

伊方発電所3号炉

地盤(敷地の地質・地質構造)について

令和5年2月28日

四国電力株式会社

I.	連続性がある断層の選定	
1.	三波川変成岩類の特徴	P4
2.	敷地内における断層分布	P11
3.	敷地内断層の性状	P16
II.	重要施設の直下にある断層の選定	
1.	重要施設と断層の位置関係	P24
2.	震源として考慮する活断層との対応	P26
III.	他の断層による切断および軟質部の有無	P37
IV.	軟質部が認められない断層の活動性評価	
1.	断層内物質の物性の検討	P41
2.	断層内物質の観察	P49
3.	まとめ	P59
V.	軟質部を含む断層の活動性評価	
1.	破碎幅の検討	P61
2.	断層内物質の詳細分析	P66
3.	断層の活動時期の検討	P89
4.	まとめ	P124
VI.	総合評価	P126

活動性評価に関する審査ガイドの記載

- 『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』における将来活動する可能性のある断層等の認定や調査手法に関する記載を踏まえて敷地内断層の活動性を総合的に評価する。

2. 将来活動する可能性のある断層等の認定

(審査ガイドから抜粋)

2.1 基本方針

- (1) 「将来活動する可能性のある断層等」は、後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できないものとする。
- (2) その認定に当たって、後期更新世（約12～13万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約40万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。
- (3) なお、活動性の評価に当たって、設置面での確認が困難な場合には、当該断層の延長部で確認される断層等の性状等により、安全側に判断する必要がある。
- (4) また、「将来活動する可能性のある断層等」には、震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面が含まれる。
- (5) 「震源として考慮する活断層」とは、地下深部の地震発生層から地表付近まで破壊し、地震動による施設への影響を検討する必要があるものをいう。



敷地において後期更新世の地形面および地層が欠如していることから、審査ガイドに従い、地形、地質・地質構造等を総合的に検討した上で敷地内断層の活動性を評価する。

3. 敷地内及び敷地極近傍における地盤の変位に関する調査

(審査ガイドから抜粋)

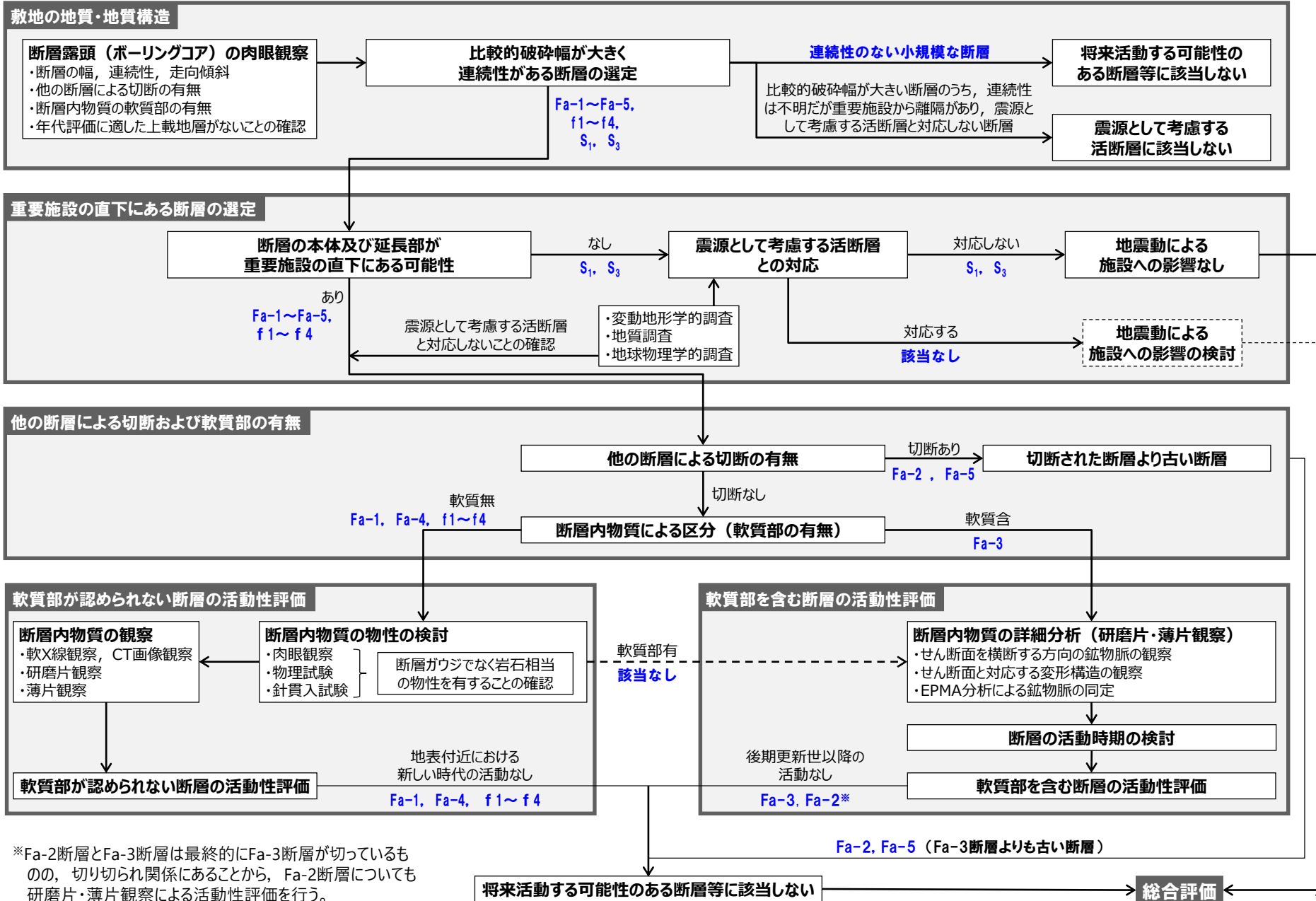
3.1 調査方針

- (1) 重要な安全機能を有する施設の地盤には、将来活動する可能性のある断層等の露頭が無いことを確認する。
- (2) 敷地内及び敷地極近傍に将来活動する可能性のある断層等の露頭が存在する場合には、適切な調査、又はその組合せによって、当該断層等の性状（位置、形状、過去の活動状況）について合理的に説明されていることを確認する。
- (3) 敷地内及び敷地極近傍に将来活動する可能性のある断層等の露頭が存在する場合には、その断層等の本体及び延長部が重要な安全機能を有する施設の直下に無いことを確認する。なお、将来活動する可能性のある断層等が重要な安全機能を有する施設の直下に無い場合でも、施設の近傍にある場合には、地震により施設の安全機能に影響がないことを、「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に基づいて確認する。
- (4) 将来活動する可能性のある断層等とは、震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面が含まれる。



審査ガイドに従い、重要な安全機能を有する施設の直下に将来活動する可能性のある断層等が無いことを確認するとともに、敷地内に「震源として考慮する活断層」が無いことを確認する。

評価の流れ



*Fa-2断層とFa-3断層は最終的にFa-3断層が切っているもの、切り切れ関係にあることから、Fa-2断層についても研磨片・薄片観察による活動性評価を行う。

I. 連続性がある断層の選定

1. 三波川変成岩類の特徴

2. 敷地内における断層分布

3. 敷地内断層の性状

II. 重要施設の直下にある断層の選定

III. 他の断層による切断および

軟質部の有無

IV. 軟質部が認められない断層の

活動性評価

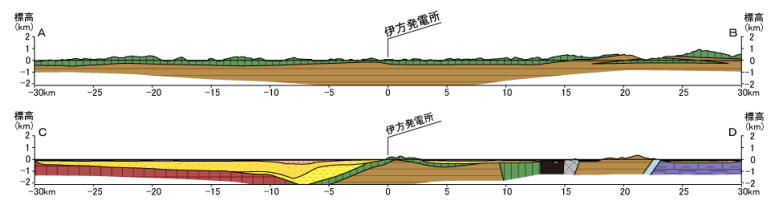
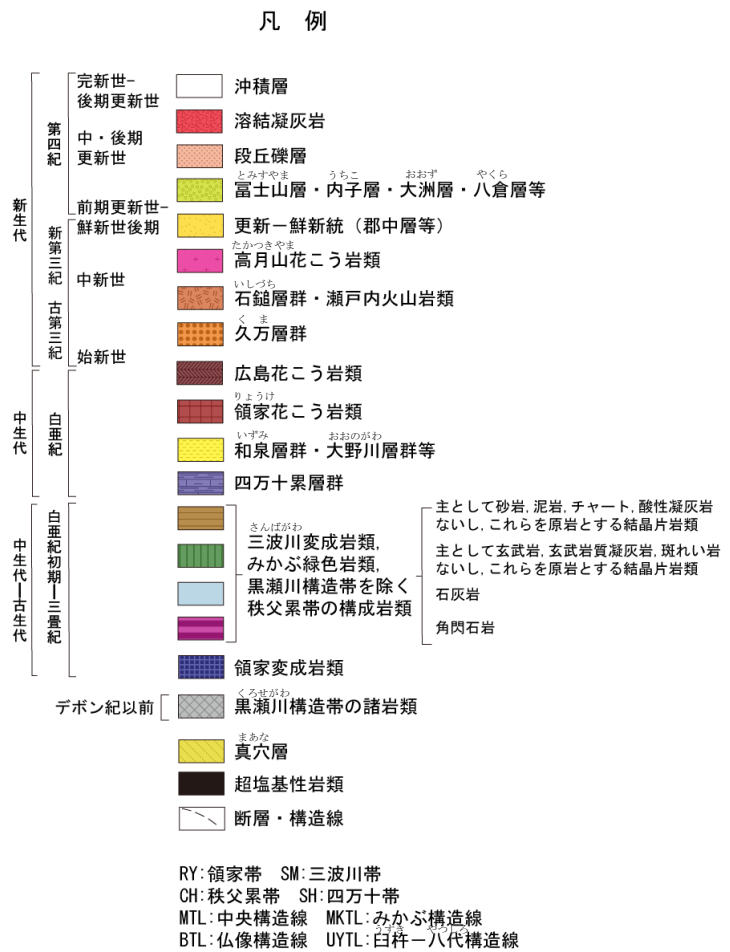
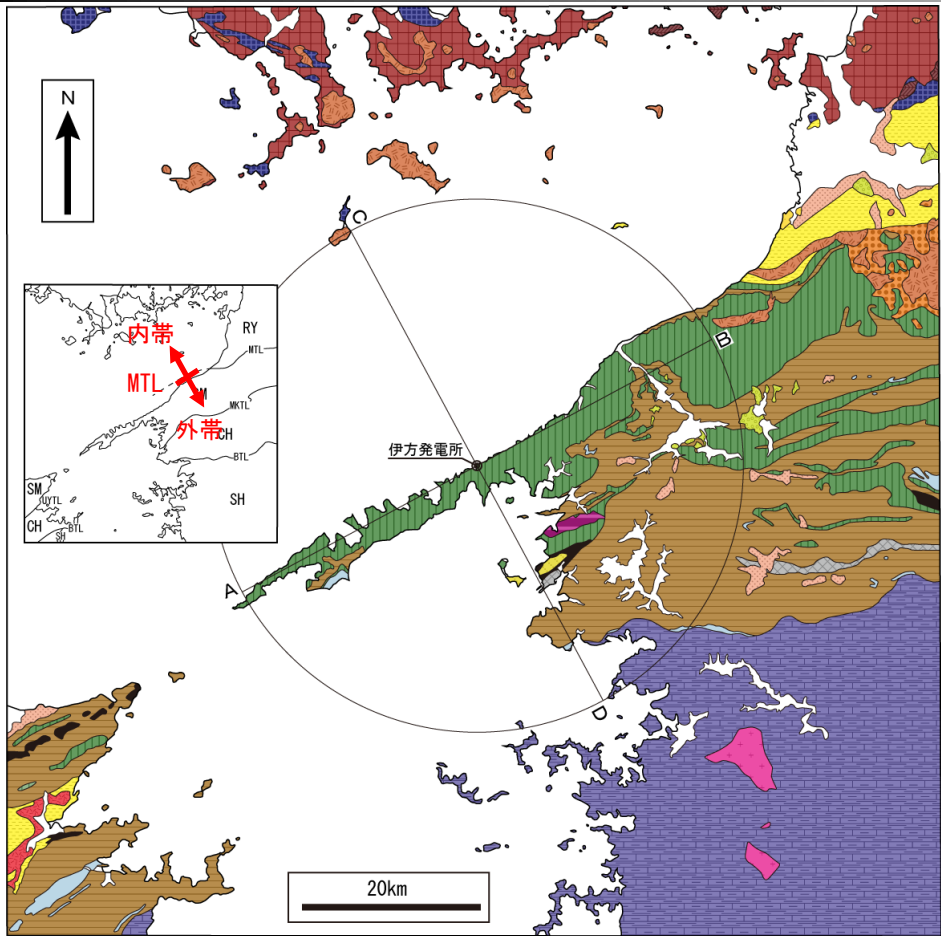
V. 軟質部を含む断層の活動性評価

VI. 総合評価



1. 連続性がある断層の選定

三波川変成岩類の特徴① <敷地周辺の地質>



○敷地周辺の内帯には領家帯に属する地層, 外帯には北から三波川帯, 秩父累帯および四万十帯に属する地層が分布し, 地質構造および地質境界断層は東北東-西南西方向である。
○敷地付近には三波川変成岩類に属する塩基性片岩が広く分布する。

1. 連続性がある断層の選定

三波川変成岩類の特徴② <伊方発電所に分布する塩基性片岩の概要>

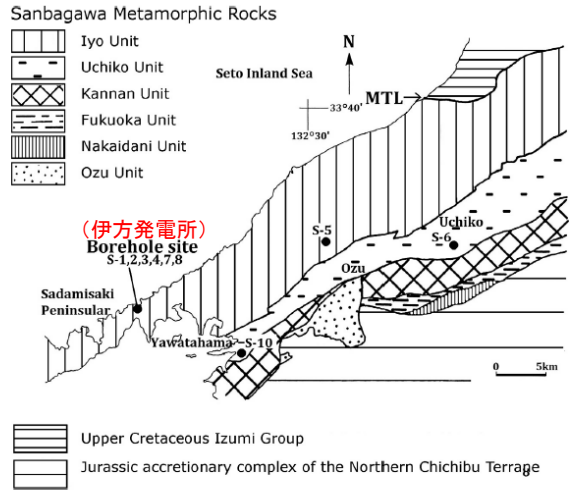
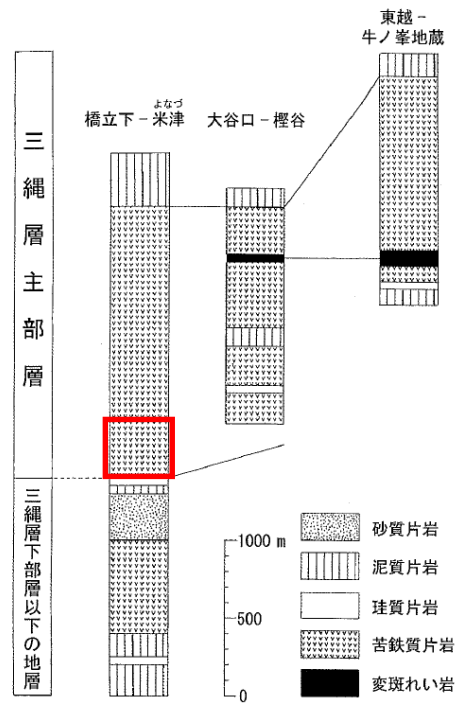


Fig. 1b. Map of northwestern Shikoku showing the location of the drill hole and the location of the surface samples.

【Knittel et al.(2014)より抜粋】
「Judged from published maps, the geological make-up of the peninsular might be relatively uniform. The surface of the peninsular is largely occupied by the main greenschist member of the Minawa Formation, which is a part of the Sanbagawa high-p/low-T Metamorphic Belt (Kojima et al., 1956).」
「Ohnishi et al. (2013) divided the 2000 m continuous succession of the schists encountered in the drill hole into two units that are correlated with the (upper) Iyo Unit and the (lower) Uchiko Unit that were defined by Banno et al. (2010) in the Ozu area (east of the study area). In the borehole, the attitude of the schistosity is generally trending ENE–WSW and gently dipping to the north.」

Knittel, U., S. Suzuki, N. Nishizaka, K. Kimura, W.-L. Tsai, H.-Y. Lu, Y. Ishikawa, Y. Ohno, M. Yanagida, Y.-H. Lee, 2014, U-Pb ages of detrital zircons from the Sanbagawa Belt in western Shikoku: Additional evidence for the prevalence of Late Cretaceous protoliths of the Sanbagawa Metamorphics, Journal of Asian Earth Sciences, 96, 148–161.



第4. 11図 伊予ユニットの地質柱状図
地層の対比は秀(1972)に従った。

【坂野ほか(2010)より抜粋】
「伊予ユニットは佐藤(1929)の出石層、秀(1972)により三縄層下部層以下の地層・三縄層主部層に対比された地質体、武田ほか(1991)の中山-肱川ナップ(南縁部を除く)、佐礼谷ナップ、双海ナップの3つのナップの集合体にほぼ相当する。
本ユニットは大洲市高山寺山より東北東方向へ延びる高角断層の北側から伊予灘沿岸(大洲市長浜町黒田から伊予市双海町上灘)にかけて分布し、苦鉄質片岩、泥質片岩、砂質片岩、珪質片岩、石灰質片岩、変斑れい岩、角閃石から構成される。」

坂野靖行・水野清秀・宮崎一博, 2010, 大洲地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 高知(13)第59号.

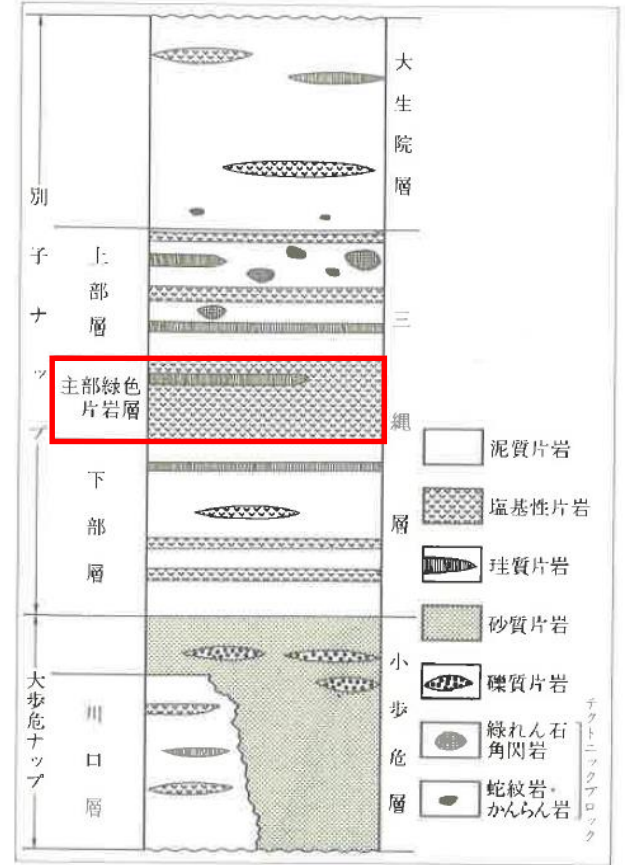


図2.17 四国中央部の三波川結晶片岩類の模式柱状図
日本の地質『四国地方』編集委員会編, 1991, 日本の地質8 四国地方.

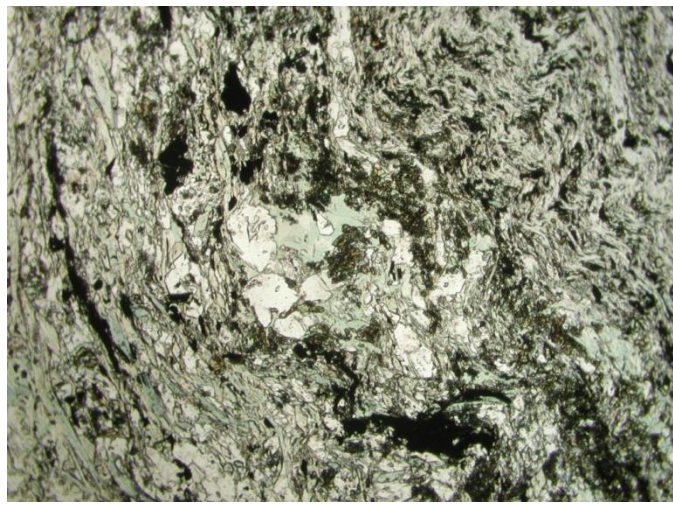
○伊方発電所の地表付近に分布する塩基性片岩は坂野ほか(2010)の伊予ユニットに対比され、三縄層主部層に相当する。

1. 連続性がある断層の選定

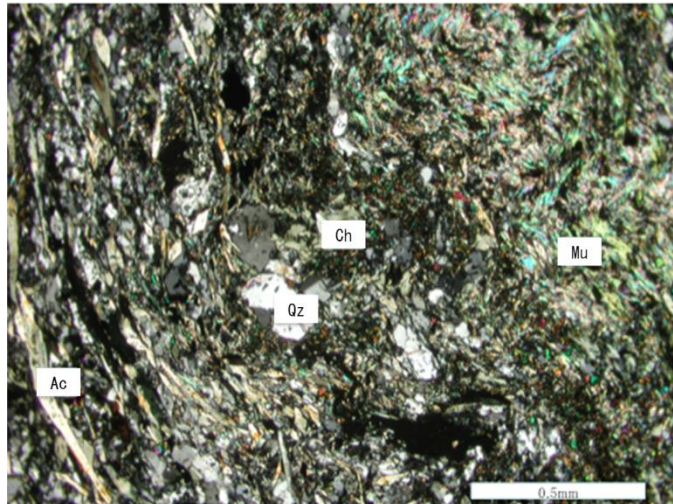
三波川変成岩類の特徴③ <伊方発電所に分布する塩基性片岩の主要鉱物>

○伊方発電所に分布する塩基性片岩は片理の発達があるものの、一般に剥離性が弱く、塊状かつ堅硬である。また、本岩は暗緑色～淡緑色を呈し、緑泥石、緑れん石、アクチノ閃石、長石、石英及び方解石が主要鉱物である。

○三波川帯の変成鉱物組合わせに基づいた変成分帯は右図のようにまとめられている。伊方発電所の地表付近に分布する塩基性片岩の変成度は観察された鉱物組み合わせに基づくと、緑泥石帯に相当する。



深度約120m薄片写真
(平行ニコル, 平成24年撮影)



深度約120m薄片写真
(直交ニコル, 平成24年撮影)
Ac: アクチノ閃石, Qz: 石英, Ch: 緑泥石, Mu: 白雲母

変成鉱物	分帯			
	緑泥石帯	ざくろ石帯	曹長石-黒雲母帯	オリゴクレーヌ-黒雲母帯
赤鉄鉱をふくむ塩基性片岩	ウインチ閃石 青閃石 ホルンブレード 緑泥石 緑れん石 スチルブノメレーン 黒雲母 ざくろ石 くさび石 ルチル チタン鉄鉱 磁鉄鉱			
赤鉄鉱をふくまない塩基性片岩	アクチノ閃石 ホルンブレード 緑泥石 パンペリー石 緑れん石 スチルブノメレーン 黒雲母 ざくろ石 くさび石 ルチル チタン鉄鉱			
泥質片岩	緑泥石 ざくろ石 黒雲母 ホルンブレード 白雲母 緑れん石 ゆうれん石 曹長石 オリゴクレーヌ 方解石 炭質物			

図2.18 四国の三波川結晶片岩類の変成鉱物組合せ(大槻・坂野, 1990英; 榎並, 1983英)

日本の地質『四国地方』編集委員会編, 1991, 日本の地質8 四国地方.

Otsuki, M and Banno, S., 1990, Prograde and retrograde metamorphism of hematite-bearing basic schists in the Sanbagawa belt in central Shikoku, J.metamorphic Geol., 8, 425-439.

Enami, M., 1983, Petrology of pelitic schists in the oligoclase-biotite zone of the Sanbagawa metamorphic terrane, Japan: phase equilibria in the highest grade zone of a high-pressure intermediate type of metamorphic belt. J. metamorphic Geol., 1, 141-161.

三波川変成岩類の特徴④ <形成史>

- 敷地付近には三波川変成岩類が広く分布する。
- 三波川変成岩類は、一般に、地下深部で低温高压型の変成作用を受けた後、地表まで上昇したとされている。
- 三波川変成岩類の形成史については多くの研究があるが、Wallis et al. (2009)によると、約9千万年前に地下深部から上昇を開始し、約5千万年前頃にその一部が地表に露出し始めたとされている。
- したがって、三波川変成岩類は、その形成の過程において地下深部での変形作用を受けており、地下深部での生成を示す断層が認められる。

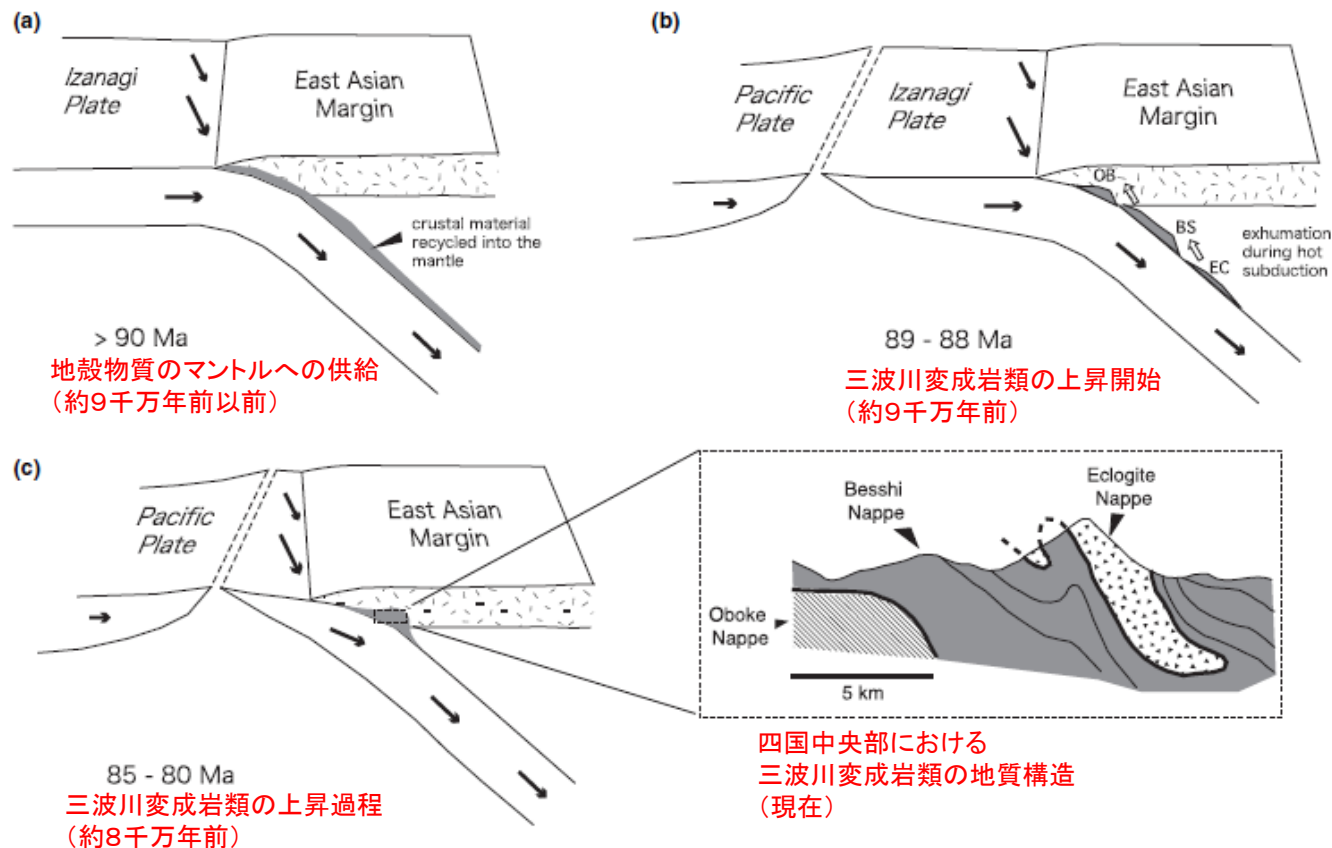


Fig. 7. Summary of proposed relationship between approach of a spreading ridge and formation of the Sanbagawa metamorphic belt. (a) Prior to 90 Ma there is normal approximately steady-state cold-subduction of the Izanagi Plate that results in most or all of the subducted crustal material being recycled into the mantle. (b) Around 90 Ma the close approach of a spreading ridge and associated younging of the subducting slab causes the subduction zone to warm and triggering the rapid rise of relatively buoyant units of the Sanbagawa belt (EC = eclogite nappe; BS = Besshi nappe; OB = Oboke nappe). The preserved metamorphic domain does not, therefore, reflect the conditions of steady-state subduction, but a snap shot of a particularly warm period in the evolution of the subduction zone. (c) Proposed relationship between the present architecture of the Sanbagawa belt and the former subduction zone.

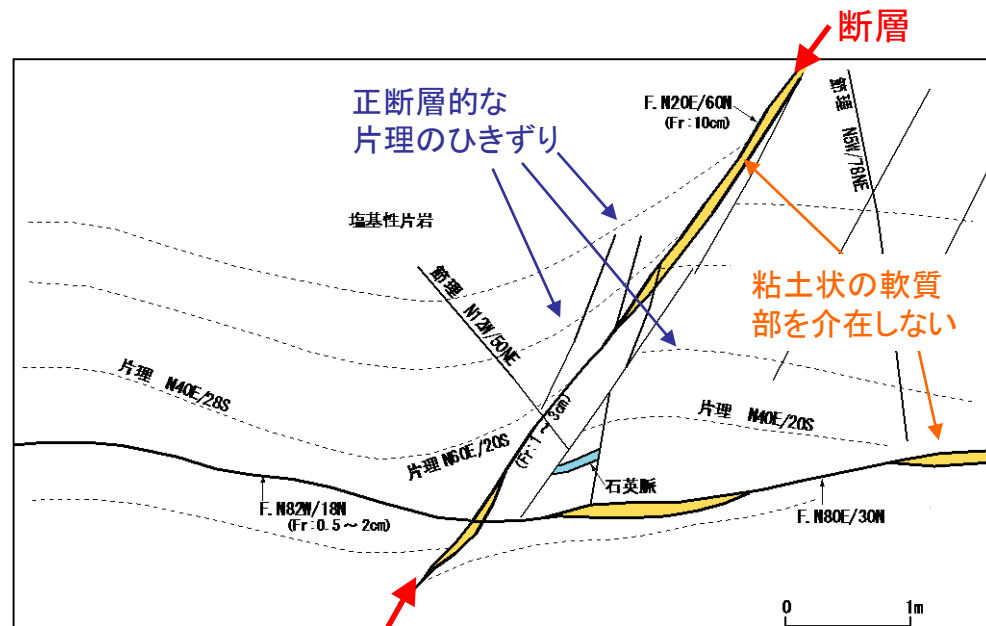
三波川変成岩類の形成史の一例(Wallis et al., 2009より抜粋)

三波川変成岩類の特徴⑤ <片理のひきずり>

- 三波川変成岩類においては、一般に、地下深部で生成した断層が認められる。
- 一例として、伊方町二見の海岸沿いの塩基性片岩露頭において、断層付近で片理が流動するように変形していることが観察される（左下写真，右下図）。このような片理のひきずり（流動的な変形）は地表付近では起こり得ず，当該断層が地下深部の温度・圧力の下で生成したことを示す。
- また，当該断層は断層内物質が岩石に相当するほど硬く粘土状の軟質部を介在しない。これは古い時代に地下深部で生成した断層であることを示すととも当該断層が地表付近に位置して以降の新しい時代には活動していないことを示唆するものである。
- なお，片理のひきずりの観察から，当該断層は地下深部において正断層的に活動したと評価される。



地下深部で生成した断層性状の例(写真)

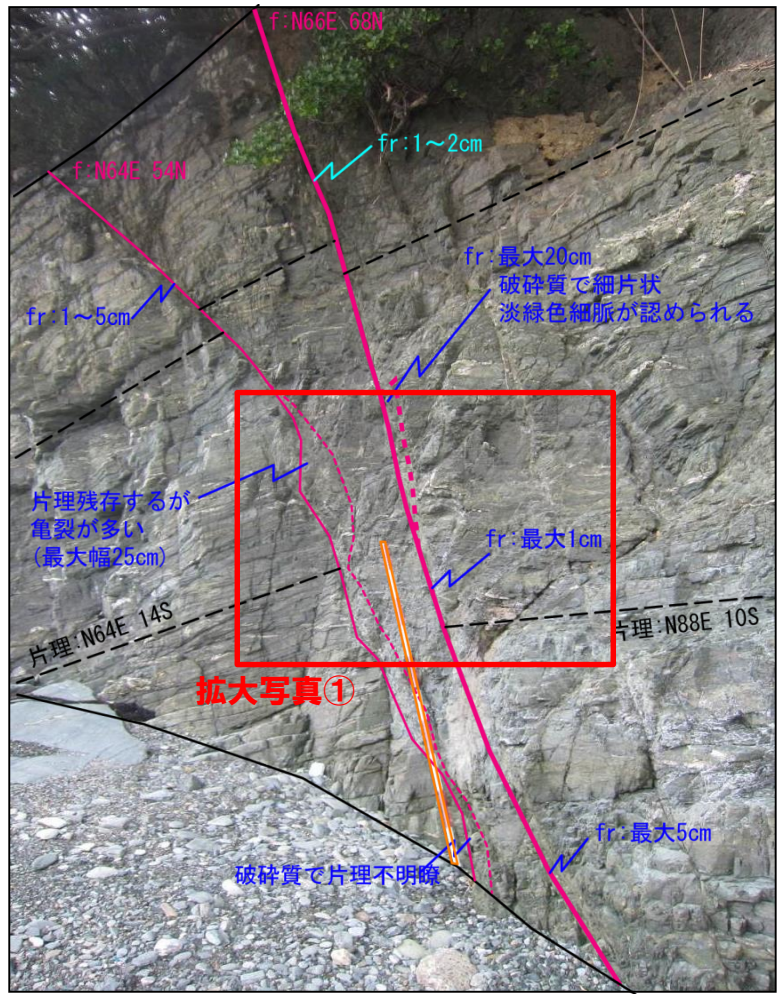


地下深部で生成した断層性状の例(スケッチ)

1. 連続性がある断層の選定

三波川変成岩類の特徴⑥ <断層幅の変化>

- 三波川変成岩類においては、破砕幅が著しく変化する断層が見られる。
- 一例として、伊方町二見の海岸沿いの塩基性片岩露頭において、1mの区間で破砕幅が20cmから1cmへと変化する。
- このような破砕幅の著しい変化も地下深部で生成した断層の特徴の一つである。



H27年撮影



拡大写真①



拡大写真② 破砕幅15~20cm程度



拡大写真③ 破砕幅1cm程度

I. 連続性がある断層の選定

1. 三波川変成岩類の特徴

2. 敷地内における断層分布

3. 敷地内断層の性状

II. 重要施設の直下にある断層の選定

III. 他の断層による切断および

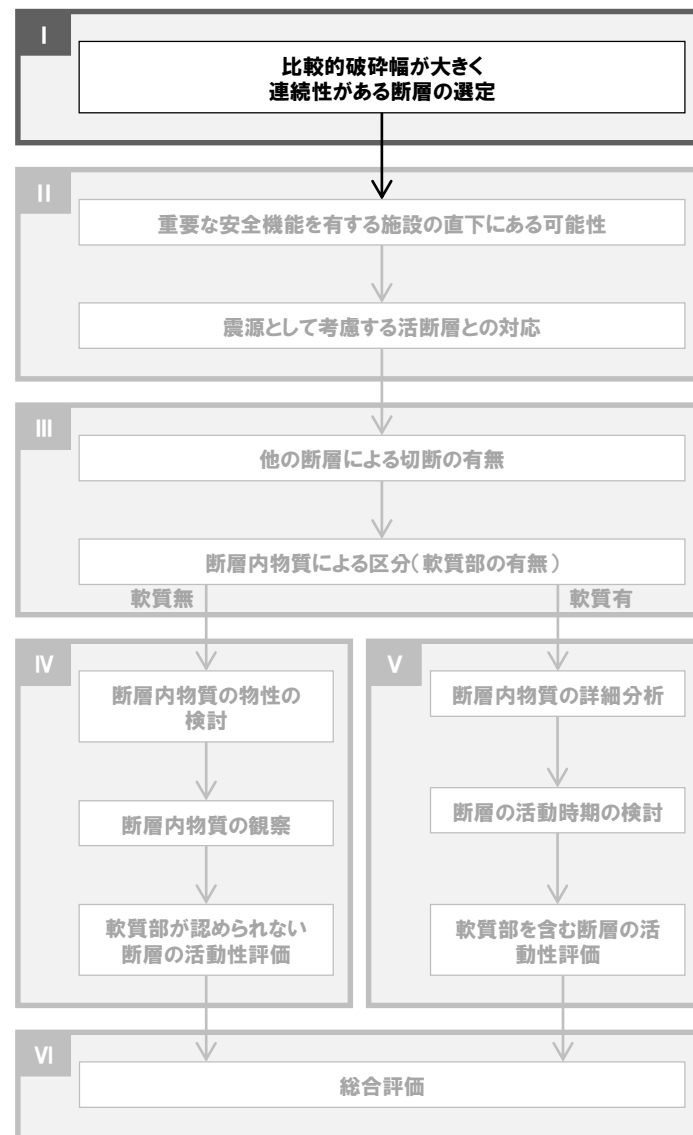
軟質部の有無

IV. 軟質部が認められない断層の

活動性評価

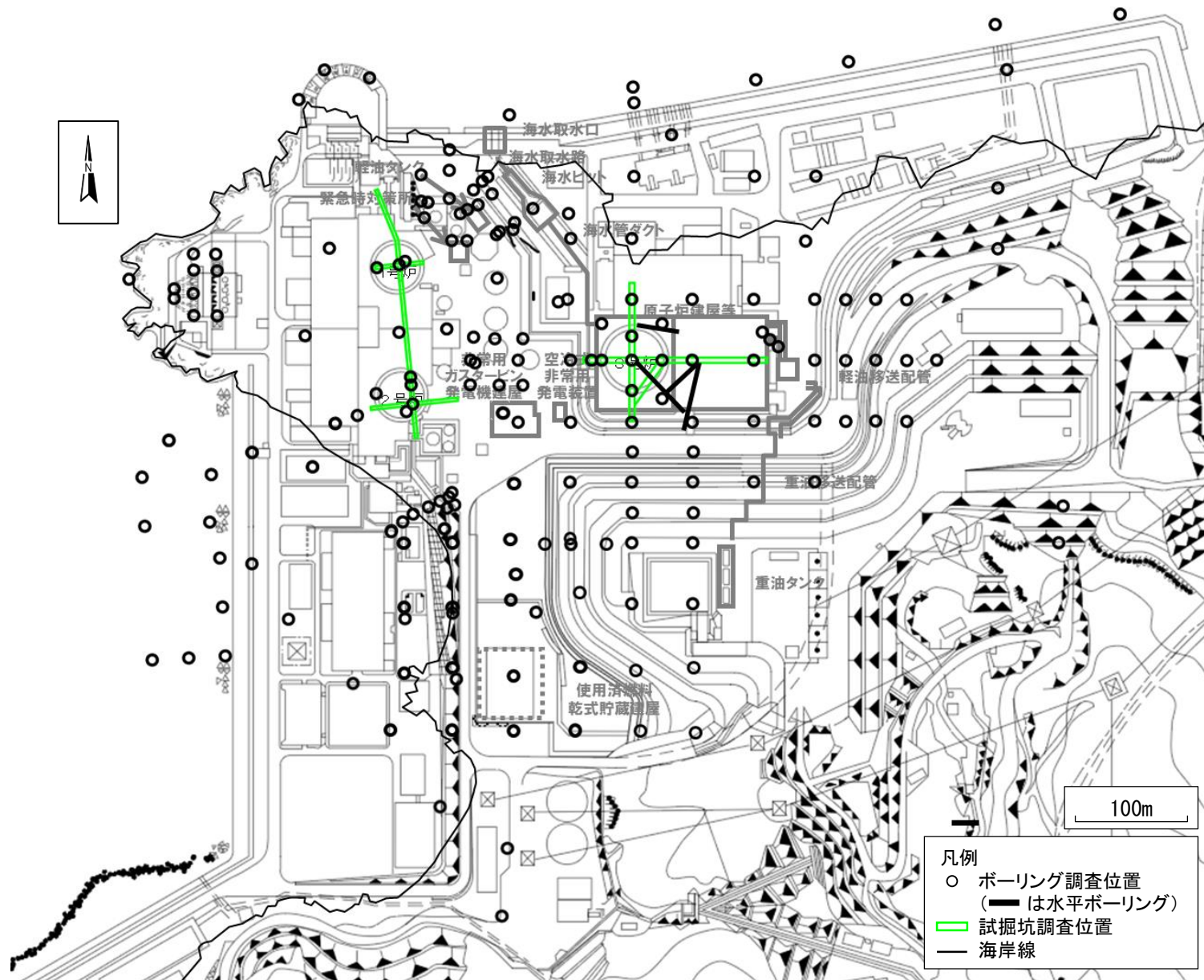
V. 軟質部を含む断層の活動性評価

VI. 総合評価



敷地内における断層分布①<調査位置>

○3号炉周辺における既往調査位置を示す。



敷地内における断層分布② <断層の選定方法の考え方>

【断層の選定方法の考え方】

- 三波川変成岩類は、地下深部で生成した小断層が多数認められる。
- 一般に、破碎幅が広いほど、断層長さは長くなる。ただし、三波川変成岩類には破碎幅が著しく変化する断層が見られる。
- 以上を踏まえ、以下の基準（これまでの3号炉設置変更許可申請の考え方）に基づき、比較的破碎幅が大きく連続性のある断層を選定する。

断層の選定方法

- ①平均破碎幅が5cm以上で連続性のあるもの
（観察範囲内および周辺のボーリングコア等に連続するもの）
もしくは
- ②他の小断層に切られるが、
平均破碎幅が5cm以上で遠方まで連続するもの

【補足】

- 破碎幅はせん断面に挟まれて母岩の組織が破碎された幅を計測するものとし、平均破碎幅は観察範囲全体を確認し、破碎幅の膨縮等を踏まえた上で代表性のある数箇所において計測する。
- 連続性について、観察範囲内および周辺のボーリングコア等である方向へ断層が連続しないことを確認することで、連続性のない小規模な断層と判断する。
- 連続性について、他の小断層に切られる断層は同様に小規模な断層であることが多いことから、観察範囲内で連続していても連続性無しと評価する。

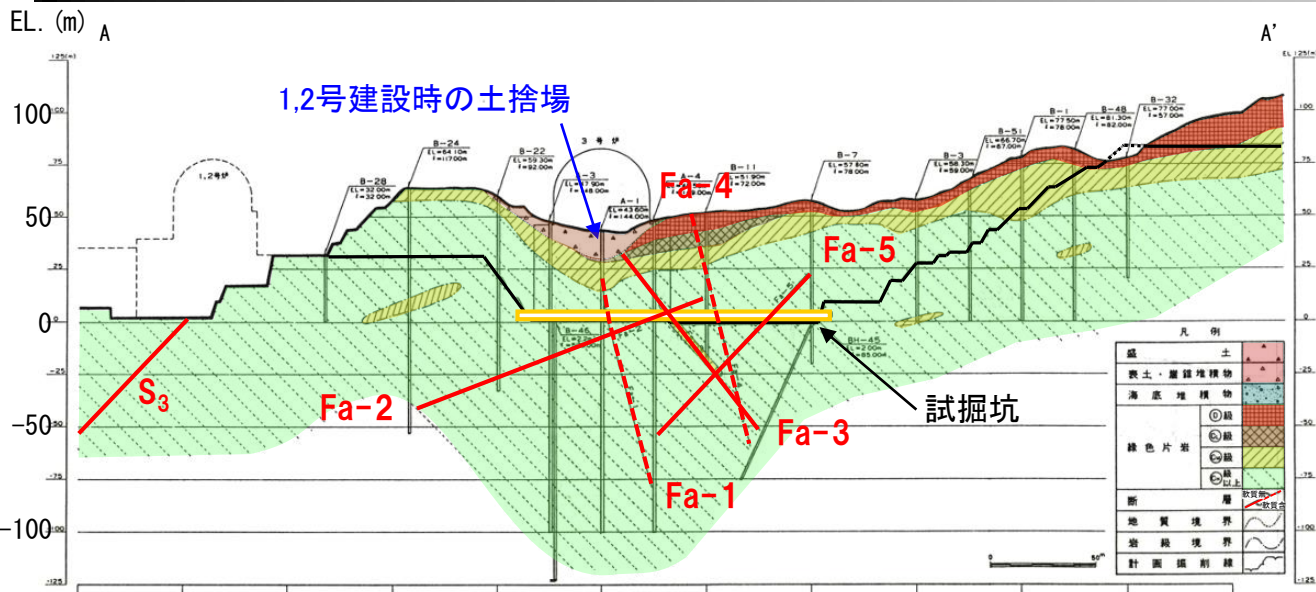
断層の選定例

断層 No.	①破碎幅	②連続性	選定
1	無 (1cm)	無 (途中で消える)	対象外
2	無 (3cm)	無 (小断層に切られる)	対象外
3	有 (5cm)	無 (途中で消える)	対象外
4	無 (2cm)	有	対象外
5	有 (10cm)	無 (隣接するボーリング孔に連続しない)	対象外
6	有 (8cm)	有	対象
7	有 (5cm)	有 (幅10cmの断層に切られる)	対象
8	有 (10cm)	有 (小断層に切られるが遠方まで連続する)	対象

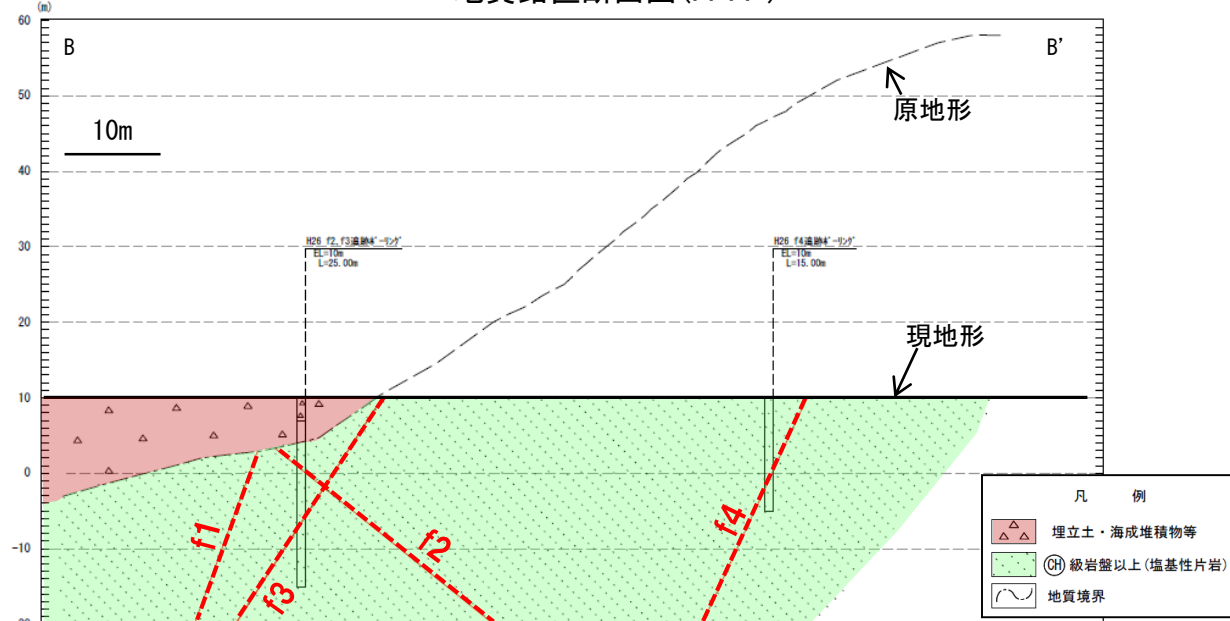
1. 連続性がある断層の選定

敷地内における断層分布④ <地質鉛直断面図>

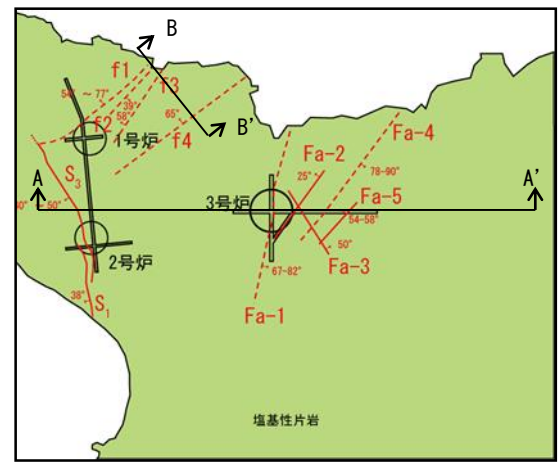
○敷地内断層は全般に中～高角度であり、Fa-2断層およびf2断層は低角度である。



地質鉛直断面図(A-A')



地質鉛直断面図(B-B')



地質水平断面図(EL+2.0m)

伊方発電所原子炉設置変更許可
申請書(3号炉増設, 昭和59年)に加筆

I. 連続性がある断層の選定

1. 三波川変成岩類の特徴
2. 敷地内における断層分布
3. 敷地内断層の性状

II. 重要施設の直下にある断層の選定

III. 他の断層による切断および

軟質部の有無

IV. 軟質部が認められない断層の

活動性評価

V. 軟質部を含む断層の活動性評価

VI. 総合評価



1. 連続性がある断層の選定

敷地内断層の性状① <Fa-1, Fa-2断層>

●Fa-1断層 (右上写真)

- ・ 走向・傾斜はN5~22° E/67~82° SEである。
- ・ 破碎幅は3~10cmで角礫岩状を呈し、断層内物質が岩石に相当するほど硬く粘土状の軟質部を介在しない。
- ・ 最大幅10cmの方解石脈を介在する。

●Fa-2断層 (右下写真)

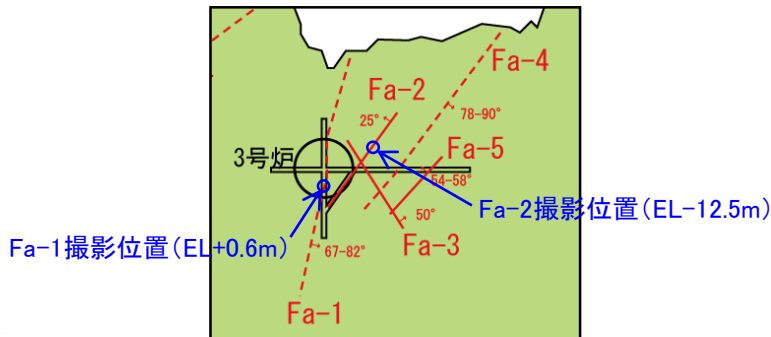
- ・ 走向・傾斜はN38° E/25° NWである。
- ・ 破碎幅は3~10cmで数条の粘土フィルム (幅0.3cm) を伴う。
- ・ ほぼ片理面に沿う低角度の断層である。
- ・ 断層付近に逆断層的な片理のひきずり (流動的な変形) が認められる。
- ・ なお、Fa-3断層と切り切れ関係にあり、最終的にはFa-3断層に3cm変位させられる。



※基礎掘削面で平成2年撮影



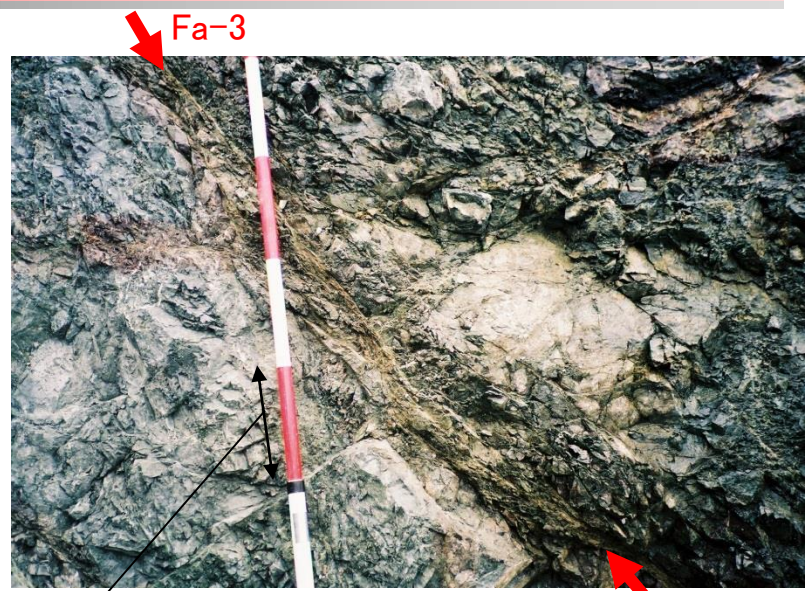
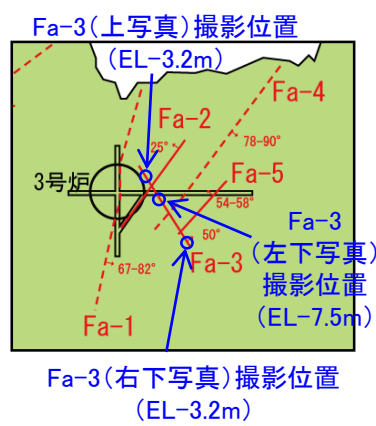
※基礎掘削面で平成2年撮影



敷地内断層の性状② <Fa-3断層>

●Fa-3断層 (右上写真)

- ・ 走向・傾斜はN31° W/50° NEである。
- ・ 3号試掘坑における破砕幅は5~40cmで幅0.2~4cmの粘土を含む。
- ・ 試掘坑から離れるにつれて破砕幅は減少し、直線性に乏しい。
- ・ 断層付近に正断層的な片理のひきずり(流動的な変形)が認められる。



※基礎掘削面で平成2年撮影



※基礎掘削面で平成2年撮影



※基礎掘削面で平成2年撮影

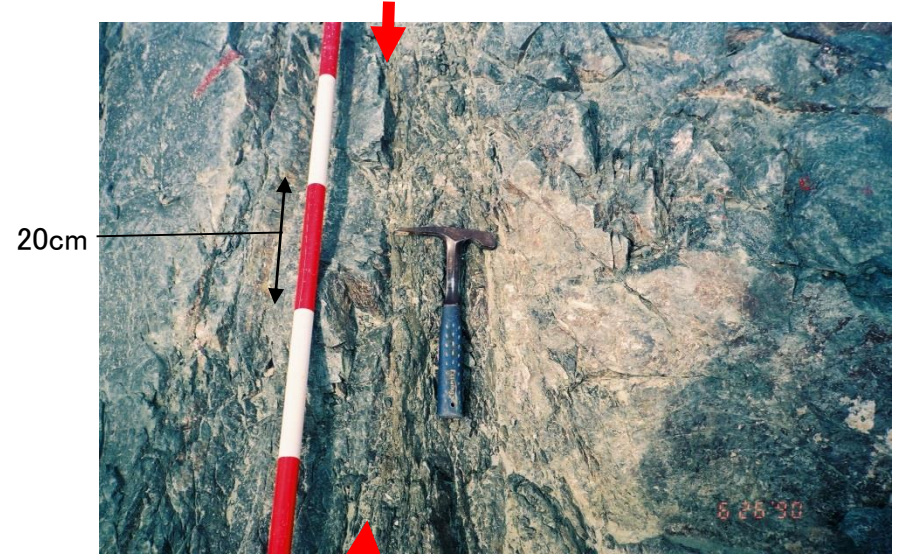
敷地内断層の性状③ <Fa-4, Fa-5断層>

●Fa-4断層 (右上写真)

- ・ 走向・傾斜はN43° E/78~90° SEである。
- ・ 破碎幅は1.5~4cmで角礫岩状を呈し、断層内物質が岩石に相当するほど硬く粘土状の軟質部を介在しない。

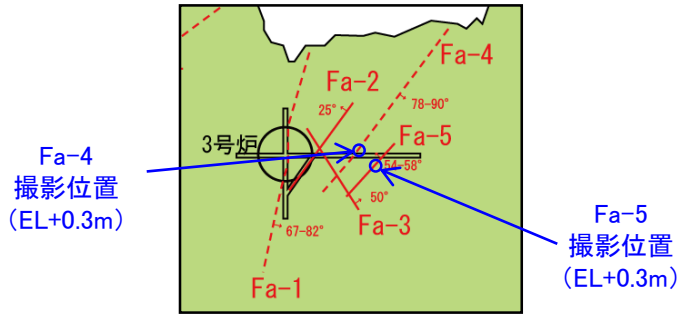
●Fa-5断層 (右下写真)

- ・ 走向・傾斜はN44° E/54~58° NWである。
- ・ 破碎幅は5~10cmで幅0.4cmの粘土を伴う。
- ・ Fa-3断層に切られ、約30cm変位させられる。



↑ Fa-4

※基礎掘削面で平成2年撮影



↑ Fa-5

※基礎掘削面で平成2年撮影

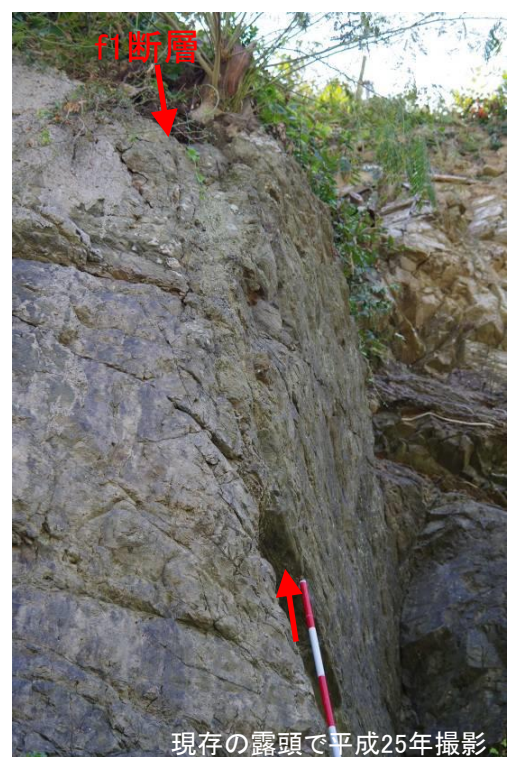
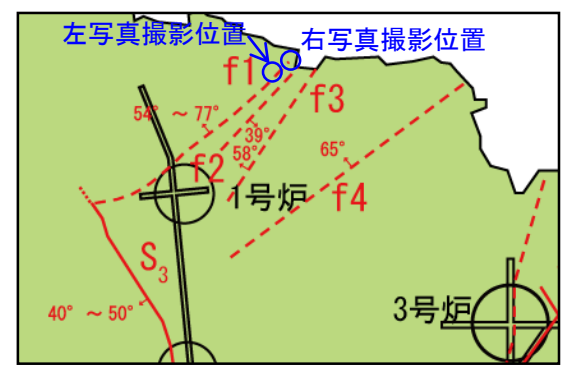
敷地内断層の性状④ <f1, f2断層>

● f1断層 (左下写真)

- ・ 走向・傾斜はN40~54° E/54~77° Nで場所によって大きく変化する。
 - ・ 破碎幅は2~10cmで断層内物質が岩石に相当するほど硬く粘土状の軟質部を介在しない。
- (平成26年7月1日の現地調査で岩石化した断層の露頭として説明)

● f2断層 (右下写真)

- ・ 走向・傾斜はN45° E/39° SEである。
- ・ 破碎幅は5~10cmで断層内物質が岩石に相当するほど硬く粘土状の軟質部を介在しない。
- ・ f1断層と交差し、互いに有意な変位が認められない。



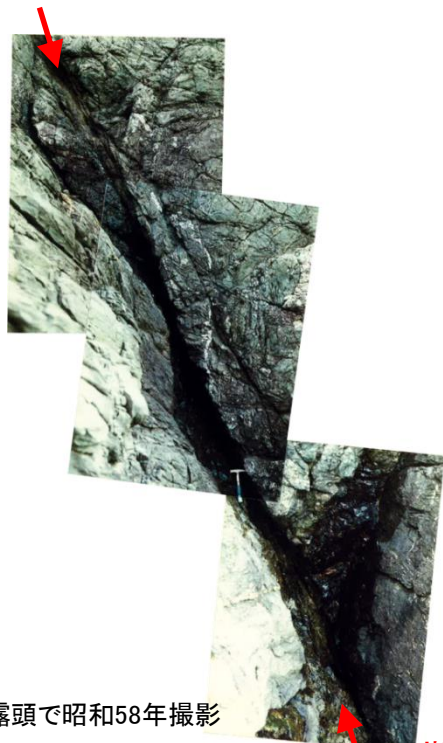
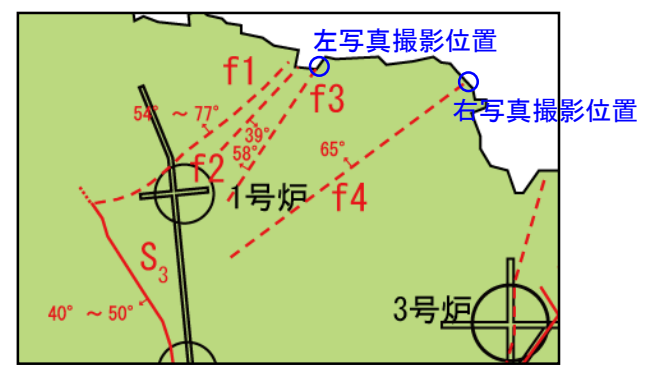
敷地内断層の性状⑤ <f3, f4断層>

● f3断層 (左下写真)

- ・ 走向・傾斜はN36° E/58° NWである。
- ・ 破碎幅は5~20cmで断層内物質が岩石に相当するほど硬く粘土状の軟質部を介在しない。
- ・ 断層付近に正断層的な片理のひきずり (流動的な変形) が認められる。

● f4断層 (右下写真)

- ・ 走向・傾斜はN56° E/65° NWである。
- ・ 破碎幅は5~10cmで断層内物質が岩石に相当するほど硬く粘土状の軟質部を介在しない。
- ・ 珪質片岩の薄層を正断層センスで約1.5m変位させている。



海岸露頭で昭和58年撮影

f3断層



海岸露頭で昭和58年撮影

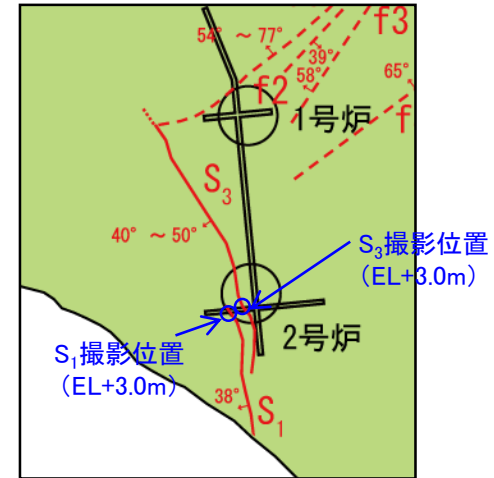
敷地内断層の性状⑥ <S1, S3断層>

● S₁断層 (左下写真)

- ・ 走向・傾斜はN12° W/38° Wである。
- ・ 破砕幅は2~50cmで部分的に細かく破砕されている。
- ・ 断層付近に正断層的な片理のひきずり (流動的な変形) が認められる。

● S₃断層 (右下写真)

- ・ 走向・傾斜はN8° E~35° W/40~50° Wで場所によって走向・傾斜が大きく変化する。
- ・ 破砕幅は2~40cmで幅0.5~3cmの粘土を含む。
- ・ 断層付近に正断層的な片理のひきずり (流動的な変形) が認められる。



