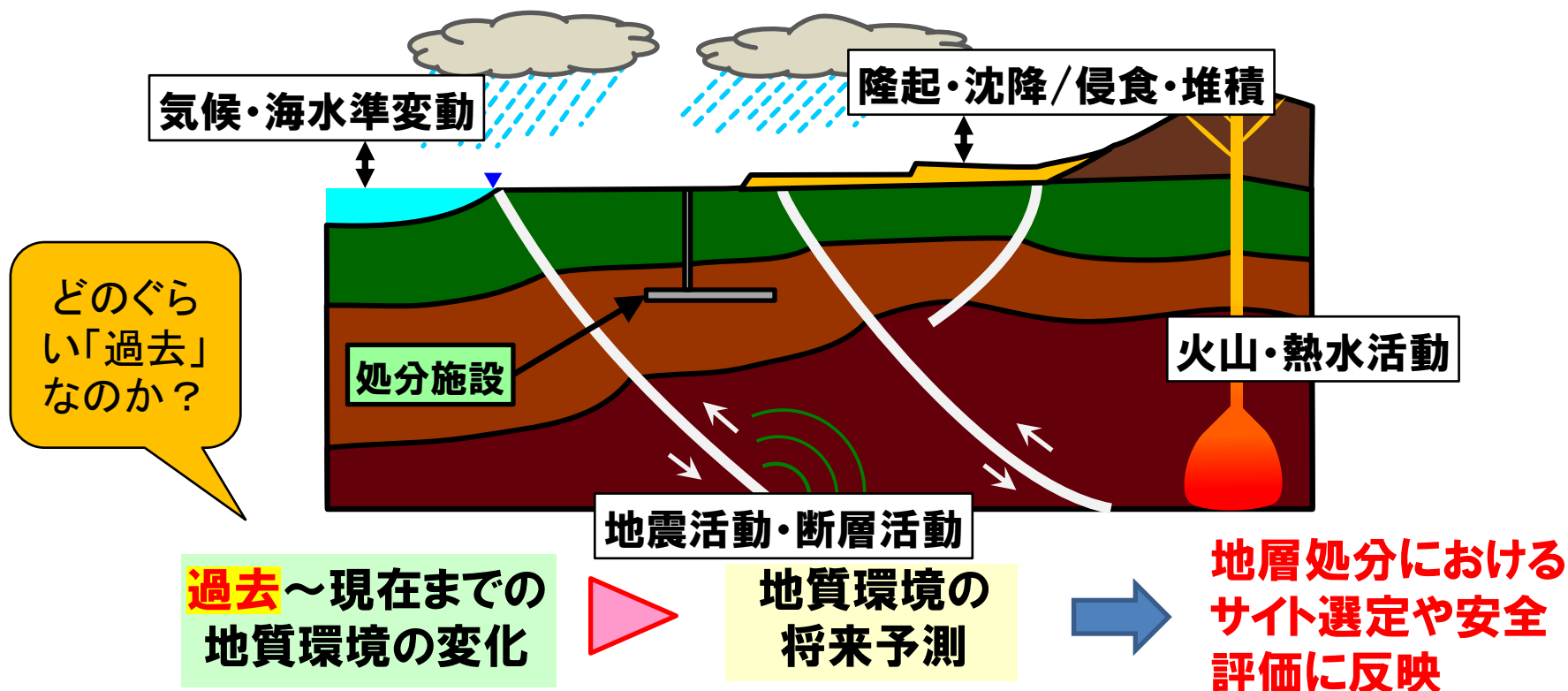


# 年代測定技術開発の現状

令和6年2月26日

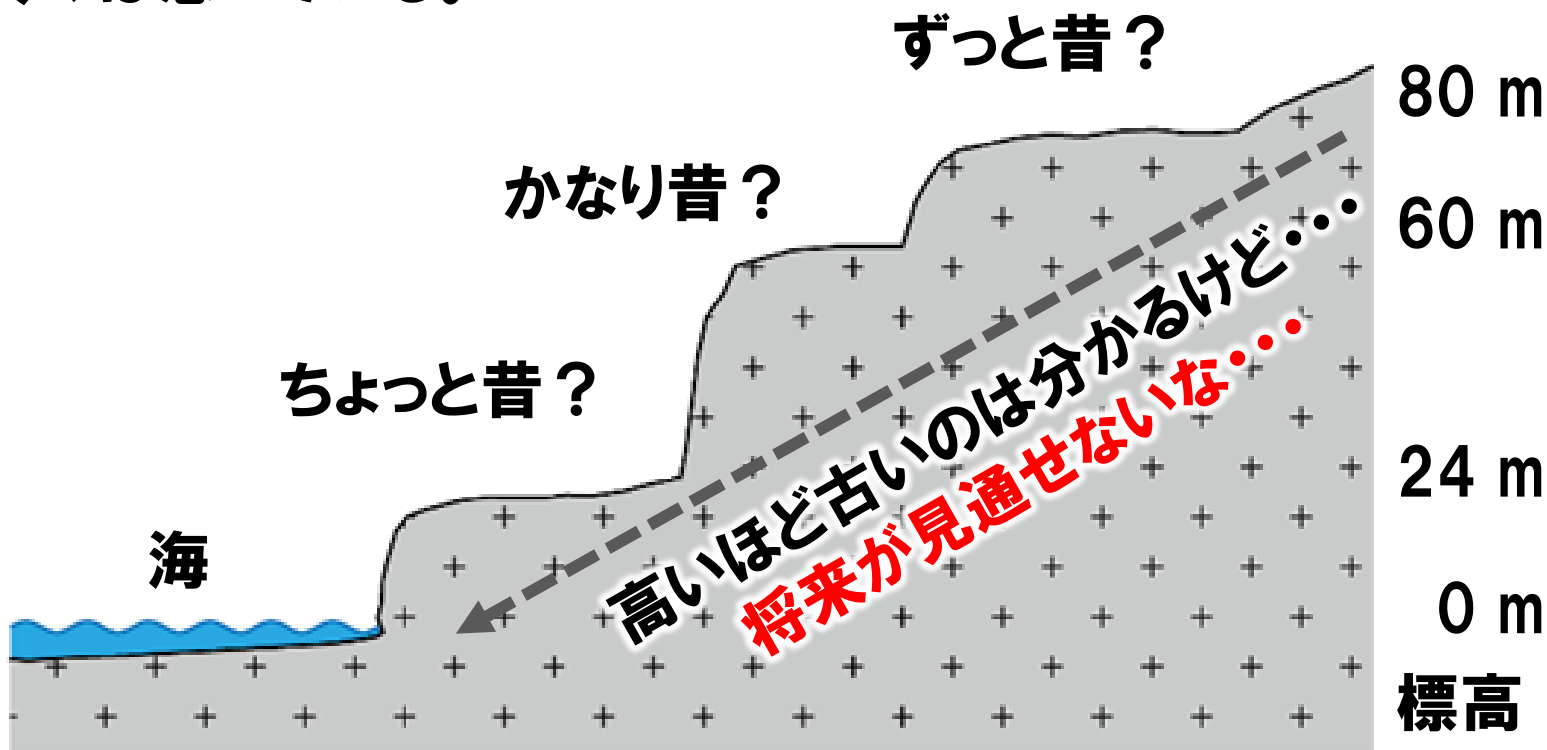
東濃地科学センター  
地層科学研究部 年代測定技術開発グループ  
島田 耕史

- 数万年以上の地質環境の将来予測の高度化のため、数十万年以上の過去～現在までの地質環境の変化を調査する技術の信頼性の向上を目指す。
- 多様な地質体、自然現象を対象として、幅広い年代値を精度良く推定できるように、各種の年代測定手法を整備。



