

活断層と原子力発電プラント

2011年3月の東北の地震と津波の後に発生した福島第一発電プラントの破壊は、自然ハザードに対する原子力発電プラントの脆弱性を浮き出させた。これは新しい問題ではない。地震ハザードは米国においてプラント開発に影響し、また火山ハザードはフィリピンのバターン原子力発電プラントが運転されなかった理由の一つであった。(コーネル他 2009)

2つの原子力発電プラント（日本の敦賀原子力プラントとカリフォルニアのディアブロキャニオン原子力発電プラント）を良く見ることで、異なる国の原子力産業の規制当局にとって重要な問題が浮き彫りになった。

両方の原子力発電プラントは共に、構造学上に活動的である領域にある活断層の近くに立地している。リスクを評価する方法と特に敦賀原子力発電プラントで生じた具体的な問題は、原子力災害に際してリスク緩和とエネルギー需要のバランスをとろうとする国が直面する複雑な問題を際立たせた。

日本の原子力発電プラントの状況

東北地震と津波は日本に対して、自然現象がもたらす大きな影響を評価してそれに備えることについて、その認識を突然に呼覚ました。その事象の直接の結果として、日本の50の原子力発電プラントのほとんどが、現在停止している。計画されていたメンテナンスを行うための定期停止の後、政府は“ストレステスト”に合格するまでプラントの再稼働を制限するとし、その後このストレステストは、日本の新たな原子力規制委員会（NRA）によって2013年7月に発令された新規規制基準に置き換えられた。

いくつかの原子炉では、原子力発電プラントが活断層の近傍にあることについてNRAが懸念を抱いたことから、その再起動が滞っている。プラントの運転を終えるべきかそれとも継続すべきかを判断と相まって、何をもって活断層とするかについてのNRAの定義とそれを地面の安定性についての新しい規制ドラフトにどのように適用するかは、重要である。規制当局と原子力発電プラントの運転者が取るアプローチは、将来の日本の主要なエネルギーインフラに対して、多大な影響を与えるだろう。

敦賀原子力発電プラント：岩盤の断層によって提起されたハザード

敦賀は、本州にある日本海東側海岸の大きな湾内に位置する歴史的な港である。2つの主要な原子力施設が、その湾の西側に形成する半島に設置されている。それらの1つである敦賀原子力発電プラントは、2つの原子炉ユニットを有し、その内の1つはこの国の最も古い稼働可能な原子力発電プラントである。そのサイトは主湾が拡張した小さくローカルな浦底湾から南東方向に延びる谷間に横たわる。(図1)

本文書は、米国地球物理学連合の学会誌であるEOSの95巻4号33-40頁(2014年1月28日発行)の論文「Active Fault and Nuclear Power Plant」を和訳したものです。この論文の著作権は米国地球物理学連合が有しており、和訳するにあたり出版元であるJohn Wiley & Son社の許可を得ています。なお本論文は、ニール・チャップマン氏、ケルビン・ビルマン氏、ピラー・ビルモア氏、ウッディ・エプシュタイン氏、ロイド・クラフ氏、河村秀紀氏が共同で執筆したものです。

目的外使用・開示・複製 禁止

谷間の東側と浦底湾は、活断層（地図上に約 10km の長さで示されているが、更に南北に大きく進展していると考えられる浦底断層）の急斜面になっている。トレンチ採掘で得られた証拠は、この断層は後期更新世（12 万～13 万年前）に繰り返し動いていることを示唆している。2 つの原子炉ユニットの基礎は、この断層の西側約 200m に位置している。プラントが建設された 1970 年代には、浦底断層は活動性があるとは考えられてなかったが、繰り返し改定が行われる活断層マップにおいて 1991 年以降、活動性があるものまたは活動する可能性があるものとして示されている

しかしながら、過去数年間、敦賀原子力発電プラントの運転者である日本原子力発電（日本原電）にもたらされた問題は、この浦底断層ではない。NRA が委任した専門家達の調査は、「以前から存在が知られていた 2 号原子炉基礎部直下に横たわる“D-1 断層”と呼ばれる岩盤内断層が、浦底断層と接続しており、それと連動して動くかも知れない。従って活動性があるものと定義されるべきである。」と結論付けた。NRA の規制に従えば、重要施設の直下の活断層の存在は、運転すべきではないことを意味する。この基準は新しい原子力発電プラントを立地する際に適用する意図で設けられたものであるが、現在、NRA は既存施設の再認可に適用しようとしている。

