

科学的有望地提示後に期待されるJAEAの役割と 研究開発テーマ

- 第四紀堆積岩類
- 第四紀火山岩類
- 新第三紀堆積岩類
- 先新第三紀堆積岩類
- 新第三紀・先新第三紀火山岩類
- 新第三紀・先新第三紀深成岩類
- 変成岩類

吉田英一

名古屋大学博物館資料分析系
dora@num.nagoya-u.ac.jp

付図2 日本列島の地質図
(20万分の1日本シームレス地質図(産総研, 2007)より新規作成)

活断層
(推定活断層を含む)

付図3 日本列島の活断層図
(中田・今泉編(2002)を基に編集)



付図4 日本列島の地温勾配カウンター図と活火山の分布
(第四紀火山カタログ委員会(1999), 矢野ほか(1999)を基に編集)

火山フロント

まずはじめに。。。

**科学的有望地の提示に係る
要件・基準の検討結果
(地層処分技術WGとりまとめ)(案)について**

平成28年8月

総合資源エネルギー調査会
電力・ガス事業分科会 原子力小委員会
地層処分技術WG

議論の経緯

最終処分関係閣僚会議を設置(平成25年12月)

…見直しの方向性を議論

エネルギー基本計画(平成26年4月)

…国が科学的有望地を提示する等の方向性を閣議決定

地層処分技術WGとりまとめ(平成26年5月)

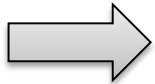
…地層処分に好ましい地質環境及びその長期安定性が確保できる場所が我が国において選定可能であることを確認

第2回最終処分関係閣僚会議を開催(平成26年9月)

…科学的有望地の要件・基準について専門家による検討を進める旨、決定

放射性廃棄物WGの再開(平成26年10月)

…科学的有望地の要件・基準等に関する検討を開始



地球科学的・技術的観点からの検討を地層処分技術WGにタスクアウト(平成26年11月)

地層処分技術WGの再開(平成26年12月)

⋮

地層処分技術WGにて「科学的有望地の要件・基準に関する中間整理」公表(平成27年12月)

- 関係学会・関係機関・専門家等への情報提供・意見照会(平成28年1月～4月)
- 「沿岸海底下等における地層処分に係る技術的課題に関する研究会」を開催(平成28年1月～8月)
- 経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)による国際レビュー(平成28年5月)

技術WGでの検討における前提

科学的有望地の位置付け

- 現時点での科学的知見に基づき、法令に基づく処分地選定調査に入る前段階における評価として、将来的に処分地選定調査を行うことによって最終処分施設建設地としての適性が確認できる可能性が高いと評価できる地域。
- 科学的有望地に含まれることは、直ちに個別地点の最終処分施設建設地としての適性を保証するものではなく、その適性は、法令に基づく処分地選定調査において、段階的に確認されるもの。

地域の分類

適性の低い地域

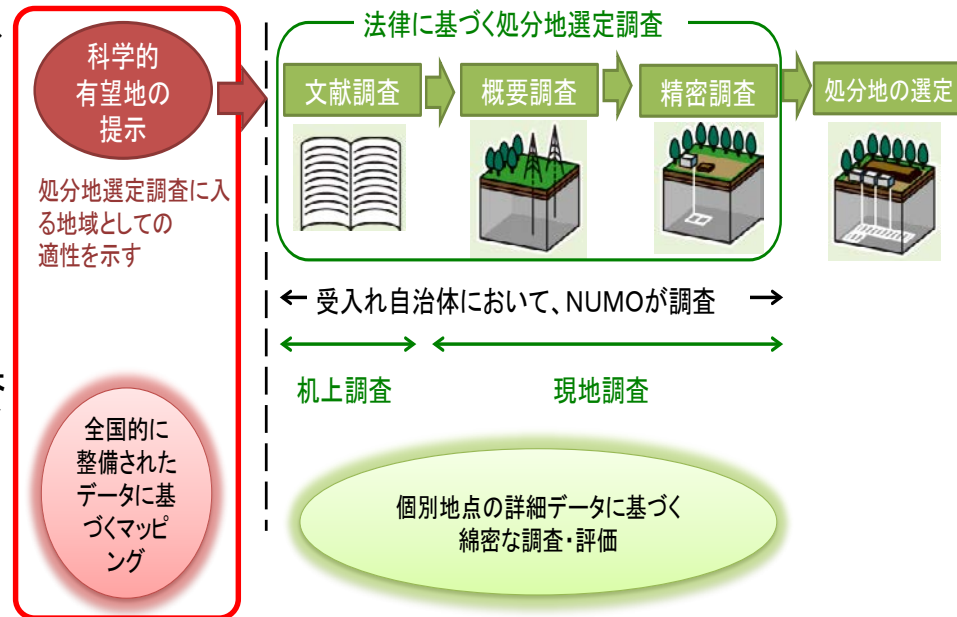
- ・・・ 処分地選定調査によって、処分地としての適性が認められることが期待しにくいいため、処分地選定調査の候補対象から除外することが適当

適性のある地域

- ・・・ 処分地選定調査によって、処分地としての適性が認められることが期待できるため、処分地選定調査の候補対象とすることが適当

より適性の高い地域

- ・・・ 処分地選定調査によって、処分地としてより高い適性が認められることが期待できる



科学的有望地の提示に係る要件・基準

- 地質環境特性及びその長期安定性に関する検討**
 - 火山の近傍
 - 活断層の近傍
 - 隆起・侵食が大きい範囲
 - 地温が高い範囲
 - 火山性熱水・深部流体が存在する範囲
 - 鉱量の大きな鉱物資源が存在する範囲 ※
- 地下施設・地上施設の建設・操業時の安全性に関する検討**
 - (地上施設) 火砕流の影響を受ける範囲
 - (地下施設) 軟弱な地層である範囲

- 輸送時の安全性に関する検討**
 - 港湾からの距離が短いこと
 - (沿岸海底下や島嶼部を含む)

一つでも該当する場合

一つも該当しない場合

該当する場合

適性の低い地域
(処分地選定調査によって、処分地としての適性が認められることが期待しにくい)

適性のある地域
(処分地選定調査によって、処分地としての適性が認められることが期待できる)

より適性の高い地域
(処分地選定調査によって、処分地としてより高い適性が認められることが期待できる)

処分地選定調査の候補対象から除外することが適当

処分地選定調査の候補対象とすることが適当

(※) 当該資源が存在しうる範囲を広域的に示したものであることに留意が必要。

沿岸部に関連する事項

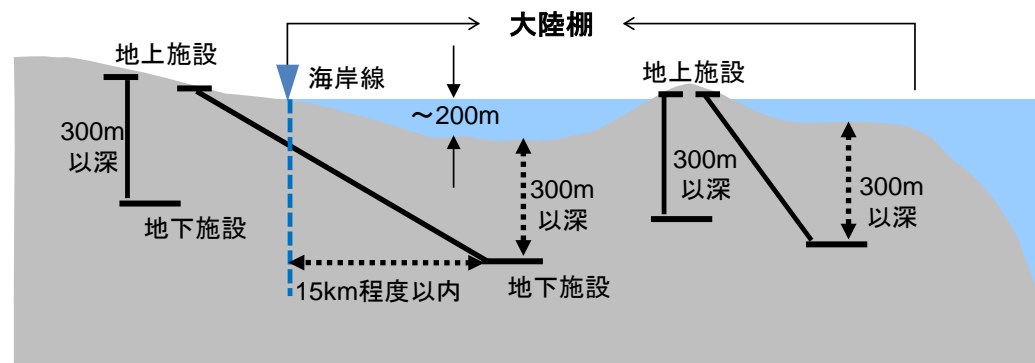
- 特に沿岸部(島嶼部や海底下を含む)の特性や建設・操業時の安全性、事業の実現可能性についての検討を行うため、本WGとは別途、有識者及び基盤研究開発機関等による研究会を本年1月に立ち上げ、本年8月に報告書を取りまとめ。研究会の報告書の内容について、本WGにおいて紹介し議論した上で、以下の内容については概ね妥当であるとの評価が得られた。

<沿岸部に期待される主な特性>

- ・地下水の流れが緩慢で、長期間流動性が低い場所を見つけられる可能性
- ・隆起速度の小さい地域が比較的多い

<沿岸部の考慮すべき事項>

- ・海水準変動や塩水(塩淡水境界)の影響
- ・侵食の影響
- ・建設・操業時の安全性(津波・湧水など)



- これらの特性・事項を踏まえ、①沿岸部における地質環境の調査・評価技術、②人工バリア構成材料や地下施設の設計・建設に係る工学的対策技術、③安全評価技術の対応可能性について検討。その結果、沿岸部で地層処分を行う場合に必要な基本的な技術は概ね整備されており、段階的な処分地選定調査・工学的対策・安全評価を適切に行うことにより、沿岸海底下等で安全に地層処分を行うことは技術的に実現可能と考えられる。
- ただし、今後も技術の高度化とデータ等の拡充に引き続き取り組むことにより、更に信頼性を高めることが重要。

今後に向けて

- 今回抽出した基準及び利用可能な文献・データを用いて、「適性の低い地域」、「適性のある地域」及び「より適性の高い地域」のマッピングを行う際には、以下の点に留意することが重要。
 - 今回抽出した利用可能な文献・データは、全国規模で整備されたものであるが、部分的にはデータが不存在的な地域が存在する場合もある。
 - また、データの密度はデータ毎に異なる。
 - そうした文献・データを単純に重ね合わせる際には、そうした不均一性を認識しておく必要がある。
- なお、今回は、地域毎に存在するローカルデータについては、地域間での比較可能性を欠くためにマップには用いないことが適当であるとしたが、そうしたローカルデータが将来的な地層処分に関する国民理解や地域理解にとって重要になってくることは言うまでもない。
- 今回の科学的有望地の提示が契機となって、まずは全国的な適性についての国民理解が広がっていくことが重要であるが、個別地域において対話が深まっていく中においては、ローカルデータについても情報共有等が進み、地域毎の地質環境等についてより具体的な理解が深まっていくことも重要。

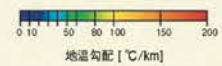
Geology

- 第四紀堆積岩類
- 第四紀火山岩類
- 新第三紀堆積岩類
- 先新第三紀堆積岩類
- 新第三紀・先新第三紀火山岩類
- 新第三紀・先新第三紀深成岩類
- 変成岩類

Active faults

活断層
(推定活断層を含む)

Geothermal gradient



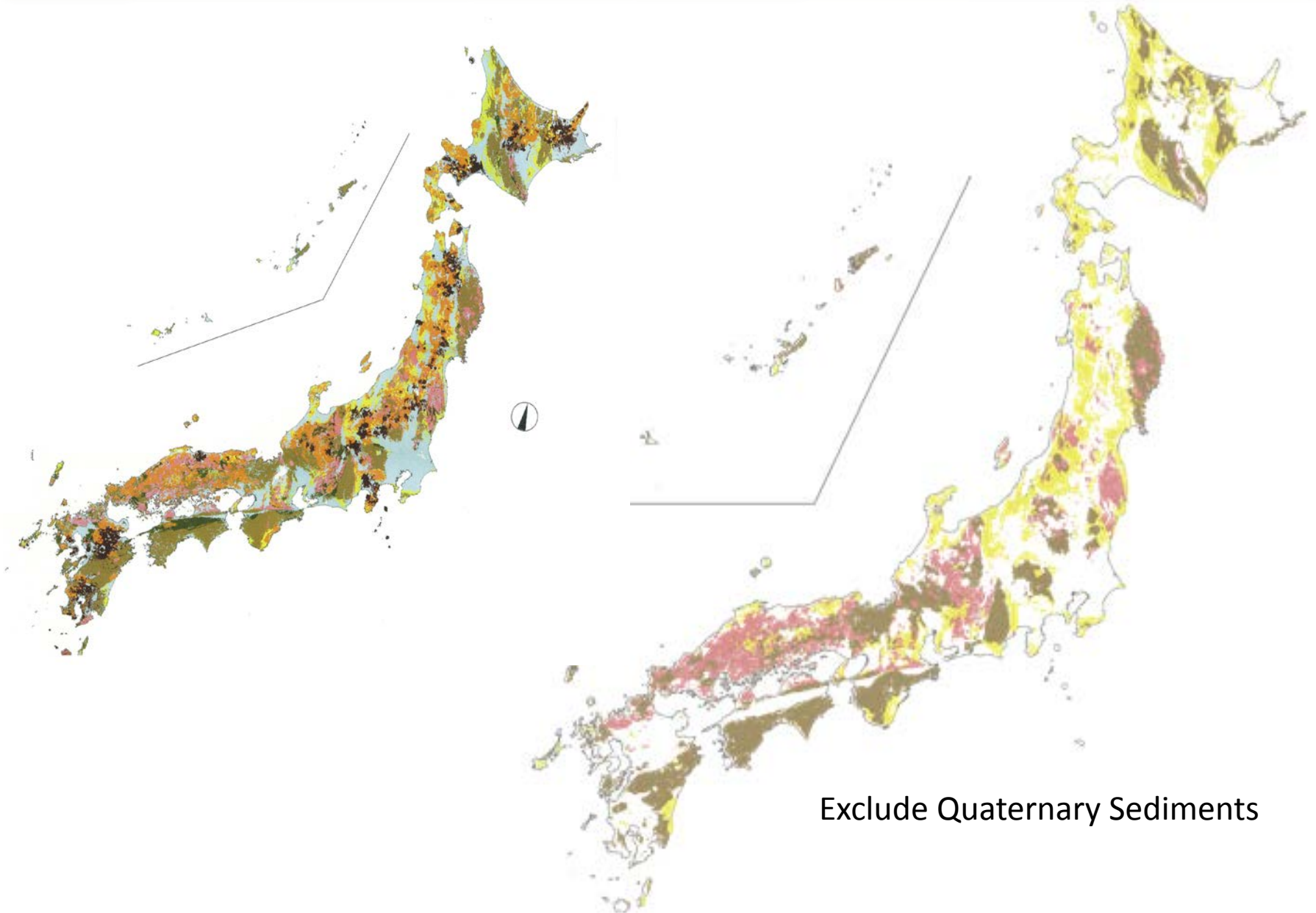
--- 火山フロント

付図2 日本列島の地質図
(20万分の1日本シームレス地質図(産総研, 2007)より新規作成)

付図3 日本列島の活断層図
(中田・今泉編(2002)を基に編集)