※基礎トレンチ内で昭和51年撮影

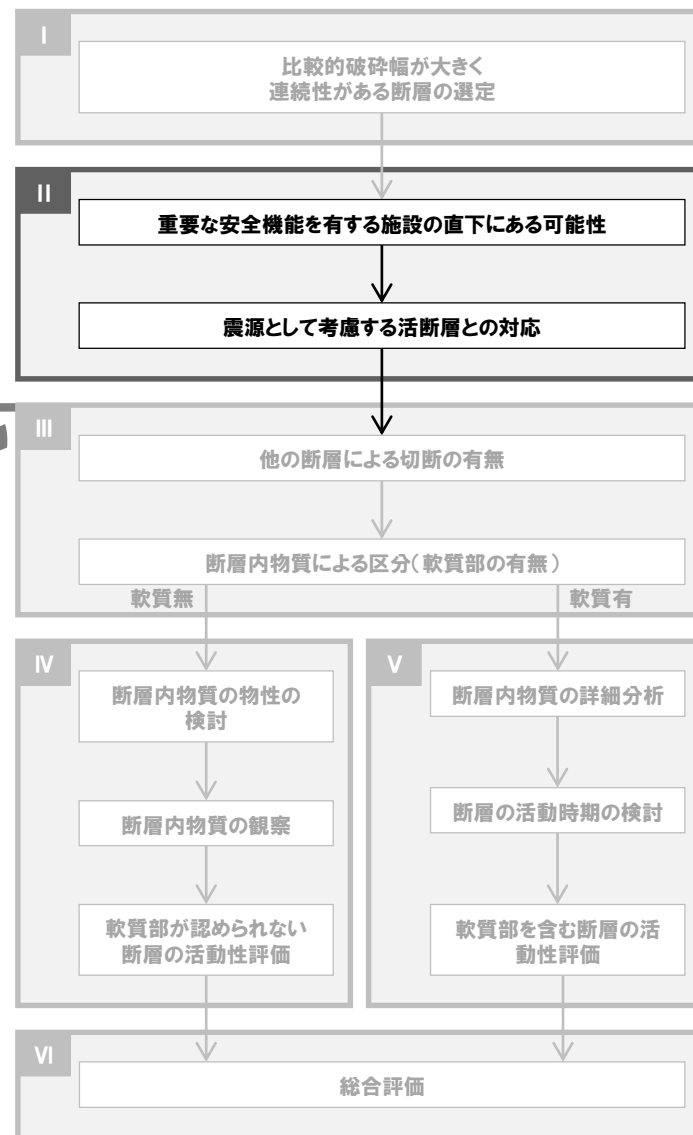


※基礎トレンチ内で昭和51年撮影

敷地内断層の性状⑦<一覧>

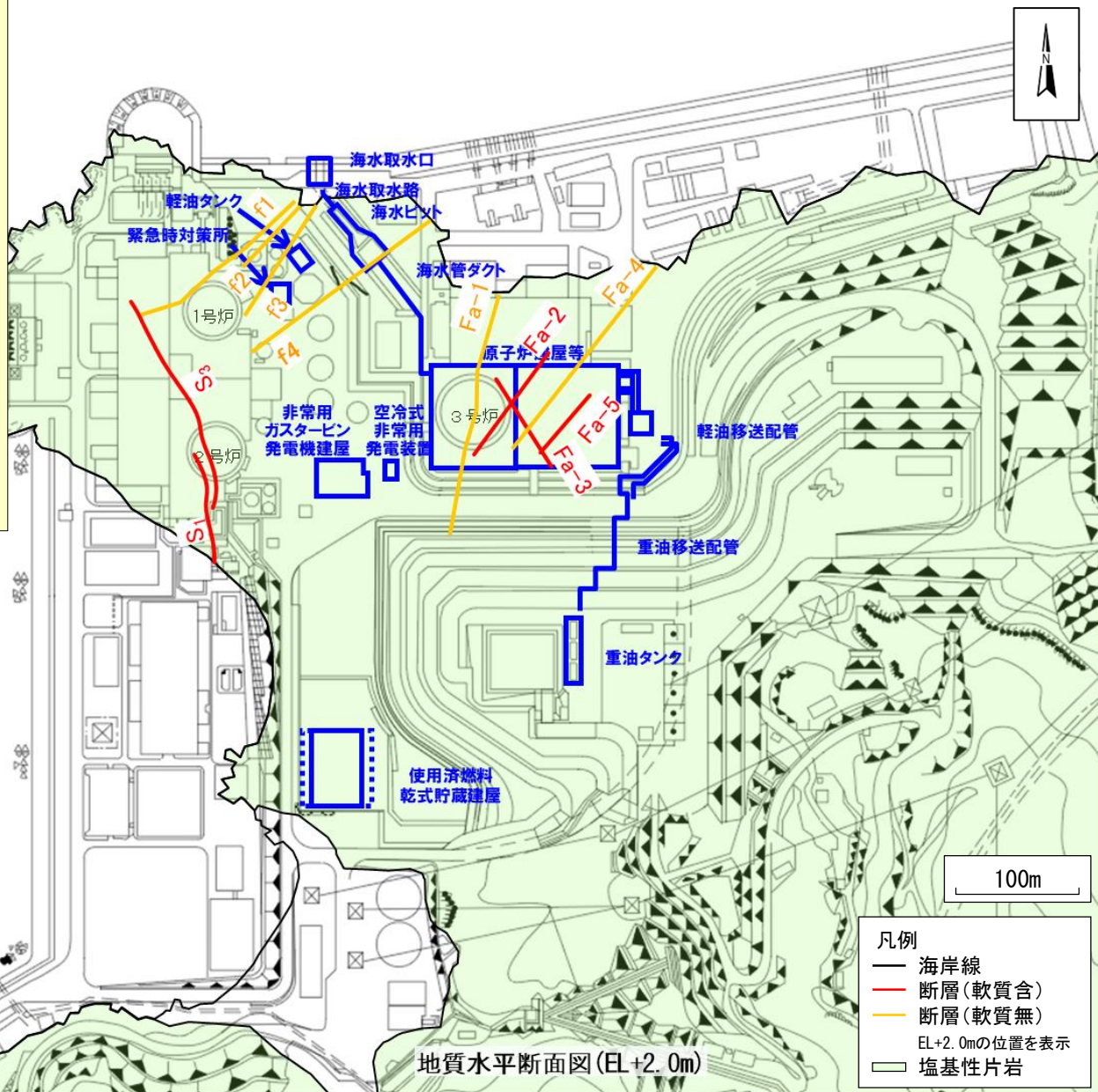
断層名	走向※・傾斜	破碎幅 fr:cm 粘土幅 cl:cm	備考
Fa-1断層	N5~22° E/67~82° SE	fr:3~10	
Fa-2断層	N38° E/25° NW	fr:3~10, cl:0.3	逆断層的な片理のひきずり
Fa-3断層	N31° W/50° NE	fr:5~40 cl:0.2~4	正断層的な片理のひきずり
Fa-4断層	N43° E/78~90° SE	fr:1.5~4 (海岸でfr:20~30)	
Fa-5断層	N44° E/54~58° NW	fr:5~10, cl:0.4	
f1断層	N40~54° E/54~77° N	fr:2~10	f2断層と交差
f2断層	N45° E/39° SE	fr:5~10	f1断層と交差
f3断層	N36° E/58° NW	fr:5~20	正断層的な片理のひきずり
f4断層	N56° E/65° NW	fr:5~10	珪質片岩を正断層センスで 約1.5m変位させる
S ₁ 断層	N12° W/38° W	fr:2~50 cl:部分的に細かく破碎	正断層的な片理のひきずり
S ₃ 断層	N8° E~35° W/40~50° W	fr:2~40 cl:0.5~3	正断層的な片理のひきずり

- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
 - 1. 3号炉施設と断層の位置関係
 - 2. 震源として考慮する活断層との対応
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
- VI. 総合評価



重要施設と断層の位置関係

- 伊方3号炉の原子炉設置位置付近において比較的破碎幅が大きく連続性がある断層はFa-1～Fa-5断層である。また、3号炉の海水ピット付近にf1～f4断層が分布する。
- 3号炉西方にS₁断層、S₃断層が分布するが、その付近に3号炉に係る重要施設※はなく、変位が施設に影響を及ぼすものではない。
- これらの断層が震源として考慮する活断層と対応しないことを確認する。

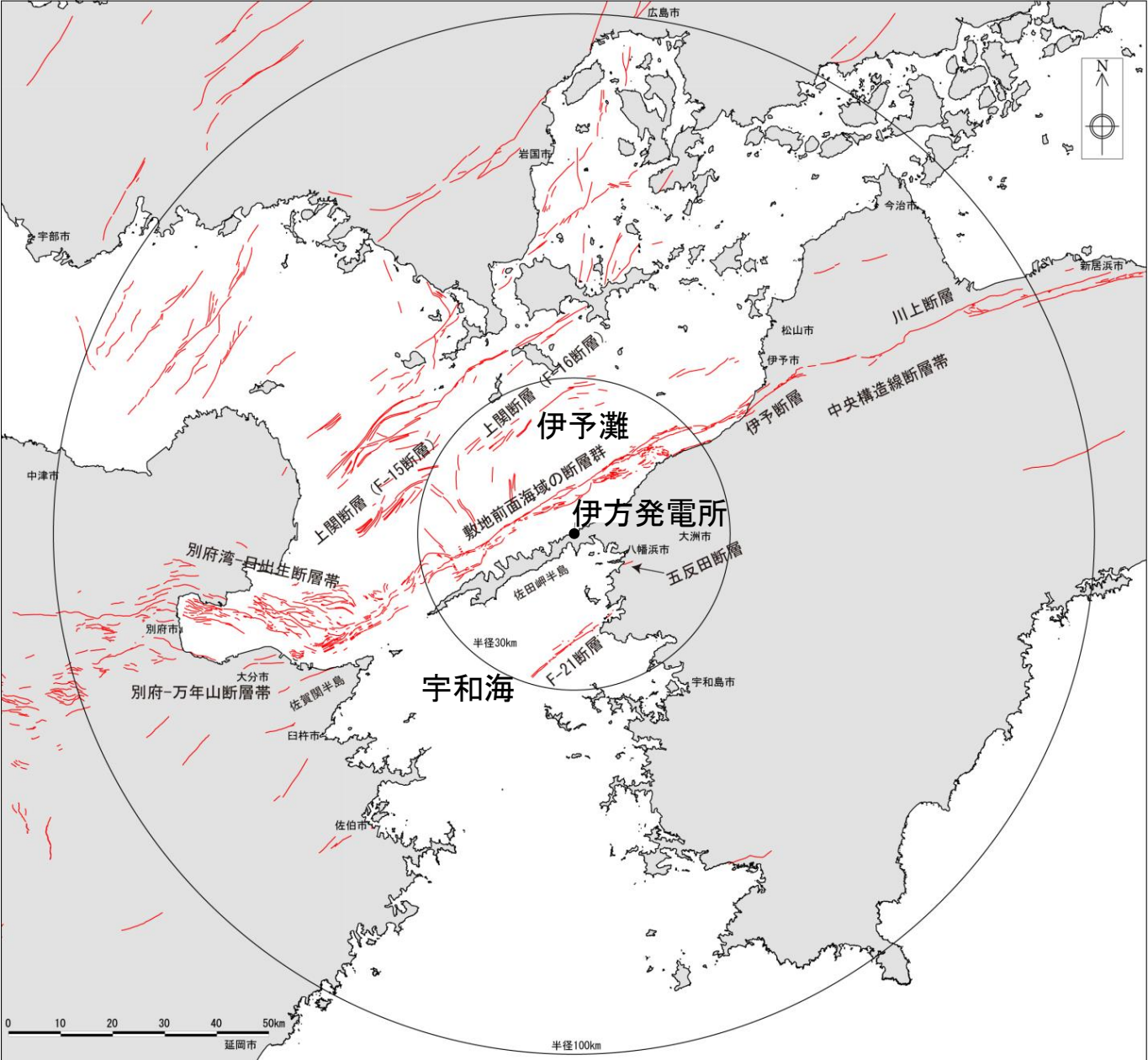


※3号炉に係る重要施設は設置許可基準規則3条・4条の対象となる耐震重要施設、使用済燃料乾式貯蔵施設および設置許可基準規則38条・39条の対象となる常設重大事故等対処施設である。

- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
 1. 3号炉施設と断層の位置関係
 2. 震源として考慮する活断層との対応
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
- VI. 総合評価



震源として考慮する活断層との対応①<敷地周辺の活断層分布>



○伊方発電所において、最も影響の大きい活断層は敷地の沖合い約8kmを通過する中央構造線断層帯であり、東北東-西南西走向で右横ずれの性状を示す。

○敷地は中央構造線断層帯の南方に位置し、敷地近傍（半径5km）に活断層は認められない。

【活断層分布図の出典】

中田 高・今泉俊文編, 2002, 活断層詳細デジタルマップ.

産業技術総合研究所活断層・地震研究センター, 2012, 活断層データベース, <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>.

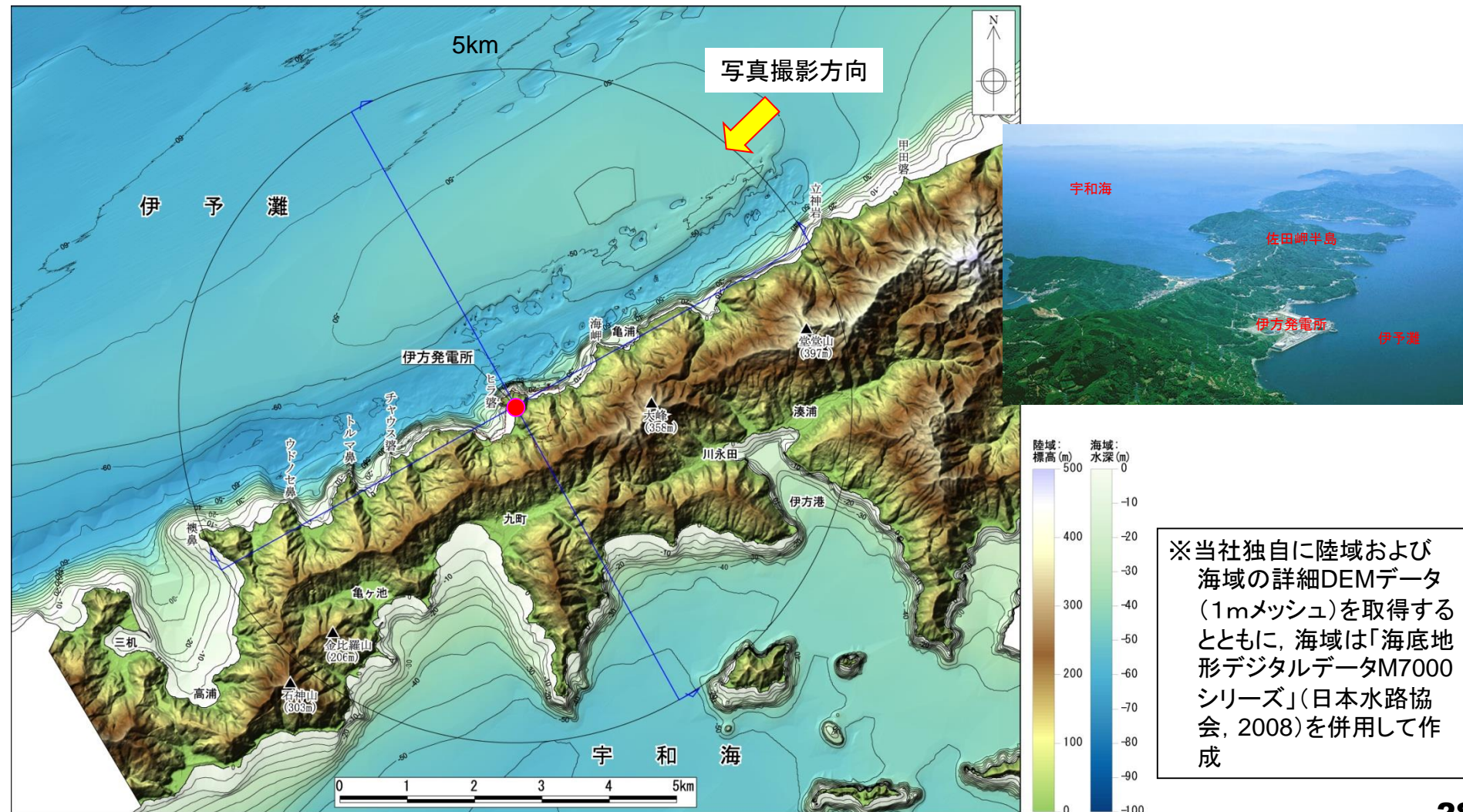
島崎邦彦・松岡裕美・岡村 眞・千田昇・中田 高, 2000, 別府湾の海底活断層分布, 月刊地球/号外, 28, 79-84.

七山 太・池田倫治・大塚一広・三浦健一郎・金山清一・小林修二・長谷川正・杉山雄一・佃 栄吉, 2002, 伊予灘～佐賀関沖MTL活断層系の広域イメージングとセグメント区分, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 活断層・古地震研究報告, 2, 141-152.

田中雅章・小西克文・國西達也・清水雄一・高智英二郎, 2010, 瀬戸内海西部海域における活断層の発見とそのテクトニクスについて, 日本応用地質学会平成22年度研究発表会, 93.

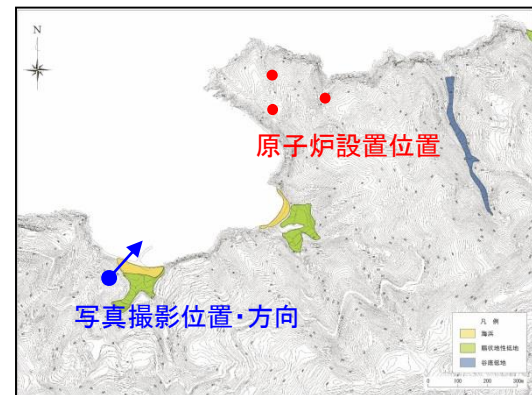
震源として考慮する活断層との対応②<変動地形学的調査(1)>

○伊方発電所の位置する佐田岬半島は、東北東-西南西方向に伸びる細長い半島であり、その海岸線は複雑に入り組んでいる。敷地近傍には、「活断層詳細デジタルマップ」、「[新編]日本の活断層-分布図と資料-」等の既存文献による変位地形・リニアメントの指摘はない。また、詳細DEMおよび空中写真による独自の地形判読によっても敷地近傍に変位地形・リニアメントは判読されない。



※当社独自に陸域および海域の詳細DEMデータ(1mメッシュ)を取得するとともに、海域は「海底地形デジタルデータM7000シリーズ」(日本水路協会, 2008)を併用して作成

震源として考慮する活断層との対応③ <変動地形学的調査(2)>



伊予灘に突き出た小半島に原子炉を設置

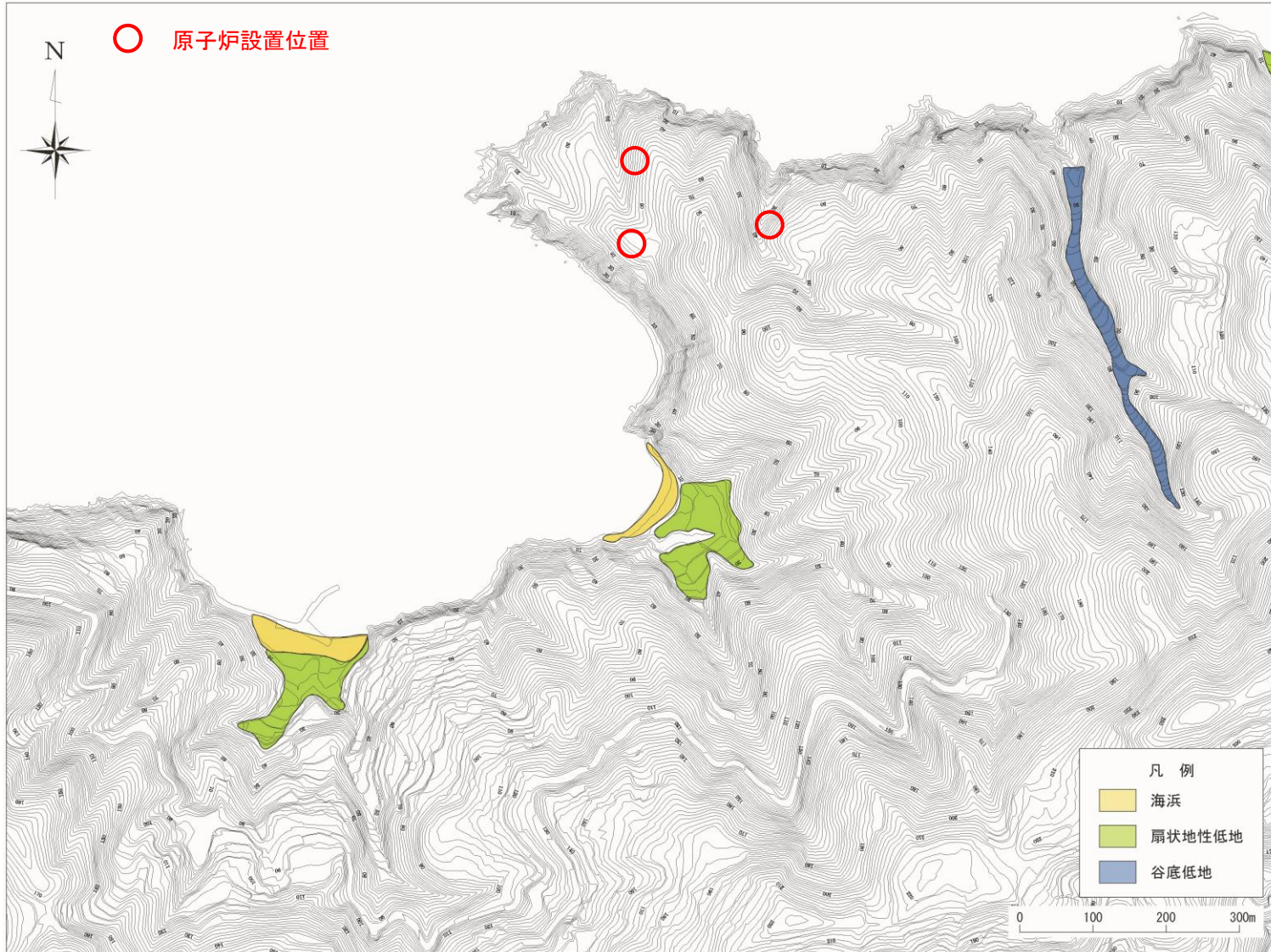
伊予灘



発電所建設前の遠景

震源として考慮する活断層との対応④ <変動地形学的調査(3)>

○地形改変前の空中写真（6千分の1モノクロ）および詳細地形データ（1mメッシュDEM）による地形判読によると、敷地内の断層（Fa-1～Fa-5断層，f1～f4断層，S₁断層，S₃断層）は活断層を示唆する変動地形と対応しない。

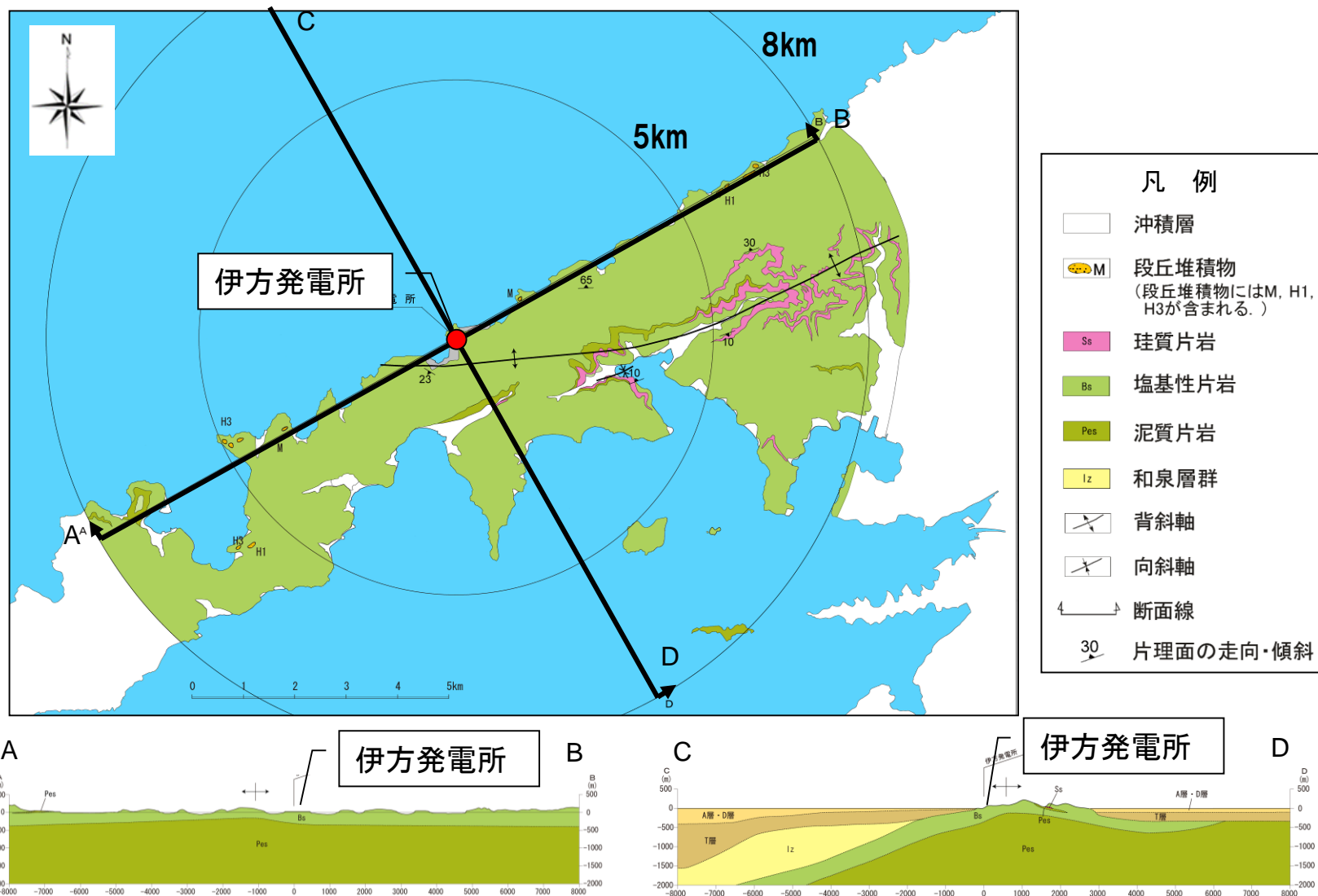


○敷地付近の地形は標高300m以下の壮年期山地からなる。東北東－西南西方向に延びる佐田岬半島の主稜線が分水界をなす。主な尾根は分水界と直交して北北西方向である。山地斜面の勾配はほぼ揃っており、高度の急変点や崖ではなく、活断層を示唆する変動地形は判読されない。

等高線間隔: 2m

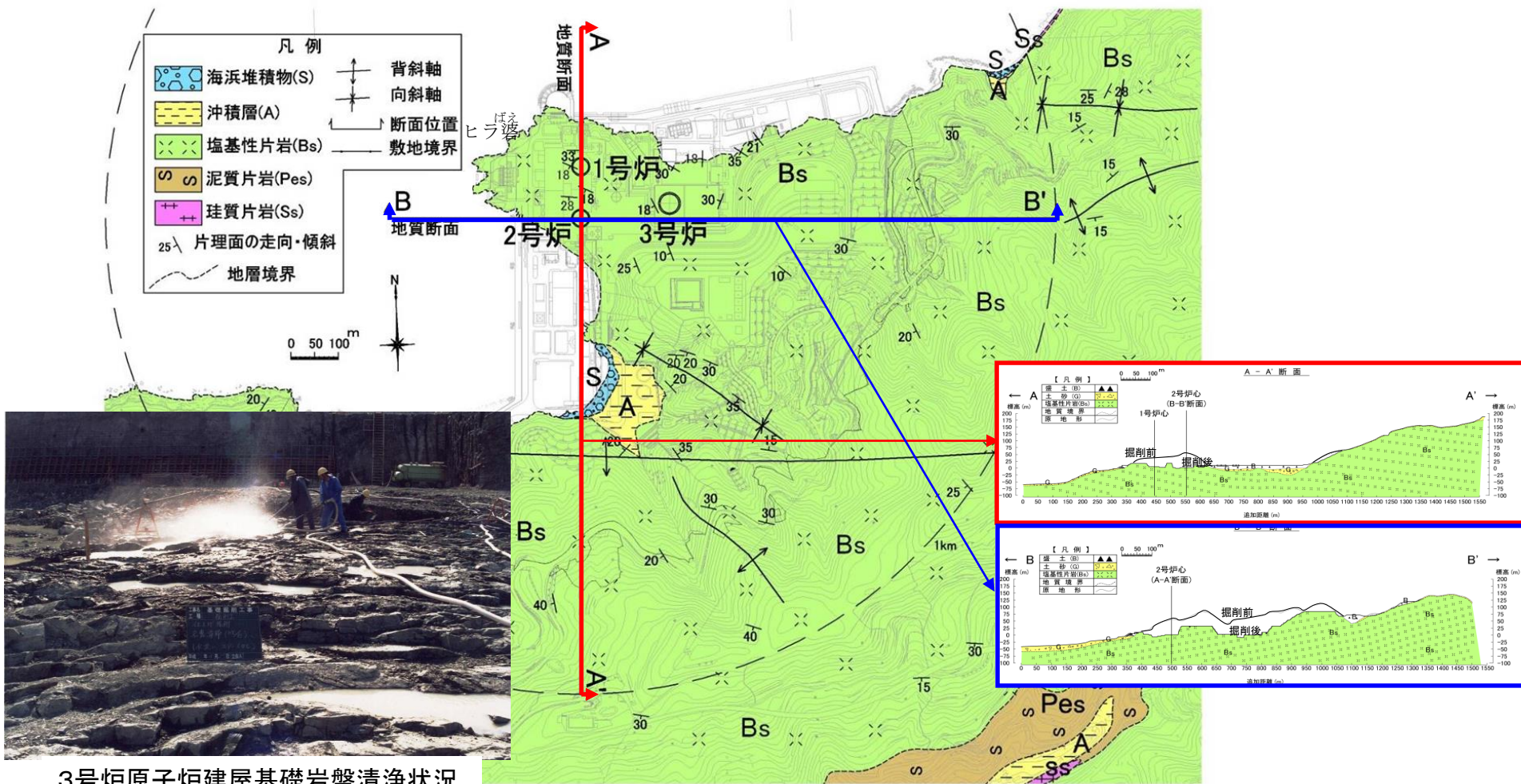
震源として考慮する活断層との対応⑤ <地質調査(1)>

○敷地近傍には広く堅硬な塩基性片岩が分布し、活断層を示唆する構造は認められない。



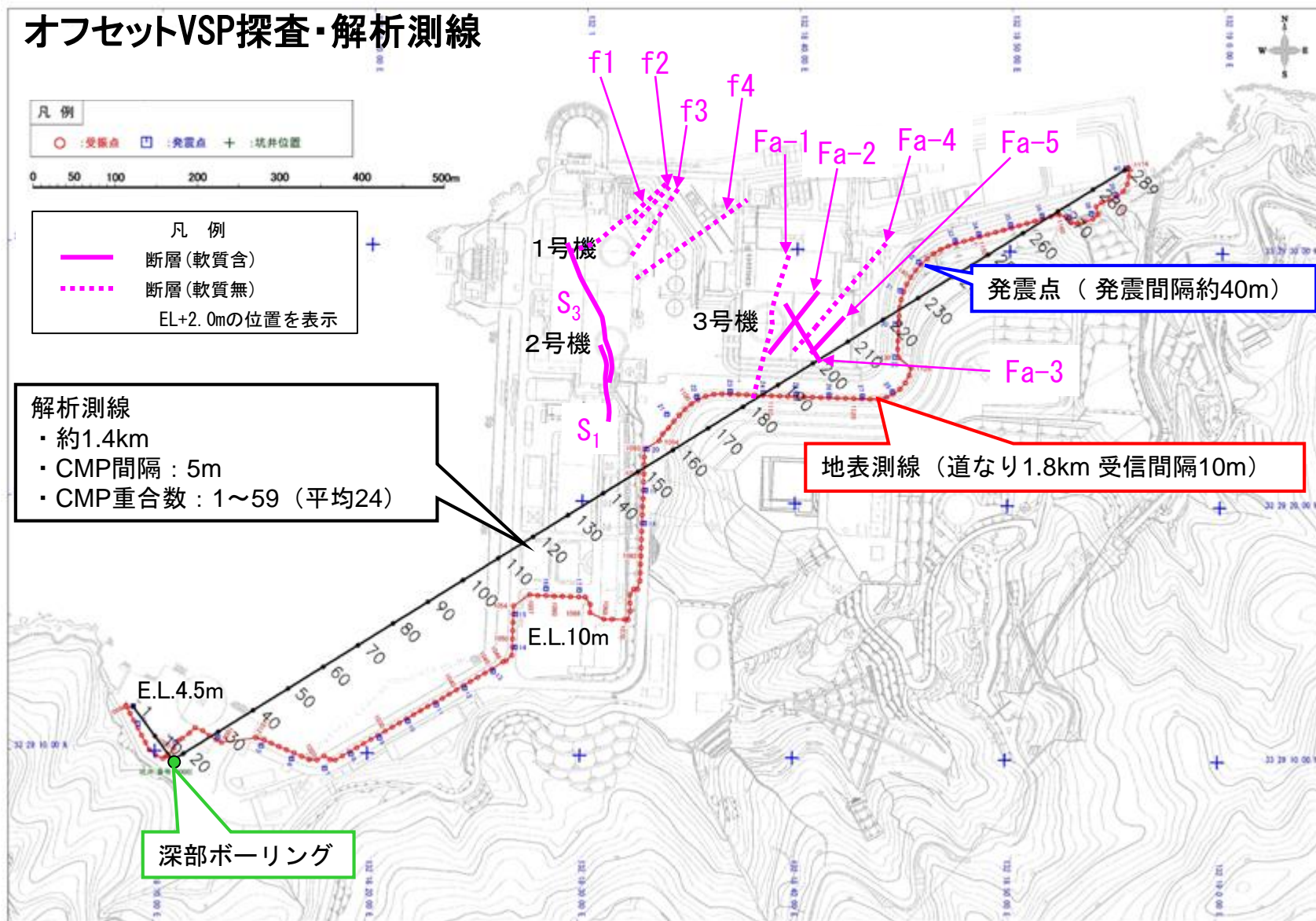
震源として考慮する活断層との対応⑥ <地質調査(2)>

○敷地の地盤は主に塩基性片岩からなり、敷地内の断層（Fa-1～Fa-5断層，f1～f4断層，S₁断層，S₃断層）に活断層を示唆する構造は認められない。なお、地山を掘削して敷地を造成しており、年代評価に適した上載地層（後期更新世の地形面および地層）が欠如している。



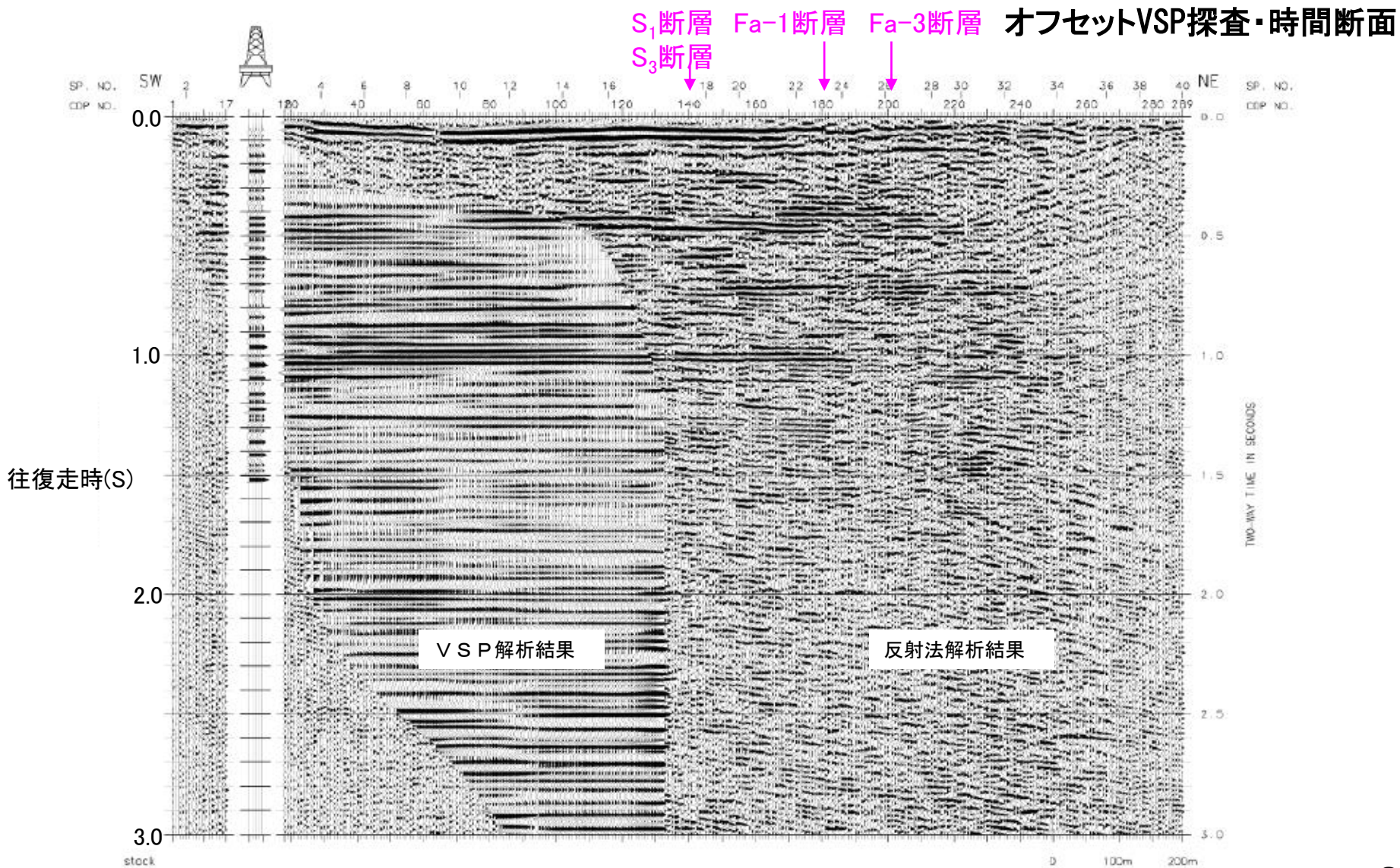
震源として考慮する活断層との対応⑦ <地球物理学的調査(1)>

オフセットVSP探査・解析測線



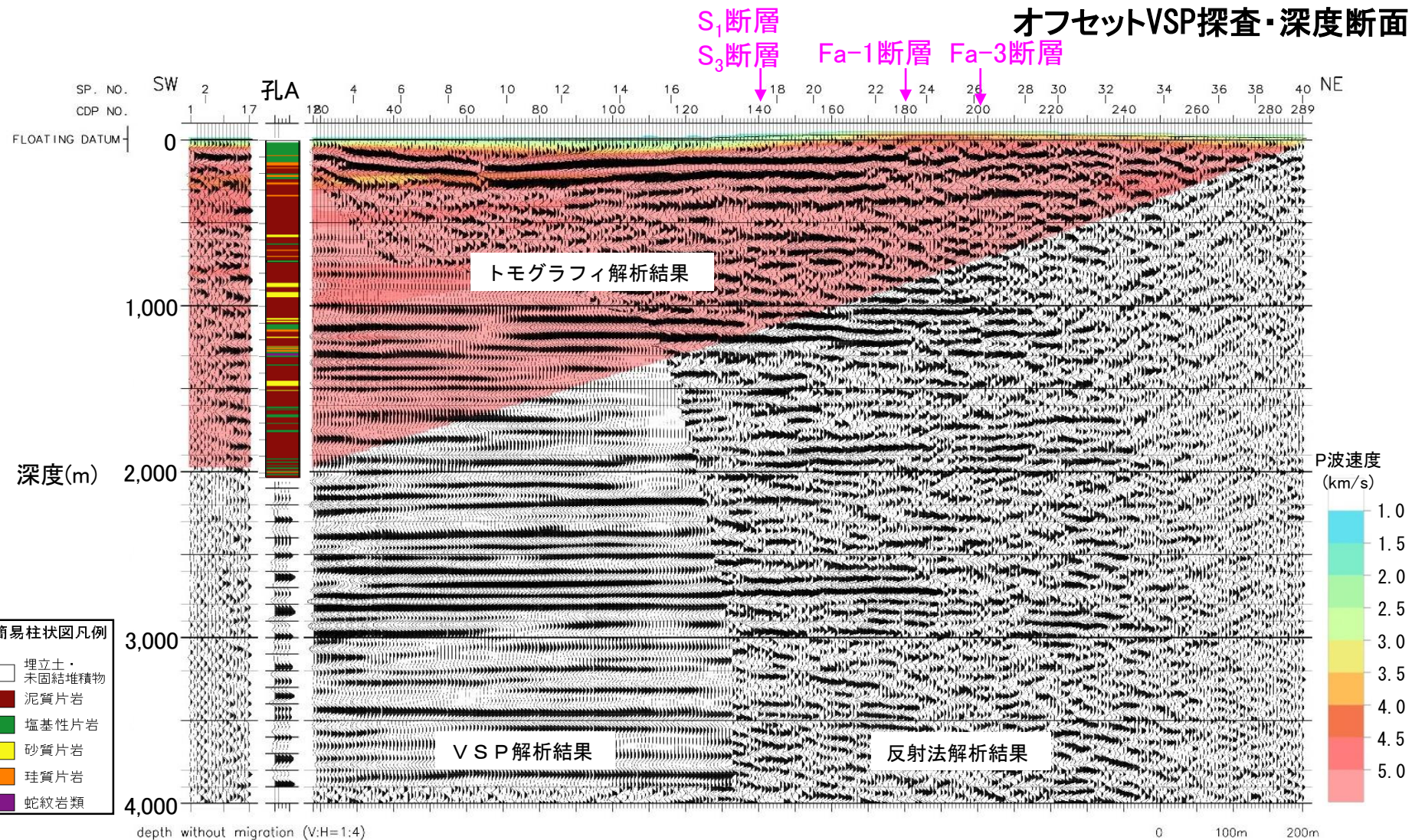
震源として考慮する活断層との対応⑧ <地球物理学的調査(2)>

○敷地において地下深部までほぼ水平な反射面が連続し、地表から地下深部まで連続する大規模な断層は認められない。



震源として考慮する活断層との対応⑨ <地球物理学的調査(3)>

○敷地において地下深部までほぼ水平な反射面が連続し、地表から地震発生層（地下2km以深）まで連続する大規模な断層は認められない。



震源として考慮する活断層との対応⑩ <まとめ>

- 変動地形学的調査，地質調査，地球物理学的調査の結果より，敷地内断層はいずれも震源として考慮する活断層と対応しない。
- S₁断層，S₃断層はその付近に3号炉申請に係る重要施設がないことからその変位が施設に影響を及ぼすものではなく，震源として考慮する活断層とも対応しない。

変動地形学的調査

敷地近傍に「活断層詳細デジタルマップ」，「[新編]日本の活断層－分布図と資料－」等の既存文献による変位地形・リニアメントの指摘はない。また，詳細DEMおよび空中写真による独自の地形判読によっても敷地近傍に変位地形・リニアメントは判読されない。

敷地内の断層(Fa-1～Fa-5断層，f1～f4断層，S₁断層，S₃断層)は活断層を示唆する変動地形と対応しない。

地質調査

敷地近傍・敷地付近には三波川変成岩類が広く分布する。敷地の地盤は主に塩基性片岩からなり，敷地内の断層(Fa-1～Fa-5断層，f1～f4断層，S₁断層，S₃断層)に活断層を示唆する構造は認められない。

地球物理学的調査

地下深部までほぼ水平な反射面が連続し，地震発生層(地下2km以深)まで連続する大規模な断層は認められない。

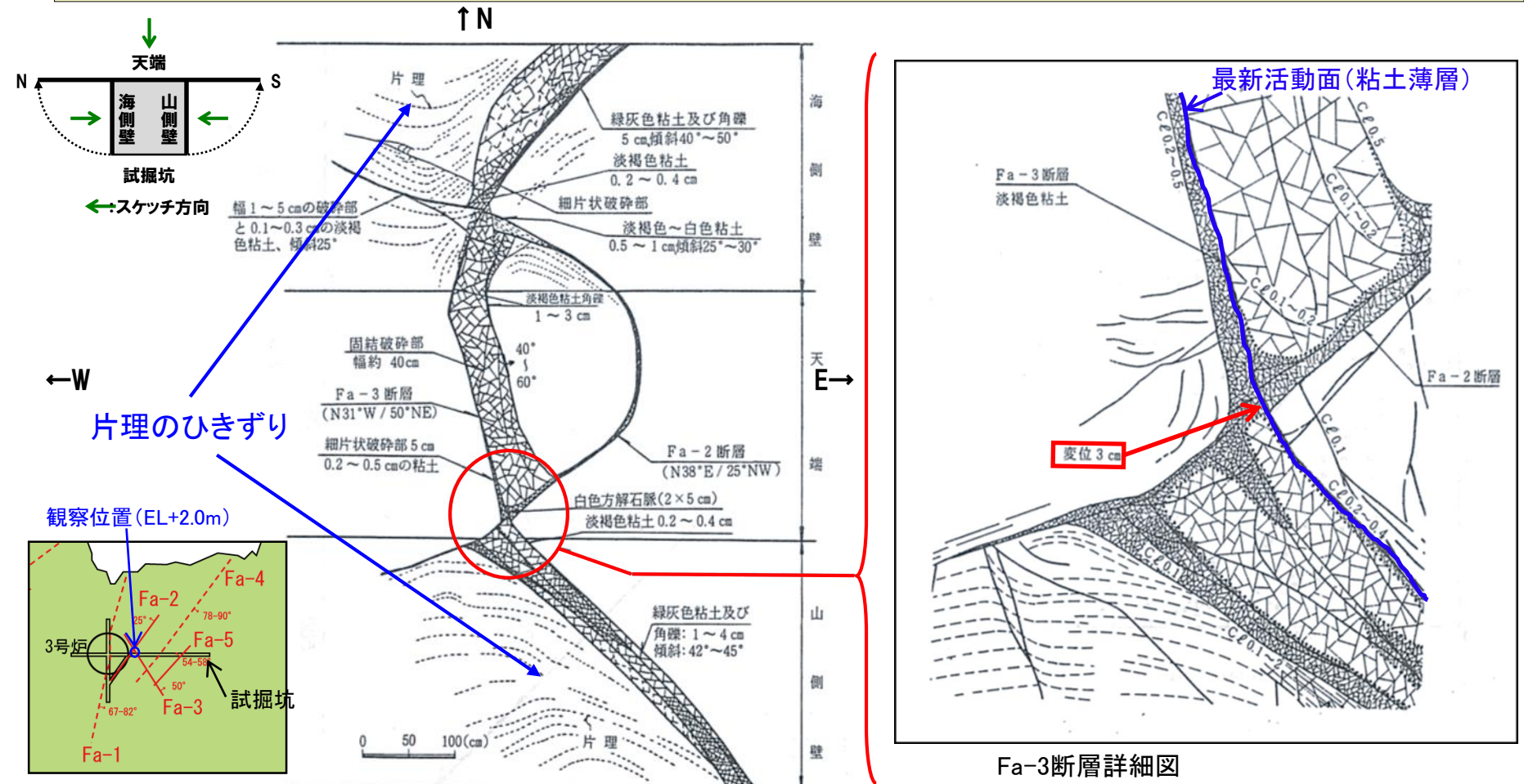
- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
- VI. 総合評価



III. 他の断層による切断および軟質部の有無

他の断層による切断① <Fa-2断層とFa-3断層の切断関係>

○試掘坑内の観察において、Fa-2断層とFa-3断層はお互いに切り、切られており、最終的にはFa-3断層がFa-2断層を3cm変位させている。Fa-3断層の最新活動面はFa-2断層を切断する薄い粘土層（幅2mm～5mm）として認められ、粘土薄層が切断されることなくFa-2断層を横断することから、Fa-3断層の最新活動はFa-2断層の活動より後である。

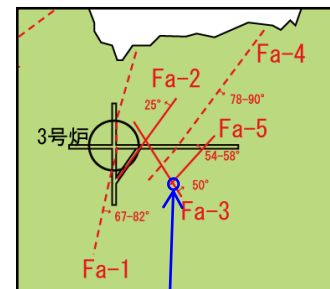


試掘坑展開図 ↓ S

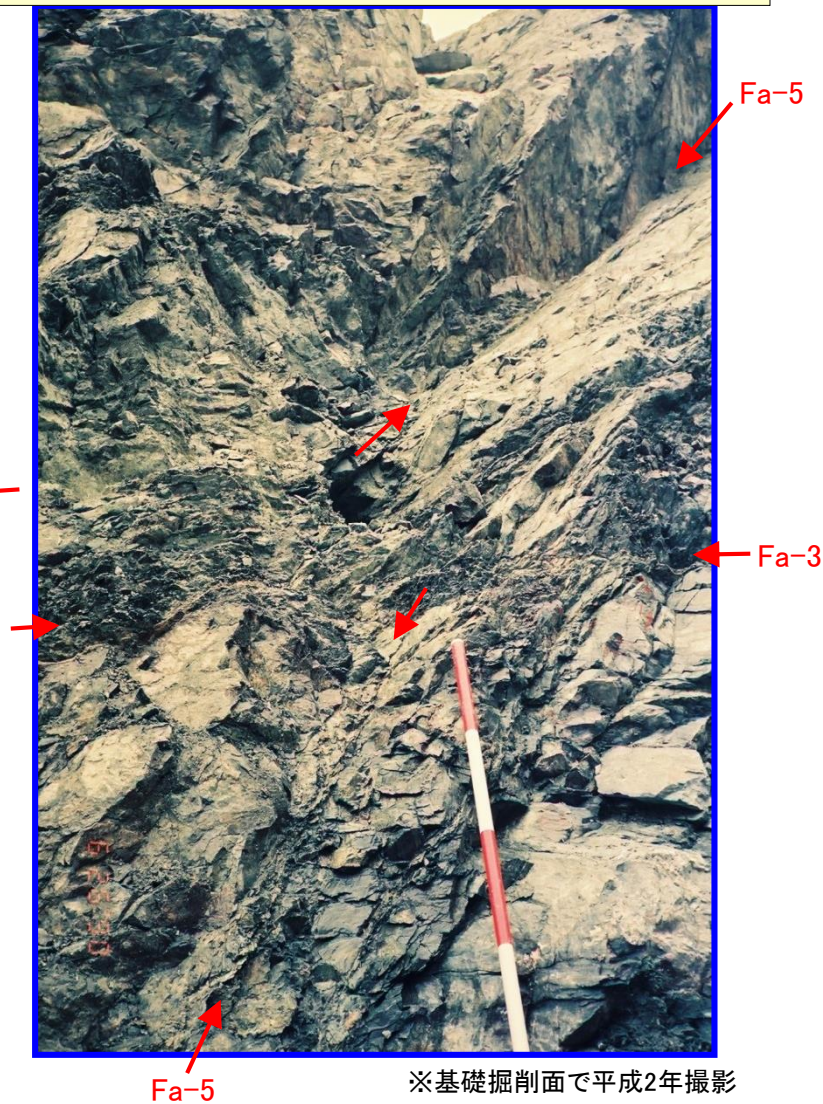
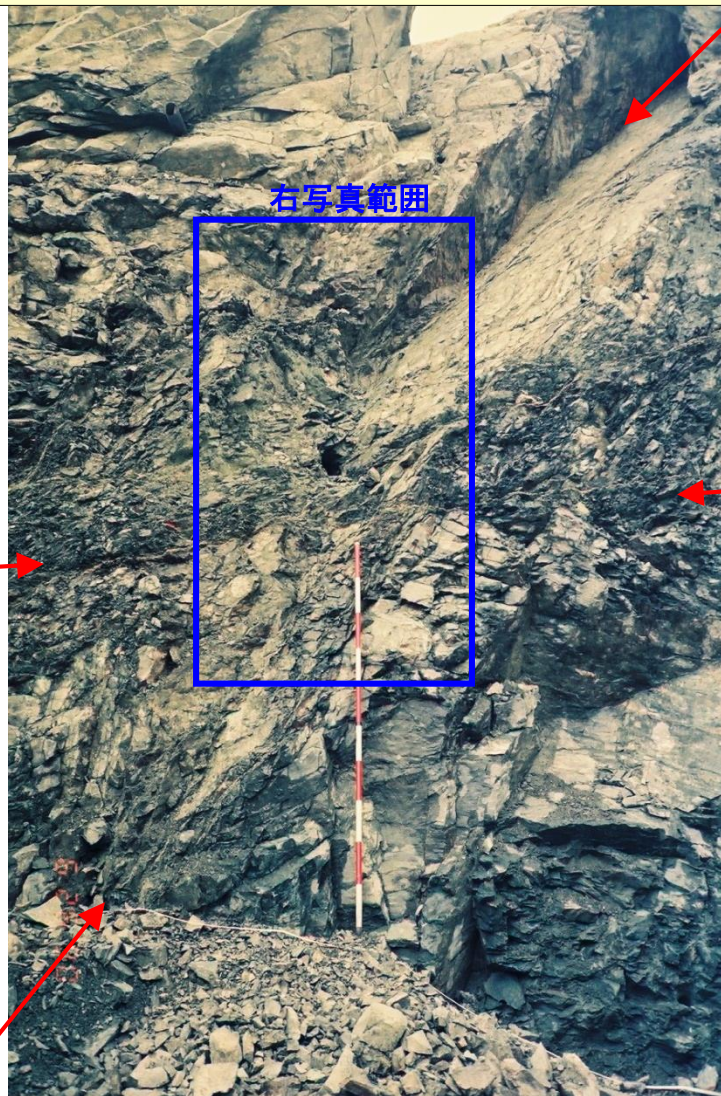
伊方発電所原子炉設置変更許可申請書(3号炉増設, 昭和59年)より抜粋, 試掘坑内にて観察

他の断層による切断② <Fa-3断層とFa-5断層の切断関係>

○Fa-3断層は、Fa-5断層を切り、約30cm変位させている。Fa-5断層はFa-3断層よりも活動時期の古い断層である。



撮影位置 (EL-7.5m)



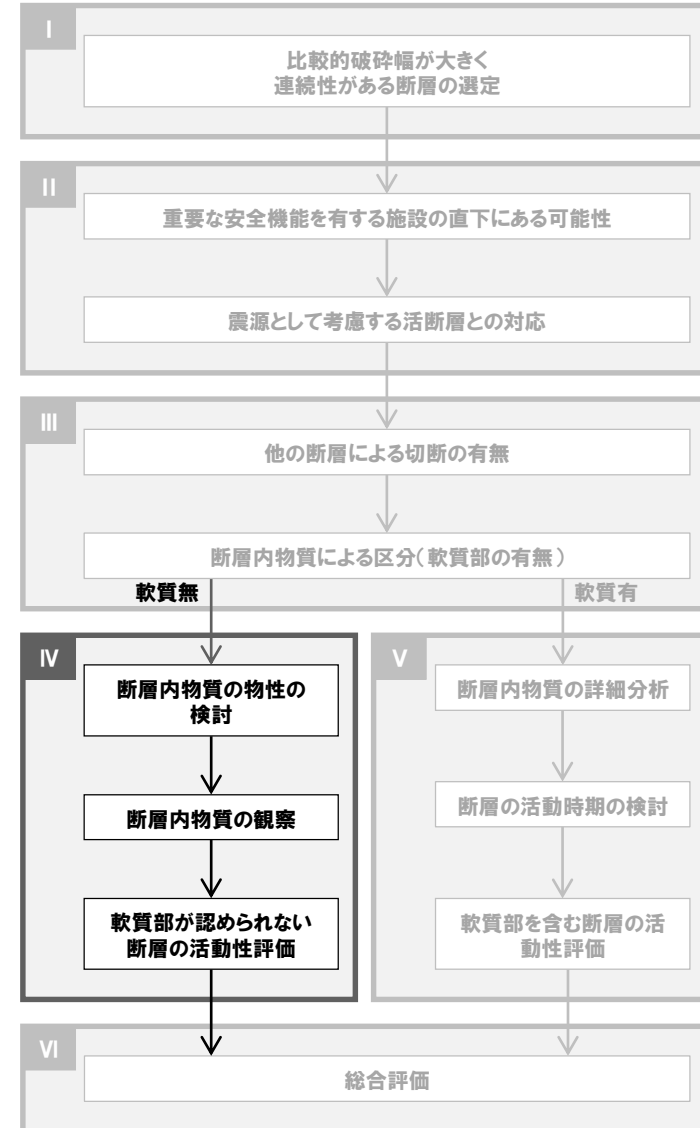
※基礎掘削面で平成2年撮影

軟質部の有無と活動性評価の方針

- 軟質部を含む断層のうちFa-2断層， Fa-5断層はFa-3断層よりも活動時期の古い断層であると判断されるため， Fa-3断層について**研磨片・薄片で微細な構造を観察することによる活動性評価**を行う。また， Fa-3断層と切り切れ関係にあるFa-2断層についても同様の活動性評価を行う。
- 軟質部が認められないFa-1， Fa-4断層， f1～f4断層については， 断層内物質が**断層ガウジでなく岩石相当の物性を有することを確認した上で薄片観察等を総合した活動性評価**を行う。

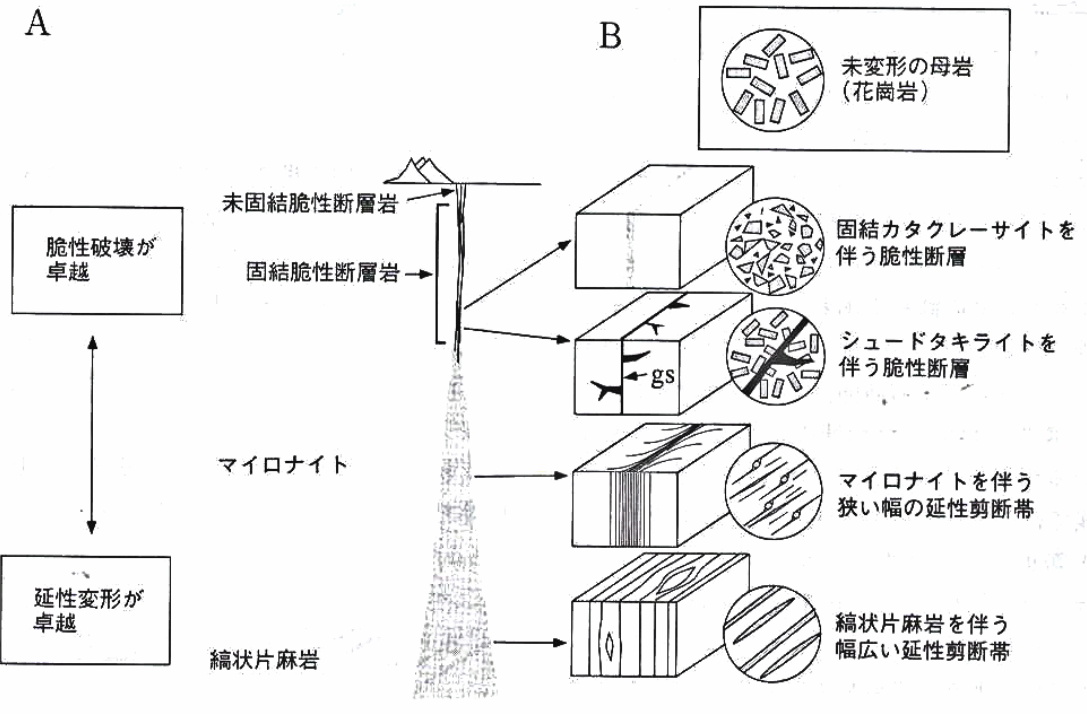
断層名	断層内物質による区分	他の断層による切断	活動性評価の方針
Fa-1断層	軟質無	—	⇒ 物理試験や薄片観察等を総合した活動性評価
Fa-2断層	軟質含	Fa-3断層に切られる	⇒ 研磨片・薄片観察による活動性評価
Fa-3断層	軟質含	Fa-2断層と切り切れ関係	⇒ 研磨片・薄片観察による活動性評価
Fa-4断層	軟質無	—	⇒ 物理試験や薄片観察等を総合した活動性評価
Fa-5断層	軟質含	Fa-3断層に切られる	Fa-3断層よりも古い断層と判断される
f1断層	軟質無	—	⇒ 物理試験や薄片観察等を総合した活動性評価
f2断層	軟質無	—	⇒ 物理試験や薄片観察等を総合した活動性評価
f3断層	軟質無	—	⇒ 物理試験や薄片観察等を総合した活動性評価
f4断層	軟質無	—	⇒ 物理試験や薄片観察等を総合した活動性評価
S ₁ 断層	軟質含	—	付近に3号炉重要施設がなくその変位が施設に影響を及ぼすものではなく，震源として考慮する活断層とも対応しない
S ₃ 断層	軟質含	—	

- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
 1. 断層内物質の物性の検討
 2. 断層内物質の観察
 3. まとめ
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
- VI. 総合評価



断層内物質の物性の検討①<検討方針>

- 敷地内には、肉眼観察で断層内物質が岩石相当の硬さで粘土状の軟質部を介在しない断層（軟質部が認められない断層）が認められ、地下深部の封圧・温度で基質と岩片が固結したカタクレーサイトと評価される。
- 一方で、地表付近で観察される活断層は、一般に粘土状で未固結の断層ガウジあるいは断層角礫を伴う。断層ガウジあるいは断層角礫は粘土やシルトなどの細粒土を含み、含水量の違いによって硬軟などの物性や挙動が著しく変化する（地盤工学会，2009）。細粒土が乾燥すると固くなる性質を考慮し、断層内物質がカタクレーサイトであるか断層ガウジあるいは断層角礫であるかを慎重に判別することが重要である。
- 以上を踏まえ、敷地内の軟質部が認められない断層（Fa-1断層，Fa-4断層，f1～f4断層）について、断層ガウジあるいは断層角礫との区別が困難な粘土状軟質部の有無を肉眼観察で再検討するとともに、断層内物質の水に対する挙動を定量的に測定し、カタクレーサイトと認定できるか否かを評価する。



【狩野・村田(1998)より抜粋】
断層岩の中で、手でこわせるほど軟弱で、粘土状の細粒な基質部が多いものを断層ガウジと呼ぶ。断層ガウジに比べて基質が少なく、角礫状の岩片が多いものを断層角礫と呼ぶ。これに対して、基質と岩片が固結しているものが破碎岩またはカタクレーサイトである。

低封圧で低温状態の地表近傍では、破碎作用によって、未固結の断層ガウジや断層角礫が形成される。地表部での断層運動そのものは、地震断層の活動として多数示されている。

地下深部に向けて封圧と温度が増大してくると、断層岩は固結したカタクレーサイトに変化する。

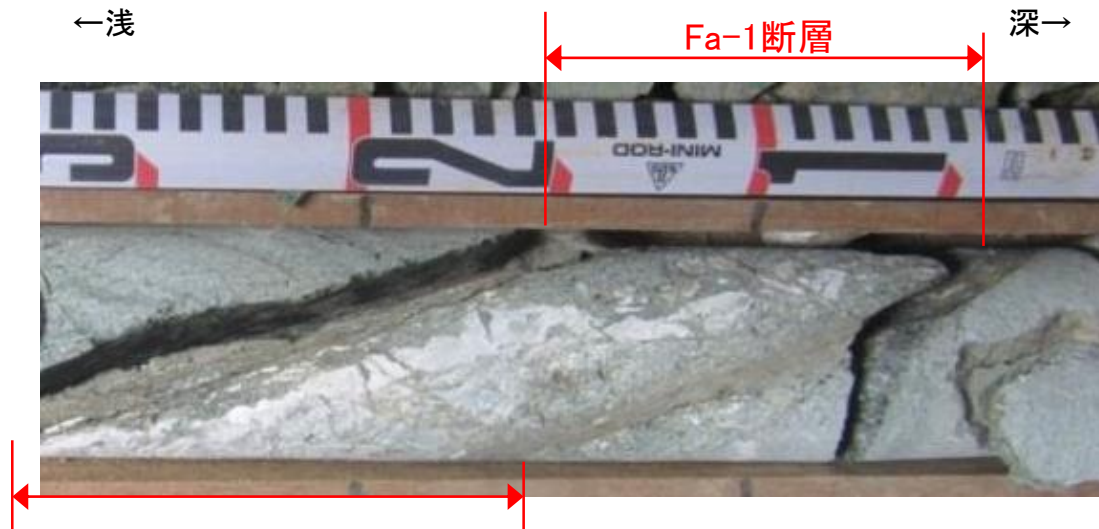
【地盤工学会(2009)より抜粋】
土は含水量の違いにより硬軟の程度が異なり、特に粘土やシルトなどの細粒土では含水量の大小によって繰り返した時、その性質と挙動が著しく変化する。

図VII.5-1 地殻浅部から深部にかけての主要な断層岩の分布 (Passchier & Trouw, 1996)
A：高角断層の模式的な断面形態，B：典型的な断層岩の組織。深さは母岩の性質，地温勾配，歪速度などによって異なる。
狩野・村田(1998)より抜粋

地盤工学会，2009，地盤材料試験の方法と解説。
狩野謙一・村田明広，1998，構造地質学，298pp.

