

参考

専門家からのご意見について

目 次

1. 見解書(奥村晃史先生(広島大学教授))参 1-1
2. 見解書(徳山 明先生(元富士常葉大学長、兵庫教育大学名誉教授))参 2-1
3. 見解書(山崎晴雄先生(首都大学東京教授))参 3-1

1. 見解書（奥村晃史先生（広島大学教授））

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2mDEM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、破砕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. F9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1m以下で、地表の2m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様な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の変位の有無にかかわらず、泊層内で低角化する逆断層の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砕帯深部の性状

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 破砕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、高角な破砕帯の地下延長部では活動的な剪断面や破砕構造は認められない。

主要な断層の破砕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

破砕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、顕微鏡下で破砕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 断層の破砕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。

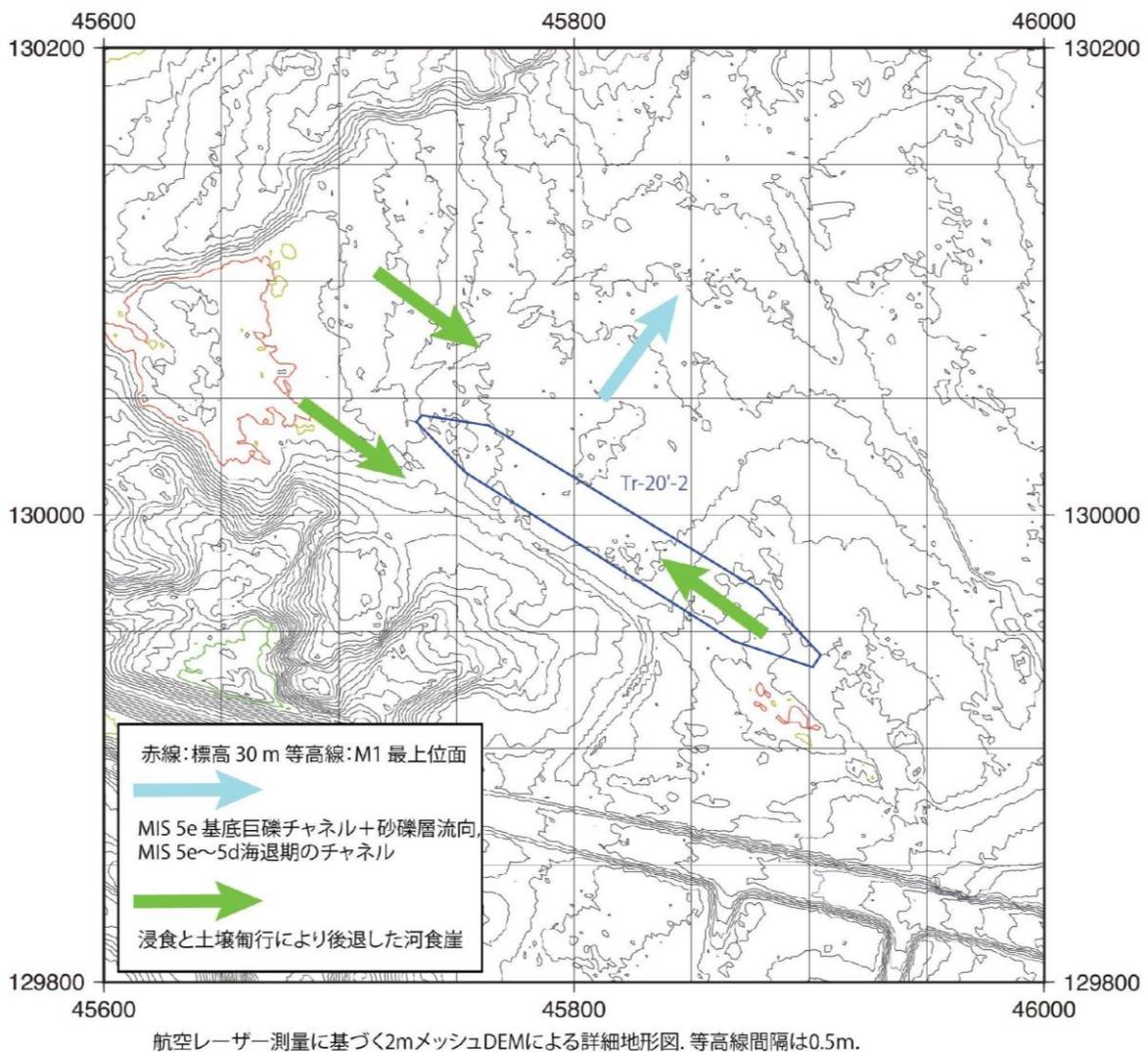
サイトには MIS 5e より古い海成段丘は存在せず、MIS 5e 海進時の海食が斜面を後退させて海食台を作った。この場合海食で取り除かれた岩盤の厚さは数十メートルに達し、波食台には未風化の泊層が露出する。仮に MIS 7 の段丘が存在して浸食されたとしても浸食は 10~20 m以上の深さにおよび、やはり未風化の泊層が MIS 5e に露出する。未風化の泊層は膨潤が小さく変形を起こさない。MIS 5e の砂層堆積後、急速に MIS 5d の海退が起きたため、風化を受けた泊層が浸水することはなかった。

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、軟弱な破砕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 にかけての時代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。



2. 見解書（徳山 明先生（元富士常葉大学長、兵庫教育大学名誉教授））

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にはできない。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	31.48
Ab	21.99	19.9		20.95
sepiolite	15.74	12.09	9.01	12.28
Q	10.35	12.27	12.06	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	5.86
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、この試料だけからは不明である。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。

3. 見解書（山崎晴雄先生（首都大学東京教授））

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