

# 20世紀ニッポン土木のオリジナリティ考

シリーズ⑨

## 古くからサイトごとに地震動評価を行ってきた 原子力発電所の耐震設計法

高精度で実施される活断層評価

岸 清	Kiyoshi KISHI	フェロー会員 工博 東京電力㈱ フェロー
酒井俊朗	Toshiaki SAKAI	正会員 東京電力㈱ 原子力技術部 土木調査Gr 課長
井上大榮	Dalei INOUE	理博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 研究参事

### 原子力発電所耐震設計技術のオリジナリティ

- 【先見性】：開発当初から地震国であることを踏まえた地点ごとの地震動評価，2段階の設計用地震動レベルの設定を行ってきた。
- 【有効性】：開発当初の段階で構築された原子力発電所耐震設計は技術の発展を踏まえつつ高度化されているが，その基本的枠組みは現状から見ても色褪せたものとはなっていない。
- 【影響性】：地点ごとの詳細な活断層評価の工学への適用は兵庫県南部地震以降の自治体レベルの防災上の観点からの活断層評価手法等に生かされている。

### 世界第3位の原子力国 日本

1951年12月29日に世界で初めて原子力による発電（実験炉）がアメリカで行われてから，およそ12年後の1963年10月26日，わが国で最初の原子力による発電が原子力研究所でなされた。この10月26日は「原子力の日」となっている。わが国の商業用原子炉としては，1966年，日本原子力発電の東海発電所（出力16.6万kW）が営業運転を開始し，その後，数年の間に敦賀（日本原電），美浜（関西電力），福島第一（東京電力）と次々に営業運転を開始した。国内では，現在51基，総出力4491.7万kWの発電出力となっており，発電電力量では全体の約35%を占めるまでに発展している。世界全体について見ると，1999年12月末現在で，425基，総出力3億5942.5万kWの原子力発電所が稼働中である<sup>1)</sup>。現時点で，日本は発電所数，発電出力いずれも米国，フランスに次ぐ世界第3位の原子力国となってい

る。国土が狭いうえに，世界でも有数の地震国である日本にこれほどの数の原子力発電所を設置し，稼働させるためには，高度な耐震設計技術が必須であり，それゆえにこの分野での先進的な研究が進められた。

「原子力発電所の耐震設計」とひとくちにいても，入力地震動を定めるための地震の評価，入力地震動を用いた原子炉建屋（原子炉を収納している建屋）の耐震設計，さらに原子炉建屋内の重要な機器・配管類の耐震設計等非常に多岐にわたっており，地質・地震等の理学分野，土木，建築，原子力，機械・電気等の工学分野が融合して成り立っているものである。

その中で，本稿では，原子力発電所の耐震設計で土木との関連の深い「サイトごとに定められる設計用地震動の策定」の考え方について概説するとともに，その際，重要な位置付けとなる活断層の評価の考え方について述べる。

### 耐震設計の概要

原子力発電所の耐震設計は，地震による設備の障害によって公衆が放射線による被害を受けることがないようになされるものであり，具体的には，原子力発電所における3つの機能，「原子炉を止める」，「原子炉を冷やす」，「放射線を閉じ込める」が確保されることを目的としている。

これらが確保されるように，原子力安全委員会は「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（1978，1981一部改訂）」<sup>2)</sup>の中で以下の基本的な方針を定めている。

- ・重要な建物・構築物は岩盤に支持させる。

表-1 主要施設の耐震重要度分類

		BWR (沸騰水型)	PWR (加圧水型)
As	A	原子炉格納容器	原子炉格納容器
		制御棒	制御棒
A	A	残留熱除去系	余熱除去系
		原子炉压力容器	原子炉压力容器
		非常用炉心冷却系	安全注入系
B	B	原子炉建屋等	原子炉格納施設等
		廃棄物処理施設	廃棄物処理施設等
C	C	蒸気タービン等	発電機等

表-2 原子力発電所の耐震設計に用いる地震力

		静的地震力	動的地震力
As	A	3.0 Ci	基準地震動 S2 から算定
			基準地震動 S1 から算定
B	B	1.5 Ci	-
C	C	1.0 Ci	-

1 : 機器・配管系に用いる静的地震力は上記の20%増し  
2 : Ciは建築基準法に規定される層せん断力係数

- ・重要な建物・構築物は剛構造とする。
- ・施設を重要度に応じてクラス分類する。
- ・重要な施設は、敷地周辺で想定される最大の地震に耐えられる設計とする。
- ・重要な施設は、一般構築物の3倍の地震力に耐えられる設計とする。

