解説

敦賀発電所敷地内破碎帯の調査結果

日本原子力発電(株) 星野 知彦, 内田 昌人

本誌 2013 年 6 月号の「敦賀発電所の D-1 破碎帯問題の現況について」で、日本原子力発電の敦賀発電所敷地内の破碎帯の同年 4 月までの調査状況について報告した。その後、原子力規制委員会は同年 5 月 22 日に、D-1 破碎帯を「耐震設計上考慮する活断層である」と断定したが、日本原子力発電は同年 6 月末までの現地での調査継続により、D-1 破碎帯が少なくとも後期更新世以降(約 12 万～13 万年前以降)動いておらず、したがって、D-1 破碎帯は「耐震設計上考慮する活断層ではない」ことをあらためて確認した。本稿では、主として 6 月末までの調査により得られた新たな知見について述べる。

I. はじめに

原子力規制委員会(以下、NRA)は、D-1 破碎帯について、「耐震設計上考慮する活断層である」とする旨の有識者会合の評価書「日本原子力発電株式会社 敦賀発電所の敷地内破碎帯の評価について」¹⁾(以下、『評価書』)を了承した。

これに対して日本原子力発電(以下、原電)は、6 月末までの調査結果に基づいて新たな報告書「敦賀発電所敷地の地質・地質構造 調査報告書」²⁾(以下、調査報告書)を同年 7 月 11 日に NRA に提出し、同年 8 月 30 日に「敦賀発電所敷地内破碎帯に係る日本原子力発電からの追加調査報告(平成 25 年 7 月 11 日付け)に関する検討会合」において、「敦賀発電所 敷地の地質・地質構造 D-1 破碎帯の評価について」³⁾で詳細説明を行った。

この調査報告書には、『評価書』が取りまとめられた時点以降に、敦賀発電所の敷地内で新たに調査(第 1 図)を行った結果が含まれている。

次章以降は、原電と NRA との見解の相違点を明らかにするとともに、それぞれの論点について、新たに得られた知見に基づいた判断を述べる。

II. 原電と NRA との見解の相違点

D-1 破碎帯の評価に対して、『評価書』は、『現在まで得られたデータ等をもとに敦賀発電所 2 号炉原子炉建屋直下を通る D-1 破碎帯については、後期更新世(約 13 万年前)以降の活動が否定できないものであり、したがって耐震指針における耐震設計上考慮する活断層であ

る旨判断できる。』とした。

その判断理由として、『K 断層の活動時期』、『K 断層及び G 断層と D-1 破碎帯の連続性』の 2 つの観点からの評価を示している。

これらの評価においては、原電と NRA との見解の相違点として、「D-1 トレンチの地層の年代」、「G 断層と K 断層の活動時期」、「D-1 破碎帯と G 断層、K 断層の連続性」の 3 つの論点がある。この論点に沿って、以下解説する。

1. D-1 トレンチの地層の年代

D-1 トレンチの地層年代に関して、『評価書』では、『⑤層下部で原電が確認したとするテフラ(本稿では火山灰)について、降灰層準の認定およびテフラの同定が不十分であることから、⑤層下部を約 12 万年前の地層と特定するのは困難であると考え。』、また『③層と⑤層(約 9.5 万年前の K-Tz(鬼界(きかい)葛原(とずらはら))降灰層を含んでいる地層)は、それほど堆積時期に差がないと考えられるため、③層についても後期更新世の地層である可能性が否定できない』としている。

上記の指摘理由として、『テフラの検出頻度が低い』、『二次堆積の可能性がある』、『事業者が参照した論文は、年代特定の根拠が不十分』、『③層は⑤層の礫と同様、比較的新鮮である』などを挙げている。

一方、原電では、K 断層、G 断層及び D-1 破碎帯の活動時期をより明確にするために、上載地層の堆積年代に関する詳細な調査を継続して行ってきた。

(1) テフラの詳細分析

テフラについては、D-1 トレンチの全域で、新たに 10 ヶ所を加えて合わせて 18 ヶ所の分析測線で連続サンプリング調査を行った。

Result of the Geological Survey of the Shatter Zone at Tsuruga Power Station : Tomohiko HOSHINO, Masato UCHITA.