断層内物質の物性の検討②<肉眼観察(1)>

- Fa-1断層およびFa-4断層のボーリングコアは、取得時から約30年の年月を経ても粉末とはならず、岩塊としての形状を保っている。
- Fa-1断層コアの破碎幅は6cm、Fa-4断層コアの破碎幅は1~3cmであり、断層内物質に粘土状の軟質部を介在しない。また、断層内物質は岩石相当の硬さで周辺の母岩と密着して一体の岩石となっており、新しい時代の活動の痕跡は認められない。
- これらの断層コアを用いて定量的にカタクレサイトと認定できるか否かを評価する。



Fa-1断層(深度約19m)コア(S58年取得)写真(平成26年撮影)



Fa-4断層(深度約30m)コア(S58年取得)写真(平成26年撮影)

断層内物質の物性の検討③ <肉眼観察(2)>

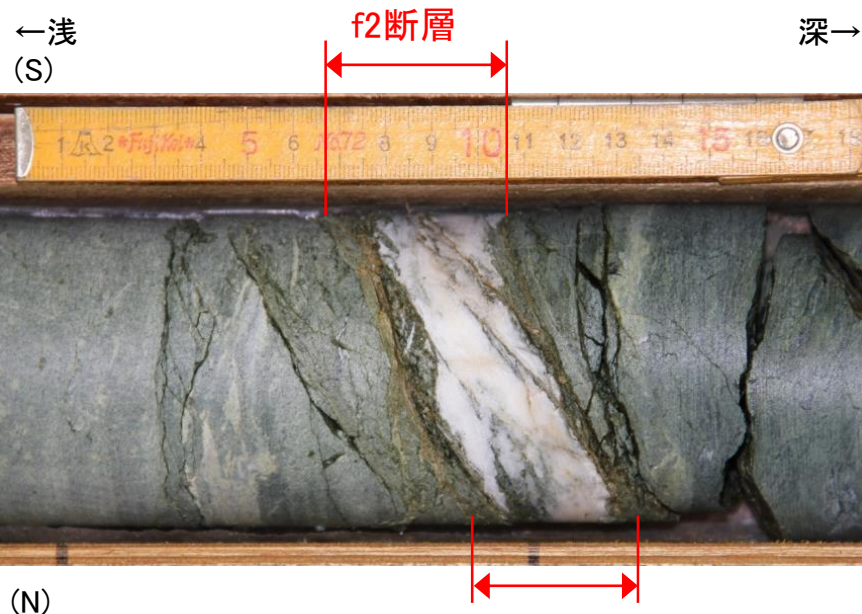
- f1断層露頭の破砕幅は2～5cm, f2断層コアの破砕幅は4cmであり, 断層内物質に粘土状の軟質部を介在しない。また, 断層内物質は岩石相当の硬さで周辺の母岩と密着して一体の岩石となっており, 新しい時代の活動の痕跡は認められない。なお, f1断層露頭は, 平成26年7月1日の現地調査で説明した露頭である。
- f1断層露頭から採取した試料およびf2断層コアを用いて定量的にカタクレーサイトと認定できるか否かを評価する。

(S) f1断層 走向傾斜
N40～50° E/70° NW (N)



f1断層露頭写真(平成26年撮影)

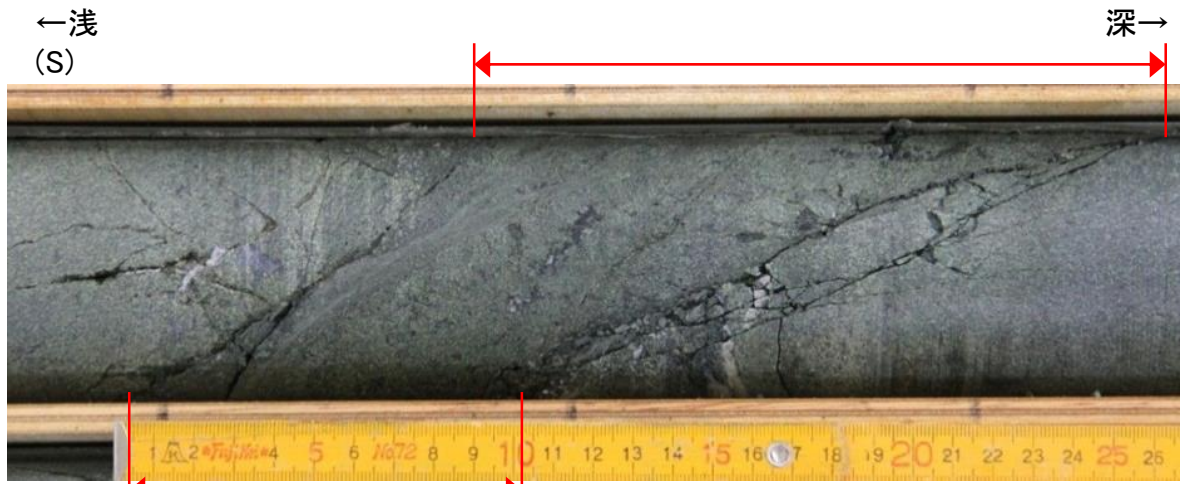
走向傾斜N34～
43° E/26～31° SE



f2断層(深度約10m)コア写真
(平成26年取得・撮影)

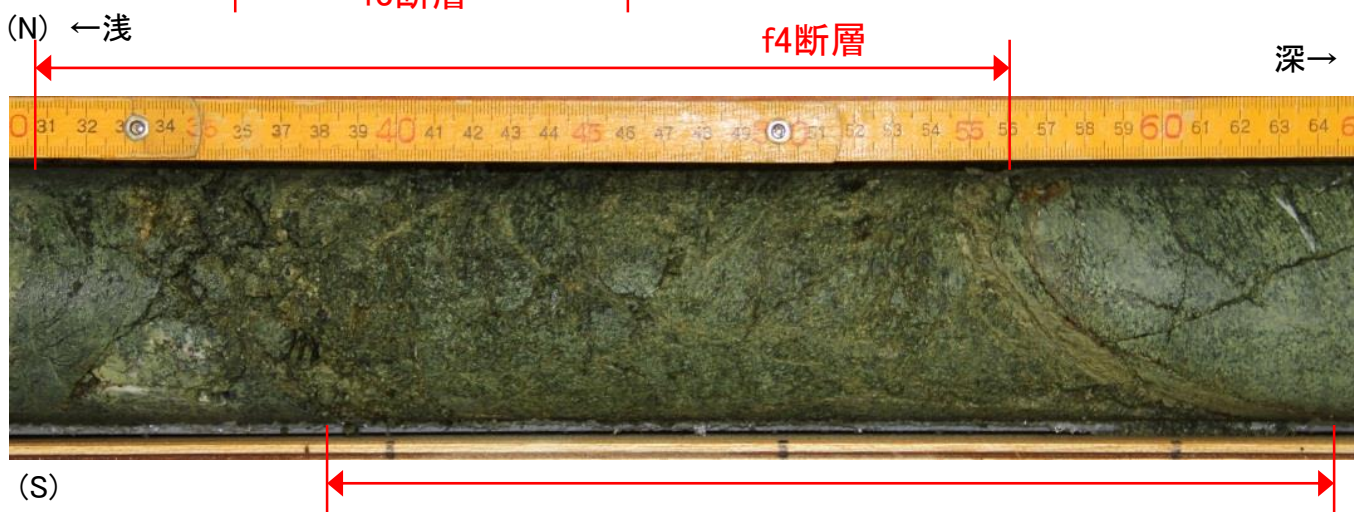
断層内物質の物性の検討④ <肉眼観察(3)>

○f3断層コアの破碎幅は8cm, f4断層コアの破碎幅は20cmであり, 断層内物質に粘土状の軟質部を介在しない。
また, 断層内物質は岩石相当の硬さで周辺の母岩と密着して一体の岩石となっており, 新しい時代の活動の痕跡は認められない。
○これらの断層コアを用いて定量的にカタクレーサイトと認定できるか否かを評価する。



走向傾斜
N36~40° E/58~69° NW

f3断層(深度約17m)
コア写真(平成26年取得・撮影)



走向傾斜
N57~62° E/51~70° NW

f4断層(深度約9m)
コア写真
(平成26年取得・撮影)

断層内物質の物性の検討⑤ <物理試験>

- 軟質部が認められない断層（Fa-1断層, Fa-4断層, f1～f4断層）の断層内物質について物理試験を行って断層ガウジ（川上断層, 伊予断層）と比較し、水に対する挙動を定量的に評価する。
- 物理試験結果より、軟質部が認められない断層の有効間げき率は10%未満であるのに対し、断層ガウジの有効間げき率は数十%に達し、顕著な差が認められる。これは、「岩石中には、外部と連結せず、外部の気相や液相と置き換えることのできない閉じた間隙がある」（地盤工学会, 2009）ためであり、これらの断層内物質が断層ガウジでなく基質と岩片が固結したカタクレーサイトであることを明確に示す結果である。

	物理試験			
	乾燥密度 (g/cm ³)	飽和密度(湿潤密度) (g/cm ³)	有効間げき率 (%)	吸水率(含水比) (%)
Fa-1断層※1	2.65	2.67	1.9	0.7
Fa-4断層※1	2.81	2.86	4.8	1.7
f1断層	2.68	2.74	5.7	2.1
f2断層	2.51	2.53	2.5	1.0
f3断層	2.74	2.81	7.0	2.6
f4断層	2.56	2.64	8.1	3.2
川上断層※2	2.21	(2.38)	17.7以上	(7.0)
伊予断層※2	1.91	(2.19)	27.4以上	(13.6)

※1 Fa-1, Fa-4断層は伊方3号炉申請時の調査で取得したコアを用いて平成26年に試験を実施。

※2 活断層である中央構造線断層帯の断層ガウジを採取して物理試験を実施。

地盤工学会, 2009, 地盤材料の試験の方法と解説。

断層内物質の物性の検討⑥ <針貫入試験>

- 断層内物質の局所的な硬さを定量的に測定するため、現場や室内で軟岩～固結土に針を貫入してその貫入長さ と 貫入荷重（針貫入勾配）を測定する針貫入試験を行う。
- 自然状態において軟質部が認められない断層（Fa-1断層, Fa-4断層, f1～f4断層）の断層内物質は断層ガウジ（川上断層, 伊予断層）よりも針貫入勾配が顕著に大きい。湿潤状態でも土のように流動化せず一定の針貫入勾配を保っており、これらの断層内物質が断層ガウジでなく基質と岩片が固結したカタクレーサイトであることを明確に示す結果である。

	針貫入試験結果(針貫入勾配)		
	自然状態※ ¹ (N/mm)	乾燥状態 (N/mm)	湿潤状態 (N/mm)
Fa-1断層	69.5	83.0	56.0
Fa-4断層	71.4	90.5	52.3
f1断層	80.6	85.0	47.0
f2断層	81.3	82.5	80.0
f3断層	62.9	71.5	54.3
f4断層	43.8	64.0	23.7
川上断層※ ²	1.3	-	-
伊予断層※ ²	1.5	-	-

【針貫入試験の測定方法】

土・岩に針を貫入し、その貫入長さ と 貫入荷重を測定して、その関係から針貫入勾配を求める試験である。（地盤工学会基準 針貫入試験方法に準拠する。）

試験にあたり、1つの計測点に対して10点の計測を行い、その平均値※を測定値として評価する。

計測点は断層沿いに破碎幅や固結度が平均的かつ試験面が平滑な箇所を選定し、断層横断方向に粘土状の細粒部や境界部等の相対的に軟質な部分で試験を実施する。

※貫入長さ1mm未満で貫入荷重100Nに達した計測点は針貫入勾配を100N/mmとして算出。

※¹ボーリングコアにおける自然状態は乾燥状態と湿潤状態の平均値を設定。

※²活断層である中央構造線断層帯の断層ガウジにおいて試験実施。

断層内物質の物性の検討⑦ <岩石化した断層の定義>

- 軟質部が認められない断層の物性を断層ガウジの物性と比較すると、乾燥密度、有効間隙率、吸水率（含水比）において有意な差が認められる。
- 地盤工学会(2009)において示されている岩石の乾燥密度と有効間隙率の関係や吸水率を参照すると、軟質部が認められない断層は硬岩に相当する物性を有すると評価される。
- さらに、伊方発電所における基礎地盤・周辺斜面の解析用物性値を参照すると、軟質部を含む断層の物性が強風化のD級岩盤～表土※に相当するのに対し、軟質部が認められない断層の物性はやや風化～風化のC_M級岩盤～C_L級岩盤※に相当する。
- 以上を踏まえ、肉眼観察、物理試験、針貫入試験の結果として断層内物質が岩石相当の物性を有して粘土状の軟質部を介在しないと判断できる断層を**岩石化した断層**と定義する。

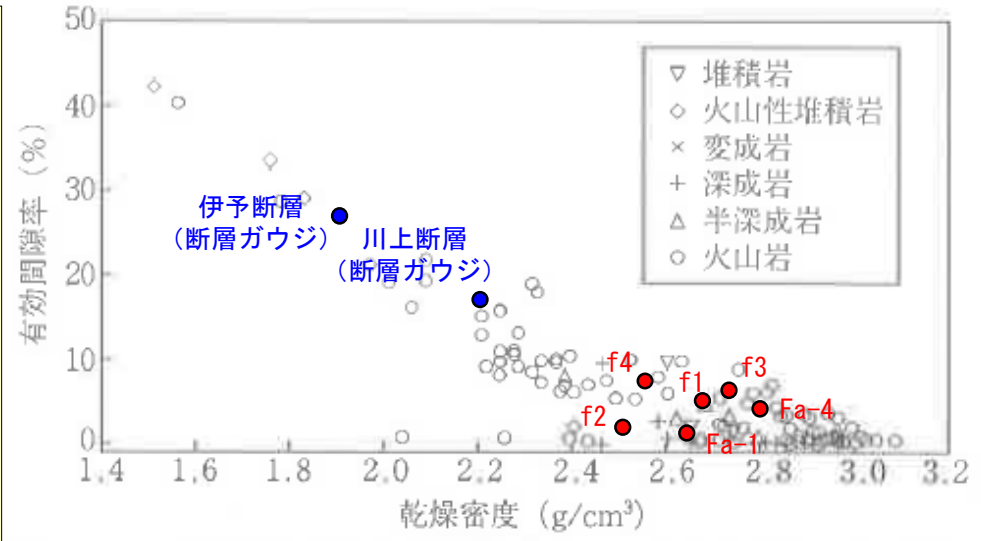


図-3.9.4 乾燥密度と有効間隙率との関係（地質調査所⁶⁾に
加筆修正） 地盤工学会(2009)から抜粋・一部加筆

【地盤工学会(2009)より抜粋】
岩石の吸水率は、硬岩では10%以下、新鮮で緻密な岩では1%以下のものが多い。風化に伴い吸水率は増加し、軟岩では数%から数十%程度に及ぶ場合がある。

基礎地盤・周辺斜面の安定性評価において設定した
解析用物性値(平成26年1日10日審査会合資料より抜粋)

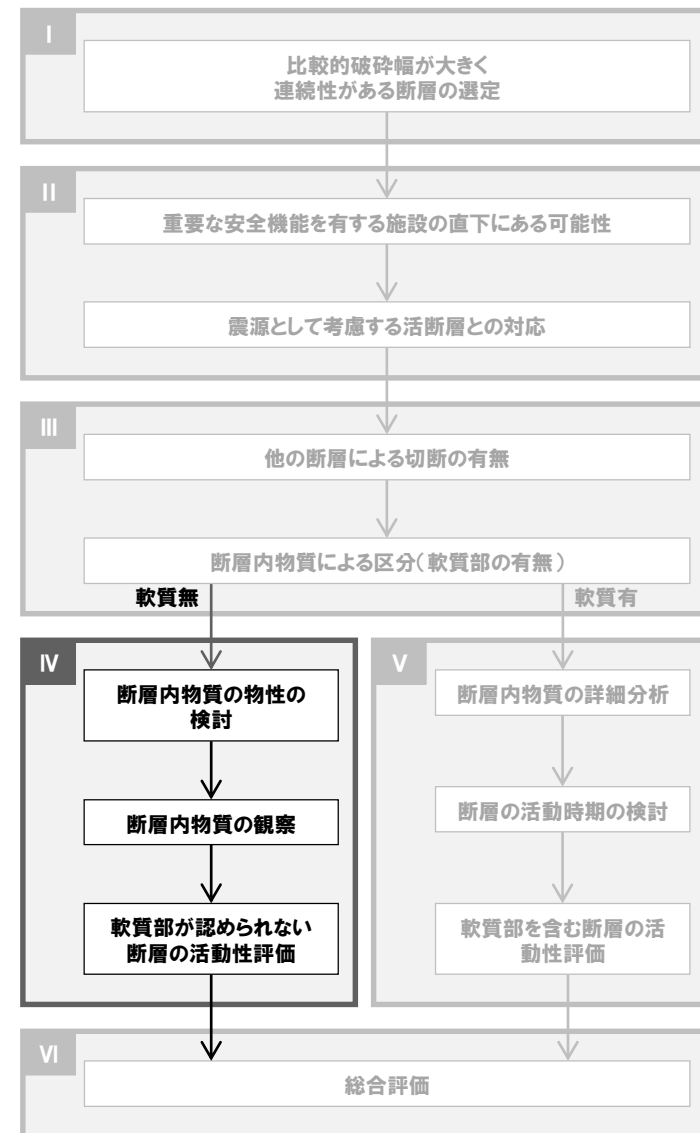
項目	岩盤※					断層		
	I級 (C _H 級)			II級 (C _M 級)	III級		軟質無 (岩石化)	軟質含
	①	②	③		① (C _L 級)	② (D級・表土)		
単位体積重量 (kN/m ³)	29.4			27.5	25.5	18.6	26.5	19.6
せん断強度 (kN/m ²)	981			490	130	39	324	78
内部摩擦角 (°)	50			41	23	17	34	24

【地盤工学会(2009)より抜粋】
岩石の有効間隙率は、密度、含水比とならんで岩石の重要な基本物性値であることから、密度試験に関連して、有効間隙率を算出することがしばしばある。
岩石中には気相や液相で満たされる間隙が多少とも存在する。このような間隙は、外部と有効に連結し、外部の気相や液相と置き換えることができるものと、外部と連結せず、外部の気相や液相と置き換えることのできない閉じた間隙がある。外部の気相や液相と置き換えることのできる間隙の占める容積の、岩石全体の容積に対する比率が有効間隙率である。

※電中研方式の分類法を基本的な考え方とし、これを参考に地質調査結果に基づきC_H級、C_M級、C_L級およびD級の4段階に分類した。

地盤工学会, 2009, 地盤材料の試験の方法と解説, 地質調査所, 1991, 日本の岩石物性値—密度, 磁性, P波速度, 有効間隙率, 熱伝導率—, 地質調査所報告第276号, 123~272

- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
 1. 断層内物質の物性の検討
 2. 断層内物質の観察
 3. まとめ
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
- VI. 総合評価

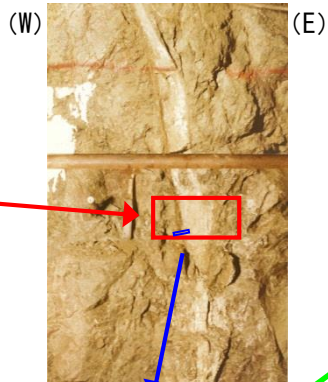


断層内物質の観察① <Fa-1断層>

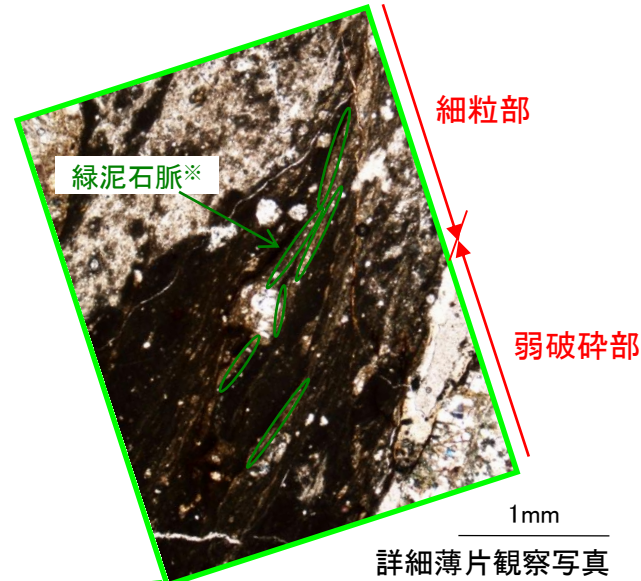
- 岩石化したFa-1断層の研磨片観察によると、主せん断面と対応する細粒部が認められる。薄片観察によると、幅数mm程度の細粒部のせん断方向に緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていないことから、緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）生成後にFa-1断層は活動していないと考えられる。
- 軟X線画像において、Fa-1断層の破砕部と母岩の明るさに差異がなく、両者が同等の密度であると判断される。
- Fa-1断層は地下深部における脆性破壊でカタクレーサイトとなっている。



Fa-1
(N5° E67° SE)

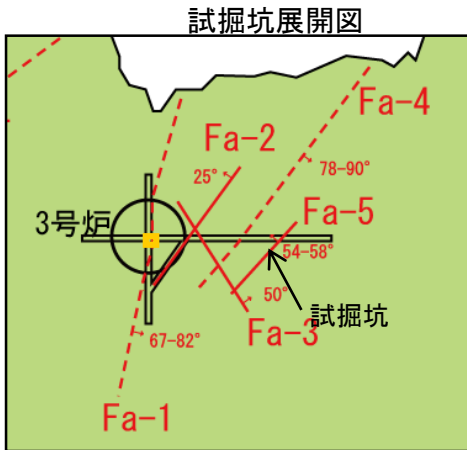


1m
試掘坑写真
(昭和58年撮影)

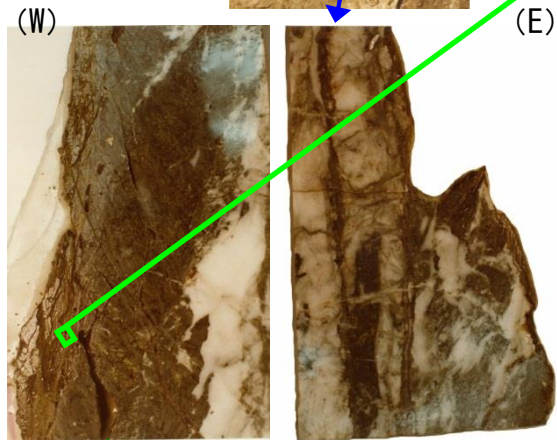


1mm
詳細薄片観察写真
(直交ニコル,
平成24年撮影)

※緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う



分析位置(展開図に対応)



塩基性片岩

細粒部
破砕部

5cm
研磨片写真
(昭和58年撮影)



5cm
軟X線写真
(昭和58年撮影)

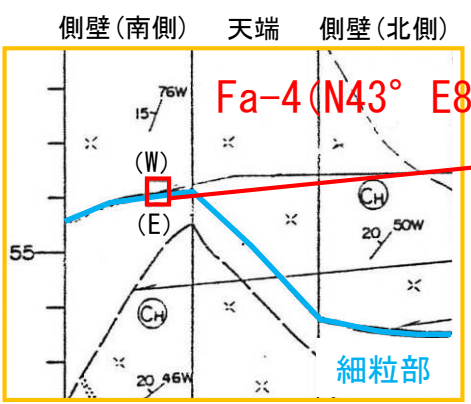
IV. 軟質部が認められない断層の活動性評価

断層内物質の観察② <Fa-4断層>

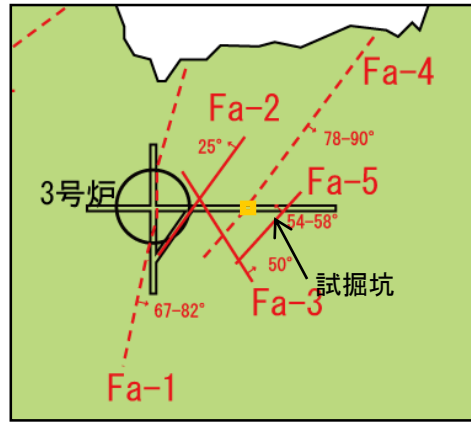
○岩石化したFa-4断層の研磨片観察によると、主せん断面と対応する細粒部が認められる。薄片観察によると、幅数mm程度の細粒部を横断する方向に変質鉍物脈が成長しており、その後脆性破壊を受けていないことから、鉍物脈生成後にFa-4断層は活動していないと考えられる。また、弱破碎部中に方解石脈の塑性変形が認められる。

○Fa-4断層の軟X線画像において、破碎部と母岩の明るさに差異がなく、両者が同等の密度であると判断される。

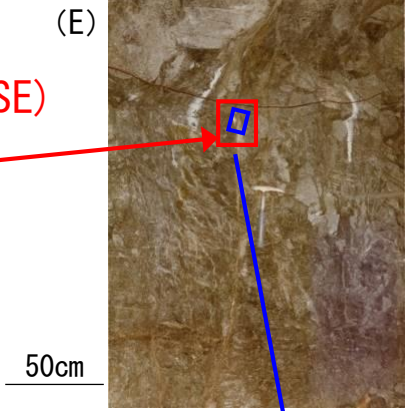
○Fa-4断層は地下深部における脆性破壊で形成されたカタクレーサイトで一部塑性変形を伴う。



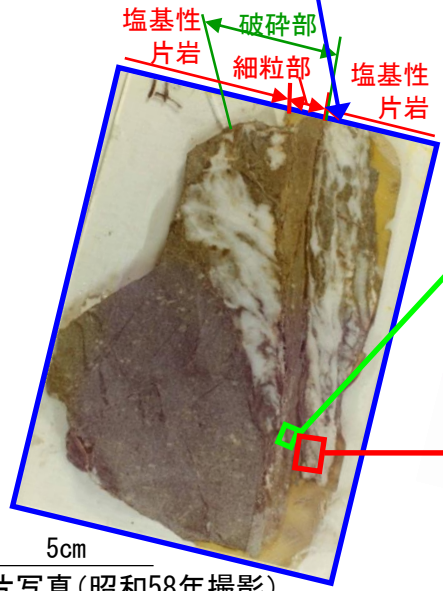
試掘坑展開図



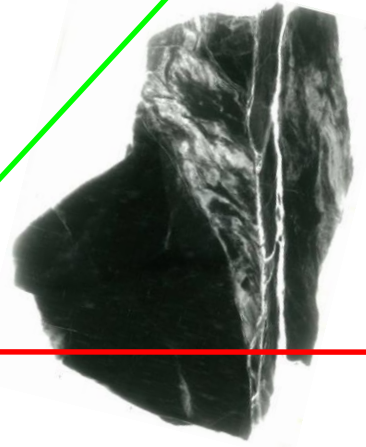
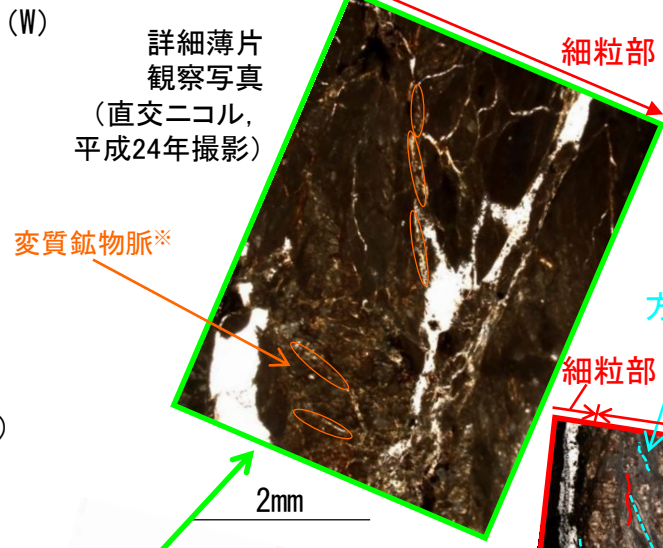
■ : 分析位置(展開図に対応)
※EPMA分析の前処理として必要な薄片の研磨が実施できない状況のため、同定することができなかった



試掘坑写真(昭和58年撮影)



研磨片写真(昭和58年撮影)

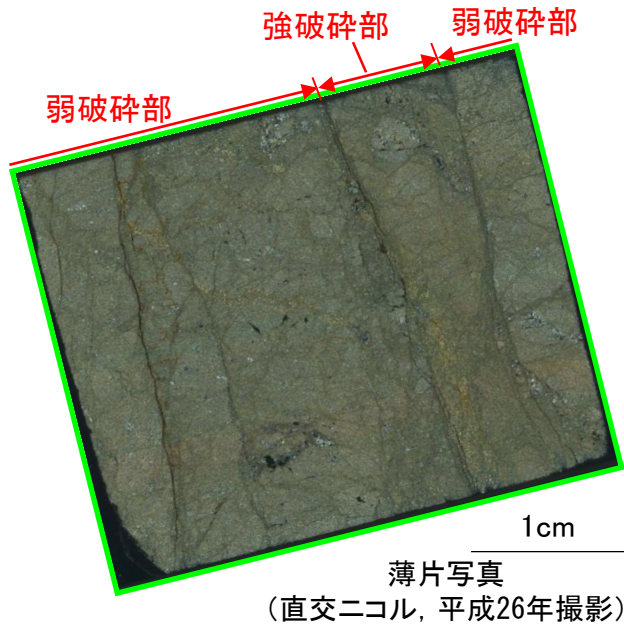


軟X線写真(昭和58年撮影) (平行ニコル, 平成26年撮影)



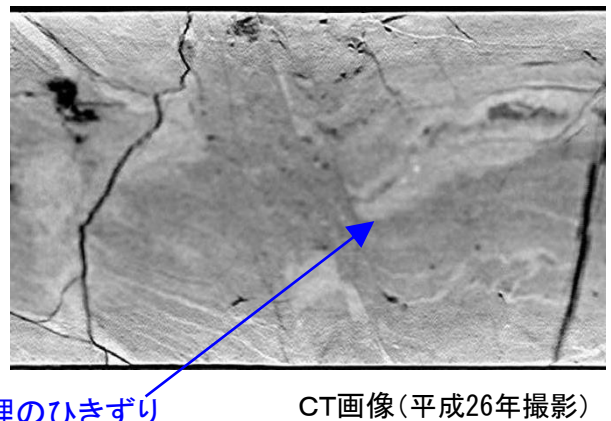
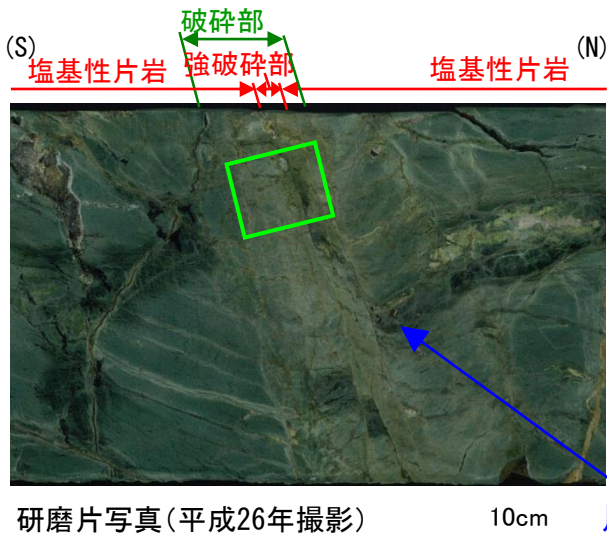
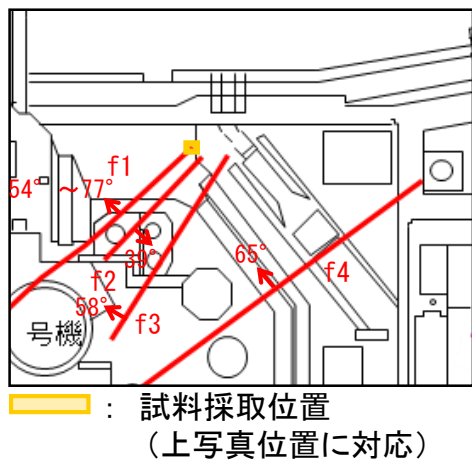
薄片拡大写真

断層内物質の観察③ <f1断層>

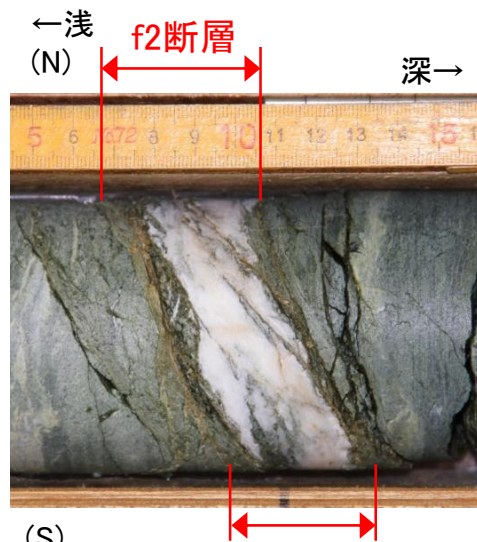


○岩石化したf1断層の研磨片観察によると、破碎部は周辺の母岩と密着して一体の岩石となっている。また、f1断層のX線CT画像において、破碎部と母岩の明るさに差異がなく、両者が同等の密度であると判断される。

○研磨片および薄片において、断層運動の繰り返しにより形成される細粒部は認められず、最も破碎の進んだ強破碎部と対応する片理のひきずりを確認できることからf1断層は地下深部における脆性破壊で形成されたカタクレーサイトで一部塑性変形を伴う。



断層内物質の観察④ <f2断層の研磨片観察>

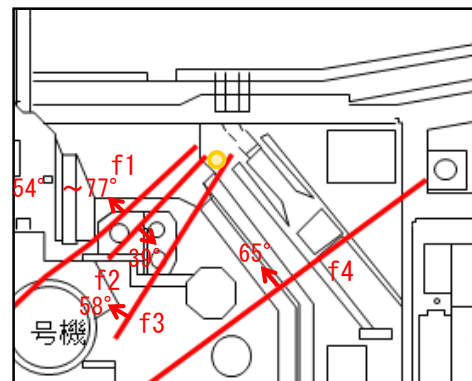


(S) f2断層(深度約10m)コア写真
(平成26年撮影)

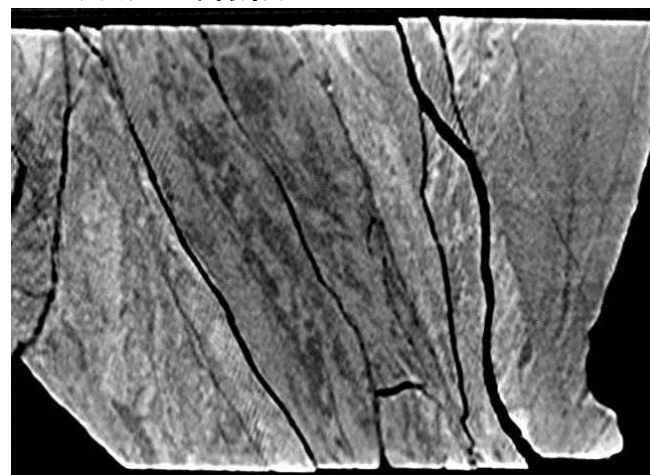
N34~43° E/26~31° SE



(S) 研磨片写真
(平成26年撮影) 5cm



● : ボーリング位置

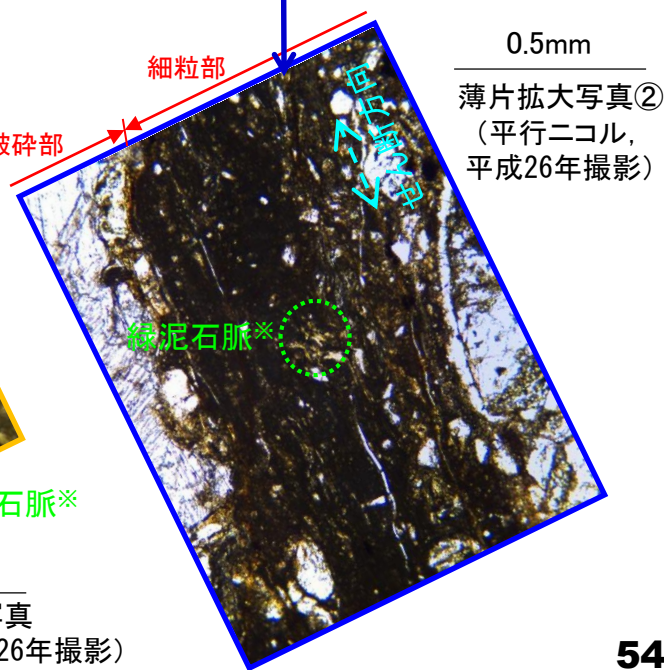
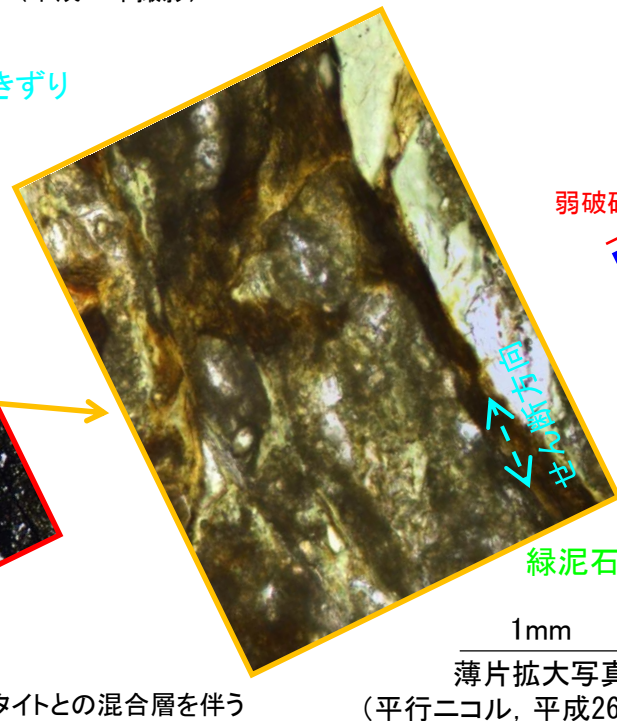
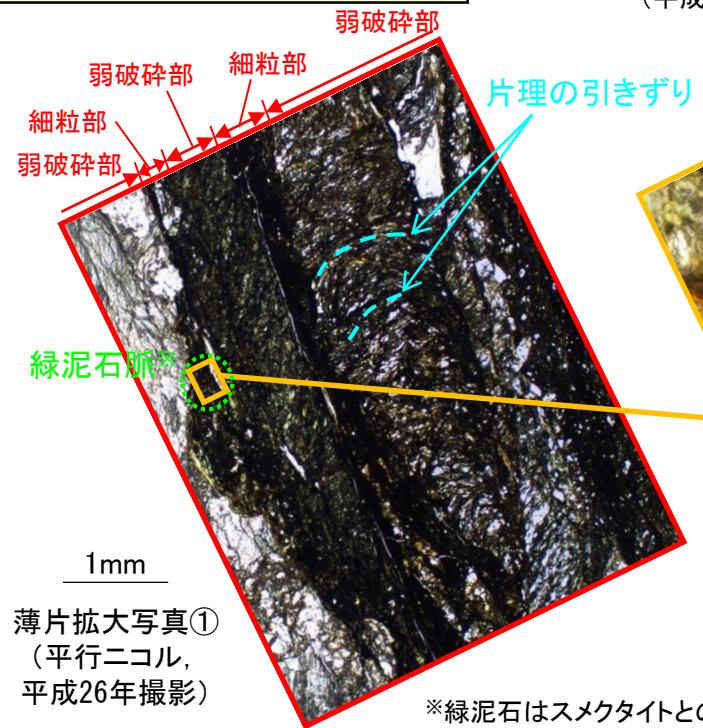
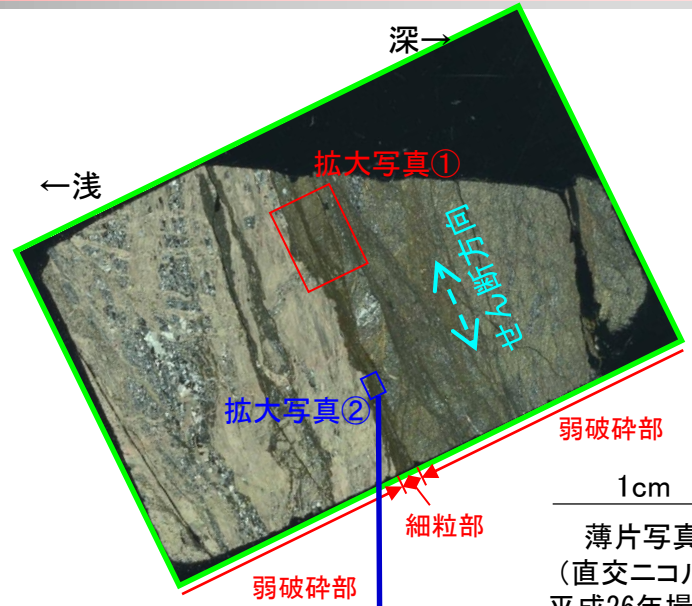
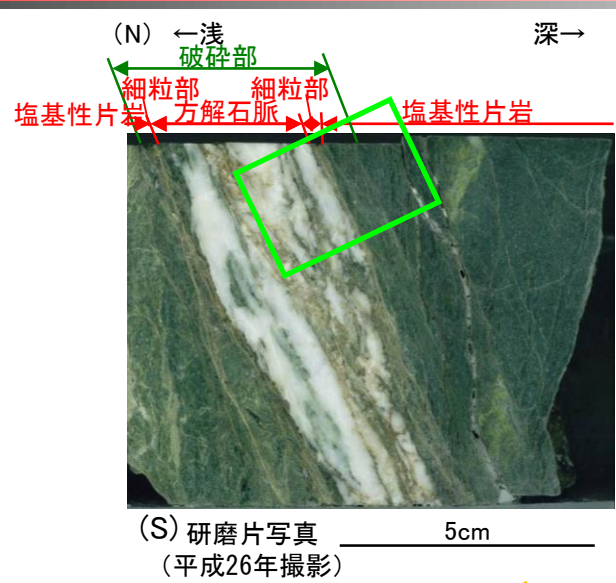


CT画像(平成26年撮影)

- 岩石化したf2断層の研磨片観察によると、破碎部は周辺の母岩と密着して一体の岩石となっている。
- また、破碎部において、方解石脈の塑性変形が認められ、地下深部での断層運動を示す。
- X線CT画像において、破碎部と母岩の明るさに差異がなく、両者が同等の密度であると判断される。
- 研磨片観察より主せん断面と対応する細粒部付近で薄片観察を行う。

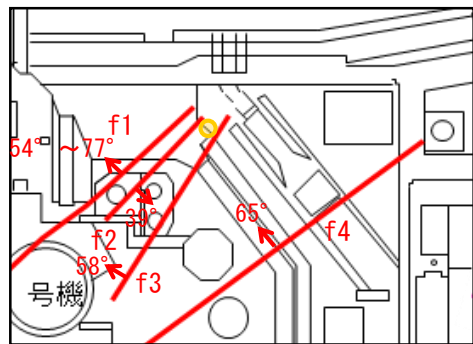
断層内物質の観察⑤ <f2断層の薄片観察>

- 薄片観察によると、幅数mm程度の細粒部と接する弱破碎部中に片理の引きずりが認められ、地下深部での断層運動を示す。
- また、せん断方向を横断する方向に緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていない。
- 研磨片・薄片観察よりf2断層は地下深部における脆性破壊で形成されたカタクレサイトの一部塑性変形を伴う。

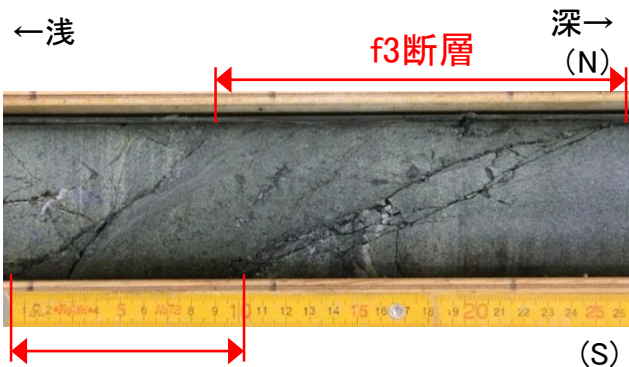


*緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う

断層内物質の観察⑥ <f3断層の研磨片観察>



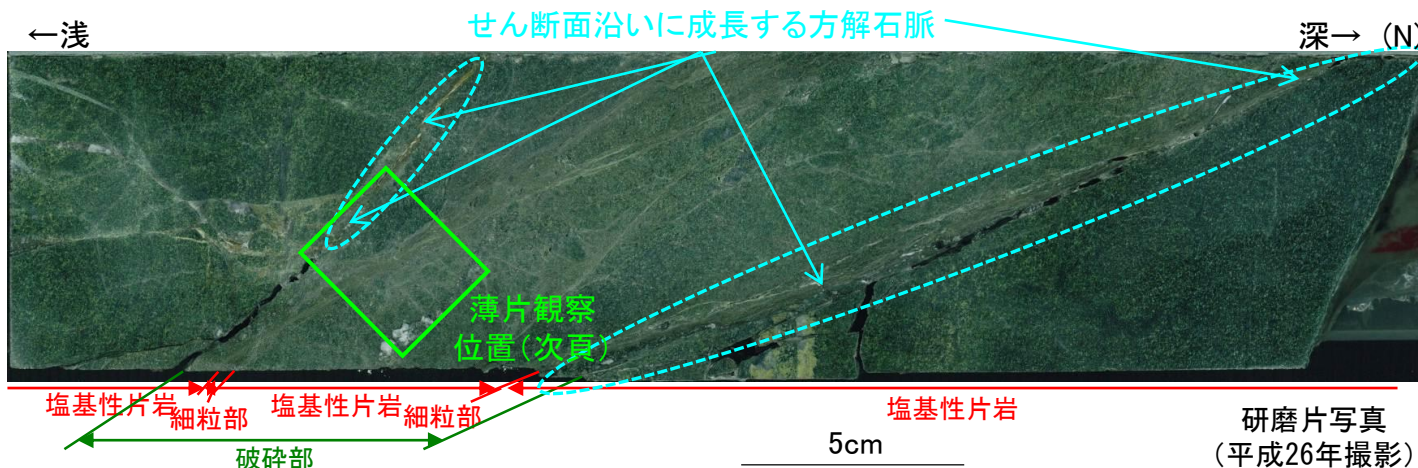
● : ボーリング位置



N36~40° E/58~69° NW

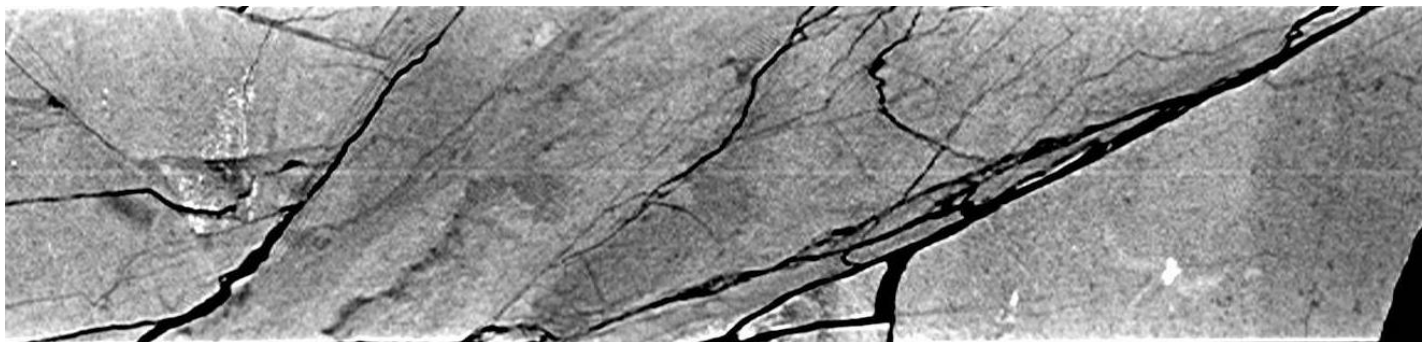
f3断層(深度約17m)
コア写真
(平成26年撮影)

(S)



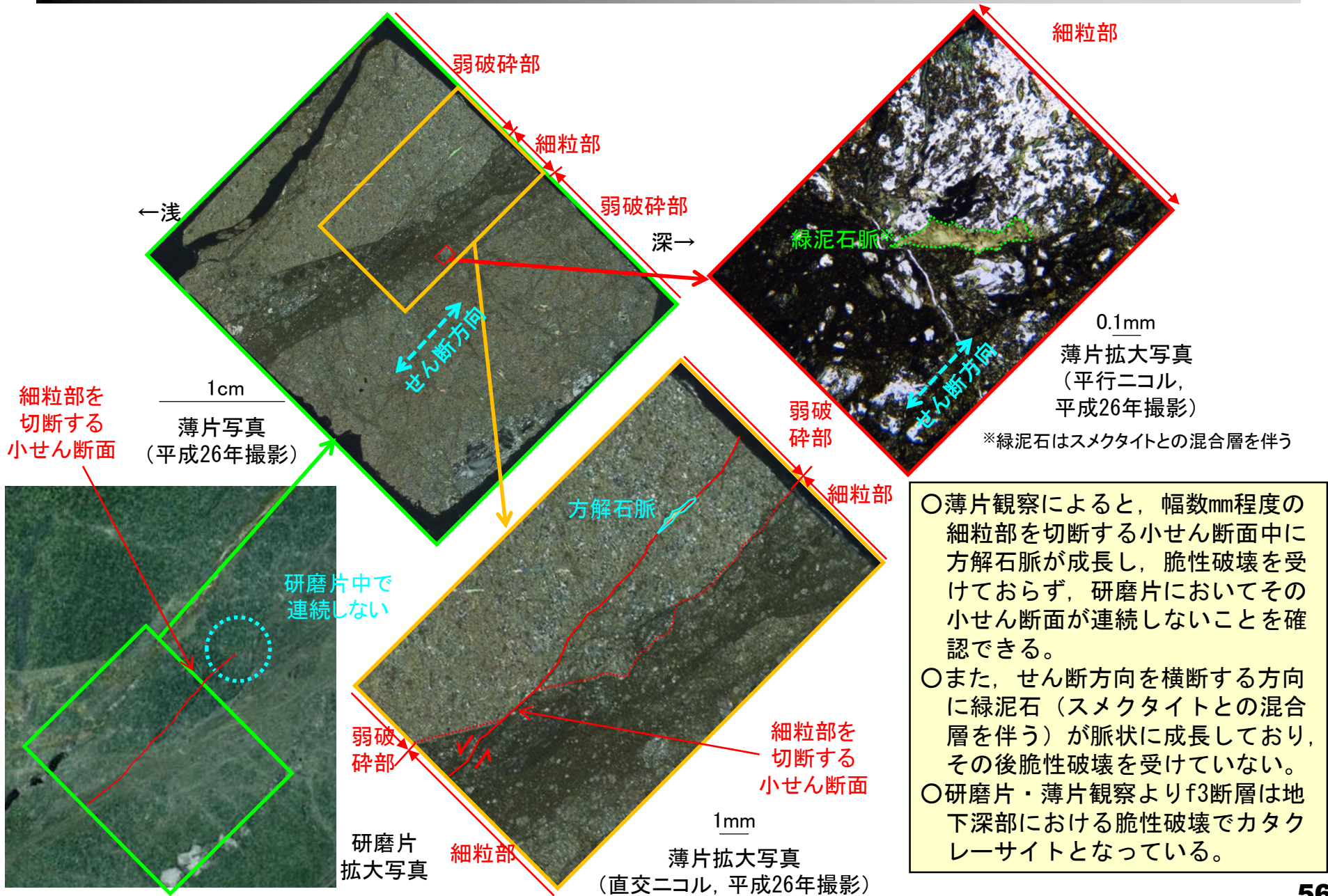
研磨片写真
(平成26年撮影)

- 岩石化したf3断層の研磨片観察結果によると、破碎部は周辺の母岩と密着して一体の岩石となっている。
- また、せん断面沿いに方解石脈が成長しており、地表付近での破断を受けていない。
- X線CT画像において、破碎部と母岩の明るさに差異がなく、両者が同等の密度であると判断される。
- 主せん断面と対応する細粒部付近において薄片観察を行う。



CT画像(平成26年撮影)

断層内物質の観察⑦ <f3断層の薄片観察>



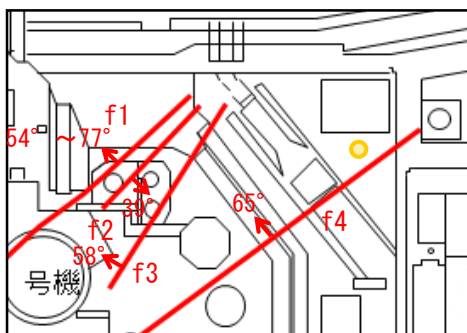
○薄片観察によると、幅数mm程度の細粒部を切断する小せん断面中に方解石脈が成長し、脆性破壊を受けておらず、研磨片においてその小せん断面が連続しないことを確認できる。

○また、せん断方向を横断する方向に緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていない。

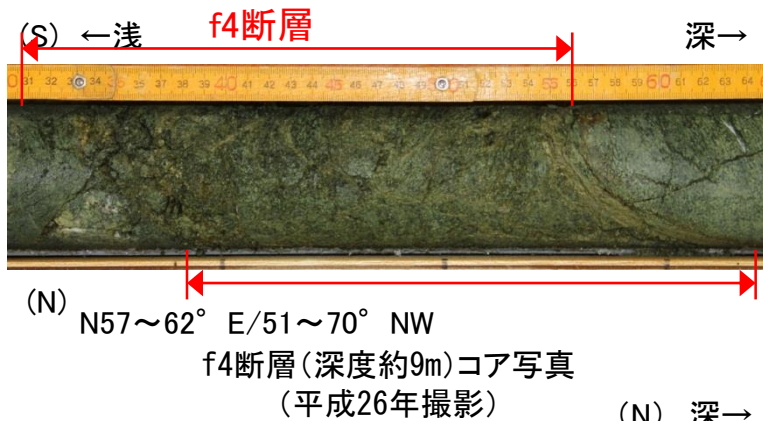
○研磨片・薄片観察よりf3断層は地下深部における脆性破壊でカタクレーサイトとなっている。

断層内物質の観察⑧ <f4断層の研磨片観察>

- 岩石化したf4断層の研磨片観察によると、破碎部は周辺の母岩と密着して一体の岩石となっている。
- X線CT画像において、破碎部と母岩の明るさに差異がなく、両者が同等の密度であると判断される。
- 主せん断面と対応する細粒部付近において薄片観察を行う。



○ : ボーリング位置



←浅

(N) 深→



塩基性片岩

細粒部

塩基性片岩

破碎部

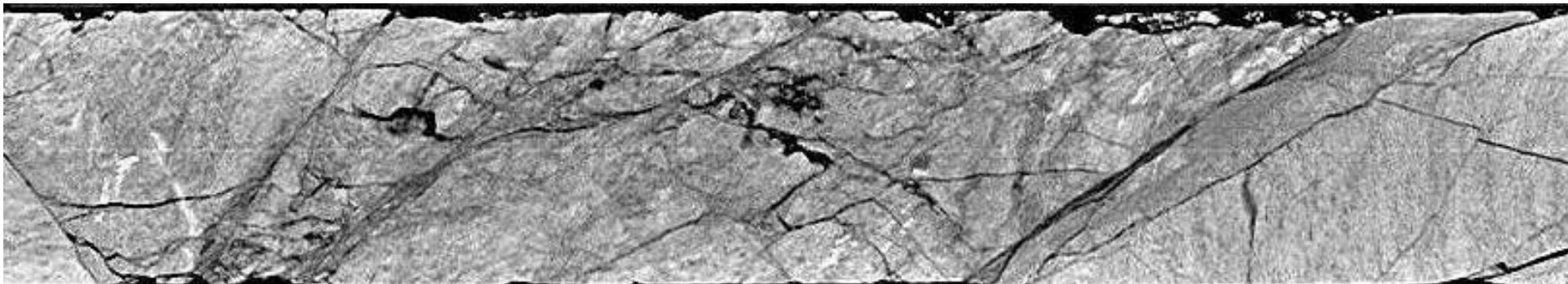
細粒部

塩基性片岩

5cm

研磨片写真(平成26年撮影)

(S)



CT画像(平成26年撮影)

断層内物質の観察⑨ <f4断層の薄片観察>

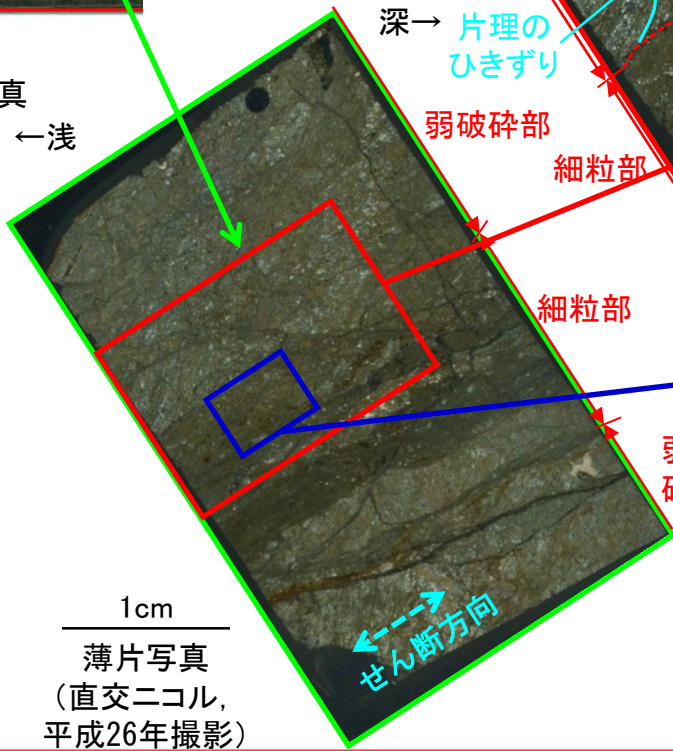


塩基性
細粒部
片岩

塩基性片岩

研磨片拡大写真

←浅



薄片拡大写真
(平行ニコル,
平成26年撮影)

1mm

弱破
碎部

細粒
部

細粒部を切断す
る小せん断面

弱破
碎部

深→ 片理の
ひきずり

弱破
碎部

細粒部

細粒部

弱破
碎部

細粒部

緑泥石脈*

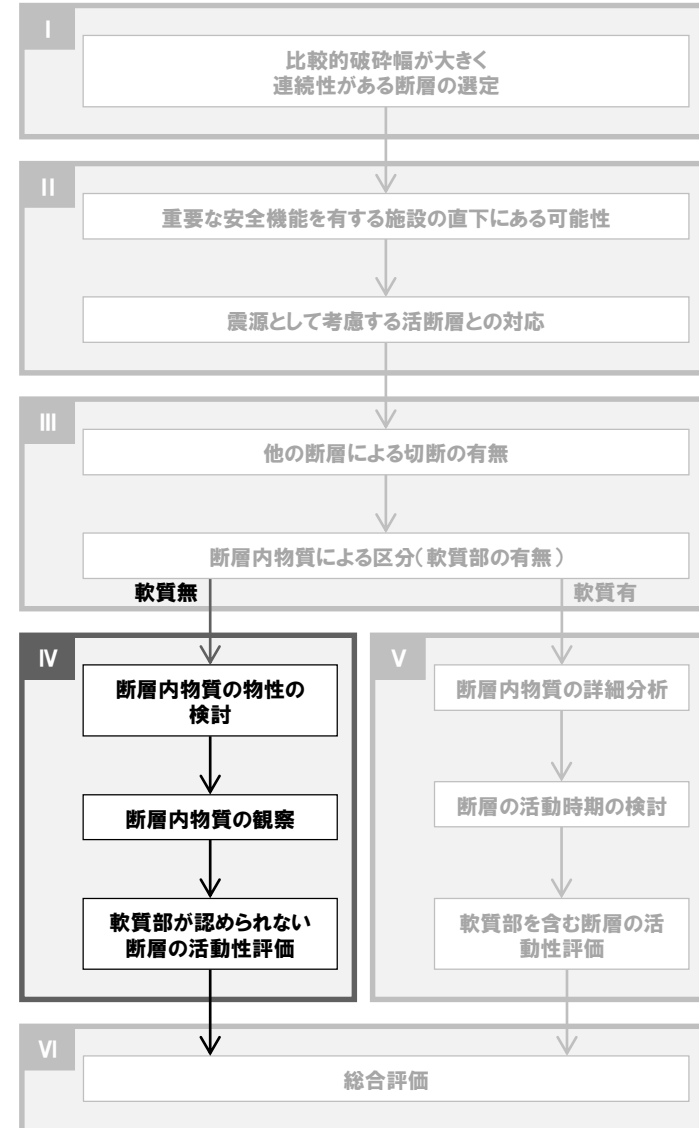
1mm

薄片拡大写真
(平行ニコル,
平成26年撮影)

*緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う

- 薄片観察によると幅数mm程度の細粒部を切断する小せん断面が認められ、研磨片においてその小せん断面が連続しないことを確認できる。
- 弱破砕部中に片理の引きずりが認められる。
- また、せん断面を横断する方向に緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていない。
- 研磨片・薄片観察よりf4断層は地下深部における脆性破壊で形成されたカタクレサイトの一部塑性変形を伴う。

- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
 1. 断層内物質の物性の検討
 2. 断層内物質の観察
 3. まとめ
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
- VI. 総合評価

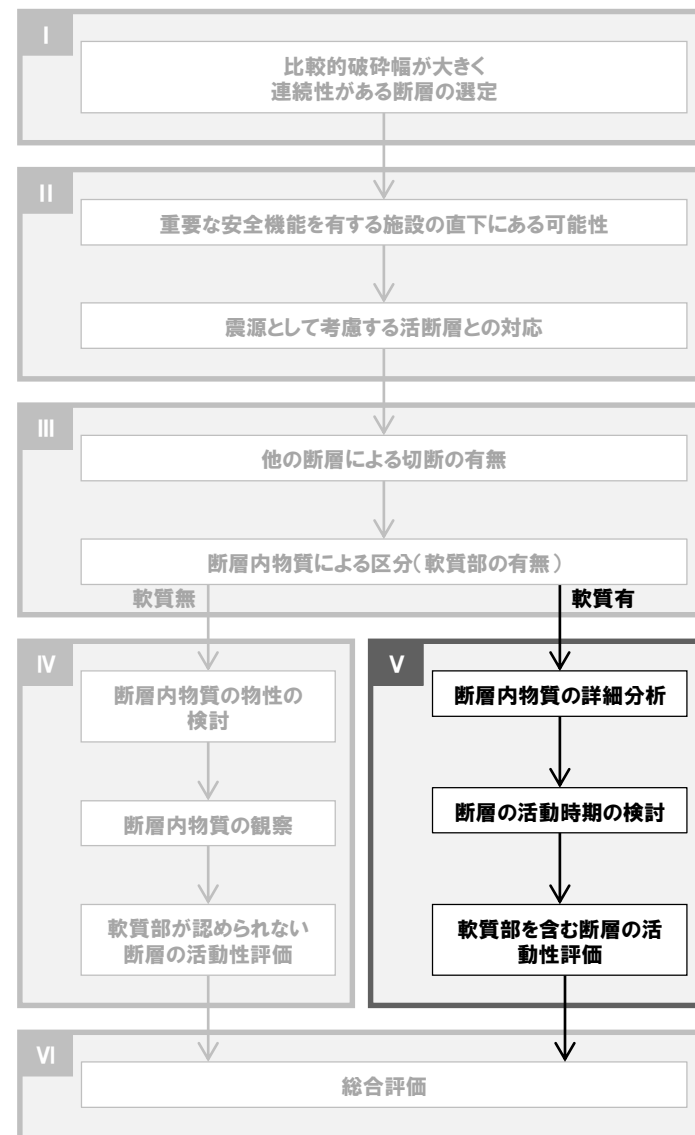


軟質部が認められない断層の活動性評価(まとめ)

