

意見書

2022(令和4)年5月18日

大阪高等裁判所 第6民事部CE係 御中

氏名     芦    田    讓    

【目次】

- 1 私の経歴
- 2 本意見書の要旨
- 3 反射法地震探査とは
  - 3-1 二次元反射法地震探査とは
  - 3-2 三次元反射法地震探査とは
- 4 関西電力が実施した調査の問題点
  - 4-1 二次元反射法地震探査
  - 4-2 屈折法地震探査
  - 4-3 PS 検層
  - 4-4 ボーリング
- 5 最新の地下調査技術である三次元反射法地震探査
  - 5-1 三次元反射法地震探査の優位性
  - 5-2 実例
- 6 結論

## 1 私の経歴

私は 1943 年生まれで、1967 年京都大学理学部地球物理学科応用地球物理学研究室卒業後、石油資源開発(株)で反射法地震探査デジタル化の研究開発を行い、1970 年には日本初のマイグレーションプログラムを開発し阿賀沖油田の開発に従事し、1974 年には浅海調査法を考案し、1980 年に中国渤海湾の膨大な物理探査データ解釈を主宰し、さらに 1983 年には三次元反射法地震探査により岩船沖油・ガス田の発見に貢献しました。1986 年に渤海湾と岩船沖のデータをまとめて東京大学工学博士号を取得し、同年に京都大学に移ってからは、1988 年 4 月に同大学工学部助教授、1996 年 11 月に同大学工学部工学研究科教授となり、2007 年 3 月に定年退職し、同年 4 月に名誉教授になりました。その間、経産省の国内石油・天然ガス基礎調査実施委員会委員長、二酸化炭素炭層固定化技術開発推進委員会委員長、地熱発電に関する委員会委員長、さらに国交省大深度地盤調査マニュアル検討委員会副委員長をはじめ、日本学術会議第 19 期会員、第 20、21、22 期連携会員、(社)物理探査学会では会長、大陸棚画定研究委員会委員長、斜面等健全性検討委員会委員長を歴任等、一貫して地下探査を専門として多くの研究・業務に従事してきました。

## 2 本意見書の要旨

(1) 1992 年 10 月 29 日の伊方原発訴訟における最高裁判所の原発設置許可処分の判決で、「原発の設置に対する合理性の判断は最新の科学技術知見による」とされた。

また、原子力規制委員会「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 別記 2 第 4 条 5 四①」（平成 25 年 6 月 19 日原規技発第 1306193 号原子力規制委員会決定）は、「敷地及び敷地周辺の地下構造（深部・浅部地盤構造）が地震波の伝播特性に与える影響を検討するため、

敷地及び敷地周辺における地層の傾斜、断層及び褶曲構造等の地質構造を評価するとともに、地震基盤の位置及び形状、岩相・岩質の不均一性並びに地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性を評価すること。なお、評価の過程において、地下構造が成層かつ均質と認められる場合を除き、三次元的な地下構造により検討すること」としている。

この2項目の指摘に対応する技術は、地下調査分野では三次元反射法地震探査である。反射法地震探査技術は欧米で1935年頃から石油資源の探鉱のために開発された。その後、観測機器がアナログからデジタルに進歩し、コンピューターによるデータ処理・解釈のためのソフトウェアが開発された。観測現場も陸上調査から海上調査へと拡がり、また、エレクトロニクス分野の技術革新に支えられ1970年頃から二次元探査から三次元探査が主流になり大きく飛躍した。この技術革新が現代の石油文明の背景にあるといっても過言でない。

この観点から判断すると、関西電力が実施した二次元反射法地震探査や屈折法地震探査は、到底最新技術ではなく多くの問題を抱えている。

- (2) 今回、この意見書を作成するにあたり、私は原子力発電所のような重要な施設の地下構造が、いまだに二次元探査のデータに基づいて解釈されていることに驚いている。私は、政府の各種委員会の委員を務めていた2000年代の初頭から関係機関に対し、原子力発電所敷地周辺の地盤調査を三次元探査で行わせるべきだと言いつけてきたが、未だに原子力発電所敷地で三次元探査は実施されていない。

確かに、費用面では三次元探査は二次元探査の2倍程度となり、調査面積にもよるが、数億円程度かかることになると思われる。しかし、得られるデータの情報量や精度を考えると決して高くはない。特に、原子力発電所のような重要な施設の場合には、必要な費用の支出は惜しむべきではなく、また、電力会社の財政規模、深刻な事故が起きた際の損害額に比べれば、三次元探査の費用は大した金

額ではないと考える。地下構造を高精度な手法で調査をし、より正確な地下情報に基づいて、地下構造形態や断層の存否、傾斜、落差、連続性を詳細に把握して議論すべきなのは当然で、そのために三次元探査は必須である。

(3) 国民の安全、安心な生活を保証するという観点から付け加えさせていただく。

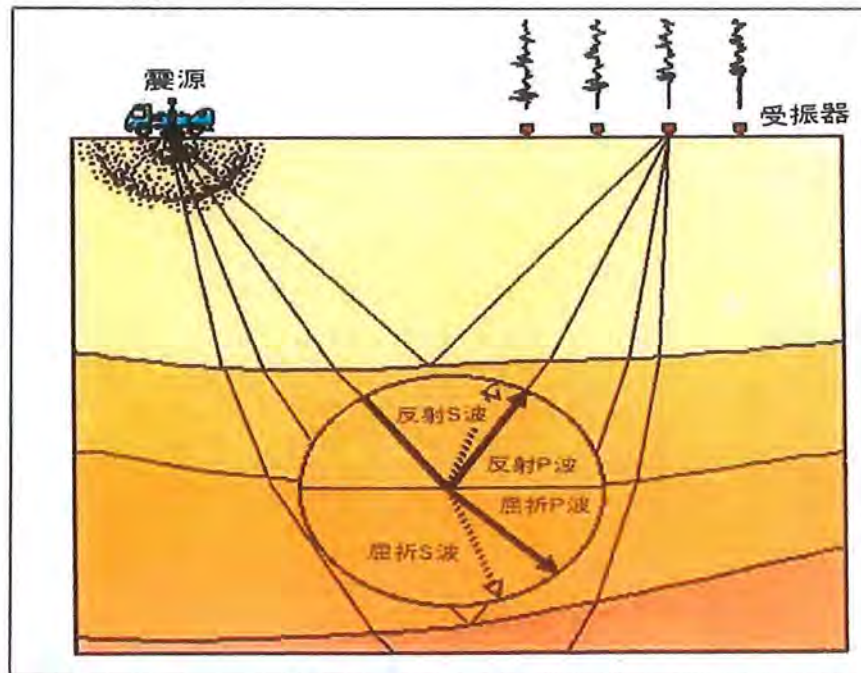
若狭湾で福島原発事故のようなことがあってはならないし、それが起こらないために関西電力も努力をされていると思う。しかし、もし、放射能流出事故が発生すると偏西風の影響で京阪神以北の地域が放射能で汚染される可能性がある。

また、琵琶湖が汚染されると、京都、大阪の家庭への安全な飲み水の供給ができなくなる。そのような事故を防ぐという観点からは、関西電力がした原子力発電所敷地の地下構造調査は、現在の物理探査の技術からかけ離れており、新規制基準の要請にも応えておらず、不十分と言わざるを得ない。

### 3 反射法地震探査とは

反射法地震探査とは、次図に示すように、地表面で人工的に発生させた振動(弾性波)が音響インピーダンス(地層の密度と弾性波伝播速度の積)の異なる地層境界面で反射してくる地震波を地表に複数個設置した受振器で測定し、地震波の到達時間と振幅を計算機で処理、解析することにより地下構造等を探る調査手法のことである。

反射法地震探査には、震源と受振器の配置により、直線上に震源と受振器を設置する二次元探査と、それらを面的に設置して記録をとる三次元探査がある。



反射法の原理

### 3-1 二次元反射法地震探査とは

震源で発生した弾性波は地下を三次元的に伝播する。したがって、二次元探査の場合、受振したデータには直下から反射して戻ってくる地震波の他に、周囲から反射して戻ってくる地震波も測線直下のものとして処理するため、それらを解析した結果も不正確になる。

このことを次頁図1に示す。図1(a)は2個のドームと断層がある地下構造モデルで、(b)は調査測線6における二次元の反射法地震記録である。この記録には緑のドームからと赤色の断層と青色の平面からの反射波に加えて、側方にある黄色のドームからの反射波が記録されている。二次元記録ではこれらを直下のものとして処理するために(c)の地下構造になる。しかし、側方からの反射を本来の位置に移動させて処理する三次元マイグレーション処理を施せば、(d)に示す地下構造に対応した正確な記録が得られる。

