

5. 専門家からのご意見について（50 音順）

見解書(1)	奥村晃史氏（広島大学教授） （平成 25 年 4 月，平成 25 年 8 月）		57
見解書(2)	金折裕司氏（山口大学教授） （平成 26 年 1 月）		69
見解書(3)	千木良雅弘氏（京都大学教授） （平成 26 年 1 月）		77
見解書(4)	遠田晋次氏（東北大学教授） （平成 26 年 1 月）		86
見解書(5)	徳山 明氏（元富士常葉大学長，兵庫教育大学名誉教授） （平成 25 年 4 月，平成 26 年 1 月）		90
見解書(6)	柳田 誠氏（駒沢大学講師， 株式会社阪神コンサルタンツ取締役） （平成 26 年 1 月）		101
見解書(7)	山崎晴雄氏（首都大学東京教授） （平成 25 年 4 月，平成 26 年 1 月）		103

東北電力東通原子力発電所敷地内の第四系と第四系基盤の変状について

2013 年 4 月 15 日

広島大学大学院文学研究科

奥村晃史

東北電力東通原子力発電所敷地内に見られる第四系の変状とそれに関わる基盤岩の物性と構造は、岩盤の安定性やテクトニックな変形の関与の可能性を考える上での貴重な実例である。2013 年 4 月 13 日、14 日に東北電力株式会社の協力を得てつぶさに基盤岩と被覆層、それらの変形を検討することができた。また、同社が作成した航空レーザー測量による 2 mDEM も空中写真判読より定量的で精度の高い地形分析を可能とした。その結果をもとに、変動地形・活断層の存否、膨潤による変状発生の可能性を考察し報告する。

1. 横ずれ断層の存在

東北電力によるこれまでの調査では、横ずれ断層の存否や活動性を確認するための調査は行われていない。昨年 12 月の原子力規制庁の有識者による現地調査では上下変位を検討するために掘削されたトレンチ壁面の見かけに基づいて横ずれの存在が推測されているが、定量的にも定性的にも実証はされていない。横ずれの存否は活断層の存否を検討するうえで重要であり、適切な調査方法を用いた綿密な調査を今後実施することが必要である。

具体的には：

- (1) 3 次元的掘削を行って平面内で剪断面・小断層の構造や随伴する変形を確認する。
- (2) 剪断面に沿う礫のオリエンテーションを計測して断層のずれとの関連を確認する。
- (3) 横ずれ変動地形の存否を詳しく調査し、破碎帯との関連を厳密に検討する。

有識者による現地調査で指摘された横ずれの証拠には以下のような問題がある。

- ・Tr-28 の現地調査で指摘のあった横ずれの根拠となる構造（以下「フラワー構造」）は厳密にはフラワー構造ではない。逆断層変位と中立～正断層変位の両方が認められ、それらは、逆断層的な変形の項で述べるような分布をしている。これは逆断層上盤先端部の被覆層変形である。
- ・フラワー構造は局地的な圧縮応力、あるいは引張応力によって形成され、両者は排他的であって混在することはない。重力性の二次的な変形は識別することができる。
- ・フラワー構造は横ずれを主体とする主断層とそこから派生する高角な斜めずれ断層群、あるいは V 字型に対をなす高角斜めずれ断層から構成される。有識者によ

る現地調査で指摘された構造はいずれにも該当しない。

- ・ s-19 露頭の逆断層的な変位を F-9 破砕帯に随伴するフラワー構造とみなすことはできない。フラワー構造の発達する領域には局地的な応力場が形成され、それに対応した変形・破断が発達する。しかし、s-19 と F-9 との間には、両者と関連する変形や破断は存在せず、はさまれた岩体の上昇も起きていない。段丘基盤内部にフラワー構造は認められない。
- ・ 現地調査で報告されている礫の回転は断層運動と無関係な可能性がある。被覆層の変形が見られる断層や破砕帯は、MIS-5e 海成層基底の淘汰の悪い砂礫層の堆積時に差別的に浸食を受けている。4 月 13 日に昨年 12 月の現地調査時より後退した壁面で観察を行ったが、泊層上面の不規則な浸食面の削り込みによってできたポケット状の凹みに砂礫が詰まっている状況が確認できた。そこでは礫の回転や引きずりは必ずしも鮮明ではなかった。今後壁面を掘り下げながら計測を行う詳しい調査が必要である。
- ・ 幅の狭い隙間は、断層粘土に沿う差別浸食、乾湿変化や温度変化による収縮と破砕に起因する差別浸食によって形成される。ここに落ち込んだ扁平礫は断層面や破砕帯の割れ目に沿って堆積せざるを得ない。一方、有識者の指摘は、断層で切られた礫層の粒子が断層面近傍だけで定方向に再配列されているような典型的な礫の引きずりによる再配列としているが、実際の状況は異なっている。ただし、この議論には断層面に沿って掘削を行い多数粒子の長軸方位の計測と統計処理が不可欠である。
- ・ 横ずれ変位地形の存否については、東北電力は存在しないとし、現地調査した有識者は具体的な存在を示していない。有識者が指摘するように地表を食い違わせて有意な横ずれ変位が繰り返されているのであれば、横ずれ変位地形が存在するはずである。従って、その存否の調査、検討が必要である。

2. F 9 断層と撓曲状斜面 (Tr-20'-2)

Tr-20'-2 付近にみられる西へ緩やかに傾斜する斜面は有識者が指摘するような変動地形とは考えにくい。

トレンチ壁面から地表面の形態に対応する変形を読み取ることはできない。

F-9 破砕帯はテクトニックではない被覆層のふくらみを作るが、それ以外に被覆層を変形させていない。

- ・ トレンチ南東側に平滑な斜面が存在するが、壁面の地層には斜面の勾配に調和する傾斜は認められない。
- ・ 海成砂層上面の高度差は、F-9 破砕帯、泊層の強風化帯に対応するふくらみを除くと 1 m 以下で、地表の 2 m を越える高度差に較べ明らかに小さい。地表面は、To-Red 火山灰を含む細粒水成層上面の浸食面と平行であり、海成砂層上面の形態とは無関係である。従って地表の撓曲状斜面は、地層の変形を示すものではない。
- ・ F-9 破砕帯西側の基盤上面の低下を作る断層・撓曲構造は存在しない。仮にこの落差が変位であったとしても、その位置は撓曲状斜面と無関係な位置にある。
- ・ F-9 付近からその北西に限って巨礫層とそれを埋める斜交葉理をもつ不淘汰な砂層が存在する。しかし、巨礫層はトレンチ南東端には分布しないこと、F-9 断層

帯と蒲野沢層上面の凹部に存在すること、斜交葉理から復元される流向が南北に近いこと、からみて、巨礫層とそれを埋める砂層は北北東へ向かうチャンネル堆積物として合理的に説明できる。

- ・トレンチ北東側、撓曲状斜面の北西側には北東に緩やかに傾き下がる幅約 100 m の地形面が存在する。その北西側には、撓曲状斜面と向かい合って平行に伸びる南東側低下の斜面が存在する。トレンチ壁面の F9 より北東側で MIS 5e～5c の堆積物がやや低い位置に分布することは、MIS-5e 以降の海水準低下に伴う段丘面の浸食によって巨礫を含むチャンネルと同じ範囲に、MIS 5e の砂層堆積後にも北東に流れる幅の広い流路が存在したことを示している（0.5m 等高線図により確認）。
- ・F-9 上とその東側の第四系のふくらみは、ふくらみの両側で相対的な隆起・沈降は認められず、断層を挟んで沈降と隆起が分けられるテクトニックな垂直ずれ変形は存在しない。
- ・F-9 に想定されている断層は東側低下の逆断層センスを持ち、撓曲状斜面とは逆の上下変位が推定され、撓曲状斜面の形成とは無関係である。
- ・F-9 破砕帯上の非対称な背斜状変形の西翼の傾き下がり、To-Red 火山灰以下のふくらみと調和するようにみえるが、やはり地表の形態とは無関係である。
- ・F-9 が有識者の指摘するように横ずれで動いた場合、この撓曲状地形のような広い幅に一樣の傾きが起こるような変形は予想できない。

3. 逆断層的な変形

泊層中に見られる逆断層的な変位と変形（東北電力がいう S 系の小断層）は、地表から深度 10～20 m まで、あるいはそれより浅い表層の現象で、断層先端上盤の局部的な上昇と回転を伴うが、断層を挟んで地盤の差動昇降はなく、地下深部に連続するテクトニックな構造ではない。F-9、F-3 破砕帯はさらに深い地下まで連続するが、地表直下で起きている第四系の変形は泊層中の断層の場合と同様であり、変形の原因は表層にだけ存在することが推定できる。従って、この変形が F-9、F-3 のテクトニックな活動可能性を示す根拠になるとは考えられない。

F-9、F-3、S-19、旧国道 338 号露頭にみられる逆断層的（f-c）な変形には以下の特徴がある。

- ・逆断層センスをもつ剪断面が基盤上面（波食台）を覆う砂礫層、MIS-5e 砂層に逆断層変位を与えている。砂礫層・砂層は剪断されていない場合もある。基盤岩には F-9 を除きシャープな剪断面が連続し部分的に断層粘土状のシルト～粘土層を挟む。
- ・基盤岩の剪断面は 2 地点でトレンチ壁面、あるいはその直下で低角となって消滅することが確認されている。
- ・高角な中新世の破砕帯（F-9）、不連続面（F-3）に連続する場合、地表近くでの低角化は確認されていない。
- ・いずれの場合も砂礫層とその上位の地層には非対称な背斜状の変形が生じている。以下はすべてに共通する。
- ・逆断層の延長上から下盤側に急傾斜な翼部が存在し、逆断層センスをもつ小断層が存在する。

- ・背斜軸部から緩傾斜翼部の上部には開口割れ目や正断層成分をもつ小断層が存在する。
- ・緩傾斜な翼部では曲げ変形はほとんど認められず、内部変形のない砂層・砂礫層が一様な傾斜で傾き下がる。
- ・傾き下がる範囲は数m～10m程度で、逆断層的な変形による上昇が傾動によって打ち消されている。

逆断層的な変形は、テクトニックな変形ではない。変形帯を挟んで有意で差動的な上下変位はない。非対称な背斜状の変形は基盤内で低角化する弧状の剪断面上での上盤の回転運動に近い。ただし、緩傾斜翼部が未変形の砂層・砂礫層へ接続する部分には破断は生じていない。回転を伴う短波長の変形は、変形の原因が浅い地下だけに存在することを示しており、低角化した断層が浅い地下で消滅することと調和的である。

逆断層的な剪断面上の被覆層の変形は、トレンチ調査等で観察される逆断層上盤先端の地表変形および被覆層の塑性～弾性変形に類似している。剪断面の延長とその下盤側には圧縮変形が、上盤の背斜状変形の軸部付近には引張変形が存在する。これは逆断層のトレンチ調査等で普遍的に観察されるが、上盤先端部の重力的変形により説明できる。

高角断層と破碎帯上にみられる非対称な背斜状変形は逆断層的変位の有無にかかわらず、泊層内で低角化する逆断層的変位の場合と類似している。これは、低角化する逆断層と同様に高角断層のごく浅い部分だけが動いて回転に近い変形を産み出していることを示す。

逆断層状の剪断面に沿う基盤上面の上下変位は見かけ1 m以上に達する場合もあるが、その場合、淘汰の悪い砂礫層が剪断面の見かけ下盤側を差別的に浸食していることが見かけ変位を大きくしている。海成砂層基部の淘汰の良い成層した砂礫層以上の地層の逆断層状あるいは撓曲状変形を元に戻してみると、淘汰の悪い砂礫層が剪断面に沿って、あるいは剪断面付近をポケット状に浸食している状況は明白である。

未固結堆積物が地震動を受けることにより、傾斜する地表や段差の重力ポテンシャルによって側方流動や地すべりが発生し、移動するブロックの先端で圧縮変形を生じることがある。この場合には移動によって物質が不足（地面が低下）した場所と物質が増加した場所（地面が上昇）した場所が対となって現れる。S系の小断層では、このような対をなす物質の過不足が認められないこと、強風化帯は未固結堆積物とは物性が異なること、段丘面の傾斜が緩いことから、地震動によって基盤岩を切る重力性の物質移動が起きたとは考えにくい。

4. ボーリングコアにみられる破碎帯深部の性状

泊層内部にみられる地下20m以浅で低角化し消滅する逆断層状の断層面は上記のように表層に限られた現象である。一方、F-9やF-3破碎帯のように中新世の

断層面に由来する構造についても、変形が地表付近に限られることは推測されたが、浅い地下での低角化や消滅は確認されていない。これら高角の構造の地下深部への連続性についてはボーリングコアの観察によって検討を行った。その結果は以下のとおりで、高角な破碎帯の地下延長部では活動的な剪断面や破碎構造は認められない。

主要な断層の破碎部について東北電力が実施した深度延長部のボーリングコア数本を観察し、固結・岩石化していることを確認した。

F-8 ; 02-10 192m 付近, K-31 182m, 205m

F-7 ; K-19 197m 付近

F-4 ; K2-14 132m 付近

破碎構造がセピオライトにより置換され、周囲の岩盤と密着し、節理によるコアの割れはあるものの、軟質なガウジは存在しなかった。定性的には主要な断層が最近繰り返しテクトニックな変動を受けたようにはみえないが、顕微鏡下で破碎構造の詳細を確認すべきである。断層岩やセピオライト・鉱物に詳しい専門家の調査・鑑定も必要である。

5. 膨潤の原因と時代

泊層の強風化部、F-9, F-3 断層の破碎物質が吸水により膨張することは試験片の実験によって確認された事実である。この事実と MIS 5 の海水準変化・環境変化と地形形成、風化作用を考えることにより、第四系の変状を合理的に説明することが可能である。

ボーリングコア (QB-1) の観察では、泊層の強風化部は MIS 5e 波食台表面から地下 10m 以内に存在する。以深は約 20m まで弱風化、それ以降は未風化である。この強風化部は MIS 5e の海進で波食台が作られてから形成された可能性が高い。

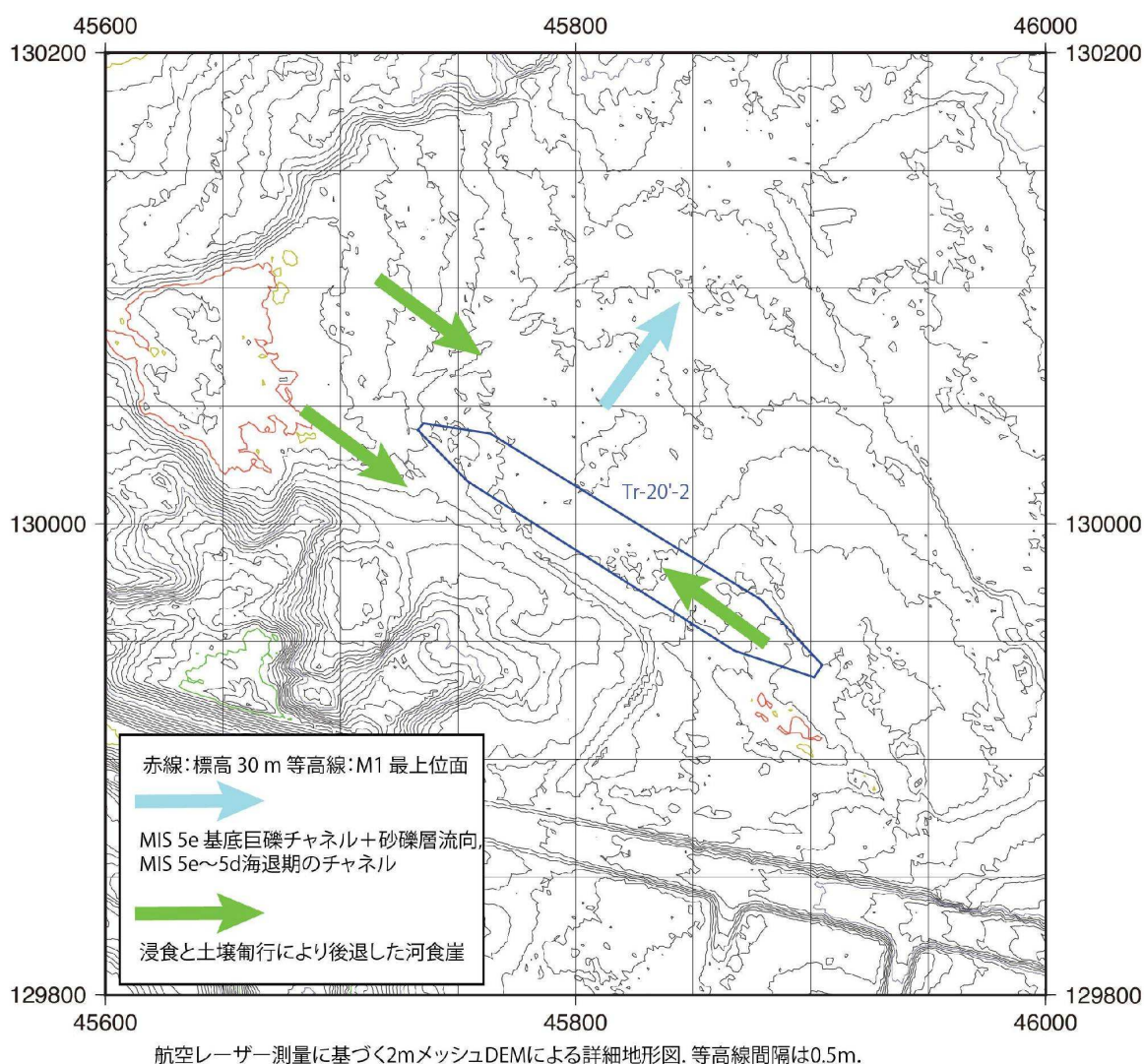
サイトには MIS 5e より古い海成段丘は存在せず、MIS 5e 海進時の海食が斜面を後退させて海食台を作った。この場合海食で取り除かれた岩盤の厚さは数十メートルに達し、波食台には未風化の泊層が露出する。仮に MIS 7 の段丘が存在して浸食されたとしても浸食は 10~20 m 以上の深さにおよび、やはり未風化の泊層が MIS 5e に露出する。未風化の泊層は膨潤が小さく変形を起こさない。MIS 5e の砂層堆積後、急速に MIS 5d の海退が起きたため、風化を受けた泊層が浸水することはないかった。