わが国では、原子炉建屋へ作用する地震動を低減させるため、地震動が表層と比較して相対的に小さい岩盤に支持させ、さらに剛構造とすることで、地震による揺れを抑えるようにしている。岩盤支持の原則は、地震国である日本特有のものであり、米国、フランスでは多くの原子力発電所が第四紀層上に設置されている。これは日本が地震多発国であることを踏まえ、耐震設計に万全を期すための方策であるといえる。なお、岩盤から地表への地震動の増幅特性に関する観測記録の蓄積、地盤の調査・試験、評価技術の進展により、わが国においても、原子力発電所の第四紀層立地の成立性について研究も進められつつある<sup>3)</sup>。

原子力発電所の諸設備は異なる機能を有する多数の設備から構成されている。これらの設備に一律の地震動を考慮することは、重要度の低い設備に対しては過大設計

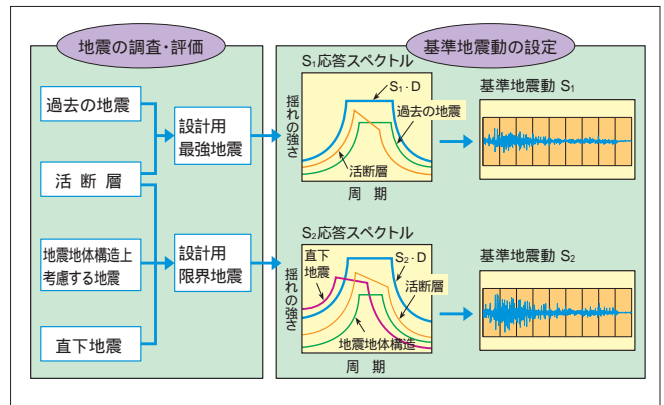


図-1 基準地震動の策定方法

となる等合理的ではないことから、設備の重要度に応じてA～Cの3クラスに分類し、重要度の高いAクラスの設備の中でも、原子炉を格納している原子炉格納容器、原子炉内の核反応をコントロールする制御棒等、きわめて重要度が高い設備についてはAsクラスとしている(表-1)。設備の重要度に応じた設計用地震力との関係は表-2に示すとおりであり、Aクラスの施設は基準地震動S1とよばれる設計用の地震動を用いた動的解析が要求され、併せて、一般構築物に適用される静的地震力の3倍の地震力を考慮する必要がある。特に重要度の高いAsクラスの施設については、当該地域で想定される最大の地震動(基準地震動S2)を用いた動的解析が要求されている。

これらの詳細な規定は前述のように、1978年に国の指針として制定されたものであるが、原子力の開発初期段階から「岩盤支持」、「剛構造」、「サイトごとに調査に基づいて2段階の設計用地震動を定めること(指針で定めているS1, S2とは厳密な意味では一致していないが)」等の基本的な考え方は設計思想として組み込まれていたものである。

1995年兵庫県南部地震を踏まえた土木学会の提言では、レベル1、レベル2という2段階の設計用地震力を考慮すること、また、近距離の活断層についても配慮すること等、個別地点ごとに設計用地震力を定めることの重要性が認識されてきているが、原子力発電所においては、「日本の活断層(活断層研究会)」等の活断層マップが公刊される以前で「活断層」が今と異なりポピュラーではなかった時代から、これらを設計に取り込み、2段階の設計用地震力を個別地点ごとに定めていた、すなわち、原子力発電所では開発当初から custom-made の耐震設計を行ってきており、この考え方は非常に先見の明のものであったといえる。



### 設計用地震動の考え方

以下では、原子力発電所の耐震設計の特徴のひとつである、サイトごとの設計用地震動の考え方について示す。

設計用地震動は基準地震動とよばれ、基準地震動はS1とS2の2種類のもので設定される(図-1)。基準地震動S1は設計用最強地震に基づく地震動であり、基準地震動S2は設計用限界地震に基づく地震動である。これらの用語は前述の耐震設計審査指針で規定されている用語であり、「最強」、「限界」の使い分けが一般には馴染みがうすいと思われるが、限界地震に対応するS2が最強地震に対応するS1のおよそ1.5倍程度の大きさとなっている(S1, S2はサイトごとに定められるため、この比率はあくまでも目安である)。

