

2018年8月28日

大飯発電所の地盤構造について

赤松 純平

1. はじめに

筆者は、これまで、関西電力株式会社（以下、関電と略記）が、大飯発電所の敷地の地盤構造を、均質で堅固であると恣意的に解釈してモデル化し、以て基準地震動を過小に評価していることを、原子力規制委員会が行った新規制基準適合性に係る審査会合の資料に基づいて論証してきた[1 甲第 357 号証、2 甲第 422 号証]。

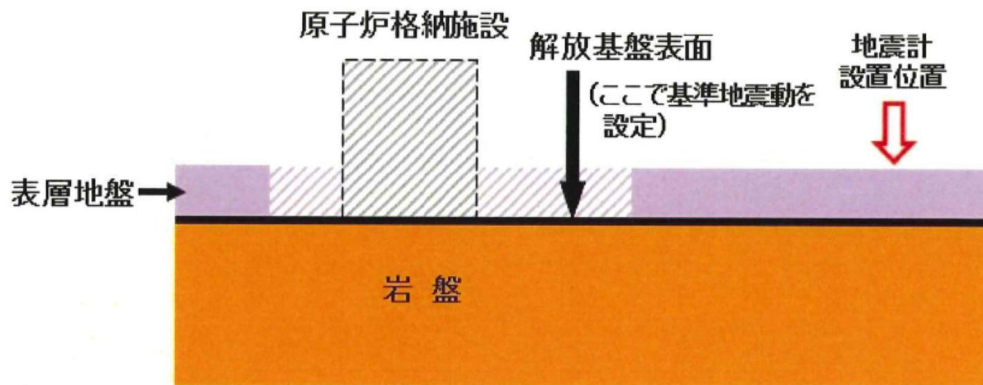
これに対して、関電は、準備書面(17) [3] において、原告らの主張に反論するとして従来通りの論をくり返し、また、原子力規制委員会が新規制基準に適合していることを確認したと主張している。関電の主張が不合理であるにも拘らず規制委員会が審査会合で承認したことについては、これまでもその問題点を指摘してきたが、関電の準備書面(17)での主張とそれらを承認した規制委員会の審査の不合理性を、いくつかの問題に絞って改めて論証する。本文中の引用文献は[番号]で示し、文献を末尾に纏めた。

2. 基準地震動評価のための地盤モデルについて

基準地震動評価のための地盤モデル（以下、評価モデル）は、地震波干渉法・微動アレイ観測から求めた位相速度の逆解析（インバージョン解析）によって、深さ 4km まで 16 層からなる水平成層速度構造モデル（以下、インバージョン・モデル）を推定し、第 1 層と深部の第 13～15 層を除いて評価モデルとした[4]。深部の 3 層を割愛したのは、地震発生層上端を 4km から 3km に変更したためと説明されている。

インバージョン・モデルの第 1 層は $V_p=2.0\text{km/s}$ 、 $V_s=0.5\text{km/s}$ 、第 2 層は解放基盤の速度としている $V_p=4.6\text{km/s}$ 、 $V_s=2.2\text{km/s}$ である（ V_p : P 波速度、 V_s : S 波速度）。軟弱な第 1 層を割愛することについて、第 89 回審査会合では「計算というか、これは、もちろん、観測の位相速度を合わせるためのもので、解放基盤から上の地盤の情報が入った観測値を設定するモデルでございます。当社の基準地震動をつくる時は、当然、この 500m/s 分は、地盤モデルからカットして、ここから下で計算するという、そういう考え方になっています」と、数値計算上の処理であり、解放基盤の速度を $V_p=4.6\text{km/s}$ 、 $V_s=2.2\text{km/s}$ とすることが前提であると説明した[5]。

関電は準備書面(17)で、「そもそも本件発電所の原子炉建屋は、地震波干渉法と微動アレイ観測において地震計を設置した軟らかい表層地盤が存在する場所ではなく、そのような軟らかい地盤を取り除いた固い岩盤（図表6の「解放基盤表面」、本件発電所においてはS波速度2.2km/sである）に直接設置されている」と述べて、下の図1に示すような模式図を提示した。



【図表6 本件発電所の解放基盤表面の模式図】

図1. 関電が提示した解放基盤の模式図 準備書面(17)を引用.