- 軟質部が認められない断層（Fa-1断層，Fa-4断層，f1～f4断層）は，肉眼観察，物理試験，針貫入試験の結果として，断層内物質が岩石相当の物性で断層ガウジあるいは断層角礫との区別が困難な粘土状の軟質部を介在しない岩石化した断層と判断できる。これらは断層内物質が周辺の母岩と密着して一体の岩石となっており，地下深部の封圧・温度で基質と岩片が固結したカタクレーサイトが地表付近に位置して以降の破断を受けていない断層である。
- また，軟X線観察・CT画像観察によると破砕部と母岩の明るさに差異がなく，両者が同等の密度と判断され，研磨片・薄片観察によると地下深部で活動して以降に地表付近での脆性破壊を受けていないことから，いずれも地下深部で形成されたカタクレーサイトである。
- したがって，軟質部が認められない断層は，古い時代に地下深部で生成した断層が地表付近に位置して以降の新しい時代には活動しておらず，将来活動する可能性のある断層等には該当しない。

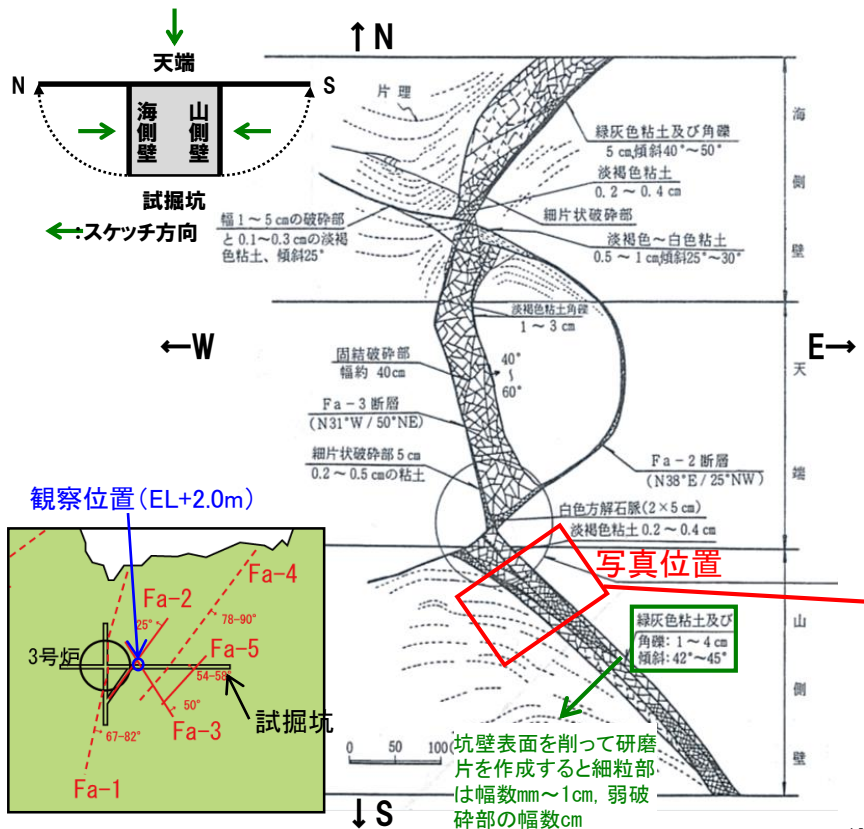
	肉眼観察	物理試験				針貫入勾配 (自然状態) (N/mm)	軟X線観察 CT画像観察	研磨片観察 薄片観察
		乾燥密度 (g/cm ³)	飽和密度 (g/cm ³)	有効間げ き率 (%)	吸水率 (%)			
Fa-1 断層	周辺の母岩と密着 して一体の岩石	2.65	2.67	1.9	0.7	69.5	破砕部と母岩は 同等の密度	カタクレーサイト
Fa-4 断層	周辺の母岩と密着 して一体の岩石	2.81	2.86	4.8	1.7	71.4	破砕部と母岩は 同等の密度	カタクレーサイト
f1 断層	周辺の母岩と密着 して一体の岩石	2.68	2.74	5.7	2.1	80.6	破砕部と母岩は 同等の密度	カタクレーサイト
f2 断層	周辺の母岩と密着 して一体の岩石	2.51	2.53	2.5	1.0	81.3	破砕部と母岩は 同等の密度	カタクレーサイト
f3 断層	周辺の母岩と密着 して一体の岩石	2.74	2.81	7.0	2.6	62.9	破砕部と母岩は 同等の密度	カタクレーサイト
f4 断層	周辺の母岩と密着 して一体の岩石	2.56	2.64	8.1	3.2	43.8	破砕部と母岩は 同等の密度	カタクレーサイト

- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
 1. 破碎幅の検討
 2. 断層内物質の詳細分析
 3. 断層の活動時期の検討
 4. まとめ
- VI. 総合評価



破碎幅の検討① < 試掘坑内の破碎幅 >

○地下約50mに位置する試掘坑における観察によると、Fa-3断層の破碎幅は、断層の影響を工学的に評価するため微小な亀裂が生じて岩盤が劣化した範囲まで含めて最大40cmであり、最も破碎の進んだ細粒部から弱破碎部までの幅は5 cm程度である。細粒部の幅は全般には0.2～0.5cmで、最も厚い箇所では幅1 cm～4 cm程度となっているものの坑壁表面を削った内部の細粒部は幅数mm～1 cm程度である。



マーカー(50cm間隔で鉛直) 緑灰色粘土: 幅0.2cm～0.5cm



試掘坑展開図(外側から見たスケッチ)
伊方発電所原子炉設置変更許可申請書
(3号炉増設, 昭和59年)より抜粋

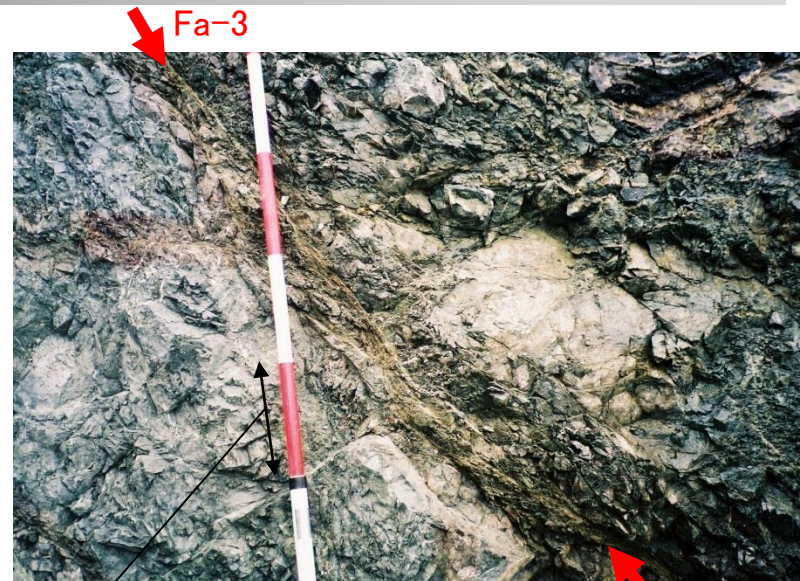
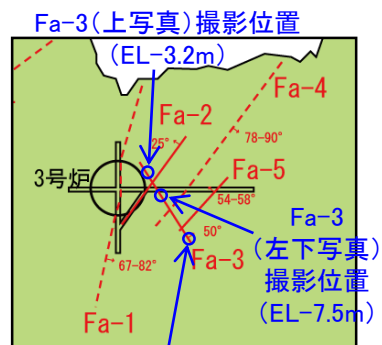
※試掘坑内で昭和58年撮影

弱破碎部の幅約5cm

Fa-3断層: 破碎幅最大40cm

破砕幅の検討② < 試掘坑周辺の破砕幅 >

- Fa-3断層は試掘坑において破砕幅が最大で40cmであるが、試掘坑から離れるにつれて破砕幅が減少し、直線性にも乏しい。
- 試掘坑から約5m掘り下げた基礎掘削面では破砕幅が小さく（左下写真）、Fa-3断層の局所的に破砕幅の大きい部分を既に掘削で除去している。



20cm

※試掘坑北方の基礎掘削面で平成2年撮影



Fa-3 →

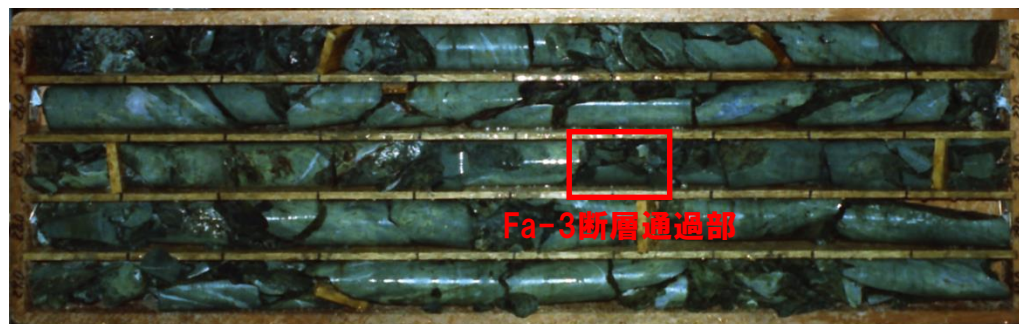


※試掘坑南方の基礎掘削面で平成2年撮影

破砕幅の検討③ <Fa-3断層通過部の破砕幅>

- 試掘坑内から水平ボーリングでFa-3断層通過部を掘削したBH-41孔, BH-42孔における破砕幅はおおよそ10cm程度である。
- また, 試掘坑より上方のFa-3断層通過部を掘削したA-4孔における破砕幅は約2cm程度である。

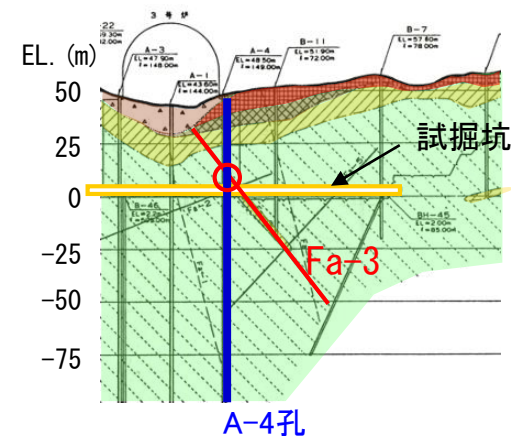
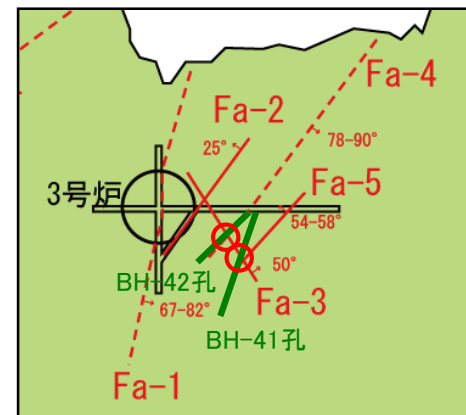
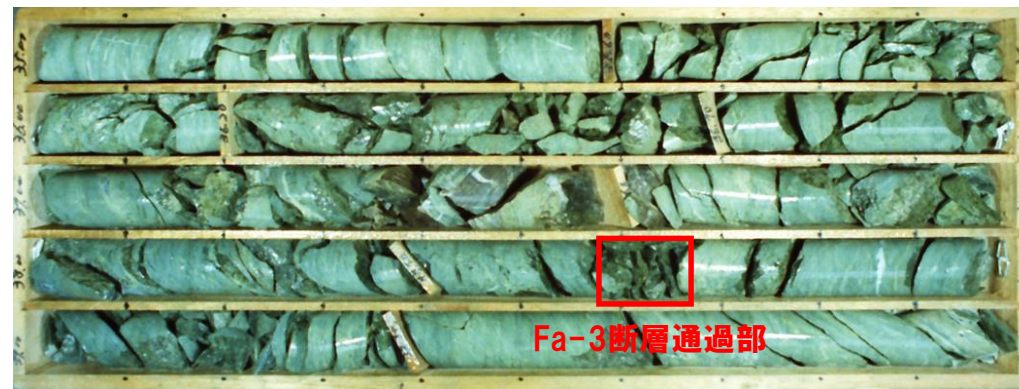
BH-41孔
コア写真
深度25m~30m
(S58年
取得・撮影)



BH-42孔
コア写真
深度15m~20m
(S58年
取得・撮影)



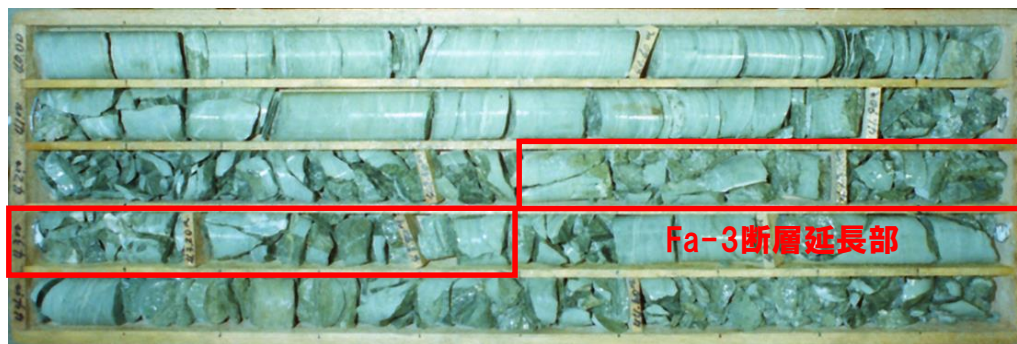
A-4孔
コア写真
深度35m~40m
(S58年
取得・撮影)



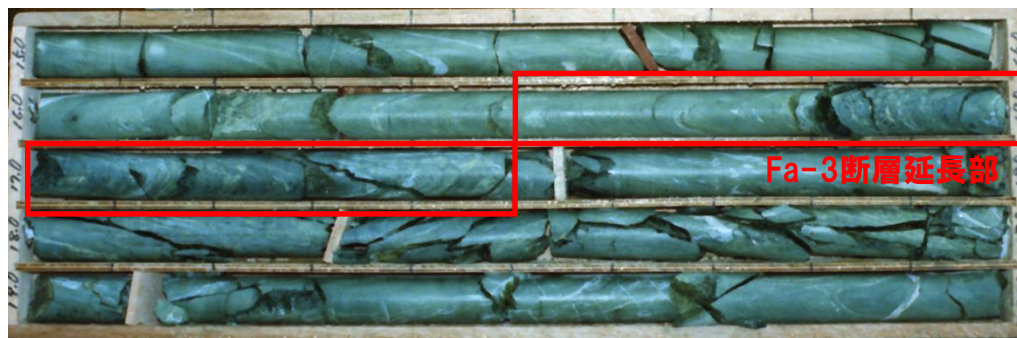
破碎幅の検討④ <Fa-3断層延長部のボーリングコア>

- Fa-3断層南方延長部のB-12孔および北方延長部のBH-43孔におけるボーリングコアに顕著な断層は認められず、Fa-3断層がここまで連続するとしても断層端部に相当し、Fa-3断層の長さは75m程度である。
- また、Fa-3断層の下方延長部のBH-45孔では全般に堅硬な岩盤が連続して顕著な断層は認められず、Fa-3断層がここまで連続するとしても断層端部に相当する。

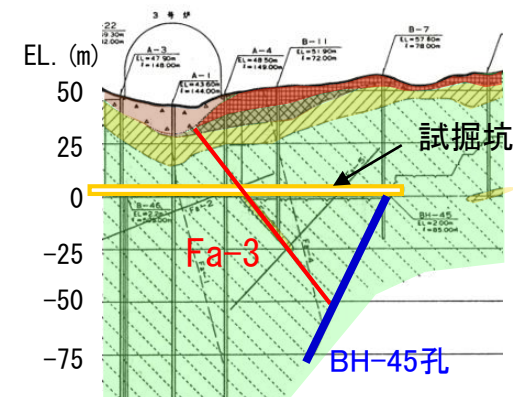
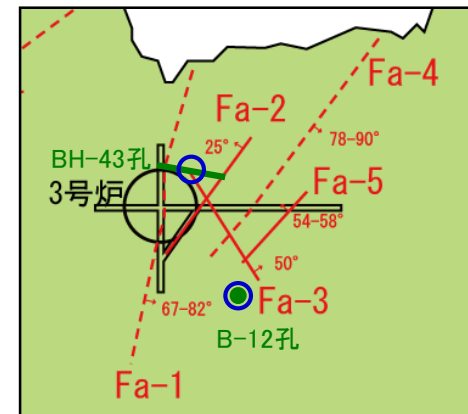
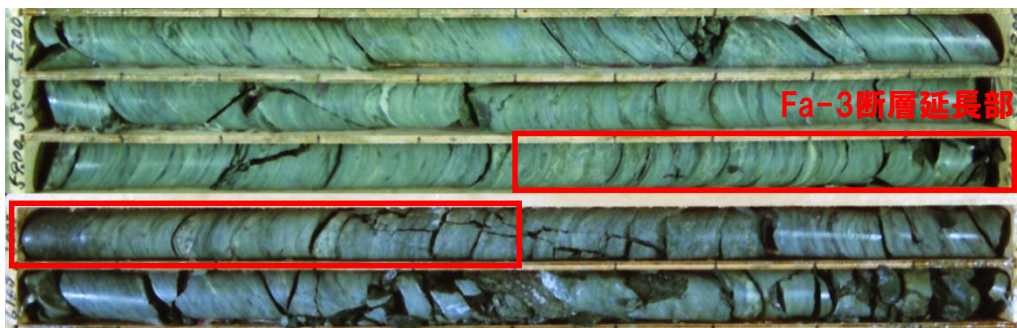
B-12孔
コア写真
深度40m～45m
(S58年
取得・撮影)



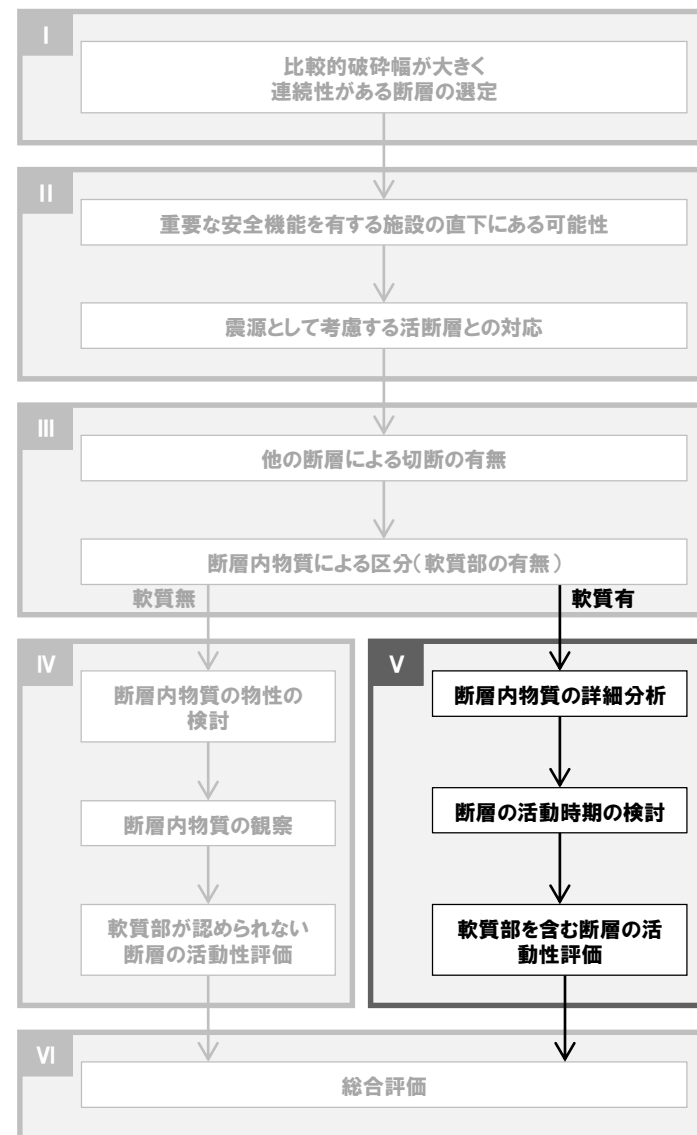
BH-43孔
コア写真
深度15m～20m
(S58年
取得・撮影)



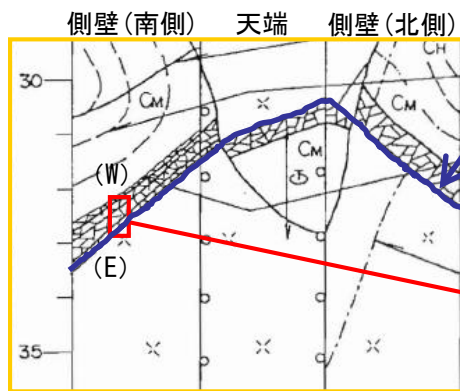
BH-45孔
コア写真
深度57m～62m
(S58年
取得・撮影)



- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
 1. 破碎幅の検討
 2. 断層内物質の詳細分析
 3. 断層の活動時期の検討
 4. まとめ
- VI. 総合評価



Fa-3断層内物質の詳細分析① <研磨片作成位置>

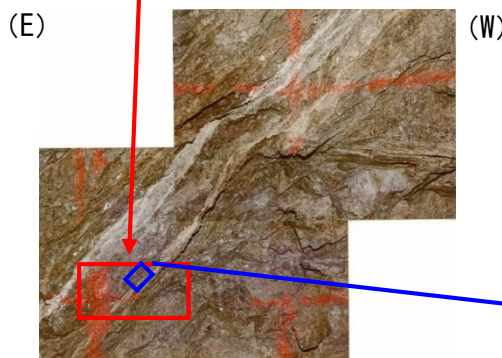


試掘坑展開図

最新活動面

細粒部(軟質部)

Fa-3 試掘坑スケッチ
(N20° W46° E)

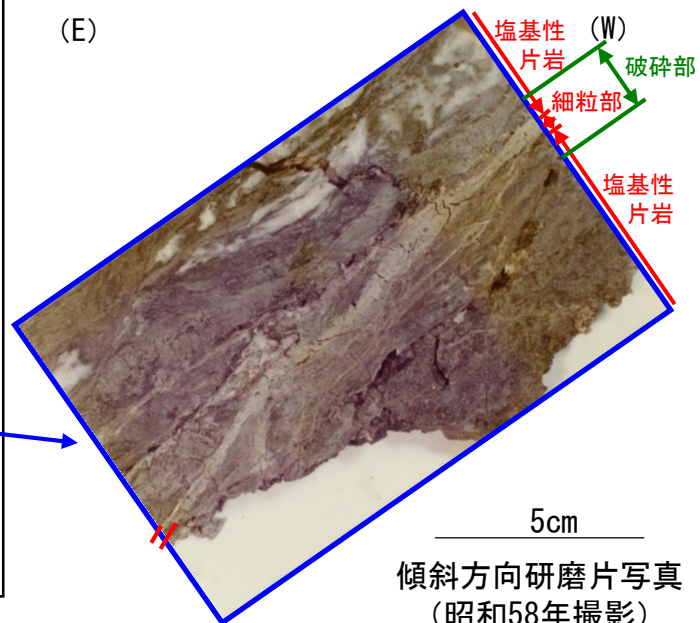


試掘坑写真(昭和58年撮影)

1m

- 最新活動面と対応する細粒部付近を分析する。試掘坑内において坑壁表面を削った内部の幅数mm~1cm程度の細粒部を含む試料を採取した。
- なお、坑壁におけるFa-3断層の細粒部の表面を削ると内部では非常に固い。

(E)



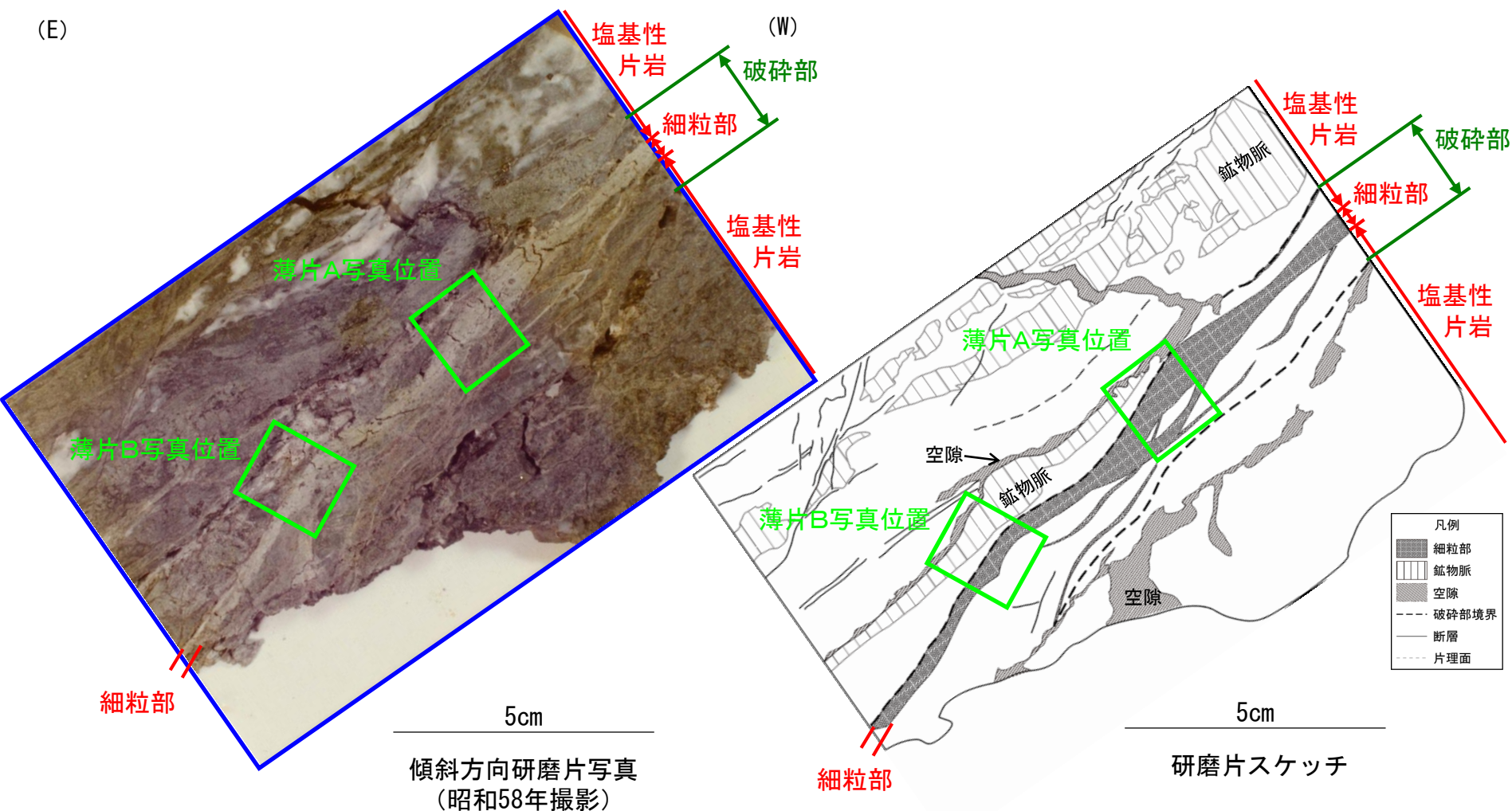
5cm

傾斜方向研磨片写真
(昭和58年撮影)

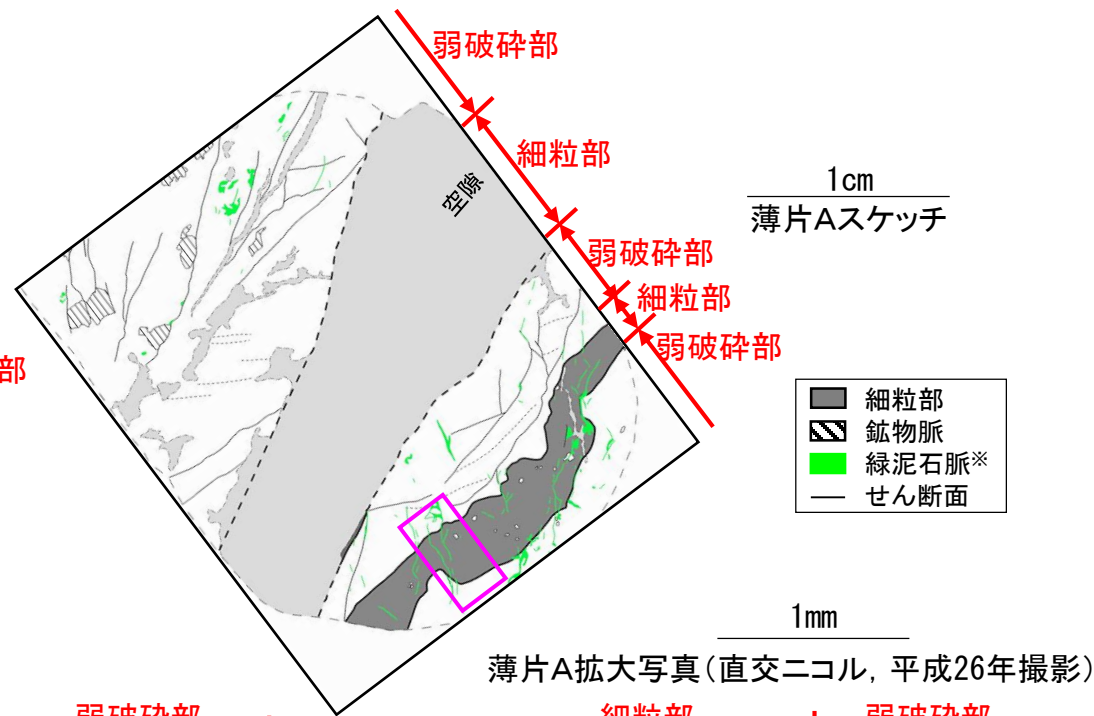
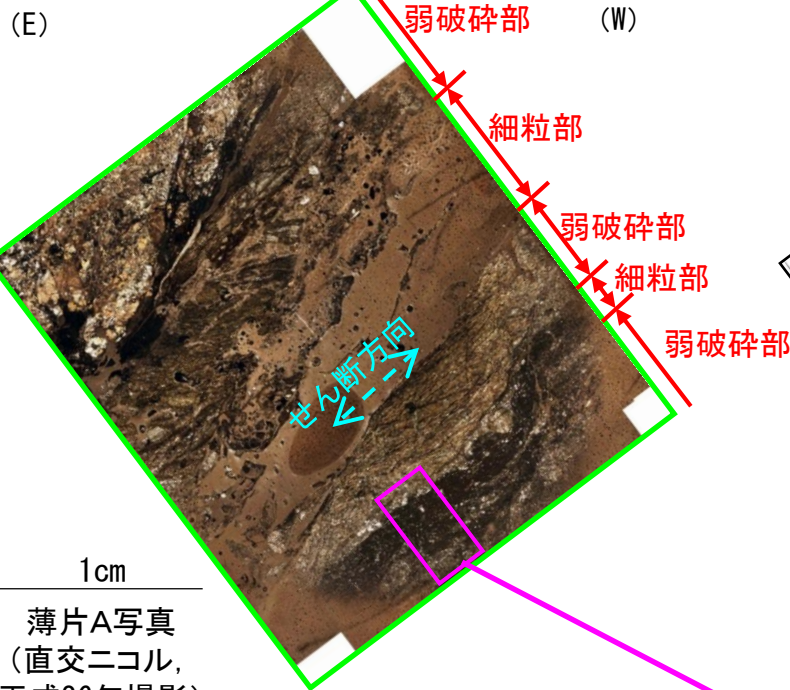
分析位置(展開図に対応)

Fa-3断層内物質の詳細分析② <研磨片観察結果>

- 細粒部は幅が数mm~1cm程度で直線性に乏しい。
- 細粒部の幅が広い薄片Aおよび細粒部の幅が狭くなる薄片Bにおいて観察を行い、Fa-3断層の活動性を評価する。



Fa-3断層内物質の詳細分析③ <薄片A観察結果>

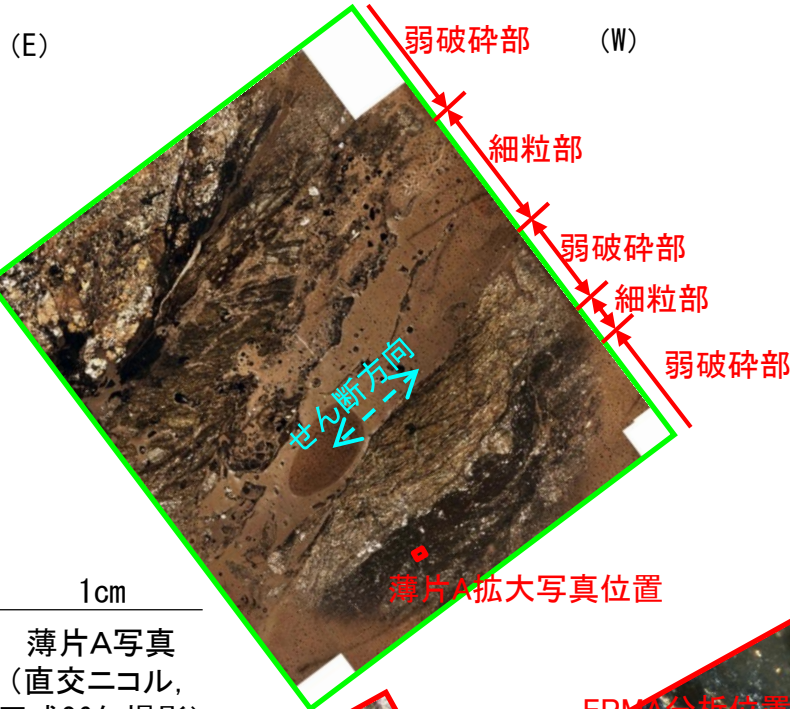


【Fa-3断層薄片Aの観察結果】

- 薄片観察によると、細粒部中に異常干渉色および黄色の干渉色を示す緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）が認められる。
- 幅数mm程度の細粒部を横断して緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていないことから、緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）生成後にFa-3断層は活動していない。
- Fa-3断層は地下深部における脆性破壊でカタクレーサイトとなっている。

*緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う

Fa-3断層内物質の詳細分析④ <薄片AのEPMA分析(1)>



薄片A写真
(直交ニコル,
平成26年撮影)

○薄片観察において異常干渉色を呈する脈状鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

【緑泥石の判断基準】

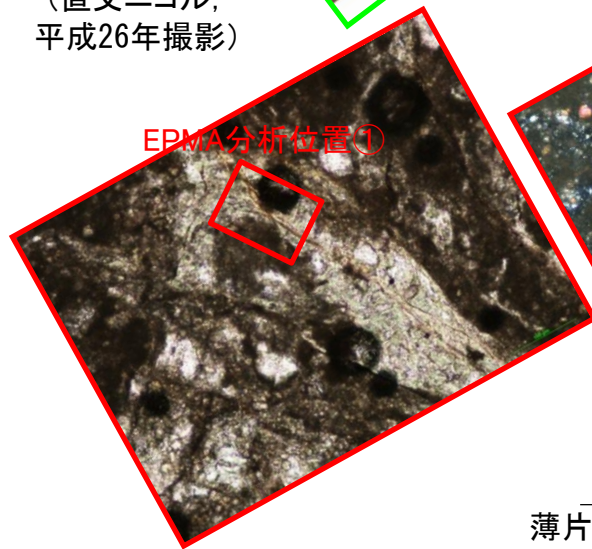
拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

SiO₂のMassが30%程度, Al₂O₃のMassが10~30%程度, FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度, TotalのMassが85%程度

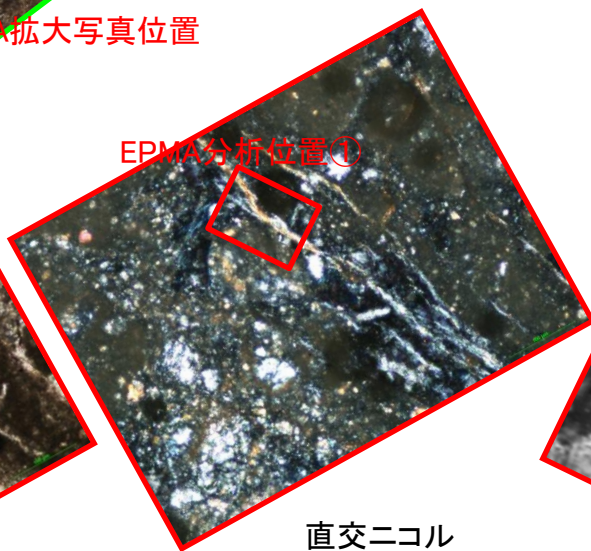
・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である
(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。

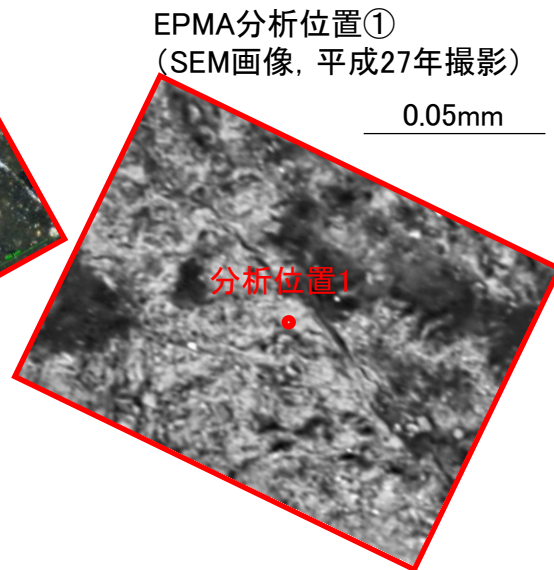
SiO₂のMassが30%程度, Al₂O₃のMassが10~30%程度, FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度, TotalのMassが85%程度



平行ニコル



直交ニコル

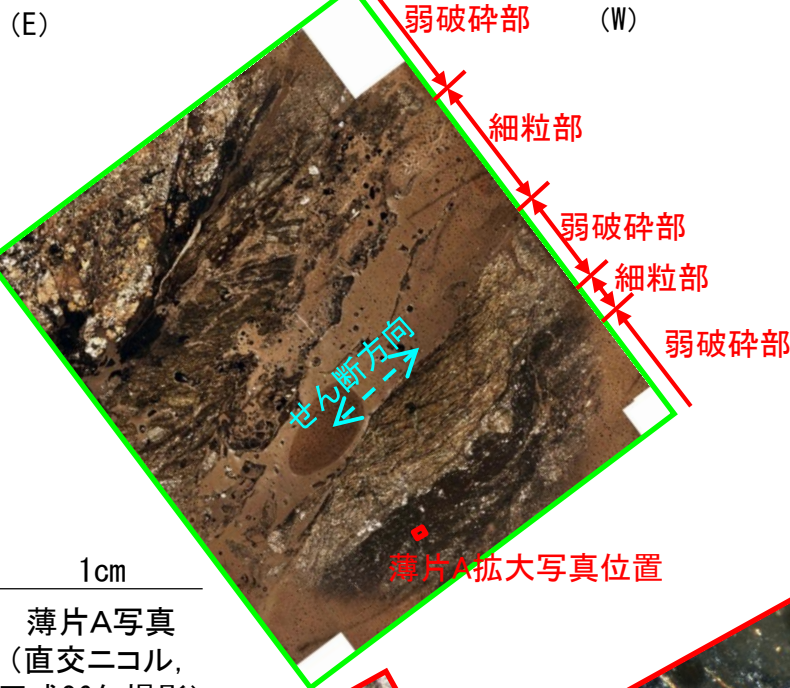


EPMA分析位置①
(SEM画像, 平成27年撮影)

0.1mm
薄片A拡大写真
(平成27年撮影)

Element	分析位置1	
	Mass (%)	Cation
SiO ₂	26.54	5.88
TiO ₂	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	14.59	3.81
FeO	22.31	4.13
MnO	0.54	0.10
MgO	18.93	6.25
CaO	0.12	0.03
Na ₂ O	0.08	0.03
K ₂ O	0.02	0.01
Total	83.14	20.24

Fa-3断層内物質の詳細分析⑤ <薄片AのEPMA分析(2)>



薄片A写真
(直交ニコル,
平成26年撮影)

○薄片観察において異常干渉色を呈する脈状鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

【緑泥石の判断基準】

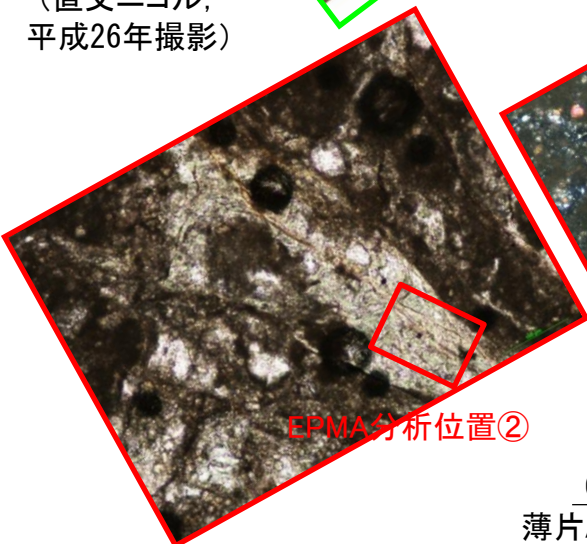
拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

SiO₂のMassが30%程度、Al₂O₃のMassが10~30%程度、FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度、TotalのMassが85%程度

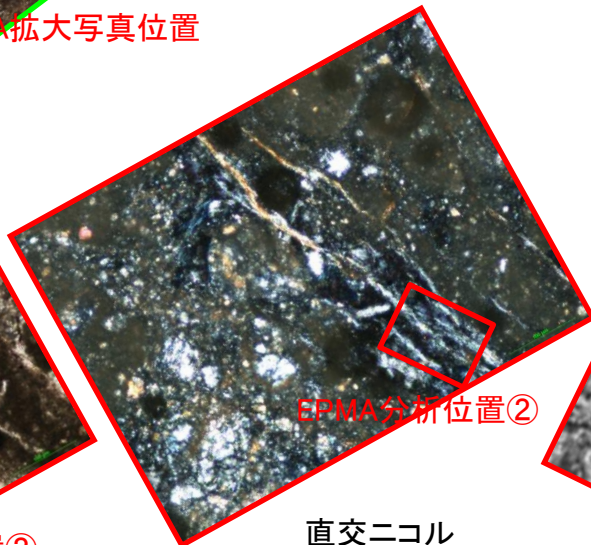
・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。

薄片A拡大写真位置



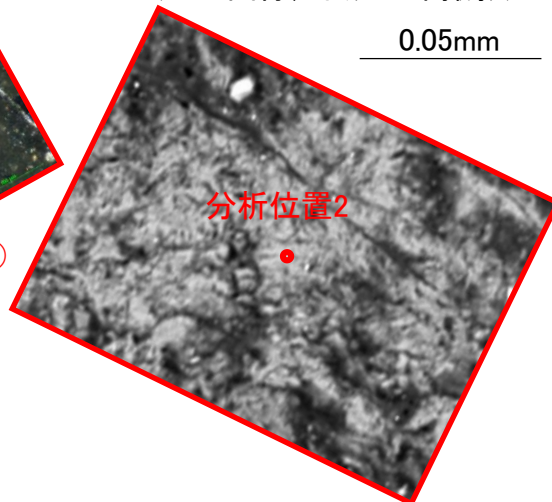
平行ニコル



直交ニコル

0.1mm
薄片A拡大写真
(平成27年撮影)

EPMA分析位置②
(SEM画像, 平成27年撮影)

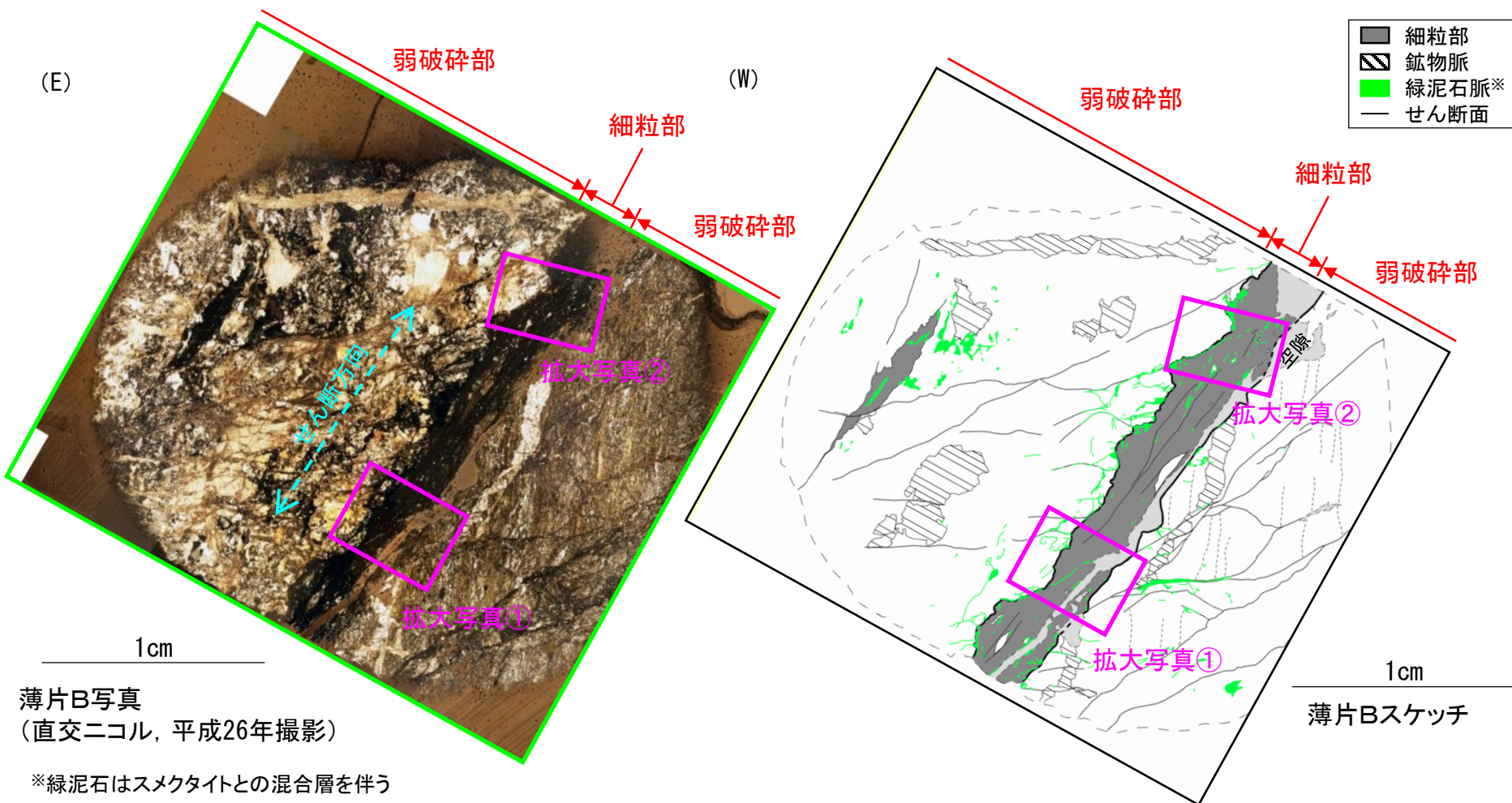


Element	分析位置2	
	Mass (%)	Cation
SiO ₂	30.62	6.25
TiO ₂	0.05	0.01
Al ₂ O ₃	16.69	4.01
FeO	23.43	4.00
MnO	0.59	0.10
MgO	17.52	5.33
CaO	0.16	0.03
Na ₂ O	0.06	0.02
K ₂ O	0.02	0.01
Total	89.13	19.75

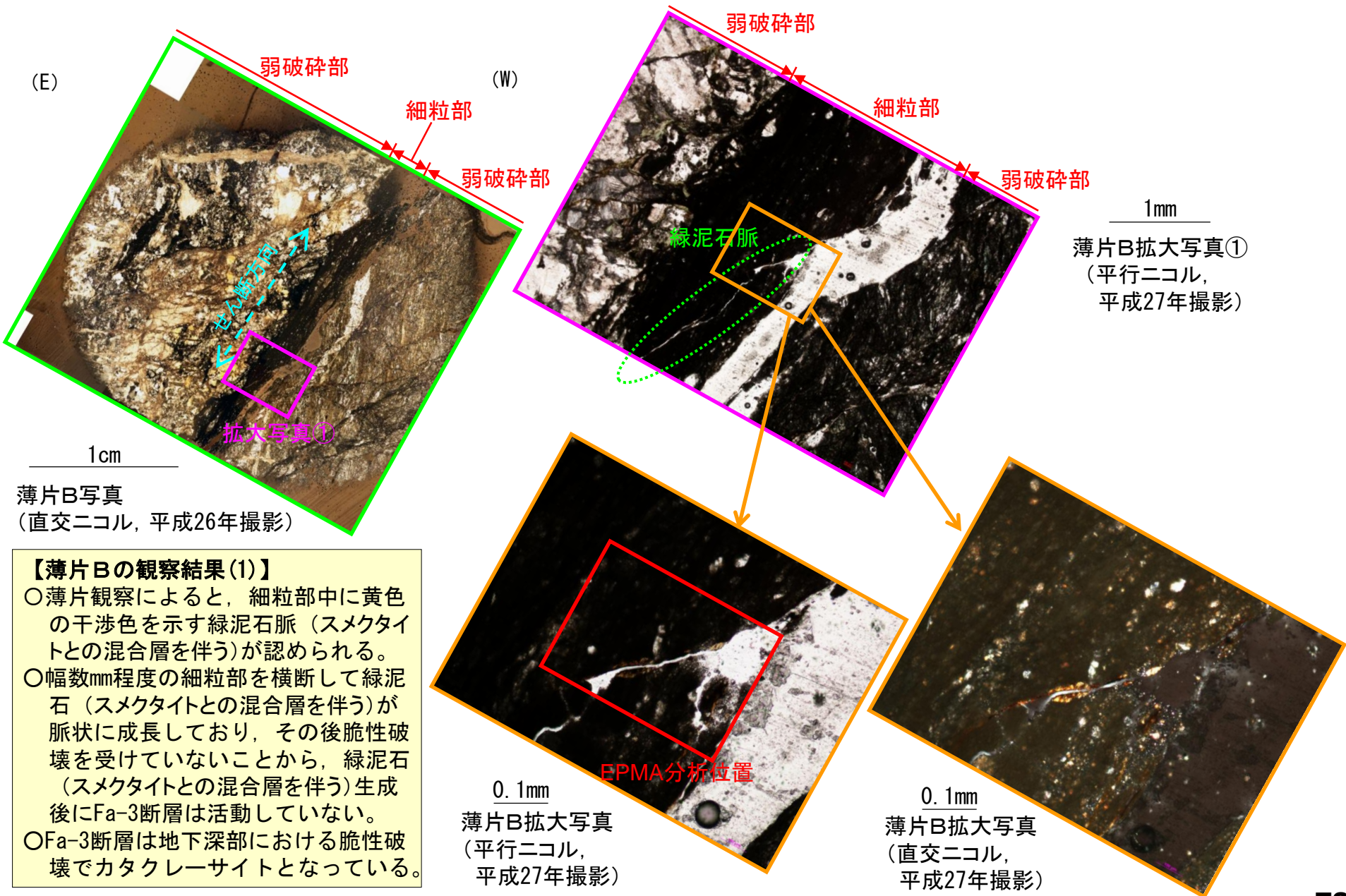
Fa-3断層内物質の詳細分析⑥ <薄片B観察結果(1)>

【Fa-3断層薄片Bの観察結果】

- 幅数mm程度の細粒部を横断して緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており，その後脆性破壊を受けていないことから，緑泥石(スメクタイトとの混合層を伴う)生成後にFa-3断層は活動していない。
- Fa-3断層は地下深部における脆性破壊でカタクレーサイトとなっている。



Fa-3断層内物質の詳細分析⑦ <薄片B観察結果(2)>



(E)

弱破碎部

細粒部

弱破碎部

せん断方向
拡大写真①

1cm

薄片B写真
(直交ニコル, 平成26年撮影)

(W)

弱破碎部

細粒部

弱破碎部

緑泥石脈

1mm

薄片B拡大写真①
(平行ニコル,
平成27年撮影)

【薄片Bの観察結果(1)】

- 薄片観察によると、細粒部中に黄色の干渉色を示す緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）が認められる。
- 幅数mm程度の細粒部を横断して緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていないことから、緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）生成後にFa-3断層は活動していない。
- Fa-3断層は地下深部における脆性破壊でカタクレーサイトとなっている。

0.1mm

薄片B拡大写真
(平行ニコル,
平成27年撮影)

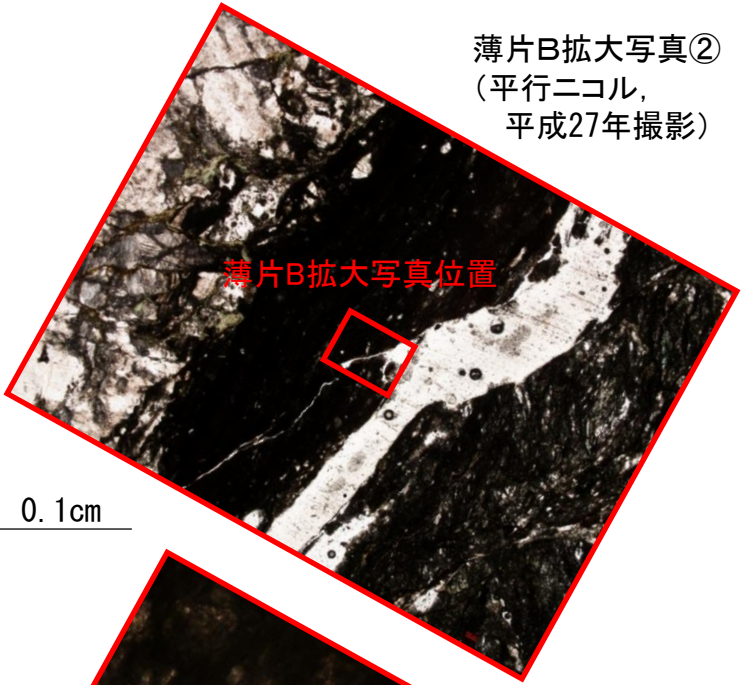
EPMA分析位置

0.1mm

薄片B拡大写真
(直交ニコル,
平成27年撮影)

Fa-3断層内物質の詳細分析⑧ <薄片BのEPMA分析(1)>

薄片B拡大写真②
(平行ニコル,
平成27年撮影)



薄片B拡大写真位置

0.1cm

○薄片観察において干渉色が黄色を呈する脈状鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

【緑泥石の判断基準】

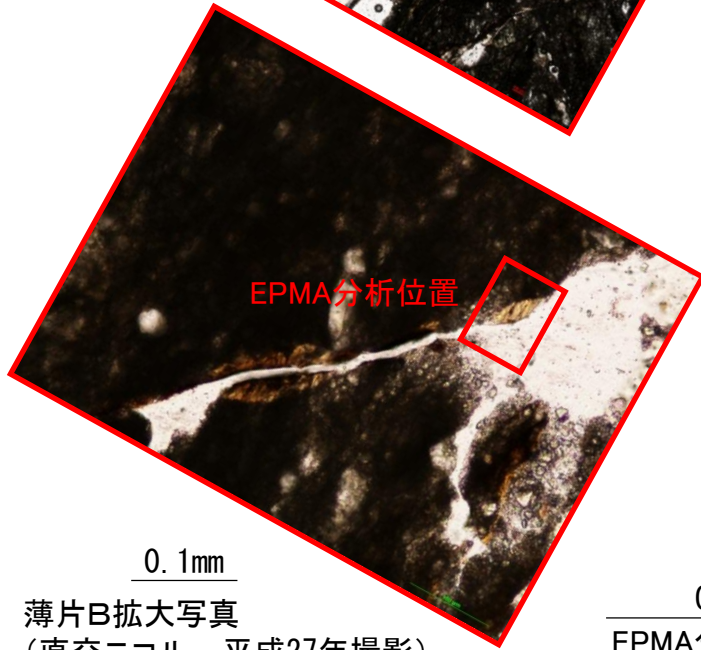
拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

SiO₂のMassが30%程度、Al₂O₃のMassが10~30%程度、FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度、TotalのMassが85%程度

・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

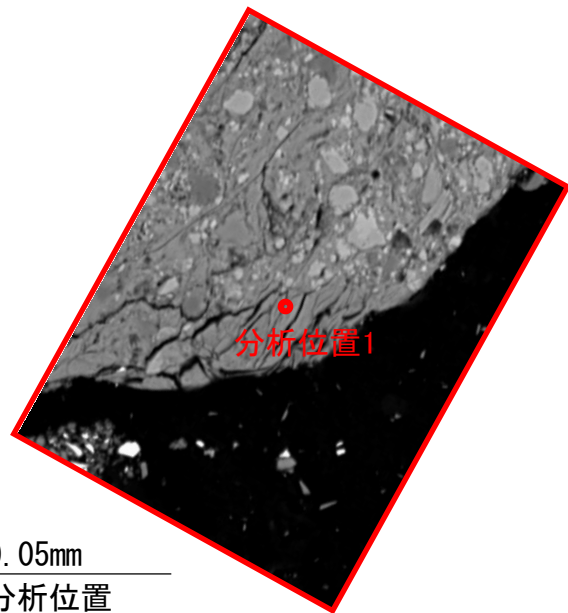
以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。

EPMA分析位置



0.1mm

薄片B拡大写真
(直交ニコル, 平成27年撮影)



分析位置1

0.05mm

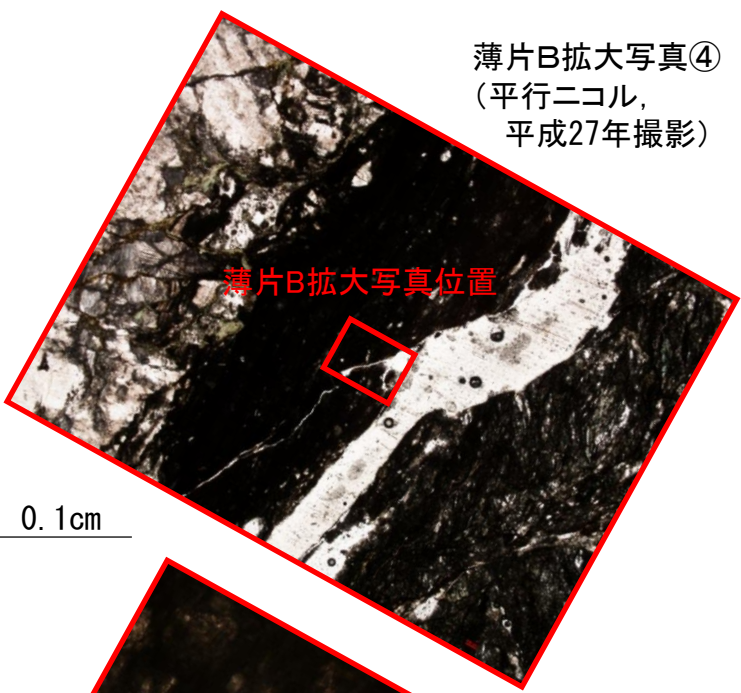
EPMA分析位置
(SEM画像, 平成27年撮影)

Element	分析位置1	
	Mass (%)	Cation
SiO ₂	32.22	6.80
TiO ₂	0.06	0.00
Al ₂ O ₃	12.08	3.00
FeO	20.49	3.62
MnO	0.33	0.06
MgO	19.18	6.03
CaO	0.69	0.16
Na ₂ O	0.05	0.02
K ₂ O	0.09	0.02
Total	85.17	19.71

W. A. Deer, R. A. Howie, J. Zussman, 1996, An Introduction to the Rock-Forming Minerals .

Fa-3断層内物質の詳細分析⑨ <薄片BのEPMA分析(2)>

薄片B拡大写真④
(平行ニコル,
平成27年撮影)



薄片B拡大写真位置

0.1cm

○薄片観察において干渉色が黄色を呈する脈状鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

【緑泥石の判断基準】

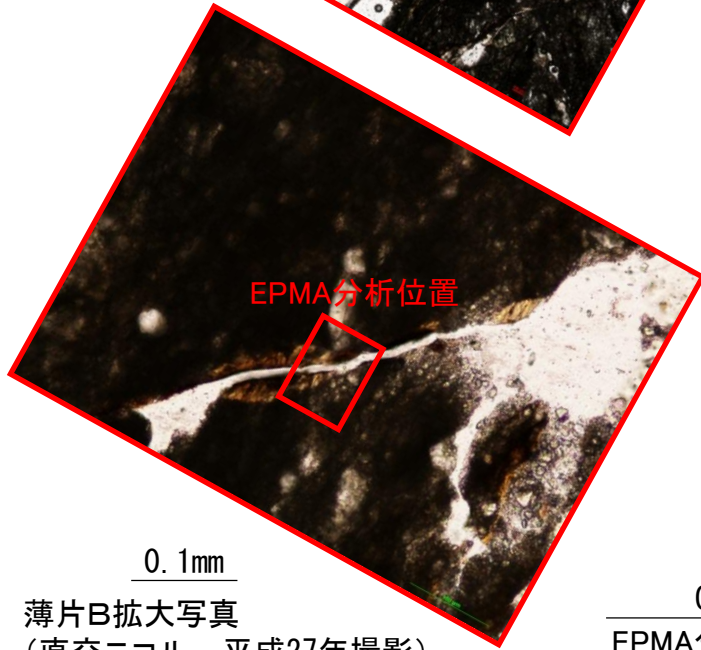
拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

SiO₂のMassが30%程度、Al₂O₃のMassが10~30%程度、FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度、TotalのMassが85%程度

・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である
(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。

EPMA分析位置

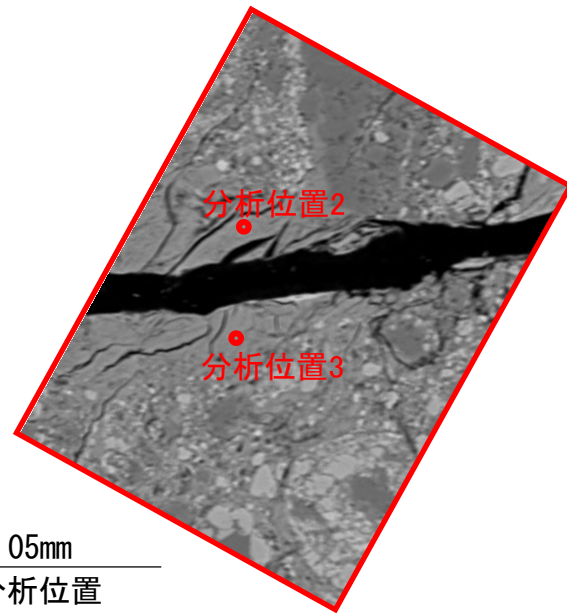


0.1mm

薄片B拡大写真
(直交ニコル, 平成27年撮影)

分析位置2

分析位置3



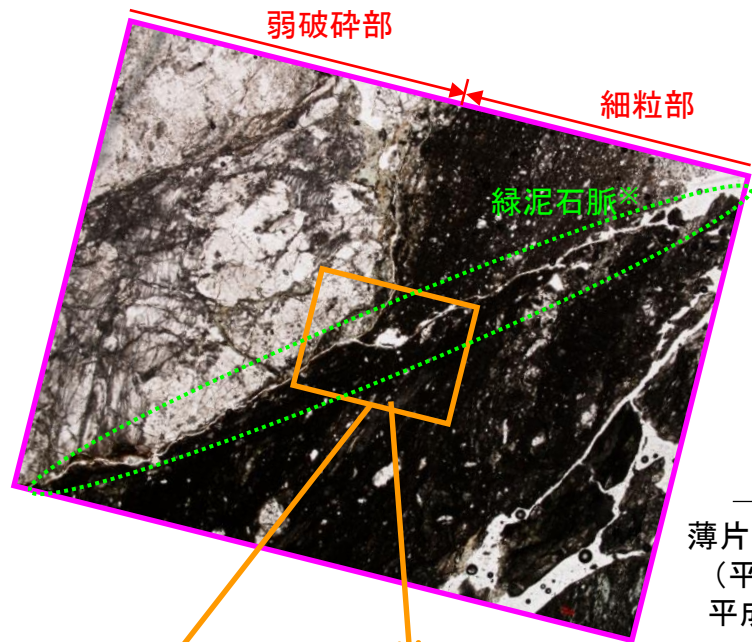
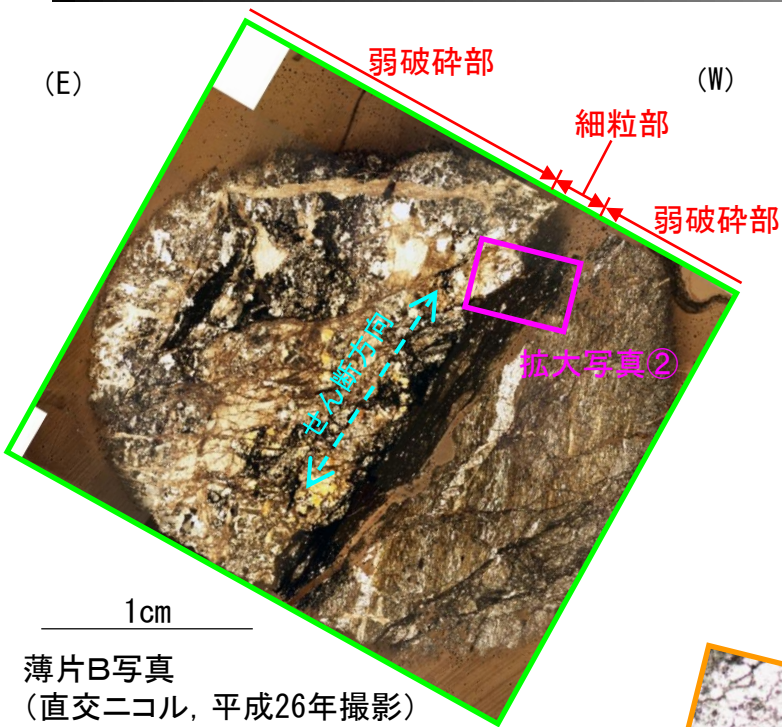
0.05mm

EPMA分析位置
(SEM画像, 平成27年撮影)

Element	分析位置2		分析位置3	
	Mass (%)	Cation	Mass (%)	Cation
SiO ₂	29.78	6.55	31.94	6.77
TiO ₂	0.02	0.00	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	11.87	3.07	12.58	3.14
FeO	20.60	3.79	20.69	3.67
MnO	0.46	0.09	0.38	0.07
MgO	19.22	6.30	18.63	5.89
CaO	0.45	0.11	0.46	0.10
Na ₂ O	0.04	0.02	0.02	0.01
K ₂ O	0.05	0.01	0.09	0.03
Total	82.48	19.93	84.81	19.67

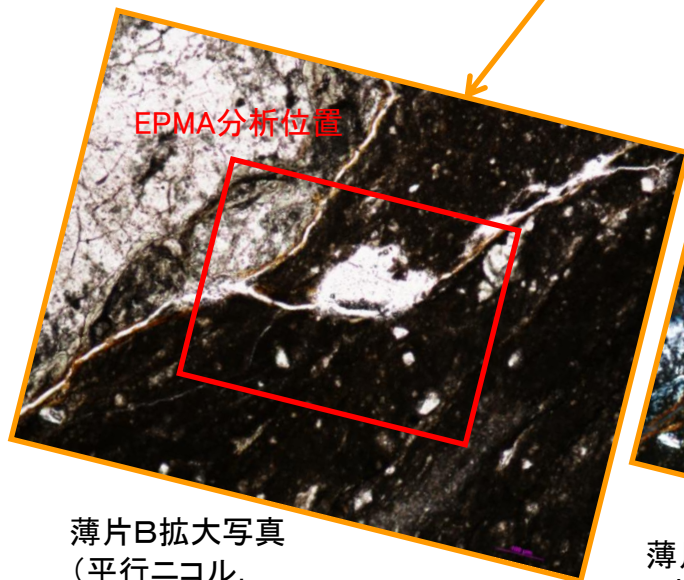
W. A. Deer, R. A. Howie, J. Zussman, 1996, An Introduction to the Rock-Forming Minerals .

