地下環境と物質移動

―地下環境の特徴とバリア機能―

名古屋大学博物館資料基盤研究系
環境地質学専攻

吉田英一
dorw@num.nagoya-u.ac.jp

地下環境と物質移動

◆地下環境を利用するとは？（目的・背景）

◆自然に学ぶ物質移動現象（アナログ事例を通して長期的挙動を理解する）

◆物質移動経路（断層･割れ目・岩石マトリクス等）の構造的特徴と元素移動反応

-移動経路の特徴と構造発達（断層と割れ目の相関）
-地下岩盤変質・割れ目充填鉱物形成と元素移動
-砂岩型ウラン鉱床に見る岩石マトリクス（堆積岩）中の元素移動

◆地下環境の機能を検証するための地下研の役割

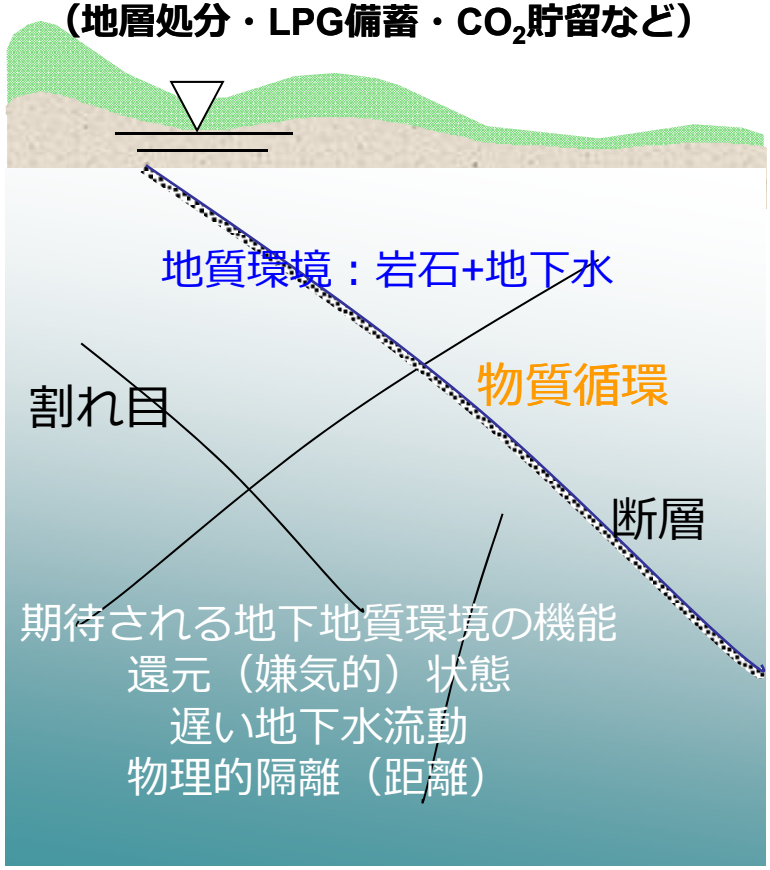
-超深地層研究所（*MIU*）…結晶質岩
-ベルギー・モル地下研究所（*SCK/CEN*）…堆積岩

◆　これからの地下環境研究

-長期的現象評価における理学と工学の境界領域研究の重要性
-我が国の地下環境の特徴と機能の理解にむけて

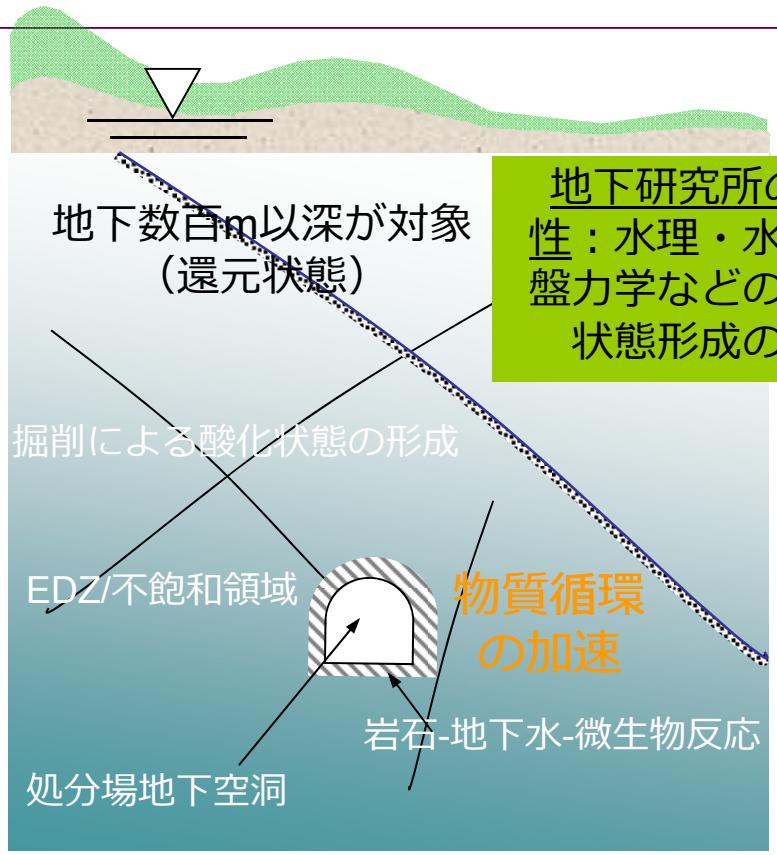
地下環境を利用するとは？（要素と期待される機能）

地下環境の利用
（地層処分・LPG備蓄・CO_2貯留など）



空洞掘削前（平衡的状態）

長期的な地下環境をどう理解するか？



掘削による非平衡状態の形成

研究目的　地下地質環境中での岩石 - 地下水連携相互作用とそれに伴う物質 (元素) 移動メカニズムの理解と応用

地下環境での理解すべき現象

（Japan specific：変動帯地質における物質循環と地下地質環境）

調査研究対象領域
地表～地下数千m

長期的な物質移動プロセスは自然に学ぶしかない
ナチュラルアナログ

◎割れ目・空隙形成プロセス
◎割れ目・空隙シーリング
◎断層と割れ目との形成相関
◎割れ目等充填鉱物形成履歴
◎充填鉱物年代測定
◎地下深部岩盤変質履歴
◎断層・割れ目内物質循環

岩石
（岩種・構造など）

物質循環

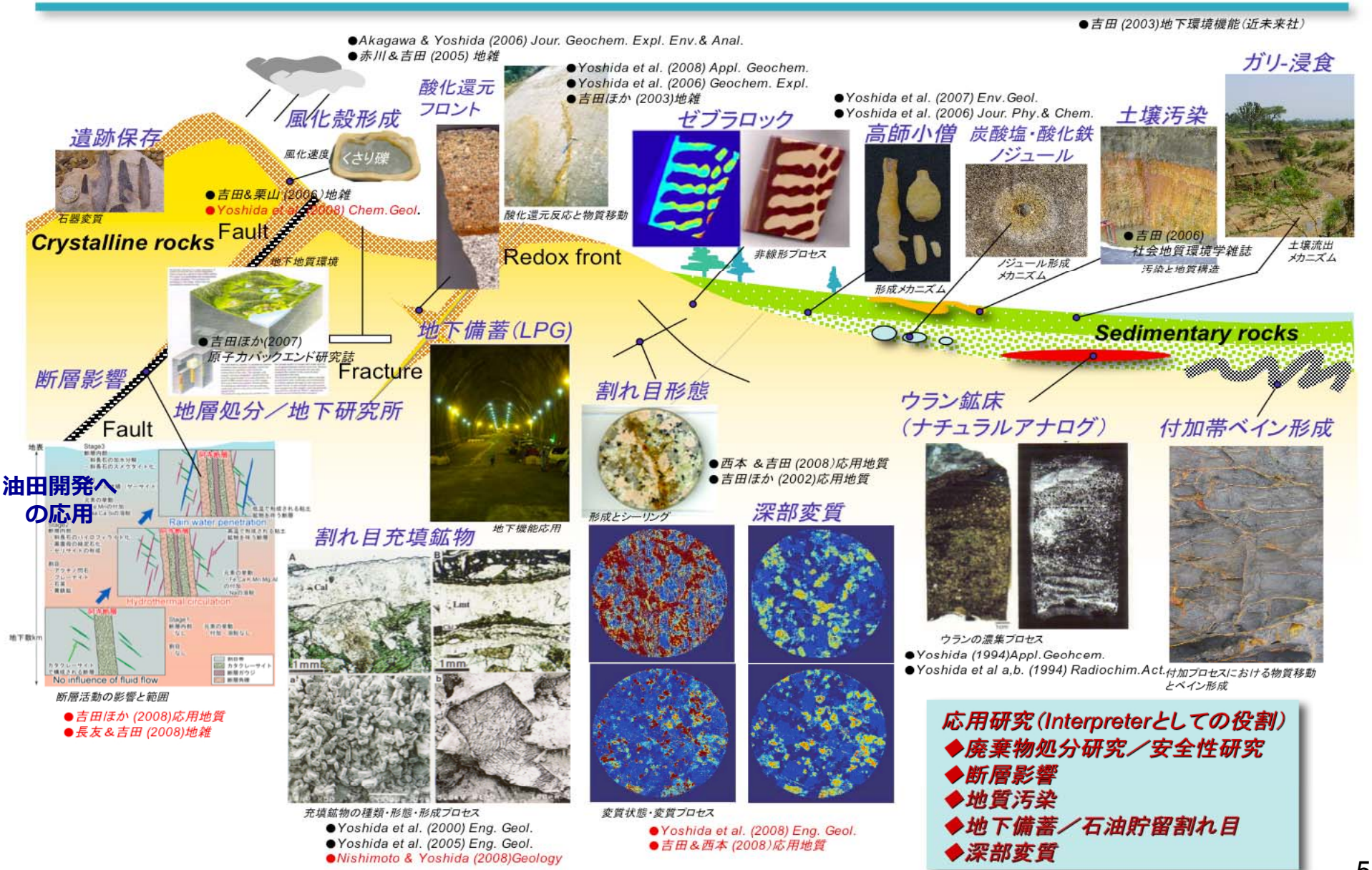
地下水
（流動・水質など）

◎水質形成履歴解析
◎地下岩石の変質と水質分布
◎地下空洞掘削による水質の安定性・緩衝作用解析
◎岩石と地下水反応プロセス・反応速度
◎地下水流動系との相関／年代測定
-酸化還元反応
-変質・充填鉱物形成
-水質変化
-微生物活動
◎地下空洞掘削による環境変化と速度

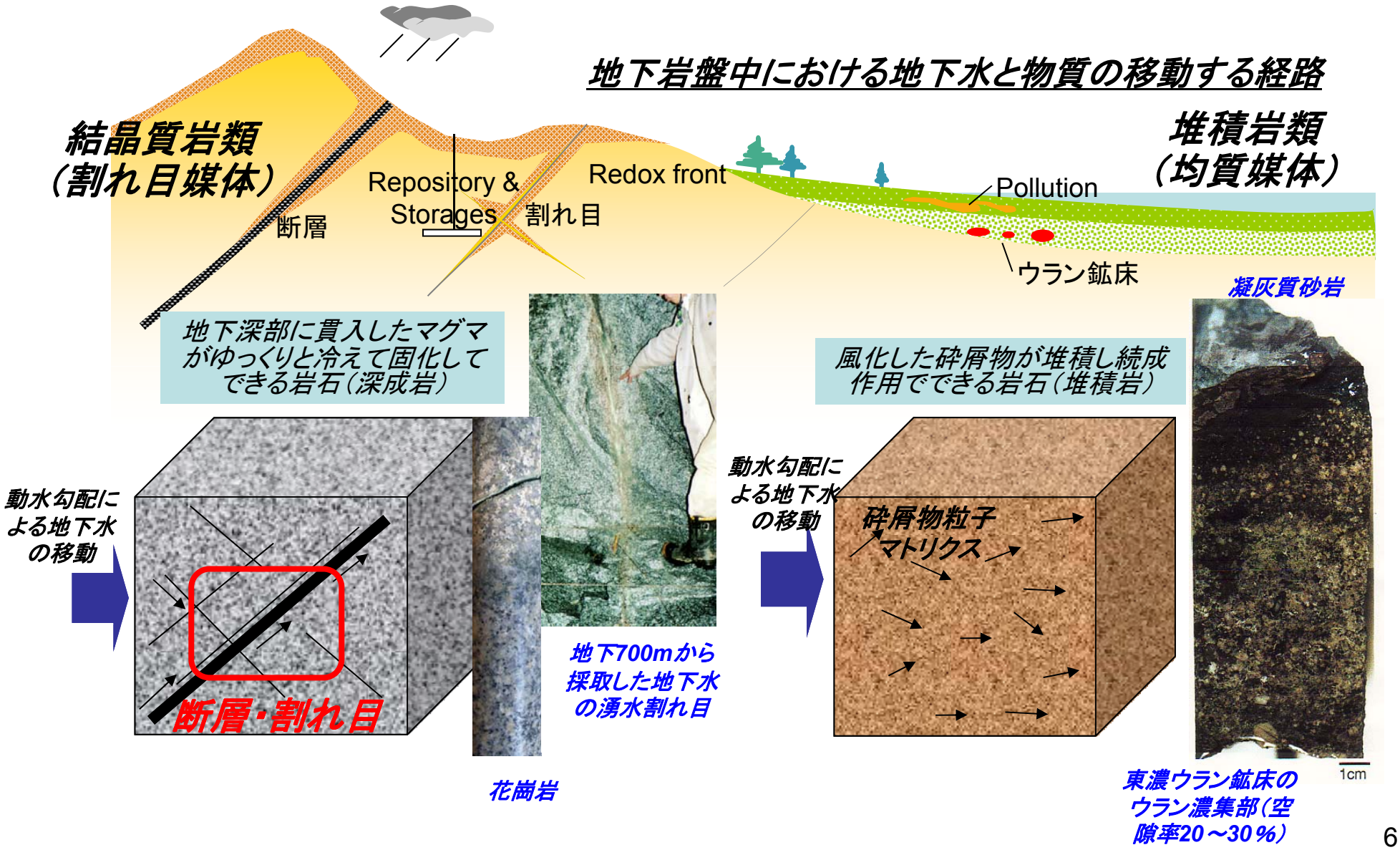
研究対象とゴール（Japan specificな地下環境機能を提示する）
◆物質循環に伴う相互作用のあり方と主たる反応を抽出し理解すること
◆緩衝作用（Self-healing or sealing）及び許容量（Capacity）の提示
◆変動帯地下地質環境に合致した技術による地層処分の実施

地質環境中での長期的な物質移動現象

自然に学ぶ長期的な物質移動プロセス

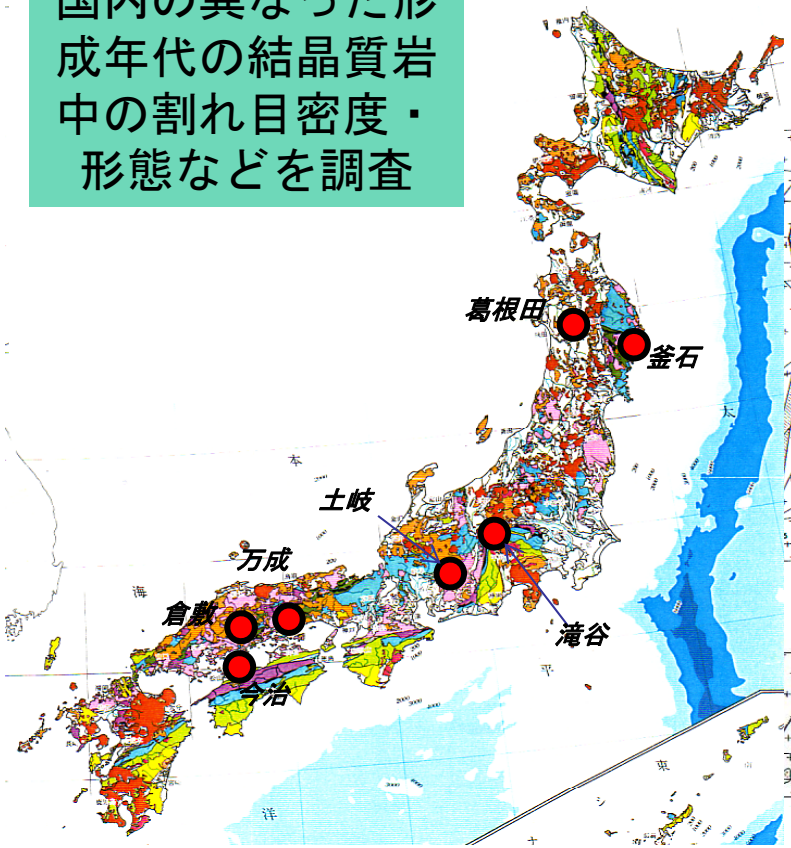


物質移動を規制する構造的特性（断層・割れ目・岩石マトリクス）



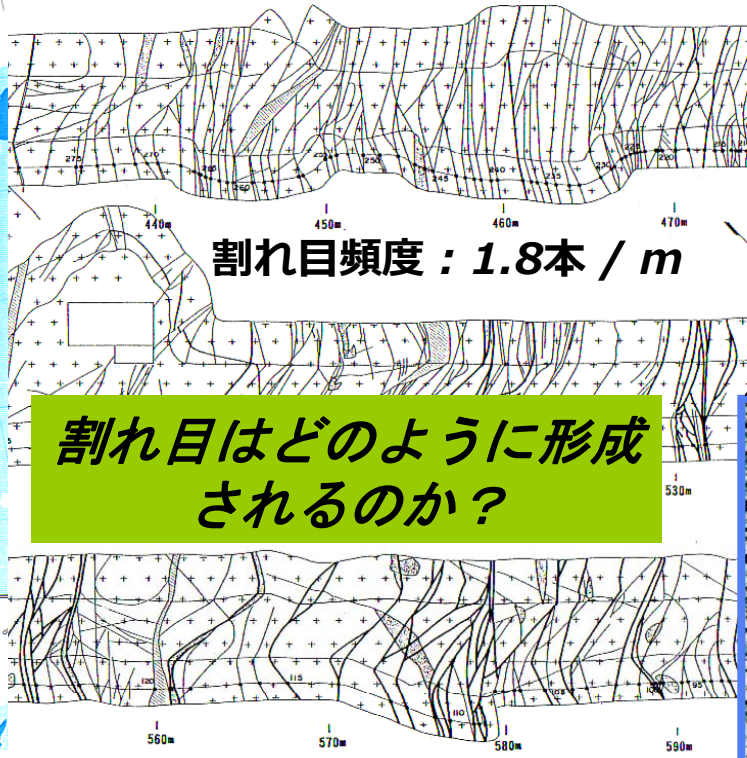
結晶質岩中におけるバックグランド割れ目の形成について

国内の異なった形成年代の結晶質岩中の割れ目密度・形態などを調査



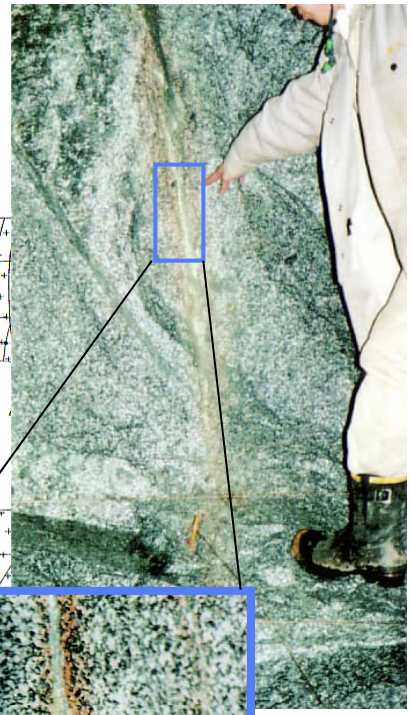
どの岩体においても平均1～2本／mの割れ目頻度を有することが確認されている

地下深部花崗岩中の割れ目の産状
（釜石栗橋花崗岩；－750mレベル）



割れ目頻度：1.8本／m

割れ目はどのように形成されるのか？

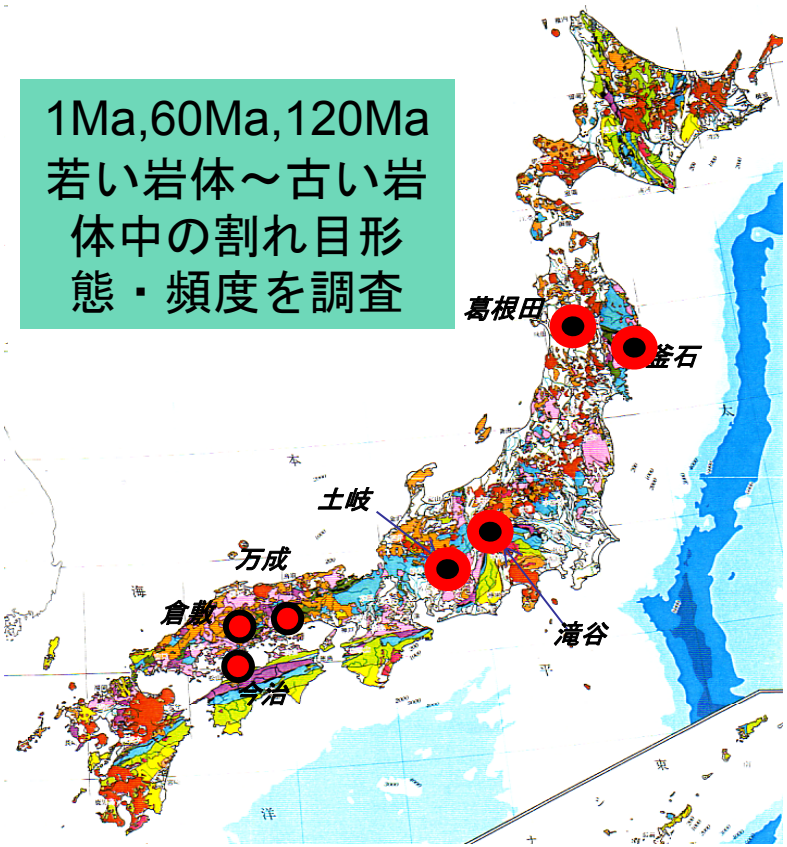


(After Yoshida et al.,2000, 2005)

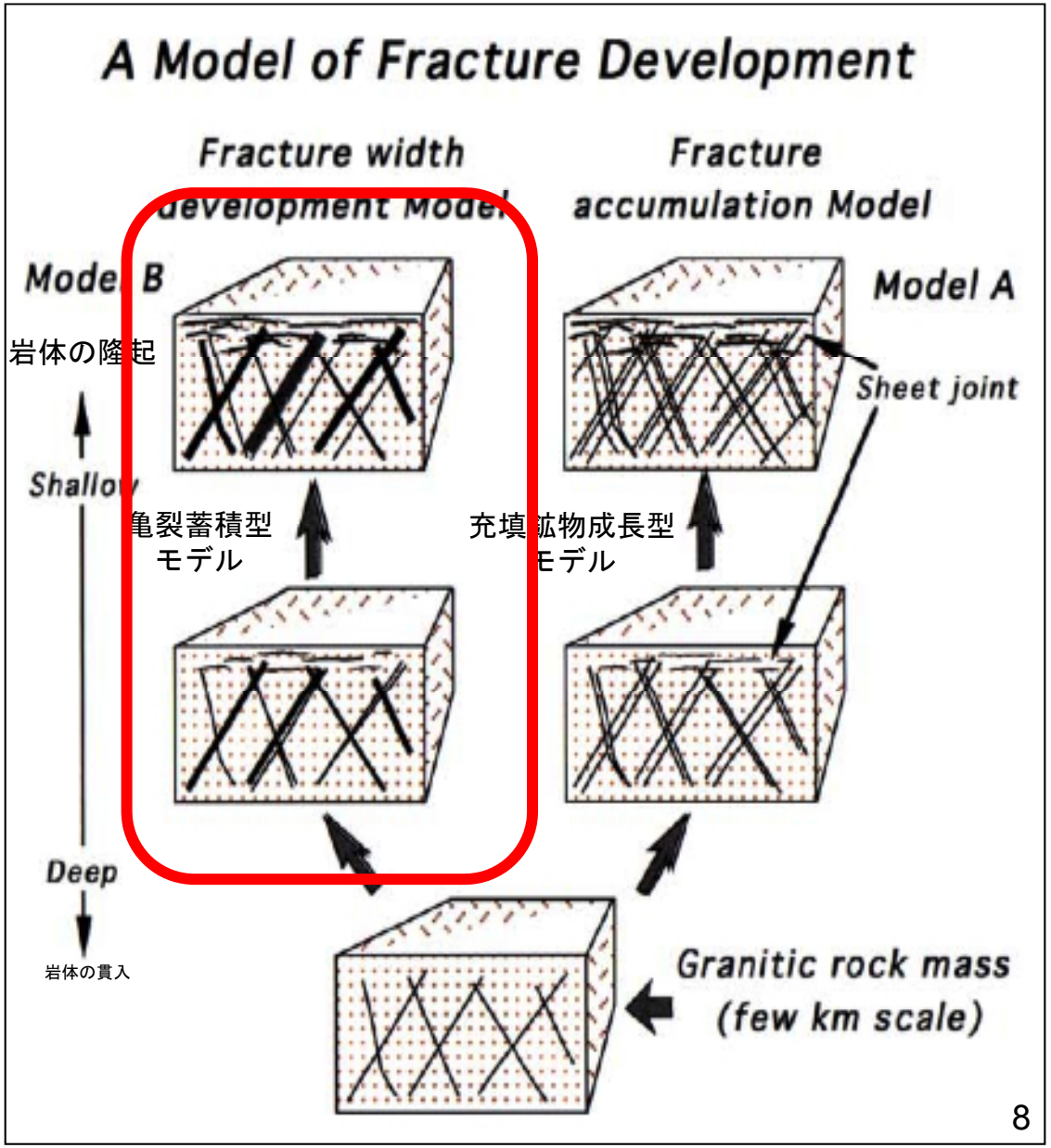
結晶質岩中バックグランド割れ目の形成モデル

(After Yoshida et al., 2005)

