

日本原子力学会ウェビナー「放射性廃棄物の管理」
第8回

放射性廃棄処分と地質環境

令和4年1月27日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門

東濃地科学センター

大澤英昭

地層科学研究部ネオテクニクスGr

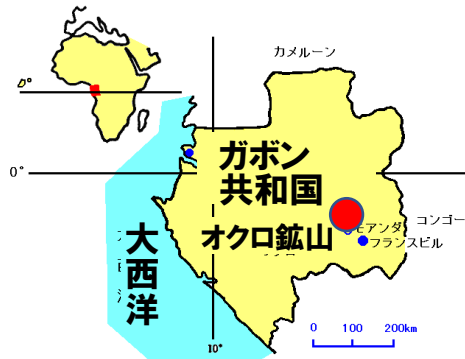
石丸恒存, 島田耕史, 末岡茂

説明内容

- ◆HLW地層処分の安全確保の基本的な考え方と地質環境分野の役割
- ◆JAEAにおける地質環境分野の研究開発の変遷
(どのような批判的質問に対し, 科学的知見の進展を考慮しながら, どのようなアプローチで信頼性を向上してきたのか・・・)

地層処分というアイデアはどこから来たのか？

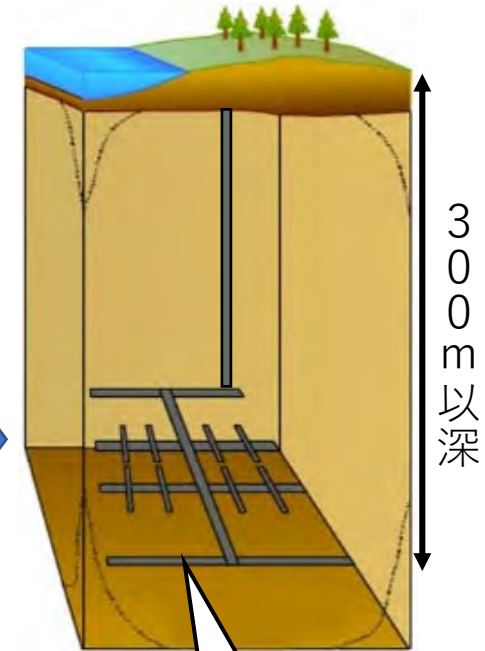
オクロ天然原子炉



約20億年前に自然状態で地下で核分裂が生じた跡(黒褐色の部分)

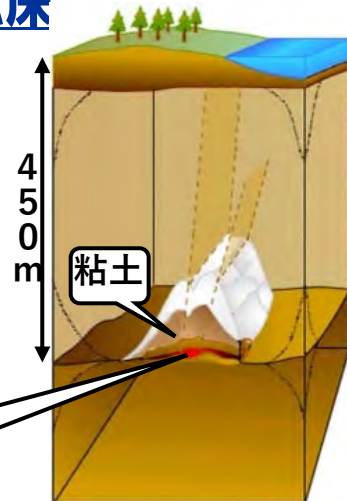


地層処分の概念



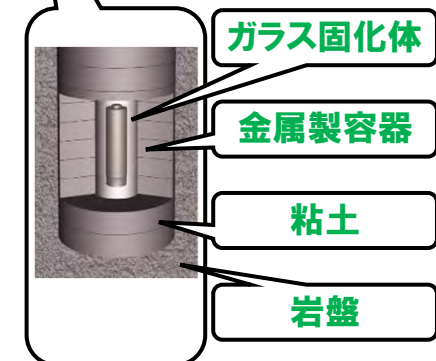
自然から学ぶ

シガーレイク ウラン鉱床



約13億年前に形成されたウラン鉱床

多重バリアシステム



地下深部の特徴

- 地上に比べて、自然現象や人間活動の影響が及びにくい
- 地下水の動きが極めて遅い
- 酸素が欠乏しており、物質の溶解や腐食が起こりにくい



約1800年前の銅鐸
(堺市下田遺跡出土品)

1800年間、粘土の中で酸素欠乏状態に置かれ、腐食せず、銅の金属光沢が保たれている

約750年前の鉄製斧
(出雲大社出土品)

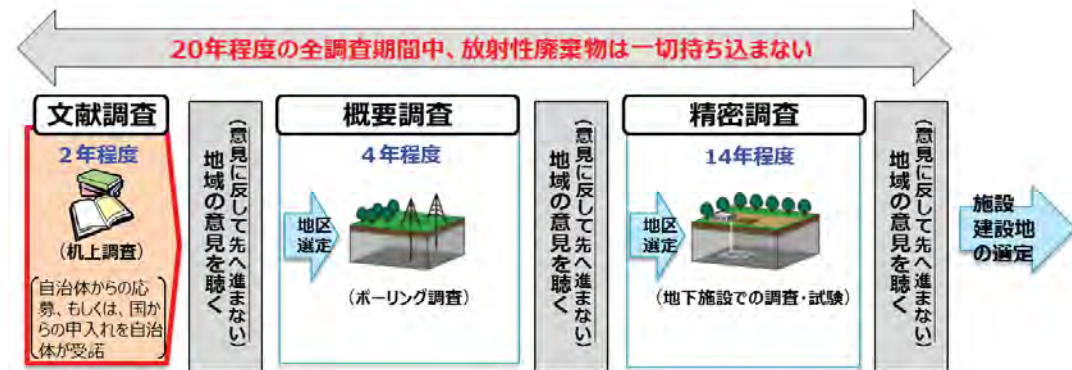


HLW地層処分の安全確保の考え方と地質環境分野の役割

【安全確保のための基本的対策】

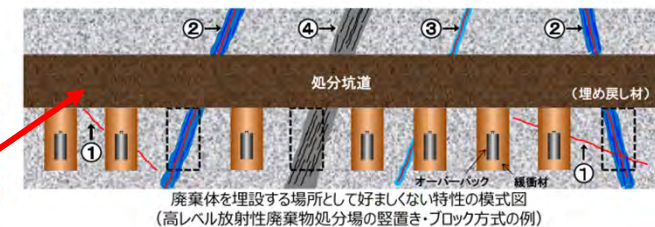
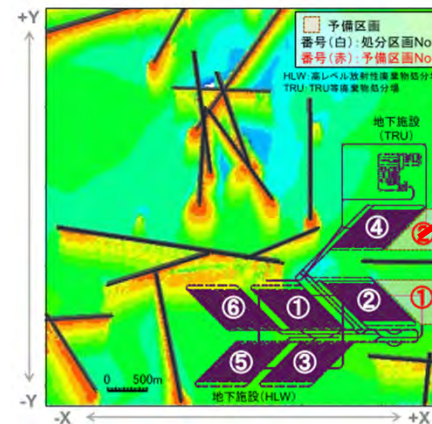
藤山(2021):包括的技術報告書の全体概要, 地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)総論, 2021.5.27, p.8より

- 段階的な調査(文献調査, 概要調査, 精密調査)により, 処分場に重大な影響を与える可能性のある自然現象(活断層や火山活動など)が及ぶ範囲を避けて, **好ましい地質環境を有するサイトを選定**
→**サイト選定調査**



資源エネルギー庁・NUMO (2022):対話型全国説明会説明参考資料
(https://www.numo.or.jp/setsumeikai/pdf/sankou_taiwa_20220105.pdf)

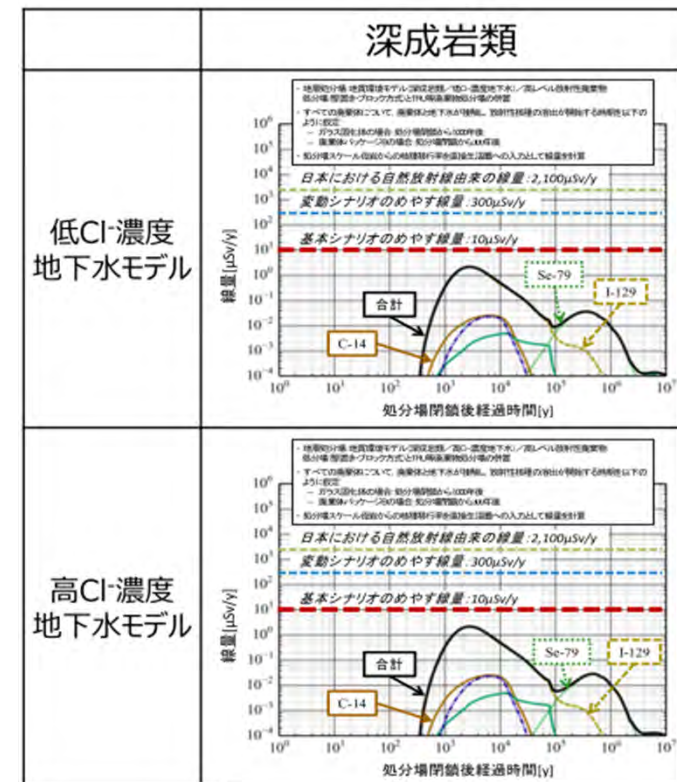
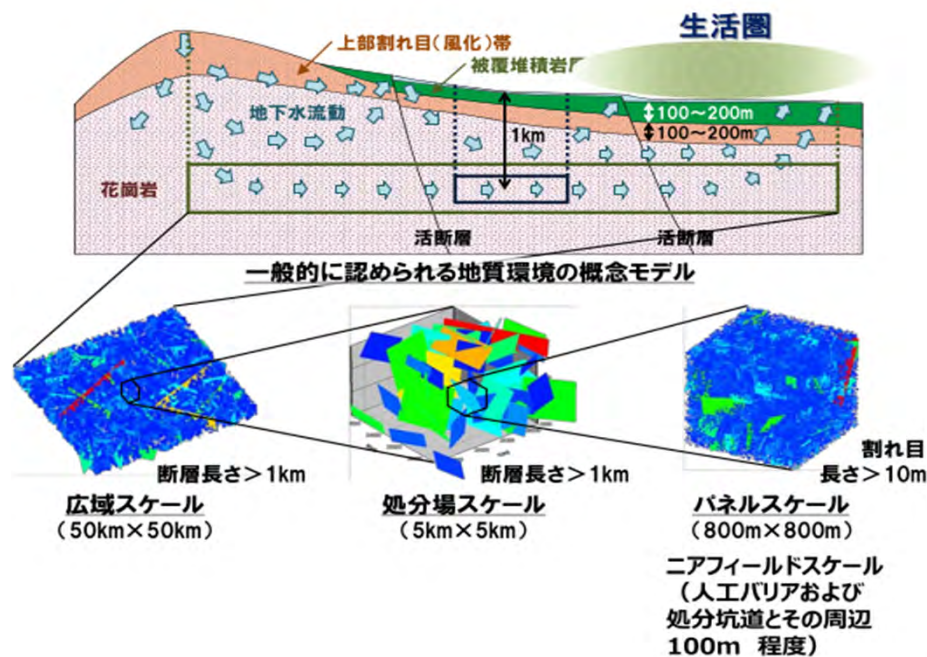
- 選定されたサイトの将来の地質環境の変化も考慮して, **十分に安全裕度を持たせて処分場(人工バリアや地下施設など)を設計**
・ 処分場の設計は, サイトの条件の具体化に応じて段階的に詳細化
→**工学的対策(処分場の設計)**



北川(2021) p.32及び34より抜粋

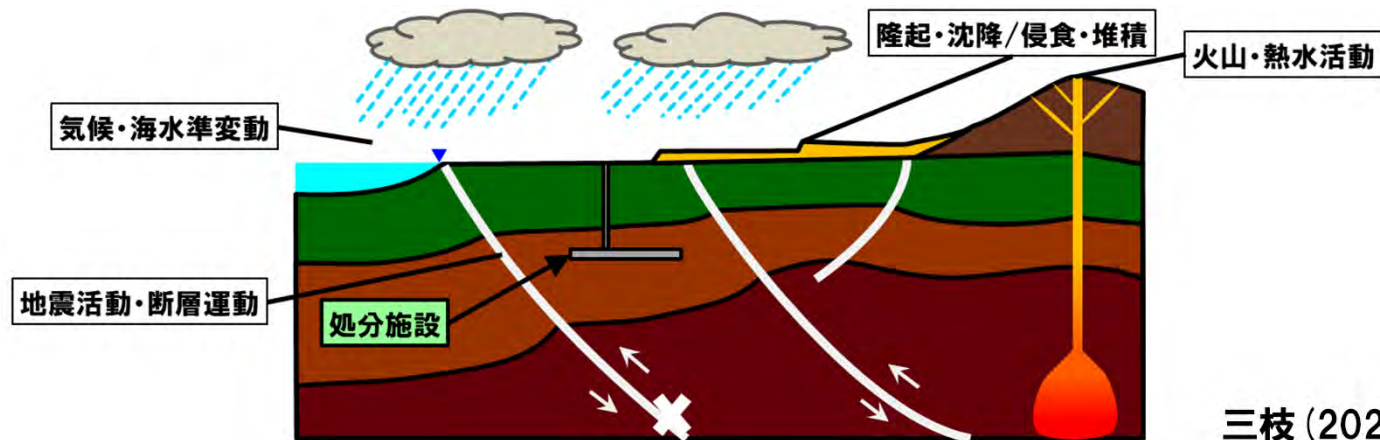
HLW地層処分の安全確保の考え方

- **さまざまな不確実性を考慮した安全評価によって算出される影響が、許容できる範囲（規制機関が示す安全基準）に収まる場合は安全と判断、収まらない場合は処分場の設計の見直しやサイトの変更などを実施**
→安全評価(物質移行モデル, シナリオなど)