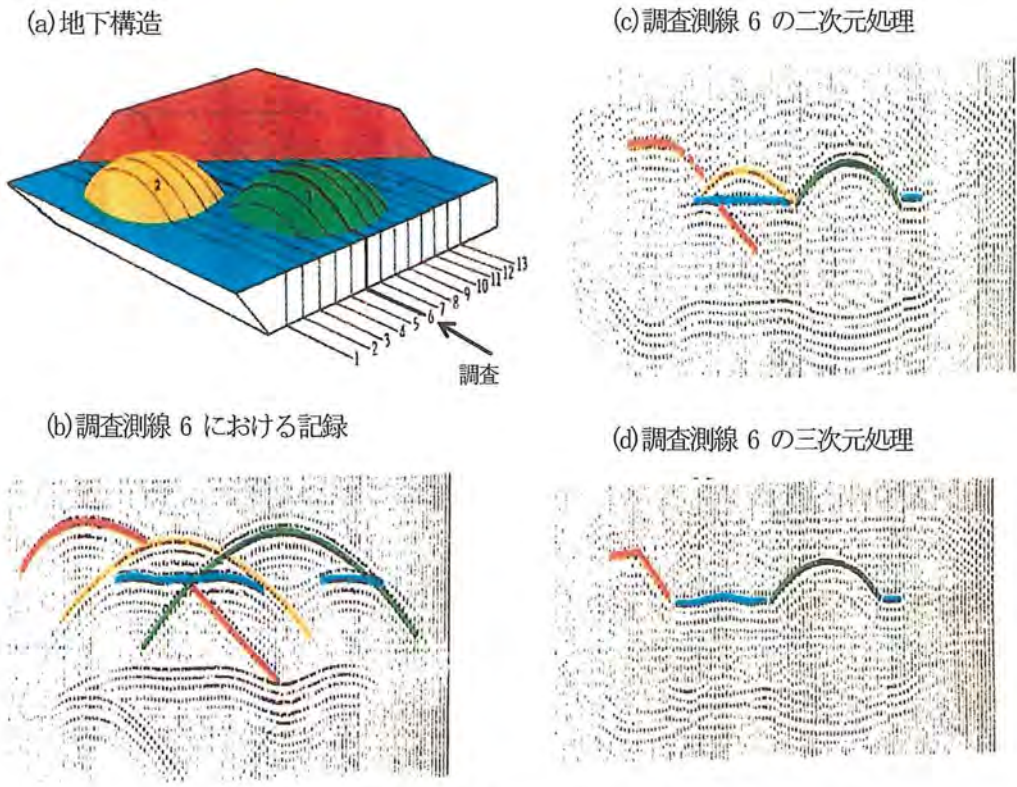
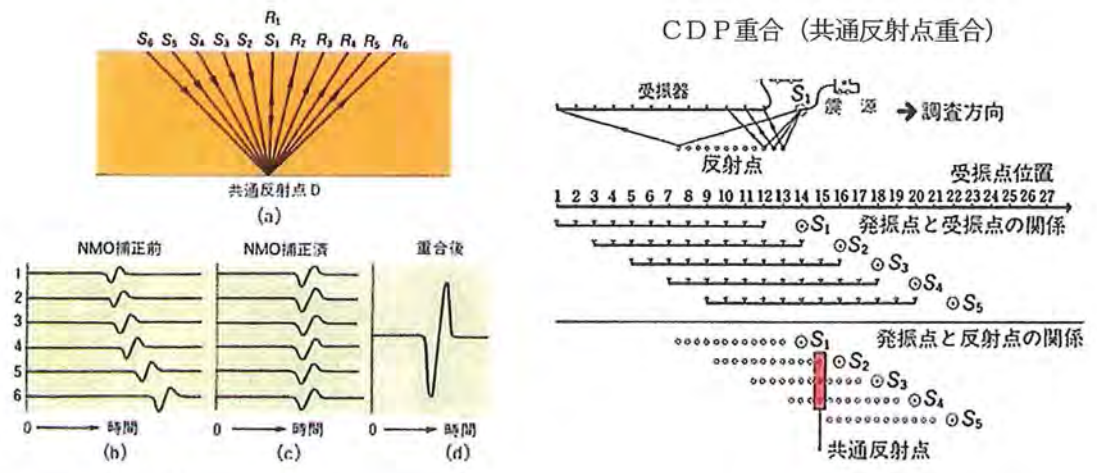


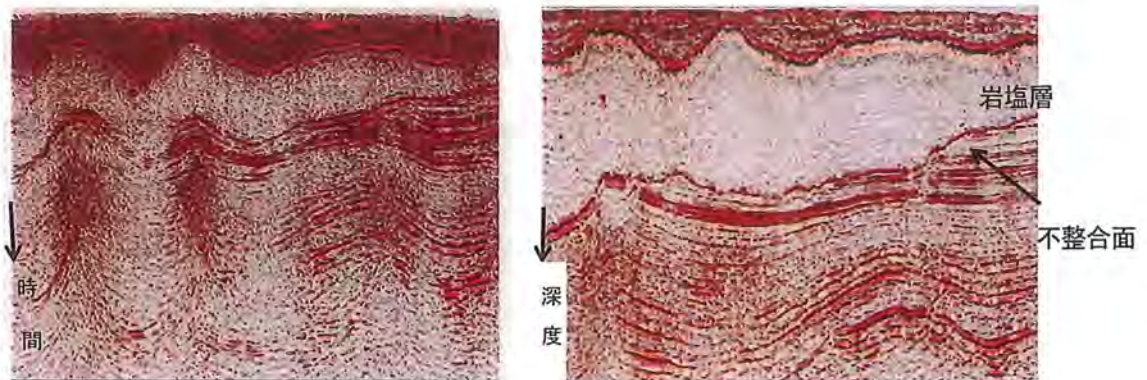
図1 ドーム構造に対する二次元と三次元処理の違い

マイグレーション処理とは、受振点で記録された見掛けの反射波を本来の反射点の位置に移動させて真の地下構造を求める処理である。



実際のデータで二次元と三次元のマイグレーション処理の相違を図2に示す。

(a)は二次元重合後時間マイグレーション<sup>1</sup>処理結果で、記録の中ほどに凸型の背斜構造がみられる。しかし、(b)の三次元重合前深度マイグレーション<sup>2</sup>では、受振点で得られたデータを真の反射点のデータに移動した後に、重合を行うために側方からの偽像が取り除かれ、さらに、時間断面から深度断面への変換誤差がなくなり、より正確な記録が得られ、岩塩層の形と層厚、岩塩層下部の不整合面、さらにその深部にある背斜構造が明瞭になっている。



(a) 二次元重合後時間マイグレーション記録

(b) 三次元重合前深度マイグレーション記録

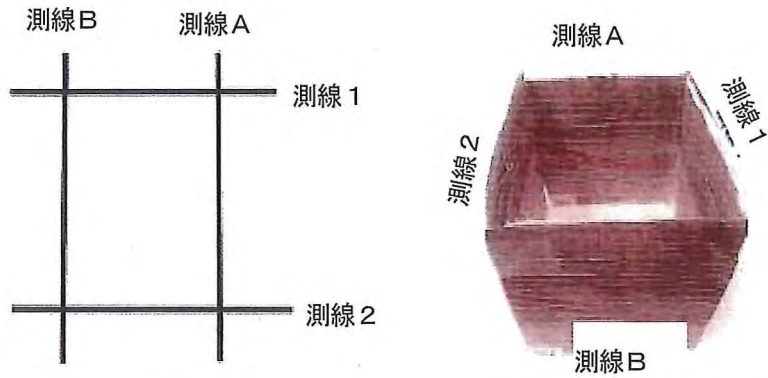
図2 二次元と三次元マイグレーションの比較

以上述べたように三次元反射法地震探査では、二次元探査に比べて得られる地下構造に関する情報の正確さと豊富さについては議論の余地がない。

<sup>1</sup> 二次元重合後時間マイグレーション処理は、すべての反射波を地下直下からのものとして表示したデータに CDP 重合を実施し、マイグレーション (移転) 処理を行うもの。データは、横軸を受振位置、縦軸を往復走時として表示する。傾斜した反射面等からの反射波はその正確な位置ではなく、その受振点直下に表示するため、真の地下構造形態とは対応しない (CDP 重合とは共通反射点重合 Common Depth Point stack : 反射法地震探査においては、一つの発震点に対して多数の受振点で測定することから、地下の反射点も複数になる。この反射点が一致する (地層の境界) データを集めてたし合わせることで地下からの反射波である一次反射波を強調させる処理手法。前頁図参照)。

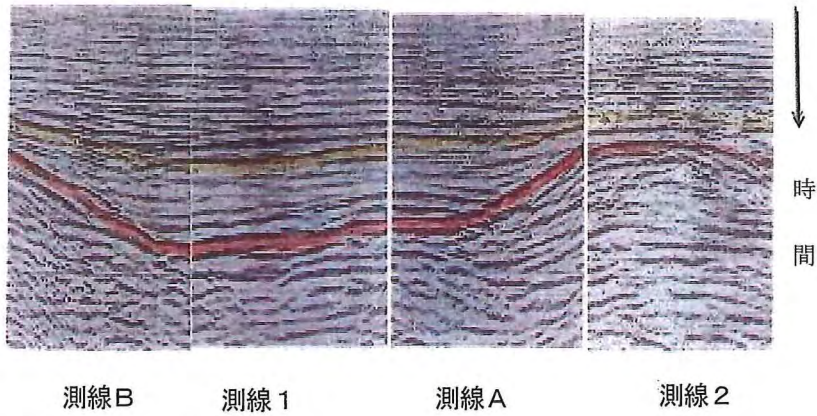
<sup>2</sup> 三次元重合前深度マイグレーション処理は、CDP 重合前の反射波を真の反射点位置に移動させた後、CDP 重合を行ったデータに対しマイグレーション処理を行うもの。そのため、反射点は正確な位置となる。マイグレーションの過程で時間断面から深度断面への変換処理を施す。

【二次元探査における地下構造図の作成方法】

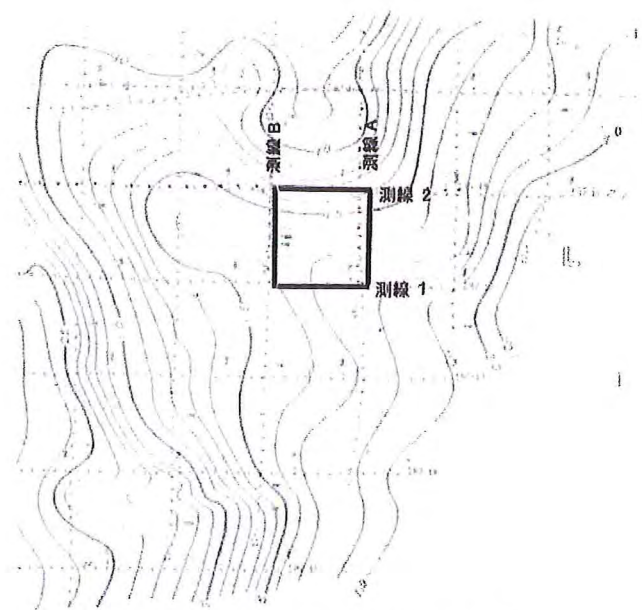


(a) 二次元調査側線

(b) 各測線の鉛直断面



(c) 記録断面（展開図）



(d) 二次元探査データによる地下構図



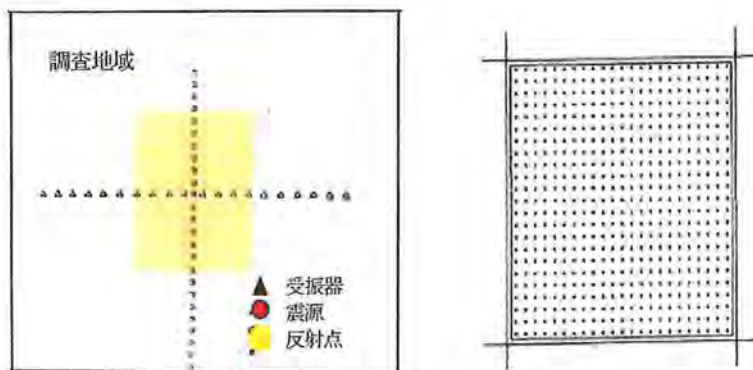
前頁図(a)に示す4本の測線を井桁状に組んだ場合の地下構造図の作成方法を述べる。

