

5. 敷地の断層の活動性評価

5. 1 上載層との関係

5. 2 断層と脈の関係

5. 2. 1 TF-1断層

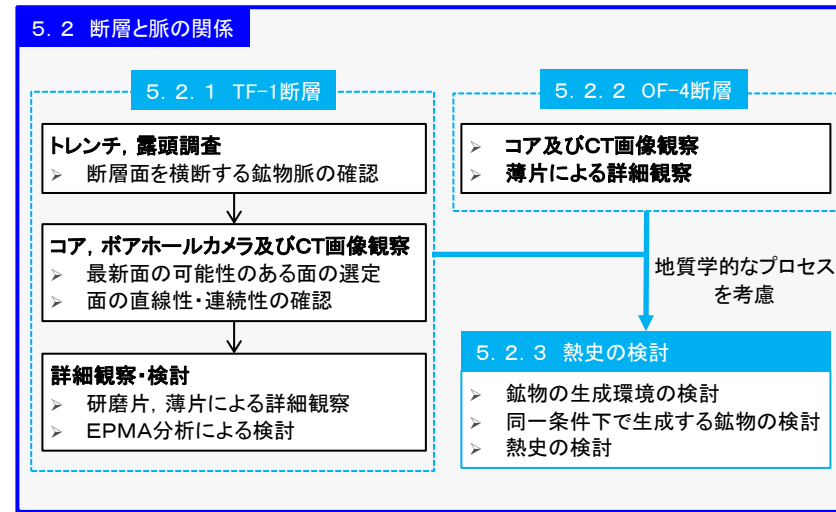
5. 2. 2 OF-4断層

5. 2. 3 熱史の検討

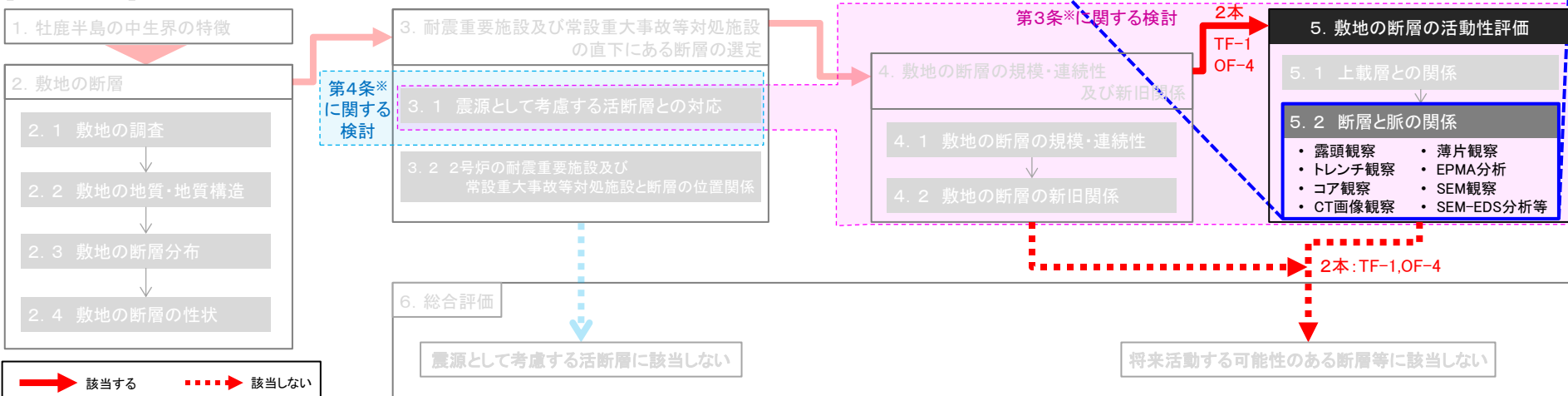
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係 【活動性評価の流れ】

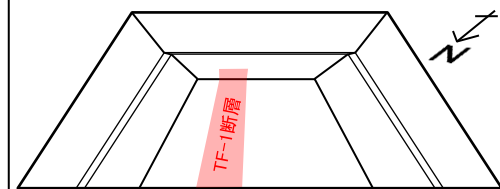
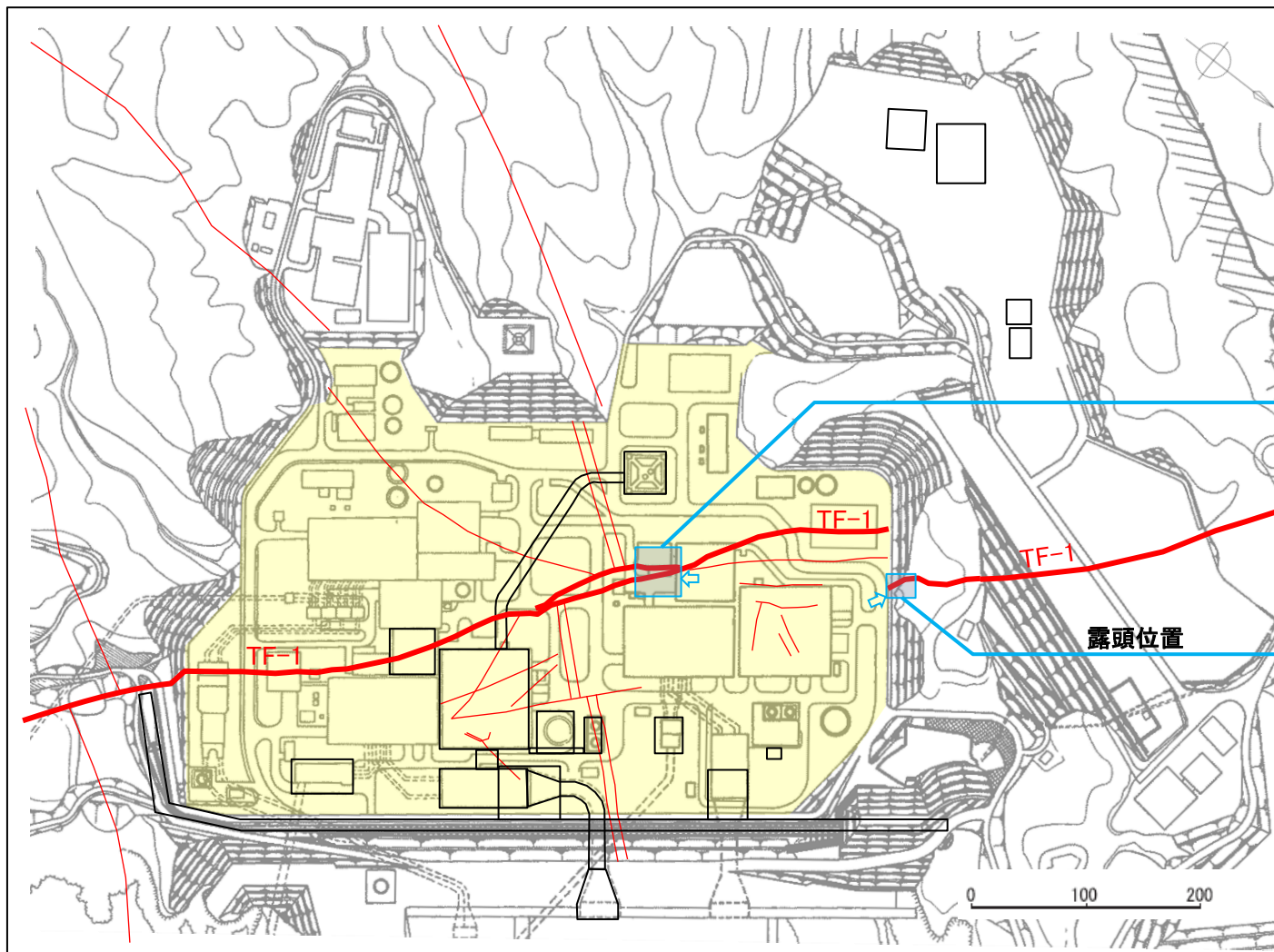
- 「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」に沿って、将来活動する可能性のある断層等の認定を行った。
- TF-1断層を対象としたトレンチ調査の結果から、TF-1断層の活動性を評価するために有効な上載層(後期更新世の地層等)は認められないことから、TF-1断層の活動性については、熱水活動に伴う鉱物脈の晶出状況等に着目し、総合的に評価した。また、OF-4断層についても同様の評価を行った。
- なお、それぞれの調査の整合性、信頼性に留意し、地質学的なプロセスも考慮のうえ、慎重に評価した。



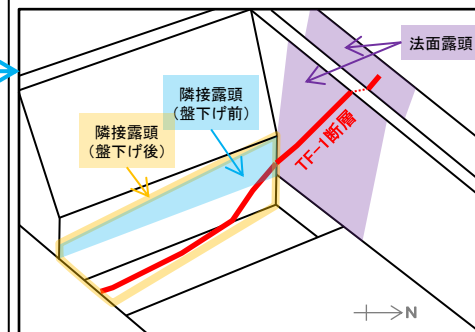
【評価の流れ】 ※実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則



5.2.1 TF-1断層【トレンチ、露頭調査位置図】



トレンチ調査位置



※黄色のハッチング箇所はO.P.約14mでの断層位置を示し、
周囲は地質構造図による断層位置を示す。

5. 敷地の断層の活動性評価

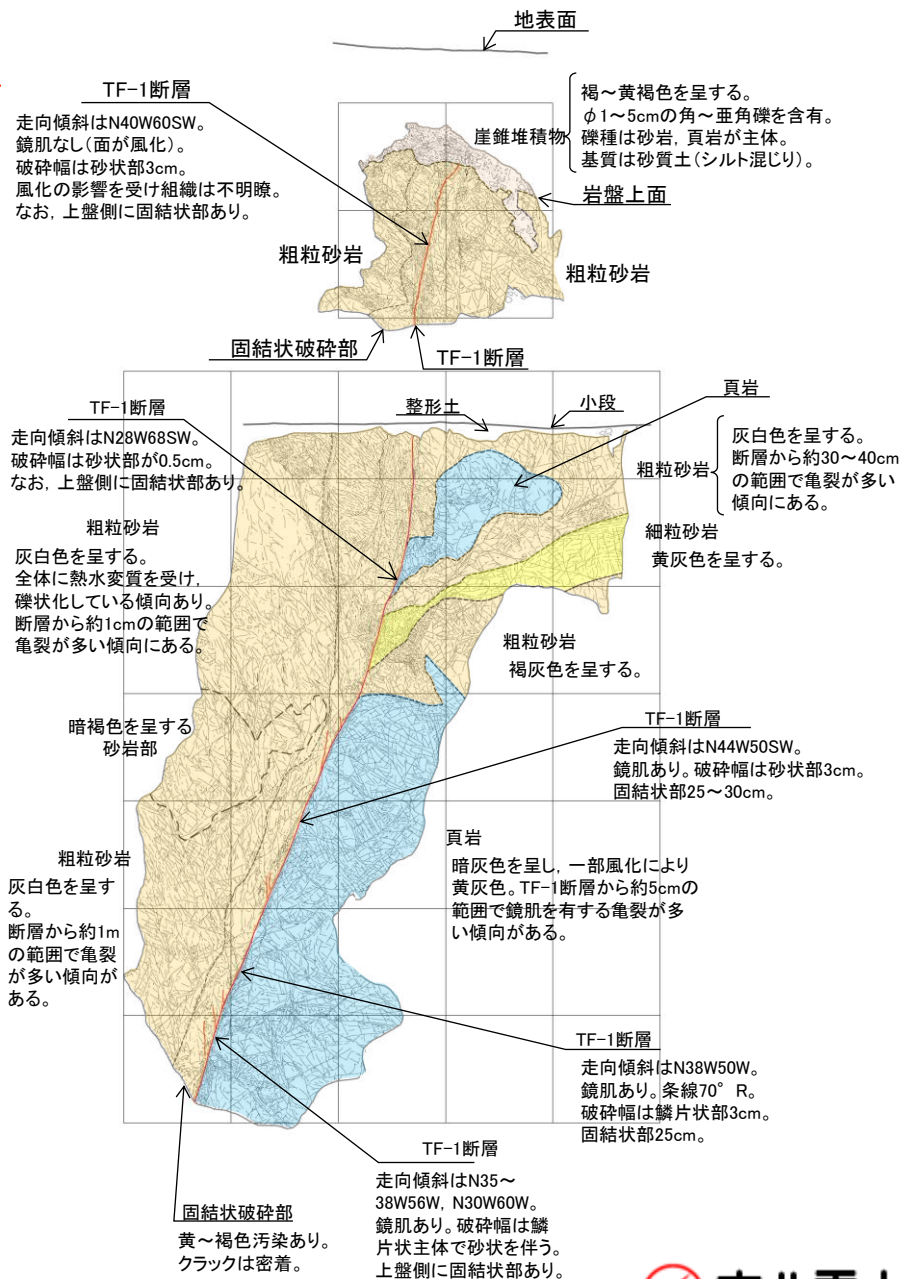
5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層【露頭調査①】

➤ 露頭(法面)では、少なくとも目視観察において、TF-1断層面を貫くひん岩脈・鉍物脈は確認されなかった。



TF-1断層露頭写真

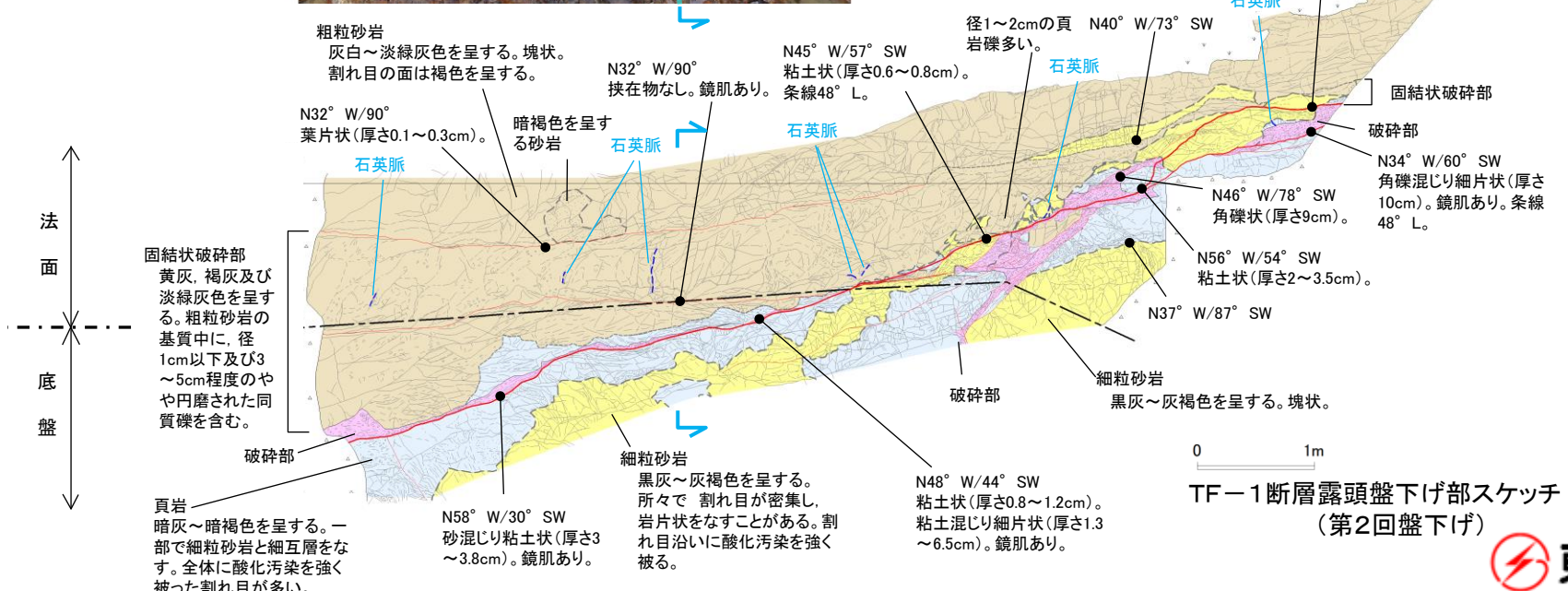
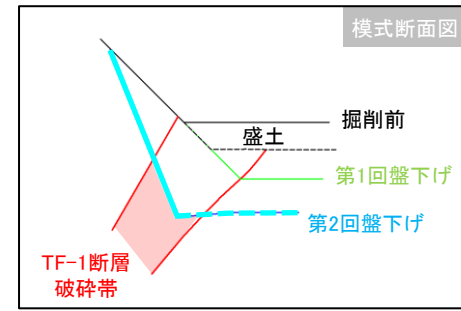
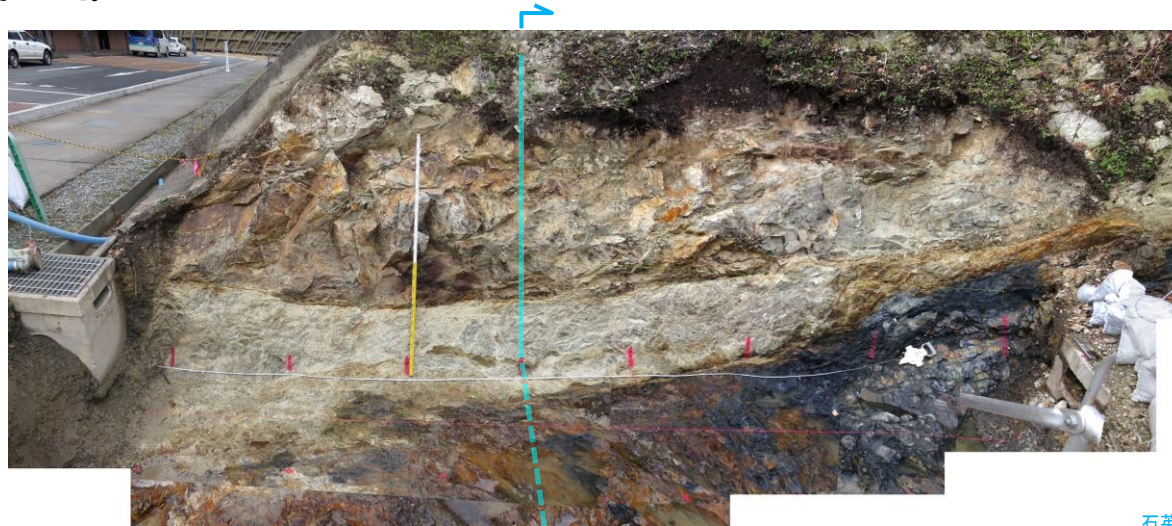


TF-1断層露頭スケッチ

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層【露頭調査②】

➤ 隣接露頭(第2回盤下げ)では、少なくとも目視観察において、TF-1断層面を貫くひん岩脈・鉍物脈は確認されなかった。



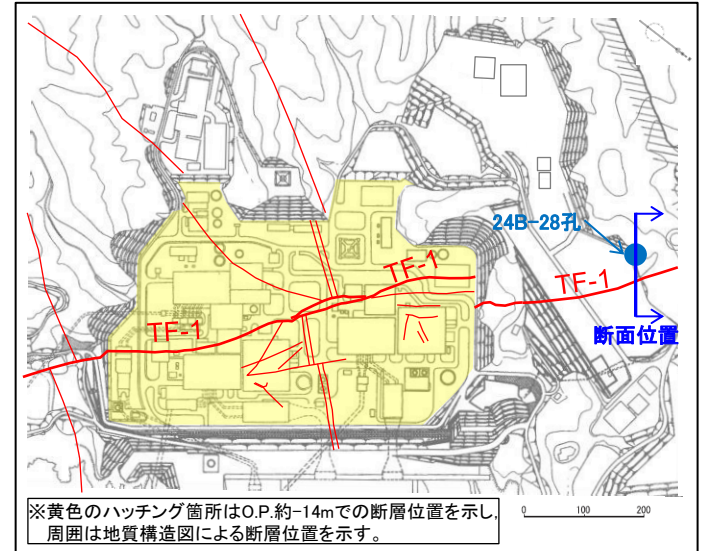
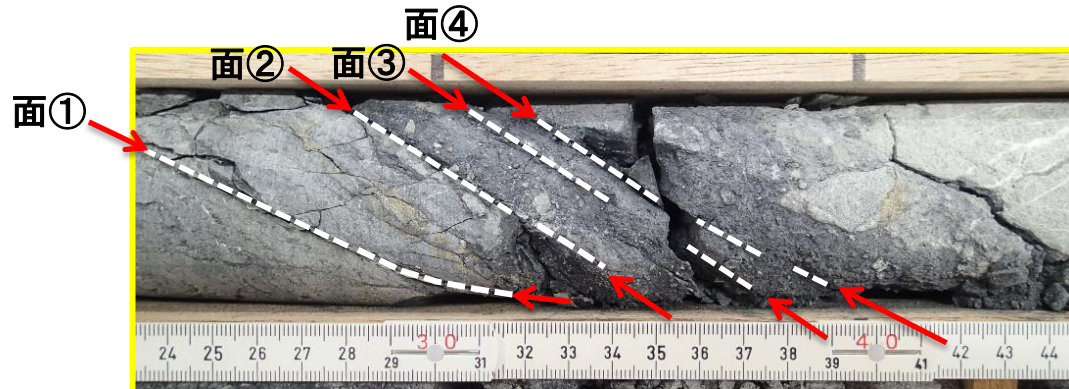
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

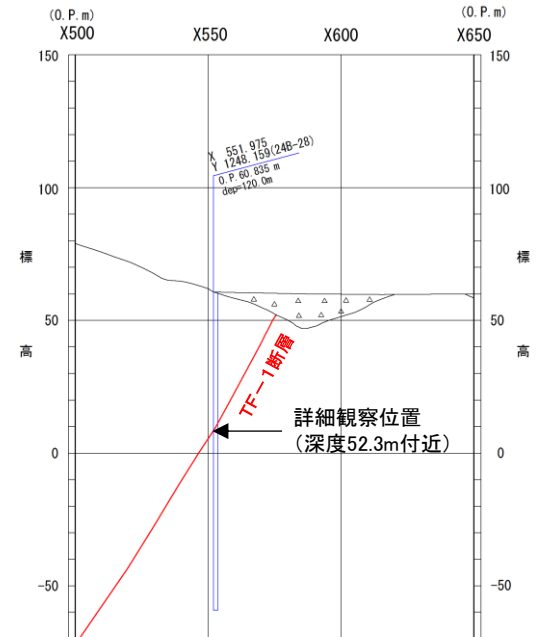
5.2.1 TF-1断層【コア観察】

24B-28孔のボーリングコア(深度52.3m付近)において、軟質部を伴うTF-1断層が確認され、4つの面が認識された。それぞれの面の観察結果は以下のとおりである。

- 面①は、軟質部を伴わない割れ目である。
- 面②は、直線性に富む明瞭なせん断面である。
- 面③は、せん断面が断続的である。
- 面④は、目視観察でせん断面を認定しづらい。



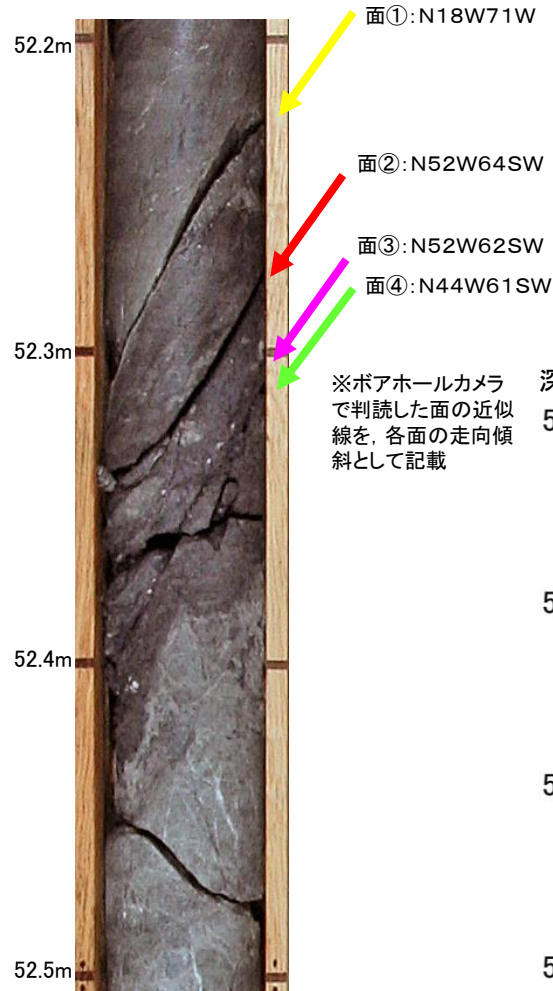
ボーリング位置図(24B-28孔)



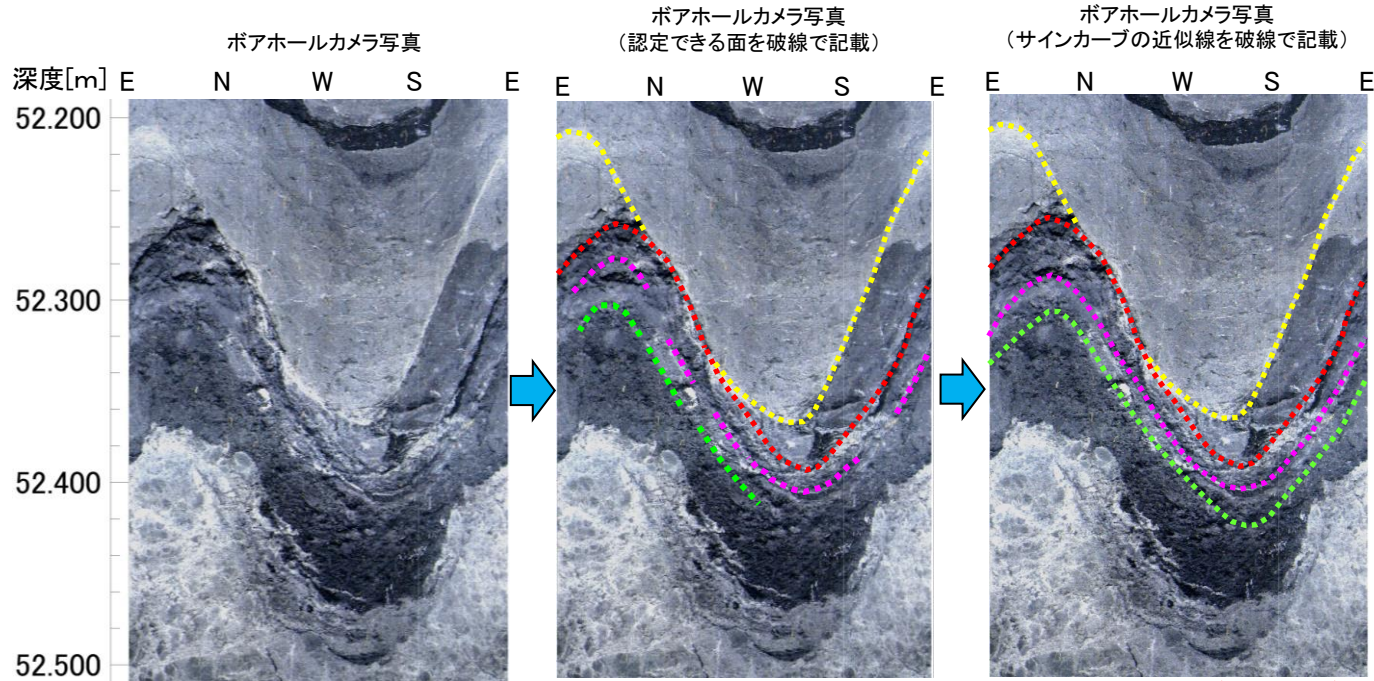
5. 2. 1 TF-1断層 【ボアホールカメラ観察】

24B-28孔のコア観察で確認したTF-1断層確認位置(深度52.3m付近)において、ボアホールカメラ観察を行い、面①～④に対応する面を確認した。面①～④のボアホールカメラ観察の結果は以下のとおりである。

- 面①は、破碎物質の見られない、脈で充填された面である。
- 面②は、直線性、連続性の高い面である。
- 面③は、断続的な面である。
- 面④は、面自体が不明瞭である。



※ボアホールカメラで判読した面の近似線を、各面の走向傾斜として記載

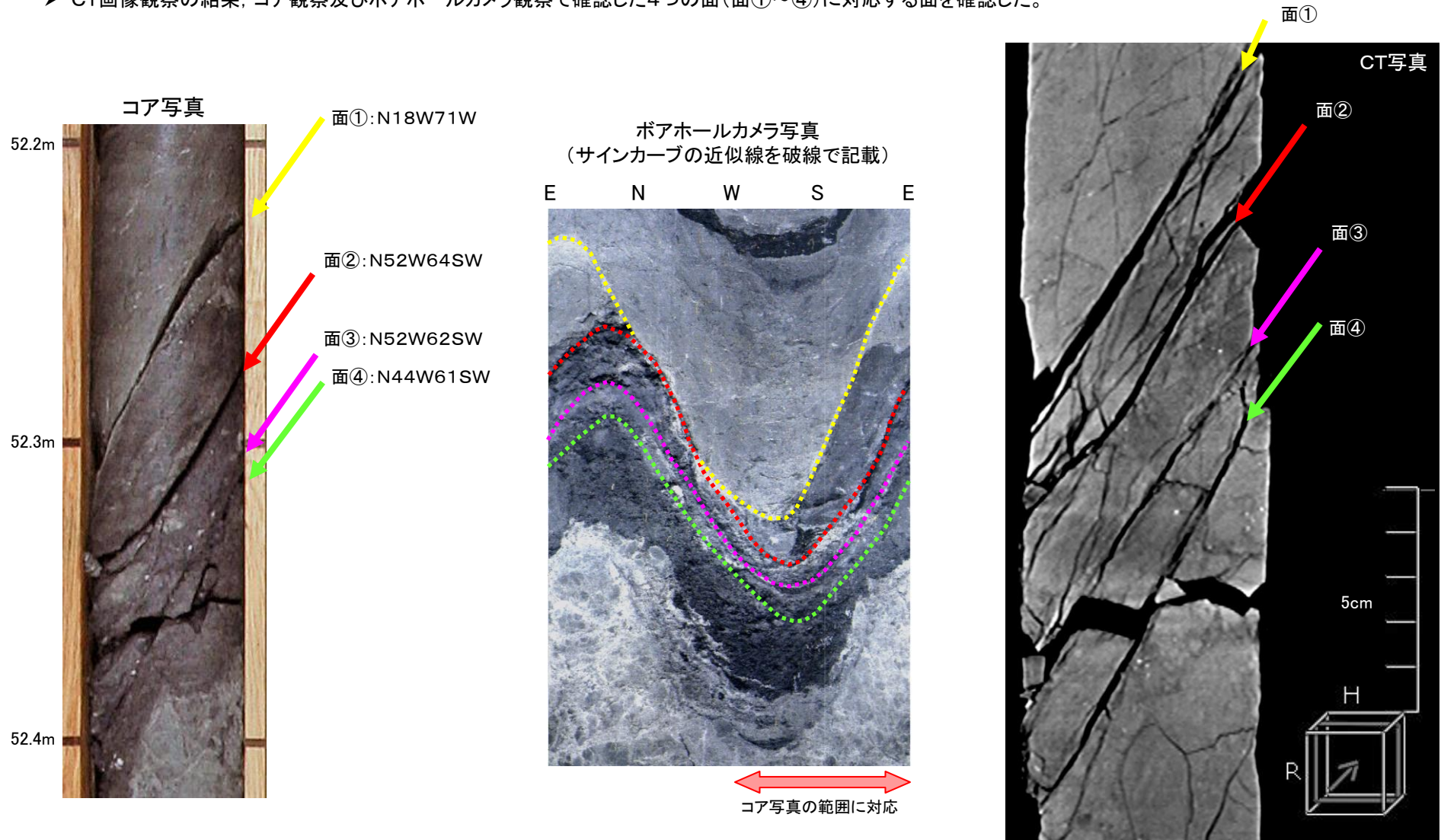


コア写真

コア写真の範囲に対応

5. 2. 1 TF-1断層 【CT画像観察①】

➤ CT画像観察の結果, コア観察及びボアホールカメラ観察で確認した4つの面(面①~④)に対応する面を確認した。



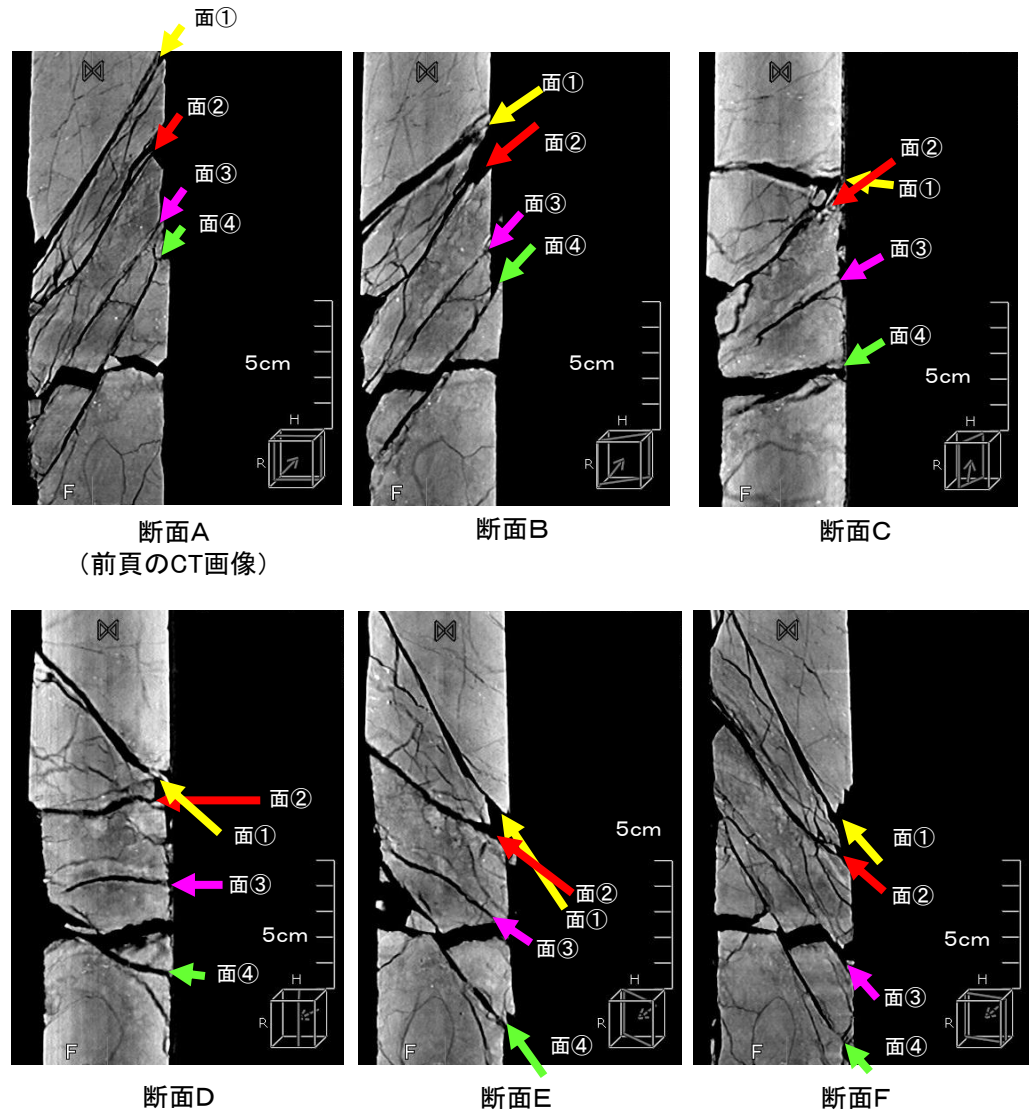
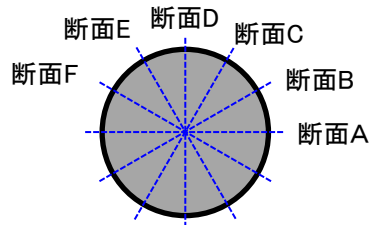
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層【CT画像観察②】

ボーリングコアを30度ずつ回転させたCT画像の観察を行い、以下の状況を確認した。

- 面①と面②は斜交することを確認した。
- 面④は、面②・面③と走向が異なることを確認した。
- なお、面③と面④はボーリング孔内において、切り切られる関係にないことを確認した。



5. 2. 1 TF-1断層 【コア・ボアホールカメラ・CT観察のまとめ】

➤ TF-1断層の最新面の検討としてコア観察, ボアホールカメラ観察及びCT画像観察を行った結果は下表のとおりである。



次頁以降, 面②, 面③について, 詳細な薄片観察を行う。

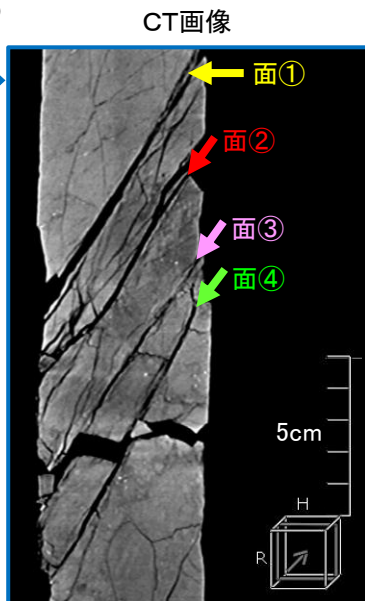
	コア観察	ボアホールカメラ観察	CT画像観察	最新面の可能性	備考
面①	➤ 軟質部を伴わない割れ目である。	➤ 破碎物質の見られない、脈で充填された面である。	➤ 面②と斜交する。	該当しない	-
面②	➤ 直線性に富む明瞭なせん断面である。	➤ 直線性, 連続性の高い面である。	➤ 面①と斜交する。 ➤ 面③と走向がほぼ同じである。 ➤ 面④と走向が異なる。	該当する	-
面③	➤ せん断面が断続的である。	➤ 断続的な面である。	➤ 面②と走向がほぼ同じである。 ➤ 面④と走向が異なる。 ➤ 孔内において, 面④と切り切られの関係にない。	該当する	-
面④	➤ せん断面を認定しづらい。	➤ 面自体が不明瞭である。	➤ 面②及び面③と走向が異なる。 ➤ 孔内において, 面③と切り切られの関係にない。	該当しない	薄片・研磨片観察結果から, 破碎・細粒化の程度が弱く, 面自体の直線性も優れない。(補足説明資料p181-p185)