1Ma,60Ma,120Ma
若い岩体～古い岩体中の割れ目形態・頻度を調査

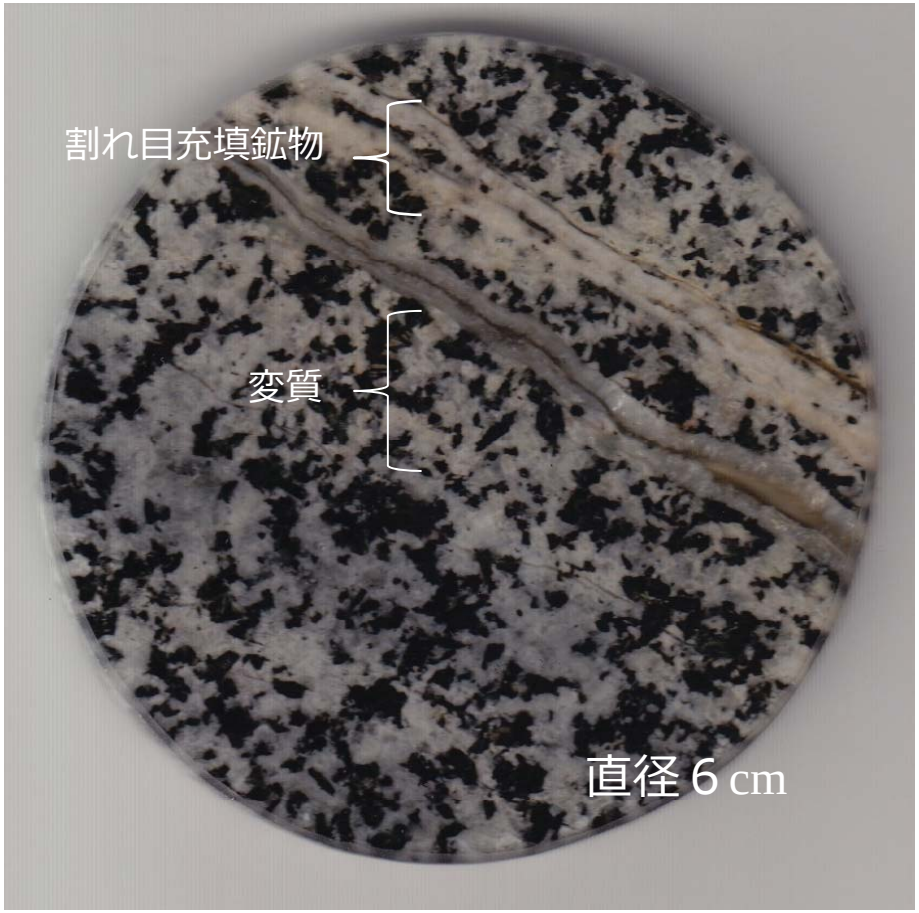


滝谷花崗岩（100万年）



物質移動経路としての割れ目性状と長期的挙動解析

透水性割れ目（地下８００mより）



割れ目から何が言えるのか？

過去の流体との反応履歴を記録した‘化石’

◆充填鉱物から何がどこまでわかるのか？
◆サイト特性調査で何をどこまで実施可能か？

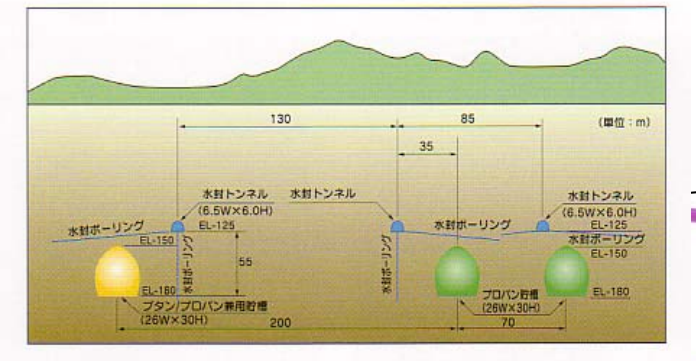
◎割れ目形成プロセス
◎割れ目シーリング
◎断層と割れ目との形成相関
◎割れ目充填鉱物形成履歴
◎充填鉱物年代測定
◎地下深部岩盤変質履歴
◎断層・割れ目内物質循環
◎水質形成履歴解析
◎地下岩石の変質と水質分布
◎岩石と地下水反応プロセス・反応速度
◎地下水流動系との相関／年代測定

透水性割れ目の長期的挙動を評価・予測

地下環境における透水性割れ目の長期的挙動評価（LPGサイト）

現在瀬戸内海海底下に２基建設中

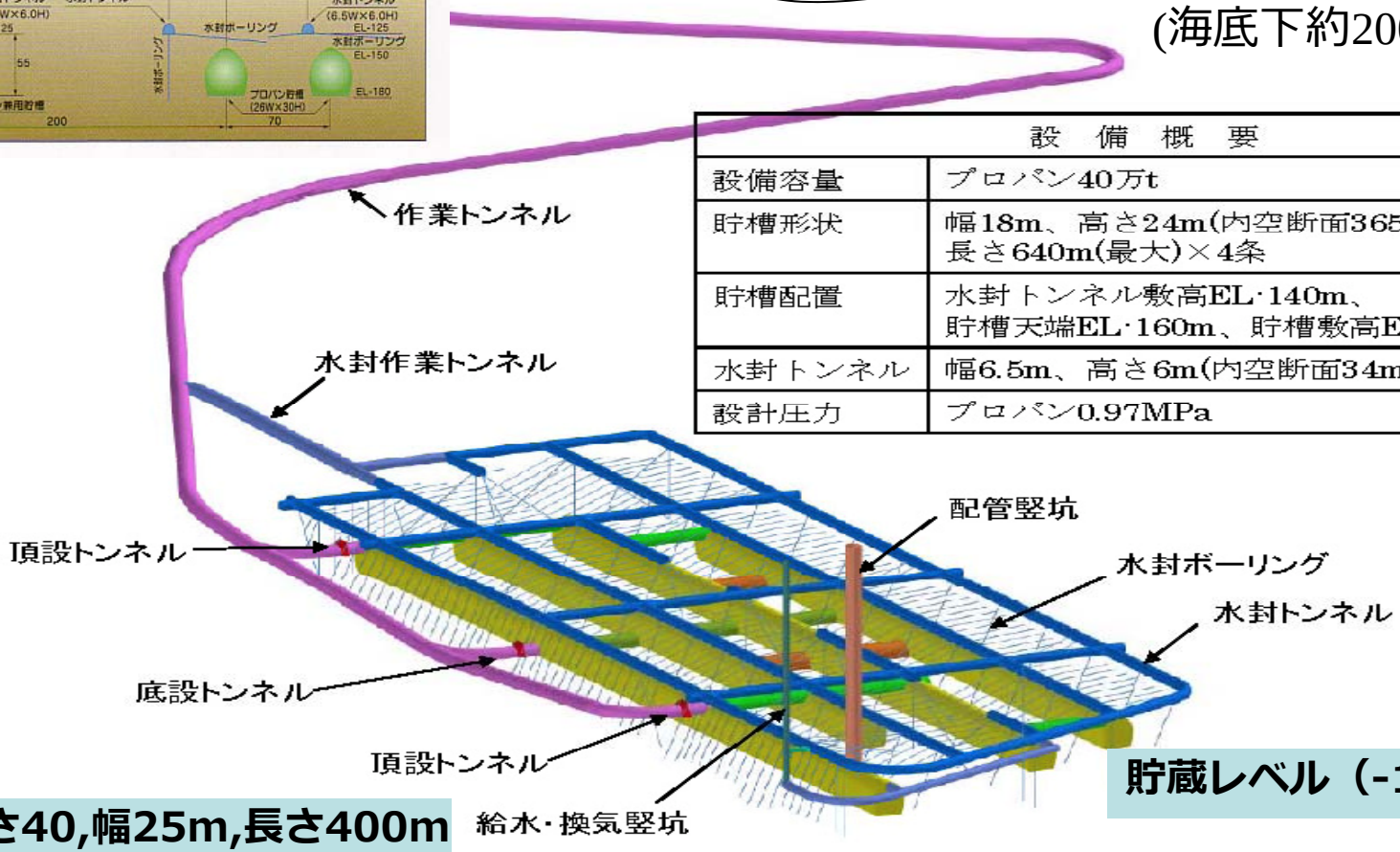
地下200メートルにLPGを約100年以上貯蔵
（地下水の水圧を利用した水封水システム）



地上

地下備蓄
空洞部分
(海底下約200m)

設　備　概　要	
設備容量	プロパン40万t
貯槽形状	幅18m、高さ24m(内空断面365m²)、 長さ640m(最大)×4条
貯槽配置	水封トンネル敷高EL-140m、 貯槽天端EL-160m、貯槽敷高EL-184m
水封トンネル	幅6.5m、高さ6m(内空断面34m²) ×4.5条
設計圧力	プロパン0.97MPa



貯蔵レベル（-180～200m)

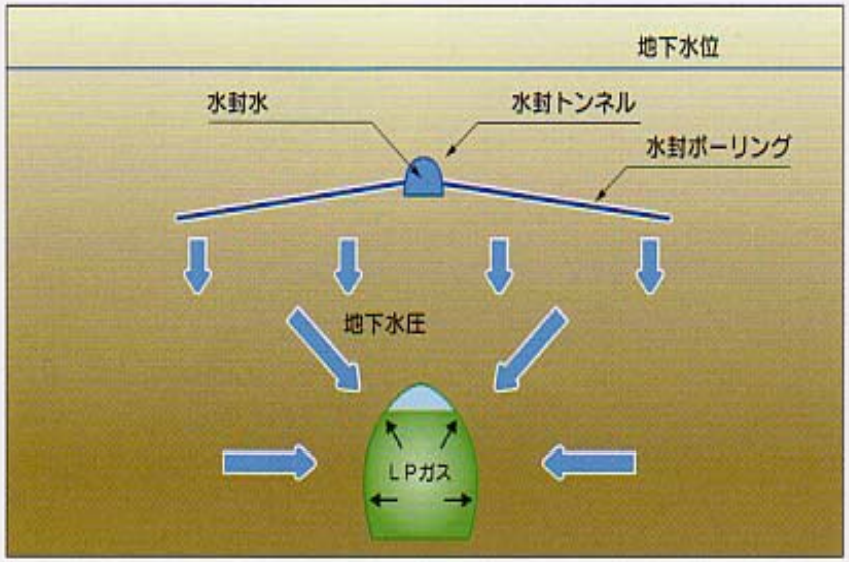
高さ40,幅25m,長さ400m

LPG地下備蓄の基本的考え方（気体を液体で貯蔵する方法）

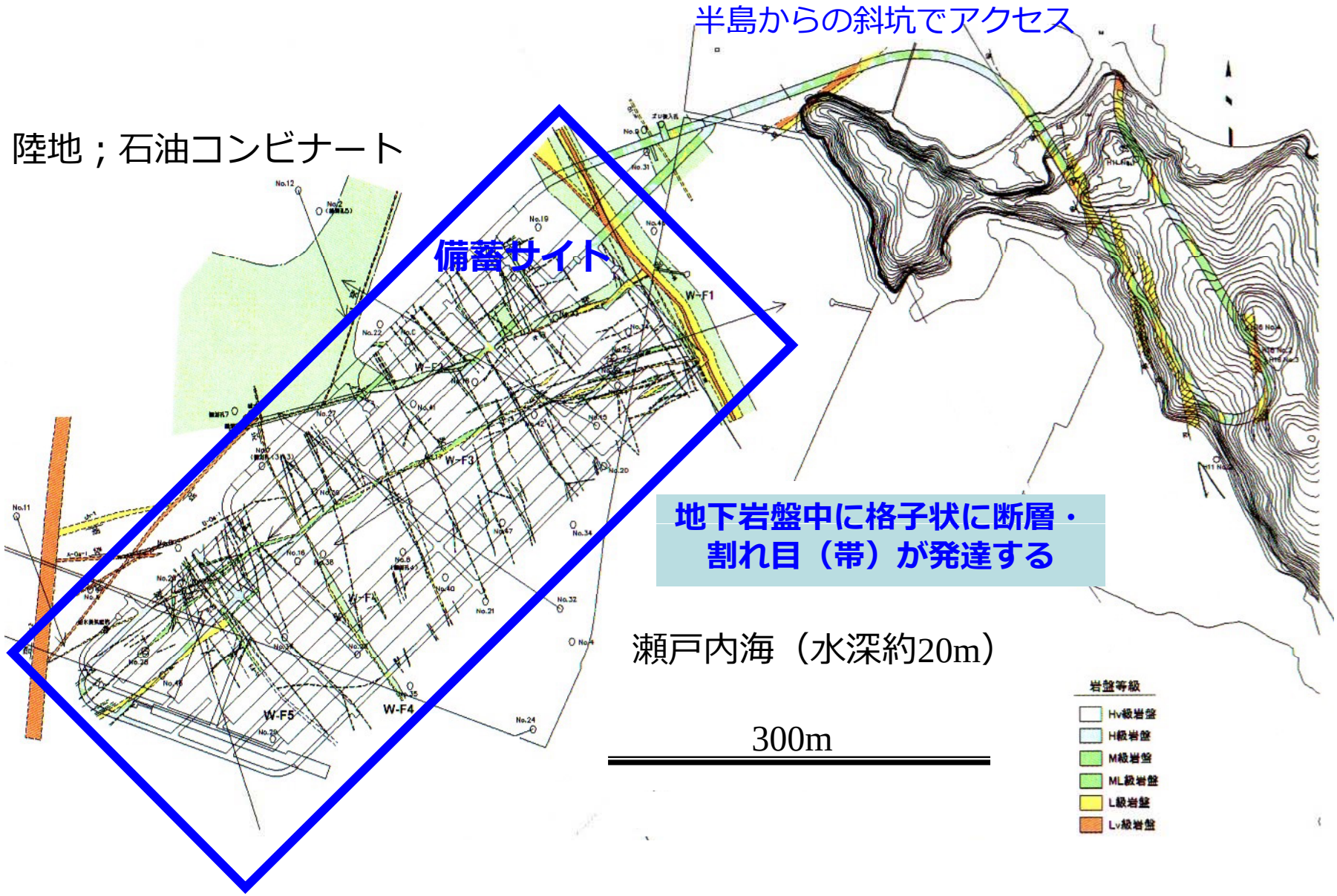
水封式地下岩盤貯蔵方式….地下水圧により常温のLPGを液体として貯蔵する方式

◆ LPGが気化する圧力（0.85MPa=85kg/m^2≒ 85m以深）よりも少し高めの地下水圧となる地下に貯槽を設けて、長期にかつ大量の貯蔵する

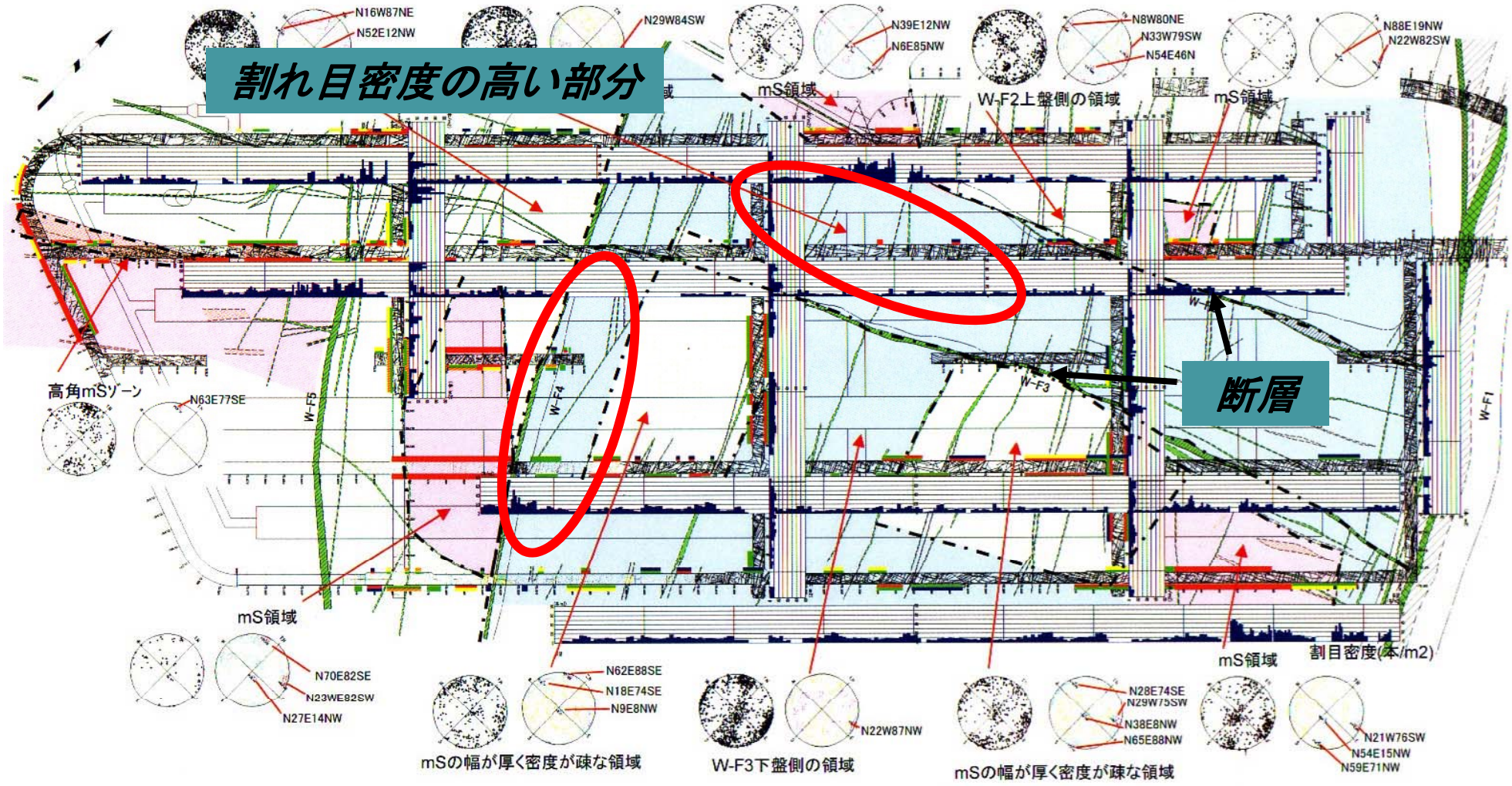
◆地下水圧を安定化させることが必要なため、水封水（すいふうすい）を供給するためのトンネル、ボーリングを配置し、地下水圧をコントロールする



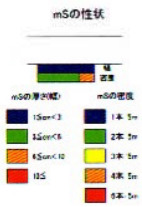
地下備蓄（倉敷）サイトにおける地質構造（海底下-140m平面構造）

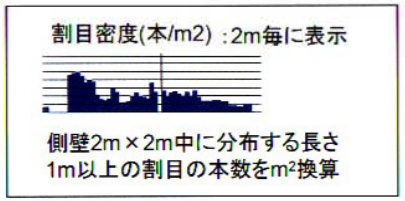


結晶質岩中の割れ目（帯）詳細分布の事例



割れ目頻度
断層近傍：5～10本／m
母岩中：1.5～2.5本／m





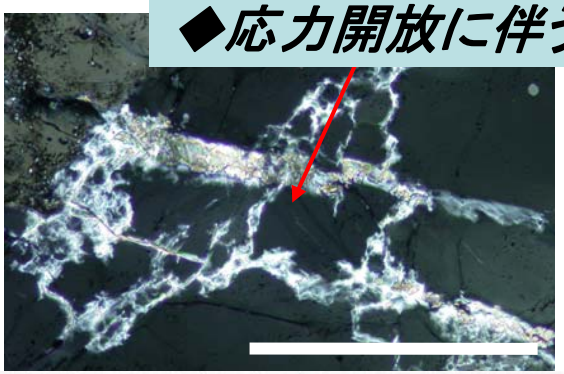
断層・割れ目充填鉱物による割れ目（水みち）の形成履歴解析

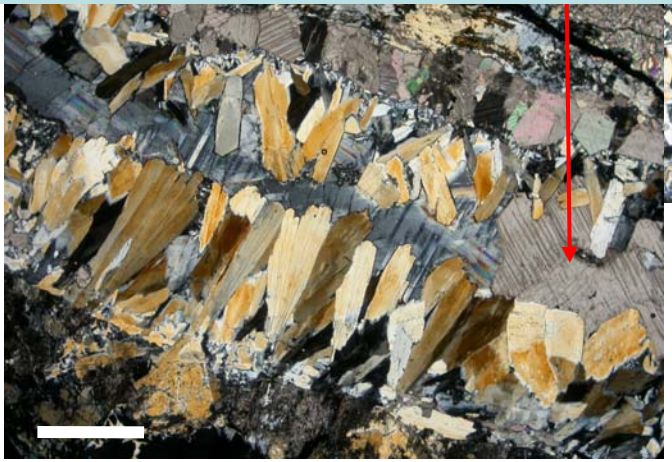
断層中の充填鉱物
マイロナイトの破砕粒子（Stage I)
カルサイトの充填（Stage IV)

岩石マト
カルサ

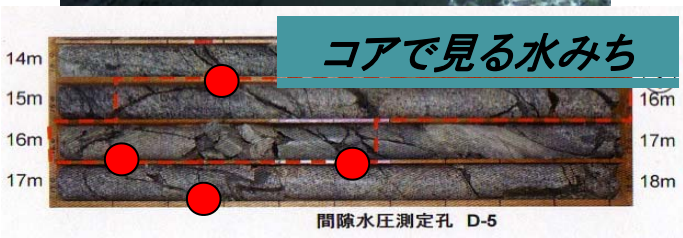
割れ目充填鉱物
母岩中の赤褐色変質（Stage II)
沸石類の充填（Stage III~IV)
カルサイトの充填（Stage IV)