調査地域を囲うように井桁状に測線を組み（前図(a)）、二次元探索により各測線のデータを取得する（前図(b)、(c)）。各測線の鉛直方向の地震記録を（前図(c)）に示す。この地震記録上の反射波を前図(c)の赤線で示すように追跡し、各測線の交点で移し替えて各測線にわたって追跡する。この操作を前図(d)の太線の格子以外のすべての格子にわたって行い、追跡した反射波の時間を読み取り測線上にプロットし、時間の等しい点を結び地形図の等高線図に相当するこの地域の地下構造図を（前図(d)）を作成する。

かかる作業を行うことにより、二次元探索でもある程度の地下構造図を作成することは可能となる。しかし、関西電力はこの作業さえ行っていない。

### 3-2 三次元反射法地震探索とは

三次元探索においては、調査地域を取り囲むように、下図 3(a)のように多数の震源と受振器を面的に配置し、それにより得られたデータを計算機によって映像化することにより、地層の境界や断層の傾斜、落差等について面的なデータを正確に捉えることができる探索法である。



(a) 調査地域と三次元調査の震源と受振器配置の一例とその場合の反射点  
(b) (a)の場合の反射点の分布((a)の黄色の部分の拡大図)

図3 陸上の三次元調査の震源と受振器配置の一例

出典：(Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics 4th ed. Geophysical references. v. 13)

## 4 関西電力が実施した調査の問題点

### 4-1 二次元反射法地震探査

ア 関西電力が行った二次元探査について（関西電力が行った二次元探査はわずか二本の測線のみで行っていること）

本件原子力発電所敷地の地下構造について、三次元探査は行われておらず、「三次元的な地下構造により検討」されているといえないことは明らかである。また、二次元探査は行われているものの、前述の二次元探査における地下構造図の作成方法からすれば、井桁に組んだ測線は4本以上必要であるところ、関西電力は本件原子力発電所敷地についてA測線とB測線の2本の測線でしか二次元探査を行っておらず、地下構造図は描けない（12頁下図、丙第15号証 右上頁数43）。

なお、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（別記2 第4条5四①）において、「評価の過程において、地下構造が成層かつ均質と認められる場合を除き、三次元的な地下構造により検討すること。」と定められており、「地下構造が成層かつ均質と認められる場合」は二次元探査も認められる規定となっている。

しかしながら、二次元探査において得られる情報は測線直下の地震情報に限られ、面的な連続性は把握できず、かつ、受振器が受振したデータは測線直下でない周囲から反射して戻ってくる波が含まれ不正確であることからすれば、二次元探査ではそもそも「地下構造が成層かつ均質」であると判別できるはずもなく、三次元探査を用いなければ「地下構造が成層かつ均質」であるかは判断できず、この点では矛盾をはらむ内容となっており、無意味な規定であるといえる。

したがって、本件原子炉敷地においては、2本の測線しか測定されていない二次元探査しか行われておらず、解釈別記2 第4条5四①に明らかに反している。

イ 本件原子力発電所敷地については「地下構造が成層かつ均質と認められる場合」にも該当しないこと（関西電力の行った反射法地震探査の結果から、「地下 500m くらいまで反射波が確認され、その範囲内では特異な構造は認められない。」との結論は導けるはずもないこと）

関西電力は、本件原子力発電所敷地についての反射法地震探査を行った結果、「地下 500m くらいまで反射波が確認され、その範囲内では特異な構造は認められない。」と結論付けている（丙第 15 号証・右上頁数 51）。

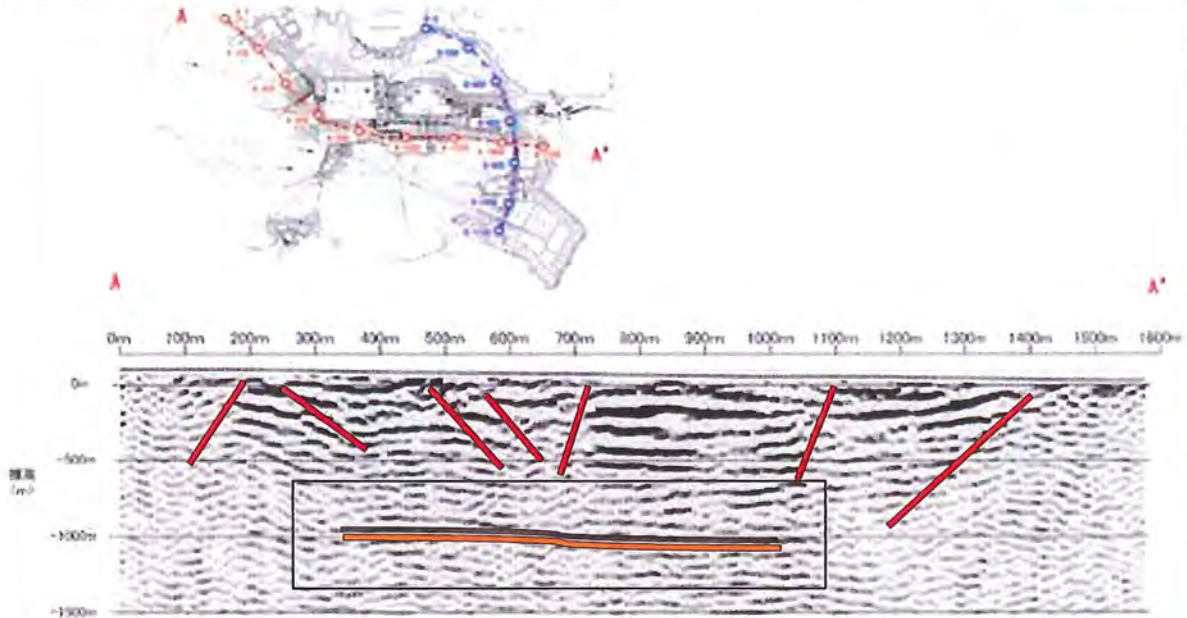
しかしながら、次頁上図の反射法地震探査調査結果(A 測線：深度断面)から、断層と考えられるものが深度 500m までで、少なくとも 7 本存在する。また、深度 1,000m にも反射波が認められる（参考までに、私がこの記録断面の形状からのみ解釈し、同一の反射面（地層の境界面）からの反射波列の連続性が途切れて落差が生じていることから断層と考えられたものを次頁上図の中に赤線で 7 本示す。この断層および深部の反射波の構造形態を明らかにするには三次元探査を実施し、ボーリングデータと照合し、正確な地下構造図を作成する以外に方法はない。）。

上記に照らせば、反射法地震探査の結果、本件原子力発電所敷地の地下 500m の範囲内では「特異な構造は認められない」との関西電力が導いた結論は明らかに誤っている。

# 反射法地震探査調査結果 (A測線:深度断面)

第59回審査会合  
資料再掲

51



縦横比14

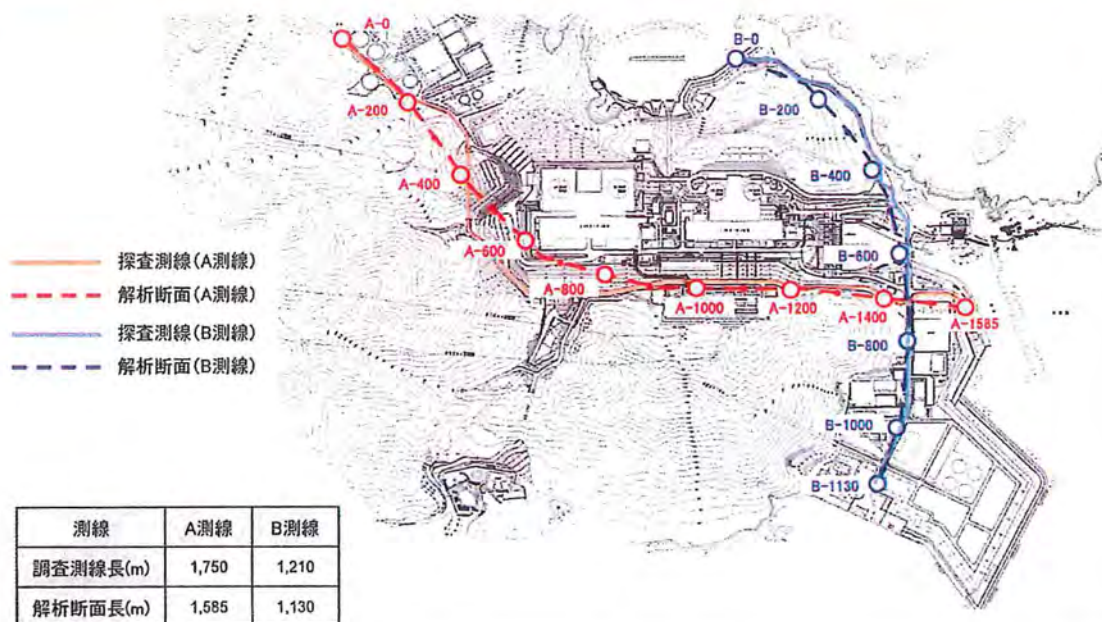
■地下500m位まで反射面が確認され、その範囲内では特異な構造は認められていない。