設計用最強地震は、発電所が稼働している期間中に、工学的見地からは起きることを予期するのが適切とされる地震であり、サイト周辺で発生した過去の地震および活動度の高い活断層による地震のうち、サイトに対して最も影響の大きい地震を考慮する。

一方、設計用限界地震は、起きる確率はきわめて小さいと考えられるが、発生した場合のサイトへの影響は設計用最強地震を上回る地震である。設計用限界地震としては活動度の低い活断層による地震、地震地体構造上想定される最大規模の地震、および直下地震を考慮する。

これらの評価にあたり、過去の地震の抽出に際しては、地震カタログ、古文書等によって地震の規模等を調査し、敷地への影響が最も大きいものを選定する。過去の地震については震源の位置に誤差が含まれていることもあるため、評価に際してはこのような位置決定の誤差についても考慮することとなる。

活断層については、その認定根拠が研究者間で必ずしも統一されていないものであり、例えば前述の「日本の活断層(活断層研究会)」では第四紀(約200万年前以降)に活動した断層を活断層と認定しているが、原子力発電所では設計用最強地震の対象として、断層の活動度の活発さを表わす平均変位速度(断層変位量/単位時間)が、1m/1000年を超える活断層(活動度がA級の活断層)のうち、1万年前以降に活動したか、あるいは活動間隔が1万年未満のものを対象としている。設計用限界地震の対象としては、平均変位速度が1m/1000年未満(活動度がB, C級の活断層)の活断層のうち、5万年前以降に活動したか、あるいは活動間隔が5万年未満のものを対象としている。したがって、「日本の活断層」によって活断層と認定されているものも原子力発電所の耐震設計上は活断層として取り扱われない可能性もあ

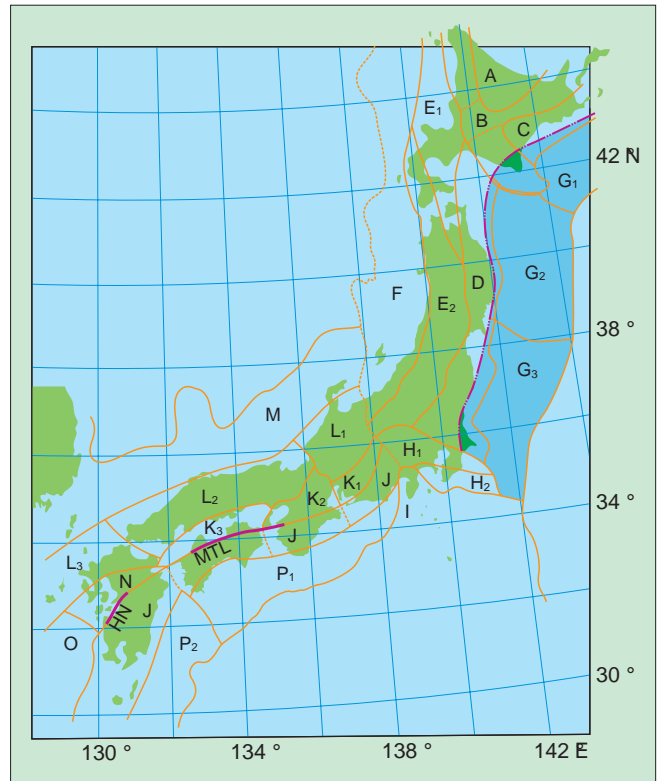


図-2 実用的地震地体構造マップ作成のための地体構造区分

り、必ずしも保守的ではないと受け取られることもある。しかし、一般に、活断層の活動と結びつきが強いとされる広域応力場が、わが国では第四紀中期～後期、すなわち数十万年前～十数万年前にかけて変化したとされており、現在と同じ応力場が形成された時期以降に活動した断層は、同じ応力場が続いている現在でも活動する可能性があることを踏まえて定められた値である。逆にいうと、第四紀初頭の頃は現在と応力場が異なっていたと考えられ、そのような時期に活動した断層については、異なる応力場となっている現在も活動すると考える必要はないということである。兵庫県南部地震以降、多数の活断層調査が実施されているが、5万年を超える再来期間を有する活断層は見つかっていないことから、上記のクライテリアは妥当なものと考えられる。