F-9 断層や F-3 断層の膨潤性に富む細粒物質は MIS 5e の波食台形成時に膨潤による変形を起こして波食台に起伏を作った可能性がある。しかし、軟弱な破碎物質は波食によって速やかに浸食されるため、変形が地形として残ることはない。従って、洞爺火山灰より下位の層準に逆断層的な変形や地層のふくらみが記録されていないことの指摘に対しては以上のように説明ができる。(もしも前に述べた泊層の強風化部が MIS 5e 以前から存在したとしても、同じ理由で波食台形成期に膨潤変形が発生し、それは浸食によって痕跡を残さない。)

MIS 5e から MIS 5c にかけての時代は、北日本でも赤色土壌が形成された時期で

あり，泊層の強風化層が形成され断層帯の風化も進行した．そして，MIS 5c の洞爺火山灰降下前後から Red 火山灰降下時期までは，これら火山灰を挟在する細粒水成堆積物が示すように，海岸低地上に浅い湛水域が広がった．膨潤の条件である風化の進行と MIS 5c の高海水準に対応した水域という二つの条件が揃ったため，MIS 5c から 5b にかけての時期に膨潤に起因する変形が発生した．海水準の変動に伴う乾湿変化や，風化の進行に対応して，同じ場所で繰り返し変形が生じることも可能である．

泊層の強風化層の厚さが 10m 程度であることは，膨潤による圧縮変形が生じる深度を規定する．回転を伴う変形の規模，逆断層状の剪断面の消滅深度は，この厚さと調和的である．また，地表からの透水が起こる深度も強風化層の厚さに規定されるとすると，断層帯での変形のスケールが泊層内の変形のスケールに似ていることと矛盾しない．



東北電力東通原子力発電所敷地内の第四系と第四系基盤の変状について（第二報）

2013 年 8 月 28 日

広島大学大学院文学研究科

奥村晃史

報告者は東北電力東通原子力発電所敷地内に見られる第四系の変状とそれに関わる基盤岩の物性と構造を 2013 年 4 月 13 日・14 日に観察し、航空レーザー測量による高精度な地形分析結果とあわせて変動地形・活断層の存否、膨潤による変状発生の可能性を考察して 2013 年 4 月 18 日の有識者会合に報告した（第一報）。本報告は、2013 年 8 月 10 日・11 日に再度東通原子力発電所の現地調査を行って、その後の東北電力による調査結果が第一報での記載や考察と整合するか否か、あるいは、第一報での提案に基づく調査の実施状況とその成果の検証を行った結果をとりまとめたものである。

1. 横ずれ断層の詳細掘削調査（Tr-28 の F3 断層）

第一報では、横ずれの存否は活断層の存否を検討するうえで重要であり、適切な調査方法を用いた綿密な調査を今後実施することが必要であることを指摘した。そして、以下の 3 点の調査を提案した。

- (1) 3 次元的掘削を行って平面内で剪断面・小断層の構造や随伴する変形を確認する。
- (2) 剪断面に沿う礫のオリエンテーションを計測して断層のずれとの関連を確認する。
- (3) 横ずれ変動地形の存否を詳しく調査し、破碎帯との関連を厳密に検討する。

今回の現地調査では、Tr-28 の南北壁面から両側へそれぞれ約 15m 四方の範囲で行われている、段階的な平面掘削と法面掘削を組み合わせた調査の状況とその最初の成果を確認した。

この調査では、考古学発掘調査で行われるような、15～30 cm ごとに厳密な平面を掘り出して詳細な観察・記載を行い、次の平面を掘る際に、端から順に法面を観察・記載するという完璧な 3 次元掘削が実施されている。また、TLS による記録や、CT スキャナを用いたブロック試料の内部構造の検討も行われており、活断層の調査でも従来例をみないような、精密な調査が実施されている。その手法は、上記課題の(1)、(2)を解くための完璧な手法といえる。

この調査による最も重要な観察は以下のとおりである。

- (a) 短縮を示す逆断層的な断層は走向を変えながら連続するが、一貫して逆断層的な変形を示す。横ずれ断層に伴うフラワー構造であれば、断層の走向によって短縮変形と伸張変形の両方が存在するが、ここで観察される逆断層的な断層は、一般の逆断層と同様、走向の変化に関わりなく短縮変形のみを示している。

(b) 伸張変形を示す正断層的な断層と開口割れ目は、逆断層的な断層と同様に一貫して伸張変形だけが見られる。正断層的な断層と開口割れ目は逆断層的な断層よりも直線的に延びる。また、逆断層的な断層の上盤側の背斜の幅や傾斜方向に応じて逆断層的な断層と斜交する方向に正断層的な断層群と割れ目群が平行に延びる状況も確認できた。

これらの観察は、第一報で述べた逆断層的な剪断面の上の被覆層の変形が、平面掘削区間で連続していることを明確に示している。

第一報で言及した逆断層的な剪断面の上の被覆層の変形は、トレンチ調査等で観察される逆断層上盤先端の地表変形および被覆層の塑性～弾性変形に類似している。剪断面の延長とその下盤側には圧縮変形が、上盤の背斜状変形の軸部付近には引張変形が存在する。これは逆断層のトレンチ調査等で普遍的に観察されるが、上盤先端部の重力的変形により説明できる。

さらに、複数のトレンチの観測から、第四系の断層のような変状は連続しないことが明らかとなった。このため、基盤の変形に伴う断層状の変位量は短い区間で大きく変化する。このことは、変状によって持ち上がった堆積物の重力的な移動が、変形の大きい場所を中心に扇状に広がる可能性を示す。この調査の進行とともに明らかとなる、第四系変状の3次元的な把握をもとに、構造を考察することが重要である。

(c) 現地調査では、平面掘削の一つの平面を観察しただけであるが、逆断層的な構造、正断層的な構造および開口割れ目のいずれに沿っても、系統的な横ずれを一切認めることはできなかった。

(d) 平面掘削で現れた扁平礫のオリエンテーションの平面露頭観察および測定値のプロットからは、逆断層的な構造、正断層的な構造および開口割れ目の走向にそって長軸が再配列するようなオリエンテーションを認めることはできない。

調査途中の観察ではあるが、これまでの平面掘削露頭マップやブロックサンプルのCTスキンの結果等とあわせて、横ずれ変形を示す構造は認められていない。また、(3)の課題である、横ずれ変動地形は存在しないことが改めて確認されている。従って、第一報で示したとおり、有識者の推定するようなフラワー構造は存在せず、横ずれ変位も存在しないと考えられる。

2. F9断層と撓曲状斜面 (Tr-20'-2, 4)

Tr-20' が東西に延長されて、F9断層東側の高まりの構成層とF9断層西側の相対的な低地の構成層の全容を観察することができた。詳細な露頭マッピングの結果はまだ見ることができなかったが、壁面の観察からは、第一報の解釈を支持するデータを多く得ることができた。

トレンチに露出する MIS 5 の堆積物は、(1) 第一報で指摘した北東へ流下するチャンネル内部、(2) その南東側の標高 29～30mの最高位段丘面、(3) Tr-20'-4 屈曲部東側の標高 28 m 以下でやや急に海側に傾き下がる段丘面、それぞれに特徴的なシーケンスと高度分布をもっている。

(1) 第一報で指摘した北東へ流下するチャネル内部では、相対的な凹地に厳密に対応して MIS 5e 基底の巨礫層が分布する。この巨礫層は後背山地の安山岩が河川作用によって円磨され、運搬されたものであることは明らかである。また、MIS 5e 層上部には、(2) の最高海水準に対応するマッシュな砂層は見られず、角礫が点在する成層した砂層がチャネル内に限って分布している。この角礫は円磨度が低い。またチャネル内と周辺に基盤の露出がないことから、基盤から浸食によって供給された礫ではなく、巨礫層と同様、河川作用によってもたらされたものである。地形と古流向分析の結果から、この河川は Tr-20' 西よりを北東に流下した、MIS 5 当時の老部川とみられる。

(2) その南東側の標高 29~30m の最高位段丘面では、波食台を覆う成層した砂礫層（海側に緩やかに傾斜する前置層の堆積構造をもつ）とそれを覆うマッシュで角礫を含まない砂層（最高海水準に対応する海進堆積物）が分布する。

(3) Tr-20'-4 屈曲部まで (2) の最高海水準期を含む堆積物が分布するが、屈曲部で波食台が上位と下位の二面に分かれる。南壁面では、約 2 m の波食台の段差を、(2) の下部前置層が海側へ前進してダウンラップしながら段差を覆い、下位の波食台状で尖滅する状況を明瞭に観察することができる。(2) の上部砂層も (3) の領域へは連続せず、海水準低下に対応した一段低く海側への傾斜がやや大きな段丘面を低位の砂礫層が構成している。この区間では、岩礁が波食を受けて破碎され、砂層中に中〜大礫を供給している状況が観察できる。礫は砂層中で円磨されているものが多い。

以上の 3 つの部分で異なる層序と標高は、(2) の部分（およびその周辺）の平坦面が、最高海水準に対応するマッシュな砂層の堆積によって形成された後、数 m の海水準低下に対応して、(2) の東側では (2) の 2~3 m 下位に汀線をもつ海側へ傾斜する堆積面をもつ海成砂層 (3) が堆積し、(2) の西側では同様に約 2 m 低位に北東へ流下する河口性の堆積物 (1) が堆積したと考えることによって合理的に説明ができる。

Tr-20'-2 の F9 付近にみられる見かけの北西側低下を断層運動とする有識者の見解が適切でないことは第一報に詳しく指摘をしたが、Tr-20' の延長部の観察は、堆積学と地形発達によって地形と地層を統一的に説明できることを確実にした。

MIS 5 の海進に伴って敷地付近には幅 1 km を越す幅広い海岸平野および、その前面には緩やかに傾斜する海食台が形成された。海水準が上昇し停滞する環境で、掃流力の大きな河川は海岸平野を真っ直ぐ横断して海に注ぐが、中小の河川は海岸平野で屈曲・蛇行したり、浜堤による閉鎖でその背後を海岸に平行に流下する。また、掃流力の大きい河川の支流は必然的に海岸線に平行に流れて大きな河川に合流する。このような状況は現在の高海水準に対応した海岸平野で普遍的に認められる。海水準が低下すると、掃流力の大きい河川の本流以外では、海岸線に平行な支流や屈曲する支流に沿って浸食が起きて、最高海水準に対応する地形面を開析する。そのような浸食地形が、海岸線側に高まりを残し、陸側が低くなるような浸食地形を作るとは極めて普通の現象である。そのような考察なしに、陸側が低くなる地形を短絡的に断層と考えることが活断層の誤認の原因といえる。

3. F 9 断層と断層鞍部状の地形 (Tr-31)

Tr-31 は標高約 21.5 m の孤立した高まりから、その西側の鞍部を横断するように掘削されて、有識者の多くが指摘した F9 断層に沿う東側隆起の断層変位の有無を検討することを目的とした。その結果上記と同じ誤りによって指摘された断層鞍部状の地形が、MIS 5 の南北性の河川によってできたチャネルの地形であること、このトレンチに露出する F9 断層には全く変位が無いことが明瞭に示されている。

Tr-31 の壁面には、波食台を覆う成層した砂礫層とその上位の礫を多く含む砂礫層からなる MIS 5 の堆積物が露出している。トレンチの標高から見て、これらの堆積物は、Tr-20'-4 の (3) の地層よりさらに下位に位置する MIS 5e 末期の海成～河口成層である。鞍部に相当する部分には、基底に粗粒な堆積物を欠き、洞爺火山灰を含む薄い泥層を堆積させる浅いチャネルが存在する。下位の成層した砂層を不整合に切り込む完全なチャネルの形を明瞭に見ることができる。下位の海成層と上位の洞爺火山灰からみて、このチャネルの形成時期は MIS 5d の海退期であると思われる。チャネルの縁は同一壁面の東縁と西縁でほぼ同じ高度に位置する。また、南壁面のチャネル縁と谷芯の高度は北壁面よりも低く、このチャネルが南に流れて段丘面を浅く浸食したことを示している。チャネル底の薄い泥層を覆う風成火山灰土の厚さはチャネルの区間でほぼ一定であり、地表に見られる鞍部状の凹地が、風成火山灰土がチャネルを一定の厚さで覆う（マントリングする）ことによって形成されたことを示している。

チャネルの中央東よりの基盤に F9 断層が認められるが、ここでは、F9 断層上の砂層とチャネルに一切変形を認めることはできない。従って、Tr-20' での観察と同様、F9 の断層運動を認めることはできない。ここに活断層を認定することは完全な誤謬であり、F9 を活断層とする判断も不適切である。

また、Tr-31 の F9 付近を被覆する第四系には、洞爺火山灰～十和田 Red 火山灰層準の泥層がごく薄く、乾陸堆積した火山灰土が同層準にある。このことは、MIS 5c から 5a の時期、ここには沼沢地あるいはラグーン的な環境が存在せず、膨潤を引き起こす水が存在しなかったことを示している。そのために、Tr-20' に類似した強風化の泊層と断層破碎帯が存在するにもかかわらず、変状が起きていないと考えることは合理的である。

4. 敷地南西に指摘された活断層の検討 (Tr-30)

Tr-30 は敷地の南西隅近くに、北北東-南南西走向で延びるとされた活断層の存否を確認するために掘削された。西側低下の断層は、断層と同じ走向の盛土とその西側でおそらく水田として利用された平坦な地面との境界に認定されている。その南南西延長上の敷地外には、屈曲する河川の浸食崖が同じ走向で存在する。それらが直線上に連続するように見えることから活断層の存在が推定されていた。

Tr-30 は推定される断層の通過する可能性のある範囲すべてにわたって掘削されているが、そこに現れたのは、平坦な基盤上面、変形していない堆積物、平坦な自然堆積物の上の盛り土と耕作によるとみられる表土の除去だけである。ここに活断層が存在することは完全に否定できる。敷地外の地形も河川浸食に人工改変が加わったものと考えられる。河川浸食は段丘の旧汀線近くに西側低下の崖地形を作っているが、その南北の段丘面、尾根

には西側低下を示す地形は認められない。安易な地形判読に基づく断層の誤認の典型的な例である。

5. ボーリングコアにみられる破碎帯深部の性状

第一報では断層面の固結・岩石化が典型的に見られるコアを観察して活動性のないことを確認し報告した。

今回観察したコアではその多くに固結・岩石化を認めることができなかった。これを説明するロジックが必要である。

可能な推論は：

- ・断層面の固結・岩石化は、地下水の循環や、地温、断層破碎物質の化学的・物理的条件が満たされた時に限って起こる。
- ・従って、そのような条件が満たされない場合に、固結・岩石化が起きないのはむしろ普通のことと考えられる。
- ・これは基盤岩中に存在する過去の断層破碎帯の多くに固結・岩石化が認められないことから支持される。
- ・しかし、固結・岩石化が起きていない断層面でも、明瞭な断層粘土や断層角礫、節理の発達認められない。
- ・これは、その断層面が最新の地質時代に繰り返し動いてはいないことを示すのではないか。
- ・一部であれ、固結・岩石化が認められることは、その断層面全体が動いていないことの証拠となるのではないか。

この推論を確認するためには、破碎帯の状況を系統的に観察・記載して、未固結で岩石化の見られない場合と、見られる場合についてその条件や成因を考察する必要がある。

また、いずれのコアに見られる断層面・破碎帯も、通常基盤岩中に見られる活断層の断層面・破碎帯とは異なっており、断層粘土がほとんど発達せず、角礫化・破碎、節理の発達を認めることができない。しかし、新第三紀の集塊岩・凝灰角礫岩を切る活断層にどのような断層物質・破碎構造が認められるか、実例の報告は少なく、確実に最近繰り返した断層の破碎帯を観察・記載して、ボーリングコア中の破碎帯と比較することが必要と考える。

6. 膨潤の原因と時代

今回、より多くのトレンチ壁面、より長大なトレンチ壁面でさまざまな第四系の変状を確認することができた。

その結果は、第一報の観察と推察を補強する。今回明かとなったことは：

- ・第四系の変状は、既存の基盤岩中の断層とは無関係に随所で発生している。
- ・基盤岩中の主要な断層（F9, F3 等）でも、MIS 5c--5a に滞水しなかった地点では変状が認められない。
- ・逆断層的な変状の変位成分（隆起側）は、系統性がなく一定しない。また、変状区間の前後区間を比較すると変位はない。さらに走向も一定せず、南北から東西までラン

- ダムに変化する．したがってこれらをテクトニックな逆断層と認めることはできない．
- ・フラワーストラクチャは存在せず，平面掘削でも横ずれは認められない．横ずれ断層に特有な直線的で連続的なトレースも存在しない．

以上の観察から，第四系の変状はテクトニックな断層の地表表現とは考えられない．

平成 26 年 1 月 9 日

東北電力株式会社「東通原子力発電所」敷地内の“断層”の性状と成因について（報告）

山口大学大学院
理工学研究科
金 折 裕 司

1. “断層”の性状と成因

表題の“断層”については、基盤岩の劣化部の膨張・上昇によって第四系中に発生した非造構的な変状（ずれ）であると結論づけることができる。

根拠は、以下の通りである。

1. 基盤岩中に“断層”があるか否かに関わらず、基盤岩劣化部の被覆層（第四系）には、亀裂、正断層、逆断層、層面滑りなどの変状が認められる。これらは、造構的な断層活動で生じた変状ではなく、基盤岩の体積膨張によって被覆する第四系に上向きの圧縮力が作用したため、一部に圧縮力が作用するとともにその両側に水平方向の引張力が生じ、第四系が収縮および伸長して形成されたものであると判断できる。（基盤岩の劣化部には節理・亀裂、および変質が顕著であり、定性的に体積膨張していることは疑う余地はない。）
2. F-9 断層（Tr-20'-2 トレンチ南面）に関しては、基盤岩中に認められる粘土化した細粒破碎部は、断層面に沿って幅の変化が著しくシャープな面を持たないので、本断層が造構的な再活動をした形跡はなく、ここで見られる第四系変状は主として断層破碎部および近傍の岩盤劣化部が体積膨張して形成されたものである。
3. 小断層 s-19（Tr-20'-1 トレンチ南面）では、第四系中に見かけ上の逆断層が認められるが、基盤岩の体積膨張によって不整合面が持ち上げられることによって、第四系が水平方向に伸長した。しかし、変形の及んでいる範囲（断層から 6m 程度）の両側が相対的に持ち上げられていない領域に拘束されていたため、伸長を調節するように一部に圧縮力が発生し、逆断層変位と層面滑りが発生した。
4. M1 段丘面の撓み（Tr-28 トレンチ南面）に関しては、基盤に膨らみ（上側に凸）がある部分の上位を覆う M1 段丘堆積物には縦方向の亀裂が集中するとともに、層理に沿った酸化や帯状酸化が認められ、透水性が高くなっている。このことも、基盤岩の体積膨張・上昇によって第四系に伸長が起きたことを示している。
5. f-1 断層（Tr-34 トレンチ東面）は上記と同様に、基盤岩の‘ソ’字状劣化部を覆う第四系は上向き波状しており、第四系には見かけ上正断層センスを示す変状が認められる。この変状は面に沿った変位は上位ほど大きく下位で消滅することから、造構性の断層であるとはみなすことはできず、基盤岩の体積膨張・上昇に伴う伸長を調節するために（不同沈下）生じた非造構性の正断層である。