(2013 年 9 月 10 日 受理)

第1図 D-1 破砕帯調査状況(新たな調査箇所)

第2図 D-1 トレンチ内の地層堆積状態及び敦賀湾内海上ボーリングコアの火山灰堆積状態

その結果、「⑦層下部から約 5.8 万年前のテフラである大山倉吉 (DKP)」、「⑤層上部から約 9.5 万年前のテフラである K-Tz」、「⑤層下部から普通角閃石」、「③層から普通角閃石」が検出された。また、D-1 トレンチ以外でも、発電所敷地南側の敦賀湾で採取した海上ボーリングコア(ボーリング調査により採取された柱状試料)の上から順に DKP、K-Tz、⑤層下部の普通角閃石、③層の普通角閃石、が検出された(第2図)。

(2) ⑤層下部テフラの降灰層準の認定

③層から検出された普通角閃石と⑤層下部の普通角閃石について、詳細な成分分析を実施した結果、両者の間に明らかに有意な差が認められ、起源が異なるテフラであることがわかった。また、⑤層下部の普通角閃石の産出下限は、その下の③層との不整合面よりいずれも浅い位置であり、③層には⑤層下部で検出されたものと同じ

角閃石は含まれていないことも判明した。さらに、⑤層下部の普通角閃石は、複数の測線で実施した連続サンプリングによるテフラ分析において、いずれもほぼ同じ層準に産出下限があり、その他のテフラ (DKP, K-Tz) も含め地層の堆積年代に逆転がないことが確認できた。

これらのことから、⑤層下部の普通角閃石は、テフラが降灰し堆積したものであり、かつ、③層下部から再堆積したものではないと判断できる。これにより、⑤層下部テフラの降灰層準は、認定できるとした。

(3) ⑤層下部テフラの降灰時期

⑤層下部テフラの起源を明らかにするため、約 9.5 万年前より以前 (K-Tz 降灰よりも古い時代) に敦賀発電所付近に降灰した可能性のある 10 種類の対比候補テフラ(第3図)から、文献で普通角閃石を含むテフラを絞り込み、大山蒜山原 (DHP)、大山松江 (DMP)、美浜テフ

第3図 後期更新世などの指標テフラ

第4図 ⑤層下部テフラと他のテフラとのマハラノビス平方距離(普通角閃石の主成分分析結果)

ラ, 大山淀江 (DYP), NEXCO80 (Lower) について, 普通角閃石の成分分析などを新たに行った。

その結果, ⑤層下部テフラの成分・屈折率は, 美浜テフラの模式地 (美浜町/若狭町気山) で採取された美浜テフラと三方湖東岸で採られた NEXCO80 (Lower) の成分・屈折率が一致し, それら以外のテフラの普通角閃石の成分の特徴とは明らかに異なることを確認した。普通角閃石の主成分分析結果を基に, ⑤層下部テフラと他のテフラとのマハラノビス平方距離^aをとると, ⑤層下部テフラは, MIS (海洋酸素同位体ステージ) 5e のテフラ, 美浜テフラ及び NEXCO80 (Lower) と相関が強いことが分かる (第4図)。

したがって, ⑤層下部テフラは美浜テフラ (NEXCO80 (Lower)) と同一であると判断される。また, NEXCO80 (Lower) 中の火山ガラスは, 琵琶湖高島沖で採取された約 12.7 万年前 (MIS5e) の BT37 中の火山

ガラスと成分・屈折率が一致している⁴⁾。

これらのことから, ⑤層下部テフラは, 美浜テフラであり, その降灰時期は約 12.7 万年前であることが判明した。

(4) ③層テフラの降灰時期

D-1 トレンチの追加調査から, ⑤層下部と③層の不整合は D-1 トレンチ全域にわたり水平方向に明瞭に認められた。⑤層下部テフラは MIS5e の最高海面期に向かう海面上昇期に降灰したものであることから, 不整合は MIS6 以前に形成されたものと判断される。