## 【ある事例】

隆起傾向にある地域で、海岸沿いに階段状の地形が分布  
 これは、隆起前に波打ち際にあった時に、波で侵食された面の集まり。  
 (海成段丘と呼ばれ、下の絵は断面図)  
 「隆起して水から離れていったから、そのうち何mか隆起するだろう。」  
 と、人々は思っている。



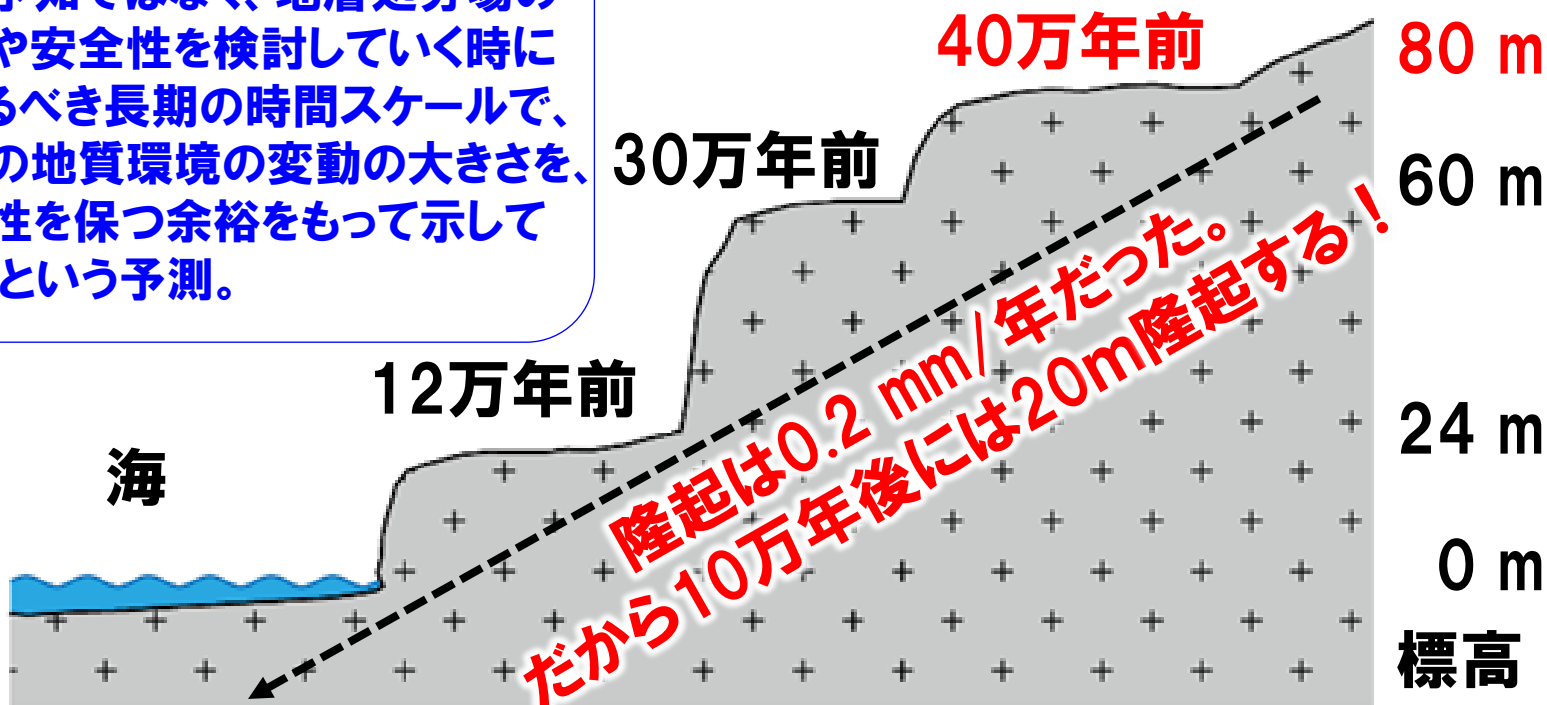
# 改めて、どうして年代を測るのか？

日本の各地の地殻変動は、地域に応じて、変動の方向が揃い等速的である、といった、「**一様継続性**」を持つ、という**経験則**がある。

これが、将来予測の道具として使われる。

そのため、年代測定技術により、過去の出来事の年代を測り、**過去を詳しく知ることで、予測を一層確からしくしていくことが大切。**

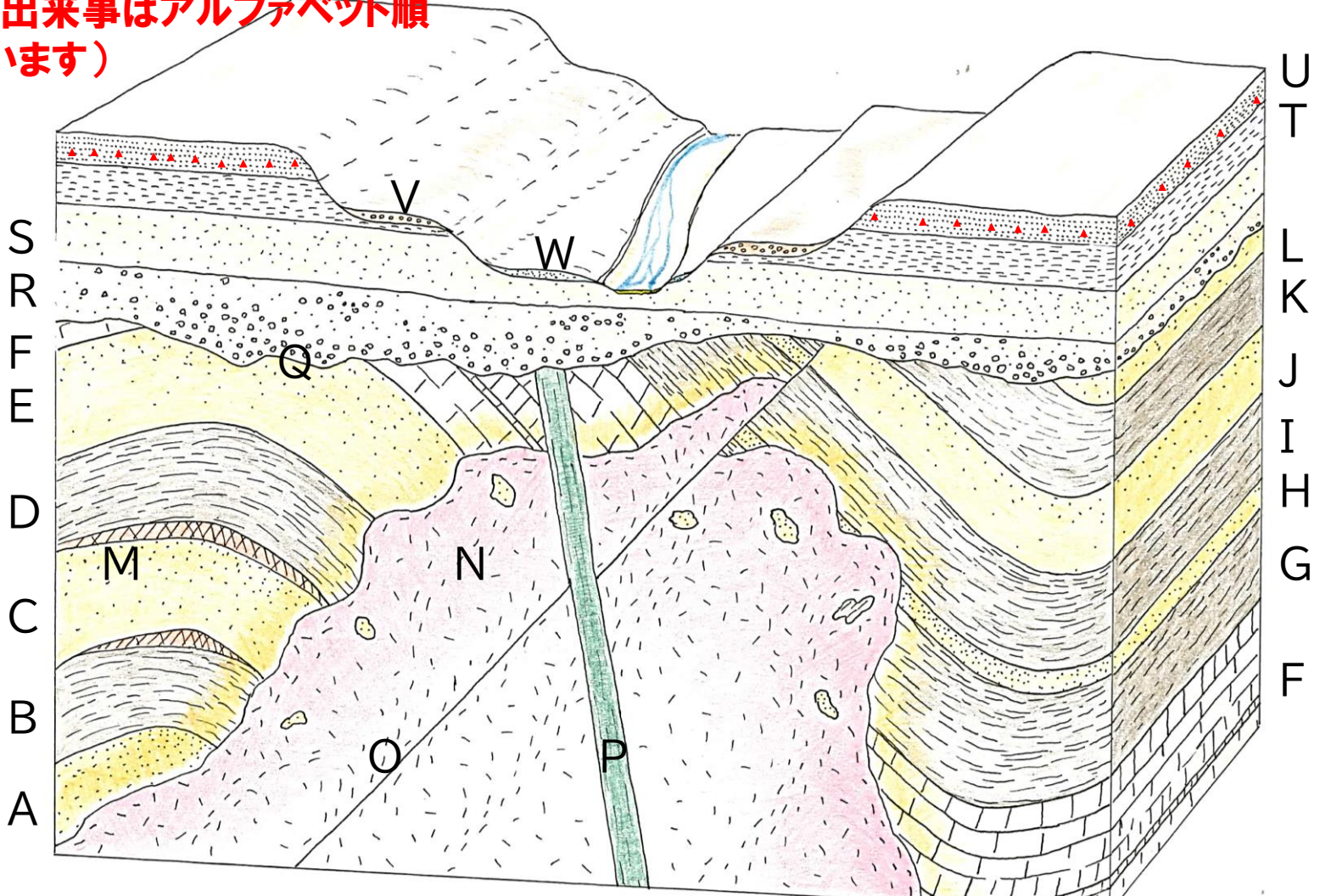
短期予知ではなく、地層処分場の選定や安全性を検討していく時に考えるべき長期の時間スケールで、深部の地質環境の変動の大きさを、安全性を保つ余裕をもって示していく、という予測。