ところで、地震波干渉法と微動アレイ観測では、地震計を設置した地表面に起伏があり、地下の構造が不均質で不整形な地盤であっても、位相速度が求まる。微動をレーリー波（地表面を横方向に伝播する表面波の一種）と仮定しており、波長の長い（周期の長い、周波数の小さい）レーリー波は、波長よりスケールの小さい構造の不均質を乗り越えて伝わる。波長の短い（周期の短い、周波数の大きい）波は、表面の起伏に沿うように伝わる。レーリー波の位相速度の逆解析で求まる構造モデルは、表面の標高は観測点の標高の平均値となる。

観測された位相速度を図2（次頁）に引用する。波長の一番短い周期0.5秒では、位相速度は約1.4km/sである。 $[\text{速度}] = [\text{波長}] \times [\text{周波数}]$ 、すなわち $[\text{波長}] = [\text{速度}] \times [\text{周期}]$ であるから、最も短い波長は約700m（ $1.4\text{km/s} \times 0.5\text{s}$ ）である。微動アレイ観測の地震計は、半径300m、600mに配置されおり、観測された波の波長はアレイ半径の数倍以上であり、全ての周期範囲にわたって、地震計の標高（地表面の起伏）は平均化される。インバージョン・モデルの表面は、地震計の平均標高となる。

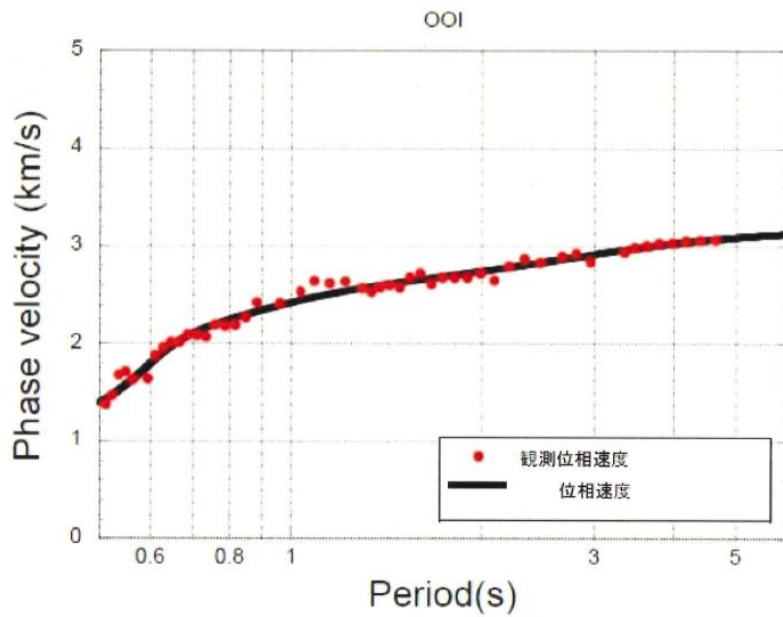
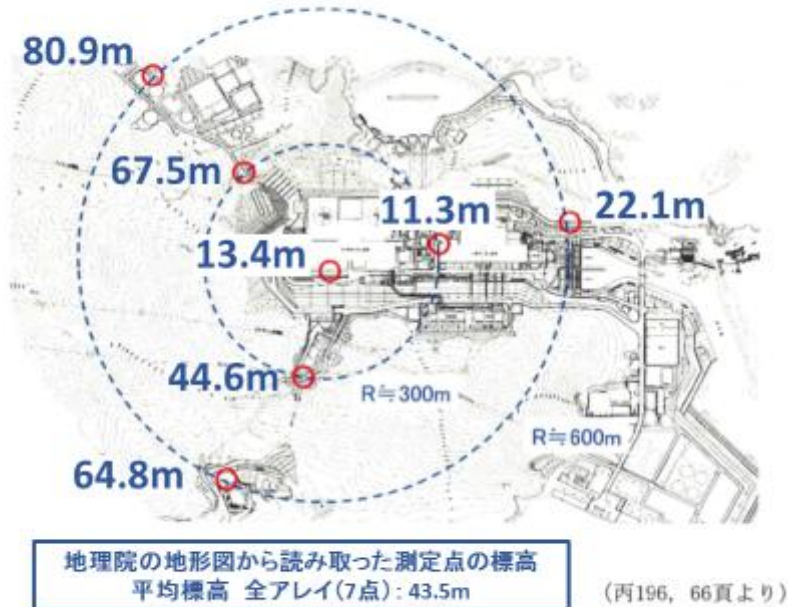