面①: N18W71W
面②: N52W64SW
面③: N52W62SW
面④: N44W61SW



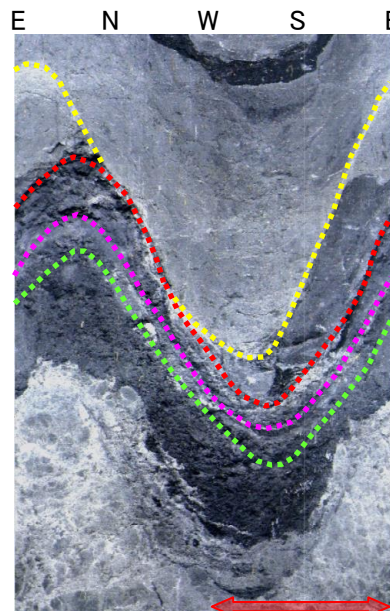
コア写真

面①
面②
面③
面④
CT画像



CT画像

ボアホールカメラ写真



コア写真の範囲に対応

5. 敷地の断層の活動性評価

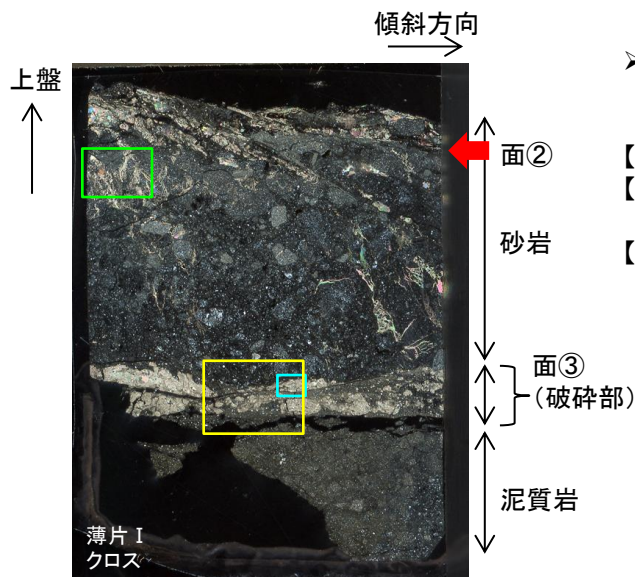
5. 2 断層と脈の関係

5. 2. 1 TF-1断層 【詳細観察・検討】

- 面②及び面③を含むように研磨片を作成した。
- コア観察・CT観察で確認した面が下図のとおり確認された。
- 面②及び面③を観察するため、薄片を作成した。



5. 2. 1 TF-1断層 【詳細観察・検討(カルサイトの晶出パターン)】

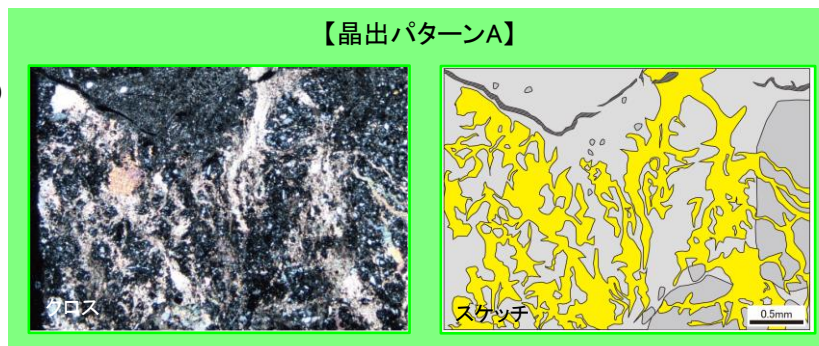


➢ 面②及び面③付近には、オープンで無色、クロスで高次の干渉色を示すカルサイトが晶出しており、以下のとおり主に3つのパターンが認められる。

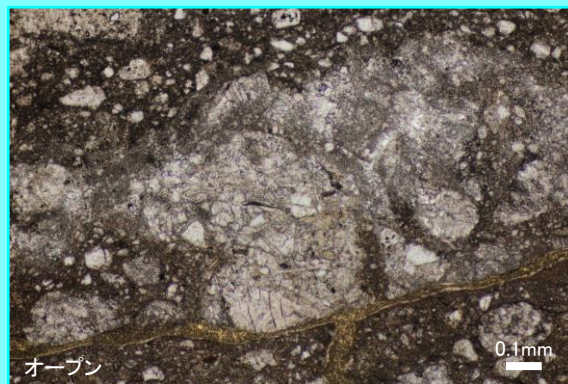
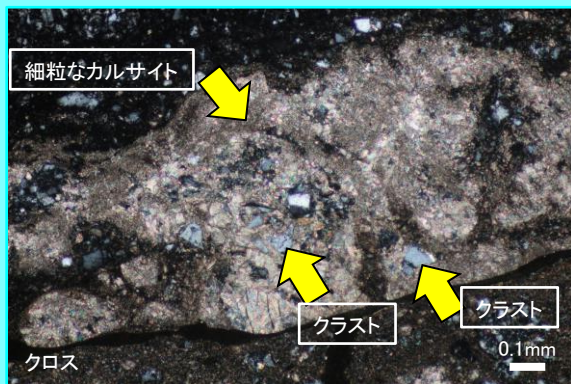
【晶出パターンA】: 細脈状にカルサイトが晶出しているもの。

【晶出パターンB】: 複数の小さなクラストの周囲に細粒なカルサイトが晶出し、クラストとカルサイトの集合体を形成しているもの。

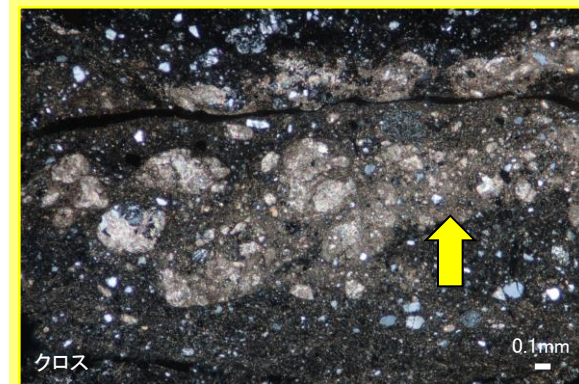
【晶出パターンC】: 細粒なカルサイトが、基質部に広く薄く晶出しているもの。



【晶出パターンB】



【晶出パターンC】



5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面②:概要)】

24B-28孔
(コア写真)

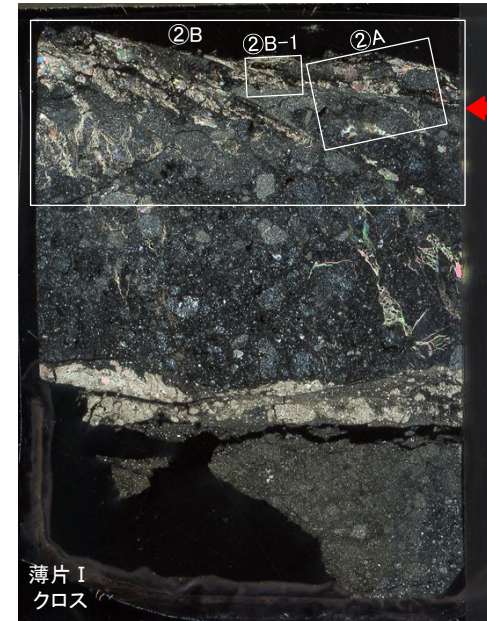
- 面②～④を含むように研磨片を作成し、面②の観察・分析を行った。
- 観察・分析結果は下表のとおりであり、詳細を次頁以降に示す。

52.0m

面①: N18W71W
面②: N52W64SW
面③: N52W62SW
面④: N44W61SW

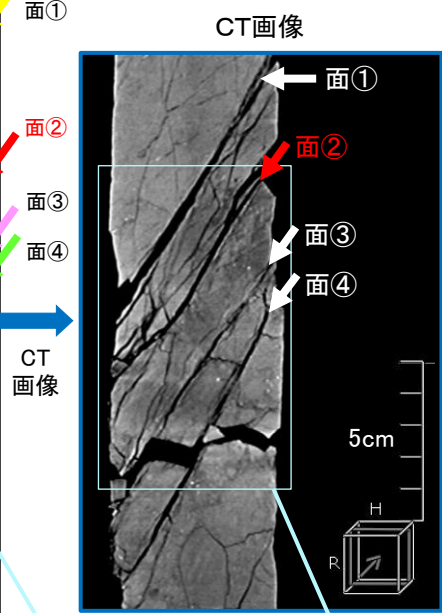
24B-28孔
コア写真(拡大)

評価項目	拡大範囲	確認内容
最新面の認定	②A	面②付近で砂岩が破碎され、細粒化しており、せん断に伴う粘土鉱物の配列を確認。
	②A'	せん断に伴う粘土鉱物を確認。
最新面を横断する鉱物の検討	②B ②B-1	面②を横断するようにカルサイトが晶出している状況を確認。
	②B'	面②を横断するようにカルサイトが細脈状に晶出している状況を確認。【晶出パターンA】

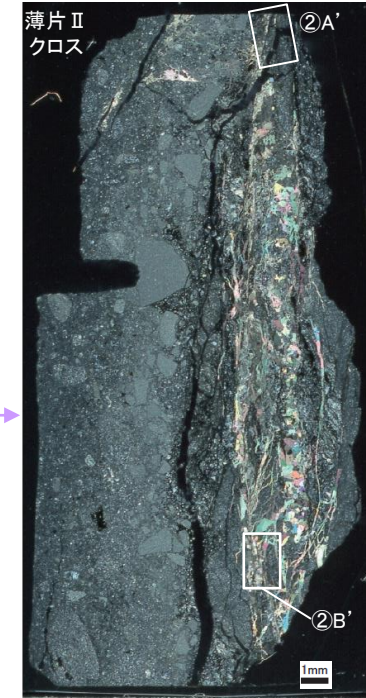


拡大

53.0m



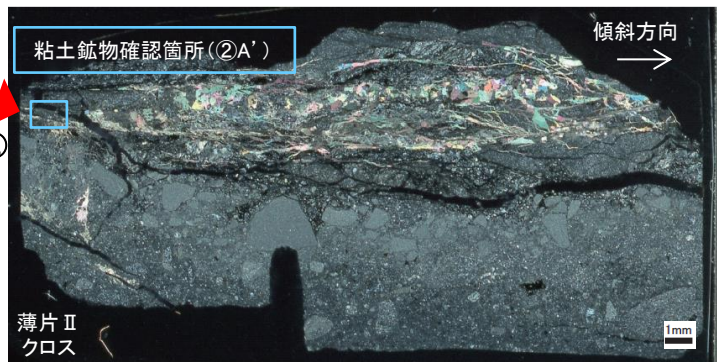
研磨片作成範囲
(コアを半割りし、手前側の試料で作成)



5. 敷地の断層の活動性評価

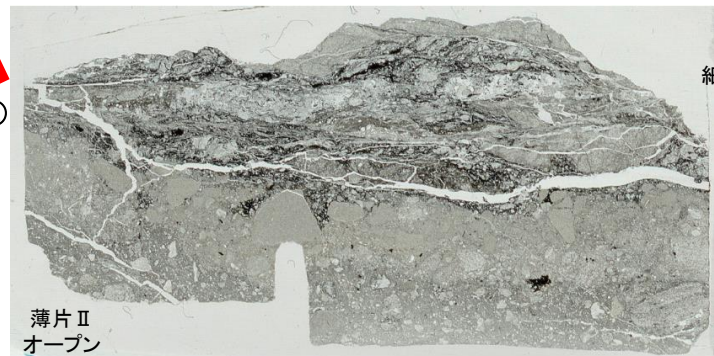
5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面②:薄片Ⅱの観察(1))】



面②

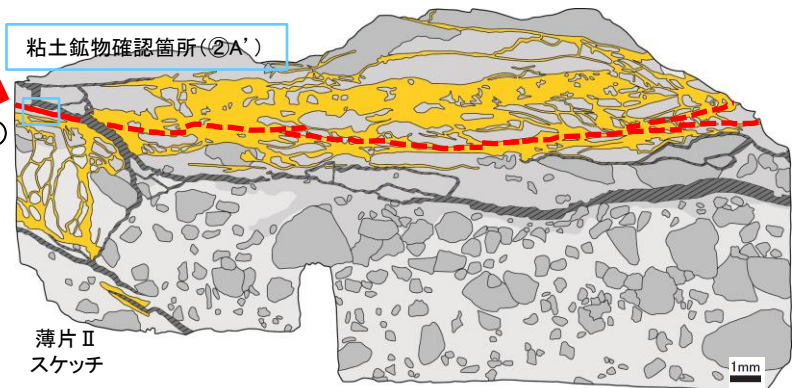
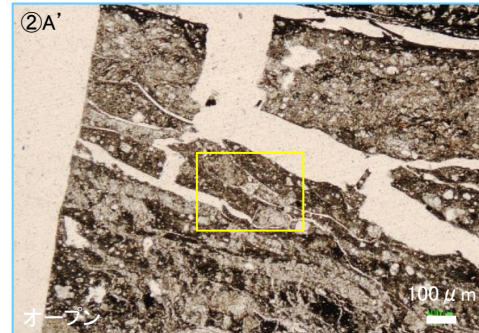
- 晶出している鉱物は、オープンで無色、クロスで高次の干渉色を示すことからカルサイトである。
- カルサイトが面周辺や面自体に晶出しているため、粘土鉱物が判別しにくくなっているが、面②のせん断面沿いに細粒な粘土鉱物が確認される。
- ⇒TF-1断層の最新面と判断される。
- ✓ 薄片観察では、粘土鉱物の配列が確認される面を最新面と認定した。(実線)
- ✓ なお、鉱物の晶出等により粘土鉱物が見えにくくなっている場合には、認識できる最新面から延長する面を最新面と判断した。(破線)



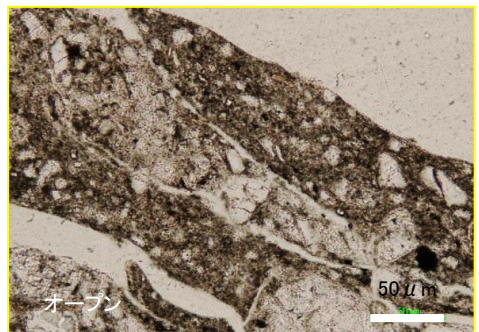
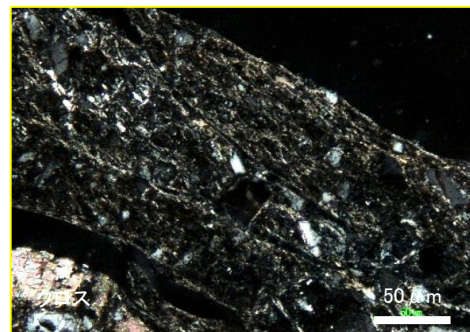
面②

面②

細粒な粘土鉱物が分布



面②

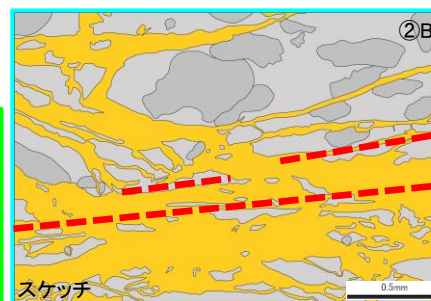
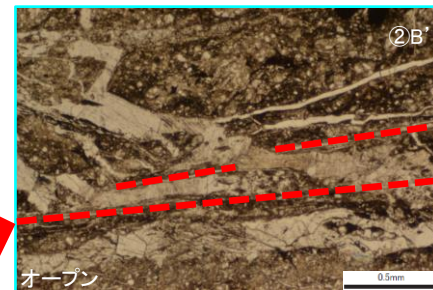
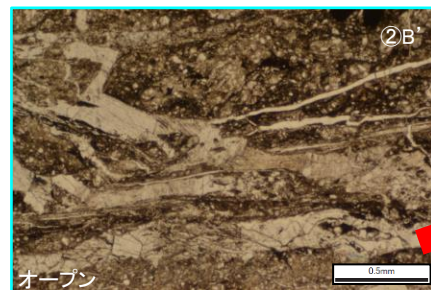
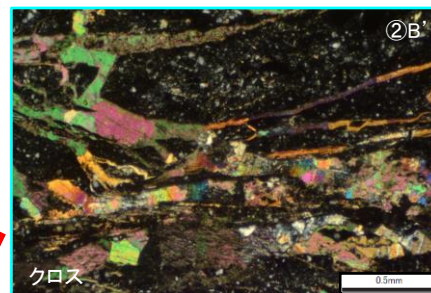
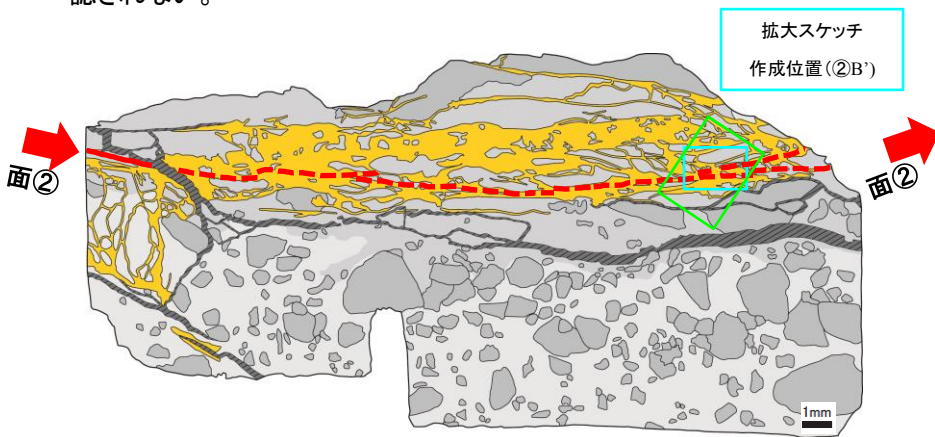


5. 敷地の断層の活動性評価

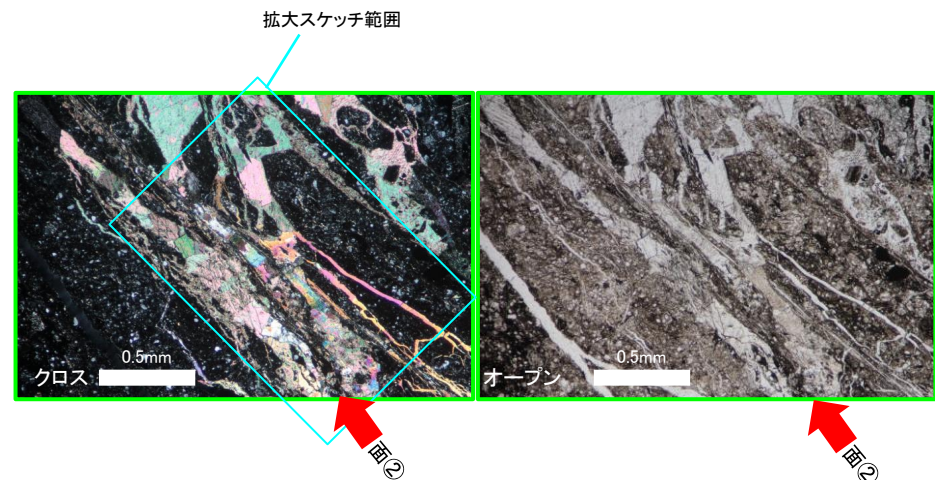
5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面②:薄片Ⅱの観察(2))】

- TF-1断層の最新面である、面②を横断するように自形のカルサイトが細脈状に晶出しており、面②の活動に伴う変形は確認されない。【晶出パターンA】
- 面②自体にもカルサイトが晶出しており、面②の活動に伴う変形は確認されない。



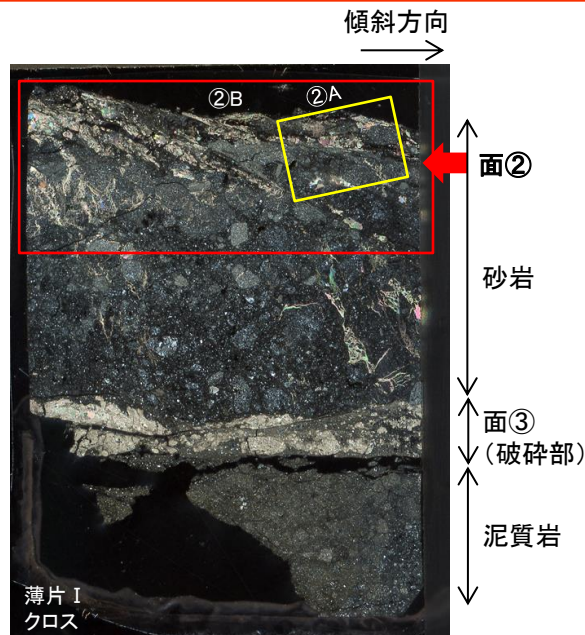
せん断面	クラスト (石英・長石・砂岩など)
粘土鉱物の配列	黒色の細粒破碎部の基質
カルサイト	空隙



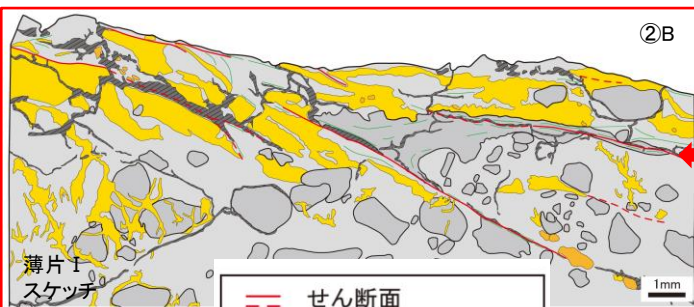
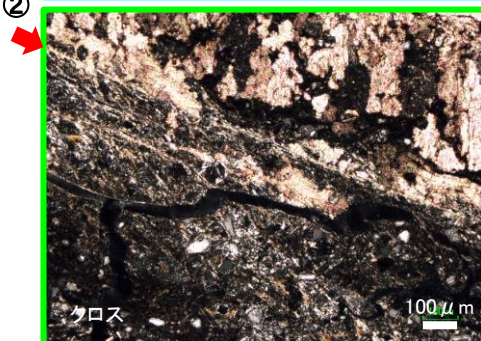
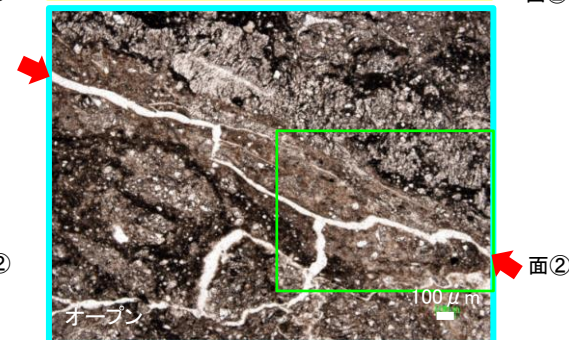
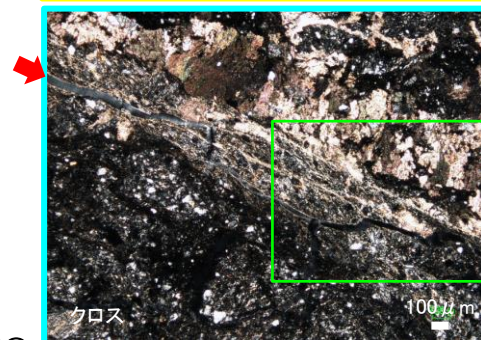
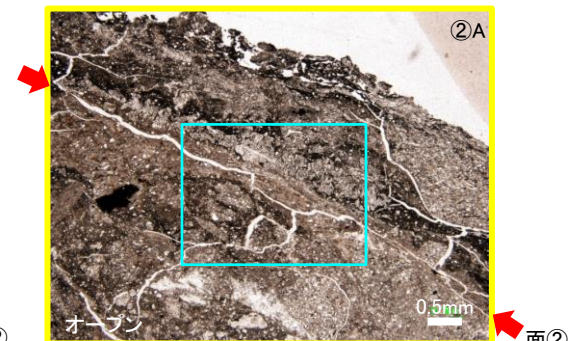
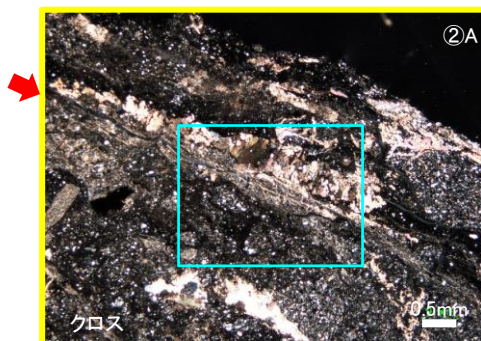
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面②:薄片Iの観察(1))】



➤ 面②付近では、砂岩が破碎され細粒化しており、せん断に伴う粘土鉱物の配列が観察される。
⇒面②はTF-1断層の最新面と判断される。

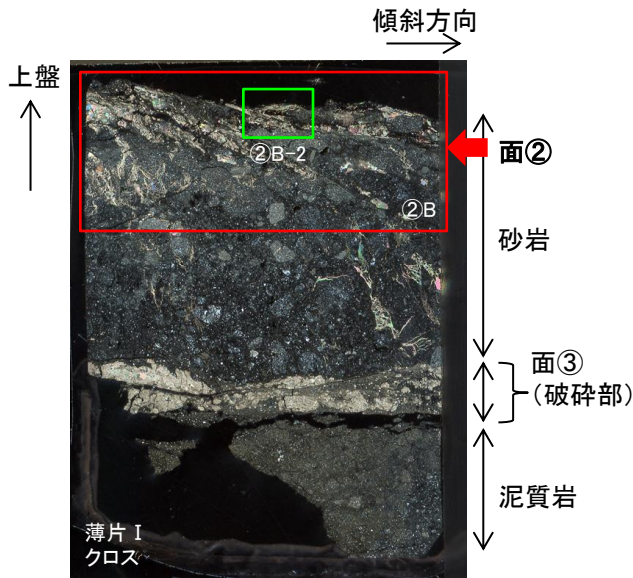


- せん断面
- 粘土鉱物の配列
- カルサイト
- クラスト (カルサイト)
- クラスト (石英・長石・砂岩など)
- 空隙

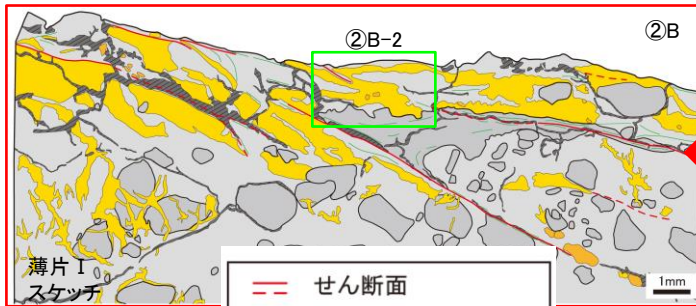
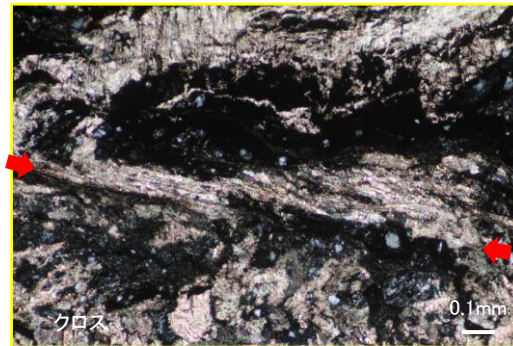
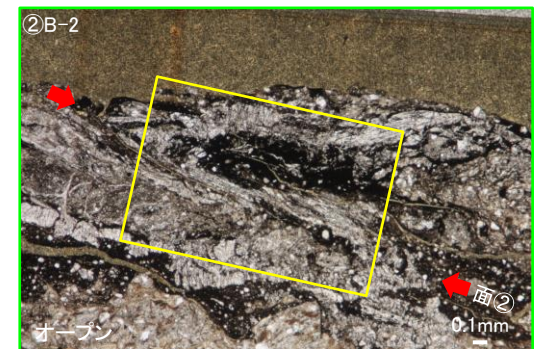
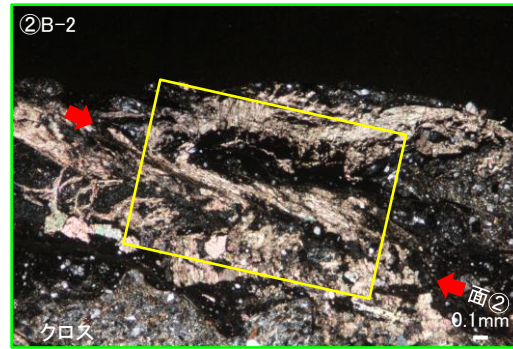
5. 敷地の断層の活動性評価

5. 2 断層と脈の関係

5. 2. 1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面②:薄片Iの観察(2))】

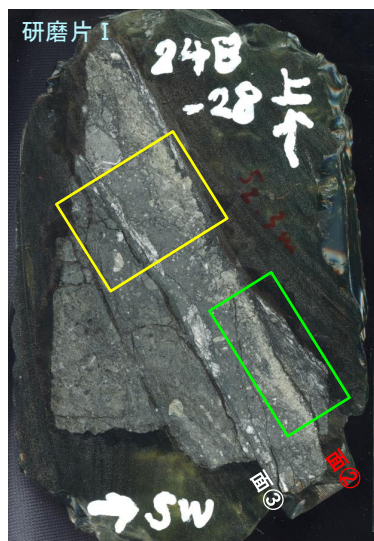


➤ 面②付近では粘土鉱物の連続が不明瞭になり、カルサイトが面②を横断して連続的に分布している。
⇒ 面②が形成された後に、カルサイトが晶出したものと考えられる。



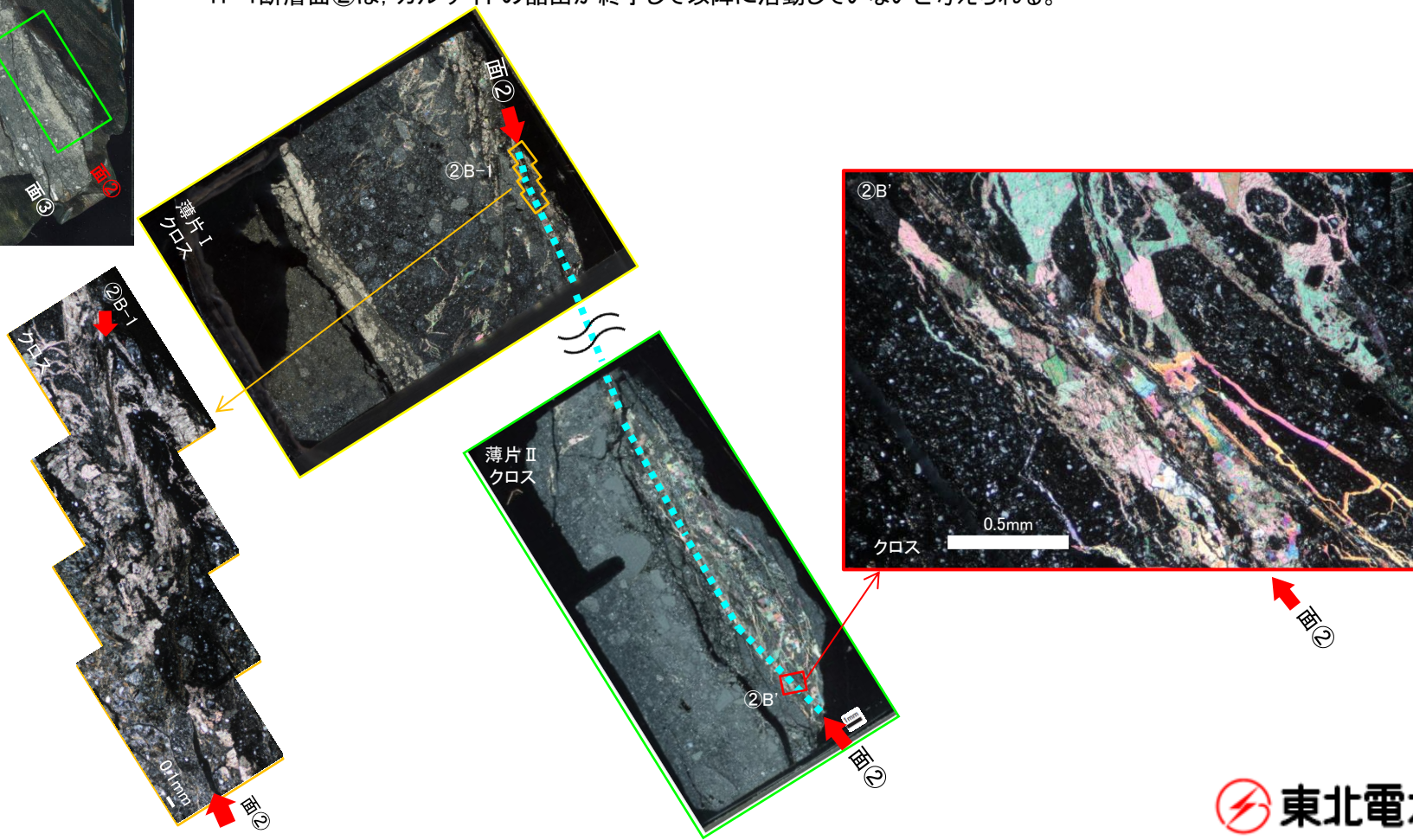
- せん断面
- 粘土鉱物の配列
- カルサイト
- クラスト (カルサイト)
- クラスト (石英・長石・砂岩など)
- 空隙

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面②のまとめ)】



- ▶面②を横断して、自形のカルサイトが細脈状に晶出している状況を確認した【薄片Ⅱ：②B'】。
- ▶面②の延長上の別の薄片Ⅰでは、カルサイトが流動したようなS字状の分布形態と、面②付近で認められるカルサイトの配列方向が、共に逆断層センスの変形のように見えることを確認した【薄片Ⅰ：②B-1】。

- ⇒・脈状のカルサイトと、変形を受けたカルサイトが共存していることから、TF-1断層面②の最終活動と同じ期間に、カルサイトがTF-1断層破碎部に晶出したものと考えられる。
- ・また、カルサイトの変形は流動的であることから、高温の環境下にあったものと考えられる。
- ・TF-1断層面②は、カルサイトの晶出が終了して以降に活動していないと考えられる。



5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③:薄片Iの概要)】

24B-28孔
(コア写真)

- 面②～④を含むように研磨片を作成し、面③の観察・分析を行った。
- 次頁以降に観察、分析結果を示す。

52.0m

面①: N18W71W
面②: N52W64SW
面③: N52W62SW
面④: N44W61SW

24B-28孔
コア写真(拡大)

評価項目	拡大範囲	確認内容
最新面の認定	③A	面③'及び面③"の並走する2つの面を確認。 面③'と面③"の間が最も細粒化しており、粘土鉱物の配列を複数確認。 面③'及び面③"は直線性、連続性及び細粒化がほぼ同程度であることを確認。
最新面を横断する鉱物の検討	③B-1	面③'を横断するようにカルサイトが晶出している状況を確認。【晶出パターンC】
	③B-2	面③'付近で、せん断に伴う粘土鉱物の配列を確認。 粘土鉱物の配列を横断するようにカルサイトが晶出している状況を確認。【晶出パターンC】
	③B-3	面③'を横断する脈はカルシウム濃度の高い領域に対応していることから、カルサイト脈であることを確認。
	③B-4	面③'を境にクラストの集合体がシャープな面に接しているようにも見える。【晶出パターンB】

拡大

面①

面②

面③

面④

CT
画像

CT画像

面①

面②

面③

面④

5cm

H

R

研磨片作成範囲

(コアを半割りし、手前側の試料で作成)