また, 敦賀湾の海上ボーリングコアの追加分析の結果, ③層テフラ (③層から検出された普通角閃石) が MIS6 (中期更新世) に相当するボーリングコアの中に含

^a マハラノビス平方距離 (Mahalanobis distance, D^2)

グループの重心どうしの距離を表し, 値が小さいほど相関が強いことを示す

第5図 D-1 トレンチの地層と海上ボーリングの地層との対比
(右図は海面変動を示す曲線で、右にいくほど海面が高いことを表す)

まれる普通角閃石と同一であることがわかった。これらのことから、③層テフラの降灰年代は MIS6 であることが新たに確認された(第5図)。

これらのテフラ分析に加えて、D-1 トレンチでは、花粉分析を実施し、⑤層下部及び②層から、温暖な気候を示す花粉が検出された。これは、⑤層下部及び②層を、それぞれ温暖な気候である MIS5e (後期更新世)、MIS7 (中期更新世)とし、③層を寒冷な気候である MIS6 (中期更新世)とした評価と矛盾しない。

したがって、⑤層は後期更新世の地層で、③層は中期更新世の地層であることが、より明確になった。

2. G 断層と K 断層の活動時期

K 断層の活動性について、『評価書』では、『D-1 トレンチ内の1ヵ所の露頭のみで、評価としての信頼性が低い』と指摘している。

一方、その後の原電の調査において、D-1 トレンチ北壁面に加えて、新たにD-1 トレンチの南側の原電道路ピットで、K 断層が③層の上部に変位・変形を与えていないことを確認した。

上記Ⅱ-1 節で示された評価結果と合わせて、K 断層と G 断層及び D-1 破砕帯は、⑤層下部(美浜テフラを含む地層)に変位・変形を与えておらず、少なくとも後期更新世以降(約12万～13万年前以降)は活動していないことがあらためて明確となった。

3. D-1 破砕帯と G 断層、K 断層の連続性

D-1 破砕帯と G 断層、K 断層の連続性に関して、『評価書』では、『適切に最新活動面の変位センス(断層のずれの向き)を認定していない可能性があるため、G 断層

と D-1 破砕帯が同一のものであるとは特定できない』、『明瞭なずれを伴う K 断層は南方へさらに延びる可能性が高い。』、『一般的に断層は直線で延びるとは限らず、屈曲して方向が多少変化したり、いったん途切れて並走したり、分岐したりする。』等の指摘を挙げ、有識者会合としては、『K 断層および G 断層と D-1 破砕帯は、一連の構造である可能性が高いと考えられる』としている。

一方、原電はその後の調査において、K 断層が南方(2号炉原子炉建屋の方向)に延びている可能性があるのか、また K 断層、G 断層及び D-1 破砕帯が一連の構造である可能性が高いのかをあらためて確認した。ボーリング調査、露頭調査、トレンチ調査で認められた破砕帯や断層について、走向・傾斜と最新活動面の変位センスのほかに、破砕部の性状の類似性に基づいて連続性を評価した。

(1) D-1 破砕帯と G 断層、K 断層の性状及び変位センスの調査

破砕帯の連続性について、これまでの着目点である「破砕帯の幾何学的位置関係」、「破砕帯の走向・傾斜」、「最新活動面の変位センス」に加えて、「破砕帯の幅」、「断層ガウジ^bの構成粒子の形状」、「断層ガウジの構成鉱物」、「破砕帯の色調」等、新たな着目点を加えて多角的に検討した(第1表)。

D-1 トレンチ北側ピットの G 断層は、花崗斑岩質カタクレサイトと黄褐色、灰白色、淡赤褐色、暗褐色の縞状構造を呈する断層ガウジからなり、N-S 方向で高角度西傾斜である。断層ガウジは、面構造が発達し、比較的明瞭であり、断層ガウジ内の構成粒子はよく円磨さ^b断層運動に伴う破砕によって生じた細粒で未団結の断層内物質。断層粘土とも呼ばれる。