# 改めて、どうして年代を測るのか？

「その場所の地質はどんな感じなんですか？」と聞かれたらどう説明すれば良いのでしょうか。

(模式図: 出来事はアルファベット順で生じています)



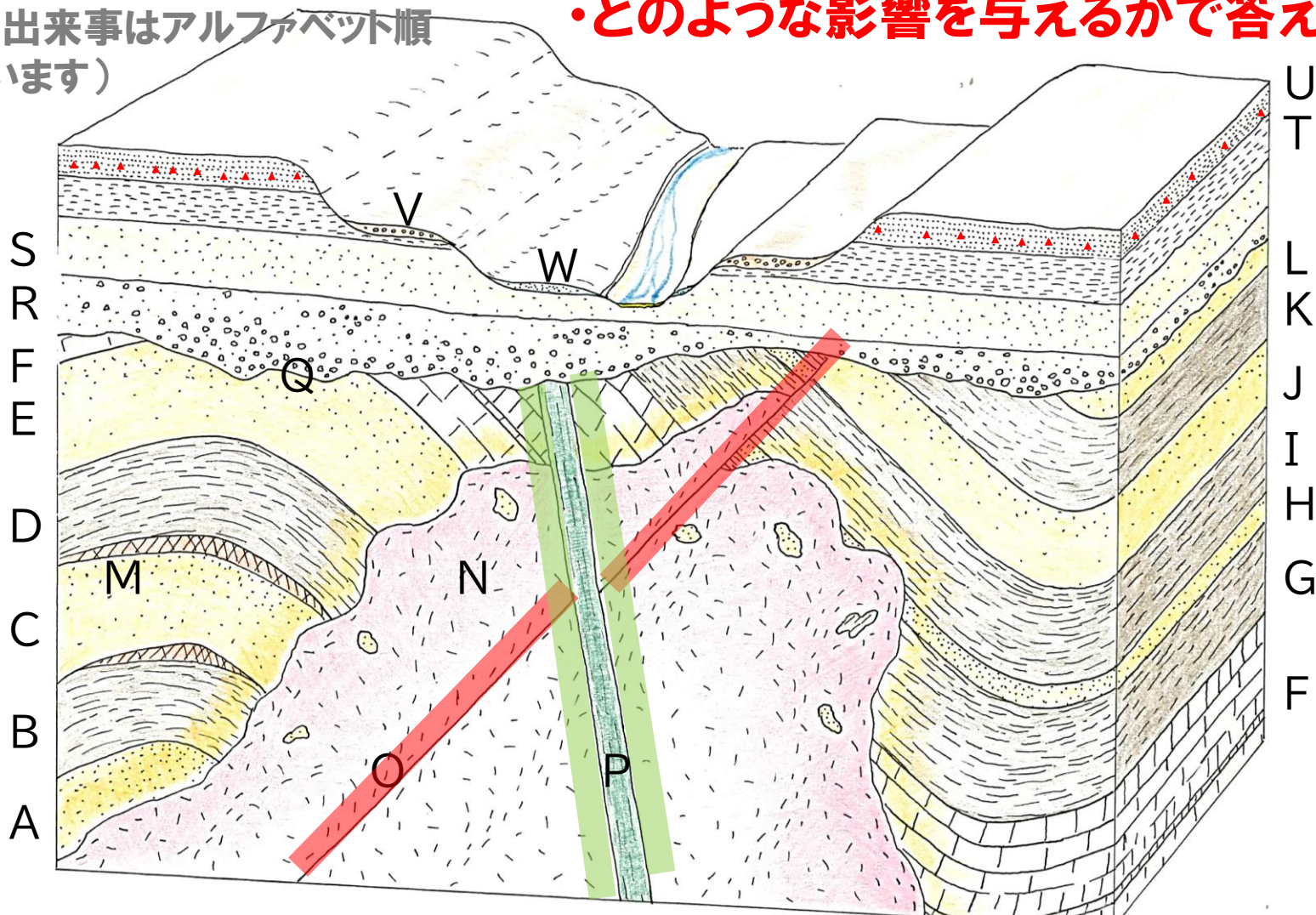


# 改めて、どうして年代を測るのか？

「その場所の地質はどんな感じなんですか？」と聞かれたらどう説明すれば良いのでしょうか。

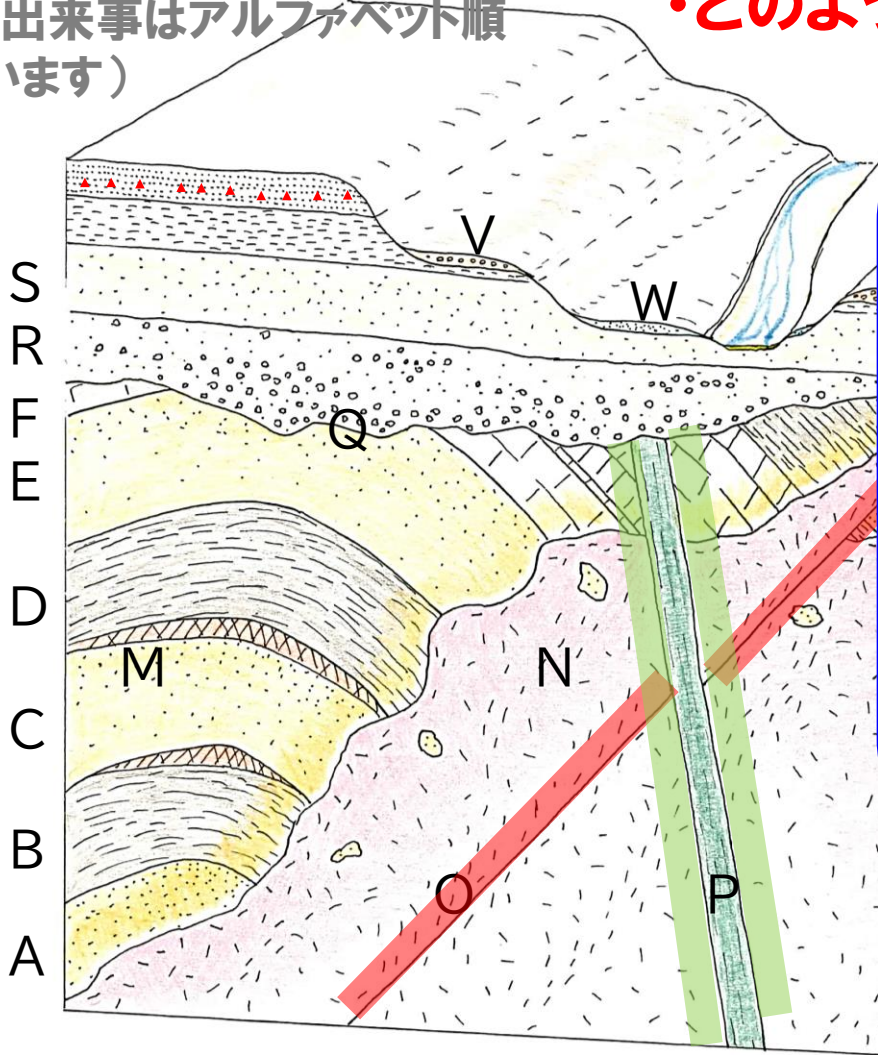
(模式図:出来事はアルファベット順で生じています)