6. Tr-34 東面で見られる基盤岩中の断層は第四系中の断層変状に連続しておらず、一連の断層運動を示すとは考えることができない。第四系変状は、いずれもシャープな断層面を有しておらず、造構性の成因は考えられない。

基盤岩中の断層および第四系変状が造構性であるか非造構性であるか否かについては、第四系の堆積学および構造地質学的な視点から総合的に判断すべきであろう。

2. 造構性と非造構性の違い

被覆層中の変状について、造構性と非造構性の違いを表-1 にまとめた。

表 1 造構性（逆断層運動）と非造構性（基盤岩体積膨張）との対比：被覆層のケース

現 象	逆断層運動	基盤の体積膨張
力学的挙動	短 縮	伸 張
地層の厚さ	厚 化	薄 化
間隙率	低 下	上 昇
クラック	剪 断 (mode II)	開 口 (mode I)
透水性	減 少 (排水)	増加 (帯水層形成)

それぞれのケースの特徴は以下の通りである。本報告の最後には参考 1 としてそれぞれの特徴を模式的に示す。参考 2 にはクラック（破壊）の mode の違いを示す。

これらの特徴を参考にして、第四系変状が造構性であるか非造構性であるかを判断すると、前述の“断層”などの第四系変状は非造構性であると結論づけられる。

● 造構性（逆断層運動）のケース

- (1) 全体が短縮して堆積物が厚化する（短縮量は幾何学的に計算できる。）
- (2) 堆積物の間隙率が減少している場合は厚化していないこともある。
- (3) 間隙率が低下することによって透水性が減少する。
- (4) 短縮によって剪断性のクラックが発生することもある。

● 非造構性（基盤岩体積膨張）のケース

- (1) 基盤の体積膨張部では堆積物が薄化する。（薄化量も幾何学的に計算できる。）
- (2) 堆積物がコンピーテントの場合には、間隙が形成されることによって薄化が起きないこともある。この場合には間隙率が上昇する。
- (3) 間隙率が上昇すれば帯水層が形成されたり、透水性も増加したりすることもある。
- (4) 堆積物がインコンピーテントの場合には、開口クラックの形成によって、薄化がまかなわれることもある。
- (5) 伸張を調整するために、不整合面や層理・葉理で層面すべりが起きることがある。

すべり面は酸化した滑らかな面で特徴づけられる。

3. 現地調査結果（第1回目）および検討事項

平成25年6月15日～16日に実施した現地調査の結果をまとめると、以下の通りである。

A. トレンチ観察

F-9 断層 (Tr-20' -2 トレンチ南面)

- (1) 断層ガウジの幅は断層に沿って変化が激しい。
- (2) 断層帯直上の巨礫を含む砂層とその上位の砂層は同じ曲率で上に凸に撓んでいる。
- (3) 断層帯を覆うM1段丘堆積物中だけに赤褐色酸化ゾーンが認められる。
- (4) 砂層の撓んだ部分には縦方向の亀裂が多く集中している。

小断層 s-19 (Tr-20' -1 トレンチ南面)

- (1) 断層を境にして見かけ上、西側が東側に乗りあがっているように見える。
- (2) 不整合面は断層の上盤では断層から離れるに連れて下降し、断層から6m程度は離れる（変形の及んでいる範囲）と下盤側とほぼ同じ高さになる。
- (3) 断層上盤側の変形の及んでいる範囲の不整合面にそって鉄の酸化が認められるとともに滑らかである。
- (4) 変形の及んでいる範囲では上載のM1段丘堆積物中の層理にも上記の同様な鉄の酸化縞が認められる。
- (5) 不整合面や堆積物中の酸化縞は、層面すべりが起きている可能性を示唆する。
- (6) 変形の及んでいる範囲ではM1段丘堆積物の層厚が薄くなっている可能性がある。

M1 段丘堆積物の撓み (Tr-28 トレンチ両面)

- (1) 膨らみの認められた部分のM1段丘堆積物には縦方向の亀裂が集中している。
- (2) 膨らみの認められる部分には層理に沿って酸化が認められ、層面すべりが起きている可能性がある。
- (3) 膨らみが認められる部分およびその近傍には、酸化した帯状の部分が認められ、間隙率が高くなり、透水性が高いと推定される。

F-3 断層の水平カット (Tr-28 トレンチ側面、主として段丘堆積物の砂層を観察)

- (1) 小亀裂に沿っては明瞭な剪断が認められない。

B. ボーリングコア観察

- (1) ボーリングコアで固結・結晶化した破碎帯は一見ガラス質で緻密であり、セピオライトや石英を含んでいる。これは、熱水変質作用により破碎部が置換・充填・結晶化して固結したものである。
- (2) 固結・結晶化した破碎帯はF-2、F-5、F-7断層で確認されている。
- (3) F-3およびF-9破碎帯では、固結部中にカタクレーサイト部をはさみ、必ずしも固結していないものもある。固結・非固結の違いは、主として熱水変質作用が場所により差異があることによるものと考えられる。

4. 現地調査結果（第2回目）

平成25年11月8日に実施した現地調査の結果をまとめると、以下のとおりである。

A. トレンチ調査結果

f-1 断層 (Tr-34)

- (1) 第四系変状は f-1 断層の活動によって生じたものではなく、f-1 断層と北側の小断層に挟まれた岩盤の（‘ソ’ 字状）劣化部が上方へ膨らむことによって形成されたものである。他のトレンチで見られる第四系変状と同様に、岩盤劣化部の体積膨張で十分理解できる。砂層および砂礫層が水平方向に伸長していることが、体積膨張に伴う基盤岩の上昇を裏付けている。
- (2) 砂層下の礫層・巨礫の存在・層厚などの条件の違いにより、砂層全体の撓みや砂層中の見かけ上正断層センスの断裂の形成などの変状の現れ方が異なるだけで、ここでみられた第四系変状は敷地内で見られるものと大差ない。
- (3) f-1 断層を覆う砂層の変状（見かけ上正断層センスずれを有する亀裂）をよく観察すると、上方ほど変位量が大きくなっていることがわかる（下：0.5～1cm，上：3～4cm）。これは、水平方向に引張力が作用して砂層が伸長したことを示す証拠である。もし f-1 断層が逆断層として動いたか、もしくは f-1 断層に沿って上盤が上方へ動いて生じた第四系変状であれば、この部分には圧縮力が生じるため、亀裂の下方にいくほど変位量が大きくなるはずであり、矛盾が生じる。
- (4) f-1 断層上および北側の小断層上の巨礫の存在、および巨礫周辺の相対的に厚い砂礫層に着目すると、f-1 断層の形成プロセスが説明できるのではないか。（次項 B として記載）

F-3 断層 (Tr-28)

- (1) 断層岩および被覆層中には、最近の横ずれセンスの動きを示唆する現象は観察されない。
- (2) 蒲野沢層の岩盤表面が特に顕著に凹凸しており、一部では、東西方向の軸を持って南北方向へ下がる高まりの中に、砂で充填された東西方向の開口割れ目が確認できる。このことは、蒲野沢層の一部が体積膨張している証拠の一つとして挙げることができる。また、岩盤表面の凹凸と上載の砂層中の亀裂分布には何らかの関連性があるように見える。
- (3) 破碎部の凹部中には、断層と直交方向に長軸が向く扁平礫が数多く見られる。このことは、波食台が形成される過程で断層に沿って削り込まれ、そこに礫がトラップされた後、新しい動きがないことを物語っている。類似の事例は、現在の中山崎海岸の波食台で頻繁に見られる。

f-k 断層 (Tr-32、33)

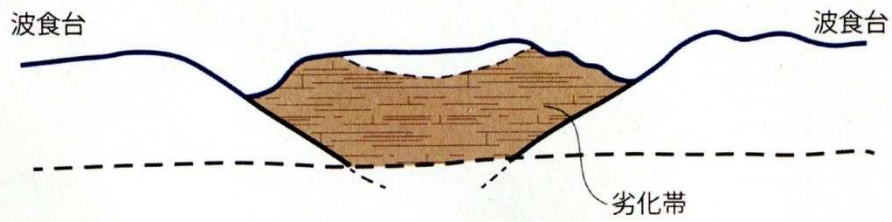
- (1) f-k 断層では第四系変状が認められない。
- (2) トレンチで見られる第四系変状は、岩相（安山岩溶岩などの劣化部）に対応して生じている。
- (3) 斜路で確認された第四系変状は、そのすぐ背面に掘削された Tr-33 において広範囲に連続しないことが確認できている。
- (4) 全体的にみると、第四系変状には共通性があり、他のトレンチと同様に岩盤劣化部に対応した体積膨張・上昇に起因すると考えることが妥当である。

B. f-1 断層付近の第四系変状の形成過程

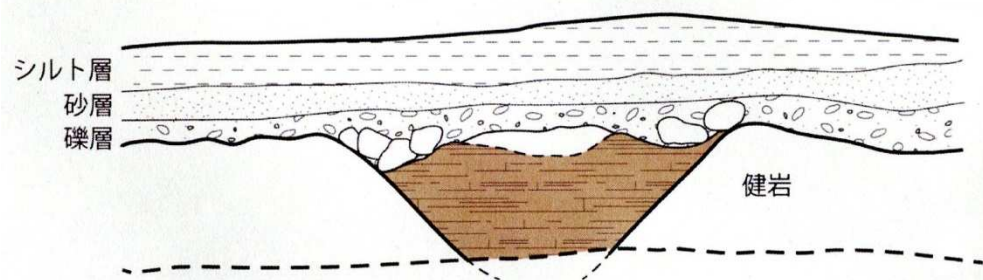
F-3 断層の水平スライスの観察を参考にして、Tr-34 の f-1 断層付近の第四系変状の形成過程をまとめると以下のとおりである（図-1）。

- （1）断層に沿った削り込みと劣化部の波食
 - ・ F-3 断層の水平スライスにみられたように、断層近傍が特に削り込まれた
- （2）礫層の堆積およびそれに続く砂層とシルト層の畳重
 - ・ 削り込み部分に巨礫のトラップ
 - ・ さらに断層間の凹部を埋めるように礫層が堆積
 - ・ このように堆積したために、削り込まれた部分で礫層が厚く堆積
- （3）基盤劣化部の体積膨張と被覆砂層での引張応力の発生による正断層もどきの形成
 - ・ 上下方向に体積膨張することによって、水平方向に伸長
 - ・ 伸長による引張割れ目の形成と割れ目の上盤側の圧密沈下（不同沈下）

(1) 波蝕と劣化帯の削り込み



(2) 第四系の堆積と巨礫のトラップ



(3) 劣化部の体積膨張

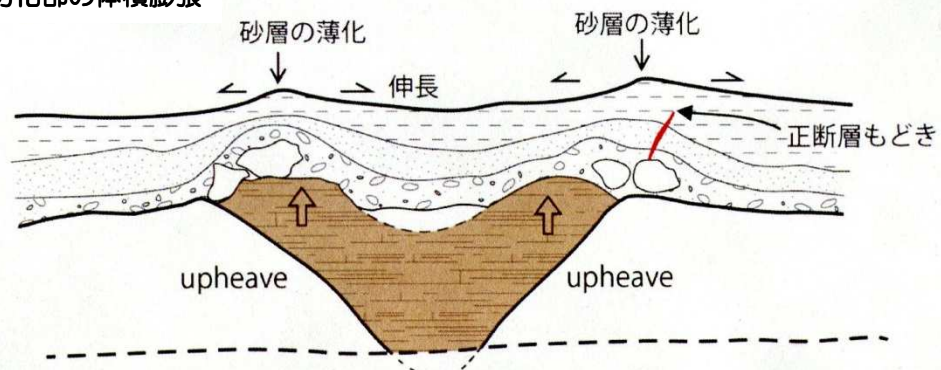
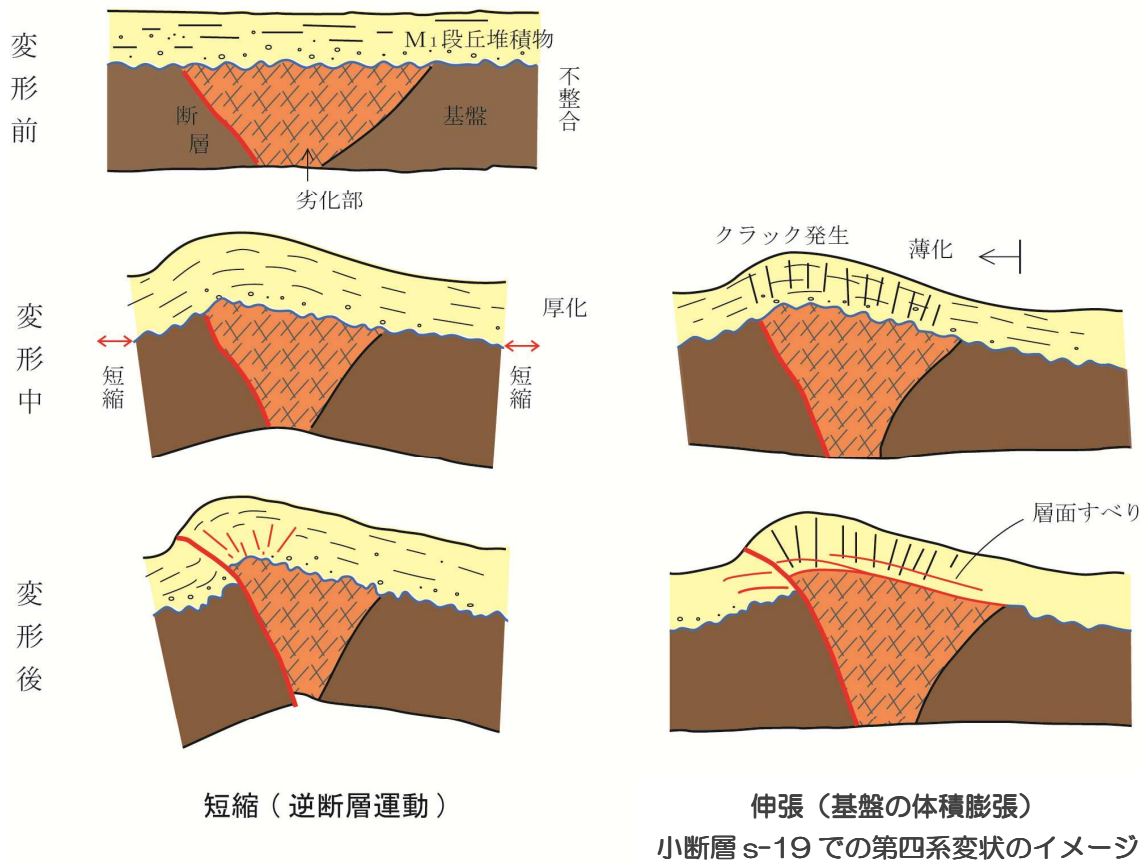


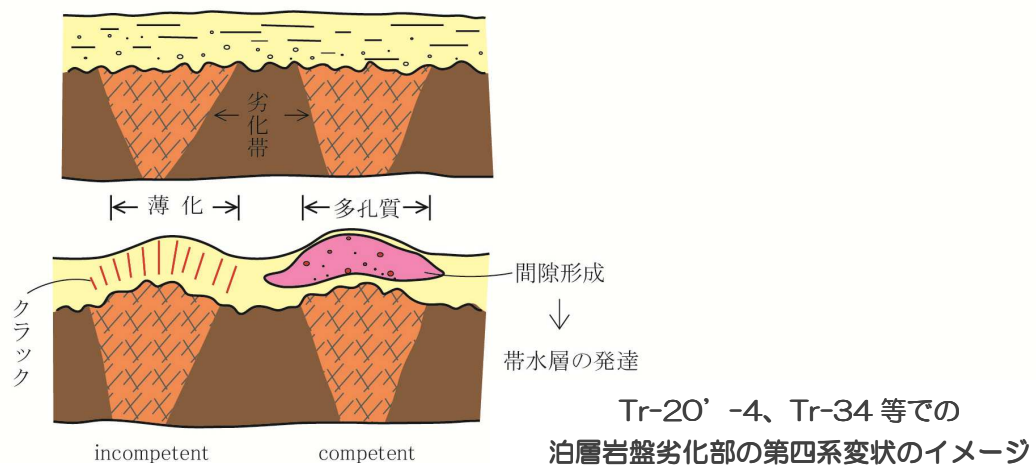
図-1 f-1 断層付近の第四系変状の形成プロセス

参考 1 : 造構性(逆断層運動)と非造構性(基盤岩の体積膨張)の比較

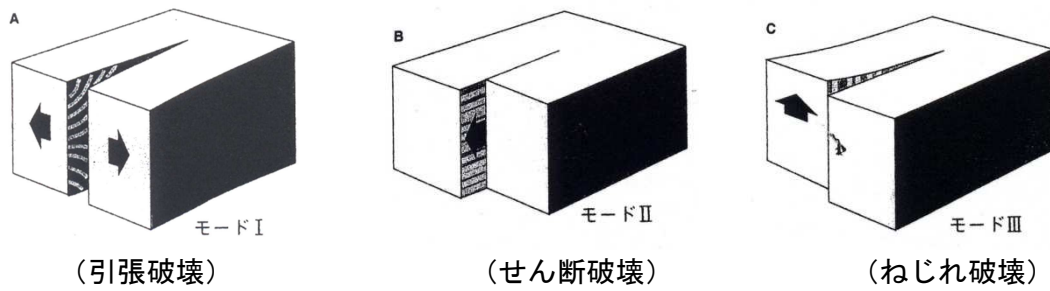
基盤中に断層アリ (小断層 s-19 のケース)