Fa-3断層内物質の詳細分析⑩ <薄片B観察結果(3)>



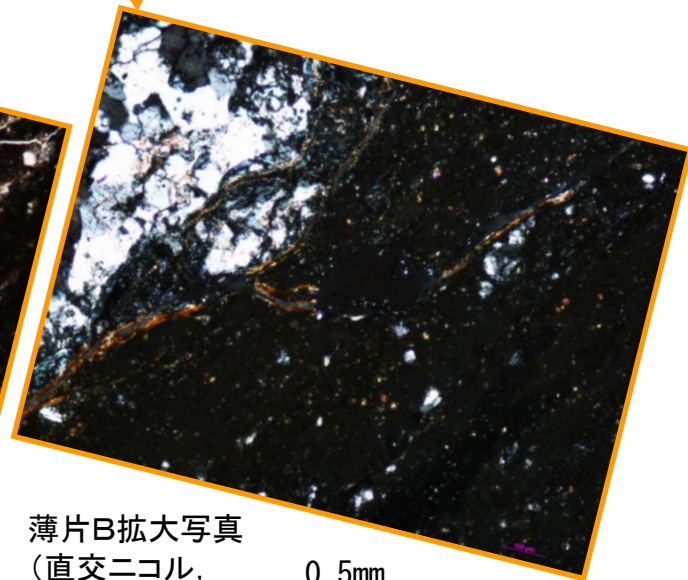
※緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う

1mm
薄片B拡大写真②
(平行ニコル,
平成27年撮影)



薄片B拡大写真
(平行ニコル,
平成27年撮影)

0.5mm



薄片B拡大写真
(直交ニコル,
平成27年撮影)

0.5mm

【薄片Bの観察結果(2)】

- 薄片観察によると、細粒部中に黄色の干渉色を示す緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）が認められる。
- 幅数mm程度の細粒部を横断して緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていないことから、緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）生成後にFa-3断層は活動していない。
- Fa-3断層は地下深部における脆性破壊でカタクレサイトとなっている。

Fa-3断層内物質の詳細分析⑪ <薄片BのEPMA分析(3)>

○薄片観察において干渉色が黄色を呈する脈状鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

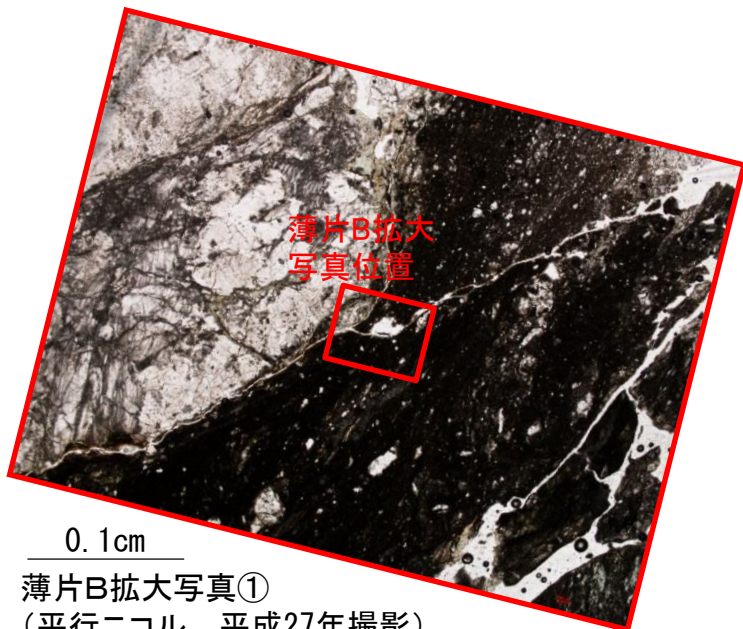
【緑泥石の判断基準】

拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

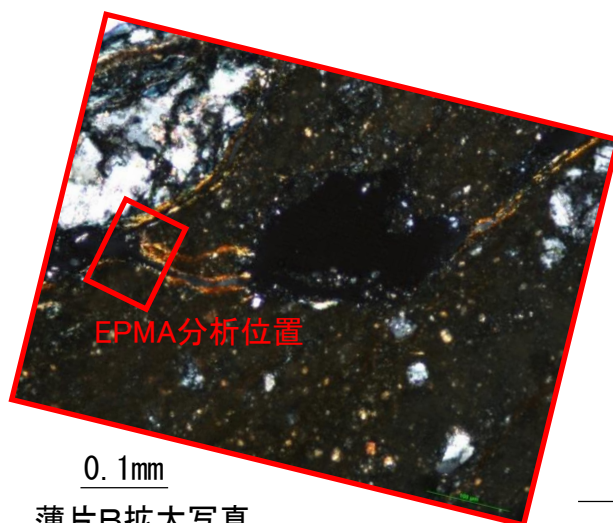
SiO₂のMassが30%程度、Al₂O₃のMassが10~30%程度、FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度、TotalのMassが85%程度

・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

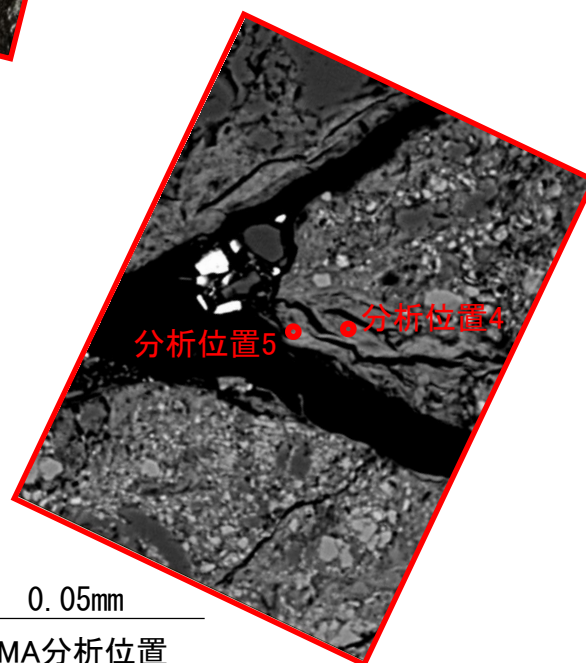
以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。



薄片B拡大写真①
(平行ニコル, 平成27年撮影)



薄片B拡大写真
(直交ニコル, 平成27年撮影)



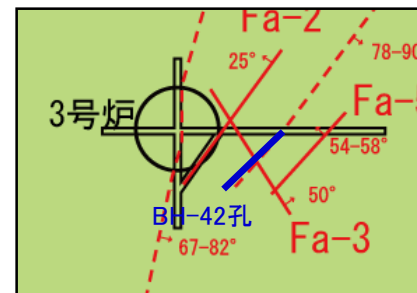
EPMA分析位置
(SEM画像, 平成27年撮影)

Element	分析位置4		分析位置5	
	Mass (%)	Cation	Mass (%)	Cation
SiO ₂	35.55	7.45	34.30	7.40
TiO ₂	0.03	0.00	0.03	0.01
Al ₂ O ₃	9.79	2.42	8.43	2.15
FeO	20.37	3.57	27.13	4.90
MnO	0.30	0.05	0.24	0.04
MgO	17.52	5.47	14.39	4.63
CaO	1.46	0.33	1.41	0.33
Na ₂ O	0.13	0.05	0.15	0.06
K ₂ O	0.26	0.07	0.24	0.07
Total	85.40	19.40	86.32	19.58

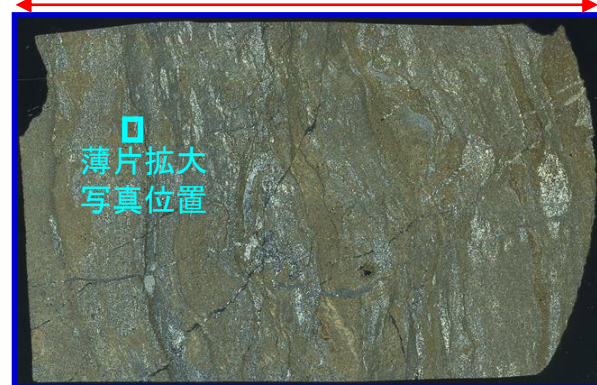
Fa-3断層内物質の詳細分析⑫ <周辺母岩のEPMA分析(1)>

BH-42孔コア写真深度17m~19m(S58年取得・撮影)

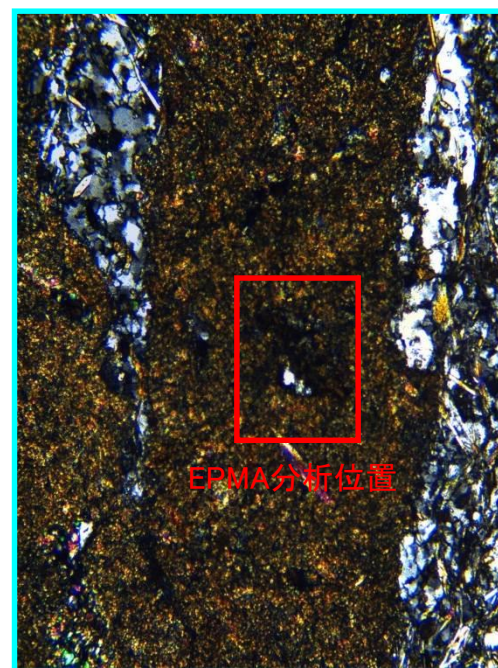
母岩分析位置①



健岩

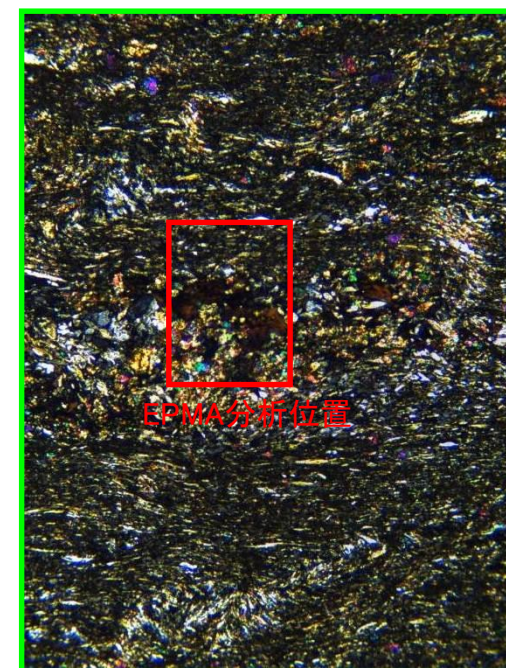


母岩分析位置①薄片写真
(直交ニコル, 平成27年撮影)



0.1mm 母岩分析位置①薄片拡大写真
(直交ニコル, 平成27年撮影)

母岩分析位置②



0.1mm 母岩分析位置②薄片拡大写真
(直交ニコル, 平成27年撮影)

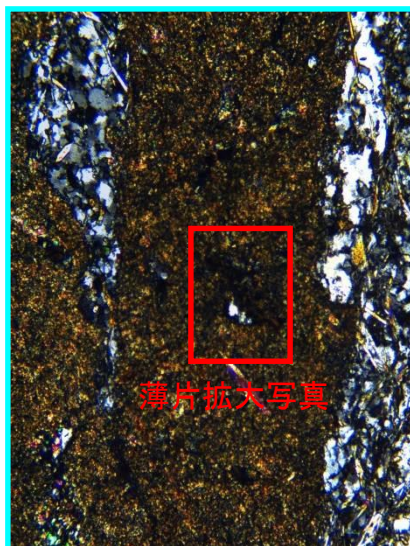
健岩



母岩分析位置②薄片写真
(直交ニコル, 平成27年撮影)

○Fa-3断層が通過するBH-42孔において、Fa-3断層通過部周辺の母岩において片理面に沿う緑泥石のEPMA分析を実施した。

Fa-3断層内物質の詳細分析⑬ <周辺母岩のEPMA分析(2)>



薄片拡大写真

0.1mm

母岩分析位置①
薄片拡大写真
(直交ニコル,
平成27年撮影)

○薄片観察において緑泥石と同定した鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

【緑泥石の判断基準】

拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

SiO₂のMassが30%程度、Al₂O₃のMassが10~30%程度、FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度、TotalのMassが85%程度

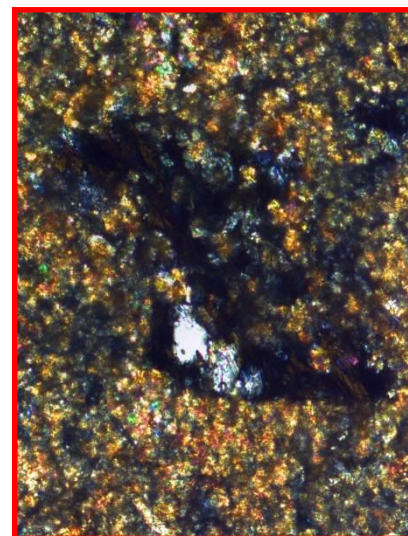
・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である
(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。



EPMA分析位置

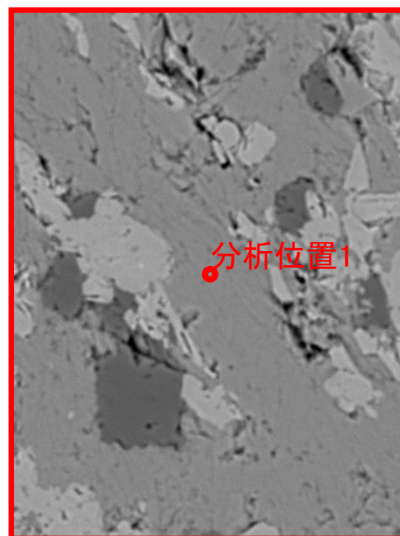
平行ニコル



直交ニコル

0.1mm

薄片拡大写真(平成27年撮影)



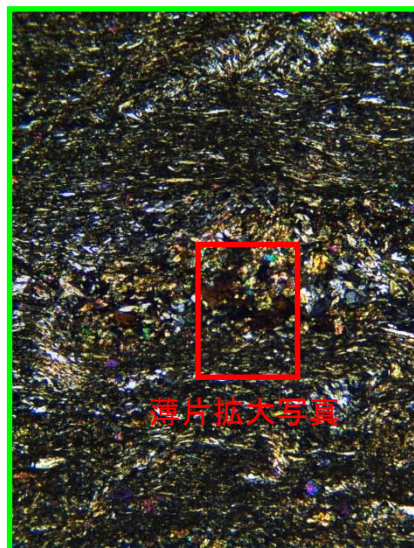
分析位置1

0.05mm

EPMA分析位置
(SEM画像,
平成27年撮影)

Element	分析位置1	
	Mass (%)	Cation
SiO ₂	29.43	6.06
TiO ₂	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	16.99	4.13
FeO	22.60	3.89
MnO	0.45	0.08
MgO	18.51	5.68
CaO	0.11	0.03
Na ₂ O	0.00	0.00
K ₂ O	0.04	0.01
Total	88.13	19.88

Fa-3断層内物質の詳細分析⑭ <周辺母岩のEPMA分析(3)>



薄片拡大写真

0.1mm

母岩分析位置②
薄片拡大写真
(直交ニコル,
平成27年撮影)

○薄片観察において緑泥石と同定した鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

【緑泥石の判断基準】

拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

SiO₂のMassが30%程度, Al₂O₃のMassが10~30%程度, FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度, TotalのMassが85%程度

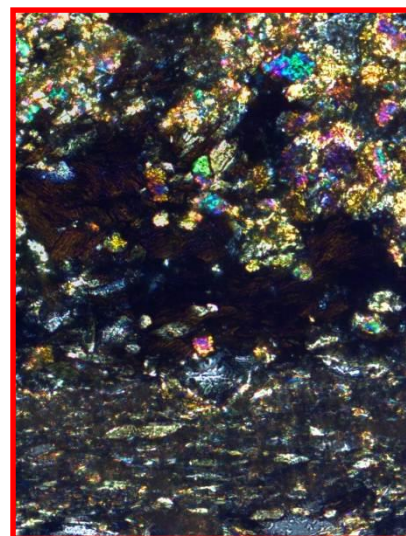
・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である
(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。



EPMA分析位置

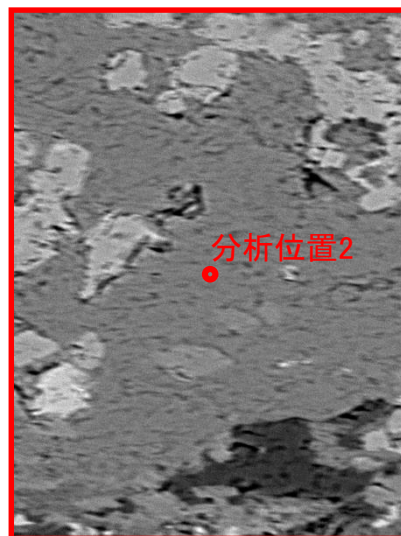
平行ニコル



直交ニコル

0.1mm

薄片拡大写真(平成27年撮影)



分析位置2

0.05mm

EPMA分析位置
(SEM画像,
平成27年撮影)

Element	分析位置2	
	Mass (%)	Cation
SiO ₂	27.24	5.66
TiO ₂	0.04	0.01
Al ₂ O ₃	18.54	4.54
FeO	23.83	4.14
MnO	0.48	0.09
MgO	18.09	5.61
CaO	0.04	0.01
Na ₂ O	0.01	0.00
K ₂ O	0.00	0.00
Total	88.28	20.06

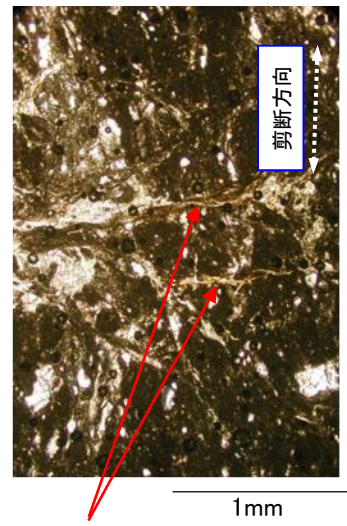
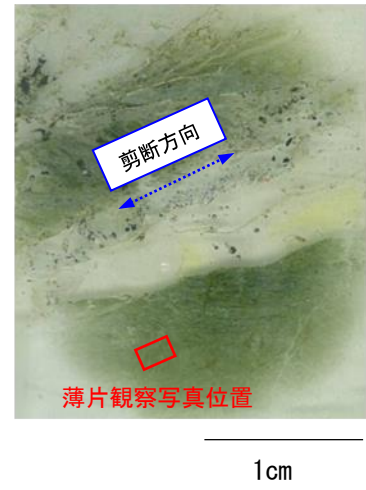
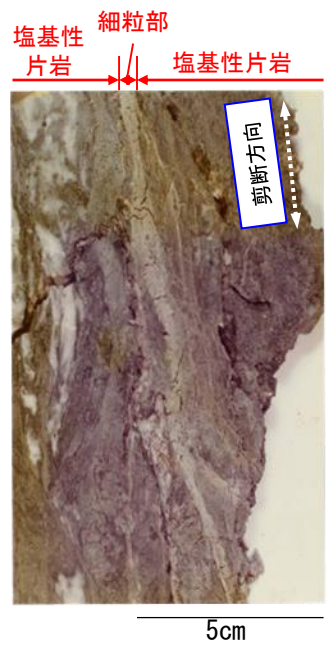
Fa-3断層内物質の詳細分析⑮ <活断層との比較>

試料接写写真

薄片写真

薄片観察写真(平行ニコル)

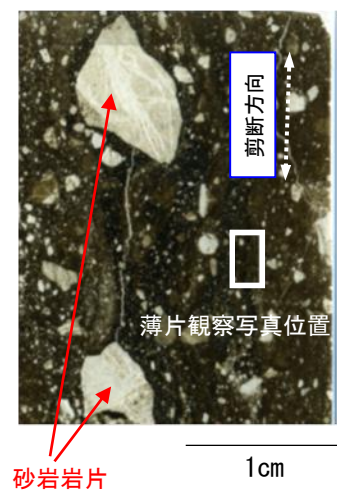
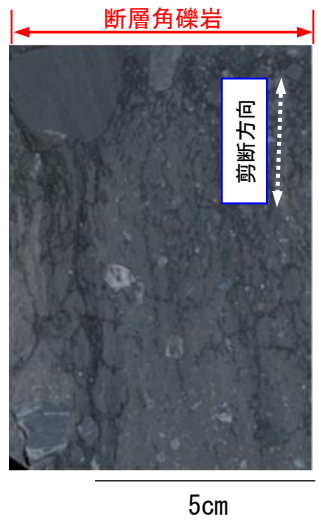
Fa-3断層



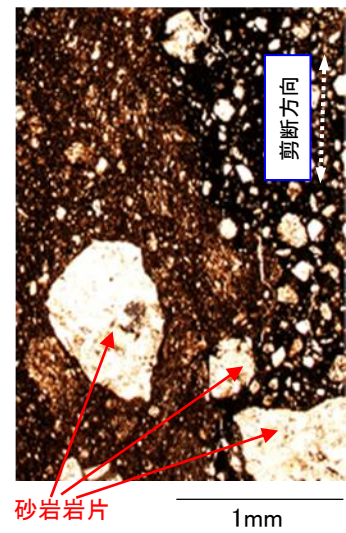
○Fa-3断層は細粒の破碎岩片と粘土鉱物で構成され、細粒部を横断して緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長し、地下深部での生成を示す。

緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）

中央構造線断層帯 (川上断層、湯谷口地点)



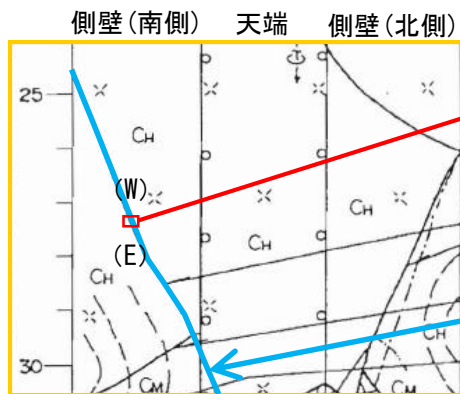
砂岩岩片



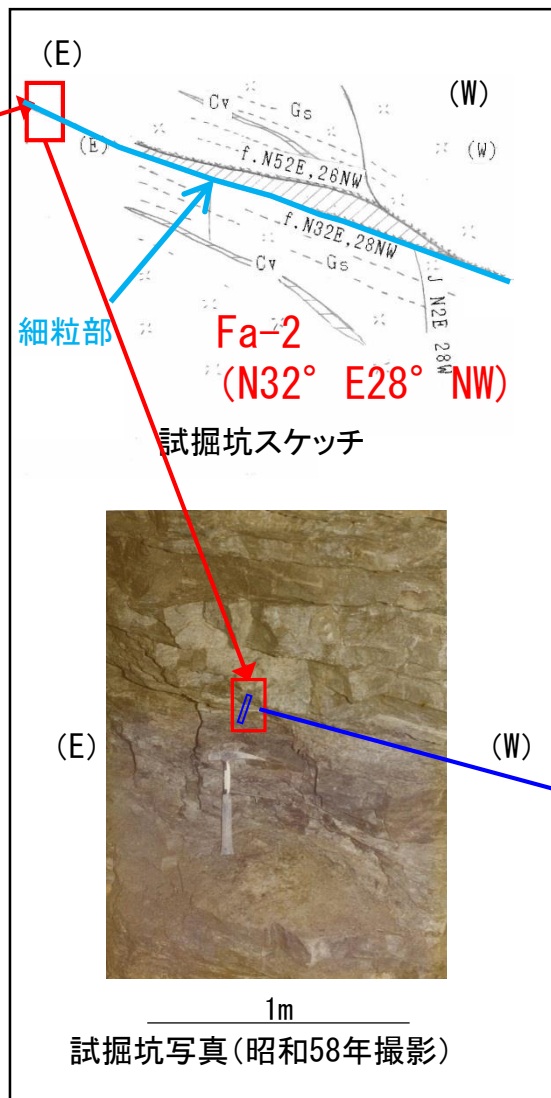
砂岩岩片

○川上断層は地下浅部の脆性破壊に特徴的な淘汰の悪い角礫状の砂岩岩片と細粒基質で構成され、地下深部での生成を示す鉱物脈の成長や塑性変形は認められない。

Fa-2断層内物質の詳細分析① <研磨片作成位置>



試掘坑展開図



試掘坑写真(昭和58年撮影)

○Fa-3断層とFa-2断層は切り切られの
関係にあることから、Fa-2断層につ
いても活動性評価を行う。
○主せん断面と対応する細粒部付近を
分析する。

(S) ※試掘坑壁面奥側方向



※試掘坑壁面
手前方向

塩基性片岩

塩基性片岩

細粒部

破碎部

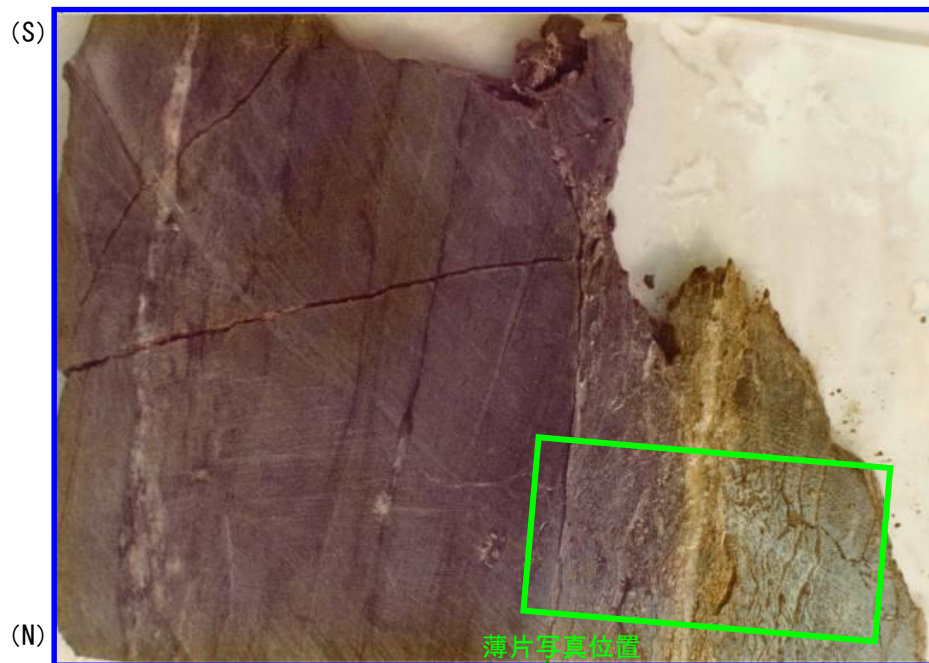
5cm

走向方向研磨片写真(昭和58年撮影)

： 分析位置(展開図に対応)

Fa-2断層内物質の詳細分析② <研磨片観察結果>

○主せん断面と対応する細粒部は幅数mm程度である。



塩基性片岩

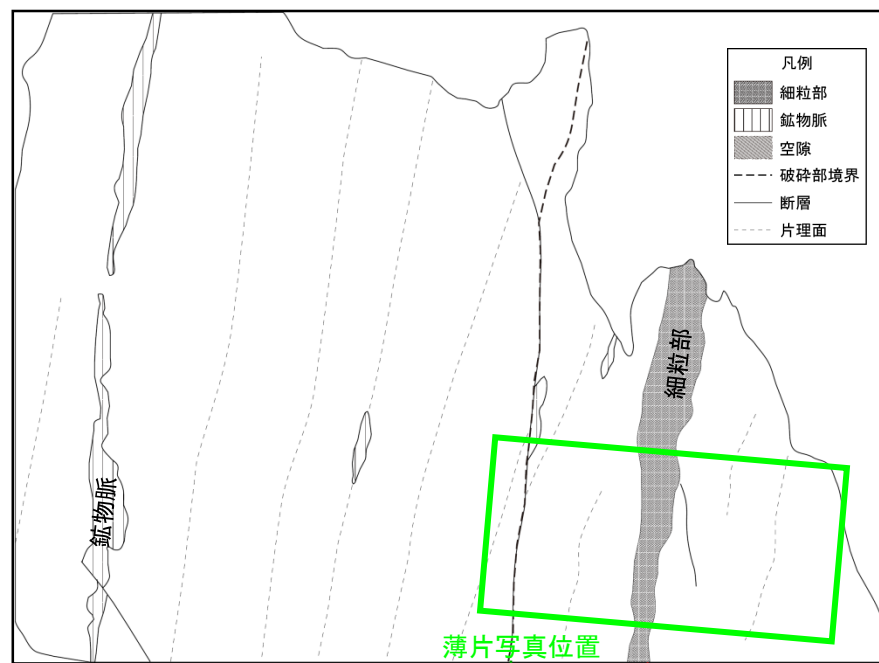
細粒部

塩基性片岩

破碎部

5cm

走向方向研磨片写真
(昭和58年撮影)



塩基性片岩

細粒部

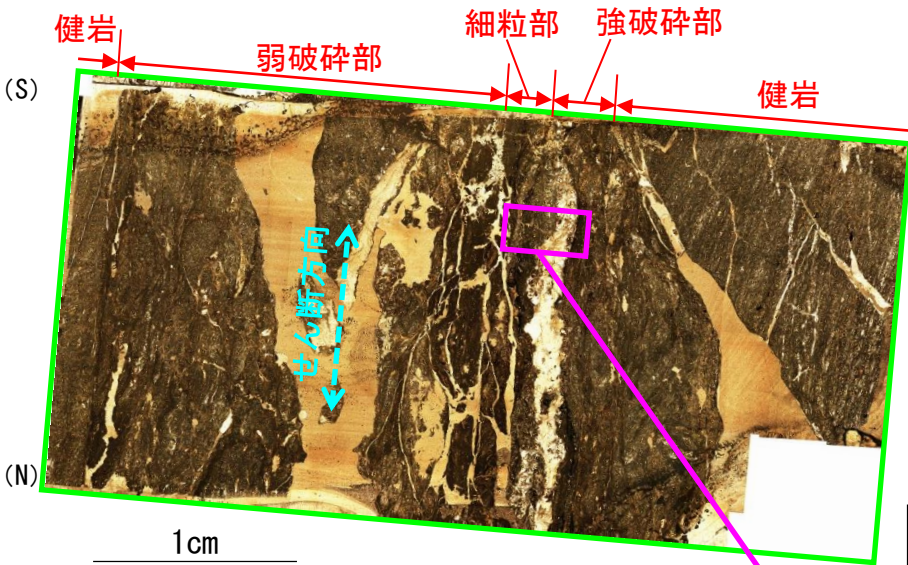
塩基性片岩

破碎部

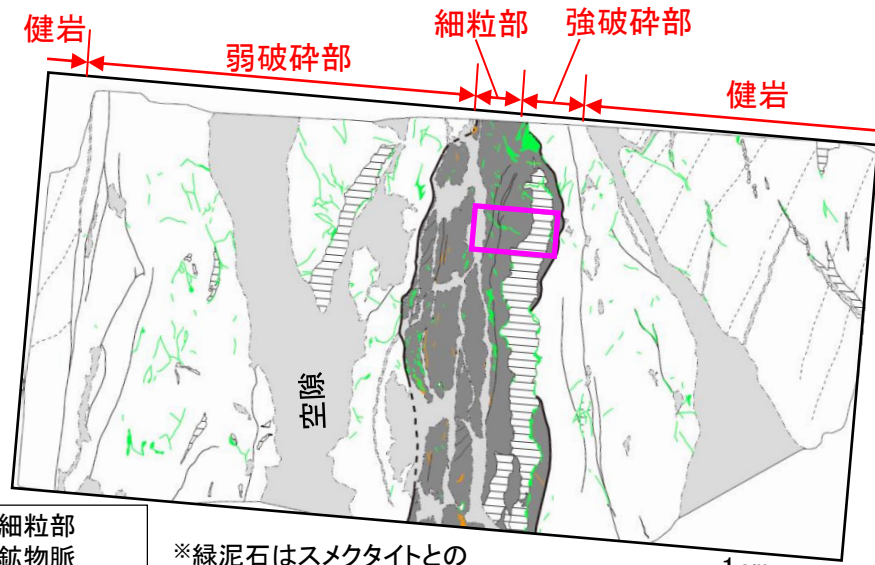
5cm

研磨片スケッチ

Fa-2断層内物質の詳細分析③ <薄片観察結果>



薄片写真(直交ニコル, 平成26年撮影)



- 細粒部
- ▨ 鉬物脈
- 緑泥石脈※
- 変質鉬物脈
- せん断面

※緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う

薄片スケッチ

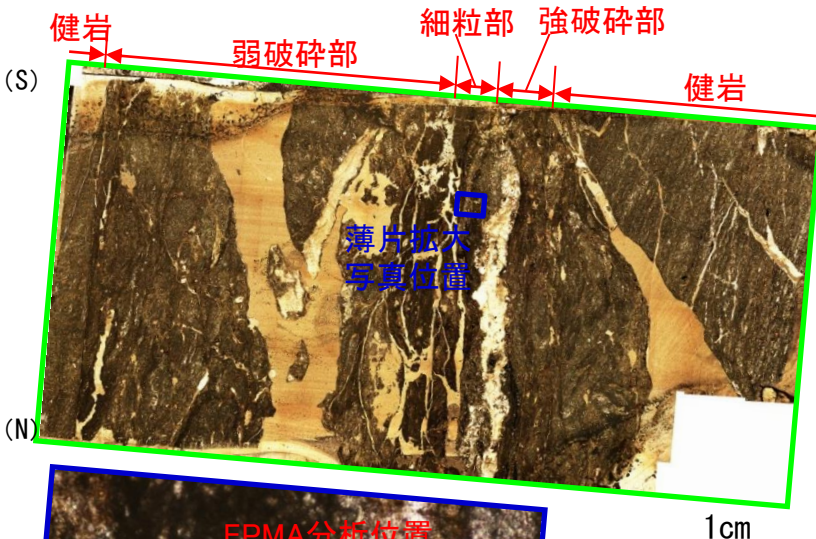
【Fa-2断層の分析結果】

- 薄片観察によると、細粒部中に異常干渉色および黄色の干渉色を示す緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）が認められる。
- 幅数mm程度の細粒部に沿って石英脈・方解石脈が成長するとともに、細粒部を横断して緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていないことから、石英・方解石および緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）生成後にFa-2断層は活動していない。
- Fa-2断層は地下深部における脆性破壊でカクレーサイトとなっている。

薄片拡大写真(直交ニコル, 平成26年撮影)



Fa-2断層内物質の詳細分析④ <EPMA分析(1)>



○薄片観察において干渉色が黄色を示す脈状鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

【緑泥石の判断基準】

拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

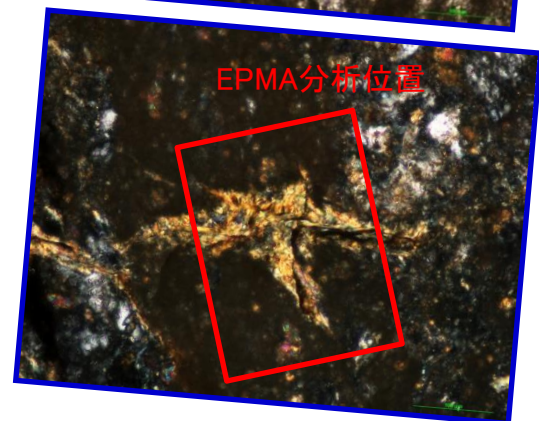
SiO₂のMassが30%程度, Al₂O₃のMassが10~30%程度, FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度, TotalのMassが85%程度

・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である
(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。



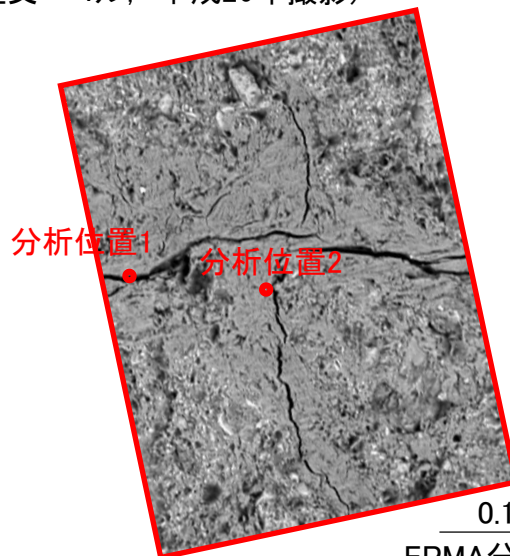
薄片写真(直交ニコル, 平成26年撮影)



平行ニコル

直交ニコル

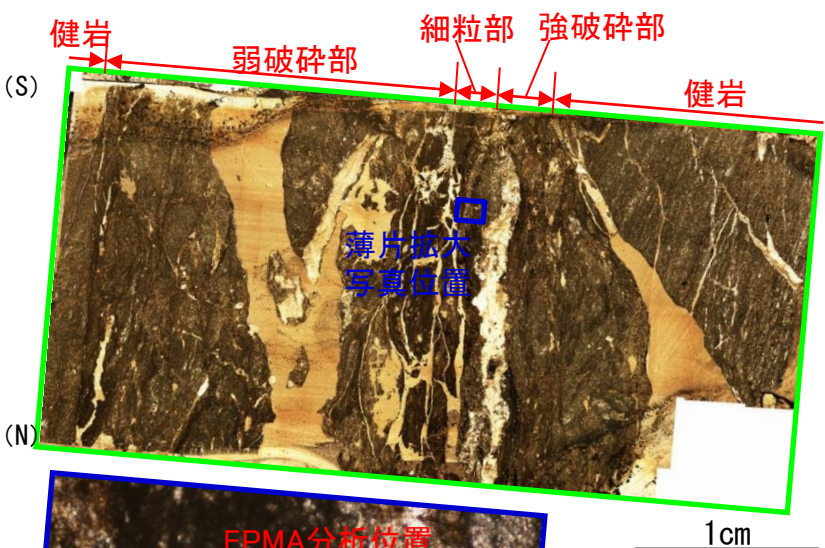
0.1mm
薄片拡大写真
(平成27年撮影)



0.1mm
EPMA分析位置
(SEM画像, 平成27年撮影)

Element	分析位置1		分析位置2	
	Mass (%)	Cation	Mass (%)	Cation
SiO ₂	32.40	6.87	32.59	7.10
TiO ₂	0.01	0.00	0.81	0.13
Al ₂ O ₃	12.57	3.14	12.66	3.25
FeO	21.56	3.82	19.39	3.53
MnO	0.31	0.06	0.29	0.05
MgO	17.45	5.52	14.91	4.84
CaO	0.55	0.13	0.72	0.17
Na ₂ O	0.04	0.01	0.05	0.02
K ₂ O	0.08	0.02	0.39	0.11
Total	84.97	19.57	81.81	19.21

Fa-2断層内物質の詳細分析⑤ <EPMA分析(2)>



○薄片観察において干渉色が黄色を示す脈状鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

【緑泥石の判断基準】
 拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
 ・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

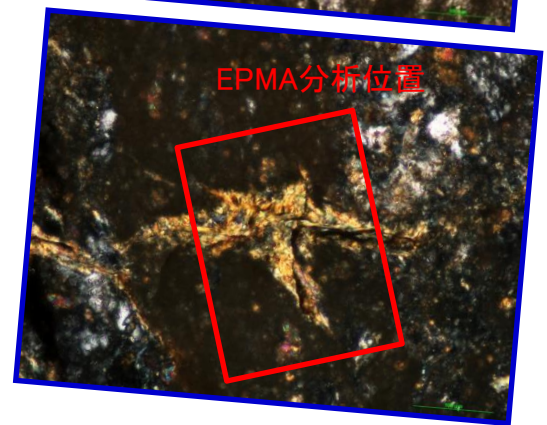
SiO₂のMassが30%程度, Al₂O₃のMassが10~30%程度, FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度, TotalのMassが85%程度

・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である (Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。



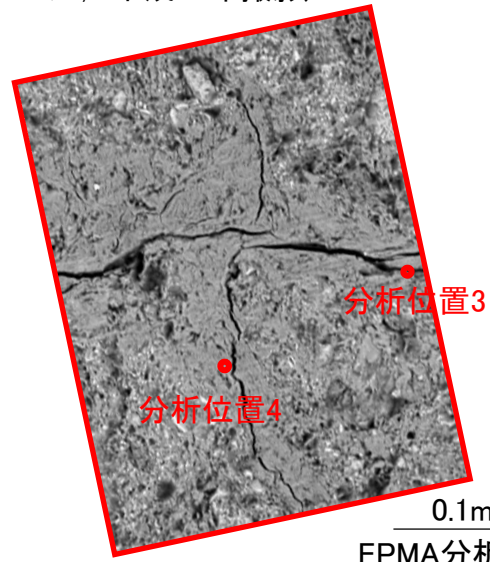
薄片写真(直交ニコル, 平成26年撮影)



平行ニコル

直交ニコル

0.1mm
薄片拡大写真
(平成27年撮影)

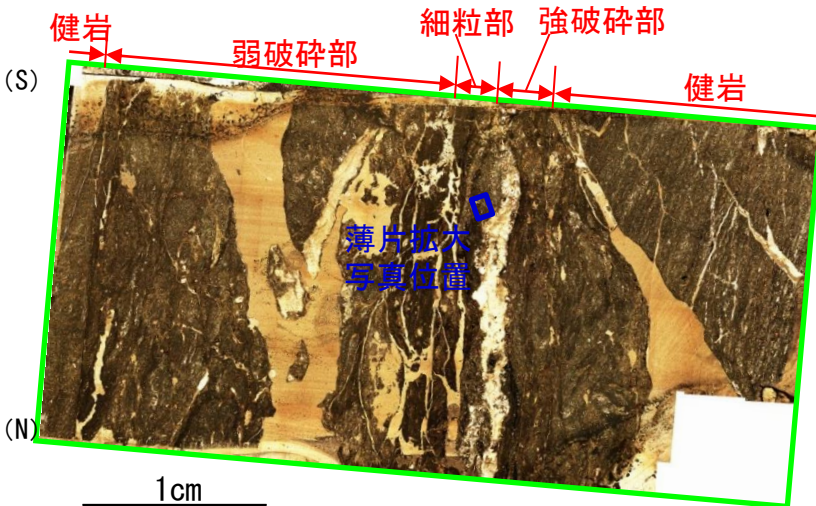


0.1mm
EPMA分析位置
(SEM画像, 平成27年撮影)

Element	分析位置3		分析位置4	
	Mass (%)	Cation	Mass (%)	Cation
SiO ₂	31.38	6.86	33.03	7.10
TiO ₂	0.03	0.01	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	11.57	2.98	12.48	3.16
FeO	20.31	3.72	19.35	3.48
MnO	0.30	0.05	0.20	0.04
MgO	17.98	5.86	16.48	5.28
CaO	0.49	0.12	1.03	0.24
Na ₂ O	0.09	0.04	0.07	0.03
K ₂ O	0.12	0.03	0.13	0.04
Total	82.27	19.67	82.79	19.35

W. A. Deer, R. A. Howie, J. Zussman, 1996, An Introduction to the Rock-Forming Minerals .

Fa-2断層内物質の詳細分析⑥ <EPMA分析(3)>



薄片写真(直交ニコル, 平成26年撮影)

○薄片観察において異常干渉色を示す脈状鉱物のEPMA分析を行い、緑泥石の組成と比較する。

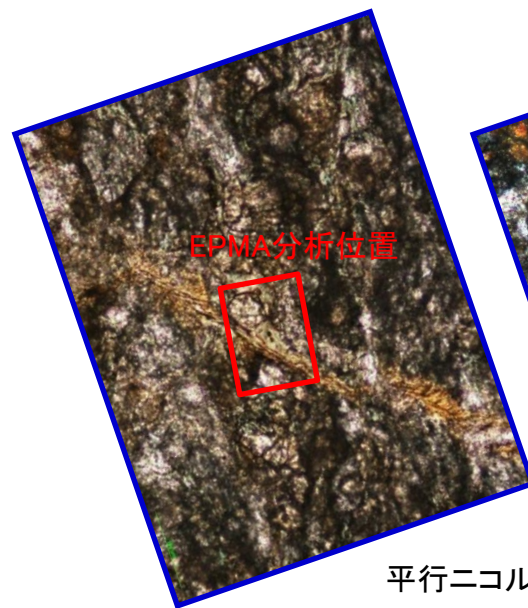
【緑泥石の判断基準】

拡大画像で脈状鉱物の分布範囲を正確に把握して分析した結果として、
・Mass(%)が既存の文献(Deer et al.(1996))に示される分析結果と概ね整合的であること

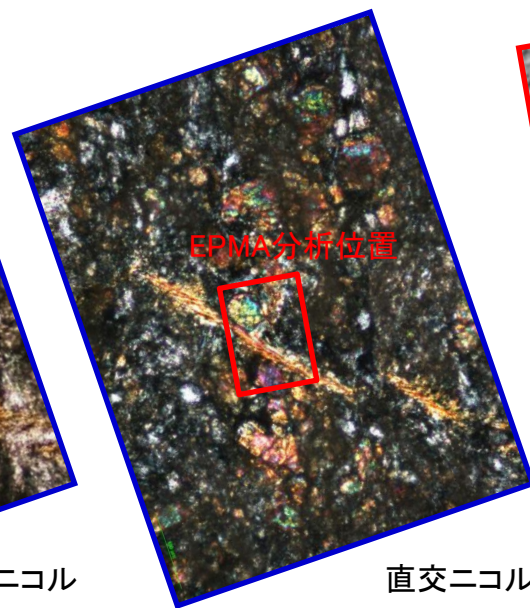
SiO₂のMassが30%程度, Al₂O₃のMassが10~30%程度, FeOおよびMgOの合計のMassが30~40%程度, TotalのMassが85%程度

・測定した陽イオン数が緑泥石の化学組成の理想式である(Mg,Fe,Al)₁₂(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₆とほぼ一致すること

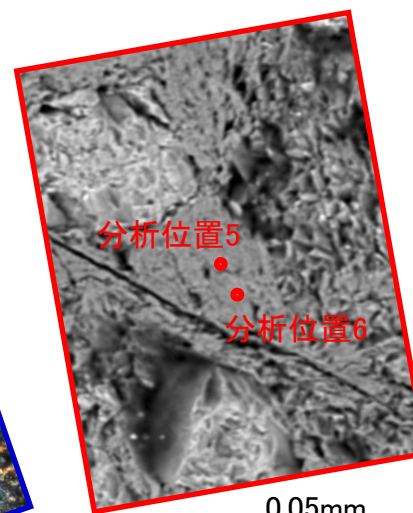
以上を踏まえ、緑泥石の同定を行った。



平行ニコル



直交ニコル



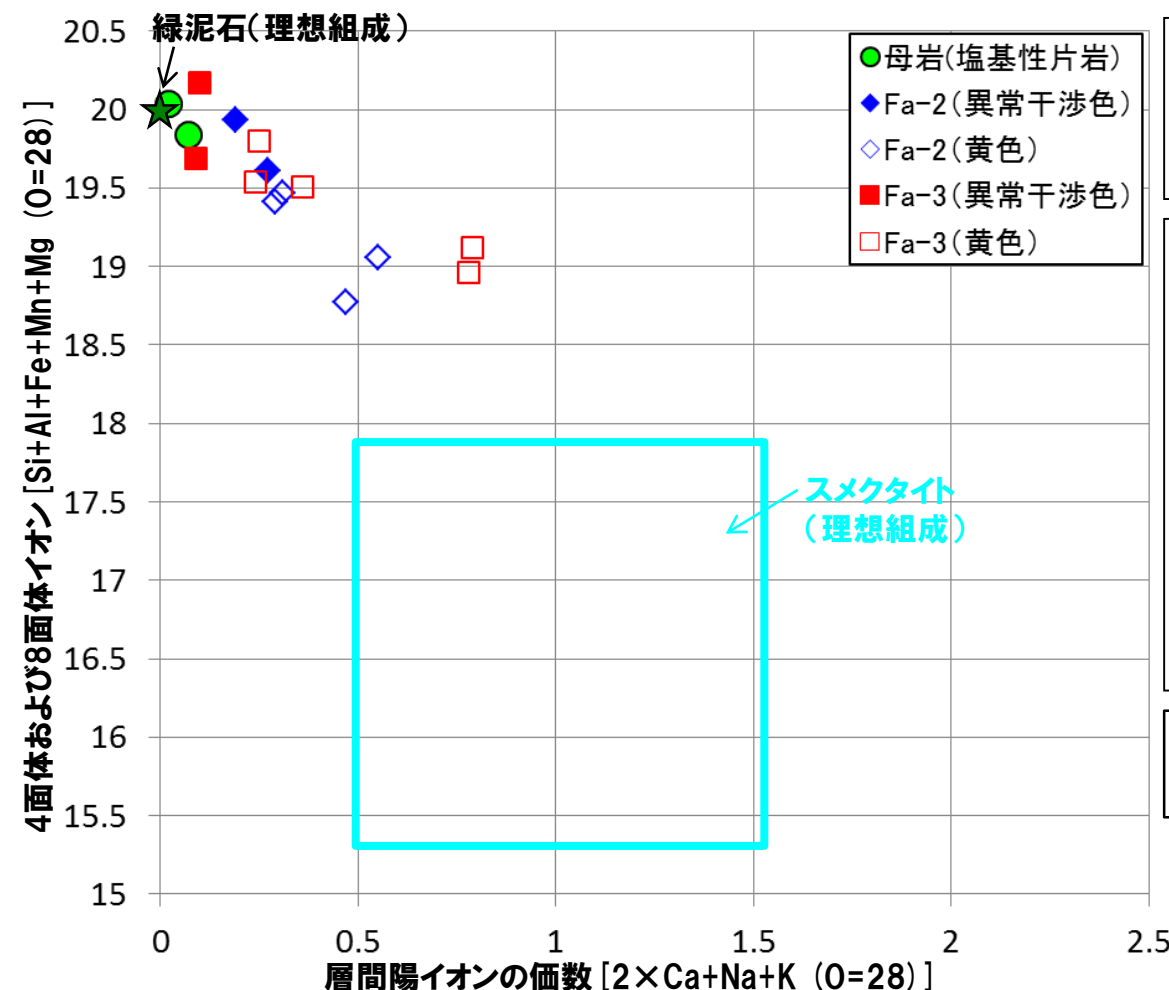
0.05mm
EPMA分析位置
(SEM画像,
平成27年撮影)

Element	分析位置5		分析位置6	
	Mass (%)	Cation	Mass (%)	Cation
SiO ₂	28.06	6.21	27.71	6.13
TiO ₂	0.06	0.01	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	15.55	4.05	14.24	3.72
FeO	20.23	3.74	20.24	3.75
MnO	0.38	0.07	0.30	0.06
MgO	16.78	5.54	19.00	6.27
CaO	0.24	0.06	0.25	0.06
Na ₂ O	0.09	0.04	0.07	0.03
K ₂ O	0.41	0.11	0.13	0.04
Total	81.80	19.83	81.94	20.04

0.1mm 薄片拡大写真(平成27年撮影)

断層内物質の詳細分析<緑泥石の干渉色と化学組成>

- 一般的に緑泥石は異常干渉色を示すことが多いものの(黒田・諏訪, 1983), スメクタイトの薄層を挟む緑泥石の混合層鉱物は黄色の干渉色を示すとされている(榊原ほか, 2005)。
- EPMA分析結果を, 4面体および8面体イオン層間陽イオンの価数図にプロットすると, 母岩中の緑泥石および異常干渉色を示す緑泥石は緑泥石の理想組成付近にプロットされる。また, 黄色の干渉色を示すものは層間陽イオンが増加し, スメクタイトの理想化学組成の領域に近づく。以上より, Fa-3断層およびFa-2断層の細粒部を横断する脈状の粘土鉱物は緑泥石でスメクタイトとの混合層を伴う。
- 以下, 異常干渉色を示すものを緑泥石, 黄色の干渉色を示すものを緑泥石/スメクタイト混合層と称し, 両者を総称する場合には緑泥石(スメクタイトとの混合層を伴う)と記載する。



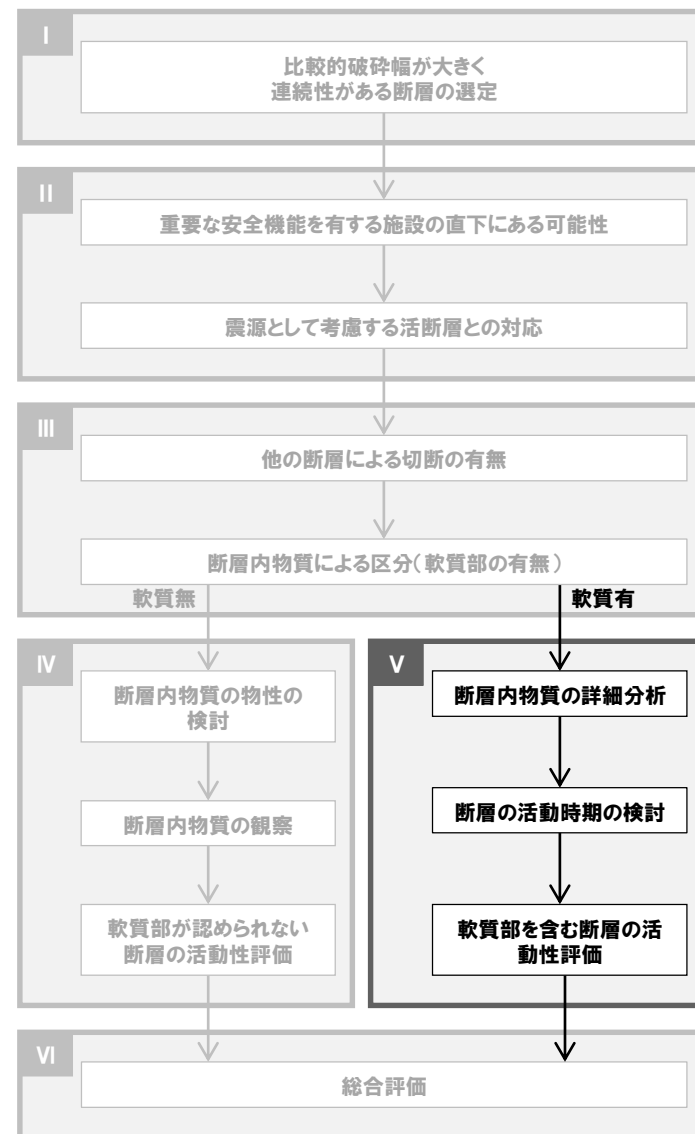
【黒田・諏訪(1983)より抜粋】
「酸化した緑泥石は濃褐色を呈することがある。(中略)緑泥石は通常, 鏡下で淡緑ないし緑色で多色性を示し, 複屈折が小さい。また分散が強いために, 消光のときに異常干渉色(暗青灰色~暗褐色)を示すことが多い。」

【榊原ほか(2005)より抜粋】
「緑泥石は, 概して干渉色が青灰色の異常干渉色を呈するものの, 部分的に一次の黄色などの干渉色を示す場合が多数認められた。これは緑泥石が純粋な端成分ではなく, スメクタイトやイライトなどの薄層を挟む混合層鉱物であることを示唆している。やや風化した部分においては鉱物周辺が褐色化し, 剪断面もしくは割れ目沿いにおいて干渉色が高くなっている。」
「薄片観察に基づいて, 産状によって緑泥石を, 「初生的な緑泥石」, 「地表の風化のため褐色化している緑泥石」および「剪断面沿いの緑泥石」に区分し, それぞれの化学組成の範囲を検討した。(中略)初生的な緑泥石, 風化のため褐色化した緑泥石および剪断面沿いの緑泥石はいずれも層間陽イオンにばらつきがあるが, 剪断面沿いにスメクタイト成分が多い傾向が認められる。」

【理想組成】
緑泥石: $(\text{Mg,Fe,Al})_{12}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$
スメクタイト: $(\text{Na,Ca}_{1/2})_{0.2\sim 0.6}(\text{R}^{+3},\text{R}^{+2},\text{Li})_{2\sim 3}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

榊原正幸・富山雄太・上原誠一郎・伊東佳彦・岡崎健治, 2005, 付加体中の緑色岩中の初生粘土鉱物およびその風化プロセス, 応用地質学会講演要旨集, 13, 65-70.
黒田吉益・諏訪兼位, 1983, 偏光顕微鏡と岩石鉱物 第2版, 共立出版, pp390.

- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
 1. 破碎幅の検討
 2. 断層内物質の詳細分析
 3. 断層の活動時期の検討
 4. まとめ
- VI. 総合評価



Fa-3断層の活動時期に関する検討のポイント

①Fa-3断層の生成時期の検討

→断層近傍において硬質の塩基性片岩が急激に破断せずにひきずりを残している。

・断層は母岩の片理を切っており、断層の生成は片理の形成より後である。

⇒断層の生成深度の検討

⇒母岩である三波川変成岩類の形成史の検討

②Fa-3断層の活動が終了した時期の検討

→断層の活動は細粒部を横断する緑泥石脈(スメクタイトとの混合層を伴う)の生成以前である。

・緑泥石脈の生成環境については、地温約100℃以上の地下深部での生成と地表付近での熱水による生成の2つの可能性がある。

⇒緑泥石脈の生成条件や生成環境の検討

⇒敷地における熱水の有無の検討

⇒地表付近における熱水変質の痕跡の検討

⇒緑泥石脈の生成環境を踏まえた生成時期の検討

③Fa-3断層内の軟質部の形成時期の検討

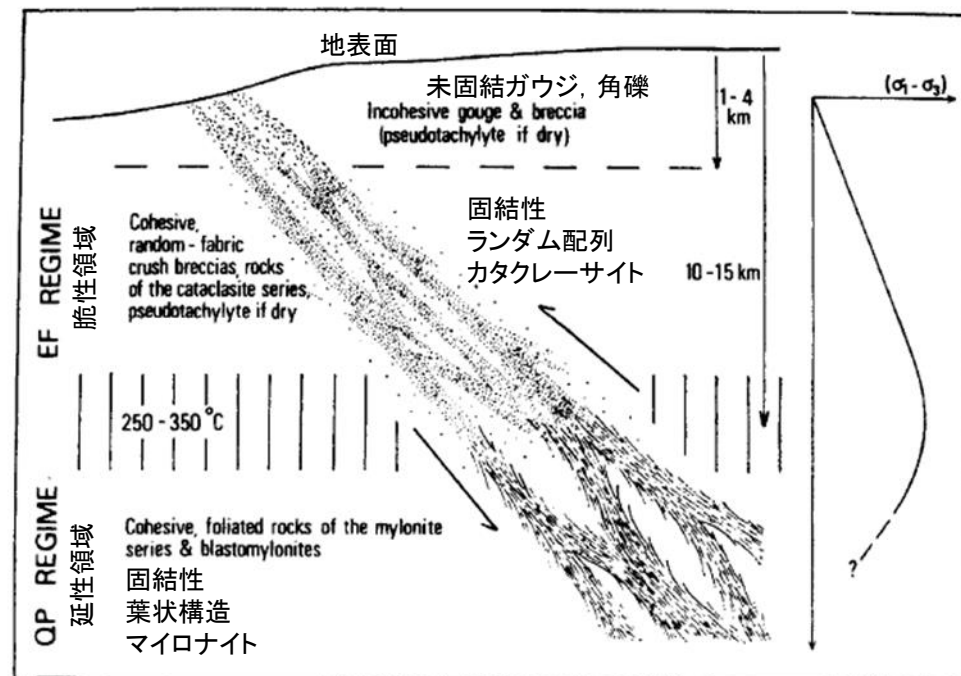
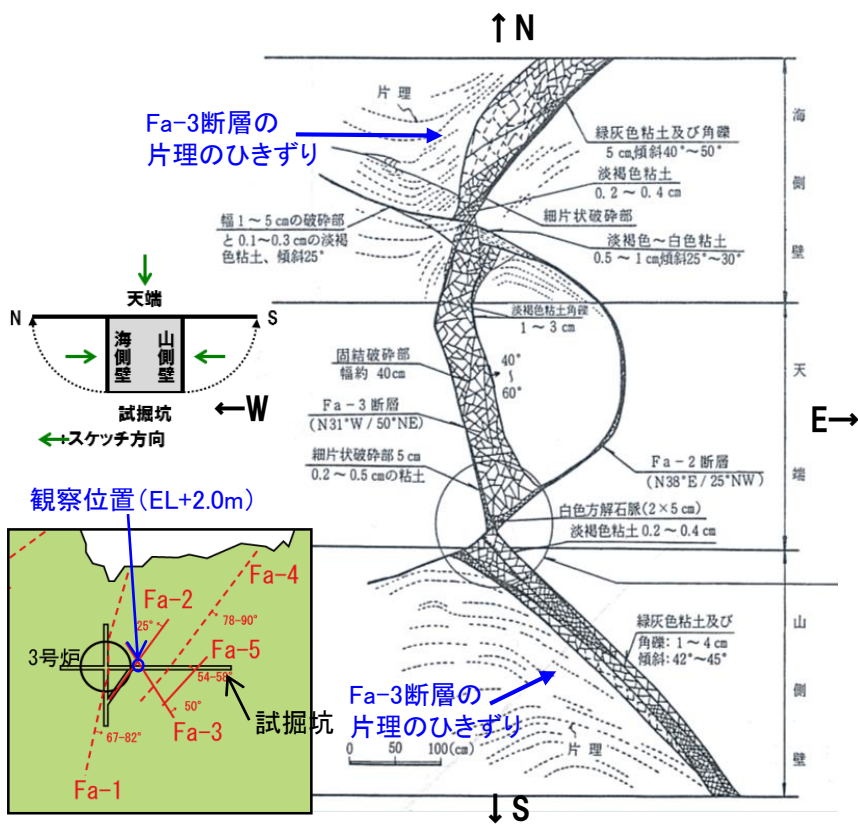
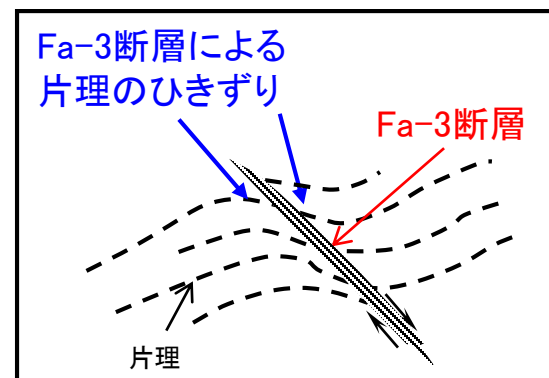
→断層内には吸水により軟質化しやすいスメクタイトおよび緑泥石/スメクタイト混合層が含まれる。

⇒軟質部が認められない断層と軟質部を含む断層の断層内物質の比較

⇒スメクタイトの成因および生成時期の検討

断層生成時期の検討① <性状と生成深度>

- Fa-3断層近傍の片理面の変形形態について、硬質の塩基性片岩が急激に破断せずにひきずりを残していることから、Fa-3断層は塑性流動の起こりうる地下数km以深で生成した断層である。
- Fa-3断層は母岩である塩基性片岩の片理を切る断層である。



試掘坑展開図(外側から見たスケッチ)

伊方発電所原子炉設置変更許可申請書
(3号炉増設, 昭和59年)より抜粋

FIG. 8. Conceptual model of a major fault zone.
断層岩の種類とその形成深度に関する概念図(Sibson, 1977より抜粋・一部加筆)



断層生成時期の検討② <生成時期>

- 敷地付近には三波川変成岩類が広く分布する。
- 三波川変成岩類は、一般に、地下深部で低温高压型の変成作用を受けた後、地表まで上昇したとされている。
- 三波川変成岩類の形成史については多くの研究があるが、Wallis et al. (2009)によると、約9千万年前に地下深部から上昇を開始し、約5千万年前頃にその一部が地表に露出し始めたとされている。
- したがって、三波川変成岩類は、その生成の過程で古い時代に地下深部の温度・圧力を被っている。
- Fa-3断層は三波川変成岩類の片理を切っており、約9千万年前以降に三波川変成岩類の上昇過程で生成した断層である。

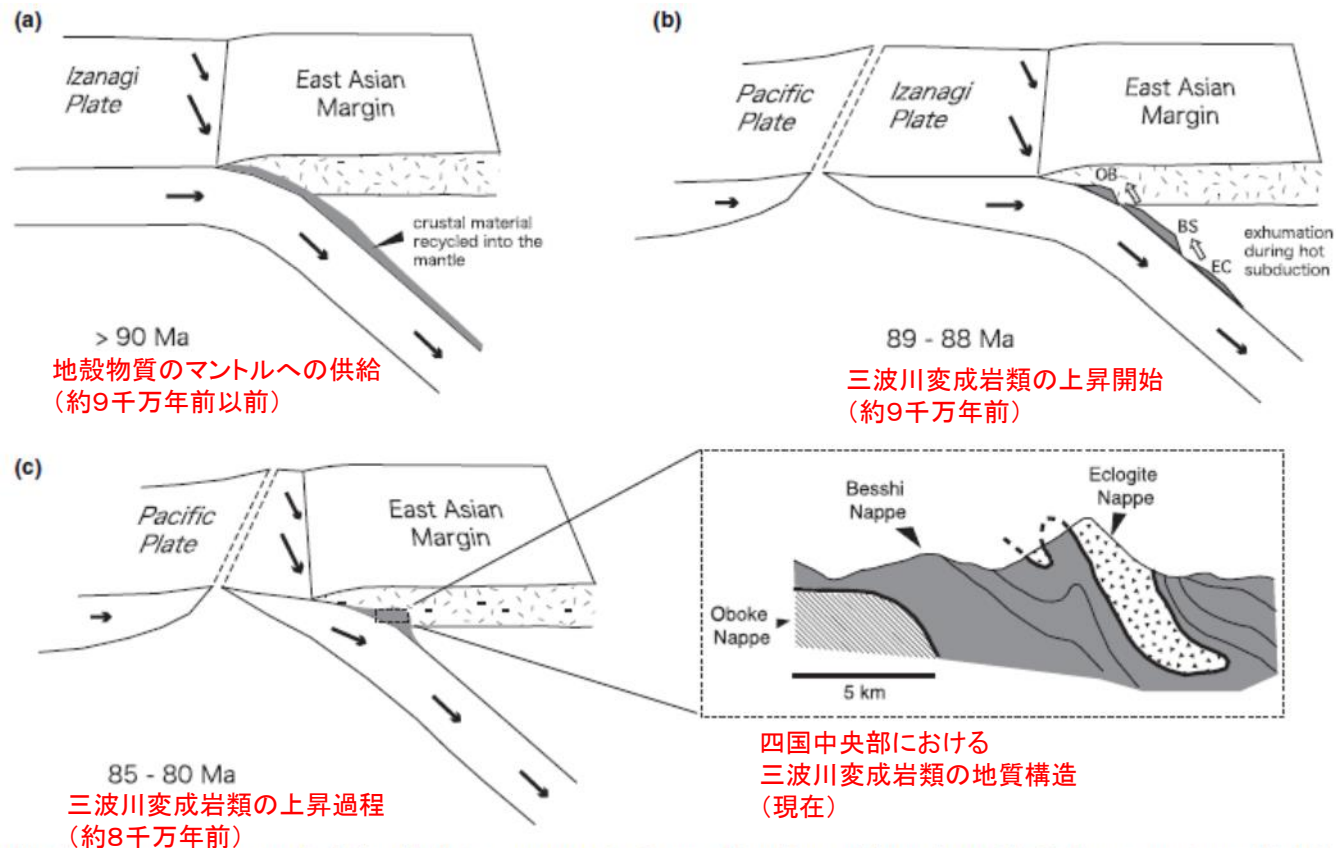
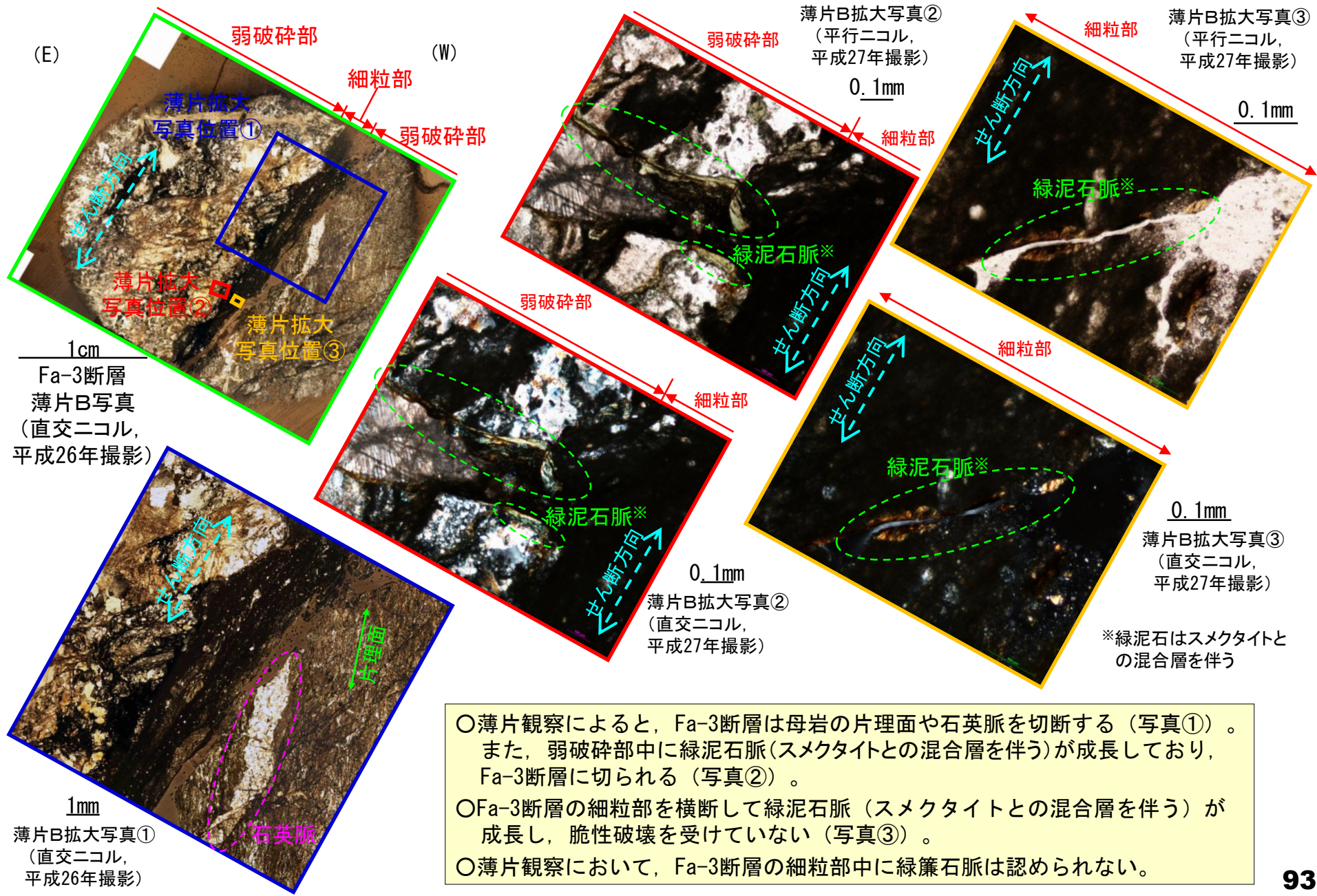


Fig. 7. Summary of proposed relationship between approach of a spreading ridge and formation of the Sanbagawa metamorphic belt. (a) Prior to 90 Ma there is normal approximately steady-state cold-subduction of the Izanagi Plate that results in most or all of the subducted crustal material being recycled into the mantle. (b) Around 90 Ma the close approach of a spreading ridge and associated younging of the subducting slab causes the subduction zone to warm and triggering the rapid rise of relatively buoyant units of the Sanbagawa belt (EC = eclogite nappe; BS = Besshi nappe; OB = Oboke nappe). The preserved metamorphic domain does not, therefore, reflect the conditions of steady-state subduction, but a snap shot of a particularly warm period in the evolution of the subduction zone. (c) Proposed relationship between the present architecture of the Sanbagawa belt and the former subduction zone.

三波川変成岩類の形成史の一例(Wallis et al., 2009より抜粋)



断層活動終了時期の検討① <薄片観察写真>



(E) (W)
弱破碎部
細粒部
薄片拡大写真位置①
薄片拡大写真位置②
薄片拡大写真位置③
せん断方向
1cm
Fa-3断層
薄片B写真
(直交ニコル,
平成26年撮影)

薄片B拡大写真②
(平行ニコル,
平成27年撮影)
0.1mm

薄片B拡大写真③
(平行ニコル,
平成27年撮影)
0.1mm

薄片B拡大写真②
(直交ニコル,
平成27年撮影)
0.1mm

薄片B拡大写真③
(直交ニコル,
平成27年撮影)
0.1mm

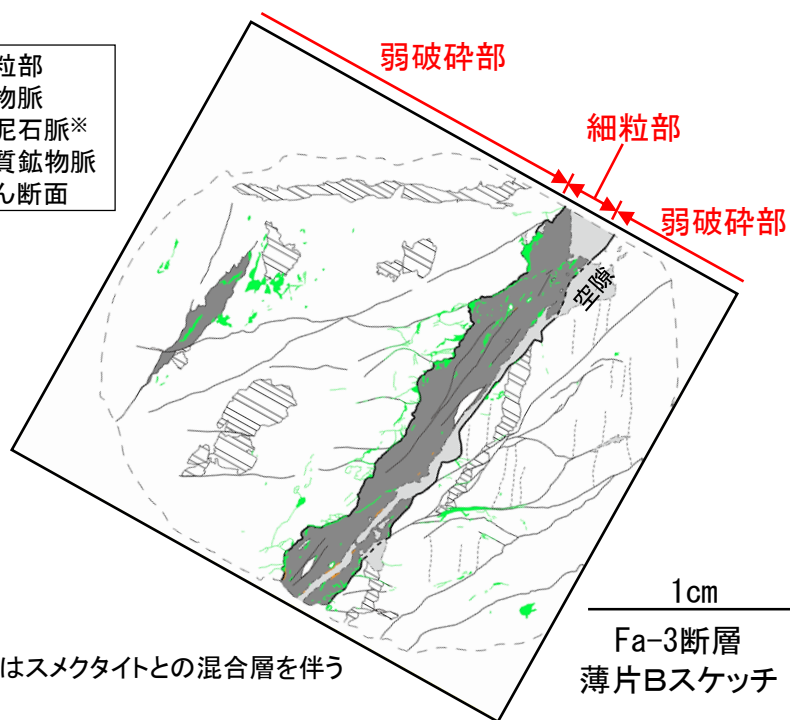
*緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う

- 薄片観察によると、Fa-3断層は母岩の片理面や石英脈を切断する(写真①)。また、弱破碎部中に緑泥石脈(スメクタイトとの混合層を伴う)が成長しており、Fa-3断層に切られる(写真②)。
- Fa-3断層の細粒部を横断して緑泥石脈(スメクタイトとの混合層を伴う)が成長し、脆性破壊を受けていない(写真③)。
- 薄片観察において、Fa-3断層の細粒部中に緑泥石脈は認められない。

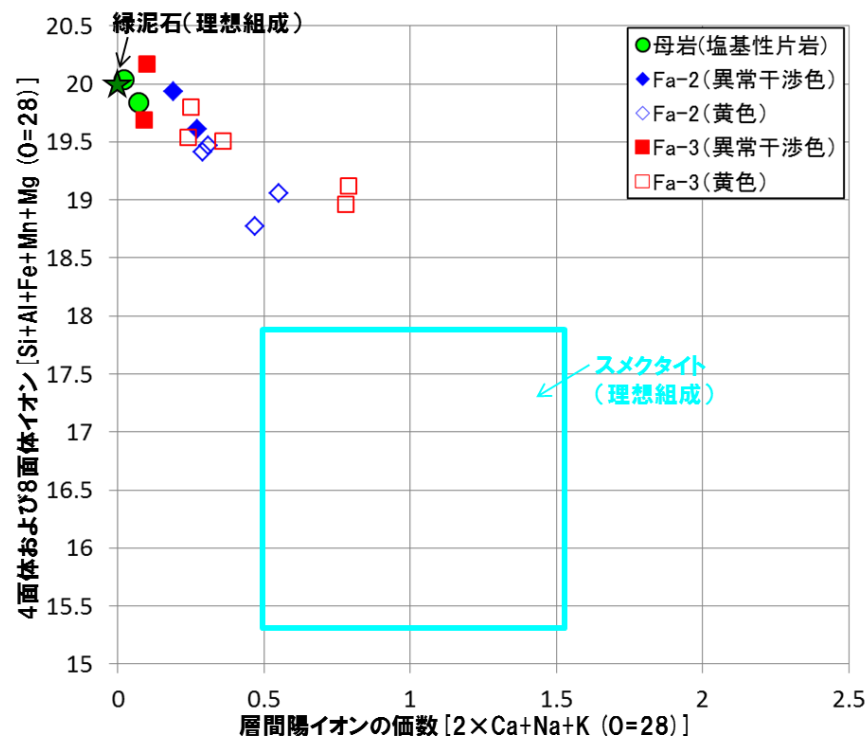
断層活動終了時期の検討② <薄片観察結果>

- Fa-3断層の幅数mm程度の細粒部を横断して緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長しており，その後脆性破壊を受けていない。Fa-3断層は地下深部における脆性破壊でカタクレーサイトとなっており，その活動時期は緑泥石脈の生成より前である。
- また，細粒部中に脈状に成長した緑簾石は認められない。したがって，緑簾石よりも緑泥石あるいは緑泥石／スメクタイト混合層が生成しやすい条件下で細粒部を横断する緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）が生成したものである。

- 細粒部
- ▨ 鉍物脈
- 緑泥石脈※
- 変質鉍物脈
- せん断面



※緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う



断層活動終了時期の検討③ <緑泥石の生成する温度条件>

○Fa-3断層の細粒部を横断して緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）が脈状に成長している。その生成する温度条件は約100℃以上とされている（吉村編, 2001）。

○緑泥石（スメクタイトとの混合層を伴う）の生成環境について、①三波川変成岩類の上昇過程における地温約100℃以上の地下深部での生成、②地表付近での熱水による生成の2つの可能性がある。

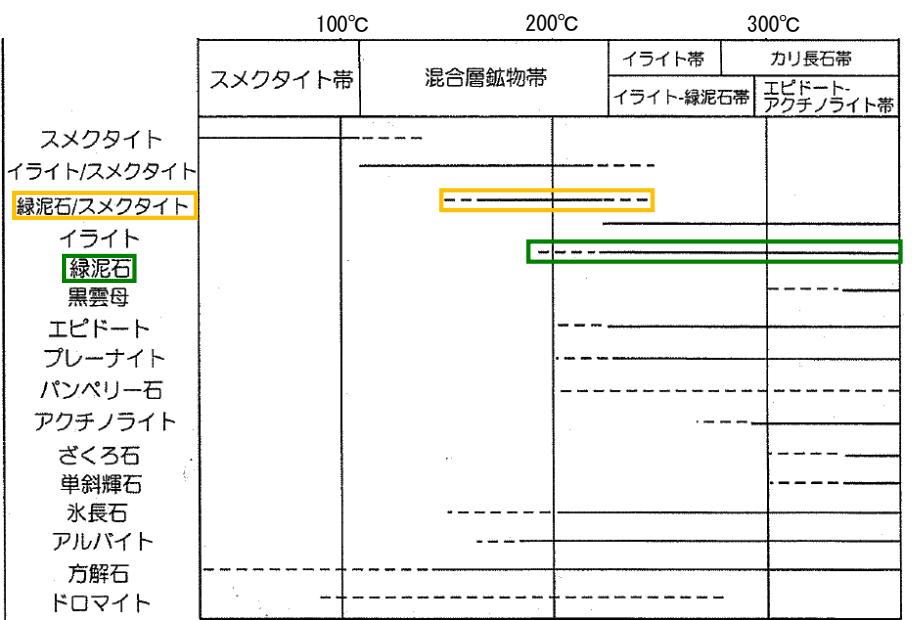
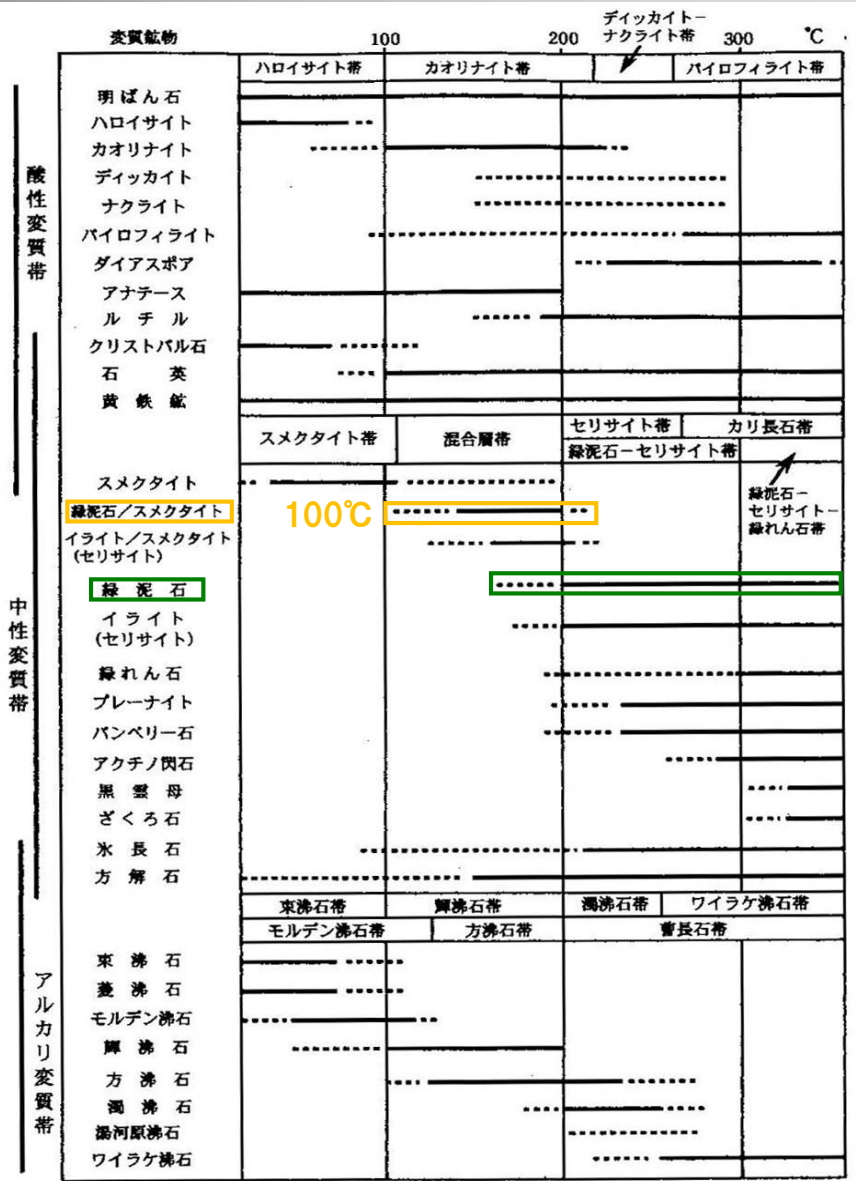


図9 各変質帯に特徴的な鉱物とそれらの概略の生成温度(吉村(2001)を改変) 井上(2003)より抜粋・一部加筆

吉村尚久編, 2001, 粘土鉱物と変質作用, 地学双書32, 293pp.
井上厚行, 2003, 熱水変質作用. 資源環境地質学, 資源地質学会, 195-202.
Inoue, A., 1995, Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments. In Velde, B.(ed.) Origin and Mineralogy of Clays. Springer, 169-329.
井沢英二, 1996, 資源の探査. 平朝彦ほか編, 地球の観測. 岩波講座「地球惑星科学」, 291-323.



吉村編(2001)より抜粋・一部加筆

図V-35 温度と熱水溶液の相違による変質鉱物の生成環境。ここに示した各変質帯の形成温度は一応の目安である。Inoue(1995); 井沢(1996)をもとに編集

断層活動終了時期の検討④ <熱水の定義>

- Utada (1980)によると、熱水変質は、地温勾配から想定される温度よりも高い温度による岩石の変質であると定義されており、Inoue (1995)もこれを追認している。
- 東 (2004)では、「一般的には地下増温率 (3 °C/ 100m) に相当する地温よりも高温の水が熱水」と定義されている。
- 水田・石山 (2009)によると、「熱水変質作用は、広域的な地下増温率によって与えられる温度に比較して、高温な熱水系での水-岩石反応に伴い、新鮮な岩石が新たに形成された粘土鉱物などの変質鉱物から構成される岩石に変化する作用である。」とされている。
- 以上を踏まえ、**熱水を「地下増温率に相当する地温よりも高温の水」と定義して検討を進める。**

【Inoue(1995)より抜粋】

The definition of Utada(1980) is used throughout this review. He defined hydrothermal reactions as follows: hydrothermal alteration is a rock alteration where solution higher in temperature than that expected from the regional geothermal gradient in a given area interacts locally with the surrounding rocks.

【水田・石山(2009)より抜粋】

「熱水変質作用は、広域的な地下増温率によって与えられる温度に比較して、高温な熱水系での水-岩石反応に伴い、新鮮な岩石が新たに形成された粘土鉱物などの変質鉱物から構成される岩石に変化する作用である。」

【東(2004)より抜粋】

「我々が直接見ることのできる熱水としては地表付近に湧き出る温泉水や地熱発電に利用される地熱水などがこれによく該当し、一般的には地下増温率 (3°C/100m) に相当する地温よりも高温の水を熱水として考えればよいことになります。」

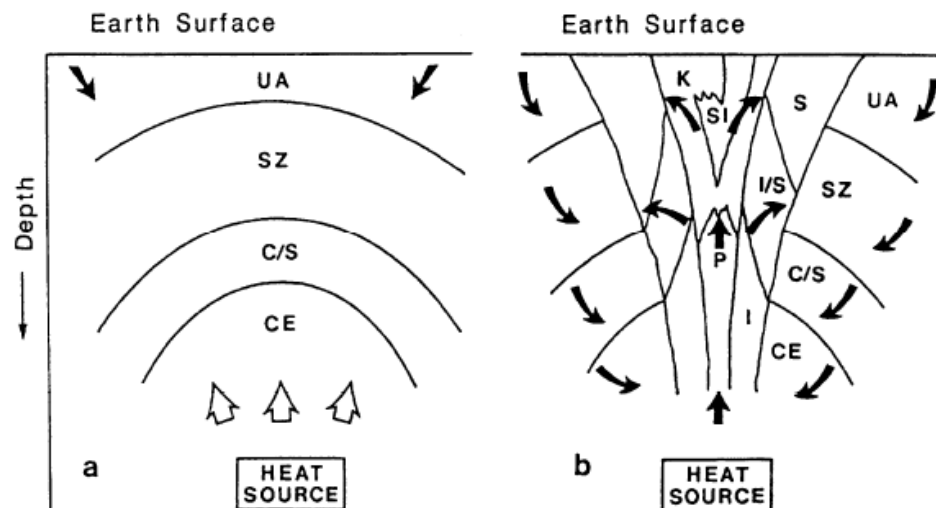


図1 熱水変質作用のタイプと累帯構造 (井沢, 1986; Inoue, 1995)

- a. 広域に拡がる熱水変質作用 (低い水/岩石比反応)
CE (プロピライト帯), C/S (緑泥石/スメクタイト混合層鉱物帯), SZ (スメクタイト・沸石帯), UA (未変質帯)
- b. 構造的に規制される熱水変質作用 (高い水/岩石比反応)
SI (珪化帯), P (パイロフィライト帯), K (カオリン帯), I (雲母帯), I/S (雲母/スメクタイト混合層鉱物帯), S (スメクタイト帯)

東(2004)より抜粋

Utada, M., 1980, Hydrothermal Alterations Related to Igneous Activity in Cretaceous and Neogene Formations of Japan. Granitic Magmatism and Related Mineralization, Min. Geol. Special Issue, 8, 67-83.

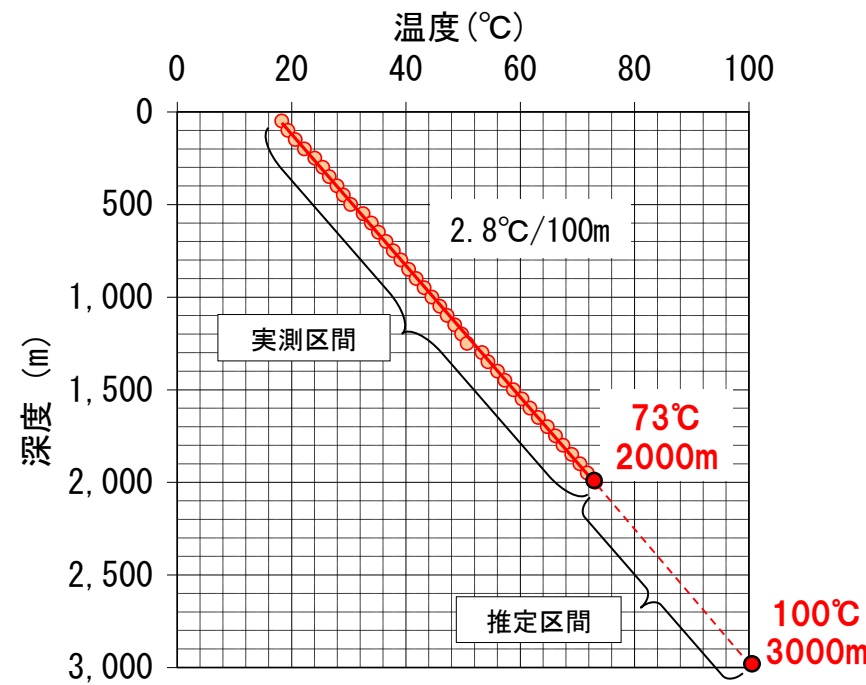
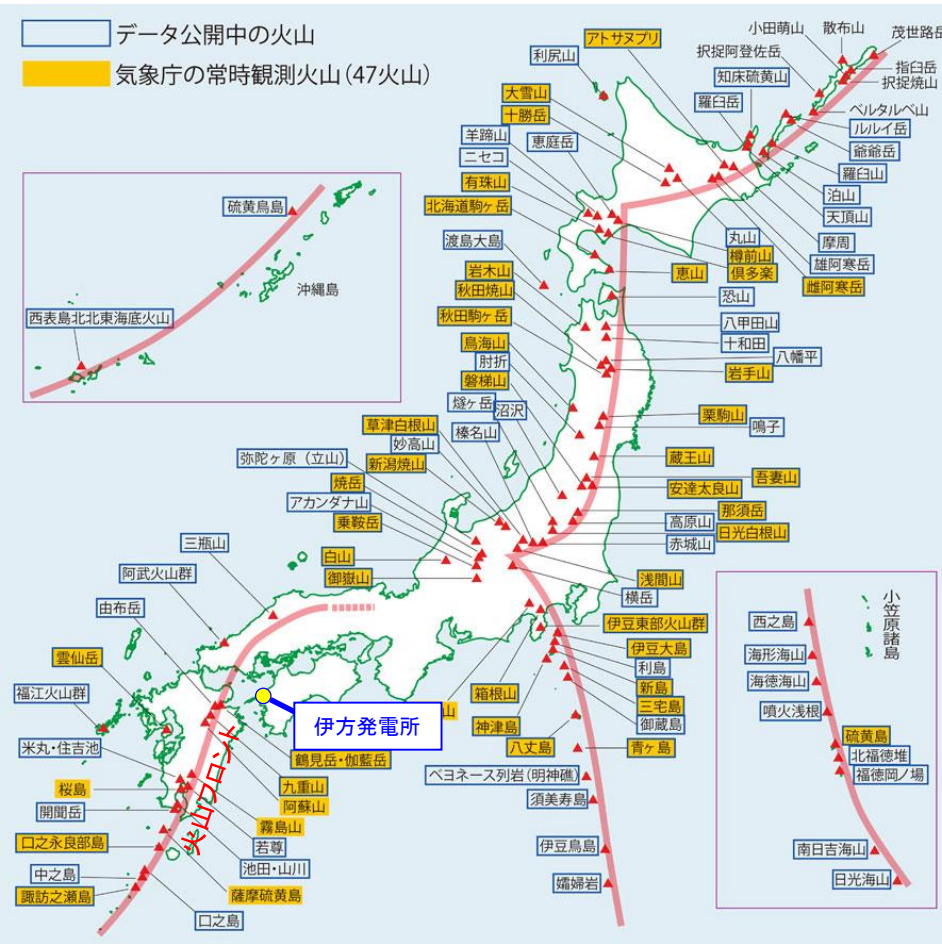
東 正治, 2004, 熱水鉱床と粘土鉱物, 粘土科学, 43, 219-227.

Inoue, A., 1995, Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments. In Velde, B.(ed.) Origin and Mineralogy of Clays. Springer, 169-329.

水田敏夫・石山大三, 2009, 母岩の変質と鉱床の生成, 資源地質, 59, 165~180.

断層活動終了時期の検討⑤ <敷地の地下増温率>

○伊方発電所は火山フロントから大きく南東に外れた位置にあり、火山と離隔がある。
○深部ボーリング調査によると、敷地の深度2,000mにおける地温は約73℃、地下増温率は2.8℃/100mで一定であり、**現在、敷地において熱水は認められない。**

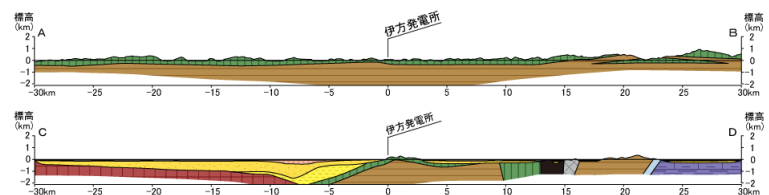
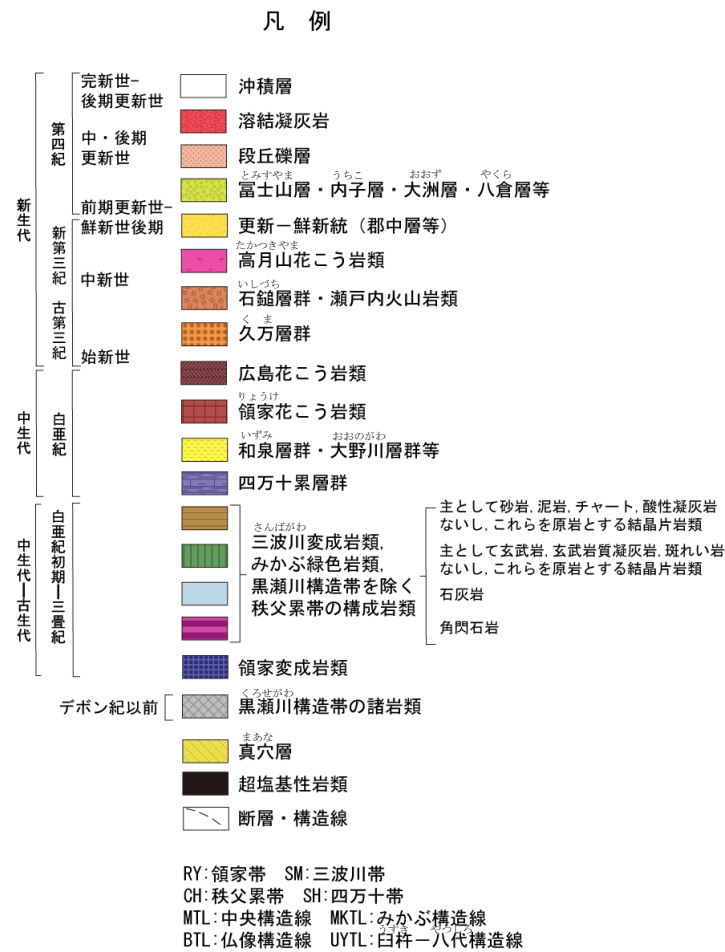
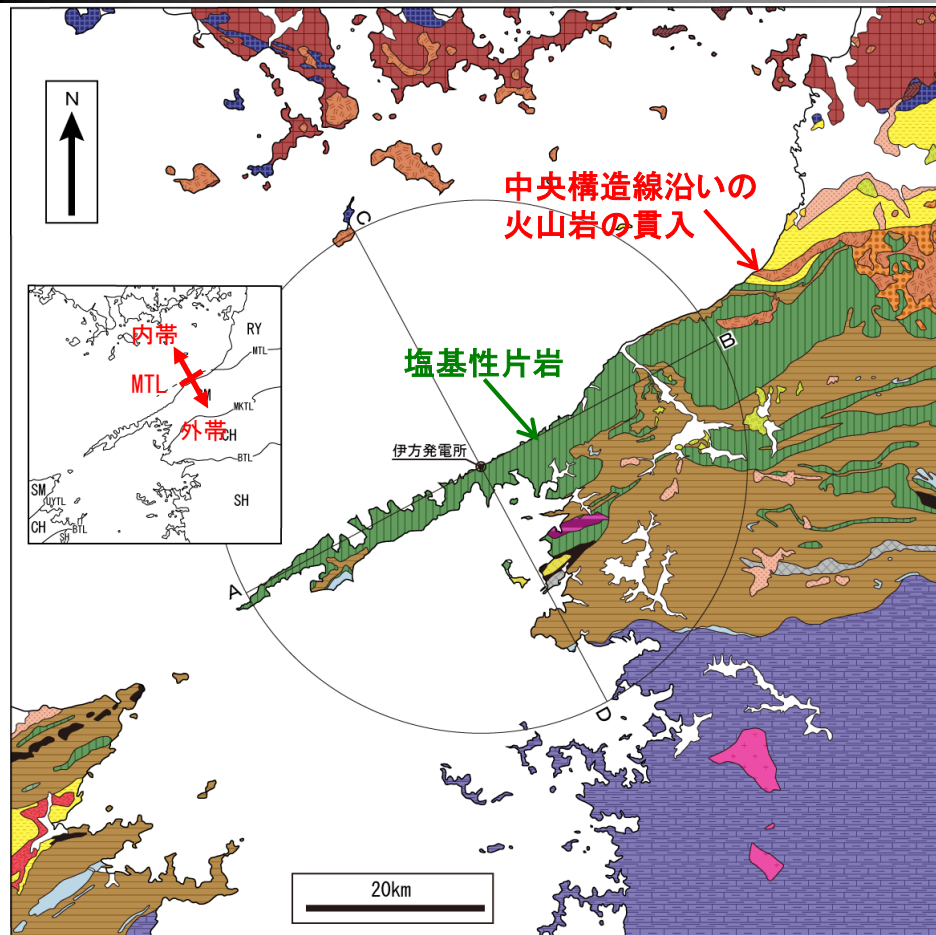


伊方発電所敷地内における
2,000mボーリングによる地下増温率

日本の活火山(産業技術総合研究所地質調査総合センター)



断層活動終了時期の検討⑥ <敷地周辺の地質図>



○敷地北方の中央構造線沿いに中期中新世 (15Ma頃) の火山岩 (石鎚層群・瀬戸内火山岩類) の貫入が認められる。
○敷地付近には三波川変成岩類に属する塩基性片岩が広く分布し、火山岩は分布しない。

敷地周辺陸域の地質図

断層活動終了時期の検討⑦ <敷地の三波川変成岩類の産状>

- 敷地近傍には広く堅硬な塩基性片岩が分布する。
- 敷地における深部ボーリング調査によって少なくとも深さ2 kmまで堅硬かつ緻密な結晶片岩が連続すること、掘削中の目立った逸水がなく透水性の低い岩盤であることを確認している。
- 敷地近傍に火山岩の貫入や熱水変質の痕跡は認められない。

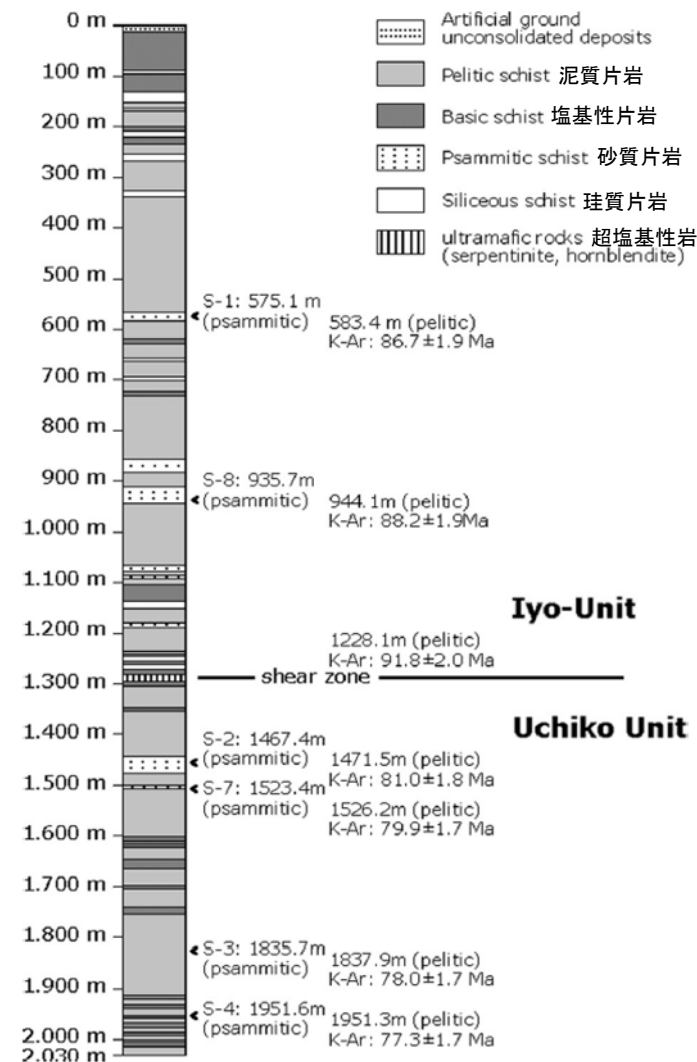
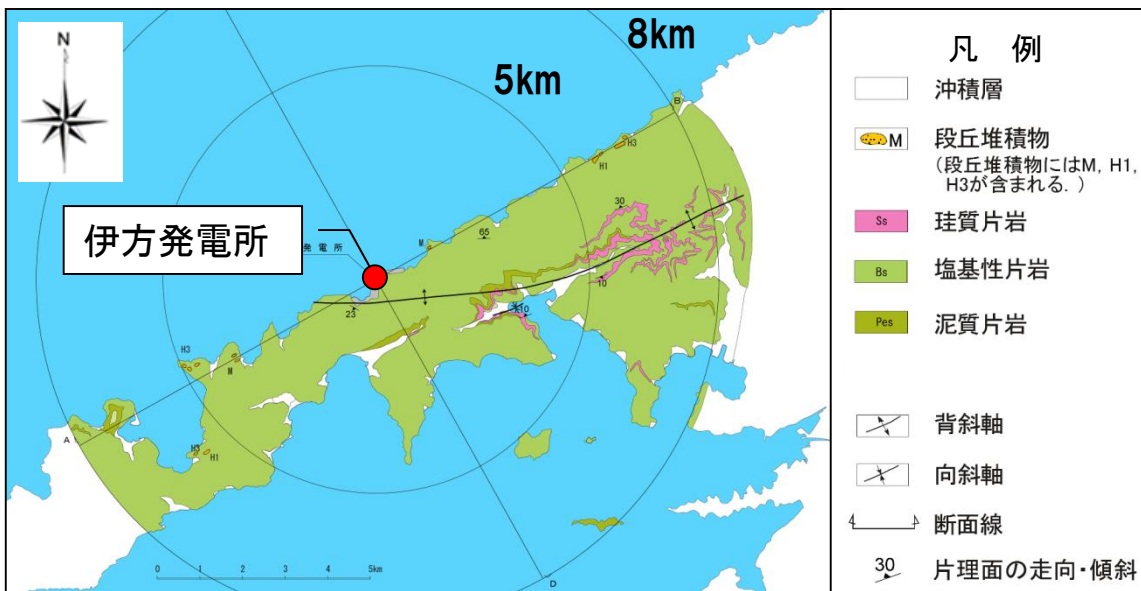
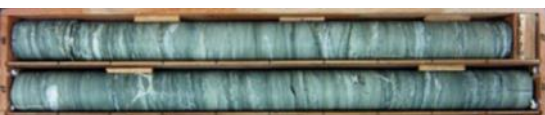


Fig. 2. Column of the bore hole.

伊方発電所敷地内における2,000mボーリング柱状図 (Knittel et al., 2014より抜粋)



塩基性片岩 (深さ約100m)

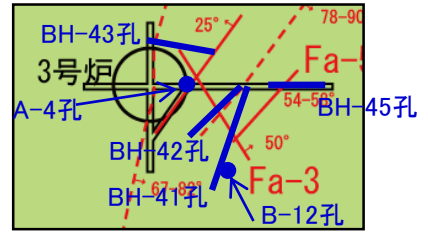


泥質片岩 (深さ約2000m)



断層活動終了時期の検討⑧ <断層付近のボーリングコア観察>

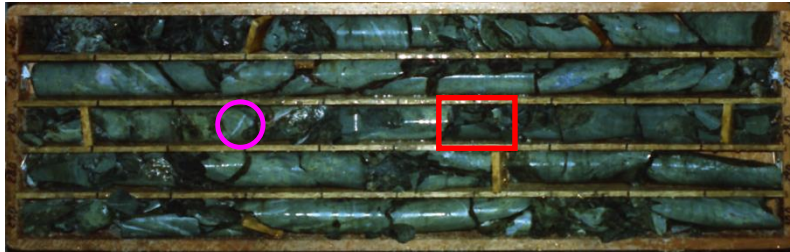
- Fa-3断層付近におけるボーリングコア観察によると、片理面に沿う剥離等で部分的にコア形状が悪くなるものの岩石は新鮮であり、Fa-3断層を中心とする熱水変質の痕跡は認められない。
- 三波川変成岩類には石英脈や方解石脈が普遍的に見られる。これらの脈は地下深部で生成したものであり、地下浅所で熱水変質に伴って生成したのではない。



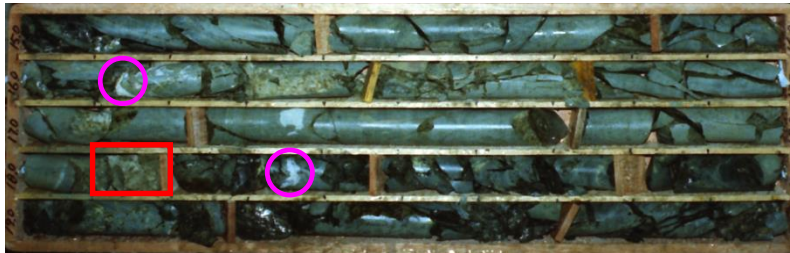
断層通過部 **Fa-3断層通過部** **石英脈・方解石脈**

断層延長部 **Fa-3断層延長部** **石英脈・方解石脈**

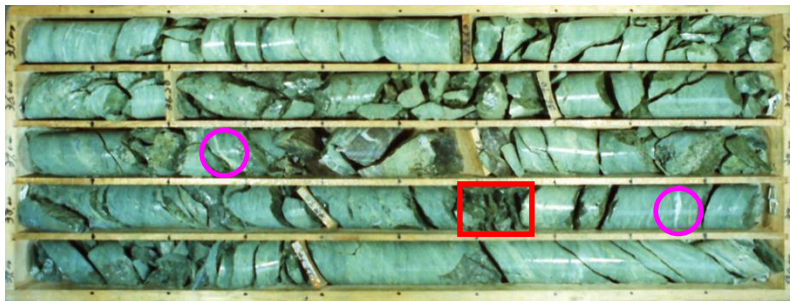
BH-41孔コア写真深度25m～30m(S58年取得・撮影)



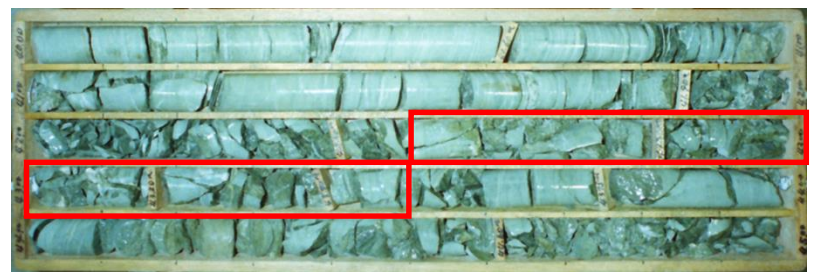
BH-42孔コア写真深度15m～20m(S58年取得・撮影)



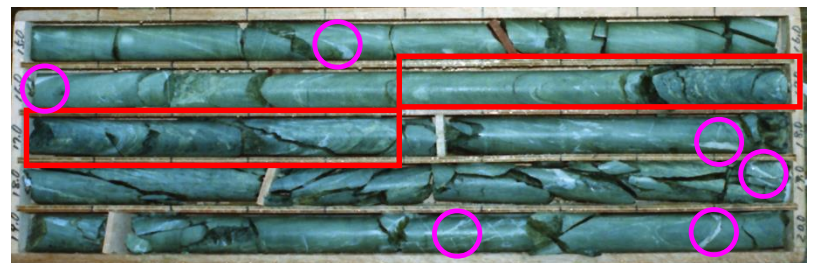
A-4孔コア写真深度35m～40m(S58年取得・撮影)



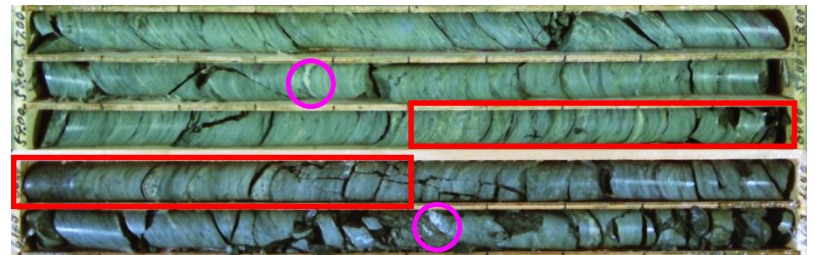
B-12孔コア写真深度40m～45m(S58年取得・撮影)



BH-43孔コア写真深度15m～20m(S58年取得・撮影)

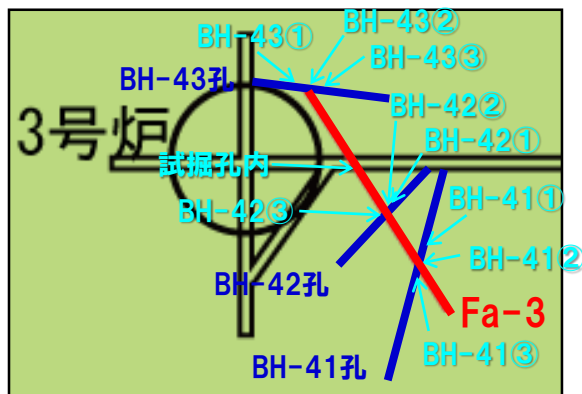


BH-45孔コア写真深度60m～65m(S58年取得・撮影)



断層活動終了時期の検討⑨ <断層付近のボーリングコアのX線分析>

○ X線分析結果によると、Fa-3断層の細粒部中に緑泥石のほか、スメクタイトが含まれる。
 ○ 流紋岩と接する熱水変質を受けた塩基性片岩の粘土がスメクタイトを多く含む事例も報告されているが（田村ほか，2007），Fa-3断層内の細片や直近の母岩にスメクタイトは微量であり、Fa-3断層を中心とする熱水変質の痕跡は認められない。



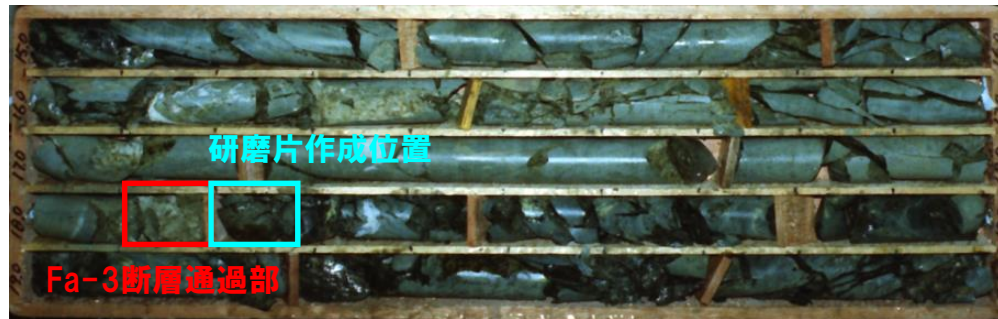
試料名	BH-41①	BH-41②	BH-41③
試料採取深度	22.6m	27.6m	31.9m
試料名	BH-42①	BH-42②	BH-42③
試料採取深度	18.13m	18.17m	18.23m
試料名	BH-43①	BH-43②	BH-43③
試料採取深度	12.1m	17.0m	21.1m

試料名	母岩	試掘坑内 (細粒部)	BH-42①	BH-42② (断層通過部)	BH-42③	BH-41①	BH-41② (断層通過部)	BH-41③	BH-43①	BH-43② (断層延長部)	BH-43③
試料の性状	岩片	細粒	岩片	細粒	岩片	岩片	岩片	岩片	岩片	岩片	岩片
分析実施年	昭和58年		平成27年								
構成鉱物	スメクタイト	△	☆								
	緑泥石	☆	☆	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++	++++
	斜長石	○	△	++++	+++	+++	+++	+++		++	+++
	石英				++					++++	++
	イライト	○	△			++		++	+++	++	+++
	角閃石	☆	○	+++	+++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
方解石	△			+++					++		++

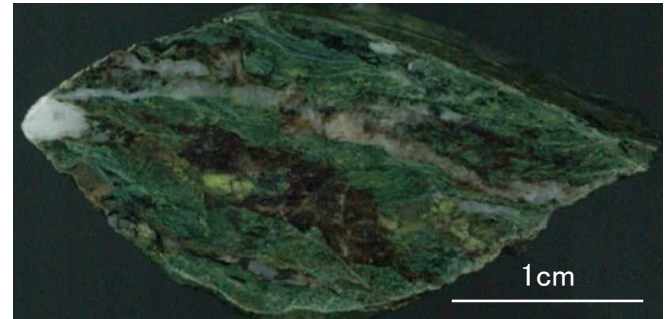
相対的な量比の目安：++++(☆)：非常に多い +++(◎)：多い ++(○)：少ない +(△)：非常に少ない

※ 石英のピーク強度等を基準に2μm以下の試料における相対的な量比の目安を示したものであり、細粒部全体としての量比を示すものではない。
 スメクタイトと緑泥石/スメクタイト混合層の回折パターンは類似しており、EPMA分析結果を踏まえれば、両者を含むと判断される。

断層活動終了時期の検討⑩ <断層と接する母岩の観察結果>



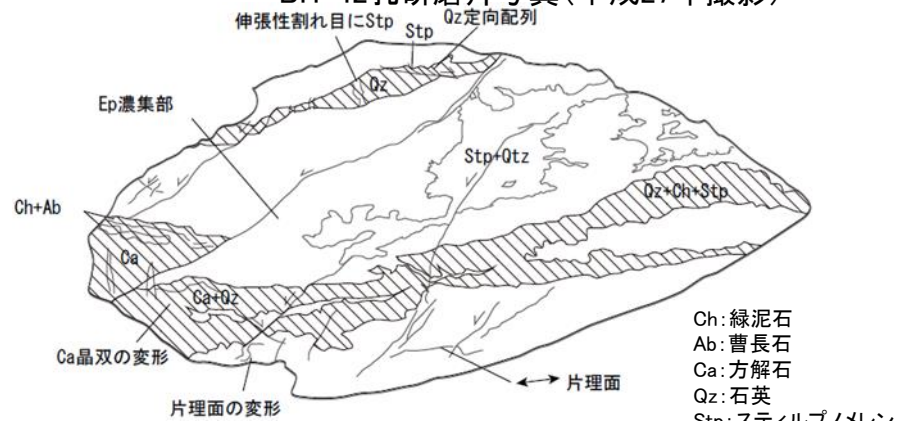
BH-42孔コア写真深度15m~20m(S58年取得・撮影)



BH-42孔研磨片写真(平成27年撮影)

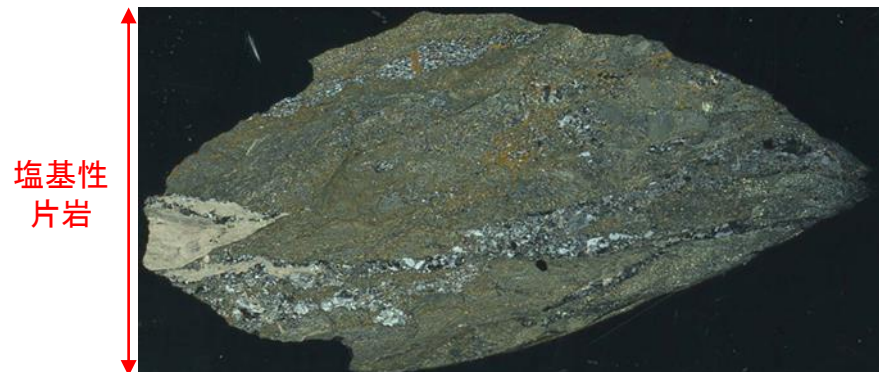


BH-42孔薄片写真(平行ニコル, 平成27年撮影)



1cm

BH-42孔薄片スケッチ



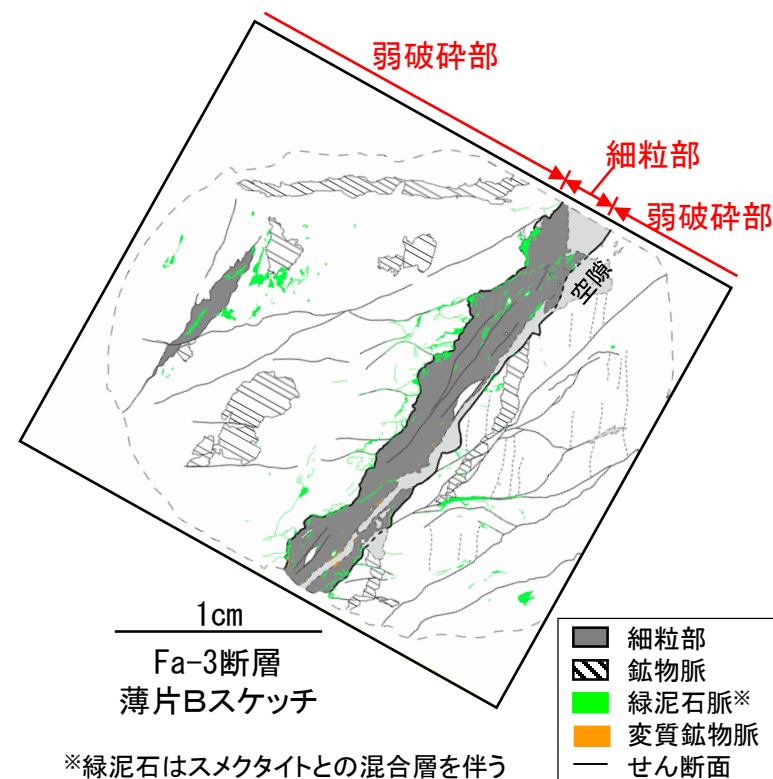
BH-42孔薄片写真(直交ニコル, 平成27年撮影)

○Fa-3断層と接する塩基性片岩の研磨片・薄片観察によると、塑性変形を伴う石英脈や方解石脈がみられ、それらは細粒部を横断する緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）よりも古い鉱物脈である。

○岩石は新鮮で母岩の組織が残っており、熱水変質の痕跡は認められない。

断層活動終了時期の検討⑪ < 緑泥石の生成環境 >

- 現在、敷地において熱水が認められないこと、敷地近傍～Fa-3断層付近に火山岩の貫入および熱水変質の痕跡は認められないことから細粒部を横断する緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）は地表付近での熱水により生成したものではない。
- Bons et al. (2012)によると脈の形成は流体の移動に関連しており、鉱物脈の主な成因として、母岩から孤立した亀裂中への流体の移動（拡散）と亀裂に沿う流体の移動の2つが挙げられており、熱水がなくても脈は形成される。
- Fa-3断層の細粒部を横断する緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）は、地表付近での熱水ではなく、三波川変成岩類の上昇過程における地温約100°C以上の地下深部で流体の移動に伴って生成したものである。



※緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う

検討項目	検討結果
火山との離隔	敷地は火山フロントから大きく南東に外れる
地下増温率	深さ2,000mまで地下増温率は一定であり、現在、敷地において熱水は認められない
敷地の三波川変成岩類の産状	地表踏査および深さ2,000mまでの深部ボーリング調査によると、敷地近傍に火山岩の貫入や熱水変質の痕跡は認められない
断層付近のボーリングコアの観察および分析	ボーリングコア観察およびX線分析より、Fa-3断層を中心とする熱水変質の痕跡は認められない
断層と接する母岩の観察	岩石は新鮮で母岩の組織が残っており、熱水変質の痕跡は認められない

断層活動終了時期の検討⑫ <緑泥石脈の生成時期と断層の活動時期>

- 深部ボーリング調査によると、緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）の生成条件である約100℃以上は深度約3,000m以深に相当し、この深度はカタクレーサイトの生成深度とも対応する。
- 敷地周辺では100万年間の隆起速度が小さいことが示されている（大森, 1990）。敷地近傍においてMIS5（約12万年前）の形成と推定されるM面の標高は25~30m, MIS7の形成と推定されるH3面の標高は50~60mであり、敷地付近における地盤の隆起速度は0.2~0.25mm/yrである。地温や隆起速度を一定と仮定すれば、**緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）の生成時期は約10Ma以前と見積もられる。**
- Fa-3断層の活動時期は約10Ma以前であり、後期更新世よりもはるかに古い。

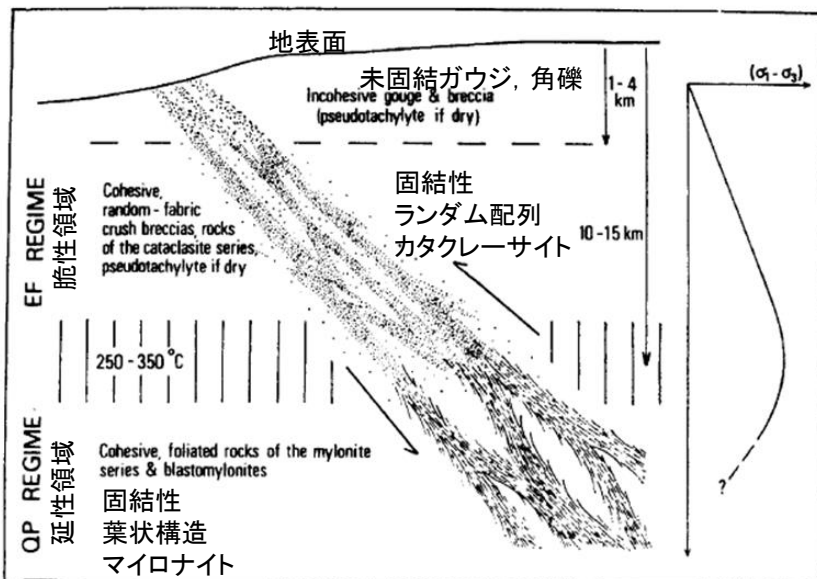


FIG. 8. Conceptual model of a major fault zone.