- ・5W1Hで答える。
- ・どのような影響を与えるかで答える。



「その場所の地質はどんな感じなんですか？」と聞かれたらどう説明すれば良いのでしょうか。

(模式図:出来事はアルファベット順で生じています)



- 5W1Hで答える。
- どのような影響を与えるかで答える。

**何時(When)が難しい。**  
**出来事は何時起きたのかに答えるために、**  
**年代測定が必要**

多くの様々な出来事が何時起こったのかを詳しく知るための高度化された編年技術を提供する必要がある。

- 多様な手法の組み合わせ
- 各手法の信頼性向上
- 新手法の開発



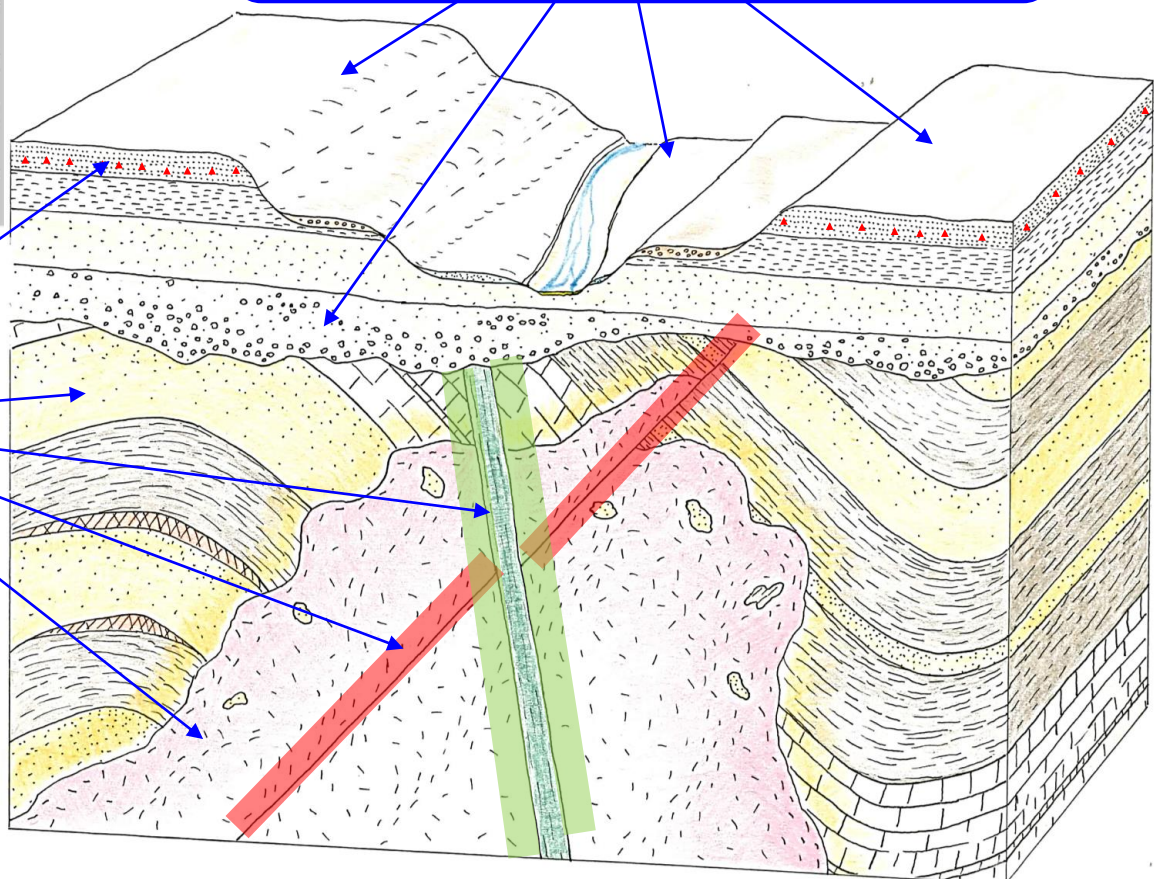
# 改めて、どうして年代を測るのか？

いろいろな **年代測定手法** を組み合わせ、地史の編年を詳細化し、  
 将来予測の信頼性を向上させるため。  
 (土地の出来事の細かい履歴書づくり)

$^{14}\text{C}$ 、 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{129}\text{I}$  (AMS)  
 OSL、ESR

U-Pb (LA-ICP-MS)、  
 K-Ar、CHIME、FT、  
 (U-Th)/He、  
 OSL、ESR、希ガス

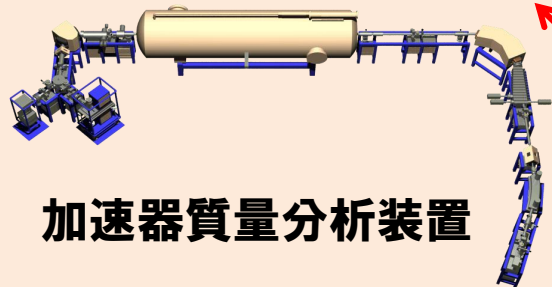
EPMA、XRF、pXRF、  
 XRD、IRMS、EA、XGT、  
 TIMS等による各種分析





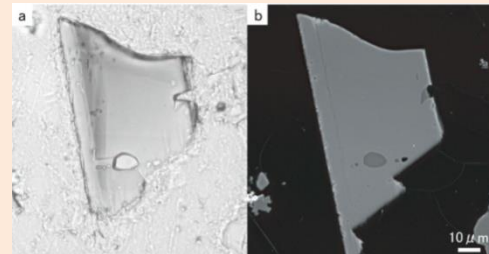
## 調べるものに合わせて色々な年代測定手法が必要

### 堆積物の放射性炭素年代法

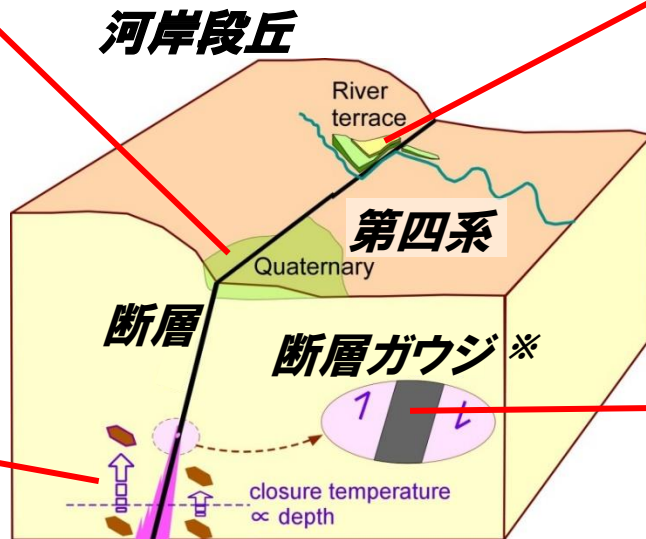


岩石、鉱物、土壌、堆積物、  
炭酸塩、植物遺骸、地下水...