水みちの充填鉱物について
◆'サンドイッチ'構造をなす（流体反応履歴）
◆応力開放に伴う結晶成長が基本（変動帯花崗岩の特徴）



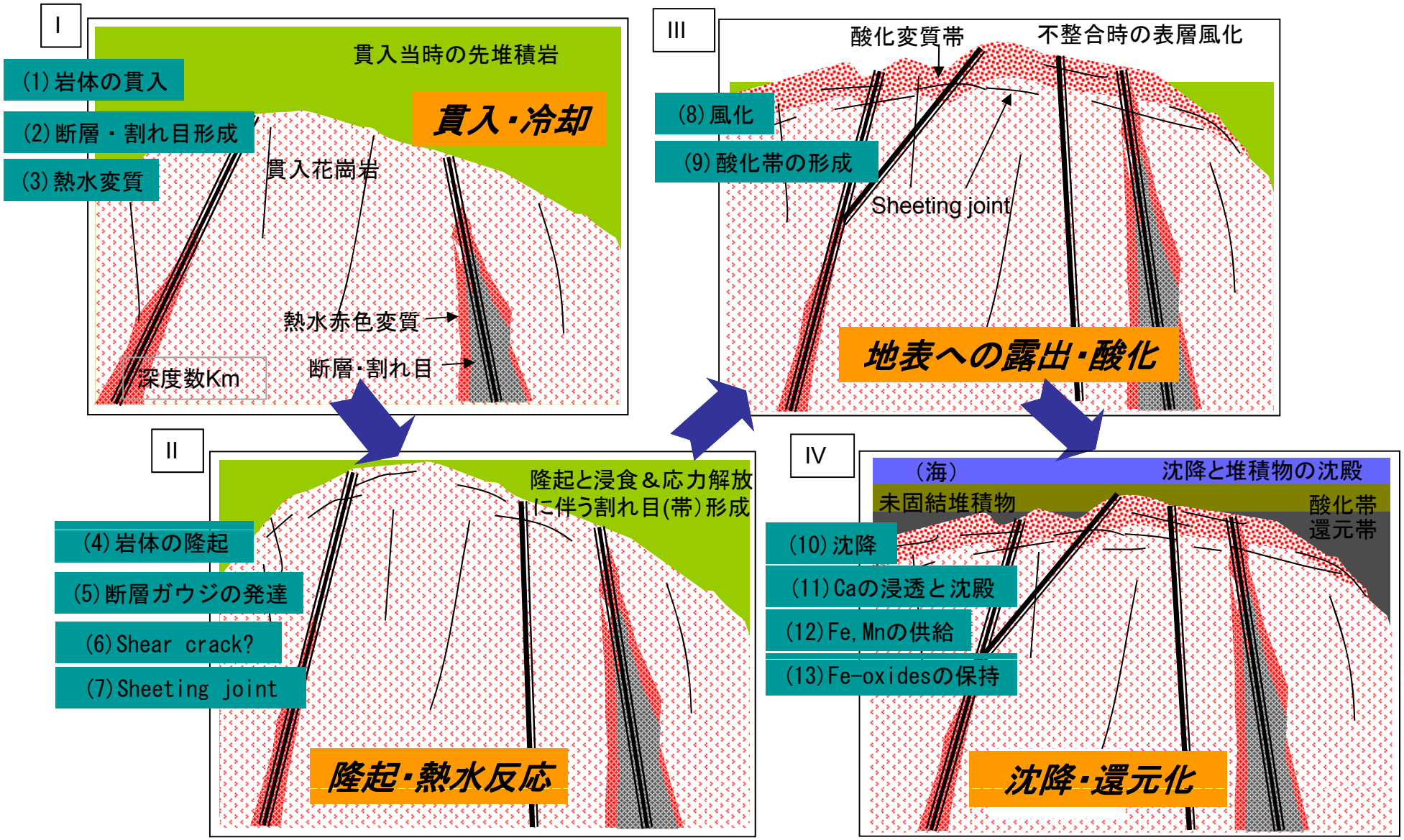


コアで見る水みち



（スケールは0.5ミリメートル）

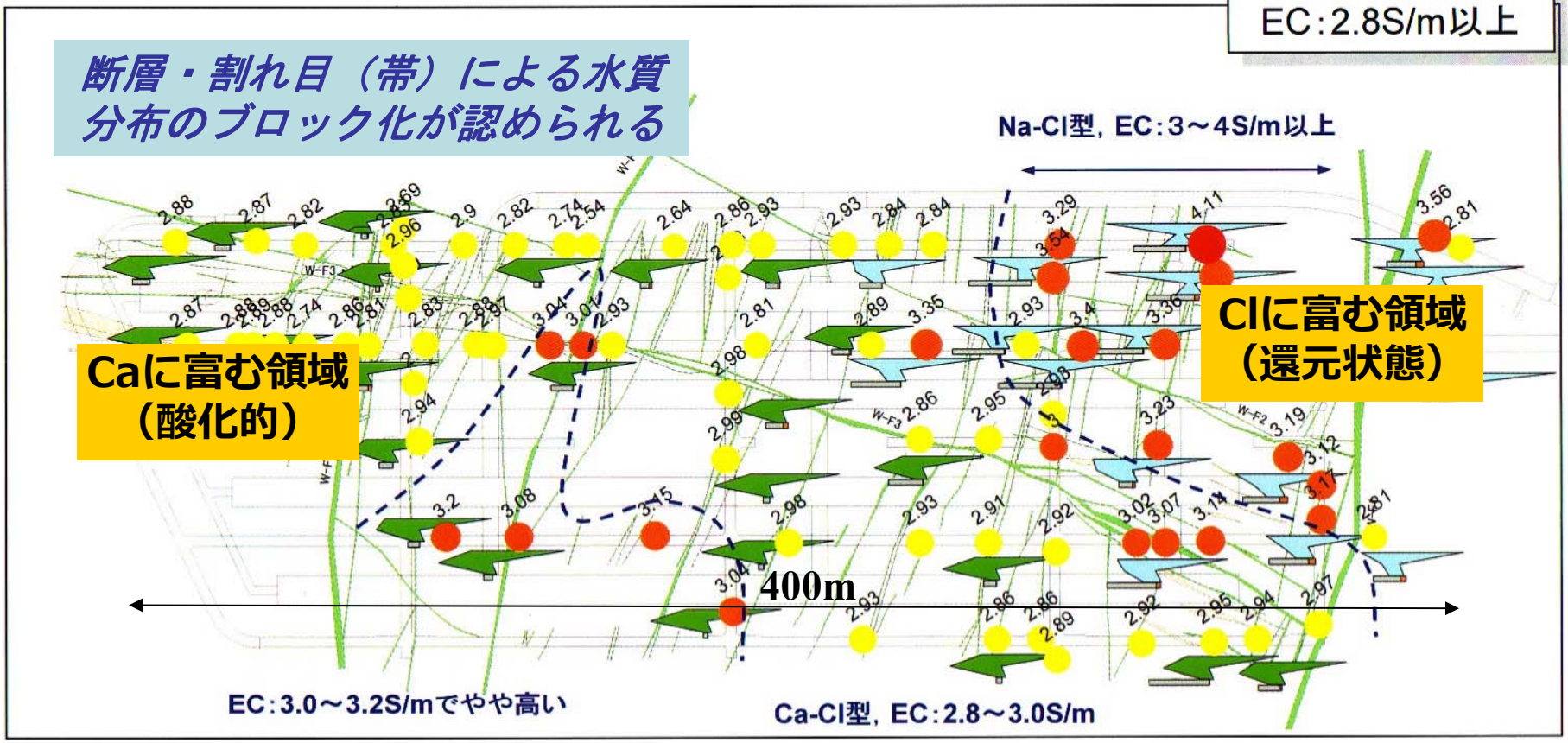
充填鉱物による岩体内構造の形成・流体反応プロセスの推定



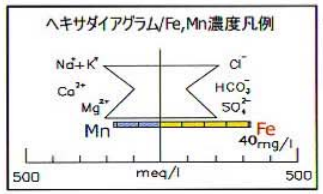
断層・割れ目（帯）の分布による地下環境の不均質化

水封トンネルレベルにおける地下水の水質（先進ボーリングによるトンネル掘削前の水質データ）

水封レベルでは
EC：2.8S/m以上

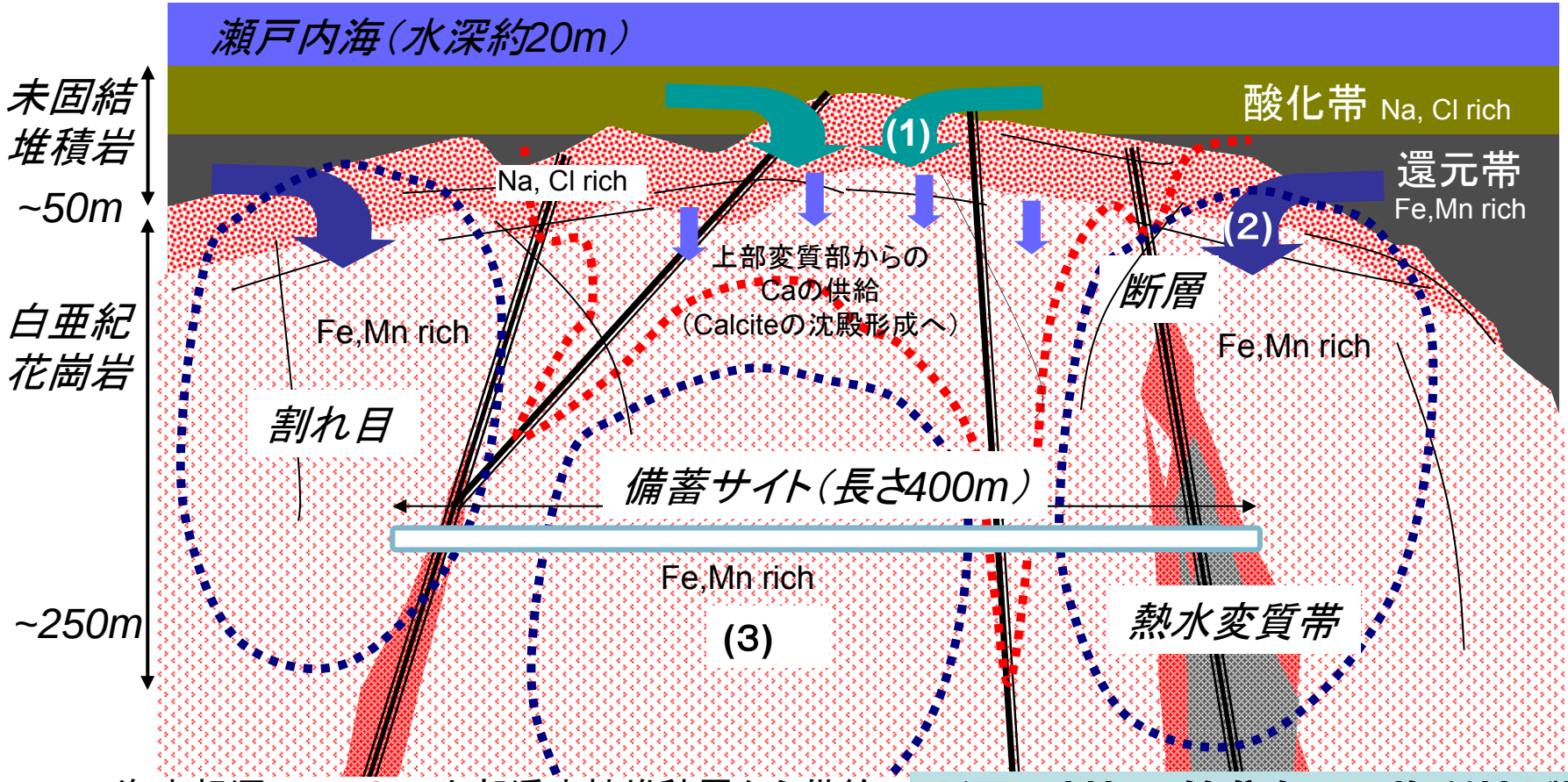


トンネル掘削の影響が少ない先進ボーリングの採水データより作成



断層周辺の割れ目（帯）の透水性が高く、断層自体は水質の境界として機能する場合が多い

地下環境の形成判読と長期挙動の予測（結晶質岩の例）

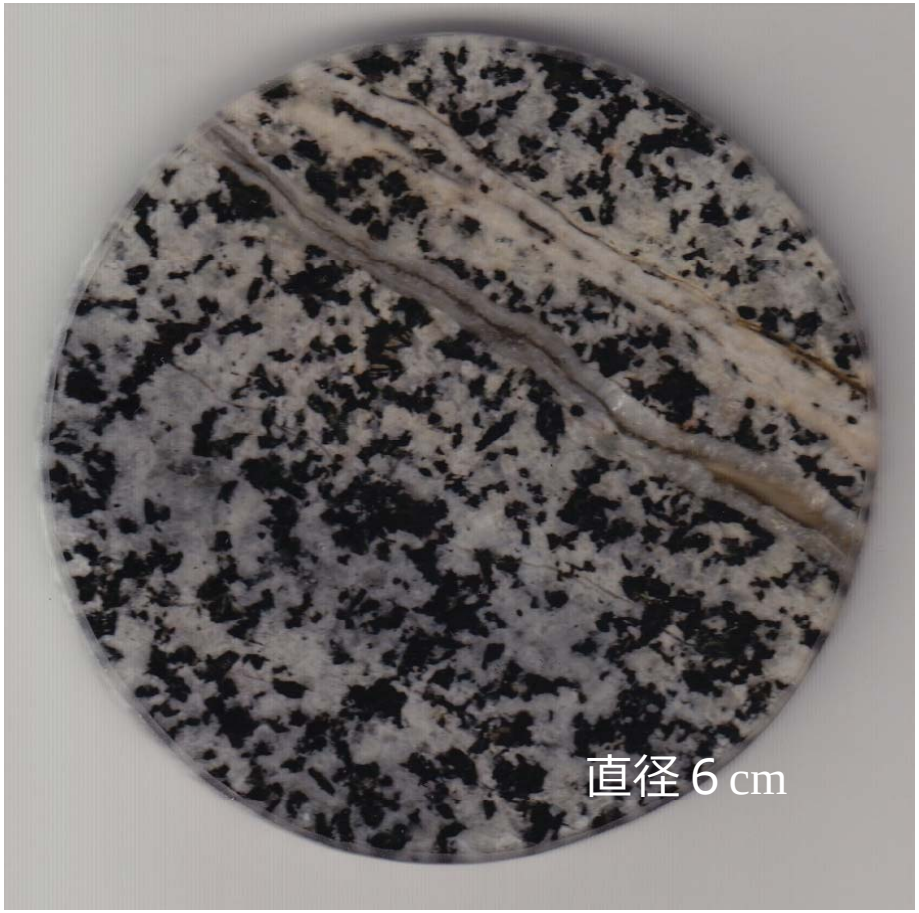


(1)海水起源のNa,Clの上部透水性堆積層から供給
(2)有機質難透水層からのFe,Mnの供給
(3)深部の還元状態地下水の貯留

断層・割れ目等分布の不均質性が地下環境の不均質性を規制
⇒地下環境利用に伴う物質移動もこれらに規制される

物質移動経路としての割れ目性状と長期的挙動解析（充填鉱物と変質）

透水性割れ目（地下８００mより）



岩盤変質から学べるもの

過去の流体との反応履歴を記録した‘化石’

◆充填鉱物から何がどこまでわかるのか？
◆サイト特性調査で何をどこまで実施可能か？

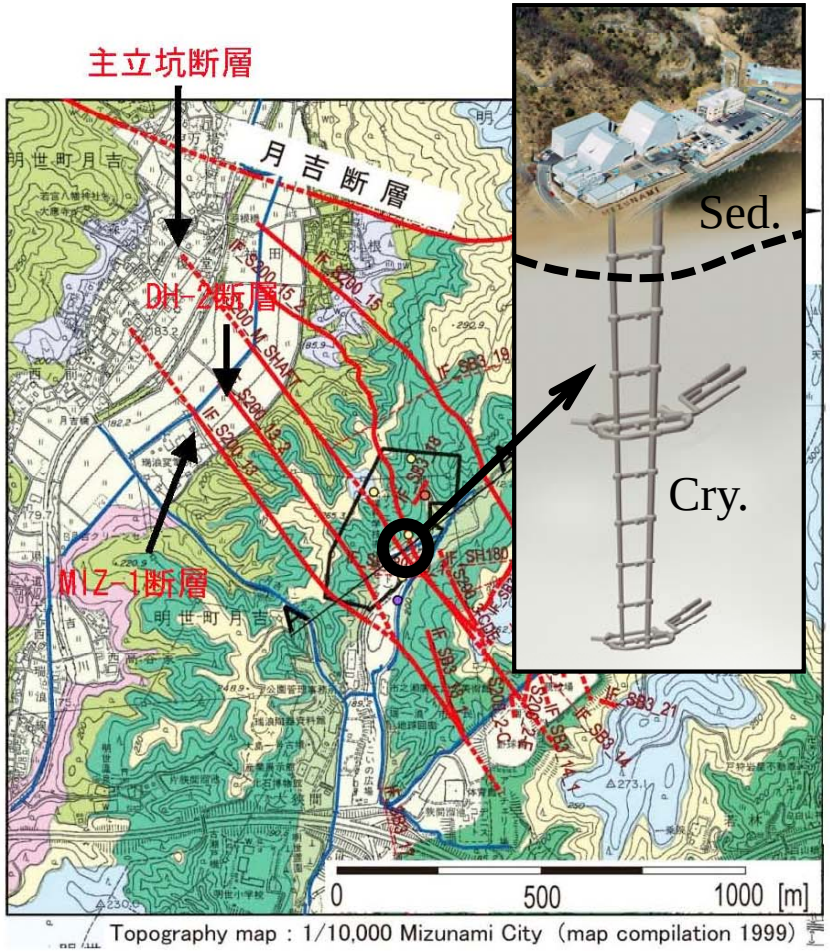
◎割れ目形成プロセス
◎割れ目シーリング
◎断層と割れ目との形成相関
◎割れ目充填鉱物形成履歴
◎充填鉱物年代測定
◎地下深部岩盤変質履歴
◎断層・割れ目内物質循環
◎水質形成履歴解析
◎地下岩石の変質と水質分布
◎岩石と地下水反応プロセス・反応速度
◎地下水流動系との相関／年代測定

透水性割れ目の長期的挙動を評価・予測

透水性割れ目周辺岩盤の変質から見えてくるもの…

URL:変動帯地下環境を知る上で重要な施設

地下深部水みち割れ目周辺での元素移動を調べる



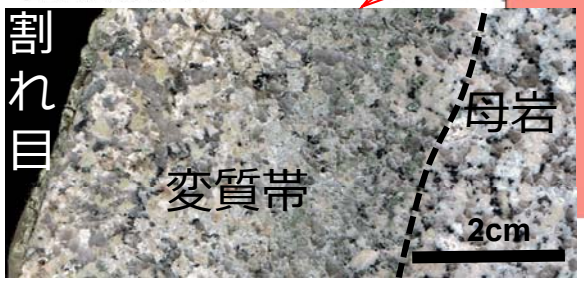
地質平面図

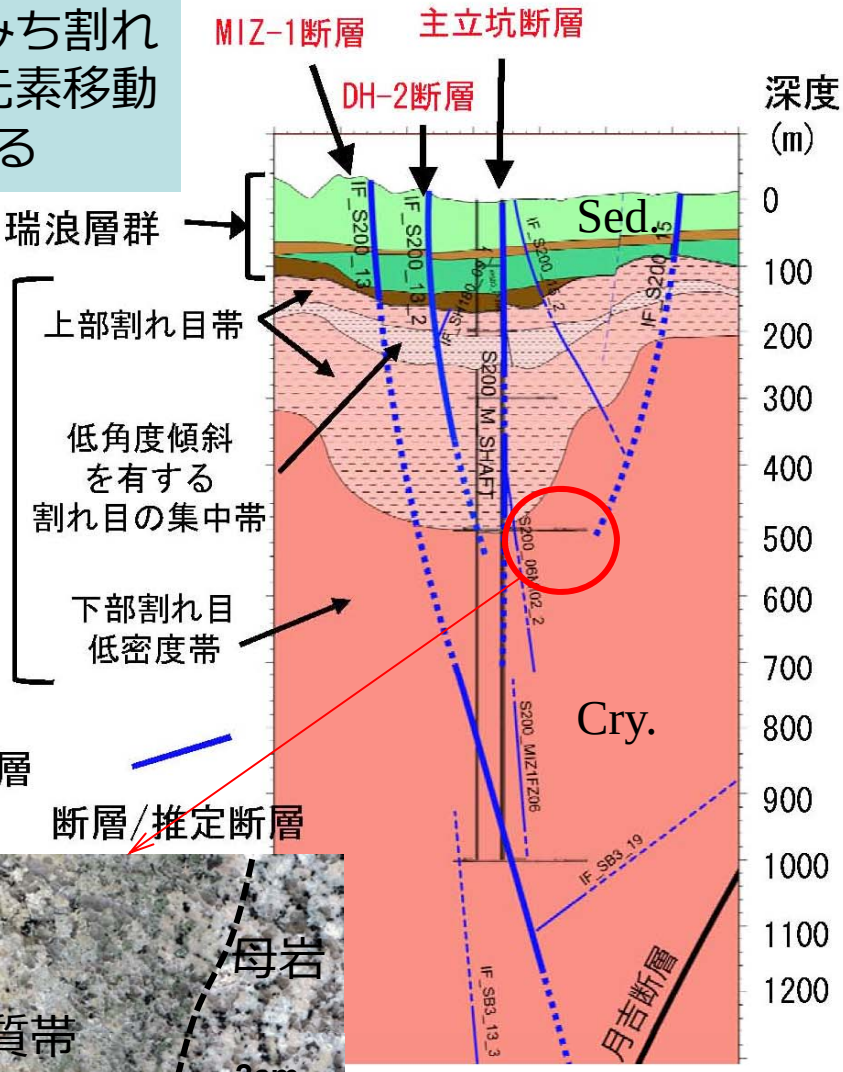
瑞浪層群

土岐花崗岩

断層/推定断層

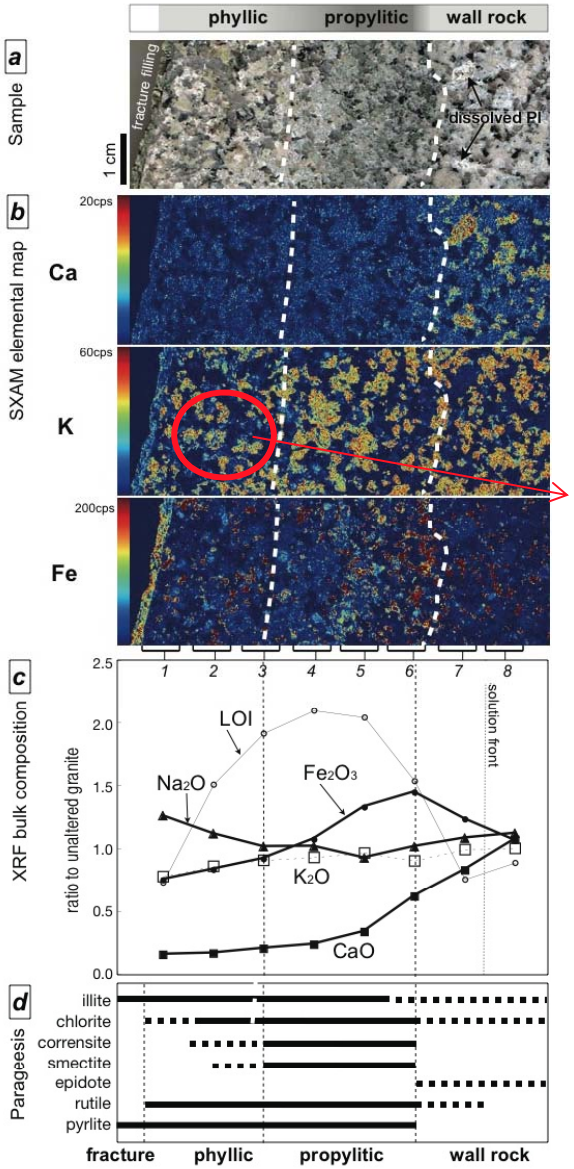
研究所用地



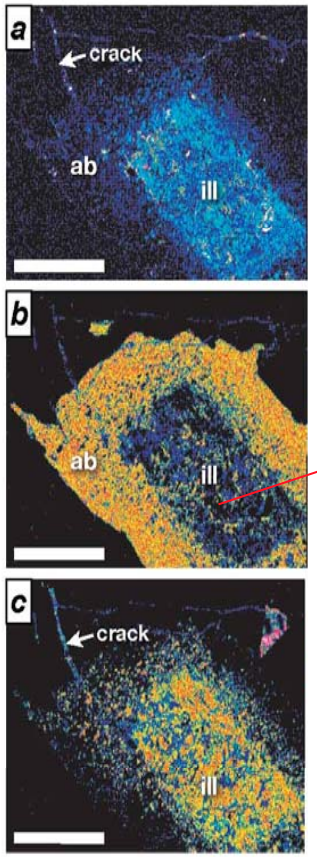


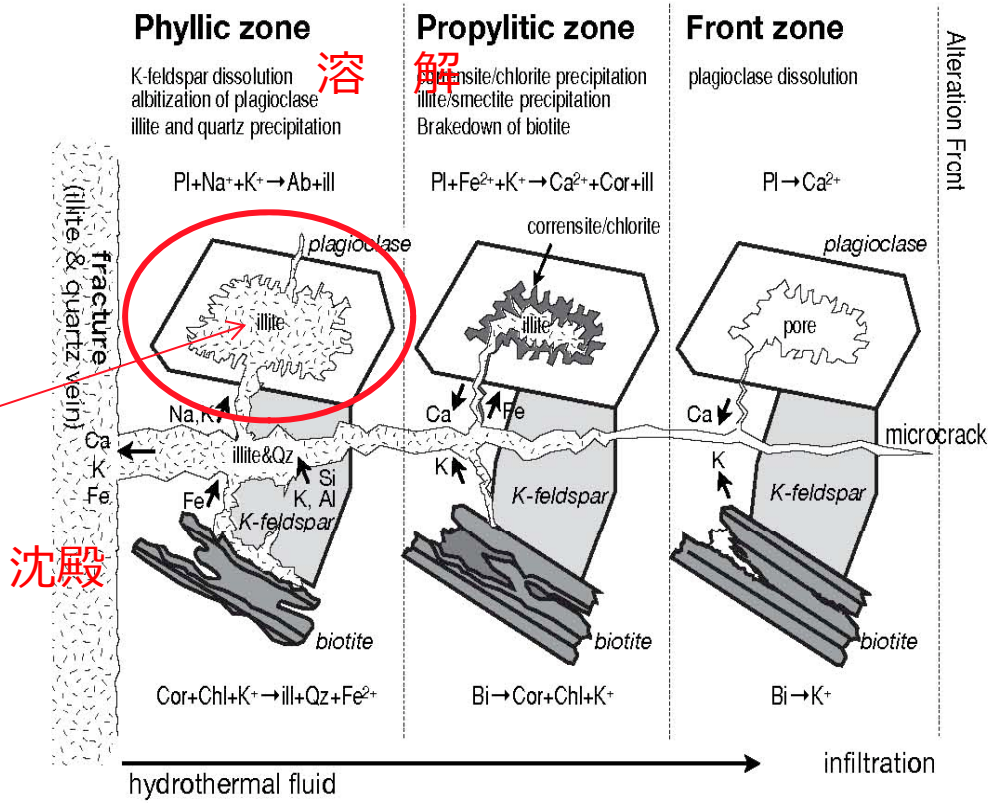
地質断面図

割れ目充填鉱物形成と周辺母岩からの元素移動プロセス



熱水(地下水)との反応に伴ってどのように充填鉱物は形成されるのか?