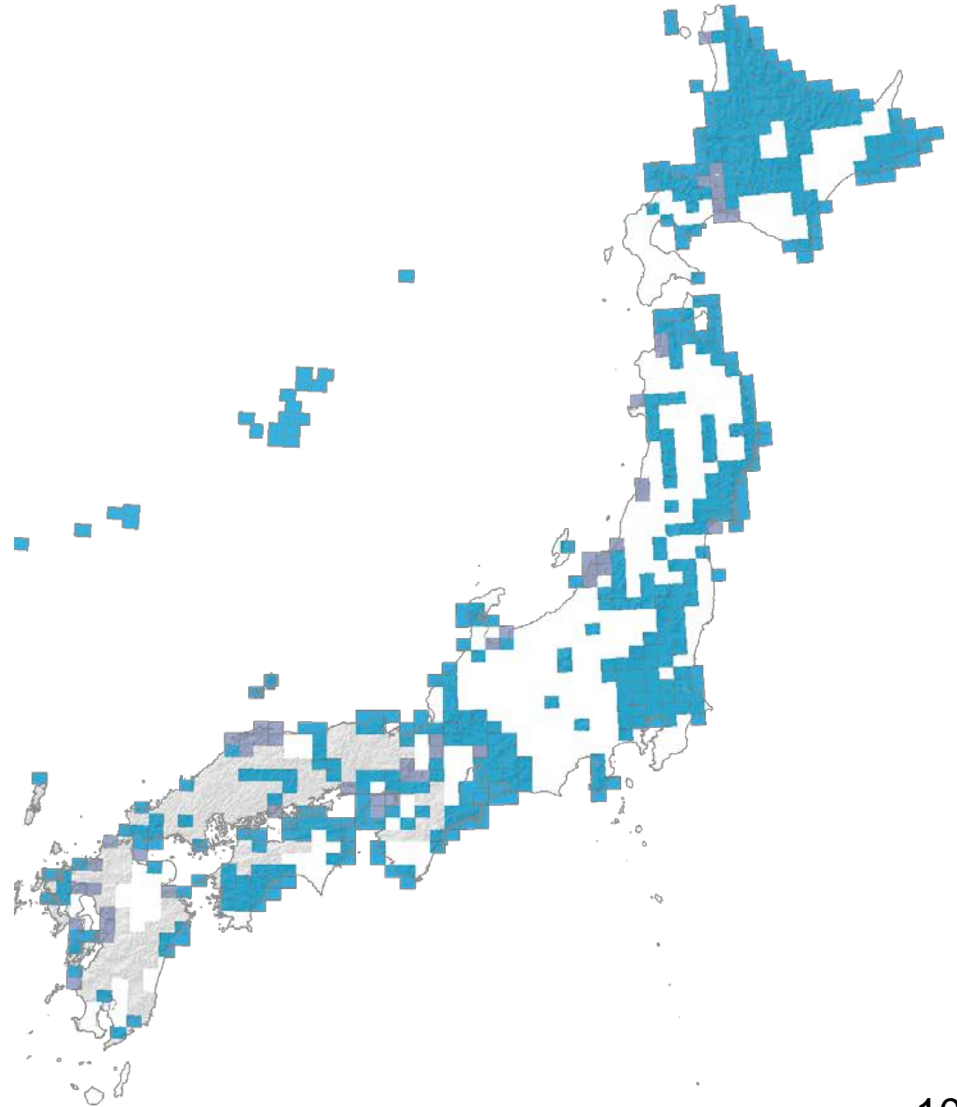
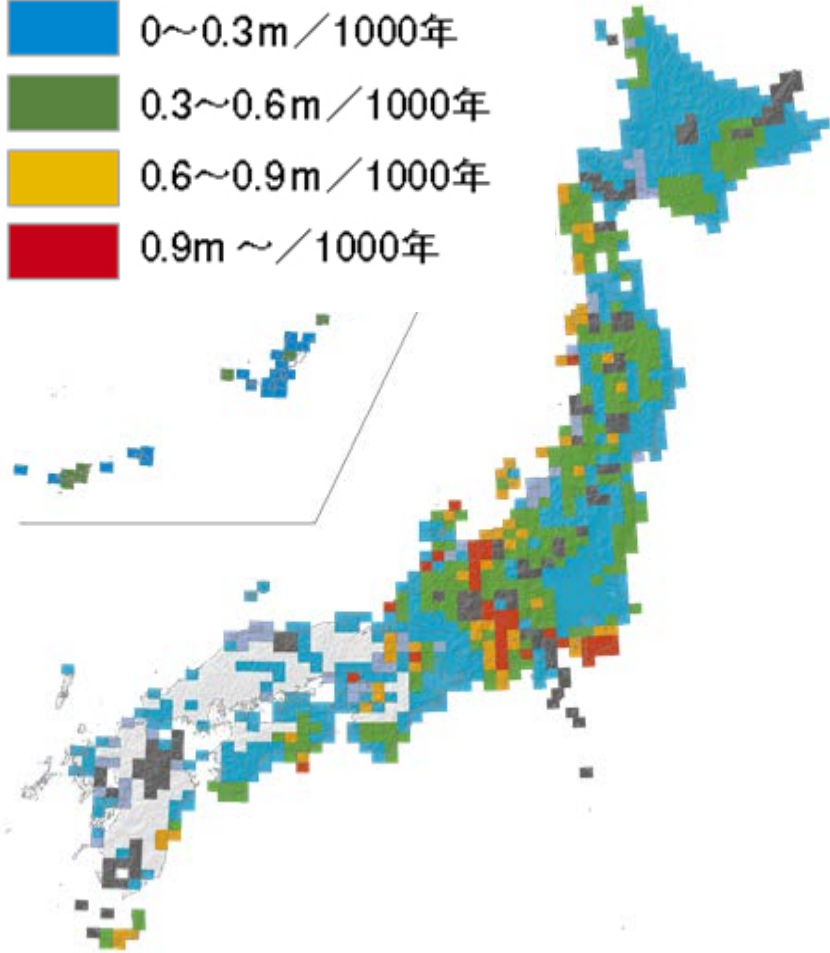
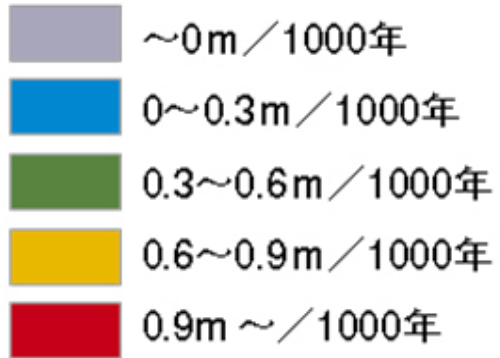
付図4 日本列島の地温勾配コンター図と活火山の分布
(第四紀火山カタログ委員会(1999), 矢野ほか(1999)を基に編集)

日本の地質

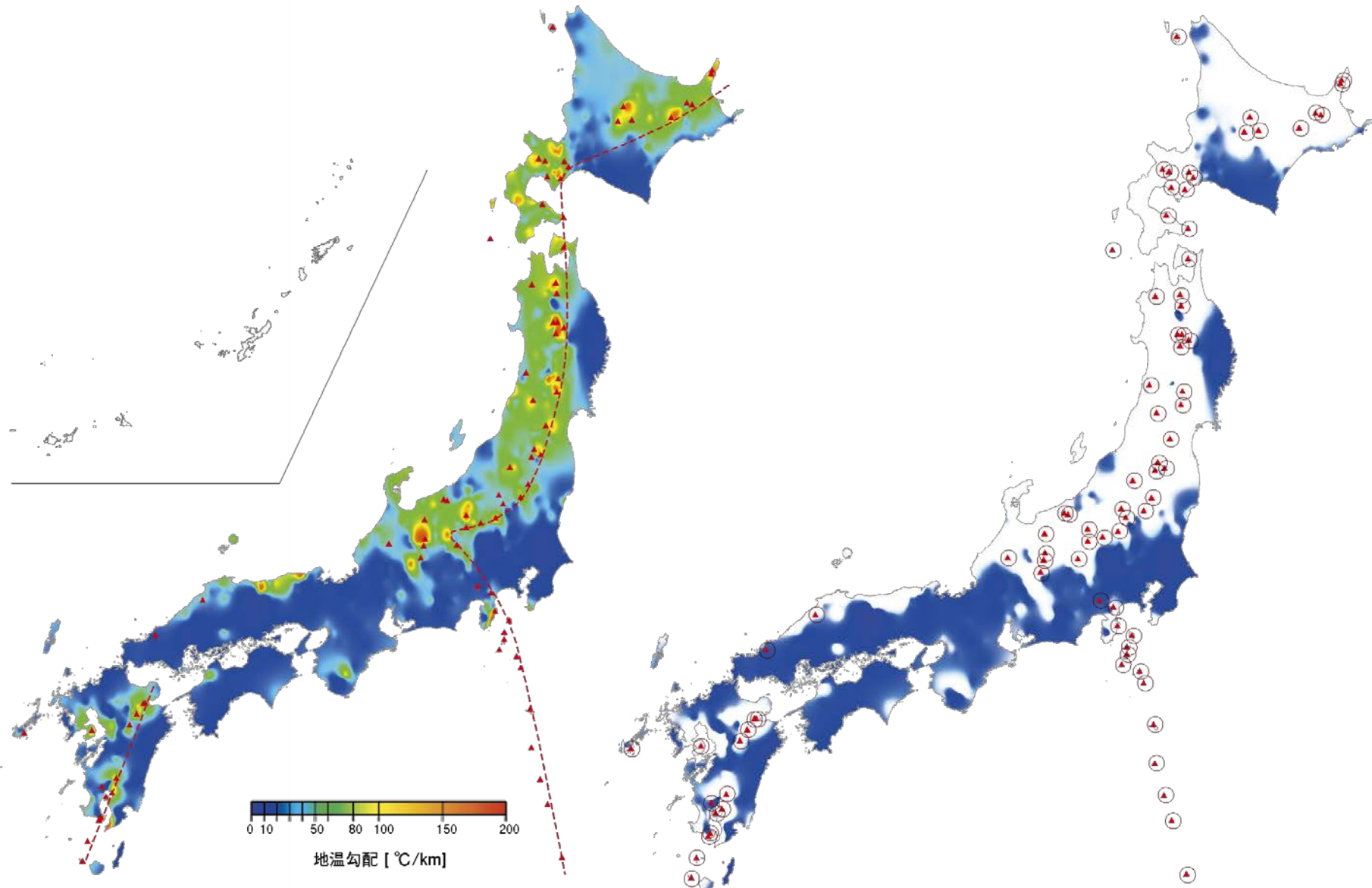


隆起沈降

■ Volcano

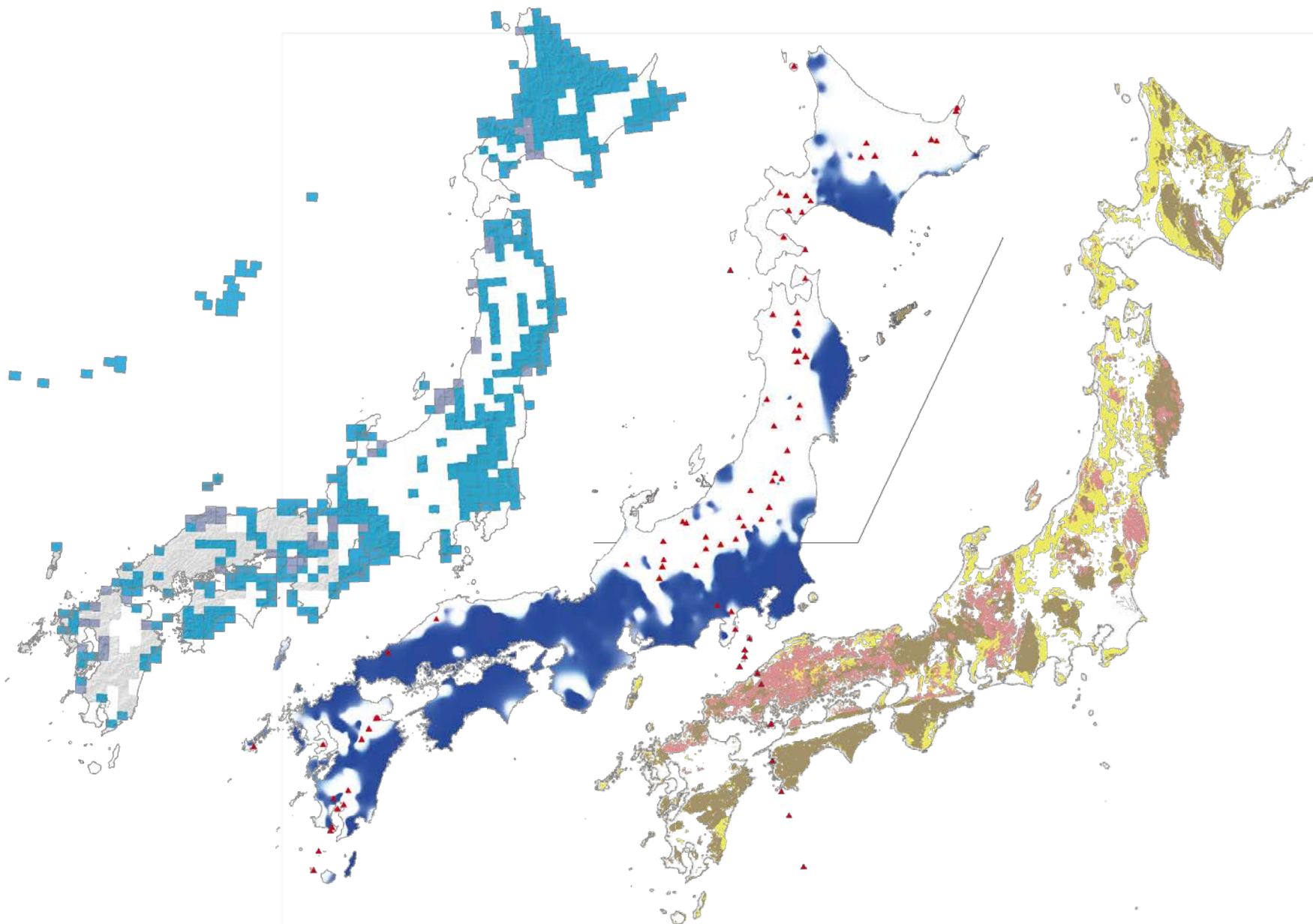


火山フロント & 地温勾配



地球科学的知見とコミュニケーションの重要性

(JAEAの来るべき段階における重要な役割の1つ)



地層処分における地下環境機能の理解について -今後の課題-

地層処分は、ガラス固化した高レベル放射性廃棄物を地下300m以深の物理的・化学的バリア地下環境の機能を活用し隔離・処分する方法。

⇒地下水を介して放射性元素が移動する可能性のある水みち(岩盤中の断層や割れ目など)の長期挙動(形成～シーリングまで)に関する知見の蓄積が不可欠。そのためには、自然現象に学びその知見をどう応用・活用するかが重要

断層近傍や岩盤内部の水みちの形成～シーリングプロセス等の知見・課題・応用

- ◆断層周辺割れ目と水理学的構造の特徴(阿寺断層と地下研究所の事例)
- ◆岩盤内部割れ目(水みち)の形成過程とその特徴(花崗岩と付加体)
- ◆炭酸塩鉱物による自然のシーリングプロセスとその応用