### 堆積物の火山灰層位法



### 基盤岩のウラン・トリウム ・ヘリウム年代法



※断層の運動によって岩石が破碎され、  
粘土のように 粒径が小さくなった部分

### 断層ガウジの カリウム・アルゴン年代法

### 希ガス質量 分析装置



詳しく地史を知るためには、地質体が経験した環境変遷や生じた出来事の年代情報を持っている試料を見つけ出し、精確な分析を行うとともに、多量の分析結果の蓄積も必要 → 化学分析の精度を維持しつつ、素早い分析を可能とする技術開発も必要

## 土岐地球年代学研究所では、さまざまな目的や状況に対応できるように各種年代測定法を開発整備

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 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>			
加速器質量分析装置 (JAEA-AMS-TONO-5MV & 300kV)	<sup>14</sup> C法							■	断層運動	地下水, 有機物	実用化済
	<sup>10</sup> Be法			■	■	■			侵食速度	石英	実用化済
	<sup>26</sup> Al法			■	■	■			侵食速度	石英	実用化済
	<sup>36</sup> Cl法				■	■	■		地下水年代	地下水	開発中
	<sup>129</sup> 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	開発中
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	実用化済

1000万 ~ 1万 技術開発の対象年代範囲

装置・技術・人材が集積したセンターとして、**大学等研究機関との協働や、学生実習生受け入れ等による人材育成への貢献、普及活動を進めてきています。**

年代測定は、装置に入れて自動で年代値が出ることはない。  
 下記の**多くの要素のパッケージ**が年代測定技術であり、地史の編年を精緻化するためには、**全要素の高度化、関係分野間の総合化が必要**。

## 試料採取から公表までの流れ

野外現地作業等  
試料採取

前処理

分析

評価  
検討

公表

## 年代値・分析値の信頼性向上

微量試料への対応  
ばらつきの少ない方法  
迅速化、合理化

標準試料の  
作成・開発

要素技術等の高度化・  
総合化・各成果の公表

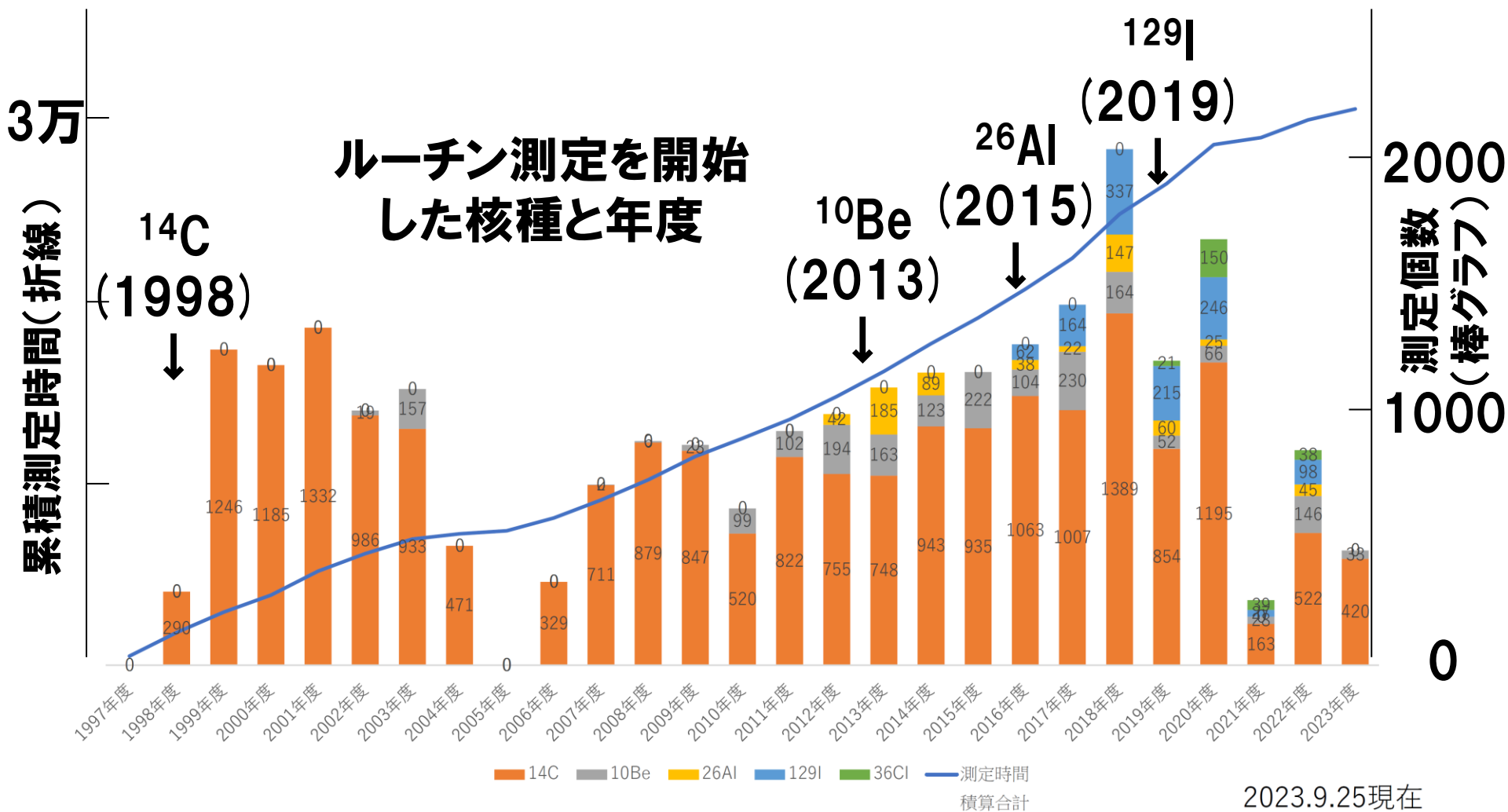
高精度分析  
局所領域分析  
チューニング  
精確さの維持管理  
手法・装置開発

試薬管理・法令対応  
清浄な環境の整備  
安全な職場の維持

先行研究・他分野技術のキャッチアップ  
新規課題掘り起こし



➤ 加速器質量分析装置(JAEA-AMS-TONO)による、 **$^{14}\text{C}$** 、 **$^{10}\text{Be}$** 、 **$^{26}\text{Al}$** 、 **$^{129}\text{I}$** の測定実績 (ポスター発表では $^{36}\text{Cl}$ 測定へ向けたチャレンジを紹介)



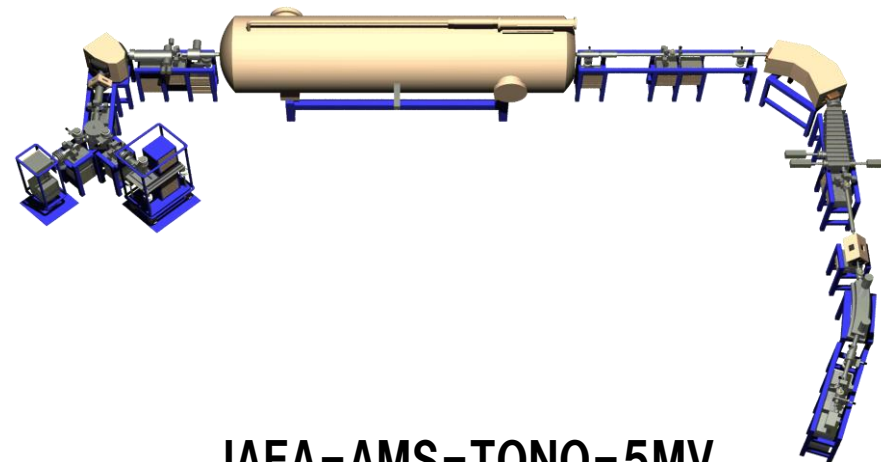
- およそ**50  $\mu\text{g}$ の炭素量**での $^{14}\text{C}$ 年代測定へ向けて、標準試料の測定に成功  
 (50  $\mu\text{g}$ :**密度1g/cm<sup>3</sup>なら0.37mm四方**の立方体)  
 通常、商業測定では、炭化物でも2mg以上の試料量が推奨されている



