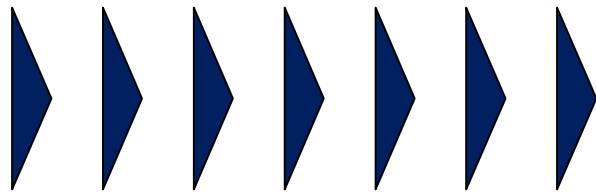
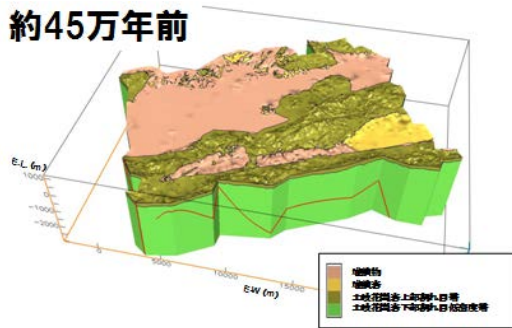
東濃地域(DH-9, 13)の地下水圧の経時変化 (2011.1.1~2012.9.30)

- 東濃地方では 10^{-7} strainオーダーの膨張→数10cm~1m以上の地下水位低下 (実際の地下水位の変化は、体積歪の変化に基づく計算結果と概ね整合的)。
- 但し、地震後に変化した地下水圧も、時間の経過につれて変化前の状態に回復していく傾向が認められる。

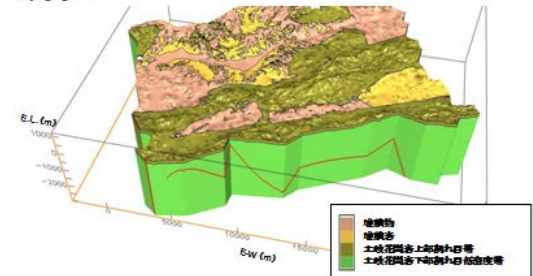
地質環境長期安定性評価確証技術開発 (経済産業省の受託研究)