日本の規制当局は、活断層をどのように定義づけているか？

敦賀は、日本において最終的に閉鎖に追い込まれる危機に直面するいくつかの原子力発電プラント及び核施設の一つである。他のものとしては、東通、美浜、志賀の原子力発電プラント及び高速増殖炉のプロトタイプであるもんじゅが含まれている。（敦賀から西に約 100 キロメートル離れた）大飯プラントでは、疑念を持たれた断層について調査がなされ、2013 年の 9 月には NRA により非活動的との見解が示された。

従って、NRA が活断層と見なすものの定義は重要である。また既設プラントのそばで活断層が見つかった場合において、プラントの安全性を確保するためにどのような対応をすべきか（プラント閉鎖？それとも規制者は、判断に先立ち、リスクを評価し、どのようにすれば緩和できるかを検討すべきか？）といった疑問が生じる。現在、日本原電と他の原子力発電プラント運転者は、活断層が施設の下に存在するか否かの基準に沿った判断に伴い、廃炉をまぬがれようと努力している。

多くの国では、種々のハザードや土木工学上の目的のもとに、活断層が定義されているが、それら定義は、実にさまざまである。日本の NRA は、古地震的に後期更新世の期間に動いた証拠に基づいた定義を用いている。

この期間中に動きがあったか否かを判断するために調査すべき新しい上載堆積層がない場合については、過去 40 万年前にさかのぼり、動いた証拠を探す調査を規制庁は指示している。規制を目的として、断層の活断性を示唆していると判断される過去の長い期間において動いた証拠がどんなものかは、未だ明らかとなっていない。

本文書は、米国地球物理学連合の学会誌である EOS の 95 巻 4 号 33-40 頁 (2014 年 1 月 28 日発行) の論文「Active Fault and Nuclear Power Plant」を和訳したものです。この論文の著作権は米国地球物理学連合が有しており、和訳するにあたり出版元である John Wiley & Son 社の許可を得ています。なお本論文は、ニール・チャップマン氏、ケルビン・ビルマン氏、ピラー・ビルモア氏、ウッディ・エプシュタイン氏、ロイド・クラフ氏、河村秀紀氏が共同で執筆したものです。

更なる古地震的な証拠を探して

NRA の専門家である地質学者による結論に直面し、日本原電は追加の古地震的証拠を集める主要プログラムを開始した。(日本原子力発電 2013) この作業は 2013 年半ばに完了したものであり、深いトレンチが掘削され、(その内のいくつかについては、浦底断層の急斜面を切断する壁を支えるための大掛かりな支持構造が必要となった)、花崗岩岩盤構造内の浦底断層と D-1 破砕帯の形跡が露出した。

作業では、層序特定と第四期(およそ 260 万年前)の上載堆積層(岩盤石を覆う陸地と海洋の堆積物の混合物)の年代特定に焦点が当てられた。九つの第四期層は、浦底断層の定期的な動きの証拠を提供した。重要な年代特定の証拠は、火山灰編年学(第四期における特定の噴火と化学的に関連付けることができる火山灰を根拠とする年代特性)から得られた。トレンチにより現れたいくつかの第四期層において、テフラ帯とテフラ班晶の破片が発見された。これら堆積層は、敦賀周辺地域の陸地、湖及び海洋のボアホールからの堆積層の中で既に年代が特定されているテフラとの間で、相関が見られる。日本原電の科学者チームは、年代が特定されている火山事象を拘束条件とした断層運動の年代別履歴を作ることを目的に、テフラと班晶の地球化学的類似性、花粉学、限られた範囲の炭素 14 年代特性に関するデータを統合した。

敦賀原子力プラントの地震ハザード評価

トレンチ掘削により、敦賀原子力プラントの基礎工事において知られていた以上の断層構造が露出した。NRA の専門家は、それらの一つである K 断層の活動性があり、2 号機原子炉の直下にまで伸びている可能性があると考えた。この考えが妥当であるか否かを見定めるため、更なる調査が日本原電により実施された。

D-1 断層及び K 断層の最終運動時期に関する新しい証拠が、堆積層上方向に貫通する程度を描くことを可能としたトレンチ内部の深い露出部から発見された。どの層を貫通しているかを見極めること及び貫通部の形状を観察することにより、いつ最終運動が起こったかを結論づけることができる。

両方の特徴から、後期更新世に動いた証拠はなかった。敦賀 2 号機の建設当時から知られていた D-1 断層は、これよりずいぶん古く、また K 断層は、2 号機に向かうはるか手前で消滅している傾向が見られた。また結果は、少なくともごく最近の浦底断層事象の最中に、D-1 及び K 断層のどちらも浦底断層と連動して動いていないことを示唆している。調査の最終段階で、独立した地質学者のチーム(この記事の著者達の数名を含む)は、証拠を評価し、原子炉ユニットの下に活動性のある構造を示す証拠はないとの日本原電の主張には正当性があるとの結論に達した。(ベリマン他、2013) 敦賀サイトの将来について、どのようにすれば最適に結論を導くことができるかを考えるために建設的な対話を開始するべきと、日本原電と NRA に対して推奨した。NRA がこれら結果を評価し、サイト調査のための訪問を将来行なう間、敦賀原子力プラントは、閉鎖された状態のままである。