藤崎 (2021), p.15及びp.27より抜粋

地質環境に求められる要件と期待される安全機能への影響要因(閉鎖後)



三枝 (2021), p.8より抜粋

基本概念	安全機能	閉鎖後長期の地質環境に求められる要件	影響要因
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	廃棄体を人間の生活環境に接近あるいは露出させるような著しい影響を及ぼす 自然現象が生じないこと	火山・火成活動, 隆起・侵食
	人間接近の抑制	現在認められている経済的価値の高い 鉱物資源が存在しないこと	鉱物資源の存在
閉じ込め	放射性物質の溶出抑制 および 放射性物質の移行抑制	熱環境 : 地温が低いこと	火山性熱水・深部流体の移動・流入
		水理場 : 地下水流動が 緩慢 であること	地震・断層活動, 隆起・侵食
		力学場 : 岩盤の変形が 小さい こと	地震・断層活動
		化学場 : 地下水は 高pHあるいは低pHではない, 酸化性雰囲気ではない, 炭酸化学種濃度* が 0.5 mol/L以上と ならないこと	火山性熱水・深部流体の移動・流入, 地震・断層活動, 隆起・侵食

*溶液中に溶存している無機炭素（炭酸塩，炭酸水素塩，炭酸，二酸化炭素）の合計の濃度

処分地選定における段階的調査



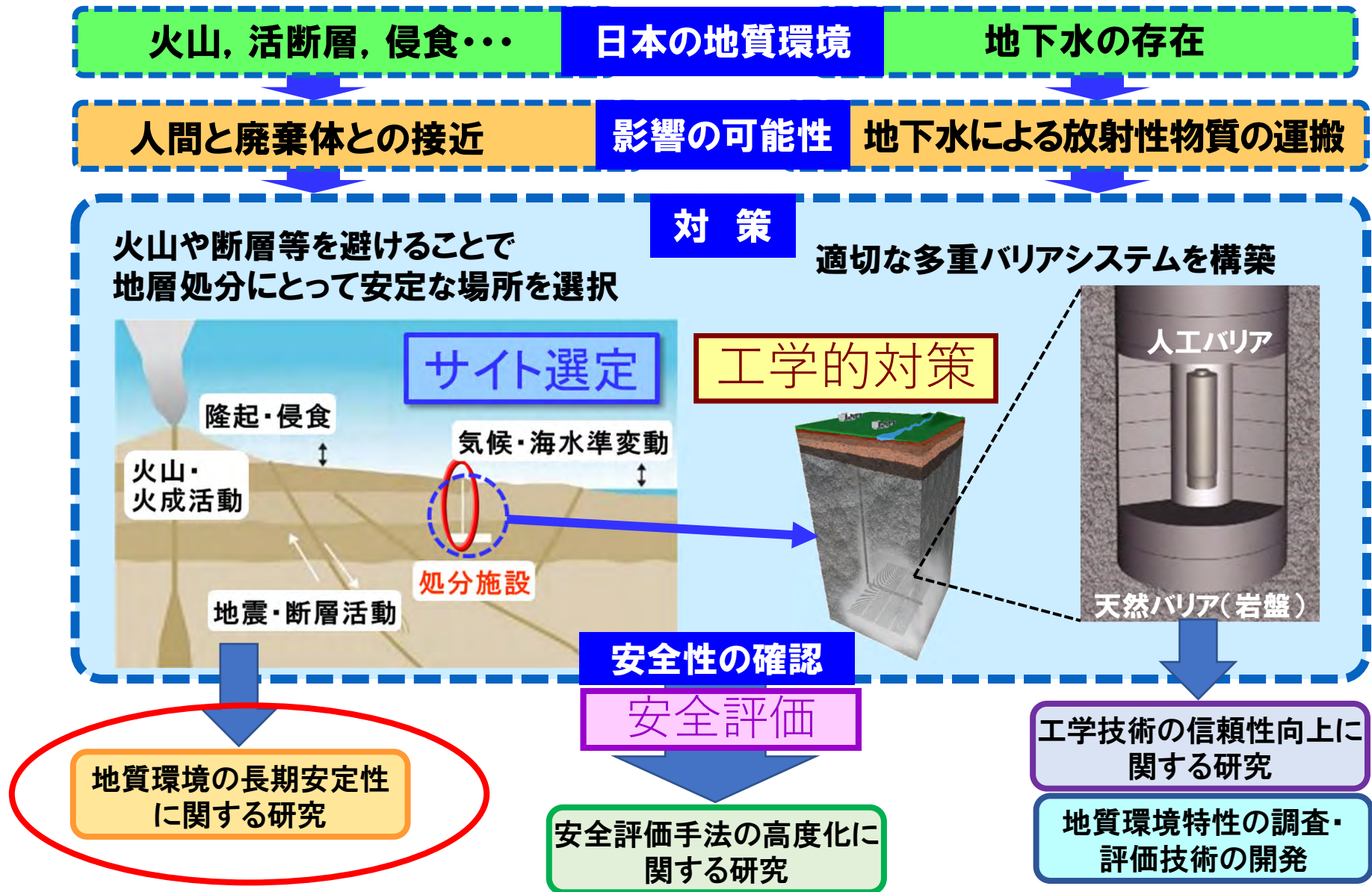
資源エネルギー庁・NUMO (2022):対話型全国説明会説明参考資料
(https://www.numo.or.jp/setsumeikai/pdf/sankou_taiwa_20220105.pdf)

- ◆ 火山・火成活動、火山性熱水・深部流体の移動・流入、地震断層活動、著しい隆起・侵食、第四紀未固結堆積物の分布、鉱物資源の存在により、明らかに劣ると判断される範囲を除外。
 - ◆ 自然現象の著しい影響を回避したサイトにおいては、閉じ込め機能の観点から地質環境特性を把握して明らかに適格性が劣る範囲を除外。
 - ◆ 過去から現在までの地質環境特性の時間的・空間的変遷を把握して、変化の幅を定量化することにより、将来10万年を超えるよう長期にわたって閉じ込めの観点から好ましい地質環境特性が安定に維持されることを確認。
- 三枝ほか(2022)

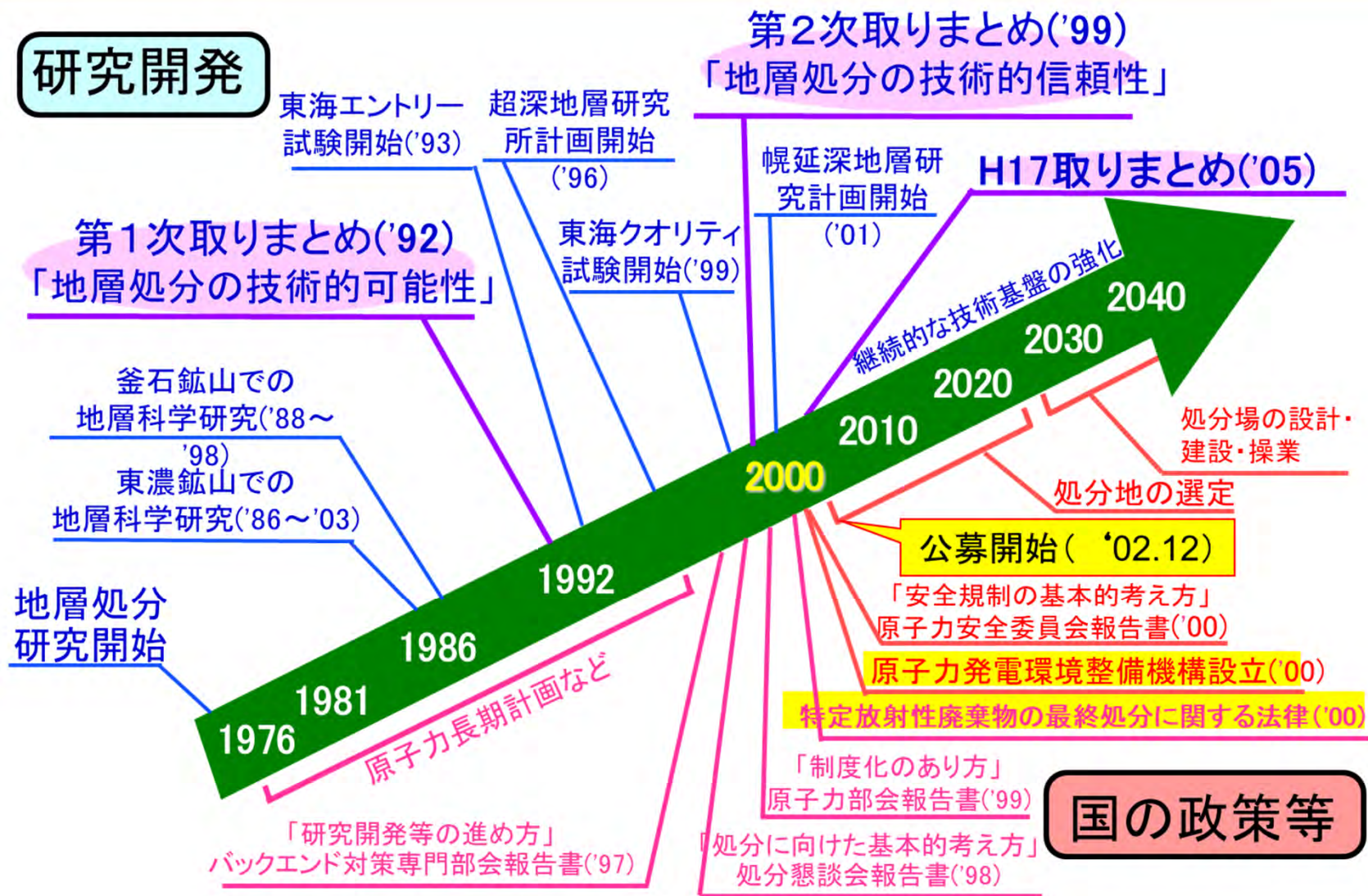
「安定な地質環境」とは何か？ (OECD/NEA,2009)

地層処分システムを構成する領域における地質環境内部での、また、外部からの攪乱に対して、その地質環境が有する本来的な緩衝能力により長期にわたって突発的あるいは急激な機能喪失を生じる可能性が低いものをいう。また、攪乱をもたらす地質学的な事象やプロセスが排除できるか、十分頻度が低いか緩慢であるか、あるいは結果としての影響が十分小さい等の条件により、処分場の安全性について必要な時間枠にわたって考慮する必要がないのであればサイトは地質学的に安定であると考えられる。

JAEAにおける研究開発



わが国の地層処分計画の流れと研究開発の経緯

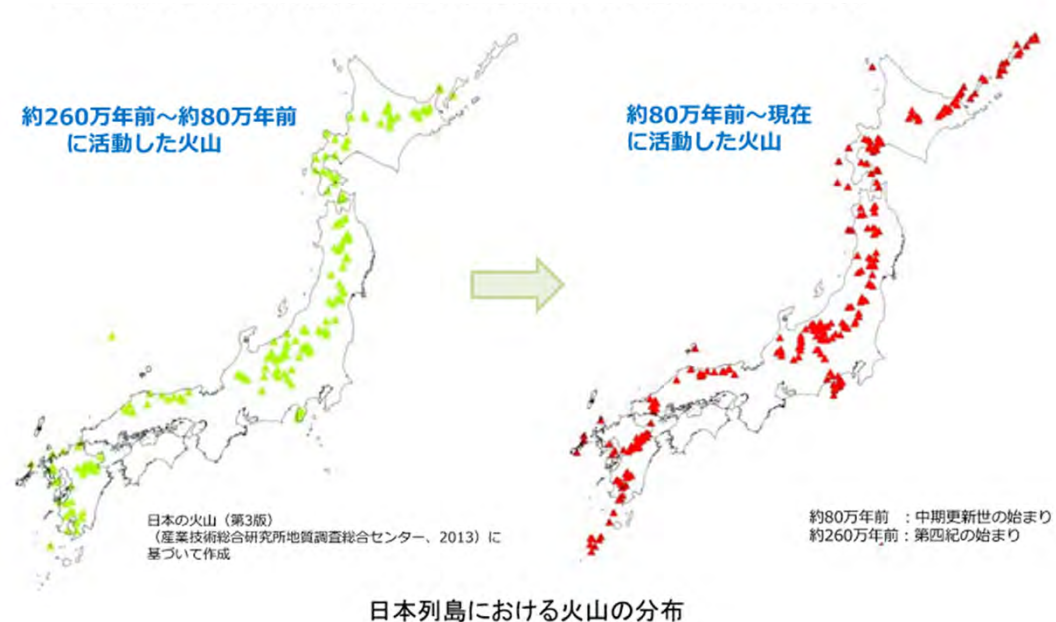
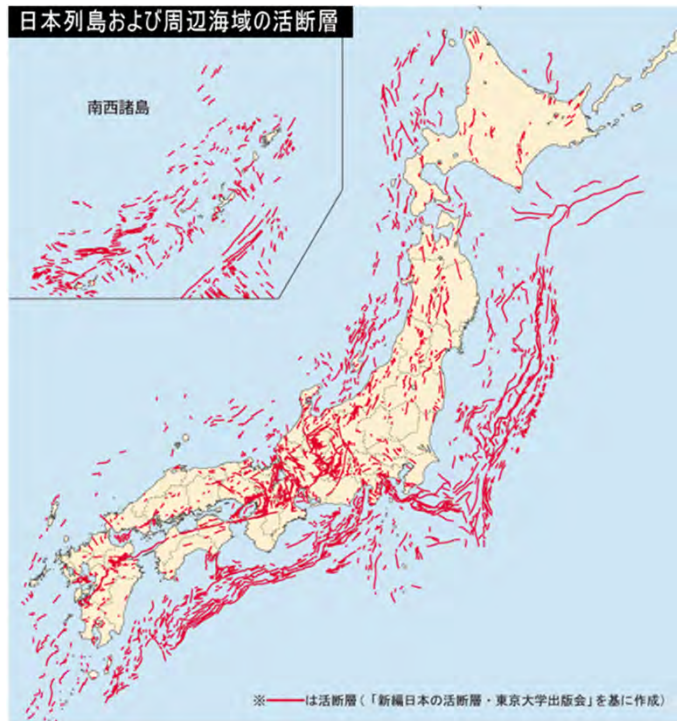