これらの、耐震設計上考慮する活断層の評価は、文献調査のみならず、事業者による地形、地質調査、反射探査(主として海域)によって広範囲かつ高精度で調査を行うことが要求されている。custom-madeの耐震設計の根幹をなす耐震設計に係わる活断層調査の精度については次節で紹介する。

設計用限界地震に係わる地震地体構造上想定される地震は以下のような考え方に基づく。

地震地体構造上想定される地震とは、日本が地震国であると一口にいても、地震の起こり方は地域によって

異なっており、各地域の地震発生の仕方に着目すると、地震発生区域ごとに地震の上限があるとみなすことができるという考えに基づくものである。研究者によってこのような地震地体構造マップがいくつか発表されており、一例を図2<sup>4)</sup>に示す。耐震設計に際しては、このようなマップを参照したうえで、活断層の分布状況、過去の地震の発生状況をさらに詳細に検討したうえで、当該地域における地震の最大規模および発生位置を決定することとなる。

設計用限界地震として考慮する直下地震については、一般に兵庫県南部地震のような「都市直下型地震」等といわれる地震と混同される恐れもあるが、これらは以下のようにまったく性格が異なるものである。

原子力発電所においては、敷地選定に際して施設予定地直下に活断層がないことを確認する必要がある。これは、活断層による影響が地震動に限られるのであれば設計上の配慮で対応可能であるが、活断層による断層変位に対しては、構造物の設計方法は確立されていないため、「避ける」ことを対応の基本としているためである。したがって、原子力発電所の耐震設計で考慮する直下地震とは、発電所施設の設置地盤に関する調査の結果、活断層がないことを確認したうえでも、さらに念のため設計上の配慮として考慮する地震動であるといえる。

これに対して、兵庫県南部地震は六甲～淡路にかけて分布する活断層が都市直下で活動したことによる地震であり、このような地震は、原子力発電所の設計においては「活断層による地震」として考慮されるものである。

以上のような、過去の地震、活断層、地震地体構造上想定される地震についてサイトごとに詳細な調査を行い、基準地震動が定まることとなる。直下地震については全国一律の規模（M 6.5，震源距離 10 km）で定められる。

全国各原子力発電所の基準地震動 S<sub>2</sub> の最大加速度はサイトごとの地震活動度に応じて異なる大きさとなり、V<sub>s</sub>（せん断波速度）が 700 m/sec 以上の岩盤レベルで 270 Gal ~ 600 Gal という値になっている。一方、全国一律に規定される直下地震（M 6.5，震源距離 10 km）により、最大加速度 370 Gal の地震動が最低要求的な位置付けで適用される。

耐震安全性を十分保証しなければならない原子力発電所ではあるものの、過度に大きな地震力を考慮しているわけではなく、当該地域の地震発生様式に応じての最大規模の地震動を考慮する点は custom-made であることによる合理性の現れである。

日本の耐震設計は、国土が狭い上に地震国であること

から、過去に多くの地震被害を受け、必然的に理学・工学の分野が協力して設備・人命を震災から守ることを命題として発展してきたわけであるが、さらにわが国では比較的古くからの地震記録が古文書等に記述、保存されてきており、研究者がこれらをまとめてカタログ化していることから、地震に対する取組みは世界でも最先端を進むことができたわけである。さらには、活断層研究の発展の背景として、日本は狭い国土の四方を海に囲まれていることから、過去の気候変化に伴う海水準の変化に応じて海岸付近には過去数十万年から現在に至る地層が段丘堆積物等として保存されていることが多く、活断層による地震が発生した場合、これらの地質学的にはきわめて若い地層に、活断層の痕跡が保存されることとなる。一方、わが国は地震同様火山も多く、例えば約 7 万年前の阿蘇山の火山噴火に伴うテフラは広く日本中に分布することが確認されている等、過去の火山噴火に伴うテフラが広く日本中に分布し、研究者の努力により、これらの中で代表的なものは指標テフラとして噴出年代が求められている。活断層を調査する際には、これらの年代が特定されているテフラを含む地層と断層との関係を確認することにより、活断層の活動履歴（どの程度の時間間隔で断層が活動しているか）を把握するうえで分解能を高めることが可能となっている。このように、わが国ではその国土の成り立ちと優秀な研究者達の研究によって、数万年～数十万年にわたるレンジで断層の活動史を検討することが可能となっている。