- 自然現象に伴う超長期の地質環境の変動(変動幅, レジリアンス等)を把握するため, 過去から現在までの変化を表現できる三次元のモデルの開発を行う。

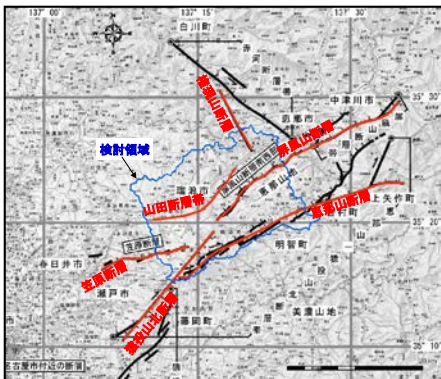
約45万年前



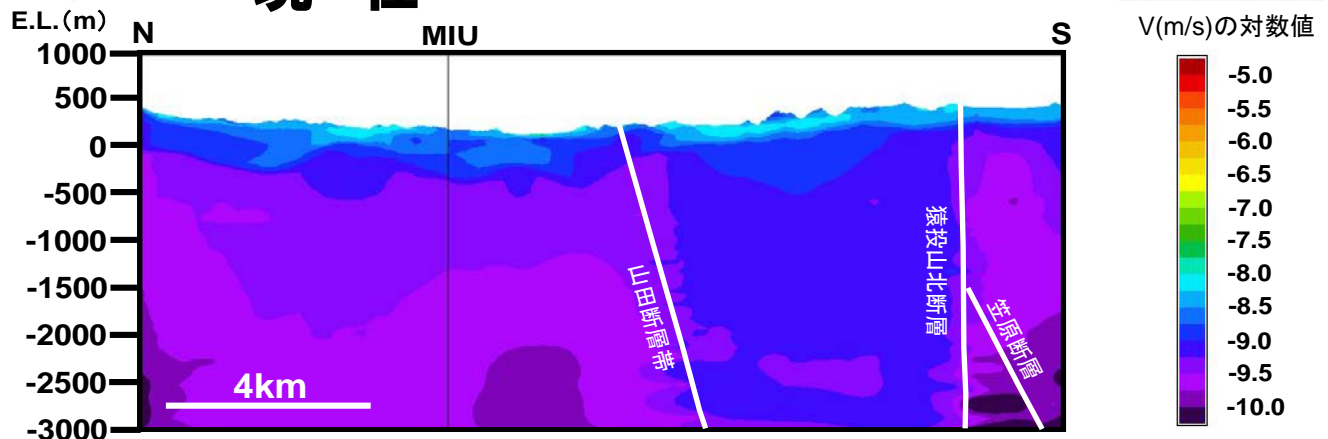
現在



現在



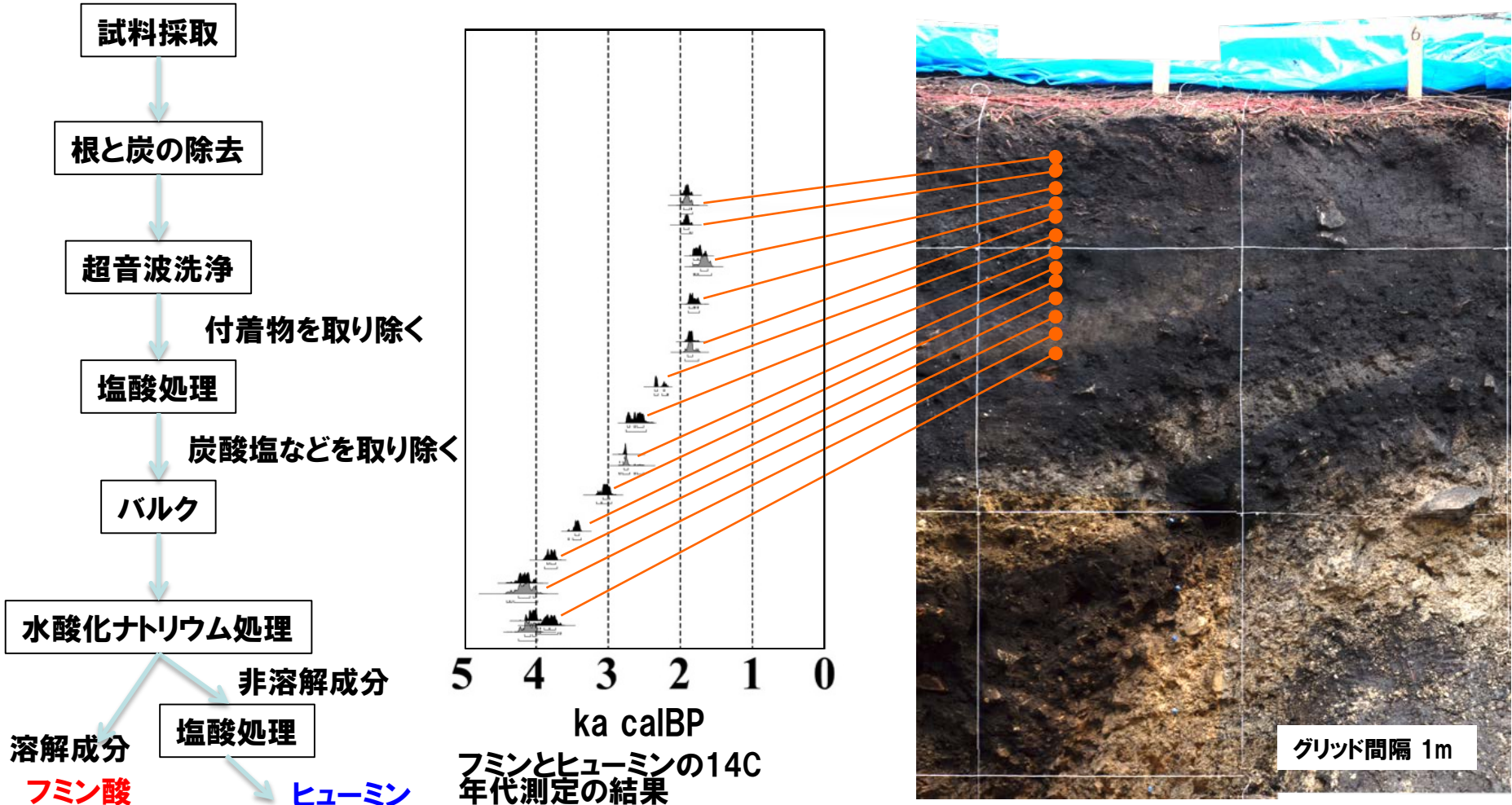
地質構造モデルに考慮した断層(地震調査委員会, 2004に加筆)