断層岩の種類とその形成深度に関する概念図
(Sibson, 1977より抜粋・一部加筆)

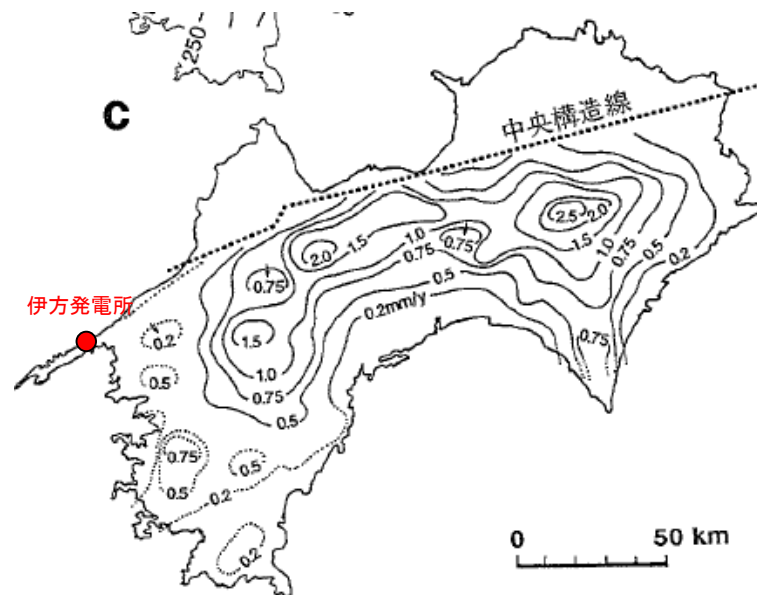


図 4-11 四国山地の変動量・変動速度の分布

c: 本稿で平均高度から推定された100万年間の平均隆起速度 (点線は信頼度の低い部分)

大森(1990)より抜粋・一部加筆

軟質部形成時期の検討①<敷地内断層のX線分析結果一覧>

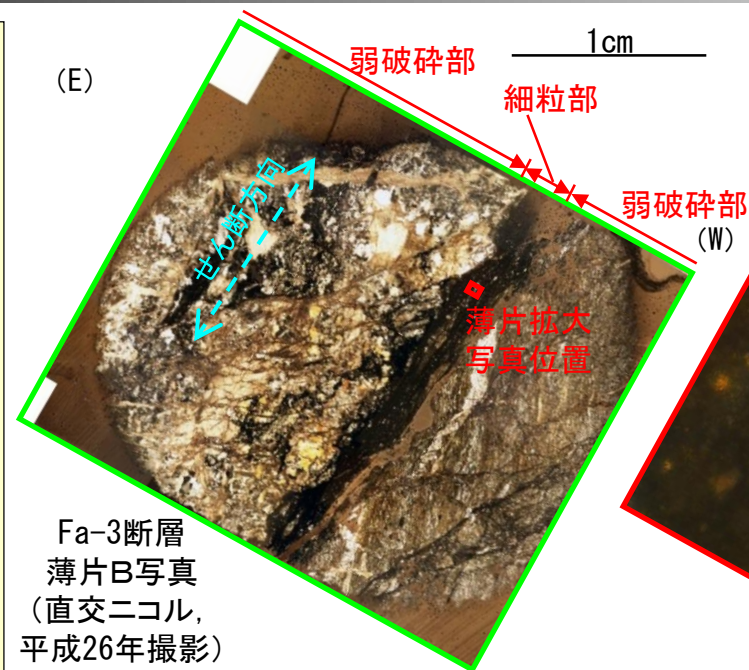
- 敷地内断層の細粒部における $2\mu\text{m}$ 以下の試料を用いたX線分析結果によると、いずれもスメクタイトを母岩より多く含む。
- 軟質部を含む断層と軟質部の認められない断層（周辺の母岩と密着して一体の岩石となった試料）の双方の細粒部中にスメクタイトが生成している。スメクタイトの生成は断層内が軟質含みとなる前から始まっている。

試料名	母岩	Fa-1 (軟質無)	Fa-2 (軟質含)	Fa-3 (軟質含)	Fa-4 (軟質無)	Fa-5 (軟質含)	母岩	f1 (軟質無)	f2 (軟質無)	f3 (軟質無)	f4 (軟質無)	
試料の性状	岩片	細粒	細粒	細粒	細粒	細粒	岩片	細粒	細粒	細粒	細粒	
分析実施年	昭和58年						平成27年					
構成鉱物	スメクタイト	△	☆	◎	☆	◎	◎		++	+	++	++
	緑泥石	☆	☆	☆	☆	☆	☆	++	++	++++	+++	++
	斜長石	○	△		△	△	○	++	++++	++++	++++	++++
	石英		△					++++				+++
	イライト	○	△	○	△	△	△	++	+		+++	++
	角閃石	☆		○	○	◎	☆	++++	++++	+++	++++	++++
	方解石	△						++		+		
凡例 (相対的な量比の目安)	☆:非常に多い ◎:多い ○:少ない △:非常に少ない						++++:非常に多い +++:多い ++:少ない +:非常に少ない					

※石英のピーク強度等を基準に $2\mu\text{m}$ 以下の試料における相対的な量比の目安を示したものであり、細粒部全体としての量比を示すものではない。
スメクタイトと緑泥石/スメクタイト混合層の回折パターンは類似しており、EPMA分析結果を踏まえれば、両者を含むと判断される。

軟質部形成時期の検討② <スメクタイトの性状>

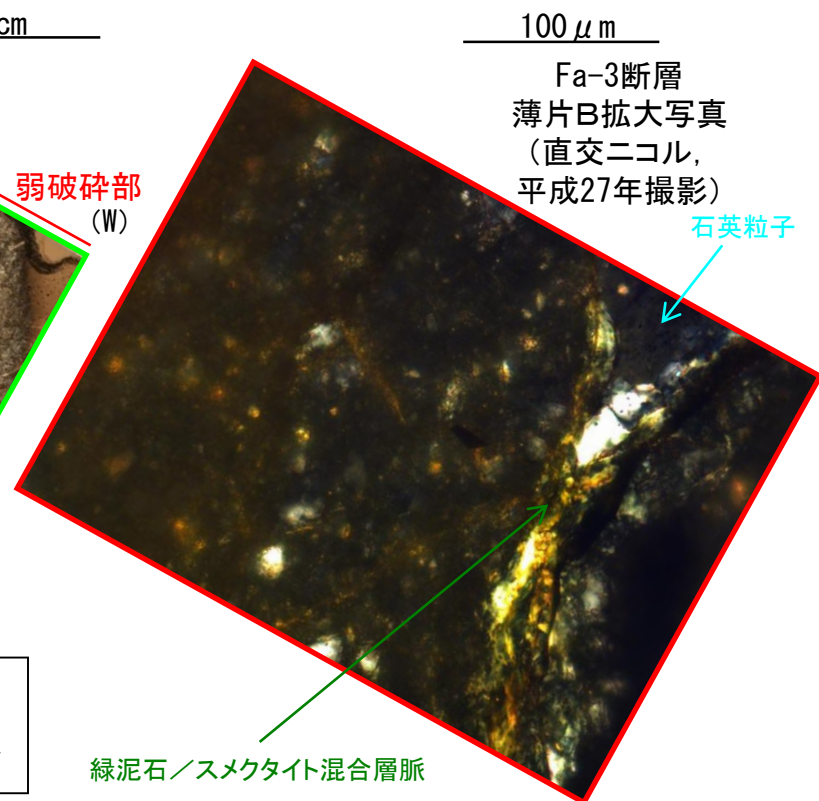
- 一般に2 μ m以下の粒子が粘土と呼ばれており、粘土鉱物は粘土を構成している鉱物の総称である（吉村編，2001）。
- スメクタイトは粘土中によくみられる典型的な粘土鉱物である（吉村編，2001）。
- スメクタイトは吸水性が高く（吉村編，2001）、スメクタイトやスメクタイト質の混合層鉱物を水中に浸すと泥状となる（白水，1988）。スメクタイトが吸水すると粘土状の軟質部を形成する。
- 塩基性片岩の粘土は、母岩の鉱物組成に比べてスメクタイトおよび緑泥石／スメクタイト混合層鉱物を多く含むことが特徴である（田村ほか，2007）。
- 2 μ m以下の試料を用いたX線分析によって検出された微小なスメクタイトを薄片観察で確認することは困難であり、**スメクタイトは細粒部中に微小な粘土鉱物として生成している。**

Fa-3断層
薄片B写真
(直交ニコル,
平成26年撮影)

【白水(1988)より抜粋】
「スメクタイトあるいはスメクタイト質の混合層鉱物を主とする粘土の場合は、水中に浸すか、水を滴下すれば、多くはたちまち泥状となる。」

【吉村編(2001)より抜粋】
「粘土」は地質、鉱物、土木、土壌、窯業などの分野で広く用いられている言葉であるが、それぞれの分野で多少ニュアンスの違った定義が与えられている。定義として、粘土の大きさを重視する面と物性から規定する面がある。前者として、微粒子を意味することは共通しているが、具体的な大きさとすると、分野によって違いがある。一般には2 μ m以下の粒子が粘土と呼ばれているが、その範囲は各専門分野で必ずしも同一ではない。」
「粘土鉱物は粘土を構成している鉱物の総称で、一般に微細な鉱物の集合体として産する。(中略)層状珪酸塩鉱物のうち、カオリナイト、イライト、モンモリロナイトは粘土中によくみられる典型的な粘土鉱物である。」
「スメクタイトは膨潤性粘土鉱物の代表的なもので、吸水して膨張するため盤膨れ(heaving)や地すべりを引き起こす主要な原因となっていると考えられている。吸水性が高く粘性が大きい。」

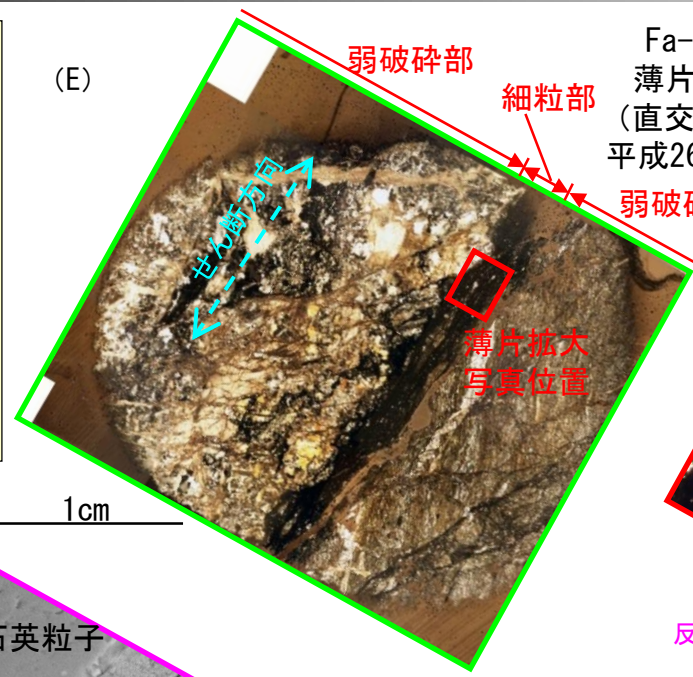
【田村ほか(2007)より抜粋】
「全体的に塩基性片岩、流紋岩の岩片の鉱物組成に比べて、これらの粘土には、スメクタイトおよび緑泥石／スメクタイト混合層鉱物の膨潤性粘土鉱物を多く含むことが特徴である。」

Fa-3断層
薄片B拡大写真
(直交ニコル,
平成27年撮影)

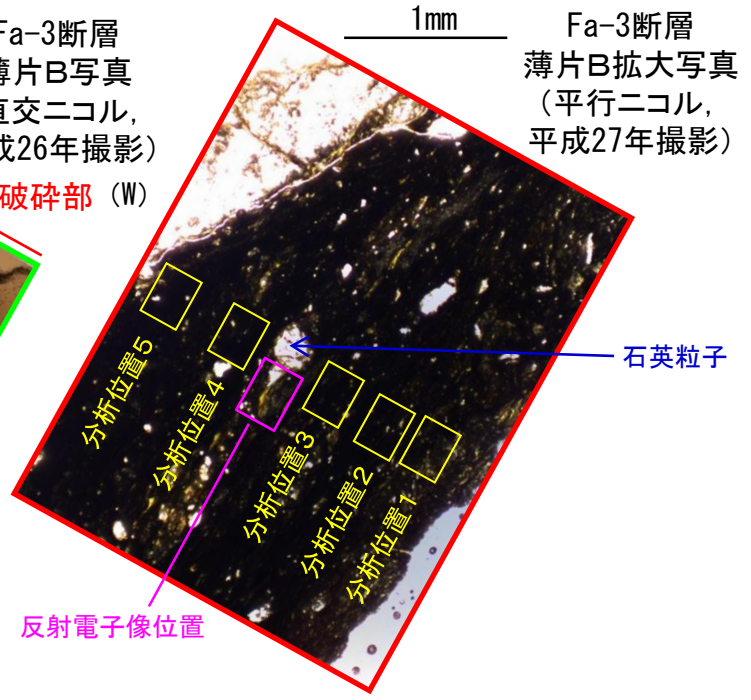
緑泥石／スメクタイト混合層脈

軟質部形成時期の検討③ < 細粒部のSEM-EDS分析(1) >

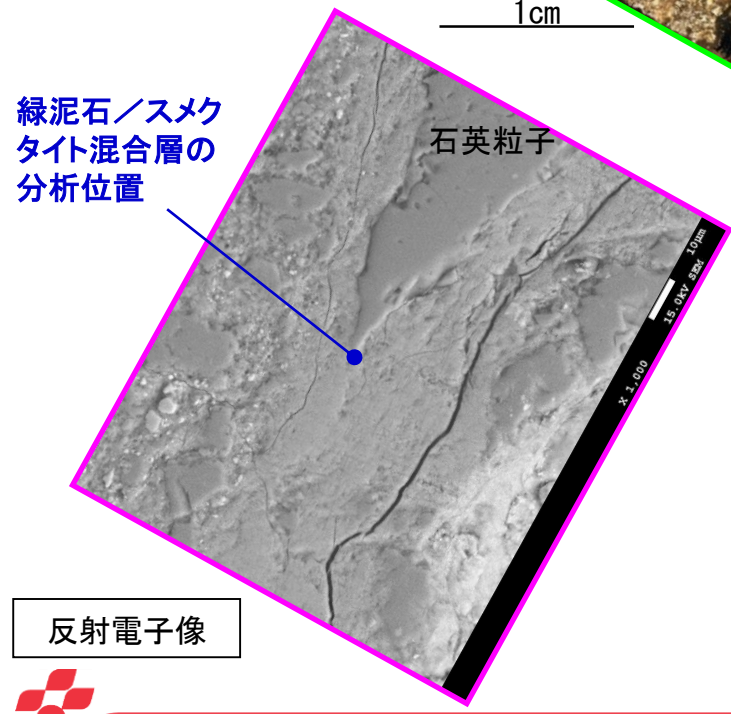
- Fa-3断層の細粒部を横断するように5箇所で粒子間の微小な粘土鉱物のSEM-EDS分析※を行う。
- 分析結果の比較のため緑泥石／スメクタイト混合層を対象に実施した分析結果を右下図に示す。Mg, Al, Siが同程度のピークを示し、層間陽イオンであるCaのピークが低いことが特徴である。



Fa-3断層薄片B写真 (直交ニコル, 平成26年撮影)

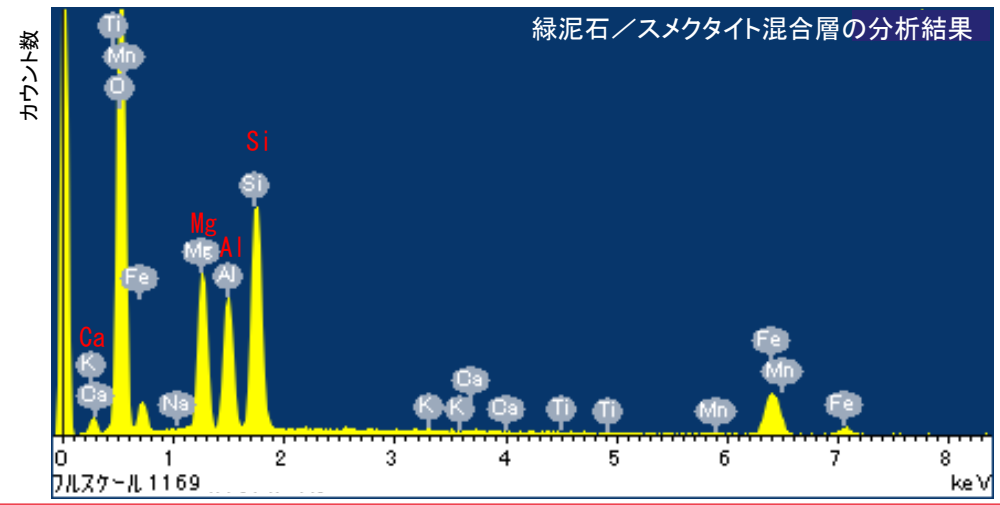


Fa-3断層薄片B拡大写真 (平行ニコル, 平成27年撮影)



緑泥石／スメクタイト混合層の分析位置

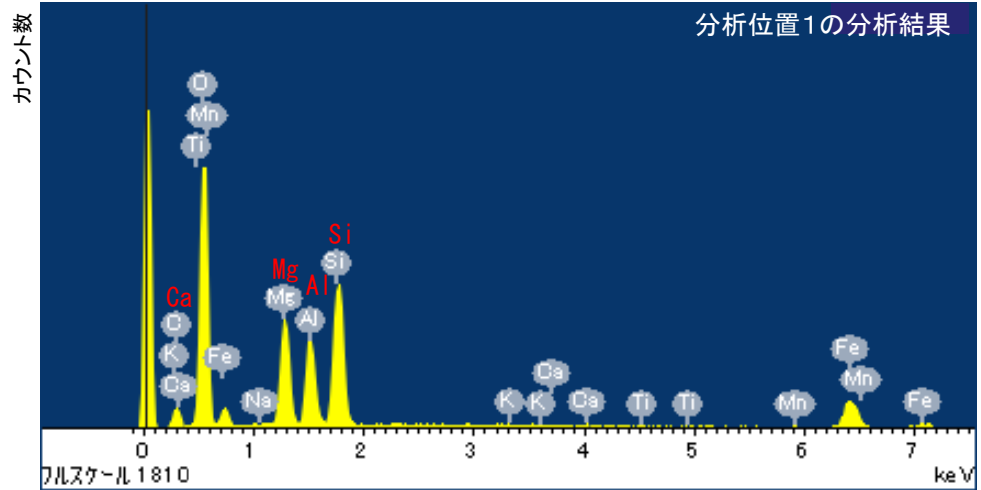
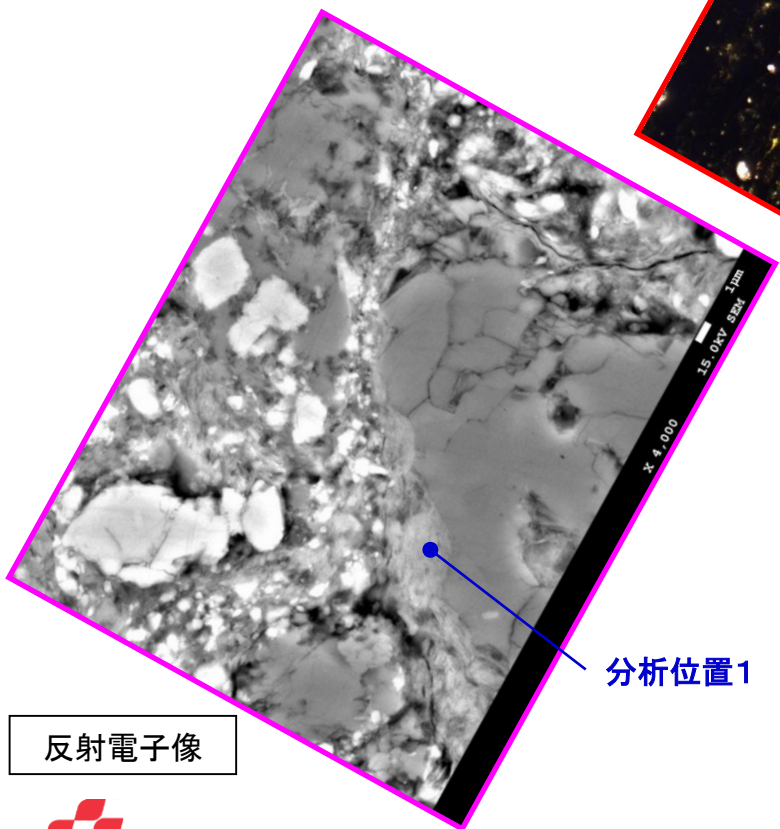
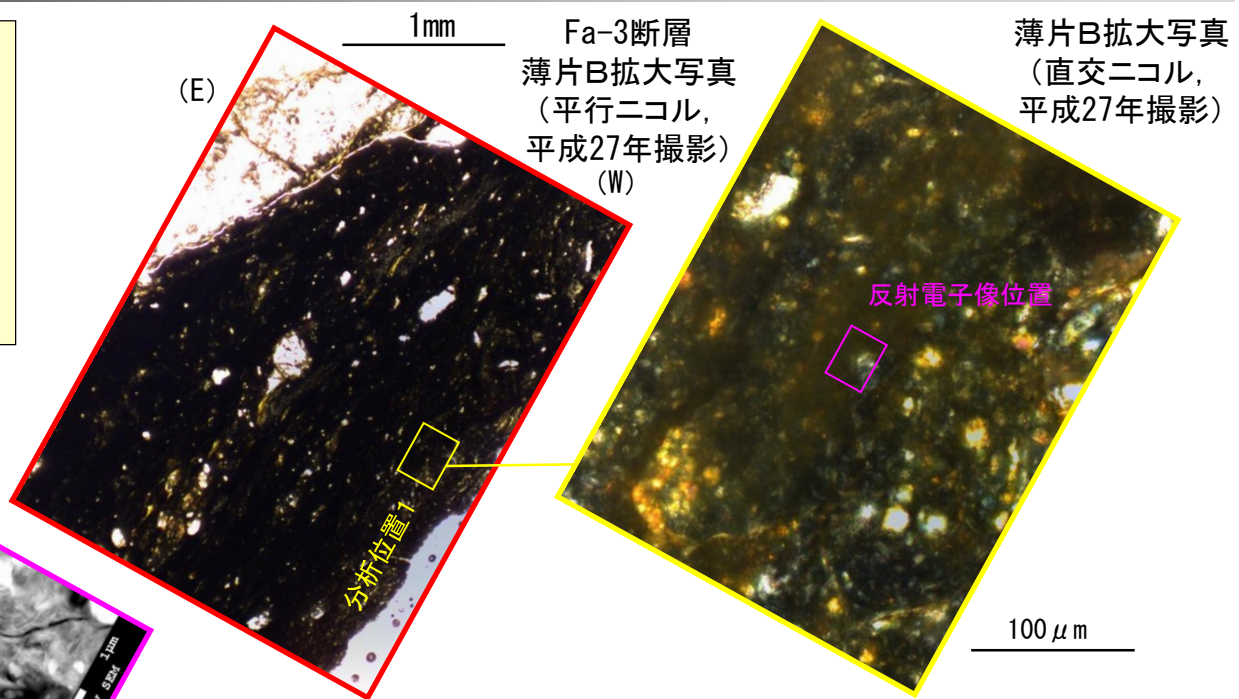
反射電子像



※微小な鉱物の分布を把握するために、高分解能での観察を可能とするFE-SEM(電界放射型走査電子顕微鏡)による観察を行い、SEM-EDS(エネルギー分散型X線分光器)で元素組成を分析した。

軟質部形成時期の検討④ < 細粒部のSEM-EDS分析 (2) >

○細粒部中の分析位置1において、粒子間の微小な粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。
○分析結果（右下図）は緑泥石／スメクタイト混合層の分析結果と類似する。



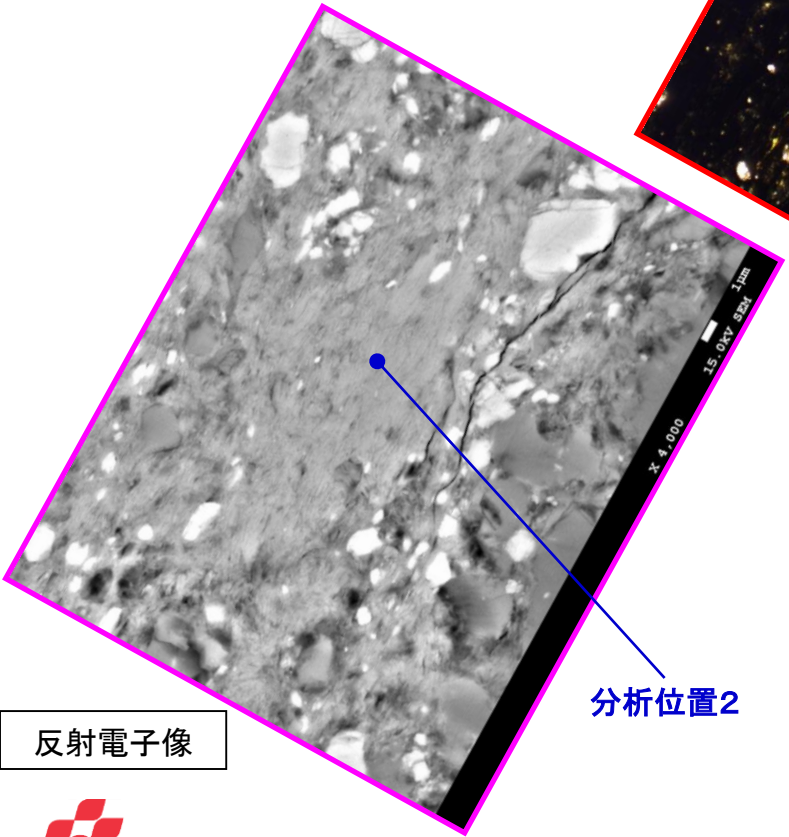
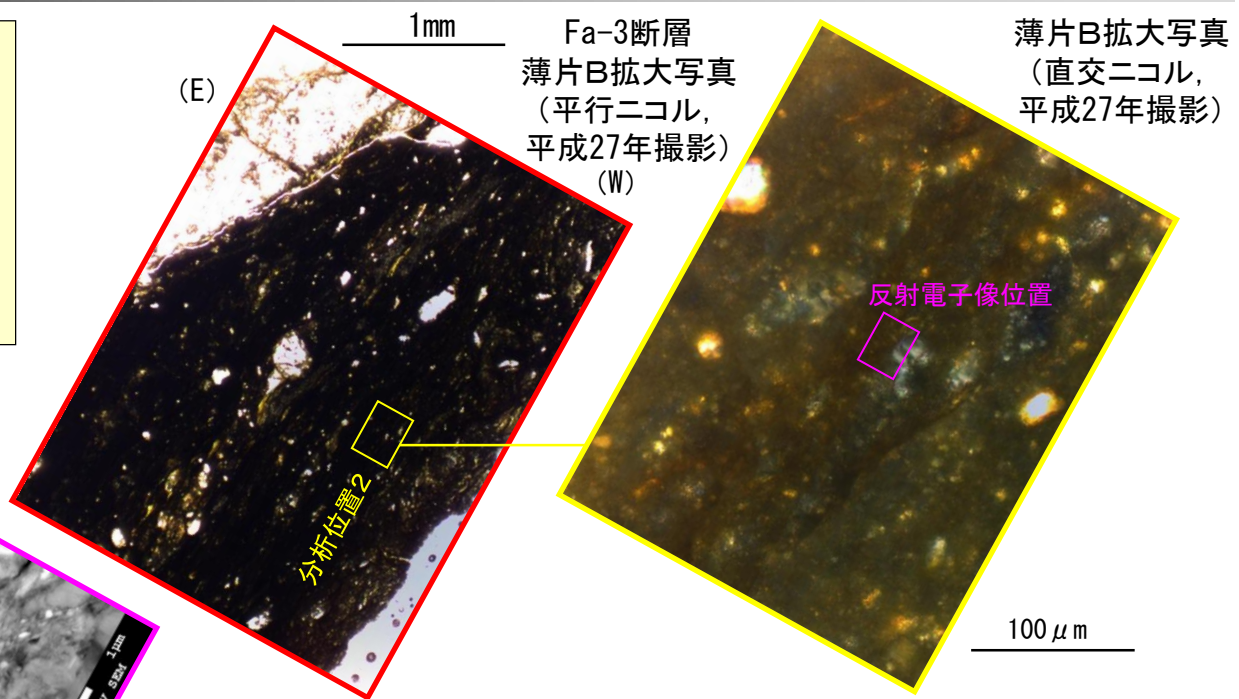
反射電子像

分析位置1

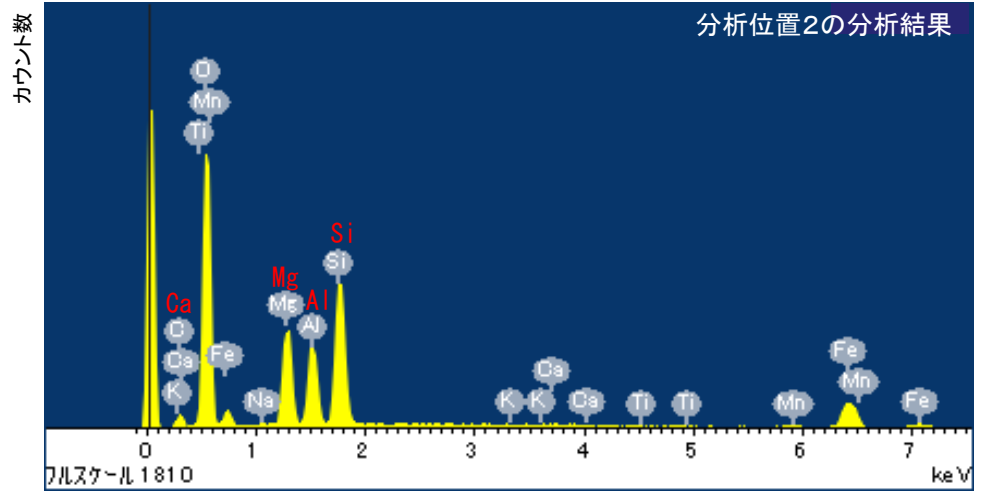
分析位置1の分析結果

軟質部形成時期の検討⑤ < 細粒部のSEM-EDS分析 (3) >

○細粒部中の分析位置2において、粒子間の微小な粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。
○分析結果（右下図）は緑泥石／スメクタイト混合層の分析結果と類似する。

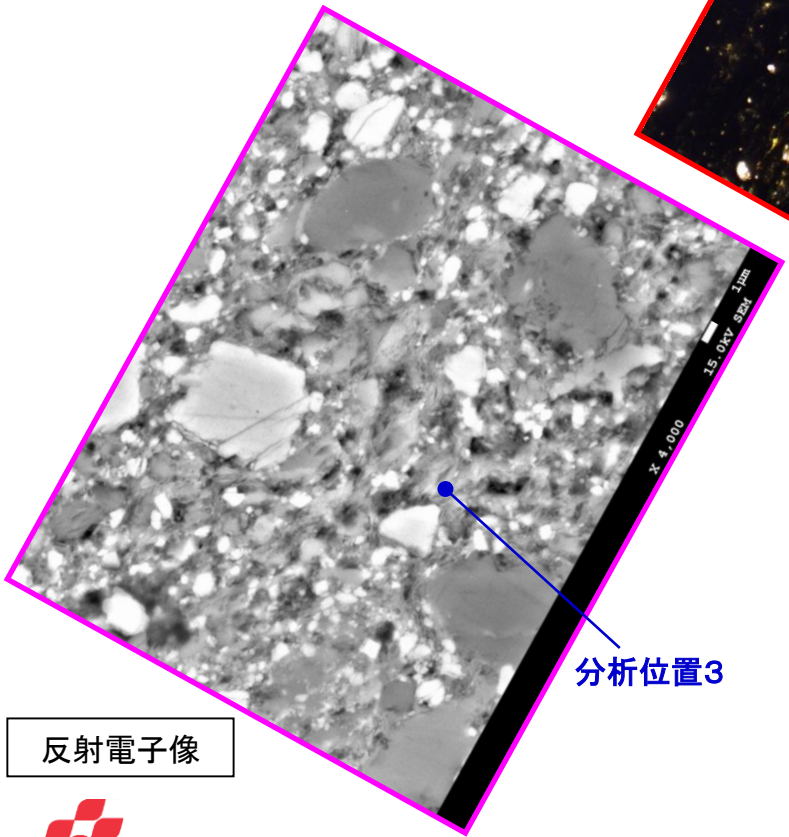
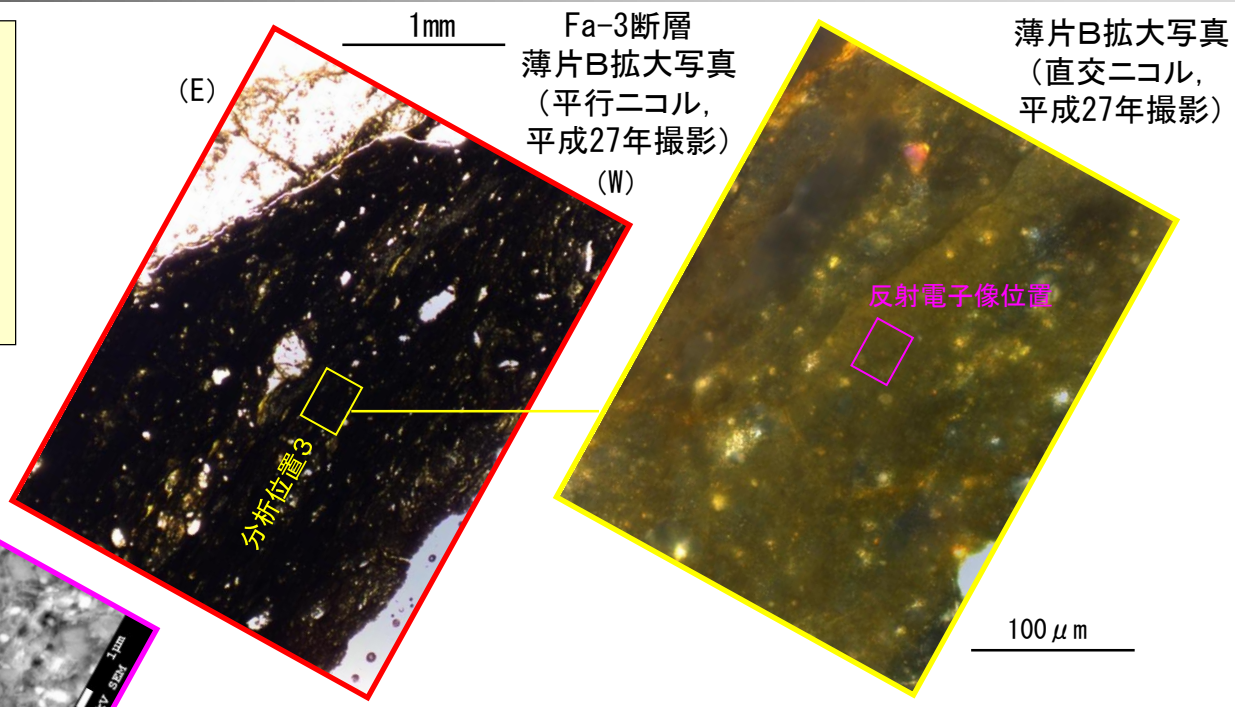


反射電子像

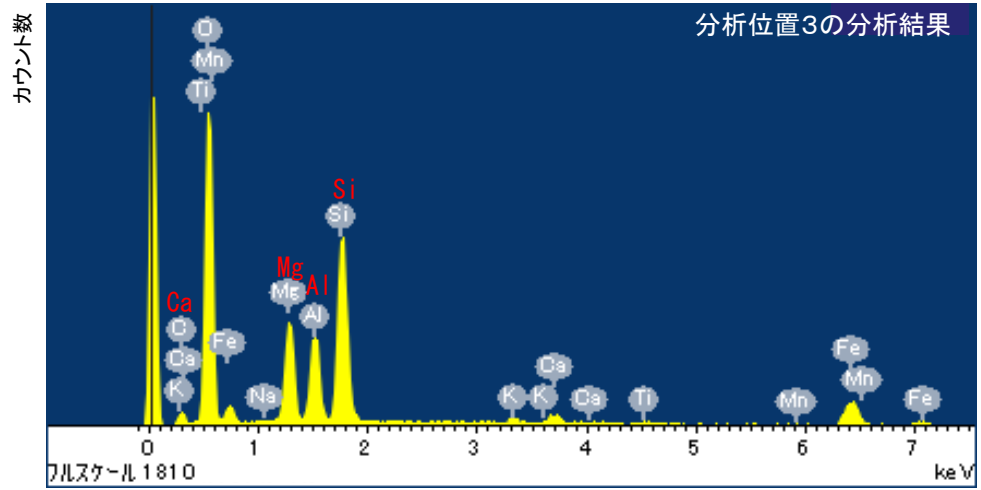


軟質部形成時期の検討⑥ < 細粒部のSEM-EDS分析 (4) >

- 細粒部中の分析位置3において、粒子間の微小な粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。
- 分析結果（右下図）は緑泥石／スメクタイト混合層の分析結果と類似する。

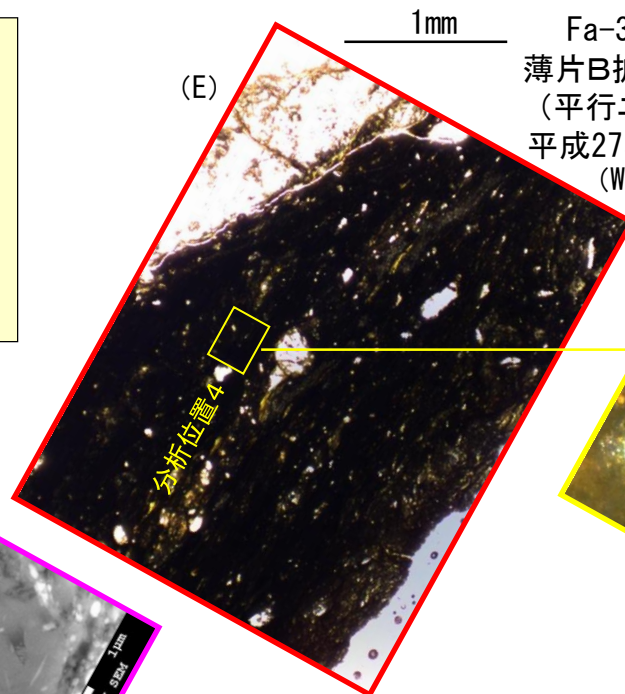


反射電子像

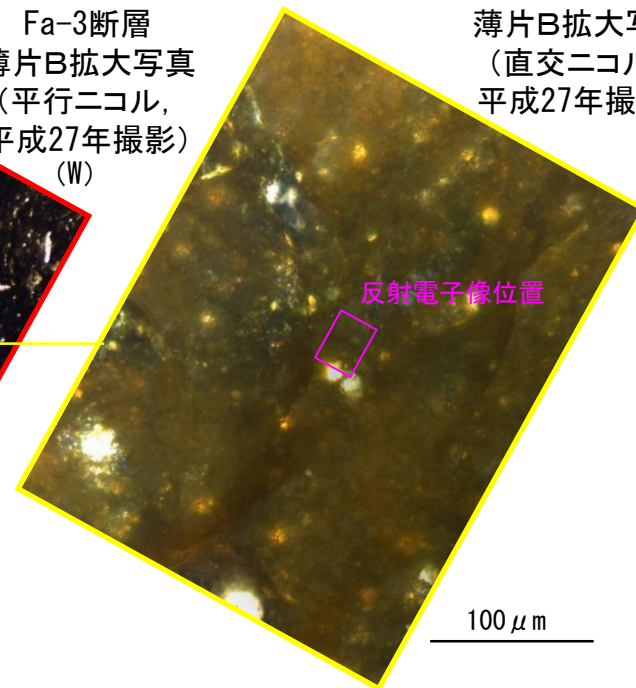


軟質部形成時期の検討⑦ < 細粒部のSEM-EDS分析 (5) >

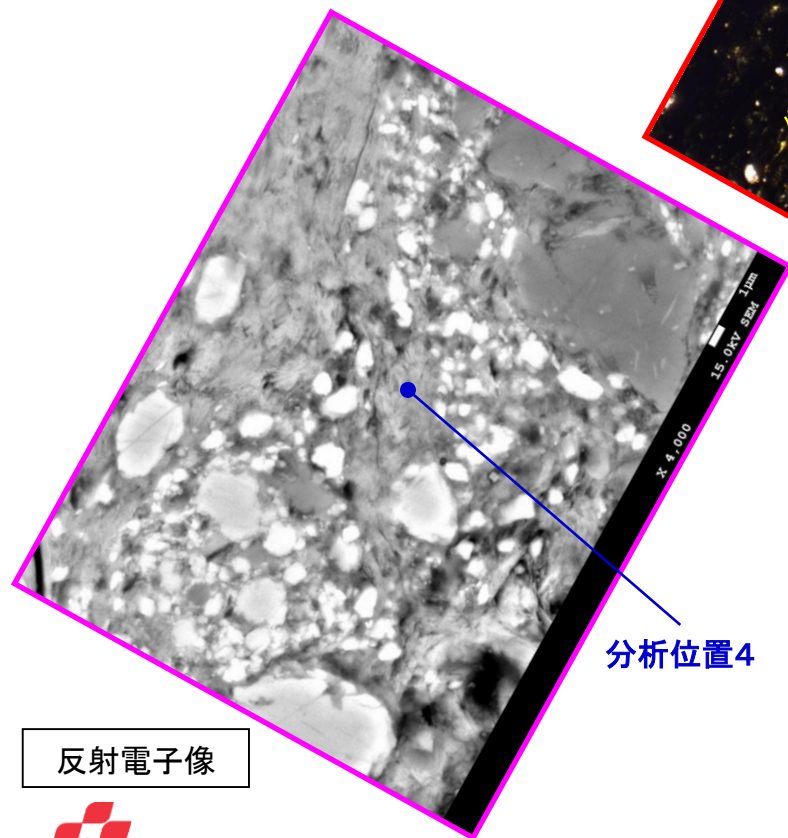
- 細粒部中の分析位置4において、粒子間の微小な粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。
- 分析結果（右下図）は緑泥石／スメクタイト混合層の分析結果と類似する。



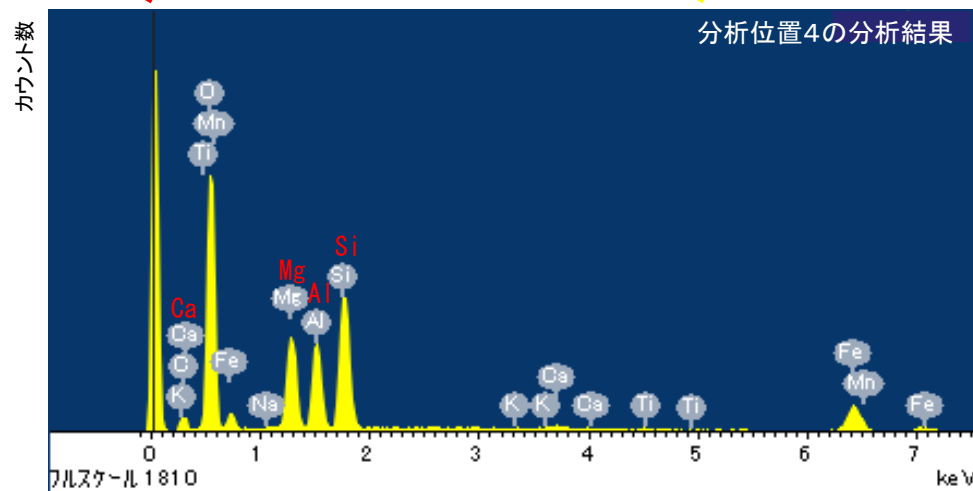
Fa-3断層
薄片B拡大写真
(平行ニコル,
平成27年撮影)
(W)



薄片B拡大写真
(直交ニコル,
平成27年撮影)

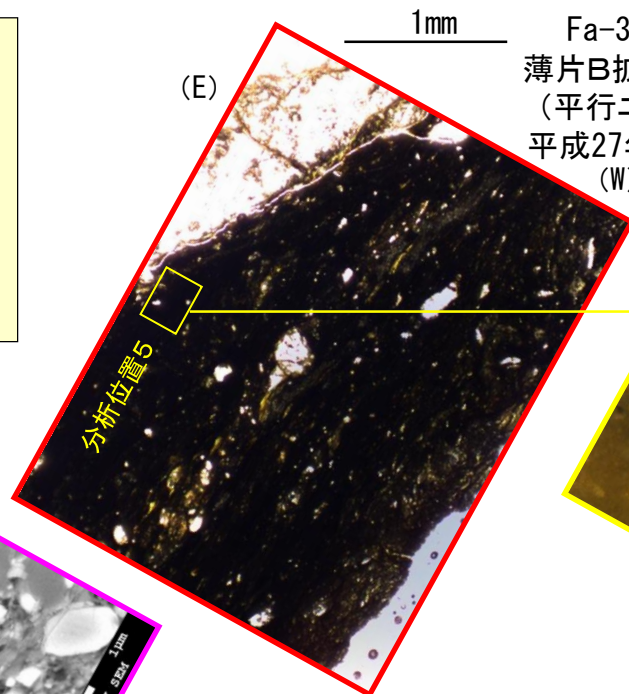


反射電子像

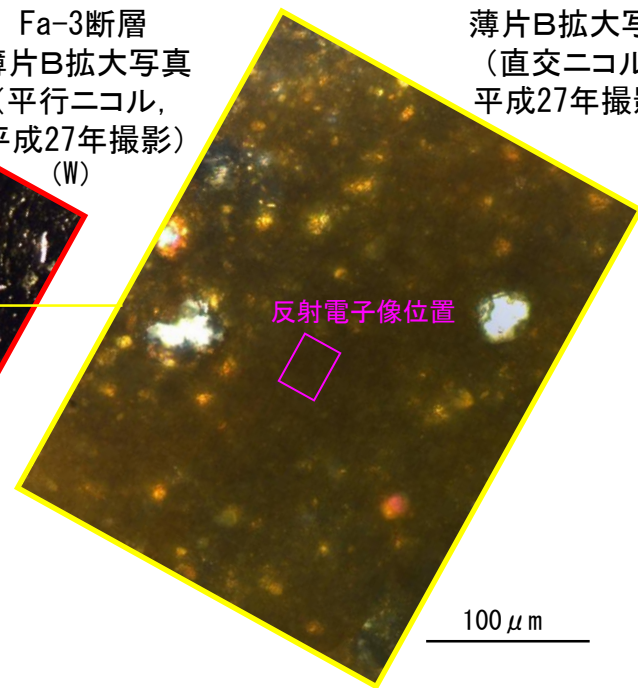


軟質部形成時期の検討⑧ < 細粒部のSEM-EDS分析 (6) >

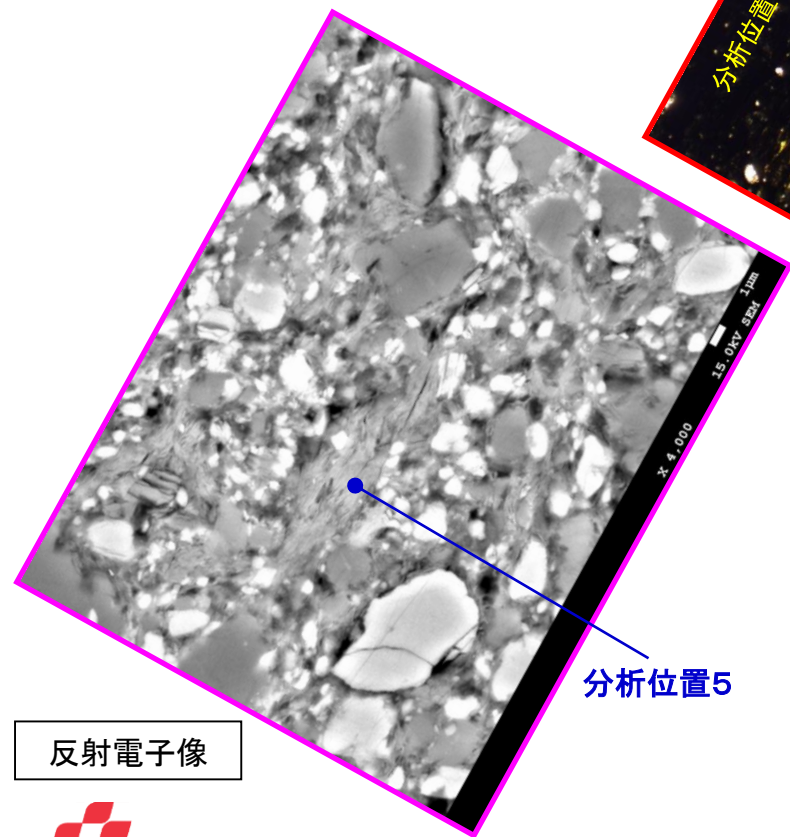
- 細粒部中の分析位置5において、粒子間の微小な粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。
- 分析結果（右下図）は緑泥石／スメクタイト混合層の分析結果と類似する。



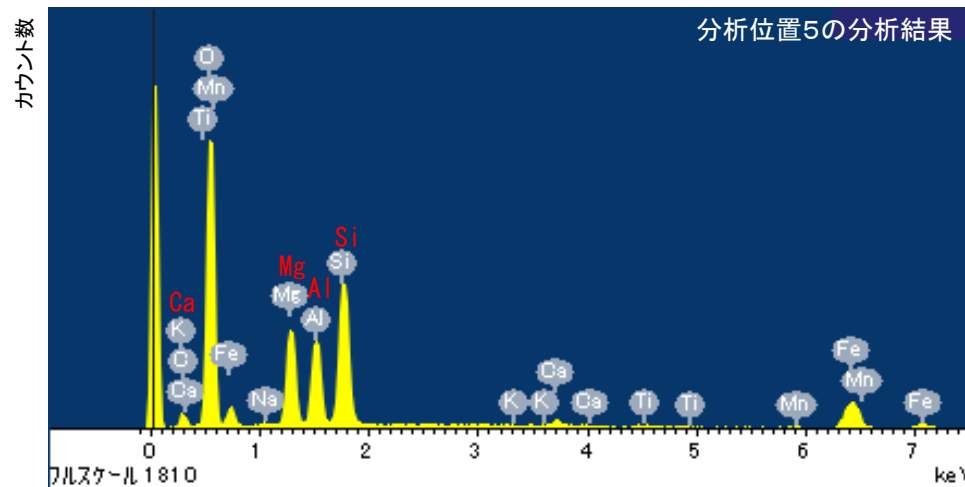
Fa-3断層
薄片B拡大写真
(平行ニコル,
平成27年撮影)
(W)



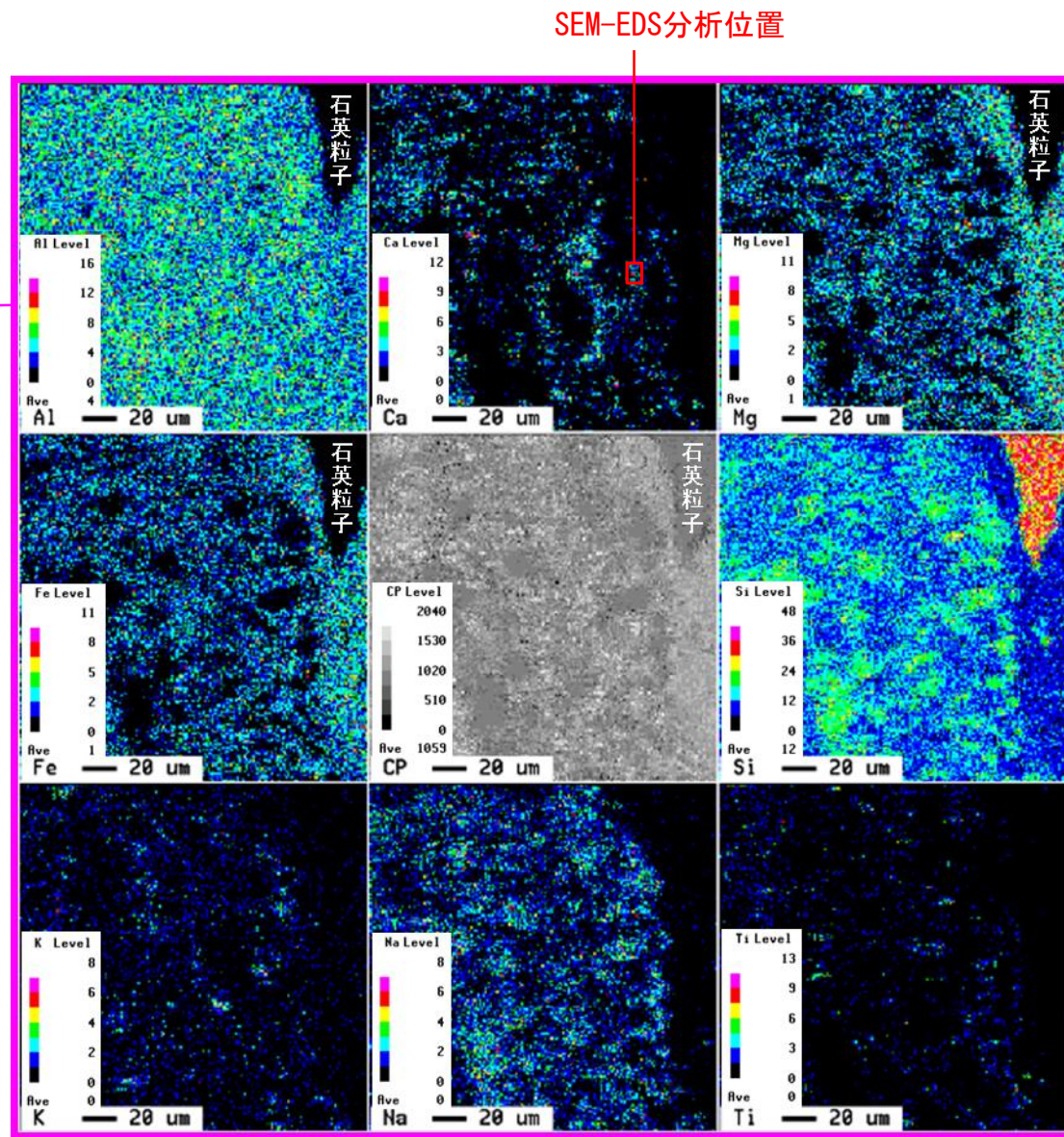
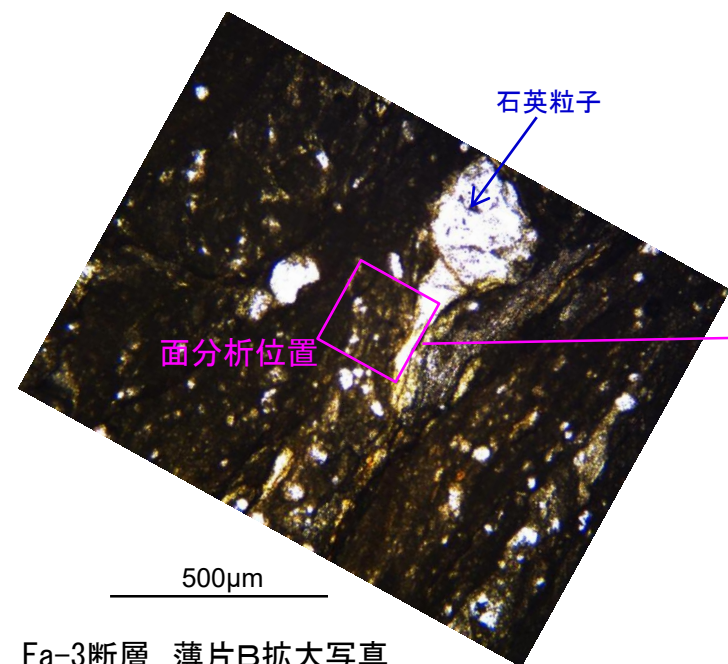
薄片B拡大写真
(直交ニコル,
平成27年撮影)



反射電子像



軟質部形成時期の検討⑨ < 細粒部の面分析 >



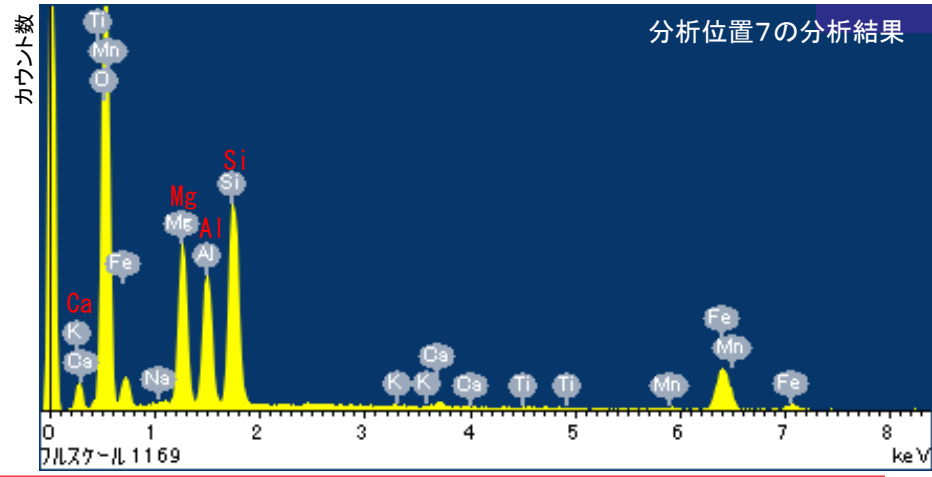
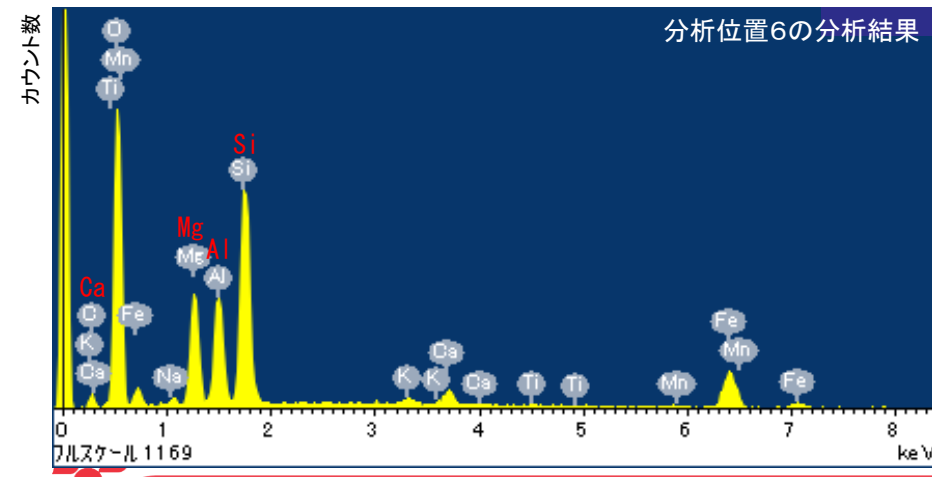
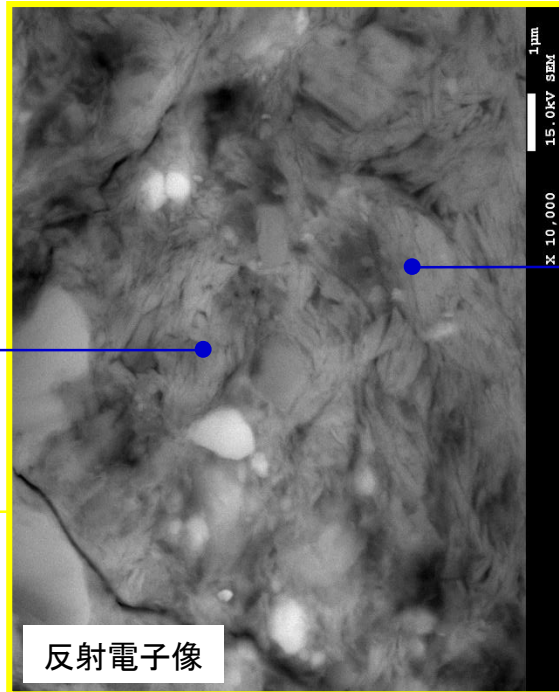
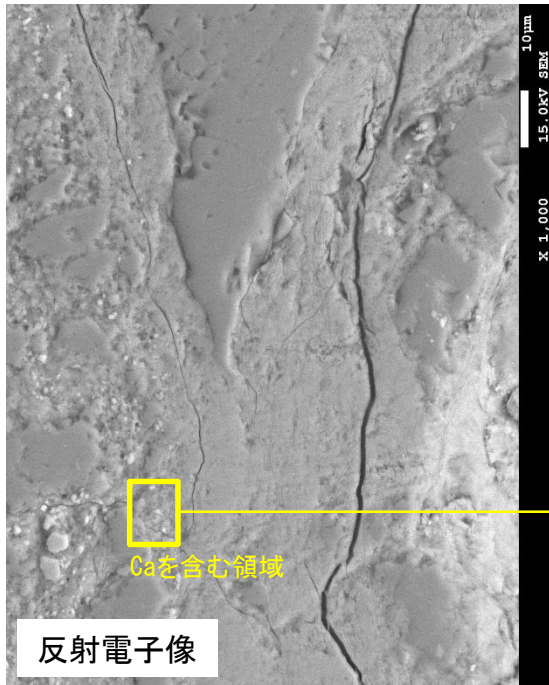
Fa-3断層 薄片B拡大写真
(平行ニコル, 平成27年撮影)

- 2 µm以下の試料からスメクタイトが検出されたことを踏まえ、細粒部中の元素の面分析を行い、分析結果を1 µmのピクセルで出力した。
- スメクタイトは緑泥石よりもCa, Siが多く、Alが少ない領域に分布することが期待される。
- 面分析結果によると、Alの濃度が変化に乏しくほぼ一様であるためスメクタイト分布域の特定は困難であるものの、Caを含む領域でSEM-EDS分析を行う。