図 2. 地震波干渉法と微動アレイ観測による位相速度

赤:観測値、黒:インバージョン・モデルによる理論値 準備書面(17)の図表 5 を引用

図 3 に、微動観測点の標高を国土地理院の地図で読み取って示した。標高は 11m～80m と約 70m の高低差がある。全観測点 7 点の平均標高は 43.5m である。すなわち、インバージョン・モデルの表面の標高は 43.5m である。

■大飯発電所敷地内で半径約600m・300mの微動アレイ観測を行う。

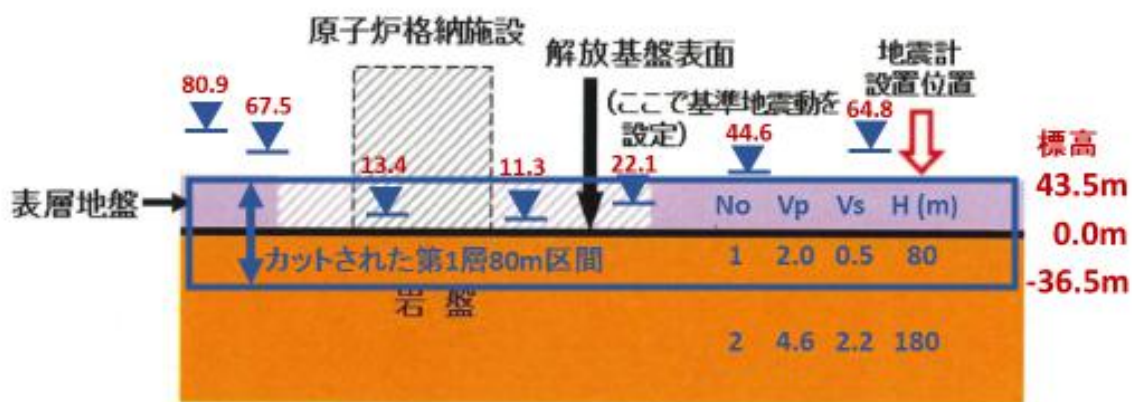


【図表 4 微動アレイ観測のための地震計の設置位置】

図 3. 微動アレイ観測の観測点の標高.

標高は、国土地理院の地図・空中写真閲覧サービスを利用 準備書面(17)の図表 4 を引用加筆.

下図（図4）は、関電が描いた解放基盤の模式図に、地震計の標高とインバージョン・モデルの層序を追記したものである。インバージョン・モデルの第1層上面は地震計設置位置と記された表層地盤の表面で、標高は観測点の平均標高である43.5m。第1層の層厚は80mであるから、第2層上面の標高は-36.5mとなる。第1層は土質地盤であるとしてカットすると、原子炉格納施設は解放基盤の $V_s=2.2\text{km/s}$ 層から、36.5mも宙に浮いてしまう。原子炉建屋基礎に $V_s=2.2\text{km/s}$ より低い速度の岩盤層が分布していることが、各種の地盤調査によって明らかにされているにも拘わらず、 $V_s=0.5\text{km/s}$ から $V_s=2.2\text{km/s}$ にジャンプするモデルを設定したことによる齟齬が露呈した。



【図表6 本件発電所の解放基盤表面の模式図】

図4. 微動アレイ観測による解放基盤の標高

▼：各地震計の標高、この平均標高は43.5m.

第1層（表層地盤）80m厚をカットすると、第2層（解放基盤相当）の標高は-36.5m.

