

地質環境の長期安定性に関する研究

調査技術の開発・体系化

— 第2期中期計画における研究成果 —

独立行政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

地質環境の長期安定性に関する研究(第2期中期計画)

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

⇒ サイトの選定や安全性の検討に必要なデータの取得

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

⇒ 変動シナリオに基づく安全評価に必要な技術

③ 年代測定技術の開発

最先端の機器分析装置を用いた放射年代測定技術を含めた編年技術の高度化

⇒ ①, ②の信頼性の向上するための技術基盤

(データの品質・解釈等の妥当性を評価するための技術的能力の蓄積)

1. 調査技術の開発・体系化(前半)

1-1 変動地形が明瞭でない活断層などに係る調査技術

断層ガス等の化学組成等を指標とした活断層を検出するための手法を提示

1-2 地殻内の震源断層などに係る調査技術

震源断層、高温流体等を高い分解能で検出するための地球物理学的手法を提示

1-3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術

坑道等で遭遇した断層の活動性を解明するための物質科学的手法を提示

1-4 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術

河成段丘以外の堆積物の編年と標高等に基づく隆起・侵食速度の算出法を提示

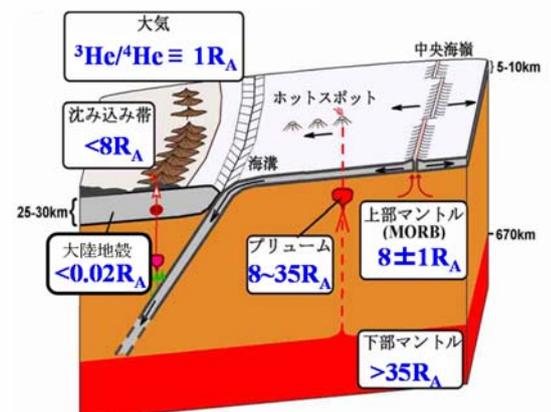
1-1 変動地形が明瞭でない活断層などに係る調査技術

【目標】

地表からの調査の段階において、変動地形が明瞭でない活断層の存否を確認するため、断層ガスの主成分・同位体組成等を指標とした調査技術を提示する。

【実施項目】

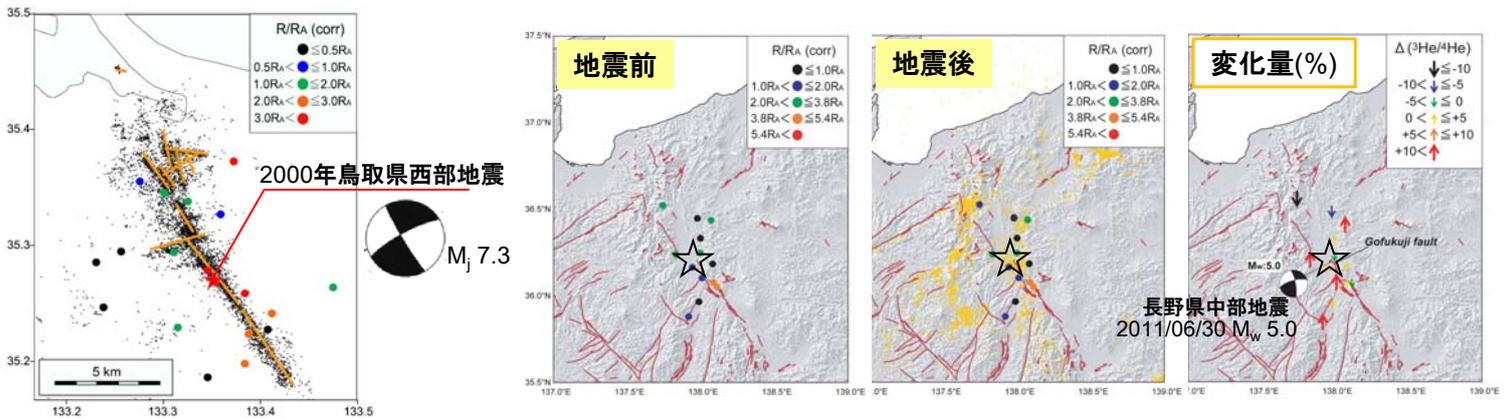
- ① 活断層等の周辺におけるマントルヘリウムの上昇に関する検討
→ 内陸地震震源域、活断層周辺の地下水・温泉井における $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の観測
- ② 断層タイプ等による $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分布特性の違いに関する検討
→ $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比データの収集および統計処理による適用性の検討



大気・地殻・マントルの $^3\text{He}/^4\text{He}$ の特徴

1-1① 活断層等の周辺におけるマントルヘリウムの上昇に関する検討

【実施内容・研究成果】 内陸地震の震源域、活断層周辺の地下水・温泉井における $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の観測