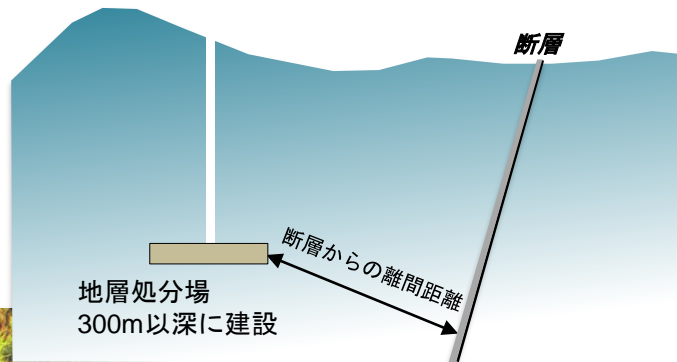
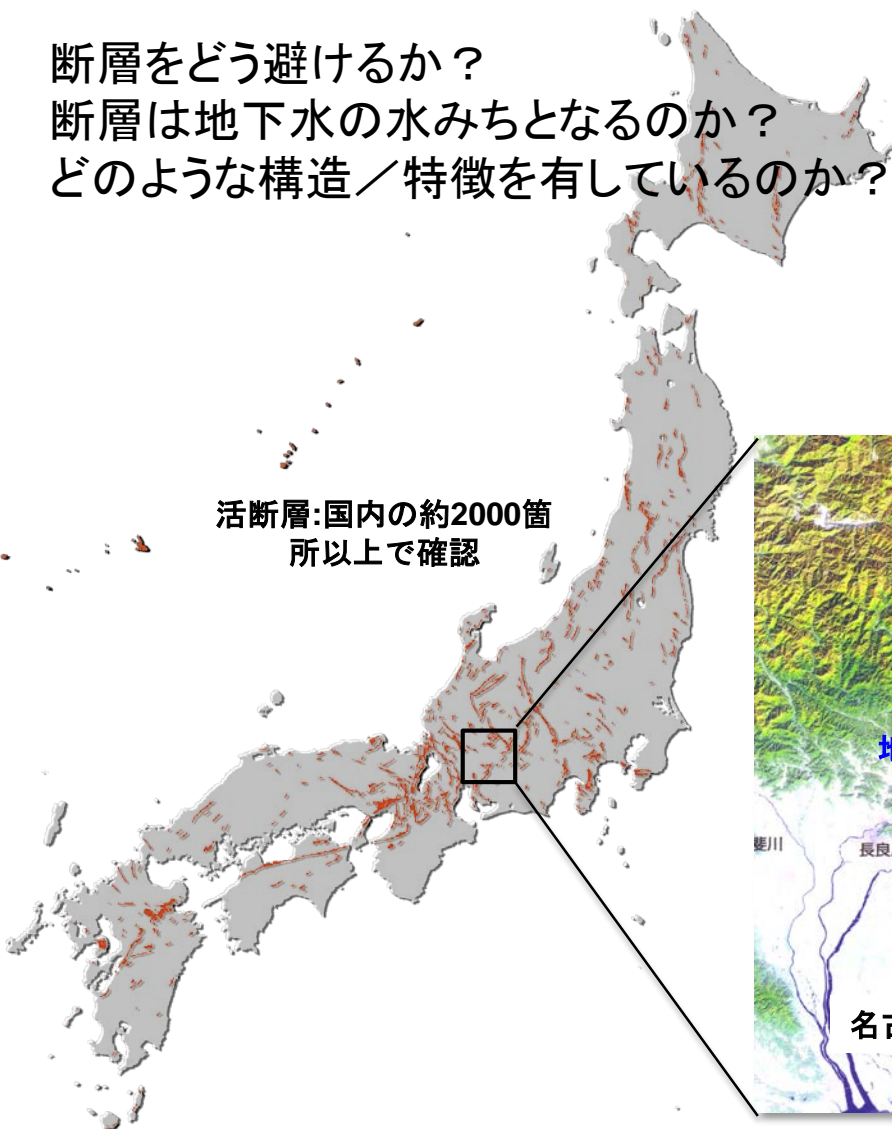
参考文献

- 1) Ishibashi et al. (2016) Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting: An example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan. *Eng. Geol.* 208, 114-127.
- 2) Ono et al. (2016) Use of fracture filling mineral assemblages for characterizing water rock interactions during exhumation of an accretionary complex. *Jour. Struc. Geol.* 87, 81-94.
- 3) Yoshida et al. (2013) Long-term stability of fracture systems and their behaviour as flow paths in uplifting granitic rocks from the Japanese orogenic field. 13, 45-55.
- 4) Yoshida et al. (2014) Geological characterisation of the active Atera Fault in central Japan: Implications for defining fault exclusion criteria in crystalline rocks around radioactive waste repositories. 177, 93-103.
- 5) Yoshida et al. (2015) Early post-mortem formation of carbonate concretions around tusk-shell over week-month timescales. *Scientific Reports* 5: 14123 doi:10.1038/srep14123.

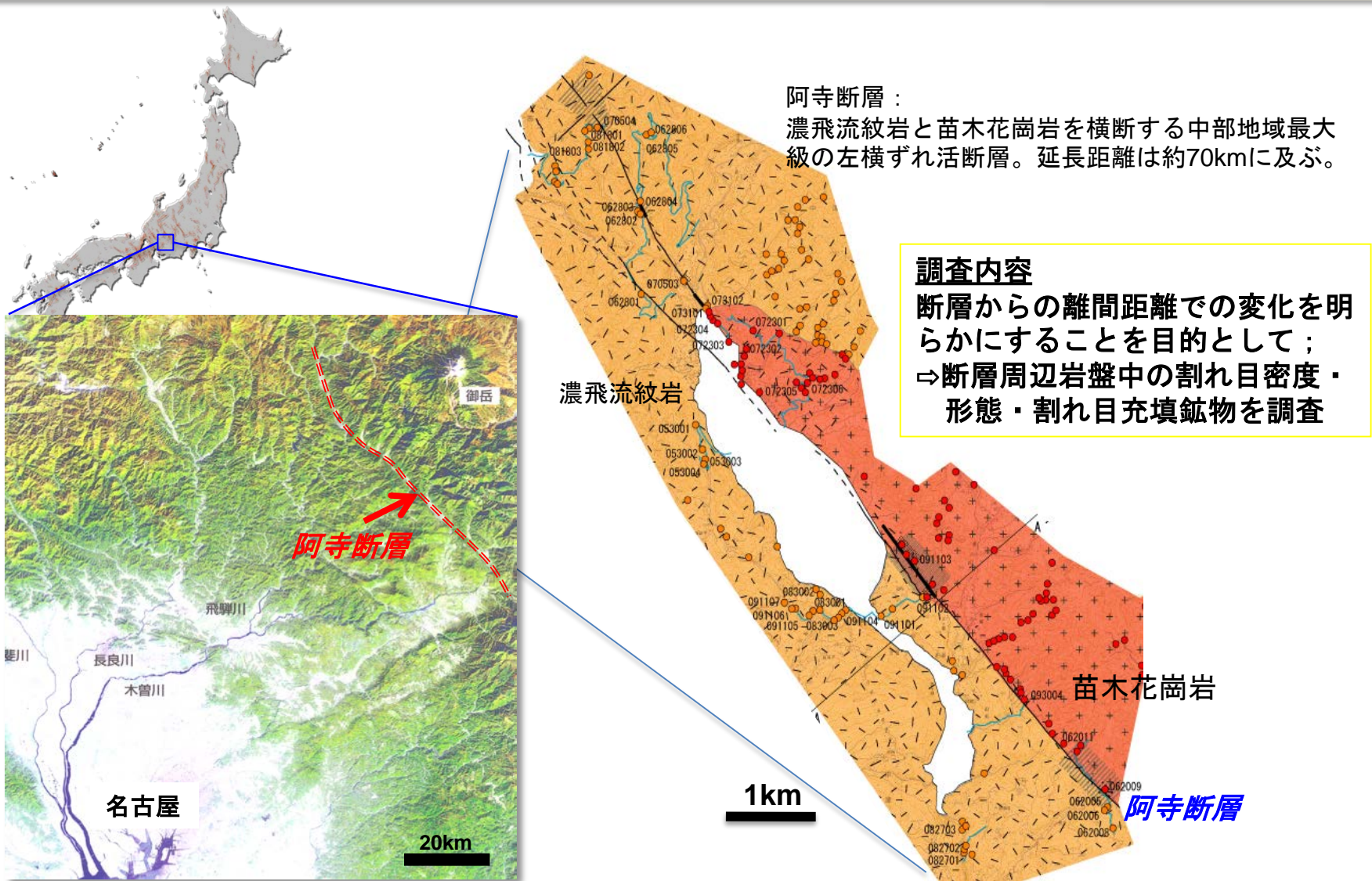
1) 断層周辺割れ目と水理学的構造の特徴

断層をどう避けるか？
断層は地下水の水みちとなるのか？
どのような構造／特徴を有しているのか？

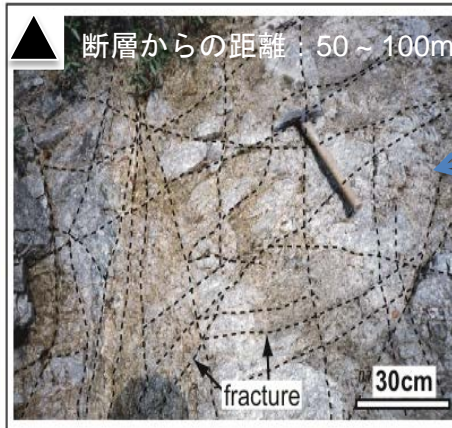
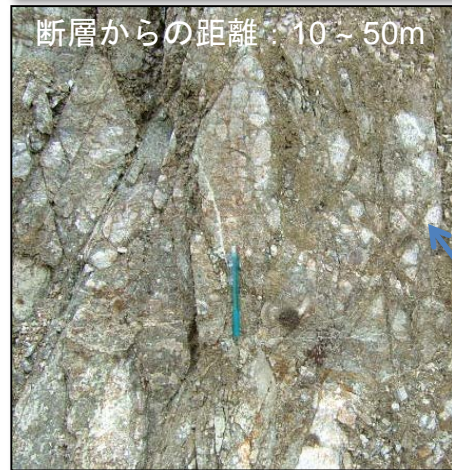
地層処分におけるサイト選定ならびにサイト特性調査において、断層の排除の仕方あるいは断層周辺に形成された割れ目（水みち）の調査手法と考え方を構築することが不可欠



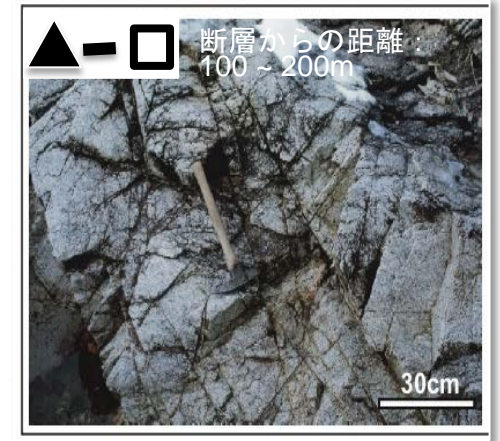
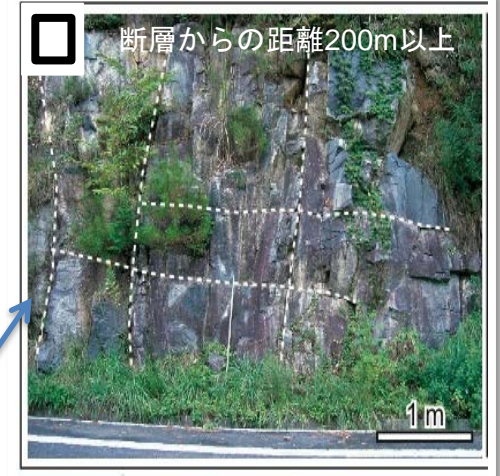
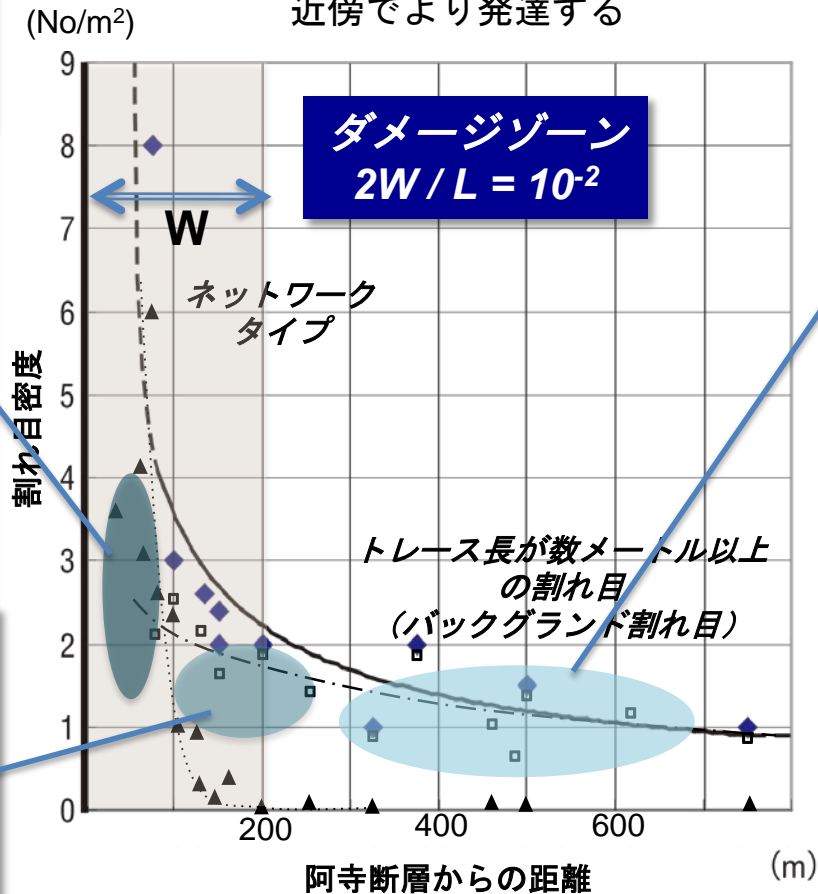
阿寺断層の運動に伴う周辺岩盤への影響 (割れ目形成とシーリング)



断層活動に伴う周辺岩盤中の割れ目形成とシーリング (割れ目密度変化)