+



+



EA(元素分析計)

AG3(自動グラフアイト調製装置)

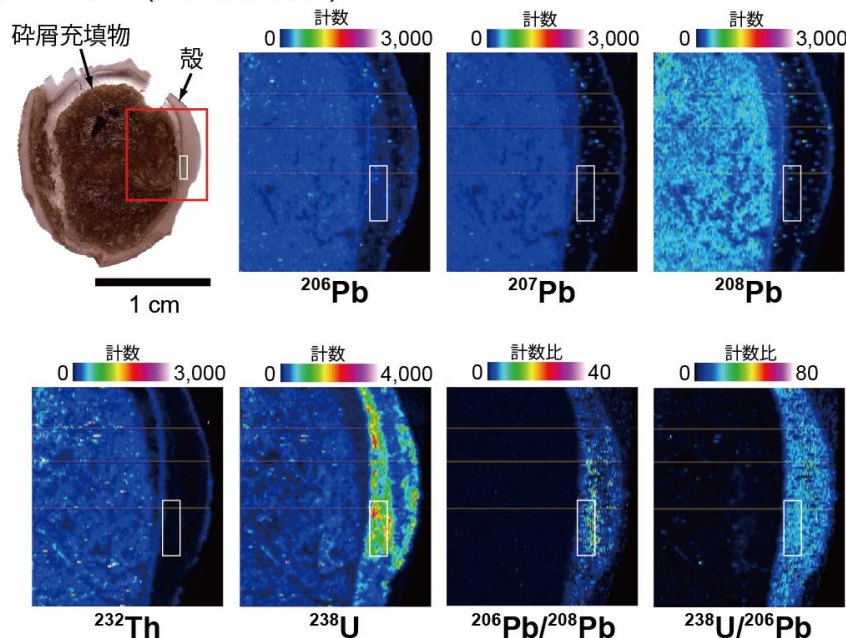
 JAEA-AMS-TONO-5MV  
(加速器質量分析装置)

Watanabe, et al., Geochemical Journal, Vol. 55, pp. 277 to 281, 2021.  
 doi:10.2343/geochemj.2.0629

**さらに少量(約20~30  $\mu\text{g}$ )での測定にチャレンジ中**

- **局所領域の高精度分析**により、炭酸塩のU-Pb年代測定に成功  
イメージング分析で適切な分析領域を特定して、示準化石3試料から、化石年代と良く一致する3億年～4000万年の年代を得た。

ウミツボミ (*Pentremites*)



レーザーアブレーション装置  
(Photon-Machines, Analyte G2)



四重極型ICP質量分析装置  
(Agilent, 7700x)



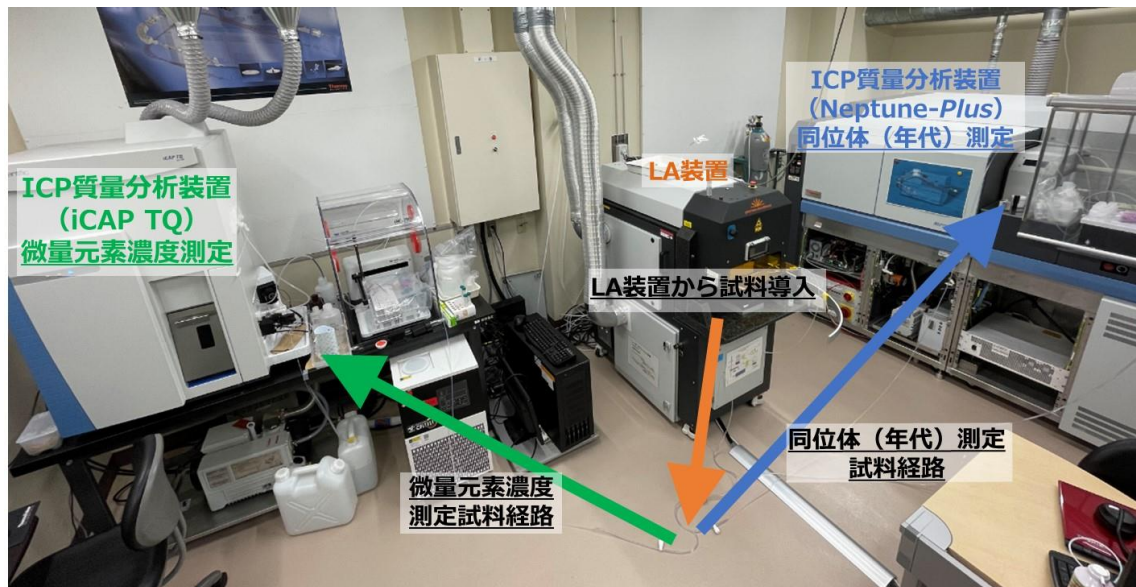
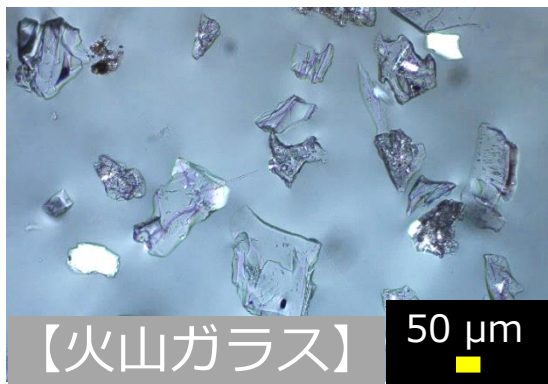
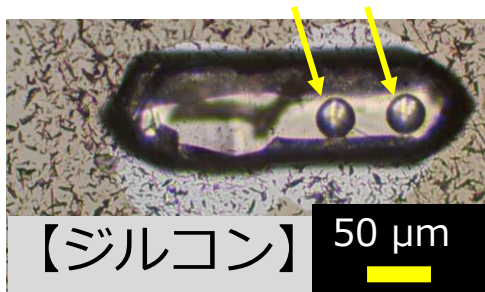
多重収束型マルチコレクタICP質量分析装置  
(Thermo Scientific, Neptune-plus)

- Yokoyama, et al., *Geochemical Journal*, Vol. 52, 531-540, 2018.  
doi:10.2343/geochemj.2.0541
- 石丸ほか, *JAEA-Research* 2019-006, 2019.  
doi:10.11484/jaea-research-2019-006