- 地質環境特性の調査・評価技術の開発(深地層の研究施設(幌延, 瑞浪))
- 地質環境の長期安定性に関する研究(全国での事例研究, 深地層の研究施設)

地質環境分野の研究開発の変遷 (地質環境の長期安定性研究)

～第2次取りまとめ(1999年)

関連する地球科学の分野に蓄積された情報や知見を分析するとともに、地層や岩石の年代測定等を補足的に実施し、過去から現在までの活動の中に認められる傾向や規則性に基づいて、自然現象の将来の活動の可能性や変動の規模等を検討



高レベル放射性廃棄物の最終処分国民対話月間全国シンポジウム「いま改めて考えよう地層処分」～処分地の適性と段階的な選定の進め方～, 2015.10, p.32.
(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/hoshasei_haikibutsu/pdf/023_s01_00.pdf)

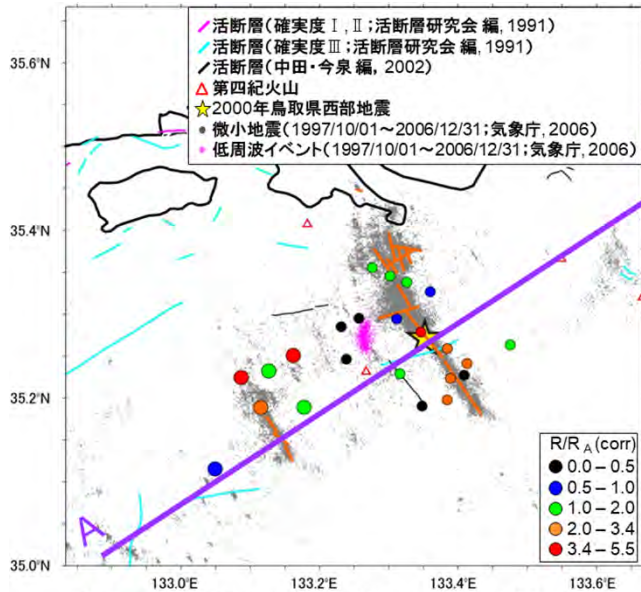
現存する活断層や火山を避けても将来的には地震・断層活動や火山・火成活動による重大な影響を免れないのでは？

変動地形が明瞭でない活断層等の把握

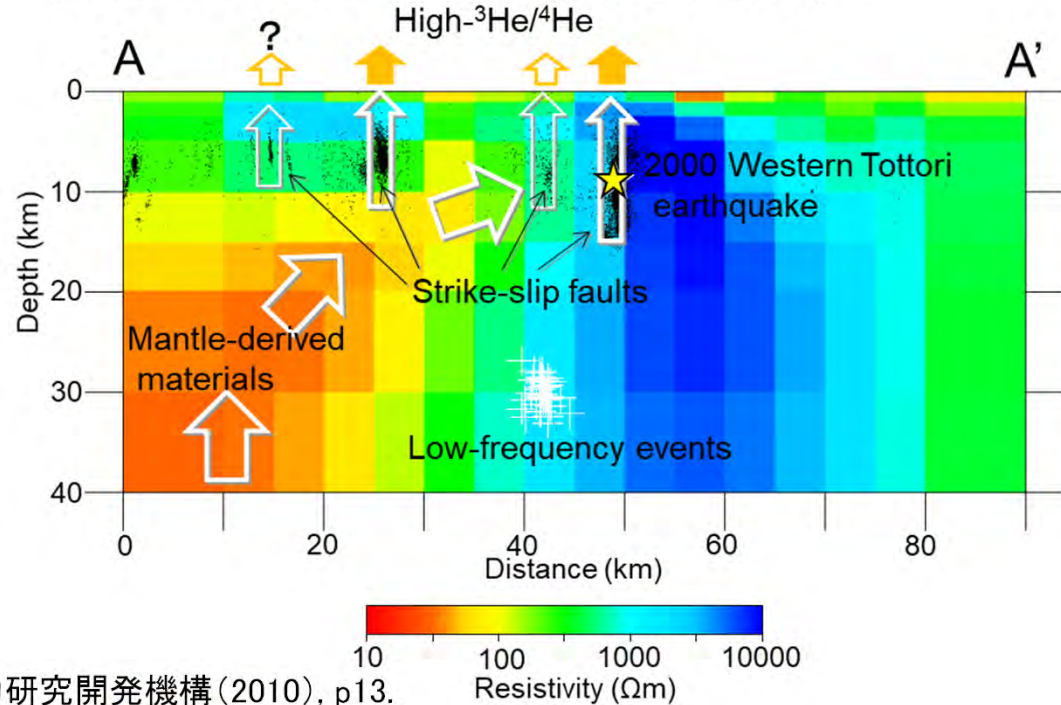
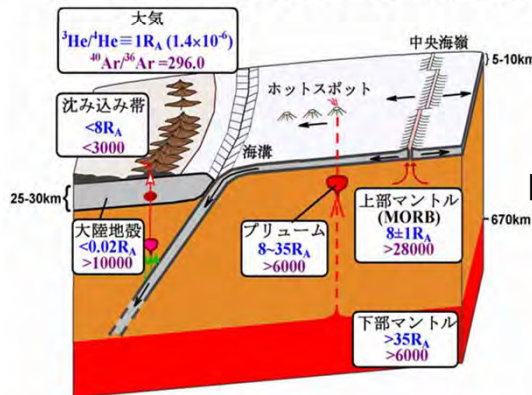
変動地形が不明瞭な地域では将来活動する可能性のある断層を把握できないのでは？

鳥取県西部地震(2000.10.6) 鳥取県米子市南方約20km 深さ9km Mj=7.3, Mw=6.6~6.8

- ✓ 2000年鳥取県西部地震は、これまで活断層が図示されていない地域で発生
- ✓ 事前に地震発生ポテンシャルがあることが推定可能だったものの・・・(井上ほか, 2002)



地下水遊離・溶存ガスの³He/⁴He分布



日本原子力研究開発機構(2010), p13.

地下深部に流体(マグマ)があり、かつ地表でマグマ起源のガスのヘリウム同位体比が確認できれば、変動地形が明瞭でない地域でも活断層の存在の可能性を指摘できるのでは・・・

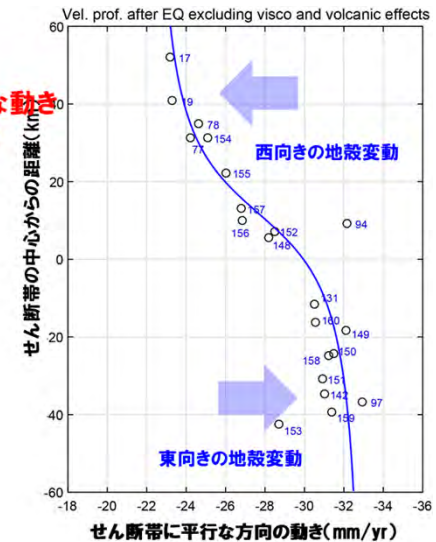
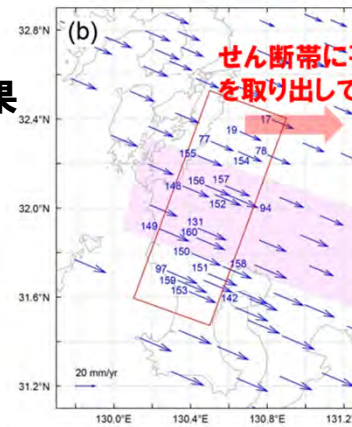
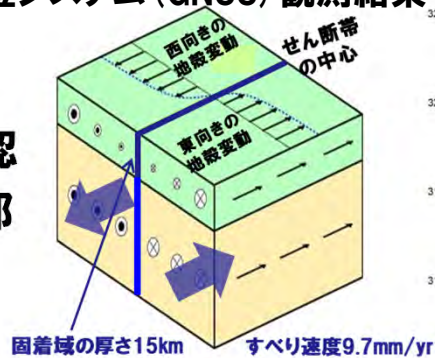
変動地形が明瞭でない活断層等の把握

大地震が発生して活断層の存在が知られる前にはわからないのでは？

南九州せん断帯

- 左横ずれのせん断帯が指摘
- 既存文献では活断層は未確認
- 成因不明のリニアメント密集部

全世界測位システム (GNSS) 観測結果

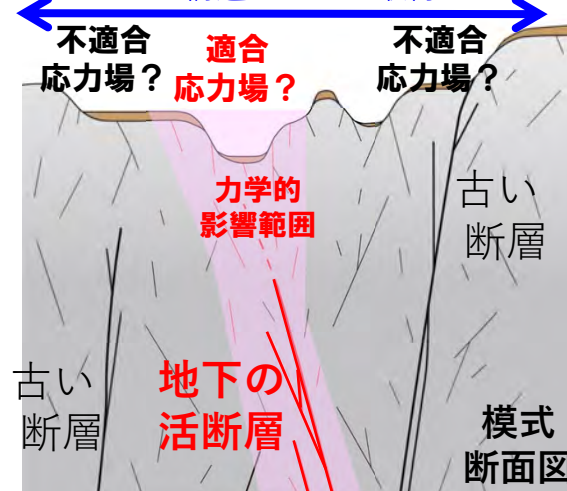


変動地形が無い場合、地下の活断層の存在をあらかじめ指摘するには？

定常的なずれ動きを確認することで、せん断帯の存在を指摘できる。

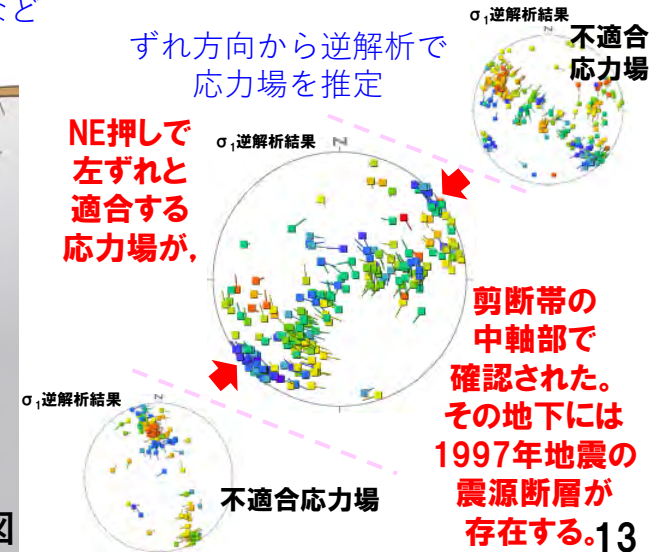
現世応力場(ひずみ速度場)と調和的なずれ(適合応力場)を示す、地表に散在する小断層の分布域の地下に、地下の活断層が存在する可能性を指摘できる。

横断ルートを設定し小断層のずれ方向などの構造データを取得



ずれ方向から逆解析で応力場を推定

NE押しで左ずれと適合する応力場が、



地震・断層活動による地下水流動の変化

2000年レポートでは、地震・断層活移動による水位の変化や湧水は時間とともにもどりに戻るため長期的な影響は少ないとされたが、長期に湧水が生じるケースがある？
 →流入する流体の化学的・熱的影響を無視できないのでは？