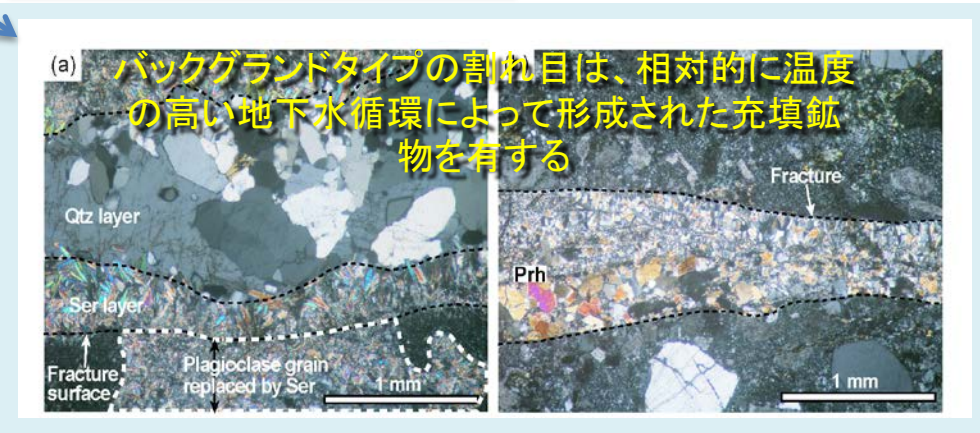
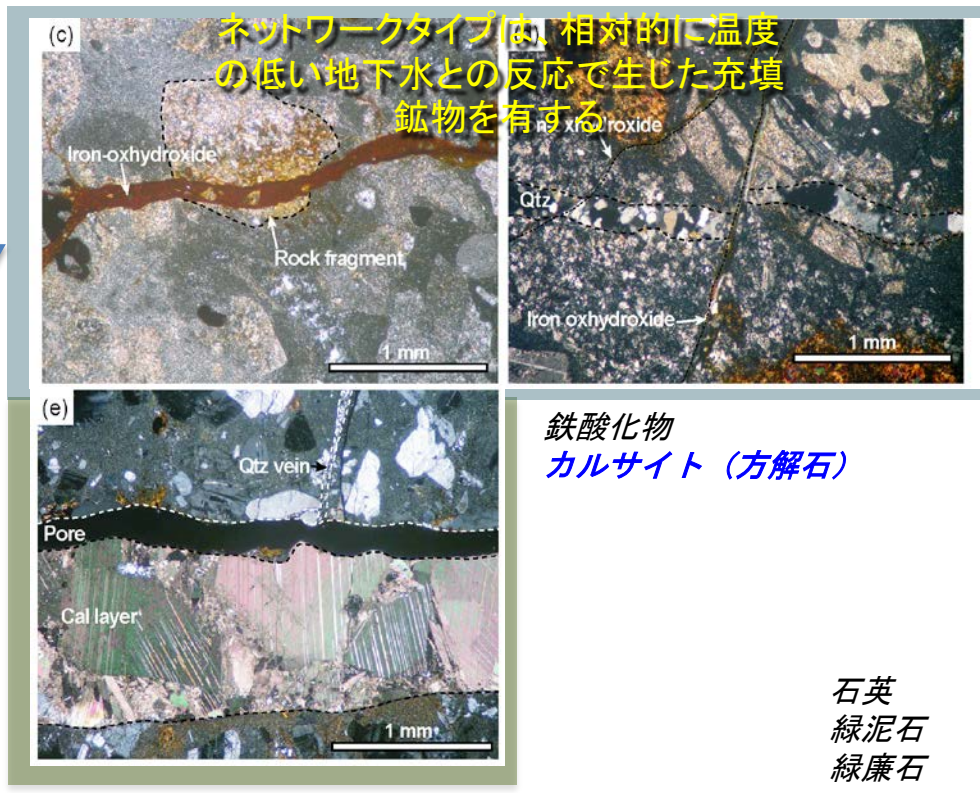
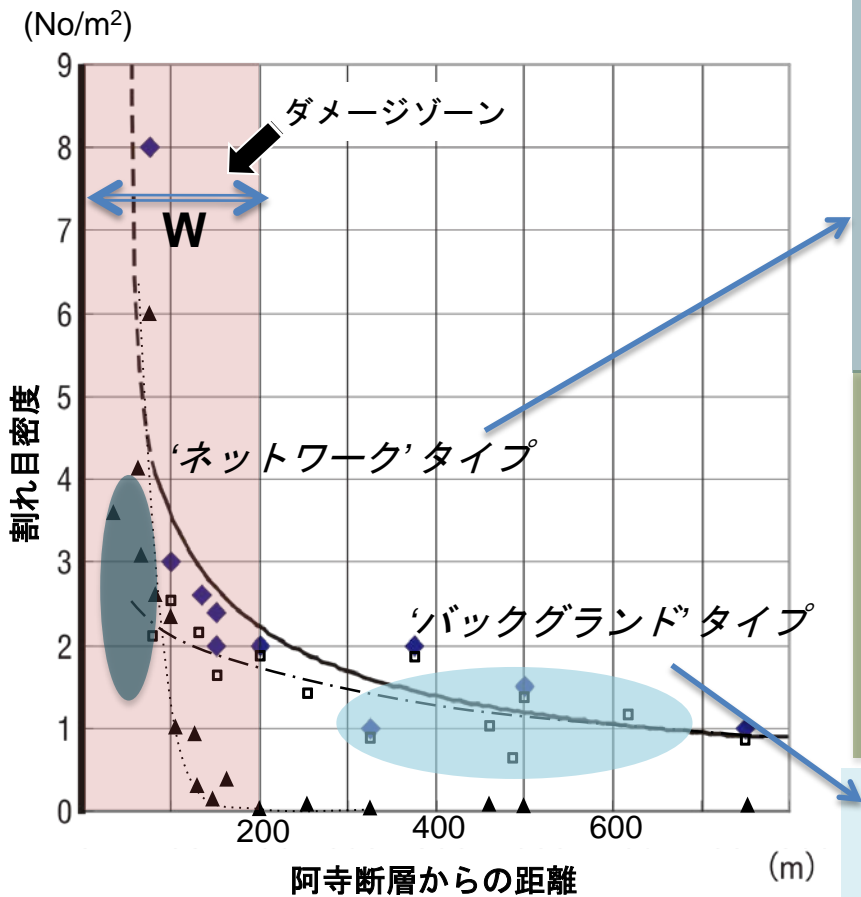


トレース長が数メートルより短い
割れ目 (ネットワーク状) が断層
近傍でより発達する



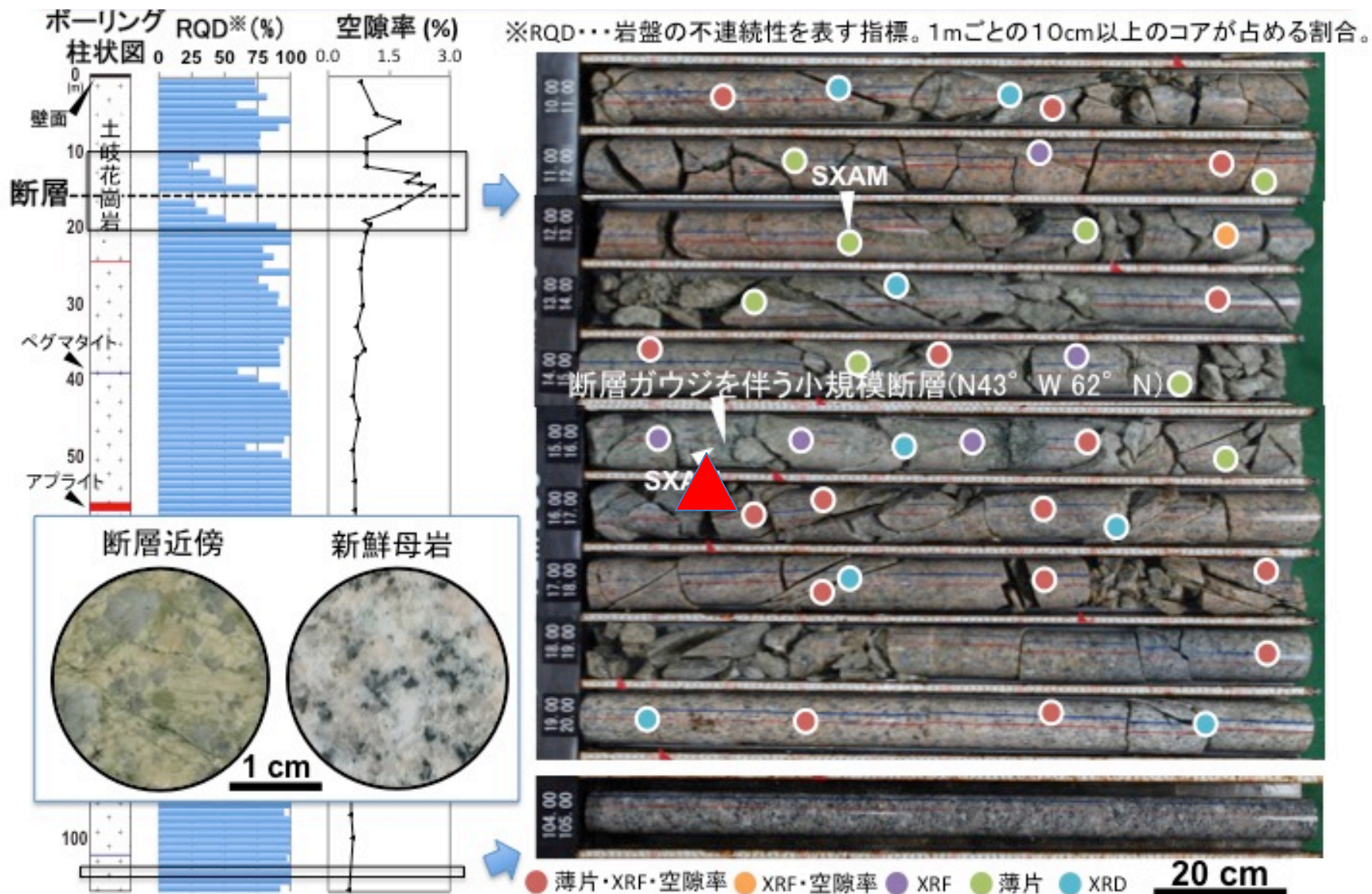
断層とダメージゾーンとの関係は ;
Vermilye and Sholz (1998)にも提示

断層活動に伴う周辺岩盤中の割れ目形成とシーリング (割れ目充填鉱物)

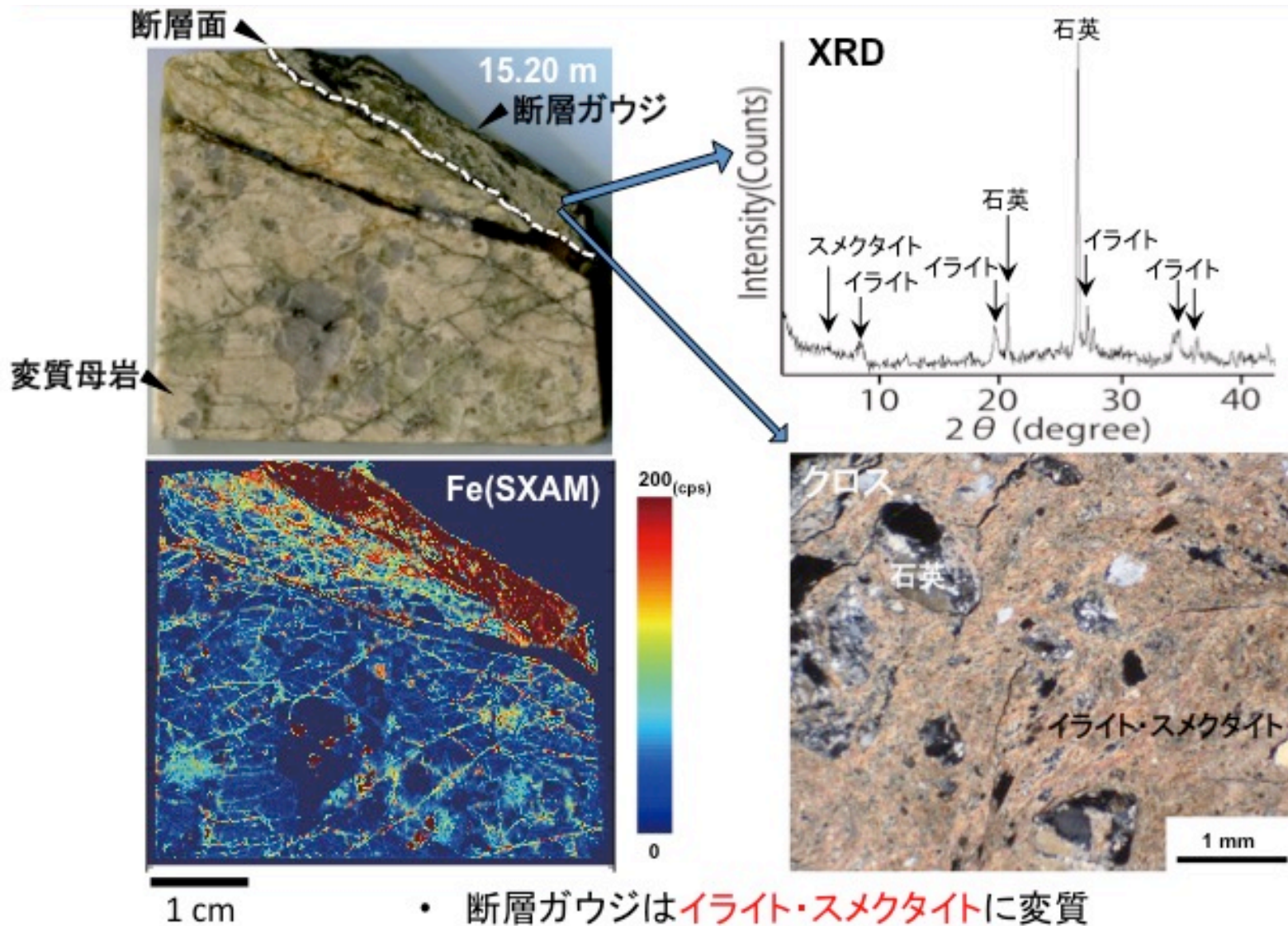


割れ目形態と充填鉱物との相関

断層活動に伴う周辺岩盤中の割れ目形成とシーリング (地下研究所の事例)

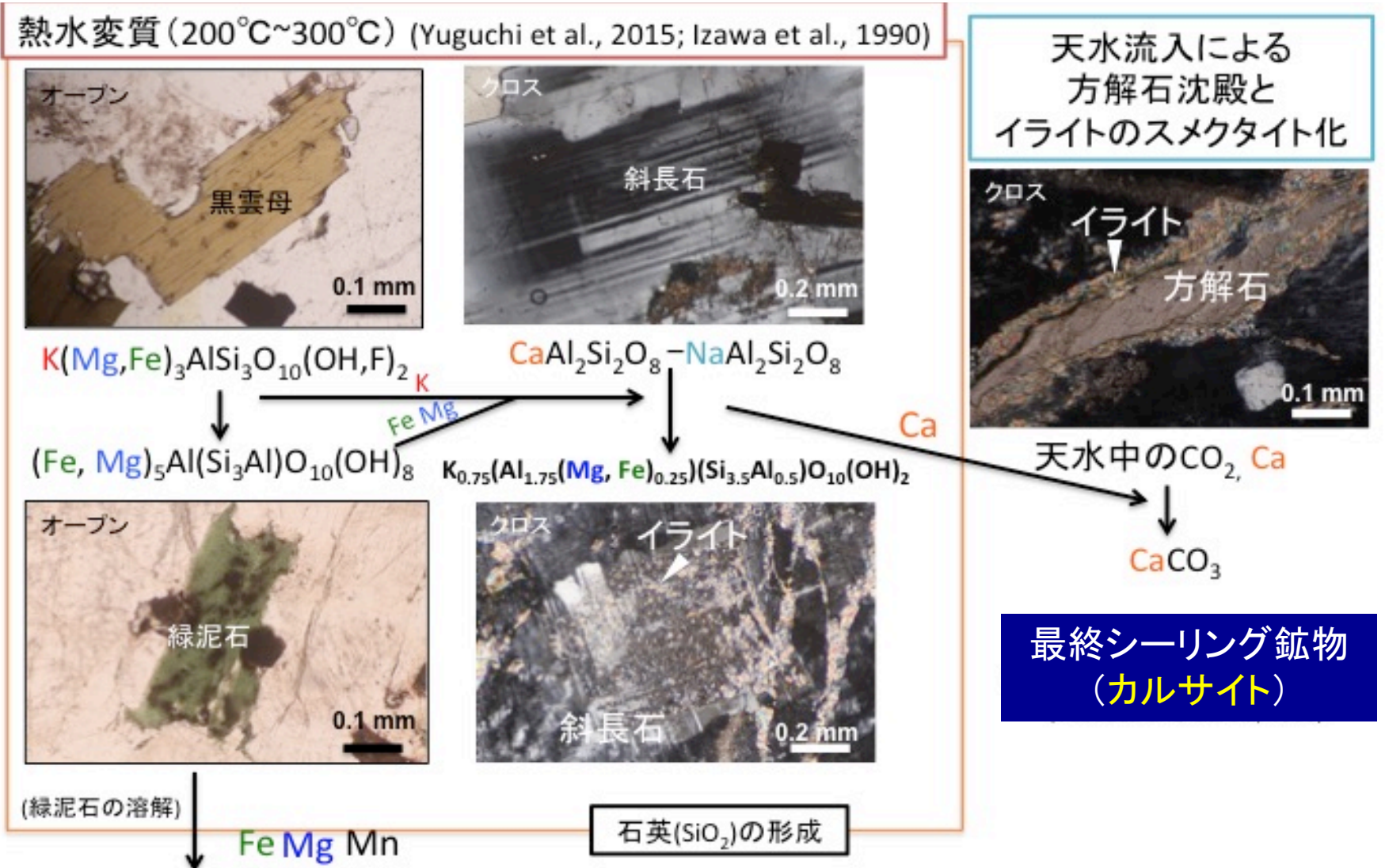


断層活動に伴う周辺岩盤中の割れ目形成とシーリング (断層ガウジ)



- 断層ガウジはイライト・スメクタイトに変質
- Feがイライト・スメクタイトに濃集

断層活動に伴う周辺岩盤中の割れ目形成とシーリング (断層中割れ目充填鉱物)