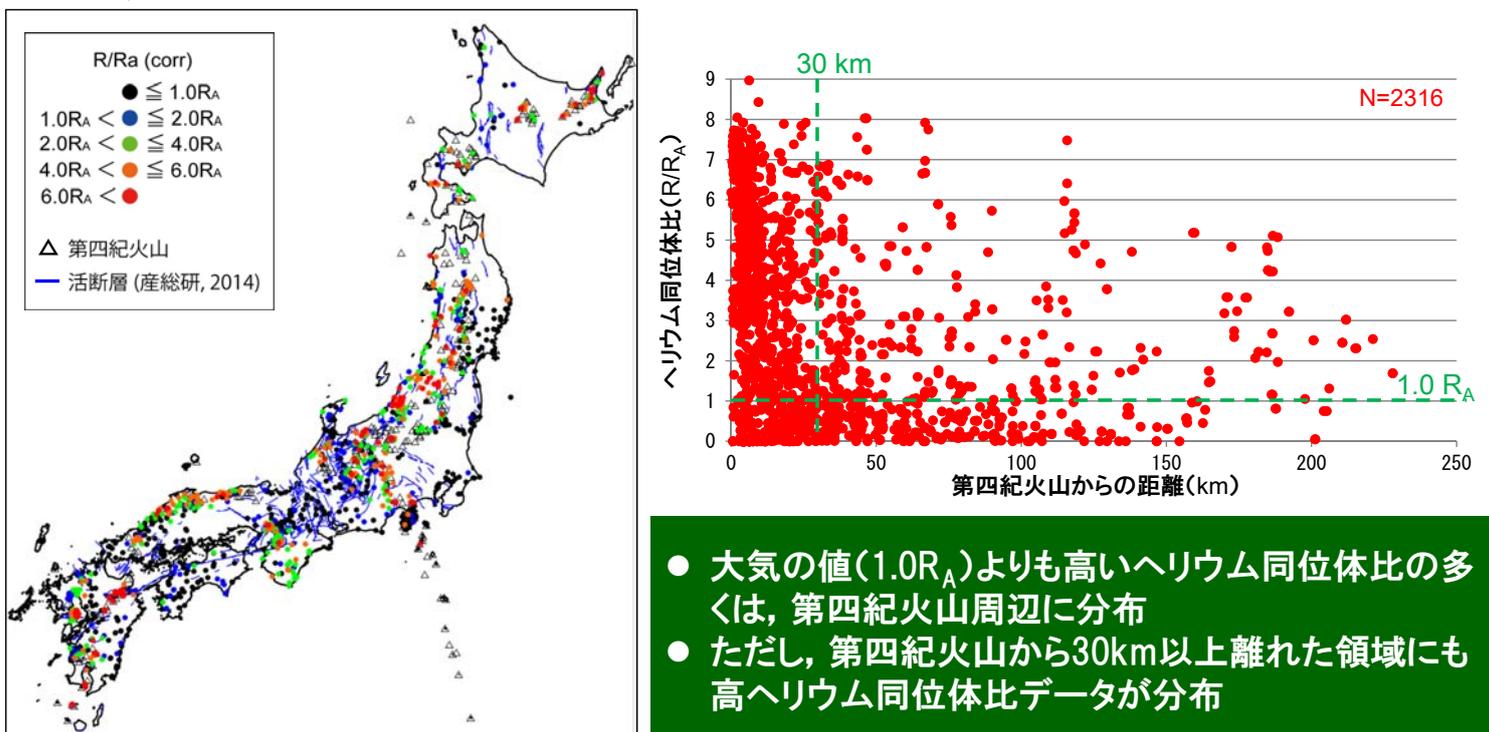


- 内陸地震の震源断層近傍で、顕著に高いヘリウム同位体($^3\text{He}/^4\text{He}$)比を確認
 - マントル起源ヘリウムが、断層を通じて地表に供給されていることを示唆
- 地震発生前後の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比変化量は、 $-0.8 R_A \sim +0.7 R_A$ であり、顕著な変化は認められない
 - 断層近傍におけるマントル起源ヘリウムの地表への供給は、地震の発生に伴う一時的な現象ではなく、定常的であることを示唆

1-1② 断層タイプ等による $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分布特性の違いに関する検討

【実施内容・研究成果】

$^3\text{He}/^4\text{He}$ 比データの収集および統計処理による適用性の検討

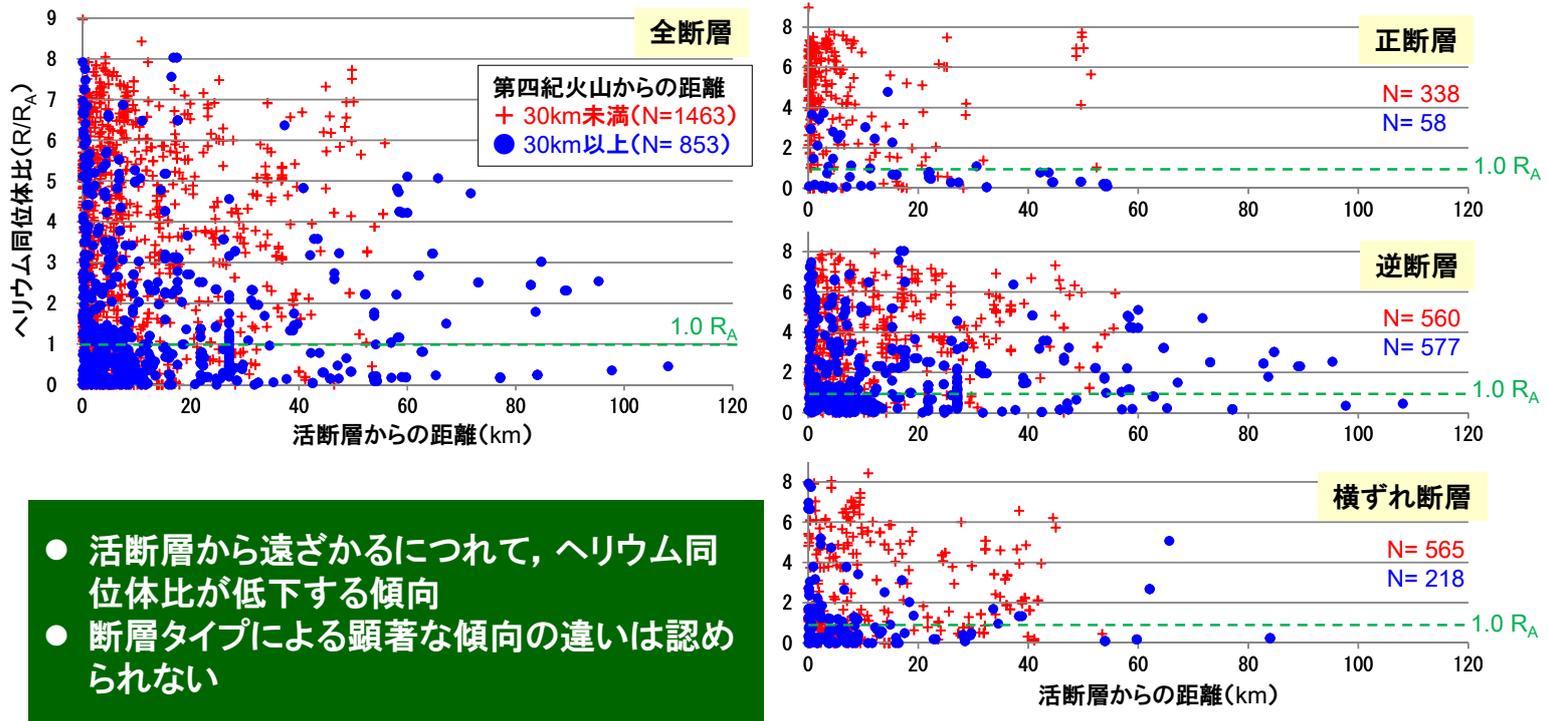


- 大気値($1.0R_A$)よりも高いヘリウム同位体比の多くは、第四紀火山周辺に分布
- ただし、第四紀火山から30km以上離れた領域にも高ヘリウム同位体比データが分布

1-1② 断層タイプ等による $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分布特性の違いに関する検討