これらの、例えば、地震的、地質的分野の基礎、応用技術のひとつひとつの積み重ねが、最終的には原子炉施設の耐震設計のシステムへと繋がっていくわけである。

#### 活断層評価事例

custom-made の耐震設計により耐震安全性を確保するという場合、必然的に調査～評価が十分な精度で実施されることが要求される。調査～評価の要求事項等については、原子炉安全専門審査会「原子力発電所地質、地盤に関する安全審査の手引き（1978）」<sup>5)</sup>により定められており、調査手法等の詳細な部分は電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針（1987）」<sup>6)</sup>に取りまとめられている。

以下では、原子力発電所における活断層の調査、評価が高精度でなされることを具体的な事例を挙げて紹介する。なお、原子力発電所周辺地域では活断層による比較的規模の大きい地震は現在まで発生しておらず、活断層の調査・評価精度を示す事例に限られることから、2000年鳥取県西部地震の震源域において、原子力発電所で適



用される調査手法に基づいて実施された調査結果を紹介する。

2000年10月の鳥取県西部地震では、既往の公刊文献等で活断層の存在が指摘されていなかった場所においてM7.3の規模の地震が発生したことから、同規模の地震はどこでも起こりうるのではないかと問題提起がなされている。そこで、この提起された問題を原子力の調査手法の精度を確かめる題材としてとらえ、電力中央研究所は地震直後から空中写真判読、地表地質調査、反射法地震探査等の詳細調査を実施してきた。その結果、当該地域では、今回の地震以前にも鳥取県西部地震と同様な地震が繰り返し発生していたことを示すいくつかの地形、地質および地質構造上のデータが得られた。具体的には次のとおりである。

まず、空中写真判読により、余震分布域に横ずれ変位地形の可能性のあるリニアメントが北西-南東方向に長さ約20kmの区間で断続的に分布することが判明した(図3)<sup>7)</sup>。また、地表地質調査により、日南町久住において、リニアメントに対応して活断層露頭が発見され、<sup>14</sup>C年代測定から、この活断層の最新活動時期は880年の出雲の地震(M7)に対応する可能性があることがわかった(図4)<sup>8)</sup>。さらに、リニアメントの成因を確かめるため、推定震源断層を横切る方向に反射法地震探査を実施したところ、系統的な左屈曲が認められるリニアメントに対応して、その地下において基盤である花崗岩中に複数の断層が確認されるとともに、それらの断層が横ずれ断層に特徴的に見られるフラワーストラクチャーを呈することが