- 蓋然性の高いシナリオ(ここでは山地形成)に基づき, 内陸部・沿岸部における地質環境特性の長期的な変動を示すための方法論を整備。
- モデル検証については, 滞留域とそれ以外の領域について, 地下水年代を含めた地球化学的指標を利用した検証を予定。

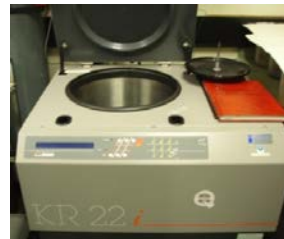
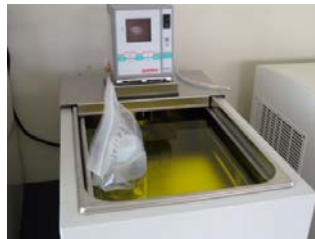
土壌を用いた炭素14年代測定

- 炭素14(^{14}C)年代測定に適した試料(貝, 木材等)が入手できないケースに土壌中の腐植酸であるフミン酸(アルカリ溶液に抽出されてくる有機物)やヒューミン(アルカリ溶液に不溶な有機物)による年代測定の適用性を検討した。



断層充填物質のカリウム・アルゴン年代測定

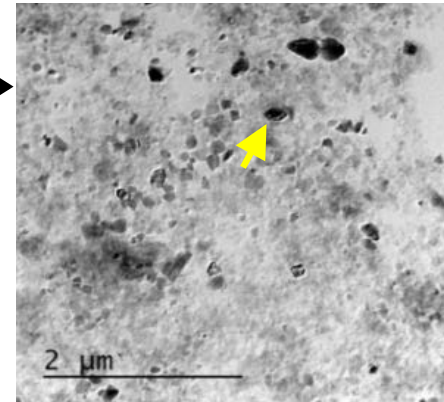
●カリウム・アルゴン(K-Ar)年代法については、通常の火山岩類の年代測定はもとより、断層の活動性評価の一環として、断層充填物質(自生雲母粘土鉱物)の前処理を含めた年代測定技術を開発した。