＊*Nishimoto & Yoshida (2010) Lithos*

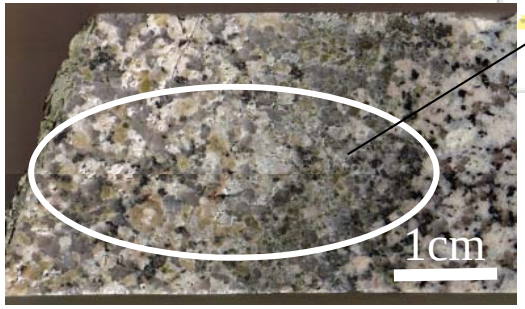
◆母岩からのCa,K,Feの供給と地下水との反応による充填鉱物の形成

充填鉱物・変質から推測される結晶質岩中長期流体反応モデル

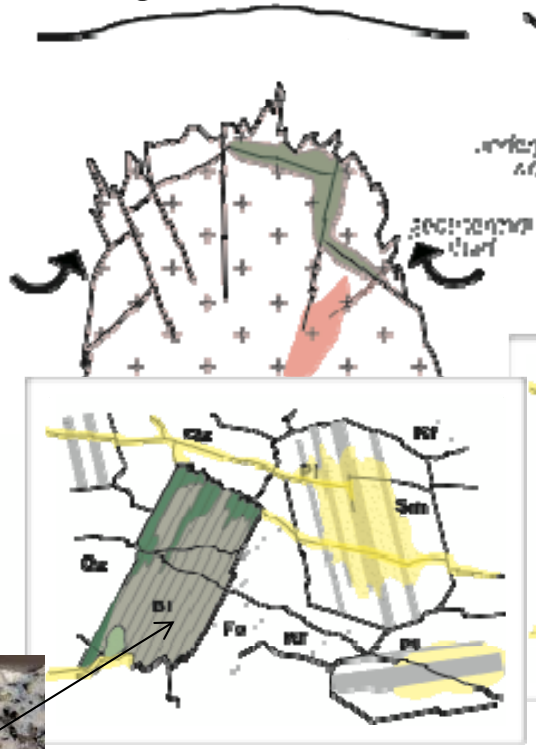
Stage I

岩体の貫入

割れ目の未発達と斜長石や有色鉱物の未変質



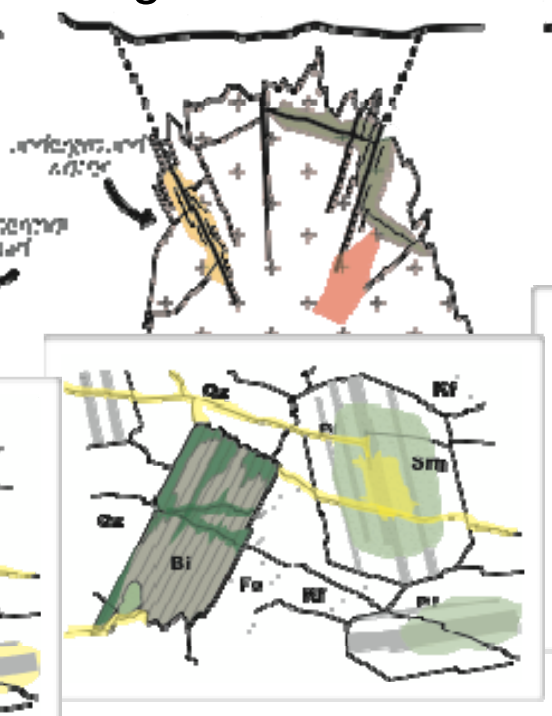
Stage II



熱水変質
（割れ目発達と地熱系成立）

割れ目にイライト・石英が充填
斜長石：Ca溶脱・イライト化
黒雲母：K溶脱・緑泥石化

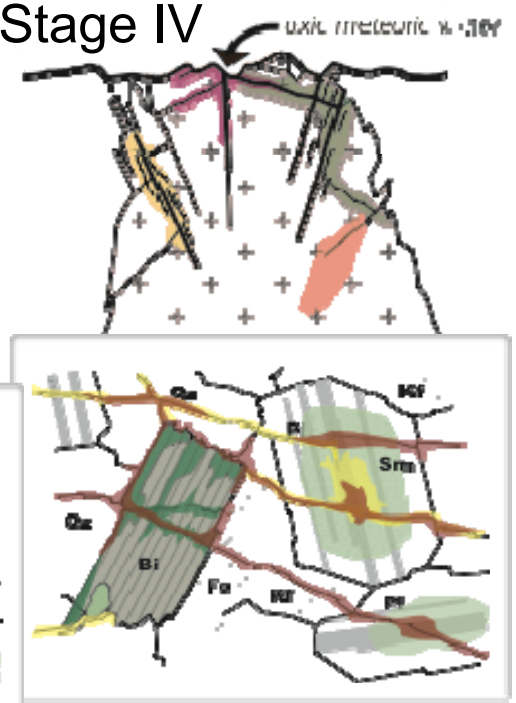
Stage III



地下水による変質
（還元水の浸透）

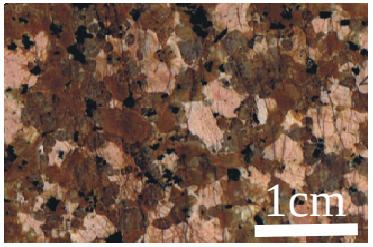
斜長石：Ca溶脱・スヌクタイト化
黒雲母：Fe溶脱

Stage IV



地下水による変質
（酸素に富む水の浸透）

割れ目に水酸化鉄の沈殿
黒雲母のバーミキュライト化

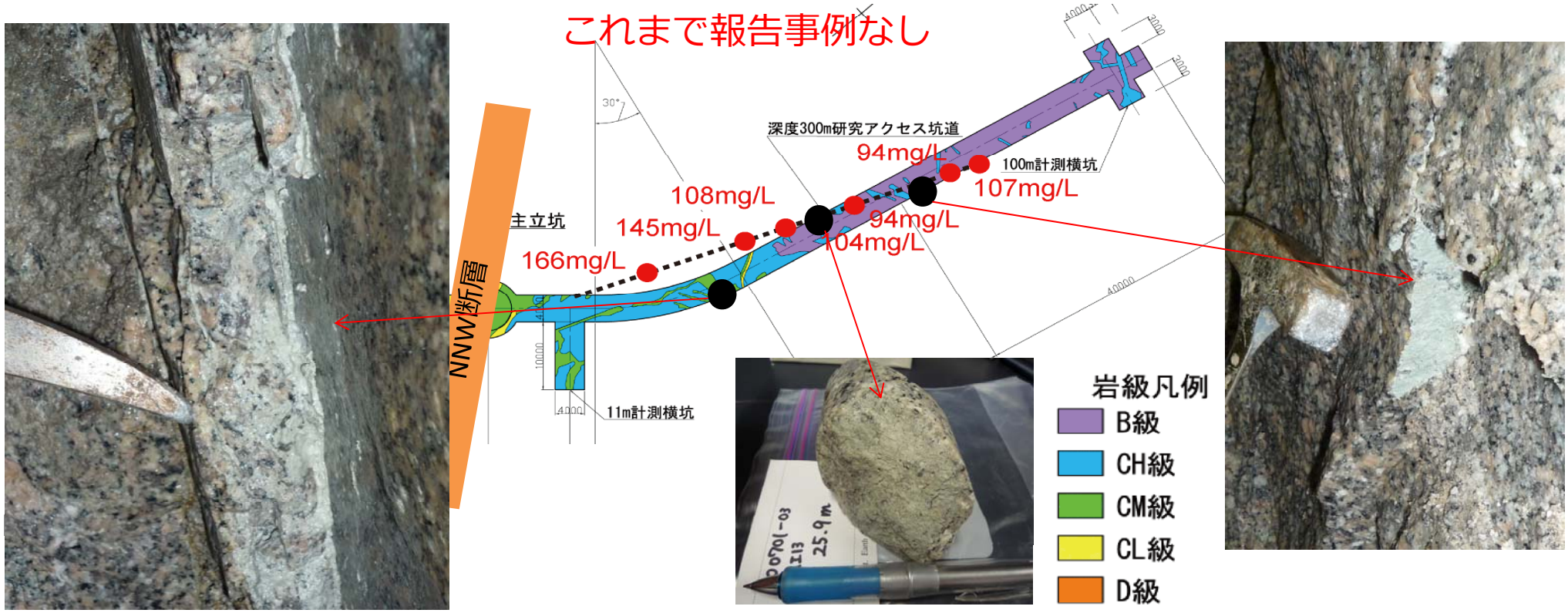


- 割れ目充填鉱物は、割れ目を生じた際の物理化学条件を反映する

吉田 (2012) 地学雑誌

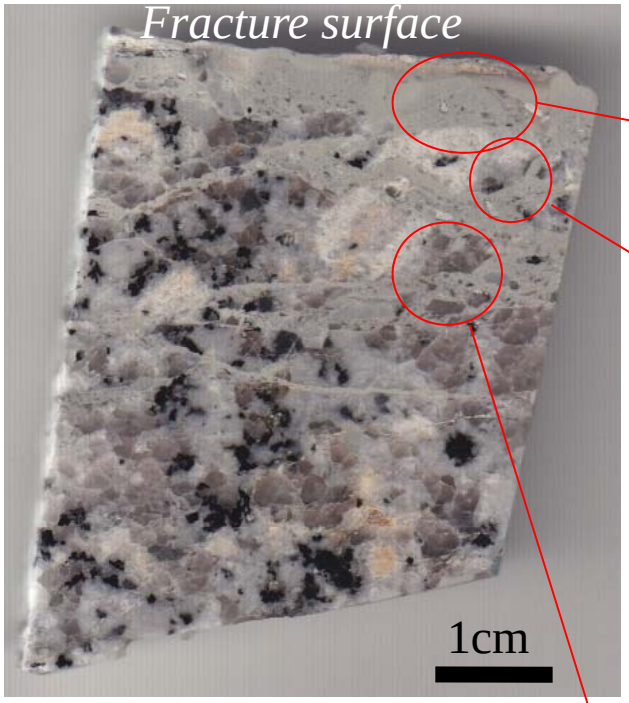
最新情報；粘土状充填鉱物を介在する透水性割れ目の詳細解析

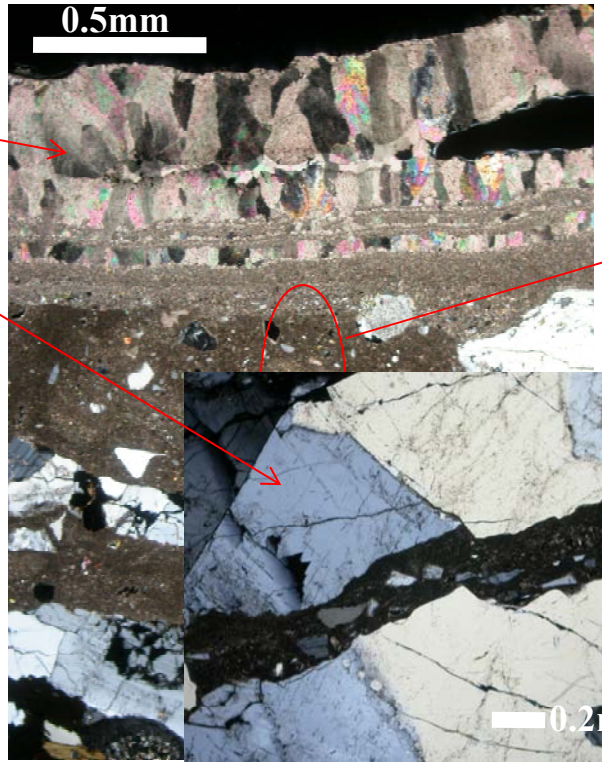
◆300mレベルでの粘土状の充填鉱物の確認 ➡ 当初、断層粘土あるいは断層破砕物と誤認

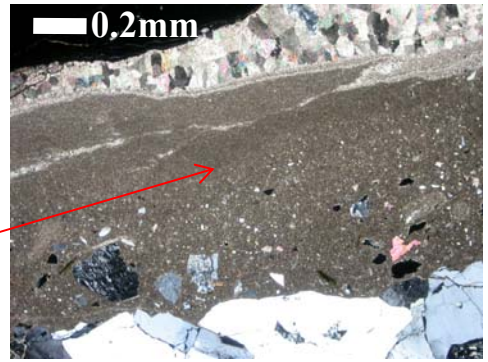


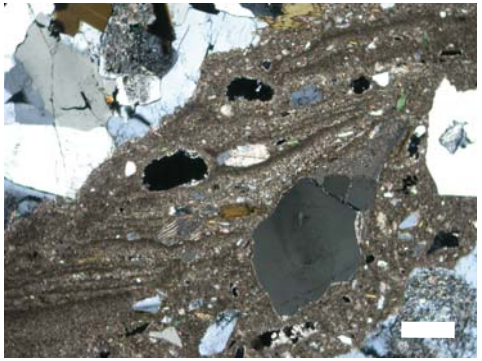
- 青灰色を呈してフィルム状に割れ目内を埋める
- 現在も透水性を有している
- 当初、ボーリングコアにおいても確認されていたがカッティングス等との認識

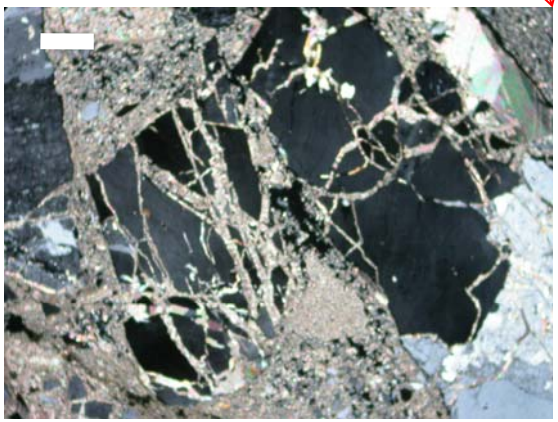
粘土状充填鉱物の産状

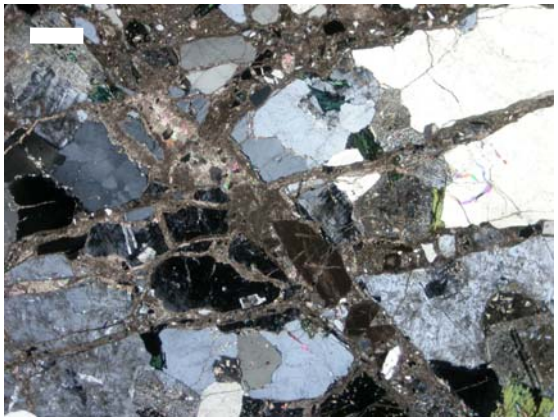












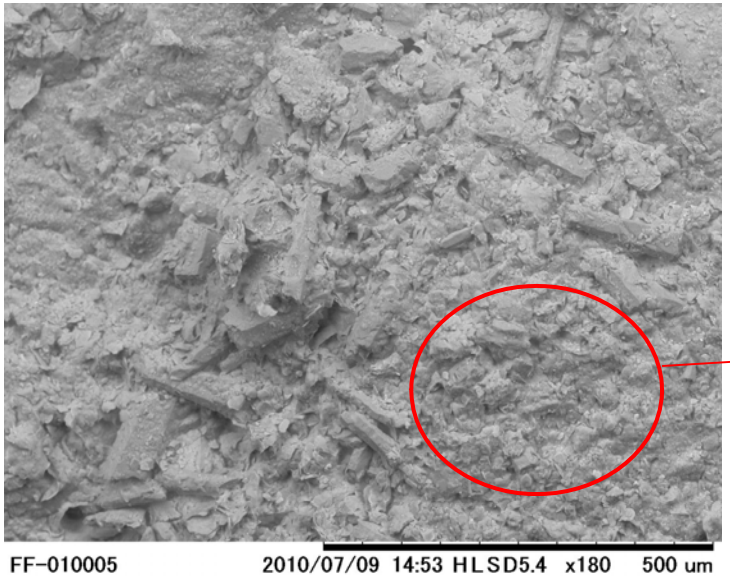
粘土充填割れ目の特徴

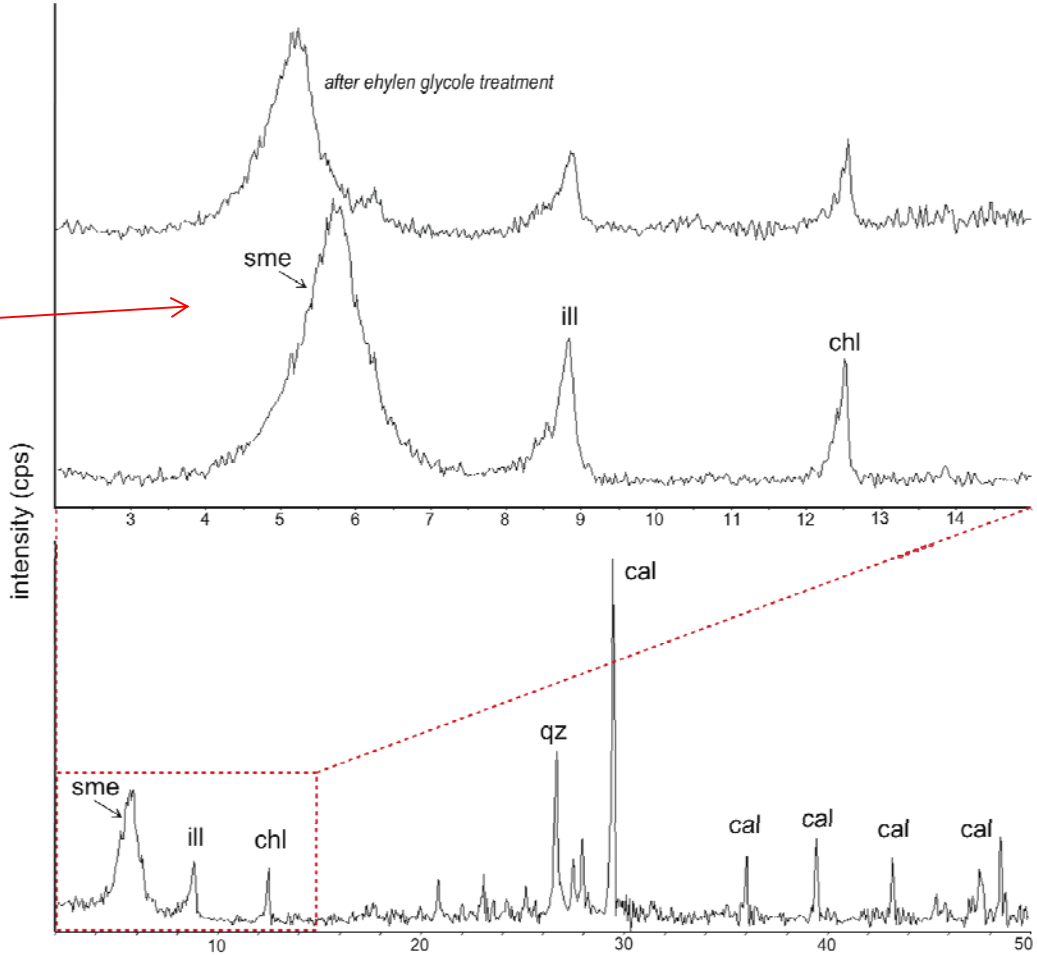
◆断層運動による破砕ではない

◆級下構造などの堆積性（流動に伴う）構造を伴う

◆‘圧入’に伴う構造を有する

粘土状充填鉱物の産状　*SEM & XRD*

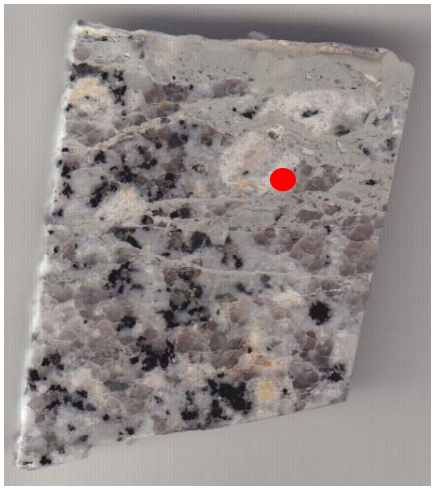


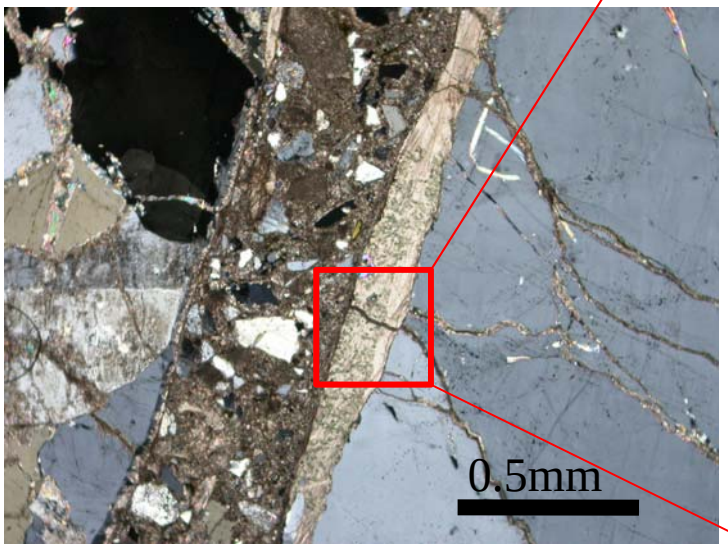


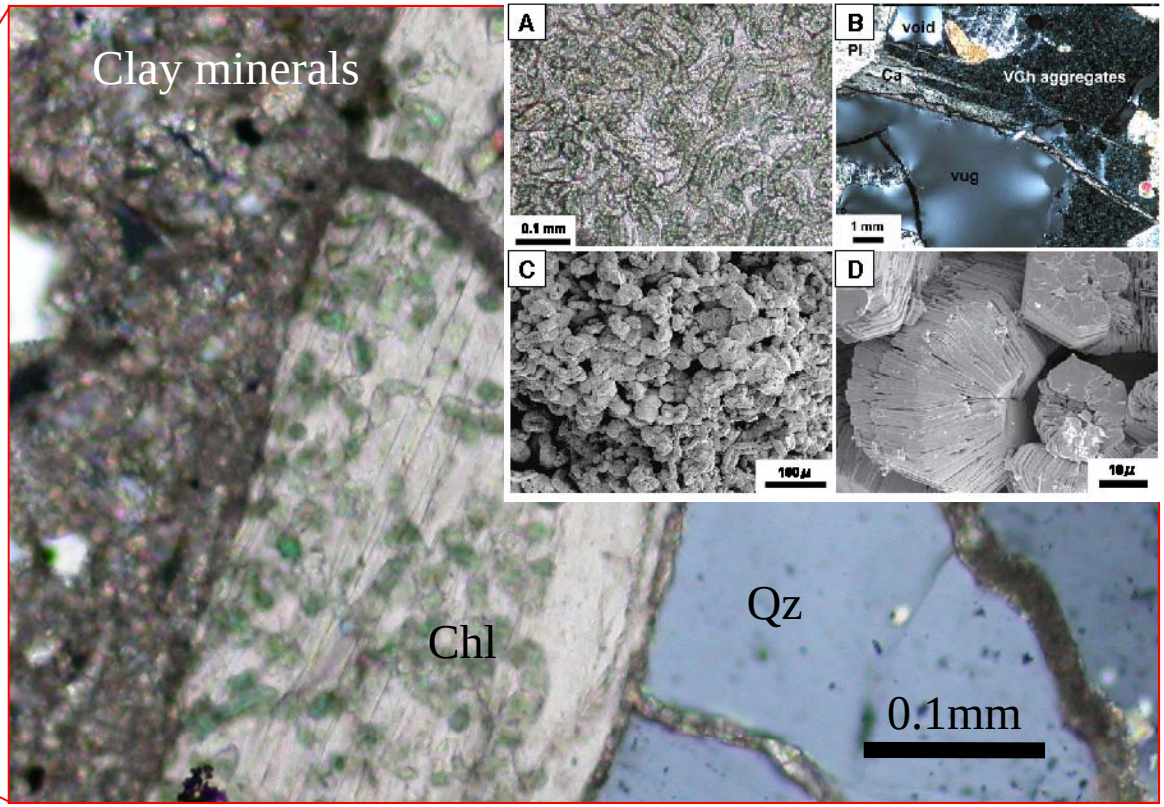
瑞浪超深地層研究所深度 300m 水平坑道で観察された土岐花崗岩中の割れ目充填白色粘土の粉末X線回折パターン