【実施内容・研究成果】

断層タイプによる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分布特性の違い

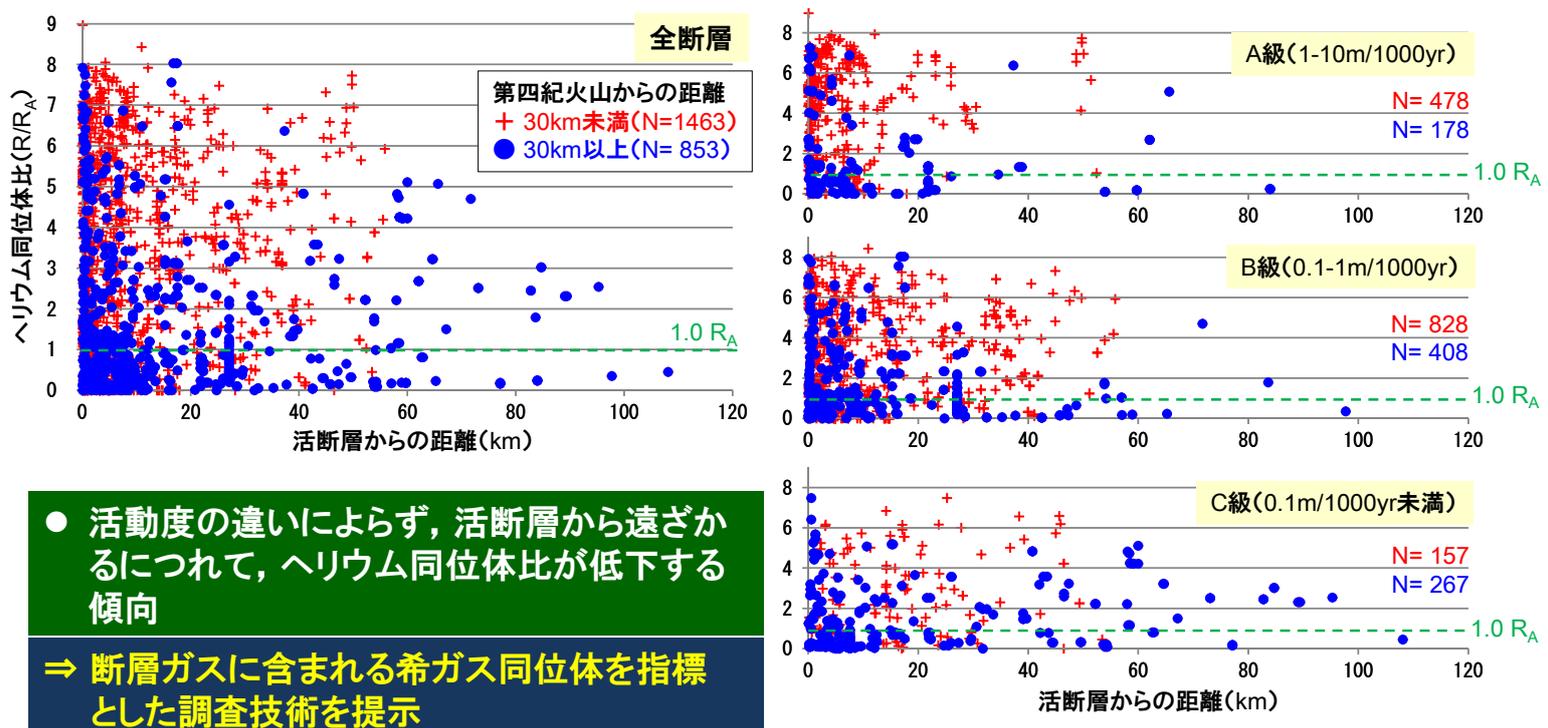


- 活断層から遠ざかるにつれて、ヘリウム同位体比が低下する傾向
- 断層タイプによる顕著な傾向の違いは認められない

1-1② 断層タイプ等による $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分布特性の違いに関する検討

【実施内容・研究成果】

断層の活動度による $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分布特性の違い

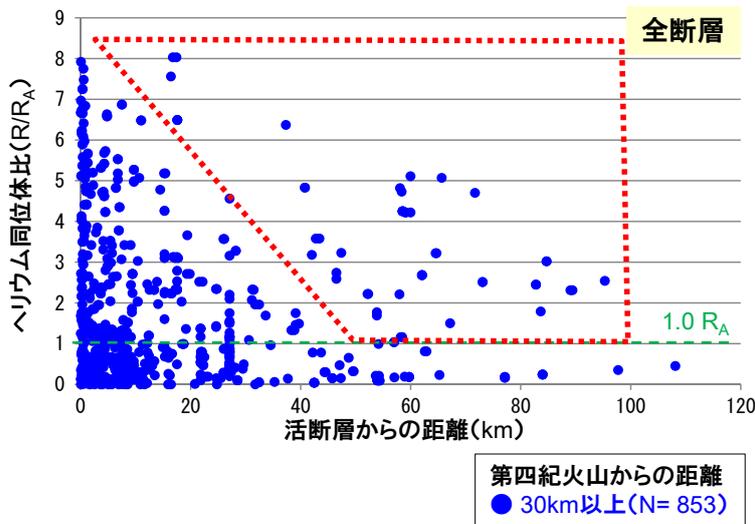


- 活動度の違いによらず、活断層から遠ざかるにつれて、ヘリウム同位体比が低下する傾向
- ⇒ 断層ガスに含まれる希ガス同位体を指標とした調査技術を提示

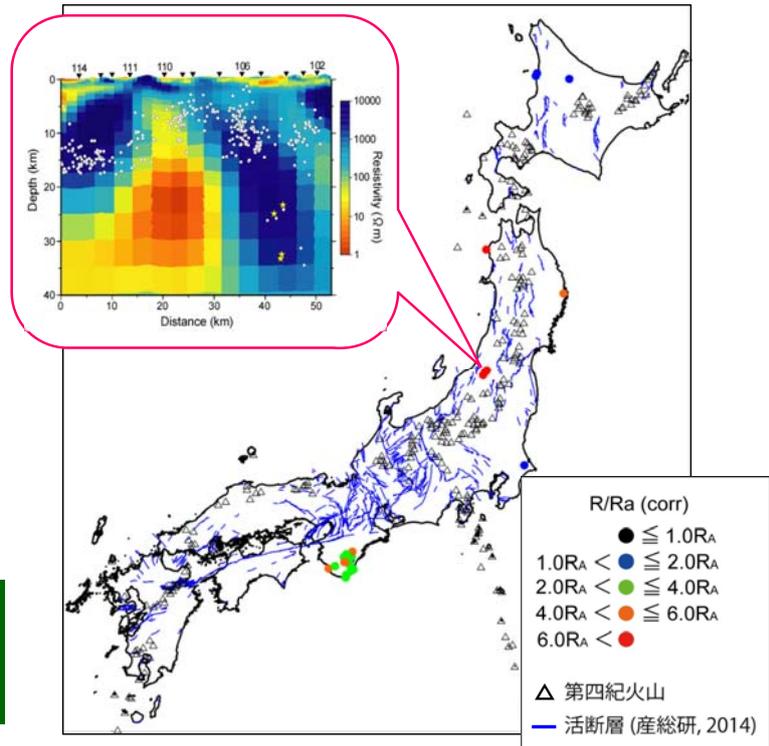
1-1② 断層タイプ等による $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分布特性の違いに関する検討

【実施内容・研究成果】

その他の要因による高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の分布特性



● 第四紀火山および活断層から離れた地域に見られる高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ データは、主に紀伊半島や飯豊山地周辺に分布



1-1 まとめ

【第2期中期計画の研究成果】

- 断層ガスに含まれる希ガス同位体を指標とした調査技術を提示
 - ✓ 逆断層および横ずれ断層を対象とした $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の有効性を示唆する事例
 - ✓ 断層を通じたマントル起源ヘリウムの地表への供給が、地震発生(断層運動)に伴う一時的な現象ではないことを示唆する事例
 - ✓ 日本列島全域において、高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比データは活断層の周辺に分布する傾向
 - ✓ この傾向は、確認断層タイプや活動度の違いにかかわらず、認められる特徴