# 解析断面の設定

第59回審査会合  
資料再掲

43

■本調査では測線配置が屈曲しているため、反射点分布のほぼ中央付近を通過する解析断面を設定した。



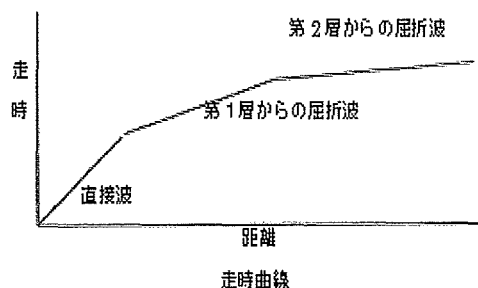
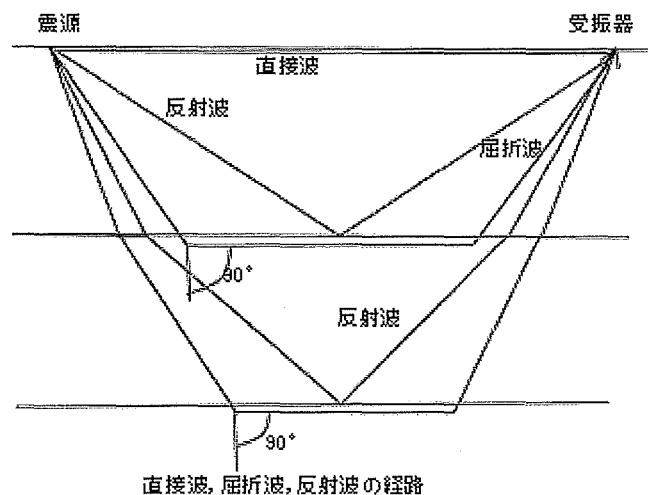
丙第15号証より

## 4-2 屈折法地震探査

### ア 関西電力の行った屈折法地震探査では地下構造の三次元的把握などできないこと

屈折法地震探査とは下図に示すように、地表での発破などによって人工的に弾性波(P波またはS波)を発生させ、地下の速度の異なる地層境界で屈折角 $90^\circ$ で臨界屈折して戻ってきた屈折波を、地表に設置した受振器で観測し、地下の構造を求める探査法のことである。

もともと、反射法地震探査に比べて屈折法地震探査は分解能、透過深度の観点から劣る調査法である。<sup>1</sup>



<sup>1</sup> 屈折法地震探査は震源から出た波が地層境界で臨界屈折角(90度)で屈折して受振点に最初に返ってきた波(初動)の到達時間(走時)を観測する。その走時を縦軸に、震源から各受振点までの距離を横軸にした座標にプロットする(走時曲線)。走時曲線上の各層からの曲線の傾きから、各層の速度と深度を計算する。低速度層(断層等)があれば、そこからの屈折波は、下層の高速層からの屈折波が先に到達するために検出されない。したがって、各層からの反射波が観測される反射法地震探査に比べて分解能、透過深度は劣る。

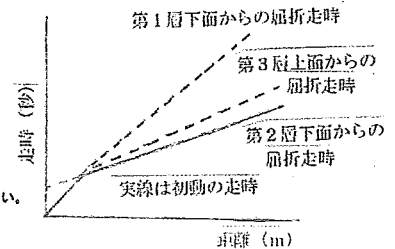
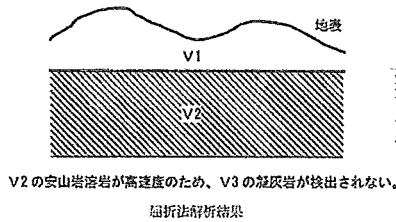
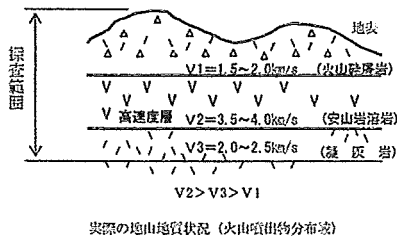
屈折法地震探査を行うに際しては、震源と受振器を直線状に配置して行うことから、直線状の測線下の情報しか得られず、かかる探査法も二次元探査法に過ぎないのであって、当該探査法によっては、地質構造及び地下構造を「三次元的な地下構造により検討」したとはいえない。

#### **イ 関西電力の行った屈折法地震探査の解析結果は、屈折法の解析結果から導き出せない内容となっていること**

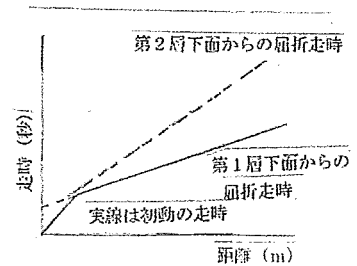
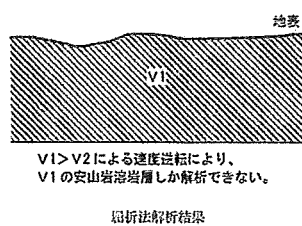
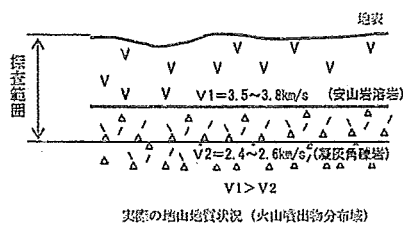
関西電力は、本件原子力発電所敷地の地下構造モデル設定のための調査として屈折法地震探査を行い、その解析結果として、「低速度帯の顕著な落ち込み等の特異な構造はない。」と結論付けている（丙第15号証・右上頁数57）。

しかしながら、屈折法地震探査においては、次頁図の例に示すように地下浅部に硬質で弾性波速度の速い地層があり、その下により遅い速度を示す地層（断層等）が存在する場合や、遅い速度の地層（断層等）が挟み込み層として存在する場合には原理的に弾性波速度の遅い地層（断層等）が全く検出されないことが生じる。

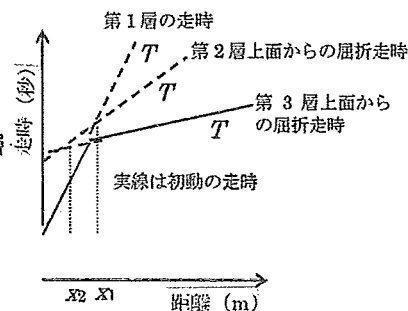
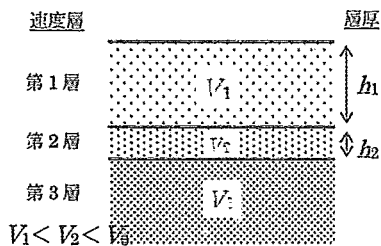
(1) 中間に相対的な高速度層が分布



(2) 相対的な高速度層が浅部に分布



(3) 深部に薄い速度層がある場合



(物理探査学会：新版 物理探査適用の手引き 2008、P22 の図に筆者が走時曲線を追加したもの。)

つまり、上図(1)に示すように、中間に高速度層がある場合や、(2)相対的な高速度層が浅部に分布する場合や、(3)深部に高速の速度層 ( $V_3$ ) がある場合には、その速い地層での屈折波が観測時に初動(弾性波が伝わった最初の波)として観測され、弾性波速度の遅い上の地層(破碎帯等) ( $V_2$ ) からの屈折波は検知されない。

したがって、屈折法地震探査では弾性波速度の遅い地層(低速度帯)である破碎帯からの屈折波は検知できないことになるから、屈折法地震探査では速度の遅い破碎帯の検出について結論付けることは不可能となる。

それにもかかわらず、関西電力は屈折法地震探査の解析結果として、「低速帯の顕著な落ち込み等の特異な構造はない。」と結論付けているのであって、かかる結論付けは関西電力が屈折法地震探査の原理的限界に基づかずに自らの望む結論を導出していると言わざるを得ない。

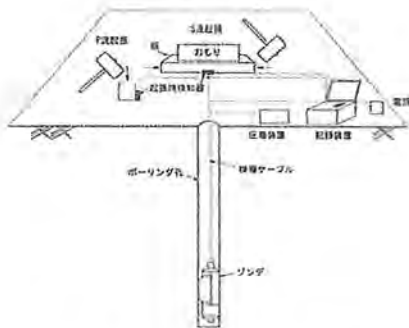
#### 4-3 PS 検層

##### ア 関西電力の行ったPS検層では地下構造の三次元的把握などできないこと

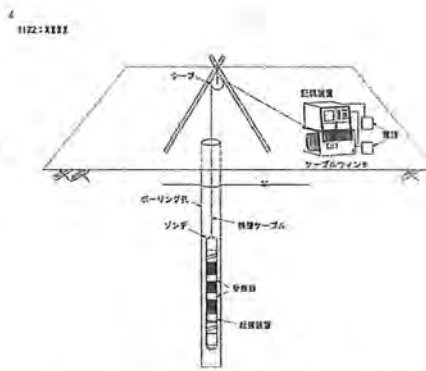
関西電力は、地下の弾性波速度(弾性波速度とは、弾性体(岩盤)の中を伝播する波動(弾性波)の速度のこと。)決定のために、PS検層を実施している。PS検層とはボーリング孔を利用して、坑井周辺の地層を伝播する弾性波(P波、S波)の深さ方向の速度分布を測定(岩盤の固さを測定)する調査方法のことであり、「ダウンホール法(孔中に受振器を適当な複数の深度に降ろし、地表から発振して孔中周囲の伝播速度を測定する方法)」と「サスペンション法(孔内起振受振方式:パルス発振器と受振器を一体化したゾンデを孔中に降ろし、孔中周囲の速度を測る方法。)」と呼ばれる2種類の調査方法がある。

なお、サスペンション法は坑井内において、例えば1m毎にゾンデと呼ばれる受振器を降ろして測定することから、ほぼ連続的にデータが測定できる。一方、ダウンホール法は坑井内において、ある深度間隔(例えば50m間隔)で受振器を設置することから、その設置箇所の制約があり、連続的にデータがとれるサスペンション法に比べて精度は劣る。





ダウンホール方式の検層装置の例

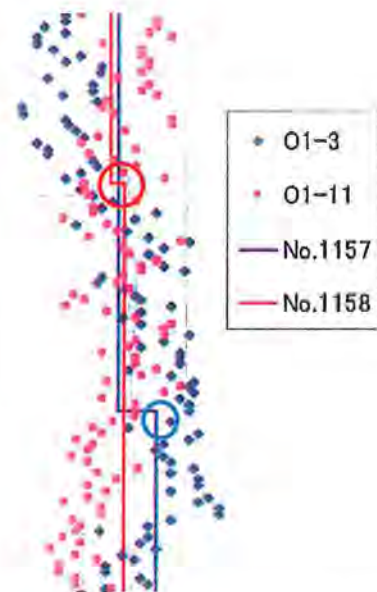


サスペンション法（孔内起震受振方式）の検層装置の例

しかしながら、P S 検層は当該ボーリング孔の位置における地下の弾性波速度を測定するもので、ボーリング孔周辺の地盤の弾性波速度の値を把握できるに過ぎない。かかる方法によっては地下構造の三次元的把握はもちろん、二次元的把握すら不可能であり、関西電力が行ったP S 検層では、地質構造及び地下構造を「三次元的な地下構造により検討」したとはいえない。

