

2012年12月1日（事前会合の11日後）

「東北電力東通原子力発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合」の
有識者各位殿

東北大学理学研究科名誉教授 大槻憲四郎

コメント（その2）

去る11月22日に開催された標記有識者会合の事前会合に関わるコメントは11月26日付でお送りしました。このコメント（その2）はより全般的な事柄に関したもので、提案も含まれています。参考にして下されば幸いです。

1. はじめに

標記有識者会議の任務は「科学的検討」に focus されている。したがって、この会合は島崎さんを chief editor とする reviewer の集団に例えられよう。小生も reviewer の一人になったつもりで該当事業者からの“論文”の評価を率直に述べるなら、“reject”か“withdraw”である。その理由は、「敷地内には地震を起こす活断層は無い」という結論に拘り過ぎたためか、それ以外の可能性を吟味するデータ採取や論理的検討が許容できるレベルを越えてなおざりになっているからである。以下にそれらを具体的に指摘するとともに、新たな調査・検討事項も提案する。

2. テクトニックなフレームワークの理解

標記の大枠を押さえておくことは、大過無い結論に到達する助けとなる。これは3.11の教訓でもある。

奥羽脊梁山脈、北上低地帯、および北上山地の北方延長部は、それぞれ下北半島恐山を中心とする山地（まさかりの刃の部分）、むつ市付近（まさかりの刃の付け根）、そして尻屋崎の先第三系基盤岩分布域に対応する。しかし、尻屋崎とその南に続く下北丘陵（まさかりの柄の部分）の隆起帯は他に見られない構造要素で（南の北上山地本体と奥羽脊梁山脈との間にあるという意味で）、その成因は必ずしも明らかでない。平成21年9月11日付の机上参考資料に収録されている横浜断層を横切る地質断面図と反射法地震探査断面図が示すように、中新世のハーフグラベン群があつて、そのときに沈降し残し、第四紀の水平圧縮応力場で背斜として強調された部分がまさかりの柄の部分の“隆起帯”なのかもしれない。

NNE-SSW 方向のハーフグラベン群は原発敷地付近にも多数あり、中期中新世蒲野沢層までが正断層で変位を受けている。このようなハーフグラベンの発達状況とこれらを形成した主応力軸配置は、東北日本に共通した現象である（例えば、大槻, 1989, 地質学論集, no.32, 281-304; Otsuki, 1990, Tectonophysics, v.181, 151-164 を参照）。

上のハーフグラベン群に関連して3つの問題を指摘できる。ひとつはその海域での広がりに関してである。平成24年5月14日付机上参考資料のp.44に重力異常図が示されているが、海岸線沿いに南北に配列する2つの正異常とその沖合のもう一つの正異常との間に南北に延びた狭い負異常帯がある。この負異常に対応した地質構造が何なのか、ハーフグラベンである可能性を含めて明らかにしておく必要がある。

第二の問題は、ハーフグラベンの極性に関してである。原発敷地内の地質図とより広域的な地質図（平成23年11月8日付机上参考資料のp.15）を参照すれば、ハーフグラベン群による沈降の中心はF-3断層とF-9断層にはさまれた地帯である。この西側には東側落ちの正断層が、東側には西側落ちの正断層が発達している。共役な断層の中、どちらか一方が卓越して発達する現象は歪勾配に支配されるようなので（Ishikawa and Otsuki, 1995, *J. Struct. Geol.*, v.17, 1047-1053）、ハーフグラベン群形成時にはF-3断層とF-9断層にはさまれた地帯が水平引張歪が最大であったと言えよう。このような過去の歪状況は次の地殻変動の初期条件となる可能性があるので、注意を要する。

