

令和2年度における個別課題の現状および今後の予定

② 地質環境の長期安定性研究

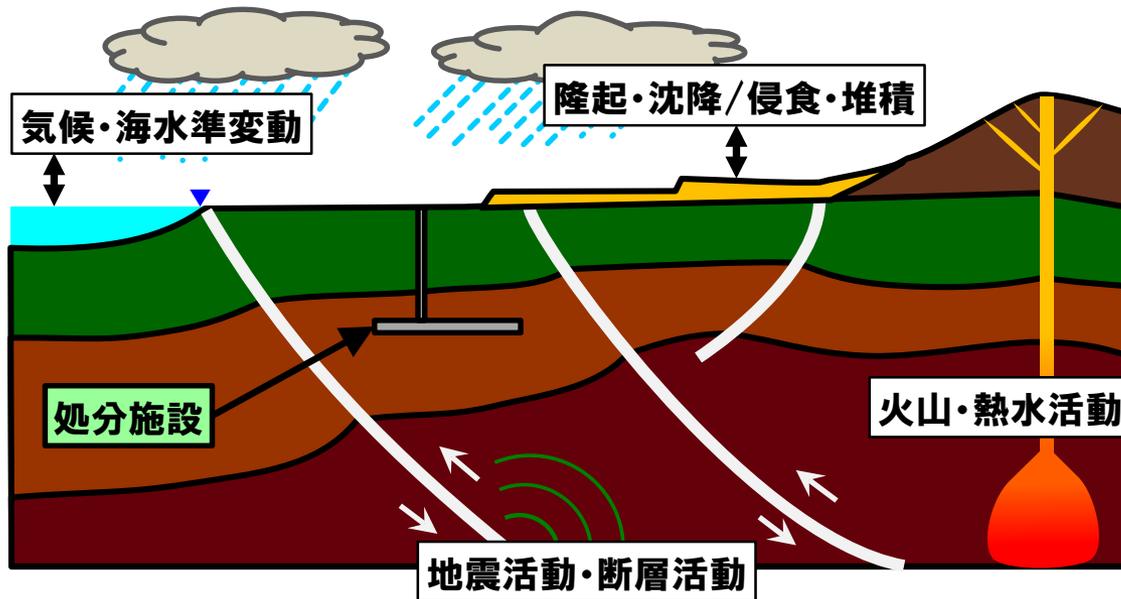
令和3年3月4日

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

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・破碎による処分施設の破損
- 岩盤の破断・破碎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

地質環境の長期安定性に関する研究(第3期中長期計画)

① 調査技術の開発・体系化

⇒サイトの選定や安全性の検討に必要なデータ取得技術

② 長期予測・影響評価モデルの開発

⇒将来の長期的な変動を考慮した安全評価に必要な技術

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

本日も説明する内容

- **自然現象に関する調査技術の整備 / 高度化に関する研究成果**
 - 第3期中長期計画における最近の主な成果
 - **処分事業にどのように反映できるかを重視した説明**
- **開発した年代測定技術の維持・伝承、イノベーション創出への取り組み**
 - **超小型加速器質量分析装置の開発**
(開発した年代測定技術のイノベーション創出への取り組み)

自然現象に関する調査技術の整備 / 高度化に関する研究成果

1) 日本全国を対象とした基盤情報の整備

- 1-1) 地下深部の流体分布を把握するための地震波トモグラフィの高度化
- 1-2) 日本列島の隆起・侵食評価のための基盤情報の整備

2) 概要調査前半への反映を目指した技術開発

- 2-1) 深部流体の移動経路に関する調査手法の開発
- 2-2) 伏在する活構造に対する調査手法の開発
- 2-3) 宇宙線生成核種を用いた隆起・侵食評価手法の開発

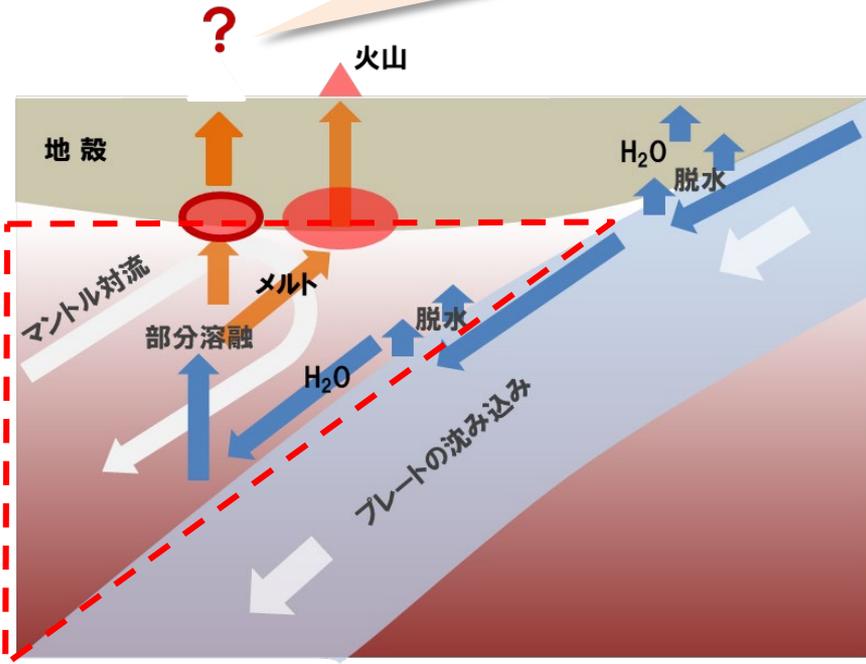
3) 概要調査後半～精密調査への反映を目指した技術開発

- 3-1) 化学組成を用いた活断層・非活断層の識別手法の開発
- 3-2) OSL熱年代による隆起・侵食評価手法の開発

1-1) 地下深部の流体分布を把握するための地震波トモグラフィの高度化

- 地殻内の領域をターゲットとした調査技術の整備に加えて、上部マントルの領域も考慮した検討の重要性が、**新たな火山の発生に対する調査・評価の信頼性向上の観点から指摘**（地層処分技術WG, 2017）