本文書は、米国地球物理学連合の学会誌である EOS の 95 巻 4 号 33-40 頁 (2014 年 1 月 28 日発行) の論文「Active Fault and Nuclear Power Plant」を和訳したものです。この論文の著作権は米国地球物理学連合が有しており、和訳するにあたり出版元である John Wiley & Son 社の許可を得ています。なお本論文は、ニール・チャップマン氏、ケルビン・ビルマン氏、ピラー・ビルモア氏、ウッディ・エプシュタイン氏、ロイド・クラフ氏、河村秀紀氏が共同で執筆したものです。

リスク解析のケーススタディとしての敦賀原子力プラント

敦賀原子力プラントを評価した独立の専門家達は、「単純に、特徴を活動性があるか否かといったことに基づき、重大な結論を出すべきではない」との結論も出した。

確かに敦賀のように主要な活断層が近くにあることが知られている場合には、特に注意して地震ハザードに対応すべきである。日本のすべての原子力発電プラントは、古典的な確率論的地震ハザード解析 (PSHA) の手法を使った最大地震加速度を用いて、構造物・システム・機器への地震動の影響（脆弱性解析）を評価するため、定期的な地震ハザード解析を行っている。

PSHA が PRA の一部であり、日本の規制当局が認めているものであることをもって、世界的に広く多くの原子力発電プラントで使われている確率論的リスク評価 (PRA) の国際標準的なアプローチは、日本の科学や工学のコミュニティーが確率論的手法を活用している数少ない領域であると言える。

日本原電が対応しなければならなかった近傍の小さな断層に関する問題は、施設が知られている活断層にとっても近い場所に建てられている場合においては、古典的 PSHA を拡張することが有益であることを示唆している。D-1 断層と K 断層の非活動性について明確な調査知見が規制当局の具体的な要求に込えているように思えるが、将来の活動発生の際に浦底断層により損傷した領域において、2次的断層が変位するかもしれない。地球科学者は、主断層の断裂に関連して2次的断層の断裂が生じる際の対応（プロセスコントロール）については、更なる研究が必要であることを認めている。これは、敦賀原子力プラントについて行われたと同様の古地震研究がスポットを当てるプロセスである。更に、官庁も施設直下の2次的断層の変位と可能性の評価も含む拡張した地震ハザード解析を有益と考えるかもしれない。NRA の定義に当てはめ、敦賀直下の特徴は活動性がないとの見方ができるものの、D-1 断層のような特長を動くとした“もしも”シナリオを探ることを目的に、動く可能性と考えられる変位量についての専門家の意見と証拠に基づく判断を組み込みつつ、確率論的断層変位ハザード解析 (PFDHA) が推奨される。

半球の反対側：ディアブロキャニオン原子力発電所におけるハザード評価からの教訓

カリフォルニア中央沿岸にあるディアブロキャニオン原子力発電所は、1960年代後半に建設され、それ以降、継続的にサイトの地震分析を見直してきた。

1970年代初め、プラントから5kmの距離にHosgri断層帯が発見され、評価基準と調査方法の開発を伴うハザード再評価を行うこととなった。現在の日本の規制で用いられている決定論的アプローチとは対称に、確率論的アプローチが開発され、1980年代後半にこれが適用された。その際の耐震評価の計画策定にあたっては、規制と事業者の対話による合意を伴うものであった。ディアブロキャニオンでのこれらの検討によって、米原子力規制委員会 (NRC) は1990年代後半以降、更に確率論的アプローチを用いることとなった。

本文書は、米国地球物理学連合の学会誌であるEOSの95巻4号33-40頁(2014年1月28日発行)の論文「Active Fault and Nuclear Power Plant」を和訳したものです。この論文の著作権は米国地球物理学連合が有しており、和訳するにあたり出版元であるJohn Wiley & Son社の許可を得ています。なお本論文は、ニール・チャップマン氏、ケルビン・ビルマン氏、ピラー・ビルモア氏、ウディ・エプシュタイン氏、ロイド・クラフ氏、河村秀紀氏が共同で執筆したものです。

