

#### 2015年度バックエンド週末基礎講座

# 地層処分と地質環境の長期安定性

平成27年11月8日(於:東北大学)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 円羽 正和

## 本日の講義内容



- > 地層処分において考慮すべき自然現象とその特徴
- ▶ サイト選定や安全性の検討に際して考慮すべき時間スケール
- > ネオテクトニクスと将来予測の考え方
- > 地質環境の長期安定性に関する研究開発の現状

### 我が国における地層処分の安全確保の考え方



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

・人間環境との離間距離の短縮

例)マグマ貫入・噴火、急激な削剥 (接近シナリオ)



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

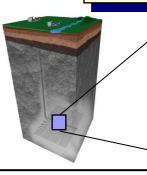
例)地殻変動に伴う地形変化 (変動シナリオ)

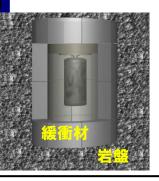


対策

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)





想定される自然現象の変 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)



地層処分システムが備えるべき性能を確保

安全性の確認

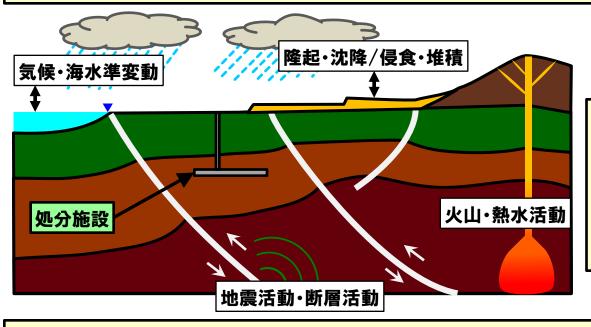
構築された地層処分システムの安全性を評価(安全評価)

### 地層処分において考慮すべき自然現象



#### 隆起·侵食/気候·海水準変動

- 生活環境と処分施設との離間距離の短縮
- ・ 地下水の流動特性や水質の変化による放射性物質の移行への影響 等



#### 火山•熱水活動

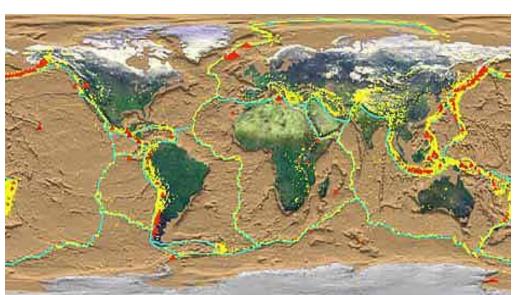
- ・マグマの貫入・噴出による処分施設の破損
- ・地温上昇・熱水対流の発生,熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化等

#### 地震活動·断層運動

- ・ 岩盤の破断・破砕による処分施設の破損
- ・ 岩盤の破断・破砕による地下水移行経路の形成,岩盤歪に起因する地下水の水理学的変化 等

### 環太平洋造山帯に位置する日本列島

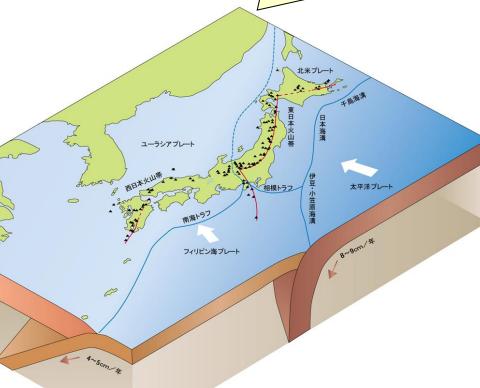




地球上のプレート境界と地震(●)・火山(●)の分布

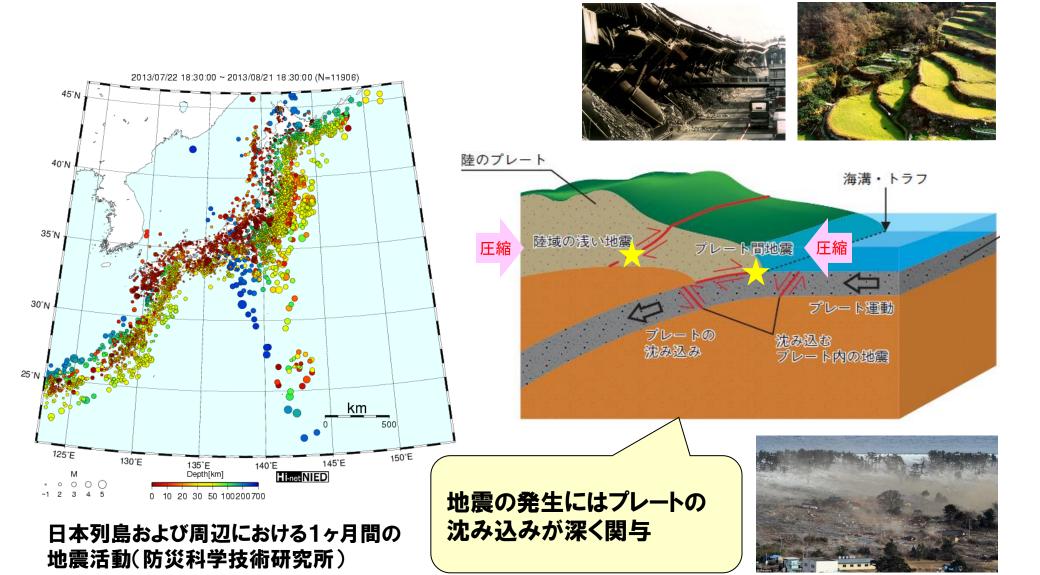
日本付近で発生する地震のエネルギーは、世界中で起きている地震のエネルギーの約10%にもなる。また、世界中の活火山のうちの1割が日本に存在する。