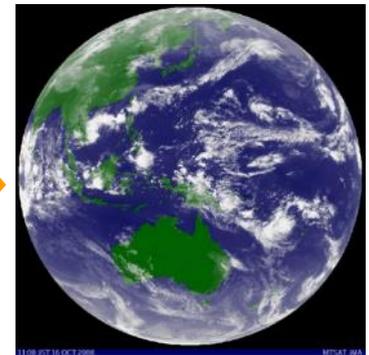
将来、新たな火山活動が生じる可能性



沈み込み帯における火成活動のメカニズム

地震波トモグラフィ法

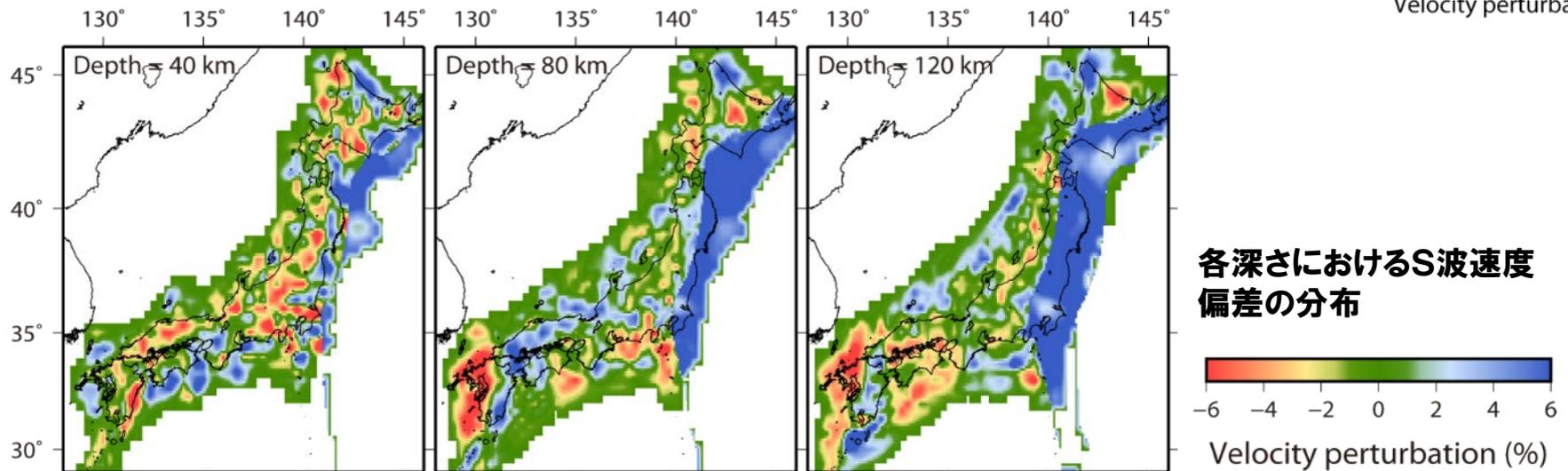
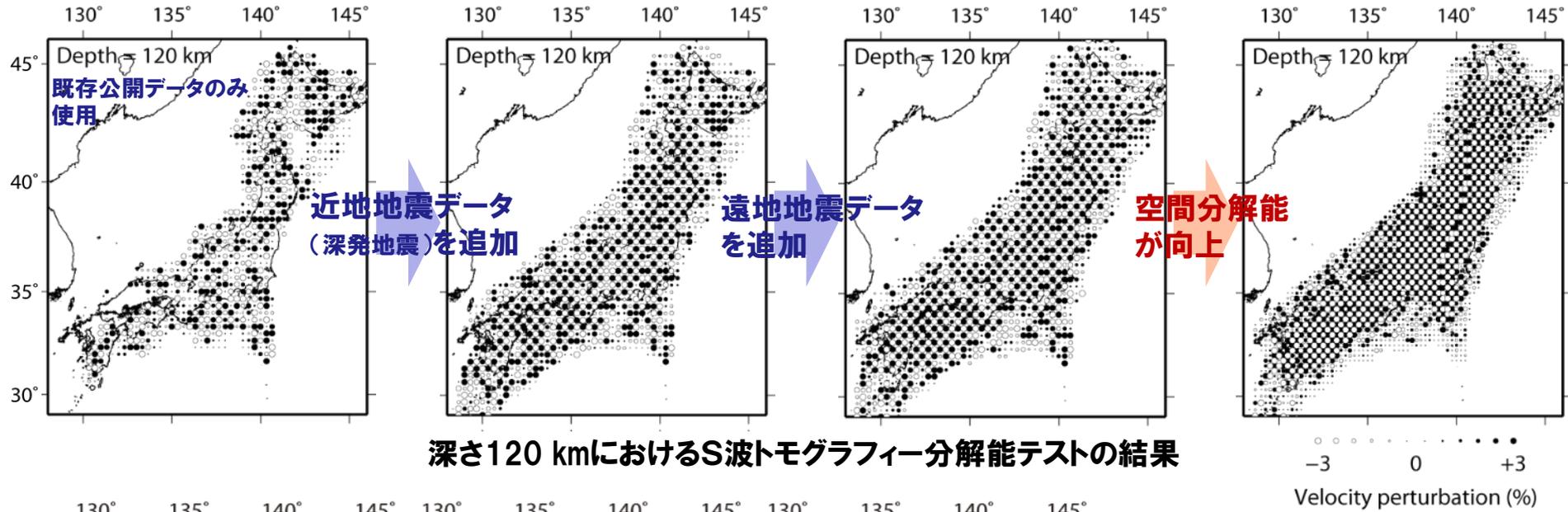
大量の地震波のデータを用いた逆解析により、地下の構造を明らかにする手法



対象： 人体 → 地球(地下)
観測データ： X線 → 地震波

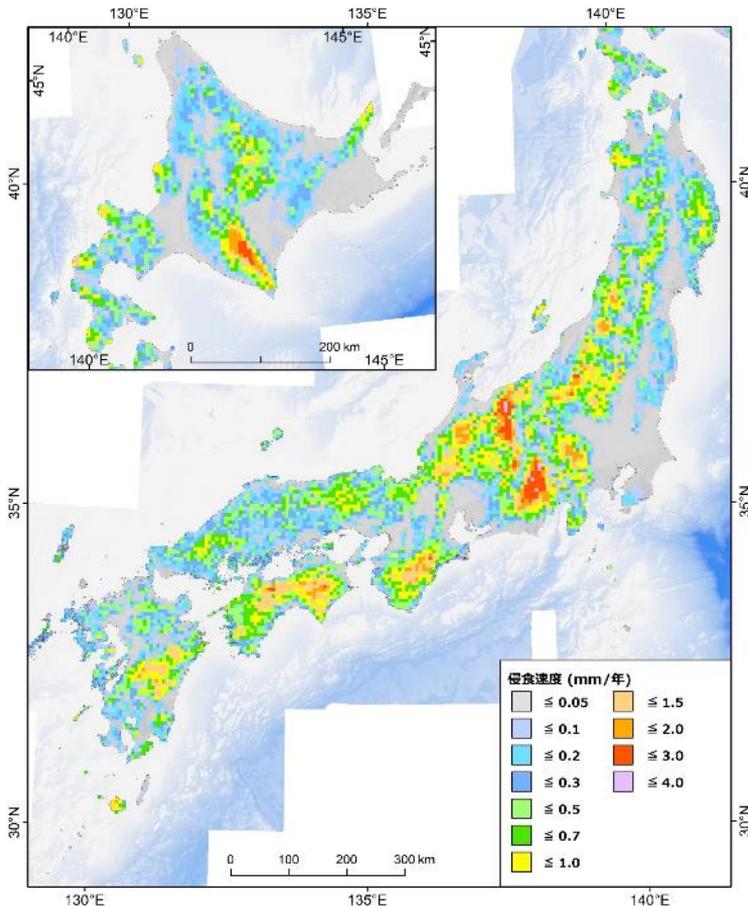
1-1) 地下深部の流体分布を把握するための 地震波トモグラフィの高度化

● 25万個以上の地震波データを用いた解析による空間分解能の向上



1-2) 日本列島の隆起・侵食評価のための基盤情報の整備

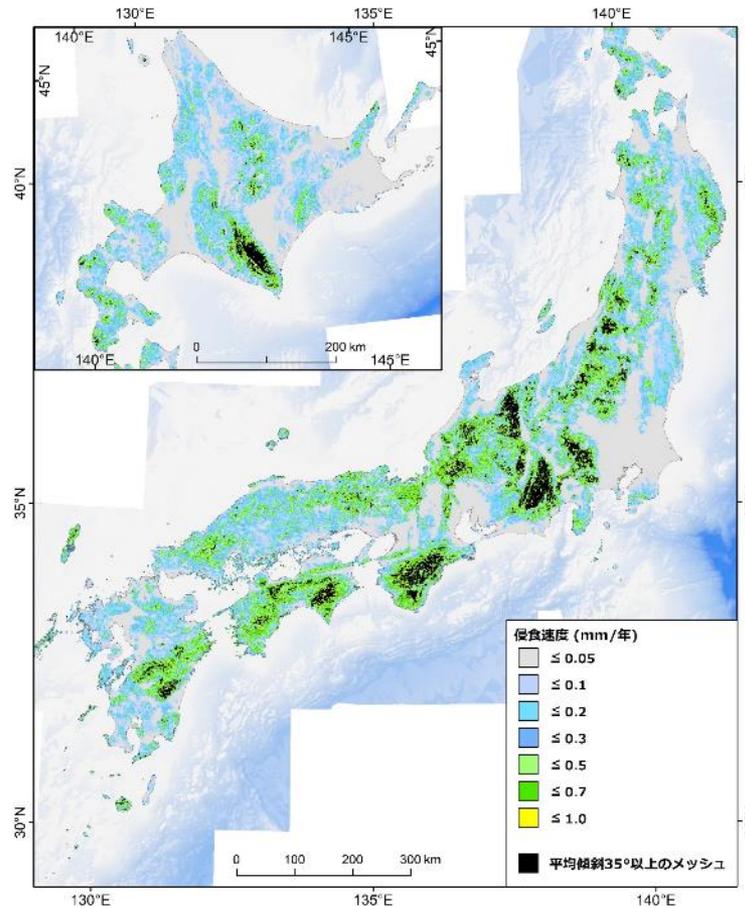
- 宇宙線生成核種等の分析データと地形解析の組み合わせにより、**最新知見に基づく日本列島(陸域)の隆起・侵食データマップを整備**