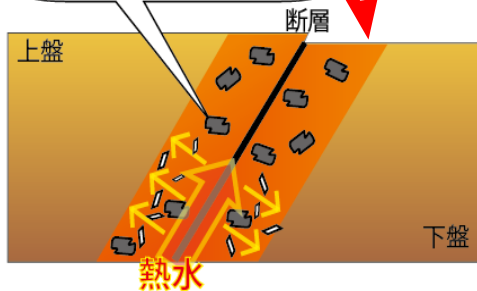
凍結・融解粉碎

→ 高速遠心分離

→ TEM解析



↓ : 自生の雲母粘土鉱物
 ● : 原岩由来の碎屑鉱物



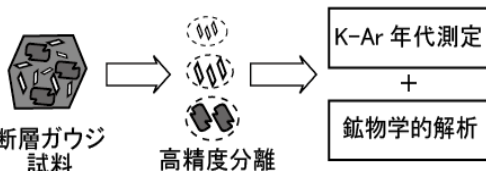
粒度分析

→ ⁴⁰Ar 定量

→ K 定量

断層物質のK-Ar年代測定の流れ

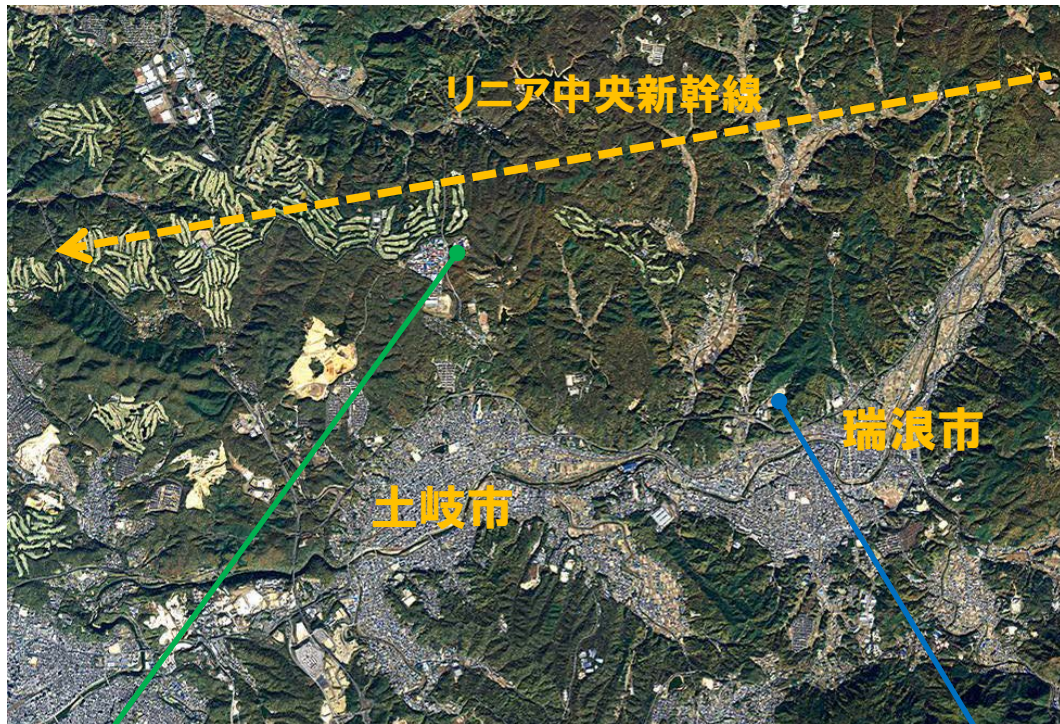
K-Ar年代測定を行った断層充填物質中のイライト(粘土鉱物)のTEM像



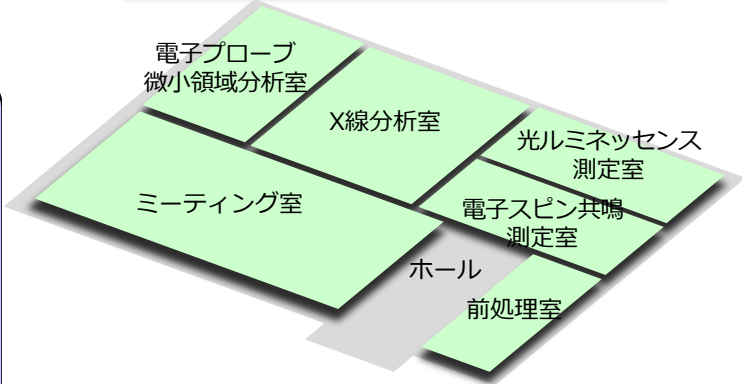
例えば、瑞浪超深地層研究所の主立坑で観察される断層岩中の自生粘土鉱物はK-Ar年代測定の結果、約4000万年前の高温の熱水活動によって生じたものと考えられる。

- ・ 地質環境の長期安定性に関する研究の概要
- ・ 第2次とりまとめ以降の研究開発成果
- ・ **土岐地球年代学研究所について**
- ・ まとめと今後の取り組み