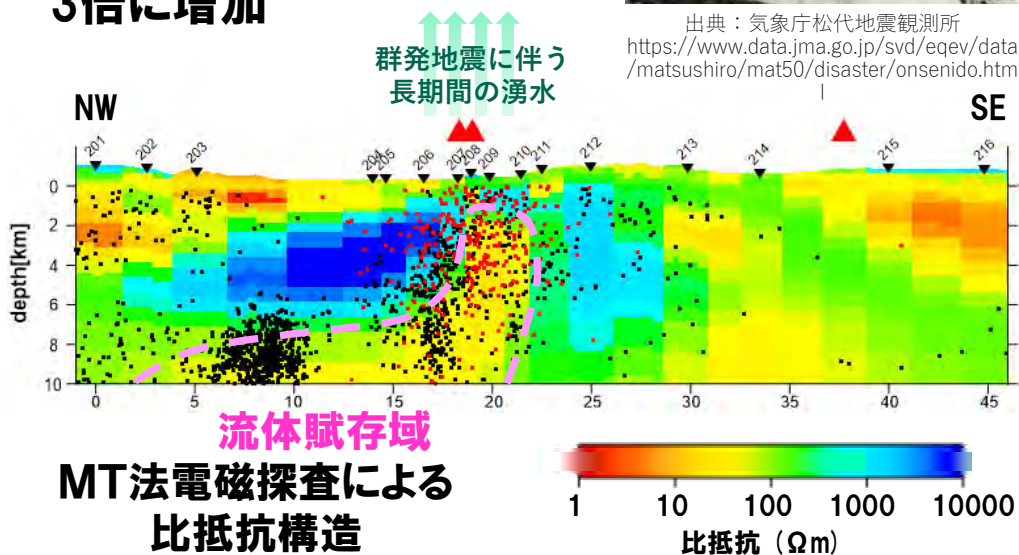
【松代群発地震

(1965~1968年)】

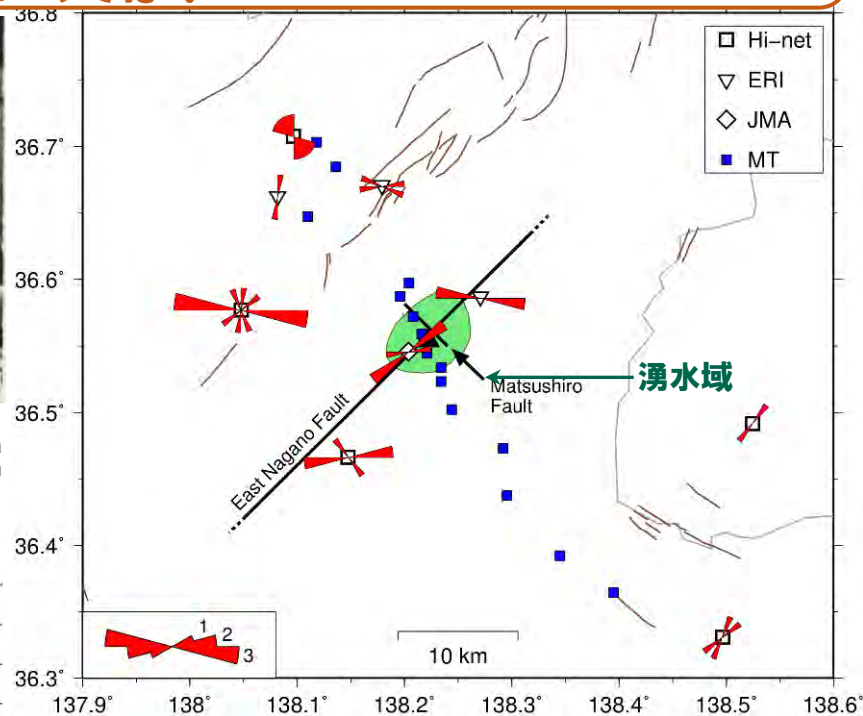
- 地震に伴い、約1千万t/4か月に達する温泉水が湧出
- 地下深部起源の塩水で、その濃度は地震発生前の2~3倍に増加



出典：気象庁松代地震観測所
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/matsushiro/mat50/disaster/onsenido.htm>



日本原子力研究開発機構・電力中央研究所(2020) 図4.3.2-1を補足,



日本原子力研究開発機構・電力中央研究所(2021) 図4.3.3-2

S波スプリッティング解析による速いS波の振動方向

➤ 湧水域は、西北西-東南東方向と北東-南西方向の2方向クラックが交差する領域に相当

地下深部からの流体の湧出可能性を評価するための指標の一つとして、流体賦存域の有無に加え、クラックが卓越する断層交差部の存否が有用である可能性

断層の活動性の把握

地下で遭遇した断層の活動性は、上載地層がないのわからないのではないか？

加速器質量分析
(JAEA-AMS-TONO)

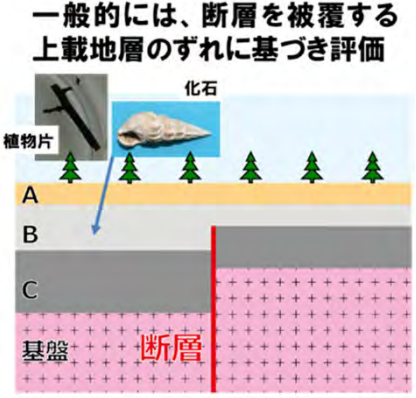


堆積物の¹⁴C年代

光ルミネッセンス年代測定法



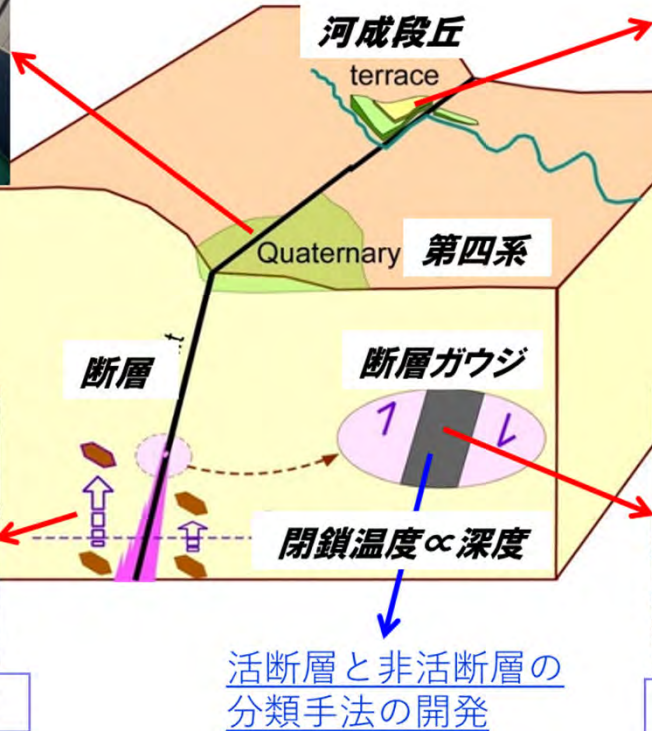
段丘堆積物の堆積年代



(U-Th)/He年代測定システム



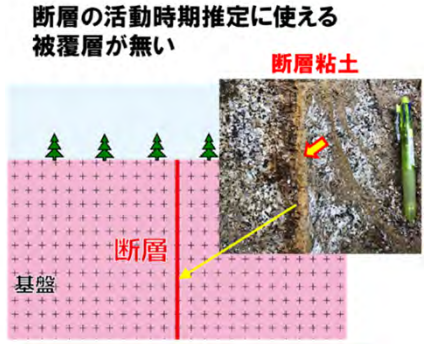
基盤岩の熱履歴(年代)



K-Ar年代測定システム



断層ガウジの形成年代



断層内物質の年代測定で正確な活動年代を知ることは難しい？

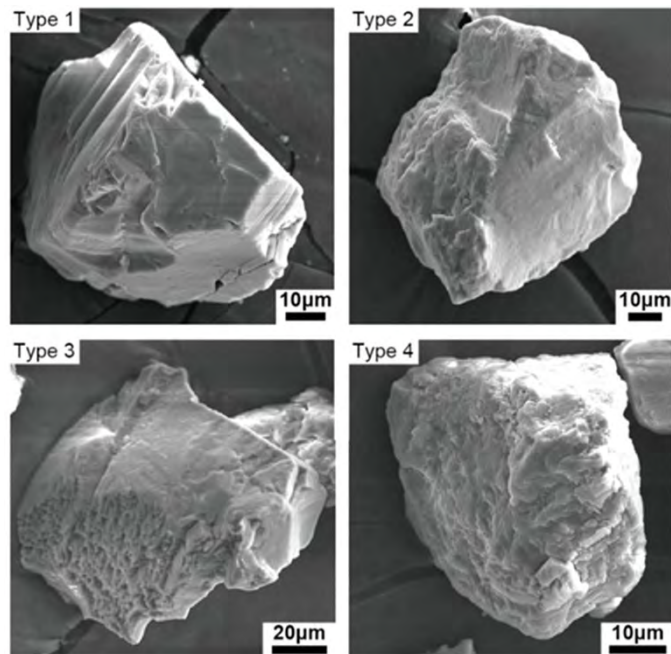
周辺岩盤の破片が混在？

サイズごとに分離

地下で遭遇した断層の活動性

ボーリング孔や坑道等の掘削によって地下で遭遇した断層については活断層の調査で通常用いられる上載地層法を適用することができず、活動性の評価はできないのでは、？

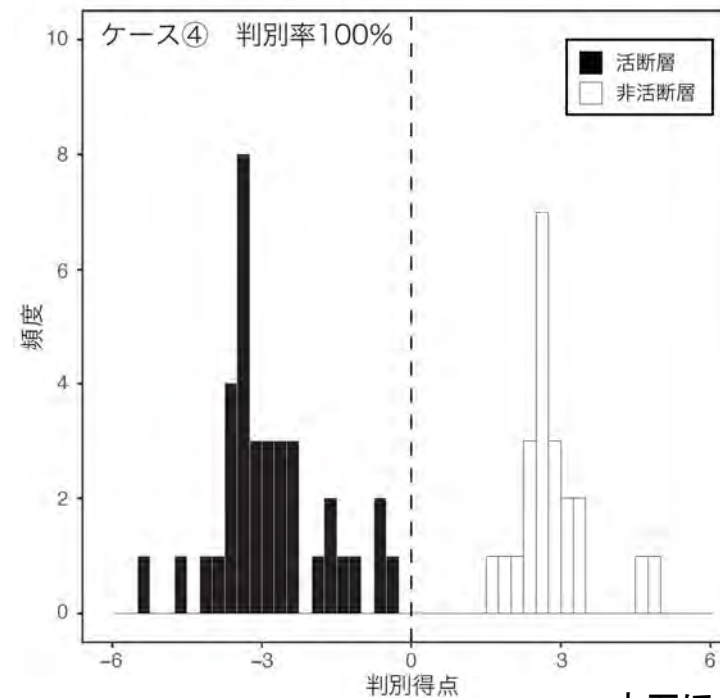
断層岩に含まれる石英等の表面構造



JAEA-Research 2016-023. 図3.1.1-2

断層内物質に活断層特有の特徴があるのでは…

日本の花崗岩中の横ずれ断層 (58試料(活断層36, 非活断層22)) の化学組成による 活断層/非活断層判別結果 (機械学習による多変量解析)



立石ほか(2021)の訂正箇所(正), 図2右下

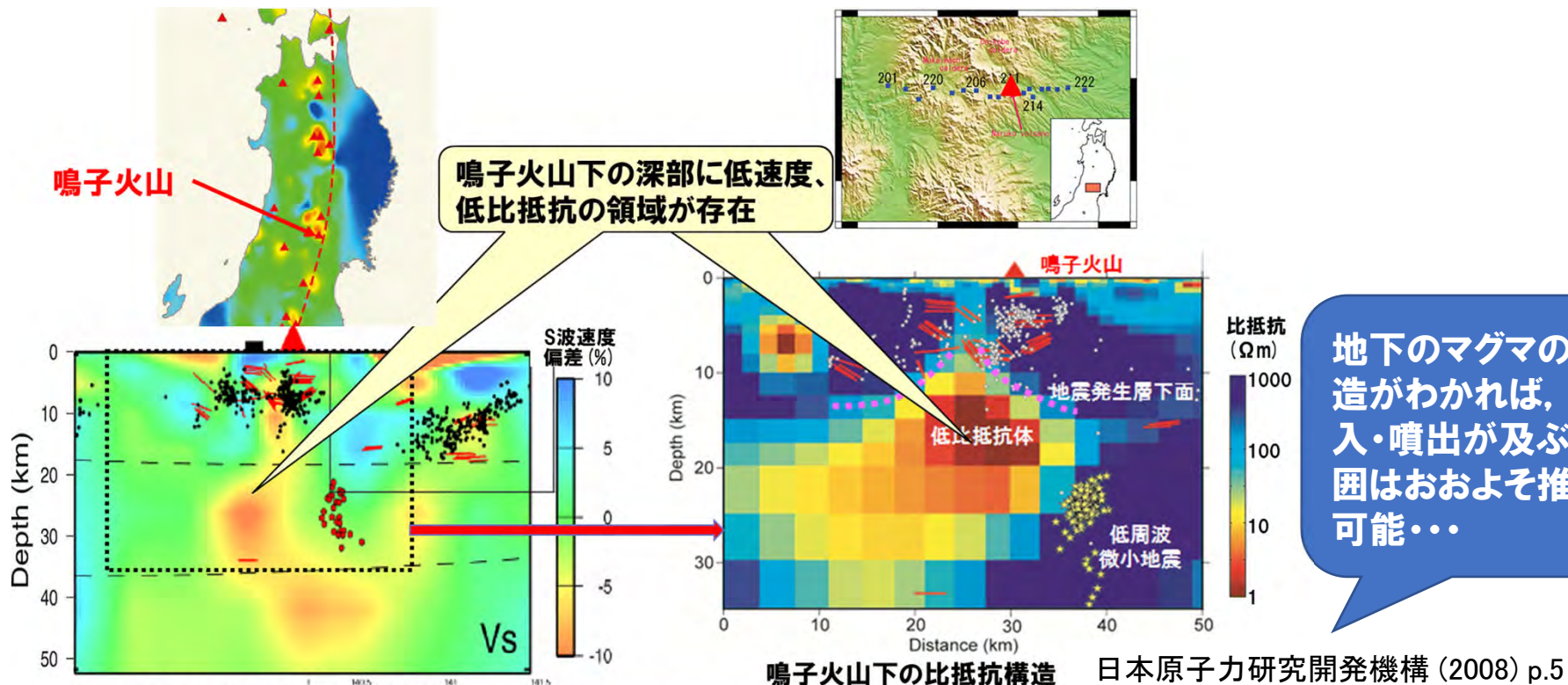
活断層ガウジ特有の
化学組成の特徴がある

(判別に寄与する程度は
 $TiO_2 > Sr > Na_2O > MnO > CaO > Ba$)