基盤中に断層ナシ



参考 2 : 破壊のモード



【狩野・村田(1998)『構造地質学』(朝倉書店)に引用された Davis & Reynolds (1996) の図】

2014 年 1 月 8 日

東北電力東通原子力発電所の岩盤と第四系の変状について

千木良雅弘
京都大学防災研究所 教授

1. はじめに

東通原子力発電所敷地において、以下の 3 回、現地調査を実施した。

2013 年 4 月 20-21 日：TR-20'-1（北面、南面）、TR-20'-2（北面、南面）、TR-20'-3（北面）、TR-28（北面、南面）、TR-29（北面、南面）

6 月 15 日-17 日：TR-20'-2（北面、南面、拡幅部北面）、TR-29（+H23 B1）、TR-28

10 月 18 日：起振実験ヤード f1、F-10、TR-32

本稿では、正確を期するために、筆者が実際に観察したトレンチとボーリングコア調査、および、岩石の風化に関連する分析結果に基づいてとりまとめる。なお、筆者は地質構造とともに岩石の風化に関する研究を長年続けてきており、この観点も含めたとりまとめとした。

2. 第四系と岩盤との変状と断層

2. 1 F-9

TR-20'-2 トレンチでは、南北性で西に急傾斜する F-9 断層が北面から南面に連続し、その破碎帯の内部構造も両面でほぼ同様である。破碎帯の幅は、法面下底で 1m、上載層直下で 2.6m であり、上方に向けて広がっている。東縁に幅 30 cm 以下の灰色ガウジがあり、これに平行に西側に乱れた砂岩層を挟む赤紫色の凝灰角礫岩から火山礫凝灰岩、ソープストーン化した安山岩または凝灰角礫岩があり、さらにその西に、蒲野沢層基底の円礫岩がある。破碎帯および周囲の岩盤面上面と上載層の形態から、破碎帯部分が上方に突き出すように変形したことが示唆される。ガウジは軟質であり、その上面は練り歯磨きをチューブから押し出したように上載層の下部に突出している。

上載層の M1 段丘堆積物の砂層には、図-1 の写真に示すように、第四系内に煙のようにたなびく褐色の帯が認められる。それは、断層の東側の黄褐色強風化凝灰角礫岩から斜め左上に上がり、いったん砂層の上の洞爺テフラを含むロームの下底に沿って左に広がり、破碎帯上の左側で、砂層中央部の礫質な部分に下がり、西方に向かってその層に沿って広がり、破碎帯西縁から 16m で消滅している。この褐色部は、その形態から判断して、鉄に富む水が黄褐色強風化凝灰角礫岩から上昇し、東から西に向かう地下水流に乗って移動し、移動中に鉄が酸化して沈殿したものである。おそらく黄褐色強風化凝灰角礫岩に含まれていた水が鉄分に富んでおり、その水が絞り出されたものである。このたなびく煙のような褐色のバンドは、南面にもほぼ同様の形で認められる。この絞り出しは、破碎帯および凝灰角礫岩の膨張に起因する可能性が高い。

この断層の東側と西側とで、岩盤面の高さを比較すると、東側で高いことが指摘されているが、東側に分布する礫層の岩盤面は決して均一な高さを示さず、凹凸している。この凹凸が岩石の風化によるものであることは、後述する。

2. 2 F-3

TR-28 トレンチでは、南北性で東に 64° 傾斜する F-3 断層がトレンチ南面から北面に連続しており、岩盤面と上載層には、北面では 30 cm の鉛直隔離を示す逆断層センスのずれが認められるが、南面ではほとんどずれは認められない。変状は洞爺火山灰層まで及んでいるが、十和田レッド軽石層にまでは及んでいない。今まで指摘されていないが、特にガウジと上盤側の蒲野沢層の構造を良く観察すれば、この変位は実際には F-3 の断層面に沿う変位ではなく、それに斜交して東に緩傾斜する断層に沿う逆断層センスのずれに伴うものであることがわかる(図-2)。上盤側の岩盤が N8W/42E の逆断層に沿って斜め上方に突き上げ、その結果ガウジがずれるように変形し、また、絞り出されるように礫層の中に入り込んでいる構造が読み取れる(図-2、3)。上載の M1 段丘堆積層の変形は、形態的にみると、断層の上盤側が F-3 断層に沿って一様に上がったのではなく、この岩盤の斜め方向への突出しに伴って形成されたように見える。“礫の落ち込み”が問題視されているが、もともと破碎帯の部分が弱いために、岩盤面がそこでくぼんでおり、そこに礫が堆積し、その上に岩盤の突出しが生じれば、逆断層センスの変位に伴ってガウジが礫の上に乗上げていくことは何ら不自然なことではない。実際、水平掘削断面調査によれば、岩盤面には大きな凹凸があり、断層部分が凹み、そこに礫が堆積している様子が認められている。断層近傍の蒲野沢層の岩盤面は、断層から 5m の区間まで断層側に高くなっていることと、上記のガウジへの岩盤の突出しの形態から、厚さ 1.5m 程度の板状の岩盤が NS 走向で東傾斜の逆断層に沿って約 40 cm 断層側に突き出したと推定できる。この突き出した岩盤の下面をなす断層のずれは、F-3 との交差部から 5m 程度で消滅していることから、この突出しの原因は、蒲野沢層の凝灰岩の膨張によると考えられ、この凝灰岩は、X 線分析によればスメクタイトを含んでおり、それが吸水膨張した可能性がある。この逆断層には、それと共役とみられる西傾斜の逆断層がある(図-2)。これらの逆断層は破碎物質をほとんど伴わず、層理面を水平に戻すと正断層センスとなり、また、この断層に沿って軽石粒が延性変形している。また、これらの断層は、形態的にも F3 断層に切断されていることから、もともと、F-3 断層よりも古いものである。それに層ずれが地表付近で再度生じたと解される。

トレンチ南面で北面で見られたような上載層の顕著なずれがないのは、南面では、泊層の凝灰角礫岩と蒲野沢層の砂岩とが接しており、凝灰岩が見られないことと関係あるものとする。

2. 3 s-19

TR-20'-1 では、トレンチ南面には岩盤内で消滅する逆断層(s-19)があるが、北面にはこの延長の断層はない。南面では、風化した凝灰角礫岩内の南北走向で西傾斜の S-19 断層に沿って、西側の岩盤が東側の岩盤の上に衝上し、その上の M1 段丘堆積物もそれに沿って変形している(図-4)。この断層の姿勢は、 $N31^\circ E/48^\circ W \sim N12^\circ W/38^\circ W$ である。基盤面の鉛直隔離は 70cm、水平隔離約 1m。断層は下方に低角となり、犬走りの下で消滅する。断層には断層面上に鏡肌と斜めずれの条線が認められるが、破碎帯はほとんどない。この断層の上盤の岩盤面は東上方に向けて突き出した形をしているが、その西側の岩盤面は断層の東側の岩盤面と同じ高さであり、東西方向長さ 10m で、厚さ 4m の 3 角形状断面をした岩盤が後方回転するように東に移動したことがわかる。岩盤は風化した凝灰角礫岩(泊層)で、岩片の多くはナイフで削れるほど軟質である。岩盤内には様々な方向で数 cm から数 10 cm 連続する割れ目も認められ、これらには黒色析出物が付着し、その上に鏡肌と条線が認められることが多い。上述の断層にも黒色析出物が付着しており、そこに斜めすべりの条線が刻まれている。これらの黒色析出物は、その独特の色から、岩石が風化する際の酸化的な条件で

形成されたマンガンの酸化物と推定される。そして、その上の条線は岩石が風化して体積膨張する際に刻まれたものと考えられる。

上記の断層は、南面のみが存在し、また、下方に向けて低角化して消滅することから、テクトニックな断層ではない。この断層の形態は、もともと西傾斜する節理あるいは小断層があった個所で表層の岩盤が膨張することによって形成されたことを強く示唆している。実際、後述するように、本トレンチ直近で掘削されたボーリングコアを用いた分析から、深さ約 10m 以浅で岩石が風化に伴って 20~40%程度膨張したと推定されている。

2. 4 s-14

トレンチ TR-29 では、s-14 と呼ばれる小断層がトレンチ南面から北面に連続しており、それ沿いにずれが認められるが、北面は岩盤の上載層がほとんど残っていないので、そこではずれの量や上載層への影響は明確ではない。

南面では、南北走向で西に 52° 傾斜する S-14 断層の上盤が約 90 cm の鉛直隔離を持って上昇している。破碎帯の幅は法面下部で 5 cm。岩盤面近傍では開口亀裂が多く、断層面は不鮮明になる。ここでは、下盤は砂礫であり、その下の岩盤面はその東方に比べて低くなっている。上載層の M1 段丘堆積物の砂層および洞爺火山灰層もこの断層のずれに伴って湾曲し、一部断層面によって切断されている。断層の上盤側が盛り上がっているのは、断層から 20m の範囲であり、そこよりも西では岩盤面の高さは断層の東側（下盤）とほぼ同じになるが、その西方では再度断層近傍の岩盤面と同程度の高さになる。上載層の砂層は、盛り上がった部分もその西のくぼんだ部分も同じように覆っている。盛り上がった部分の西縁付近から東に下がっていく割れ目密集ゾーンがあり、これが上述の断層と合わせて逆三角形断面をもつ岩盤の塊をつくっており、この部分が盛り上がっている。ただし、この割れ目密集ゾーンが岩盤面と交差する部分には岩盤面と上載層のずれは認められない。

断層の上盤も下盤も凝灰角礫岩であり、これらはいずれも強く風化している。特に上盤側の凝灰角礫岩は球状風化による軟質化が著しく、球状風化被膜の表面には黒色析出物があり、そこに鏡肌が形成されている。鏡肌の条線の方法は様々で一定していない。上盤ほど著しくないが下盤の岩片にも球状風化は見られる。

TR-29 の直近で掘削されたボーリングコアの分析結果から、深さ約 15m より浅い岩盤で体積が 20%程度膨張していることが推定されている。

2. 5 f-1

Tr-34 では、NW 走向で北東に緩傾斜する f-1 断層が観察される。この断層はセピオライト（青味白、緑、黒）を伴い、断層に沿うせん断面は断続的に幅 20-30 cm間に発達し、ガウジと軟質部を伴う。この断層の両側の岩石は青色のセラドナイトを伴う凝灰角礫岩であり、それらの岩盤面は M2 段丘堆積層に覆われ、断層の両側でずれていない。この断層の上の位置で M2 段丘堆積層の砂層に高角割れ目がわずかに認められ、そこで北東下がりのずれが 1 cm程度認められる個所があったが、このずれは上下に消滅していた。そのため、この微小なずれは下位の岩盤内の断層のずれによるものではない。微小なずれの認められた部分の下には巨礫が位置しており、この変位は、巨礫の地震時の変位などによる局所的な変形であると考えられる。

2. 6 その他

上述した断層と第四系の変状の他にも、当敷地内には、至るところに第四系の変状を伴う岩盤のずれや変形が認められる（TR-28 の西部、TR-32, TR-20'-4 など）。しかしながら、

それらの多くは、深部や側部に長く連続するものではないこと、また、前述した TR-20'-2 の F-9 断層沿い、および、TR-28 の F-3 断層沿いの変状を除くと、変状は凝灰角礫岩の風化部およびそれに隣接する安山岩溶岩に限られていることが確かめられている。TR-28 の西部北面では、平たい逆三角形の風化凝灰角礫岩塊が、その下面をなす割れ目帯に沿って両側にせり上がるように変形していた(図-5)。また、これらの割れ目帯は明瞭な断層面をなさず、かつ、トレンチ底部にまでは連続していなかった。TR-20'-2 の拡幅部では、下位に風化した凝灰角礫岩があり、その上に安山岩溶岩が位置している個所があり、凝灰角礫岩は風化軟質化しているものの開口割れ目を伴わないのに、硬質な安山岩には不規則な割れ目が発達し、それが最大 2-3 cm 開口している個所が見られた(図-6)。これらの開口割れ目は、凝灰角礫岩が膨張して、その上の安山岩溶岩を押し上げた結果形成されたものと解される。

3. 第四系の変状の主因が岩石の体積膨張にあることについて

掘削された多くのトレンチで、岩盤と上載の第四系に何らかの変状が認められた。筆者の観察範囲で変状が認められたのは、TR-20'-2 の F-9 断層部分と TR-28 の蒲野沢層の凝灰岩部分を除くと、泊層の凝灰角礫岩の風化部、および TR-20'-2 拡幅部の局所的な安山岩に限られており、未風化の凝灰角礫岩の岩盤面と上載第四系には変形は認められなかった。このことは、凝灰角礫岩の風化と変状とが密接に関係していることを強く示唆している。

TR-20'-2 で観察された F-9 断層では、破碎帯部分がわずかに上に突き出るような変形とガウジの絞り出しが認められたものの、その断層の両側で岩盤面と上載層とのずれは認められなかった。このことは、前述したように、破碎帯部分と隣接する凝灰角礫岩との体積膨張に起因すると考えるのが妥当である。また、TR-20'-2 で認められたガウジの絞り出しと、凝灰角礫岩の間隙水の絞り出しは、凝灰角礫岩が風化に伴って膨張して、これらを絞り出したことを示唆している。TR-28 で認められた F-3 断層に沿うずれも、実際には F-3 断層ではなく、それに衝突する東傾斜の逆断層に沿う岩盤の突出しである。そして、この変位も F-3 断層から約 5m の間で消失してしまうことから、ここまでの範囲の岩石が体積膨張したと判断することが妥当である。低角な断層にわずかな逆断層センスの変位の認められるものもあったが (TR-20'-1, s-19; TR-29, s-14; TR-32 斜路など)、これらはいずれも深部でさらに低角度化し、s-19 と s-14 では 10m 程度の深さで消滅することが確かめられている。また、s-19 と TR-32 斜路の断層は、トレンチの両側面に連続するような規模のものではなかった。TR-28 の西部北面では、平たい逆三角形の岩盤塊が、その下面をなす割れ目帯に沿って両側にせり上がるように変形していた。このように、深部に連続せずに低角化する形態、および逆断層センスを示すずれは、これらの断層変位がテクトニックなものではなく、表層部の岩石の体積膨張に起因することを示している。

4. 体積膨張が生じていることの証拠

凝灰角礫岩が風化して体積膨張していることは、前述の地質構造から明らかであるが、その他の証拠は岩石と密度と化学組成の風化に伴う変化である。この考え方は、少ないものの研究事例があり、信頼性がある。それは、化学成分の内チタンあるいはジルコニウムを風化時不動態素として、風化前後の岩石の不動態素含有率と密度とを用いて、化学的風化に伴って生じた岩石の体積変化を算定するものである。それと共に、岩石の他の化学成分の増減も算出することができる。

s-19 断層周辺、および、TR-20'-4 直近では、それぞれ 1 本と 6 本のボーリングコアを用いて、掘削直後に試料採取が行われ、乾燥収縮などの体積変化が生じない状態で密度測定

がなされ、さらに XRF 化学分析が行われた。試料は、凝灰角礫岩の主体を占める基質部分である。それによれば、両か所ともに、深さ約 10m~15m 以浅で体積が 20~50%膨張しているという結果が得られた(図-7)。これらの体積が変化している部分は、風化度が A, B, C, D, E 区分の内、主に D と E 区分の岩石であった。風化度区分は次のとおりであり、岩石の見かけ上も C と D の間の変化が大きい。化学成分の変化を見ると、やはりこれらの岩石で多くの化学成分が溶脱されており、目視で分類した風化程度が化学的にも裏付けられている。

- A 新鮮
- B 角礫の縁がやや変色(黄色味)
- C 基質がやや褐色化。角礫に変色粒子あり
- D 基質が褐色化、角礫には軟質のものもあるが、硬いものも残存
- E 基質褐色化、角礫褐色化してすべて軟質

体積が 30%増加するということは、膨張が等方的に生じていれば、長さとしては 10%の伸長となる。実際には表層部の側方部は拘束されているので、地表に向かう方向のみ伸長することになる。この場合には、鉛直方向に 30%の伸長となる。一方で、側方に低角不連続面がある場合、それに沿って側方移動が可能になるので、膨張はほぼ 2 次元的に生じる(不連続面の走向方向は拘束されている)。この場合には、約 14%の伸長となる。実際に s-19 では、約 10m の長さの板が約 1m 伸長したと推定され、その場合の伸長は 10%であり、計算結果と実測結果とはほぼ整合的である。

このように低角の不連続面がある場合に、岩石の体積膨張によって逆断層変位のずれが生じることは、米国コロラド州の白亜系 Pierre shale で知られている。さらに、地層が急傾斜の場合に、特定の地層が体積膨張を起こして、突き出すように変形する場合があることも同じ事例で知られている。

5. 岩石の体積膨張のメカニズム

前述したように、TR-20'-1 トレンチの s-19 断層近傍などで掘削されたボーリングコアの分析結果から、深さ約 10m~15m より浅い岩盤で凝灰角礫岩の基質が褐色化し、化学成分が溶脱され、体積が 20~50%程度膨張していることが推定されている。そのため、この膨張は化学的風化に伴って生じたものと判断されるが、その詳細メカニズムは今のところ明らかではない。S-19 近傍のボーリングコアの場合、膨張した部分よりも深部の岩石にはスメクタイトが含まれているが、浅部ではそれが消失してハロイサイトが形成されていることもわかっている。そのため、この膨張はスメクタイトの吸水膨張ではなく、風化に伴って生じる現象に起因する膨張であると考えられる。凝灰角礫岩が風化に伴って膨張することの原因として、風化に伴う膠結力の低下、鉱物あるいは火山ガラスの水和、粘土鉱物の膨潤などが考えられる。

TR-28 の F-3 断層沿いの変位は、蒲野沢層の凝灰岩の膨張に起因すると推定される。そして、この岩石は見かけ上強く風化してはおらず、また、スメクタイトを含有するものであるため、その吸水膨張によって見かけ上の断層変位が生じたものと考えられる。

6. 岩石の膨張の生じた時期

第四系の変状は M1 段丘堆積層と洞爺火山灰層(約 11 万年前)にあり、十和田レッド軽石層(約 8 万年前)に覆われているため、変状は両者が堆積した間の期間に生じたことになる。この間は 3 万年と短く、新鮮な凝灰角礫岩が軟質になるまで風化するには短い、次のようなことから、比較的急速に風化が進んだことは十分に考えられる。1) 風化前に凝灰角礫岩にはスメクタイトが形成されるような変質がすでに生じていたことが少なくと