日本列島は、プレートの沈み込み帯に位置する。



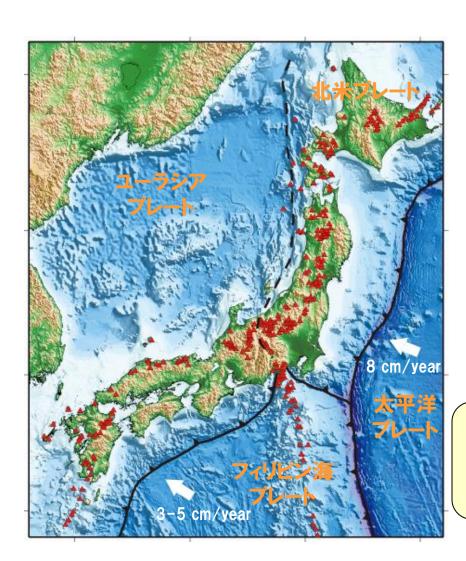
# プレート運動と地震・断層



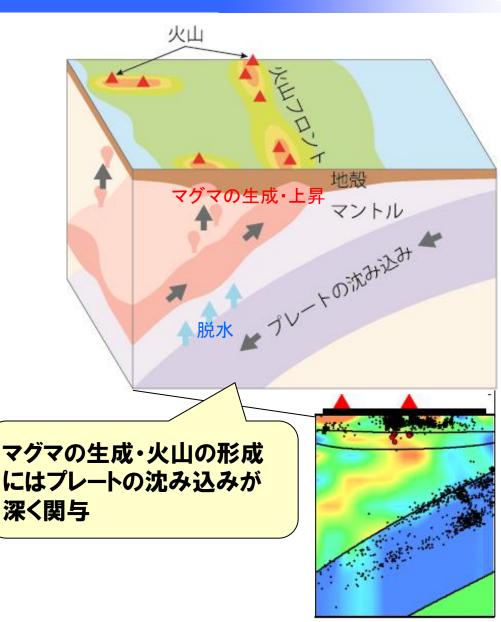


# プレート運動と火山



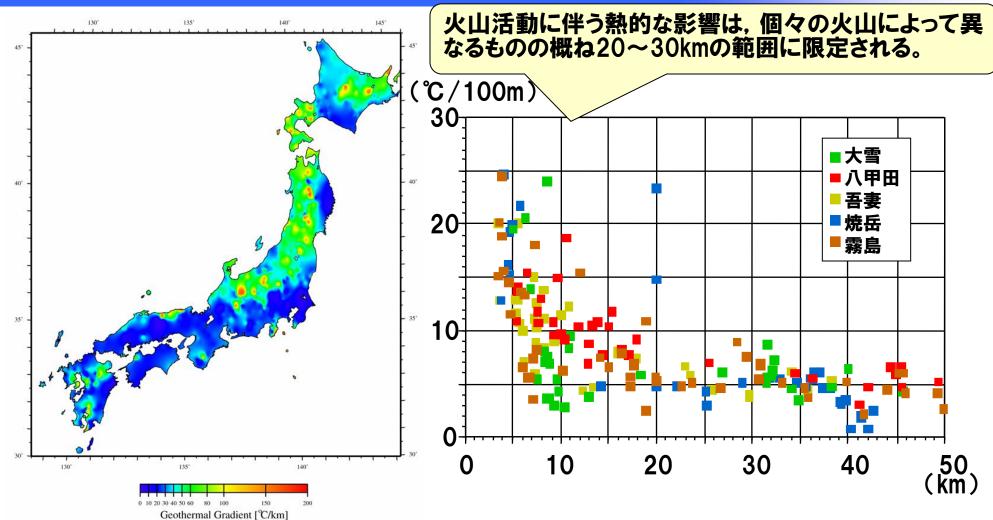


日本列島のプレート配置と第四紀火山の分布



## 火山活動が地質環境に及ぼす影響(地熱)

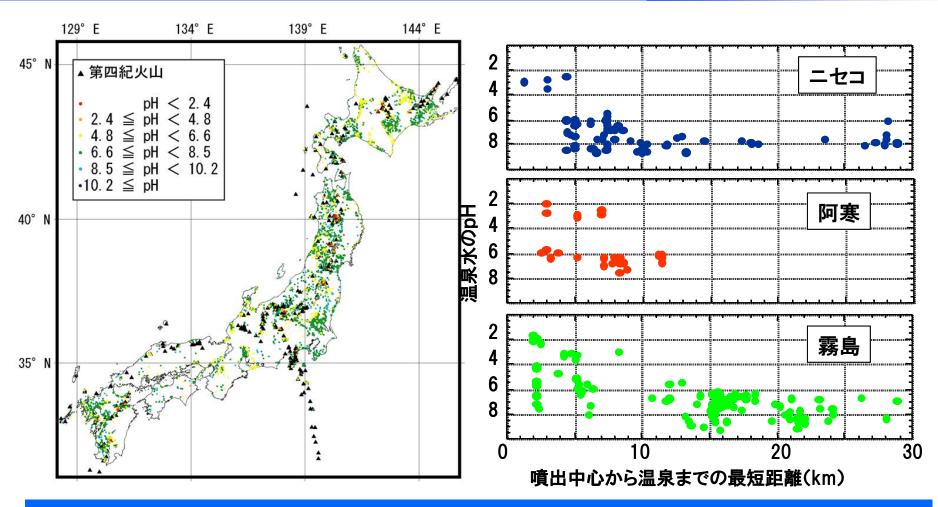




日本列島地温勾配図と火山周辺の坑井の地温勾配(梅田ほか, 1999) 高温異常の背景となるバックグラウンドは東日本で3~5℃/100m, 西日本で2℃/100m程度である。また、 火山周辺の地温勾配値は一般的に高いが、噴出中心から離れるにしたがって低減。

### 火山活動が地質環境に及ぼす影響(水質)

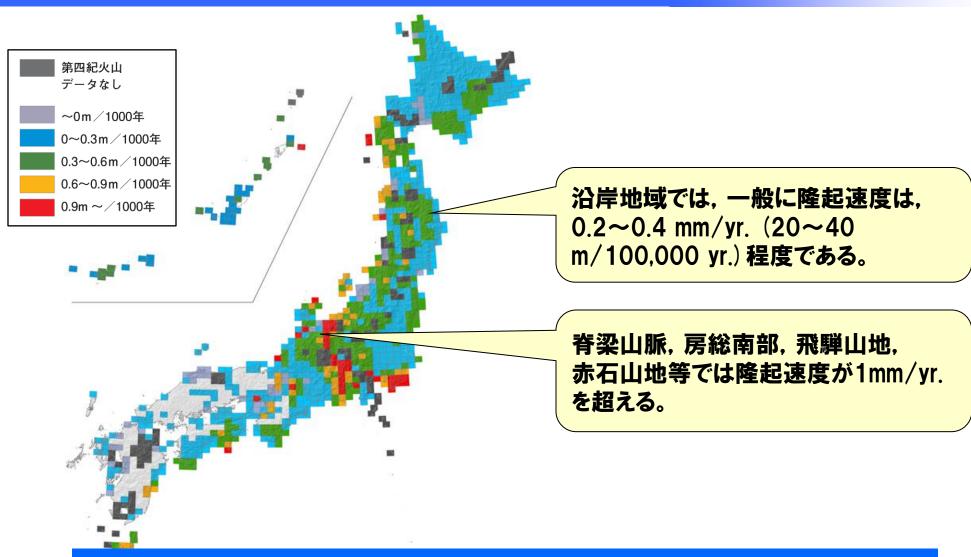




日本列島温泉pH分布と火山周辺の温泉の距離とpHの関係(浅森ほか, 2002) 火山周辺の温泉水のpHは、一般的に低く(酸性)、噴出中心から離れるにしたがって中性に変化する。 pH<4.8の酸性地下水は、噴出中心より概ね数km~20kmの範囲に多く分布する。