第三の問題は、過去の正断層が水平圧縮応力場で逆断層として再活動する現象に関わることである。平成21年9月11日付の机上資料によれば、反射法地震探査断面にいくつかのハーフグラベンが認められる。そして横浜断層の一部では西傾斜の逆断層性活断層が確認されている。上記資料では横浜断層の北方延長を含む全体を下北断層と呼んでいるようだが、岩井・多田・北村（1986, 北村 信編「新生代東北本州弧地質資料集」第1巻—その8—, 13p., 宝文堂）によれば、東通村砂子又付近では下北断層の西側に蒲野沢層の泥岩が厚く分布し、断層近接部では最大で50度も東に傾いている。他方、断層の東側に沿っては緩く西に傾く砂子又層が細長く分布していて、下北断層が西上がりの逆断層であることを示唆する。断層西側の厚い蒲野沢層の存在は、下北断層が中新世には西落ちの正断層として活動し、砂子又層堆積後の第四紀には逆断層として再活動したのかもしれない。下北断層の全長は30kmを越えるので、より確かなデータを採取すべきである。

上の第二の問題のパラグラフでF-3断層とF-9断層にはさまれた地帯では中新世の水平引張歪が最大であることを指摘した。そのような所の地下では、東西両側から伸びる多数の断層面が交差し、かつ地殻は多少とも水平に伸長・薄化しているであろうから弱く、かつ第四紀の水平圧縮応力場の下でも変形が集中するであろう。そのような文脈で見たとき、敷地西方近接部にあるNNE-SSW方向の一切山東方断層（活断層と認定されている）の存在理由が理解できるのではなかろうか。同様のことは、既に指摘した東方沖合の東西2つの正の重力異常域に挟まれた南北に延びた狭い負の重力異常域にも該当するかもしれない。以上のことから、「中新世のハーフグラベンの形成によって改変された地殻構造を初期条件としたネオテクトニクス」という視点で、海域を含めたテクトニクスの枠組みを再検討することを勧める。

3. 事業者とは異なった視点での活構造に関する解釈

先ず、事業者の示したデータ全てがWNW-ESE方向の水平圧縮による変形である

と矛盾なく解釈できることを示そう。

- ① 平成 23 年 11 月 8 日付の机上参考資料の p. 21 に掲載されている変状の分類を参照されたい。同資料 p. 27 の「粘土注入」に分類される現象は、断層破砕帯の中でも特に軟質な粘土部が段丘堆積物中に絞り出された channel flow とみなすことができる。断層破砕帯（図の例は F-8 と F-9）の方向が NNE-SSW なので、注入を起こした水平圧縮の方向は第四紀の主圧力軸と同じである。
- ② 「撓み」（同資料 p. 25）も「粘土注入」と同じメカニズムであって、破砕帯は母岩より軟質なので、破砕帯中に著しく軟質な粘土層が無い場合には、上方に緩やかに凸な撓みができる。対称か非対称かは、破砕物質の粘性率の不均質分布による。
- ③ 断層破砕帯とこれを覆う第四系の接触面に段差が出来ているケース（段差 R 型、小断層 R 型と NR 型）は、WNW-ESE 方向の水平圧縮を受けて弱い既存破砕帯に沿って逆断層運動をしたと考えて不都合なことは何も無い。これには撓みを伴うことがあって何ら不思議ではない。突き上げるブロック側に従属的な正断層が伴われることはよく知られていて、有限要素法による解析やモデル実験がある。
- ④ 既存の破砕帯沿いではない所に生じた逆断層性小断層 s-19（同資料 p. 42）は、走向傾斜が N12E38W であり、現在の応力場で生じた活断層とみなせる。垂直変位が 250cm に達する小断層 s-14 も同様に、断層面は N28E47NW である。
- ⑤ 「段差 N 型」は、一か所のみで確認されているらしいが図示されていない。「小断層 N 型」は p. 28 に実例が掲げられているが、第四系と第三系中の破砕帯との境界面が明瞭に変形しているとは言えず、被覆第四系中の小断層が破砕帯の動きに依るものか確定的でない。「撓みの対照型」は岩盤の劣化部が厚い所に対応して出来ているとされ、実例が同資料の p. 26 に掲げられている。ただし、劣化度は定量的に表示されていない。以上のことから、この⑤の項目で扱った変形には、確たる根拠が無いようである。
- ⑥ 平成 24 年 5 月 14 日付の机上参考資料の p. 8 には断層条線のデータが掲載されていて、いずれの計測個所でも傾斜方向が卓越する。しかし、正断層として活動したときの条線と第四紀に入ってから刻まれたかもしれない条線とが区別されていないので、仮説の成否の判定には使えない。