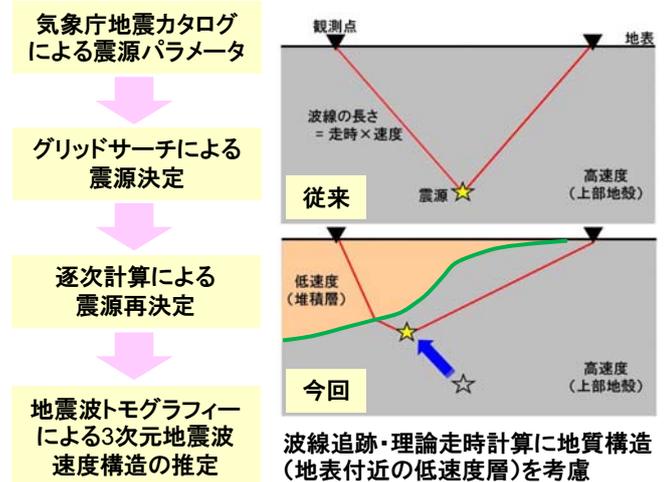
1-2 地殻内の震源断層などに係る調査技術

【目標】

地表からの調査段階において、地下深部における震源断層や高温流体等の存否や構造を確認するため、地球物理学的アプローチによる調査技術を提示する。

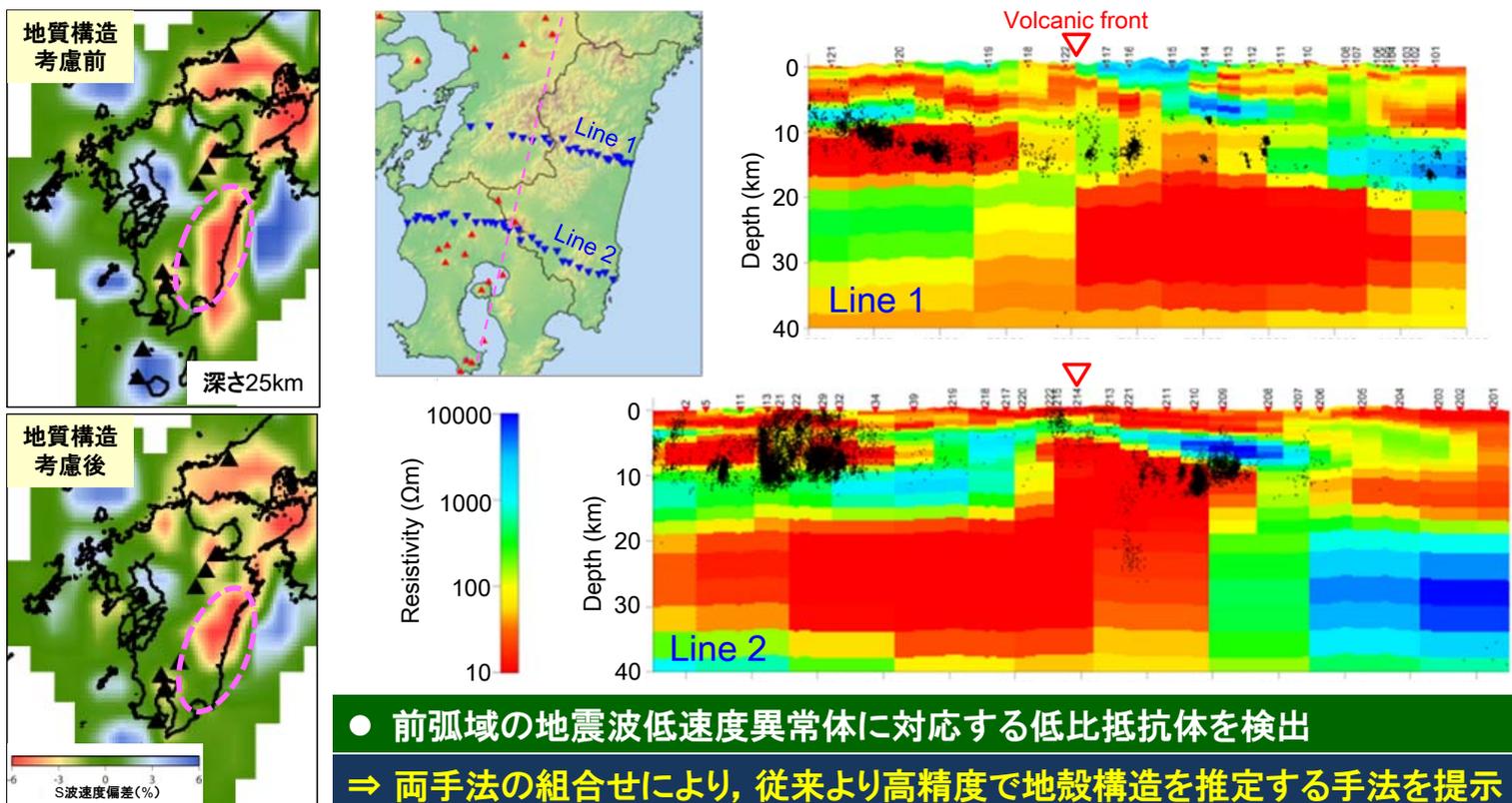
【実施項目】

- ① 微小地震の震源決定法・トモグラフィー法の高度化
 - 地質構造を考慮した震源決定法の構築
 - 地震波トモグラフィー法への適用
 - 比抵抗解析結果との比較による有効性の検証
- ② MT法データ処理・解析手法の高度化
 - 3次元比抵抗解析手法の開発
 - 観測データのノイズ除去手法の開発
 - 震源断層における比抵抗構造の推定



1-2① 微小地震の震源決定法・トモグラフィー法の高度化

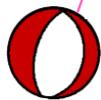
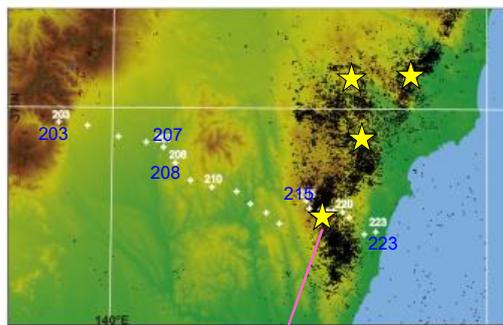
【実施内容・研究成果】 比抵抗解析結果との比較による有効性の検証



1-2② MT法データ処理・解析手法の高度化

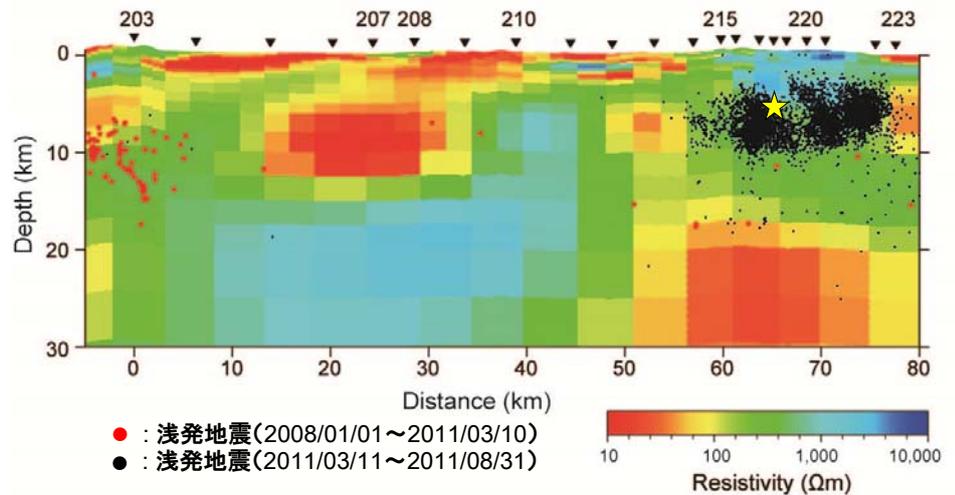
【実施内容・研究成果】 震源断層における比抵抗構造の推定

2011年茨城県北部の地震



2011/03/19
M_j 6.1

- + : MT法測点
- : 浅発地震
- ★ : 地震(M > 6)