も一部で確認されていること。2) 岩盤が海食棚で侵食を受けた時には岩石と接触していた水は海水であるが、その後 M1 段丘堆積物が堆積した後離水し、岩石と接触する水は淡水になったこと。海水よりも淡水の方が岩石との反応性が高く、また、厚い電気二重層を形成することから、この水質変化が風化と体積変化に影響を与えたものとみられる。体積膨張が 8 万年前以降ほとんど生じていない理由は、体積膨張を伴うような風化現象は深くまで生じるのではなく、上載圧がある程度以上になると、進まなくなることにあると考えられる。実際、s-19 だけでなく、他の H25B-m1~m5 のボーリング孔いずれでも、体積膨張は深さ 10m~15m 以浅で生じていることは、風化に伴う岩石の膨張圧がこの程度の深さの岩荷重であることを示唆している。

岩石の風化ではなく、おそらくスメクタイトの吸水膨張によると考えられる F-3 断層個所の変状も、M1 段丘堆積層体積の後に離水し、その後変形が発生したことを示唆している。スメクタイトの吸水膨張程が海水よりも淡水の場合の方がはるかに大きいことは良く知られた事実であり、岩石が離水してから著しい吸水膨張が始まり、その膨張圧が上載圧とつりあった時点で吸水膨張が終了したという考えも、合理的であると考ええる。

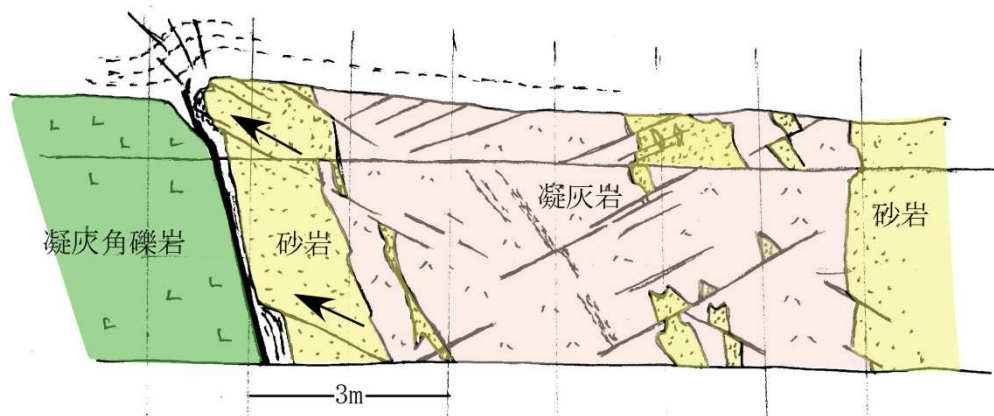
6. おわりに

筆者が観察した限りでは、東通原子力発電所で認められる第四系の変状は、テクトニックな新しい断層活動によるものではなく、岩石の体積膨張に起因するものであると判断されることを述べた。その体積膨張の原因としては、必ずしも粘土鉱物の吸水膨張によるものだけではなく、岩石の風化に伴う現象によるものが多いと考える。なぜ岩石が風化する際に体積が膨張したのか、を完全に明らかにすることは、現在の学術レベルでは難しいが、本文に述べたように、体積膨張が実際に生じ、それによって第四系の変状が生じたことは、岩盤の中の断層の構造、岩石の密度と化学組成によって裏付けられている。また、体積膨張圧には限界があるようであり、深さ 10m~15m 程度よりも深い上載荷重では生じないことが示唆されている。つまり、これらの上載荷重分の地層を除去して構造物を設置した後、仮に岩石の風化が早く進んだとしても、この上載荷重に相当する程度の重量構造物を持ち上げることはできないと考える。

付図



図一 1 TR-20'-2 北面の F-9 断層。断層の東側の凝灰角礫岩から上に向かい、次に西(左)にたなびく褐色の雲状のゾーンが見える。これは鉄の水酸化物の沈殿物であり、その形態から、凝灰角礫岩から絞り出された間隙水から沈殿したものである。



図一 2 TR-28 の F-3 断層。左上と下のスケッチは同じ部分。右上の写真から、蒲野沢層の断層近傍部分だけが手前に突き上げ、そこから離れると岩盤面は下盤の泊層と同じになることがわかる。下のスケッチの矢印で示すように、この突き上げによってガウジが変形を受けている。



図-3 TR-28 の F3 断層上部。右図では、ガウジが矢印で示す岩盤の左上への突き上げによって変形を受け、一部は礫層の中に押し込められている。



図-4 TR20' -1 の s-19. 右方に向けて低角化して消滅する様子が見える。また、断層から離れると岩盤面の高さが同じになる（直線）



図-5 TR28 の西部北面。逆三角形上の岩盤が両側の岩盤に乗り上げるようにずれ、上載の砂層をも変形させている。



図-6 TR-20'-2 拡幅部の安山岩。岩石の割れ目が最大 2-3 cm 程度開口している。

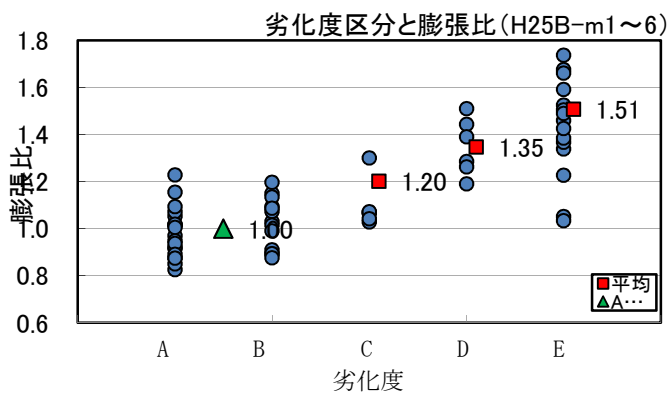
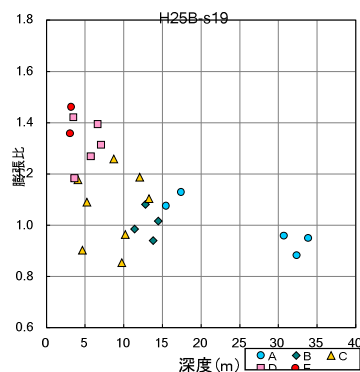


図-7 s-19 直近の 1 孔と TR20'-4 の m1-6 孔のボーリングコアによる岩石の膨張比（電力中央研究所作成）。左：s-19。深さ約 10m よりも浅い個所で体積が新鮮岩石（A, B の平均）に比べて 20～40% 程度体積が増加している。TR20'-4 では、A, B, C 区分の岩石に比べて D, E 区分の岩石の方が平均的には体積が 20～50% 増加していることがわかる。

平成 26 年 1 月 10 日

東北電力株式会社 東通原子力発電所の敷地内破砕帯について

東北大学災害科学国際研究所 教授 遠田晋次

東北電力東通発電所の敷地内破砕帯の現地視察を行ったので、一研究者として中立的な立場からの見解を下記に記す。

なお、私は原子力安全保安院地震・津波、地質・地盤合同 WG の B サブグループ委員としても委員会と現地調査に参加し、一部の追加調査の立案にも携わった。まずその当時に述べた主なコメントを再掲した後、昨年の調査について記す。

【保安院 B サブ時代の東北電力の説明と現地調査を通じて】

- 複数回の活動：最終間氷期の海面上昇に伴う膨潤作用なのに 2 回の断層活動が認められる（トレンチ Tr-20' -2 の F9 断層の調査において）。成因は議論の余地があるが、少なくとも繰り返し性があるのではないか。
- 敷地内に見られるような第四紀層を切る断層が膨潤作用で説明されたとする研究事例を知らない（当時は東北電力からも報告がなかった）。膨潤の可能性は否定できないが、報告事例がない以上、活断層ではないとする確証の高い証拠とメカニズムの丁寧な説明が必要。
- 膨潤によって体積膨張は起きるが、どのようにして剪断変形を引き起こすのか説明が必要。
- （当時の今泉委員が指摘されていたように）一部に変動地形の可能性があるので慎重な検討が必要。
- s-19 断層（Tr-20' -1 トレンチ）のように確かに地下数 m で消滅する断層も複数認められる。断層近傍でしか変位がみられないリストラックな断層であり、全体として顕著な上下変位があるようには見えない。

このような疑問点やコメントを総合すると、当時は東通発電所敷地内の小断層は「震源へと繋がる典型的な活断層では無いが、受動的に動いた断層群の可能性が高い」と考えていた。なお、当時は規制委員会専門家会合で指摘されているような横ずれ断層運動が卓越する構造は認められず、議論にもならなかった。

【昨年の現地調査でのコメント】

上記の保安院時代に立案された追加調査と、原子力規制委員会専門家会合を受けて実施された各種調査により情報量が格段に増えた。その状況で、再度現地を調査し、Bサブ委員当時の解釈を改めざるを得ない状況になったので、以下にコメントする。

● 複数回の活動について：トレンチ Tr-20' -2 の大幅拡張に伴い、全体の地質構造が詳しく把握できるようになった。それにより、保安院時代に指摘した2回の断層運動は、巨礫周辺に特徴的に見られる葉理の乱れを1回前の変形と誤認していたことがわかった。F-9断層から離れた巨礫についても、その周辺の砂層・細礫層を観察すると、巨礫周辺の水流の乱れによると考えられる葉理の乱れが観察される。これがF9断層近傍では断層運動による変形とその後の侵食面の形成（傾斜不整合）と見分けが付きにくい。また、トレンチが海側へ大きく拡張されることによって、M1層の堆積ユニットが細分できることがわかった。保安院時代に示されたスケッチではM1層が単一色のため内部構造まで詳しく考慮しなかったが、拡張されたトレンチ壁面には海側（東）に前進して堆積が進行した状況が明瞭に露出している。堆積組織・構造ユニットに基づきM1層を細分し、それに基づき全体を俯瞰すると、変形はF-9断層周辺の波状変形が主で、F-9断層から離れると上下変位はほとんど認められないことがわかる。基盤上面が低い西側の蒲野沢層上には、その凹地を埋めるようにM1層最下部のサブユニットが存在している。泊層の溶岩や凝灰岩に比べて蒲野沢層砂岩・泥岩は侵食抵抗が低く大きく侵食された後、M1最下部ユニットが低下側のみを埋積したと考えられる。したがって、Tr-20' -2でも地表面高度（地形）と断層変位（F-9断層周辺の盛り上がり）には何らの因果関係は認められない（他の地点での推定断層崖と地下構造との不对応については後述）。なお、F-9断層から東に20m程度泊層の強風化部が続いており、その部分の第四紀層は波状に緩く盛り上がっている。そのため、保安院当時の掘削範囲が狭い状況では、東側が隆起したように見えた可能性がある。

● F-9断層について：Tr-20' -2で観察する限り、内部に剪断構造（直線的な断層形状、鏡肌、条線）が認められず、典型的なガウジにはみえない。基盤の圧縮によって内部の粘土が絞り出されているようにみえる。ましてや横ずれ変位を示す明確な構造は認められない。

● 断層運動が膨潤作用によって引き起こされた例として、Noe et al.の一連のコロラドの事例が「発掘」された。これによって、少なくとも「報告事例が無い」とした保安院当時の私の発言は撤回せざるを得ない。全体的な印象として、小断層が多数観察される箇所は強風化となっている。これは東北電力の基盤の泊層・蒲野沢層の風化区分とほぼ整合している。また剪断面（小断層）は既存の断層や、凝灰角礫岩中の礫縁や礫破断面などの弱面に多い。すなわち、膨潤による体積変化の影響が既存の剪断面（弱面）を動かす原動力になった可能性がある。その点、定性的ではあるが、膨潤によって剪断変形を引き起こす仕組みを一通り説明できる。

その他、専門家会合で指摘されている以下の問題点に関して、私見を述べる。

【横ずれ断層変位について】

● F-3 断層の水平スライス調査 (Tr-28 トレンチ) によって横ずれ変位の有無を調査しようとする試みは理解できる。しかし、特に浅い部分において、水平スライスで痕跡が認められないとしても、横ずれ変位が存在しないと断定できない。浅い部分ではフラワー構造中の断層が低角化し捻れ、縦方向のセンスが大きくなるからである。ただし、今回の調査は3次元的な断層構造の復元や変位センスの調査、X線 CT を用いた丁寧な変位復元を行っている。現地で観察した限りでも (1 スライスであるが) 礫の回転は認められなかった。東北電力の詳細な計測データからは礫の回転はなく、レイクもほぼ傾斜方向であるデータが示されている。水平スライス調査以前の情報としても、(条線が正確に計測されていると信じる限り) 変位は傾斜方向であり横ずれ変位が主体とは言えない。この状況では、F-3 断層の傾斜はきわめて高角でロックアップ角は優に超えており、テクトニックな逆断層運動を想定しにくい。膨潤による表層のみの動きと解釈することも可能である。

● 水平スライス面では基盤上面の顕著な波状の凹凸が認められた。現地での観察では、波状の基盤の盛り上がりは、その長軸 (背斜軸?) が F-3 断層に直交しているようにも見えた。特に、基盤隆起部縁辺では F-3 断層に直交する剪断面も一部確認した。典型的な横ずれ断層に、このような直交する断層や波状構造が伴われている例を著者は知らない。剪断を伴うことから、波蝕による基盤表面の凹凸だけでは説明できず、膨潤による盛り上がりと剪断が一部加わっていると考えられる。

【変動地形と小断層について】

● 東北電力は保安院および専門家会合によって指摘された変動地形を複数箇所掘削した (Tr-29, 30, 32, 33)。その結果、すべてのトレンチにおいて低断層崖直下に対応する断層は確認されなかった。これらの低崖は、下位の堆積構造とは全く無関係で、一部は人為的なものである。したがって、それらの低崖が断層変位地形でないことは今回の調査で明確である。

● ただし、上記目的で掘削したトレンチ壁面には堆積物までも切断する多数の小断層が露出した。それらの走向・傾斜には定向性はなくランダムに近い (推定断層崖に直交するようにトレンチがデザインされているので低崖の走向に整合するよう見える)。この観察事実は、F-3, F-9 断層からの距離に関係なく敷地内一体にこうした小断層が散在する事を示している。また、これらの小断層は泊層凝灰角礫岩・火山礫凝灰岩の風化部や風化部上面に多く認められ、新鮮な部分にはほとんど認められない。このことを考慮すると、これらの小断層はテクトニックな断層運動にともなう副断層的に生じたものとは考えにくい。むしろ、東北電力が指摘するように、基盤風化部との空間的整合性の方が高い。風化部の体積膨張によって既存の弱面が変位させられたと考える方が合理的ではないだろうか。

【f-1 断層について】

- f-1 断層の上方に見られる堆積物中のわずかな変位と剪断は局所的であり，直線的に基盤に続いているわけではなくテクトニックな断層かどうか不明である．
- Tr-34 トレンチに認められる断層は f-1 だけではない．同一壁面の北側にも顕著な剪断面（仮に f0）が存在する他，泊層中に数多くの小断層や節理とそれにともなう条線が確認できる．しかし，それらの大半は多様な走向を示し，直線性を欠き連続性にも乏しい．
- 堆積物中に長波長の撓みが認められ，概ね f-1 断層と f0 に挟まれた部分がわずかに持ち上がっているようにもみえる．しかし，この上昇部分は岩盤劣化部・風化部とも調和的にも見え，上記の他の小断層と同様な成因で生じた可能性が高い．
- f-1 断層上方の堆積物中のわずかな変位は少なくともトレンチ内では1度の変位で説明できる．基盤全体がバルクとして体積変化した状態でわずかに剪断が生じた可能性もあり，テクトニックなものと断言はできない．将来も変位を生じるかどうかを判断する上で，成因解明は重要である．

以上

東通発電所サイトにおいては，F-4, F-5, F-7, F-8 等の断層破碎帯が固化しているため，活動性はないと判断しているが，このことについて説明する。断層破碎帯には破碎等の変形様式に階層構造があり，その変形様式は深さ（封圧）と共に階層的に変化することが知られている。

活断層は最近にできた破断面であるから，現在観察することのできる露頭の破碎帯では，地表条件の，封圧の小さい条件の変形しか見ることはできない。仮に，露頭で封圧の大きい条件での変形や，熱水等に伴う事象が見られたとすると，それらは過去に地下深い場所で形成された変形等が，時間をかけて隆起等により，地表付近に達したものと解釈されるから，そのような破碎等は過去にできたものであり，活断層による破碎ではないことがわかる。活断層の露頭では，断層に挟まれた周辺の岩石は粉碎されているので，断層面どうしが密着していることはない。断層面が密着固化していれば，断層活動後，当該地域の岩盤が固化したことになり，活断層ではないことが明白である。

熱水による鉱化作用に伴う固化

母岩	142.57m	197.28m	199.82m	Average
olivine	6.54	3.12	11.14	6.93
augite	19.17	6.22	23.01	16.13
An	17.24	40.27	36.86	31.46
Ab	21.99	19.9		20.95
sepiolite	15.74	12.09	8.01	12.28
Q	10.35	12.27	12.08	11.56
Hem	5.35	4.89	4.43	4.82

Sepiolite 脈	142.82m	198.73m	試掘坑 2 号	Average
sepiolite	36.64	24.37	30.31	30.44
seladonite	10.01		1.71	5.88
Q	33.26	61.34	21.49	38.70
An	2.21	2.18	19.04	7.81
Ab	2.87	0.82	8.54	4.08
Hem	5.58	12.78	21.49	13.28

東通のサイトでは，sepiolite, seladonite 等を伴う熱水性の鉱化作用があるが，その鉱化作用によって岩盤全体も固化を起こしている。母岩についての分析値をノルム計算の手法により分析すると，上表のようになる。母岩の原岩は，かんらん石・輝石（約 30%）および斜長石（約 70%）からなる安山岩質の岩石と考えられるが，分析してみると，この他，約 25%の石英，沸石 sepiolite 等の二次生成鉱物が混入していることがわかる。このうちある部分は石英脈などとして，二次生成鉱物と識別がつくが，ほとんどは母岩にしみ込んでしまっている。このしみ込みにより，母岩は広範囲に固化してしまっている。残余の成分として石英が脈状に入っているところもある。

破碎部が sepiolite 化している部分の分析値を同様に計算すると（表下半分），30~45%が sepiolite, 20~35%が石英である（f-f 断層の破碎部では石英が 61%に達している）。残余の 3~5%（f-f 断層部では 28%）が斜長石であり，これは初生的なものか，熱水侵入時に周辺の岩