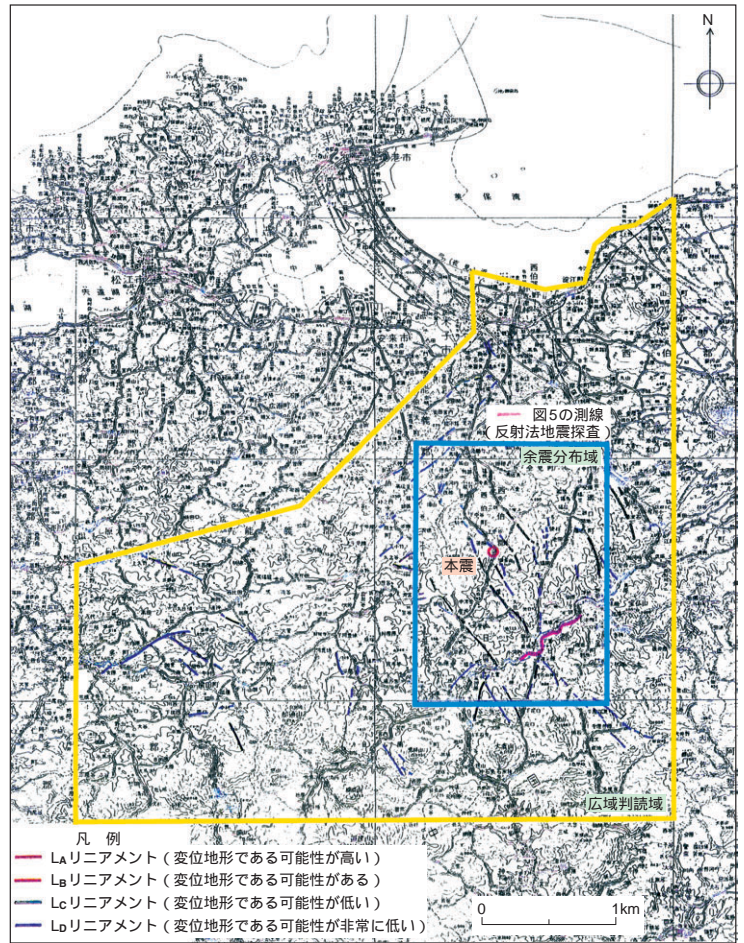


図-3 余震分布域および西方地域のリニアメント

判明した(図5)<sup>9)</sup>。

以上のように、原子力発電所で適用されている手法に基づき調査を行った結果、今回の地震以前にも鳥取県西部地震と同様な地震が繰り返し発生していたことが明らかになりつつある。