数十年間の侵食速度分布図

(約6 kmメッシュ)(藤原ほか, 1999)

ダム堆砂量に基づく短い時間のデータのみ



数百～1万年間の侵食速度分布図

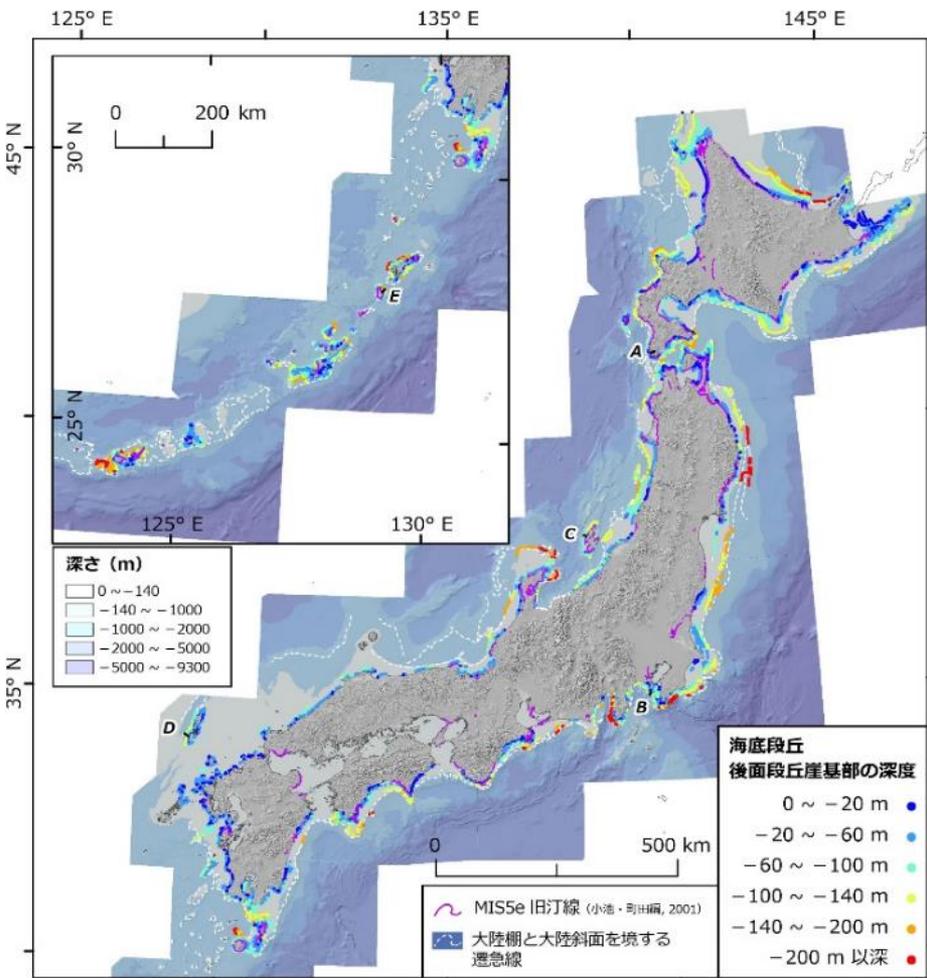
(約1 kmメッシュ) **New!**

宇宙線生成核種・熱年代のより長い時間のデータも反映

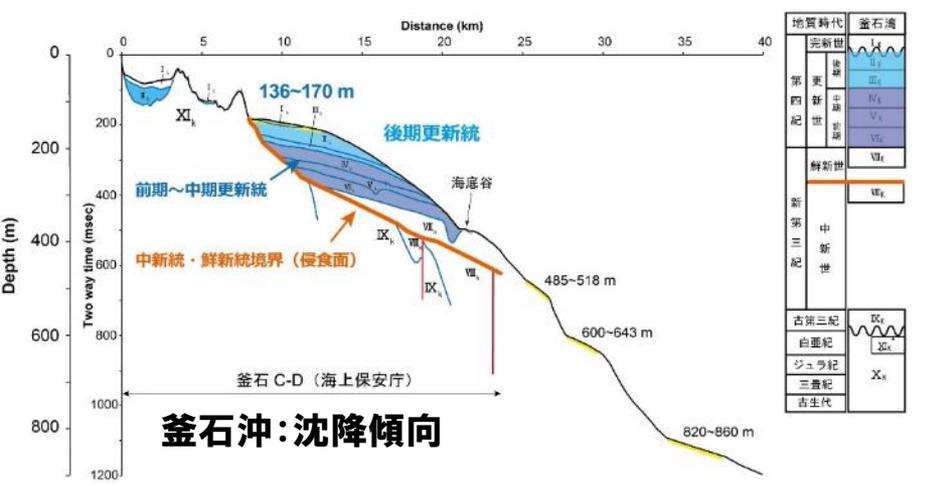
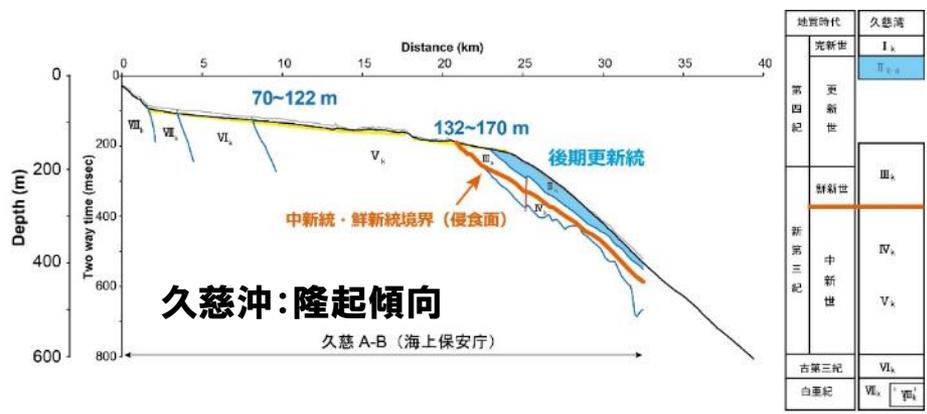
従来版に加え、
特に山地における侵食速度データが改善

1-2) 日本列島の隆起・侵食評価のための基盤情報の整備

- 音波探査等による海底地形や堆積構造のデータに基づき、**日本列島** 周辺の沿岸部海域の地殻変動を読むために必要な手法を整理



日本全国の海底段丘の判読結果



海底音波探査記録の解析から隆起・沈降傾向を明らかにした例

自然現象に関する調査技術の整備 / 高度化に関する研究成果

1) 日本全国を対象とした基盤情報の整備

- 1-1) 地下深部の流体分布を把握するための地震波トモグラフィの高度化
- 1-2) 日本列島の隆起・侵食評価のための基盤情報の整備

2) 概要調査前半への反映を目指した技術開発

- 2-1) 深部流体の移動経路に関する調査手法の開発
- 2-2) 伏在する活構造に対する調査手法の開発
- 2-3) 宇宙線生成核種を用いた隆起・侵食評価手法の開発