将来の火山の噴火位置

マグマが地表に噴出した火口の位置はその火山を代表する位置を中心として概ね半径15 km の範囲内に分布するとされているが、例外もありマグマの貫入・噴出が及ぶ範囲はわからないのでは？

- ・陥没カルデラを形成する第四紀火山や活動域が広範囲に及ぶ単成火山群等といった一部の火山には例外が認められる。
- ・近年の火山噴火において岩脈マグマが火山中心から30 km 移動したとの事例も報告されている。

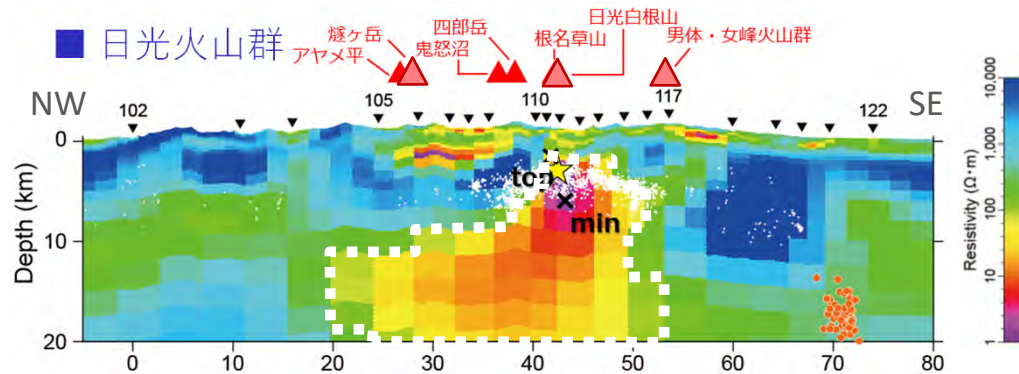


鳴子火山下のS波速度構造

日本原子力研究開発機構 (2008) p.5

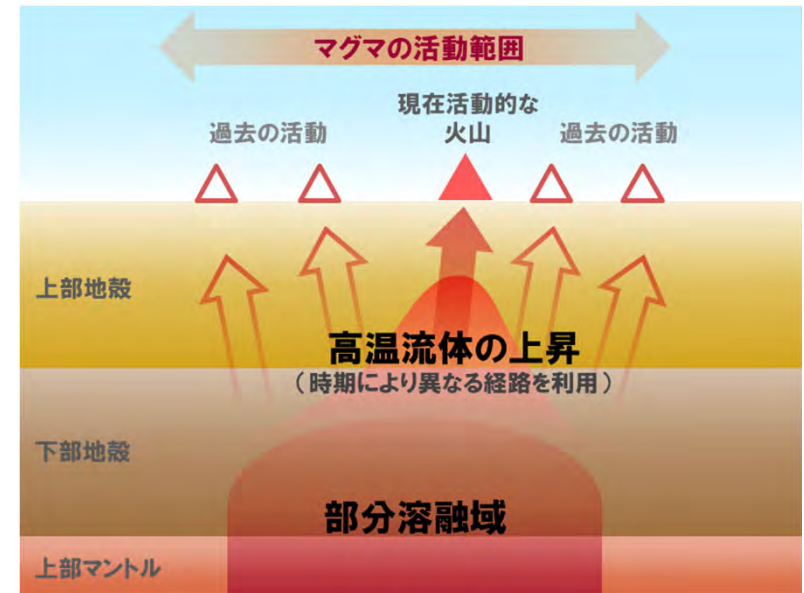
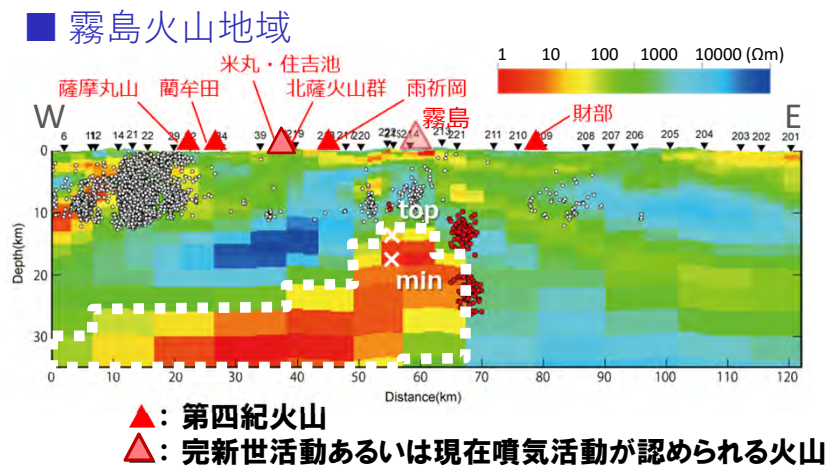
鳴子火山下にマグマが存在することを示唆
→地磁気・地電流法の適用性を確認した。

将来の火山の噴火位置(活動範囲)



将来の火山の活動場所は変わるのではないか？

第四紀火山の活動範囲と現在の部分溶融域に関する概念モデル



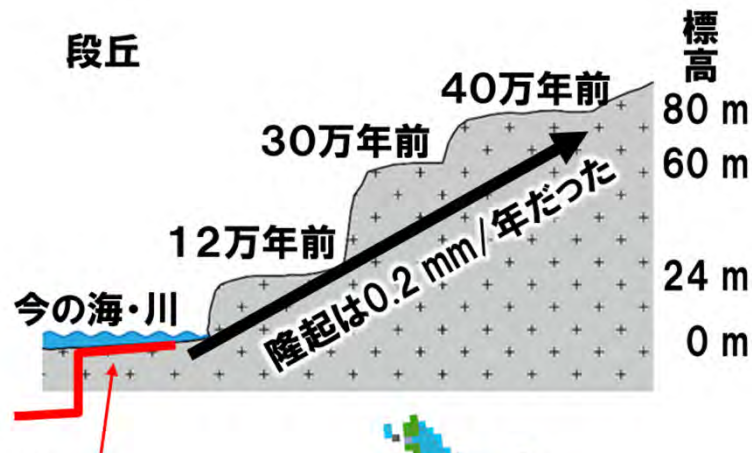
日本原子力研究開発機構・電力中央研究所(2019) 図2.2.2-4

火山地域におけるMT法電磁探査の例

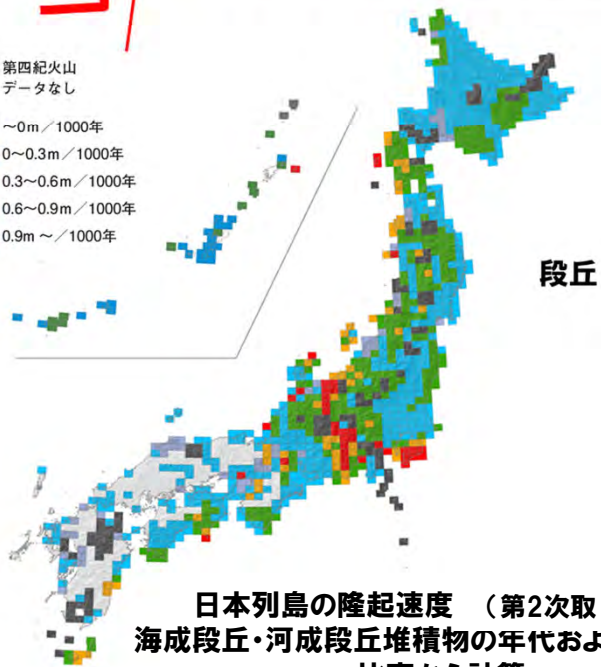
- 火山地域で第四紀に活動した火山は、地下深部(下部地殻やマントル最上部)における低比抵抗体の直上、またはその近傍に分布
- 低比抵抗体の上面は、活火山(概ね過去1万年以内に噴火した火山及び現在活発な奮起のある火山)に向けて浅くなる傾向

部分溶融域の分布を電磁法探査などで確認することにより、マグマの活動範囲が把握可能・・・

隆起・侵食速度の把握(第2次取りまとめ)

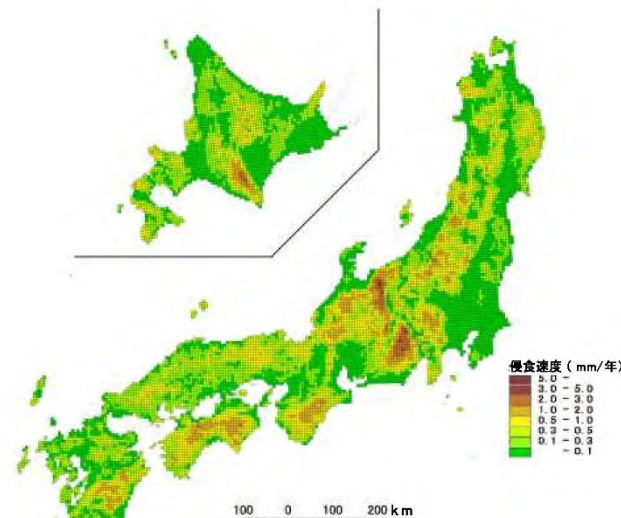
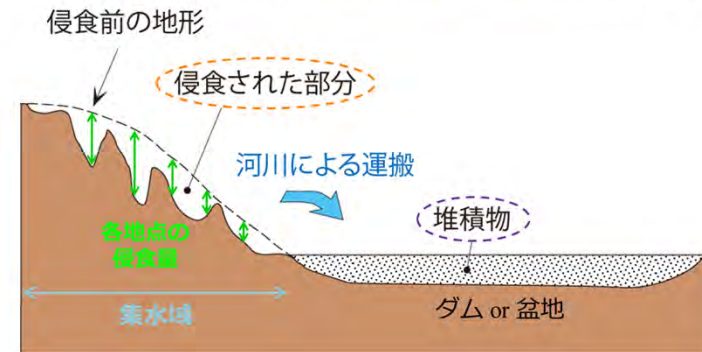


- 第四紀火山
データなし
- ~0m/1000年
- 0~0.3m/1000年
- 0.3~0.6m/1000年
- 0.6~0.9m/1000年
- 0.9m~/1000年



$$\text{侵食された体積} = \text{堆積物の体積}$$

$$\text{平均侵食速度} = \frac{\text{堆積物の体積}}{\text{集水域面積} \times \text{堆積開始の時期}}$$



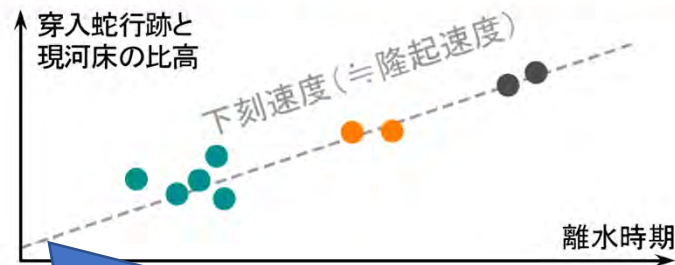
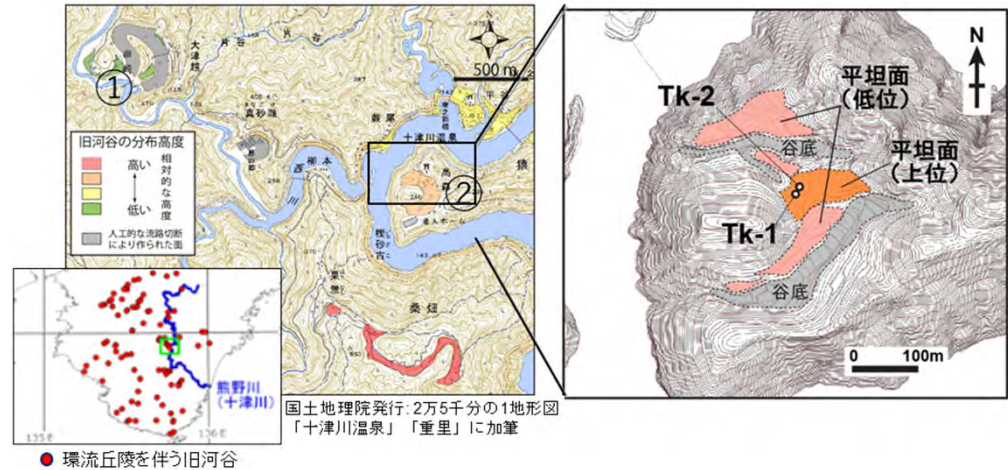
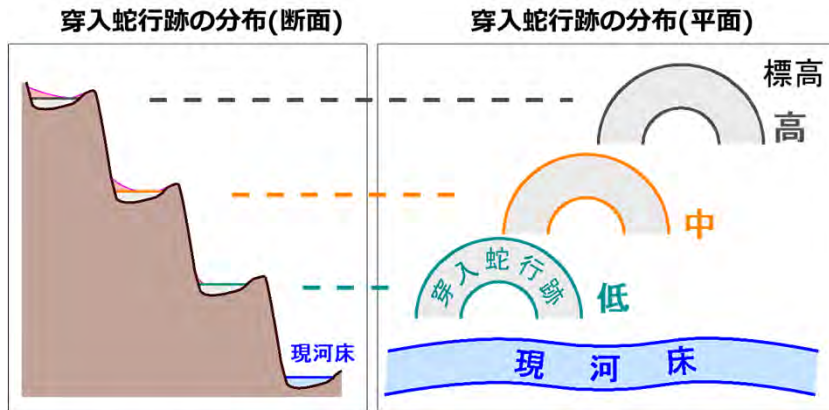
日本列島の侵食速度 (第2次取りまとめ, 1999)
ダム地域の侵食速度(ダム堆砂量から推定)
と地形起伏の強さとの関係式から計算