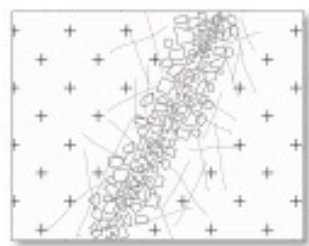


断層活動に伴う周辺岩盤中の割れ目形成とシーリング (充填鉱物形成プロセス)

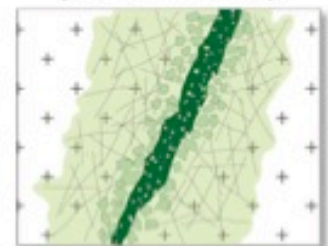
I 花崗岩の貫入・定置
(約70 Ma)
Shibata and Ishihara(1979)



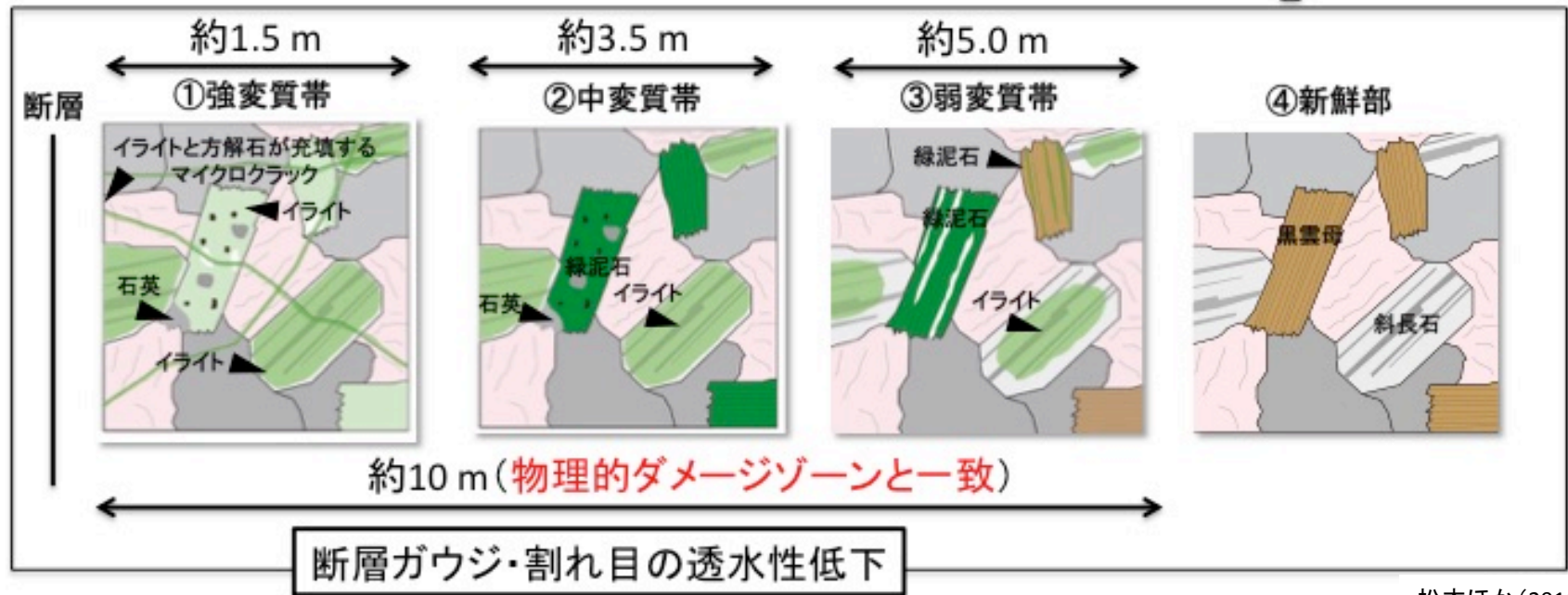
II 小規模断層と
その周辺割れ目の形成



III 熱水の浸透
(約20 Ma 以前)
(笹尾ほか, 2006)



IV 天水の流入

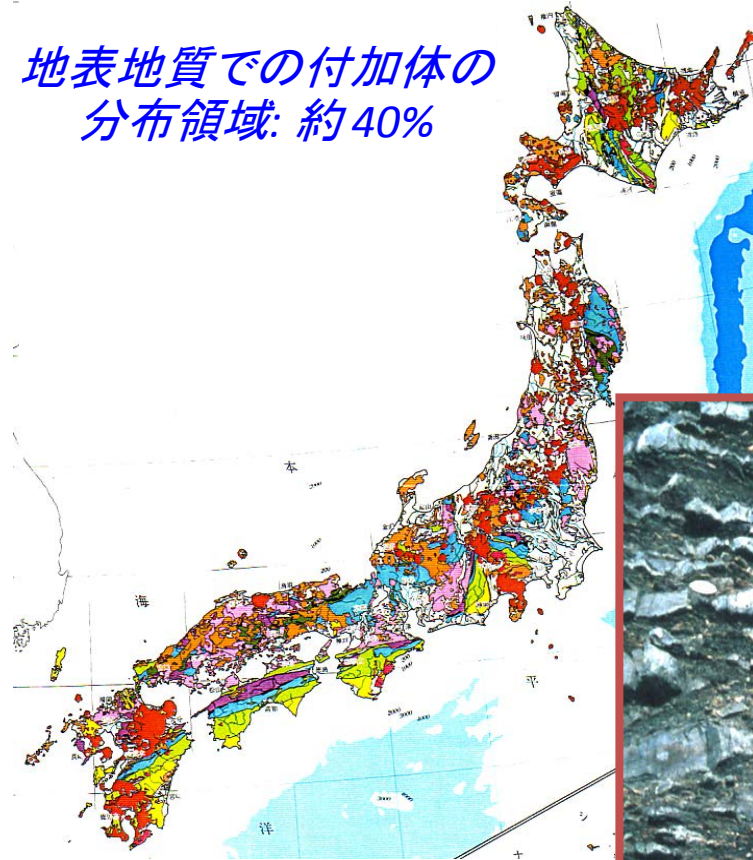


松本ほか(2016)

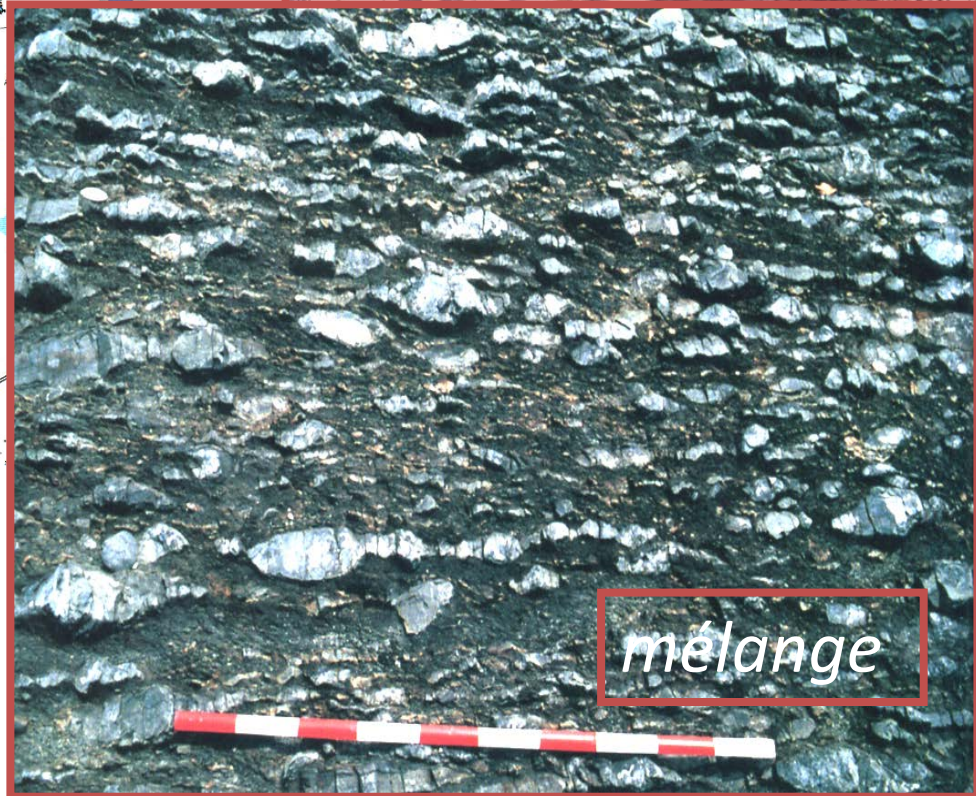
充填鉱物の種類および組み合わせによる形成履歴・シーリングプロセスの理解
(形成割れ目の約90%はシーリング)

2) 岩盤内部割れ目(水みち)の形成過程とその特徴(付加体)