以上のことから、事業者の示した第四系変状のほぼ全てが現在の WNW-ESE 方向の水平圧縮による変形であると解釈しても何らさしつかえない。

4. “第四系変状” が活断層ではないとして提示された根拠の妥当性

事業者が第四系の変状を活断層とは認めない理由は、変状が連続性に乏しいということだけである。

平成 23 年 11 月 8 日付の机上参考資料の p. 20 には、変状の有無をチェックした地点が示されている。変状の有無が入り乱れて分布し、大部分が連続性に乏しい。このことは、多くの変状が断層の方向にほぼ直交する方向からの水平圧縮応力によって既存破砕帯の弱い破砕物質が絞り出された構造であるためであろう。観察地点ごとのデータを見なければ、より詳しく検討することが出来ないの、資料に掲載されている比較的変位が大きな断層に着目する。P. 24 の f-o 断層は 1m 余りの変位（スケールが示されていない！）を持つ逆断層だが、この地点の北 1km 余

りにわたって変位の有無に関するデータが無い。小断層 s-19 も 1m 程度の変位を示す逆断層だが (p. 40 を参照)、これより 500m 北までと 300m 南まで、変位の有無の観察はされていない。もうひとつのやや顕著な活断層性逆断層 (変位は 3m 程度) は s-14 で (p. 45)、孤立した地点で観察されているのみで、その広がりにより制約を与えるデータが無い。

さて、上記の小断層のサイズをごく大まかに推算してみる。モード III のクラックモデルの平均変位は $U = \pi \Delta\sigma L / 2\mu$ で表される (L は断層の半長、 $\Delta\sigma$ は静的応力降下、 μ は剛性率)。蒲野沢層を念頭においてここでは μ を 5×10^{10} Pa、 $\Delta\sigma$ を 1MPa (通常の地震で 3MPa 程度なので、大きすぎだろう)、U を 1m とすれば、L は 300m 程度となる。上に述べた f-o 断層、小断層 s-19、および小断層 s-14 は前後数百 m かそれ以上にわたって連続しないという観察事実を欠いているが、その範囲は上の L の大きさ程度かそれ以上である。以上は検討すべき視点の一例に過ぎないが、「断層があまり続かない」という現象の意味を理解するには、 $\Delta\sigma$ や μ を正確に見積もることを含めた定量的検討が必要なのである。媒質が延性的であれば、近距離で断層が見えなくなってしまうようなことがあっても不思議ではなく、消えてしまうことを根拠にテクトニックな断層ではないと主張するのは誤りである。なお、堆積岩中の断層変位分布は J. J. Walsh, J. Watterson, D. C. P. Peacock, D. J. Sanderson, 村岡洋文などが、*Journal of Structural Geology* に複数論文を書いていたと記憶しているが、勉強して欲しい。

小断層 s-19 に関しては露頭規模の距離で連続が確認できなくなり (p. 41)、s-14 はボーリングでは地下 20m 余りで延長を確認できなくなるという (p. 46)。s-19 の変位は約 1m で、変位は約 6m 離れると 0 になるというのだから、歪は 10 数%になる。これらのことが示すように、実際に敷地内の岩石はかなり延性的なのである (別に特異なわけではない)。このような定量的な検討をすれば、断層面を見落していないのかを疑い、露頭やボーリングコアを再度観察することなどを含めて、多方面からの検討を行うスコープが開けよう。