東濃地科学センター土岐地区の名称変更

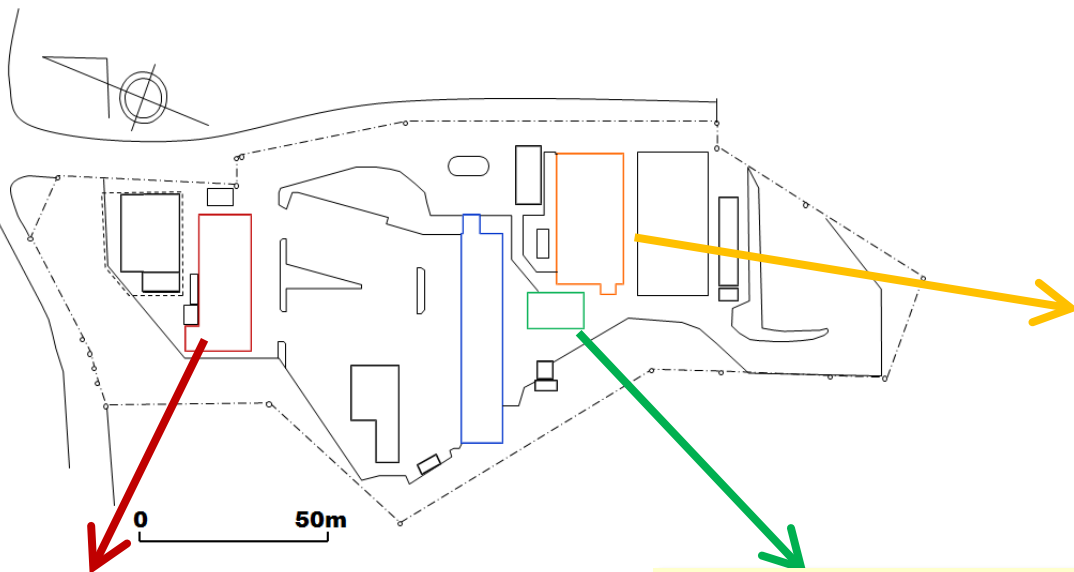


土岐地球年代学研究所
Toki Research Institute of Isotope
Geology and Geochronology



機器分析棟の開設式(H26.11.14)

土岐地球年代学研究所の施設・設備



希ガス同位体年代測定システム



地下水年代等の推定に利用
(経済産業省の受託研究にて実施中)

^{14}C , ^{10}Be 等年代測定システム装置



断層活動, 噴火年代等の推定に利用
(施設供用制度によって依頼測定も実施中)

光ルミネッセンス年代測定システム



土砂の堆積年代等の推定に利用
(経済産業省の受託研究にて実施中)

U-Pb等年代測定システム



カルサイト等の鉱物年代の推定に利用
(経済産業省の受託研究にて実施中)

ペルトロン年代測定棟

機器分析棟

研究棟

年代測定法の反映先と実用化に向けた状況



対象施設	年代測定法	年代測定範囲(年)							主な反映先	対象物質	実用化へのスケジュール
		10 ⁹	10 ⁸	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³			
加速器質量分析装置 (ペレトロン)	¹⁴ C法						—		堆積年代	地下水, 有機物	実用化済
	¹⁰ Be法			—	—	—			表面露出年代	石英	実用化済
	²⁶ Al法			—	—	—			表面露出年代	石英	~H27
	³⁶ Cl法				—	—			地下水滞留時間	地下水	~H31
希ガス質量分析装置	K-Ar法	●●●●	—	—	—	—			岩石・鉱物年代	自生雲母粘土鉱物	実用化済
四重極型質量分析装置	(U-Th)/He法		●●●	—	—	●			熱年代	アパタイト, ジルコン	実用化済
光ルミネッセンス測定装置	OSL法						●●	—	堆積年代	石英, 長石	~H27
電子スピン共鳴装置	ESR法			●●	—	—	—	●●●	堆積年代	石英, 炭酸塩鉱物	~H27
高精度希ガス 質量分析装置	希ガス法		—	—	—	—	—	—	地下水滞留時間	地下水	~H29
レーザーアブレーション 誘導結合プラズマ 質量分析装置	U-Pb法	—	—	—	—	●●			岩石・鉱物年代	炭酸塩鉱物	~H29
	²³⁰ Th- ²³⁴ U法					—	—	—	岩石・鉱物年代	炭酸塩鉱物	~H29
	FT法		●●	—	—	—	●●		熱年代	ジルコン, アパタイト	~H27
電子プローブ マイクロアナライザー	CHIME法	—	—	—	—	●●			岩石・鉱物年代	ジルコン, モナザイト	実用化済

- ・ 地質環境の長期安定性に関する研究の概要
- ・ 第2次とりまとめ以降の研究開発成果
- ・ 土岐地球年代学研究所について
- ・ **まとめと今後の取り組み**

今後の取り組み(土岐地球年代学研究所を中核として)