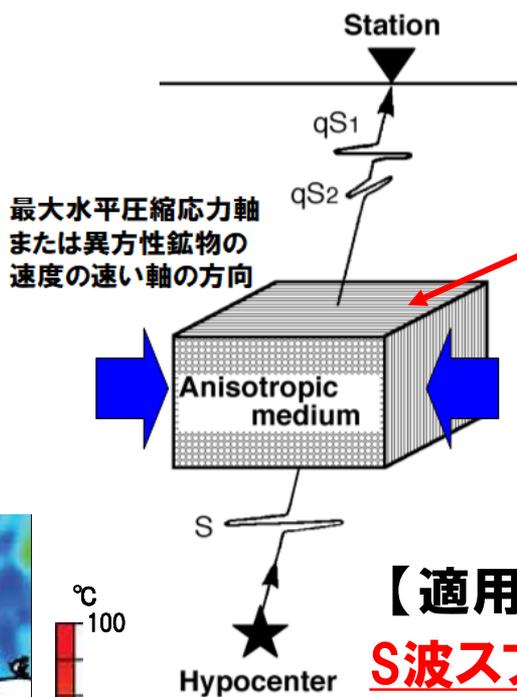
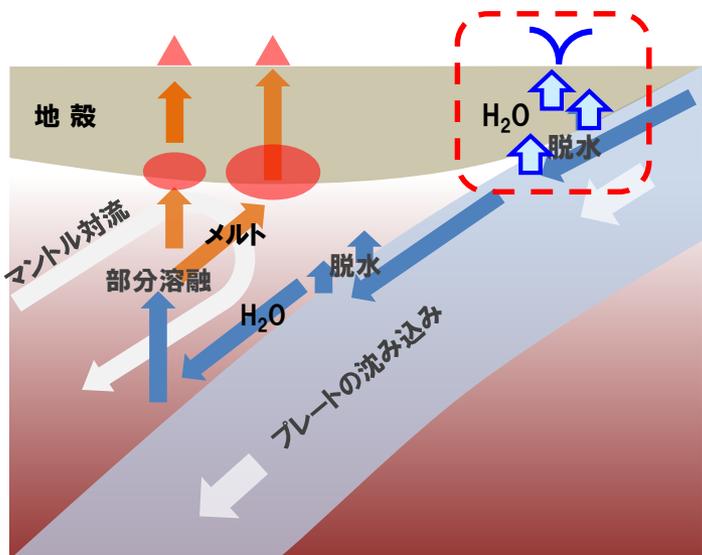
3) 概要調査後半～精密調査への反映を目指した技術開発

- 3-1) 化学組成を用いた活断層・非活断層の識別手法の開発
- 3-2) OSL熱年代による隆起・侵食評価手法の開発

2-1) 深部流体の移動経路に関する調査手法の開発

- 沈み込むプレート起源の高温の深部流体の地表付近への流入に関与する地質環境特性を調査・評価する技術の整備が必要

(地層処分技術WG, 2017)

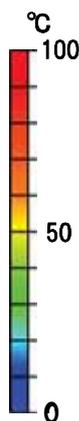
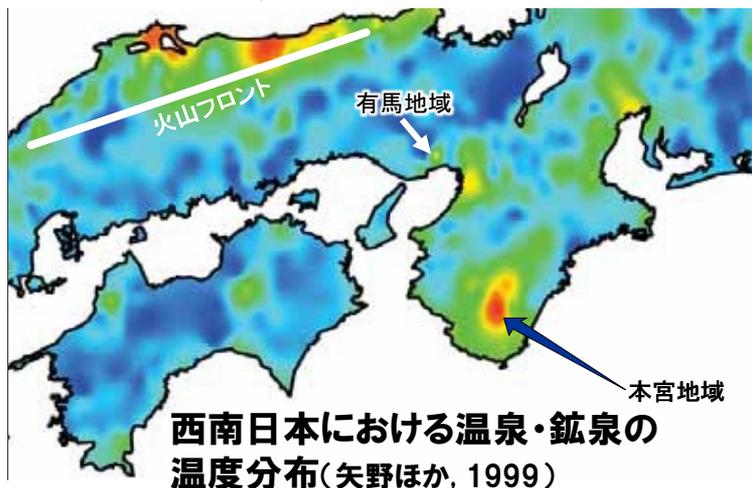


異方性媒質
↓
地殻内の割れ目密集域
↓
深部流体の移動経路

【適用手法】

S波スプリッティング解析

異方性媒質に入射した地震波(S波)が速度・振動方向の異なる2つの波に分離する現象を解析することにより、異方性媒質の分布や性状を明らかにする手法を適用



2-1) 深部流体の移動経路に関する調査手法の開発

● 1965-1968年松代群発地震(長野県)を対象とした事例研究

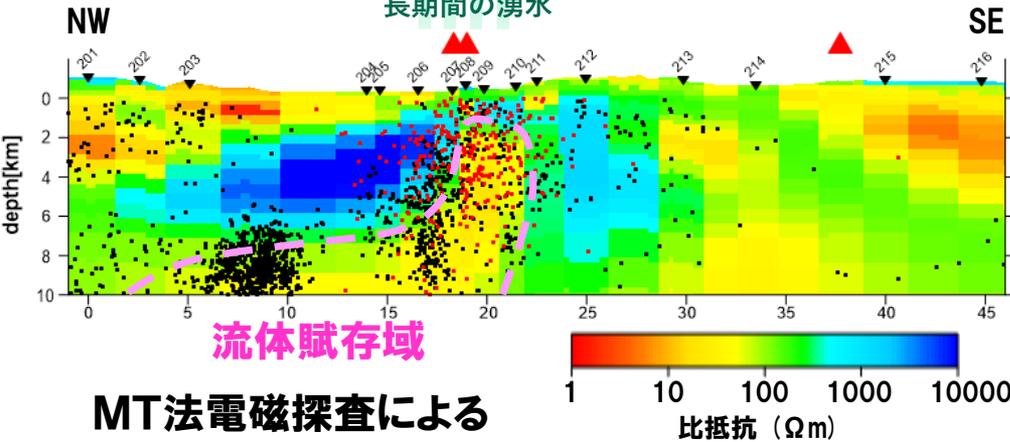
【松代群発地震】

- 地震に伴い、約1千万t/4ヶ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

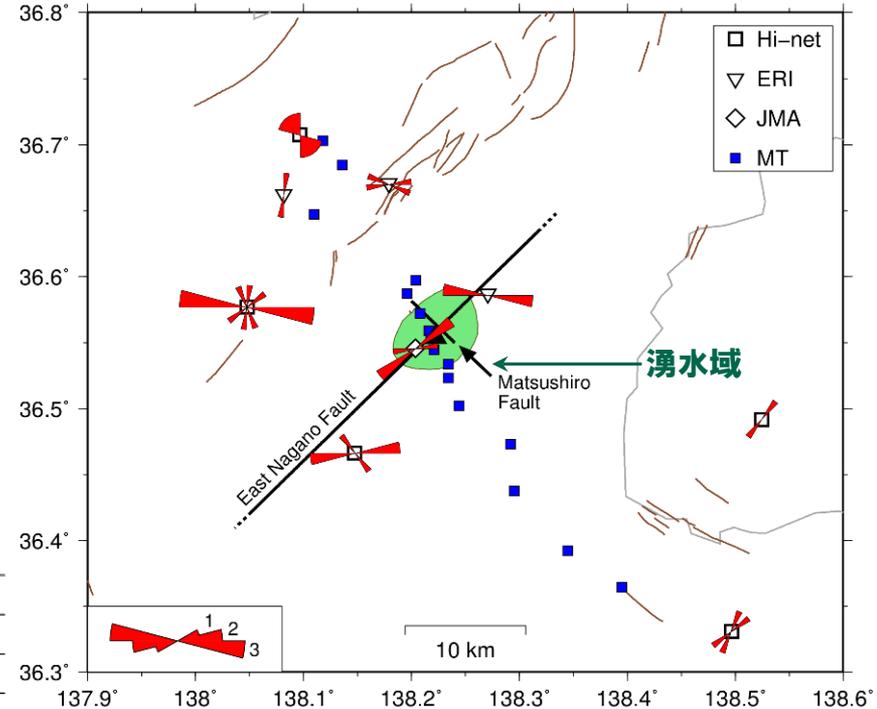


出典: 気象庁松代地震観測所
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/matsushiro/mat50/disaster/onsenido.html>