盤から溶かしこんだものかは、この試料だけでは不明である。この脈は従って sepiolite-石英の共存する熱水脈なことが判る。

このような状況から、熱水による鉍化作用は、破碎帯への脈状の侵入のみでなく、本地域の地下岩盤の広範囲に浸透していることがわかる。Sepiolite の鉍化を伴う熱水作用は全国的に大変珍しく、鉍物学的には大変に貴重であるが、その時期についてははっきりとしたことはわかっていない。しかし、青函トンネル地域の地質との類推により、広範囲に亘っているため、泊層の火成作用に引き続きおこったものと考えられている。活断層の活動があるようなごく最近の地質時代に、このような sepiolite-石英を伴う広汎な熱水作用があったことは、日本全体でも知られてはいない。

F-5 断層の破碎帯は形成後に sepiolite の熱水作用を受け、更に石英脈が切って入っていることから、この破碎帯は熱水作用以前に形成されたものであるから、活断層ではないことは明白である。同じように、断層形成後の鉍化作用を受けている断層には F-7, F-8, F-4, f-g, f-f, f-3 等があり、何れも F-5 と同様に地質的前後関係から断層後に固化が生じていて、その後動いていないので活断層ではないことは明白である。

地下深部における固化

H-5 (F-2) 断層、H-2 (F-8) 断層は、地下延長方向に向けボーリング調査を行い、約 200m の深さでは、地盤が固化し、断層面は固化密着しているとの報告がある。地下深部での固化は、高封圧条件によることが多いが、本地域においては、前述の通り、広汎な熱水作用による固化があるため、必ずしも高封圧のみで固化したものではないと考えられる。

一般に、断層帯には地下方向への延長が 10~15km 程度はあるが、破碎帯は、深さにより封圧が増すので、変形様式が深部に向かい以下のように変化することが判っている。

地表部	粉状の破碎
100~数百 m	破碎帯の固化
1~数 km	せん断面、破碎部における引きずり
数~10km 程度	破碎部の流動変形

本サイトにおいては、破碎帯の変形にこのような階層構造がはっきり見られるところはないが、断層破碎帯の観察に当たっては、このような視点が重要であることを敷衍する。

東通サイトの地質（意見書メモ）

徳 山 明

1. 変動地形学的に“活断層”の指摘を受けた箇所についての精査

4 委員それぞれが、変動地形学的に活断層があると指摘された場所について、東北電力では、3 箇所のトレンチ掘削調査を行ったが、何れの箇所の直下においても地層には断裂やずれはなく、ほぼ水平に連続しており、活断層ばかりでなく、広域的応力に伴う過去の地質断層と思われるものも、一箇所も存在しないことが明らかになった。

敷地南部では、地形は全体として東側に緩く傾斜しているが、F-9 断層東側、及び南西部の F-3 断層の西側の 2 箇所において、地表面で東側が高まっている箇所があり、それらの地点について各委員が断層地形であると指摘した。東北電力では、これらを横断するそれぞれほぼ東西の三つのトレンチ（Tr20'-4、Tr-30 及び Tr-28）を掘削し、当該地域の地層の状態を詳しく調査した。

1.1. 敷地南端 F-9 断層東側の地形的高まり（Tr20'-2～4）

敷地の南端、F-9 断層の東側に、 M_1 の段丘堆積物の上に高まりがあるとの指摘があった。この箇所については、東北電力は F-9 断層東側に、延長約 190m にわたり Tr-20'-4 トレンチを掘削し、東西断面の調査を行った。トレンチによる断面では、指摘された地形的高まりの部分には盛り土が分布し、植林前の地形的改変が行われた形跡がある。この下のトレンチ断面では、この地点の下部の地層には断層は全く存在しない。上からローム、洞爺火山灰、 M_1 段丘堆積物等が平坦に重なっており、これらの地層を切る断層は全く存在しないことが判明した。盛り土による高低差を委員たちが変動地形と見誤ったものである。

なお、東西方向のトレンチでは、泊層凝灰角礫岩の風化劣化部が、未風化の溶岩の上に、南北方向の逆断層により乗り上げ、これによって不整合及びその上の第四系に変状を生じさせている箇所が見付かっている。

1.2. 敷地南西部の指摘箇所（Tr-30 トレンチ）

敷地南西端部において、東側が高い地形が敷地外の南西方から NNE-SSW 方向に連続して、変動地形の可能性があるとの指摘があった。この場所について東西方向のトレンチ Tr-30 を掘削した。その結果、変動地形の可能性があるとされた、東側が高いとされた箇所には土塁が形成され、盛り土があり、地形の人工的な改変が行われていた。西側の地形的に低い箇所は、かなり広汎に切土され、ローム層上部まで欠けていることが分かった。この下には、断層等の地層の変形は全くなかった。なおこの変動地形が指摘された箇所より東側には、劣化した泊層およびこれを覆う M_1 面の段丘堆積物の砂層に規模の小さい段差、撓み、小断裂等の、第四系のいわゆる変状に伴う小断層等があるが、これについては、変状の項で述べる。

1.2.1. F-3 沿いの変動地形の調査結果 (Tr-28 トレンチ)

F-3 断層西側数十 m 離れた位置に、東側下がりの斜面地形が認められ、耐震バックチェックの審議において、この地形が変動地形である可能性があるとして指摘されたことから、Tr-28 トレンチを掘削し、調査した。

その結果、トレンチ断面には、この地形のある位置の下の地層には、断層は認められなかった。M₁ 面の段丘堆積物を覆う陸成堆積物が、当該傾斜面末端より山側で厚く堆積している状況が確認された。以上から、当該の地形は断層活動とは関連性がないことが判明した。

1997 年の設置審査に当たっての地質・基盤調査において、これらの場所については、活断層はないと判断されており、また、今回の規制委員会での疑義に対し、東北電力が独自の調査を行い、「活断層はない」という結論を得ており、すでに、その調査結果を報告していたところであるが、規制委員会では、有識者専門委員による独自の調査を行い、委員会の正式見解として、東北電力の再度の調査結果を否定し、「活断層がある、またはその疑いがある」との結論を下していた。

この度のトレンチ掘削調査の結果、活断層ばかりか、過去に動いた断層の存在する場所が一箇所もなかったことは、専門委員の調査が杜撰であったことを露呈したものである。

活断層は、現在の日本列島を取り囲むプレートの配置及び動きによって生じた応力の解放によって生じたものであり、現在動いている活断層は、プレートの現在の配置ができて以降、活動を繰り返してきているが、プレートの配置に変化が起こるまで、今後とも数十万年くらいは繰り返し動いて、歪みを解消してゆくと考えられている。活断層の存在確認に当たっては、地層の変位、変形の繰り返し等の地質現象の観察が不可避であるにもかかわらず、地形を外観しただけで活断層の存在を断定したことが、大きな過ちとなった。

2. F-3 断層に横ずれはあるか (Tr-28) 水平掘削)

F-3 断層については、Tr-28 トレンチ北面の観察において、委員から扁平礫の長軸が断層面に平行に配列して入り込んでいること、並びにいわゆるフラワー構造の割れ目が発達する等の観察事項から、横ずれ成分が卓越しているとの指摘があった。地質平面図でみると、F-3 断層は敷地北部において走向が東寄りに曲がり、そのトレースに小さな屈曲があることから、この断層は基本的に横ずれ断層ではないことがわかるので、東北電力の説明としては横ずれ断層ではないとされていた。

東北電力では、Tr-28 トレンチ掘削において、F-3 断層を、M₁ 段丘面の上に重なっている上部、中部、下部陸成層レベルから、順次水平掘削を行いつつ堆積物を取り除きながら、F-3 断層の水平のトレースを追跡し、礫の配列を調べるなど、綿密な観察を行った。

ここでは、F-3 断層は蒲野沢層砂岩（東側）と泊層の火山碎屑岩（西側）との境をなす断層であるが、この掘削では、上に重なる M₁ 段丘面の P2 レベルから高角度の断裂が現れ、南側では P4S レベルから西側の泊層が出現し、F-3 のトレースが出始めた。

P5S の掘削面では、南端より 4m の地点で、泊層東側の F-3 のトレースは、西側に三角形の形に約 1m 窪んで屈曲していることが確認された。北側区画では、P5N 面付近から下では、（東）蒲野沢層／泊層（西）の境のトレースが追跡でき、南側ほどの大きさではないが、泊層・蒲野沢層共、断層破碎帯をはさみ、凹凸があることが判明した。このように大きな出張りがあれば、断層は水平に動くことは不可能であり、このことから、F-3 断層の横ずれは、あったとしても、大きくはないことが判明した。

また、断層帯中にはさまれている礫について調べた結果、P2N 面（座標位置縦 n12；横 n

⑤) で採取した断層による食い違い礫を X 線 CT 画像により断面を調べた結果、横ずれ成分は左横ずれ方向に東側が約 1cm ずれているが、縦方向では、東側が約 2.5cm 下方にずれており、左横ずれとともに、東側が下にずれていることが判明した。

P3N の水準の砂岩 (M_1 段丘堆積物；採取位置 縦 n12；横 n12) には堆積時の葉理 (走向 N51W；傾斜 13S) が、F3 にほぼ平行な小断層によって、見かけ上走向方向に 7.3cm、傾斜方向に 1.6cm ずれているが、水平変位量は 6.8cm となる。

2.1. 礫配列の方向性について

Tr-28 トレンチの観察時に、礫配列の方向性から横ずれがあると指摘されたので、Tr-28 トレンチの水平掘削時に、P2N～P5 下 S の各水準 15 掘削面について扁平礫の方向性の測定を行った。これらの礫は、何れも M_1 段丘堆積物の礫であるが、F-3 断層の両側それぞれ約 3m の帯から採取しているが、全く定向性はない。P5N では北部で断層の西側に泊層が、断層東側は全体を蒲野沢層が境しているが、東側 3m 帯での礫の配列と、その外の部分での配列とほとんど差はない。

この傾向は更に下の P5 下 N の水準での配列性と変わらない。同じ水準の南側 P5 下 S では断層の全体が泊層と蒲野沢層とで境され、 M_1 段丘堆積物は断層の間に挟まれた狭い帯に限られ、礫はその帯に落ち込んだものだけであるが、礫の配列には全く定向性はない。これらの事実は、断層直上部では、 M_1 段丘堆積物中で、断層に平行な割れ目が発達し、縦・横のずれが認められるが、礫の再配列を起こすような、断層の継続的な動き、特に水平方向の横ずれはなかったことを意味している。

有識者会合における『砂礫層が断層沿いの基盤中に深く落ち込み、断層に取り込まれ、扁平礫の長軸が断層に平行に配列している構造』は、Tr-28 トレンチの壁面での観察によるが、同トレンチの水平掘削調査では、断層を覆う M_1 段丘堆積物中には、断層破碎部やその周辺の凹地沿いに巨礫を含むが、これらには定向配列はなく、扁平礫も断層破碎帯中においても定向配列はない。P6N 面においては、F-3 断層破碎部の溝状凹地には、蒲野沢層由来の軟岩礫の、長軸が溝と直交してはまり込んだままの形を残している礫もあり、いわゆる横ずれに伴う回転の痕跡は認められない。

3. f-1、f-2 断層の活動性について(Tr-34 トレンチ調査)

f-1 断層は、第四系基底に変位を与えていないため、東北電力では、耐震設計上考慮すべき活断層ではない、と考えているが、有識者会合の結論としては、「耐震安全上重要な施設の直下を通過すること」から、更なる検討が必要とされた。また、f-2 断層は、設置許可申請時のスケッチをもとに、これを覆う M_2 面段丘堆積物およびその基底面に変位を与えていないことから、東北電力では、f-2 断層については少なくとも M_2 面形成期以降の活動性はないと判断しており、その判断は正しいと考える。

f-1 断層については、Tr-34 トレンチ中間掘削面、NE-SW 方向の露頭において観察した。f-1 断層は走向 N56W；傾斜 NE20；相対的に北側上がりの逆断層である。鉛直変位量は試掘坑内で最大 0.8m である。トレンチ北面では、この断層は M_2 面段丘堆積物に不整合に覆われていて、不整合面に変位を与えていない。たまたま、この不整合面に接する位置に M_2 面段丘堆積物には巨礫があり、断層がこの礫にぶつかって止まっているように見えるが、不整合面とこの礫との間には薄い砂礫層があり、この部分は、断層の変位を受けていない。また、礫層の上に重なるラミナを伴う縞状の砂層中には、垂直に近い小断裂がある。この小断裂は正断層で、NE 落ちのずれがあり、f-1 とは逆センスである。この小断裂は、不整合下の泊層の凝灰角礫岩の風化による粘土鉱物の膨潤に伴う変位（いわゆる第四系変状）に

よるものであり、f-1 とは活動の時期も異なり、関係がない。f-1 断層は蒲野沢層堆積後の中新世には形成されており、第四系の不整合以降の動きはない。これに対し、M₂ 面段丘堆積物上部砂層内の小断層は後期更新世になってから形成された。

この変状がたまたま f-1 の不整合面のすぐ上にあるため、有識者会合では f-1 の動きに関係していると考え、f-1 に活断層の疑いがあるとする意見もあるが、時期的に大きな隔たりのある全く異なる事象である。また、委員の中には、膨潤による体積膨張の可能性は認めるが、その量が膨潤のみで説明できるかどうかについて疑問を持つ者もある。

これについては、泊層中の凝灰角礫の風化によって、どれだけの量のモンモリロナイトが生成されたかにもよるが、隣接する東電サイトでは、泊層中の風化モンモリロナイトの量と膨潤量、膨潤圧等についての実験・計測を行って確かめており、通常の第四系変状として説明できると思われる。

以上の考察により、原子炉建屋近傍の f-1 及び f-2 断層には、少なくとも M₂ 面形成期以降の活動性はないことが明らかとなった。

4. 第四系の変状

4.1. 第四系変状の概要

第四系の変状は、第四系の下位にある泊層等の地層、または、断層破碎帯等の風化変質が主な原因となって盛り上がり、不整合上の第四系に段差や上に盛り上がる撓みをもたらしている現象で、盛り上がりの規模は最大 1 m 程度、通常数十 cm 程度で、大きくはない。盛り上がりに参加している、ラミナを伴う段丘堆積物には、平行で小規模の断裂や段差を生じているところがある。F-3, F-9 等の大きな断層を覆う第四系中に変状が認められる箇所があるが、分布は局所的で、断層走向方向の連続性はない。また、それぞれの変位は単発的であり、繰り返しによる累積変位はない。

変状を生じさせている断層には、上記 F-3, F-9 等の地質的な断層とは無関係に、変状ができた結果生じた小断層も多数存在し、これらの走向はまちまちで、東西方向のものも、南北方向のものもある。

変状を生じさせた不整合下の地層は、泊層の凝灰角礫岩等で、風化変質が著しく、特にモンモリロナイトを含有するが、変状下の部分には、礫のタマネギ状風化等が卓越し、膨潤に伴う変形やいたみが明瞭である。また、同じ泊層の凝灰角礫岩であっても、風化変質を受けていず、劣化していない部分は膨潤していないので、変状には加わっていない。泊層には、厚い安山岩質溶岩も分布するが、この溶岩は均質で孔隙率が小さく、風化変質を受けていないため、変状の要因とはなっていない。変状は、風化変質の著しい凝灰角礫岩層が、未風化の安山岩溶岩や、蒲野沢層の砂層上に逆断層によって乗り上げることににより生じ、この逆断層が不整合面を切って第四系にまで達している場合が多く、この場合、第四系基底部に段差が生ずる。また、この逆断層により、変状のドーム状盛り上がりが生ずるが、その頂部の砂層 (M₁ 層) には展張割れ目が見られる。

泊層の上には蒲野沢層が重なっているが、泊層は風化変質を受けているが、蒲野沢層は風化を受けてはいない。これは泊層堆積後、蒲野沢層堆積以前に、地表において、中新世後期の風化作用を受けたためである。風化作用は、後述のとおり、高温・多雨気候下で、地表近くの地下水溜まりで、空気中の CO₂ を取込みながら進行する化学的平衡反応である。地下水溜まり上部では、酸性条件で長石等の構成鉱物から SiO₂ を溶脱させ、ギブス石、カオリナイト等を残す。その下の中性の帯では、イオン交換によりモンモリロナイトが沈澱し、最下部ではアルカリ性の条件下で、沸石やフリントが沈澱する。モンモリロナイトは氷期の乾燥気候下で、脱水した後、間氷期に水を吸着し膨潤する。その体積比は乾燥後の

モンモリロナイトに比べ、膨潤後には、乾燥時の最大 2.3 倍に達する。東電での泊層凝灰角礫岩、直径 60mm、厚さ 20mm の円筒状の試料を使用した実験では、膨潤圧は 1.2~6MN/m² に達する（東電 2010 年：地盤耐震意見聴取会資料による）。この膨潤圧の大きさは、上載の厚さ 3m 程度の第四系の堆積物、及び 3m 程度の蒲野沢層砂岩を持ち上げ、変状を起こすのに十分な大きさである。

これまでの調査では、洞爺火山灰を含む地層（11.5~11.2 万年前）は変状に参加しており、また、十和田レッド軽石層及びその同時代層（8 万年前）は変状を受けていないので、変状の生じたのはこの間の間氷期であったと思われる。

4.2. 変状の産状と形態

第四系の変状は、上述のとおり、不整合面下の地層または断層等の風化劣化による変形等に起因している。主要な断層としては、F-3, F-4, F-5, F-9, 及び F-10 の断層で起こっている。変状は蒲野沢層と泊層が接する区間の一部に発達し、全線にわたって見られるわけではなく、また、同じ断層上でも、変状の連続性はない。この外に、泊層の風化変質部が、未風化の蒲野沢層の上に被さる形で、衝上が生じ、これが不整合上の第四系に変形を与え、撓み等の変状が生じた例がある。これについては、東北電力では、小断層による変状としてまとめ、f-c, f-j, f-k, f-l, f-o を挙げている。これらは、トレンチを掘削することにより、見つかったものもあるが、第四系に変状をもたらすものとしては、この地域に独特の現象である。

断層の場合には、断層破碎帯が風化時に変質し、この部分が盛り上がり、不整合上の第四系に変状を与えたものである。F-9 の場合には、Tr-20'-2 トレンチで詳しく調査が行われた。F-9 は走向 N35E、傾斜 78NW であるが、破碎帯幅はこのトレンチで、最大 4.6m である。膨潤前はこの幅はもっと狭かったと思われるが、結果的に、この幅となり、上方にドーム状に最大 1m 程度盛り上がった。これにより、第四系の M₂ 砂岩（厚さ 4~5.5m）の上面は、約 1.5m の幅で、最大 0.6m 盛り上がる撓みが生じた。この破碎帯でのモンモリロナイトの含有量は、一部に>25%の部位分もあるが、中心付近で 1.5m 幅で 20~25%含まれている。なお、断層脇の泊層（凝灰角礫岩層）も変質を受けていて、約 20m にわたり、<10%程度のモンモリロナイトが検出されている。しかし、第四系のドーム状撓みの直接の原因は中心の断層破碎帯である。