第1表 破砕帯の性状整理表

性 状	D-1破砕帯 (2号炉原子炉建屋背後斜面, D1-2～1-5孔)		G断層 (D-1トレンチ北側ピット他)		K断層 (D-1トレンチ1-1ピット他)	
走 向	おおむねN-S		N-S		基盤岩中で大きく蛇行(N-S～NE-SW)	
変位センス	正断層		正断層		逆断層	
断層ガウジ の微細構造	・構成粒子が円磨 されている ・面構造が発達し、 比較的明瞭 		・構成粒子が円磨 されている ・面構造が発達し、 比較的明瞭 		・構成粒子が 角礫状 ・面構造が 不明瞭 	
断層ガウジ の構造	縞状 		縞状 		無構造 	
断層ガウジ の色調	黄色, 褐色, 茶色 等 		黄橙色, 褐色 		灰赤色, 灰白色等 	
断層幅	狭 い		狭 い		広 い	
断層ガウジ の硬さ	締まっている		締まっている		軟らかい	
X線回折 分析	 主成分の強度を表す スメクタイト(sm)含む カオリナイト(kln)含む 石英(qtz)含む		 主成分の強度を表す スメクタイト(sm)含む カオリナイト(kln)含む 石英(qtz)含む		 主成分の強度を表す スメクタイト(sm)多量含む カオリナイト(kln)含む 石英(qtz)含まず	

れている。最新活動面について複数の条線方向を統計的に確認した結果、縦ずれ成分が卓越する。条線の面構造から推定される変位センスは、正断層成分が卓越している。D-1 トレンチ北側ピット南方で採取したブロック試料の薄片試料観察によれば、最新活動面の断層ガウジの変位センスは、正断層卓越のセンスが推定される。これらのG断層の特徴は、D-1 破砕帯の特徴と類似しており、G断層はD-1 破砕帯と一連の構造であると判断される。

一方、K断層は、走向が基盤岩中で大きく蛇行する中～高角度の西傾斜の破砕帯である。幅広の白色熱水変質を伴うカタクレサイトと灰白色、淡褐色等の色調を呈する断層ガウジからなり、断層ガウジの構成粒子は円磨されず角礫状を呈している。断層の変位センスは、地層の変位方向によれば逆断層センスであり、面構造は不明瞭である。これらのK断層の特徴はD-1 破砕帯及びG断層とは異なる。

このように新たな着目点に基づく検討によっても、D-1 破砕帯の特徴はG断層の特徴と類似し、K断層の特徴とは異なることが分かった。

(2) K断層が南方へ延びる可能性

K断層が南方へ延びている可能性を確認するために、新たにD-1 トレンチ内とその外側周辺でピット調査や道路などのはぎ取り調査などを行った。その結果、最初は大きかったK断層の変位量が浦底断層から離れるに

つれて急激に減少(消滅)し、2号炉原子炉建屋の方向には延びていないことが分かった。

上記Ⅱ-3節(1)(2)から、「K断層は、途中で消滅し、2号炉原子炉建屋の方向には延びていない」、また「G断層とD-1 破砕帯は一連の構造であるが、K断層とは一連ではない」ことがあらためて明確となった。

4. 結 論

以上の観察事実及びデータに基づく分析結果により、「K断層とG断層及びD-1 破砕帯は、いずれも後期更新世以降は活動していない」、また「D-1 破砕帯はG断層と一連の構造であるが、K断層とは一連ではないこと」が明らかとなった。

したがって、敦賀発電所2号炉原子炉建屋直下を通るD-1 破砕帯は、耐震指針における「耐震設計上考慮する活断層」ではなく、また、浦底断層と同時に活動し、直上の重要な施設に影響を与えるおそれはないことが明確に確認された。