研磨片 I

24B
-28
↑

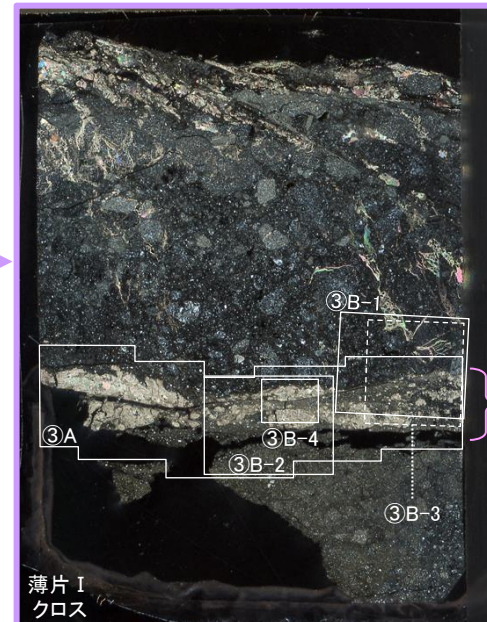
薄片作成範囲

面②

面③

→ SW

傾斜方向



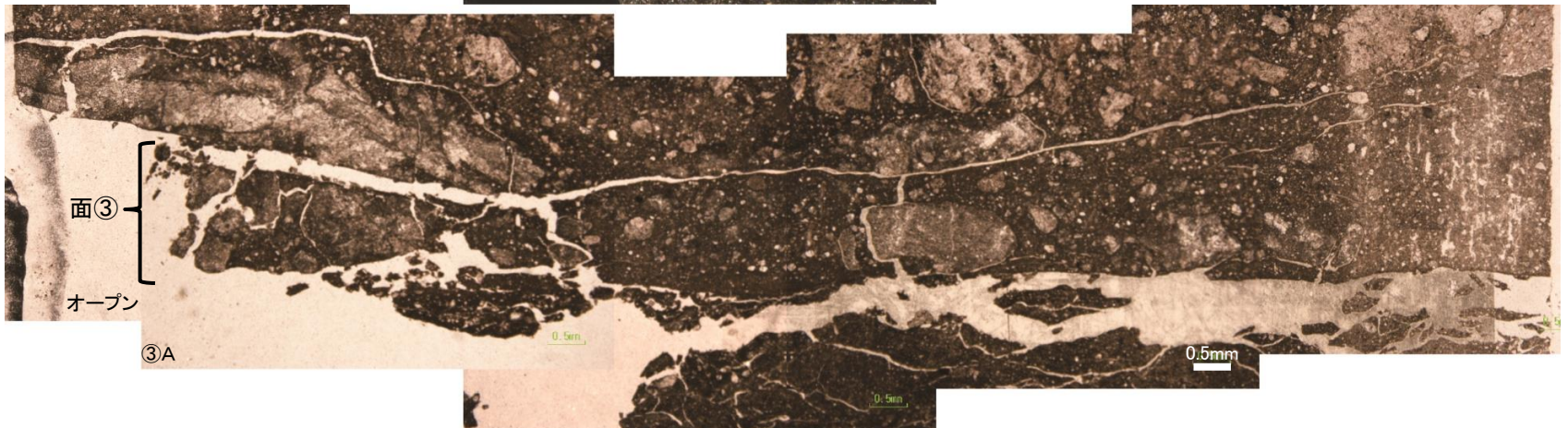
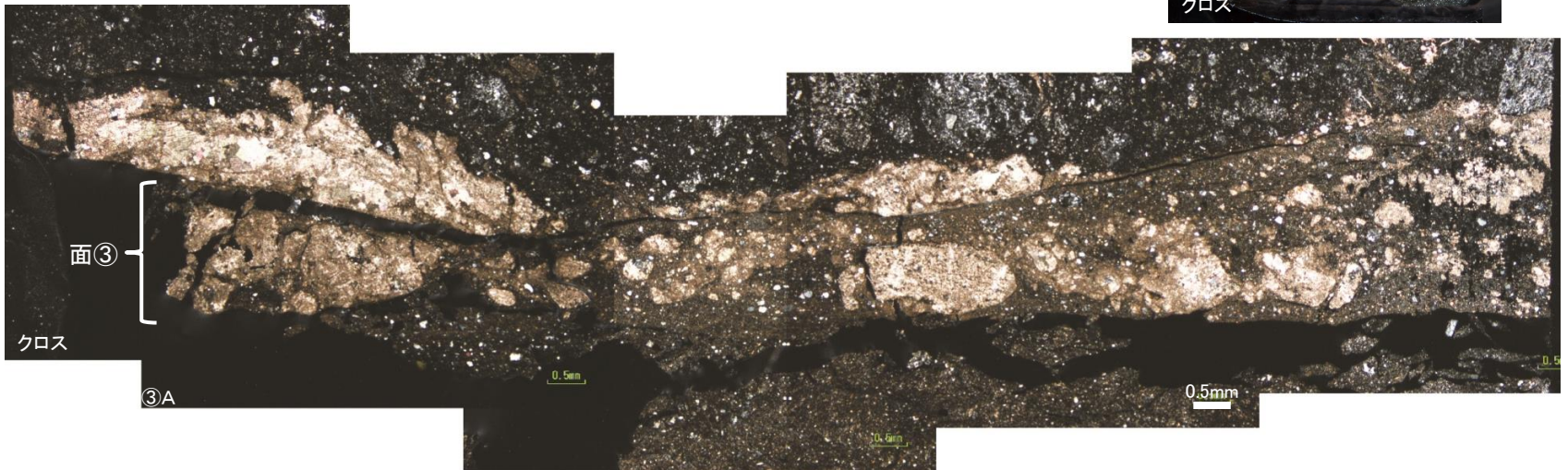
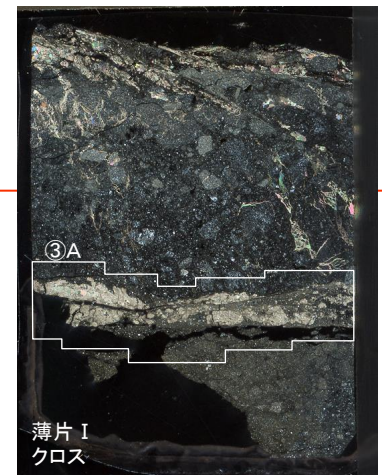
53.0m

5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③:薄片Iの観察(1))】

- 面③付近の薄片観察の結果、面③付近には並走する2つの面が確認された。
- 次頁で詳細観察を行う。



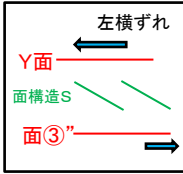
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

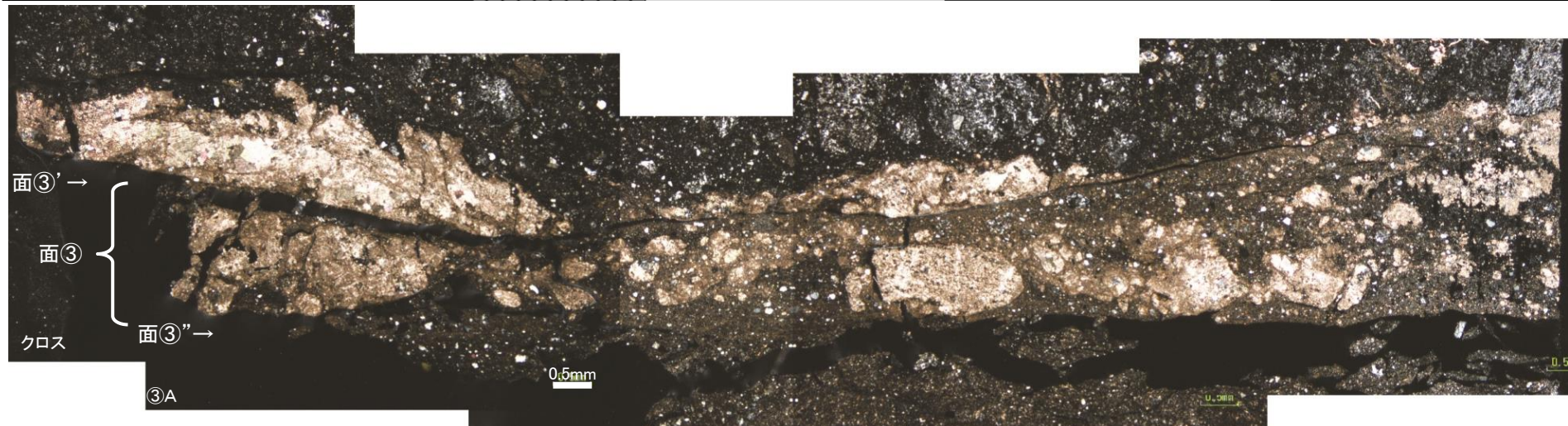
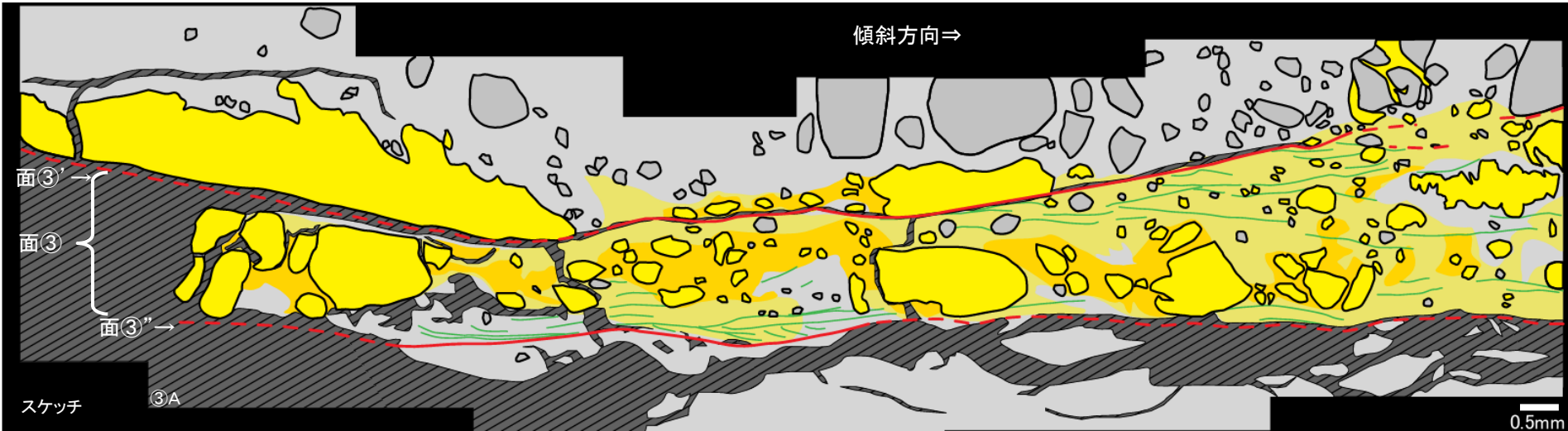
5.2.1 TF-1断層【詳細観察・検討(面③:薄片Iの観察(2))】

第456回審査会合(H29.3.24)
資料1-1 p111 再掲

111

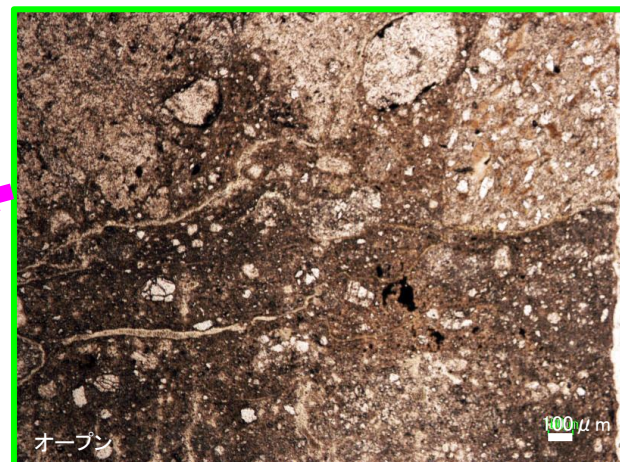
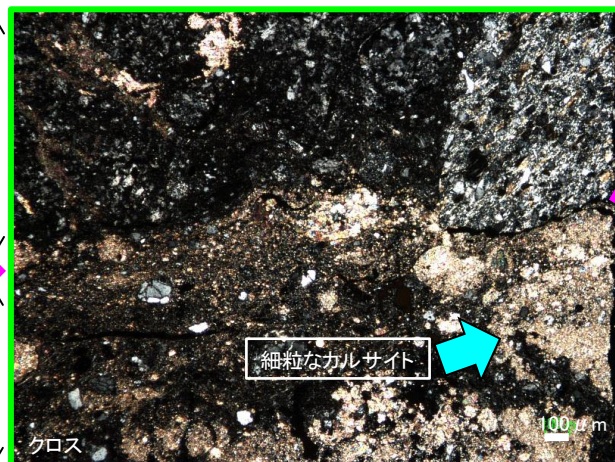
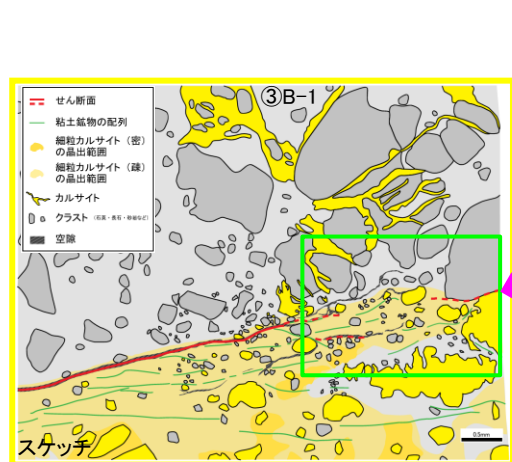
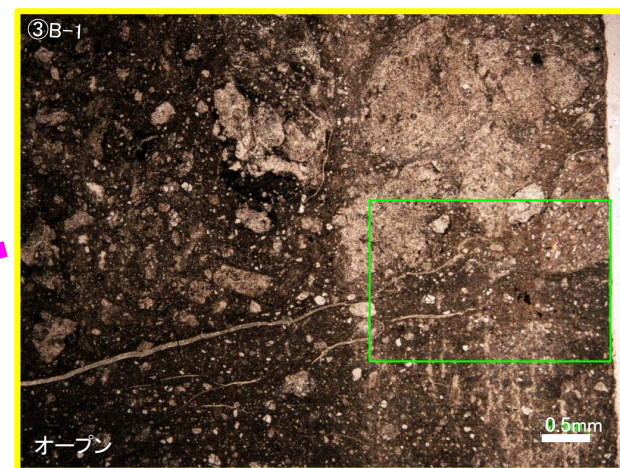
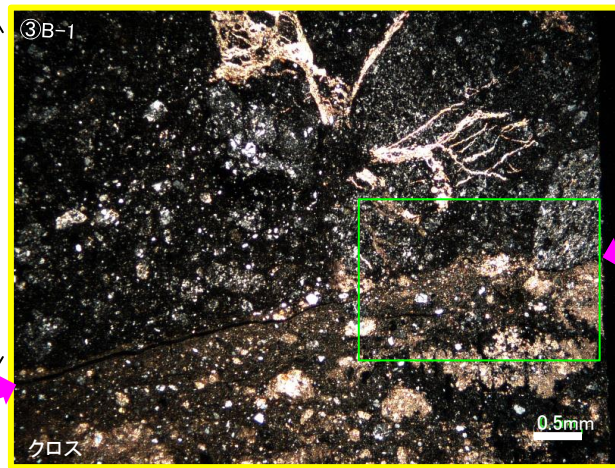
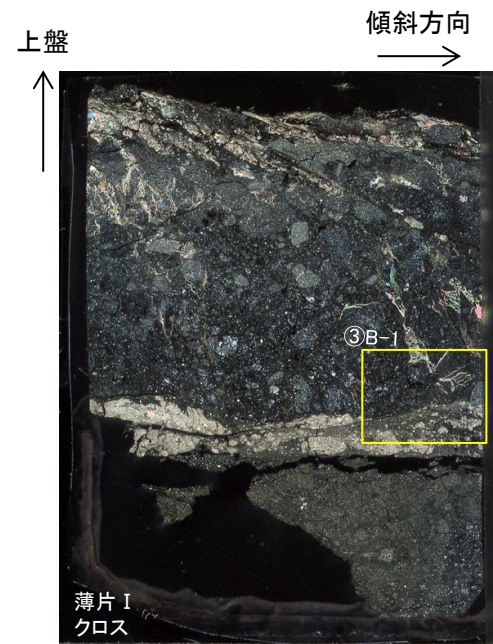


- ▶ 詳細薄片観察の結果、面③付近には並走する2つの面(面③'及び面③")とする)が確認された。
 - ▶ 面③'と面③"に挟まれる領域(破碎部)が最も細粒化しており、内部に粘土鉱物の配列が複数確認された。
 - ▶ 面③'及び面③"付近には、せん断に伴う粘土鉱物の配列(Y面及び面構造S)が観察され、逆断層センスの構造が確認できる。
 - ▶ 面③'及び面③"は直線性、連続性及び細粒化の程度がほぼ同じである。
- ⇒面③'と面③"に挟まれる領域(破碎部)を最新活動ゾーンとし、面③'及び面③"が最新面と考えられる。



5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③':薄片Iの観察)】

- 晶出している鉱物は、オープンで無色、クロスで高次の干渉色を示すことからカルサイトである。
- 基質部には細粒なカルサイトが晶出している【晶出パターンC】。
- TF-1断層の最新面である、面③'を横断するようにカルサイトが晶出しており、面③'の活動に伴う変形は確認されない。

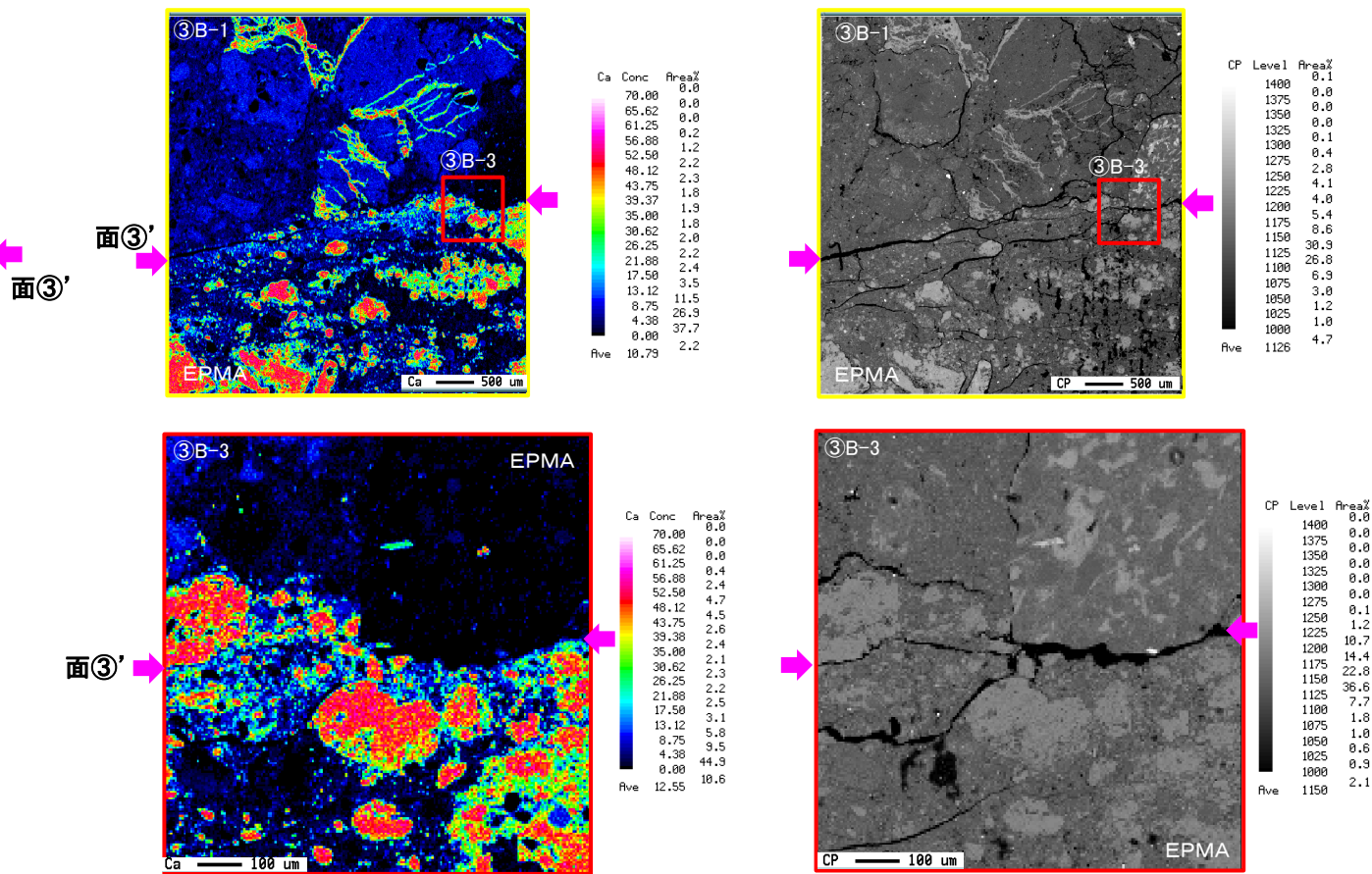


面③' (別の箇所)の薄片観察結果については、「補足説明資料4. 1」に示す。

5. 2. 1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③') : EPMA分析)】



➤ EPMA分析の結果, TF-1断層の最新面である, 面③'を横断する脈はカルシウム濃度の高い領域に対応していることから, カルサイト脈であることを確認した。

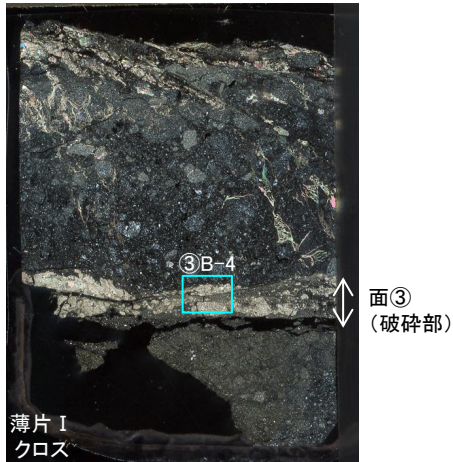


面③' (別の箇所)のEPMA分析結果については、「補足説明資料4. 1」に示す。

5. 敷地の断層の活動性評価
5.2 断層と脈の関係

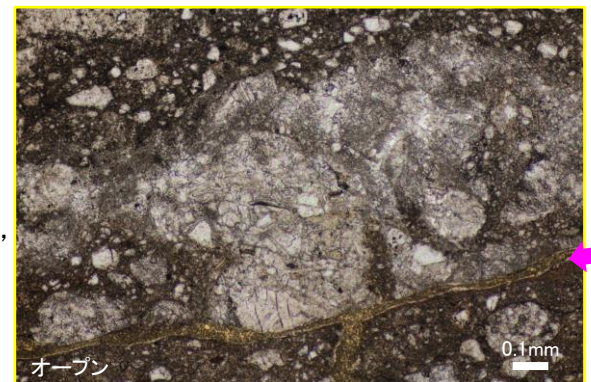
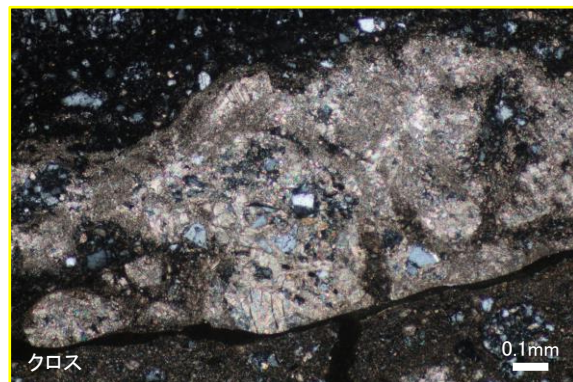
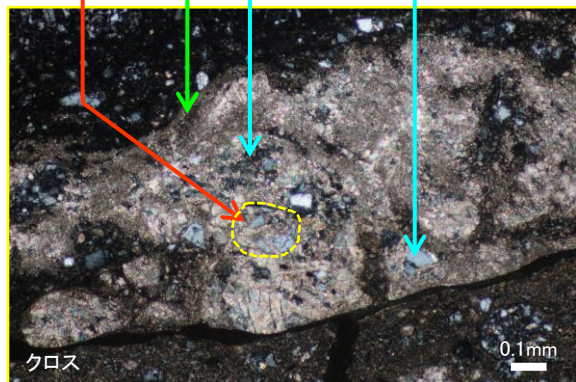
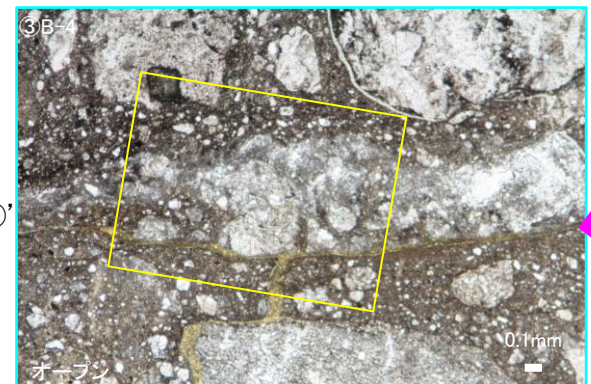
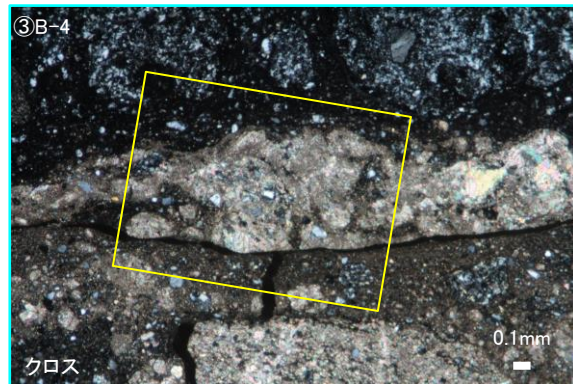
5.2.1 TF-1断層【詳細観察・検討(面③':薄片Iの観察)】

傾斜方向
→



- 低倍率で観察すると面③'付近には大きなカルサイトのクラストが分布しているように見えるが、高倍率で観察すると、石英等の破碎されたクラストが認められ、そのクラスト間に細粒なカルサイトが晶出し、クラストとカルサイトの集合体を形成している。【晶出パターンB】
- また、石英等のクラストの一部がカルサイトに置き換えられている箇所も確認される。
⇒クラストが形成された後に、カルサイトが晶出したものと考えられる。
- 一方、面③'を境にクラストの集合体がシャープな面に接しているようにも見える。
⇒面③'を挟んだ下盤側の破碎部中の空隙率が小さいことにより、カルサイトが面を横断できなかったとも考えられるが、せん断の影響を受けている可能性も考えられる。

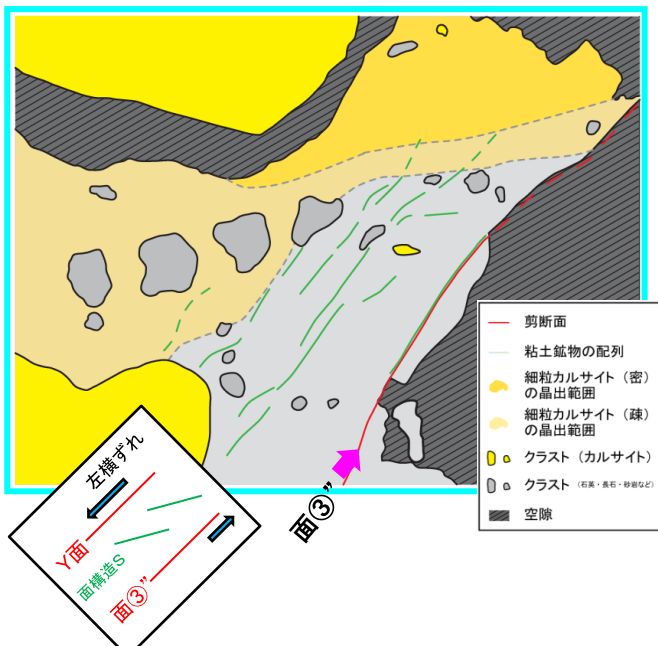
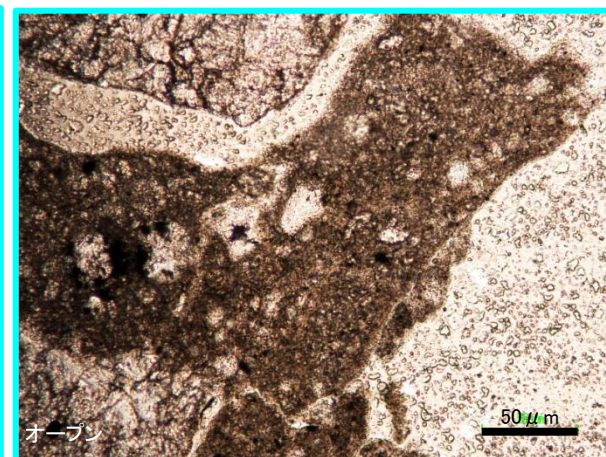
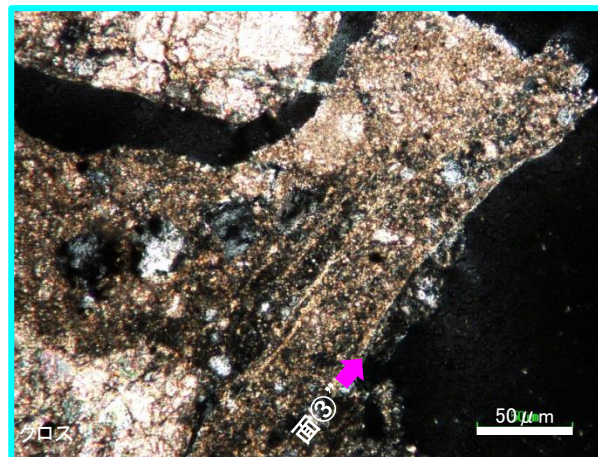
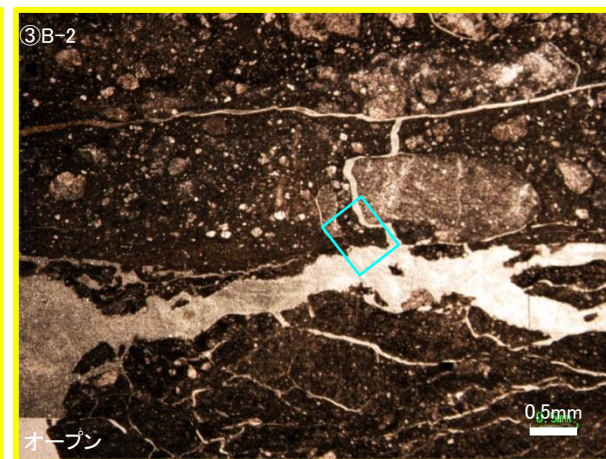
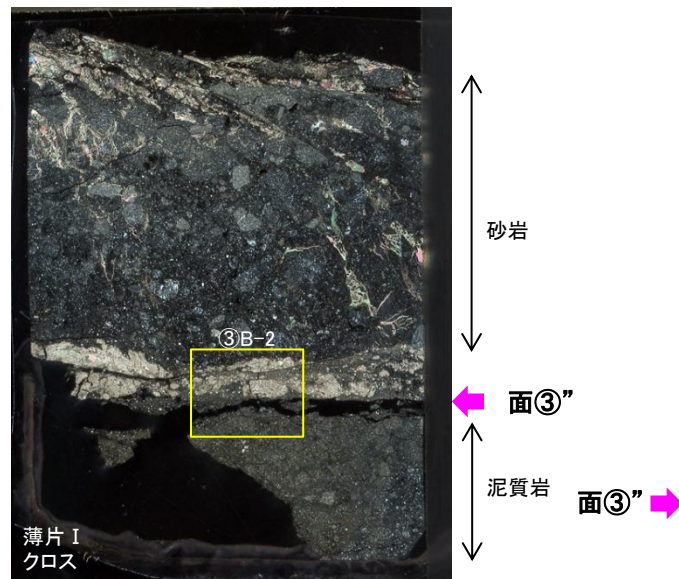
置換
細粒なカルサイト
破碎されたクラスト



拡大写真については、「補足説明資料4.2」に示す。

5.2.1 TF-1断層【詳細観察・検討(面③”):薄片Iの観察①】

- 晶出している鉱物は、オープンで無色、クロスで高次の干渉色を示すことからカルサイトである。
- TF-1断層の最新面である面③”付近には、せん断に伴う粘土鉱物の配列(Y面及び面構造S)が見られる。
- カルサイトが粘土鉱物の配列(Y面)を横断するように晶出しており、面③”の活動に伴う変形は確認されない。【晶出パターンC】



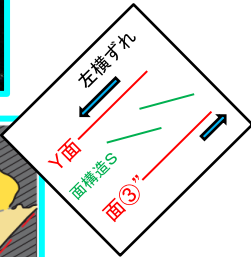
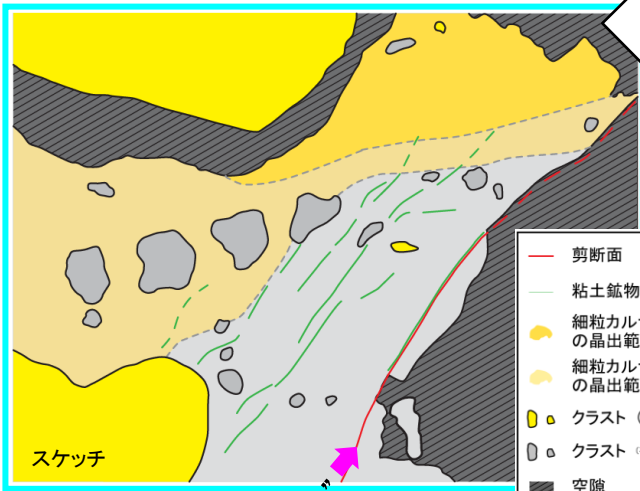
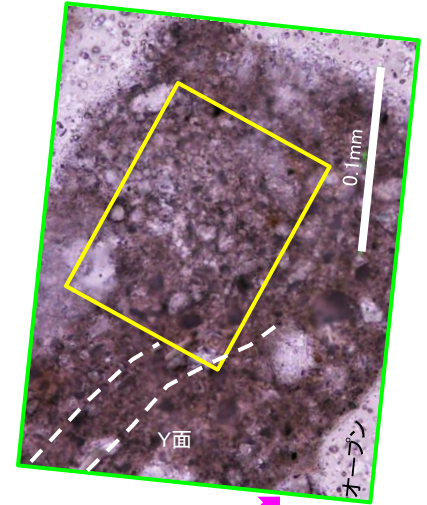
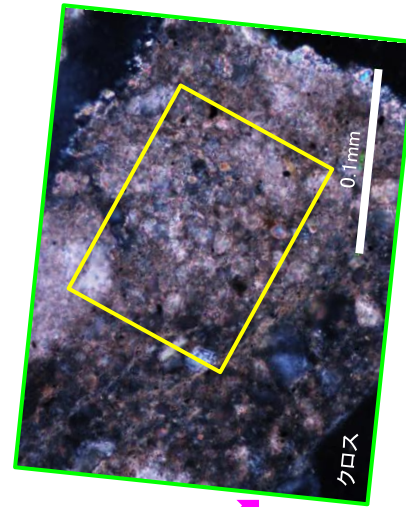
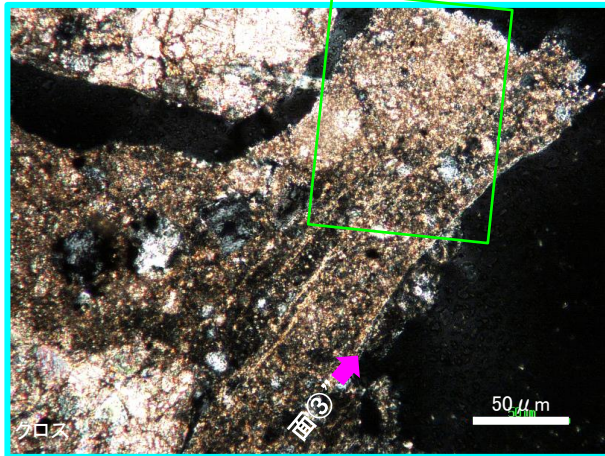
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

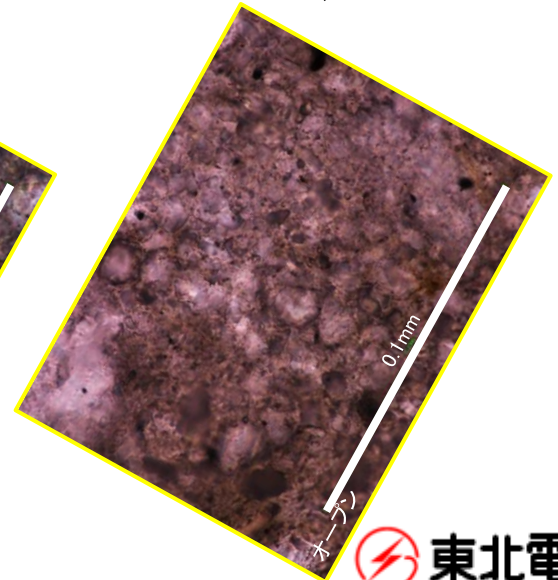
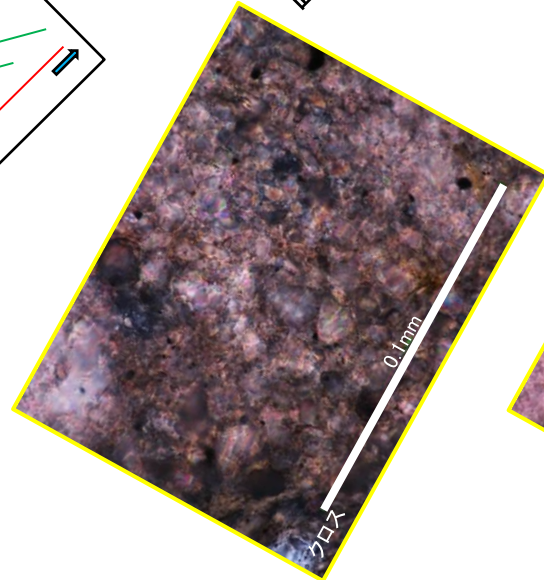
5.2.1 TF-1断層【詳細観察・検討(面③”：薄片Iの観察②)】

- 粘土鉱物の配列(Y面)を横断するようにカルサイトが晶出している。
- 粘土鉱物の配列(Y面)の方向に、カルサイトが定向配列する様子は確認されず、面③”の活動に伴う変形は確認されない。【晶出パターンC】

⇒面③”の活動後に、自形のカルサイトが晶出したと考えられる。



- 剪断面
- 粘土鉱物の配列
- 細粒カルサイト (密) の晶出範囲
- 細粒カルサイト (疎) の晶出範囲
- クラスト (カルサイト)
- クラスト (石英・長石・砂粒など)
- 空隙



5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③:薄片Ⅲの概要)】

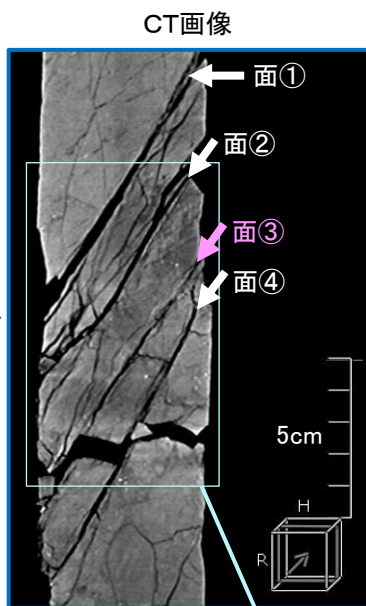
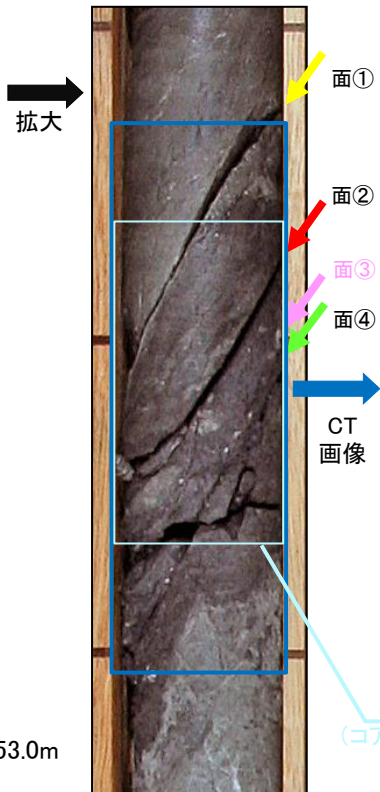
24B-28孔
(コア写真)