- 西日本の内陸部などの山間部で河成段丘など残されていないことが多いのでは？
- 基盤岩が直接露出しているところでは隆起速度が決まらない？

隆起速度の把握

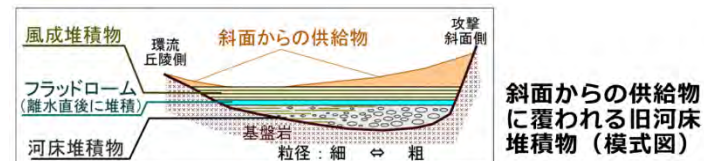
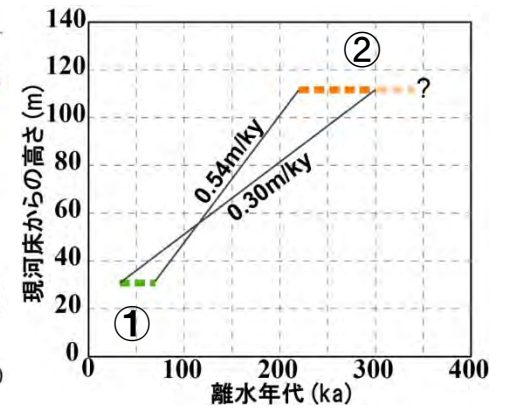
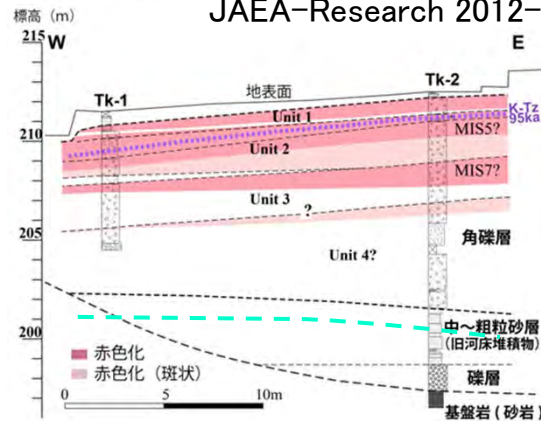
西日本の内陸部などの山間部で河成段丘など残されていないことが多いのでは？

旧河谷の堆積物を用いた調査手法の適用性の例(紀伊半島十津川)



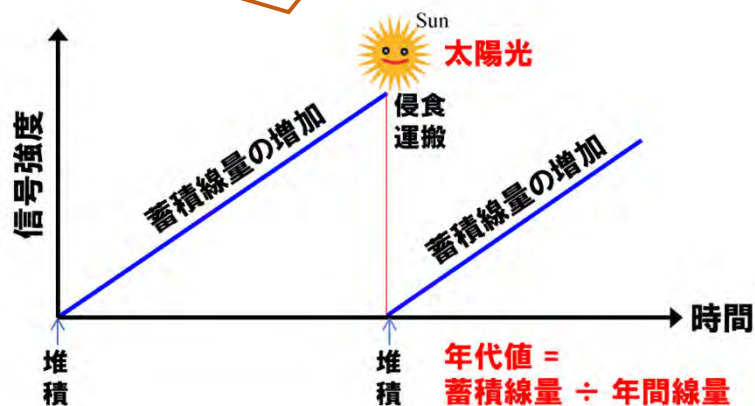
環流旧河谷（蛇行する河川において流路の短絡が発生することで形成される昔の河川の痕跡）の堆積物の離水時期から隆起速度を推定できる・・・
(データベース化) 全国968箇所

JAEA-Research 2012-024 図3.1.5-11, 12, 14(一部改変)



隆起速度の把握

火山灰(テフラ)がないと年代が決まらない?



東濃地科学センター 土岐地球年代学研究所
光ルミネッセンス測定室



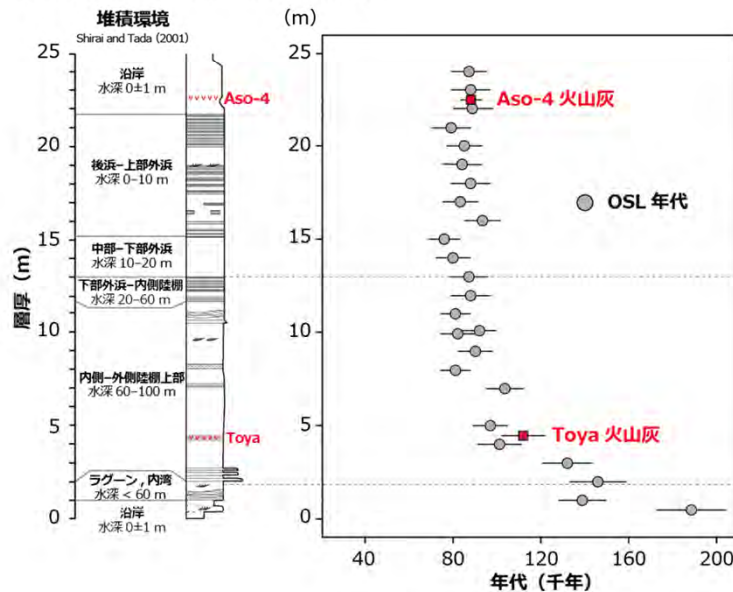
Ris ∅ DTU製 TL/OSL DA-20

石英・長石を用いた海成段丘堆積物の光ルミネッセンス年代測定が可能・・・



長石を用いた海成段丘堆積物の光ルミネッセンス年代測定の適用例

海成段丘堆積物の露頭 (男鹿半島の安田海岸)



連続的な長石の光ルミネッセンス年代値は火山灰層序と調和的

隆起速度の把握

➤ 海成段丘があっても、基盤岩が直接露出している地域(侵食地形)では年代が決まらない？



東濃地科学センターの加速器質量分析装置を用いて分析技術を開発

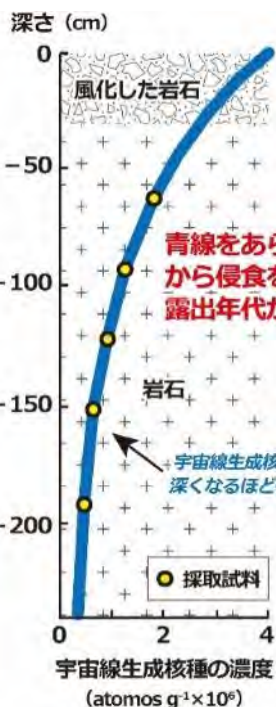


岩石と宇宙線との反応で生成される核種(^{10}Be や ^{26}Al)濃度から侵食量を推定(風成物の堆積速度が小さいケースに有効)

従来は、堆積物中の火山灰分析や放射性炭素分析などによる年代決定に基づき、隆起量を推定



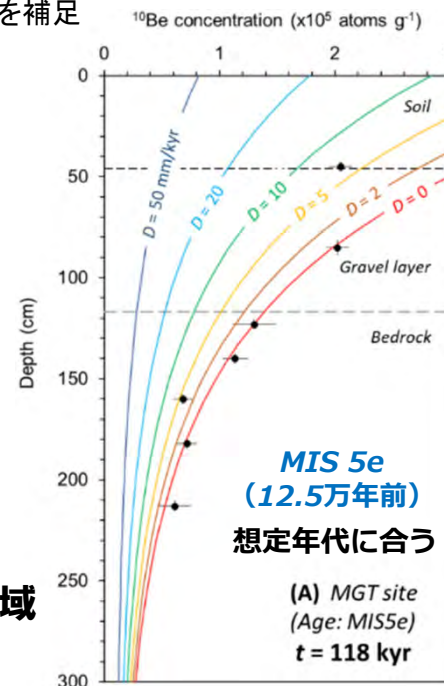
年代測定可能な堆積物がない(岩石がむき出し)場合の新たな技術開発が必要



左)イメージ図

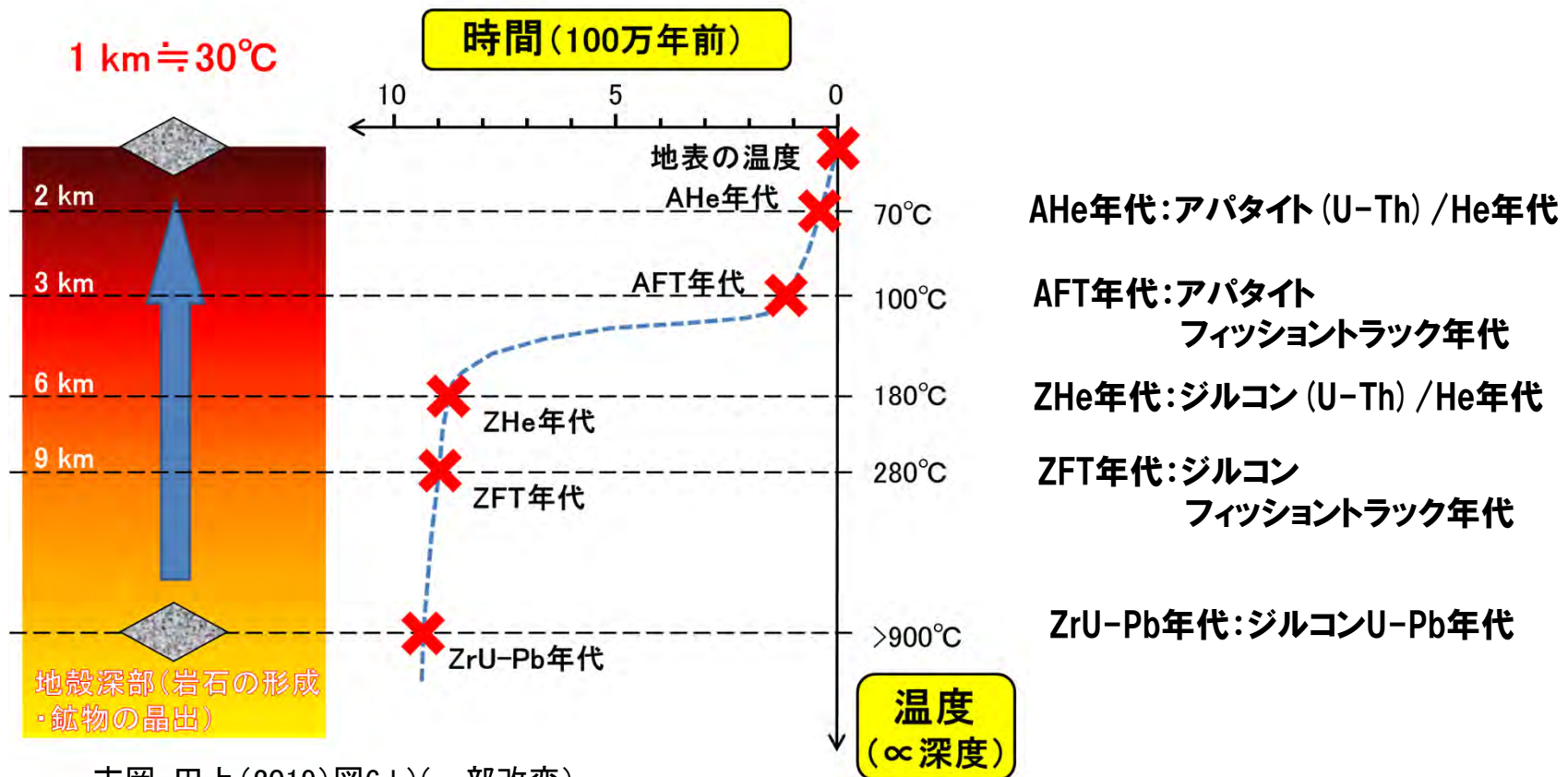
右)高知県室戸地域での事例研究

日本原子力研究開発機構・電力中央研究所(2021) 図5.2.3-1を補足



侵食速度の把握

基盤岩が直接露出している地域(侵食地形)では侵食速度が決まらない？

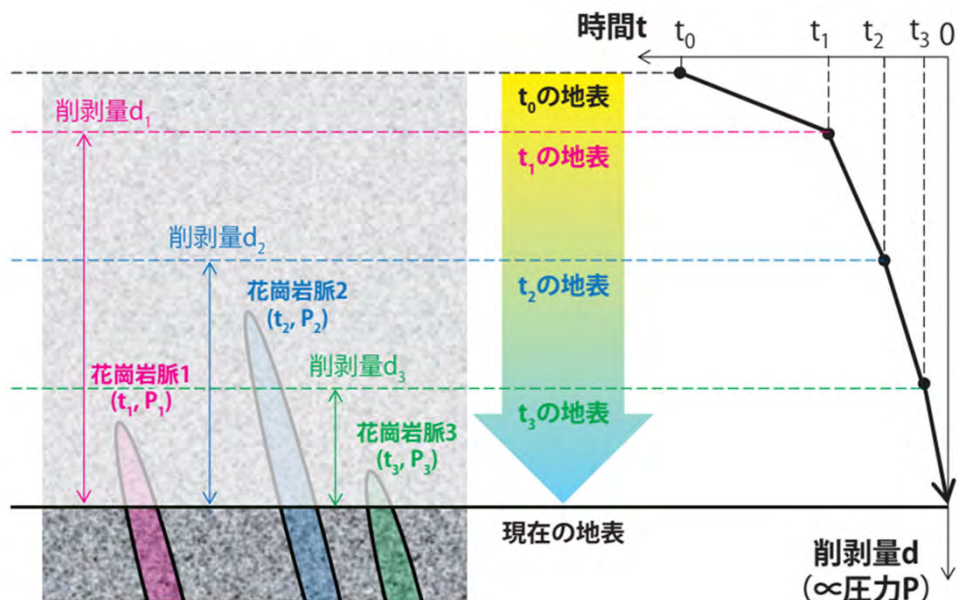


末岡・田上(2019)図6 b)(一部改変)