**高精度分析を可能にするコンタミの極力無い前処理環境の構築、  
鉱物の単一微小領域から「高精度な同位体分析(年代測定)」と  
「元素濃度の定量分析」を同時に実施可能な技術整備など、  
継続的にチャレンジ中**

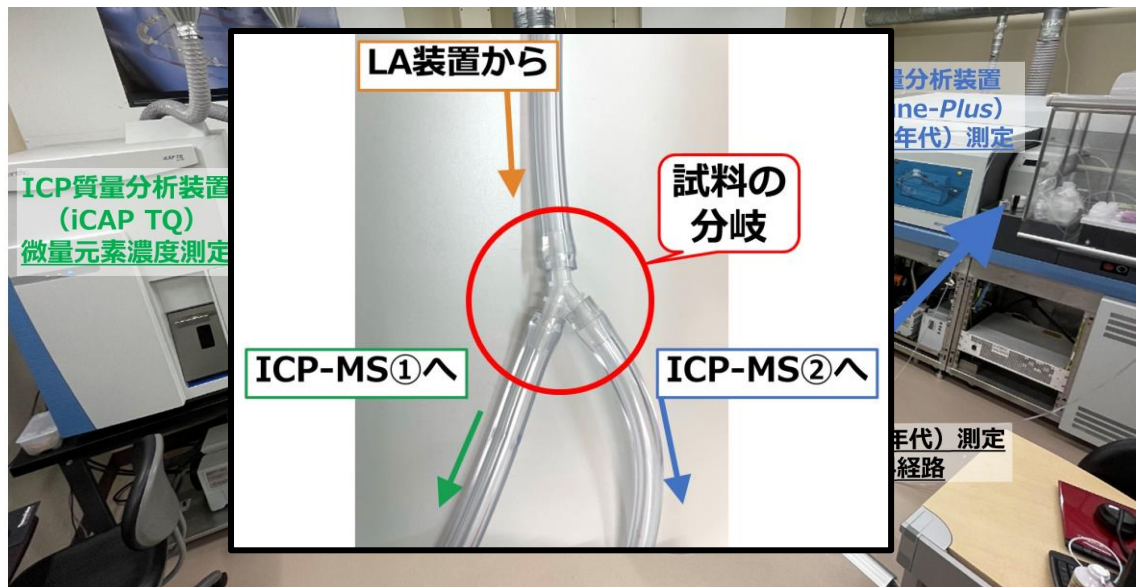
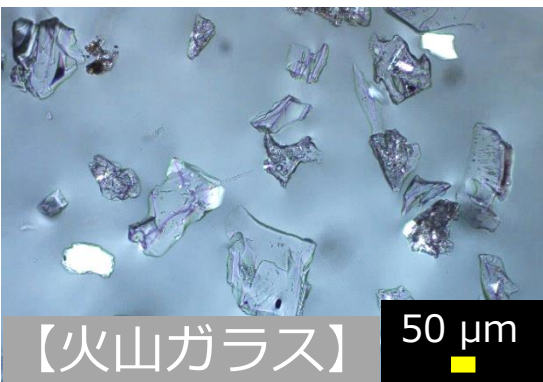
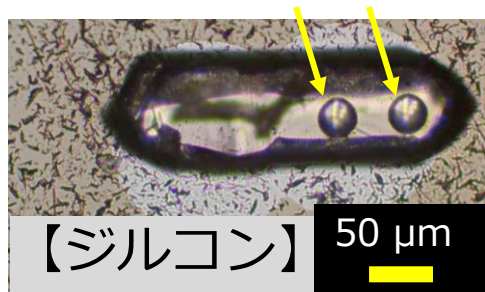


- 鉱物の単一微小領域から「高精度な同位体分析(年代測定)」と「元素濃度の定量分析」を同時に実施可能な技術  
従来の2点照射を1点照射にし、より詳細な地質記録の復元と信頼性向上に貢献



**LASS (Laser Ablasion Split Stream)-ICP-MS**

- 鉱物の**単一微小領域**から「**高精度な同位体分析(年代測定)**」と「**元素濃度の定量分析**」を同時に実施可能な技術  
従来の**2点照射**を**1点照射**にし、より詳細な地質記録の復元と信頼性向上に貢献



**LASS(Laser Ablasion Split Stream)-ICP-MS**

**【ジルコン】標準試料では推奨値に対し年代値は一致、Ti濃度は整合的**  
**【火山ガラス】適用にチャレンジ中。火山ガラスの対比は極めて重要**  
**局所領域多元素(微量元素)分析による**  
**テフラの詳細対比例をポスターで紹介**

- **複数の年代測定手法に対応するジルコン標準試料の探求**  
 カソードルミネッセンス、U-Pb年代、フィッション・トラック年代、Hf同位体などの手法で、若い時代の年代測定に、安心して使える国内産ジルコンを探究

年代測定では、ラボ分析結果の信頼性を示すために、  
**標準試料と未知試料の分析結果を併記。**

そのため、元素組成が均質で安心して使える標準試料は、  
 年代測定結果の信頼性向上に大きく貢献。

## 各試料の適正評価の表

丹羽ほか, JAEA-Research 2023-005, 2023.  
 doi:10.11484/jaea-research-2023-005

	NST	NFS	TRG04	OGPK
① カソードルミネッセンス観察	○	◎	◎	○
② U-Pb 年代	◎	◎	◎	◎
③ フィッション・トラック年代	□	×	□	□
④ Hf 同位体組成	○	○	○	○

◎ : 非常に良い (均質), ○ : 良い (比較的均質), □ : 参照値あり, × : 悪い



- **複数の年代測定手法に対応するジルコン標準試料の探求**  
 カソードルミネッセンス、U-Pb年代、フィッション・トラック年代、Hf同位体などの手法で、若い時代の年代測定に、安心して使える国内産ジルコンを探究

年代測定では、ラボ分析結果の信頼性を示すために、  
**標準試料と未知試料の分析結果を併記。**  
 そのため、元素組成が均質で安心して使える標準試料は、  
**年代測定結果の信頼性向上に大きく貢献。**

### 各試料の適正評価の表

丹羽ほか, JAEA-Research 2023-005, 2023.  
 doi:10.11484/jaea-research-2023-005

	NST	NFS	TRG04	OGPK
① カソードルミネッセンス観察	○	◎	◎	○
② U-Pb 年代	◎	◎	◎	◎
③ フィッション・トラック年代	□	×	□	□
④ Hf 同位体組成	○	○	○	○

◎ : 非常に良い (均質), ○ : 良い (比較的均質), □ : 参照値あり, × : 悪い

ポスター発表では **(U-Th) / He法のジルコン標準試料探究の**  
**チャレンジを紹介**

- 地質試料を対象とした**化学分析手法の高効率化**として、**大型の(通常の)XRFに加えて、pXRF(ポータブルXRF)の活用を進めている。**



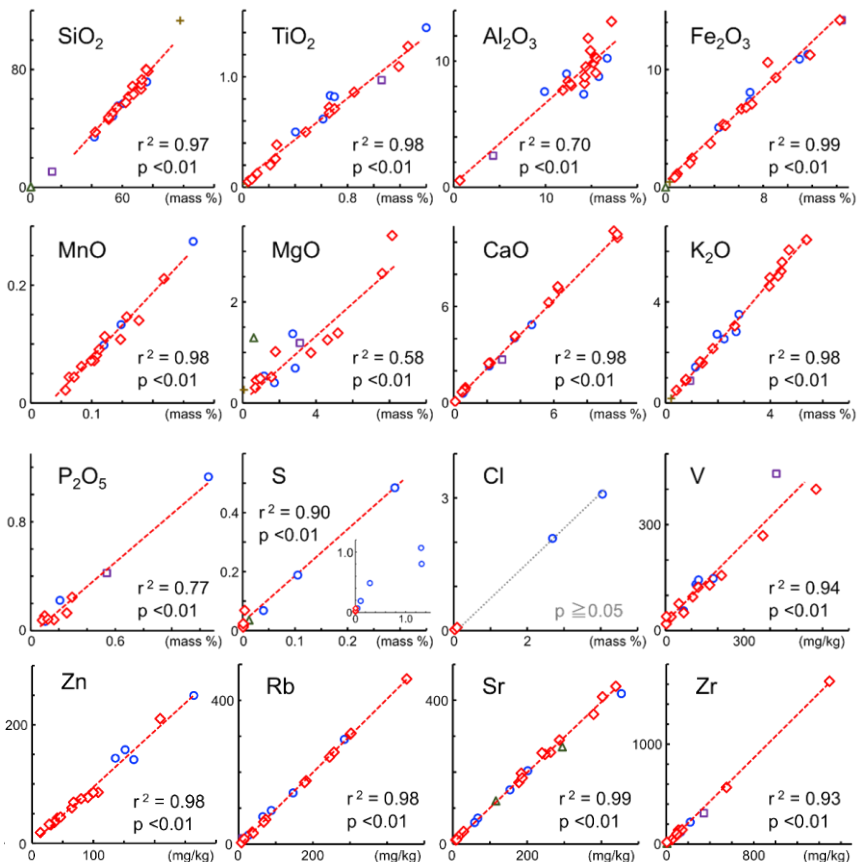
### 断層岩コア試料への適用

山本ほか, JAEA-Testing 2021-003, 2021.  
doi:10.11484/jaea-testing-2021-003

Watanabe, et al., Jour. Mineral. Petrol. Sci., Vol. 116, pp. 140-158, 2021.