- 群発地震域の近傍に深部から連続する低比抵抗体を検出

⇒ 地殻流体の分布を指標として、震源断層の存否や構造等を明らかにできる可能性を提示

1-2 まとめ

【第2期中期計画の研究成果】

- 従来より高い精度で地殻構造を推定する地球物理学的手法を提示
 - ✓ 震源決定法への地質構造に応じた地震波速度の適用と地震波トモグラフィーへの応用
 - ✓ 比抵抗境界の推定に適した3次元比抵抗構造解析プログラムを開発
 - ✓ 地震波トモグラフィーおよび比抵抗構造解析により、その有効性を確認
- 地殻流体の分布を指標として、震源断層の存否や構造等を明らかにできる可能性を提示
 - ✓ 1997年鹿児島県北西部地震、2011年茨城県北部の震源断層等を対象とした事例

1. 調査技術の開発・体系化(後半)

1-1 変動地形が明瞭でない活断層などに係る調査技術

断層ガス等の化学組成等を指標とした活断層を検出するための手法を提示

1-2 地殻内の震源断層などに係る調査技術

震源断層、高温流体等を高い分解能で検出するための地球物理学的手法を提示

1-3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術

坑道等で遭遇した断層の活動性を解明するための物質科学的手法を提示

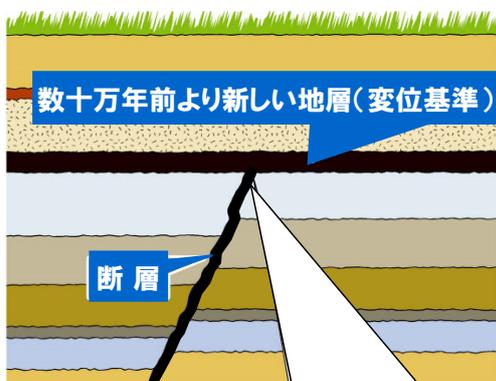
1-4 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術

河成段丘以外の堆積物の編年と標高等に基づく隆起・侵食速度の算出法を提示

1-3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術

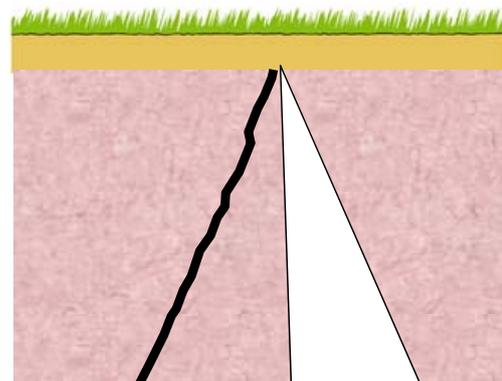
【目標】

上載地層法が適用が困難な地下で遭遇した断層等の活動性を把握するため、断層内物質(断層岩や充填物質等)を用いた調査技術を提示する。



断層が変位基準の地層に変位・変形を与えていれば活断層として認定

変位基準の地層の年代決定が重要
(¹⁴C年代, テフラ分析等)



変位基準が存在せず、古い地層しか存在しない場合には活断層の認定は困難

断層内物質を用いたアプローチ

1-3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術

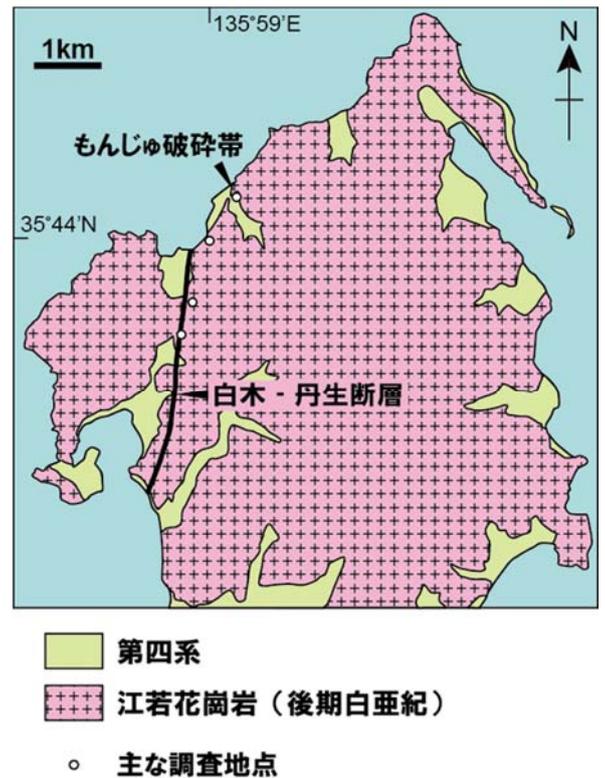
【実施項目】

- ① 断層内物質の構造地質学, 鉱物学的特徴等に基づく評価手法の検討
- ② 断層内物質の年代測定に基づく検討

→高速増殖原型炉「もんじゅ」破砕帯活動性評価の追加地質調査における検討

平成24年8月 原子力安全・保安院による指示
 平成25年4月 調査報告書提出
 平成25年8月 第1回評価会合
 平成25年9月 原子力規制委員会による追加調査の指示
 平成26年3月 全体取りまとめ報告を提出
 平成26年12月 第2回評価会合
 平成27年3月 第3回評価会合

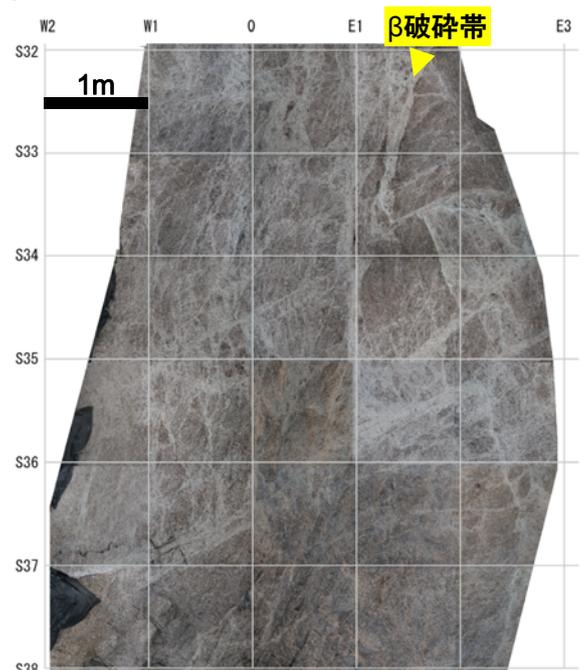
敦賀半島



「もんじゅ」破砕帯活動性評価の追加地質調査

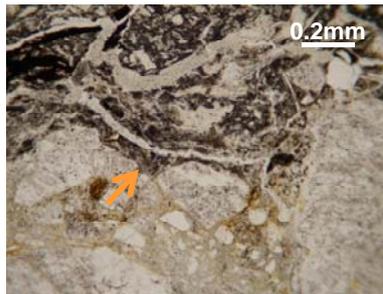
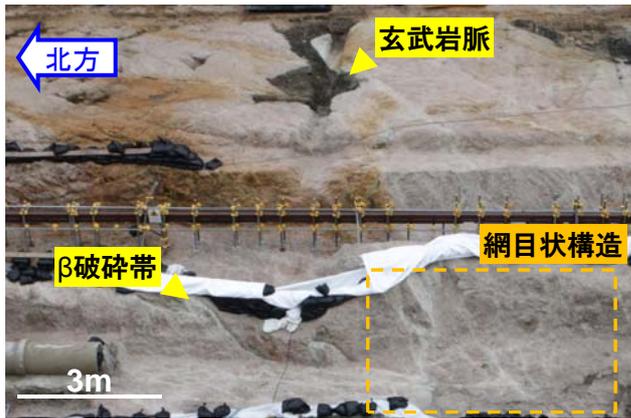