群発地震に伴う
長期間の湧水



MT法電磁探査による
比抵抗構造



S波スプリッティング解析による速いS波
の振動方向

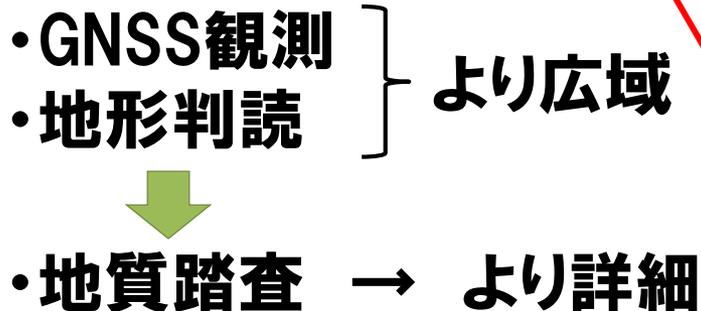
- 湧水域は、西北西-東南東方向と北東-南西方向の2方向クラックが交差する領域に相当

⇒ 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を示唆

2-2) 伏在する活構造に対する調査手法の開発

- 地形的に不明瞭な活断層の調査事例の蓄積が課題 (地層処分技術WG, 2017)
- **ひずみ集中帯**: GNSS観測結果から日本各地で指摘
⇒ 今後発達する可能性のある断層が伏在している有力な地域

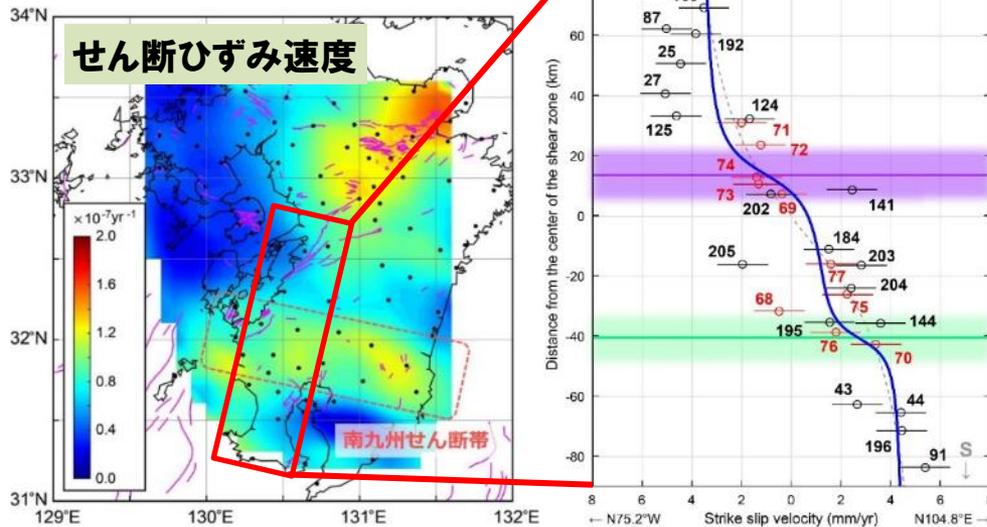
南九州のひずみ集中帯を事例対象として、GNSS観測、地形判読、地質踏査を組み合わせたアプローチを適用