準備書面(17)の図表6を引用加筆

3. 地震波伝播速度の異方性

地震波伝播速度の異方性とは、地震波の伝播方向の違いによって地震波速度が変化する現象である。岩盤などの媒質の弾性係数が方向に依らない等方性に対し、結晶構造などによって方向に依存する場合を異方性と云う。弾性の異なる等方性の媒質が層構造をしていたり（ラミネート構造）、多数のクラックがある方向に卓越して並んでいたりすると、特定の周波数帯の地震波に異方性が現れることがある。異方性があると、地震波が偏倚して伝播したり、特定の方向の震動が卓越したりすることがある。

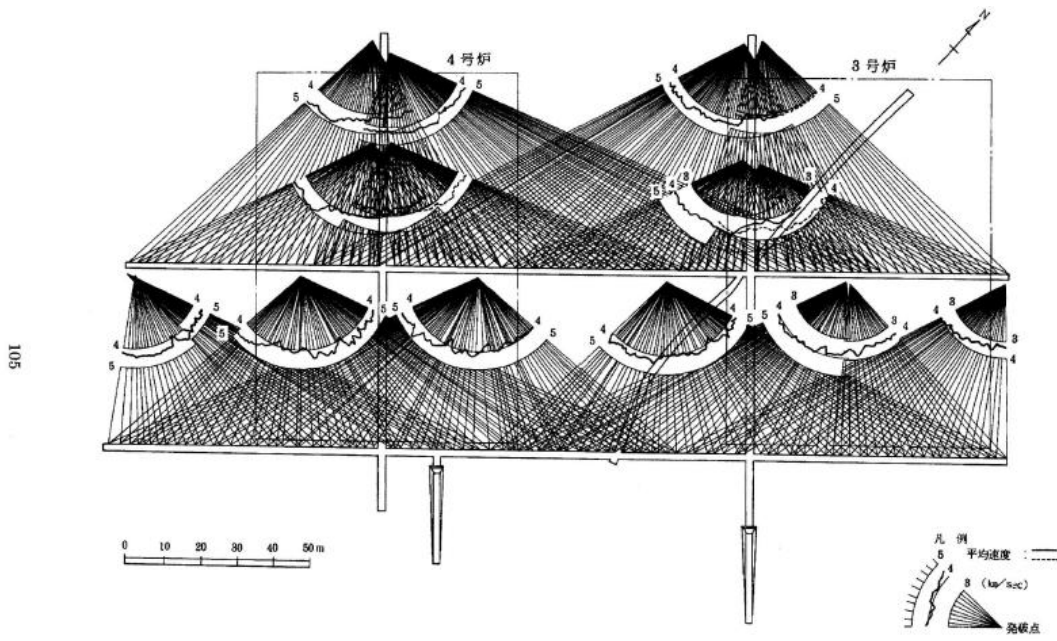
関電は、大飯発電所 3、4 号機の地震等に係る新基準適合性審査に関する事業者ヒアリング(65) (平成 28 年 2 月 23 日)において、速度の異方性の有無を次のように報告している。「試掘坑内の平均速度法(坑間弾性波探査のこと)による弾性波試験結果は、第 5.110 図に示すように P 波速度は 3.0km/s~5.2km/s で平均値 4.3km/s、変動係数 7.0%である。一方、互いに直交する坑道沿いの屈折波法弾性波速度の測定結果では、NW-SE 方向の P 波速度は 3.5km/s~5.0km/s、平均 4.7km/s、S 波速度は 1.8km/s~2.5km/s、平均 2.3km/s、NE-SW 方向の P 波速度は 3.0km/s~5.3km/s、平均 4.5km/s、S 波速度は 1.3km/s~2.8km/s、平均 2.1km/s であり、弾性波速度による異方性はほとんど認められない[6]」。関電は、坑間弾性波探査の結果については異方性を検討せず、NW-SE 方向と NE-SW 方向の屈折法探査結果のみを比較して異方性はないとしている。

試掘坑内の坑間弾性波探査の結果([7] 第 5.110 図)は、次頁に示す図 5 のように、発破点と地震計とを結ぶ扇状の波線上に、波線に沿う P 波平均速度(発破点と地震計間の区間速度)を円形グラフとして表してある。4 号炉の左上のグラフの速度スケールは 4~5km/s であるが、3 号炉の右下のスケールは 3~4km/s である。一瞥して 4 号炉側に比べ 3 号炉側の速度が小さいことが判る。関電の資料にはこのような図が 4 枚示されている。それらのグラフから P 波速度値、波の伝わる方向を読み取った。読み取ったデータ数は 1,378、値は 3.0km/s~5.0km/s の広い範囲に分散しており、その算術平均は $V_p=(4.253 \pm 0.340)\text{km/s}$ である。