β破砕帯の南方延長を把握するため剥ぎ取り範囲を拡大 (平成26年3月)



- 割れ目が網目状に発達する構造が明確になる
- β破砕帯は他の破砕帯に切断される

「もんじゅ」破砕帯活動性評価の追加地質調査



偏光顕微鏡写真(単ポーラー)

- 玄武岩脈は変形が認められる花崗岩に沿って、または花崗岩の変形構造を切断して貫入
- 接触部には急冷周縁相が破碎した花崗岩中に湾入 しながら連続的に形成
- 玄武岩内部には角礫化が認められるが、変位センスは系統的に一樣方向を示さず、局所の変形にとどまる

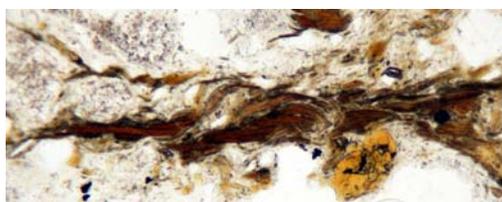
破砕帯の産状

β破砕帯:

- 粘土鉱物の定向配列や複合面構造が一部で見られる
- しかし、白木-丹生断層の断層ガウジのような積層構造等は認められない



剥ぎ取り調査地点の破砕帯には黒雲母の塑性変形が普遍的に見られる



0.2mm 偏光顕微鏡写真(単ポーラー)

白木-丹生断層の断層ガウジ



断層ガウジの偏光顕微鏡写真(直交ポーラー)

- 積層構造が発達
- 粘土鉱物の定向配列が顕著
- 細粒化が進行



繰り返しの破碎



注入組織

「もんじゅ」破砕帯活動性評価の追加地質調査

【「もんじゅ」破砕帯追加調査の結果】

剥ぎ取り調査の範囲を拡充し、敷地内破砕帯に活動的であることを示す証拠が認められないことを確認



江若花崗岩に普遍的に発達する粘土脈の例

いつでも任意に調査範囲を拡充できるとは限らない
(特に、地層処分等における坑道での調査の場合)

- ① 断層内物質の鉱物学的特徴等に基づく評価手法の検討
- ② 断層内物質の年代測定に基づく検討

1-3①断層内物質の鉱物学的特徴等に基づく評価手法の検討

断層内物質の鉱物組成 (XRD分析)

- 母岩起源の石英, 長石類に富む
- 粘土鉱物としてスメクタイト, イライト, カオリナイトを含む

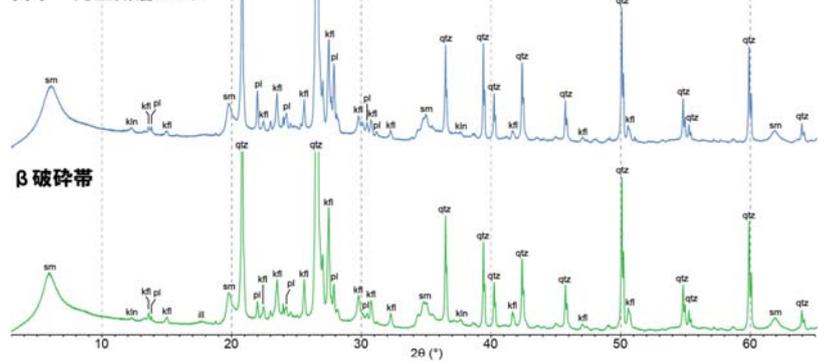
→物理・化学特性の大きく異なる複数の鉱物種が混在

バルクの組成のみで評価するのは一般的には困難

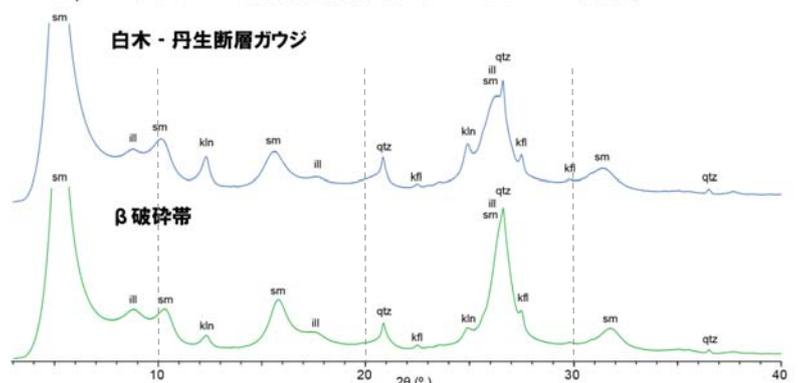
- 石英に着目した検討
- 粘土鉱物に着目した検討

バルク粉末試料の不定方位分析

白木・丹生断層ガウジ



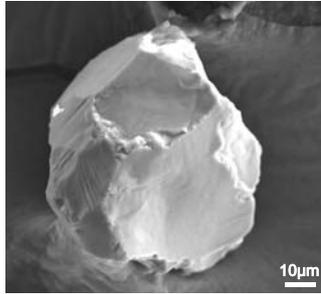
<0.1μm フラクシオンの定方位分析 (エチレンジリコール処理)



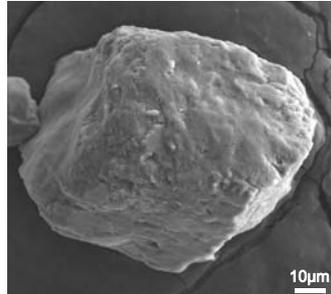
1-3①断層内物質の鉱物学的特徴等に基づく評価手法の検討

【実施内容】 石英粒子の表面構造の観察

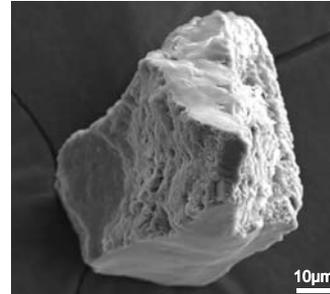
- 一般的に形成時期の古い石英粒子ほど化学的腐食が進行(Kanaori et al., 1985など)⇒活動時期の新しい断層では新鮮な表面構造を持つ石英粒子が多い傾向が期待
- 断層内物質から20~75μmサイズの石英粒子を抽出し、SEMで表面の特徴の違いを観察



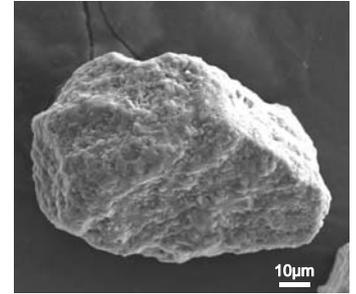
Type 1
ほぼ全面が新鮮な表面構造を有する



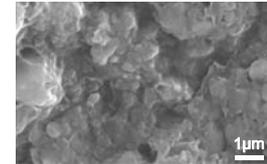
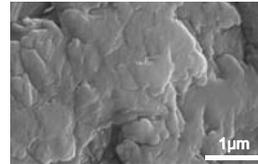
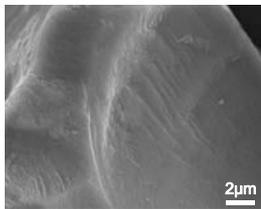
Type 2
摩耗、または弱い腐食により円磨された表面を有する