### 日本列島の隆起・沈降運動の特徴





日本列島の最近10万年間の隆起速度(藤原ほか, 2004)海成段丘・河成段丘堆積物の年代および段丘面の比高から計算した。

## 「第2次取りまとめ」の結論・評価(原子力委員会, 2000)



地震・断層活動、火山・火成活動のような急激かつ局所的な自然現象については、活動地域の時間的な変化や地質環境への影響に関する過去の事例調査の知見に基づき、その活動及び影響の範囲が限定されることが明らかにされている。

☞ サイト選定に反映(処分システムへの著しい影響の回避)

隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動のような緩慢かつ広域的な現象については、変動の規模及びその地域性や周期性に関する知見に基づき、個々の地域における変動量が概ね推定できることから、想定される変動を考慮して、地層処分システムの設計や安全評価に反映できることが示されている。

☞ 工学的対策・安全評価に反映(将来の変動幅の予測)

## 概要調査地区等の選定(特に評価期間)に係る動向



#### 【特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律, H12.6】

①地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと。②将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること。

【高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について、原子力安全委員会、H14.9】

①対象地域の隆起・侵食量から処分場及びその周辺の地質環境に対し著しい変動をもたらすおそれ、②処分施設を合理的に配置することが困難となるような活断層の存在、③第四紀に活動したことのある火山の存在が文献調査で明らかな地域は、これを概要調査地区には含めない。

#### 【概要調査地区選定上の考慮事項、原子力発電環境整備機構、H14.12】

①文献に示されている活断層がある場所は含めない、②将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりの可能性を考慮し、第四紀火山の中心から半径15kmの円の範囲内にある地域は含めない、③過去10万年間の隆起の総量が300mを超えていることが明らかな地域は含めないように概要調査地区を選定する。

## 地層処分の安全規制(特に評価期間)に係る動向



#### 【高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について (第1次報告),原子力安全委員会,H12.11】

一般公衆に対する評価線量が最大となる時期(10<sup>5</sup>年以上)においても、基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認することが基本である。

【高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて,総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会,H15.7】

評価期間が長期になると、処分システム領域に対する外乱の発生予測の不確実性が増加することに起因して、計算結果の信頼性が低下する可能性もある。 評価期間の設定に際しては、計算上のピーク発生時期と関連する外乱事象発生の予測可能性とを併せ考慮していく必要がある。

【放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について, 原子力安全委員会、H16.6】

評価期間が長いことによって派生する不確実性等については、シナリオの発生の可能性を踏まえた放射線防護の基準を検討することが重要(→ 余裕深度処分)。超長期の防護基準については、天然の放射能濃度との相対的比較等の補完的指標も考慮すべきである。

### 地質学的現象の将来予測の方法論



#### 1)外挿法による予測

過去から現在までの変動の履歴を検討し、そのなかから時間的、空間的な変動の普遍性、法則性を見いだすことによって、その傾向を将来に延長(外挿)して予測する方法。プレート運動の枠組みで生じる永続性がある現象には、外挿法が特に有効(日本地質学会、2011)。

#### 2)類推法による予測

予測しようとする現象と類似の事例を過去のデータから探索し、そのアナロジーによって将来の変動を予測する方法。

#### 3)確率論による予測

過去から現在までに発生した現象の発生頻度、規模と範囲等から将来 の発生確率を求める方法。

#### 4)モデルを用いたシミュレーションによる予測

現象に関与する物理法則を見いだして、物理(数学)モデルを作成し、それを用いた数値実験によって予測を行う。

### ネオテクトニクスと外挿法による将来予測



#### (ネオテクトニクス) (Wegmann, 1955)

現在進行中の変動およびそれと同様な特性の続く最近の時代の変動。 なお、最近の時代の範囲は地球上の地域によって異なる。

#### 【第四紀後期の地殻変動】(垣見・松田, 1987)

- ① 第四紀を通じて一方向に進行してきた(変位の累積性)
- ② その運動方向はほぼ等速的であった(速さの一様性)
- ③ その運動をもたらした応力場は第四紀を通じて持続している(地殻応力の持続性)
- ④ 地殻変動は地域ごとに特有のくせをもっている(変動様式の地域性)



#### 【地殻変動の一様継続性に基づく外挿による予測の考え方】

第四紀後期の地殻変動の一様継続性(変位方向の一様性,変位の等速性)が成立している場合には、過去から現在までの変動傾向・速度を同程度の将来まで外挿することは可能である(松田、1987、1988)。

## 外挿法による地質学的現象の予測可能性の検討



外挿法による予測が可能な期間を検討するためには、現在のネオテクトニクスの枠組みの中で変動の一様継続性(変位方向の一様性,変位の等速性)がどの地域でいつ頃に成立したかを地形・地質学的な情報から検討する必要がある。

#### 【パラメトリックな時系列解析モデルによる予測可能性】

過去から現在までの現象の履歴が、どのような相互関係があったか (自己回帰性)を解析し、その関係性が比較的短い時間は継続する と仮定して、予測値として取り扱う方法。

時系列解析モデル(例えば、自己回帰移動平均モデル)の研究例によると、過去の期間(N)に成り立っていた関係性(定常性)は、将来になればなる程、その関係性そのものが変化していると考えられるので、0.1 N ~0.2 程度であれば関係性が継続する確率が高いと考えられている。

## 日本列島の活断層が現在の活動を開始した時期の推定

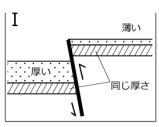


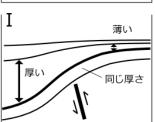
高い←

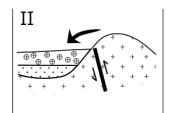
正確度

→ 低い

活動開始層準の 認定による手法 I、II

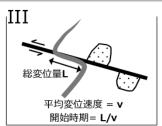


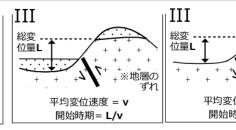


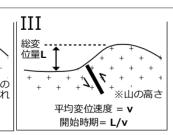


- . 断層による地層の変形や層厚の変化に基づき活動開始層準を認定
- ||. 断層活動に起因すると考えられる 堆積環境の変化(後背地堆積物の 変化等)から活動開始層準を認定