図 6 は読み取った全ての波線を、読み取った P 波平均速度で彩色表示した図である。5.0km/s を濃緑、4.0km/s を黄、3.0km/s を赤とし、その間をカラースケールで示すように色分けして示した。速度値は波線が示す区間全体の平均速度であるにも拘らず、場所による違いが明瞭である。

図 7 は、読み取った P 波速度値を発破点から地震計に向かう波線方向に直接プロットした円形グラフである。中心位置が 3.0km/s、外周が 5.0km/s であり、南北方向と東西方向とで速度の分布傾向が異なる。

図 8 に、読み取った P 波速度を方位 10 度刻みで平均した値を示す。180 度反対方向に進む波は同じ方位区分として平均した。中心を 3.7km/s、外周を 4.5km/s として示してある。この平均値の図から、P 波平均速度の方位依存性が明瞭である。概ね南北方向で最大 4.45km/s、東西方向で最小 4.00km/s であり、東西方向の速度が 1 割程度小さい。関電は、異方性が相殺される NE-SW 方向と NW-SE 方向の屈折法探査の結果だけを示して、異方性はないと主張している[6]。



第 5.110 図(1) 試掘坑内坑間弾性波探査 (平均速度法) 結果図 (その 1)

図 5. 試掘坑坑間弾性波探査.

発破点から地震計に至る波線上に、P 波平均速度を円形グラフで表す.

P 波平均速度は 4 号炉側で 4~5km/s、3 号炉側で 3~4km/s

[7] 105 頁の図を引用.

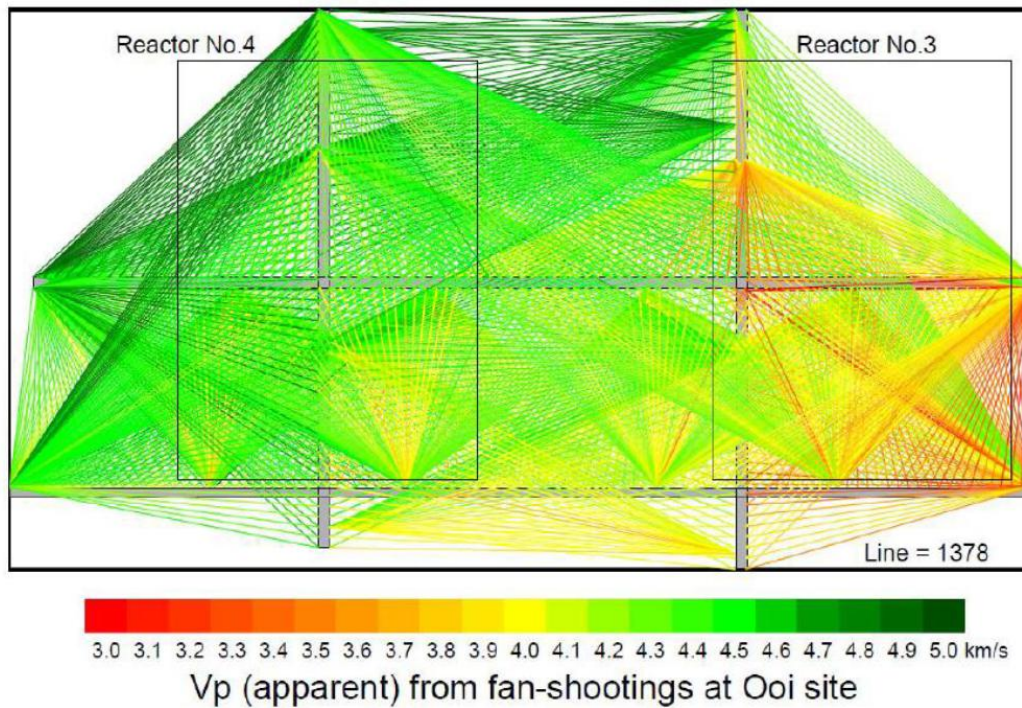


図 6. 坑間弾性波探査波線の坑間 P 波速度による彩色表示.