Type 3
部分的に腐食が進行し、凹凸の発達した表面が半分近くを占める



Type 4
全体的に腐食が進行し、ほぼ全面が凹凸の発達した表面を持つ

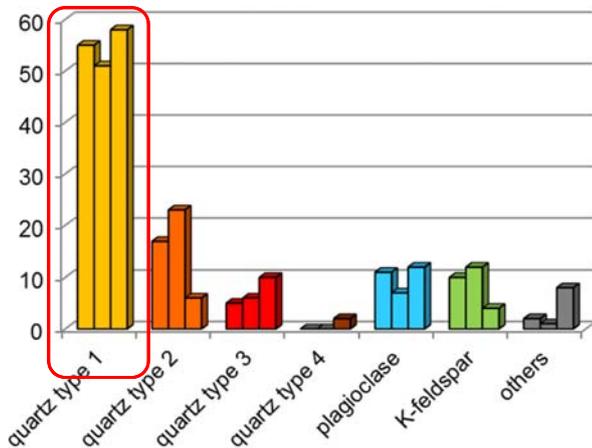


1-3①断層内物質の鉱物学的特徴等に基づく評価手法の検討

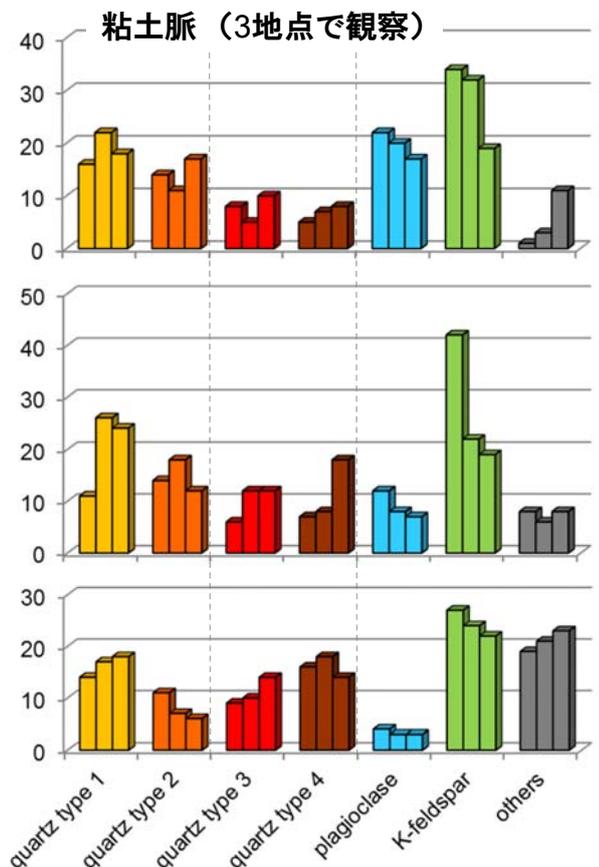
【実施内容】 石英粒子の表面構造の観察

- 平均的な傾向を評価するため、試料ごとにn=100で3回、種類分けを実施

白木-丹生断層ガウジ



- 繰り返し活動した履歴のある白木-丹生断層のガウジは、新鮮な表面構造を持つ石英粒子が圧倒的に多い



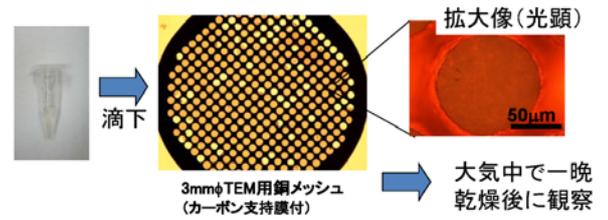
1-3①断層内物質の鉱物学的特徴等に基づく評価手法の検討

【実施内容】 粘土鉱物粒子のTEM観察

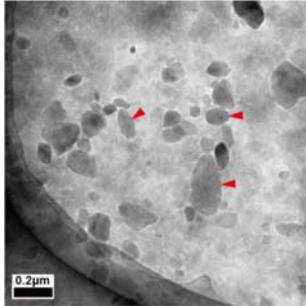
凍結-融解の繰り返しによる破碎と超高速遠心分離により、 $<0.1\mu\text{m}$ の極細粒の粒子を人為的に壊さないように濃集



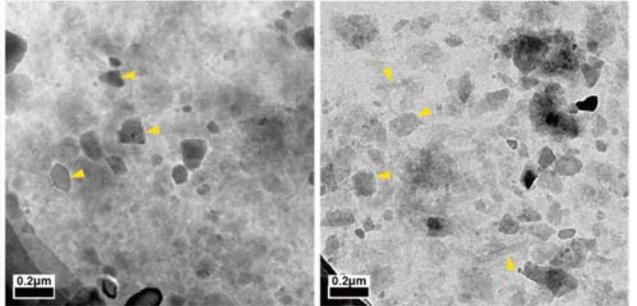
(JEOL JEM-2100Fで観察)



白木-丹生断層ガウジ



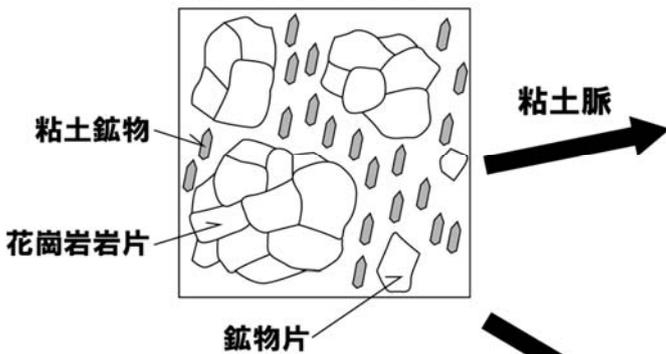
粘土脈 (2地点で観察)



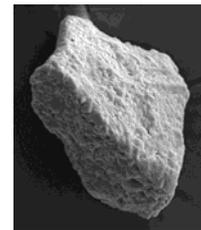
- 繰り返し活動している活断層の粘土鉱物の方が、摩耗が進んでいるように観察される
- 統計的な評価を行うためには、より粒子を分散させるよう工夫する必要がある

1-3①断層内物質の鉱物学的特徴等に基づく評価手法の検討

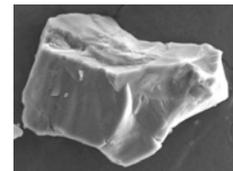
粘土脈の起源：
破碎を伴う熱水活動



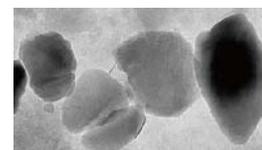
化学的腐食が進行



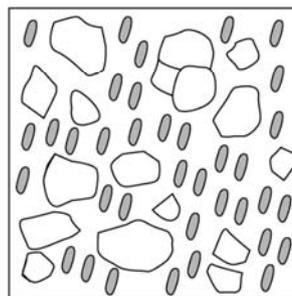
岩片・鉱物片のさらなる分割による
新鮮な結晶面を持つ石英粒子の増加



石英より相対的に弱い粘土鉱物に対しては物理的な摩耗が進行



白木-丹生断層ガウジ
繰り返しの断層活動

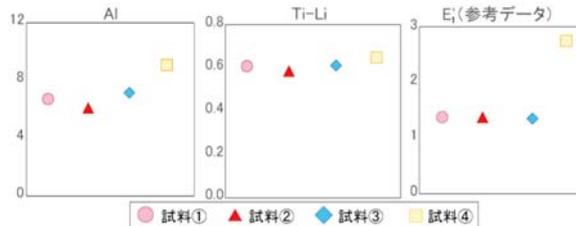
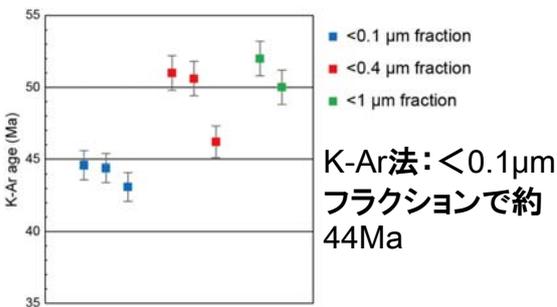