- 面②～④を含むように研磨片を作成し、面③の観察・分析を行った。
- 観察・分析結果は下表のとおりであり、詳細を次頁以降に示す。

評価項目	拡大範囲	確認内容
最新面の認定	③A'	せん断に伴う粘土鉱物の配列を確認。
最新面を横断する鉱物の検討	③B'-1	面③' 沿いに自形のカルサイトが晶出していることを確認。
	③B'-2	面③' の上下にカルサイトが確認され、変位(ずれ)は確認されない。

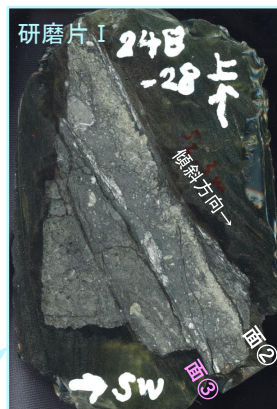
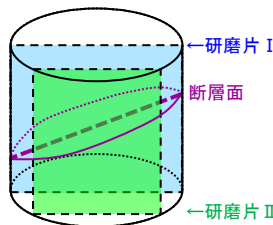
面①: N18W71W
面②: N52W64SW
面③: N52W62SW
面④: N44W61SW

24B-28孔
コア写真(拡大)

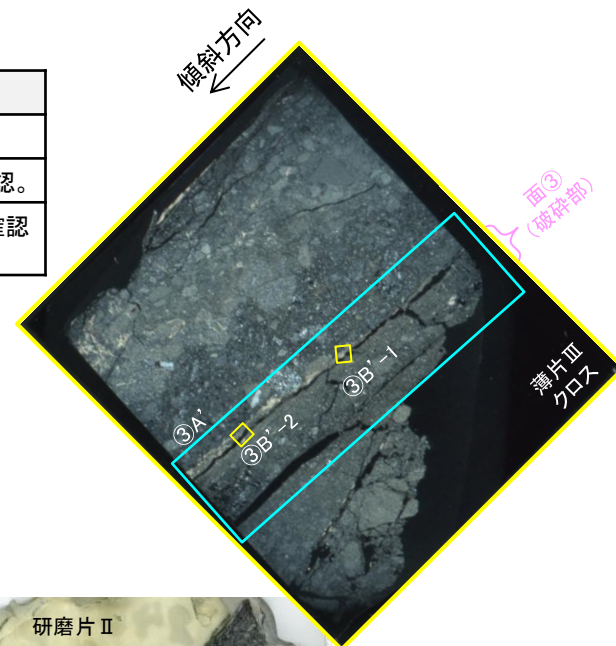


研磨片作成範囲
(コアを半割りし、手前側の試料で作成)

研磨片の位置



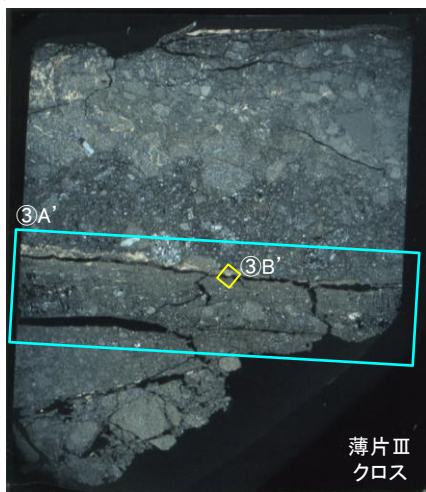
研磨片 I を紙面手前側約1cmの箇所まで切断し、作成



面③
(破砕部)
薄片Ⅲ
クロス

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③:薄片Ⅲの観察①)】

上盤 ← 傾斜方向

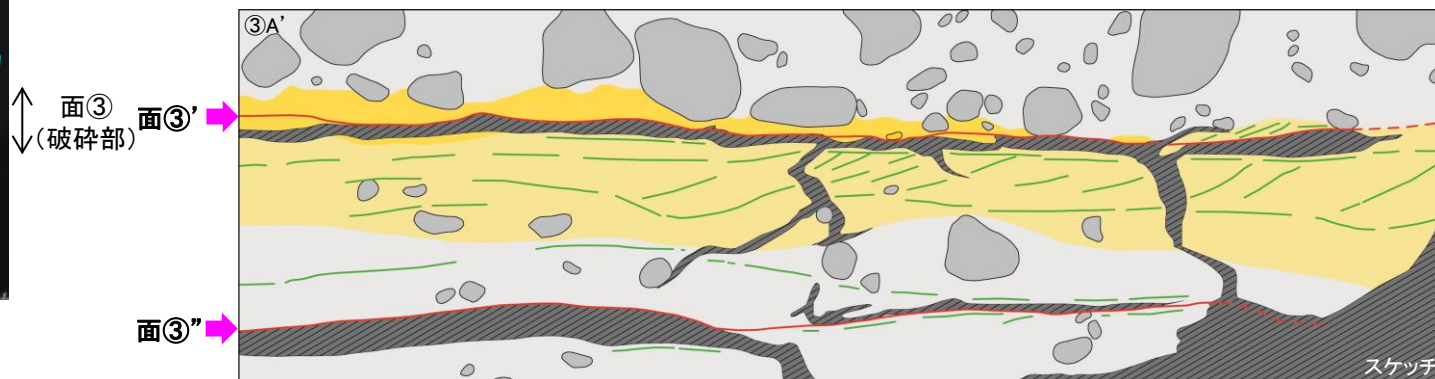


薄片Ⅲ
クロス

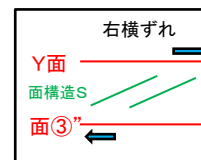


薄片Ⅲ
オープン

- 面③付近には並走する2つの面(面③'及び面③'')が確認された。
- 面③'と面③''に挟まれる領域(破碎部)の内部に粘土鉱物の配列が複数確認された。
- 面③'付近には、せん断に伴う粘土鉱物の配列(Y面及び面構造S)が観察され、逆断層センスの構造が確認できる。
- 面③''は、せん断に伴う粘土鉱物の配列が確認されることから、TF-1断層の最新面と判断される。

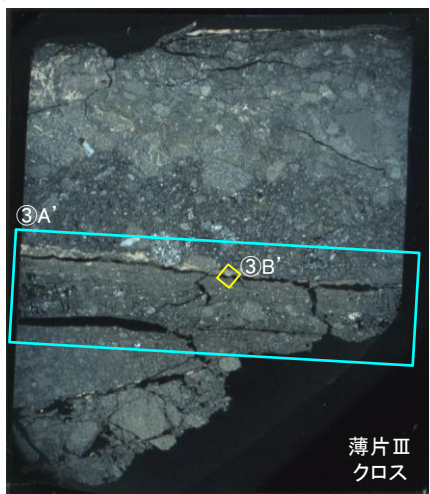


- せん断面
- 粘土鉱物の配列
- 細粒カルサイト (密) の晶出範囲
- 細粒カルサイト (疎) の晶出範囲
- カルサイト
- クラスト (石英・長石・砂岩など)
- 細粒破碎部の基質
- 空隙



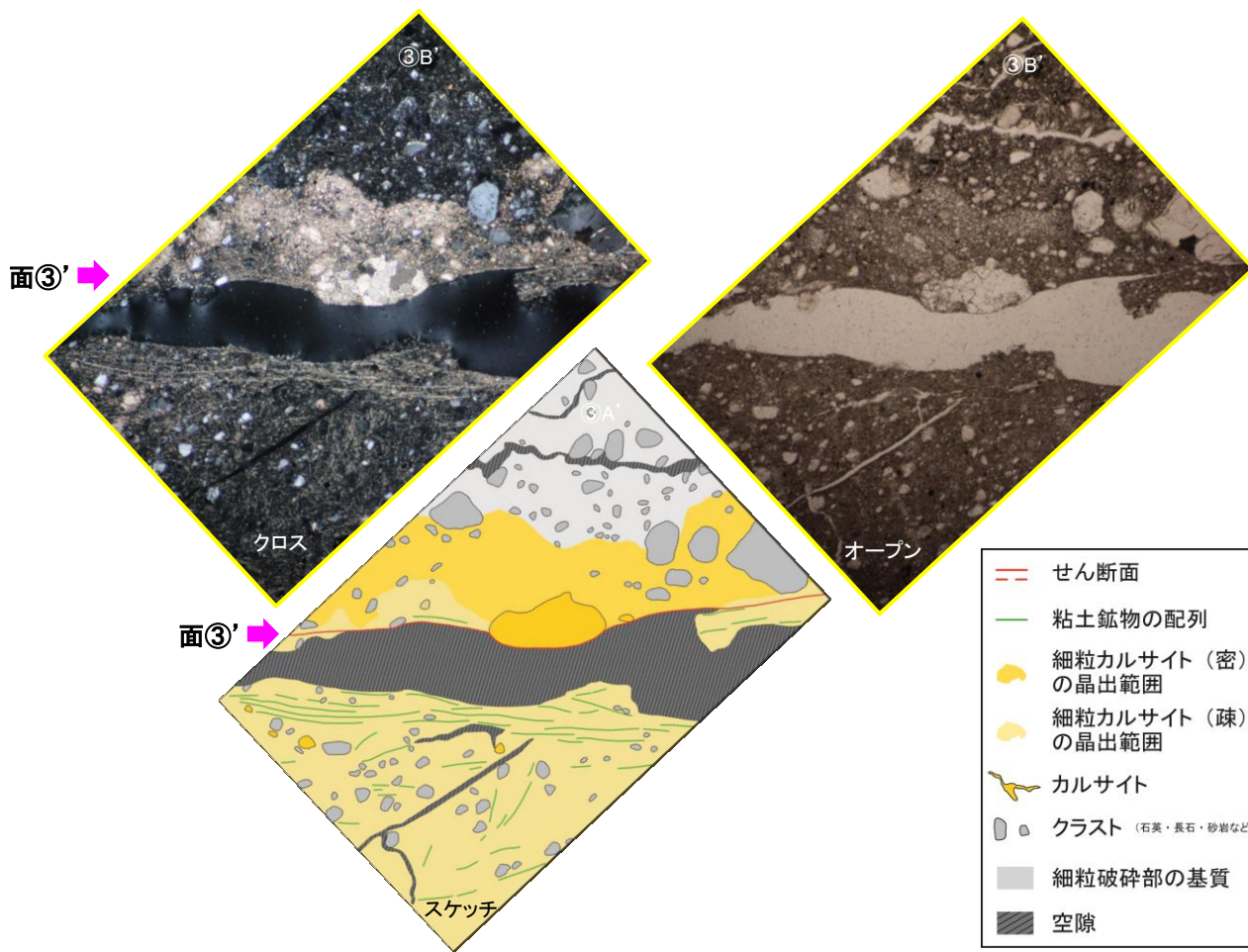
5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③:薄片Ⅲの観察②)】

上盤 ↑ 傾斜方向 ←



- 晶出している鉱物は、オープンで無色、クロスで高次の干渉色を示すことからカルサイトである。
- TF-1断層の最新面である、面③' 沿いに自形のカルサイトが晶出しており、面③' の活動に伴う変形は確認されない。

⇒面③' の活動後に、自形のカルサイトが晶出したと考えられる。

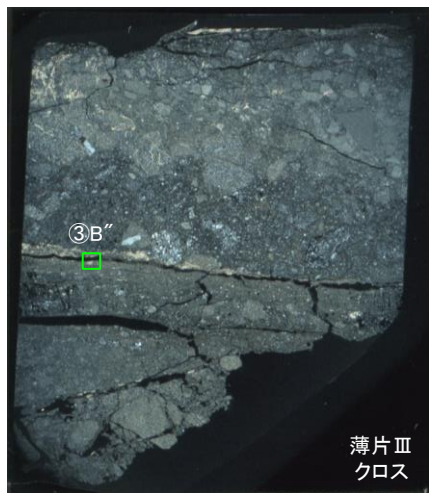


5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③:薄片Ⅲの観察③)】

上盤 ↑ 傾斜方向 ←

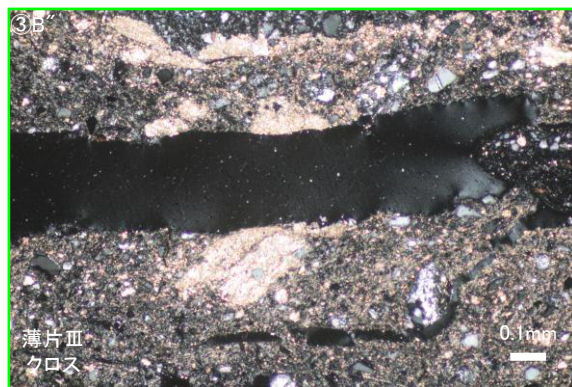


↑ ↓ 面③ (破碎部)

薄片Ⅲ
クロス

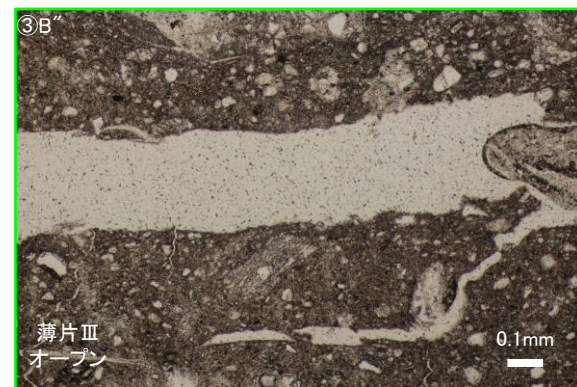
- 晶出している鉱物は、オープンで無色、クロスで高次の干渉色を示すことからカルサイトである。
- TF-1断層の最新面である、面③'の上下に晶出しているカルサイトに、変位(ずれ)は確認されない。

⇒面③'の活動後に、カルサイトが晶出したと考えられる。



薄片Ⅲ
クロス

0.1mm



薄片Ⅲ
オープン

0.1mm

面③'



↑ ↓ 面③ (破碎部)

薄片Ⅲ
オープン

5. 敷地の断層の活動性評価

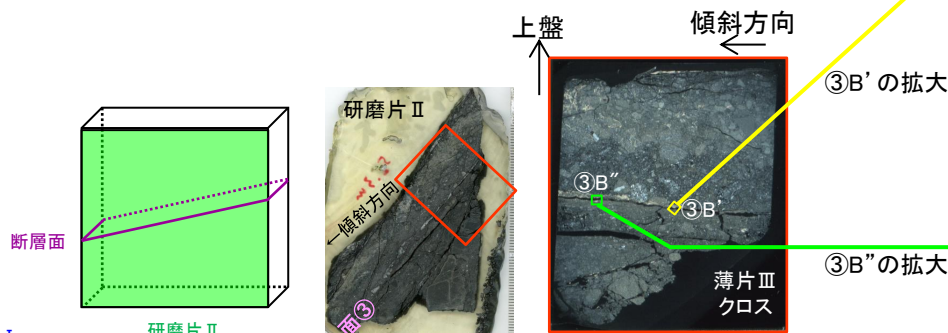
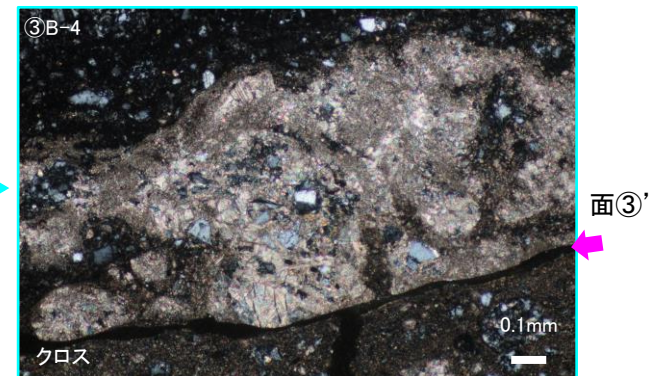
5. 2 断層と脈の関係

5. 2. 1 TF-1断層 【詳細観察・検討(面③のまとめ)】

- 面③' 沿いに自形のカルサイトが晶出しており、変形は確認されない。【薄片Ⅲ：③B'】
- 面③' の上下にカルサイトが確認され、変位(ずれ)は確認されない。【薄片Ⅲ：③B''】
- 面③' を境にクラストの集合体がシャープな面に接しているようにも見え、断層活動による変形を受けた可能性がある。【薄片Ⅰ：③B-4】

⇒ 自形のカルサイト、変位のないカルサイト、及び変形を受けたカルサイトが共存していることから、TF-1断層面③' の最終活動と同じ期間に、カルサイトがTF-1断層破碎部に晶出したものと考えられる。

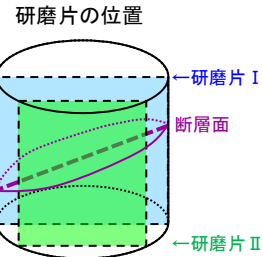
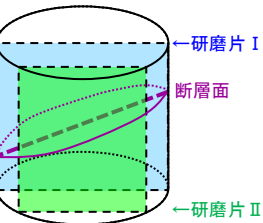
・自形のカルサイト、変位のないカルサイトも確認されることから、TF-1断層面③' は、カルサイトの晶出が終了して以降に活動していないと考えられる。



研磨片の位置

断層面

断層面



5. 2. 1 TF-1断層 【詳細観察・検討のまとめ】

- 面②には、せん断の影響を受けて流動したようなS字状の分布形態を示すカルサイトが確認されたが、最新面を横断して脈状に晶化する自形のカルサイトも確認された。
- 面③付近でせん断の影響を受けたカルサイトも確認されたが、面③沿いに自形のカルサイト、及び面③の上下に分布する変位のないカルサイトも確認された。
- ⇒・脈状のカルサイトと、せん断の影響を受けたカルサイトが共存していることから、TF-1断層の最終活動と同じ期間に、カルサイトがTF-1断層破碎部に晶出したものと考えられる。
 - ・カルサイトには流動的な変形に見えるものもあることから、高温の環境下にあったものと考えられる。
 - ・せん断の影響を受けていない自形のカルサイトが、TF-1断層の最新面を横断して晶出していることも確認されることから、TF-1断層はカルサイトの晶出が終了して以降に活動していないものと考えられる。

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層 【詳細観察・検討のまとめ】

➢ TF-1断層の活動性を評価するために有効な上載層(後期更新世の地層等)は確認できなかった。

5.1 上載層との関係

トレンチ調査
➢ 断層面を横断する鉱物脈の確認

➢ トレンチ、露頭では、TF-1断層を貫くひん岩脈、鉱物脈を目視観察で確認することはできなかった。

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層

トレンチ、露頭調査
➢ 断層面を横断する鉱物脈の確認

5.2.2 OF-4断層

➢ コア及びCT画像観察
➢ 薄片による詳細観察

➢ TF-1断層の最新面の可能性のある面として、面②と面③を選定した。

コア、ボアホールカメラ及びCT画像観察
➢ 最新面の可能性のある面の選定
➢ 面の直線性・連続性の確認

地質学的なプロセスを考慮

➢ 脈状のカルサイトと、せん断の影響を受けたカルサイトが共存していることから、TF-1断層の最終活動と同じ期間に、カルサイトがTF-1断層破碎部に晶出したものと考えられる。
➢ せん断の影響を受けていない自形のカルサイトが、TF-1断層の最新面を横断して晶出していることから、カルサイトの晶出が終了して以降、TF-1断層は活動していないと考えられる。

詳細観察・検討
➢ 研磨片、薄片による詳細観察
➢ EPMA分析による検討

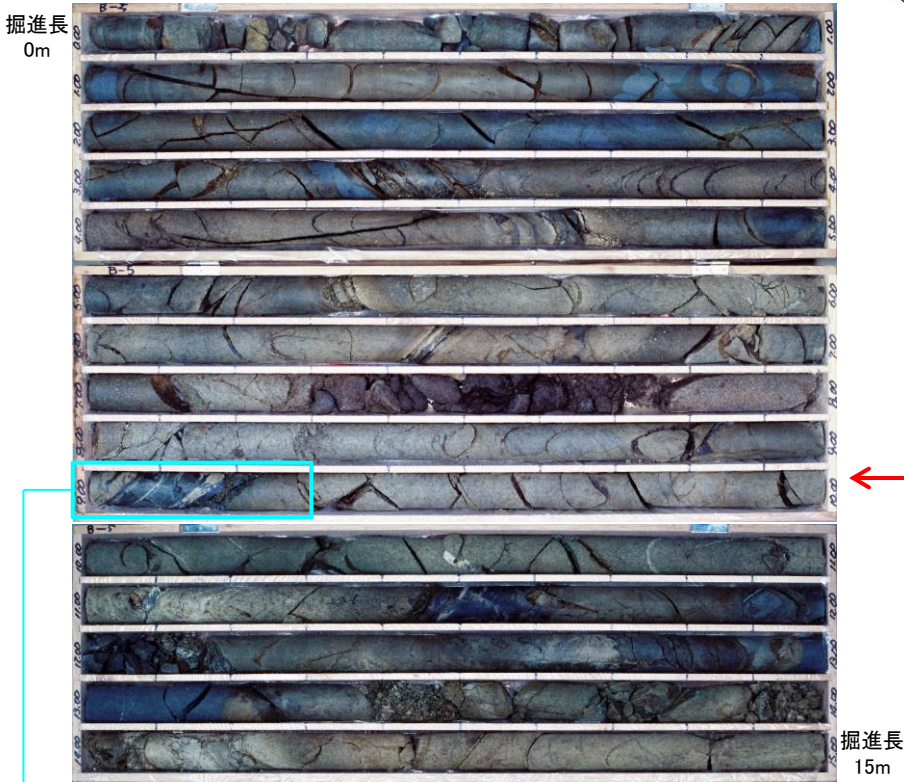
5.2.3 熱史の検討

➢ 鉱物の生成環境の検討
➢ 同一条件下で生成する鉱物の検討
➢ 熱史の検討

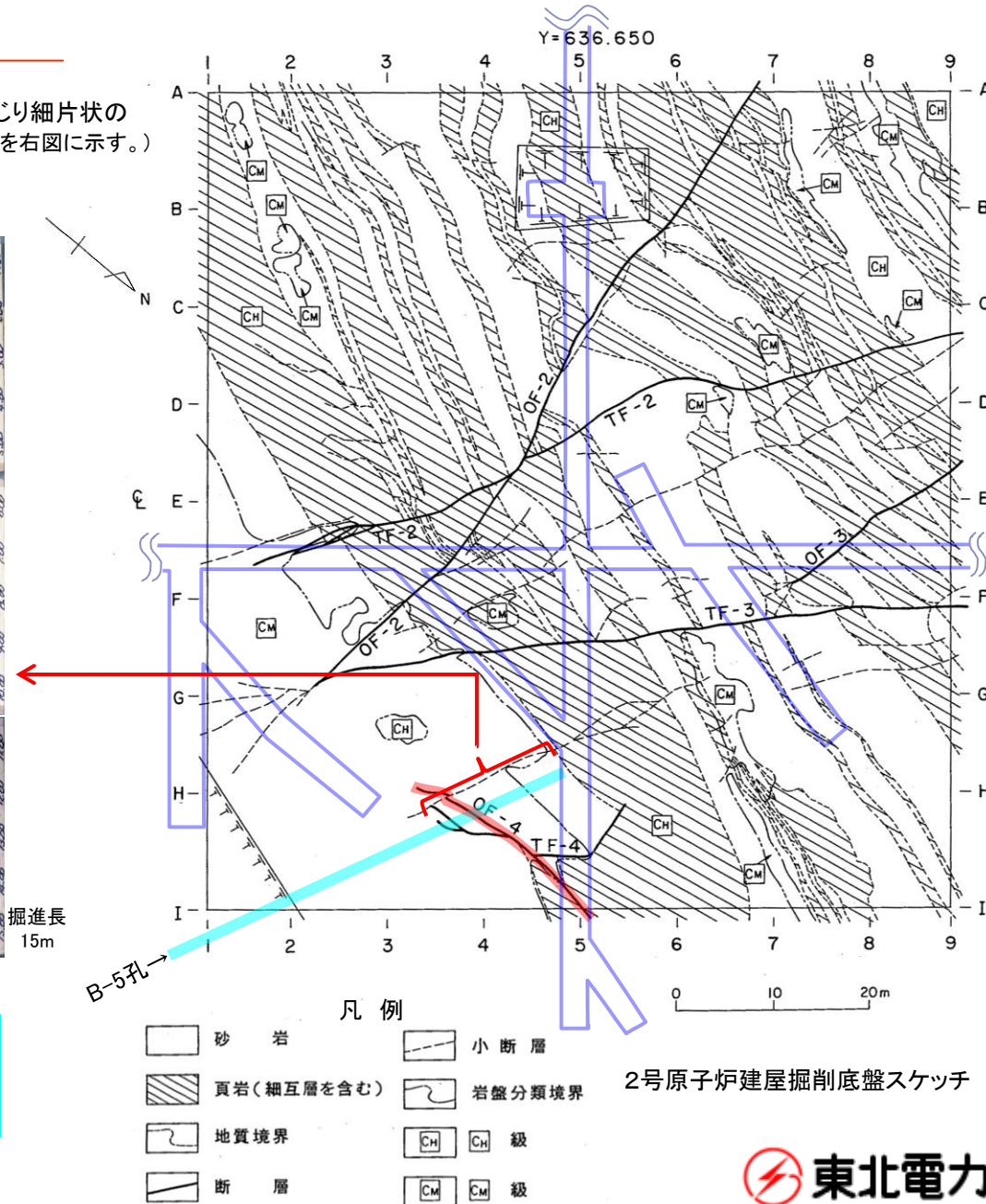
5.2.2 OF-4断層【位置図】

- ▶ 試掘坑から水平ボーリング(B-5孔)を実施。
- ▶ 孔口(試掘坑壁面)から掘進長約9.2m付近の位置に、幅約1cm、砂混じり細片状のOF-4断層破砕部を確認。(水平ボーリング(B-5孔)とOF-4断層の位置関係を右図に示す。)
- ▶ 次頁以降でOF-4断層破砕部の観察、分析結果を示す。

B-5孔 (ボーリングコア写真)



B-5孔 掘進長 9.0~9.3m

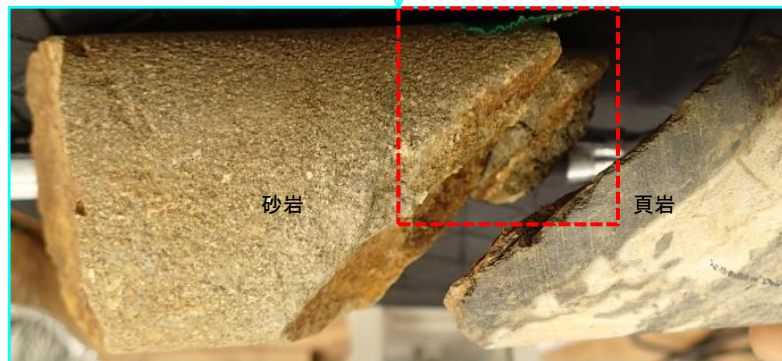
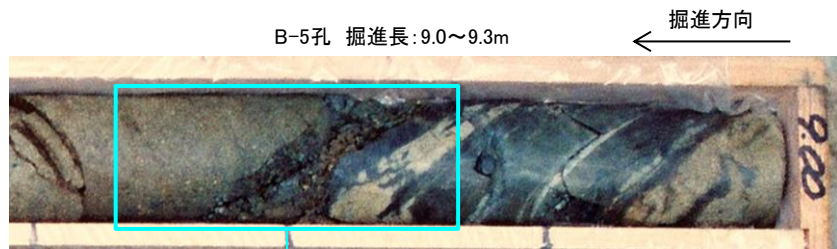


5. 敷地の断層の活動性評価

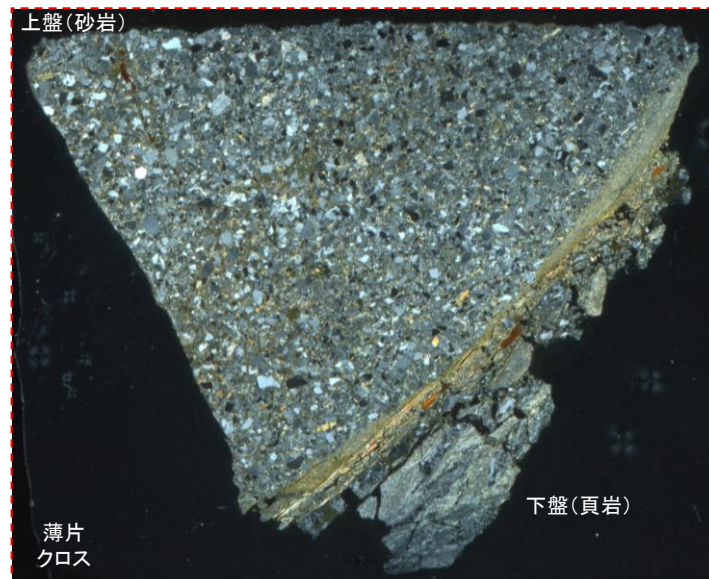
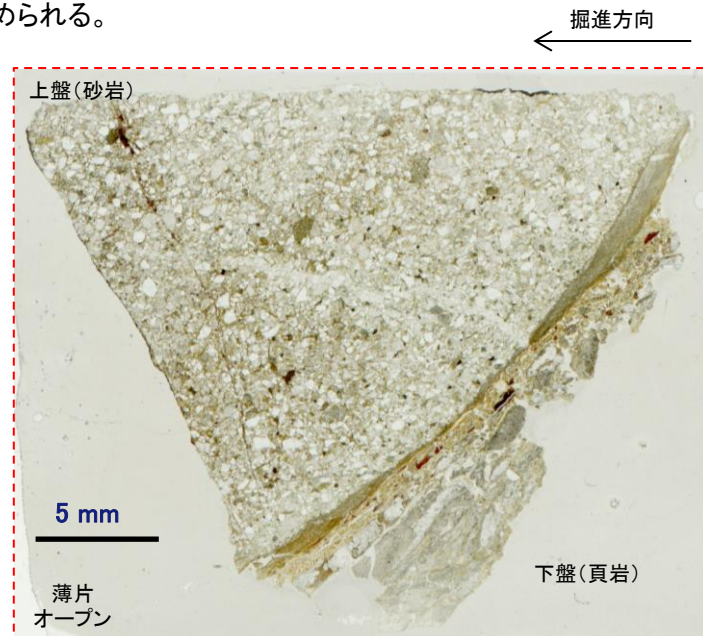
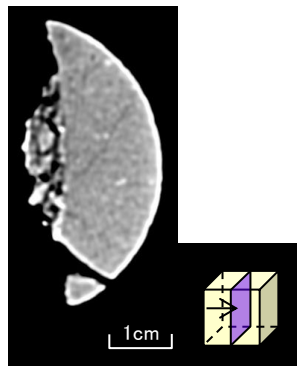
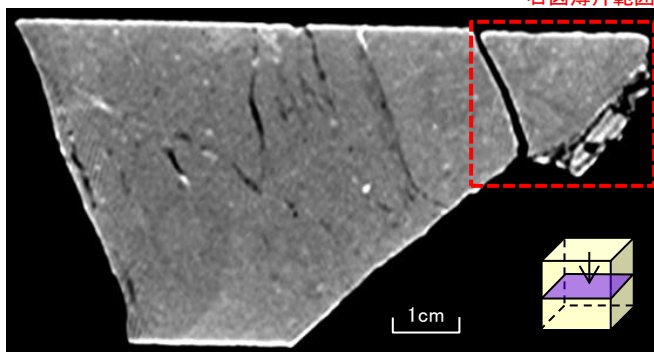
5. 2 断層と脈の関係

5. 2. 2 OF-4断層【CT画像・薄片観察】

- OF-4断層は、上盤側の砂岩と下盤側の頁岩の境界付近に、幅約1cmの破砕部として認められる。
- OF-4断層破砕部(B-5孔:掘進長9.2m付近)を含むように薄片を作成した。



CT画像



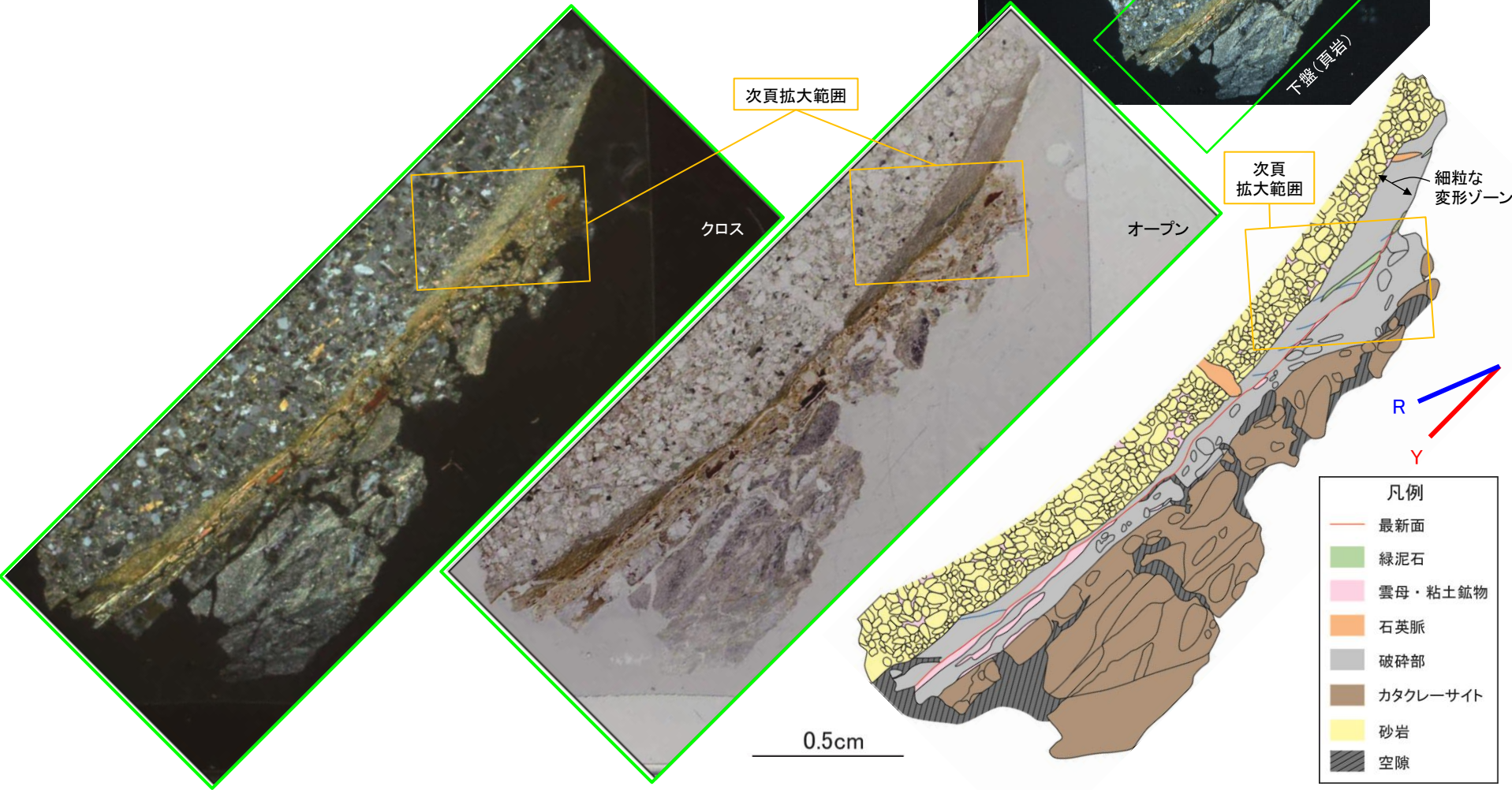
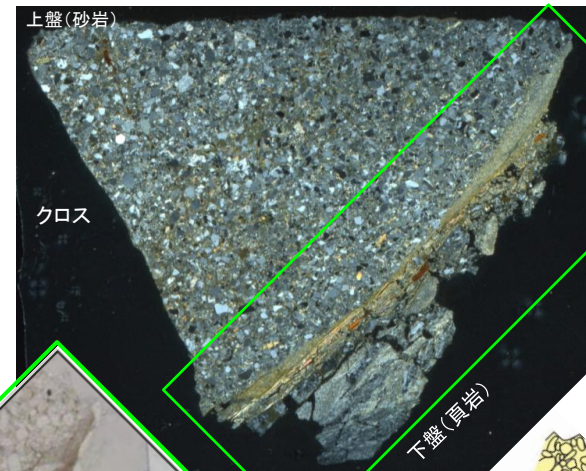
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.2 OF-4断層【薄片の観察①】

➤ OF-4断層破碎部で作成した薄片の詳細観察を行った結果、上盤側から下盤側に向かって、砂岩、破碎部、頁岩を原岩とするカタクレーサイトから構成されている。

- ✓ 破碎部の内部には、比較的連続性の良い最新面が認められる。(スケッチ赤線)
- ✓ 破碎部のうち、最新面より上盤側には細粒な変形ゾーンが認められる。
- ✓ 最新面沿いには、粘土鉱物が認められる。
- ✓ 下盤側のカタクレーサイトは、古い断層活動による破碎の影響を受けた頁岩が固結している。