## イ 関西電力のP S 検層の結果から導いた関西電力の結論が非科学的かつ非論理的であること

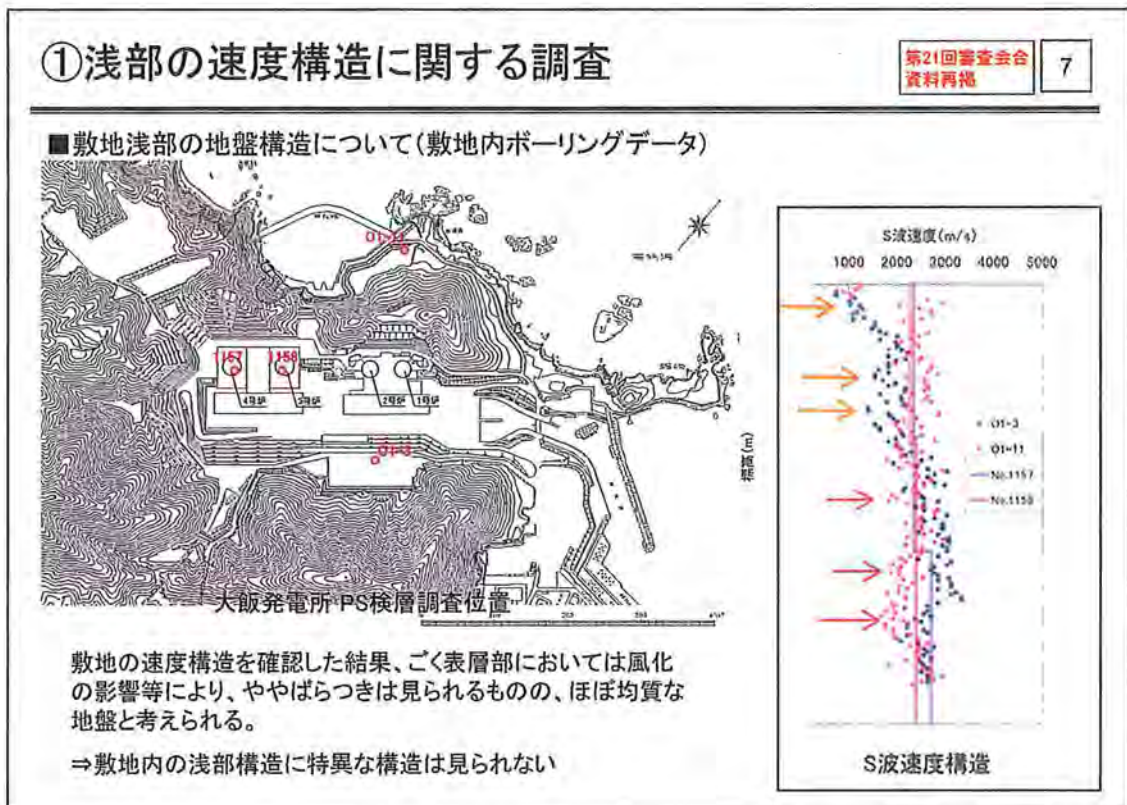
関西電力は、次頁図の01-3 と 01-11 の点においてサスペンション法で観測を行い、NO. 1157 及び NO. 1158 においてダウンホール法で観測を行っており、ダウンホール法については、次頁図「①浅部の速度構造に関する調査」の右側グラフを拡大して見る限り（右図）、ダウンホール法の調査結果を表す上下に延びる直線のS波速度の値が変わる箇所が



2 か所であることから、わずか 4 か所の深度でデータを観測しているに過ぎない（右上図は丙第 15 号証・右上頁数 7 一部拡大。○は引用者挿入）。

そして、関西電力はかかる観測結果から、「敷地浅部に  $V_s = 2.2 \text{ km/s}$  程度の硬質な岩盤が広がっていることが確認された。」と結論付けている（丙第15号証・右上頁数12）。

しかしながら、サスペンション法のデータは下図の右グラフが示す各点を見ても明らかなように相当にばらついており、また、下図右グラフ中の矢印で示す部分においてはS波速度の値が低く、低速度層が存在し、当該箇所においては破碎帯が存在する可能性があることが分かる。一方で、ダウンホール法は観測点が上述のとおり4か所と測定間隔が大きく粗いため、S波速度の数値が平均化されて、サスペンション法で見られる低速度層が現れていない。



(図の→は引用者追加)

このような観測データから、「敷地浅部に  $V_s = 2.2 \text{ km/s}$  程度の硬質な岩盤が広がっていることが確認された。」との結論を導くことは不可能なはずで

あるところ、関西電力はあえて精度が悪いダウンホール法のデータを用いて、S波速度を  $2.2 \text{ km/s}$  程度（「 $V_s = 2.2 \text{ km/s}$  程度」）と導いている。このS波速度は浅部の減衰定数（揺れが時間とともに弱まっていく程度を示す定数のこと。）の導出にも係わる重要な値であるにもかかわらず、関西電力は非科学的・非論理的な導出過程を用いていると言わざるを得ない。

#### 4-4 ボーリング

##### ア 関西電力の行ったボーリング調査では地下構造の三次元的把握などできないこと

関西電力は本件原子力発電所敷地の地下構造モデル設定のための調査としてボーリング調査を行うことで、地層の深度を把握し本件原子炉直下の地質断面図を作成している（丙第15号証・右上頁数11）。

しかしながら、ボーリング調査の結果得られる坑井データは、当該地点だけのデータを提供する一次元調査であることから、当該調査によっては、地質構造及び地下構造を「三次元的な地下構造により検討」したとはいえない。

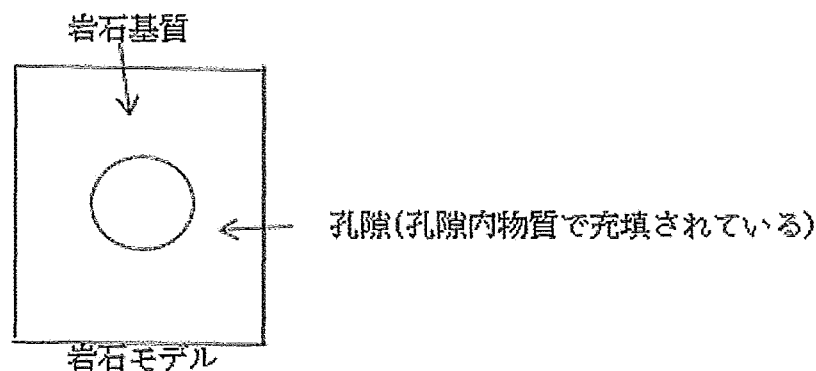
##### イ 関西電力はボーリング調査等により、岩石の硬度について結論を導いているが、かかる結論が不正確であること

関西電力はボーリング調査等のデータから作成した地下構造図に、「原子炉建屋基礎岩盤については、CM級以上の岩盤が基礎直下より確認されている。」と記載している。関西電力はボーリング調査や地表地質調査で確認された結果からこのような記載をしたものと考えられる。

しかし、岩石は岩石基質と孔隙内物質で充填されている孔隙からなり、基質と孔隙充填物質の伝播速度をそれぞれ、 $V_m$ 、 $V_f$ 、孔隙率を  $\Phi$  とすると、この岩石の弾性波平均速度  $V$  は時間平均公式から

$$1/V = \Phi/V_f + (1 - \Phi)/V_m$$

となる。この式は見掛けは硬い岩石でも、内部に孔隙や破碎帯等があればその弾性波伝播速度は孔隙率に反比例して遅くなることを示している。つまり、次図の岩石モデルのように、岩質が硬くても内部に孔隙や破碎帯などがあれば全体としてはもろくなるということである。



関西電力のボーリング調査等のデータには、岩石の孔隙についての調査結果が記載されていないこと、またサスペンション法による PS 検層の結果の低速度層の存在を無視していることを考慮すれば、関西電力の「原子炉建屋基礎岩盤については、CM級以上の岩盤が基礎直下より確認されている。」との記載は不正確なものであるといえる。

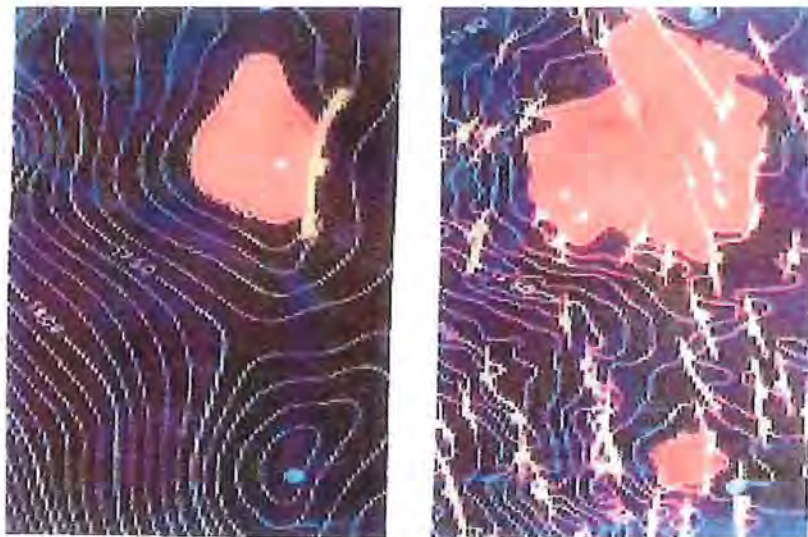
## 5 最新の地下調査技術である三次元反射法地震探査

### 5-1 三次元反射法地震探査の優位性

次頁図は同じ場所の反射法地震探査による地下構造図で、次頁図(a)は二次元探査によるデータ、次頁図(b)は三次元探査によるデータである。

二次元探査の次図(a)では、上下2つの背斜構造<sup>1</sup>(次図(a)の上部ピンク色の箇所及び下部白丸の箇所)が認められるが、下部の背斜構造は小さく、また、上部背斜構造の右側に1本の断層が認められるだけである。

一方、三次元探査の下図(b)では、上下2つの背斜構造の形が詳細になり、二次元探査の下図(a)に比べ、下部の背斜構造が明瞭になるとともに、数多くの断層が認められる。