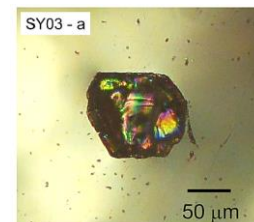
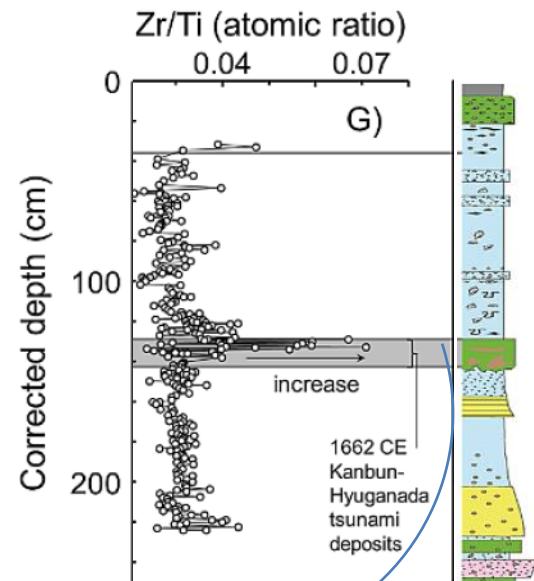
doi:10.2465/jmps.201224

pXRFによる標準試料中の各含有量(mass%)



含有量の既報値(通常のXRF分析結果)

### 津波堆積物の検出への適用



津波堆積物の泥質砂から  
見つけ出された  
ジルコン

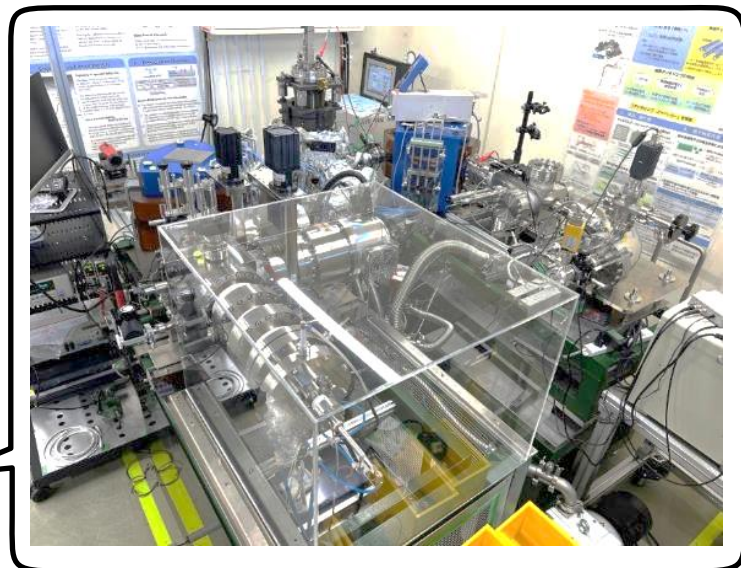
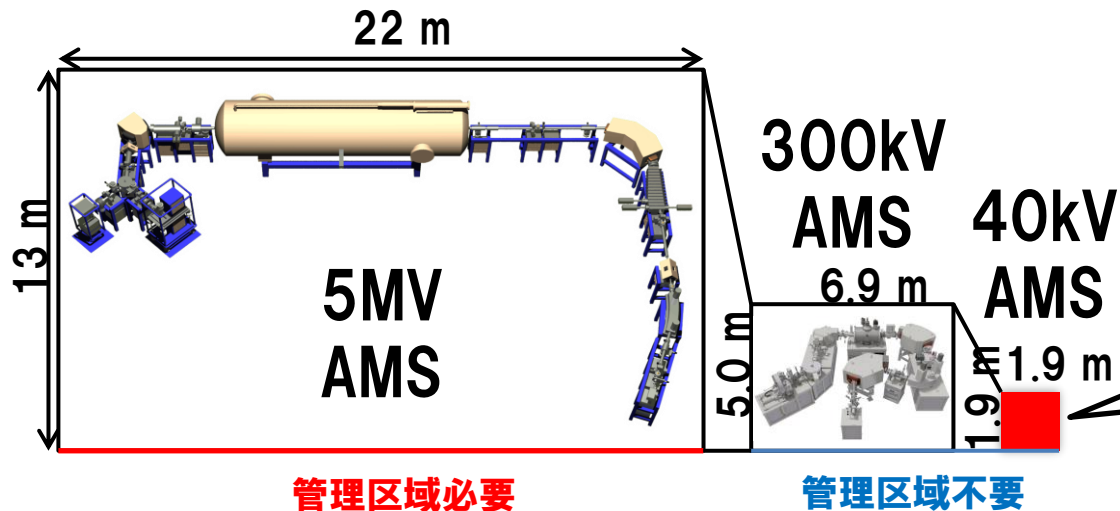
Watanabe, et al., Marine Geology, Vol. 444 (2022) 106704.

<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106704>

**断層岩、津波堆積物、湖底堆積物だけでなく適用事例を増やしていく**

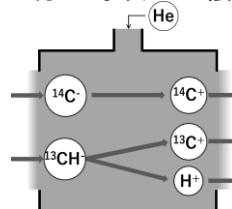
➤  **$^{14}\text{C}$ 年代測定、炭素同位体比測定のユビキタス化を目指し、超小型AMSを開発中。**

JAEA技術シーズ集第9版表紙に掲載

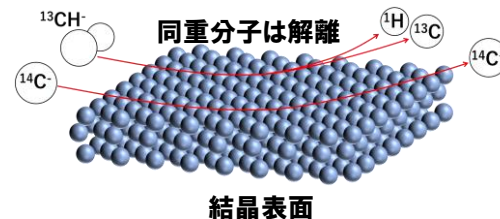


「加速器質量分析装置 超小型化への挑戦—結晶表面を用いて原子・分子をふるい分ける—」  
原子力機構の研究開発成果 2023-24, p. 82に掲載

従来技術  
ガストリッパー法



新技術  
結晶表面ストリッパー法



**国内に15基しかないAMSを小型化(移動可能化)、低コスト化し、調査現場近くでの分析や脱炭素に向けたバイオベース度認証への普及を目指し、原理実証にチャレンジ中**

東濃地科学センターでは、地層処分の安全確保において重要な自然現象を調査する技術について、最新の科学的知見を取り入れながら、様々な技術開発を継続的に進めてきた。

数万年以上の将来にわたる地層処分の安全性の評価のためには、過去～現在までの長い時間スケールにおける変化を踏まえて行うことが必要であることから、年代測定技術開発を進め、地層処分事業の各段階で必要となる編年技術の構築に努めていく。

また、原子力を取り巻く課題解決や社会のニーズへも対応できるよう、大学等研究機関と協働しつつ、試料前処理技術や測定手法の改良、分析精度の向上、化学分析手法の高度化、機器分析手法の改良等、年代測定技術を総合的に整備発展させ、見学等による普及活動も進めながら、自然現象を調査する技術の更なる信頼性の向上に努めていく。