- 石英や粘土鉱物の構造観察についてはさらに事例を増やしていく(断層活動の評価のみならず、断層内物質の年代測定の基本情報としても重要)

1-3② 断層内物質の年代測定に基づく検討

【実施内容】 花崗岩及びβ破砕帯の年代測定

未変質花崗岩	ジルコンU-Pb法 黒雲母K-Ar法 ジルコンFT法 アパタイトFT法	68.5±0.7 Ma 62.2~62.3±1.4 Ma 71.6±4.8 Ma 50.8±7.4 Ma
β破砕帯内物質		44.6±1.0 Ma, 44.4±1.0 Ma, 43.1±1.0 Ma (<0.1 μm)
K-Ar法(粒度ごとに分離して測定)		51.0±1.2 Ma, 50.6±1.2 Ma, 46.2±1.1 Ma (<0.4 μm)
		52.0±1.2 Ma, 50.0±1.2 Ma (<1 μm)
	ジルコンU-Pb法 ジルコンFT法 アパタイトFT法	66.8±1.0 Ma 58.7±11.2 Ma 28.4±4.9 Ma
石英ESR法(破砕帯内とその近傍の花崗岩とで測定)		NA

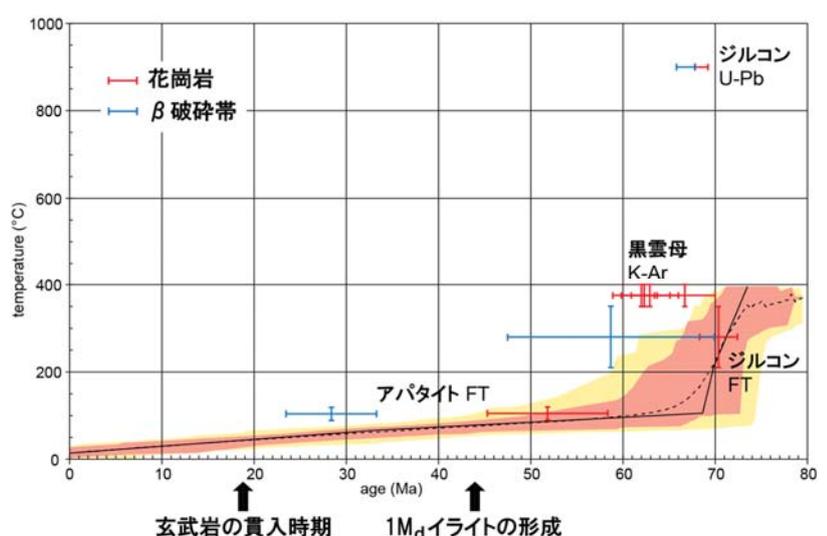


石英ESR法:β破砕帯(試料④)で大幅な信号強度の低下が見られない

1-3② 断層内物質の年代測定に基づく検討

【実施内容】 年代測定による熱史の検討

- 花崗岩と破砕帯で、ジルコンU-Pb年代及びジルコンFT年代に有意な差がない。また、両者ともジルコンFT長の短縮が無く、急冷パターンを示す。
⇒貫入時~約250°Cに冷却されるまでの熱史は、花崗岩と破砕帯でほぼ同様
- アパタイトFT長は短い側に裾の長い典型的な徐冷パターンを示す。熱履歴逆解析の結果も同様の傾向を示す。
⇒花崗岩は、約110°C付近以下で徐冷
- XRDポリタイプ解析では、<0.1 μmフラクションのイライトは主に200°C以下で形成される1M_d型で構成される。
⇒粘土鉱物は花崗岩の冷却に伴い形成

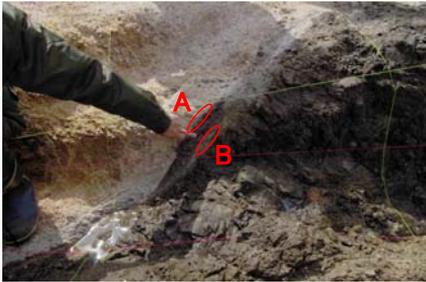


アパタイトFT年代、アパタイトFT長、ジルコンFT年代、ジルコンFT長に基づく花崗岩の熱履歴逆解析の結果を、実データとの適合度が高い順に、実線>薄赤色の領域>黄色の領域で示してある。破線は加重平均。計算にはHeFTy ver. 1.8.2(Ketcham, 2005)を使用。

● 破砕帯内物質を用いた年代測定の結果からは、「もんじゅ」剥ぎ取り調査範囲に活動的であることを示す証拠は認められない

1-3② 断層内物質の年代測定に基づく検討

【実施内容】 玄武岩脈沿いに産する方解石の年代測定



放射性炭素年代(^{14}C)法 (JAEA-AMS-TONOにて測定)

試料名	試料ID	^{14}C 年代 (年BP, 1σ)
A	JAT-9799_1	測定限界以下
	JAT-9799_2	測定限界以下
B	JAT-9798_1	48,000 \pm 590
	JAT-9798_2	48,460 \pm 600
C	JAT-9800_1	測定限界以下
	JAT-9800_2	測定限界以下

⇒方解石脈の ^{14}C 年代測定結果は、バックグラウンド・レベルとほぼ一致

アイオニウム (^{234}U - ^{230}Th) 法

⇒測定の結果、試料の閉鎖系が保たれていない(年代値の算定根拠を満たしていない)可能性が高いことを確認(新たな方解石の沈殿・成長や溶解等の影響が考えられる)



- 「もんじゅ」剥ぎ取り調査範囲に産する方解石脈については、有効な形成年代は得られなかった(形成時期が各手法の測定限界より古い可能性が高い)
- 方解石等の鉱物脈と断層との切断関係に基づく断層の最新活動時期の推定はしばしば有効であるので、鉱物脈に対する年代測定技術の開発は今後も進めていく

1-3 まとめ

①断層内物質の鉱物学的特徴等に基づく評価手法の検討

- 石英や粘土鉱物の電子顕微鏡による構造観察等を実施
- ✓ 変質部の微小領域の鉱物・化学分析や変形実験等との対比も行っていく
- ✓ 活断層と非活断層の識別に加え、断層とノンテクトニック構造(地すべり等)の識別手法についても検討していく

②断層内物質の年代測定に基づく検討

- 粘土鉱物のK-Ar年代測定や方解石脈のアイオニウム(^{234}U - ^{230}Th)年代測定等を実施
- ✓ 変位マーカースとなり得る鉱物脈の年代測定や、石英粒子の年代測定(OSL、ESR等)の適用性の検討等を進めていく