計算による手法 III 活断層の総変位量を平均変位速度で除することにより活動開始時期を推定





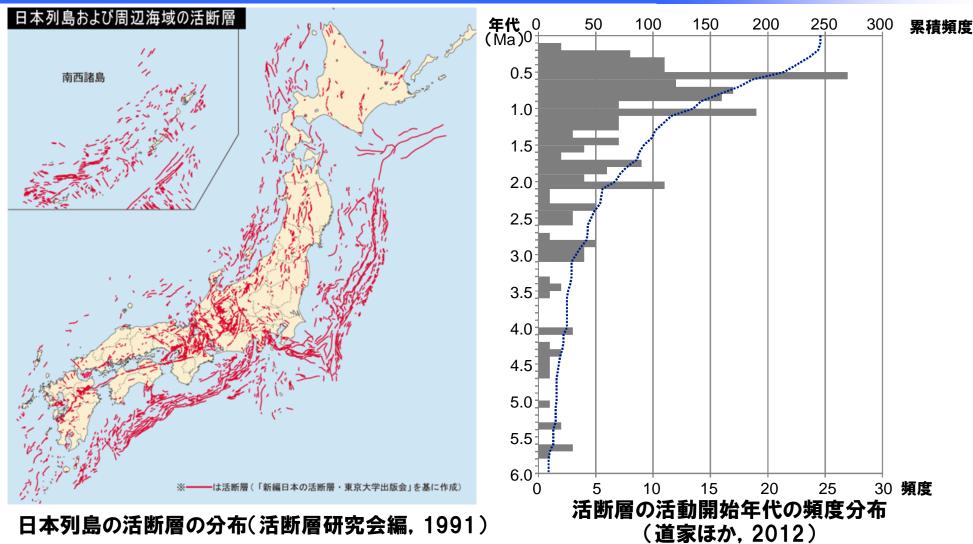


(平均変位速度が過去において一定であったと仮定)

- ▶ 既存情報に基づき、日本列島に分布する活断層の現在の活動がどこまで遡れる かを整理
- ▶ 断層活動の傾向から,10万年を超える超長期の地殻変動の傾向を概括的に把握

## 活断層の活動の開始時期



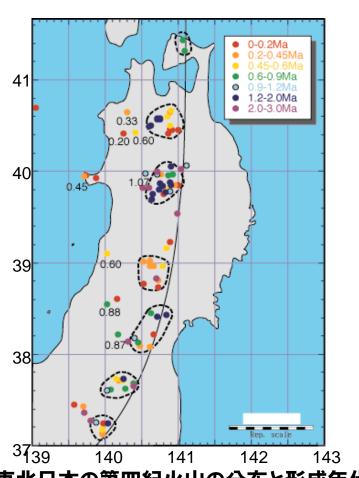


日本列島の活断層の約80%は,第四紀以降に活動を開始している。そのうち,

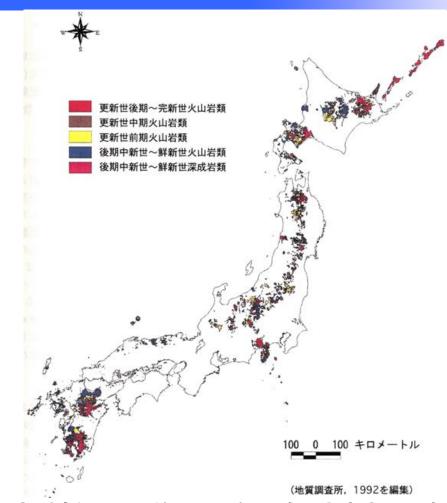
日本列島の活断層の約80%は、第四紀以降に活動を開始している。そのうち、約50万年前頃に活動を開始した断層が最も多い。

## 新第三紀以降の火山活動の時空変遷





東北日本の第四紀火山の分布と形成年代 (林ほか, 1996)

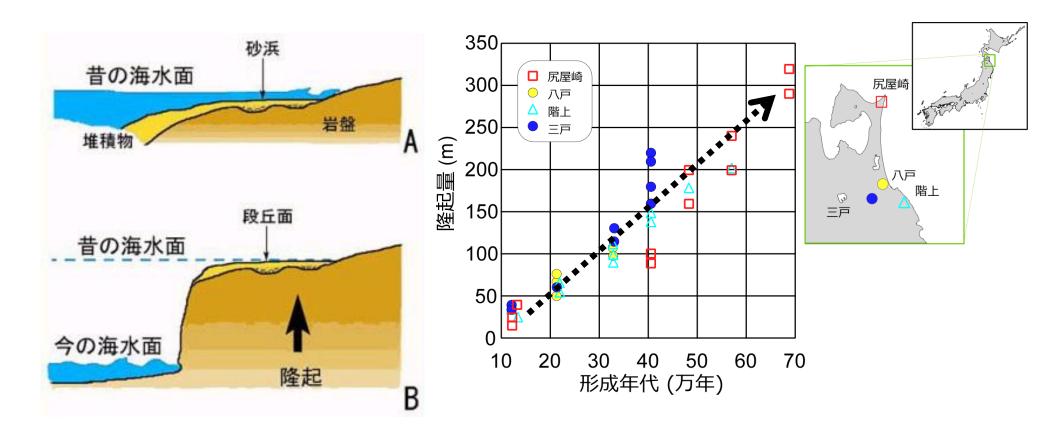


日本列島における約700万年以降の火山岩の分布

約700万年以降は火山フロントの日本海側(東・西日本火山帯)において活動が限定。但し、火山フロントの日本海側では、過去数10万年間では既存火山の15km以遠においても新規の火山が形成。

### 第四紀後期の地殻変動の一様継続性の例



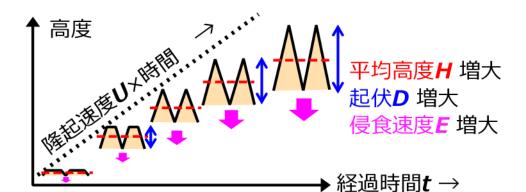


下北半島の海成段丘の形成年代と高度の関係 (核燃料サイクル開発機構, 1999)

段丘からみた過去数十万年間の変動の方向・速度はほぼ一定

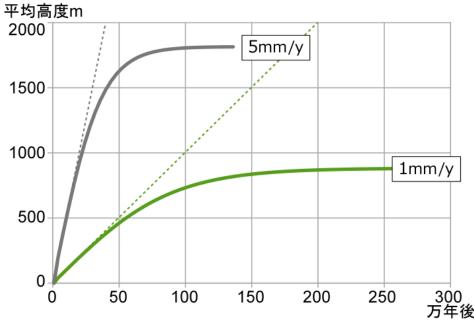
## 山地発達モデルによる地殻変動の一様継続性の評価





- ■山地の平均高度Hの変化  $\Delta H/\Delta t$  = 隆起速度U 侵食速度E..①
- ■山地の侵食速度Eは起伏Dの関数  $E = \alpha \frac{D}{\beta} \quad (D:$ 高度分散量) ......②
- ■山地の起伏 D は平均高度 H の関数
  D = aH b ......3
  - $\therefore \Delta H / \Delta t = U \delta H^{\gamma} \dots 1$