粘土状充填鉱物の形成履歴と形成年代の推定

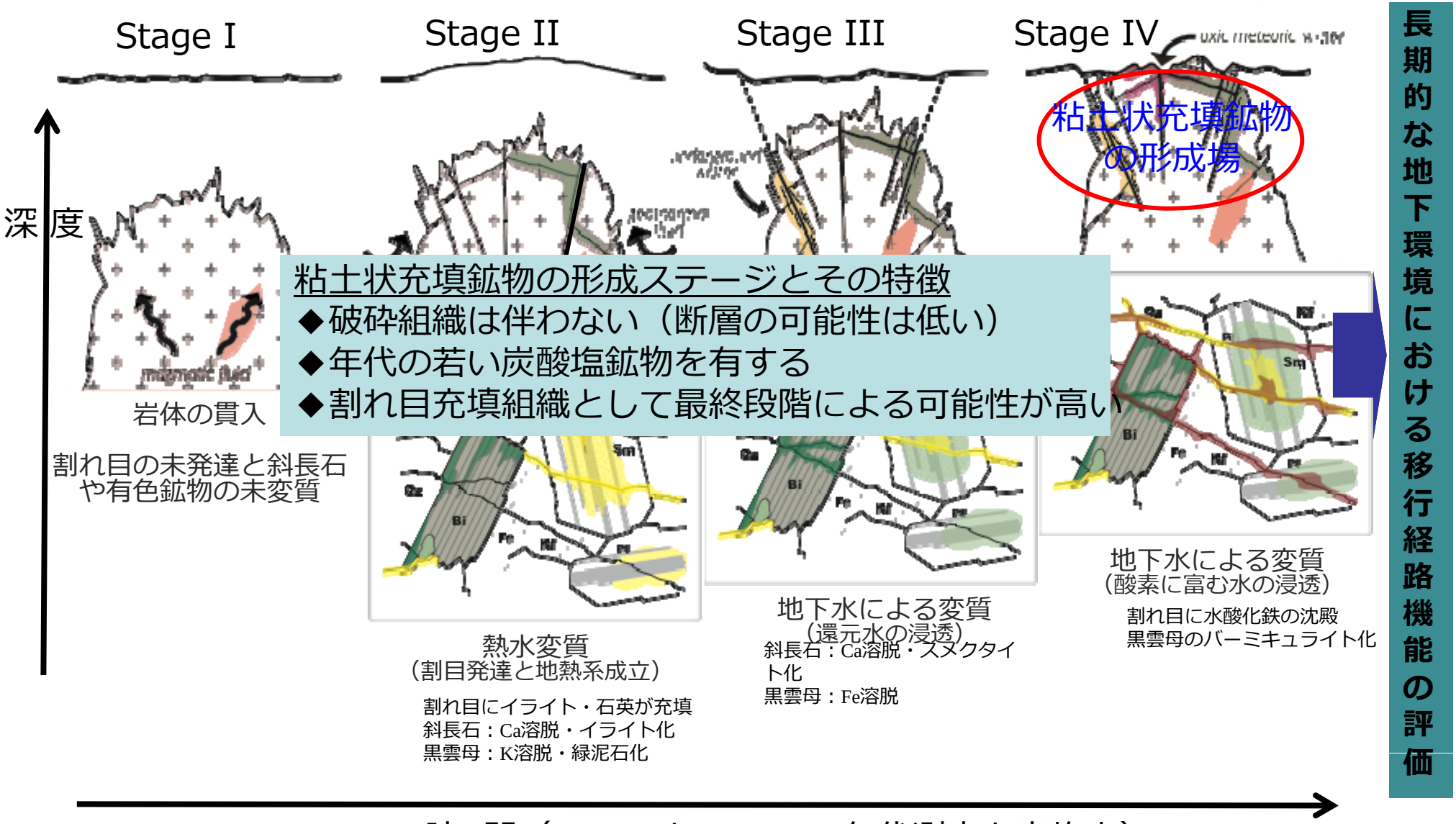
充填組織に見る形成順番
◆粘土（状）充填鉱物の充填は最も遅い時期と推定
◆粘土状充填鉱物中の炭酸塩鉱物に対してC-14年代測定を実施
　実施の背景：地下水との反応時期が推定可能では。。
　結果。。。　2~10pMC（地下坑道の５カ所の粘土状充填鉱物より）







変動帯結晶質岩中の透水性割れ目・変質形成モデル



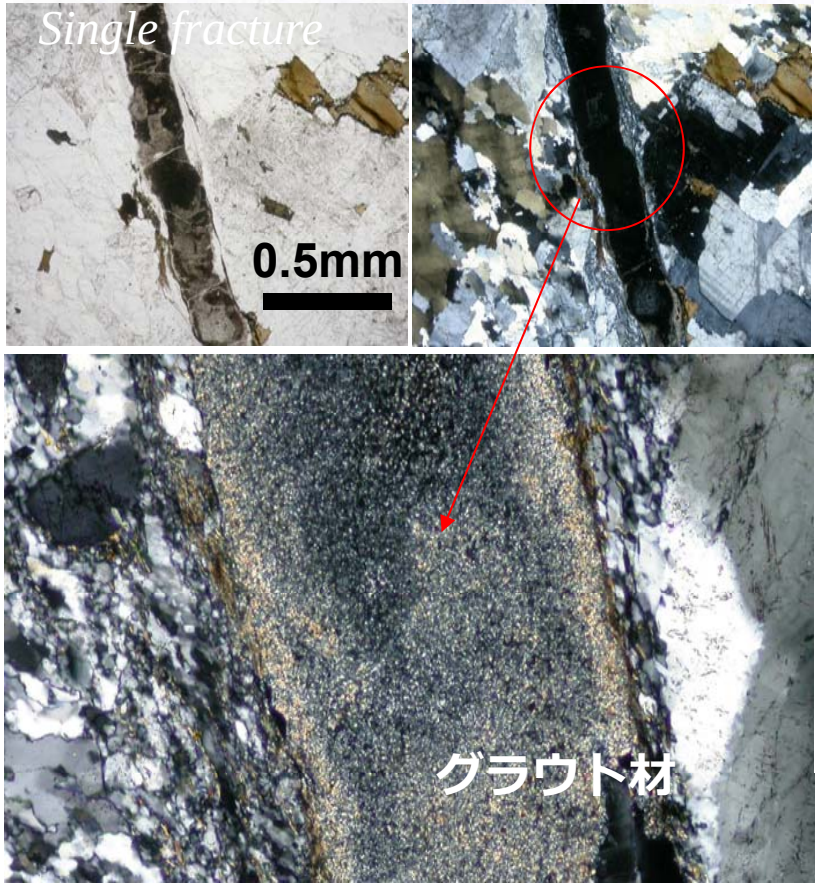
粘土状充填鉱物の形成ステージとその特徴

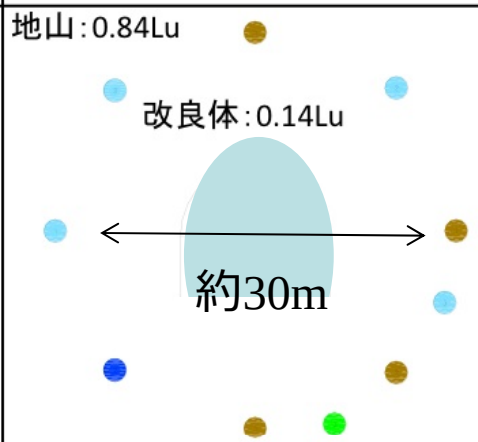
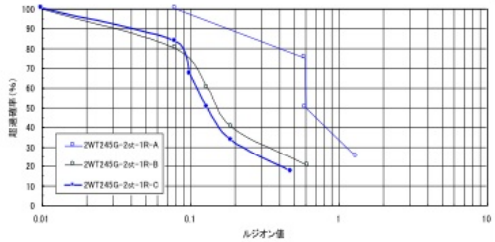
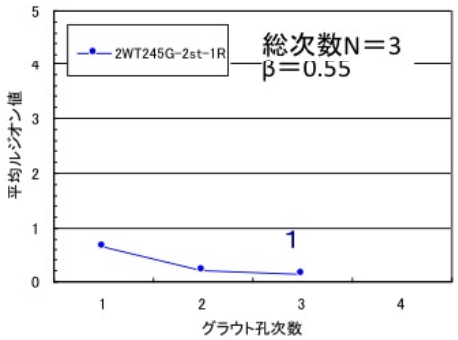
- ◆破砕組織は伴わない（断層の可能性は低い）
- ◆年代の若い炭酸塩鉱物を有する
- ◆割れ目充填組織として最終段階による可能性が高い

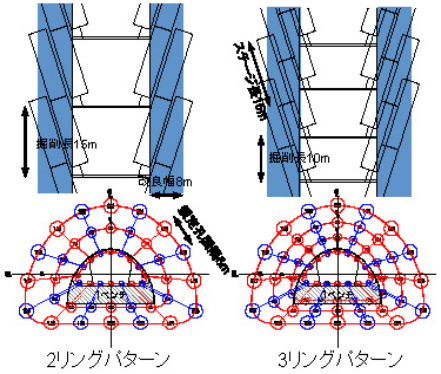
長期的な地下環境における移行経路機能の評価

工学への応用：地下環境における透水性割れ目湧水対策（グラウトの事

◆湧水量：50ℓ／分



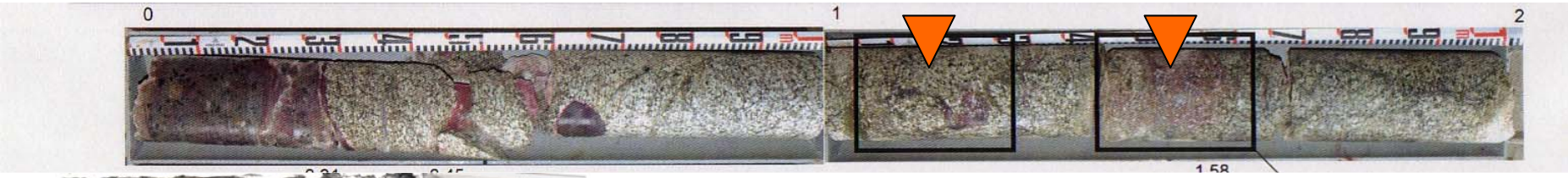
領 域	①一般部（断面A-A）
断面図	
超過確率図（ルジオン値）	
次数低減図（ルジオン値）	