(a) 二次元探査による地下構造図 (b) 三次元探査による地下構造図

図5 二次元と三次元反射法地震探査による地下構造図の相違

また、三次元探査の場合は、三次元探査により得られる地下構造の情報につき計算機上の処理を行うことで、三次元キュービック表示(次頁図(a))と呼ばれる表示が可能となり、任意の方向の垂直断面、任意の深度の水平断面(スライス断面(次頁図(b)))等を作成することも可能であり、背斜構造や向斜構造の深度方向の変化や断層の存在を明瞭に把握することが可能となる。

<sup>1</sup> 地層が盛り上がって褶曲し、山の形になった地下構造のこと。逆に、陥没して谷の形になった地下構造を向斜という。

さらに、三次元探査によるデータを用いて、フェンスダイアグラム(下図7)と呼ばれる図面を作成することも可能となる。フェンスダイアグラムは、特定の深度における水平方向のスライス断面上に直交する鉛直断面をフェンスのように重ねて表示したものであり、かかる図面により鉛直断面で発見された断層が水平方向にどのような形状で延びているか等が識別可能となる。

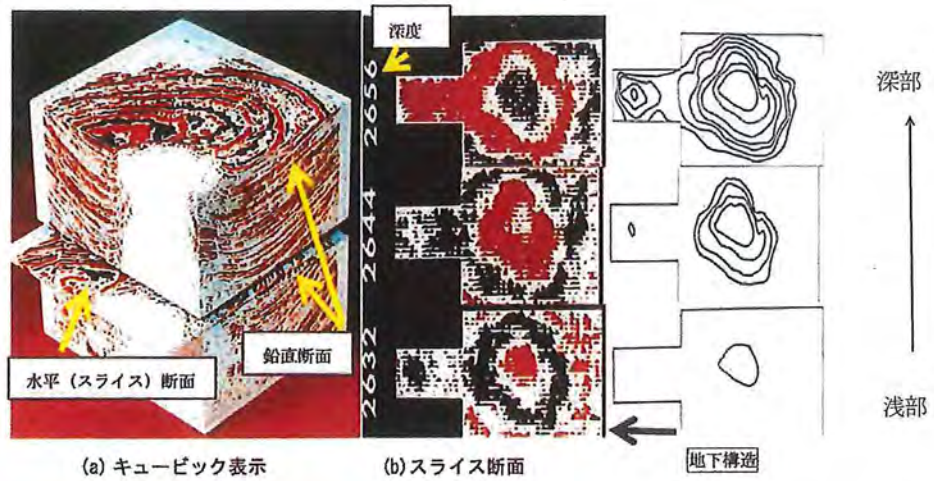


図6 三次元データの表示方法の一例

(出典：Interpretation of three-dimensional seismic data by Alistair D. Brown, AAPG Memoir 42 1986)

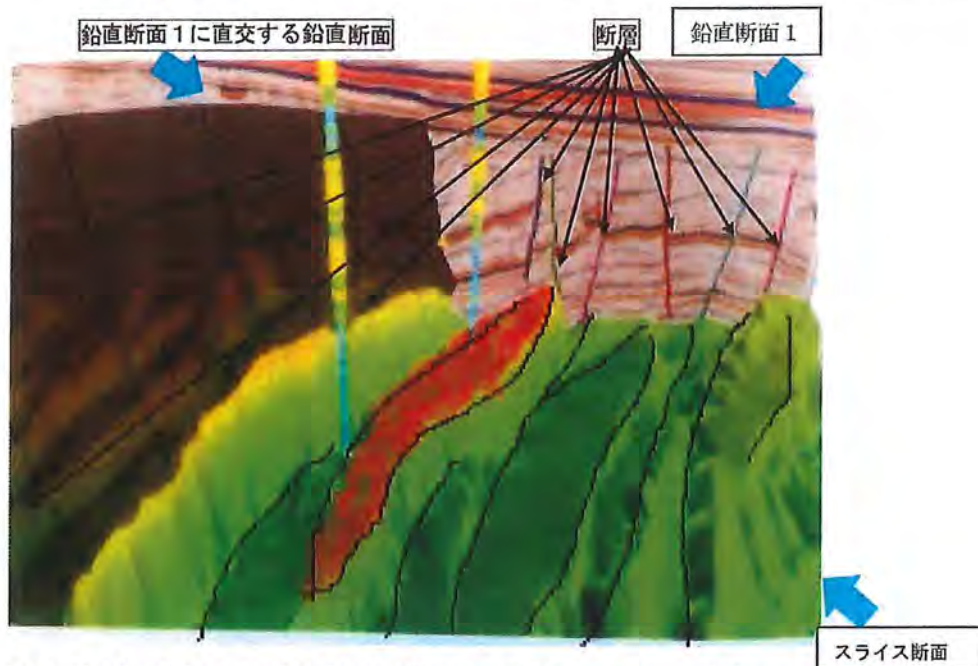


図7 三次元地震探査のデータによる地下構造 (出典：GEO Teric Software 社パンフレットに加筆)

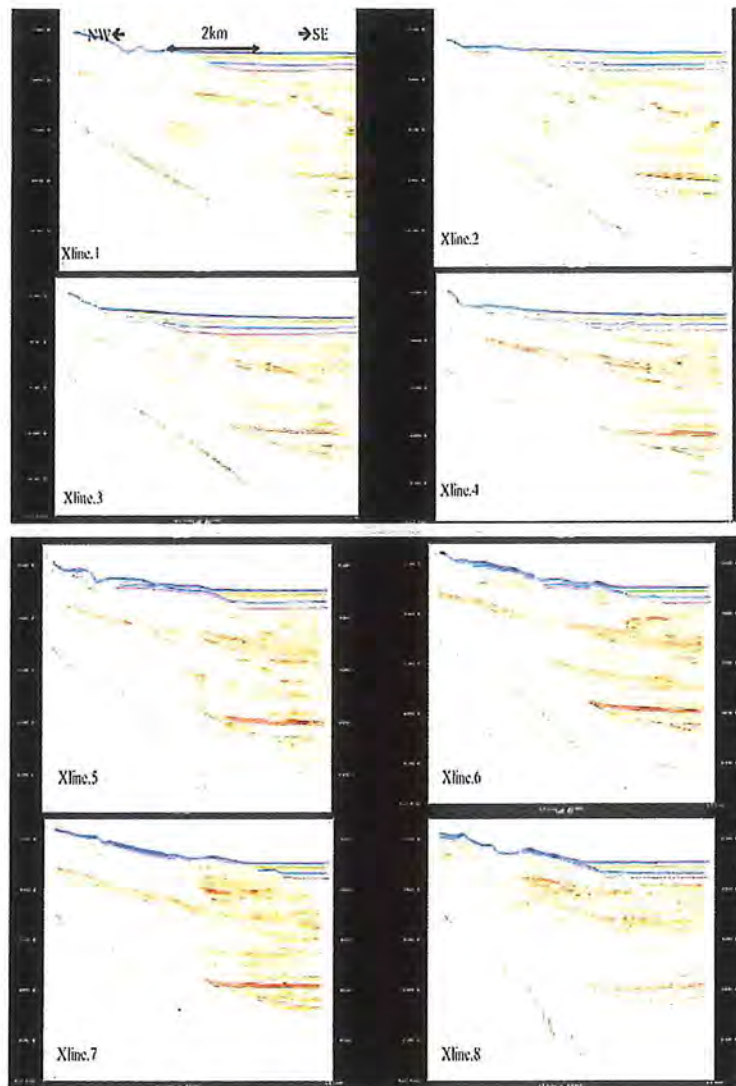
また、二次元探査では調査の前に断層の走向方向は不明のため、断層の形状を把握するのに必要な断層の走向方向に直交する記録を得ることはできない。しかし、三次元探査では反射点が調査域全域に分布しているので、必要な方向に沿った記録を集めて処理することで、任意の方向の記録断面を作成することができる。

24頁の図と25頁の図は、二次元探査と三次元探査の記録による断層の連続性の確認の比較である。これにより三次元探査による記録の方がはるかに正確に断層の連続性を容易に把握できることが理解できる。

24頁の図(a)の8枚の図面は、約500メートル間隔の8本の二次元反射法地震探査の記録を示している。これらの記録をみると、多くの断層があるのはみてとれる。しかし、それらがどのように繋がっているのかは判別が困難である。

一方で、25頁図(b)、(c)の二枚は三次元反射法地震探査のスライス断面で、図(c)は図(b)のスライス断面上で白い縞状の断層を橙色で結んだ解釈断面である。この両者の比較から二次元探査に比し、三次元探査の方がより容易に断層の連続性の確認が可能であることがわかる。

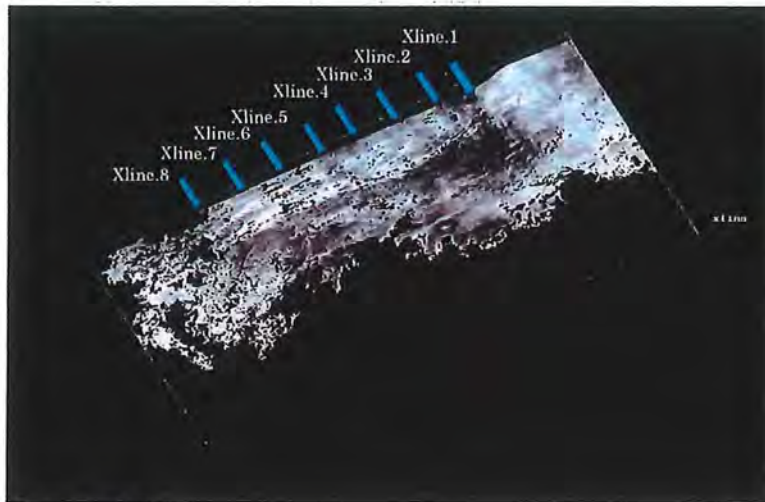
このような三次元探査の優位性からすれば、F6破碎帯等の連続性に



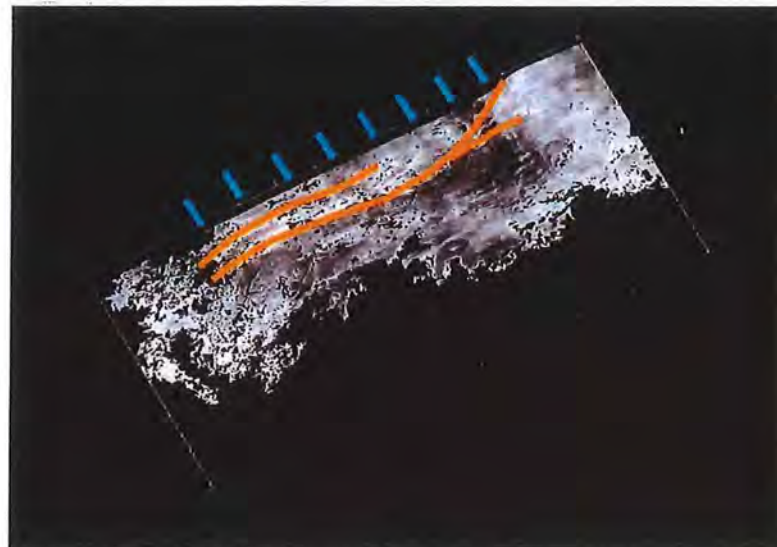
(a) 二次元反射法記録断面

についても、三次元探査を実施することにより、その位置、走向等も正確に把握できるのであるから、その調査を行うことは原子力発電所を稼働させるための最低条件であると思われる。