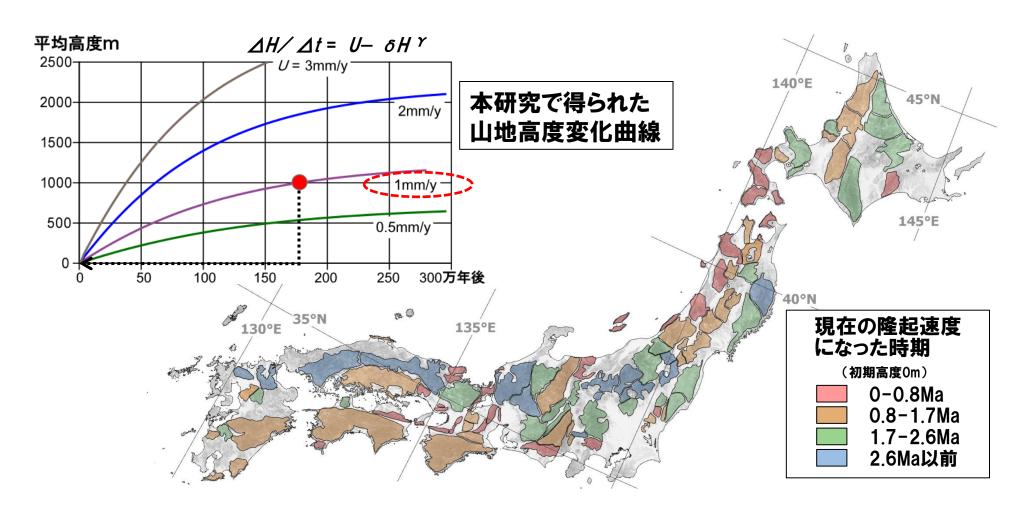
Ohmori (1978) **による山地発達モデル** 



隆起速度一定のもとでの山地高度の変化曲線 (Ohmori, 1978)

### 山地発達モデルによる地殻変動の一様継続性の評価





▶ 天塩山地, 北海道南西部, 出羽山地, 佐渡島, 近畿三角帯等の日本海東縁変動帯や新潟-神戸歪集中帯では約1.0Ma以降に現在の隆起速度になったと推定

### 地質学的現象の将来予測



- 地形・地質学的情報によると日本列島の多くの地域で、現在の変動方向・速度(一様継続性)が成立したのは、中期更新世(数十万年前)以降と考えられる。
- ▶ 山地発達モデルによると、日本海東縁変動帯や新潟-神戸歪集中帯等の地域では、中期更新世以降に現在の隆起速度と同程度になったと推定できる。
- ▶ 中期更新世以降に地殻変動の一様継続性が成立した地域では、 外挿法による信頼性が高い予測が行われる期間は、将来十万 年程度と考えることが妥当と思われる。

## 2011年東北地方太平洋沖地震後の動向



【日本学術会議「高レベル放射性廃棄物の処分について」H24.9】 (高レベル放射性廃棄物の処分に関する取組みについての国民への説明のあり方に関する、原子力委員会からの依頼(H22.9)に対する回答)

高レベル放射性廃棄物の処分に関する政策の抜本的見直し:説明の仕方ではなく根源的な問題

【総合資源エネルギー調査会地層処分技術WG 中間とりまとめ、H26.5】 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価 一地質環境特性および地質 環境の長期安定性について一

地層処分の技術的信頼性の再評価の一環として、第2次取りまとめ以降の最新の 科学的知見を反映:

- ✓ 地層処分に好ましい地質環境およびその長期安定性が確保できる場所が我が 国において選定可能であることを改めて確認
- ✓ 地層処分の技術的信頼性向上に向け、複数の研究課題も提示

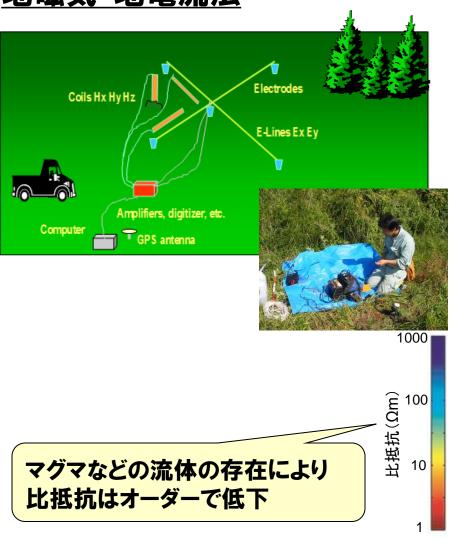
## 地質環境の長期安定性に関する研究開発の現状

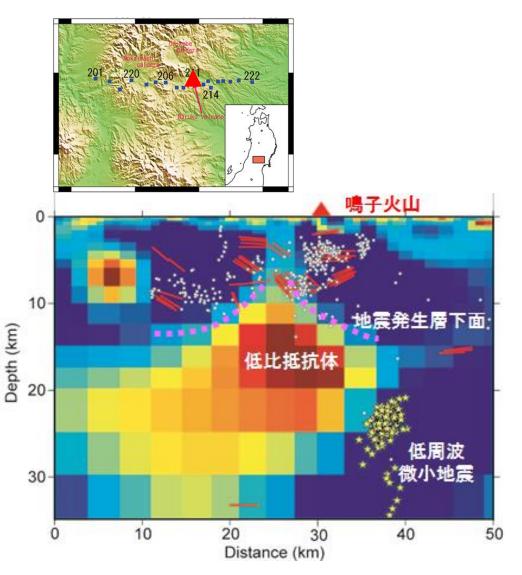


- ➢調査技術の開発・体系化
  - ✓ 地下深部のマグマ・高温流体の調査技術 (既に達成された研究成果の例)
- >長期予測・影響評価モデルの開発
  - ✓ 断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価 (2011年東北地方太平洋沖地震後の研究事例)
- >年代測定技術の開発



### 地磁気·地電流法





Asamori et al. (2010)

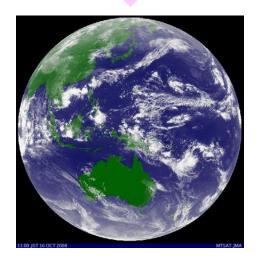


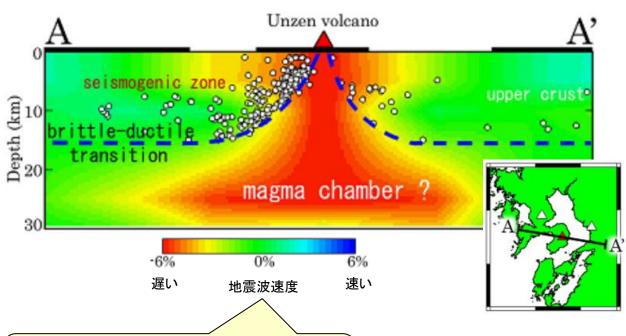
#### 地震波トモグラフィー法



対 象 : 人体 → 地球(地下)