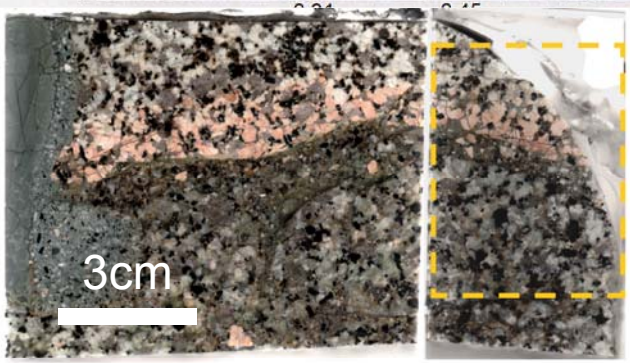


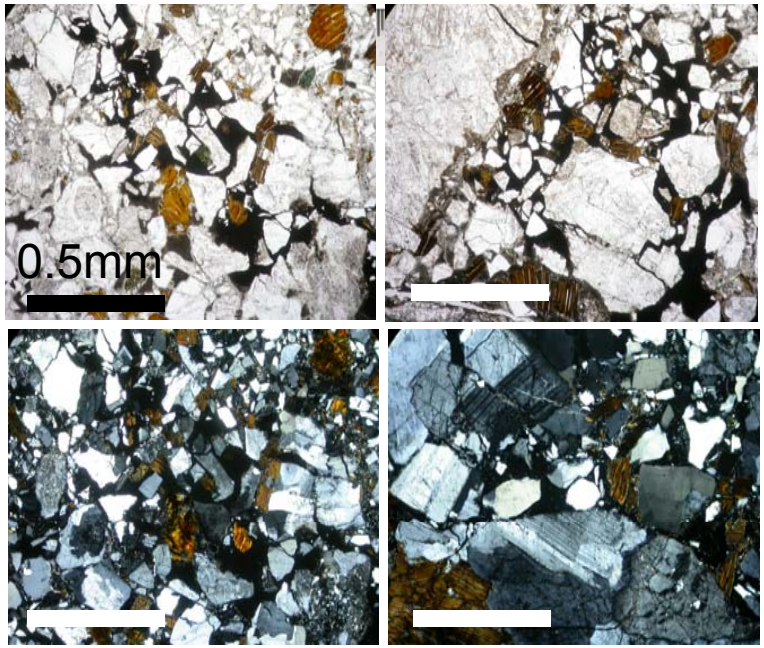
通常の止水グラウト
◆長さ約30m
◆数m~10m間隔/本

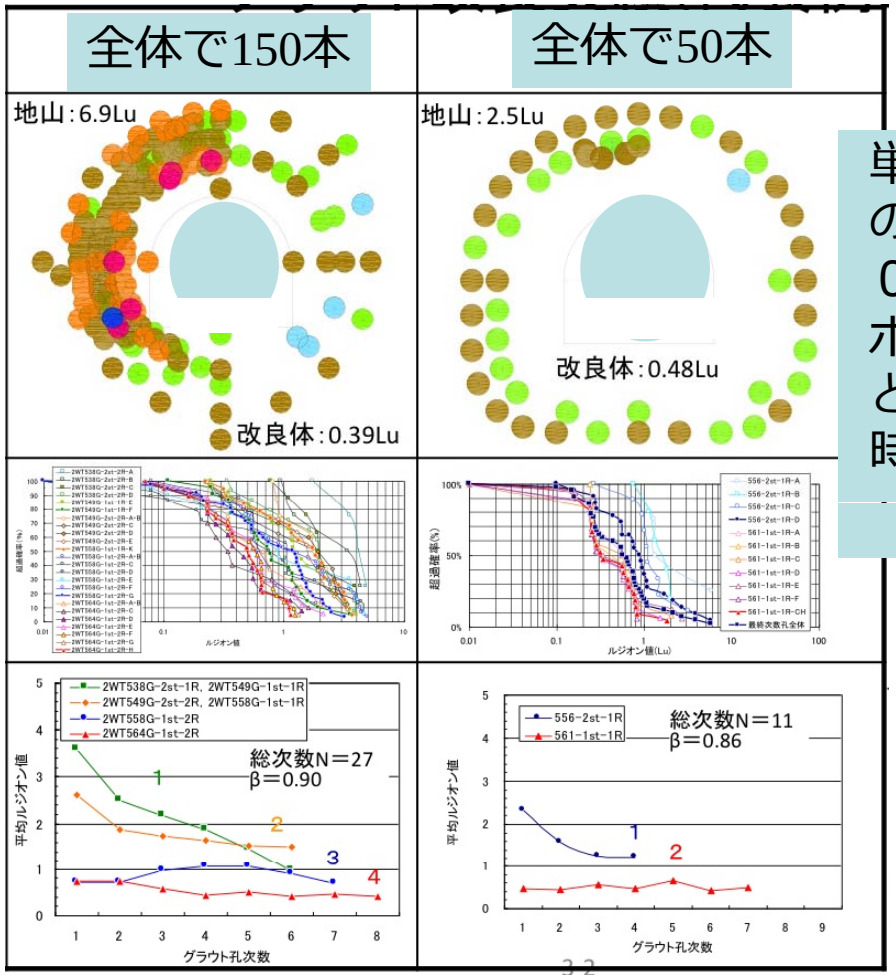
全体で約10本程度が平均的

粘土状充填鉱物を有する場合の施工事例



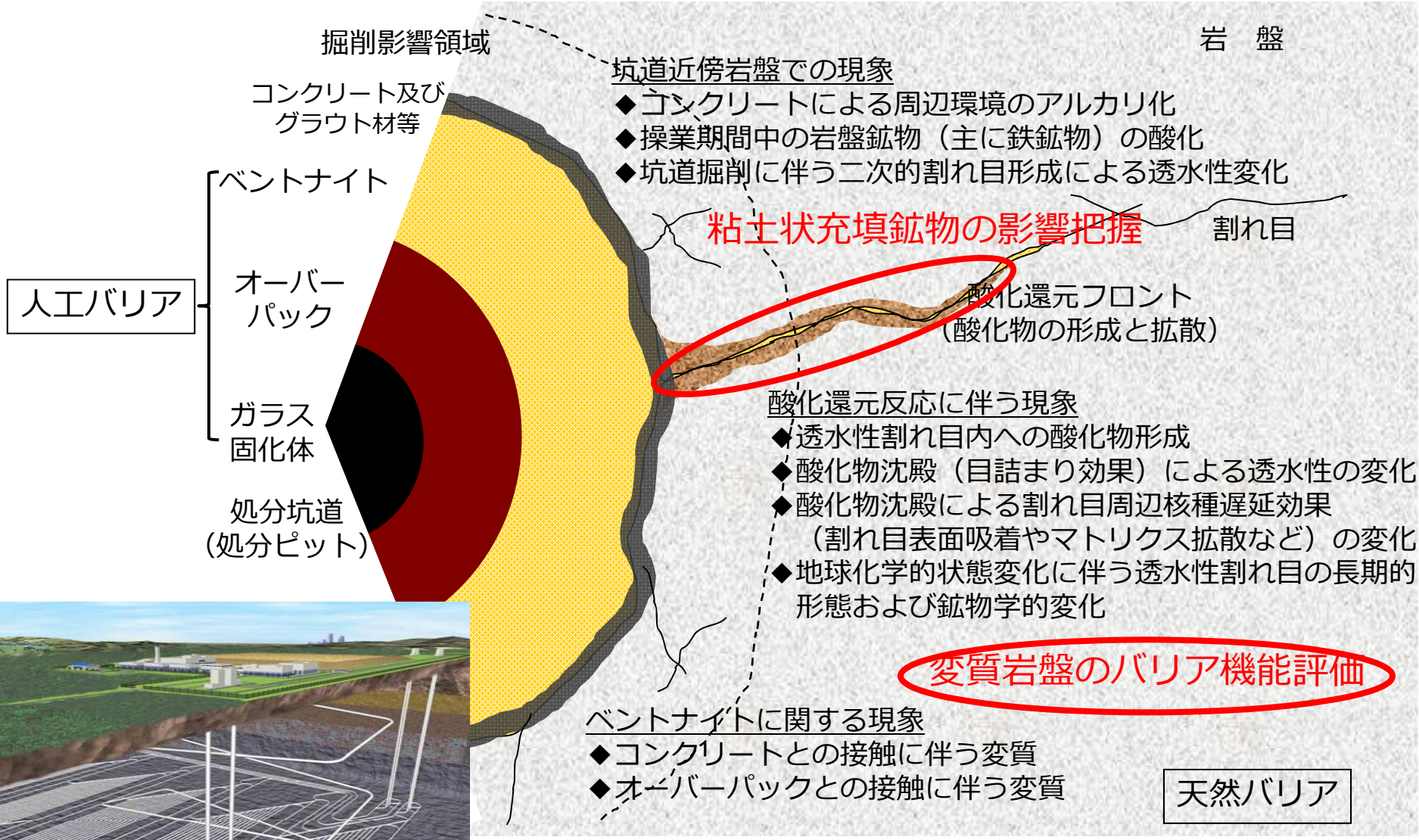




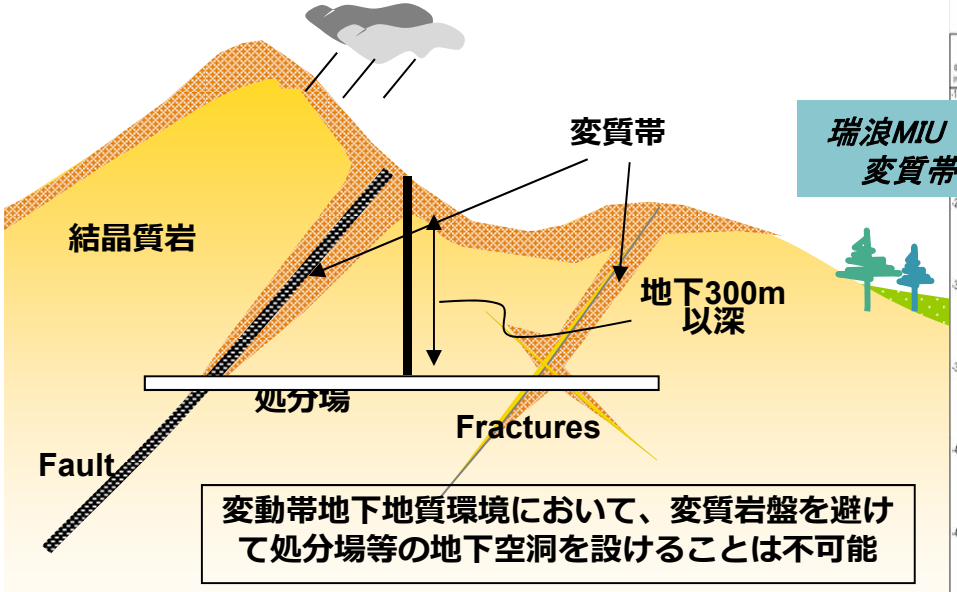


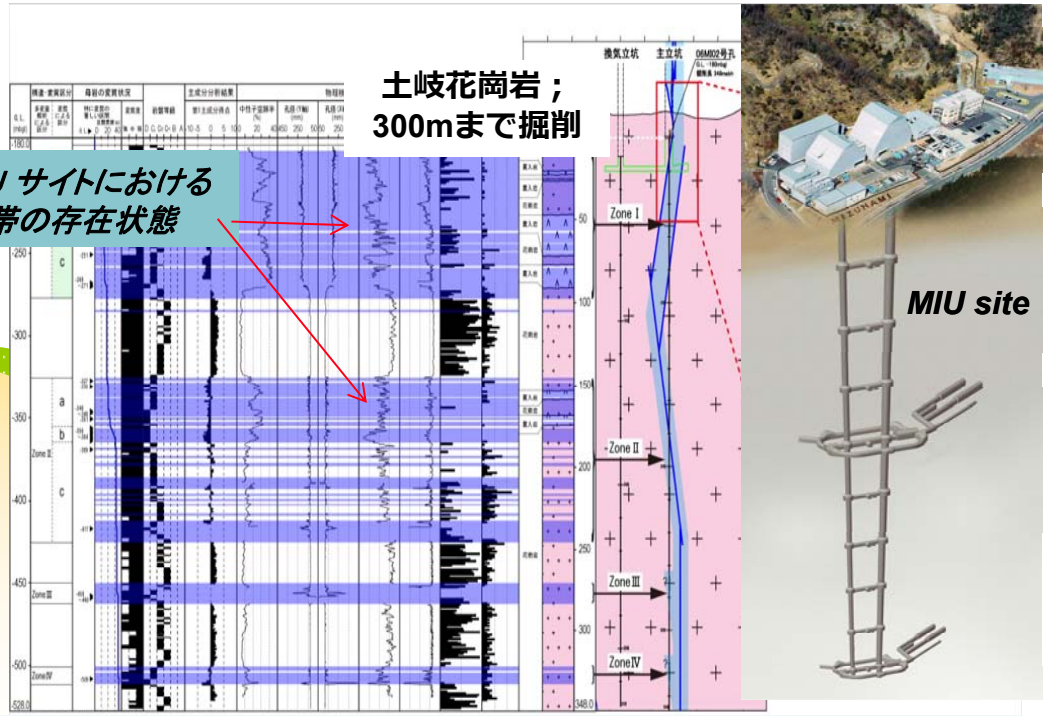
単一割れ目の約５～１０倍以上のボーリングと掘削等の時間を必要とする

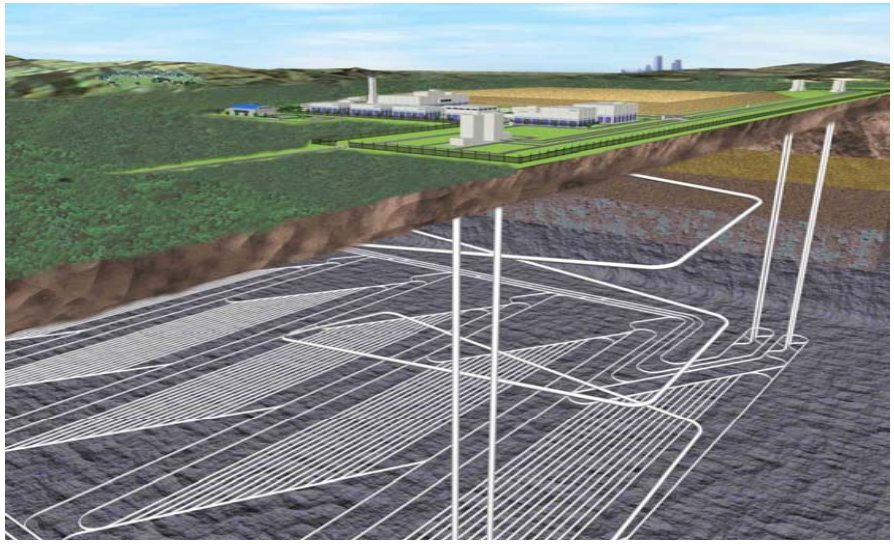
ニアフィールド周辺岩盤における物質移動と地球化学的反応プロセスとの相関



変動帯結晶質変質岩盤とバリア機能の評価







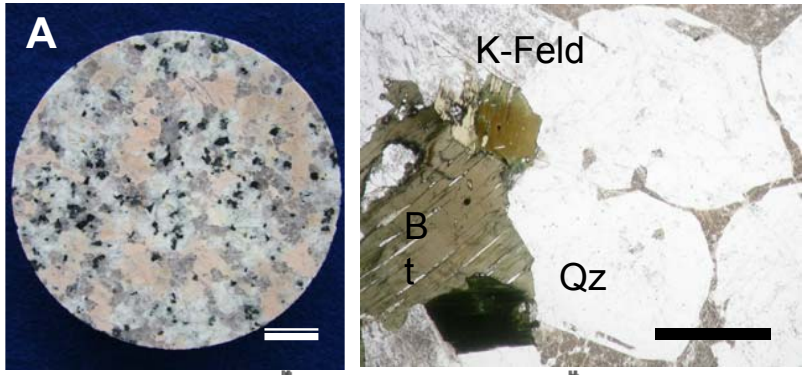
Conceptual view of panel allocation

地下岩盤において必ず変質帯に遭遇する以上、変質岩盤が有する物質移動の遅延機能（天然バリアとしての働き）を評価することは不可欠である

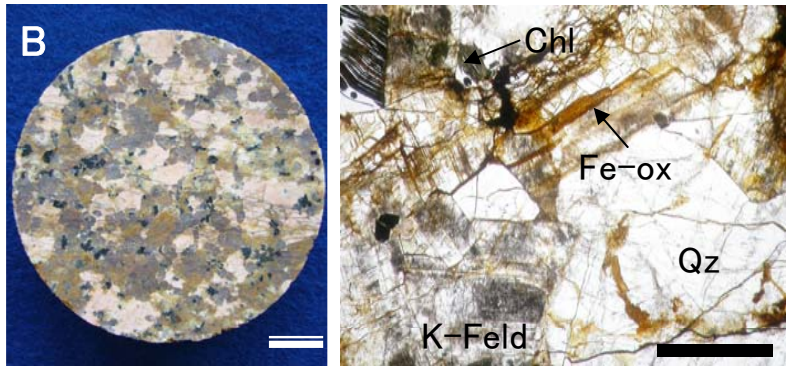
将来の処分場において、変質岩盤を天然バリアの一部として新鮮な岩盤同様に扱うかどうかで処分場パネル等のレイアウトにも影響を及ぼす可能性有り

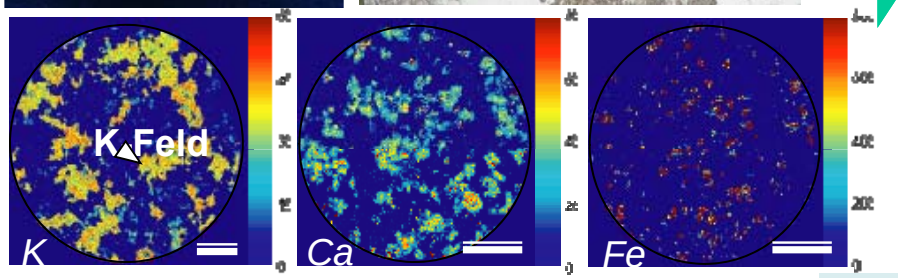
新鮮岩盤 vs 変質岩盤（鉱物・組織・物性）

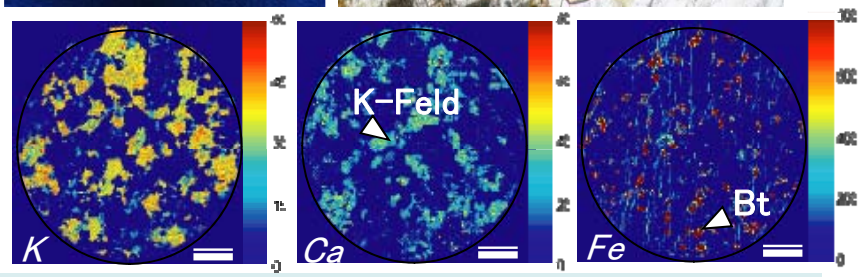
新鮮 Gr.

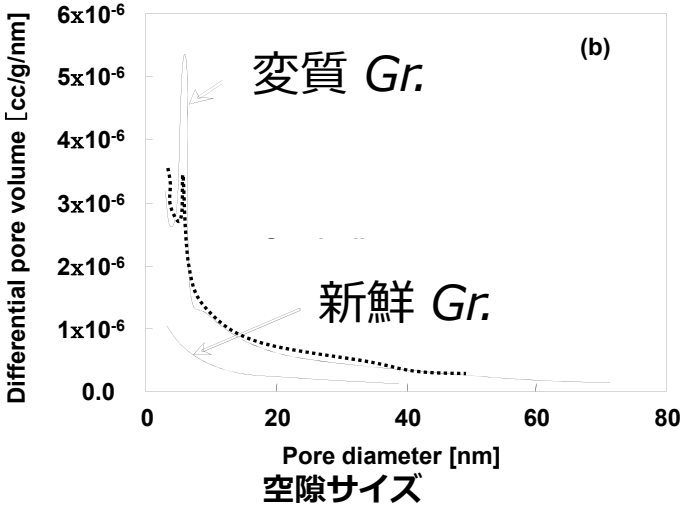


変質 Gr.









◆ マイクロフラクチャーの形成／発達
◆ 鉱物の溶解あるいは二次鉱物の沈殿(K, Ca, Fe-ox)

	Density /g cm^{-3}	Porosity (%)	Specific surface area/m^2 g^{-1}	Adsorption capacity (STP)/cm^3 g^{-1}	Average of pore diameter/nm
Fresh G.	2.58	0.7	0.064	0.015	10.9
Altered Gr	2.55	1.8	1.3	0.293	12.7

各種物性値(比重、空隙率、比表面積、平均空隙孔サイズ)

Yoshida et al. (2009) Engineering Geology

新鮮岩盤 vs 変質岩盤（吸着能による評価；Cs）

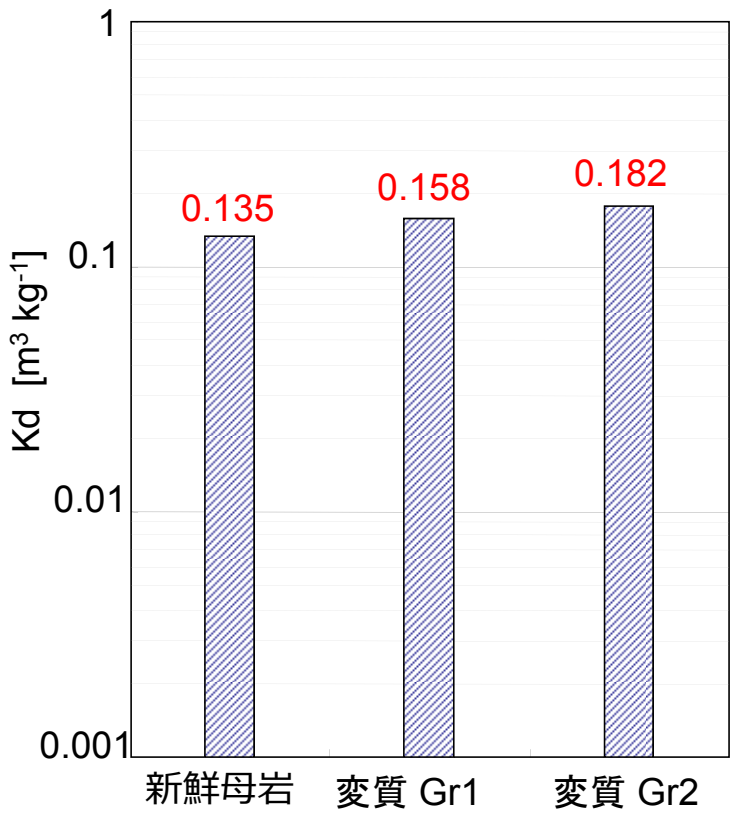
新鮮 *Gr.*

変質 *Gr.*

Grain size
<100um

吸着試験に用いた溶液の成分・試験条件	[mol L^{-1}]
Cs	1.0×10^{-5}
$NaHCO_3$	3.6×10^{-3}
$CaSO_4 + 5H_2O$	1.1×10^{-4}
KCl	6.2×10^{-5}
$MgSO_4$	5×10^{-5}
試験溶液 pH	8.5
試験の固体／液体比	10 cm^3 g^{-1}
試験に用いた容器	30 mL of Poly(propyrene) bottle
吸着試験期間（日）	109 days with shaking
試験温度（K）	298 K

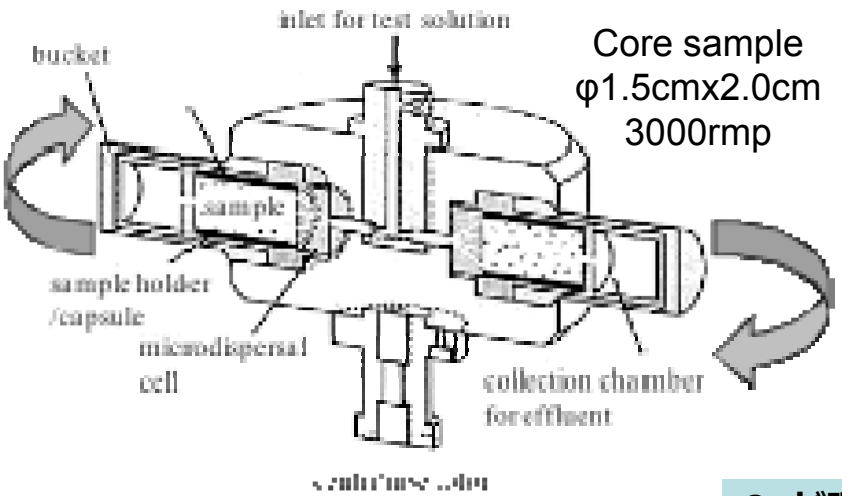
バッチ式吸着試験の諸条件



Csを用いた吸着試験結果

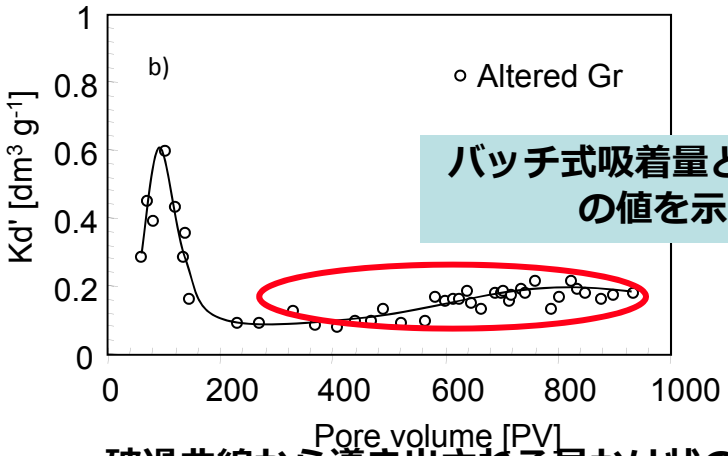
新鮮母岩と変質岩石の吸着能に大きな相違は見られない（変質岩盤の方が吸着機能の高い場合も考えられる）

新鮮岩盤 vs 変質岩盤（透過試験による吸着能評価；Cs）



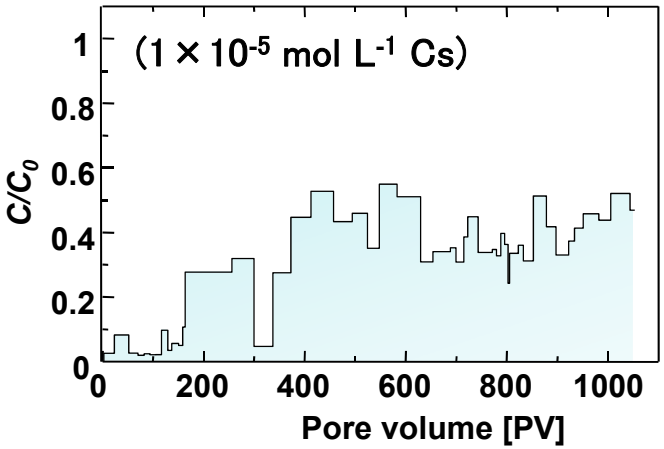
Core sample
φ1.5cmx2.0cm
3000rmp

円心機を用いた加速透過試験装置



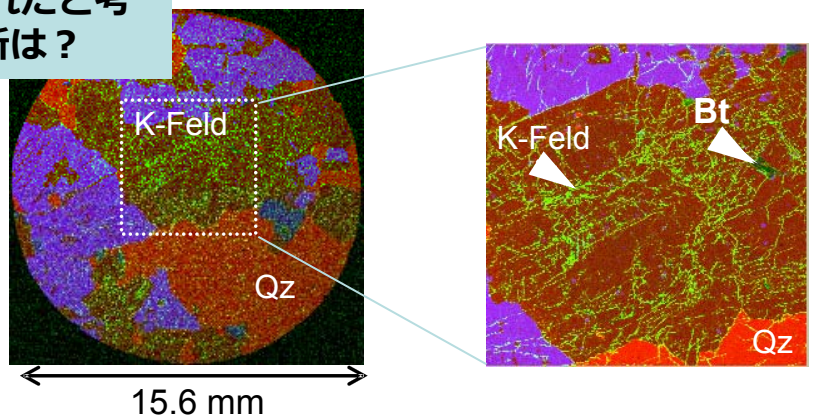
バッチ式吸着量とほぼ同等の値を示す

破過曲線から導き出される見かけ状の吸着能（Kd'）



加速透過試験機を用いた変質花崗岩のCsの吸着試験

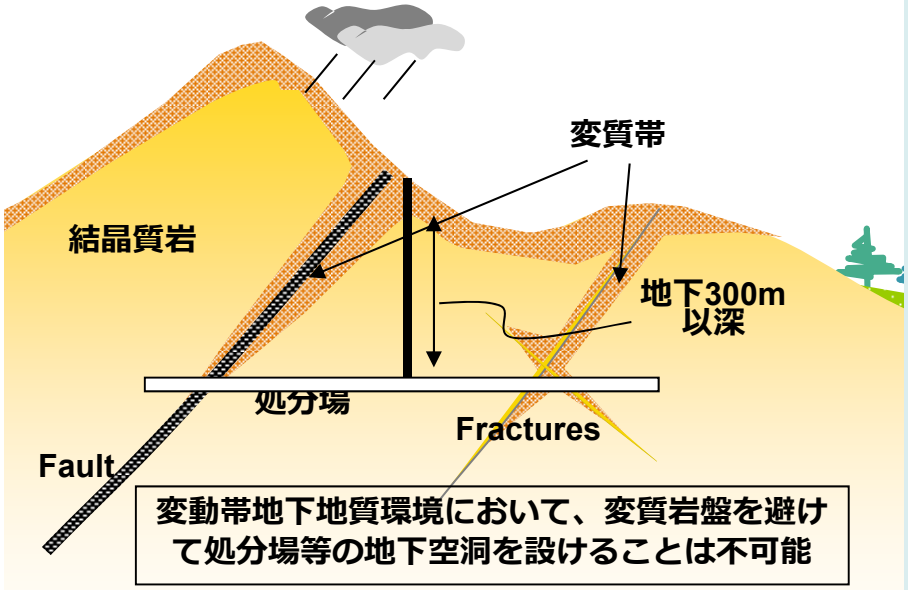
Csが吸着されたと考えられる場所は？

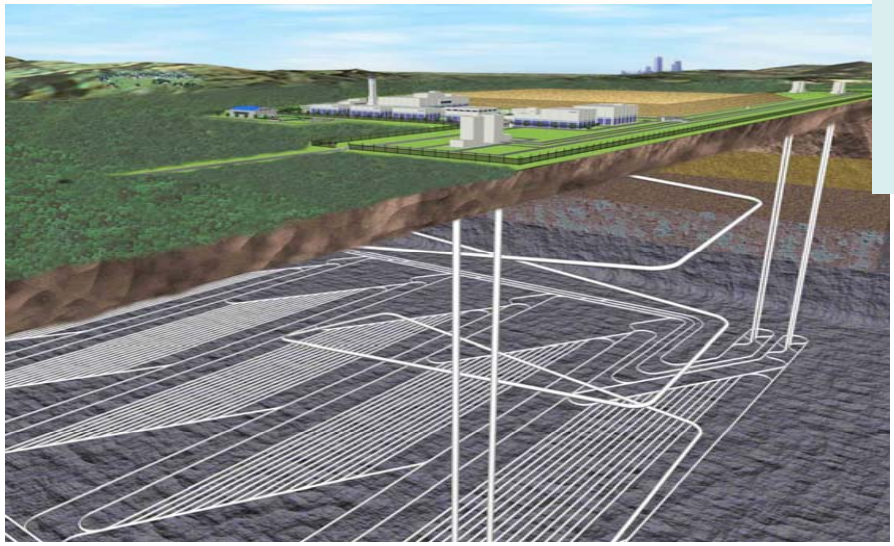


EPMAによって確認した変質岩盤中の微小空隙構造。タングステン溶液を円心機を用いて岩石内部に浸透させた後に、薄片を作成し、内部空隙構造を同定したもの。 矢印の部分により多くのタングステン溶液が能集。($3Na_2WO_4 \cdot 9WO_3$; sodium metatungstate solution).. K-Feld;Potasium-Feldspar, Qz;Quartz, Bt;Biotite.

(After Yoshida et al., 2009)

物質移動の観点からみた地下環境の機能（結晶質岩の場合）





Conceptual view of panel allocation

変動帯結晶質岩の断層・割れ目特性

◆断層：隆起とともに断層ガウジが発達
⇒必ずしも「水みち」となるわけではない

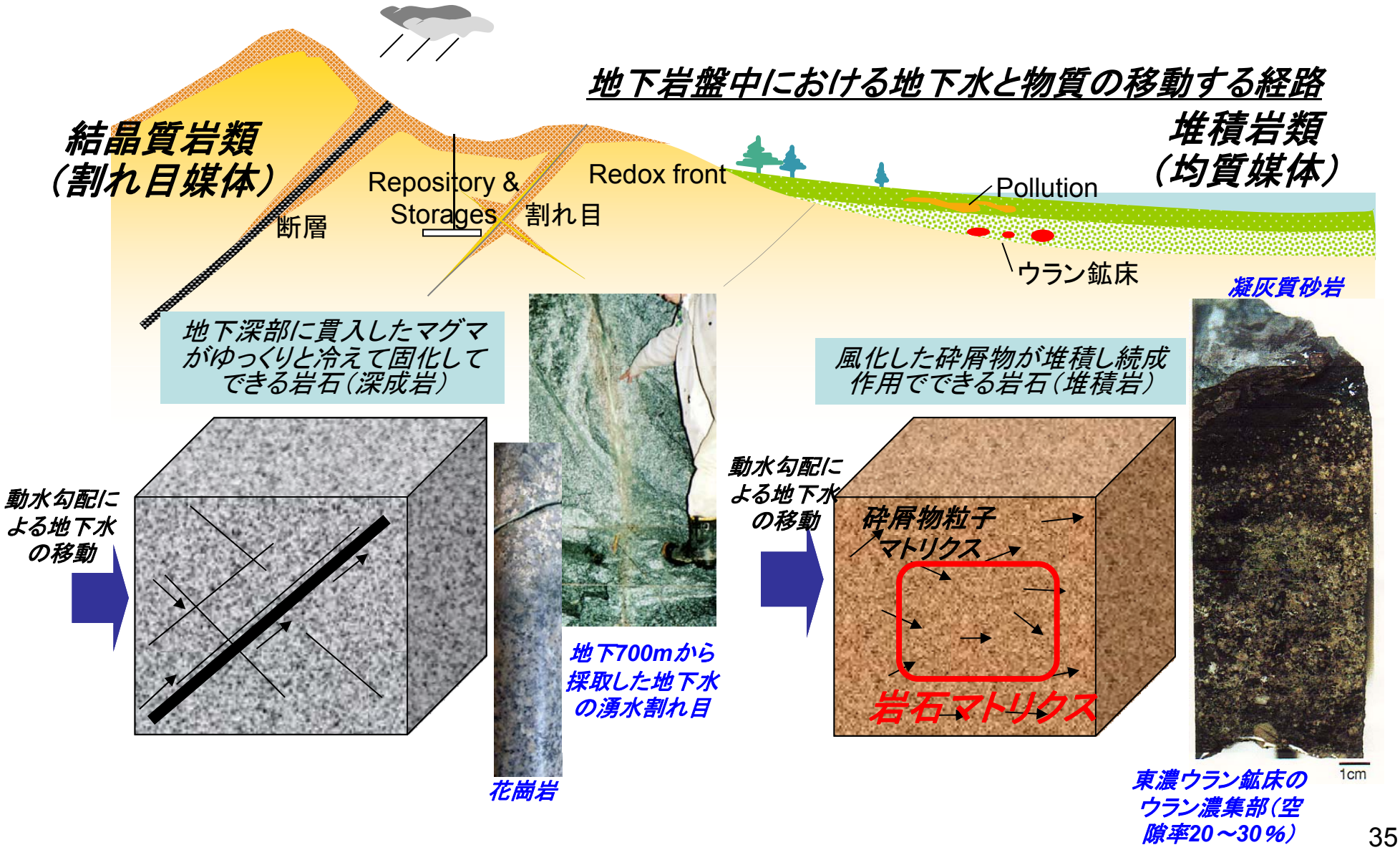
◆割れ目：バックグランド割れ目の発達
⇒単一割れ目が平均１～２本／mの割合で存在
（欧米の安定陸塊は日本の約１／１０）
⇒割れ目密度はあまり変化しない
（初期段階に形成された割れ目に依存）