これに対し s-19 小断層の場合は、上のような断層とは関係なしに、変質の進んだ泊層の凝灰角礫層が、変質度の小さい泊層凝灰角礫岩の層の上に乗りに上げることによって生じた断層であり、それが原因となって生じた変状である。トレンチ 20'-1 での観察では、この主断層は走向 N12W、傾斜 38W の東向き逆断層であり、上盤の凝灰角礫岩層は約 0.7m 乗りに上げている。泊層の上、不整合面上の第四系の M₁ 砂層は約 1.5m の厚さがあるが、この逆断層により、下部は 0.7m 切れるが、地層上面は円弧状に泊層の凸部をカバーしている。その上の洞爺湖火山灰から十和田レッドまでを含むシルト層は、M₁ 砂層に沿って上に曲がるが、後に削られ、平たんになる。その上を、不整合にローム層が覆っている。この変状では、主断層の逆断層は下方に、約 4m で消滅する。この断層の西側から乗りに上げた変質劣化した上盤層では、断層から 15m 西側のボーリング (H24B-3 孔) では、変質部は厚さ約 7m であり、この部分が上に乗りに上げて断層となったと考えることができる。このように、逆断層によって乗りに上げた岩体の底は浅く、厚さは数 m である。その部分だけが変質劣化したことにより、体積が膨張（膨潤）し、衝上ができ、上に載る第四系の地層中に変状を起こしたことになる。ここで、変質により体積膨張のあった部分は、凝灰角礫岩であるが、この中の礫には、玉ねぎ状の風化が見られ、礫がその分膨張したことがわかり、一見して、劣化が

進んでいることで膨潤がわかる。このトレンチ底盤で、風化劣化層が乗り上げた下盤にある凝灰角礫岩では、構成する角礫等は同じ種類であるが、劣化がなく、一見して、膨張していないことがわかる。膨潤により変状を起こした部分は、明らかに劣化が進んでおり、膨張していない原岩の層とは明瞭に区別がつくことから、変状が含有するモンモリロナイトの膨潤によって生じたことが分かる。

トレンチ Tr-16 では更に浅い例が知られている。走向 NE で SE 傾斜の s-9 断層と、走向 NE で NW 傾斜の s-10 の二つの断層で境された、深さ数 m の逆三角形の風化変質部が、未風化の蒲野沢層の上に載っている、という例である。この場合、不整合以前に、上が削られたために、このように薄い地塊が出来たとも思われ、従って形成された時期は第四紀より古い可能性もあるが、トレンチ 20'-1 での s-19 小断層の底を見ていることになるのであろう。

小断層の方向については、特に定まった方向はない。断層破碎帯に沿っている例が多いために、NS 方向のものが多く、Tr-30, Tr-32 では東西方向の小断層があり、Tr-20'-2 での F-9 断層の場合は N35E であり、Tr-16 の s-9、10 の場合は NW-SE 方向である。

4.3. 変状の成因

これまで述べたように、変状は第四系の下地層または断層破碎帯が風化劣化した場所で生じていて、繰り返し性がなく、断層等の構造運動とは結びついていない。変状に関連した小断層（逆断層）は、変状が生じたことにより、いわば受動的にできたもので、系統的な構造運動に結びついたものではない。主要の断層沿いのものではなく、いわゆる小断層を伴うものには、特定の方向性はなく、断層形成の場所も、地下数m程度で、浅い。

変状はしたがって、風化劣化の作用に何らかの関連があると考えるのが普通であろう。設置審査の行われた当時、私は地すべり、特に東北、北陸地方にある大規模地すべりについて調べており、風化作用との関連でモンモリロナイトについても研究していた。たまたま乾燥—加湿の繰り返しの実験で、膨潤のメカニズムが、モンモリロナイトの鉱物相の転移に関連していることに気付き、本地域の変状も膨潤の作用で説明できることがわかった。風化作用により、あるホライゾンにモンモリロナイトが集中することは普通に見られることであるが、このモンモリロナイトが膨潤すると、モンモリロナイト化した部分全体が膨潤することになり、かなりの体積増加となる。実験に使用したのは熱水変質によってできた、ほぼ純粋なモンモリロナイト塊であったが、これをそのまま水に浸しておいても膨潤はおきない。熱水であれ、風化であれ、生成された鉱物は生成時の風圧・温度の条件下で安定な構造を持っている。

モンモリロナイトは雲母のように層状の構造を持つが、結晶生成時には層間が 15 Å であり、そのままでは膨潤は起こさない。これが一旦乾燥し、相対湿度が 70~60% になると、一部が 13 Å に転移しはじめ、乾燥を続けると 13 Å の鉱物に転移する。13 Å 鉱物となったものは、水に浸すと、どんどん膨潤し、最終的に 23~19 Å のピークが混合した鉱物となる。原岩試料では密度は 2.07g/ml、体積・重量を 100 とすると、乾燥状態の 13 Å 鉱物では、重量 94-92、体積 90-83、密度は 2.18-2.29g/ml となった。これを浸水状態で膨潤させると、重量 134-161、体積 197-229、密度は 1.36-1.56g/ml となった。体積は原岩状態からすると 2.3 倍、13 Å 鉱物状態からすると 2.5 倍となった（徳山, 1986）。

風化した堆積層がモンモリロナイト化した場合、膨潤はモンモリロナイト鉱物の含有量によるから、全体がどれだけの倍率で膨潤するかはわからないが、地すべり地帯では、風化によるモンモリロナイト帯全体が膨潤し、上に載る厚さ 50m 以上の風化殻全体を持ち上げてすべりだす。このようなことから、本地域でもモンモリロナイト化した堆積層がその

まま膨潤することは充分可能であると考えた。

トレンチ Tr-20'-1 の s-19 断層の場合、膨潤した地層は厚さ数～10m 程度、堆積岩塊の大きさは数十 m 程度であり、トレンチ Tr-16 の場合は更に小さいので、この程度の大きさであれば、堆積岩塊全体が膨潤することは充分可能であり、s-19 ができたことによって増加した体積は、この堆積岩塊の量で解決できるであろう。

その後、東北電力や東京電力では、現地でモンモリロナイト化の比率を測定し、堆積層が膨潤すれば、第四系で生じている変状を充分説明できると判断された。その後、東京電力では、前述のように、泊層の、実際のサンプルを使用して、膨潤の実験を行った。これによると、膨潤圧の大きさは $1.3 \sim 6.0 \text{ MN/m}^2$ であった。不整合上の変状に参加している第四系の堆積物は、 M_1 段丘堆積物 (2m) 及び、洞爺火山灰、十和田レッド等を含む粘土-シルト層 (>2m) であり、これらの堆積層の比重は >2 であるから、上載圧よりは膨潤圧の方がはるかに大きいことになる。

4.4. 風化殻と古気候との関連

我が国では、中新世後期、鮮新世末～更新世当初、および約 12 万年前頃の間氷期の 3 回の高温多湿気候下で風化作用が活発となり、特徴的な構造を持つ風化殻が形成された。風化殻は、地下水溜まりが空気中の CO_2 を取り入れ、岩盤の鉱物全体と反応してできた風化生成物の層で、上から溶脱層、イオン交換層、および沈殿層の 3 層が形成される。モンモリロナイトは中間のイオン交換層の中で、長石等の鉱物から Al が溶脱し、上の溶脱層からの Si, K, Na 等のイオンが附加して沈殿し形成された。泊層の凝灰角礫岩層のうち、この位置に存在していた部分からモンモリロナイト卓越層が形成された。

モンモリロナイト層はその後、氷期の乾燥期を経て $13 \text{ \AA}$ 鉱物に相転移し、其の後の間氷期、恐らく 11～13 万年前頃の高温多雨気候下で、地下水面の上昇により、水に浸かって膨潤した。この時の膨潤により、第四系の変状が起こったと考えられる。ヨーロッパの第四紀氷河期においては Mindel 氷期が最強の氷期と云われ、また Mindel/Riss 間氷期が最も高温であったと云われており、本地域で $13 \text{ \AA}$ 鉱物に相転の起こった氷期が Mindel 氷期、また、膨潤が起こった時期が Mindel/Riss 間氷期と一致することになり、地球的な古気候変化と、本地域での第四系変状に関連したイベントとは、時代的に一致していることになる。

4.5. 風化殻の形成

地表を構成する岩石のほとんどは、ケイ酸塩鉱物からなり、シリカやアルミナの他、アルカリ、苦土類、鉄・マンガン等のイオンが組合わさって構成されている。地下水の帯水域では、これらが、空気中から取り入れられた CO_2 等と反応し、地下水温度や、pH 等の条件の変化に応じて、安定な物質に再配列されて、風化殻が形成される。地下水帯水域は全体として一つの化学平衡を保つので、当時の地下水の構成により、鉱物の水平な累帯構造が発達する。ほとんどの場合、上部の酸性の溶脱帯と、その下の中性及び微弱アルカリ性のイオン交換・集積帯とに分かれる。この地下水帯水域での平衡反応は増進的なので、次に、より高温・湿潤な気候になると、その時の条件の反応に置き換えられてしまう。逆に、前の時より低温・乾燥の場合には、その条件での風化殻は形成されないことになる。このような結果として、我が国では新第三紀以降 3 回の風化殻の形成があった。最初は中新世後期、次が鮮新世末～更新世当初、最後が 11～13 万年前の Mindel/Riss 間氷期の時期で、中新世後期のものが最も厚く、鉱物の種類や反応系も最も多様である。現在も風化作用はあるが、11～13 万年前に比べてポテンシャルが低いため、当時の風化殻より進んだ形にはならず、反応は停止している状態なのである。

上記 3 期の風化殻のうち、最もよく保存されているのは鮮新世末～更新世当初のもので、

最古のものは風化殻は厚かったが、其の後に剝削を受けてほとんどが保存されていない。また、最後のものは、地形としては鮮新世末～更新世当初の殻を避け、その下にしか出来ないで、数も少ない。本地域では、泊層が風化を受け、一部に赤色風化の痕跡が残っているで、中新世後期の風化殻があったことは確かであるが、詳細は不明である。第四系変状の要因となった

モンモリロナイトの厚く発達した風化殻は、保存の条件等から考えて、鮮新世末～更新世当初のものと考えられる。

この風化殻は、全部が保存されていたとすると、上から次のような、風化鉱物の累帯構造が発達する。厚さは典型的な例である。：

最上部	ギブス石、酸化鉄が卓越(50m)；色は赤色 ハロイサイト卓越層(50m)；白色 モンモリロナイト沈殿層(100m)；淡黄色 フリント・沸石層(5～10m)；白色
最下部	弱風化の原岩(1～0.5m)

この風化殻では、モンモリロナイト沈殿層の部分が保存され、この部分が、古気候変化によって、水を吸着し膨潤し、周囲の地層を押し上げて上に膨らんだために、不整合上に堆積していた第四系を押し上げ、いわゆる変状を形成することとなった。上に乗り上げた部分と、その下盤になった部分とは、変質/劣化の状態により、礫に玉ねぎ状の風化割れ目の有無等により、上述のとおり、肉眼でもはっきりと区別することができる。

4.6. 変状の膨潤による説明

有識者会合では、第四系の変状の成因が、粘土鉱物を含む基盤岩や、断層内物質が、地下水位の上昇に伴い、水分を含み膨張した「膨潤」であるとの主張は合理的でない旨の評価を受けた由である。先にも述べたように、変状をおこす要因となった、逆断層の上盤にある層と、下盤の乗り上げられた層とは、同じ泊層である。しかし、例えば小断層 s-19 の例では、原岩は上盤、下盤共、同じ凝灰角礫岩であるが、上盤の角礫には、玉ねぎ状の同心円状の風化割れ目があり、その周辺も著しく劣化が進み、この部分が明瞭に体積変化（膨張）を起こしたことがわかる。これに対し、この層と接する下盤では、構成する角礫等には、上述の「玉ねぎ状の同心円状の風化割れ目」等の体積変化を起こした証拠は残されていない、上盤とした盤とは明瞭に異なっている。なお、トレンチ Tr-20'-1 における小断層 s-19 及び、トレンチ Tr-20'-2 における F-9 断層については、変状の原因となった地層及び断層帯の変質部について、岩盤劣化の区分を行い、X 線回折によるモンモリロナイトの含有率、針貫入試験及び土壌硬度試験等を行い、膨潤する度合いについての、科学的・合理的な研究調査を行っていることを敷衍する。

また、この第四系変状については、北に隣接する東京電力敷地にも存在するが、東京電力では、泊層及び蒲野沢層の実際の岩石試料を使用して膨潤圧の測定を行っている（前出、東電、2010）。その試験結果によると、蒲野沢層試料では 5 個のうち 4 個が 3.0 MN/m²、他の 1 個は 2.3 MN/m² であった。また、泊層の試料では結果にばらつきがあり、1.3～6.0 MN/m²（平均的には 2.5～3.0 MN/m²）であった。変状を起こした泊層変質岩に載っている第四系の段丘堆積物等の比重を 1.5 程度と仮定すれば、膨潤圧は、最低値でも 1.3 MPa であるから、1m の厚さの変質岩は膨潤により、上載堆積物 86m を持ち上げられる力を有することが分かる。

先にも述べたように、モンモリロナイトが生成するためには、原岩の凝灰角礫岩層が熱

水作用を経るか、または高温多雨気候下における風化作用が必要であり、この鉱物が膨潤するためには、氷期における乾燥気候と、其の後の間氷期における高温多雨気候とを経る必要がある。このように多様な気候条件を経ることが出来たのは、第三紀後期～末期にかけての気候変化と、第四紀における氷河期の繰り返しという、ダイナミックな古気候変動の所産にほかならない。

小断層が第四紀に形成されたからと云って、その要因は地化学的变化にあり、これがただちに活断層に結びつくものでないことは自明であり、地質学的事象の解明に当っては、多くの科学的知見の集約が必要であることを申し添え、擱筆する。

見解書（６）（柳田誠氏（駒澤大学講師、阪神コンサルタンツ））

東通原子力発電所 敷地内断層に関する意見書

2014 年 1 月 13 日

駒澤大学 講師
株式会社阪神コンサルタンツ 取締役
柳田 誠

1. F-3 断層について

- ①Tr28 トレンチ壁面でみられるフラワーストラクチャー状の形状を示す小断層群には逆断層、正断層が混在する。
- ②南北各 5 面以上で行われた水平面スケッチでは岩相境界を基準にして観察しても横ずれは認められない。1つの風化礫が見かけ上、横ずれしているが、CT スキャンにより上下変位であることが明らかとなった。
- ③小断層群の平面形状は数mの波長で緩やかに湾曲しており直線性に乏しい。
- ④最下層の水平掘削では基盤岩破碎帯に沿って溝状の凹地がありそこに礫が方向性を持たずに充填していることが明らかとなった。この凹地は波蝕溝である。

以上から F-3 断層は有識者会合が言うような横ずれ断層ではないと判断する。

2. F-9 断層

- ①F-9 断層にほぼ沿って東側に地形的な高まりがある。Tr20'-2 では段丘基底に約 3 m、toya 火山灰で約 2m の高度差があり、東側が高い。F-9 断層をはさんで最大 85cm の東側上がりの段差がある。F-9 断層は西傾斜なので活断層とすれば正断層になる。これは圧縮場であることを前提にすれば考えにくい。
- ②断層東側の岩盤は風化が進み、高まりを作っている。他の地点でも岩盤風化部は高くなっていて、岩盤の膨潤現象の存在が裏付けられる。
- ③Tr20'-2 では F-9 断層破碎帯の幅 3m 程度間で、段丘礫層基底面が凸型に膨れている。断層によって切れているのではなく、破碎帯が上に膨れている。
- ④2k' トレンチでは F-9 断層に第四系の変状はみられない。
- ⑤南延長部において横ずれ地形はない。

以上から F-9 断層は段丘礫層基底面が凸型に膨れているだけで、切れていないので、活

断層とは考えられない。断層東側の地形的な高まりは、風化岩盤の膨潤によって形成されたと考えられる。

3. 敷地内の第四系の変状の解釈

- ①敷地内の主要断層については、第四系の変状は同一の断層でみて、場所ごとに違いがあり、断層の全区間で変状は見られない。たとえば、Tr-16 トレンチでは向かい合う法面で変状があったり、なかったりする。第四系の変状は平面的にみて連続性が乏しい。
- ②Tr20' トレンチの F-9 断層は破碎帯だけが膨れ上昇している。新鮮堅硬な安山岩の部分は逆に凹んでいる。
- ③場所によっては段丘堆積物内の変状が下位の基盤岩内に連続しない場合がある。たとえば、Tr-32 トレンチ、Tr20' トレンチでは段丘堆積物に生じている変状の延長の岩盤内にはシャープで直線的な断層がない。
- ④小断層 s-14 と s-19 では段丘堆積物にある変状をボーリングによって地下へ追跡すると、地下 20m 以深に連続しないことが確認されている。

以上から、敷地内の第四系の変状は、活断層が活動して形成されたとするには多くの矛盾点がある。変状は新第三系の断層と直接関係しておらず、構造運動以外の成因であり、岩盤の膨潤によって形成されたと考える。

4. 原子炉建屋付近の f-1 断層、f-2 断層

- ①f-1 断層は Tr-34 トレンチで確認され、断層面の走向傾斜は概ね N55W,30N で破碎幅は 1~20cm と小規模である。
- ②f-1 断層延長上の M2 段丘堆積物の砂層には高角度正断層センスで、変位量数 cm の小断層がみられる。しかし、段丘基底面に段差はない。また、小断層に変位の累積性はなく、変位量は上ほど大きい。
- ③岩盤内では f-1 断層の上盤側と北側に幅 20m 程度の風化部がみられ、この場所では段丘堆積物が緩い凸状の変形を示す。
- ④f-2 断層は f-1 断層と同様の走向傾斜であり、M2 段丘堆積物に変位を与えていない。

以上から、f-1 断層は M2 段丘堆積物の基底に変位を与えていないこと、上盤側が風化していることから、敷地内で多くみられる岩盤膨張による現象と判断される。f-2 断層には第四系の変状がみられないので、第四紀後期の活動性を議論する断層ではない。

以上

平成 25 年 4 月 12 日

意 見 書

公立大学法人 首都大学東京
都市環境科学研究科 地理環境科学域
教授 山崎 晴雄

私は旧内閣府原子力安全委員会によって実施された耐震バックチェックにおいて、東北電力東通原子力発電所の地質・地質構造の審議に関わりました。また、「評価会合」審議等における各種資料も確認しています。