観測データ: X線 → 地震波





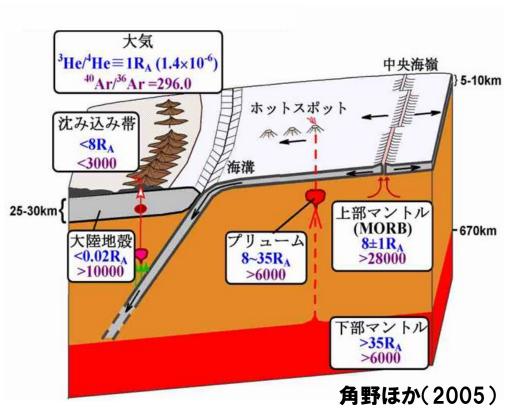
高温や流体を含む領域(マグマなど)では地震波速度が低下

Zhao et al. (2002)

地磁気・地電流法や地震波トモグラフィー法を用いてマグマなどの高温流体の分布を推定



#### ヘリウム同位体比

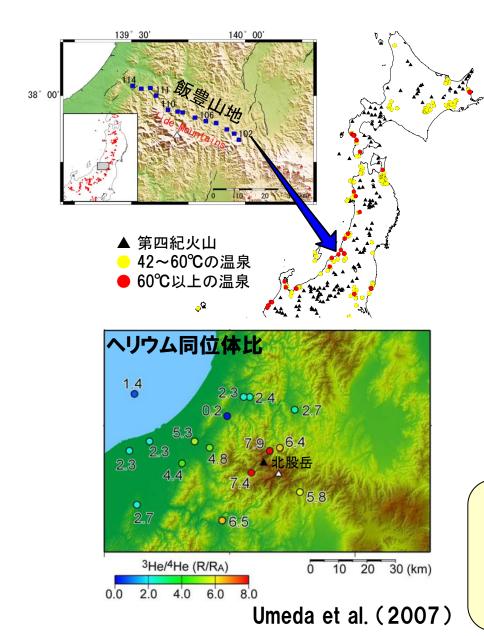


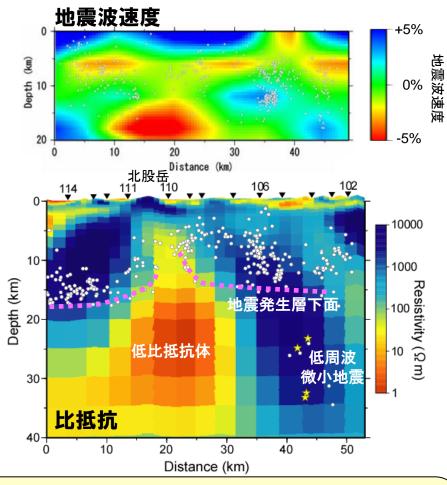
マントル起源の 3He/4He比は、大気の8 倍、radiogenic (crustal)Heの50倍以上

R/RA ●<1.0 1.0≦ <2.0 2.0 < 0 < 4.0 4.0≦●<6.0 6.0≤●

日本列島のヘリウム同位体比の分布図 (R/R<sub>A</sub>は大気の<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比(1.4x10<sup>-6</sup>)で規格化; 草野ほか、2012)







- ✓飯豊山地下に高温流体の存在を示唆する 低地震波速度・低比抵抗体
- ✓ ヘリウム同位体比は北股岳近傍で高く、離れる につれて低下する傾向
  - ⇒伏在するマグマの存在を示唆

## 断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価

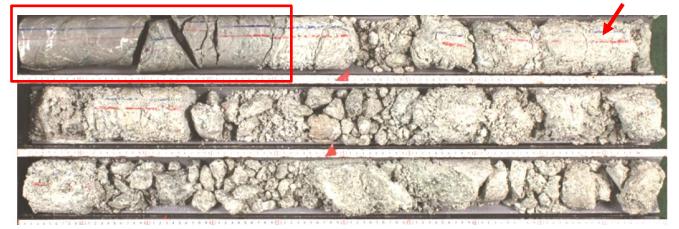


【断層破砕帯】 水理地質構造の不均質性の 大きな要因の一つ

> 中央構造線の破砕帯 (安康露頭:長野県)



断層コア:細粒破砕物質や変質鉱物が 密に充填⇒低透水 ダメージゾーン:割れ目が 密に発達⇒高透水

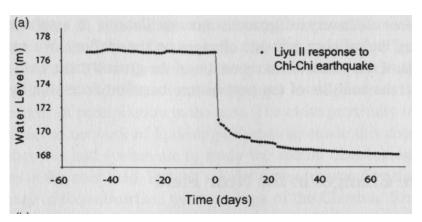


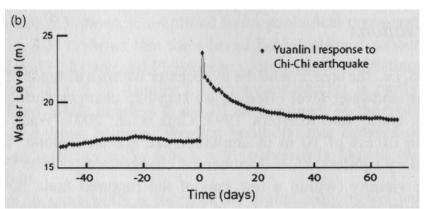
(瑞浪超深地層研究所 の坑道中の断層を貫い たボーリングコア)

## 断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価



#### 地震に伴うステップ状の地下水圧の変化





(the 1999 Chi-Chi Earthquake; Wang and Chia, 2008)

#### 【地下水圧の変化の要因】

✓ 地表付近の堆積層の液状化

[Manga, 2001; Montgomery et al., 2003]

✓ 地殻の体積歪の変化

[Wang, 1997; Ge and Stover, 2000; Hamiel et al., 2005]

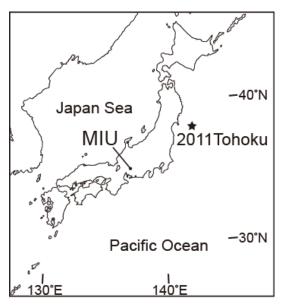
✓ 岩盤の透水性の変化(水みちの詰まりが取れるなど)

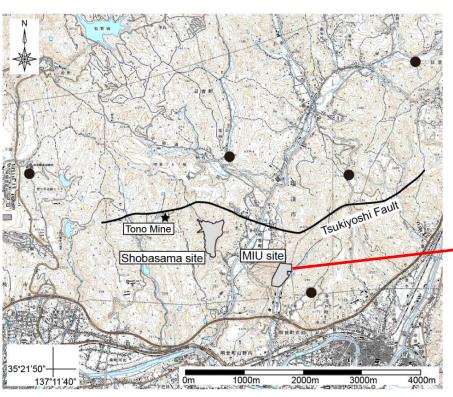
[Elkhoury et al., 2006; Liu and Manga, 2009]