(b)スライス断面



(c)三次元反射法記録のスライス断面による解釈断面

以上のように、地下構造の正確な把握は、測線下の情報しか把握できない二次元探査では到底できず、三次元探査が地下構造の把握に有用であることは一目瞭然である。二次元探査を医療診断分野のレントゲン検査や超音波診断に例えれば、三次元探査は地下構造内部を立体的断面として把握できるという点でCTスキャン検査やMRI検査であり、二次元探査と三次元探査は情報量の差異、地下構造把握の容易さ等において各段の差があることがわかる。

## 5-2 実例

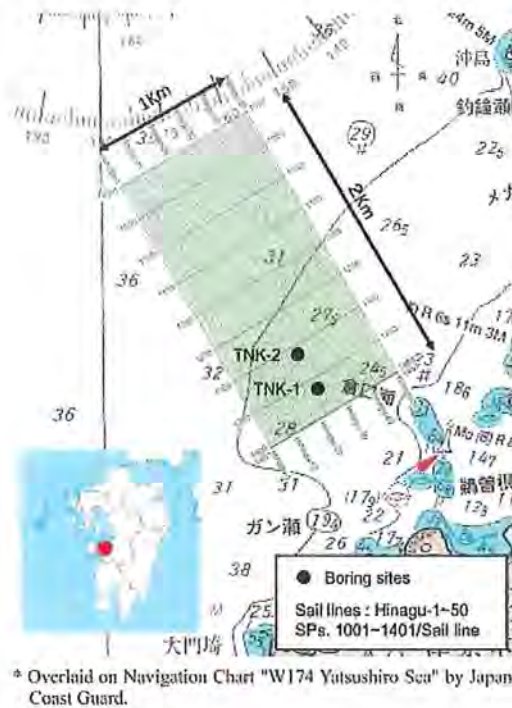
三次元探査の有効性を示すために、2016年に発生した熊本地震の後に、文部科学省による総合的な活断層調査の一環として、国立研究法人産業技術総合研究所地質調査総合センター活断層・研究部門、地震予知総合研究振興会地震防災調査研究部、(株)地球科学総合研究所が八代湾で行った海上の三次元探査の実例を示す。

海上での三次元反射法地震探査は、深海域では1980年頃から石油資源探査で行われた。経済産業省の国内石油・天然ガス基礎調査として2000年代後半から三次元物理探査船「資源」を用いて実施されてきた。浅海域用としては、海底にケーブルを敷設するOBC(Ocean Bottom Cable)が2000年頃に開発され、三次元探査が実施されている。特に2016年4月の熊本地震で活動した日奈久断層の海域延長部では、地震発生前から音波探査を主体とした海底活断層調査が実施されてきた(例えば、「楮原ほか(2011):布田川・日奈久断層帯海域部における高分解能マルチチャンネル音波探査、活断層・古地震研究報告、No.11、273-294)。

熊本地震以降は、平成28年度(2016年度)文部科学省による総合的な活断層調査の一環として海上ボーリング調査や年代測定による活断層評価が行われた(阿部ほか(2017a):日奈久断層海域延長部における海底活断層調査—海上ボーリングと高分解能マルチチャンネル音波探査に基づく活動評価—、日本地震学会2017年秋季大会予稿集)。その一環調査として、超高分解能三次元地震探査(UHR3D)による日奈久断層帯海域部における調査が2017年に実施された。その結果は、

「猪野ほか(2018):物理探査、第71巻、33-42頁」に詳細に示されている。それによると次図に示すように調査面積 $1 \times 2\text{km}$ ( $2\text{km}^2$ )、水深8~40m、調査測線20m

間隔で 50 本+補間測線 10 本、計 60 本、観測日数は日中作業のみで 6 日間であった。

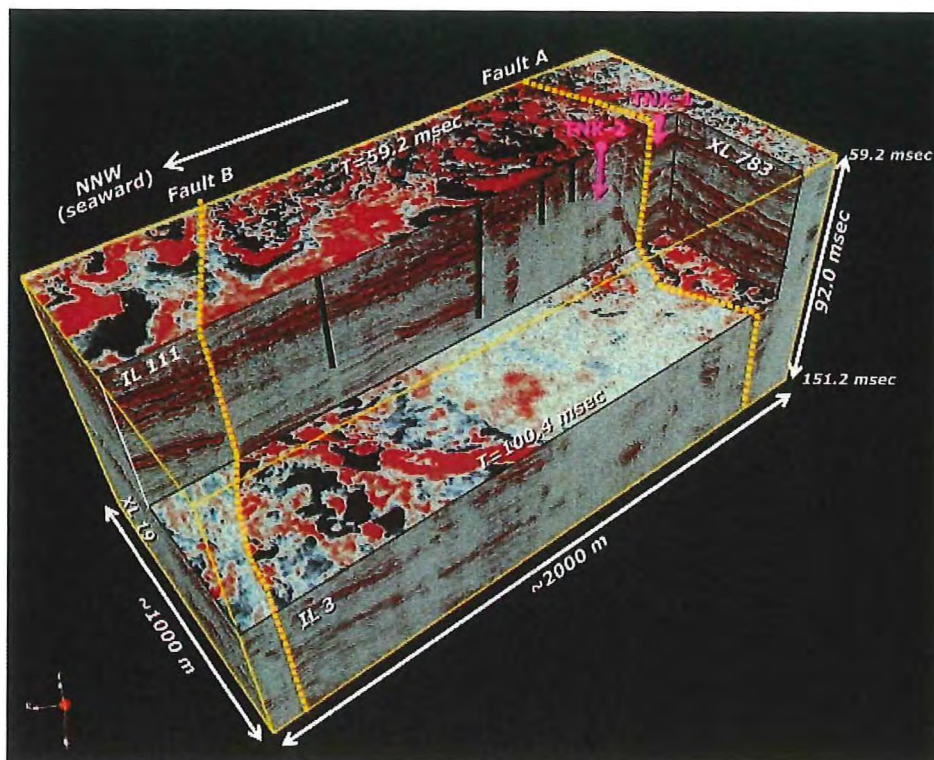


調査海域、三次元反射法地震調査測線と二本のボーリング位置

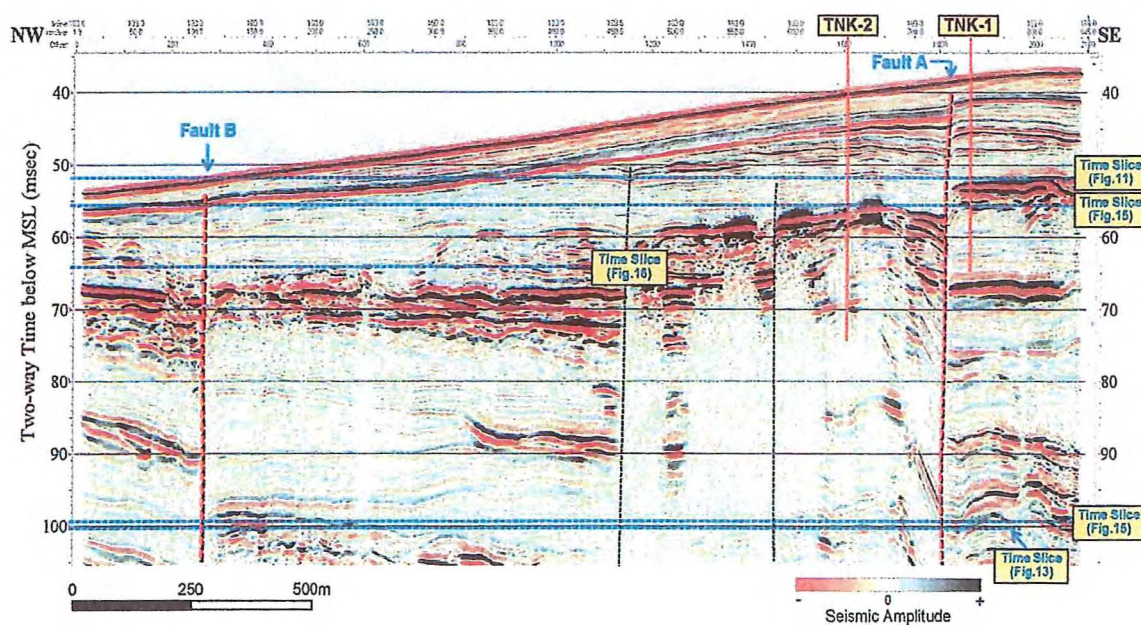
その解釈データを次頁図(a)、(b)に示す。図(a)は海面からの反射時間 59.2ms と 100.4ms におけるスライス断面と二枚の鉛直断面を組み合わせたチャープロット図面である。図(b)は坑井 TNK-1 と TNK-2 上を通る鉛直断面である。S/N 比<sup>1)</sup>の向上した垂直分解能が 0.5m と高分解能の記録がとれている。また、この記録によると Fault A と Fault B 以外にも多くの断層があるのもわかる (図 (a) に黒線で断層位置を引用者が追記)。

<sup>1)</sup> S/N 比 : 信号対雑音比 (Signal to Noise ratio)。ある時点の信号エネルギー (振幅とする場合もある) と残りのエネルギー (雑音) との比のこと。