大学・研究機関

共同研究

地層処分をはじめとする原子力の安全対策の基盤となる地球科学に係る新たな知見の創出と中～長期の自然災害のリスクの予測・評価

➡ e.g.) 新規基準(地震・津波, 火山, 地滑り, 地形・陸水の変化)への対応

原子力施設の耐震安全性に係る科学的・技術的知見

地層処分の安全性に係る科学的・技術的知見

災害要因となる自然現象の理解に係る科学的・技術的知見

調査技術の開発・体系化

長期予測・影響評価モデルの開発

年代測定技術の開発

土岐地球年代学研究所

Toki Research Institute of Isotope Geology and Geochronology

最先端の機器分析装置を用いた年代測定技術の高度化および年代測定手法の標準化

研究成果



研究委託



国・規制機関

研究成果



研究委託



民間事業者

機構内連携・協力

各拠点関係部署

高速増殖原型炉「もんじゅ」



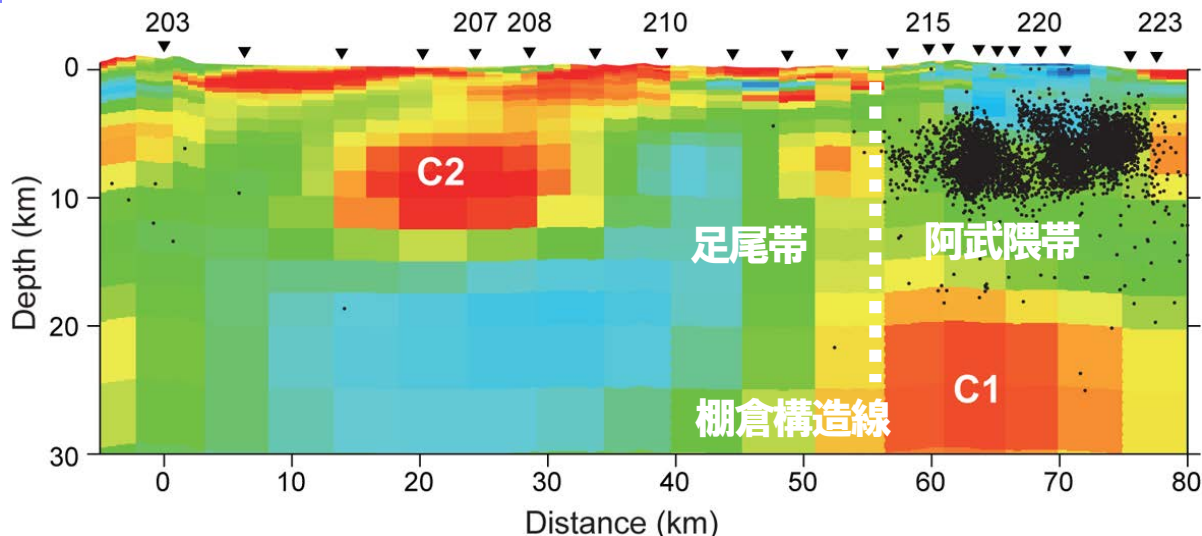
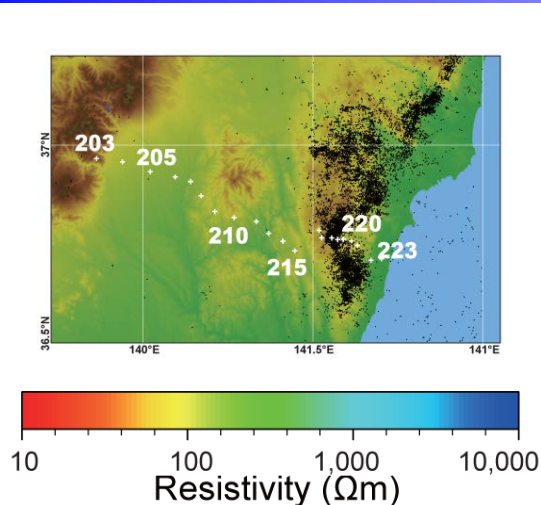
「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価」

(総合資源エネルギー調査会 地層処分技術WG;H26.5)