## 瑞浪超深地層研究所周辺での地下水圧モニタリング



#### 広域地下水流動研究

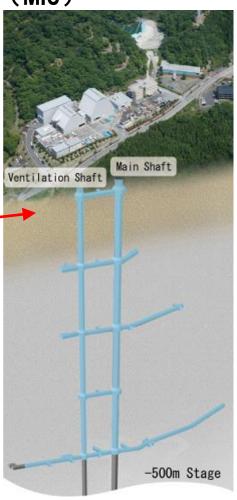




● ボーリング孔での地下水圧 の長期モニタリング地点

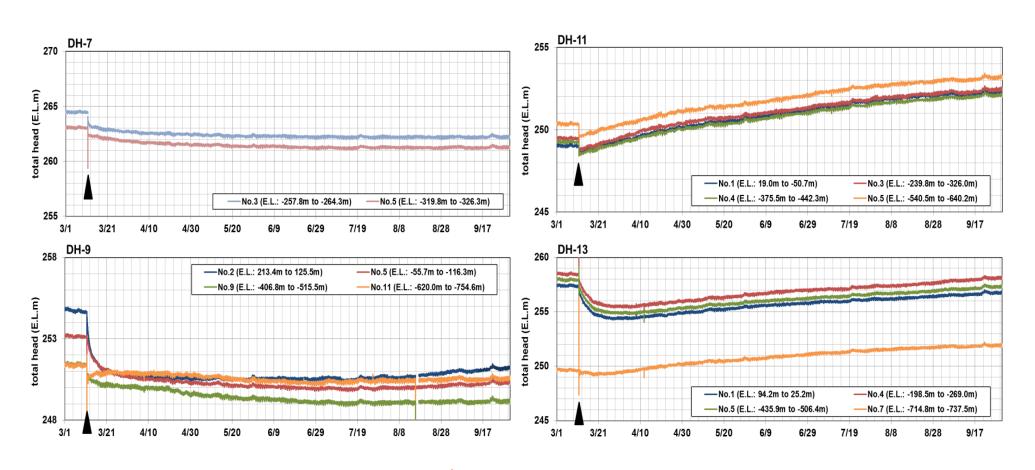


#### 瑞浪超深地層研究所 (MIU)



# 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地下水圧の変化



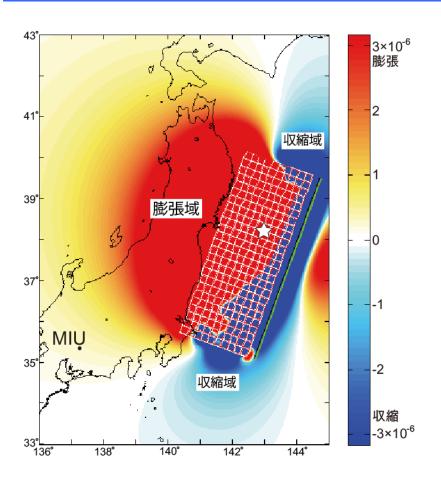


地震直後に明瞭に、ステップ状に地下水圧が低下

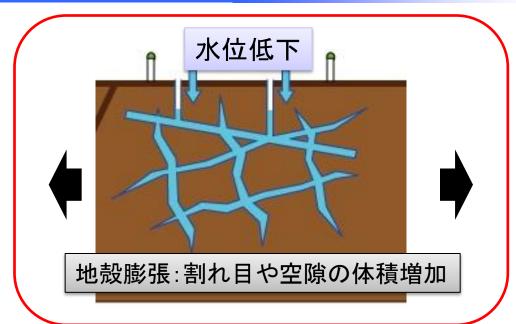
(Niwa et al., 2012)

### 地震に伴う地殼変動と水圧変化





東北地方太平洋沖地震に伴う体積歪変化は、研究所周辺で約2×10<sup>-7</sup>strainの膨張 (Coulomb 3.1で計算)



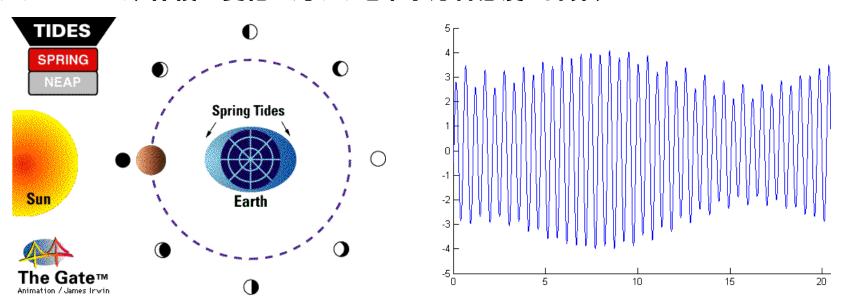


#### 体積歪変化に対する地下水応答感度



#### 潮汐成分からの推定

(BAYTAP-Gにより、地下水圧データから潮汐成分を抽出し、GOTIC2による潮汐の理論値と比較することにより、体積歪変化に対する地下水応答感度を計算)



地震に伴う体積歪変化の計算結果から推定される地下水位変化は、大局的には 実際に観測された地下水位変化と整合的

	M2分潮を用いた計算に基づく値	実際の観測値(地震前後1日の低下量)
AN-1	62cm	72cm
DH-7	57cm	88cm
DH-11	78cm	39cm
DH-13	60cm	80cm

# 断層を挟んだ長期的な地下水圧の変動の違い





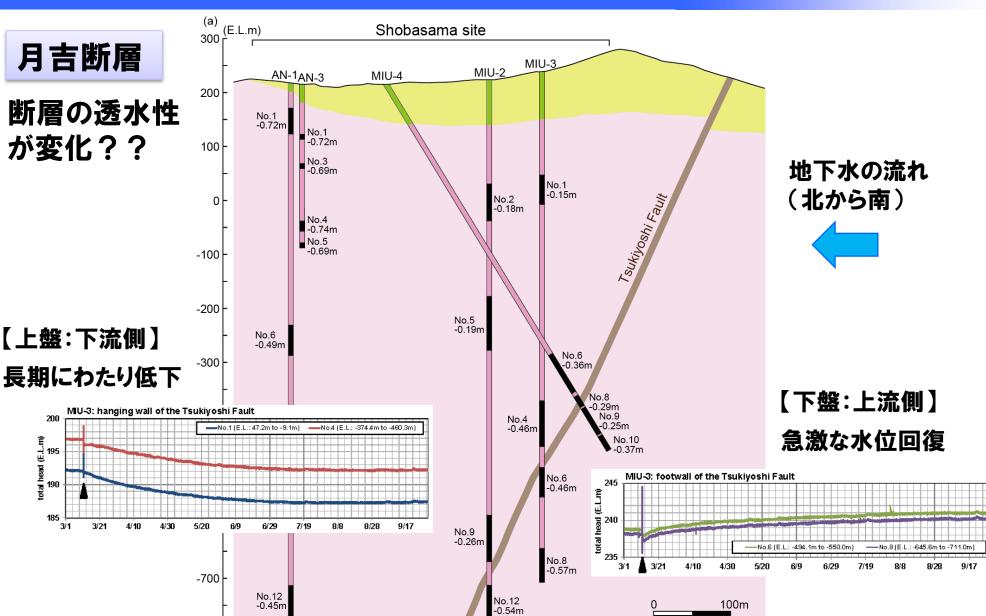
断層の透水性 が変化??