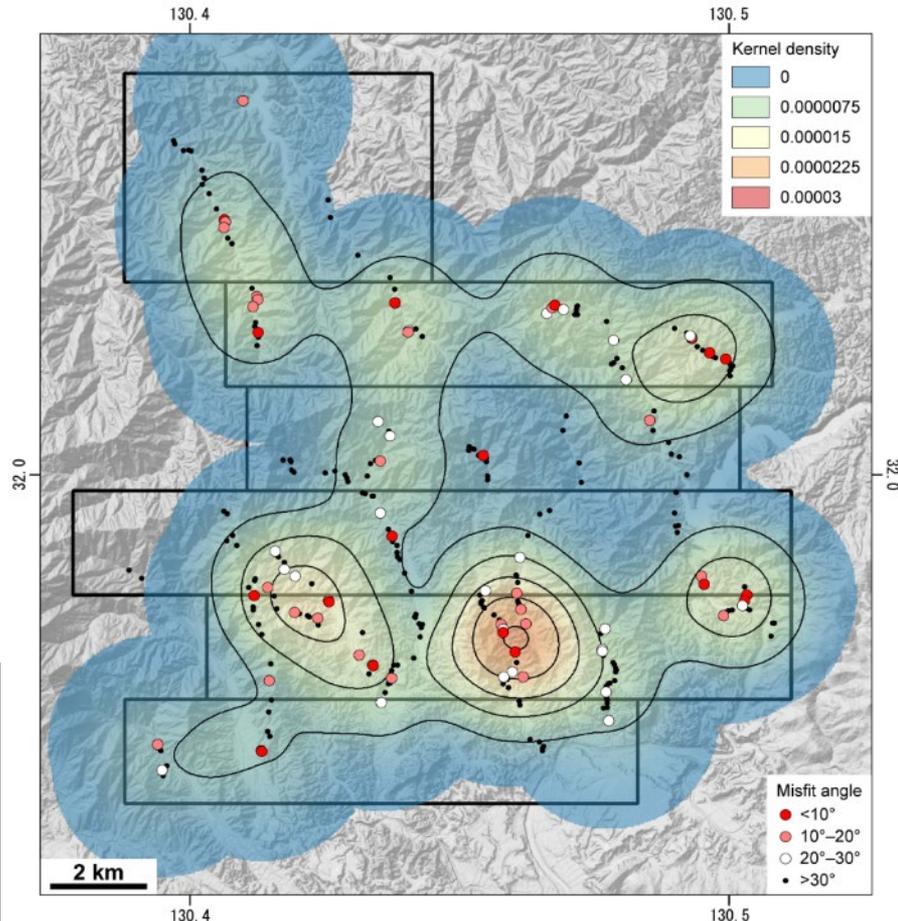
2-2) 伏在する活構造に対する調査手法の開発

● 南九州における事例研究

【GNSS観測】



【地質踏査(小断層解析)】



地震発震機構に基づくせん断応力と小断層の運動方向との角度差のカーネル密度分布

【地形判読(リニアメント分布密度)】



ひずみ集中帯に伴う地殻の変形の影響を受けている範囲を制約

2-3) 宇宙線生成核種を用いた隆起・侵食評価手法の開発

- 隆起量・侵食量推定の指標となりうる堆積物が無い場合の新しい手法の開発→幅広い地質環境に対応するための技術の拡充



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

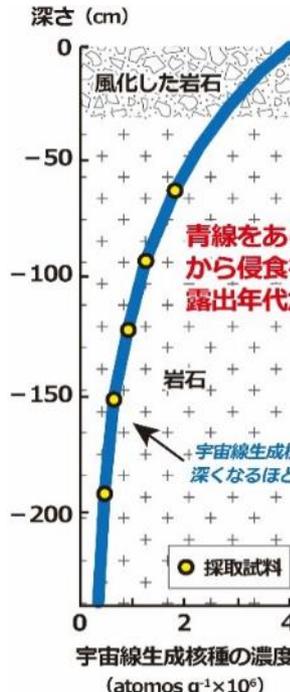
東濃地科学センターの加速器質量分析装置を用いて分析技術を開発



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



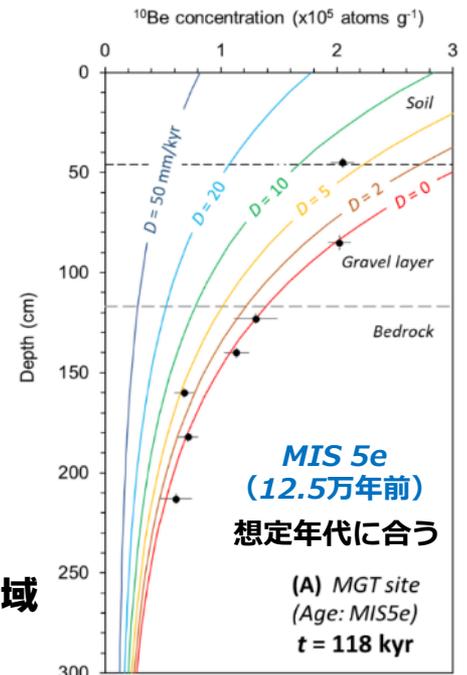
青線をあらかず計算式から侵食を考慮した露出年代が求まる

岩石

宇宙線生成核種の濃度は、深くなるほど低くなる

● 採取試料

左)イメージ図
右)高知県室戸地域での事例研究



自然現象に関する調査技術の整備 / 高度化に関する研究成果

1) 日本全国を対象とした基盤情報の整備

- 1-1) 地下深部の流体分布を把握するための地震波トモグラフィの高度化
- 1-2) 日本列島の隆起・侵食評価のための基盤情報の整備

2) 概要調査前半への反映を目指した技術開発

- 2-1) 深部流体の移動経路に関する調査手法の開発
- 2-2) 伏在する活構造に対する調査手法の開発
- 2-3) 宇宙線生成核種を用いた隆起・侵食評価手法の開発

3) 概要調査後半～精密調査への反映を目指した技術開発

- 3-1) 化学組成を用いた活断層・非活断層の識別手法の開発
- 3-2) OSL熱年代による隆起・侵食評価手法の開発

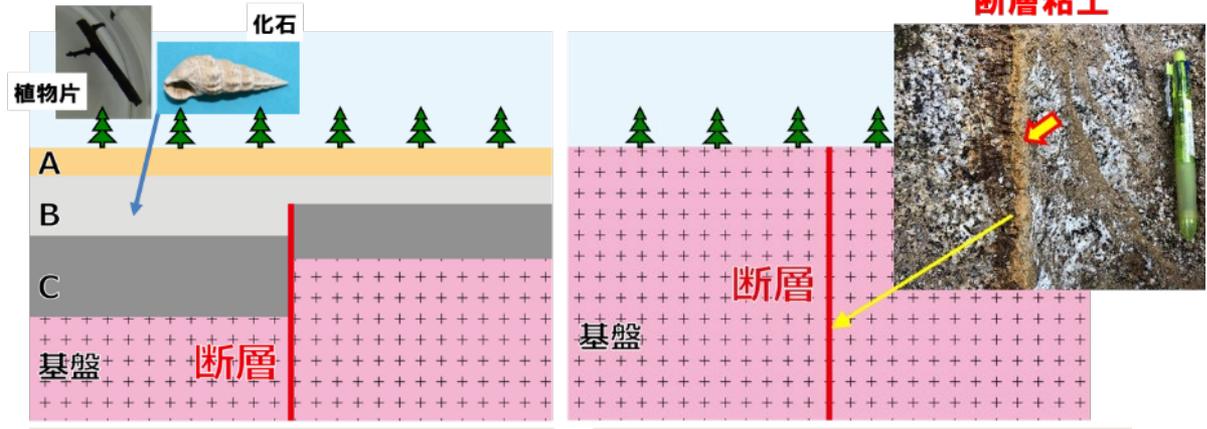
3-1) 化学組成を用いた活断層・非活断層の識別手法の開発

● 断層粘土の化学組成(15元素)の多変量解析に基づき、活断層と非活断層とを識別

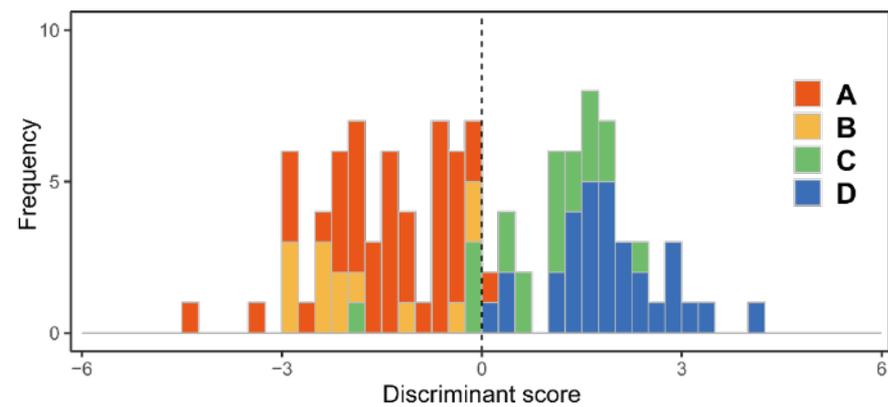
一般的には、断層を被覆する上載地層のずれに基づき評価

断層の活動時期推定に使える被覆層が無い

- 客観的な指標による識別
- 簡便な手法(商業的に普及している化学分析で対応可能) → 詳細調査に入る前のスクリーニングに適用
- 現状では、岩種ごとに分けた解析が必要



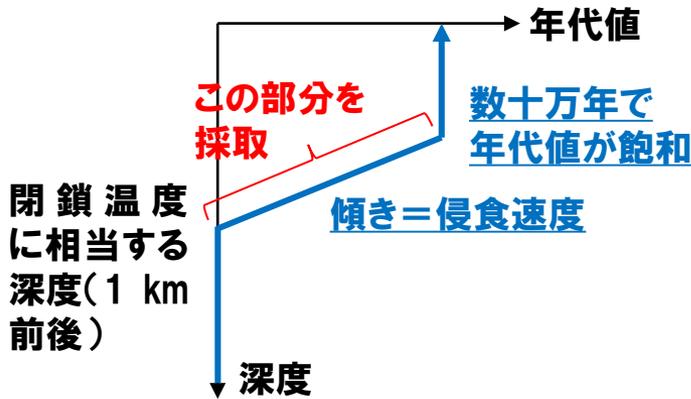
日本各地の花崗岩質岩中の断層粘土(108試料)に対する計算結果⇒判別率95%



- A: 確実な活断層(上載地層のずれあり)
 - B: 活断層の可能性が高いが、決定的証拠なし
 - C: 非活断層の可能性高いが、決定的証拠なし
 - D: 確実な非活断層(上載地層のずれなし)
- ⇒BとCもほぼ区別できている!