地表地質での付加体の
分布領域: 約40%



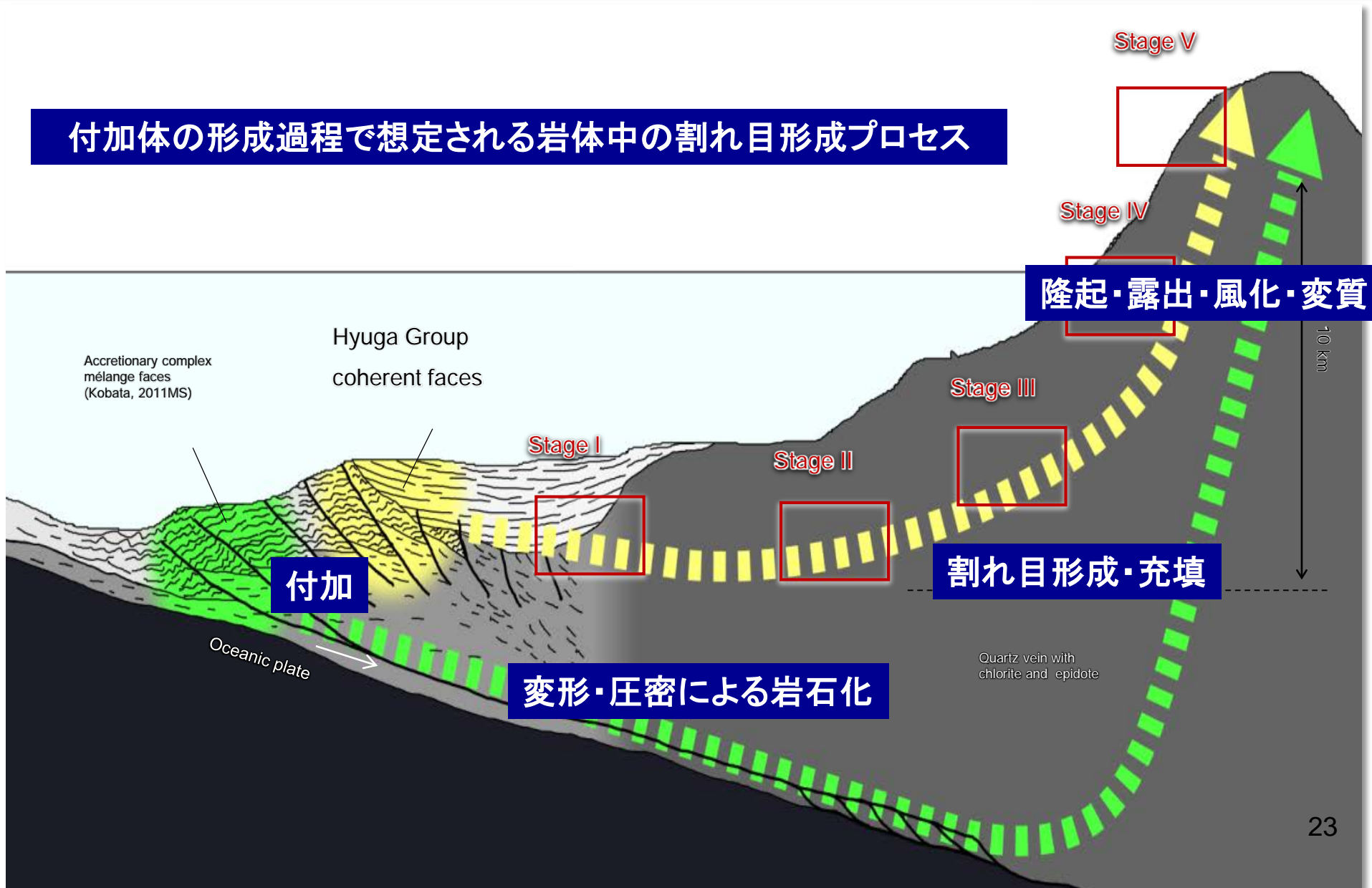
褶曲やスラストの形成



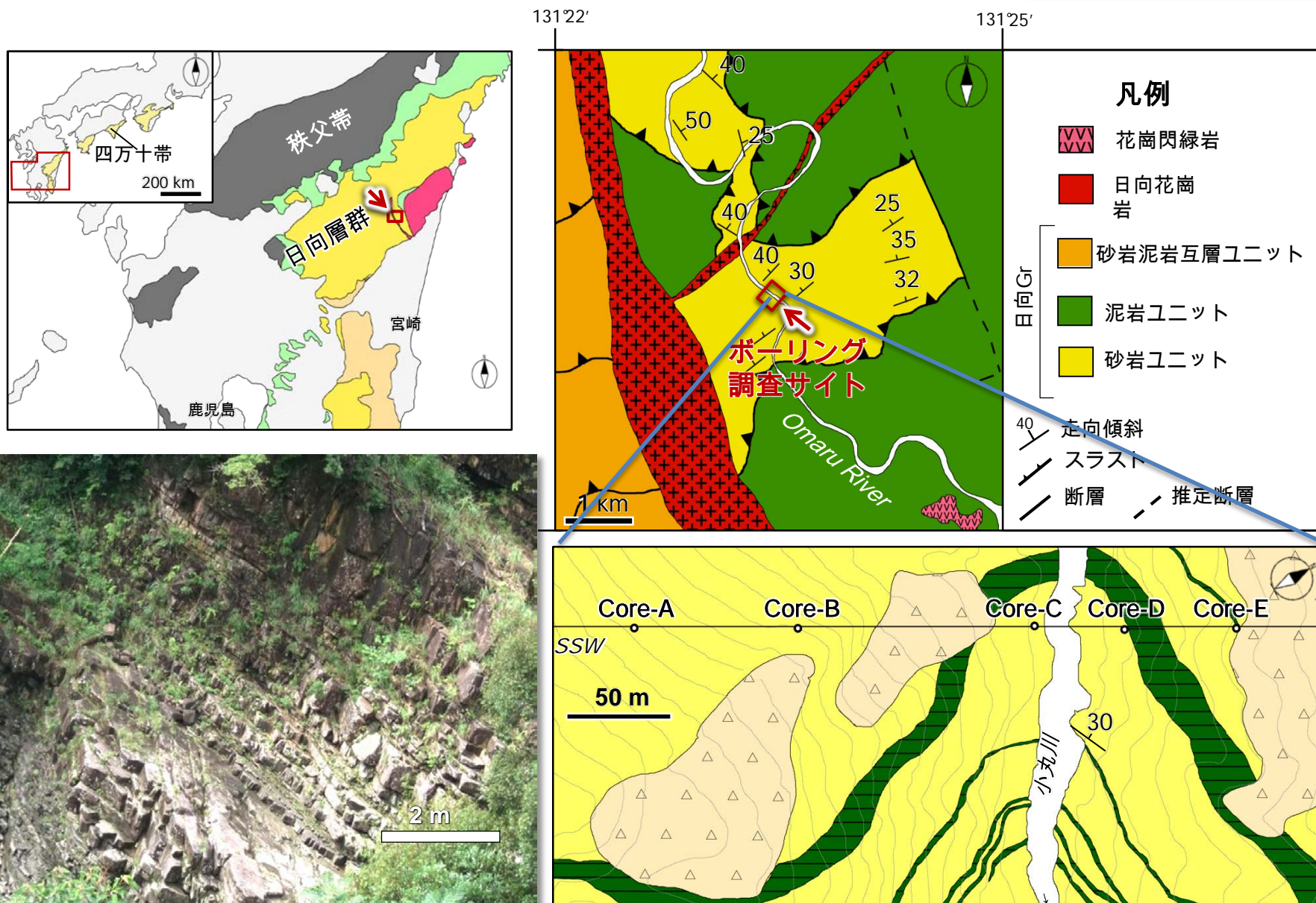
どういう割れ目(水みち)が、
いつ、どのように形成され
るのか？

付加体内部割れ目(水みち)の形成過程の概念

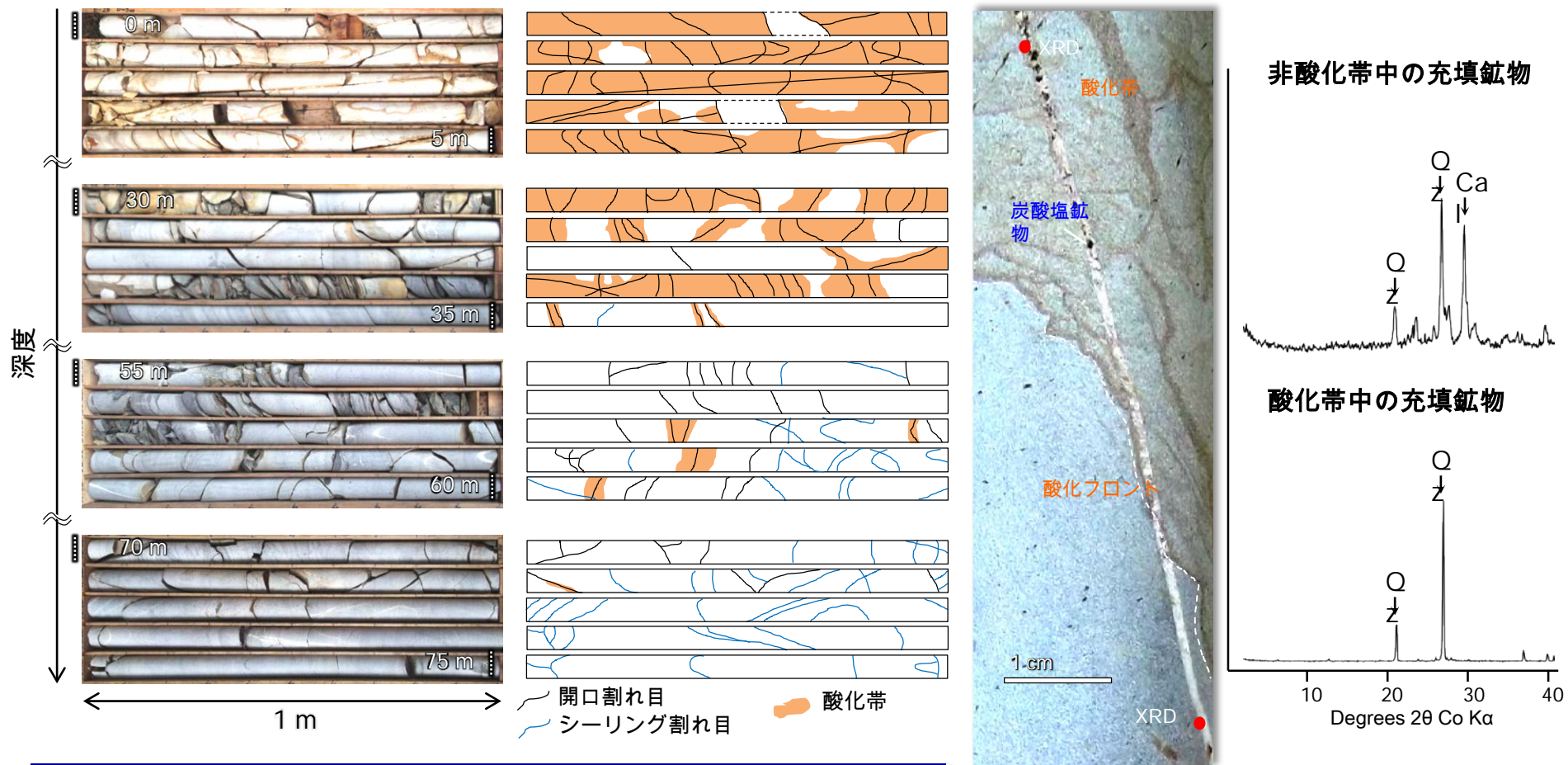
付加体の形成過程で想定される岩体中の割れ目形成プロセス



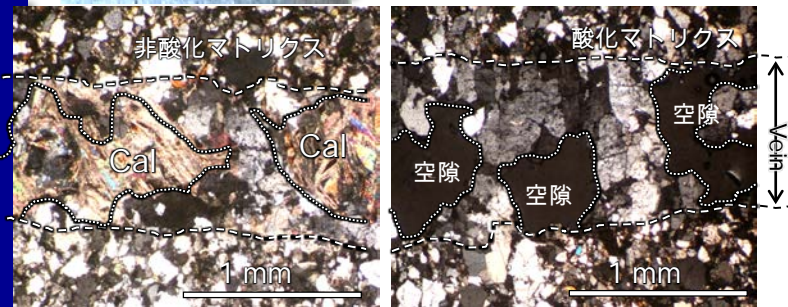
付加体内部割れ目(水みち)の形成過程とその特徴(四万十層群を事例に)



付加体内部割れ目(水みち)の形成過程とその特徴(ボーリングコア調査の結果)

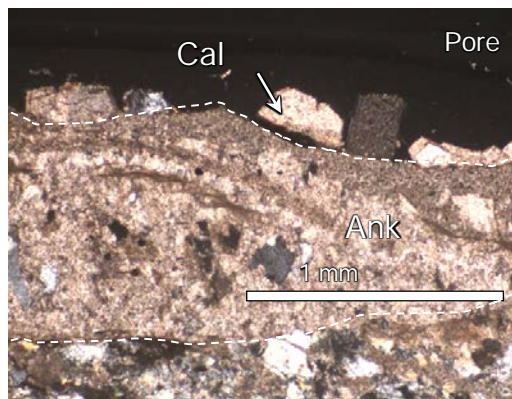
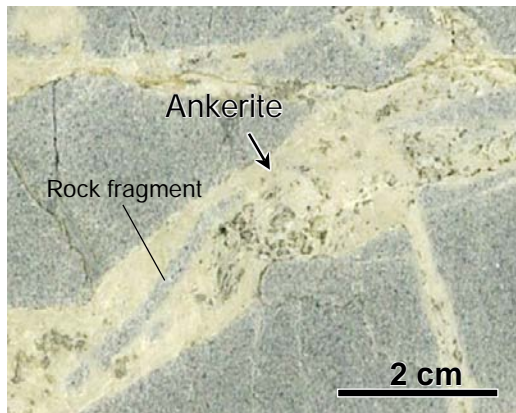
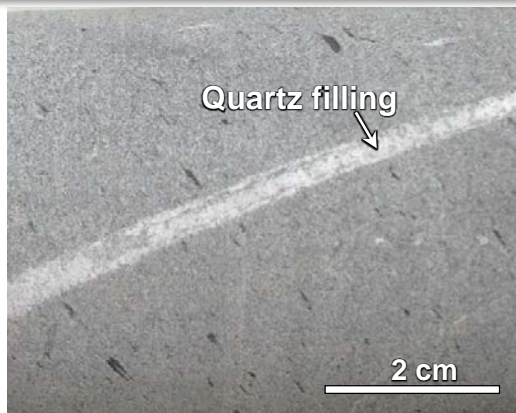


- ◆ コア回収率 (450m): 98%
- ◆ 総割れ目本数 = 3088 (in 450m)
(割れ目形態および充填鉱物の産状から、掘削に伴って形成されたと判断された割れ目 = 88)
- ◆ 酸化フロントの到達深度 ≒ 80m
- ◆ 酸化帯中での開口割れ目の割合 = 98%
- ◆ 非酸化帯中での開口割れ目の割合 = 9%

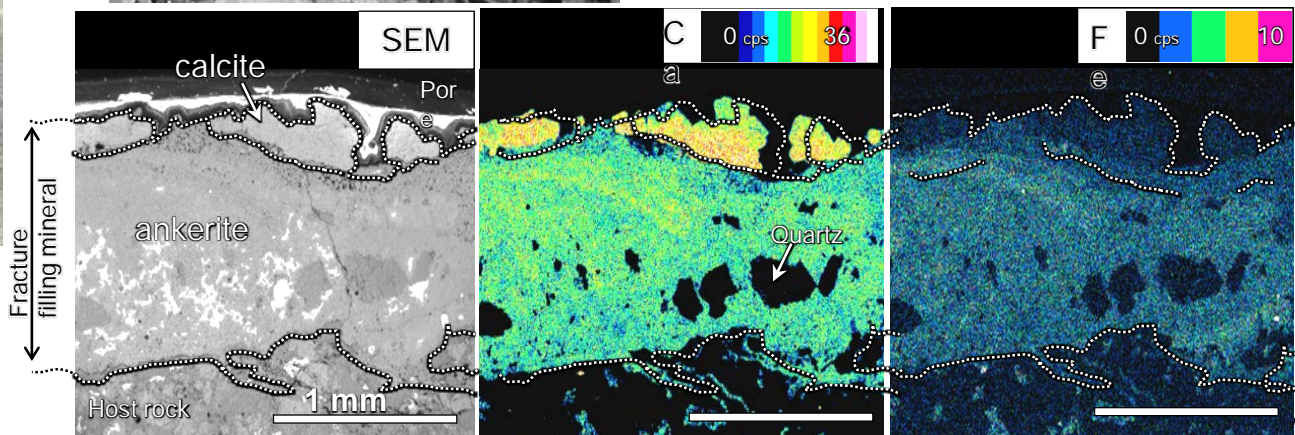
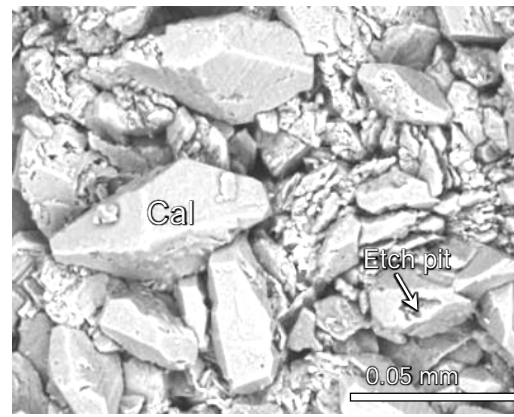
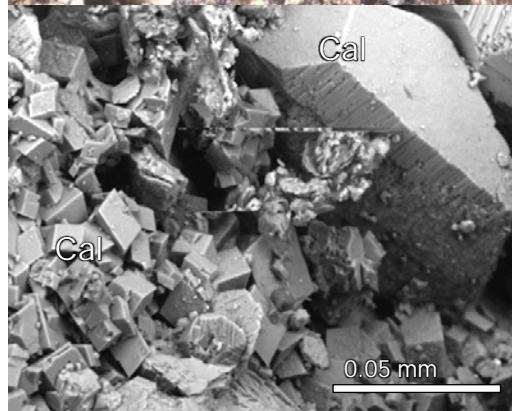


付加体内部割れ目(水みち)の形成過程とその特徴(シーリング鉱物)

熱水循環によって形成されたと考えられる充填鉱物(シーリング)

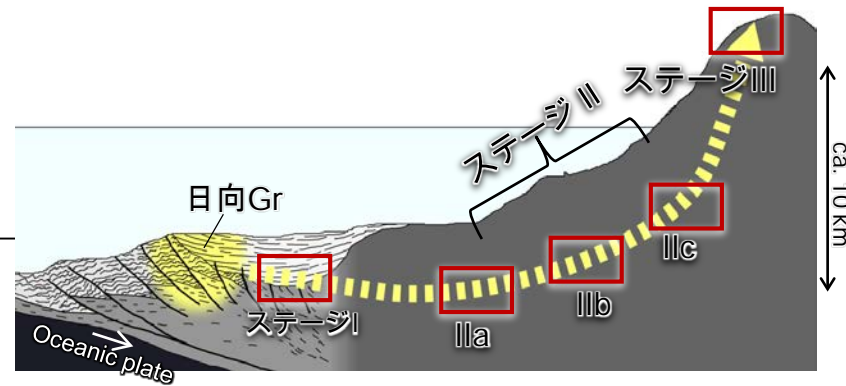
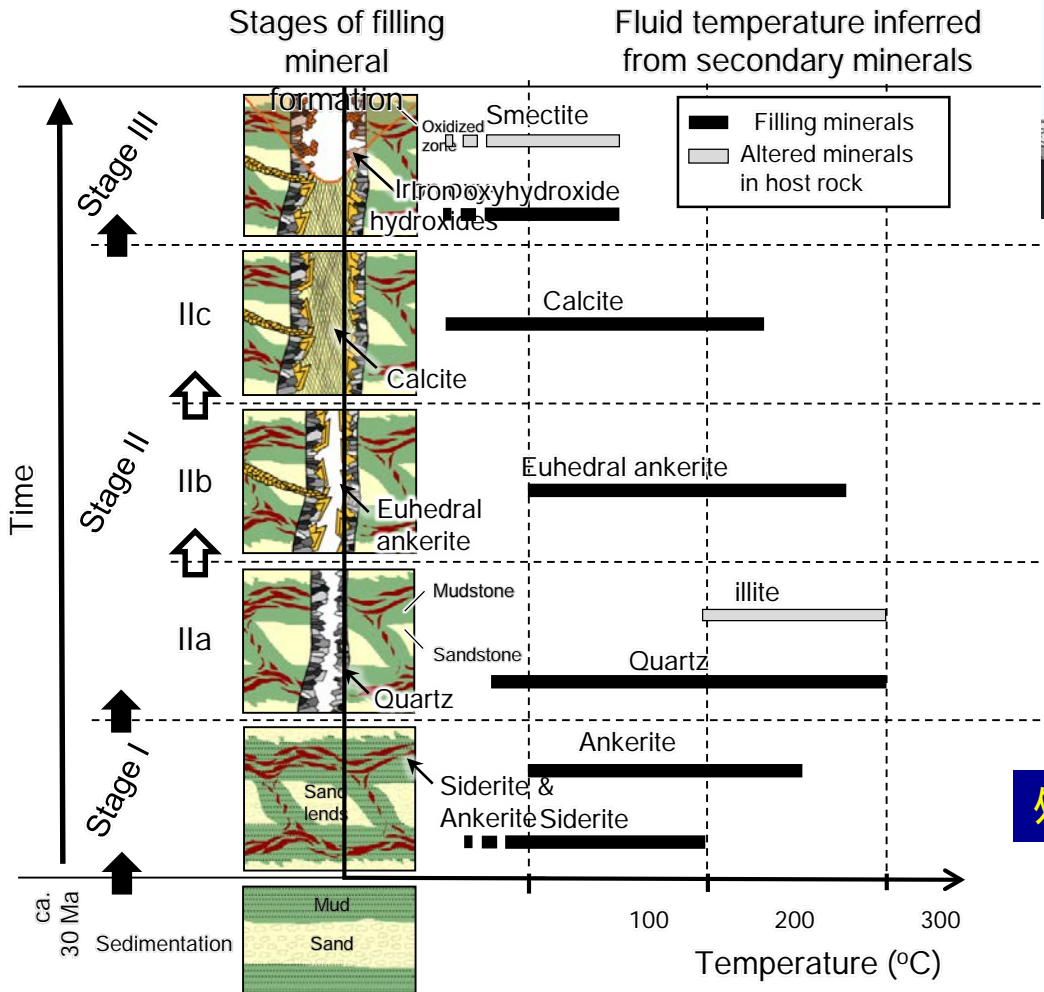