Ⅲ. 外部専門家によるレビュー

原電が2013年7月11日に取りまとめた敦賀発電所敷地内破砕帯に係る調査結果の報告書については、国内外の2つのグループ(Lloyd's Register社によって組織された地質・地震の専門家グループと地層処分分野で世界的に活躍しているNeil Chapman教授(英国)を中心とす

る地質関係の専門家グループ)により、科学的・専門的な視点でレビューを受けた。専門家グループは、現地調査や合同レビュー委員会での議論を経て、同年8月1日に以下のようなレビュー結果の概要を報告した。

- (1) 原電は、NRA が関心を持つ破砕帯について、科学的な調査を注意深く実施してきた。これらの調査は、破砕帯に関わる基本となる地質学的理解を得るだけでなく、NRA により提示された具体的な論点に答えることを念頭に行われた。
- (2) 原電の最新の報告書には、新たに得た重要な地質学的な知見が含まれており、それらは2013年5月のNRAの有識者会合で提示された論点について明確に答えている。レビューチームは、この新たに得られた知見は、原電とNRAが議論を再開するための重要な理由付けになるものと考ええる。
- (3) NRAの関心の中心は、2号炉の近傍もしくは直下にあるK断層及びG断層／D-1破砕帯が活断層であるかどうか、もしくはこれらが浦底断層(数千年ごとに地表破壊を発生させてきたことが知られている)による地震に伴い動き得るかどうかということである。
- (4) 原電の調査には包括的な地質学的調査は含まれていないものの、レビューチームは、原電の調査結果が、NRAによるこれらの具体的な関心事項に回答するには十分なものであると考える。
- (5) 原電は、NRA が関心を持つ破砕帯が「活断層」ではないとする妥当かつ説得性のある証拠を、主に2013年5月からの追加調査によって示して来ている。
- (6) レビューチームは、それらの破砕帯が少なくとも約12万～13万年前以降(おそらく、より長い間)、そのサイトで動いていないという明確な証拠があることを認めた。

この他、専門家グループからは、原子力発電所の耐震安全に係る推奨事項などの提案もあった。このレビュー結果の詳細については、原電のホームページ⁵⁾を参照されたい。

IV. おわりに

敦賀発電所敷地内の破砕帯について、2013年6月末まで行った調査結果を主として取りまとめた。そこに含まれる新たな知見により、敦賀発電所2号炉の原子炉建屋の直下を通るD-1破砕帯は後期更新世以降(約12万～13万年前以降)活動しておらず、したがって、耐震設計上考慮する活断層ではないことをあらためて確認することができた。

この調査に当っては、変動地形学、地質学(火山灰年代分析、構造地質学)、岩盤力学など多くの国内外の専門家からのご助言をいただいた。ここに深く感謝を申し上げる。

— 参考資料 —

- 1)「日本原子力発電株式会社 敦賀発電所の敷地内破砕帯の評価について」, 2013年5月15日, 原子力規制委員会 敦賀発電所敷地内破砕帯に関する有識者会合.
- 2)「敦賀発電所 敷地の地質・地質構造 調査報告書」, 2013年7月11日, 日本原子力発電(株).
- 3)「敦賀発電所 敷地の地質・地質構造 D-1破砕帯の評価について」, 2013年8月30日, 日本原子力発電(株).
- 4)「近畿地方および八ヶ岳山麓における過去の43万年間の広域テフラの層序と編年—EDS分析による火山ガラス片の主要成分化学組成—」, 2004年, 長橋良隆ら, pp.15-35.
- 5) <http://www.japc.co.jp/tsuruga-chousa/pdf/press/20130828.pdf>

著者紹介

星野知彦 (ほしの・ともひこ)

日本原子力発電(株)
(専門分野／関心分野) 機械工学／耐震設計, プラント建設, 原子炉保全, ミドル・メディアコミュニケーション

内田昌人 (うちた・まさと)

日本原子力発電(株)
(専門分野／関心分野) 炉心管理, 炉心設計