3-2) OSL熱年代による隆起・侵食評価手法の開発

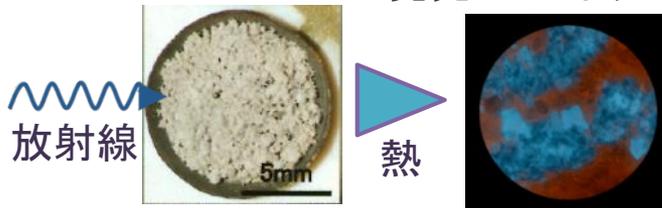
- 1000 m級の大深度ボーリングコアを用いて、**その場の隆起・侵食速度の推定が可能**な新しい技術開発



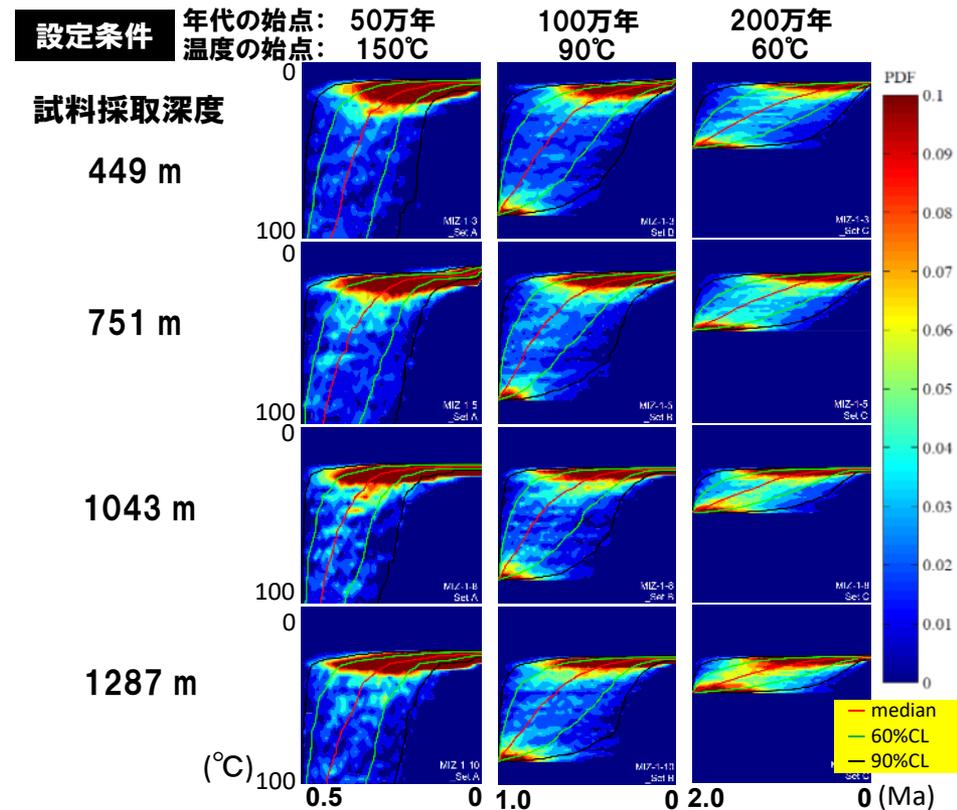
熱年代学的手法: 熱による放射年代のリセットや若返りを利用して隆起・侵食速度を推定

OSL熱年代: リセットの温度(閉鎖温度)が低く、過去数十万年間の侵食速度が推定可能

発光: ルミネッセンス



【瑞浪のコアでの測定・解析事例】



20万年の範囲では、熱履歴に変化はない
 ⇒ほとんど侵食を受けていない
 (侵食速度が遅い地域に対する適用性の確認)

自然現象に関する調査技術の整備 / 高度化に関する研究成果

【自然現象ごとの整理】

処分事業の進捗



	1) 日本全国を対象とした基盤情報の整備	2) 概要調査前半への反映	3) 概要調査後半～精密調査への反映
火山・熱水活動	1-1) 地震波トモグラフィの高度化	2-1) 深部流体の移動経路に関する調査手法	
地震・断層		2-2) 伏在する活構造に対する調査手法	3-1) 化学組成を用いた活断層の識別
隆起・侵食	1-2) 沿岸域の基盤情報の整備	2-3) 宇宙線生成核種を用いた隆起・侵食評価	3-2) OSL熱年代による隆起・侵食評価

R2～ 共同研究(土岐地球年代学研究所)

(五十音順)

共同研究先	研究テーマ
愛知教育大学	火山岩の放射年代測定法と古地磁気年代測定法に関する研究
石川県立大学	断層内物質の年代測定による断層活動性評価手法に関する共同研究
環境科学技術研究所	加速器質量分析装置によるヨウ素-129測定法に関する研究
関西電力・富山大学	断層岩化学組成データベースの構築と断層活動性評価への活用に関する研究 (R3～開始予定)
岐阜大学	堆積物等の詳細分析に基づく気候・環境変動に関する研究
京都大学	地質環境の長期安定性評価に係る地形・地質・断層調査技術の高度化に関する共同研究
国立歴史民俗博物館	日本産樹木年輪による炭素14年代較正曲線の整備
東京大学	第四紀の隆起・沈降速度の推定手法の高度化に関する共同研究
東京大学・深田地質研究所	断層中のメタンガス高精度検出に関する共同研究
富山大学	機械学習に基づいた断層の活動性評価手法の開発に関する共同研究
奈良女子大学	地質試料の年代測定法の拡充のためのチャネリングを利用した同重体分別の基礎研究
日本大学	断層破碎帯の内部構造解析に関する共同研究
弘前大学	第四紀地殻変動の評価手法の高度化に関する共同研究
福井県立恐竜博物館	化石試料の年代測定を通じた高精度年代測定手法の妥当性評価に関する共同研究
山形大学・東大地震研・学習院大学	岩石・年代学的手法を用いた自然現象の影響評価手法の高度化に関する研究

本日も説明する内容

- 自然現象に関する調査技術の整備 / 高度化に関する研究成果
 - 第3期中長期計画における最近の主な成果
 - 処分事業にどのように反映できるかを重視した説明
- 開発した年代測定技術の維持・伝承、イノベーション創出への取り組み
 - **超小型加速器質量分析装置の開発**
(開発した年代測定技術のイノベーション創出への取り組み)

地質環境の長期安定性に関する研究(第3期中長期計画)

① 調査技術の開発・体系化

⇒サイトの選定や安全性の検討に必要なデータ取得技術

② 長期予測・影響評価モデルの開発

⇒将来の長期的な変動を考慮した安全評価に必要な技術

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

土岐地球年代学研究所で実施できる年代測定法

● 様々な自然現象、年代範囲に対応する年代測定法を整備・実施

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, 炭酸塩鉱物	~R2
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
FT自動計測装置	FT法		■	■	■	■			侵食速度	アパタイト, ジルコン	~R2