5. 歪集中帯と地震発生の潜在能力

他と比較できる定量的データは無いのだが、原発敷地内の“変位”の頻度が異常とも言えるほど多いと感じる。変位の有無に関する調査の多くは、地質調査の結果判明した過去の正断層に沿って行われたようだが、それらの多くは WNW-ESE 方向の水平圧縮応力によって既存の正断層が逆断層として“ウジウジ”と再活動したものようである。しかし、典型的な逆断層性の活断層も見られる。さらに注意すべきことは、変位量が 3m の小断層 s-14 は既存正断層が無い所 (埋め込み震動効果 C 試験体法面) で偶然発見されたものらしく、同様に北隣のトレンチ Tr-7 にも複数の小断層 (s-12, s-13) が発見されている。これらの断層発見頻度の状況と断層のサイズと空間分布の法則性 (Otsuki, 1998, *Geophys. Res. Lett.*, v. 25, no. 5, 671-674; Goto and Otsuki, 2004, *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi:10.1029/2003GL018868) を考慮すると、さらにずっと多くの活断層が発達していて、それらを見逃しているものと考えて対処すべきである。先の「2. テクトニックなフレームワークの理解」の項で、中新世にハーフグラベン群が形成された時には F-3 断層と F-9 断層に挟まれたあたりで水平引張歪が最大となり、その地下では多

数の正断層群の断層面が交差していると述べた。もし、これらの断層が heal していなければ、地殻の弱化帯のままのはずである。“変状”が異常に多いように見えるのは、この地殻弱化帯に歪が集中していることを示唆するのではなからうか。

逆断層性小断層が地下にトレース出来ないことを根拠に「地震を起こさない」と結論するのは早計である。言うまでも無く、地震を起こすのは被覆堆積層の下の地殻本体である。蒲野沢層のような中新統は破壊強度の小さいし、Dc も大きいであろうから、たくさんの弾性歪エネルギーを蓄えることができないし、不安定すべりを起こしにくいので、地震発生層には含まれない。被覆堆積層の変形を調査する重要性は、それが地殻本体の変形のマーカーである点にある。そのような視点で事業者の調査結果を見たとき、F-3 と F-9 に挟まれたあたりが地殻本体の歪集中帯の中軸であり、地震を起こすポテンシャルが高いという見方ができるのかもしれないので、検討すべきである。

6. 「劣化膨張説」は正しいか

劣化膨張説の誤りについては、すでに 11 月 26 日付の小生からのコメントで指摘したが、ここではより立ち入って検討する。

① 風化・劣化と膨張との関係について

平成 24 年 5 月 14 日付の机上参考資料の p. 17 の表を見れば、劣化度ともに密度が減少し、劣化度 A の密度と他の劣化度の密度との差を体積歪に換算していることが伺える。このように密度差全てを体積歪に帰することは、劣化や風化に伴う物質（元素）移動がないことを仮定することに等しい。これは乱暴な議論で、とても受け入れられない。そもそも、風化には Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ などの塩基カチオンが溶脱し、多孔質化・低密度化する過程を含んでいるし、これらを含めた各種イオンの移動・沈殿も伴われることは常識である。

Chemical Index of Alteration $\text{CIA} = 100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ などの客観的・定量的な分析によって化学風化度を評価し、物質（元素）の移動を調べることが不可欠である。このような調査で物質移動が無いことを証明しなければ、密度の変化を体積歪に帰することは出来ない。

② 膨張の原因について

事業者は膨張の直接的証拠を示していない。“変状”に関しては、それらが活構造であるとも解釈できることを上に示した。したがって、“変状”を膨張の確かな証拠とは出来ない。事業者の言うように、モンモリロナイトの吸水は膨張の原因となり得る。それを証明するためには、モンモリロナイト含有率分布図を示すことが最低限必要であり、これによってはじめて膨張量を計算する入口に立てる。このような分析を“変状”を含む多数の領域で行う必要があるが、まずは小断層 s-19 付近の露頭で実施するのがよい。

平成 24 年 5 月 14 日付の机上参考資料の p. 14 に“変状”形成のシナリオが描かれている。モンモリロナイトは水浸したときだけ膨張するのではなく、膨潤は湿度にも依存するし、層間水と付着水とでは脱水条件が異なる。もちろん膨張は膨潤性粘土鉱物の吸水だけによって起こるわけでもない。これらの問題に関しては古くから多くの研究がなされているので、それらをより正しく理解することが必要である。

③ 膨張による小断層形成モデル計算

このモデル計算に関しては、11月26日付のコメントで、入力された体積歪に根拠がないこと（上述）、破壊基準が不明で、弱面（小断層）を予め用意してあるらしいことなどの欠陥があることを指摘してあるので、そちらを参照のこと。