◆隆起に伴う応力解放とサンドイッチ状充填鉱物の形成／シーリング
⇒安定陸塊に比して相対的に早い隆起速度による開孔割れ目の形成

◆変質地下岩盤（母岩）の普遍的存在

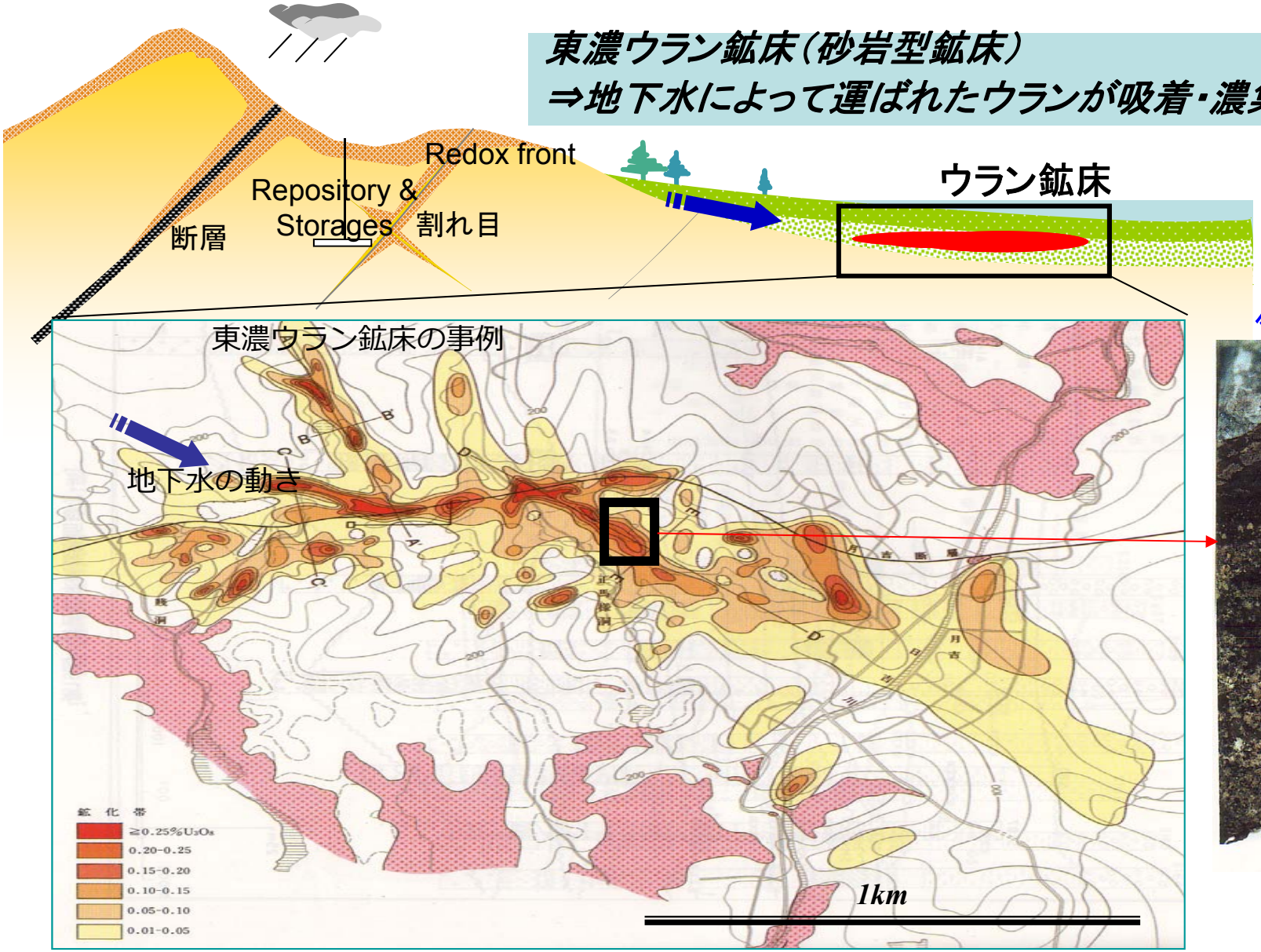
◆変動帯地質環境で育まれてきた結晶質岩体としての特徴
◆現在の状態を指標とした長期的安全評価のフレームワークが維持可能であることを示唆

地下環境と物質移動（岩石マトリクス／鉱物粒界における物質移動）



岩石マトリクス中の物質移動アナログ（ウラン鉱床を活用した物質移動の理解）

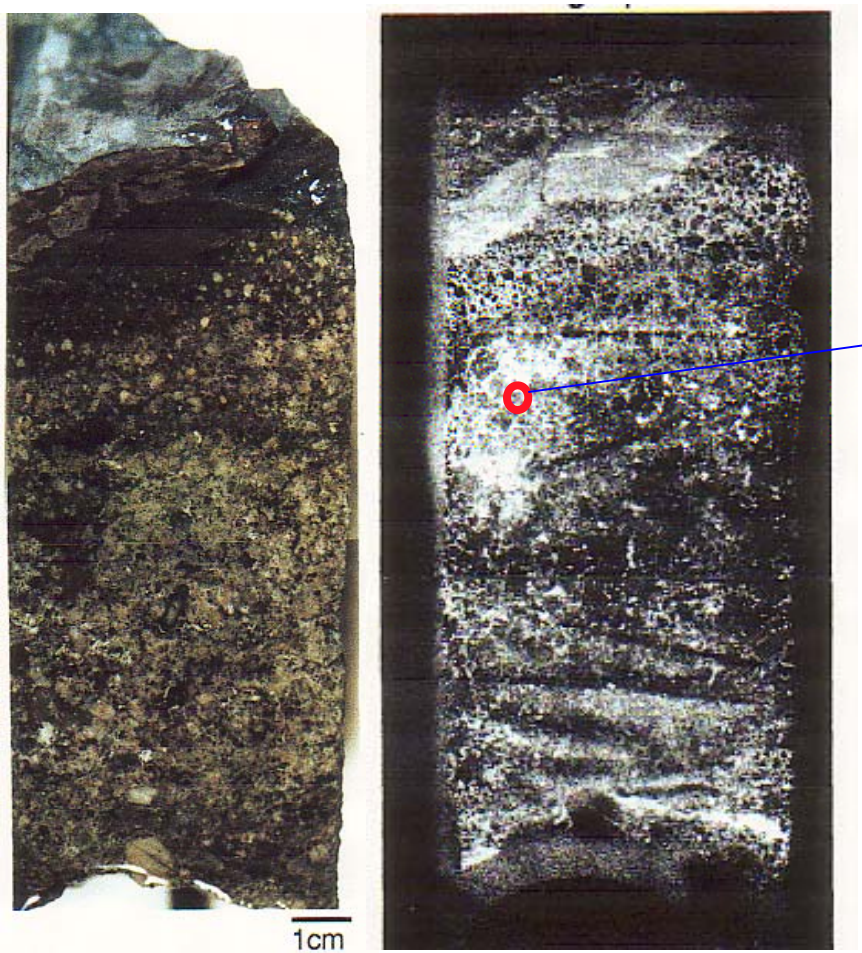
東濃ウラン鉱床（砂岩型鉱床）
⇒地下水によって運ばれたウランが吸着・濃集した鉱床



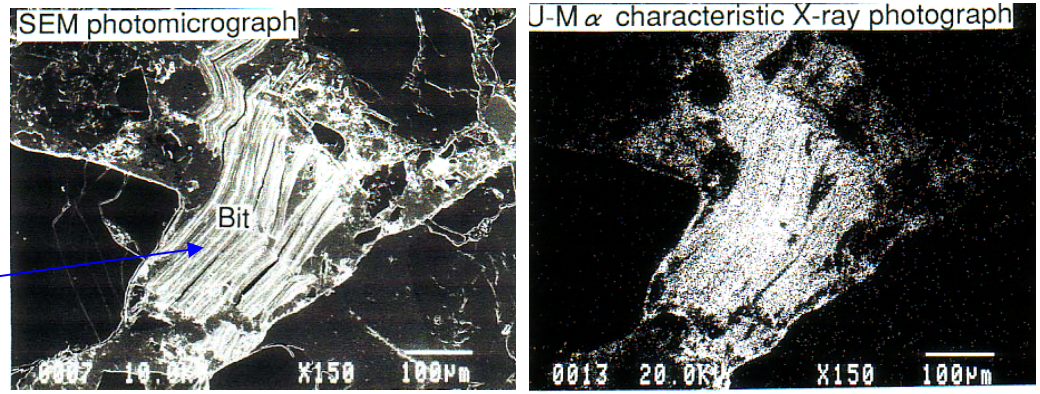
凝灰質砂岩

ウランの吸着・濃集状態（岩石マトリクスと濃集の相関）

ウラン鉱床を用いた研究の結果から言えること..



ウラン濃集部分：オートラジオグラフ
（白い部分がウランの濃集ケ所）

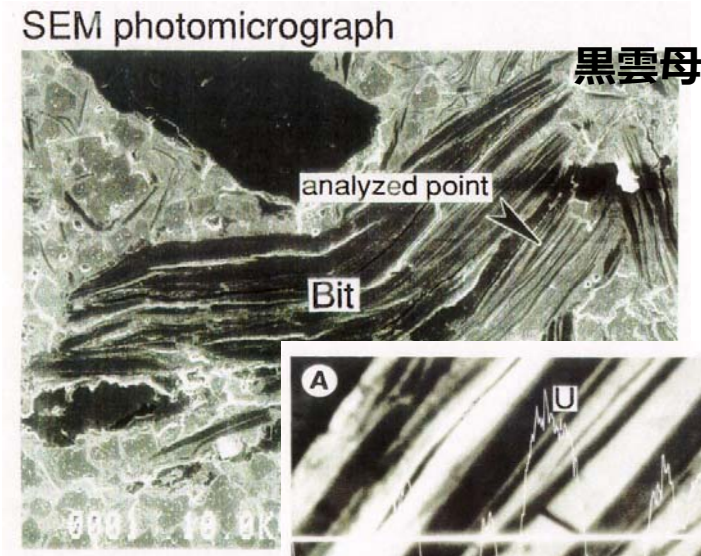


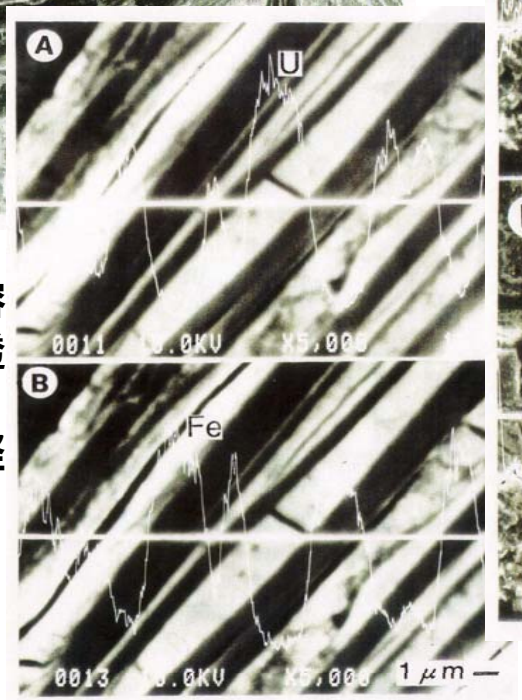
<u>調査・分析結果</u>

微小領域の分析結果から、鉄を多く含む鉱物（黒雲母や黄鉄鉱）に選択的に濃集し、顕著な二次的な移動は生じていないことがウラン系列核種の放射非平衡分析から示される（地層の核種固定機能）

ウランの吸着・濃集状態（鉱物と濃集の相関）

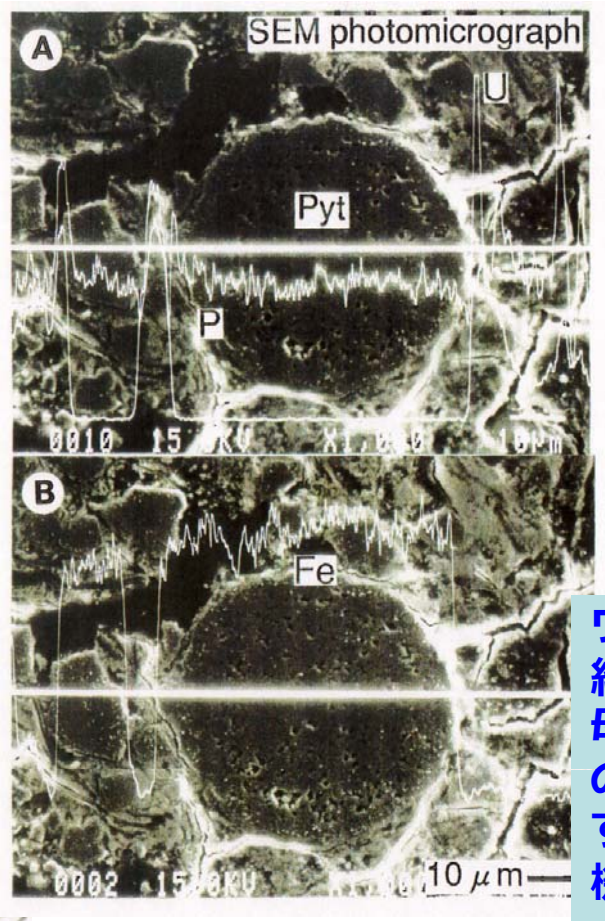
ウラン濃集状態（天然環境では酸化還元反応に伴うウランの濃集プロセスが重要となる）

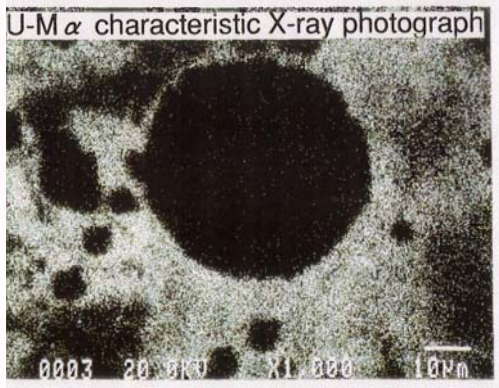




黒雲母のへき開にそって、地下水に溶解したウランが浸透し、黒雲母のFeとの酸化還元反応を経て沈殿／濃集

球顆状黄鉄鉱





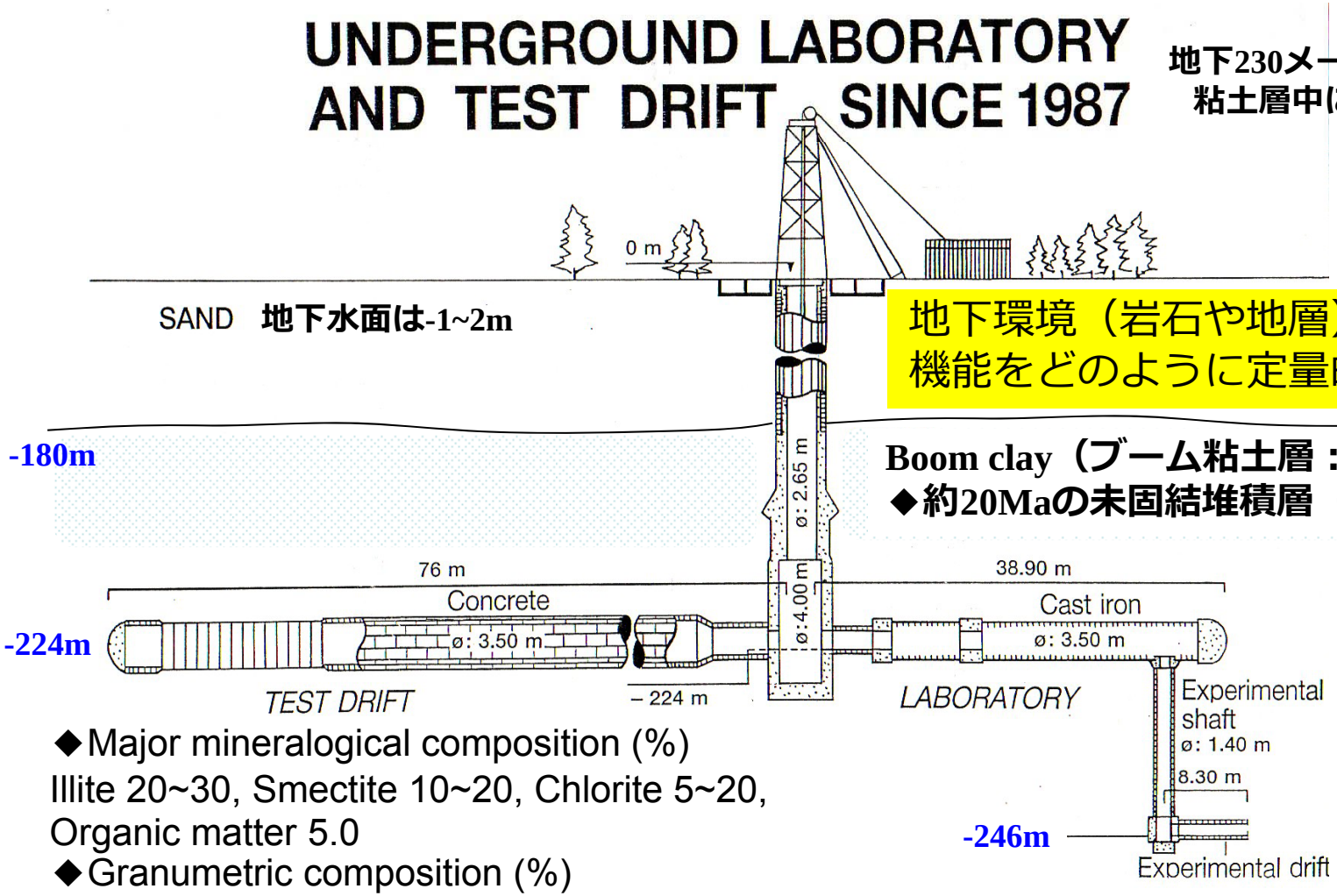
球顆状黄鉄鉱が形成されるときの酸化還元反応に伴って沈殿／濃集

ウラン鉱床を用いた研究の結果から言えること..黒雲母や粘土鉱物、鉄鉱物などの堆積岩中に普遍的に存在する鉱物が吸着素材として機能していること

核種吸着・遅延機能をどのように定量的に評価するか？

天然バリア機能を把握するための核種移行原位置試験

ベルギー・モル原子力研究所（1980年代初めから建設）

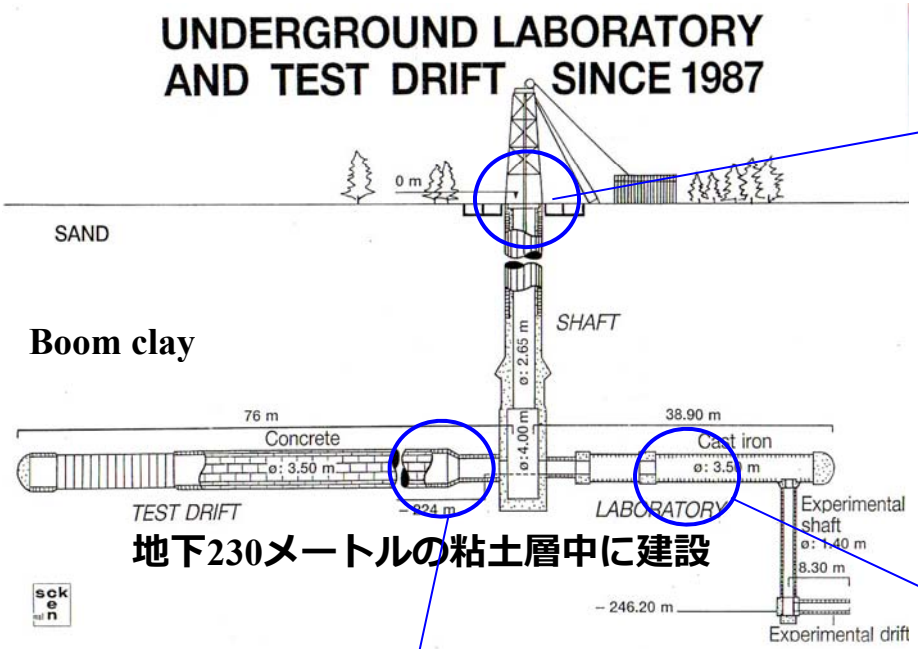


地下環境（岩石や地層）の持つ核種隔離機能をどのように定量的に評価するか？

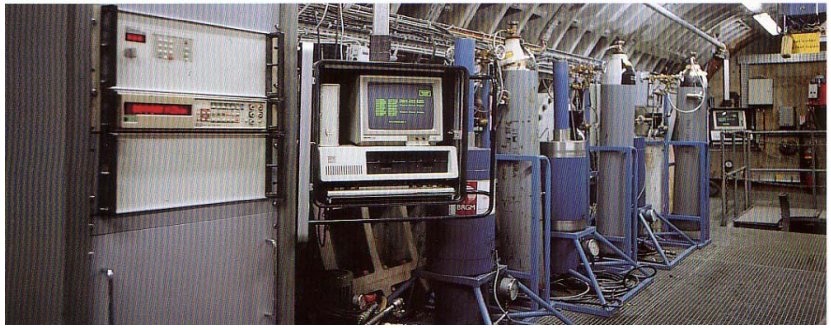
◆Major mineralogical composition (%)
Illite 20~30, Smectite 10~20, Chlorite 5~20,
Organic matter 5.0
◆Granumetric composition (%)
<2μm 50~60， 2μm<d<60μm 40~45，>60μm 2~8
◆Hydraulic conductivity 4×10^{-12} m/s
◆Porosity 30~40 %

ベルギー・モル地下研究所原位置試験研究

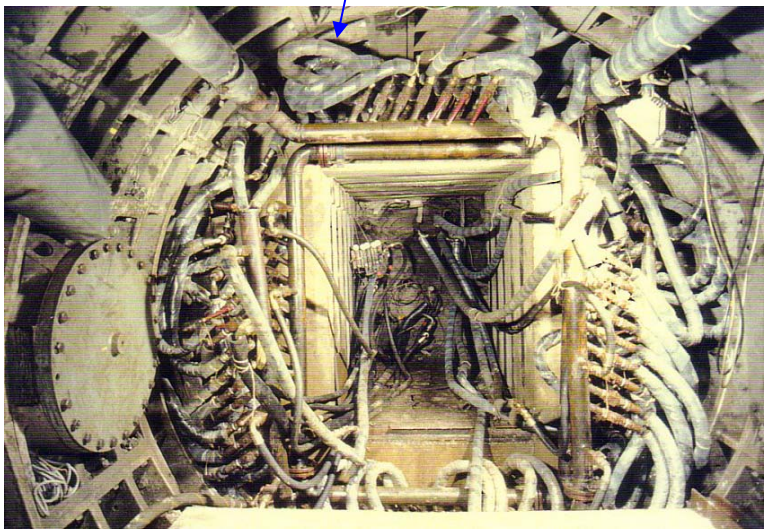
シャフト部分



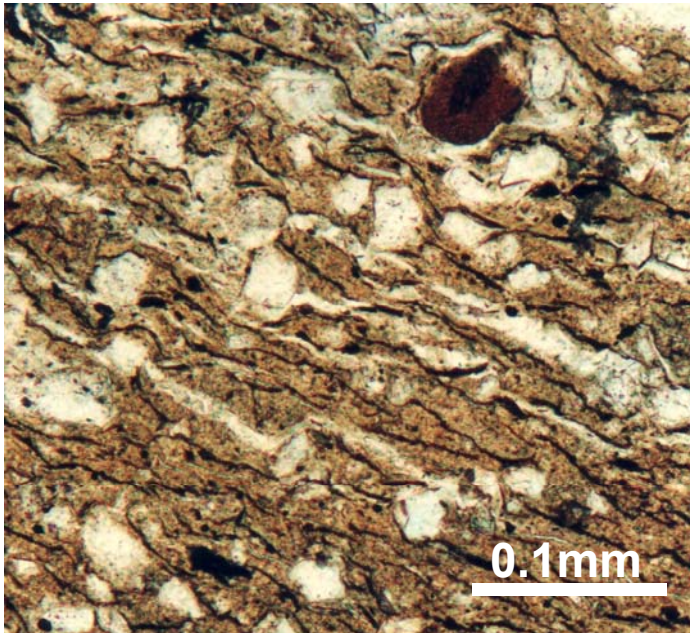
地下230メートルの粘土層中に建設



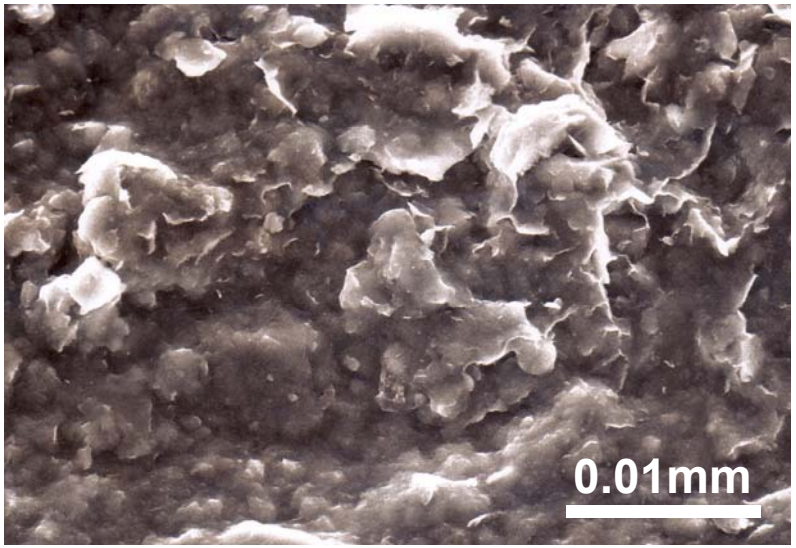
凍結工法による掘削

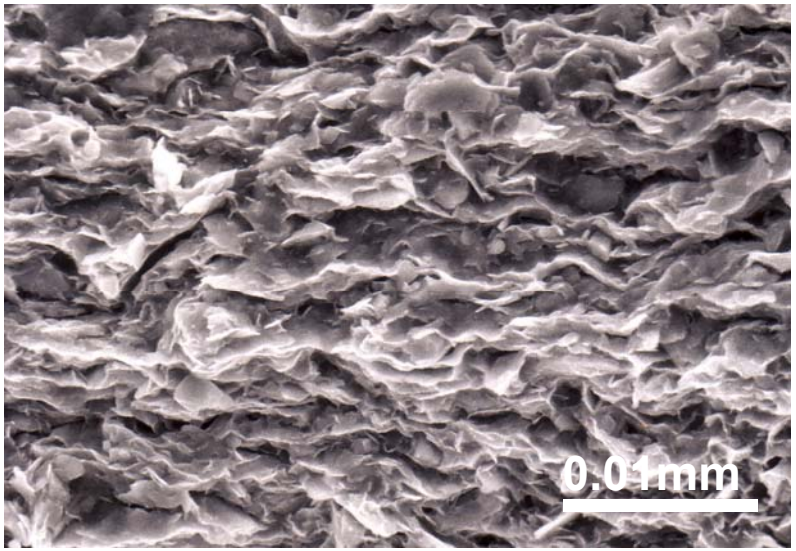


*Boom clay*の堆積学的特徴



Chemical composition (%)
SiO_2 60, Al_2O_3 15, Fe_2O_3 5.0, K_2O 3.0,
CaO 0.7, Na_2O 0.5, MgO 1.3, TiO_2 0.8
Loss of weight at 1000℃ 10.0
Organic matter 5.0
Porewater chemistry pH=8.5-9.0, Eh=~-250mV
Major mineralogical composition (%)
Illite 20~30, Smectite 10~20, Chlorite 5~20
Granumetric composition (%)
<2μm 50~60, 2μm<d<60μm 40~45,
>60μm 2~8
Hydraulic conductivity 4×10^{-12}m/s
Porosity 30~40 %