地震探査においては S/N 比の向上が重要であり、データ取得時の多孔爆破や受振器の群設置、データ処理時における重合、各種フィルタリング処理などさまざまな手法が用いられる。雑音が無ランダムであれば、N 重合により S/N 比は  $\sqrt{N}$  だけ向上する。

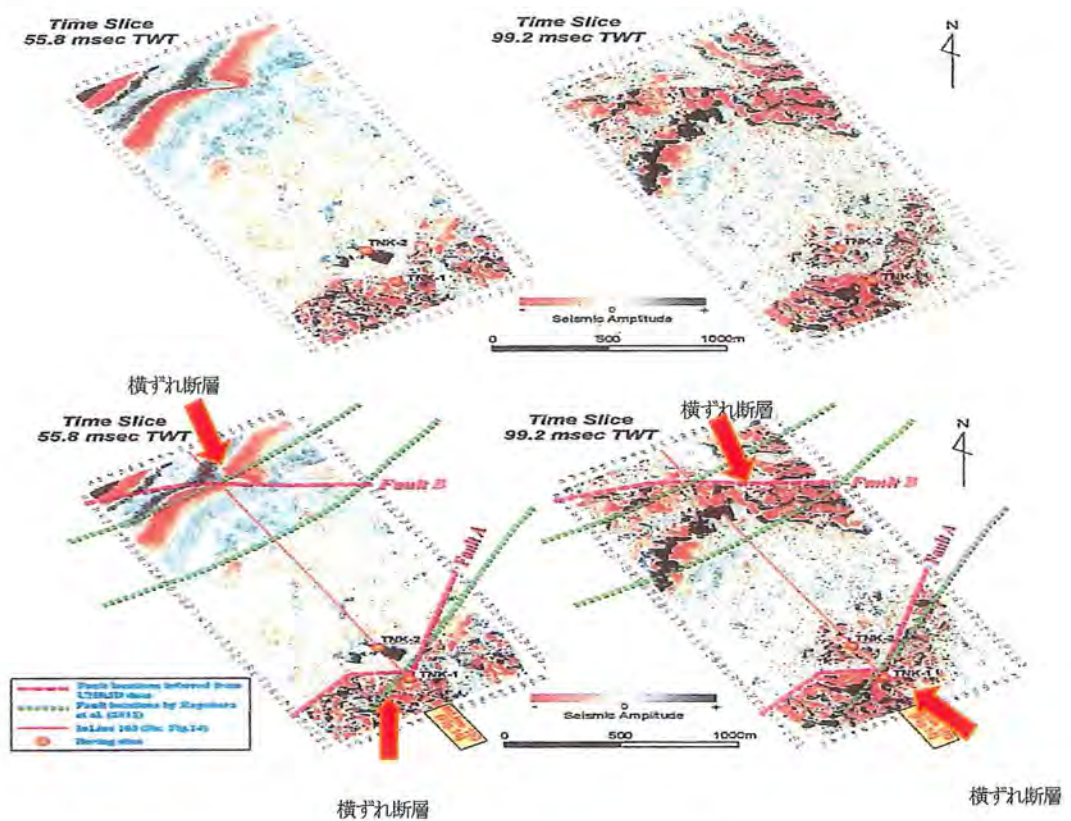


図(a) 二枚のスライス断面と二枚の鉛直断面を組み合わせたチャープロット断面



図(b) 二本の坑井を通る鉛直断面

下図の上段はマイグレーション結果の地下からの反射時間 55.8ms と 99.2ms のタイムスライス原記録で、下段はその解釈断面である。これによると Fault A と Fault B は水平方向にずれている横ずれ断層であること、及びそのずれの量がわかる。

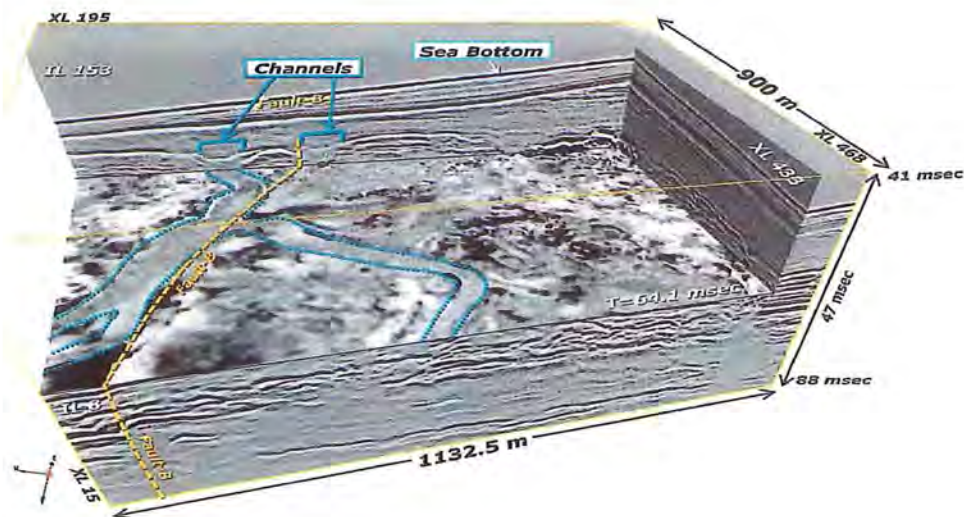


時間 55.8ms と 99.2ms のタイムスライス断面 上段は原記録、下段は解釈記録

その他、八代湾での三次元探査の結果、従来の二次元探査では直線的に把握されていた活断層が実際は鍵状に折れ曲がって連続することや、Fault B の近辺に昔の川の流路が存在したこと（次頁図は 64.1ms のタイムスライス断面で、Fault B の近辺に昔の川の流路があることがわかる。）までもが明らかになっている。

また、三次元探査の論文（猪野滋・須田茂幸・菊地秀邦・大川史郎・阿部信太郎・大上隆史：超高分解能三次元地震探査（UHR 3D）—日奈久断層帯海域部

における実施例一、物理探査第 71 巻(2018)33-42 頁) においても、「Fig. 15 から調査域の南側で明瞭な断層が認められる。その分布形態はこれまで既存文献に記載されたもの(猪原ほか、2011)より極めて複雑であり、直線状ではなく雁行状になっていることが新たに確認された。北側に認められる断層についても、従来確定されてきた走向とは異なっている。Fig. 16 は北側の断層に沿って見られるチャンネル構造を示したものであるが(Time Slice 位置は Fig. 14 参照)、このような過去の堆積環境が明瞭に確認できる。正確な断層走向の解明や、過去の堆積環境を示すチャンネル構造のような地質現象の視覚化は、二次元探査では困難であり、三次元探査により可能となるものである。」と述べられているように、これまで二次元探査では分からなかった断層の形状、断層の走向などが三次元探査を行うことで視覚化でき、明瞭に把握することが可能となる。



昔の川の流れを示す断面

以上述べたように、この三次元反射法地震探査の結果から、二次元探査に比べて三次元探査では多くの情報が正確にわかり、その優位性は明白である。

## 6 結論

- 1 大飯原発敷地には F-6 を含めて 15 個の主要破碎帯が存在するとされている。特に F-6 破碎帯は長大で、その位置および連続性の確認は重要である。しかるに、関西電力はそのために二次元反射法地震探査を二本の測線で測定をし、ボーリング調査やトレンチ調査等をしているに過ぎない。ボーリング調査やトレンチ調査は断層の存否の判定にとって重要な調査である。しかし、断層のない所にボーリングやトレンチを掘って、断層がないといわれても無意味である。したがって、三次元反射法地震探査を行い、地表地質調査、既存のボーリングデータ等を総合して詳細な地下構造形態を把握して断層の存否を確認すべきである。
- 2 特に、F-6 破碎帯については総合解釈に基づき、もっとも有効な地点にボーリングをオールコアで掘削し、木片や火山灰を採取し放射年代測定で活断層であるかを決定すべきである。
- 3 関西電力が実施した二次元反射法地震探査以外の調査の問題点を述べる。
  - ・ 屈折法地震探査は、原理的に低速度層は検知できない。しかるに、破碎帯の検出等に屈折法地震探査を実施したのは、屈折法の原理を認識していなかったのか、低速度層を検知しなくなかったからかとの疑問を持つ。
  - ・ PS 検層  
サスペンション法とダウンホール法で坑井内の S 波弾性波速度を計測しているが、サスペンション法はほぼ連続的に弾性波速度を計測できるが、ダウンホール法は数か所の深度に受振器を設置して計測する。したがって、ダウンホール法は受振器を設置した区間の平均的速度を求めることになり、サスペンション法に比べて精度は格段に劣るにもかかわらず、サスペンション法で計測された低速度層を無視して、あえて精度が悪いダウンホール法での速い S 波速度を

導出している。S 波速度は減衰定数の導出に係る重要なデータであることから非科学的な意図が伺える。

・ボーリング

参考人は地表地質調査とボーリングデータを用い、原子炉直下の地質断面図を作成しているが、地表地質は地表におけるデータであり、ボーリングは坑井内の一次元データである。この両者のデータでどうして正確な地下深部までの三次元地下構造図が作成できるのか疑問を抱かざるを得ない。これが正確な地下構造形態がわかる最新の技術であるとも主張するのであろうか？

さらに、ボーリングの調査と地表地質調査からの地下構造図に、「原子炉建屋基礎岩盤については、CM級以上の岩盤が基礎直下より確認されている」としているが、岩石基質が硬くても、内部に孔隙があれば時間平均公式で岩石の平均速度は孔隙率の値に反比例して遅くなるのであり、関西電力のボーリング調査等のデータには、岩石の孔隙についての調査結果が記載されていないことからすれば、関西電力の「原子炉建屋基礎岩盤については、CM級以上の岩盤が基礎直下より確認されている。」との記載は不正確な結論である。

4 以上のとおり、関西電力による本件原子炉敷地内活断層及び地下構造の調査は不十分であることが明らかであり、結果、本件原子炉敷地内活断層の評価には重大な疑義が残ったままとなっている。

5 このような状況で、本件原子炉は、設置許可基準規則3条3項が求める「耐震重要施設及び兼用キャスクは、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。」との要件を満たしているはずもなく、本件原子炉は設置許可基準規則3条3項に反していると言わざるを得ない。

以上