目的外使用・開示・複製 禁止

米地質調査所の推奨を基に、Hosgri 断層帯では、発電所の最近接地点を含んで、どこにおいてもマグニチュード7.5の地震が発生することを想定すべきであるとNRCは提言した。この断層帯による設計地震動スペクトルは、重力加速度(g)の0.75倍の加速度ピークを示すこととなる。ディアブロキャニオン原子力発電所は、Hosgri 断層帯の想定事象に対して強化策を施し、1984年に運転許可が得られた。

この運転許可においては、NRCの原子炉安全アドバイザー委員会の推奨に基づいた、事業者による耐震設計基準の開発と評価実施計画の策定も行われた。事業者であるPacific Gas & Electric Company (PG&E)は、地震挙動により発電所が適切に耐え続けるか否かについて、最新手法とデータを用いて周期的に再評価する「長期的地震プログラム」実行した。

NRCスタッフとコンサルタント、米地質調査所、太平洋地震技術研究所 (the Pacific Earthquake Engineering Research Center)、南カリフォルニア地震センター (the Southern California Earthquake Center)、学会、個人コンサルタント事務所の、最先端の地質科学調査への積極的関与によって、ディアブロキャニオン原子力発電所における周期的ハザード評価に対する包括的で技術な計画が得られた。NRCとPG&Eの開かれた対話が計画に役立っている。コンサルタントによる独立レビューとピアレビューを頻繁に行うことが、この開かれた対話と相互理解に寄与している。

長期的地震プログラムは今日まで継続しており、この活動によってPG&Eは、新しく地震に関する安全の課題が浮上した際に、それらの予測と応答が可能となっている。例えば、1986年10月19日のロマプリエタ地震や、カリフォルニア他の関連の良質な記録から得られた新規データを用いた地盤変動解析の結果検証や試験が可能である。これによって、中央カリフォルニアで発生する地震が驚愕や軋轢のあるデータを生じさせることはないだろうという信頼を増してきた。

ベストアプローチの探求

国がエネルギーの必要性に対して公衆安全を確保するという問題に取り組む時、断層の最新活動に対して年代を設定するのか、または、地震に耐える構造設計を確保しつつ断層の活動確率を評価するのか、どちらのアプローチが両方の目的を達成するのに妥当なのかという疑問が生じる。

包括的な基準に基づいたハザードによりプラントの閉鎖を受け入れることは、公衆に対する特定の災害を完全に防止するというアプローチから理解し易いが、国や要所のインフラへの影響により別の災害を起こす。個々の原子力発電所に対する定量的なリスクの検討や評価を行わないため、ケースによっては非常に保守的になり得る。

本文書は、米国地球物理学連合の学会誌であるEOSの95巻4号33-40頁(2014年1月28日発行)の論文「Active Fault and Nuclear Power Plant」を和訳したものです。この論文の著作権は米国地球物理学連合が有しており、和訳するにあたり出版元であるJohn Wiley & Son社の許可を得ています。なお本論文は、ニール・チャップマン氏、ケルビン・ビルマン氏、ピラー・ビルモア氏、ウディ・エプシュタイン氏、ロイド・クラフ氏、河村秀紀氏が共同で執筆したものです。

この問題に対して、最近の日本における地震や活断層の再評価にとって、ディアブロキャニオンのようなアプローチが有効なモデルとなり得る。非信頼度分析や PFDHA、長期的地震評価計画による複合的な情報を用いることで、活断層の潜在により恒久的な閉鎖の危機にある日本の原子力発電施設に対して、どのような取扱いをするのかが、リスク情報を基にした判断を可能とするだろう。

無論、確実な評価を行うために事業者と規制において時間と資源を必要とし、原子力発電所の再稼働前に断層に関連するハザードの評価を完了すべきであるのか、再稼働と同時に分析を行うのか難しい判断を必要とする。

それまでの間においても、日本で停止している原子力発電所に時は過ぎ続けている。選択がどうあれ、公衆と政治家と同様に、科学者と規制と原子力発電所事業者の対話を改善することで、彼らにとって良い情報が得られるだろう。

<おわり>

<図表注釈>

図1. (左上図) 敦賀原子力発電プラント、北西を見る。(下左図) 日本における敦賀の位置。(右図) 敦賀原子力発電プラントの地図。活動性のある浦底断層の隆起した側では、施設の右側に突き出す急斜面を形成している。D-1 トレンチのサイズに関する注記、浦底断層と D-1 破砕帯を露出するまで掘られた。K 断層は、D-1 トレンチに露出した小さな特徴。2号機は、その原子炉の直下に D-1 破砕帯が横切る。ボーリング孔の位置は黒い点。オレンジのひし形と丸は、D-1 トレンチの掘削以前に、D-1 を評価した箇所。