東通原子力発電所敷地では、表層に第四系の変状（地表付近の地層中の食い違いなど）が見られものの、第四系の変状を伴う断層破碎帯の地下深部では破碎帯が石英充填により石化しています。これらを踏まえて整理すると、

- ① 変状を伴う破碎帯または岩盤劣化部では、その表層付近の密度が周辺の岩石より低いこと、
- ② その破碎帯は周辺の多数のボーリングによって地下分布が確認されていること、そして、
- ③ 深部で破碎帯が石英充填により石化していること、

などの証拠に基づけば、第四系の変状は表層部のみの現象であり、地下に続く断層が地震を起こす活断層として活動した結果では無いことを示すものと考えます。

このような小規模な変状やずれに対しては、活断層があるはずだという決めつけではなく、科学的な証拠を以て検討・評価すべきだと思います。

以上

平成 26 年 1 月 14 日

東通原子力発電所敷地内の変状の形成等に関する意見書

公立大学法人首都大学東京都市環境科学研科
地理環境科学域 教授 山崎 晴雄

東北電力株式会社（以下事業者と呼ぶ）が平成 25 年に東通原子力発電所敷地内で実施した、断層の活動性や地盤変状に関する地質調査（以下 H25 地質調査と呼ぶ）の結果について見解を述べる。

事業者は原子力規制委員会の有識者会合（以下有識者会合と呼ぶ）からの問題指摘に対して、多数のトレンチ調査やボーリング調査などを実施して、個々の指摘に対抗するデータの収集をして反論を行ってきた。そのデータ資料や現地での地形・地質の観察結果に基づき、筆者は全般的な見解として、この発電所敷地内には有識者会合によって指摘されたような、「耐震設計上考慮すべき断層は存在していない」と判断する。以下にその判断の根拠を述べる。

1. 敷地内断層の活動性について

①Tr-30,31, Tr-20' 2～4 の個別状況

Tr-30は敷地南西端部において、有識者会合から東側隆起の活断層の可能性があると指摘された、西側に鞍部、東側に小規模な高まりが北東－南西方向に断続的に続く地形群の一部に対して掘削されたものである。

ここでは、泊層と蒲野沢層が接する部分（おそらく断層）に激しい岩盤劣化部が見られ、それを覆う M₁+段丘堆積物（地形分類図による）に上へ凸のカマボコ形断面を示す変状が認められる。しかし、東側が高まる高度差が認められた地点はもっと東に離れており、しかもそれは人工的な土塁（盛り土）によって作られた高まりであった。従って、地塊の高まりに対応する断層は存在せず、写真判読で認められた東側（海側）に高まる斜面地形は断層変位地形ではなく、人工構造物によるものであるとする事業者の主張は首肯できる。

Tr-31と Tr20'-2～4は敷地南部を北東-南西方向に走る F-9 断層に沿って、東側が高まる地形が断続的に認められ、有識者会合で活断層による変位の可能性がと指摘された地域で、F-9 断層と地形の高まりの関係をj知るために掘削されたものである。

これらの地域では F-9 断層の東側に泊層の火山碎屑岩、西側に蒲野沢層の砂岩－シルト岩が分布し、両者の間には幅 4m に及ぶ明瞭な破碎帯が認められる。Tr-20'-2 では破碎帯を覆う M₁ 段丘堆積物に幅 9m 以上の上に凸のカマボコ断面型の変状が認められる。F-9 断層の東側の泊層は全体に風化による激しい岩盤劣化を受けている。岩盤劣化した部分は M₁ 段

丘堆積物に覆われるが、断層西側の蒲野沢層分布地域よりも 2m 程度高度が高く、これが F-9 断層の東側高まりとして認められるものである。有識者会合はこの高まりが F-9 断層の東側に広く分布することから、F-9 断層が東側隆起の活断層である可能性を指摘している。この指摘に対し事業者はトレンチ掘削等により上記の結果を得て、F-9 断層の破碎帯はそれを覆う M₁ 段丘に膨潤による上に凸の変状を生じさせている (Tr-20'-2) が、断層変位は認められないとし、F-9 断層は耐震設計上考慮すべき断層ではないと評価している。そして、Tr-31 や Tr-2'-4 など F9 東側の高まりの下にある泊層が激しい風化による岩盤劣化を起こしていることから、高まりの原因は岩盤劣化部の膨潤作用による隆起と考えている。

筆者はトレンチ調査結果から、F-9 断層の破碎帯が M₁ 段丘堆積物に断層変位を与えておらず、後期更新世以降の活動が否定でき、従って耐震設計上考慮すべき断層では無いことは同意する。しかし、高まりの成因については膨潤作用だけでは説明できないのでは無いかと考える。その理由は、膨潤作用は外国の例を含め断層破碎帯などに沿う比較的小規模なものが多く、成因的にもその方が考え易い。これに対し、F-9 断層の東側の高まりは幅 100m にも及ぶ大規模なものである。そのような大規模な広がりを持つものが膨潤だけで形成されるのかどうか現状では判断がつかない。膨潤だけではない成因（理由）を考えると、段丘面の対比の問題が思い浮かぶ。この敷地南部の段丘面对比の信頼性はどのくらいあるのだろうか。異なる段丘を同一段丘とみている可能性は無いのだろうか。例えば、Toya 火山灰を載せているの M₁ と M₁' 段丘の区別は、火山灰が粘土化した場合、離水層準の把握がきちんとできるのか疑問がある。対比についての疑問のもう一つの理由は、高まりの東側端まで掘削した Tr-2'-4 では、高まりを覆う M₁ 段丘堆積物と、その更に東側の低い地域に分布する M₁ 段丘堆積物が繋がらず、両者の間に岩礁のような泊層の高まりがあり、低い方に分布する M₁ 堆積物が岩礁にアバットしているように見え、高まりに分布する M₁ と同一段丘には見えないことである。

以上は未解明点として指摘しておくが、大事なことは、高まりの成因が未解決だからと言ってそのことが、F-9 断層の活動性が分からない（評価できない）と言うことでは無い。F-9 の後期更新世以降の活動性は破碎帯を覆う M₁ 段丘が変位していないことから否定できると考える。

②F-3 断層の横ずれ変位の有無について

有識者会合では、Tr-28 の壁面に M₁ 段丘堆積物を切る割れ目の形状と、堆積物の破碎帯への落ち込み状況、礫の上下方向への再配列が認められるとして、フラワーストラクチャーを持つ横ずれ断層の可能性があるとして指摘した。これに対し事業者は、H25 地質調査で Tr-28 の壁面から直交方向に断層の上を、割れ目の分布を観察しながら 50cm ずつ掘り下げていく平面掘削を実施し、基盤上面（段丘基底面）までの割れ目の分布形態や基盤の凹凸の状況を明らかにした。その結果、基盤の上面は波食台とみられ、岩石の強度状況に応じて高さ数 10cm の凹凸が認められる。とくに F-3 断層の破碎帯に沿って深く彫り込まれた部分がある。この様な場所に巨礫を含む礫や砂が挟まり込んでいる。この様な巨礫には破

砕帯の基盤の窪みにはまり込んでしまったものが有ったが、それには回転の様子は一切確認できなかった。

平面掘削で確認した割れ目の分布についても、ほとんどの割れ目は F-3 断層に平行する南北走向を示し、小規模な上下変位を持つのみで、横ずれ変位に伴う雁行状の割れ目は認められない。一部、F-3 断層と斜交する方向に延びる割れ目もあるが、これは蒲野沢層が深く浸食された部分、つまり、段丘堆積物の厚い部分などに集中しており、地表付近の堆積物の分布に規制された構造である。この様な小規模な割れ目の発生と特徴は、発電所敷地内で各地に見られる泊層と蒲野沢層の断層境界（破碎帯）に沿って現れる岩盤劣化に伴う膨潤作用で合理的に説明可能である。

事業者はこの様なデータを基に、F-3 断層には M₁ 段丘形成以降の活動は認められず、耐震設計上考慮すべき断層ではないと主張しているが、筆者は、これは調査方法も含めて極めて合理的な判断であると考え、この主張を全面的に首肯するものである。同時に、地表付近で見られる地質現象は様々な要因や作用が複雑に関連して形成されたものであり、思い込みなどによって僅かの観察結果だけから安直な結論を出すことは、その影響の大きさを考えれば厳に慎まねばならない、との思いを新たにした。

2. 第四系に認められる変状の成因について

① 基盤と変状との関係

東通発電所敷地内で認められる地盤変状は、トレンチ壁面で小規模な地盤の盛り上がりとして認められる。一部、段丘堆積物に断層状の食い違い、特に逆断層状のずれを伴っているところがあり、有識者会合では活断層と指摘された部分もある。これに対し事業者は、地盤盛り上がりなどの地盤変状は、破碎帯などの風化部分が膨潤作用による非地震性の体積膨張で形成されたものであり、将来活動して地震を起こすような耐震設計上考慮すべき断層ではないとしている。

筆者は膨潤作用の形成過程や、その中での粘土鉱物の挙動については詳しい知識を持たないが、F-3 や F-9 等の断層破碎帯を覆う段丘堆積物に、上に凸の変状は認められるが、明瞭な断層変位が確認できないこと、変状が認められ破碎帯の密度がそうでないものと比べて明らかに小さいこと、即ち体積膨張が考えられることや、変状が破碎帯だけでなく、風化によって劣化した泊層の部分にも多数認められることから、変状は断層変位によるものではなく、風化等で劣化した破碎帯や基盤の膨潤によって生じたものであるという考えに同意できる。

また、有識者会合は、明瞭なずれ（断層）が破碎帯を覆う一部の段丘堆積物に存在することを活断層の根拠に挙げているが、この様な断層は地下に入るとすぐに低角度化して消えてしまう、あるいは変状を示す破碎帯が地下へ少し入るとセピオライト化などにより完全に固化し、地下深部に続かないこと等が事業者の調査で示されており、地下深部に起源を持つものではなく、地表付近の環境変化等に起因した現象と思われる。この様な事実は有識者会合が示す活断層シナリオとは一致していない。よって、筆者は事業者の見解に首

肯する。

以上から筆者は、変状は基盤の泊層や大規模な断層破碎帯などの岩盤劣化部が後期更新世前半に膨潤を起こして形成されたとする事業者の判断は妥当な評価と認める。

② 変状の活動（形成）時期と原因

敷地内の変状の活動時期について、事業者は段丘堆積物の変形の様子などから 11.5～10 万年前とかなり絞り込んでいるが、変状の両側で M₁ 段丘堆積物の厚さが異なることから、変状の形成は MIS5e（12.5 万年前）から Toya 堆積(11.5 万年前)までの間の時期についても考えられるのではないかと思う。その場合、地層の堆積状況に急激な変化の痕がないことから、活動は長い時間をかけて起こり、ゆっくりと変形が生じた可能性がある。変状形成の主な原因として、事業者は破碎帯や風化帯などが粘土鉱物の形成や地下水の作用等で体積膨張する膨潤作用を考えている。確かに、変状は断層破碎帯の存在する場所だけではなく、泊層が激しく風化した場所でも認められる。

そのような変形が生じる理由として、MIS5e, 5c 等の海進期、東通発電所の敷地は海岸部、あるいは海岸沿いの低い台地の部分にあり、地下水位が高く、気温も現在と同じように相対的に高く、1 年のうちに温暖と寒冷の両方の季節を持っていた。これが地表部の風化作用を促進し、水の作用も加わって膨潤形成に関連しているのでは無かろうか。筆者には膨潤形成の具体的なメカニズムは良く分からないが、周辺の状況証拠から、氷河性の気候変化に伴う環境変化が関係している可能性がある。変状の形成は MIS 5 のステージに終わり、その後の氷河期（MIS4 以降）には形成されていない。これは、氷河性海水準変動で海面が低下し、また、定常的な隆起運動で高度が高まり、発電所敷地地域は地下水位が低下し、段丘堆積物の下の岩盤劣化部が膨潤作用を受けにくくなったためとも考えられる。

このような膨潤作用は気候変化の中で、ある限られた条件の所で形成され、時間的に条件が変わっていったため、同じ場所では、ある時期以降は形成が見られないものと考えられる。従って、現在の気候条件下では東通発電所の敷地内で膨潤作用が復活する可能性は極めて低いと考えられる。

③ 受動変位の可能性

前述のように、段丘堆積物の変状部分には断層変位状のずれが認められるところがある。事業者は地震による受動変位は認めていないが、筆者は地震動によって表層部の岩盤劣化部分に小規模なずれが生じる、あるいは、膨潤による変状自体が地震を引き金にして形成をはじめた可能性があると思う。

この場合、大地震は三陸地震や十勝沖地震、あるいは先日の 3.11 の巨大地震のようなものが頻繁に繰り返しているのに、敷地内の膨潤作用は後期更新世の前半しか認められないことの理由が説明できなければなるまい。

大陸の縁辺部は、氷河性海水準変動により海水の絶対量が増えるため、海底にかかる荷重が増加し、それによって生じる歪みが蓄積しやすい地域である。Brothers, et.al (2013)

は、巨大海底地すべりの発生要因を探るため、受動的大陸縁辺部（沈み込みの無い大陸縁辺）で後氷期における 120m の海水準上昇で、沿岸部に生じるクーロン破壊応力変化（ Δ CFF）の変化断面を計算した。その結果、狭い幅の大陸棚では沿岸部付近の深さ 5km 付近以下にある断層に 1 Mp 以上の大きな Δ CFF 集中が生じ、これが局地的な地震を起こして、不安定な大陸棚縁辺に巨大海底地すべりを発生させる可能性があることを示した。下北半島は沈み込みのある能動的プレート境界に隣接しており、上記の研究とは多少条件が異なるが、海水準変動に伴う海底での海水の重さの急激な変化によって大陸縁辺部の地下で局地的な歪みが生じ、地表に断層は出ないが比較的大きな地震を起こすことがあるかも知れない。このような時期に、膨潤作用を生じる条件が整った場所が存在すれば、地震を引き金に膨潤作用が起き、あるいはその一部に非地震性のずれが生じる可能性もあろう。このような地震は、海水準変化の途中とか、海進のピーク直後などのある条件でしか発生しないので、歴史記録等からの推定は困難である。しかし、地表に断層が出現しないような地震であれば、それは耐震性評価においては直下地震と同じ評価が可能である。

3. その他

① 反射法探査による断層の地下深部の延長についての議論に関して

有識者会合では、事業者が行った反射法探査の解析から、断層面が地下 500～1000m で低角になって地下深部へ続かないことから起震断層では無いという事業者の見解に対して、スペック等が明示されていないことを理由に資料として取り扱わないとしている。しかし、追加調査で事業者は隣接する東京電力の敷地内で東電が実施した探査結果を加えて、断層は地下で低角化し、起震断層ではないという主張を再度掲げている。筆者自身は、この調査に限らず、反射法自体が探査法として分解能が低く、活断層の評価には利用できないことは理解しているが、探査結果として、低角化する断層が見えていることは事実であり、スペックをさらに明示したところで曲がった断層がまっすぐになるとは思えない。また、スペックにより解析の条件を変えることで、見えてくるものが大幅に変わるとしたら、この方法は恣意性が高く精密な議論には使えないことになる。有識者会合で「資料として取り扱えない」と意見を述べたのは、反射法探査の専門家と聞いているので、反射法探査は恣意性が高いと主張しているわけでは無さそうである。

従って、スペックの明示の重要性はともかくとして、反射記録に基づいて地下深部に繋がる断層ではなく、起震断層ではないとする事業者の主張に十分合理的な根拠があると考ええる。

② 「安全側に判断」の意味と合理的な判断

規制委の新安全基準には、将来活動する可能性があるかどうか分からない断層については「なお活動性の評価に当たって、接地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状況により、安全側に判断する必要がある」（1. 地震及び津波に対する設計の基本方針：要求事項の詳細（2））と言う記述がある。簡単に言えば、将来動く

かどうか分からない断層は安全のために動くものと見なせ、ということである。この考え方は理解でき、基本的には賛成するが、安全側に判断するという文言を、それがポピュリズムに迎合して、発電所の稼働を遅らせる、あるいは、廃炉を最終目的とする意図に利用されてはならないと考える。

将来の活動の可能性の有無は、発電所周辺の地形や地質の中から様々な努力によって抽出された情報を、詳細に検討した上で合理的に判断すべきものである。データを得る努力をしなければ、何も知識・情報がなく、分からない（確認が困難）ということになってしまいが、新安全基準の言う確認が困難というのは、この様なことではなく、詳細な合理的な検討をしても、否定とも肯定とも結論が出せない場合を意味すると考える。合理的に判断すればある結論や方向が導けるのに、細部の不明点や未解明な事象の存在、あるいは極端に低確率な事象の発生可能性などを以て、合理的な判断を否定したり、あるいは分からないと結論づけることではないと考えるべきである。

東北電力株式会社の「25 年地質調査」では、原子力規制委員会の有識者会議の様々な指摘・意見に対して真摯に対応して、調査結果を出している。長い多数のトレンチやボーリングによる調査が行われ、疑問点を解決する多数の情報が得られ、特徴や成因を合理的に説明することにできるようになってきた。断層変位地形の可能性が指摘されていた F-9 断層では、同断層を覆う後期更新世以降段丘堆積物に断層活動の痕跡は認められず、また、指摘されていた「断層変位地形」の位置と、F-9 断層の破砕帯の位置大きくずれているなどの証拠が得られている。F-3 断層も一つの露頭のみから「横ずれに伴うフラワーストラクチャー」で、上下方向に延びる礫の直線的配列などから横ずれ断層と指摘されていた。これについて、多層に亘る詳細な水平面掘削を行って、横ずれ断層の証拠が全く存在しないことを明らかにした。

ここで用いられた水平掘削の調査法は、有識者会議からの提起された問題を解決する調査法として適切であり、得られた成果も活断層で無いことを合理的に説明しており、妥当なものと判断する。逆に、有識者会合はこの様な事業者の調査結果に対し、率直に前回の判断の誤りを認めるべきである。もし、事業者の調査結果を踏まえてもなお、耐震設計上考慮すべき断層であると考えたら、細部の疑問点や微細な地質構造などでは無く、多数の合理的な根拠を以て事業者の主張に反論すべきであろう。

文献

Brothers, D.S., Luttrell, K.M. and Chaytor, J.D., 2013, Sea-level-induced seismicity and submarine landslide occurrence. *Geology*. 41: 979-982.