敷地西側 (図の左上) から東側 (右下) へ速度は低下. 3 号炉側での低速度が顕著である.

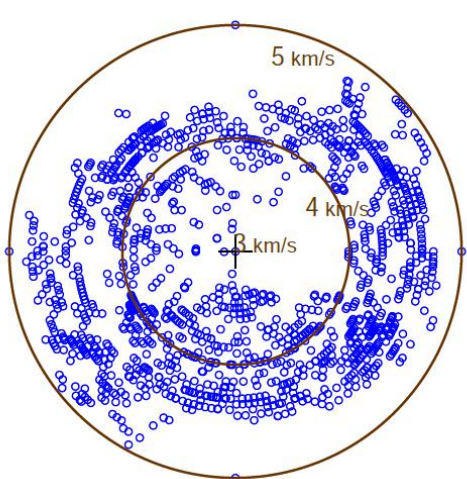


図7. P波速度の伝播方向依存性.
読み取ったP波速度を発破点から地震計に向かう方位にプロット.

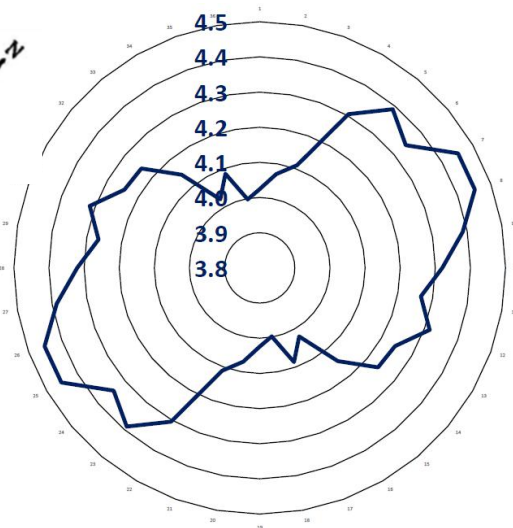


図8. 方位10度刻みでの平均のP波速度.
図7の速度値を、180度反対方向に伝わる波は同じ方位区分として平均.

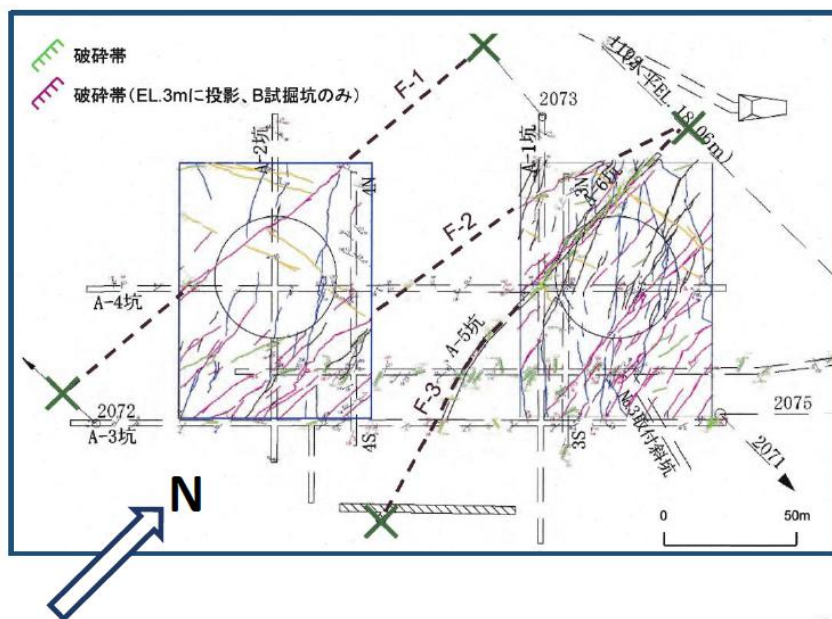


図9. 3、4号炉建屋基礎岩盤における断層破砕帯の分布. [8] 27頁の一部を引用.