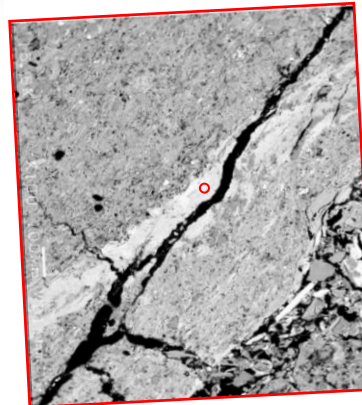
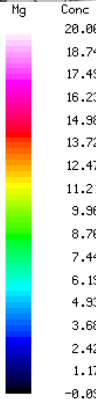
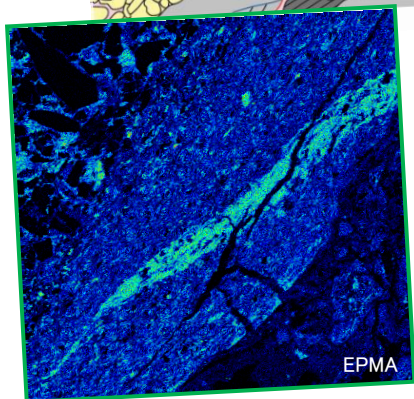
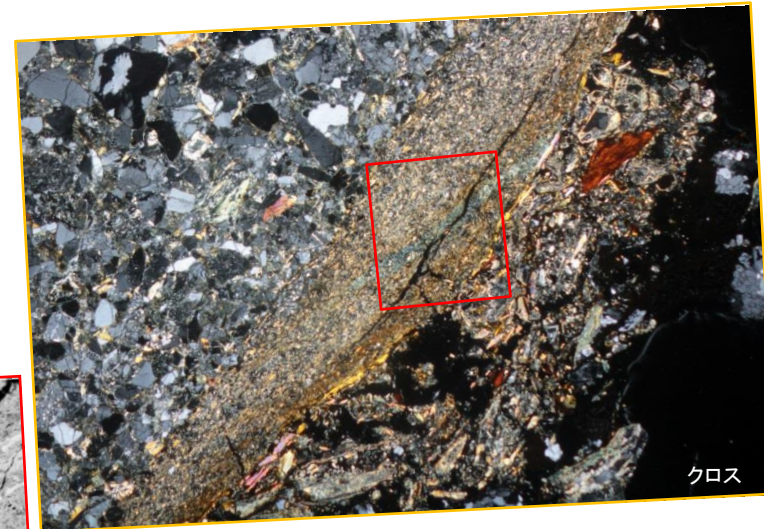
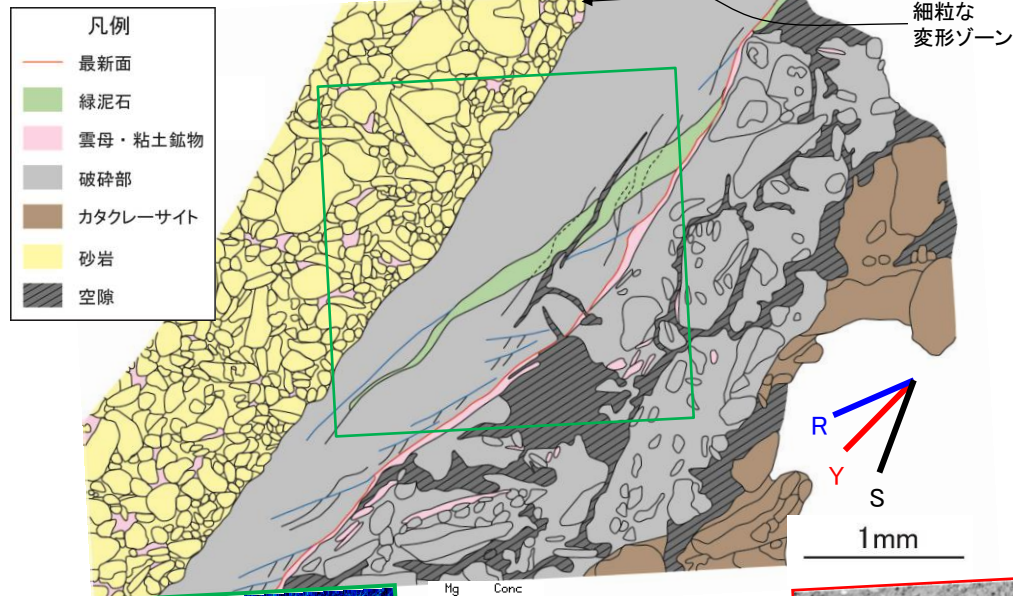


5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.2 OF-4断層【薄片の観察②】

- 細粒な変形ゾーン内では鉱物が脈状に晶出しており、オープンで緑色、クロスで異常干渉色を示すことから、緑泥石であると考えられる。
- Deer et al.(1992)によると、緑泥石 ($(\text{Mg, Fe, Al})_6(\text{Al, Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) の組成は、 SiO_2 が30%程度、 Al_2O_3 は10~30%程度、 FeO と MgO の合計が30~40%程度とされており、EPMA(WDS)分析による定量分析結果からも緑泥石であることが支持される。
- EPMA(WDS)分析によるマッピング結果からも、この脈状の鉱物はマグネシウム濃度が高い領域に対応しており、緑泥石であることが支持される。



EPMA(WDS)定量分析結果(単位: %)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
29.28	0.11	18.58	26.03	7.85	0.59	0.15	0.23

○: 分析位置

5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

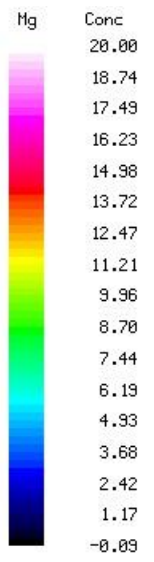
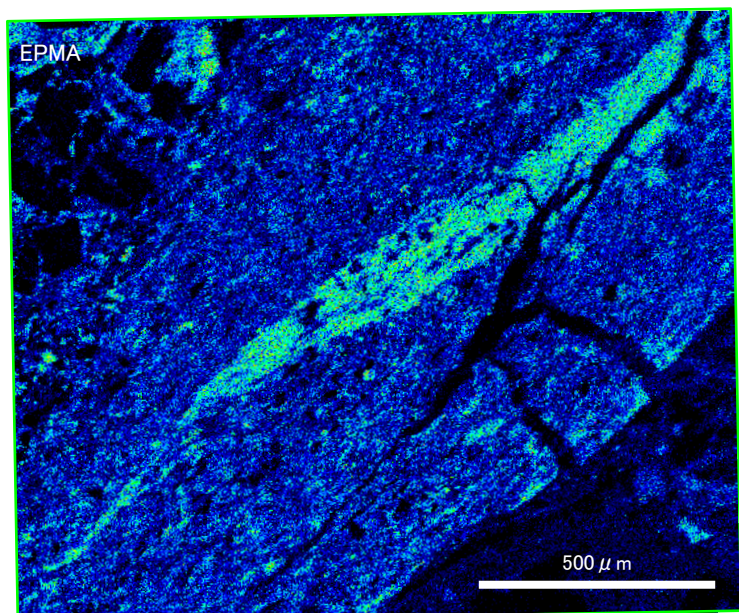
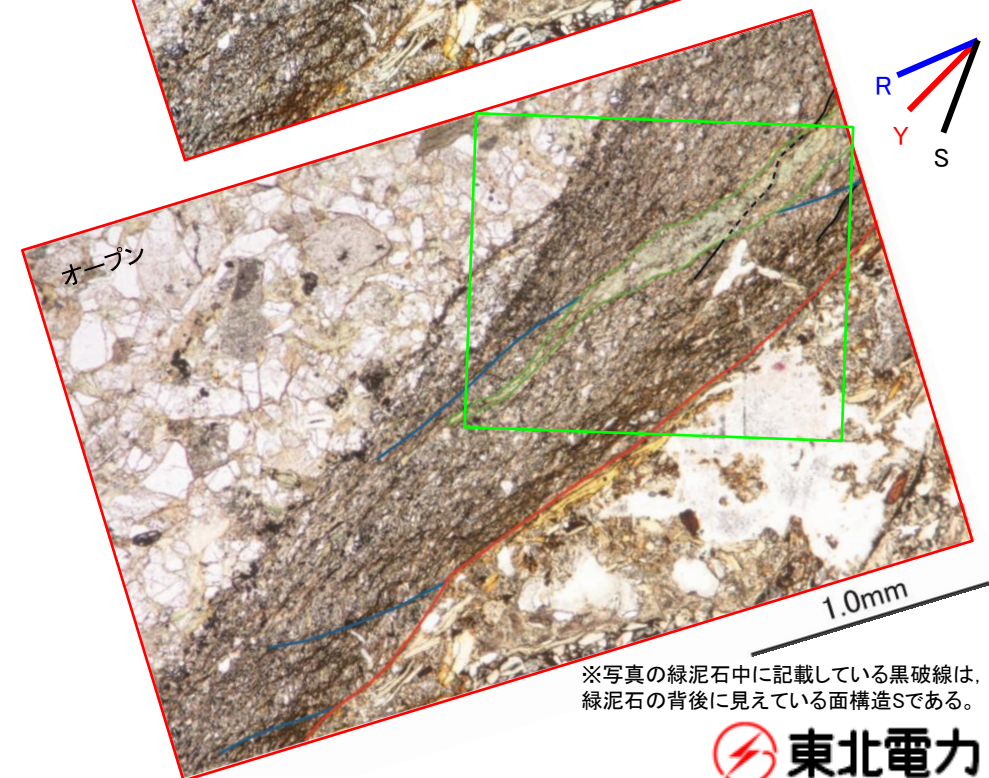
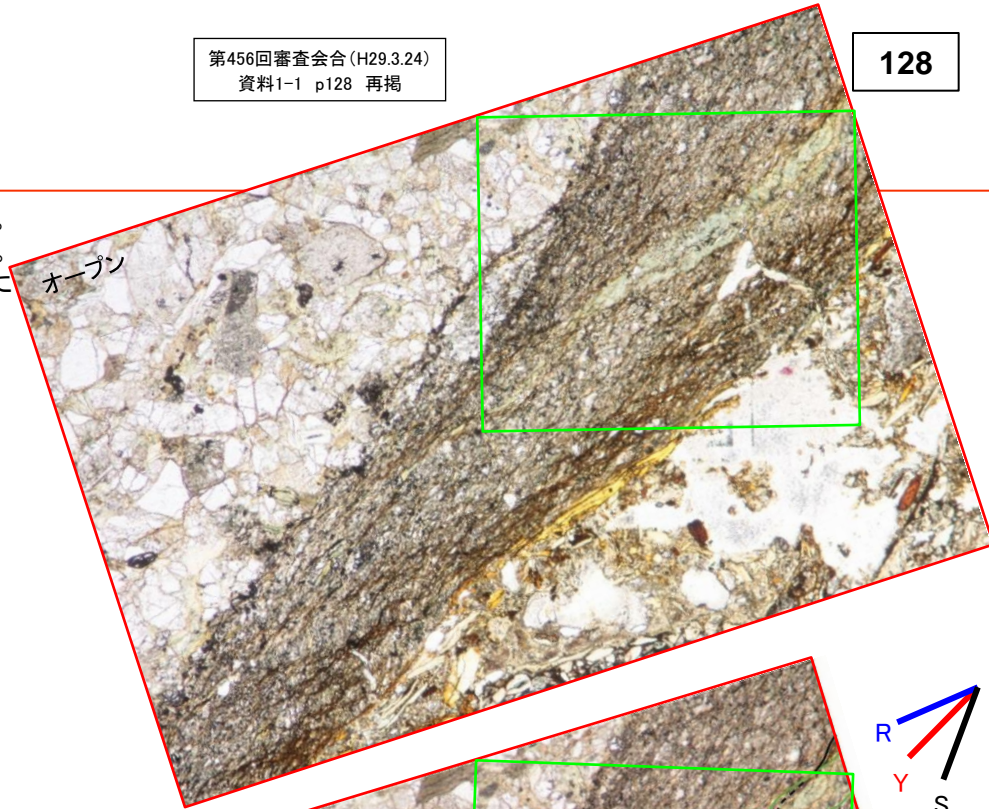
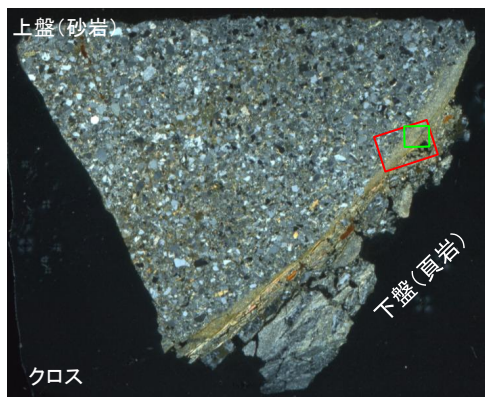
5.2.2 OF-4断層【薄片の観察③】

第456回審査会合 (H29.3.24)

資料1-1 p128 再掲

128

- 細粒な変形ゾーンのうち、最新面付近に逆断層センスの変形構造が確認された。
- ✓ R面(青線)及び面構造S(黒線)が、みかけ右横ずれ方向の逆断層センスを示す。
- 脈状の緑泥石(黄緑線)には断層活動に伴う変形は確認されず、最新面の形成に伴う逆断層センスの変形構造(R面:青線)を切るように晶出している。
- EPMA分析からも、緑泥石はマグネシウム濃度の高い領域に連続的に分布しており、断層活動に伴う変形は確認されない。

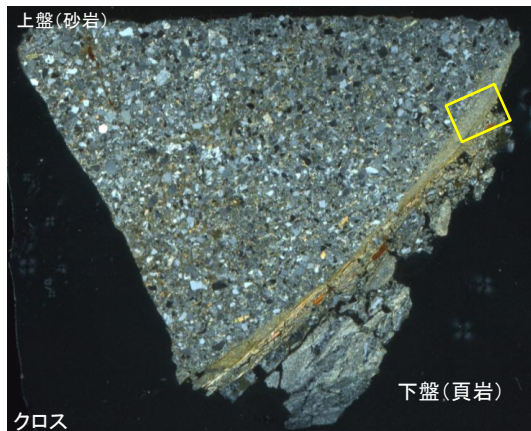


※写真の緑泥石中に記載している黒破線は、緑泥石の背後に見えている面構造Sである。

5. 敷地の断層の活動性評価

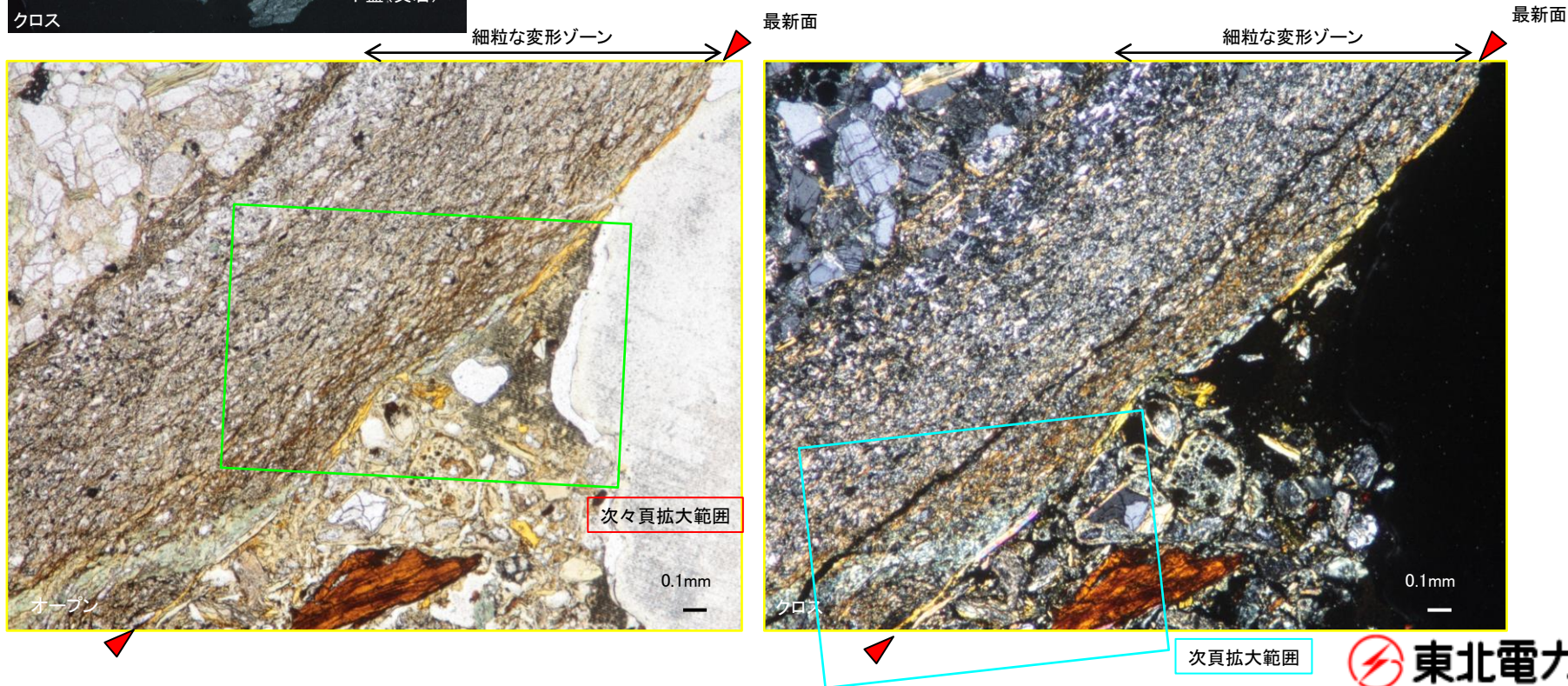
5.2 断層と脈の関係

5.2.2 OF-4断層【薄片の観察④】



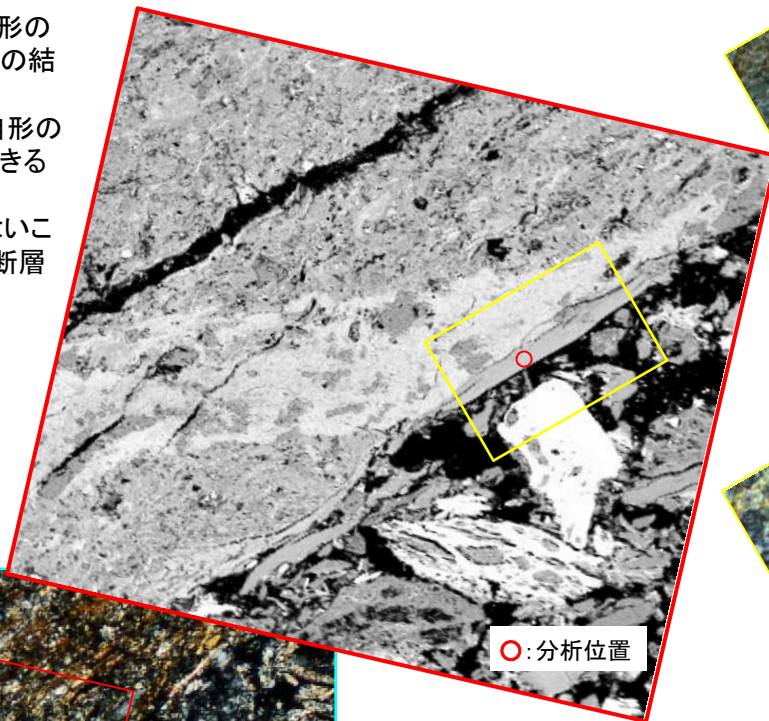
➤ OF-4断層の最新面自体に、自形の鉱物が晶出している。

- ✓ 細粒な変形ゾーン内に脈状に晶出する緑泥石の下盤側を覆うように、最新面上に自形の鉱物が晶出している。(水色枠線内中央部付近: 次頁)
- ✓ 上記鉱物の右上延長方向の最新面上に、オープンで緑色、クロスで異常干渉色を示す自形の鉱物が晶出している。(黄緑色枠線内中央部付近: 次々頁)

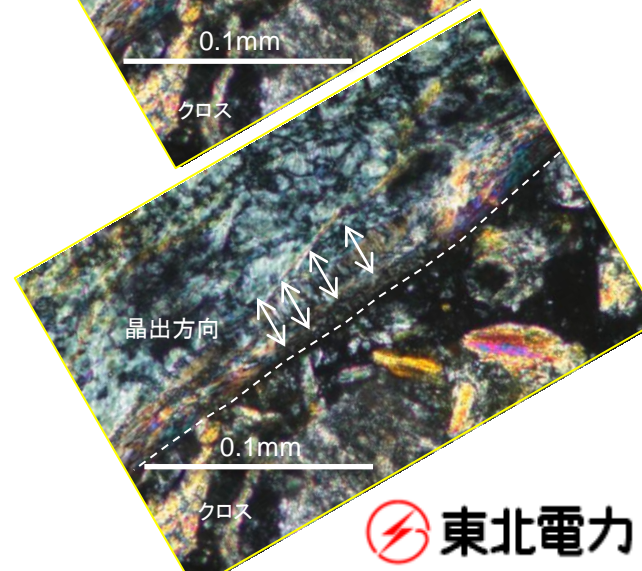
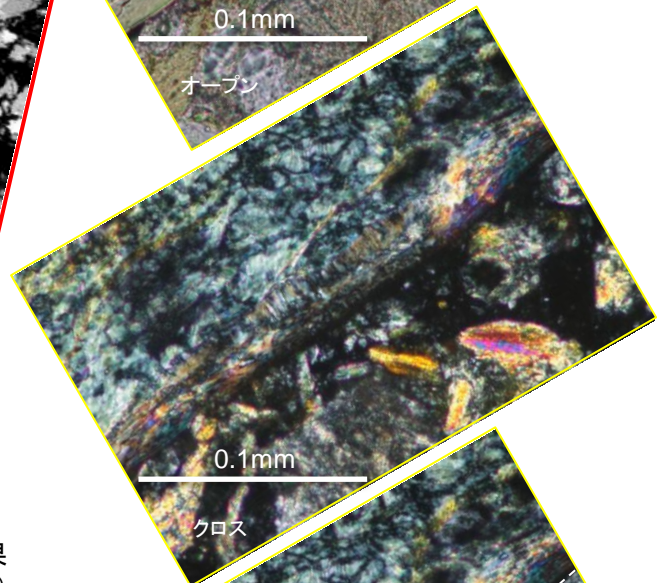
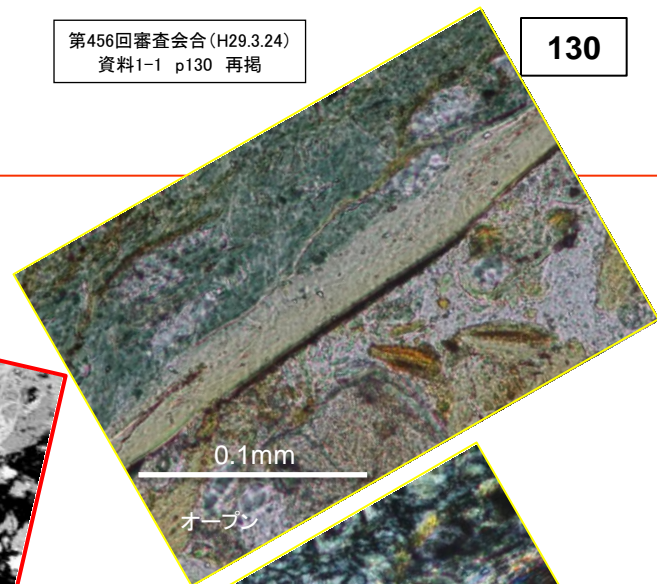


5.2.2 OF-4断層【薄片の観察⑤】

- OF-4断層の最新面自体に晶出している自形の鉱物は、EPMA(WDS)分析による定量分析の結果、スメクタイトと考えられる。
- スメクタイトは、せん断面に垂直な方向に自形の結晶が晶出し、成長している様子が確認できることから、熱水由来と考えられる。
- スメクタイトに破碎による変形は認められないことから、スメクタイトが晶出して以降、OF-4断層の活動はなかったものと考えられる。



○:分析位置



晶出方向

0.1mm

クロス



クロス

100μm

EPMA(WDS)定量分析結果
(単位:%)

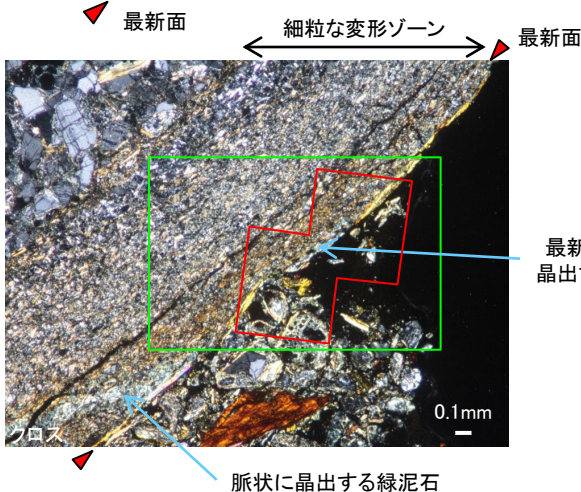
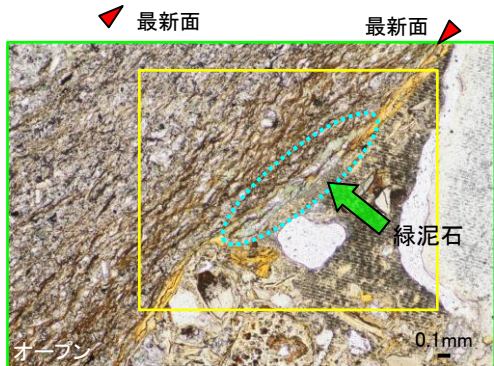
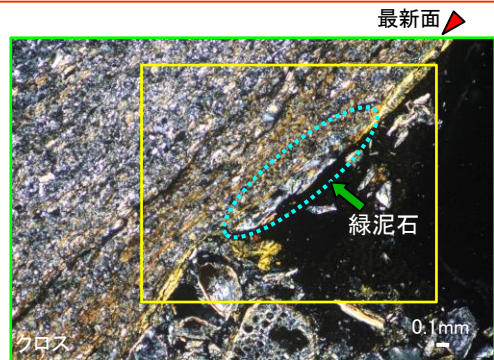
	OF-4断層 スペクトル	スメクタイト*
SiO ₂	48.52	42.29
TiO ₂	0.02	0.17
Al ₂ O ₃	9.15	11.55
FeO	21.31	21.16
MgO	2.21	1.04
CaO	1.43	2.27
Na ₂ O	0.36	0.36
K ₂ O	0.89	0.34

*下田(1985)

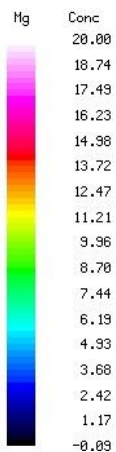
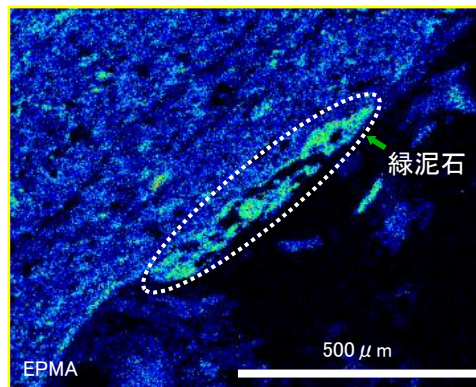
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.2 OF-4断層【薄片の観察⑥】

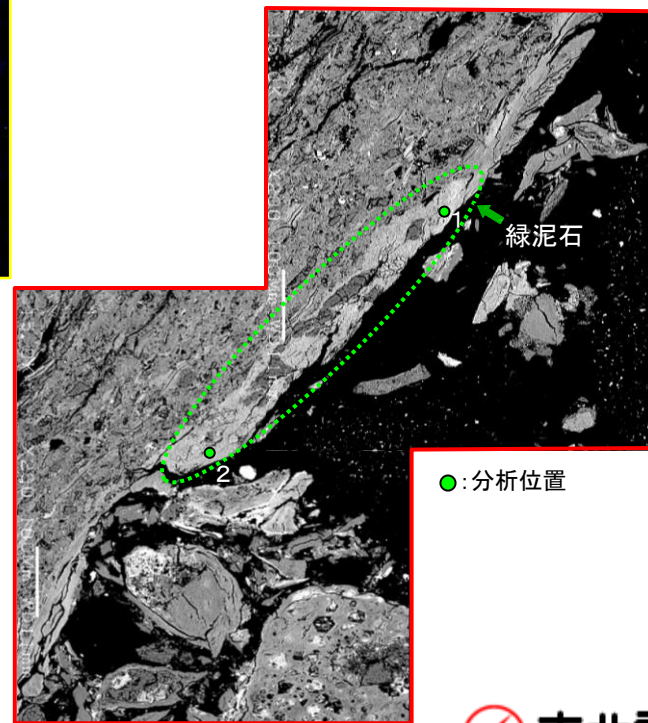


- OF-4断層の最新面自体には、部分的に緑泥石が確認される(オープンで緑色、クロスで異常干渉色を示す)。
- ✓ 熱水由来のス멕タイトが晶出している最新面延長線上に、最新面の連続を遮るように晶出。
- ✓ 近傍にス멕タイト中に取り残されたように分布する緑泥石が見られる。(次頁に掲載)
- EPMA(WDS)分析によるマッピング及び定量分析の結果からも、緑泥石であることが支持される。
- 緑泥石は最新面の連続を遮るように晶出し、破碎による変形は認められないことから、緑泥石が晶出して以降、OF-4断層の活動はなかったものと考えられる。
- なお、細粒な変形ゾーン内に脈状に晶出する緑泥石、及び最新面自体に晶出している緑泥石にはいずれも変形は認められないことから、それぞれの位置で形成されたものと考えられる。



EPMA(WDS)定量分析結果
(単位: %)

	OF-4断層 スペクトル1	OF-4断層 スペクトル2
SiO ₂	25.24	32.12
TiO ₂	0.21	0.04
Al ₂ O ₃	14.10	17.39
FeO	29.64	25.79
MgO	6.47	8.18
CaO	0.69	0.69
Na ₂ O	0.16	0.21
K ₂ O	0.15	0.11

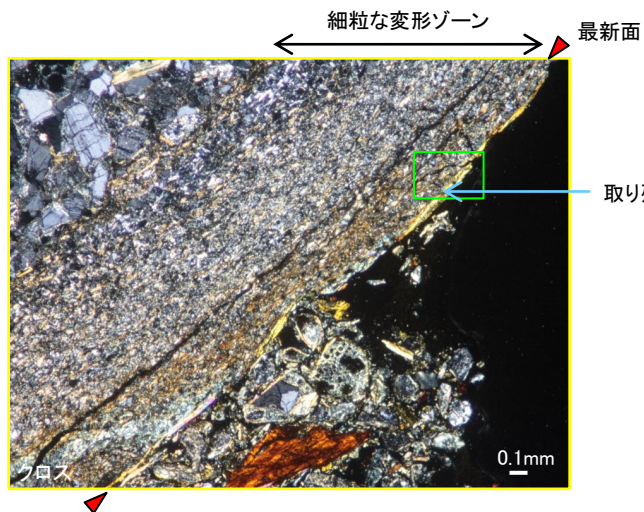


●:分析位置

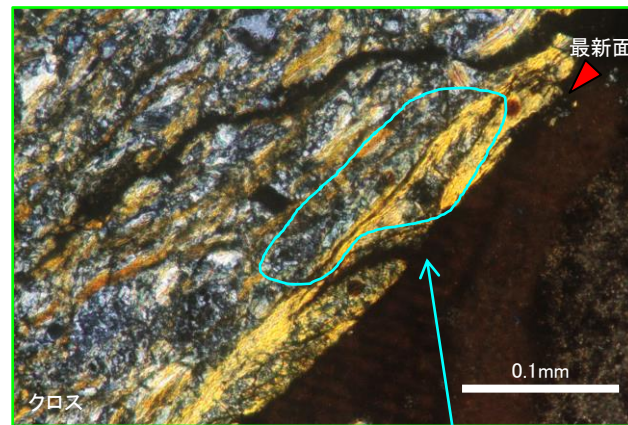
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.2 OF-4断層【薄片の観察⑦】

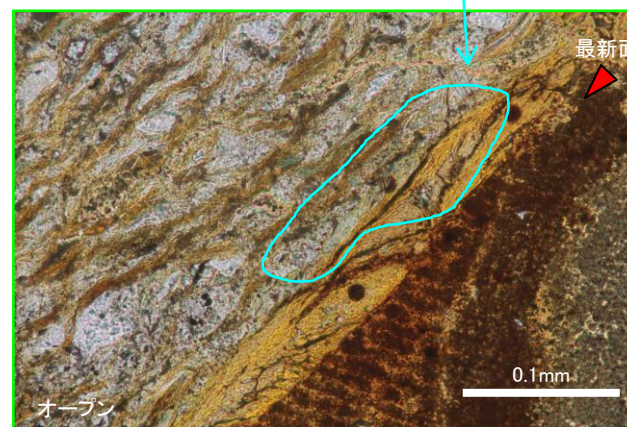
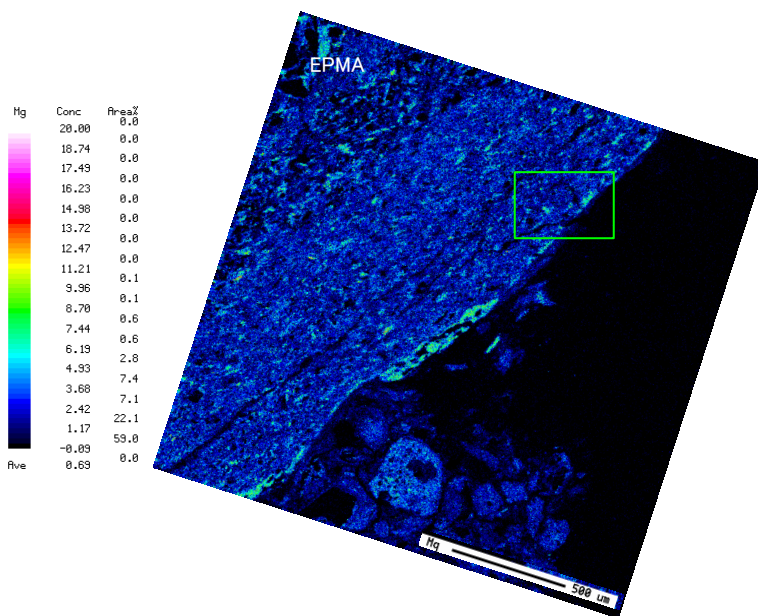


▶ スメクタイト中に取り残されたように分布する緑泥石が見られる。
(スメクタイトで埋められた最新面の一部に緑泥石が見られる)



最新面

スメクタイト中に取り残されたように分布する緑泥石



最新面

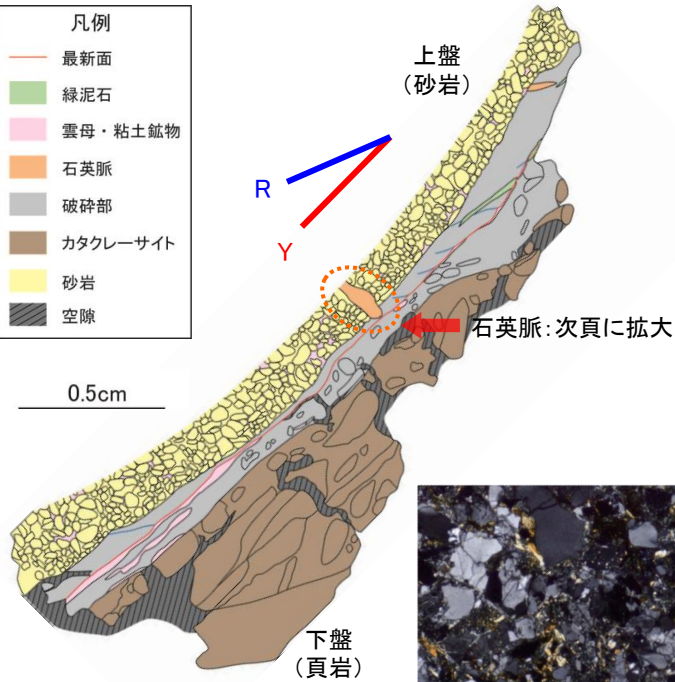
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