鉱物の年代測定法別の閉鎖温度を利用して、山地規模の百万年オーダーの侵食速度の算出が可能・・・

侵食速度

熱史や熱構造が複雑な地域では適用できない？



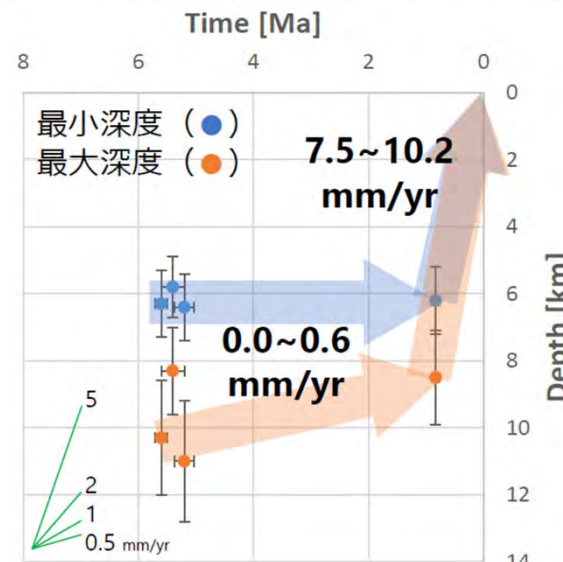
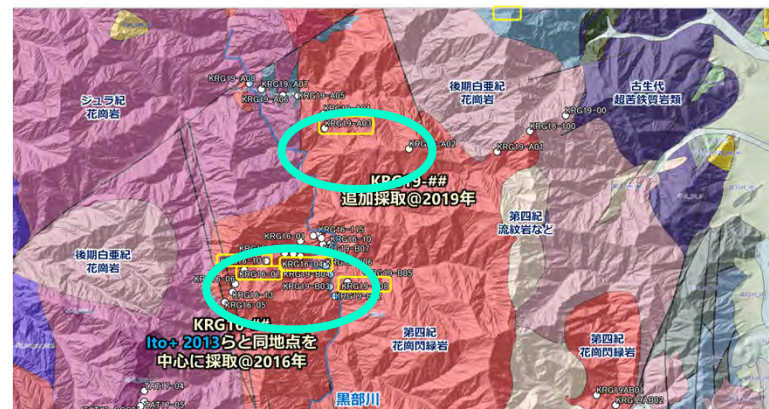
(末岡(2017), 図2)

削剥史の復元方法の概念図

複数の花崗岩体について、固結年代 t_i をジルコンU-Pb法、固結圧力 P_i (\propto 固結深度 d_i)をAl-in-Hbl地質圧力計で推定し、広域的な削剥史を復元

複数の花崗岩体の圧力(深度)を角閃石の地質温度圧力計で推定し、ジルコンのU-Pb年代測定と組み合わせることで、侵食速度が推定可能・・・

飛騨山脈黒部地域の事例



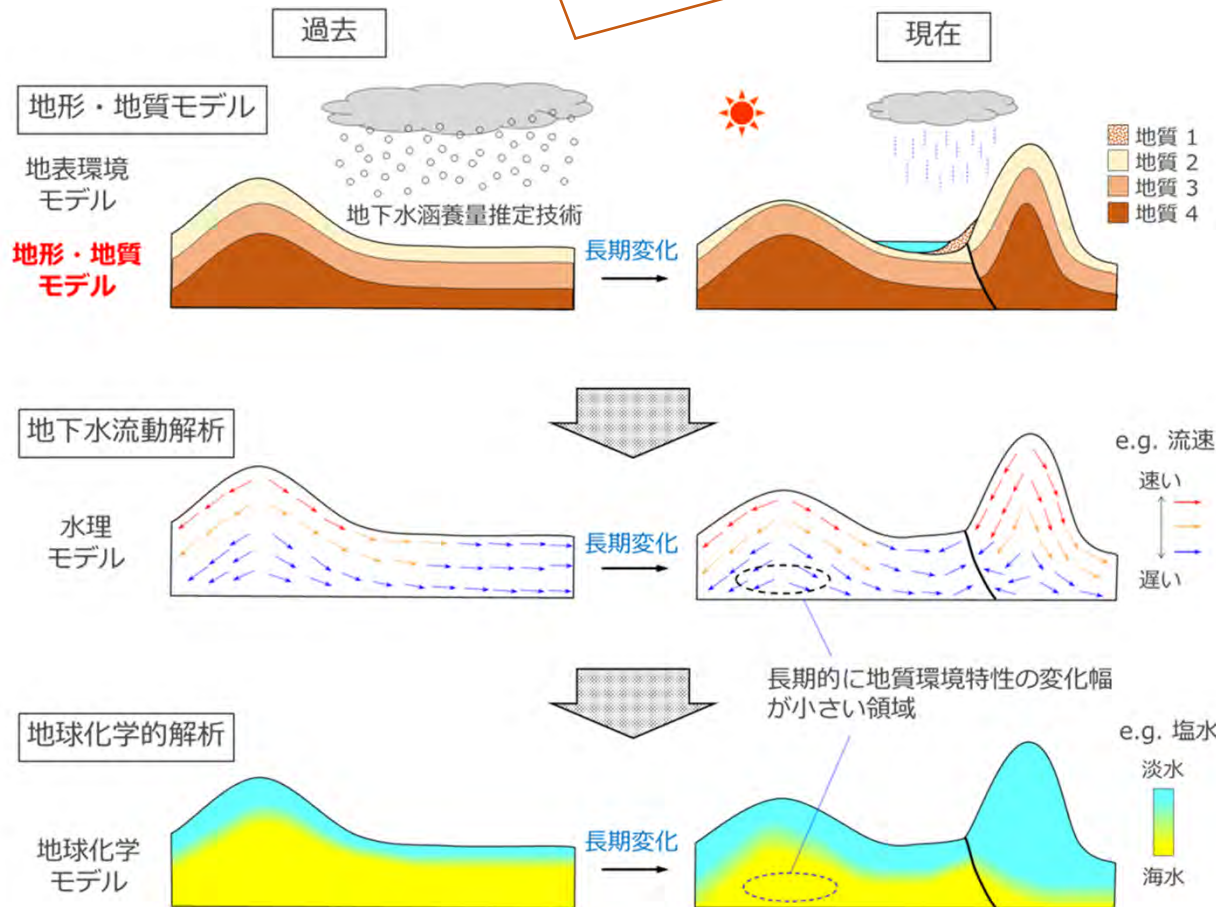
末岡ほか(2021)

- ✓ 約5Maの岩体と、約0.8Maの岩体の比較では、固結深度は同等(6~10 km程度)
- ✓ 年代vs深度は0.8Ma前後の侵食が加速

地質環境の長期変動

将来を推測(外挿)するために必要な過去の地質環境の変動を把握することは可能なのか？

地下研究施設 (URL) がある東濃・幌延地域を事例として



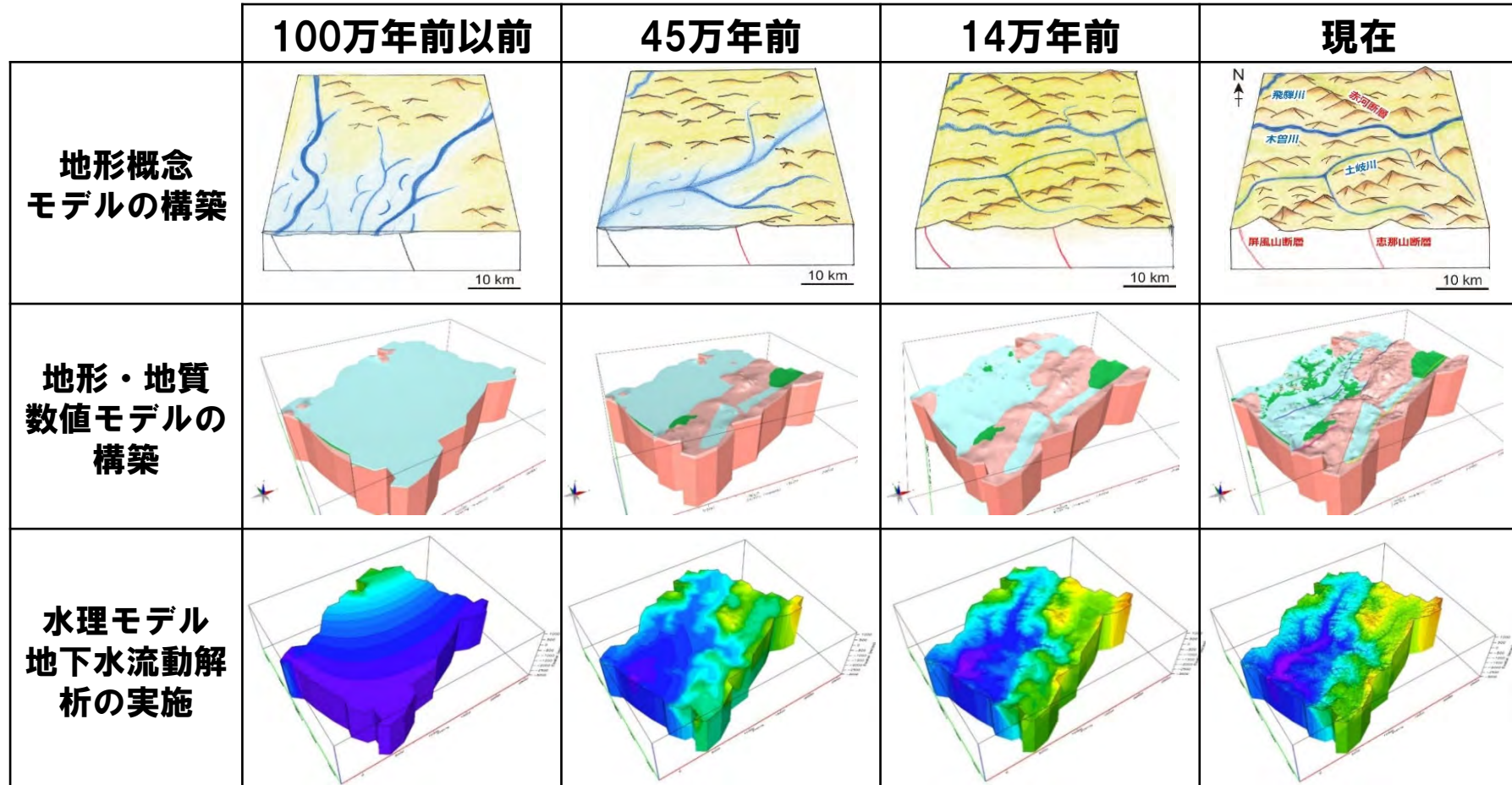
- より長期の過去の地質環境の変遷を理解(不確実性も含めて)
- 各分野間の相互作用を考慮して統合モデルを構築(長期滞留域の妥当性と地下水年代や溶存成分濃度・分布の整合性)
- 地質環境の変動幅がより相対的に小さい領域を把握(長期滞留域, 化学的な条件が一定の範囲内)

地質環境長期変動モデル

日本原子力研究開発機構(2018), 図1.2-3(一部改変)

地質環境の長期変動性評価（アプローチ）

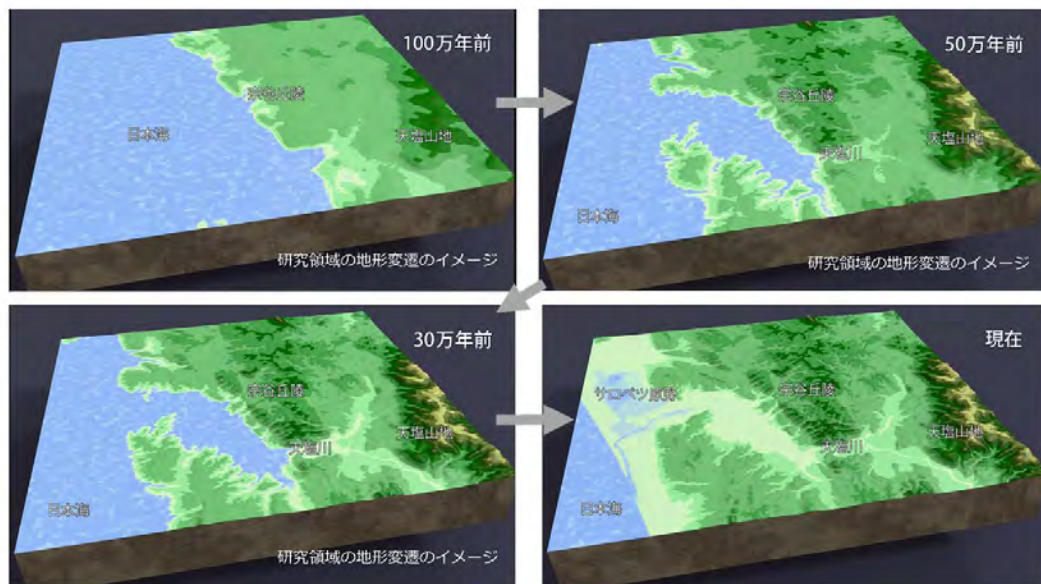
（地質環境長期変動モデルの構築）



- 過去から現在までの地形・地質モデルの構築およびそれに基づく地下水流動解析等を実施
⇒地球化学モデルを踏まえたモデルの統合化と可視化および不確実性の評価手法を検討