最後のステージで地下水の循環によって形成される充填鉱物
⇒ 方解石(カルサイト)



付加帯内部割れ目(水みち)の形成過程とその特徴

付加～圧密～変形・破壊・割れ目形成～充填～
隆起～風化・変質過程における「水みちの形成」
とシーリングプロセス



割れ目形成と充填鉱物の段階的形成による「水みち」の形成条件・シーリング条件を把握することが可能。とくに、カルサイトのシーリングプロセスは重要

カルサイトの割れ目充填によって、地表からの酸性地下水の流入が干渉され、地表からの影響を抑制する働きが認められる

処分場の地表からの影響深度の把握が可能

地層処分における地下環境機能 -自然に学ぶ現象と応用 (まとめ) -

地層処分は、ガラス固化した高レベル放射性廃棄物を地下300m以深の物理的・化学的バリア地下環境の機能を活用し隔離・処分する方法。

⇒地下水を介して放射性元素が移動する可能性のある水みち(岩盤中の断層や割れ目など)の長期挙動(形成～シーリングまで)に関する知見の蓄積が不可欠。そのためには、自然現象に学びその知見をどう応用・活用するかが重要

- ◆断層をどう避けるかの要件は?(取り込むか)...サイト研究のできるJAEAの重要な役割
- ◆バリア機能の長期的健全性(何で担保するか?)
- ◆水みちの理解(断層と割れ目帯...概念モデルの信頼性の担保)
- ◆水みちと人工バリアとの相互反応
- ◆より現実的な日本の地下環境の状態の提示が必須

変動体Host rocksにおける現実的な移行経路階層モデルの提示
(信頼される safety case の提示)

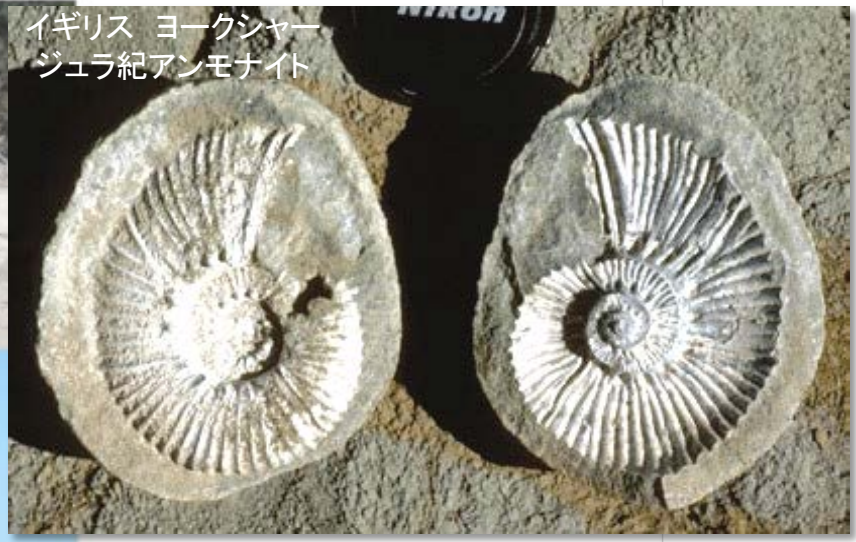
さらに、自然状態／機能を活用したプロセスの活用
⇒炭酸塩鉱物による自然のシーリングプロセスとその応用
(超長期の隔離機能は最終的には自然環境に頼らざるを得ない)

3) 炭酸塩鉱物(方解石)による自然のシーリングプロセスとその応用(最近の目論み)



NZ:Boulders
ニュージーランド
モレアキ・ボルダー

イギリス ヨークシャー
ジュラ紀アンモナイト



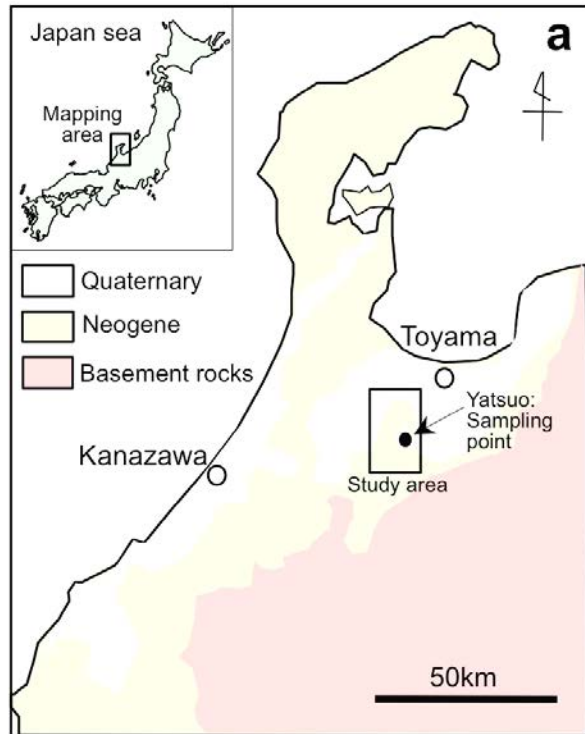
- 産状にみる基本的なコンクリーションについての疑問**
- ◆何故、球状なのか？
 - ◆何故、カルシウムは濃集するのか？
 - ◆何故、コンクリーションの境界はシャープなのか？
 - ◆何故、コンクリーション中の化石は保存がいいのか？
 - ◆何故、コンクリーション中の化石はほぼ中心にあるのか？

◆どれくらいの時間で形成されるのか？ etc



**化石溶解説、メタン発酵説、微生物反応説、
単純拡散モデル etc**

ツノガイ球状コンクリーション(これまでの予測を超える形成速度)



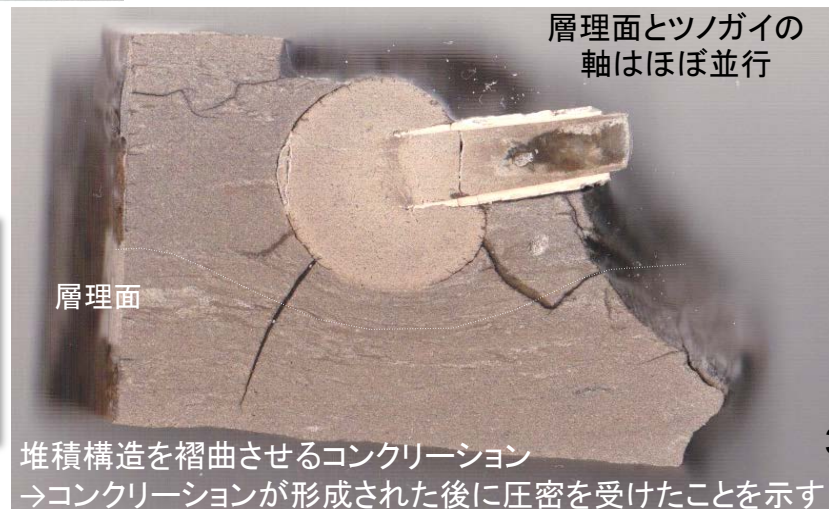
富山県八尾地域

八尾層群: 東別所層(約16Ma)

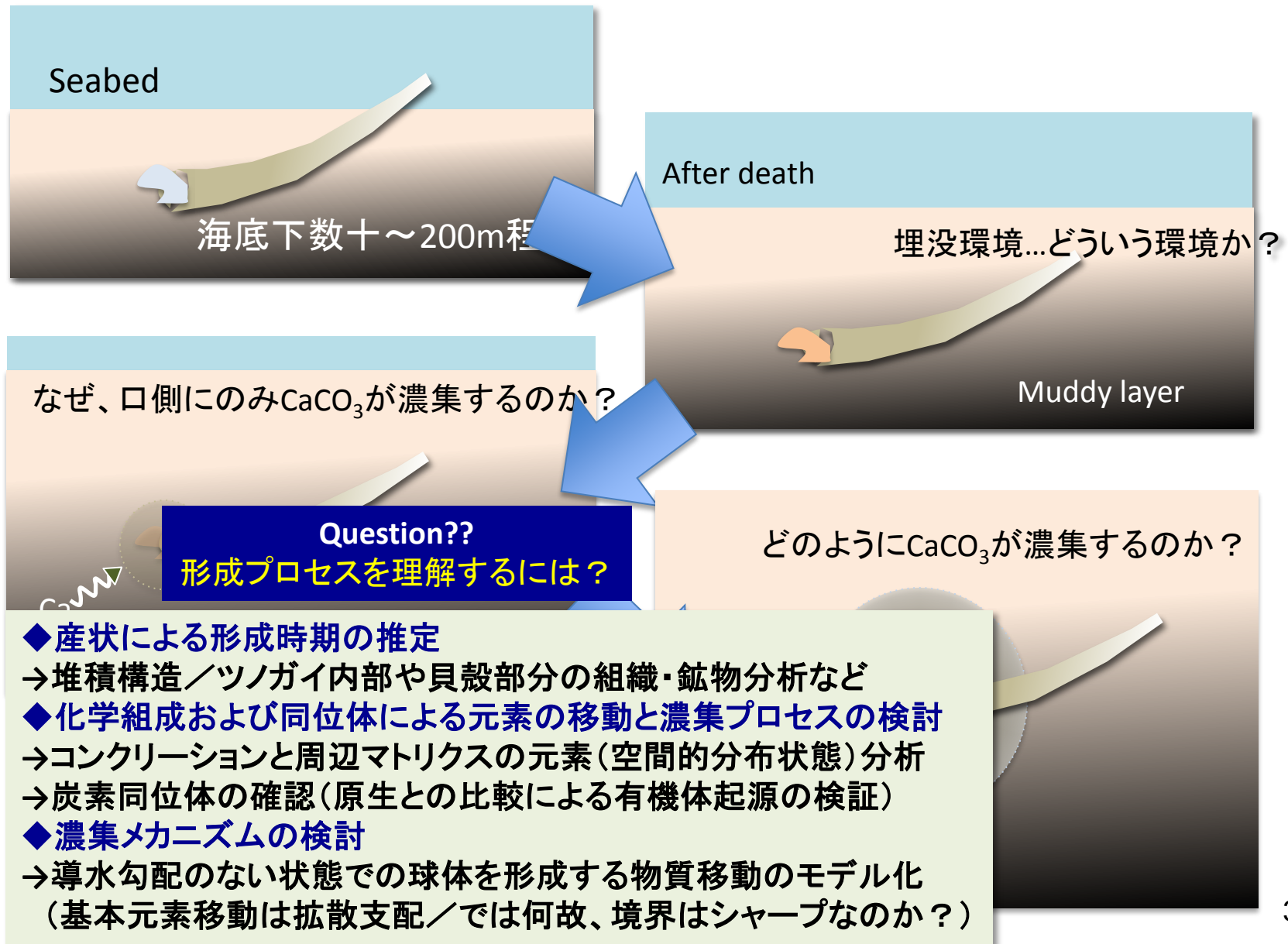
(花粉等を用いた年代、環境の検討はあれているが、
コンクリーションそのものについての研究は無し)

産状の特徴

- ◆ほぼ球形; $\phi = 1.6 \sim 2.8\text{cm}$ (30試料測定)
- ◆必ずMouth(口)側に形成される
- ◆コンクリーションの中心付近にMouthが位置する



堆積構造を褶曲させるコンクリーション
→コンクリーションが形成された後に圧密を受けたことを示す



ツノガイ球状コンクリーションの化学成分から見る形成条件

主要成分分析結果

	01	02	03	04	05	06	07	08
	Concretion					Matrix		
SiO ₂	28.79	34.03	31.64	28.05	33.83	62.54	62.14	60.43
TiO ₂	0.25	0.32	0.29	0.24	0.32	0.92	0.90	0.90
Al ₂ O ₃	6.68	8.15	7.43	6.46	8.08	17.79	17.51	17.14
Fe ₂ O ₃	2.21	2.55	2.48	2.15	2.49	6.90	7.36	6.95
MnO	0.63	0.42	0.43	0.69	0.44	0.03	0.03	0.03
MgO	2.93	3.01	3.08	2.85	2.98	2.43	2.42	2.34
CaO	51.67	45.71	48.34	52.12	46.01	3.99	3.84	4.04
Na ₂ O	0.70	0.90	0.81	0.69	0.90	1.86	1.92	1.95
K ₂ O	0.67	0.89	0.80	0.64	0.89	1.79	1.78	1.75
P ₂ O ₅	2.39	1.08	1.15	2.96	1.07	0.13	0.13	0.13
Total(wt%)	96.91	97.07	96.45	96.84	97.00	98.38	98.03	95.65
lg.Loss (wt%)	32.34	30.63	31.51	32.62	30.52	12.12	12.30	12.05

← コンクリーション → 周辺マトリクス

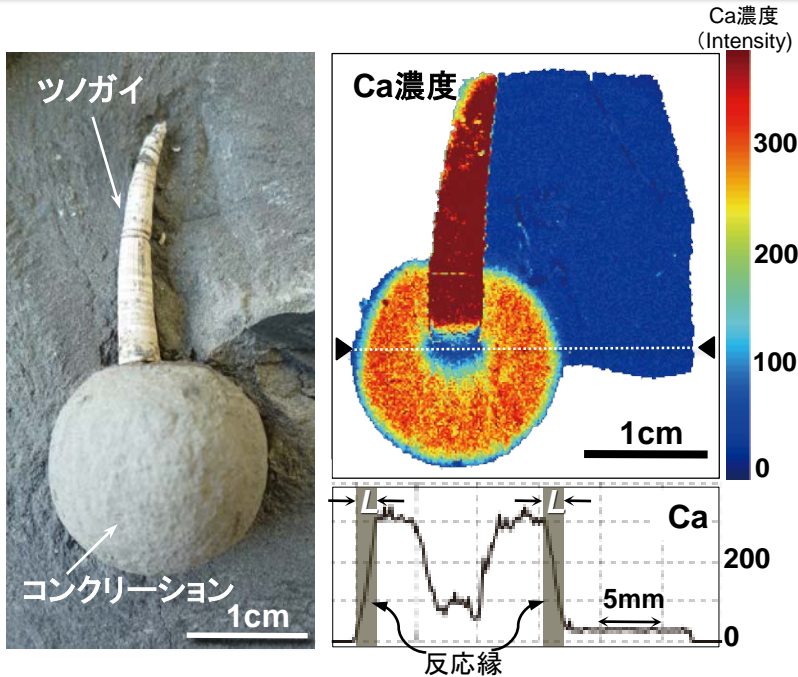
同位体分析結果

	C (μg)	δ ¹³ C vs PDB (‰)
Fossil (see text Figure 1)		
concretion	1	32.5 (7.20%) -19.2
	2	36.4 (7.87%) -19.1
	3	50.6 (8.36%) -18.3
	4	30.6 (6.07%) -15.9
	5	30.7 (7.54%) -18.7
	6	45.0 (8.86%) -19.0
	7	27.5 (6.20%) -17.6
matrix	8	10.8 (0.01%) -6.35
	9	7.2 (0.01%) -7.58
	10	9.9 (0.01%) -8.29
tusk-shell	11	83.0 (12.5%) +1.13
	12	63.0 (13.6%) +1.46
	13	62.0 (12.2%) +1.64
Living tusk-shell		
shell	14	51.9 (12.6%) +1.21
	15	48.8 (13.4%) +1.25
	16	63.6 (14.2%) +1.34
organ	17	40.7% -15.9
	18	34.6% -13.2
	19	34.9% -14.7