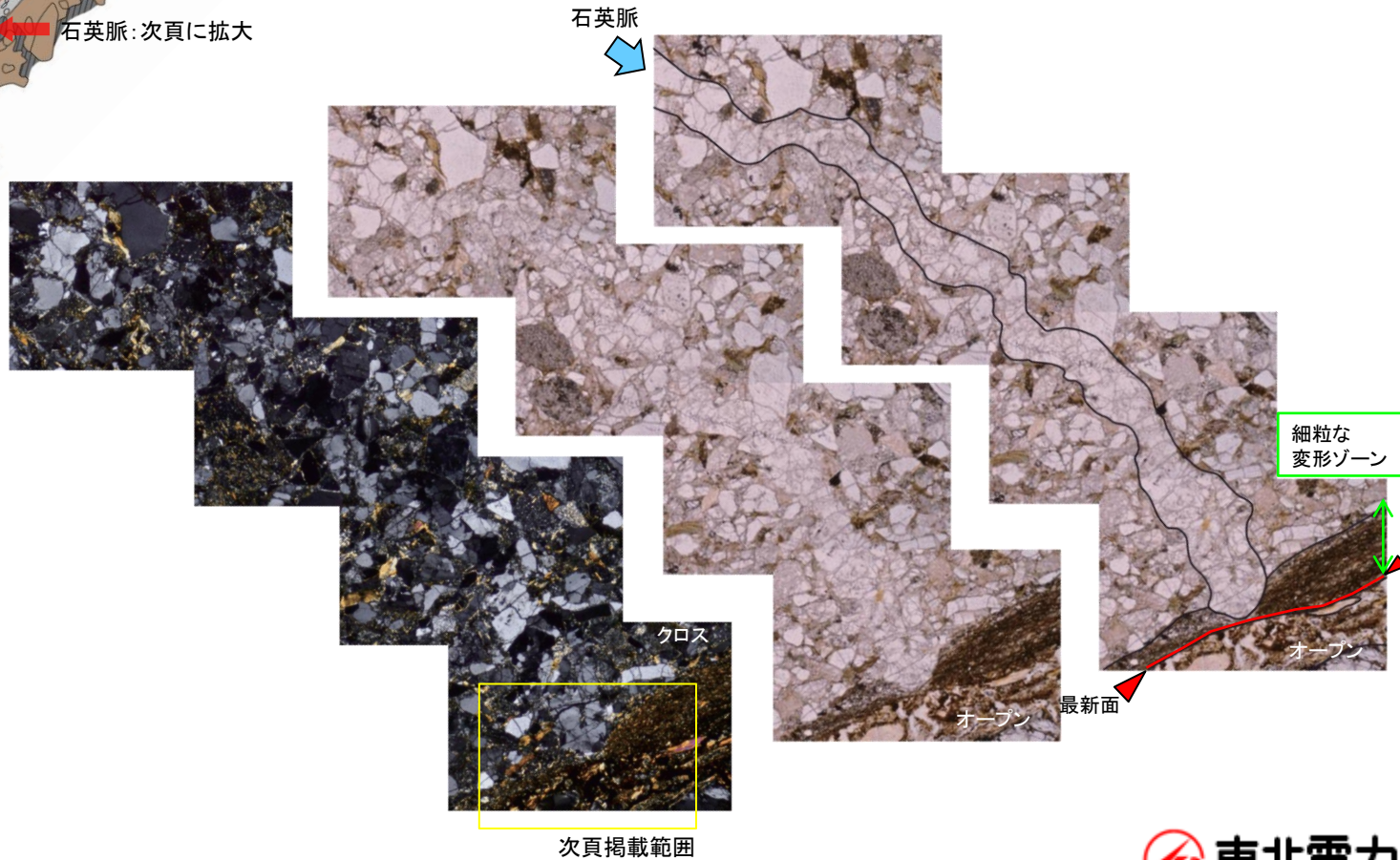
5.2.2 OF-4断層【薄片の観察⑧】

凡例

—	最新面
■	緑泥石
■	雲母・粘土鉱物
■	石英脈
■	破碎部
■	カタクレーサイト
■	砂岩
■	空隙



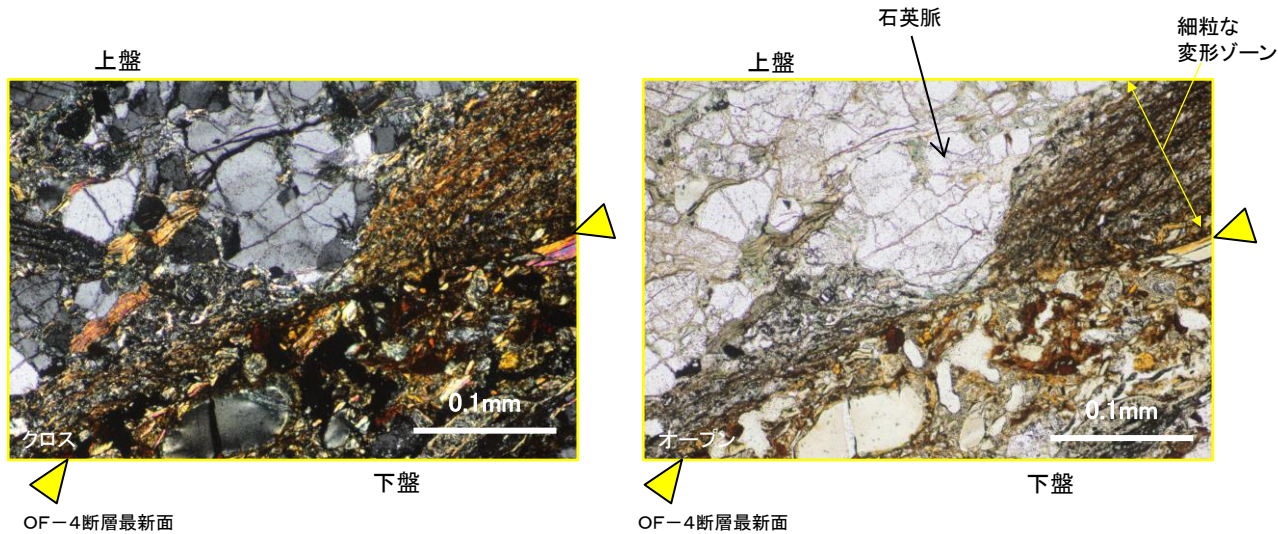
➤ 上盤の砂岩からOF-4断層の細粒な変形ゾーンに石英が脈状に晶出し、最新面近傍まで達している状況を確認した。



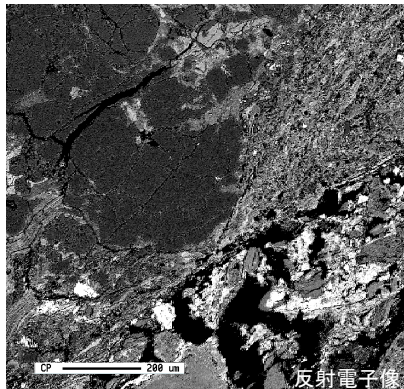
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

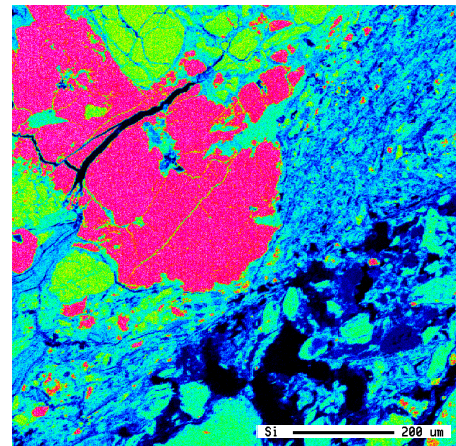
5.2.2 OF-4断層【薄片の観察⑨】



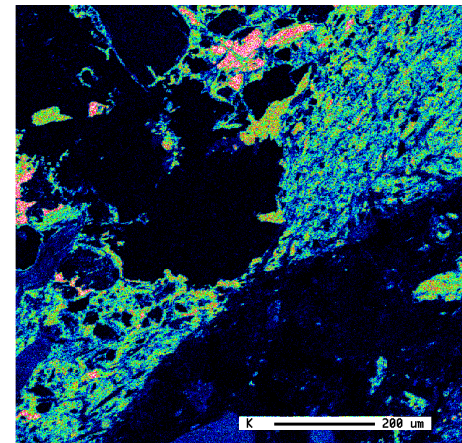
- OF-4断層の細粒な変形ゾーン内に石英脈が晶出しているが、石英脈は最新面とは接していない状況を確認した。
 - OF-4断層の変位センス(逆断層センス)と整合的に、石英の小破片が左下方方向にくさび状に点在している様子が確認される。
 - EPMA分析の結果からも、石英粒子が同様に点在している様子が確認できる。
- ⇒石英脈は断層活動の影響を受けていると考えられる。



Si	Conc	Area%
	100.00	0.0
	93.71	0.4
	87.42	2.2
	81.13	5.7
	74.84	7.4
	68.56	4.8
	62.27	2.0
	55.98	1.4
	49.69	2.8
	43.40	4.4
	37.11	5.8
	30.82	11.0
	24.53	15.4
	18.25	13.9
	11.96	8.3
	5.67	6.0
	-0.62	8.1
	36.79	0.0



EPMA分析結果 (Si)



EPMA分析結果 (K)

K	Conc	Area%
	20.00	0.3
	18.74	0.3
	17.49	0.2
	16.23	0.2
	14.98	0.8
	13.72	0.6
	12.46	0.8
	11.21	1.1
	9.95	3.3
	8.70	2.2
	7.44	2.6
	6.18	3.0
	4.93	7.0
	3.67	4.0
	2.42	4.5
	1.16	6.0
	-0.10	63.0
	1.92	0.0

5. 敷地の断層の活動性評価
5.2 断層と脈の関係

5.2.2 OF-4断層 【詳細観察・検討のまとめ】

5.1 上載層との関係

トレンチ調査

- 断層面を横断する鉱物脈の確認

- OF-4断層の活動性を評価するために有効な上載層(後期更新世の地層等)は確認できなかった。

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層

トレンチ, 露頭調査

- 断層面を横断する鉱物脈の確認

コア, ポアホールカメラ及びCT画像観察

- 最新面の可能性のある面の選定
- 面の直線性・連続性の確認

詳細観察・検討

- 研磨片, 薄片による詳細観察
- EPMA分析による検討

5.2.2 OF-4断層

- コア及びCT画像観察
- 薄片による詳細観察

地質学的なプロセスを考慮

5.2.3 熱史の検討

- 鉱物の生成環境の検討
- 同一条件下で生成する鉱物の検討
- 熱史の検討

- 脈状の緑泥石が, 最新面の形成に伴う逆断層センスの変形構造を切るように晶出していることを確認した。
- OF-4断層の最新面自体に緑泥石, 及び熱水由来のスメクタイトが晶出しており, 断層活動に伴う変形はないことを確認した。

- TF-1断層の活動性を評価するために有効な上載層(後期更新世の地層等)は確認できなかった。

- トレンチ, 露頭では, TF-1断層を貫くひん岩脈, 鉱物脈を目視観察で確認することはできなかった。

- TF-1断層の最新面の可能性のある面として, 面②と面③を選定した。

- 脈状のカルサイトと, せん断の影響を受けたカルサイトが共存していることから, TF-1断層の最終活動と同じ期間に, カルサイトがTF-1断層破碎部に晶出したものと考えられる。

- せん断の影響を受けていない自形のカルサイトが, TF-1断層の最新面を横断して晶出していることから, カルサイトの晶出が終了して以降, TF-1断層は活動していないと考えられる。

5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【カルサイトの流体包有物①】

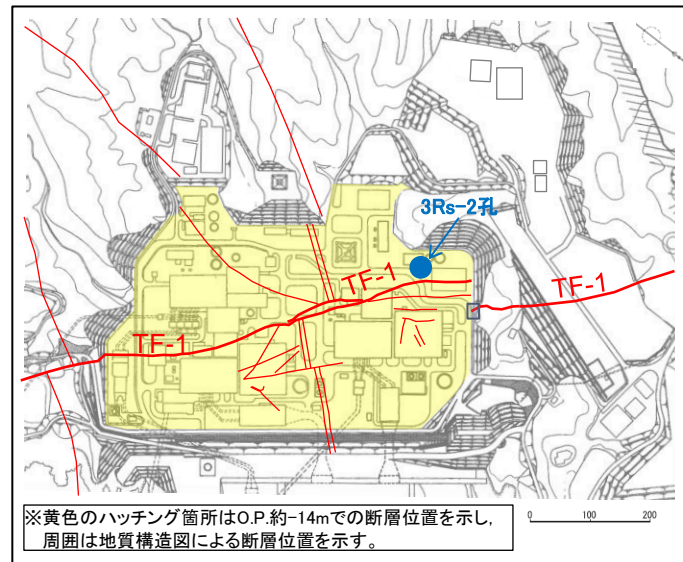
カルサイトの生成環境について検討するため、カルサイトの流体包有物の均質化温度測定を行った。

- ✓ USGS型加熱冷却台を用いた。
- ✓ 流体包有物の均質化温度を20個測定した。



- カルサイト脈初成包有物の均質化温度の平均値は、約192°Cとの結果が得られた。
- 日本粘土学会編(2009)によれば、カルサイト(方解石)は約150°C以上の環境下で晶出する鉱物であり、上記結果と整合的である。
- 敷地内で確認されたカルサイトは、高温の熱水環境下で晶出したものと考えられる。
- カルサイトの初成包有物と二次包有物の生成温度は、ほぼ同じ温度帯で比較的高温であることから、カルサイトが晶出していた期間を通じて、高温の熱水環境下にあったものと考えられる。

3Rs-2孔 78.25m付近の試料を採取した。

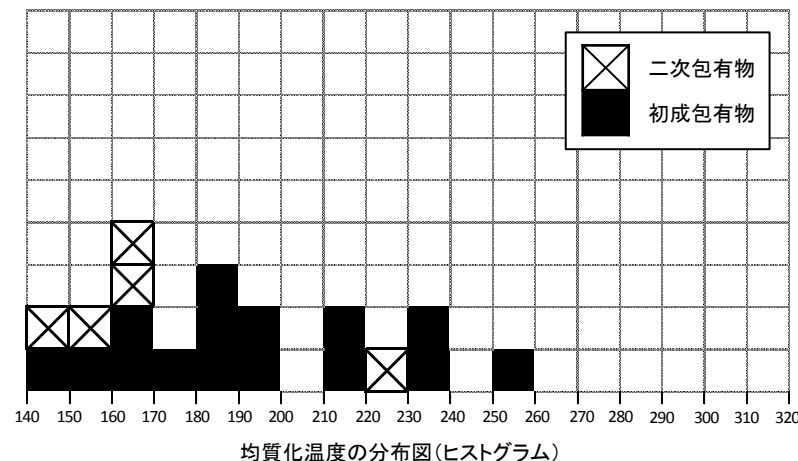


ボーリング位置図(3Rs-2孔)



No.	包有物	均質化温度(°C)
1	初成	213.1
2	初成	154.0
3	初成	172.5
4	初成	186.1
5	初成	230.0
6	初成	233.5
7	初成	254.4
8	初成	218.5
9	二次	165.0
10	初成	192.8
11	初成	181.5
12	初成	195.7
13	初成	142.0
14	初成	164.5
15	初成	184.4
16	二次	167.8
17	二次	149.6
18	二次	156.3
19	二次	226.9
20	初成	162.7

均質化温度測定結果



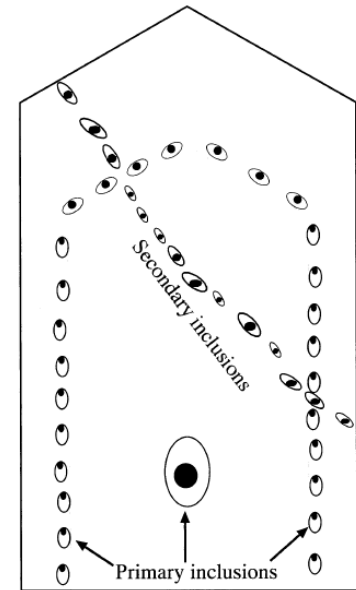
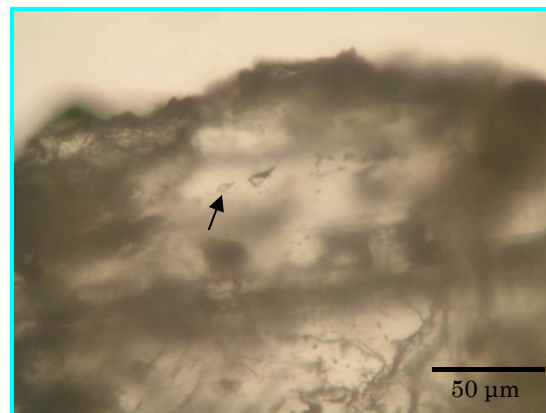
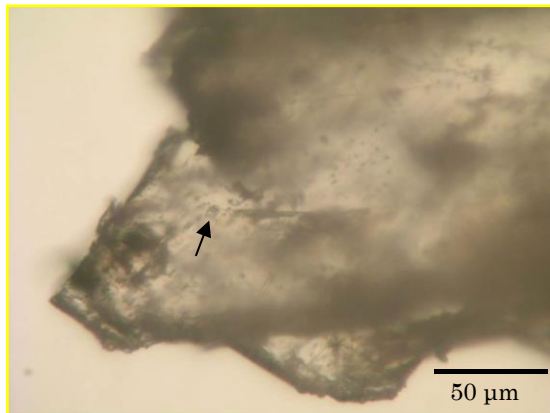
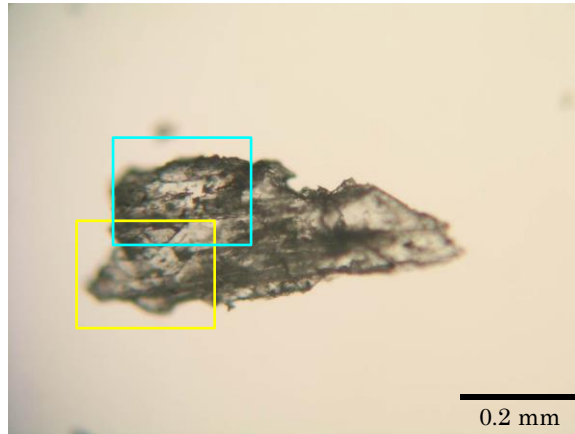
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【カルサイトの流体包有物②】

【流体包有物】佐脇(2003)から引用

- 石英や方解石等の鉱物が生じた時に取り込んだ数 μm ~数百 μm の流体。
- 取り込んだ時点で物質の出入りのない状態(閉鎖系)が成立するため、その時点での温度、圧力情報を保持している。
- 佐脇(2003)によれば、初成包有物と二次包有物は次のように示されている。
 - ✓ 初成包有物は、鉱物が成長している最中にその成長面上に存在していた流体が捕獲されて形成されたもの。
 - ✓ 二次包有物は、成長し終えた鉱物に外力や急冷による歪み応力等によって割れ目(クラック)が入り、そこに流体が侵入した後、クラックが閉塞して(ヒールされて)形成されたもの。



初成包有物と二次包有物の概念図(佐脇(2003))

流体包有物(初成)の例(3Rs-2孔, 78.25m付近)

5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【24B-28孔における検討】

- ▶ 薄片観察を実施している, 24B-28孔における熱水環境を検討した。
- ▶ 24B-28孔の深度52.8m付近からカルサイトを採取し, 100%リン酸に溶解させて酸素同位体比を測定した。

生成温度の計算式 (O'Neil et al., 1969)

$$1000\ln \alpha = 2.78(10^6/T^2) - 3.39$$

T: 生成温度(K)

α : $\delta^{18}O_{SMOW}(\text{方解石}) - \delta^{18}O_{SMOW}(\text{熱水})$

$\delta^{18}O_{SMOW}(\text{方解石})$: 酸素同位体試験により求めた酸素同位体比

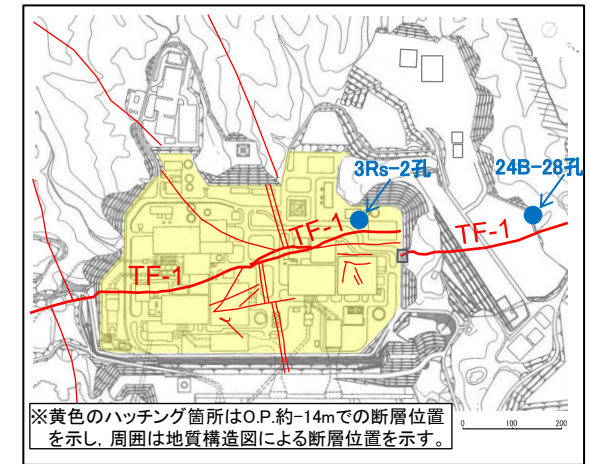
$\delta^{18}O_{SMOW}(\text{熱水})$: 熱水の酸素同位体比



24B-28孔 深度52.8m

【カルサイトの生成温度】

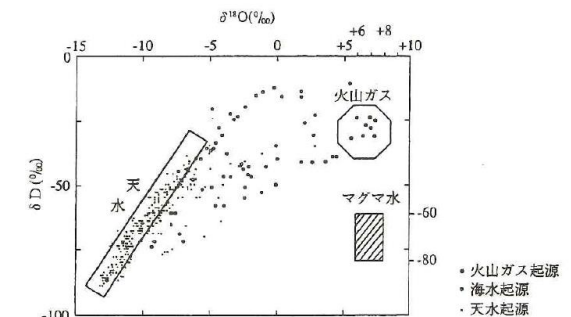
ボーリング孔	流体包有物均質化温度測定結果	$\delta^{18}O_{SMOW}(\text{方解石})$ 測定結果	$\delta^{18}O_{SMOW}(\text{熱水})=0\text{‰}$ を仮定	$\delta^{18}O_{SMOW}(\text{熱水})=5\text{‰}$ を仮定
3Rs-2孔 深度78.3m	約192°C	14.61‰	121.1°C	191.0°C
24B-28孔 深度52.8m	-	13.85‰	129.5°C	205.1°C



ボーリング位置図(3Rs-2孔, 24B-28孔)

- ▶ 3Rs-2孔のカルサイトの, 流体包有物均質化温度(平均)は約192°Cであった。
- ▶ 3Rs-2孔のカルサイトの生成温度は, 生成時の水の酸素同位体比を5‰と仮定すると約191°Cである。また, カルサイトが同0‰から生成したと仮定した場合, 約121°Cである。
- ▶ 24B-28孔のカルサイトの生成温度は, 水の酸素同位体比を5‰と仮定すると約205°Cである。また, カルサイトが同0‰から生成したと仮定した場合, 約130°Cである。

⇒ 3Rs-2孔, 24B-28孔のカルサイトはともに, 120°C~200°C前後で生成したと考えられる。
・カルサイトは高温環境下にあった時期に, 高温の水から生成したと考えられる。



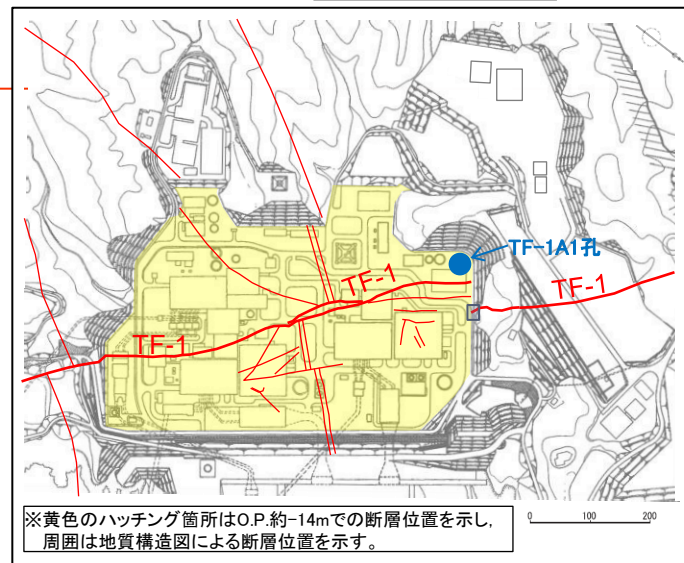
(参考) 日本の地熱水の酸素と水素の同位体組成の関係 吉村(2001)

5. 敷地の断層の活動性評価

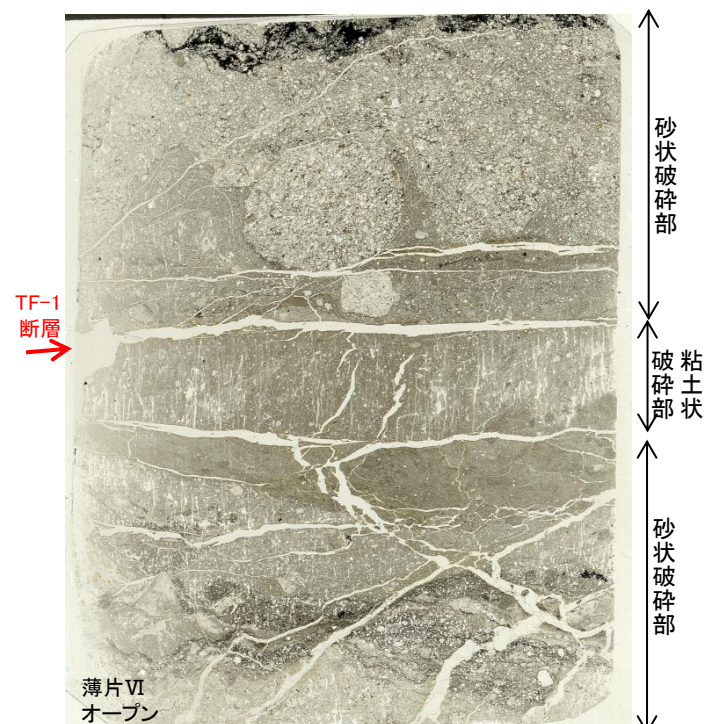
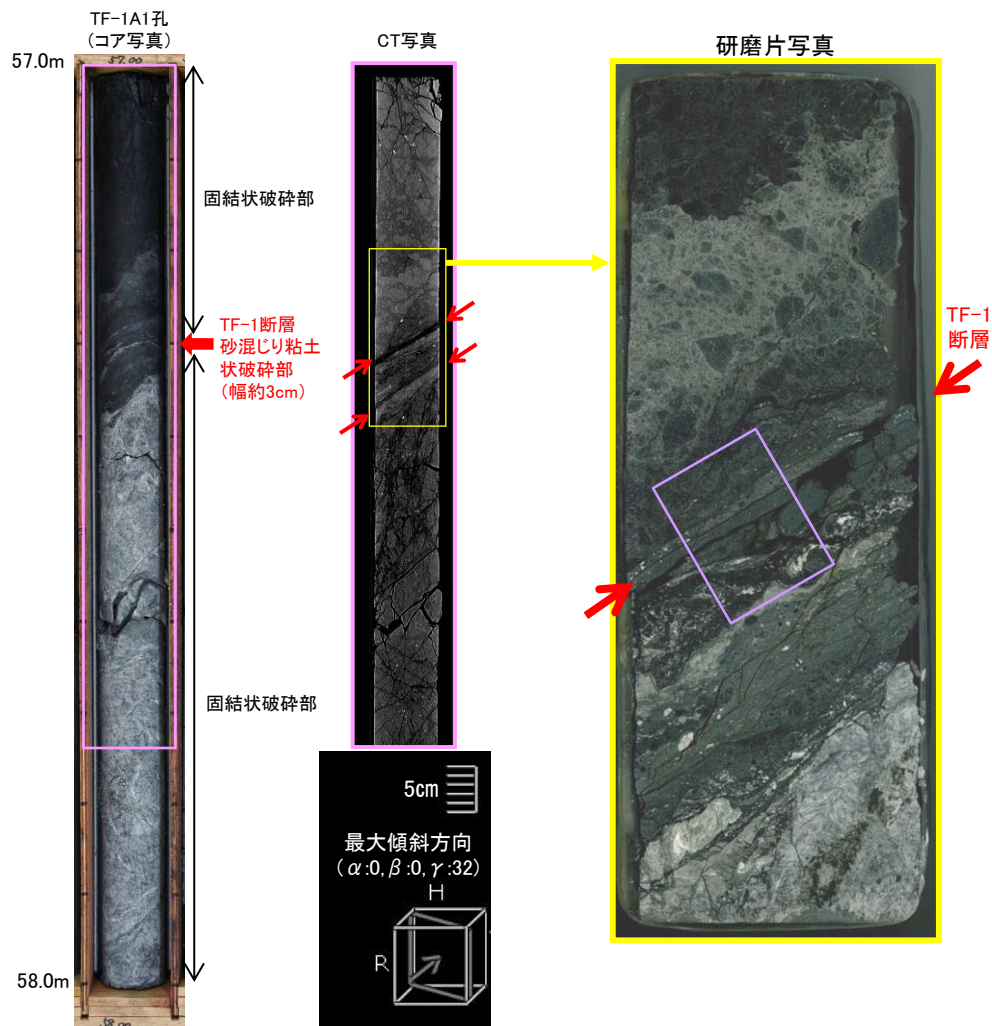
5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【斜長石のアルバイト化:概要】

- カルサイトが生成する環境と同一条件下で生成する他の鉱物の検討を行うため、TF-1A1孔の57.3m付近のTF-1断層破碎部を含むように薄片を作成した。



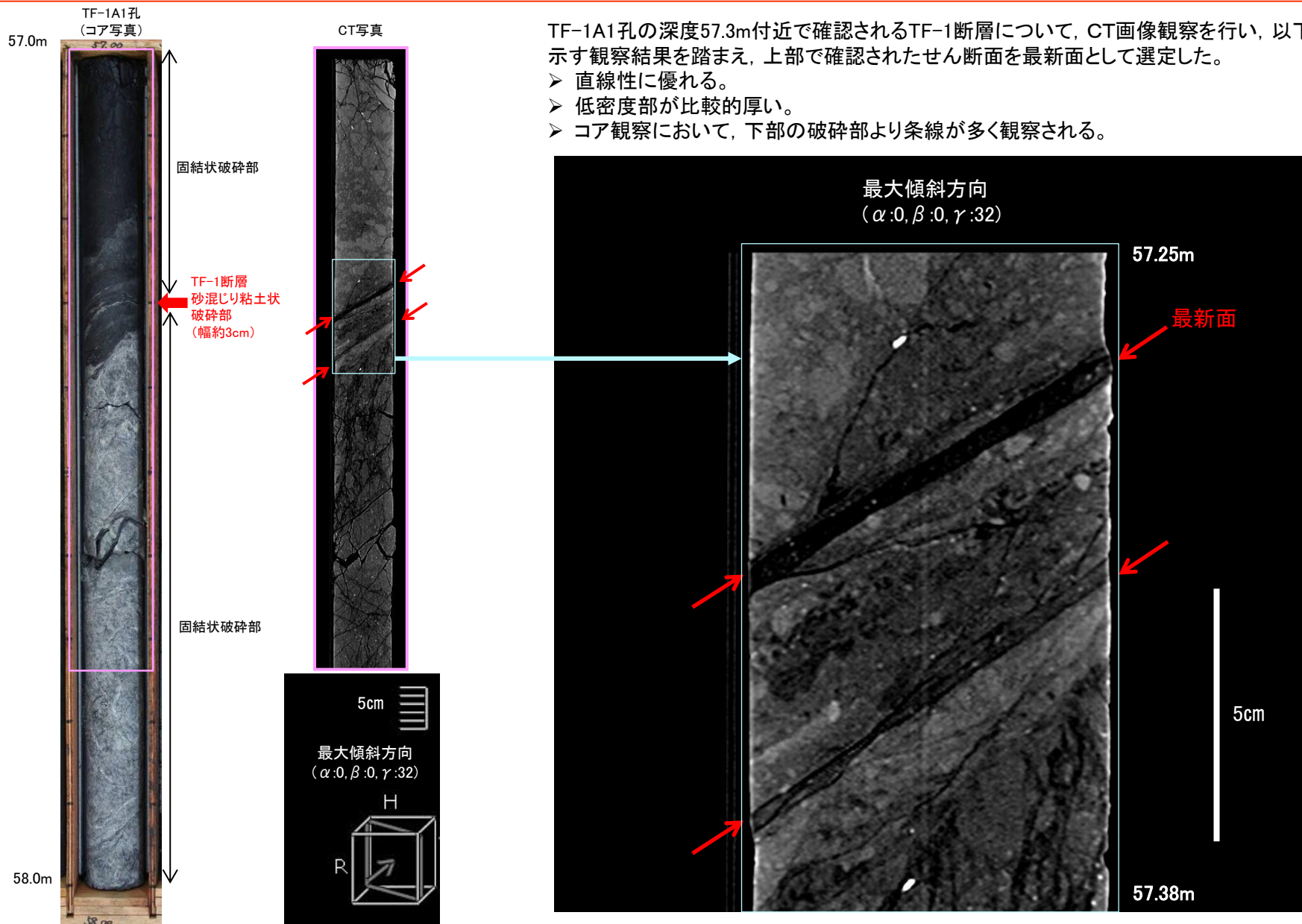
ボーリング位置図(TF-1A1孔)



5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【斜長石のアルバイト化①】

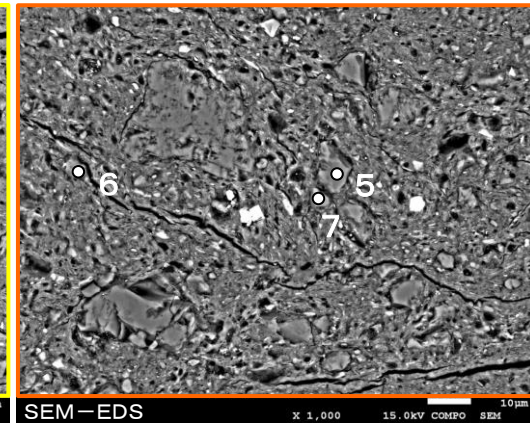
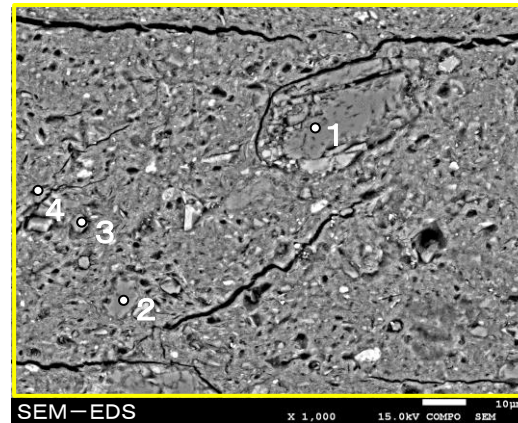
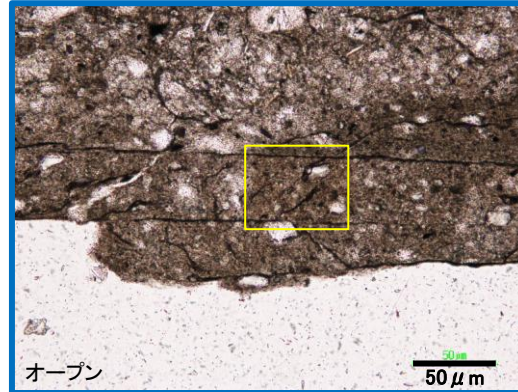
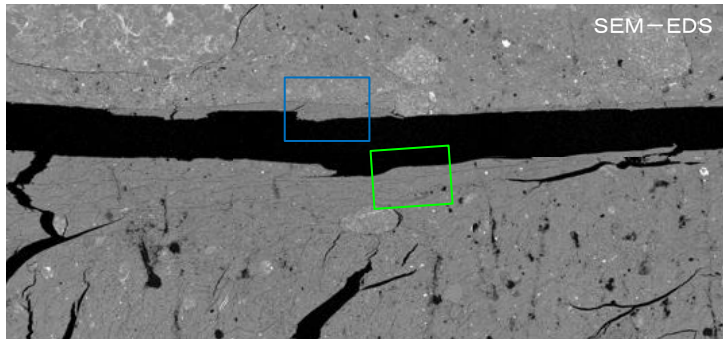


5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【斜長石のアルバイト化②】

- TF-1断層破碎部の細粒化している箇所において分析を行った(TF-1A1孔: 深度57.3m)。
- 標準的なアルバイトの化学組成は, SiO₂は68%程度, Al₂O₃は20%程度, Na₂Oは11%程度とされている(Deer et al.(1992))。
- TF-1断層の破碎部の斜長石は主にアルバイトの化学組成を示す。



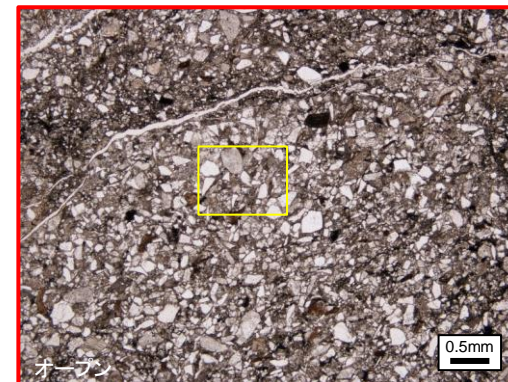
SEM-EDS分析値(100%換算)

No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	total	Ab	An	Or
1	71.8	0.3	17.4	0.0	0.0	0.0	0.6	9.8	0.2	100	96	3	1
2	71.9	0.0	18.2	0.0	0.0	0.0	0.0	9.9	0.0	100	100	0	0
3	67.0	0.2	21.0	0.0	0.0	0.0	2.9	8.6	0.2	100	83	16	1
4	68.8	0.0	19.3	0.3	0.0	0.0	1.5	10.0	0.2	100	92	7	1
5	67.3	0.0	20.5	0.0	0.2	0.0	3.3	8.6	0.0	100	82	18	0
6	71.6	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.2	10.0	0.3	100	98	1	2
7	71.6	0.0	17.8	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4	0.2	100	99	0	1
代表値1	67.84	0.00	19.65	0.02	—	0.04	0.00	11.07	0.29	99.80	—	—	—
代表値2	67.41	—	20.50	—	—	0.1	0.81	10.97	0.36	100.37	—	—	—

(Deer et al.(1992))

5.2.3 熱史の検討【斜長石のアルバイト化③】

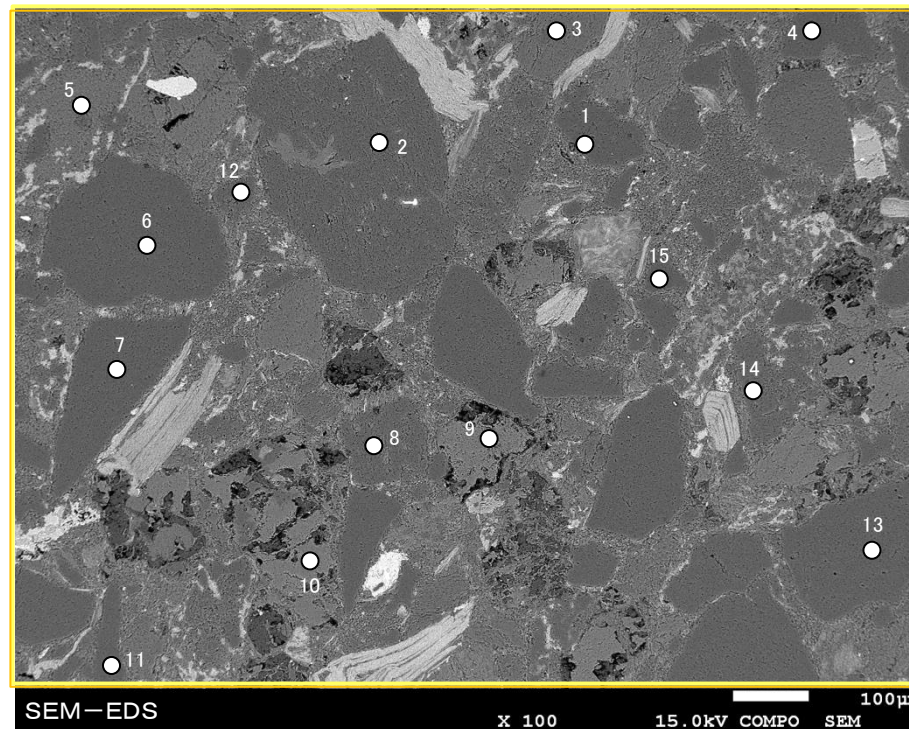
- TF-1断層周辺の砂岩の組織を残している箇所において分析を行った(TF-1A1孔: 深度57.3m)。
- 標準的なアルバイトの化学組成は、 SiO_2 は68%程度、 Al_2O_3 は20%程度、 Na_2O は11%程度とされている(Deer et al.(1992))。
- TF-1断層周辺の非断層破碎部の斜長石はアルバイトの組成を示さないものが多い。



SEM-EDS分析値(100%換算)