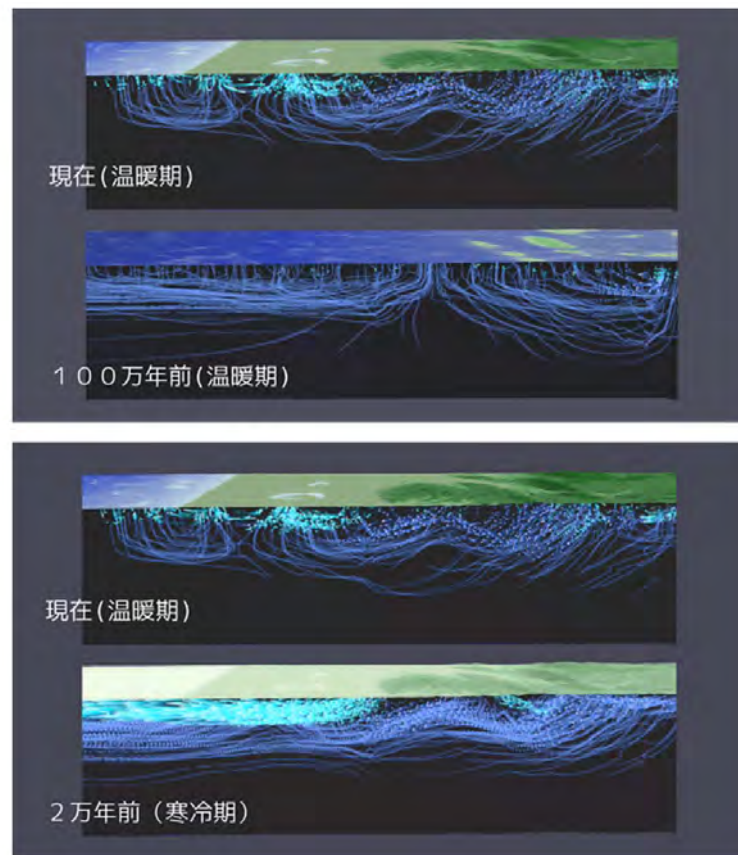
地質環境の長期変動性評価 (アプローチ) 可視化例(幌延)

地形の変化



日本原子力研究開発機構(2018) 図2.1-9(b)及び(e)

地下水流動の比較



経済産業省資源エネルギー庁委託事業

過去100万年間にわたる地質環境の長期的な変化を探る」

-山間部の地域を事例とした取り組み

(<https://www.youtube.com/watch?v=Lh4EB0Dp3pA>)

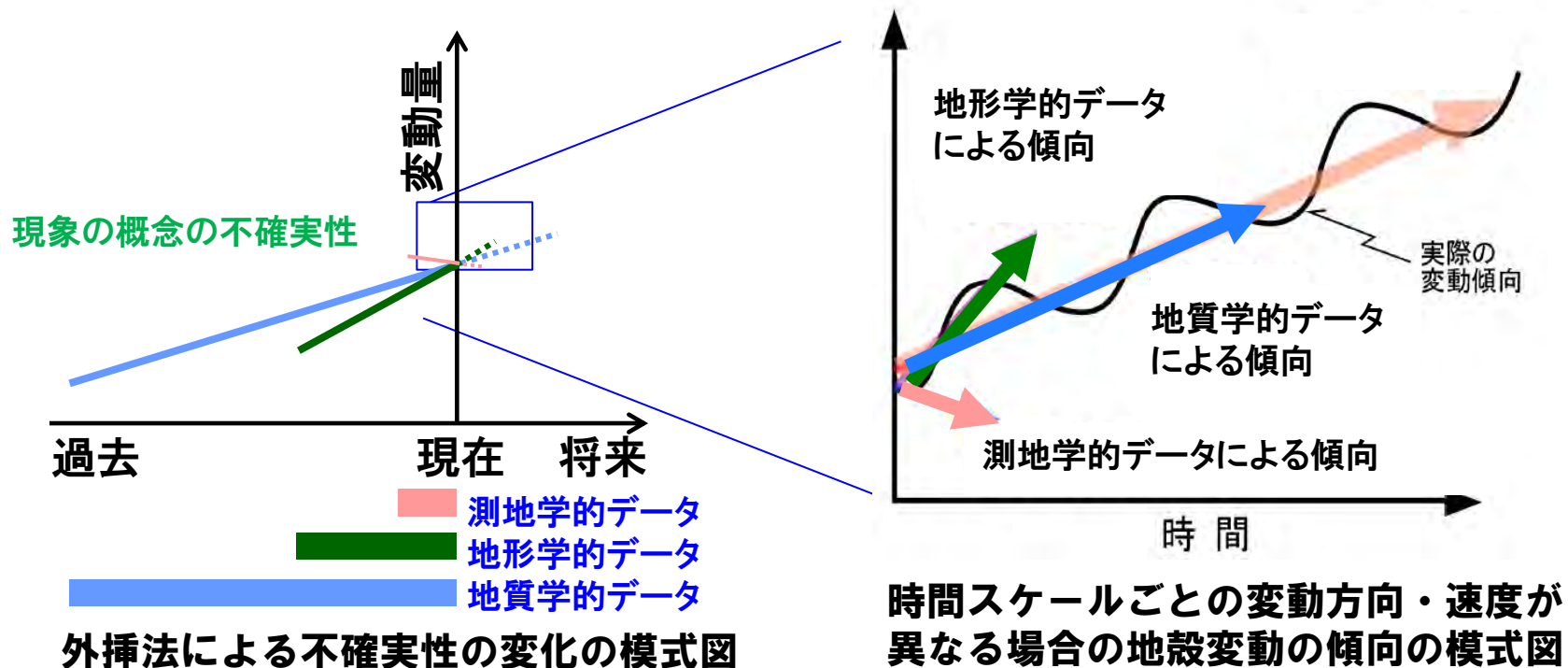
-平野部の地域を事例とした取り組み

(<https://www.youtube.com/watch?v=yITmXGhRIAc>)

水色:流れの早い領域
青色:流れの遅い領域

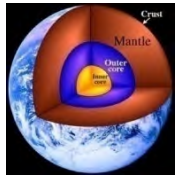
外挿法による将来予測(留意事項)

十万年以上の長期予測をする場合や、時間スケールごとの変動方向・速度が大きく異なる場合は、**大きな不確実性が伴う。**



地形・地質学的手法による過去～現在の変遷に基づいた帰納的なアプローチに加えて、変動のメカニズムを考慮した数値シミュレーションなどによる演繹的な予測・評価も有効 ⇒変動の幅を持たせた形の将来予測で対応

土岐地球年代学研究所の役割



地球科学に係る統合的な研究拠点の創成

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最新の知見の創出と中～長期的な地質リスクの予測・評価

科学的・技術的知見

原子力施設の耐震安全性

地層処分の安全性

災害要因となる自然現象の理解

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 Geochronology Research Laboratory

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

大学・研究機関

共同研究

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

安全研究センター

年代測定技術

土岐地球年代学研究所で実施できる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(年前)							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 (JAEA-AMS-TONO-5MV & 300kV)	¹⁴ C法								断層運動	地下水, 有機物	実用化済
	¹⁰ Be法								侵食速度	石英	実用化済
	²⁶ Al法								侵食速度	石英	実用化済
	³⁶ Cl法								地下水年代	地下水	~R3
	¹²⁹ I法								地下水年代	地下水	実用化済
希ガス質量分析装置	K-Ar法								断層運動	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								侵食速度	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								断層運動	石英	実用化済
									隆起速度	長石	実用化済
電子スピン共鳴装置	ESR法								断層運動	石英	実用化済
										炭酸塩鉱物	~R3
高精度希ガス質量分析装置	希ガス法								地下水年代	地下水	実用化済
電子プローブマイクロアナライザ	CHIME法								後背地解析	モナザイト, ジルコン	実用化済
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								後背地解析	ジルコン	実用化済
									断層運動	炭酸塩鉱物	実用化済
フィッシュトラック自動計測装置	FT法								侵食速度	アパタイト, ジルコン	実用化済

 技術開発の対象年代範囲

まとめ

- **地層処分では、外的要因となる自然現象について、これらが地層処分の機能に与える影響が許容できるものなのかどうかを確認し、地質環境に擾乱を与える自然現象の影響が小さい地域をより好ましいものとして選定**



- **地質環境の安定性については様々な疑問に答える研究を行ってきており、対応できる技術が準備**
- **地層処分の安全性という観点で、科学的知見の進展を考慮しながら、地層・岩盤に残された過去の痕跡やこれから起きる自然現象やと向き合い、対応していくことが信頼性を向上する上でも重要**

ご静聴ありがとうございました

引用文献

- 浅森浩一ほか(2012):地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成23年度), JAEA-Research 2012-024
- 藤崎淳(2021):閉鎖後長期の安全性の評価, 地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)長期安全評価 2021/06/30.
- 藤山哲雄(2021):包括的技術報告書の全体概要, 地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)総論 2021/05/13.
- 石丸恒存ほか(2016):地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成27年度), JAEA-Research 2016-023.
- 井上大榮・宮腰勝義・上田圭一・宮脇明子・松浦一樹(2002):2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調査, 地震, 54, 557-573.
- 北川義人(2021):処分場設計と閉鎖前の安全性評価, 地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)処分場設計, 2021/05/26.
- 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊1 わが国の地質環境, JNC TN140099-021.
- 西尾和久ほか(2015):「平成27年度東濃地科学センター地層科学研究情報・意見交換会」資料集, JAEA-Review 2015-041.
- 日本原子力研究開発機構(2008):地質環境の長期安定性に関する研究の成果および今後の計画-火山・地熱活動に関する研究-, 地質環境の長期安定性研究検討委員会第4回.
(https://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/anteisei_iinkai/4-4.pdf)
- 日本原子力研究開発機構(2010):地震・断層活動に関する研究-H21年度研究成果, 地質環境の長期安定性研究検討委員会第8回. (https://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/anteisei_iinkai/8-2.pdf)

引用文献

- **日本原子力研究開発機構(2018):平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書.**
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2017/29fy_tyoukiannteisei_honnbunn.pdf)
- **日本原子力研究開発機構(2019):高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 5か年報告書.**
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2017/25-29fy_tyoukiannteisei_torimatome.pdf)
- **日本原子力研究開発機構・電力中央研究所(2019):平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発報告書.**
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2018/30fy_choukiantesei.pdf)
- **日本原子力研究開発機構・電力中央研究所(2020):平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発報告書.**
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2019/31fy_choukiantesei.pdf)
- **日本原子力研究開発機構・電力中央研究所(2021):令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発報告書.**
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2020/2fy_choukiantesei.pdf)
- **OECD/NEA (2009) Considering timescales in the post-closure safety of geological disposal of radioactive waste, NEA No. 6424.**
- **総合エネルギー調査会, 電力・ガス事業分科会, 原子力小委員会, 地層処分技術WG(2014):地層処分にに関する地域の化学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分技術WG取りまとめ), 平成29年4月.**

引用文献

- 三枝博光(2021):地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化, 地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)長期安全評価 2021/06/16.
- 三枝博光他(2022):オールジャパンでとりくむ地層処分のいま 第2回地層処分に関する地質環境評価技術, 日本原子力学会誌, 64(1), 46-50.
- 末岡茂(2017):日本アルプスの形成に関する熱年代学的研究, フィッション・トラックニュースレター, 30, 4-6.
- 末岡茂・田上高広(2019):低温領域の熱年代学の原理と地殻浅部のテクトニクスへの応用, 地学雑誌, 128(5), 707-730.
- 末岡 茂・河上哲生・鈴木康太・山崎あゆ・鏡味沙耶・長田充弘・横山立憲・田上高広(2021)鮮新世～第四紀花崗岩類の形成深度・年代に基づく飛騨山脈黒部 地域の削剥史(速報). 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG47-P04, Virtual開催, 6月4日.
- 立石良・島田耕史・清水麻由子・植木忠正・丹羽正和・末岡茂・石丸恒存(2021):断層ガウジの化学組成に基づく活断層と非活断層の判別:線形判別分析による試み. 応用地質, 62(4), 252p.
- 渡部豪ほか(2021):南九州せん断帯におけるGNSS観測(第5報), 日本地球惑星科学連合2021年大会, S-CG50

本発表には, 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(JPJ007597)(地質環境長期安定性評価確証技術開発), 平成30～令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(JPJ007597)(地質環境長期安定性評価技術高度化開発)の成果の一部を利用しました。

用語解説

- **MT法電磁探査**: 自然の電磁場が地表に照射されることによって地中に誘導される電場と磁場の強度の比から地下の比抵抗分布を推定する物理探査手法
- **S波スプリッティング**: 異方性媒質に入射したS波が、互いに直交する方向に振動し、異なる速度で伝播する2つの波に分裂する現象
- **閉鎖温度**: 親核種、娘核種について閉鎖系が保持される温度で、これ以上高温になると、娘核種が散逸し、年代がリセットされる