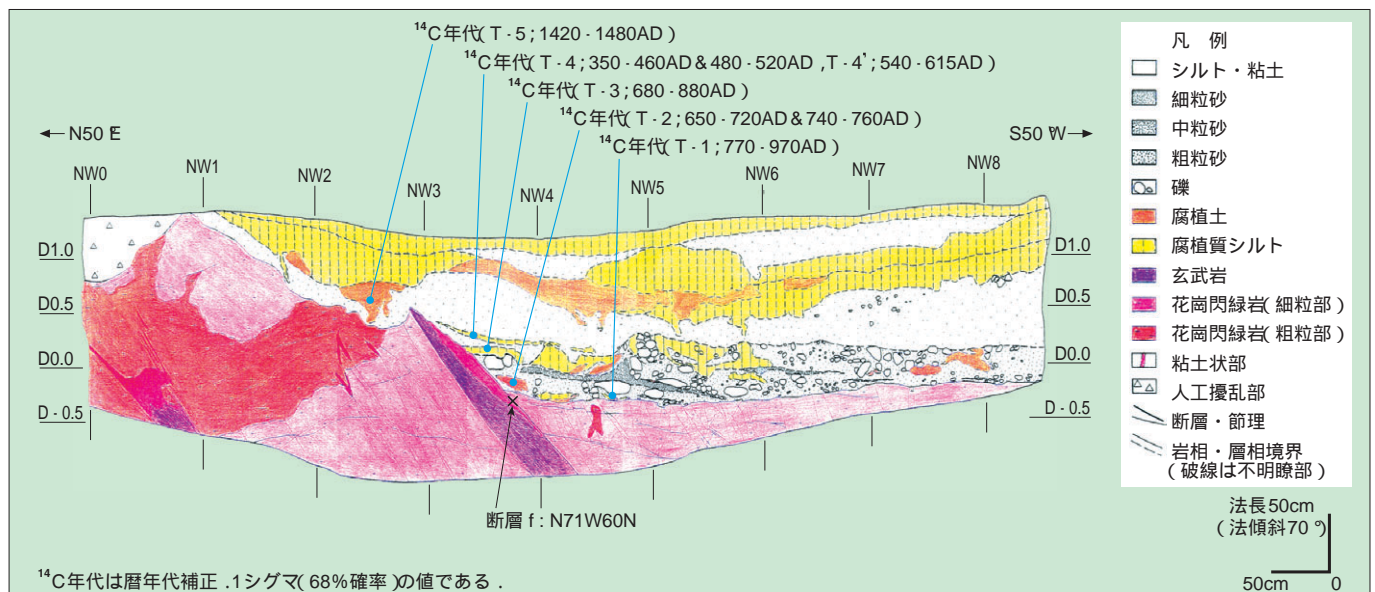


図-4 久住トレンチ北西側のり面スケッチ



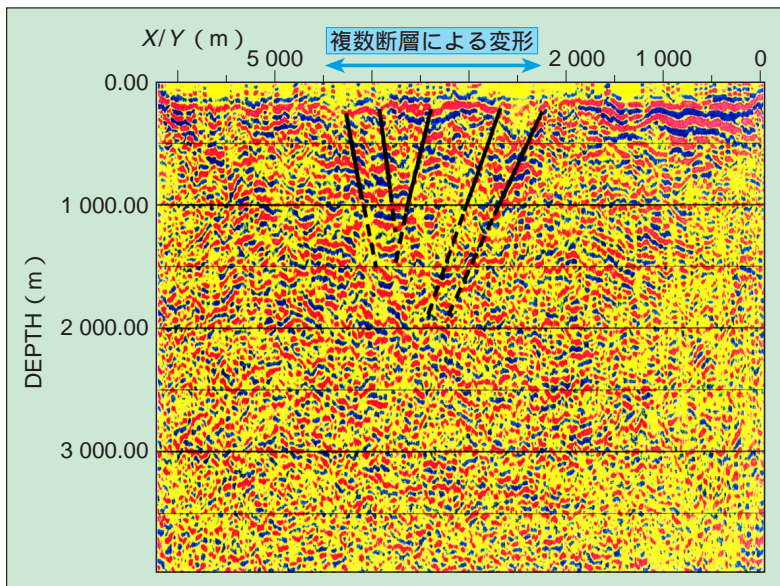


図-5 反射断面図（浅部拡大図解釈図）

次に既存文献に示された断層と、原子力のように詳細な調査を行った場合に評価される活断層との対比を行うことにより、活断層調査の精度について述べる。活断層分布図は前述の「日本の活断層」等によりとりまとめられており、その数は実に約2000本に達するものの、これらの中には、空中写真判読に基づき地形的に推定したものにすぎないものも数多く含まれている。

福島県の浜通り地方に分布する双葉断層は、「日本の活断層」により長さが70kmにも及ぶ長大な活断層とされている。原子力発電所の立地に係わる調査においては、双葉断層について、空中写真判読、地表踏査等の詳細な調査を行い、70kmに及ぶとされる双葉断層のうち、最近まで活動している区間はその一部にすぎず、大部分が少なくとも過去10万年間は活動していないことが明らかとなったことから、この結果を評価に取り入れている。この評価は近年、自治体による活断層調査として福島県が実施した活断層調査によっても支持されることとなった。同様の例としては、青森県の野辺地町から十和田市にかけての長さが約30kmの活断層が青森県の調査によりその活動性が否定されるなど、既存の活断層分布図に示されているものの中には、少なからず活断層として評価する必要のないものが含まれていると思われる。

これらとは逆の事例として、新潟県の中越地方には既存の活断層分布図に数多くの活断層が示されているもの

の、原子力発電所の調査において、当時の分布図には示されていない活断層を空中写真判読により抽出し、活断層として評価した。この断層は、その後地質調査所によって発見され<sup>10)</sup>、新たに活断層分布図に加えられた。このように、既存の分布図には活断層の見落としもある。

原子力発電所の活断層評価に際しては、同一地域を対象として、大縮尺から小縮尺の複数の空中写真を用いて詳細にリニアメントの判読をしたうえで、その結果等も参考にして地表踏査を行っている。発電所周辺調査として、これらの諸調査は、発電所敷地および敷地を中心とする少なくとも半径30kmの領域

について、おおむね数年程度の時間をかけて十分な精度をもって、実施されており、活断層評価に際して、見落としあるいは過大評価することなく、合理的な評価を地点ごとに得ることとなる。

活断層調査は、原子力発電所の立地、建設に係わる諸調査の中でも、最も重要な調査の一つとなっており、他機関に先駆けて精力的に行われてきた。この結果として、活断層調査に関する考え方や手法が確立し、活断層に携わる技術者を育成することとなり、これらの技術は、1995年兵庫県南部地震以降の自治体による活断層調査に生かされている。

#### 参考文献

- 1 - 原子力産業会議：世界の原子力発電開発の動向1999年次報告
- 2 - 原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，1981
- 3 - 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所の立地多様化技術，1996
- 4 - 萩原尊禮編：日本列島の地震 - 地震工学と地震地体構造 - ，鹿島出版会，1991
- 5 - 原子炉安全専門審査会：原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き，1978
- 6 - 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601，1987
- 7 - 井上大榮ほか：2000年鳥取県西部地震の位置と規模は事前に評価可能か？（その1） - 震源域周辺の断層変位地形 - ，地球惑星科学関連学会，2001
- 8 - 井上大榮ほか：2000年鳥取県西部地震の位置と規模は事前に評価可能か？（その2） - 震源域周辺の断層破碎帯と活断層露頭 - ，地球惑星科学関連学会，2001
- 9 - 阿部信太郎ほか：2000年鳥取県西部地震震源域における反射法地震探査，地球惑星科学関連学会，2001
- 10 - 吉岡敏和，加藤禎一：新潟県長岡市南西，親沢町における活断層露頭および断層変位地形，地質学雑誌，93，1987