No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	total	Ab	An	Or
1	62.8	22.8	3.4	9.8	0.0	98.8	84	16	0
2	60.1	20.4	2.3	9.3	0.2	92.3	87	12	1
3	69.3	17.5	0.0	9.9	0.0	96.7	100	0	0
4	57.9	23.9	5.7	7.7	0.0	95.2	71	29	0
5	67.4	19.8	0.0	11.8	0.0	99.0	100	0	0
6	59.8	24.6	5.9	8.2	0.2	98.7	71	28	1
7	64.6	18.8	0.0	10.6	0.0	94.0	100	0	0
8	60.5	20.8	3.0	8.8	0.0	93.1	84	16	0
9	65.9	26.5	5.3	10.2	0.3	108.1	77	22	1
10	59.1	25.6	6.9	7.3	0.0	98.9	66	34	0
11	59.4	27.5	8.7	7.0	0.0	102.6	59	41	0
12	66.4	22.5	2.6	10.3	0.0	101.7	88	12	0
13	64.1	24.8	5.1	9.2	0.0	103.2	77	23	0
14	56.5	25.8	7.8	6.8	0.0	96.9	61	39	0
15	56.4	26.1	8.0	6.7	0.0	97.2	60	40	0
代表値1	67.8	19.7	0.0	11.1	0.3	99.8	—	—	—
代表値2	67.4	20.5	0.8	11.0	0.4	100.4	—	—	—

(Deer et al.(1992))

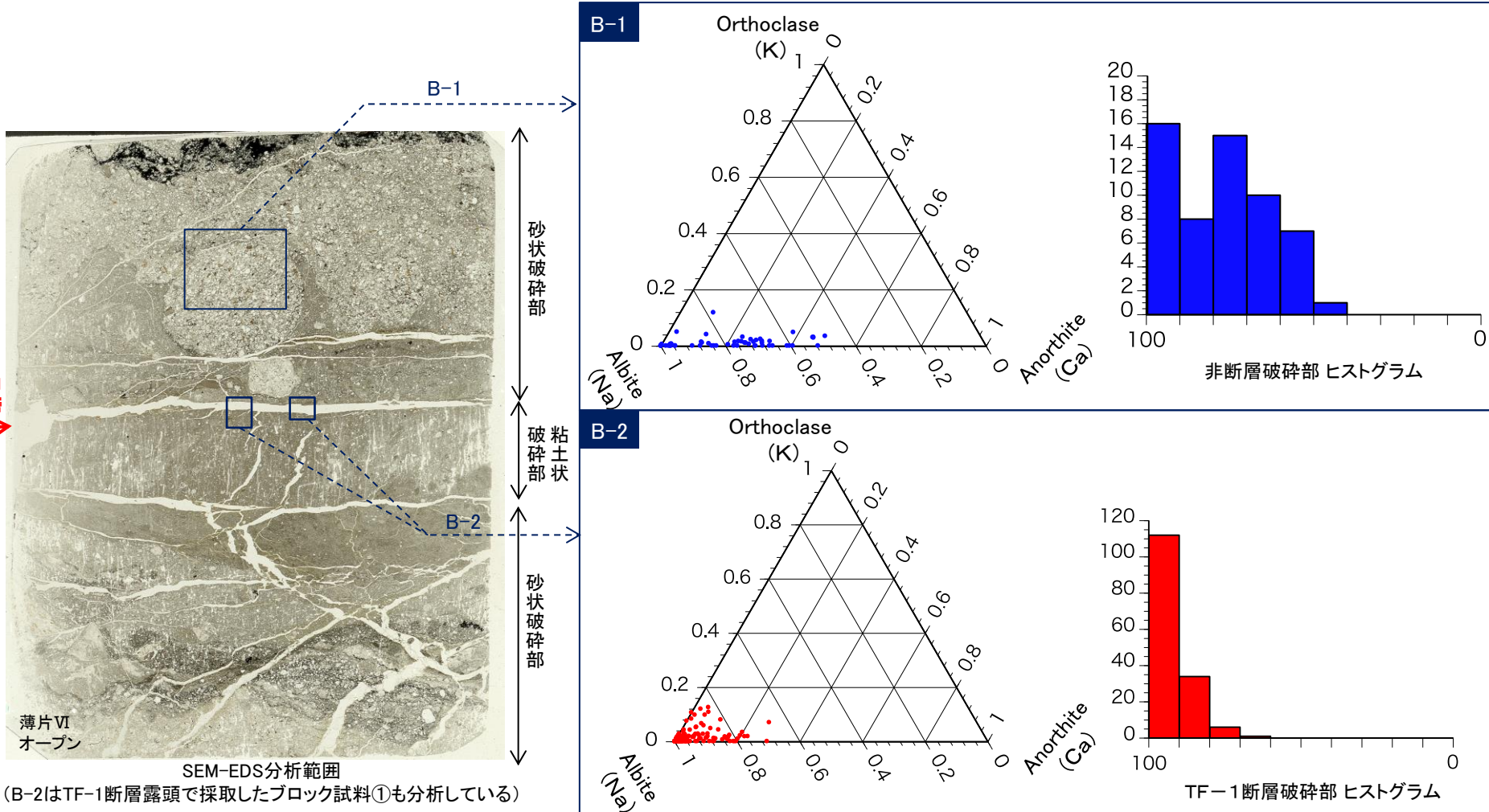


5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討 【斜長石のアルバイト化④】

- TF-1断層破碎部と非破碎部における、斜長石のアルバイト化に関する検討を行った。
 - 非断層破碎部の斜長石の多くはアルバイト成分が60~80%であり、断層破碎部の斜長石の多くはアルバイト成分が80%以上である。
- ⇒非断層破碎部と比較して、TF-1断層破碎部はアルバイト成分に富む傾向を確認した。

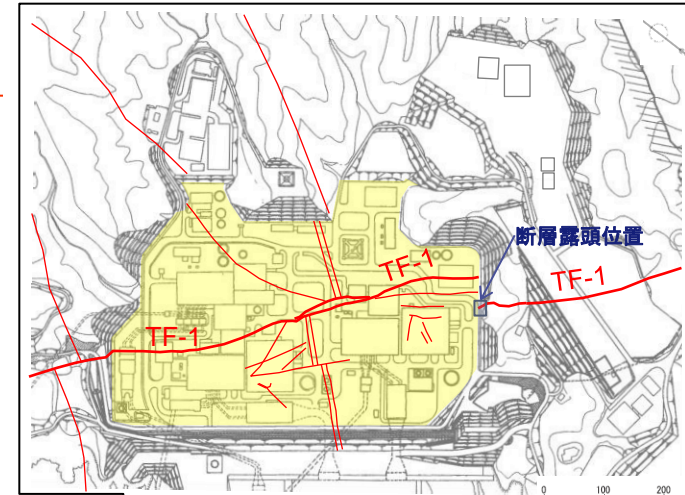


5. 敷地の断層の活動性評価

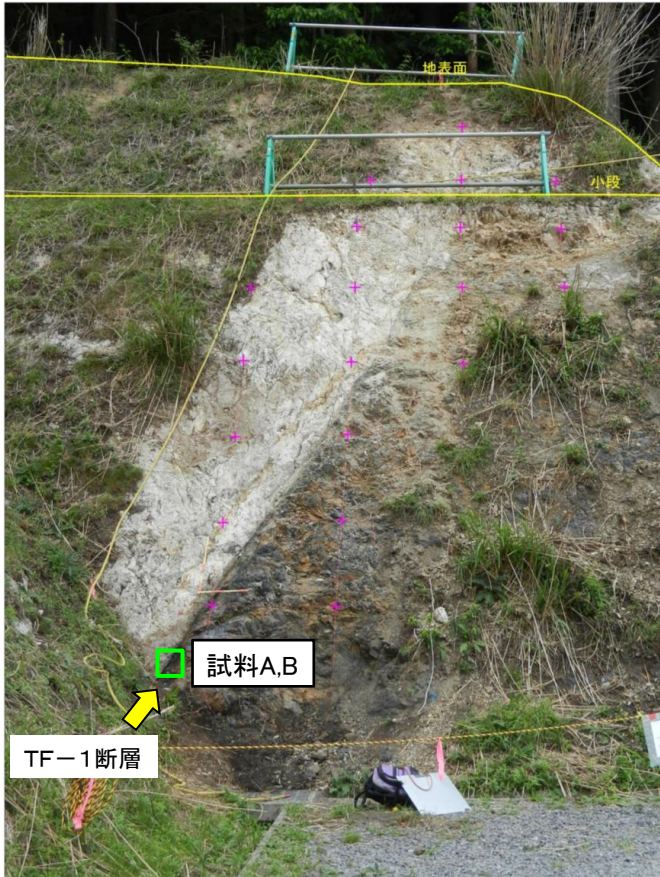
5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【イライトの晶出①】

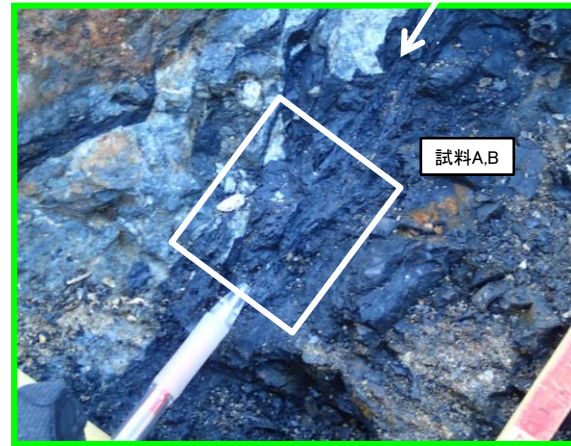
- 露頭観察により破碎部内の直線性及び連続性の高い面について試料採取を行った。
- TF-1断層最新面の認定にあたってはCT画像観察を実施し、内部構造を含む直線性・連続性の高い面(CT画像による最新面)を確認した。



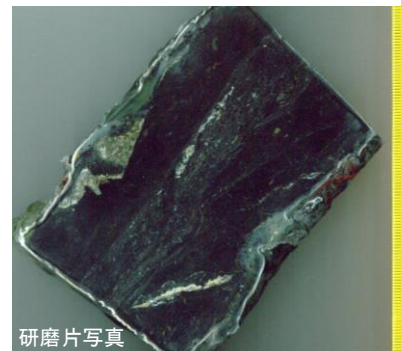
※黄色のハッチング箇所はO.P.約14mでの断層位置を示し、周囲は地質構造図による断層位置を示す。



TF-1断層露頭写真

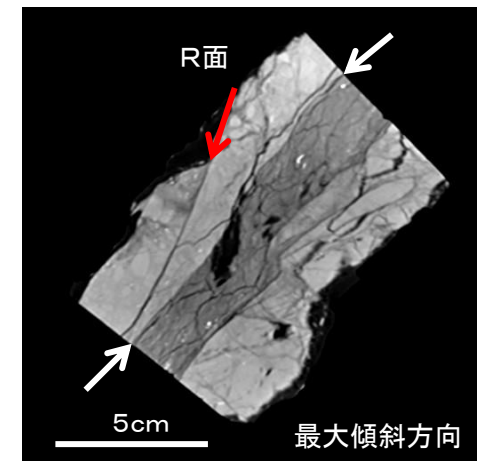


試料採取位置



研磨片写真

※ 試料Bについては、試料Aの奥からXRD及びSEM用の試料を採取した。

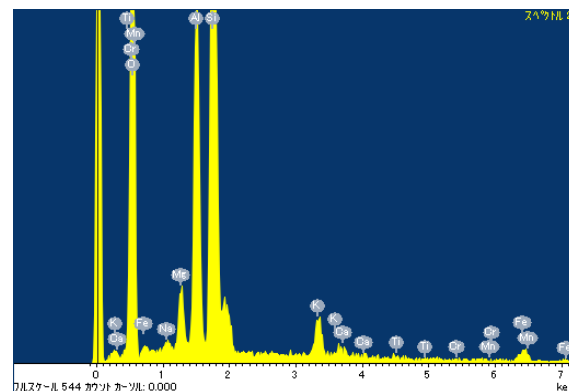
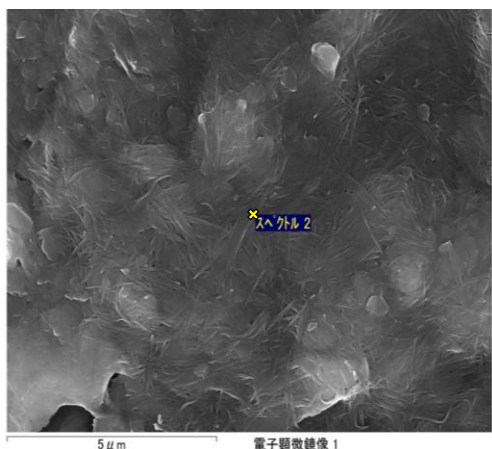
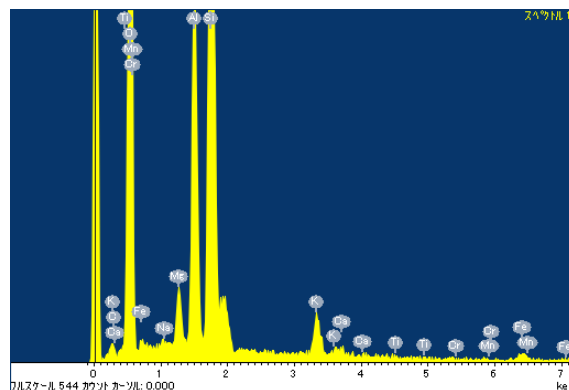
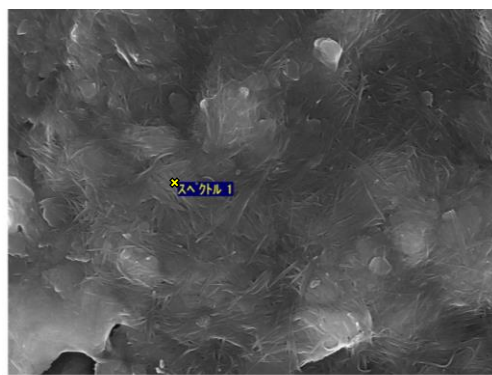


5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【イライトの晶出②】

➤ SEM-EDS分析の結果から、長柱状の粘土鉱物中にはカリウムの存在が確認された。
⇒長柱状の粘土鉱物は、カリウム質粘土鉱物のイライトと考えられる。

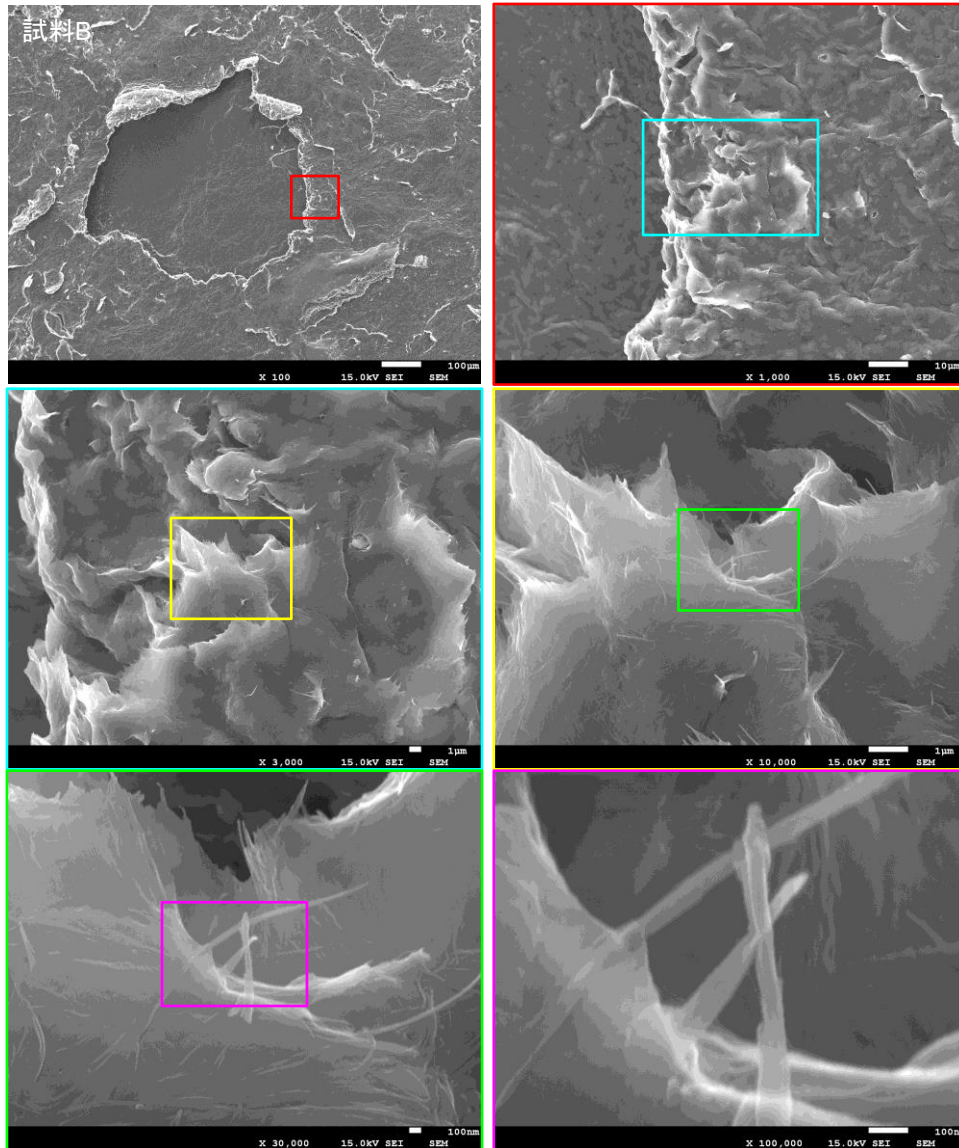


	試料A スペクトル1	試料A スペクトル2	イライトの 代表値
SiO ₂	69.1	65.2	51.25
TiO ₂	0	0	0.17
Al ₂ O ₃	22.1	22.7	23.53
FeO	1.7	3.9	2.02
Fe ₂ O ₃	-	-	0.33
MgO	3.2	3.7	3.32
CaO	0.7	0.7	0.59
Na ₂ O	0	0.6	0.05
K ₂ O	3.3	3.3	7.61
H ₂ O ⁺	-	-	5.87
H ₂ O ⁻	-	-	5.26
total	100	100.01	100.02
Number of Cation			
O=22			
Si	7.845	7.397	7.163
Al	2.951	3.033	3.877
Ti	0.000	0.000	0.018
Fe	0.323	0.738	-
Fe ₃ ⁺	-	-	0.212
Fe ₂ ⁺	-	-	0.039
Mg	0.535	0.623	0.692
Ca	0.080	0.083	0.088
Na	0.000	0.128	0.014
K	0.473	0.479	1.357

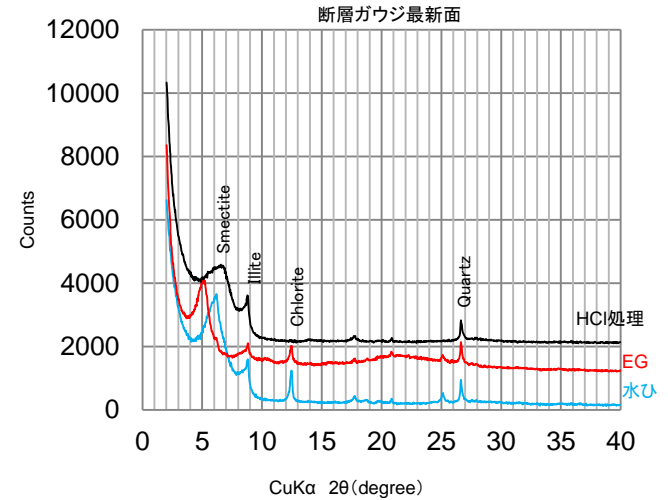
スペクトル1, 2は100%換算値
代表値はDeer et al., (1992)による

試料Aの分析結果の詳細については、「補足説明資料4. 3」に、SEM観察による粘土鉱物の形状については「補足説明資料4. 4」に示す。

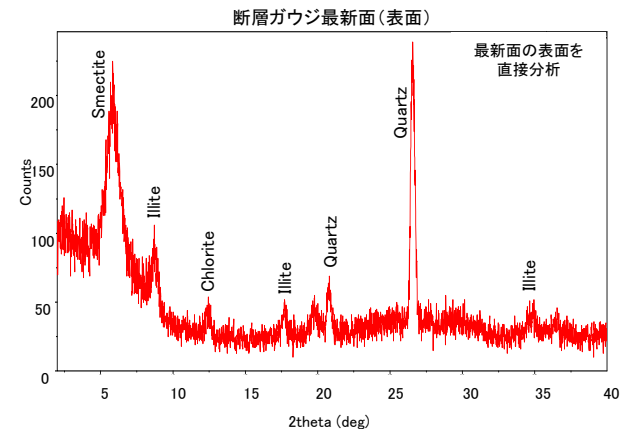
5.2.3 熱史の検討【イライトの晶出③】



- ▶ SEM観察の結果、TF-1断層の最新面には長柱状の自形の粘土鉱物が成長し、破壊されていない。
- ▶ XRD分析の結果、TF-1断層の最新面から採取したガウジには、イライトの存在が確認された。
- ▶ 微小領域XRD分析においても、イライトの存在が確認されている。
- ▶ イライトの生成温度は200°C程度(日本粘土学会編(2009))とされており、カルサイトの生成温度と矛盾はないことを確認した。



- EGでピークがシフトするため、6.2° 付近のピークはスメクタイトである。
- 塩酸処理でピークが消えるため、12.5° 付近のピークは緑泥石である。

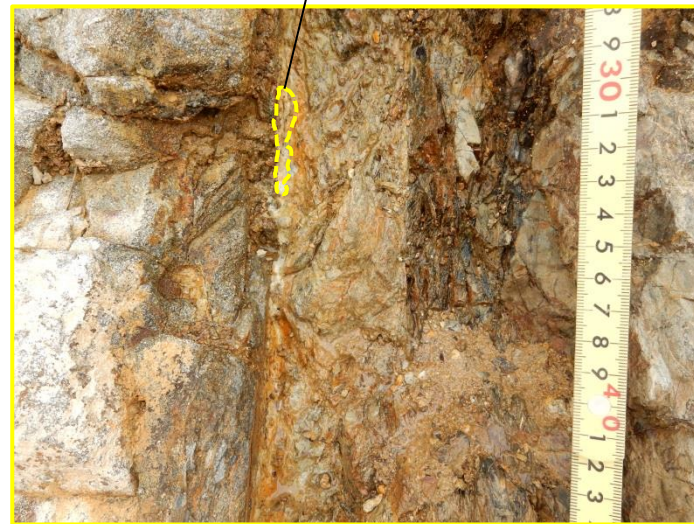


5.2.3 熱史の検討【イライトの晶出④】

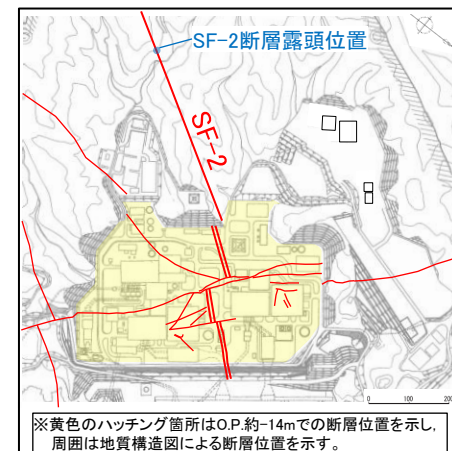
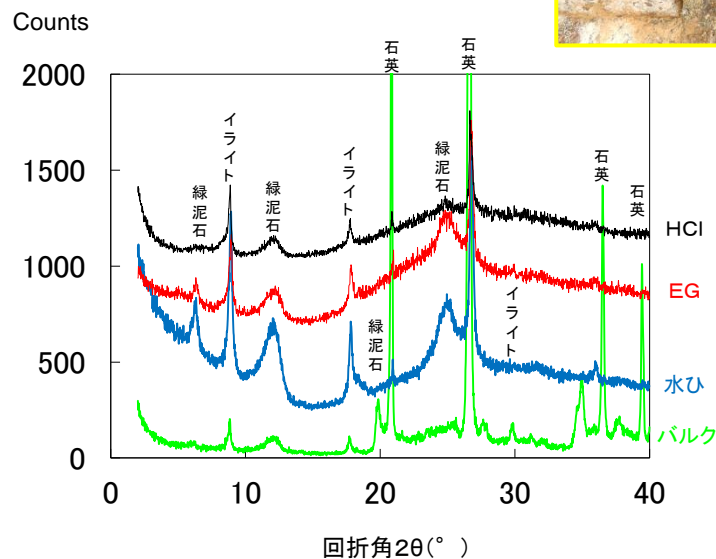
- SF-2①断層破碎部の白色細粒部の試料を採取し、XRD分析を実施した。
- XRD分析結果から、イライトの存在が確認された。



SF-2①断層露头写真



XRD分析箇所



※黄色のハッチング箇所はO.P.約-14mでの断層位置を示し、周囲は地質構造図による断層位置を示す。

5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

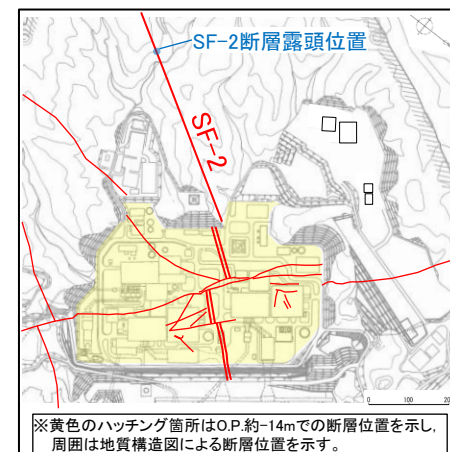
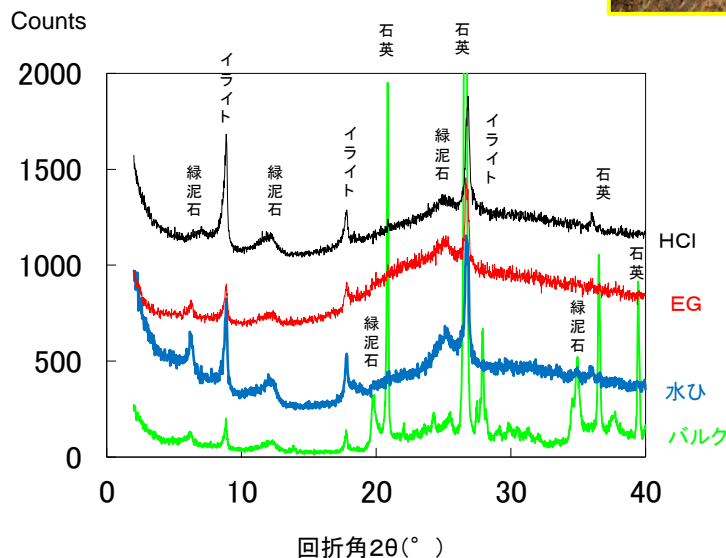
5.2.3 熱史の検討【イライトの晶出⑤】

- SF-2②断層破碎部の白色細粒部の試料を採取し、XRD分析を実施した。
- XRD分析結果から、イライトの存在が確認された。

XRD分析箇所



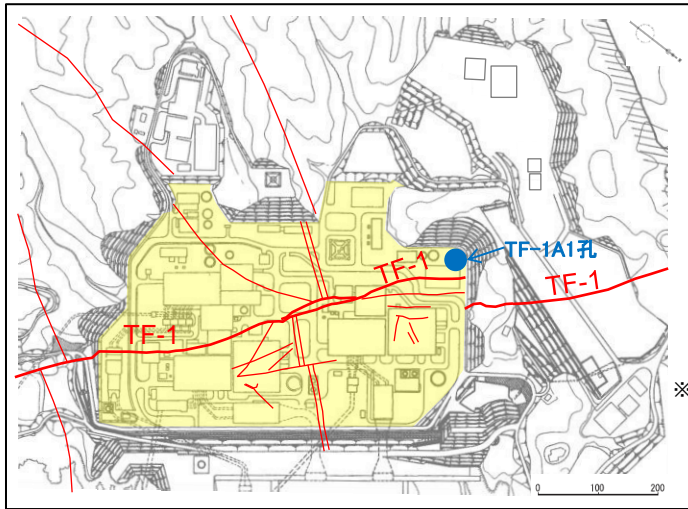
SF-2②断層露頭写真



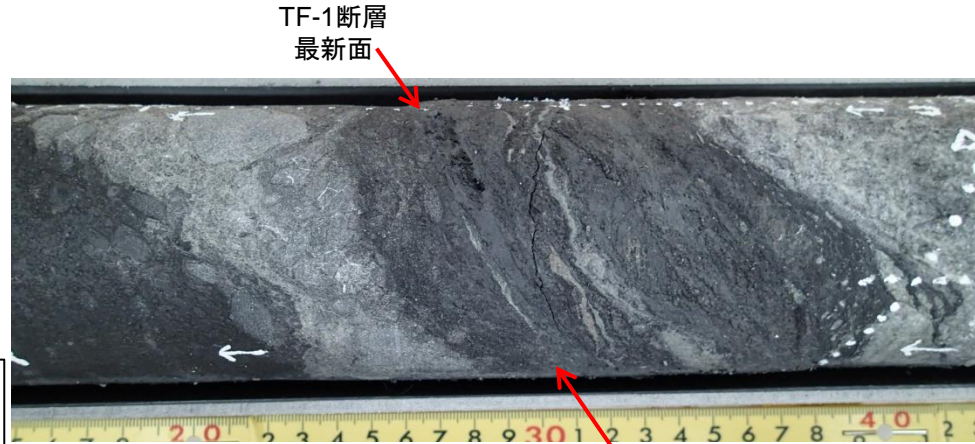
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

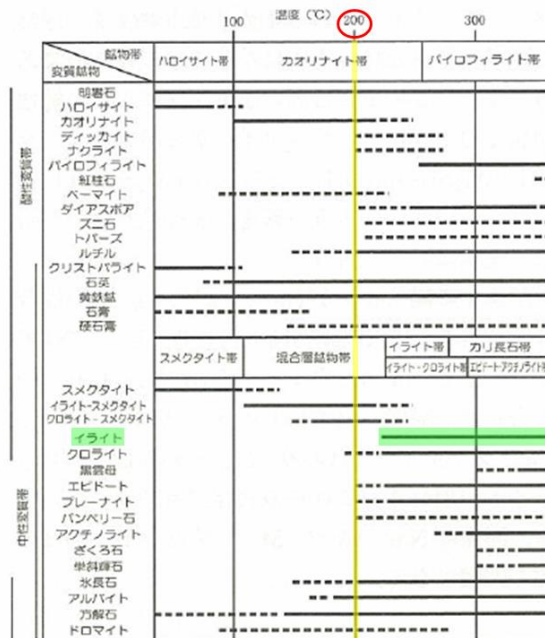
5.2.3 熱史の検討【K-Ar年代測定(参考)】



※黄色のハッチング箇所はO.P.約-14mでの断層位置を示し、周囲は地質構造図による断層位置を示す。



K-Ar年代分析試料 採取位置
・最新面においてコアを半分けし、最新面上の試料を用いた。



※日本粘土学会編(2009)

試料番号	測定物 (粒径)	カリウム含有量 (wt.%)	放射性起源Ar (10 ⁻⁶ cc STP/g)	K-Ar年代 (Ma)	非放射性起源 ⁴⁰ Ar (%)
3RS-5 (137.49-137.75m)	長石 (50-75 μm)	2.548 ± 0.051	1075.8 ± 10.6	105.6 ± 2.3	4.1
D-2 (44.50-44.80m)	長石 (50-75 μm)	2.131 ± 0.043	915.9 ± 9.1	107.5 ± 2.3	4.3
0-TF-1	イライト (0.2-2 μm)	4.029 ± 0.081	1536.6 ± 21.6	95.7 ± 2.3	28.1

貫入岩
(ひん岩)

TF-1断層
最新面

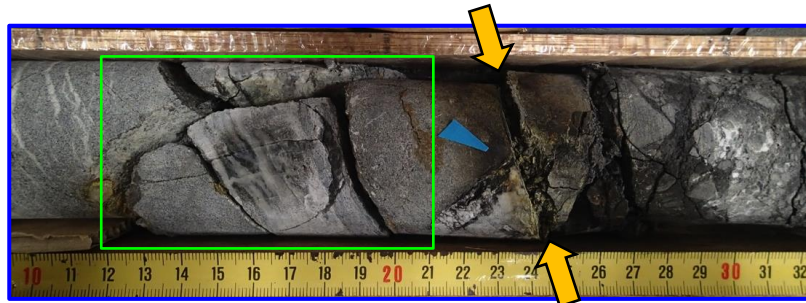
- TF-1断層粘土状破碎部におけるイライトのK-Ar年代を測定し、95.7Maとの結果が得られた。
- ✓ この結果は既往試料(TF-1断層ガウジ部の最も変質が進行した試料)での97.8Maとの結果とも整合的である(詳細は「補足説明資料4.4」に示す)。
- 一方、貫入岩(ひん岩)のK-Ar年代として、105.6Maと107.5Maが得られた。

5. 敷地の断層の活動性評価

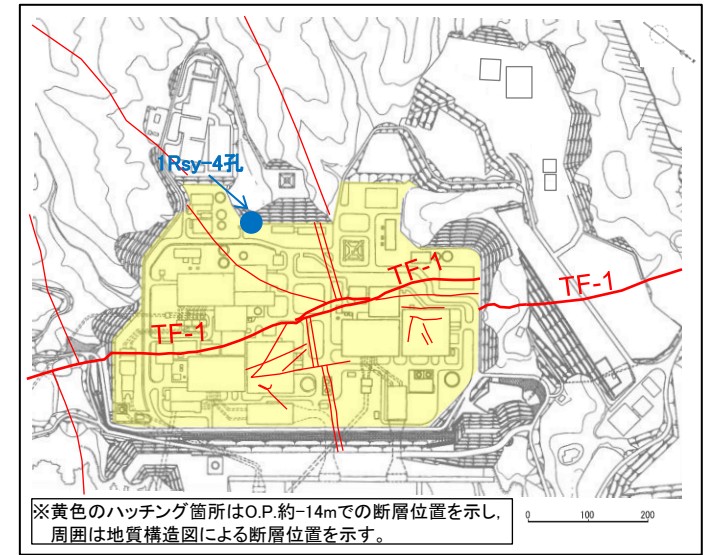
5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【石英脈・カルサイト脈】

- ボーリングコア試料(1Rsy-4孔)の破砕部付近の詳細観察を実施した。
- 深度179.24m付近で、石英脈がTF-1断層に切られている。
- 深度179.17m付近にも白色脈が見られ、この白色脈を切る割れ目扱いにも別の白色脈が確認される。



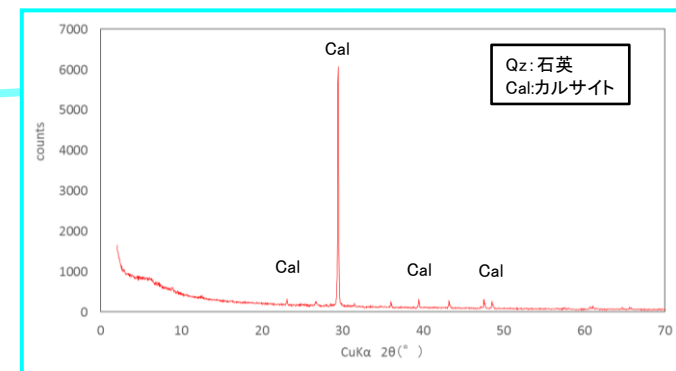
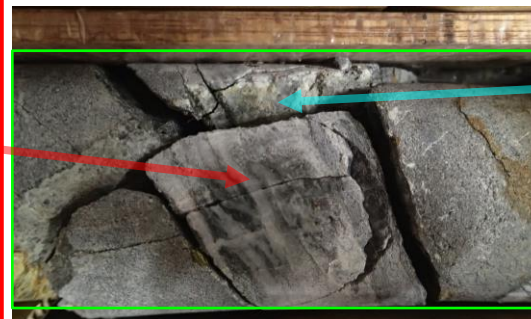
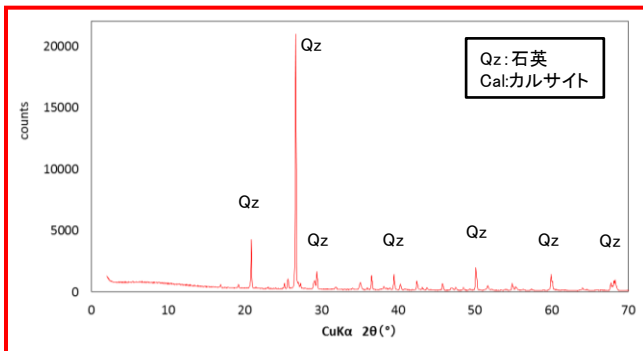
TF-1断層面



※黄色のハッチング箇所はO.P.約-14mでの断層位置を示し、
周囲は地質構造図による断層位置を示す。

ボーリング位置図(1Rsy-4孔)

- 深度179.17m付近の白色脈(赤線部)と白色脈を断ち切る面上に分布する白色脈(水色線部)から試料を採取し、XRD分析を実施した結果、それぞれ、石英とカルサイトであることを確認した。
- カルサイト脈が石英脈を切っている状況が確認された。



5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討 【TF-1断層とカルサイト(晶出時期の検討)】

TF-1断層については、最新面を横断する脈状のカルサイトと変形を受けたカルサイトが共存しており、地質学的プロセスを考察する上で、断層活動の影響とカルサイトの晶出時期の関係を示す重要な現象を確認している。

【事例①】

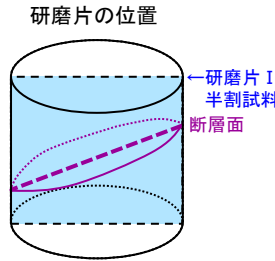
脈状に晶出していたカルサイト(晶出パターンA)が、クラストとして取り込まれているもの。カルサイトの晶出後、断層活動の影響を受けたことを示唆する。

【事例②】

結晶単体で存在しているカルサイトの周辺に、細粒なカルサイト(晶出パターンC)が晶出しているもの。結晶単体のカルサイトは周縁部の一部に凹凸が見られ、溶蝕を受けている。カルサイトの晶出時期は、少なくとも2時期あると考えられる。