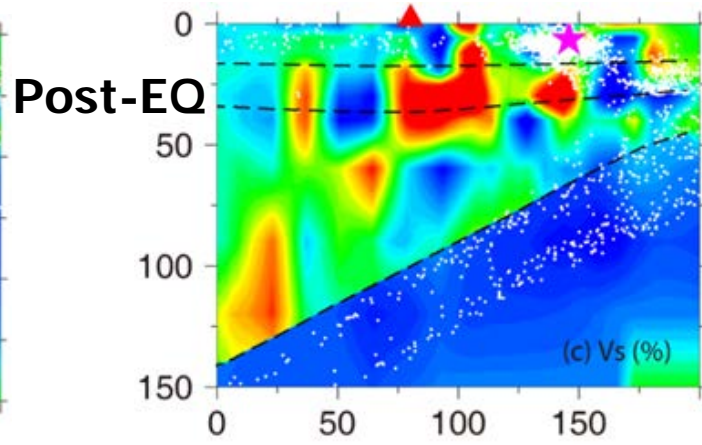
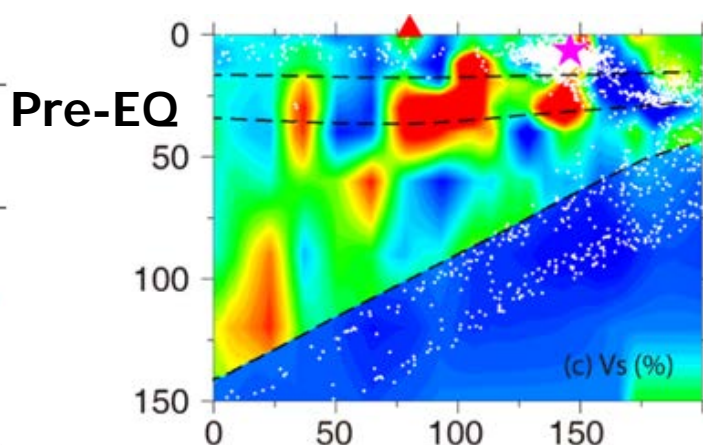
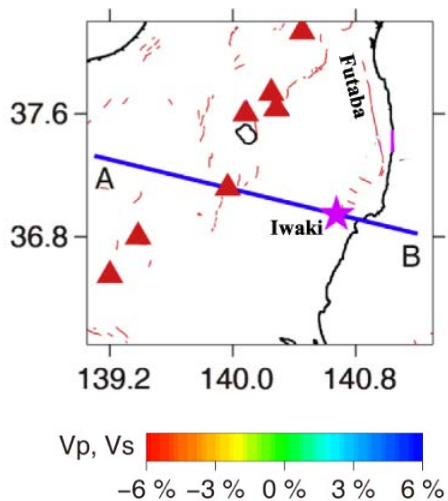
【地層処分の技術的信頼性向上に向けた研究課題】

- 天然現象の将来予測を行う上での前提となるプレートシステムの継続性の評価のための、プレートシステムの変遷と地質学的イベントの関係の整理・検討
- 地質断層の再活動性に関する調査事例および上載法の適用が困難な断層の活動性の評価方法(断層岩や充填鉱物の年代測定法)の整備
- 隆起量・侵食量を評価するための、地形学的手法や堆積物の年代測定法の整備
- 繰り返し活動し変位の規模が大きな断層の評価に反映するための、未成熟な活断層の調査事例の蓄積および調査や評価方法の整備
- 地震活動の評価に反映するための、東北地方太平洋沖地震後に誘発された地震や湧水(たとえば、2011年4月11日の福島県浜通り地震)に関する調査事例の蓄積
- 地下水の動きが緩慢であることを評価するための地下水年代測定などの技術の整備や調査事例の蓄積 等

地層処分の技術的信頼性向上に向けた取り組み : 東北沖地震後に誘発された地震や湧水研究の例



群発地震を横断する測線の二次元比抵抗構造



3/11前後の福島県浜通りの地震波速度構造(Vs)鉛直断面(Zhao, 2015)

- 例えば、東北沖地震で誘発された群発地震下には地震波速度・比抵抗の異常体が存在。群発地震や応力場の深度方向の違いに影響している可能性。

- 第2次取りまとめ以降, **①概要調査等で必要となる調査技術**や**②変動シナリオの安全評価のベースとなる地質環境の長期予測モデルの開発**を行った。
- 第3期中長期計画(H27~33)では,「自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を,地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する」。
- 具体的には以下の研究開発を進めていく。
 - ① 断層の活動性に係る評価技術
 - ② 地殻構造の高空間分解能イメージング技術
 - ③ 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術
 - ④ 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術