【上盤:下流側】

4/30

-800

total head (E.L.m) 190



### 潮汐成分の変化に基づく透水性変化の推定





地震の前後で位相の 急激な変化は認められない

⇒透水性は変化して いない

断層が本来から有する透水構造の不均質性が, 地下水圧の変動に影響

# 土岐地球年代学研究所の開設



#### 平成26年11月14日 機器分析棟完成





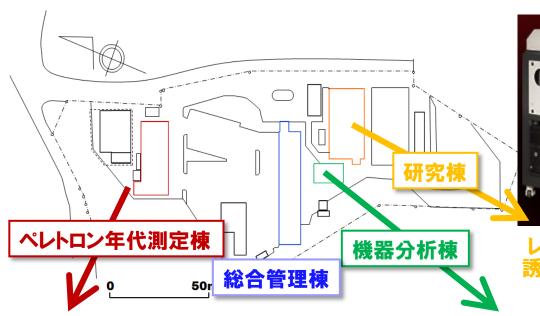
#### 土岐地球年代学研究所 <u>T</u>oki <u>R</u>esearch Institute of <u>I</u>sotope <u>G</u>eology and <u>Ge</u>och<u>r</u>onology (TRIGGER)





# 土岐地球年代学研究所 分析施設









レーザーアブレーションシステム付きマルチコレクター 誘導結合プラズマ質量分析装置(LA-MC-ICP-MS)



ペレトロン年代測定装置



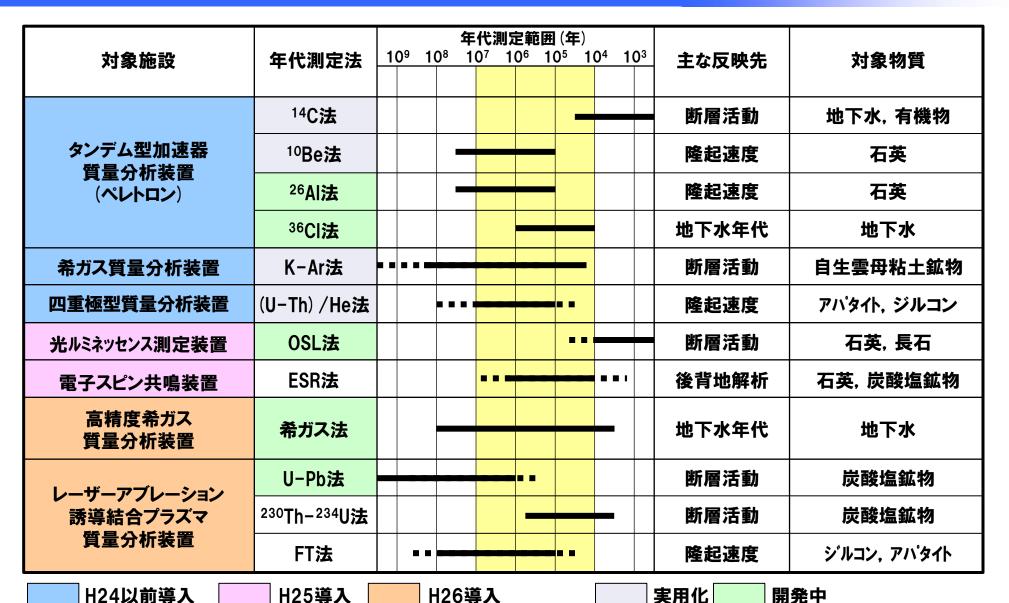
光ルミネッセンス測定装置 (OSL)



マルチコレクター希ガス質量分析装置

### 土岐地球年代学研究所で実施中の年代測定手法



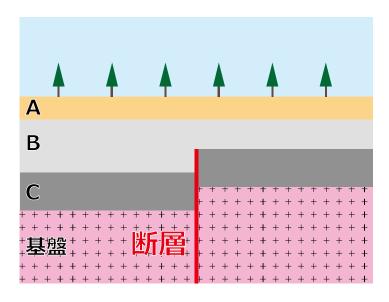


40

### 断層の活動性評価に係る課題

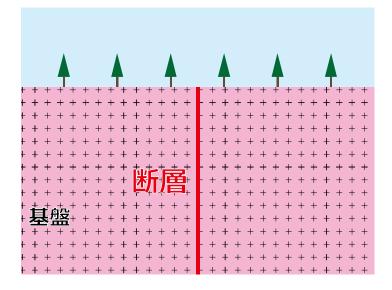


一般的には、断層を被覆する上載地層のずれに基づき評価



A, B,C層の年代から断層の 最新活動時期が推定できる

断層の活動時期推定に使える 被覆層が無い (例えば、基盤岩中のボーリング コアや地下坑道で出現した断層)



上載地層法に基づく活動性 評価は困難

⇒断層内充填物質は使えないか?

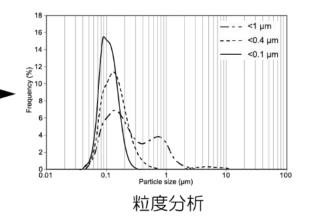
# 断層内充填物質のK-Ar年代測定





AND

skamas (5)\* 20-20044



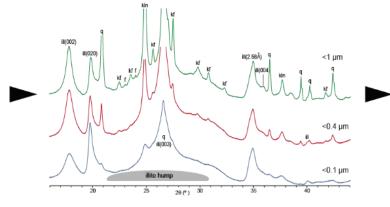
破砕帯の観察・試料採取

凍結・融解粉砕 (-20°C~25°C)

高速遠心分離による 極細粒試料の分離

<u>0.2 μm</u>

電子顕微鏡(TEM)観察



X線回折分析



カリウムおよびアルゴンの定量 (写真は感度法を適用したアルゴン用 質量分析計)

## 断層内充填物質のK-Ar年代測定(適用事例)



- 高速増殖原型炉「もんじゅ」の 敷地内破砕帯 (原子力規制委員会による 調査に係る対応)
- 瑞浪超深地層研究所の研究 坑道中の地質断層
- 兵庫県の有馬一高槻構造線、 山口県の岩国断層など (活断層)