■ 技術開発の対象年代範囲

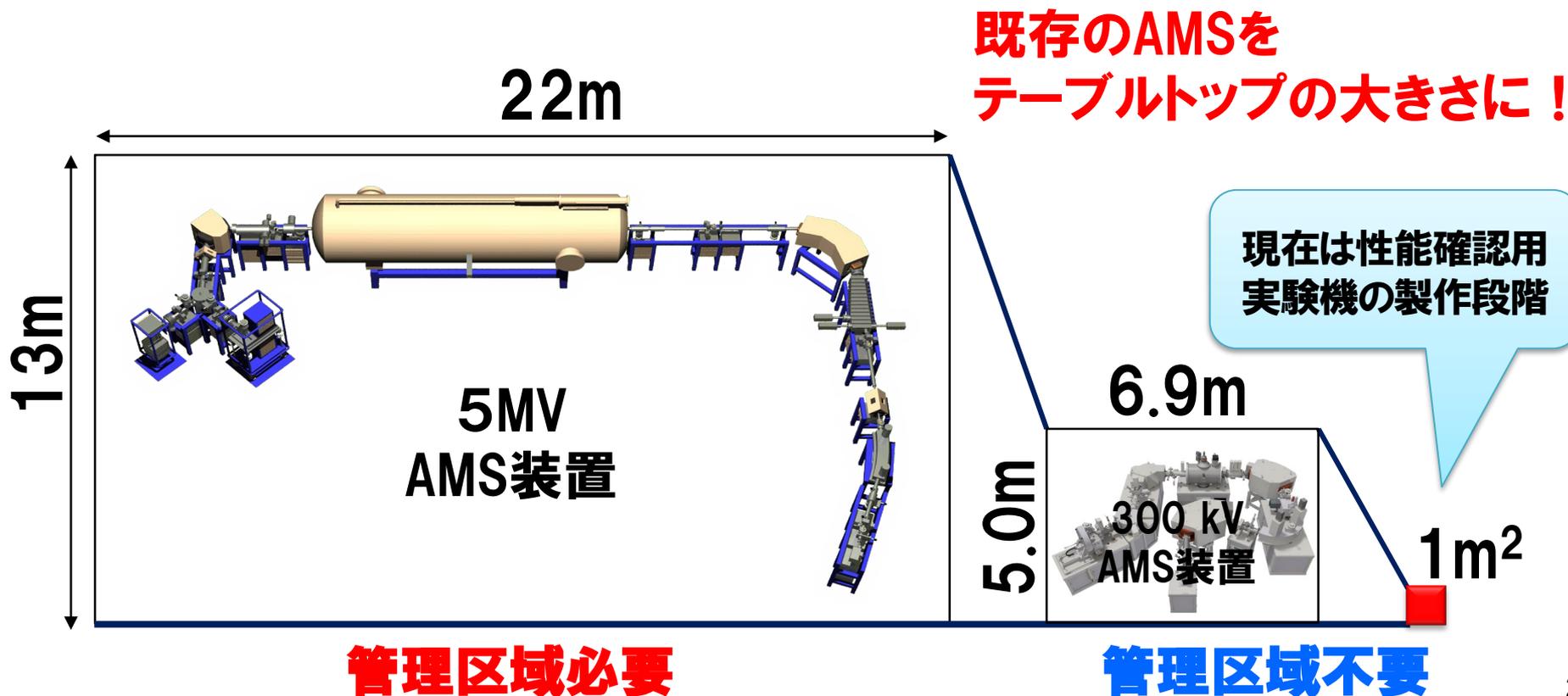
加速器質量分析装置による放射性炭素(¹⁴C)法が最もよく使われる

開発した年代測定技術のイノベーション創出への取り組み

- 汎用性の高い加速器質量分析法の技術開発により特許取得
- **特許技術**を組み込んだ

超小型・安価・管理区域不要で前処理フリー

炭素専用全自動加速器質量分析装置(AMS)の開発をめざす



特許技術を組み込んだ超小型AMSを開発中

特許技術

「イオンビーム機能性透過膜」

特願：国際PCT9288号(4カ国)「イオンビーム機能性透過膜」

特許：国内6086587号「妨害核種分別方法」

超小型・安価・管理区域不要AMS装置

試料導入装置接続

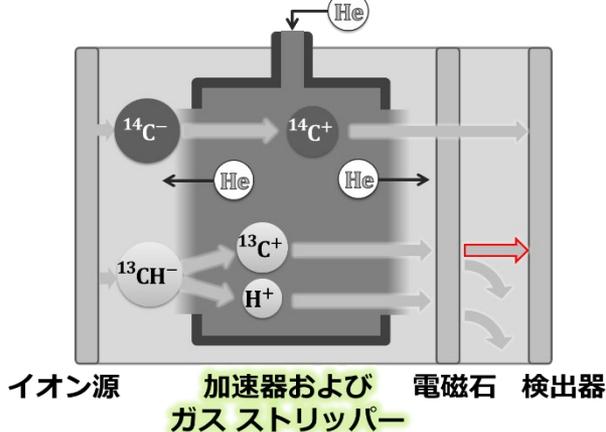
前処理フリー

試料燃焼→CO₂をAMS装置へ

例：市販の全自動元素分析装置
(現在他社で実用化済み)

従来技術

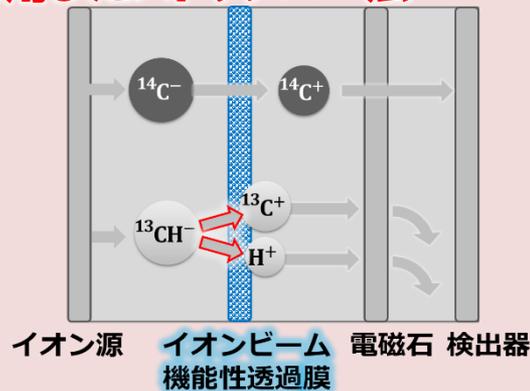
ガス ストリッパー法



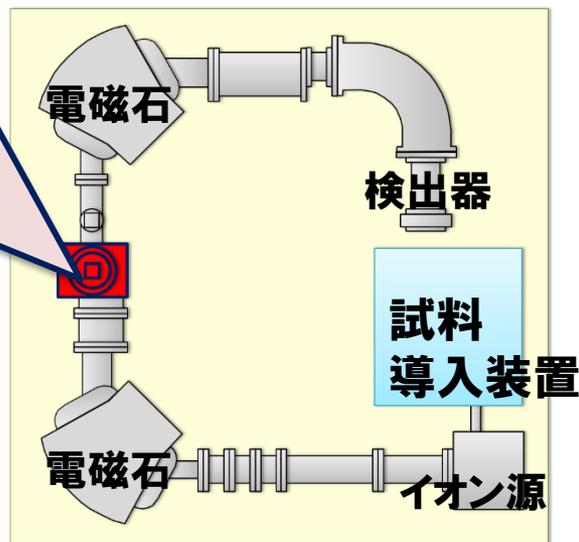
- ✓ 十分なガス量が必要
 - ✓ 大型偏光器が必要
- ⇒小型化困難

本新技术

イオンビーム機能性透過膜を利用したストリッパー法



- ✓ 高い透過率
 - ✓ ¹³CHなどの分子を分別可能
 - ✓ ガス不要
- ⇒小型化可能



**1m×1m
炭素専用全自動
AMS開発へ**

開発装置の使用先

● 地質調査現場など

従来不可能だった現場での装置設置・分析が可能に！

外注

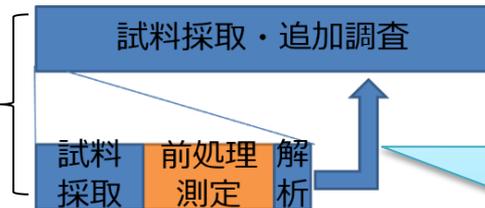
納期：数週間～2か月程度
1試料当たり6.5万円



現在



装置導入後



現場での分析結果を
フィードバックしながら
迅速な調査が可能

期間・費用を
大幅に低減

● タイヤ・プラスチック・ゴムなどの輸出時のバイオベース度*の測定

装置導入により自社にて

迅速・低コストで製品化を実現！

*バイオベース度：バイオマスと石油の混合比率



タイヤ



プラスチック

イノベーションの創出：装置開発から製品化へ

- **イオンビーム機能性透過膜等の性能確認用実験機を製作中**



(加速器)質量分析装置

- 最大加速電圧：40 kV
- 測定予定核種： ^{14}C
- 大きさ：約2 m四方

- **今後の予定**
性能試験及び改良を進めながら、
製品化に向けて企業とのパートナー化をめざす

まとめ

- **第3期中長期計画のもとで、自然現象に関する調査技術の整備/高度化に関する研究成果を創出しているところ**
- **それらの成果(知見や技術)については、処分事業にどのように反映できるかに留意した取りまとめを進めている**
- **年代測定技術の開発では、調査技術の整備等に利用するだけでなく、社会への高い波及効果を期待したイノベーション創出への取り組みも進めている**