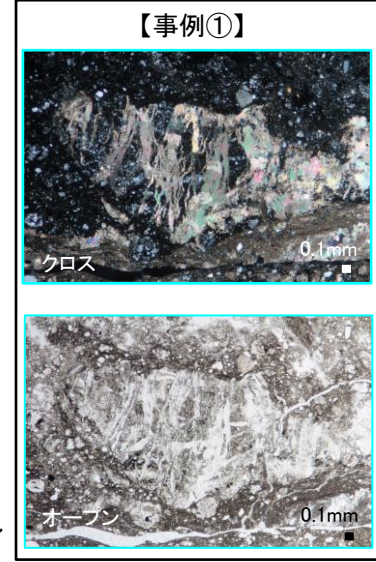
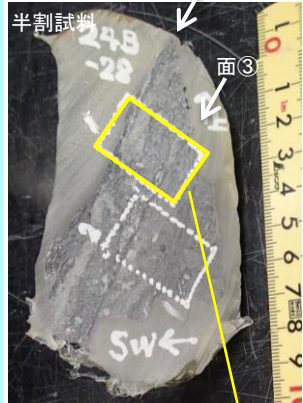
【事例③】(p114参照)

研磨片 I 中の薄片 I の面③' 付近で、破碎したクラスト間に細粒なカルサイトが晶出し、クラストとカルサイトの集合体(晶出パターンB)を形成しているが、シャープな面で面③' と接している。カルサイト晶出の前後2回の断層活動を示唆する。



研磨片 I の対となる試料

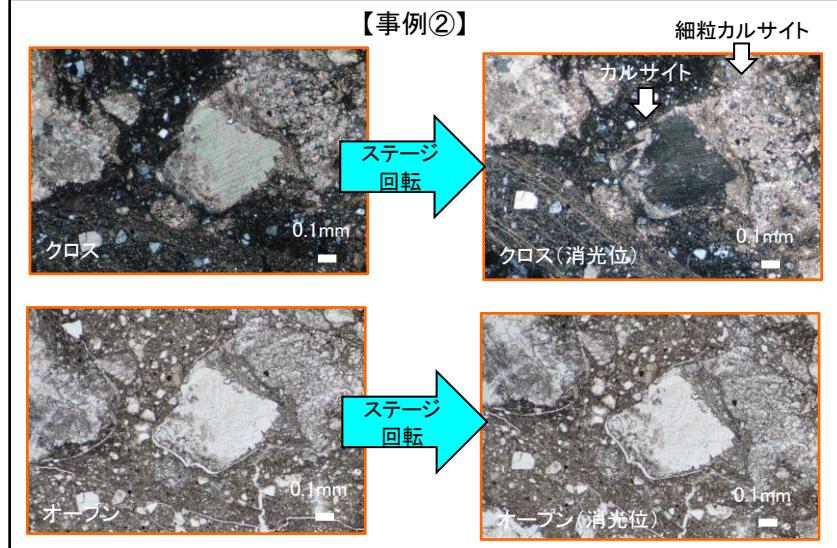
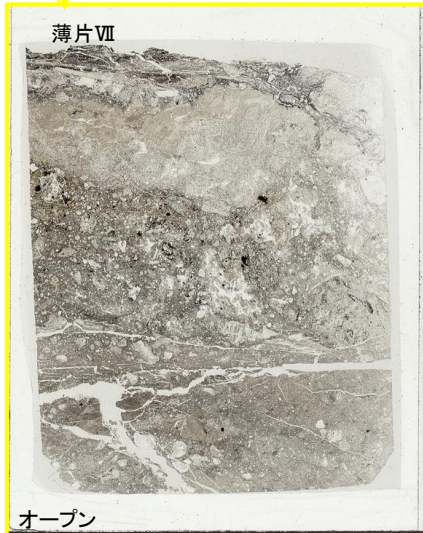
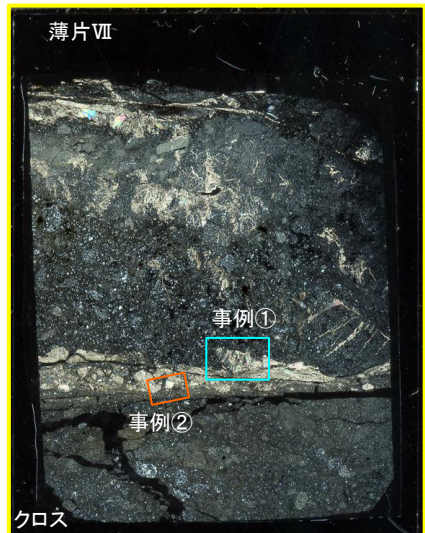
研磨片 I の位置



TF-1断層最新面付近には、晶出パターンA~Cが共存していることから、カルサイトの晶出時期は複数回あったものと考えられる。

一方、カルサイトの初成と二次の流体包有物の生成温度より、カルサイトが晶出していた期間を通じて、高温の熱水環境下にあったものと考えられる。

⇒TF-1断層の最終活動と同じ期間に、カルサイトが複数回晶出したものと考えられる。



5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【敷地内で確認された鉱物等】

➢ 敷地内で確認された鉱物等は以下のとおりである。

【石英】

- ・TF-1断層に切られる。
- ・OF-4断層の細粒な変形ゾーン内に脈状に晶出しているが、最新面とは接していない。
- ・OF-4断層の影響を受けていると考えられる。

【スメクタイト】

- ・OF-4断層の最新面自体に熱水由来の自形の結晶が晶出し、破壊されていない。

【イライト】

- ・TF-1断層の最新面に長柱状の自形の結晶として存在し、破壊されていない。

【緑泥石(クロライト)】

- ・OF-4断層の細粒な変形ゾーンに脈状に晶出し、破壊されていない。
- ・OF-4断層の最新面自体に晶出し、破壊されていない。

【アルバイト】

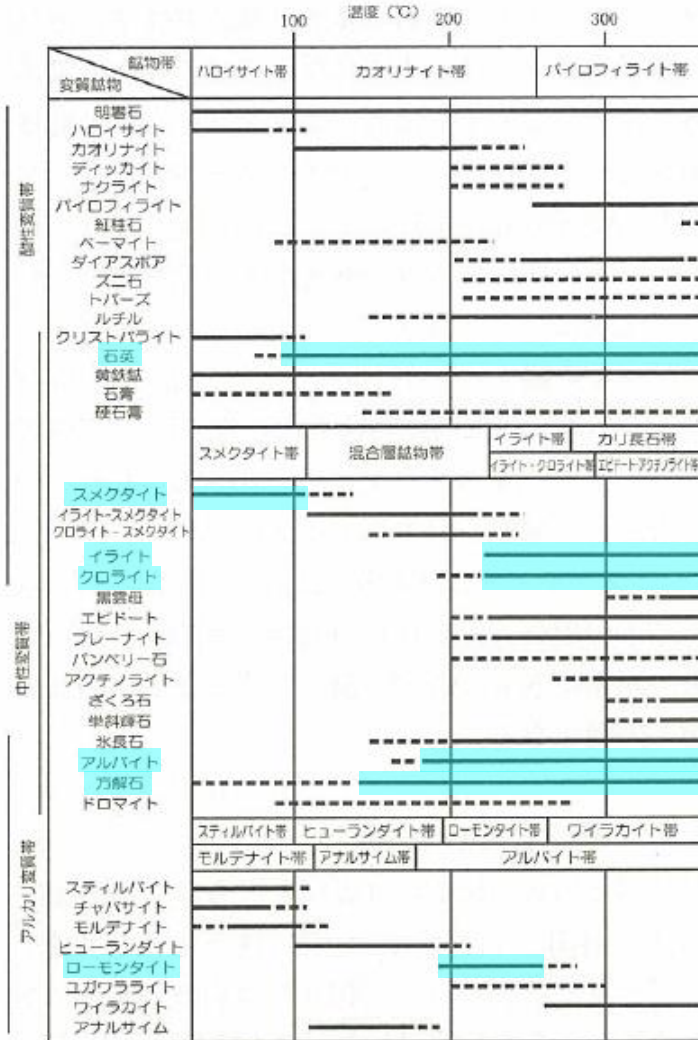
- ・TF-1断層の最新面の斜長石は、アルバイト成分に富んでいる。

【ローモンタイト(濁沸石)】

- ・TF-1断層の周辺部に脈状に晶出している。

【カルサイト(方解石)】

- ・TF-1断層の影響を受けているカルサイトも確認されるが、TF-1断層の最新面を横断して脈状に晶出し、破壊されていないカルサイトもある。
- ・カルサイトには3種類の晶出パターン(A~C)が見られ、TF-1断層最新面付近で共存している。
- ・カルサイトの晶出は複数回あったものと考えられる。
- ・カルサイトの初成包有物と二次包有物の生成温度は、ほぼ同じ温度帯で比較的高温である。
- ・二次包有物の生成がTF-1断層の活動の影響としても、カルサイトが晶出していた期間を通じて高温の熱水環境下にあったものと考えられる。

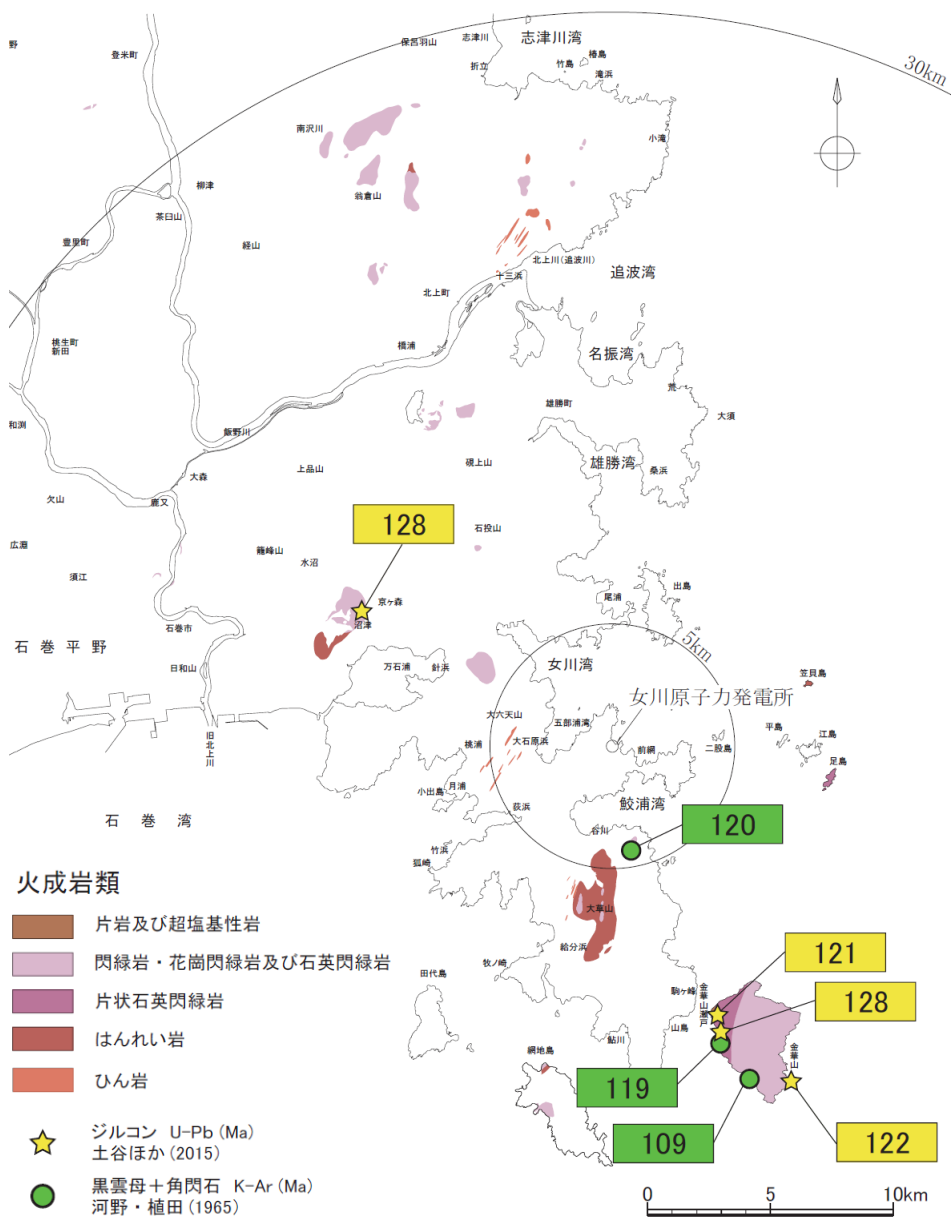


日本粘土学会編(2009)

5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【熱水の生成環境① 前期白亜紀の火成岩類】



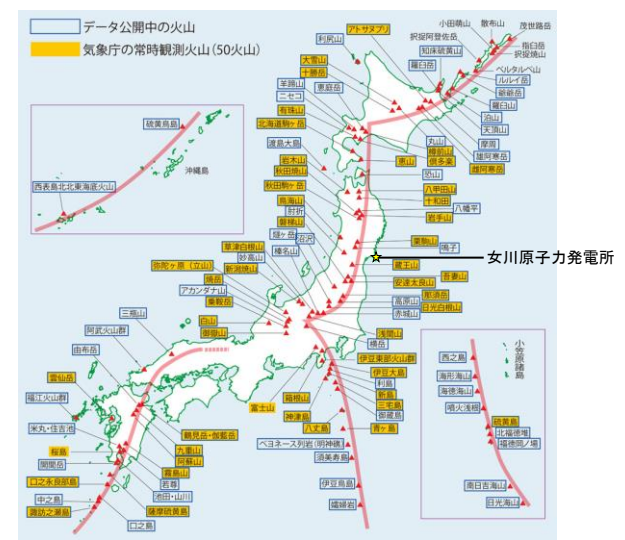
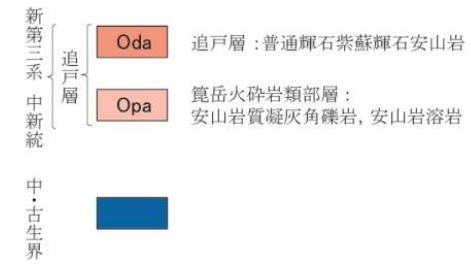
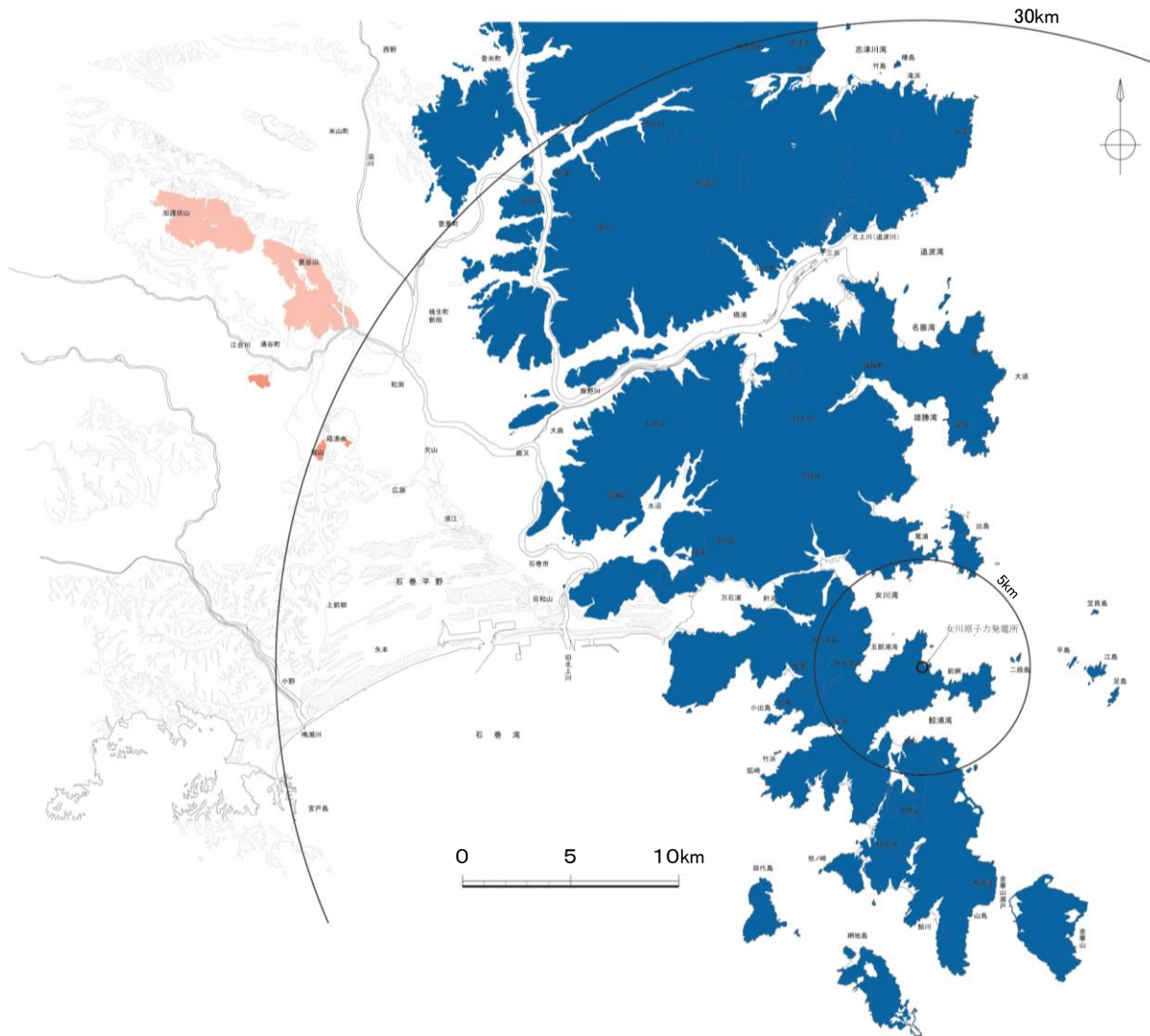
- 敷地を含む南部北上山地の中古生界分布域には、前期白亜紀とされている花崗岩類等が分布している。
- ✓ なお、中塚・大熊(2005)、Okuma and Kanaya(2005)等によれば、磁気異常分布からも敷地周辺には花崗岩類等の岩体の存在が示唆されており、地質図で認められる花崗岩類はしっかりした岩体を構成しているものと考えられる。(詳細は補足説明資料「1. 敷地の地形及び地質・地質構造の概要」を参照。)
- これらの花崗岩類等の年代について、以下の年代値が得られている。(文献記載内容の詳細は補足説明資料「1. 敷地の地形及び地質・地質構造の概要」を参照。)
- ✓ 109～120Ma: 河野・植田(1965)による黒雲母+角閃石のK-Ar年代。
- ✓ 121～128Ma: 土谷ほか(2015)によるジルコンのU-Pb年代。
- 上記の文献による年代値の違いについては、以下のとおり考察される。
- ✓ ジルコンのU-Pb法の閉鎖温度は1000℃程度であることから、マグマの貫入・固結年代を推定することができる(伊藤ほか(2012))とされており、敷地周辺に分布する花崗岩の貫入年代に良く対応しているものと考えられる。
- ✓ 貫入岩体の鉱物のK-Ar年代は、その鉱物の閉鎖温度まで冷却した時代を記録しているため、得られる年代は貫入年代より若い値が出る(佐藤(2016)、御子柴(2002))とされており、河野・植田(1965)による敷地近辺に分布する花崗岩中のK-Ar年代109～120Maは、冷却過程を反映した年代に対応しているものと考えられる。
- 一方、敷地内に貫入岩脈として分布するひん岩中に含まれる長石のK-Ar年代(東北電力(株)実施)は約105～107Maである。
- ✓ 長石の閉鎖温度は角閃石よりも更に低い(兼岡(1998))ことから、敷地内のひん岩に含まれる長石を対象にしたK-Ar年代は更に若くなっている可能性がある。
- これら花崗岩類の存在は、熱源としてあるいは同一の熱源を有する岩体の存在を示唆するものとして、前期白亜紀における女川原子力発電所付近の熱水活動と関連性を有するものと考えられる。

5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討 【熱水の生成環境② 後期白亜紀以降の火成活動】

- 敷地を含む南部北上山地の中古生界分布域には、新第三紀中新世以降の火山岩類は分布しない。
- 現在の火山フロントは、女川原子力発電所から西に約60km離れた位置にある。
- ⇒ 女川原子力発電所付近には、新第三紀中新世以降の火成活動は認められない。



産業技術総合研究所 (2017)

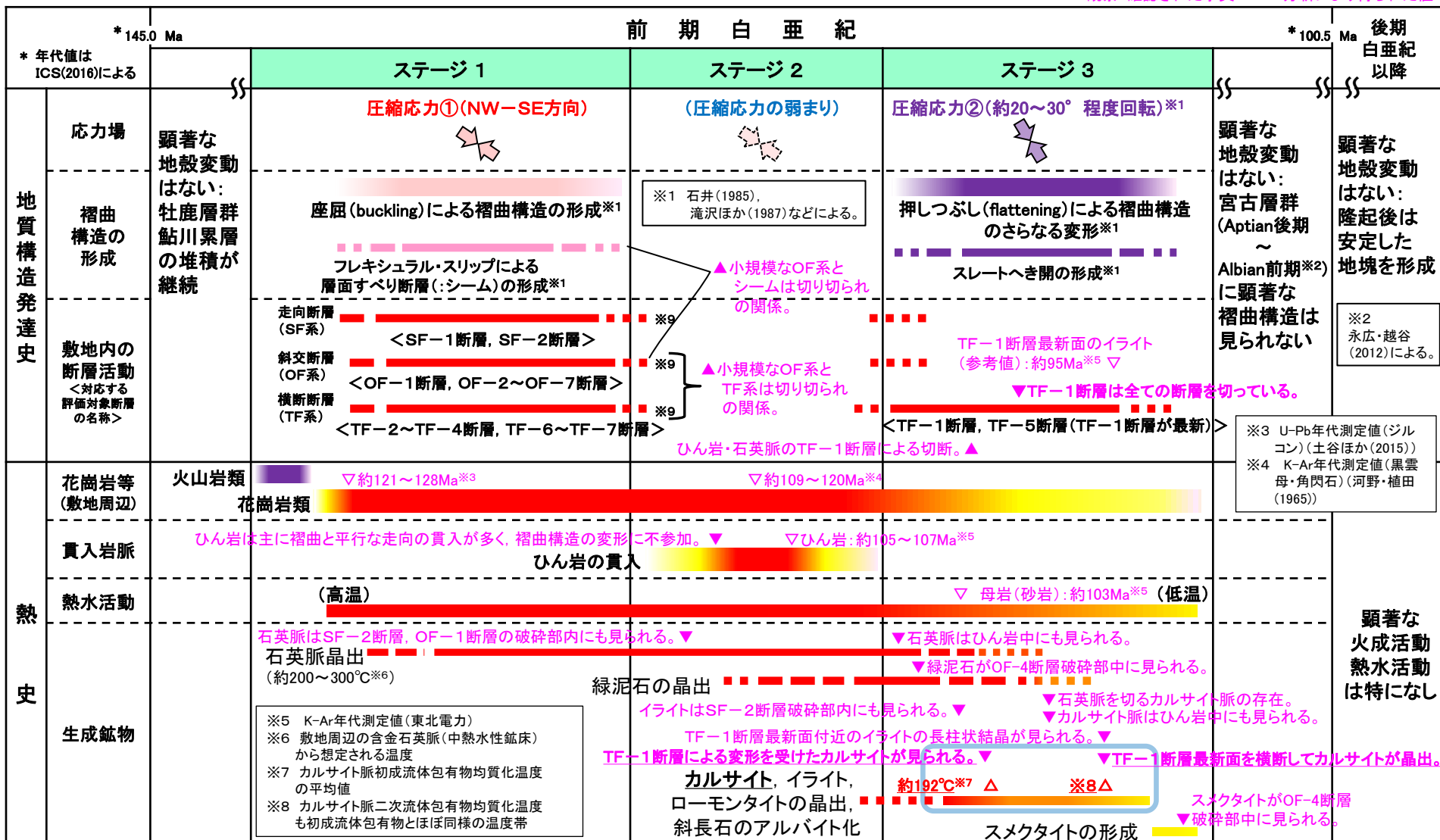
5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【まとめ①】

- ▶ 地質構造発達史及び敷地周辺の花崗岩類の年代を踏まえ、敷地内で観察される貫入岩脈であるひん岩や様々な生成鉱物の性状から、熱史については以下のとおりまとめられる。
- ▶ 考察内容の詳細について次頁に示す。

▲ 観察・確認された事実 △ 分析により得られた値



※9 ステージ1の走向断層(SF系), 斜交断層(OF系), 横断断層(TF系)には、淡水貯水槽底盤等でみられる小断層を含む。

5. 敷地の断層の活動性評価

5.2 断層と脈の関係

5.2.3 熱史の検討【まとめ②】

熱水活動と生成鉱物

- 敷地内の地層を構成する岩石中に見られる生成鉱物として、石英、緑泥石、カルサイト、イライト、ローモンタイト、スメクタイト等が見られる。これらの鉱物は目視あるいは顕微鏡観察下で脈状に晶出することが多い。
- 前頁の総括図において、各生成鉱物の晶出状況について観察、確認された事実関係を示すとともに、一般的な生成温度帯を加味した新旧関係について整理した。

熱水活動と温度条件

- 一連の熱水活動において、温度条件・熱水成分の変化に応じて、異なる鉱物(脈)が形成されたと考えられる。
- 石英脈は確認された中ではTF-1断層に切られているが、カルサイト脈等と比較して、より早期の高温状態の熱水から晶出したものであり、時期的に矛盾はないものと考えている。
 - ✓ 敷地周辺の中生界には、滝沢ほか(1974)等によれば点在する金鉱山として中熱水性鉱床(約200~300°C)の含金石英脈の存在が知られており、石英脈の形成環境を示唆するものと考えられる。
- カルサイト脈初成流体包有物均質化温度の平均値は約192°C(前頁総括図の※7)であり、二次流体包有物均質化温度もほぼ同様の温度帯となっている(前頁総括図の※8)。

熱水活動と年代測定結果との対応関係

- 河野・植田(1965)、土谷ほか(2015)による年代測定結果(前頁総括図の※3, 4)によれば、冷却過程を踏まえた上で敷地周辺の花崗岩類の年代は概ね前期白亜紀の中期~後期(概ね121~128Ma程度)と考えられる。
- 一方、TF-1断層破砕部最新面付近のイライトから得られたK-Ar年代測定結果は95.7±2.3Maであるが、イライトの晶出温度はジルコン、黒雲母、角閃石等に比べてかなり低温であることに加えて、断層破砕部に対するK-Ar年代測定法の適用は発展途上段階の技術であること、断層破砕部沿いでは変質の影響が大きい可能性があること等から参考値の扱いとしており、広域的な地質構造発達史の観点から、褶曲構造及び断層の形成が宮古層群の年代(Aptian後期~Albian前期)より古いとされていること(永広・越谷(2012)等)を踏まえ、前頁総括図においてはステージ3に位置づけて整理している。

TF-1断層の活動とカルサイトの性状から考察される熱史

- TF-1断層の最新面付近に見られるカルサイトの性状や3種類の晶出パターン(A~C)が共存することから、カルサイトについては複数回の晶出があったことが示唆される。
 - ①TF-1断層による変形を受けたカルサイト ②TF-1断層による変形を受けていないカルサイト
 - カルサイト脈中の流体包有物均質化温度から想定される熱水環境は、初成及び二次ともに同様の温度帯を示す。
- ⇒ 「①の母体となるカルサイトの晶出」後、「TF-1断層の活動によりカルサイトが変形を受け」、更にその後「別のカルサイト晶出があった」と考えられるが、いずれも一連の期間の高温な熱水環境下にあったものと考えられる。(前頁総括図の生成鉱物欄右下の水色枠に対応)

以上の地質構造発達史を踏まえた熱史の考察から、TF-1断層及びOF-4断層で確認された脈状のカルサイトや緑泥石は、前期白亜紀に終息した熱水活動により生成されたものであると考えられる。

5. 敷地の断層の活動性評価【まとめ】

5.1 上載層との関係

トレンチ調査

- 断層面を横断する鉱物脈の確認

TF-1断層の活動性を評価するために有効な上載層(後期更新世の地層等)は確認できなかった。

OF-4断層の活動性を評価するために有効な上載層(後期更新世の地層等)は確認できなかった。

5.2 断層と脈の関係

5.2.1 TF-1断層

トレンチ, 露頭調査

- 断層面を横断する鉱物脈の確認

コア, ボアホールカメラ及びCT画像観察

- 最新面の可能性のある面の選定
- 面の直線性・連続性の確認

詳細観察・検討

- 研磨片, 薄片による詳細観察
- EPMA分析による検討

5.2.2 OF-4断層

- コア及びCT画像観察
- 薄片による詳細観察

地質学的なプロセスを考慮

5.2.3 熱史の検討

- 鉱物の生成環境の検討
- 同一条件下で生成する鉱物の検討
- 熱史の検討

トレンチ, 露頭では, TF-1断層を貫くひん岩脈, 鉱物脈を目視観察で確認することはできなかった。

TF-1断層の最新面の可能性のある面として, 面②と面③を選定した。

脈状のカルサイトと, せん断の影響を受けたカルサイトが共存していることから, TF-1断層の最終活動と同じ期間に, カルサイトがTF-1断層破碎部に晶出したものと考えられる。

せん断の影響を受けていない自形のカルサイトが, TF-1断層の最新面を横断して晶出していることから, カルサイトの晶出が終了して以降, TF-1断層は活動していないと考えられる。

脈状の緑泥石が, 最新面の形成に伴う逆断層センスの変形構造を切るように晶出していることを確認した。
OF-4断層の最新面自体に緑泥石及び熱水由来のス멕タイトが晶出しており, 断層活動に伴う変形がないことを確認した。

TF-1断層の最新面では, 斜長石がアルバイト成分に富んでいること, 長柱状のイライトが生成し破壊されていないこと, 及び周囲にローモンタイトが晶出していることを確認した。

カルサイトには複数回の晶出が認められる。

カルサイトの初成包有物と二次包有物の生成温度は, ほぼ同じ温度帯で比較的高温である。

二次包有物の生成がTF-1断層の活動の影響としても, カルサイトが晶出していた期間を通じて高温の熱水環境下にあったものと考えられる。

TF-1断層の活動による変形を受けたカルサイトが認められるが, 最新面を横断して晶出するカルサイトが確認されることから, カルサイトの晶出が終了して以降にTF-1断層は活動していないと考えられる。

OF-4断層破碎部の最新面形成に伴う変形構造を切るように緑泥石が脈状に晶出していること, 及び最新面自体にも熱水由来のス멕タイトや緑泥石が晶出し, これらの鉱物が破壊されていないことを確認した。

TF-1断層及びOF-4断層で確認された脈状のカルサイトや緑泥石は, 前期白亜紀に終息した熱水活動により生成されたものであることを確認した。

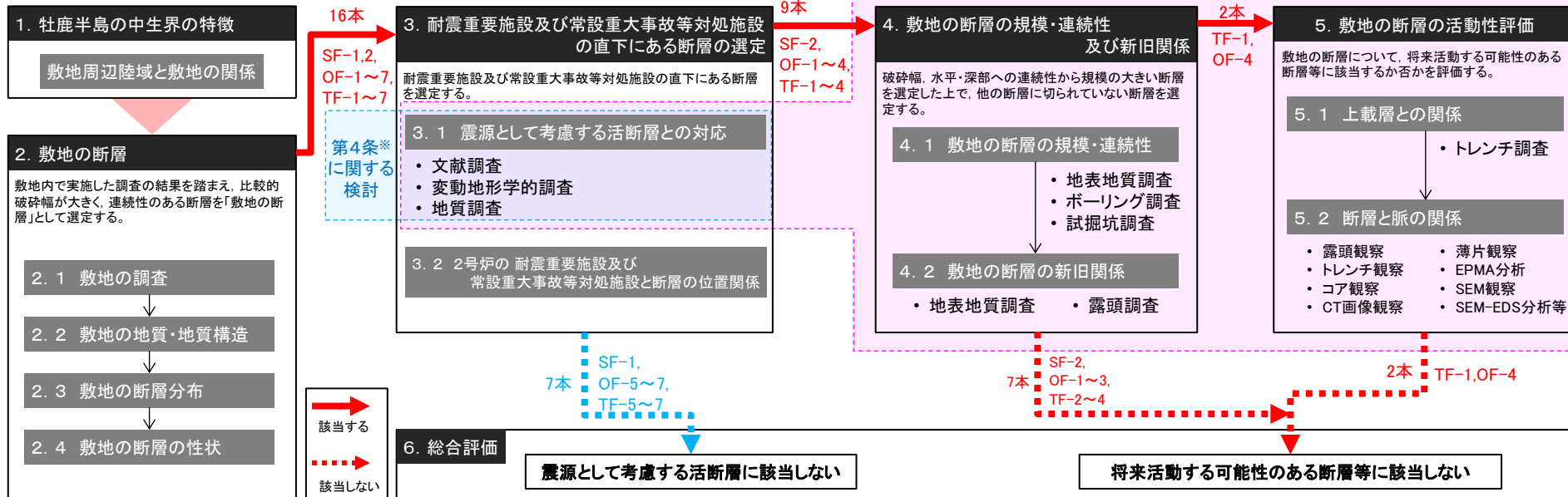
TF-1断層及びOF-4断層は, 後期更新世よりもはるかに古い前期白亜紀の熱水活動が終息して以降に活動していないことから, 将来活動する可能性のある断層等に該当しない。

6. 総合評価

6. 総合評価

【評価の流れ】

※実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則



- 【2】敷地において、比較的破碎幅が大きく、連続性を有する断層として、SF-1,2断層、OF-1~7断層、TF-1~7断層を確認した。
- 【3. 1】これらの敷地の断層は、いずれの断層も震源として考慮する活断層には該当しないことを確認した。
- 【3. 2】SF-1断層、OF-5~7断層、TF-5~7断層は、2号炉の耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設との位置関係から、変位が施設に影響を及ぼすことはないことを確認した。
- 【4】SF-2断層、OF-1~4断層、TF-1~4断層について、規模・連続性及び新旧関係を確認し、活動性評価を行う断層として、TF-1断層及びOF-4断層を選定した。
- ✓ TF-1断層: 地質構造を規制する規模・連続性の大きな断層であり、他の断層に切られていない。
 - ✓ OF-4断層: 地質構造を規制していない規模・連続性の小さい断層であるが、他の断層に切られていない。
- 【5】TF-1断層及びOF-4断層は、活動性を評価するために有効な上載層(後期更新世の地層等)との関係が確認できないことから、断層破碎部の最新面と熱水活動に伴う鉱物脈との関係を詳細に確認した。
- ✓ TF-1断層の活動による変形を受けたカルサイトが認められるが、最新面を横断して晶出するカルサイトが確認されることから、カルサイトの晶出が終了して以降にTF-1断層は活動していないと考えられる。【5. 2】
 - ✓ OF-4断層破碎部に脈状の緑泥石が晶出しており、最新面自体には熱水由来のスメクタイト及び緑泥石が晶出していることを確認した。【5. 2】
 - ✓ TF-1断層及びOF-4断層は、後期更新世よりもはるか古い前期白亜紀の熱水活動が終息して以降に活動していないことから、将来活動する可能性のある断層等に該当しない。【5. 2】

- 2号炉の耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設の直下にある断層は、震源として考慮する活断層に該当しない。
- 2号炉の耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設の直下にある断層は、将来活動する可能性のある断層等に該当しない。

参考文献

1. 産業技術総合研究所地質調査総合センター(2013):日本重力CD-ROM
2. 滝沢文教・神戸信和・久保和也・秦光男・寒川旭・片田正人(1984):石巻地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所
3. 滝沢文教・久保和也・猪木幸男(1987):寄磯地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所
4. 活断層研究会編(1991):[新編]日本の活断層—分布図と資料, 東京大学出版会
5. 中田高・今泉俊文(2002):活断層詳細デジタルマップ
6. 日本地すべり学会東北支部(1992):東北の地すべり・地すべり地形—分布図と技術者のための活用マニュアル—
7. 防災科学技術研究所(2009):地すべり地形分布図第40集「一関・石巻」, 国立研究開発法人防災科学技術研究所
8. W. Deer, R.A. Howie and J. Zussman, 1992, Introduction to the Rock-Forming Minerals, Mineralogical Society
9. 下田右(1985):粘土鉱物研究法, 創造社
10. 日本粘土学会編(2009):粘土ハンドブック(第三版), 技報堂出版株式会社
11. 佐脇貴幸(2003):流体包有物—その基礎と最近の研究動向—, 岩石鉱物科学, Vol.32, no.1, January, p23-41
12. James R. O'Neil, Robert N. Clayton, and Toshiko K. Mayeda 1969, Oxygen Isotope Fractionation in Divalent Metal Carbonates, The Journal of Chemical Physics, 51
13. 吉村尚久(2001):粘土鉱物と変質作用, 地学団体研究会
14. 中塚正・大熊茂雄(2005):日本空中磁気データベース, 数値地質図, P-6, 地質調査総合センター
15. Okuma, S. and Kanaya, H. 2005, Utility of petrophysical and geophysical data to constrain the subsurface structure of the Kitakami plutons, northeast Japan, Earth Planets Space, 57, 727-741
16. 河野義礼・植田良夫(1965):本邦産火成岩のK-Ar dating(Ⅱ)—北上山地の花崗岩類—, 53, 143-154
17. 土谷信高・武田朋代・足立達朗・中野伸彦・小山内康人・足立佳子(2015):北上山地の前期白亜紀アダカイト質火成活動とテクトニクス, 岩石鉱物科学, 44, 69-90
18. 伊藤久敏・田村明弘・森下知晃・荒井章司(2012):飛騨山脈の深成岩マグマの貫入時期とテクトニクス—LA-ICP-MSによるジルコンのU-Pb年代測定法の適用—, 地質学雑誌, 118, 7, 449-456
19. 佐藤興平(2016):谷川岳花崗岩体の年代とフォッサマグナ地域における新第三紀の珪長質火成活動, 群馬県立自然史博物館研究報告(20), 85-104
20. 御子柴(氏家)真澄(2002):北上山地南部, 千厩一気仙沼地域の火成岩類のK-Ar年代, 岩石鉱物科学, 31, 318-329
21. 兼岡一郎(1998):年代測定概論, 東京大学出版会, 315p
22. 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編)(2017):1万年噴火イベントデータ集(ver. 2.3). 産総研地質調査総合センター(<https://gbank.gsj.jp/volcano/eruption/index.html>)
23. International Commission on Stratigraphy, 2016, INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART v2016/12, (<http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>)
24. 石井和彦(1985):南部北上山地牡鹿半島における褶曲及びスレートへき開の形成過程, 地質学雑誌, vol91, no.5, p309-321
25. 滝沢文教・一色直記・片田正人(1974):金華山地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所.