軟質部形成時期の検討⑩ < 細粒部のSEM-EDS分析 (7) >

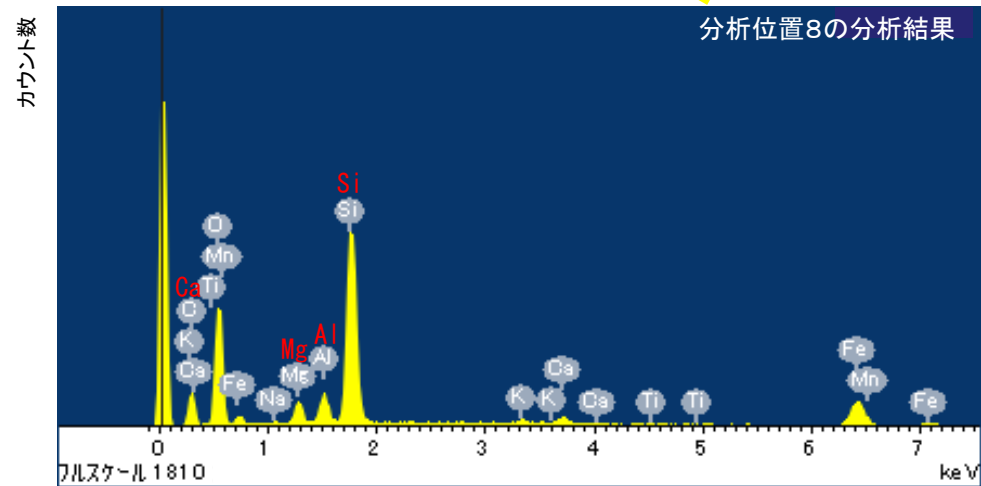
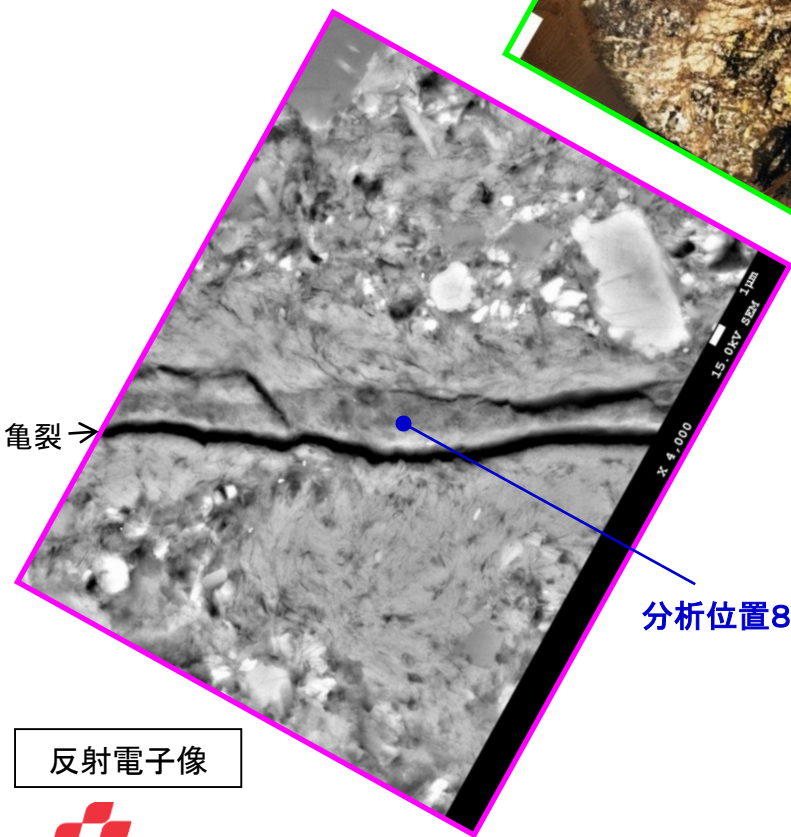
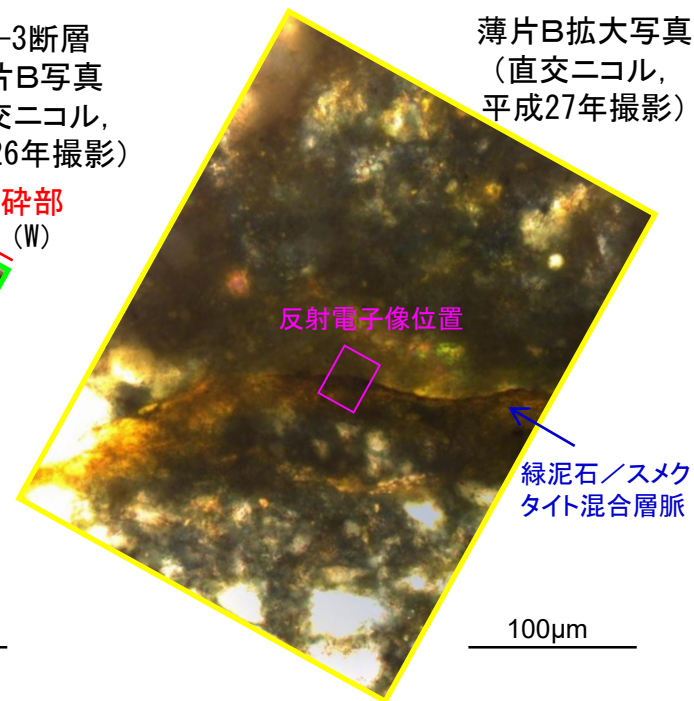
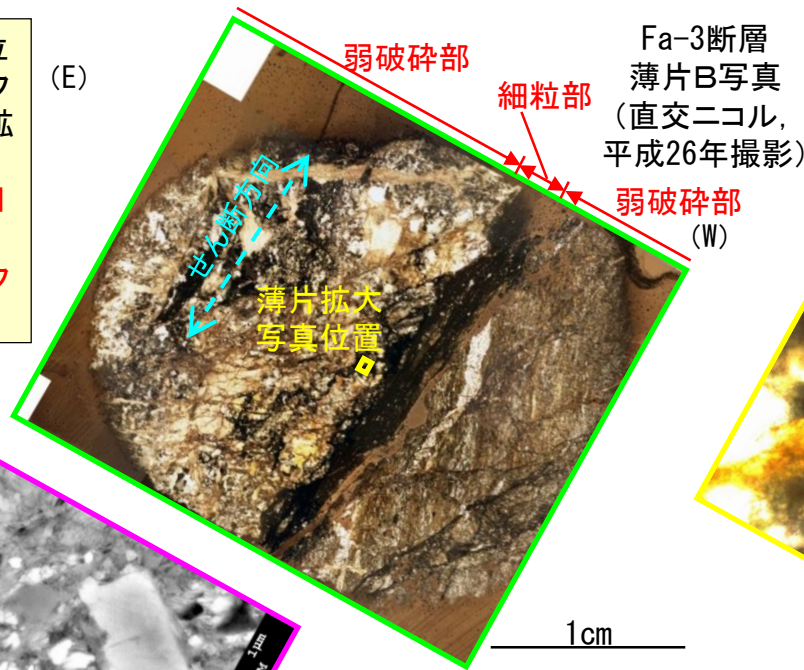
○Caを含む領域中の分析位置6, 7において、粒子間の微小な粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。

○分析結果（下図）は緑泥石／スメクタイト混合層の分析結果と類似する。



軟質部形成時期の検討⑪ < 亀裂沿いのSEM-EDS分析 (1) >

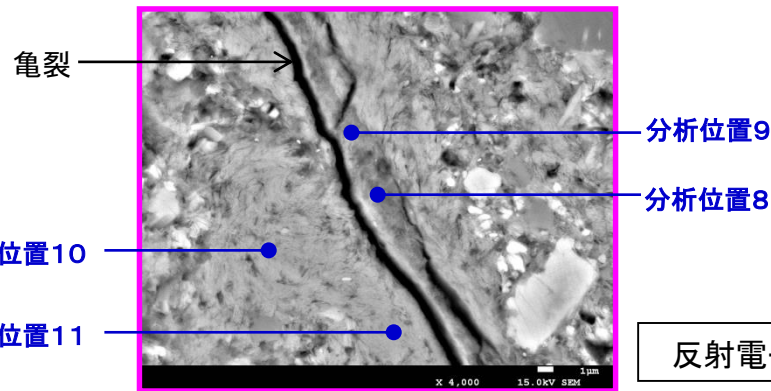
- 弱破碎部中の亀裂沿いの分析位置8において、緑泥石／スメクタイト混合層脈と接する粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。
- 分析結果（右下図）は、Mg、AlよりSiのピークが顕著に高く、層間陽イオンであるCaのピークもやや高い。



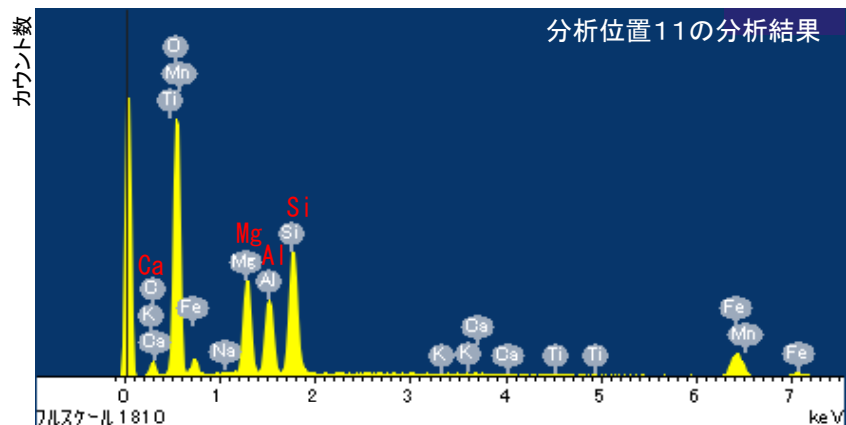
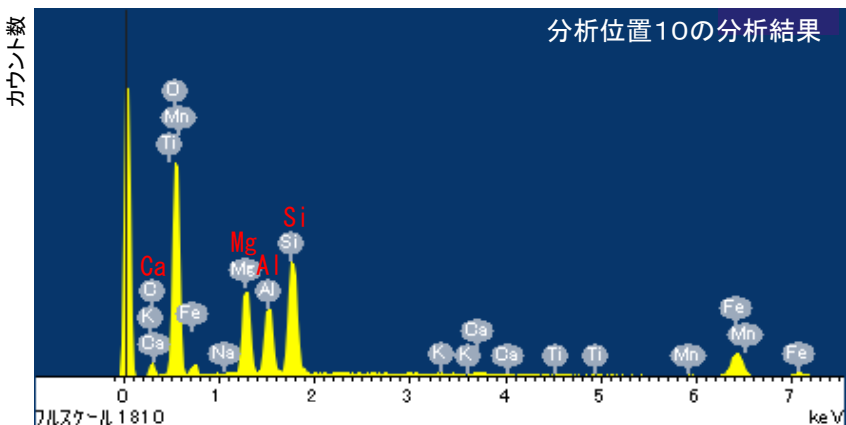
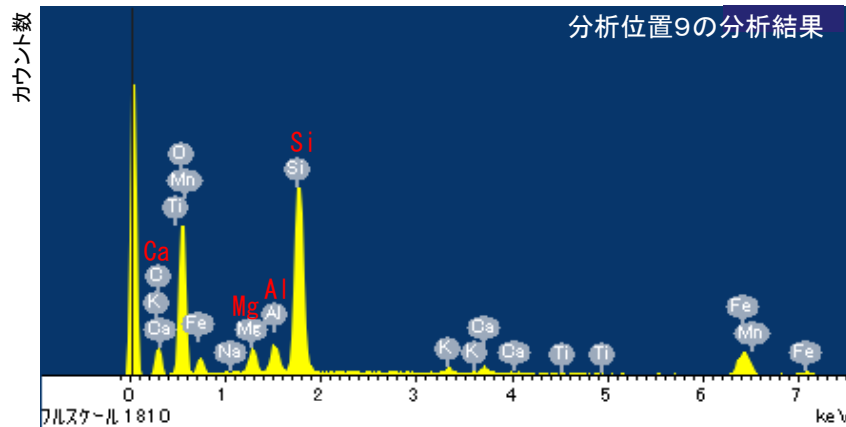
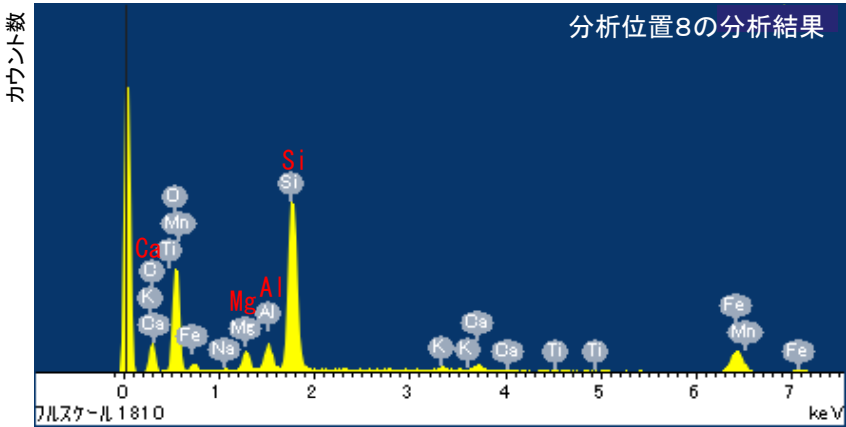
軟質部形成時期の検討⑫ < 亀裂沿いのSEM-EDS分析 (2) >

○弱破碎部中の亀裂沿いの分析位置8～11において、粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。

○8, 9の分析結果はMg, AlよりSiのピークが顕著に高く、層間陽イオンであるCaのピークもやや高い。一方、10, 11の分析結果はMg, Al, Siが同程度のピークを示し、Caのピークが低く、緑泥石/スメクタイト混合層の分析結果と類似する。

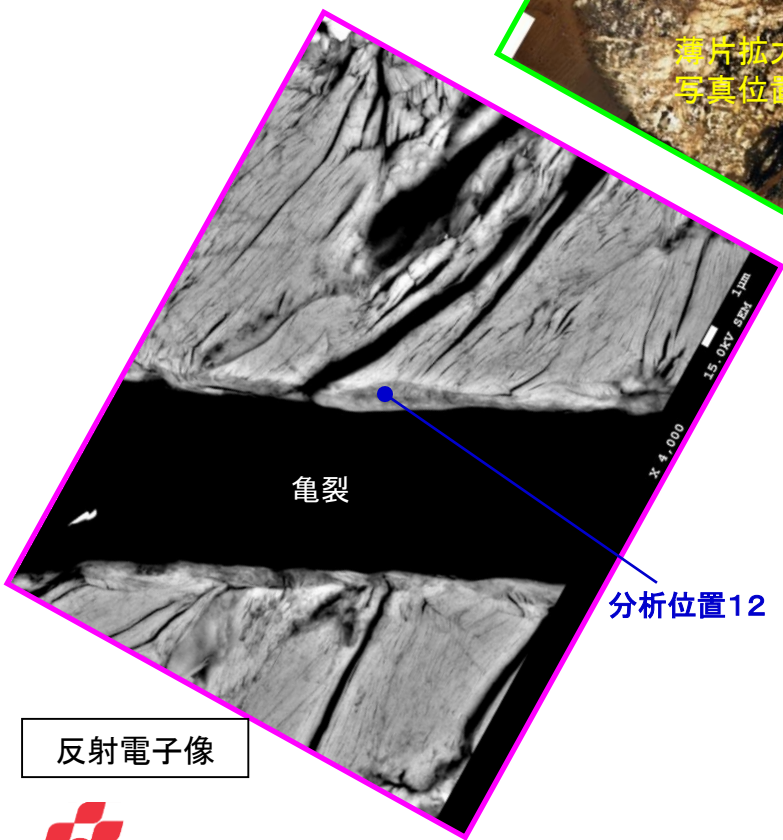
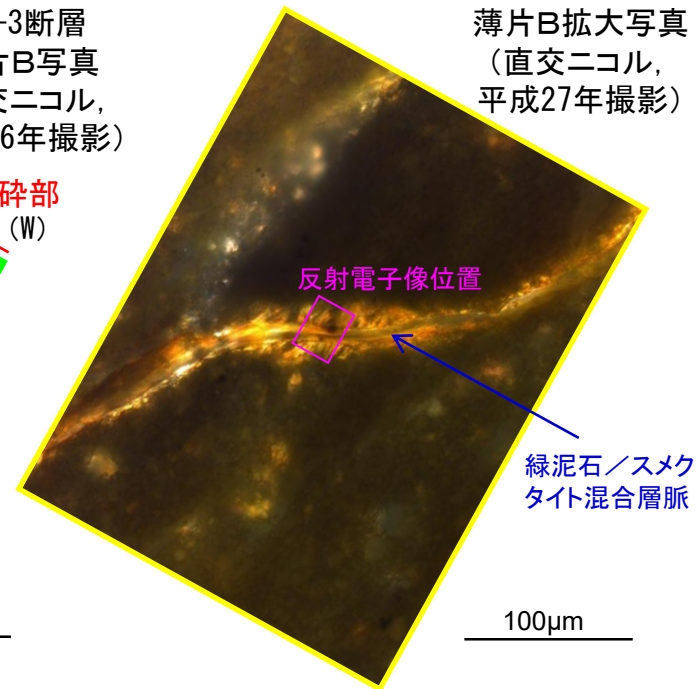
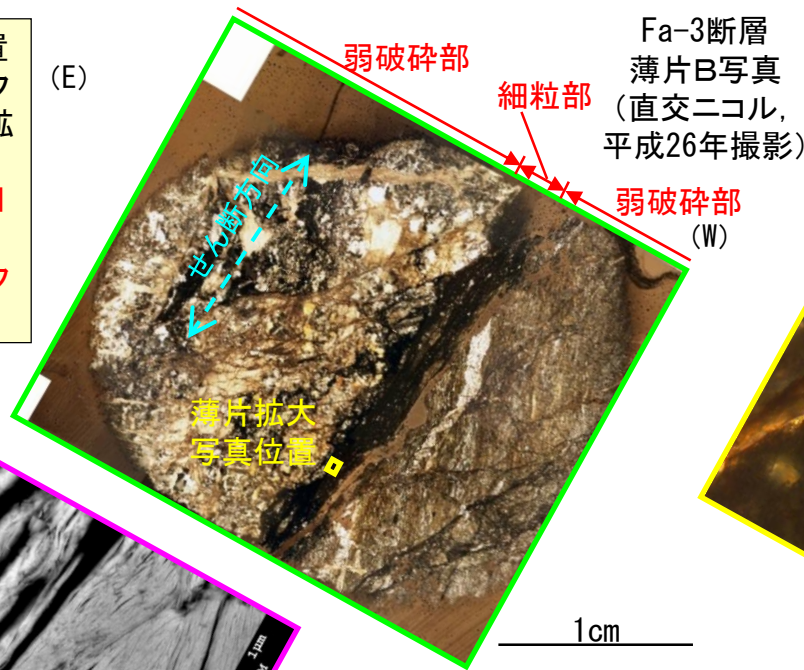


反射電子像

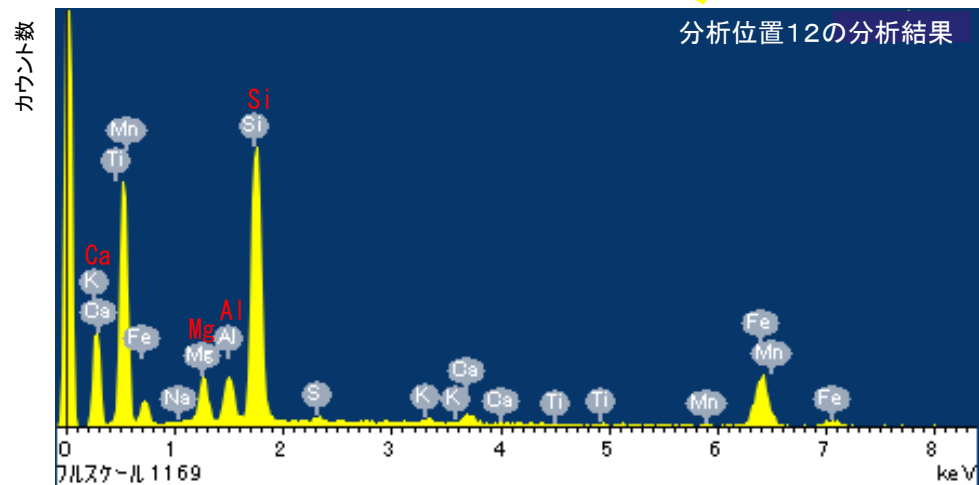


軟質部形成時期の検討⑬ < 亀裂沿いのSEM-EDS分析 (3) >

- 細粒部中の亀裂沿いの分析位置12において、緑泥石／スメクタイト混合層脈と接する粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。
- 分析結果（右下図）は、Mg, AlよりSiのピークが顕著に高く、層間陽イオンであるCaのピークも高い。

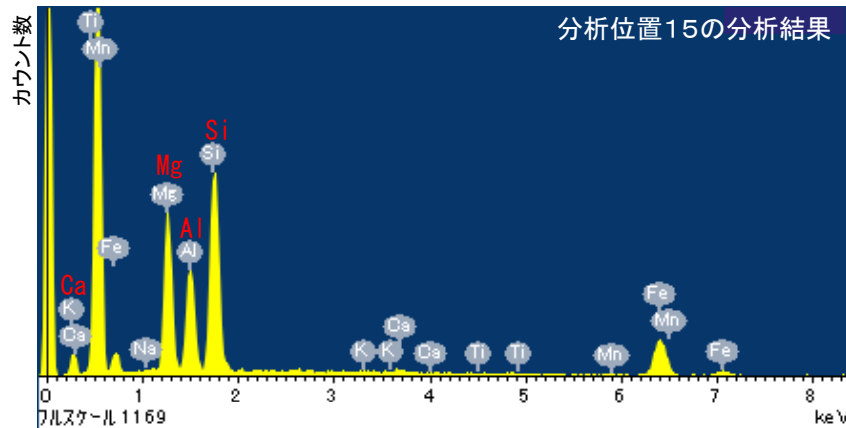
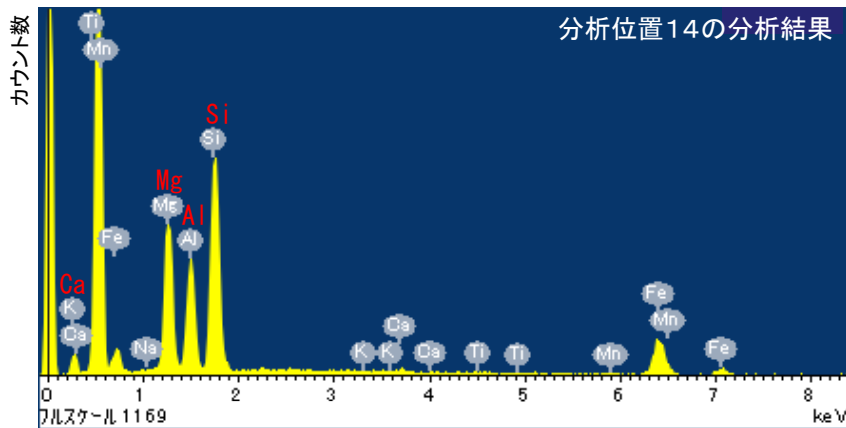
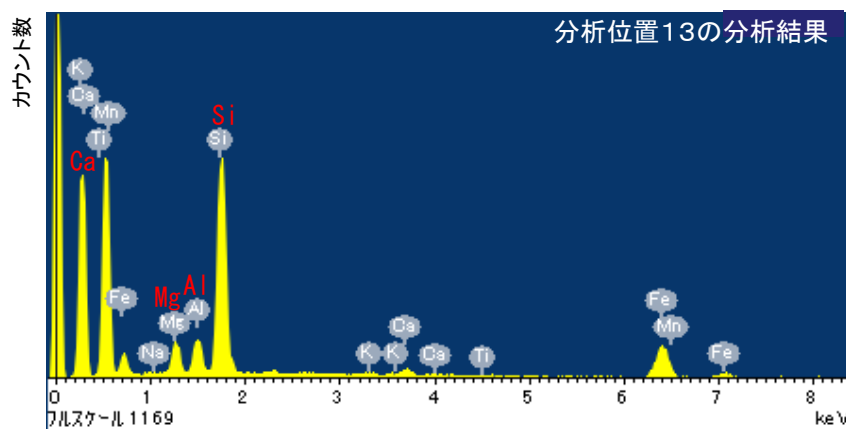
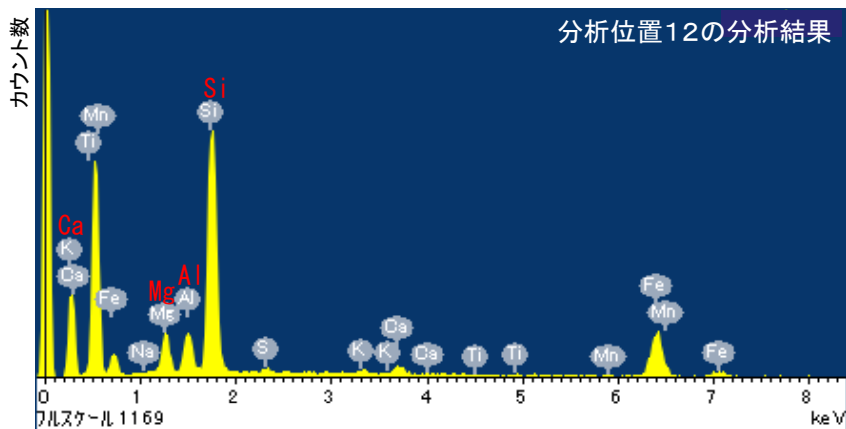
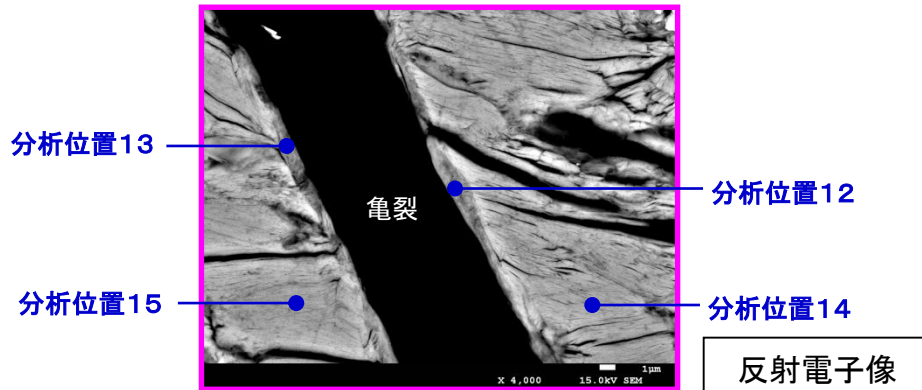


反射電子像



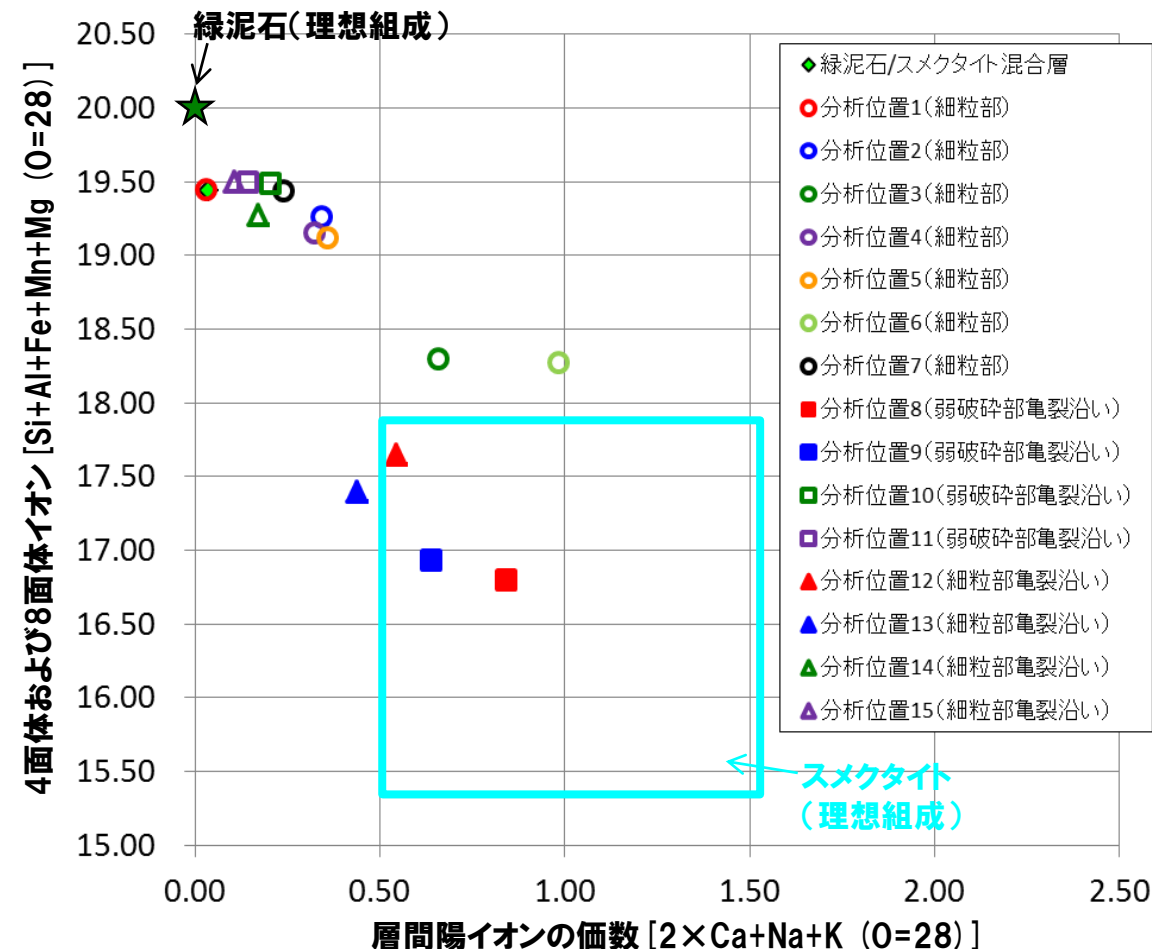
軟質部形成時期の検討⑭ < 亀裂沿いのSEM-EDS分析 (4) >

- 細粒部中の亀裂沿いの分析位置12～15において、粘土鉱物のSEM-EDS分析を行った。
- 12, 13の分析結果はMg, AlよりSiのピークが顕著に高く、層間陽イオンであるCaのピークも高い。一方、14, 15の分析結果はMg, Al, Siが同程度のピークを示し、Caのピークが低く、緑泥石/スメクタイト混合層の分析結果と類似する。

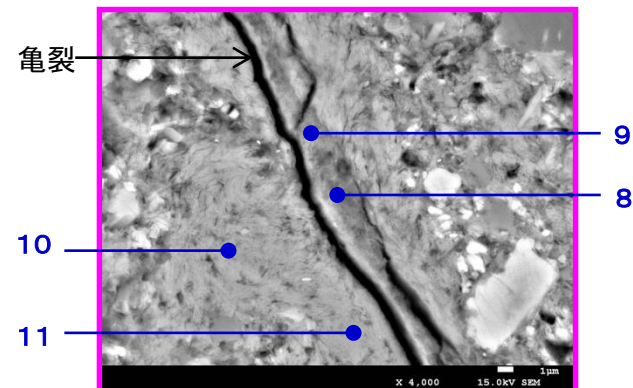
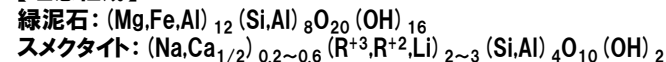


軟質部形成時期の検討⑮ <スメクタイトの化学組成>

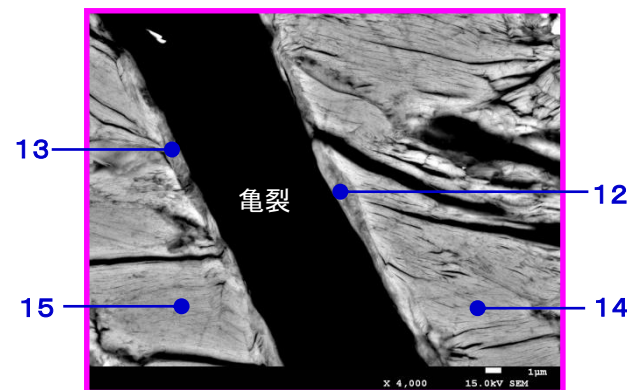
- Fa-3断層のSEM-EDS分析結果から陽イオンの構成比を換算し、4面体および8面体イオン層間陽イオンの価数図にプロットすると、細粒部中の微小な粘土鉱物は緑泥石の理想化学組成とスメクタイトの理想化学組成の間にプロットされる。一方、亀裂沿いで緑泥石/スメクタイト混合層脈と接する粘土鉱物はスメクタイトの理想化学組成の領域付近にプロットされる。
- Fa-3断層の細粒部中に緑泥石/スメクタイト混合層が多く生成しており、亀裂沿いにスメクタイトが生成していることを示す。断層内には吸水により軟質化しやすいスメクタイトおよび緑泥石/スメクタイト混合層が含まれる。



【理想組成】



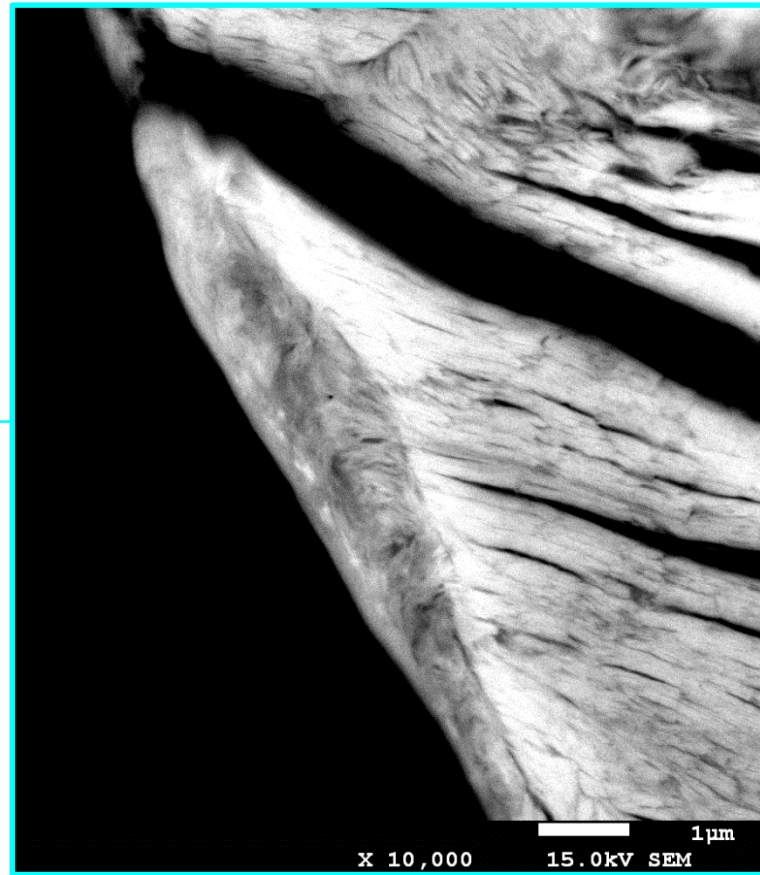
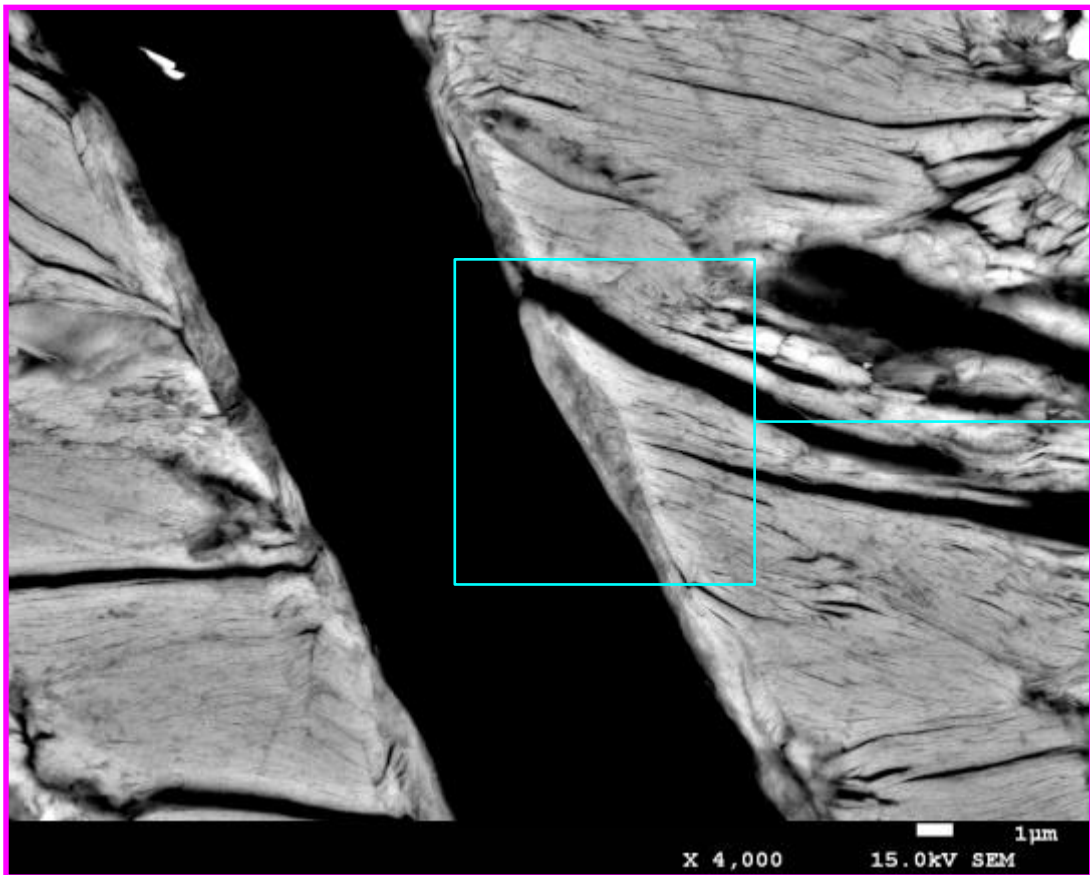
反射電子像



反射電子像

軟質部形成時期の検討⑬⑭ <スメクタイトの産状>

- 緑泥石／スメクタイト混合層脈と接して亀裂側に薄く（厚さ1 μm程度）シート状のスメクタイトが生成してせん断を受けておらず，両者の境界が明瞭である。
- 緑泥石／スメクタイト混合層脈の生成後，地下水の作用で亀裂沿いにスメクタイトが生成したことを示す。



緑泥石／スメクタイト混合層

反射電子像(4,000倍)

亀裂

スメクタイト

緑泥石／スメクタイト混合層

スメクタイト

亀裂

反射電子像(10,000倍)

緑泥石／スメクタイト混合層

スメクタイト

軟質部形成時期の検討⑱ <スメクタイトの生成する温度条件と生成時期>

- スメクタイトが生成する温度条件は緑泥石あるいは緑泥石／スメクタイト混合層よりも低い。スメクタイトの生成は緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）の生成より後で、相対的に地表に近い低温な環境で生成したものである。
- 地表近くに位置して以降、地下水の作用で断層内の亀裂沿いにスメクタイトが生成し、断層幅が大きく水の影響を受けやすい箇所ではスメクタイトおよび緑泥石／スメクタイト混合層が吸水して軟質部が形成されたものと考えられる。

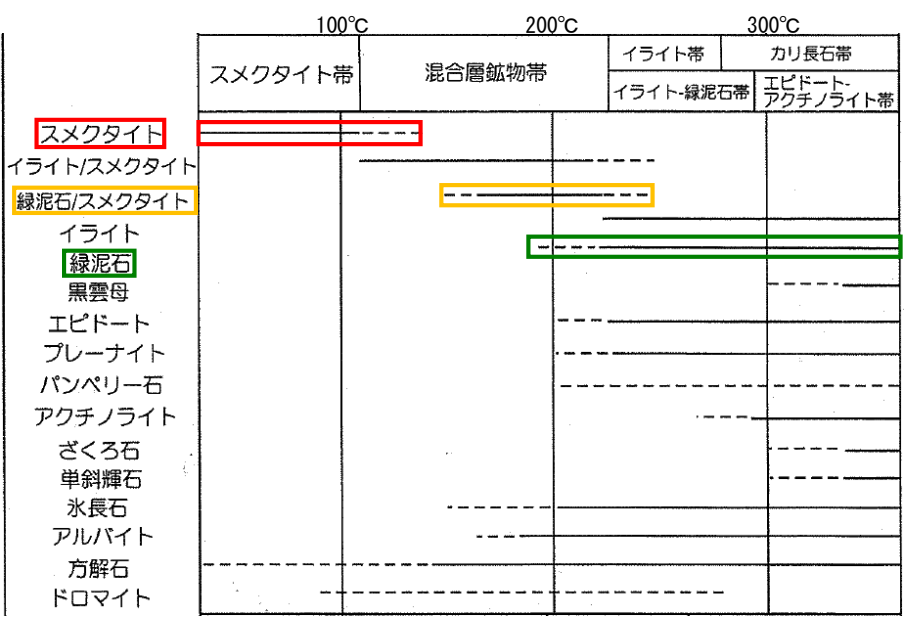
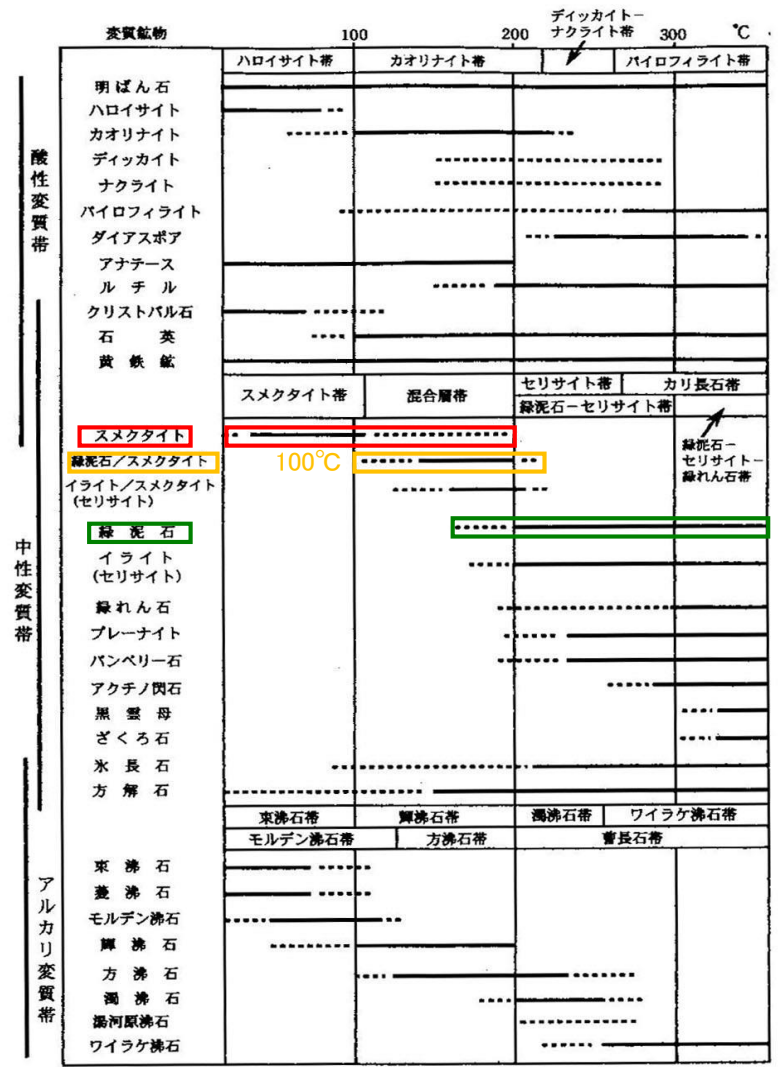


図9 各変質帯に特徴的な鉱物とそれらの概略の生成温度(吉村(2001)を改変)。

井上(2003)より抜粋・一部加筆



吉村編(2001)より抜粋・一部加筆

図V-35 温度と熱水溶液の相違による変質鉱物の生成環境。ここに示した各変質帯の形成温度は一応の目安である。Inoue(1995); 井沢(1996)をもとに編集



井沢英二, 1996, 資源の探査. 平朝彦ほか編, 地球の観測. 岩波講座「地球惑星科学」, 291-323.

吉村尚久編, 2001, 粘土鉱物と変質作用, 地学双書32, 293pp.

井上厚行, 2003, 熱水変質作用. 資源環境地質学, 資源地質学会, 195-202.

Inoue, A., 1995, Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments. In Velde, B.(ed.) Origin and Mineralogy of Clays. Springer, 169-329.

Fa-3断層の活動時期に関する検討結果

①Fa-3断層の生成時期の検討

→断層近傍において硬質の塩基性片岩が急激に破断せずにひきずりを残している。

・断層は母岩の片理を切っており、断層の生成は片理の形成より後である。

⇒塑性流動の起こりうる地下数km以深で生成した断層である。

⇒約9千万年前以降に三波川変成岩類の上昇過程で生成した断層である。

②Fa-3断層の活動が終了した時期の検討

→断層の活動は細粒部を横断する緑泥石脈(スメクタイトとの混合層を伴う)の生成以前である。

・緑泥石脈の生成環境については、地温約100℃以上の地下深部での生成と地表付近での熱水による生成の2つの可能性がある。

⇒現在、敷地において熱水は認められず、地表付近における熱水変質の痕跡も認められない。

⇒緑泥石脈は三波川変成岩類が上昇する過程における地温約100℃以上の地下深部で生成したものであり、その生成時期は約10Ma以前と見積もられる。

⇒Fa-3断層の活動時期は約10Ma以前であり、後期更新世よりはるかに古い。

③Fa-3断層内の軟質部の形成時期の検討

→断層内には吸水により軟質化しやすいスメクタイトおよび緑泥石/スメクタイト混合層が含まれる。

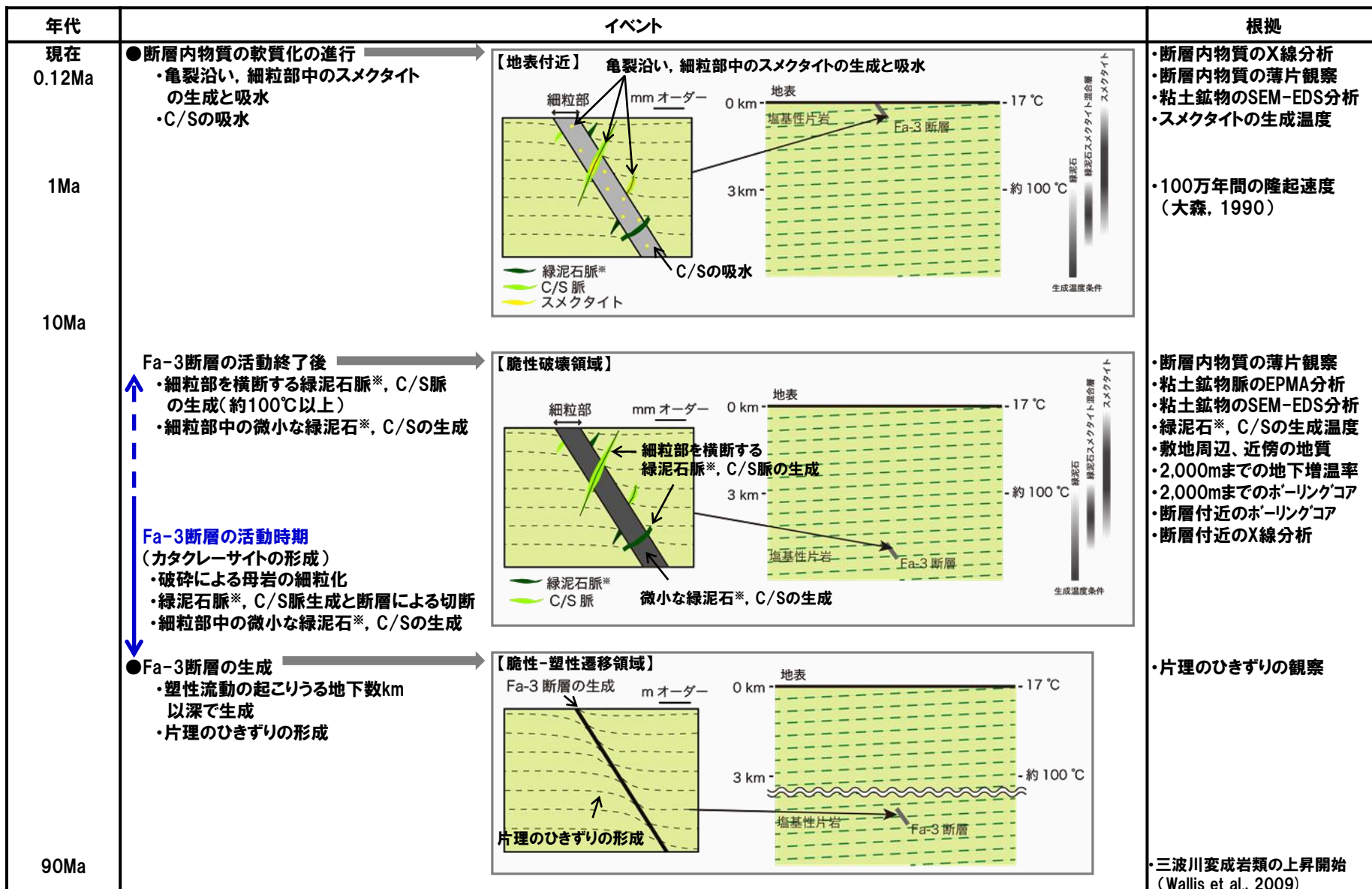
⇒軟質部を含む断層と軟質部の認められない断層の双方の細粒部中にスメクタイトが生成しており、スメクタイトの生成は断層内が軟質含みとなる前から始まっている。

⇒断層内に緑泥石/スメクタイト混合層が多く生成するとともに、緑泥石/スメクタイト混合層脈と接して亀裂側に薄くシート状のスメクタイトが生成してせん断を受けておらず、両者の境界が明瞭である。

⇒地表近くに位置して以降、地下水の作用で断層内の亀裂沿いにスメクタイトが生成し、断層幅が大きく水の影響を受けやすい箇所ではスメクタイトおよび緑泥石/スメクタイト混合層が吸水して軟質部が形成されたものと考えられる。

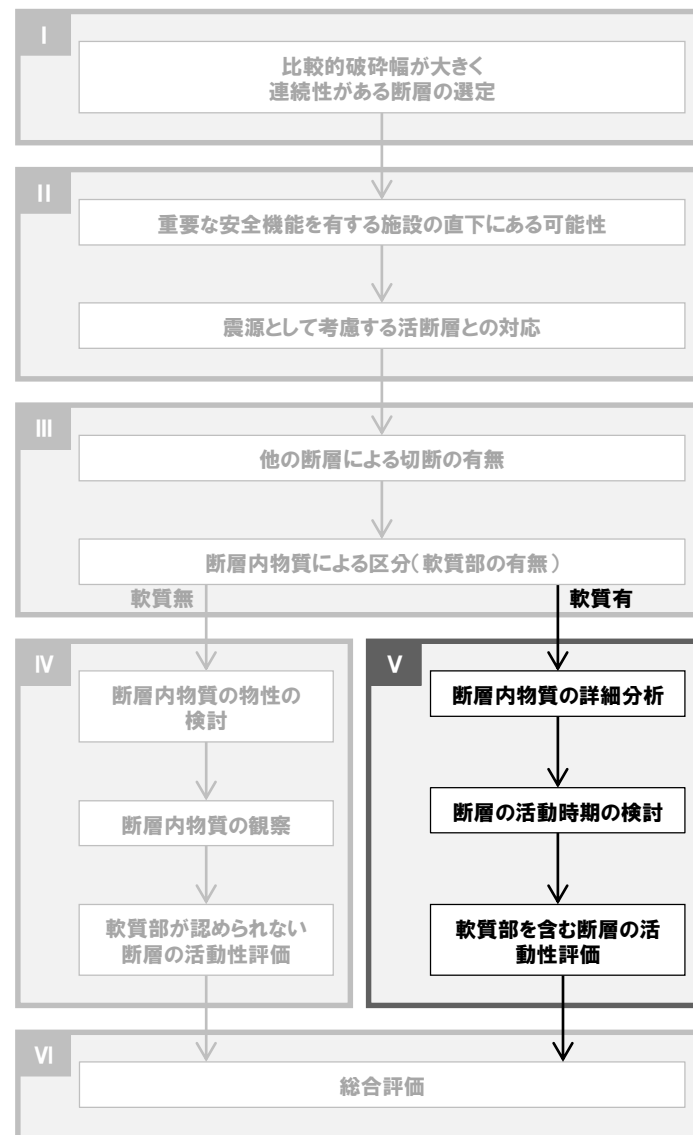
Fa-3断層の断層内物質の形成過程(概念図)

○断層内物質の形成過程の概念図を以下に示す。Fa-3断層の活動時期は約10Ma以前であり、後期更新世よりもはるかに古い。



*緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う。緑泥石/スメクタイト混合層をC/Sと称する。

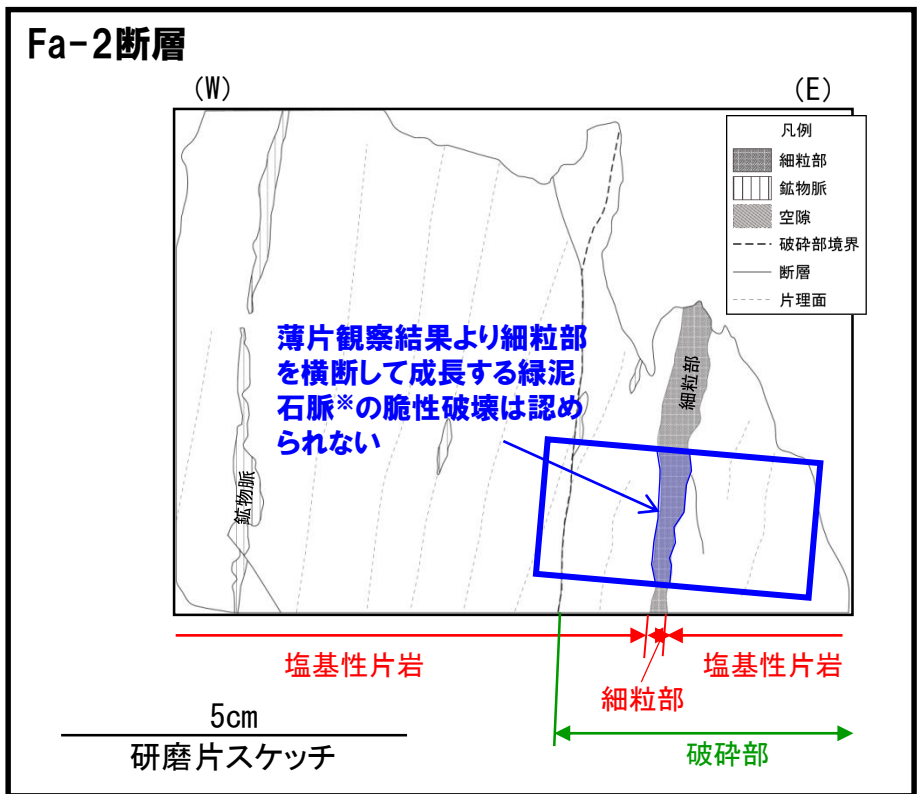
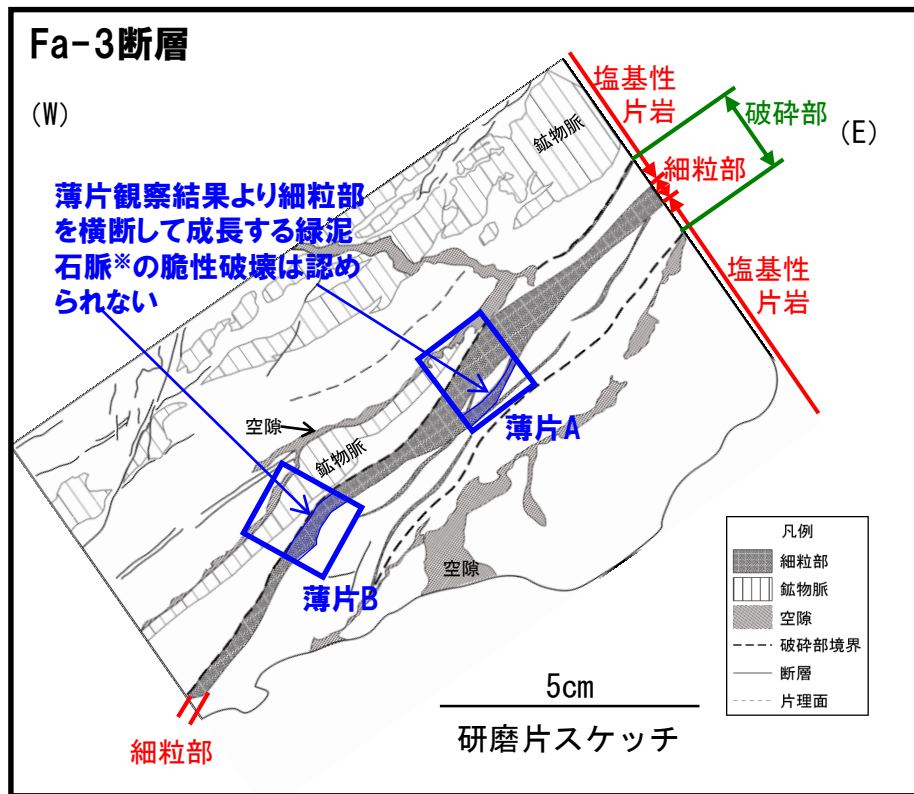
- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
 1. 破碎幅の検討
 2. 断層内物質の詳細分析
 3. 断層の活動時期の検討
 4. まとめ
- VI. 総合評価



V. 軟質部を含む断層の活動性評価

軟質部を含む断層の活動性評価のまとめ

- 薄片観察よりFa-3断層の薄片Aおよび薄片Bにおける細粒部を横断して成長する緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）に脆性破壊は認められない。また、切り切られの関係にあるFa-2断層でも細粒部を横断して成長する緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）が脆性破壊されていない。
- 以上より、Fa-3断層およびFa-2断層に古い時代の緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）生成以降の活動は認められず、Fa-3断層に切断されるFa-5断層の活動時期も古い。これらの軟質部を含む断層の活動時期は後期更新世よりもはるかに古く、いずれも将来活動する可能性のある断層等には該当しない。
- 軟質部を含む断層は軟質部の認められない断層と同じく地下深部でカタクレーサイトとなっており、断層内の軟質部は断層運動によって形成されたものではない。地下水の作用で断層内の亀裂沿いにスメクタイトが生成し、断層幅が大きく水の影響を受けやすい箇所ではスメクタイトおよび緑泥石／スメクタイト混合層が吸水して軟質部が形成されたものと考えられる。



*緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う

- I. 連続性がある断層の選定
- II. 重要施設の直下にある断層の選定
- III. 他の断層による切断および
軟質部の有無
- IV. 軟質部が認められない断層の
活動性評価
- V. 軟質部を含む断層の活動性評価
 1. 破碎幅の検討
 2. 断層内物質の詳細分析
 3. 断層の活動時期の検討
 4. まとめ
- VI. 総合評価



Fa-3断層の活動性の総合評価

- 敷地近傍（半径5km内）に活断層は認められず、周辺の活断層からの「枝分かれ断層」としてFa-3断層が変位する可能性はない。
- Fa-3断層は直線性の悪い長さ75m程度の断層であり、その性状から古い時代に地下深部で生成した断層である。断層内物質の分析から、断層の活動時期は後期更新世よりもはるかに古い。
- 以上より、Fa-3断層は将来活動する可能性のある断層等には該当しない。

敷地近傍の状況

文献調査	敷地近傍(半径5km内)に「活断層詳細デジタルマップ」や「[新編]日本の活断層」等の既存文献による変位地形・リニアメントの指摘はない。 四国電力を含めた各種機関の音波探査記録を総合的に解析した産業技術総合研究所の検討において敷地北方約8kmの中央構造線断層帯以南に活断層は認められない。
地形調査	詳細DEMおよび空中写真による独自の地形判読において敷地近傍(半径5km内)に変位地形・リニアメントは判読されない。
地質調査	敷地近傍(半径5km内)・敷地付近には三波川変成岩類が広く分布し、活断層を示唆する構造は認められない。
地球物理学的調査	敷地内で実施したオフセットVSP探査によると、地下深部までほぼ水平な反射面が連続し、地震発生層(地下2km以深)まで連続する大規模な断層は認められない。

Fa-3断層の性状

断層の走向・傾斜	試掘坑内でN31° W/50° NEであるが、直線性が悪く、場所によって走向・傾斜が変化する。東西圧縮横ずれの応力場とは対応しない。
断層の幅	試掘坑内におけるFa-3断層の破碎幅は、断層の影響を工学的に評価するため微小な亀裂が生じて岩盤が劣化した範囲まで含めて最大40cmであり、最も破碎の進んだ粘土部からやや破碎された弱破碎部までの幅は5cm程度である。また、試掘坑から離れるにつれて、Fa-3断層の破碎幅は減少し、Fa-3断層の局所的に破碎幅・粘土幅の大きい部分を既に掘削で除去している。
断層の連続性	Fa-3断層は長さ75m程度であり、地下深部の震源域まで連続するようなものではない。
断層付近の岩盤	断層付近の岩盤は破碎や変質がなく新鮮である。また、正断層的な片理のひきずりが認められ、Fa-3断層が古い時代に地下深部で生成したことを示す。
断層内物質	最新活動面と対応する細粒部は幅が数mm～1cm程度で直線性にも乏しい。その細粒部を横断して緑泥石(スメクタイトとの混合層を伴う)が脈状に成長しており、その後脆性破壊を受けていないことから、緑泥石(スメクタイトとの混合層を伴う)生成後にFa-3断層は活動していない。 細粒部中の緑泥石脈(スメクタイトとの混合層を伴う)は三波川変成岩類が上昇する過程における地温約100℃以上の地下深部で生成したものであり、Fa-3断層の活動時期は後期更新世よりもはるかに古い。 地下水の作用で断層内の亀裂沿いにスメクタイトが生成し、断層幅が大きく水の影響を受けやすい箇所ではスメクタイトおよび緑泥石/スメクタイト混合層が吸水して軟質部が形成されたものと考えられる。

敷地内断層の活動性の総合評価

断層名	震源として考慮する活断層との対応	他の断層による切断	断層内物質の肉眼観察	物理試験	針貫入試験	軟X線観察 CT画像観察	研磨片観察 薄片観察	総合評価
Fa-2	震源として考慮する活断層とは対応しない	Fa-3に切られる	粘土状の軟質部を含む	-	-	-	せん断方向に成長する石英脈・方解石脈および細粒部を横断して成長する緑泥石脈※に脆性破壊は認められない	地下深部における緑泥石脈※生成以降の活動は認められず、活動時期は後期更新世よりもはるかに古い
Fa-3		Fa-2と切り切れ関係		-	-	-	細粒部を横断して成長する緑泥石脈※に脆性破壊は認められない	
Fa-5		Fa-3に切られる		-	-	-	-	
Fa-1		-	岩石相当の硬さで周辺の母岩と密着して一体の岩石となっており、新しい時代の活動の痕跡は認められない	硬岩に相当する物性(密度、有効間げき率、吸水率)を有し、断層ガウジの物性と顕著な差が認められる	湿潤状態でも土のように流動化せず一定の針貫入勾配を保っており、断層内物質が断層ガウジでなく基質と岩片が固結したカタクレサイトであることを明確に示す	破砕部と母岩の明るさに差異がなく、両者が同等の密度であると判断される	せん断方向に成長する緑泥石脈※に脆性破壊は認められない	地表付近における新しい時代の活動はない
Fa-4		-					せん断方向を横断する方向に成長する変質鉱物脈に脆性破壊は認められない 弱破砕部中に方解石脈の塑性変形が認められる	
f1		-					断層運動の繰り返しにより形成される細粒部は認められず、最も破砕の進んだ強破砕部に沿って片理のひきずりが認められる	
f2		-					細粒部と接する強破砕部中に片理の引きずりが認められ、せん断方向を横断する方向に成長する緑泥石脈※に脆性破壊は認められない	
f3		-					せん断面沿いの方解石脈の成長や細粒部を切断する小せん断面が認められ、せん断方向を横断する方向に成長する緑泥石脈※に脆性破壊は認められない	
f4	-	弱破砕部中の片理の引きずりや細粒部を切断する小せん断面が認められ、せん断方向を横断する方向に成長する緑泥石脈※に脆性破壊は認められない						
S ₁	-	部分的に細かく破砕	-	-	-	-	付近に3号炉重要施設がなくその変位が施設に影響を及ぼすものではなく、震源として考慮する活断層とも対応しない	
S ₃	-	粘土状の軟質部を含む	-	-	-	-		

○敷地内で比較的破砕幅が大きく連続性がある断層としてFa-1～Fa-5断層、f1～f4断層、S₁、S₃断層があり、いずれも震源として考慮する活断層と対応しない。S₁断層、S₃断層はその付近に3号炉申請に係る重要施設がないことから、その変位が施設に影響を及ぼすものではなく、震源として考慮する活断層とも対応しない。

○軟質部が認められない断層（Fa-1断層、Fa-4断層、f1～f4断層）は、古い時代に地下深部で生成した断層が地表面付近に位置して以降の新しい時代には活動しておらず、将来活動する可能性のある断層等には該当しない。

○Fa-3断層およびFa-2断層に古い時代の緑泥石脈（スメクタイトとの混合層を伴う）生成以降の活動は認められず、Fa-3断層に切断されるFa-5断層の活動時期も古い。これらの軟質部を含む断層の活動時期は後期更新世よりもはるかに古く、いずれも将来活動する可能性のある断層等には該当しない。

※緑泥石はスメクタイトとの混合層を伴う