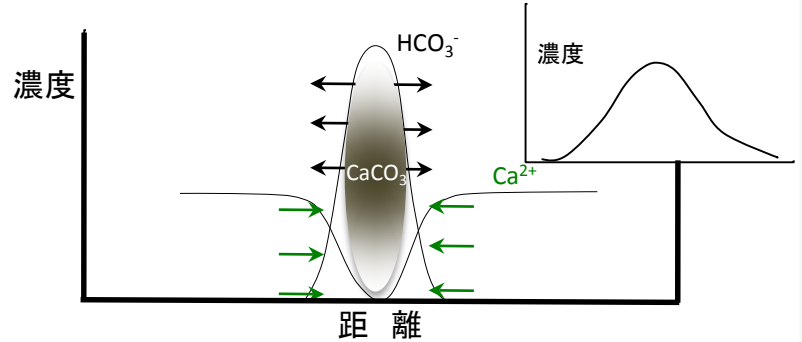
化学組成・同位体の特徴

- ◆Caの濃集 (vs周辺マトリクス10~14倍)
- ◆Pの濃集 (vs周辺マトリクス8~22倍)
- ◆コンクリーション中のδ¹³C
≒原生ツノガイの体組織中のδ¹³C
- ◆コンクリーションツノガイ殻中のδ¹³C
≒原生ツノガイ殻中のδ¹³C
≒海水中のδ¹³C

地層処分と地下環境 -自然に学ぶ現象と応用- 3) 球状炭酸塩コンクリーションに学ぶ
球状コンクリーションの形成モデル



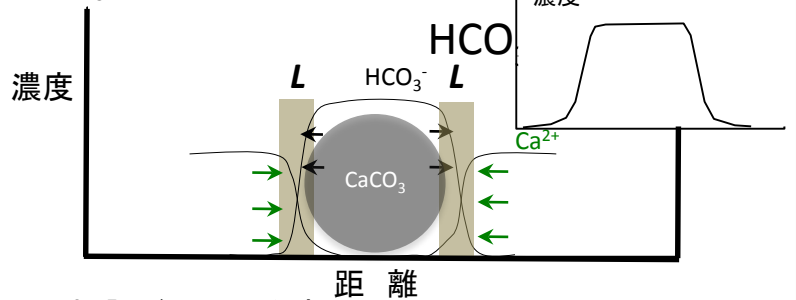
A) 単純な従来型拡散・沈殿モデル



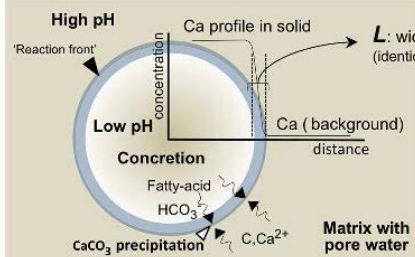
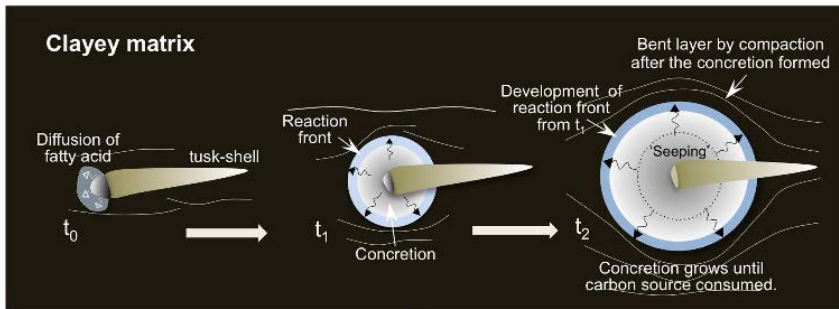
沈殿は全体で発生
⇒ 中心ほどCaCO₃の濃度が高くなければならぬ

B) 'Seeping organic' モデル

(HCO₃⁻とCa²⁺の拡散差を考慮したモデル)



沈殿は縁(L)で発生
⇒ 全体CaCO₃の濃度が均一になる



L : width of 'reaction front' between concretion and matrix (identical with Ca concentration from concretion to background level)
 $R \cdot \text{CH}_3\text{COOH} = R \cdot \text{H} + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
 $\text{HCO}_3^- = \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$
 $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{CaCO}_3 \downarrow$
 $L = D/V$
 (D: Diffusion coefficient, V: Growth rate of concretion)

$$L(\text{cm}) = D(\text{cm}^2/\text{s}) / V(\text{cm}/\text{s})$$

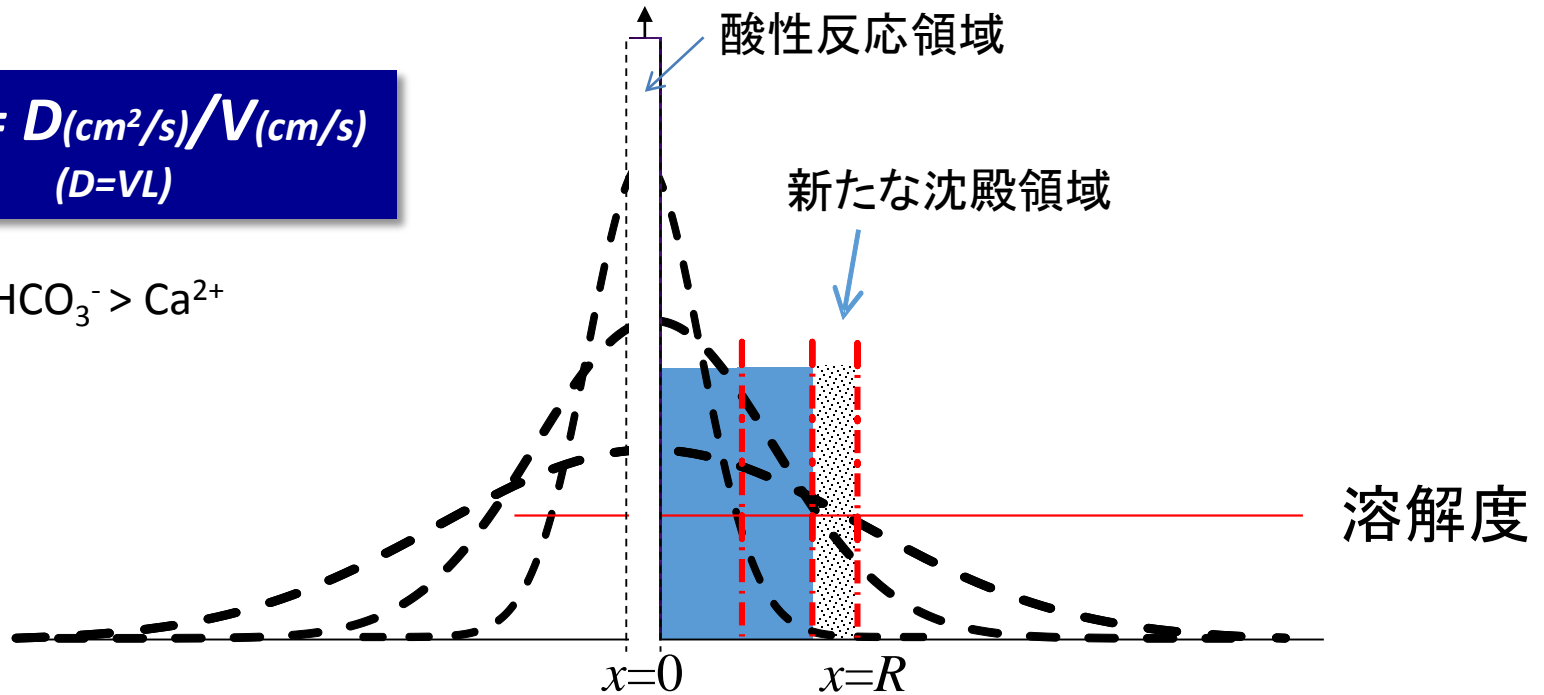
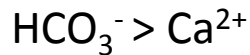
$$(D=VL)$$

モデル化の試み

パルス入力モード

$$L(\text{cm}) = D(\text{cm}^2/\text{s}) / V(\text{cm}/\text{s})$$

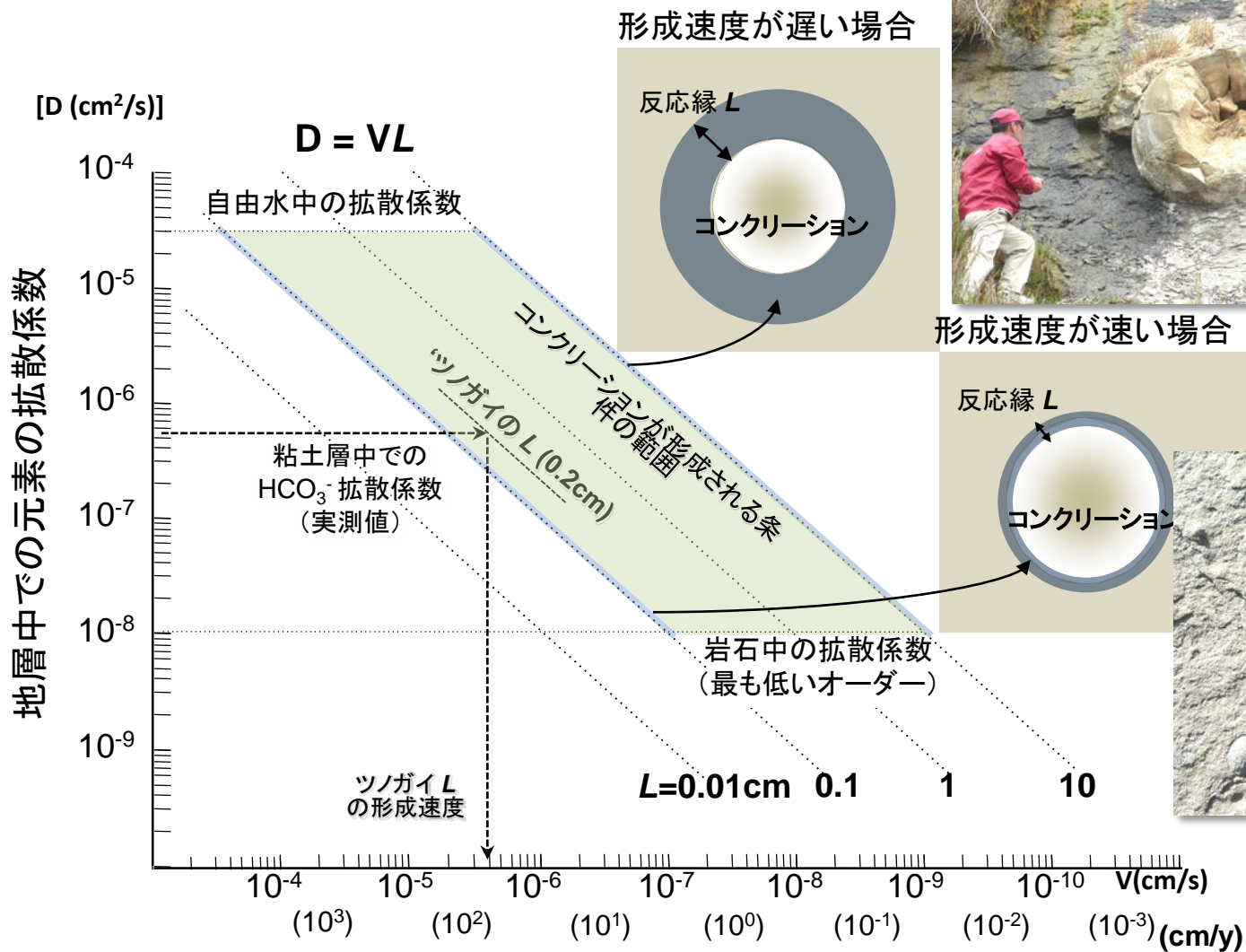
$(D=VL)$



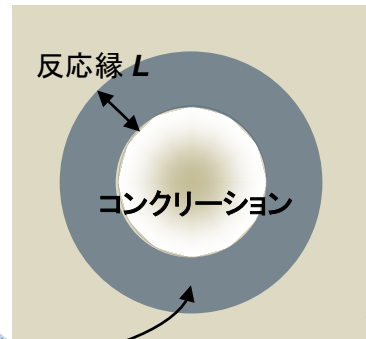
パルス量で
球の大きさが決まる

物質移動(拡散)と化学反応のカップリング

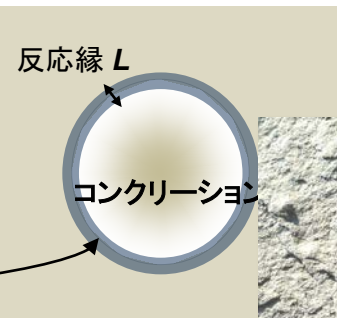
'Diffusion-growth rate cross-plot' (コンクリーション形成速度ダイアグラム)



形成速度が遅い場合

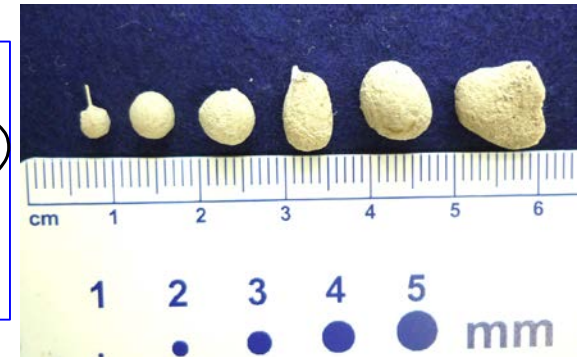


形成速度が速い場合



今後の課題／展望(応用)

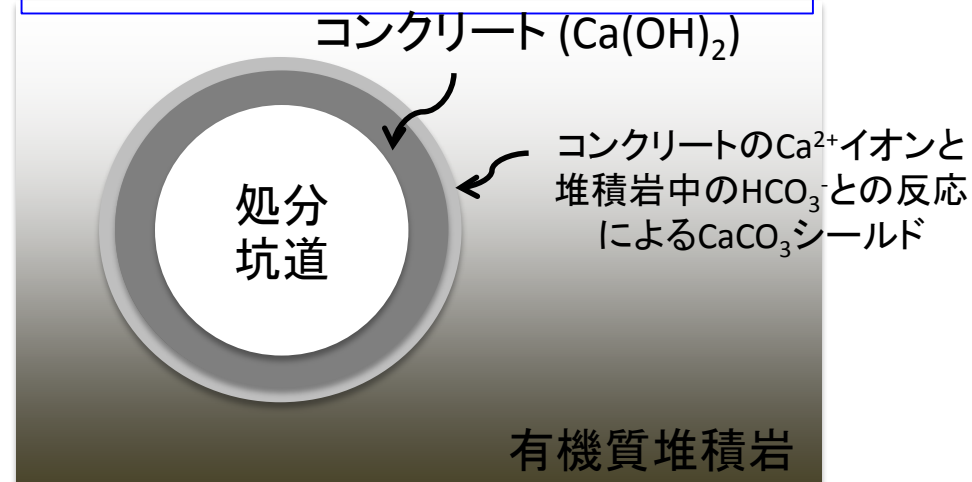
- ◆ 形成年代の明確なCaCO₃コンクリーションの検討
(‘Diffusion-growth rate cross plot’の汎用性の検証)
- ◆ 他の炭酸塩コンクリーションの形成プロセスの検討
- ◆ 炭酸塩以外のコンクリーション形成プロセスの検討



- ◆ 実験による形成プロセスの検証(反応縁形成によるモデルの検討)



- ◆ 自己シーリングプロセスの応用
(地下処分場の長期固定)



引用文献

Yoshida, H., Ujihara, A., Minami, M. et al., Early post-mortem formation of carbonate concretions around tusk-shells over week-month timescales. *Scientific Reports* 5:14123/DOI:10.1038/srep14123, (2015).