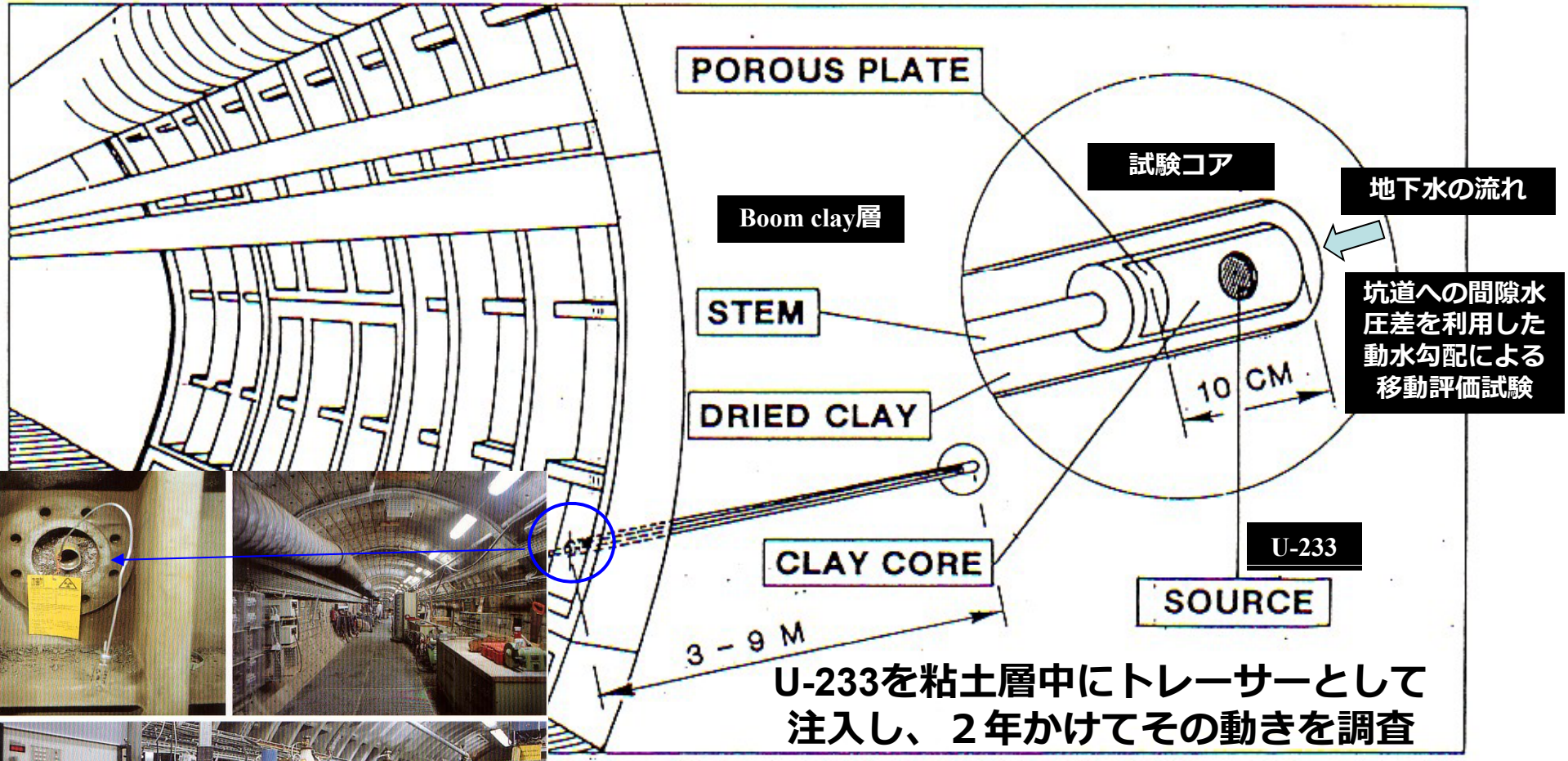


◆浅海内湾性の堆積物。長期に渡って穏やかな堆積環境が継続していたことを示唆。

◆微視的な堆積構造を有する（粘土鉱物の堆積による異方性の存在）
◆有機質である（粘土層といった堆積物には普遍的に存在）

◆難透水性層を評価する場合の重要ポイント（その１）

放射性元素(吸着性トレーサーU-233)を用いた原位置試験

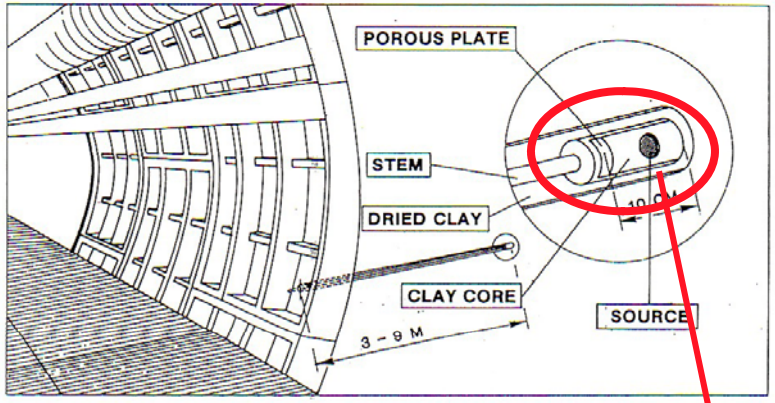


U-233を粘土層中にトレーサーとして
注入し、２年かけてその動きを調査

U-233を使用する理由

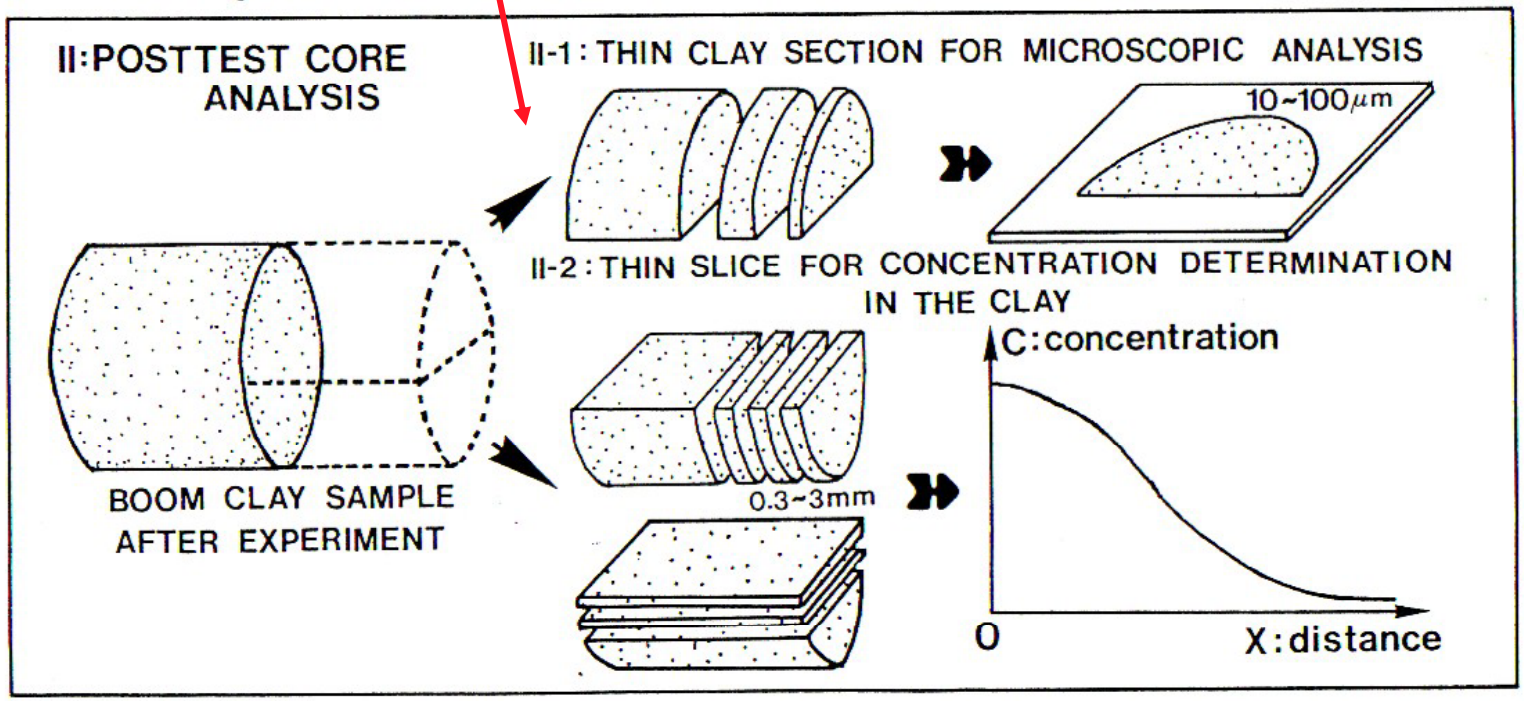
- ◆放射性廃棄物の重要核種（化学的アナログ）
- ◆α線を出し、天然ウラン系列核種との区別可能

放射性元素(吸着性トレーサーU-233)原位置試験：解析方法

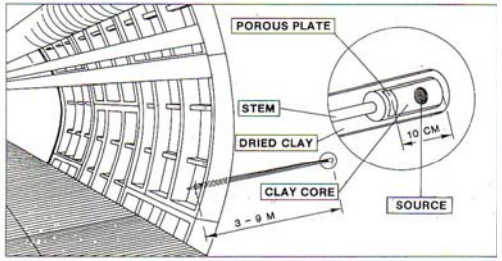


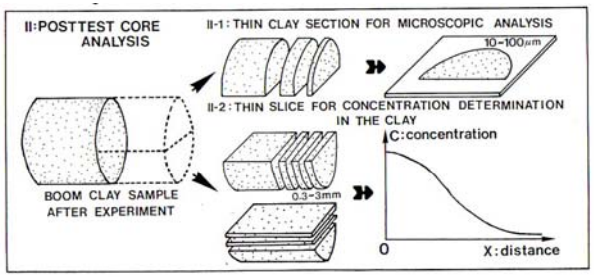
試験後の解析方法

- ◆試験コアをオーバーコアリングで採取
  （軟岩であることからオーバーコアリングが必須）
- ◆コアを半分にカットし、一方では岩石薄片を作成し、
  もう一方の資料で透過した放射線量の測定を実施

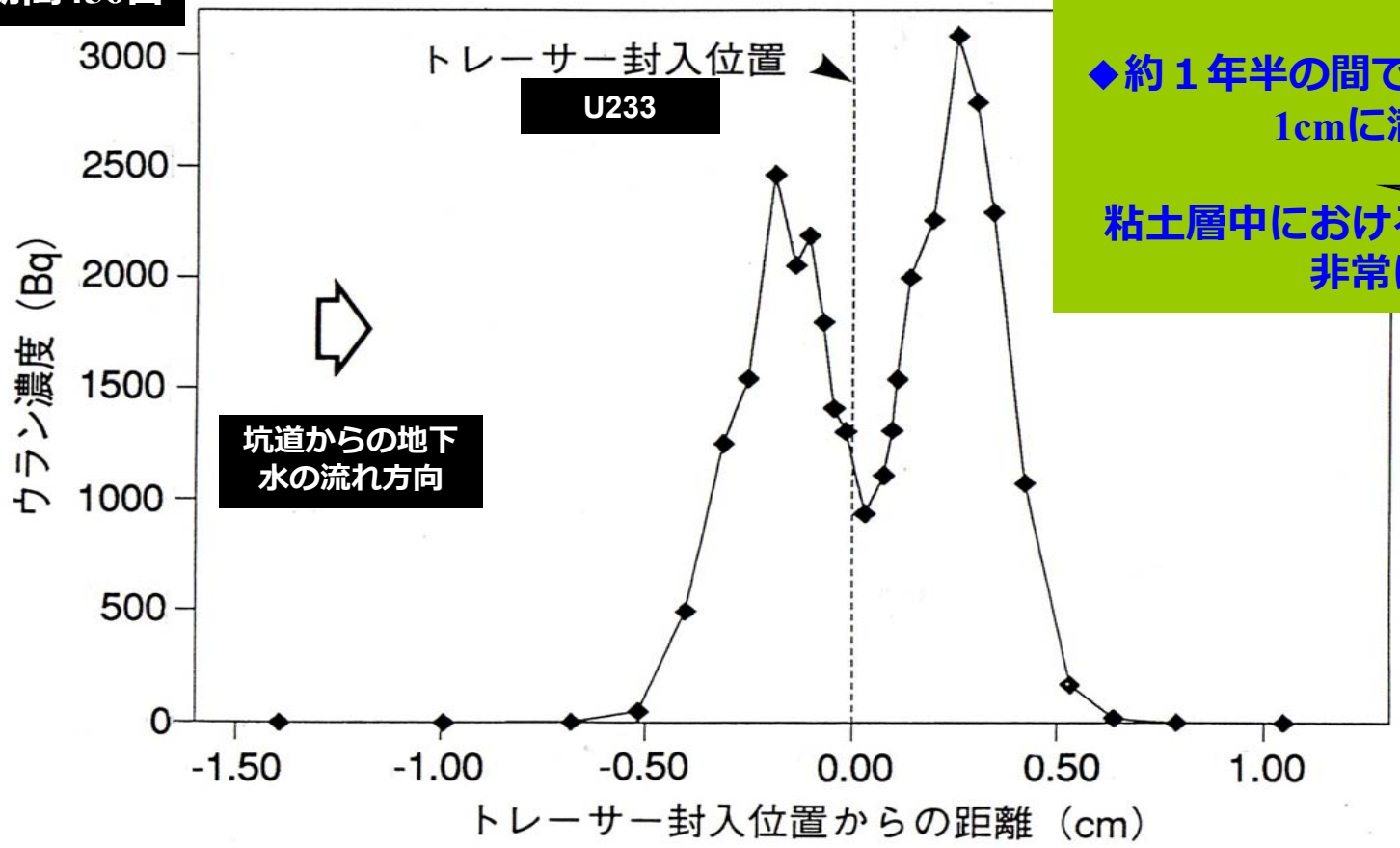


放射性元素(吸着性トレーサーU-233)原位置試験：結果（プロファイル）





試験期間456日



結果（重要ポイント）

- ◆トレーサー封入位置からほぼ対称的なウランの濃度分布を示す

↓

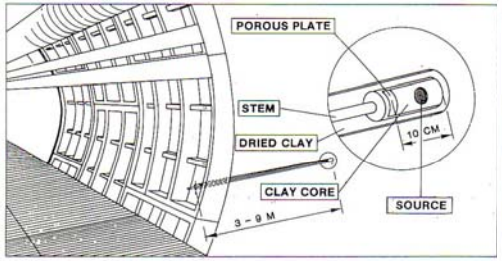
動水勾配10000以上であるにも関わらずウランの動きは拡散支配である

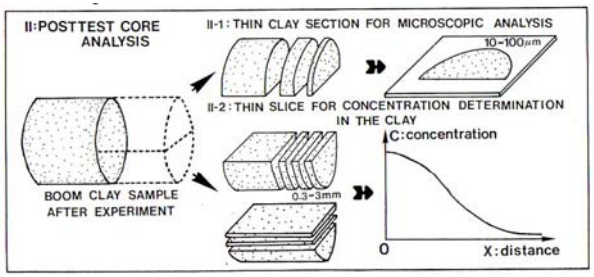
- ◆約１年半の間でのウランの動きは1cmに満たない

↓

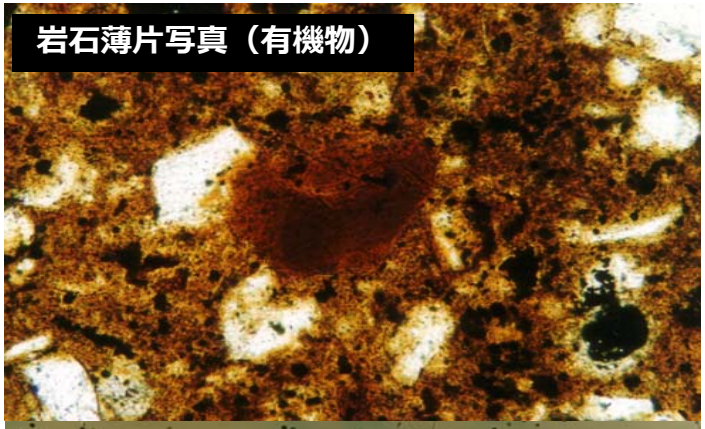
粘土層中におけるウランの動きは非常に遅い

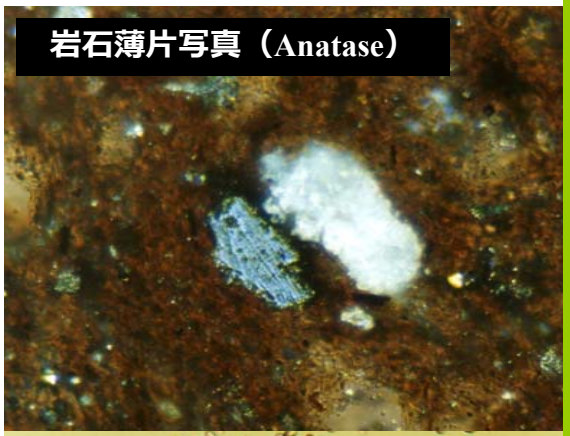
放射性元素(吸着性トレーサーU-233)原位置試験：結果（吸着ヶ所）

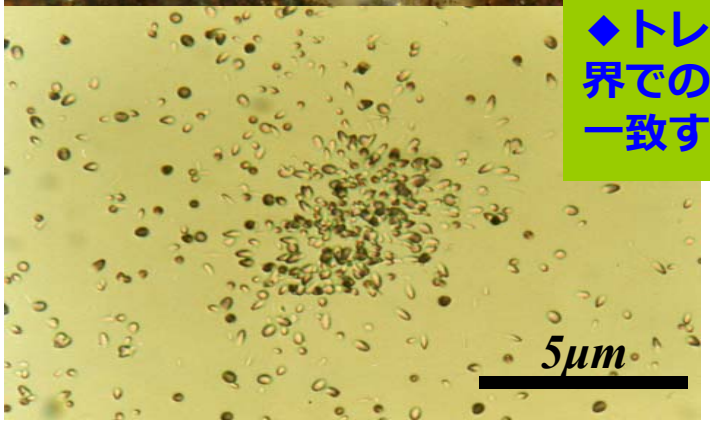




αトラックによる同定







結果（重要ポイント）

◆ウランの主な濃集ヶ所

→有機物

→鉄鉱物

→粘土鉱物

◆有機物や鉄鉱物への吸着は酸化還元反応によるU(IV)としての固定が考えられる

◆粘土鉱物への吸着は、ウラン鎖体の物理化学的吸着が主な原因と考えられる

◆トレーサー試験による結果と自然界でのウランの濃集産状はおおよそ一致する

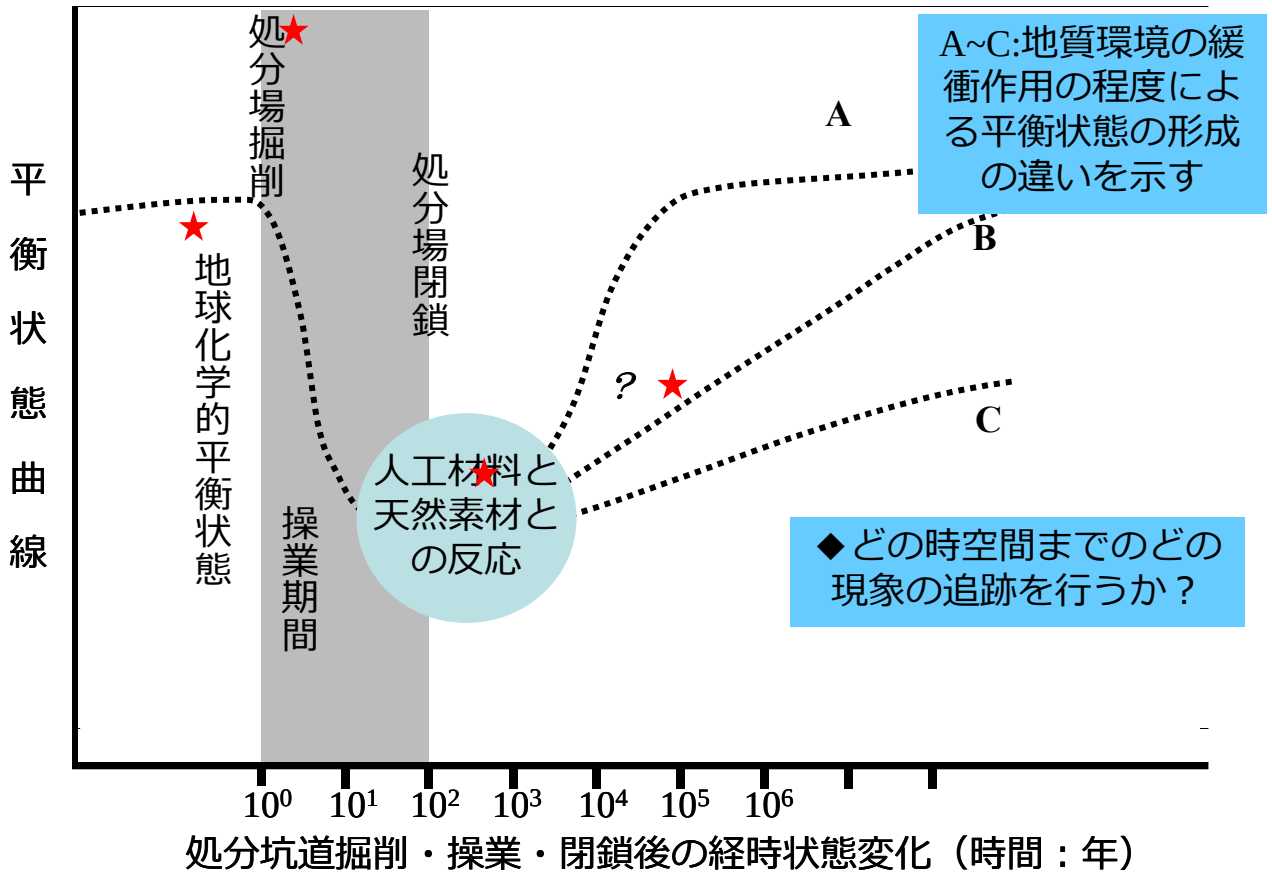
これからの地下環境研究の考え方（地層処分の場合）

おおよその割れ目形成や地下変質形成プロセスを理解（将来のサイト特性調査へも適用可能）

地下環境の特徴として

◆断層・割れ目（帯）を避けることは不可能

◆断層や割れ目（帯）に伴う変質帯を必ず有する

◆透水性割れ目の特異的性質（粘土状充填物の存在：グラウトなどへの影響）

これらを有する地下環境総体としてのバリア機能（緩衝作用）の把握が最も重要