図9は、原子炉建屋基礎岩盤における断層破砕帯の分布図である[8]。断層破砕帯の走向方向は、概ね南北方向であり、図8に示されたP波速度の異方性の方向と相関が高い。また、4号炉直下に比べ、3号炉直下の方が破砕帯の分布密度が高い。図6に示された速度の地域的な不均質性は、断層破砕帯の分布密度に起因していることが示唆される。次頁の図10に、速度の不均質性がさらに明瞭なコンター図を示す。

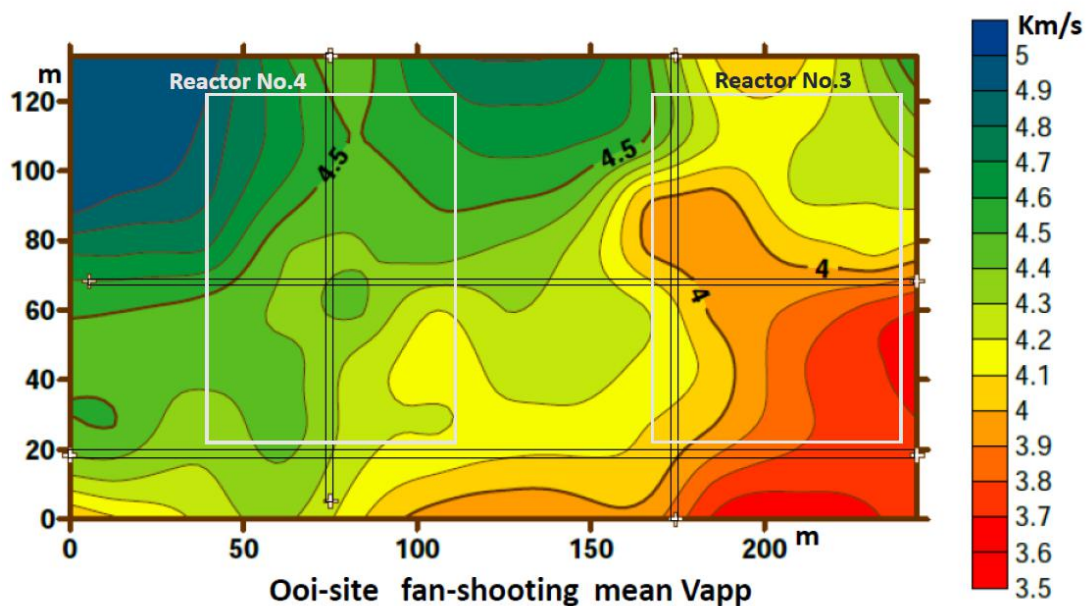


図 10. 原子炉建屋基礎岩盤の P 波平均速度の分布.

敷地西側（図の左上）から東側（右下）へ速度は低下.

3号炉直下には、4km/s 以下の速度帯が東側から延びている。

速度の不均質性は、図 9 に示される断層破碎帯の分布密度に起因する。

4. はぎとり法解析結果について

関電は、反射法地震探査の記録を用いて、屈折法解析のはぎとり法解析を行い「やや深部を伝わる平均的な最下層速度は、A 測線で約 4.5km/s 程度、B 測線で約 4.8km/s 程度であった」と記している[9]。はぎとり法解析は、表層の軟らかい（速度の小さい）地盤の厚さが場所によって変化している場合に、その厚さを場所ごとに求める方法であり、表層の速度と厚さ、下層の速度とが求まる。下層の速度だけを示し、表層の速度と厚さを示さないのは、自らに都合のよいデータのみを断片的に取り上げていることになる。

関電が示した A 測線の走時曲線を用いて、はぎとった表層の速度と厚さを計算した[2]。その際、表層の平均速度 1.9km/s としたのは、筆者の作図の間違いで、やり直したところ図 11 に示すように 1.1km/s（青破線）と求まった。原子炉建屋付近では、はぎとり曲線（赤線）からの観測走時の遅れは約 60ms（ミリ秒、青矢印）であるので、はぎとった表層の厚さは約 66m、すなわち「最下層」とされている 4.5km/s 層の深さは約 66m である。測線が展開されている地表面の標高は 30~40m であるので、「最下層」4.5km/s 層の標高は -26m~-36m である。関電は、解放基盤を標高 0m に設定し、

その速度を $V_p=4.6\text{km/s}$ としているが、はぎとり法解析の結果とは 30m もの違いがある。標高 0m の解放基盤は、平均速度 $V_p=1.1\text{km/s}$ の表層の中にあることになる。

図 12 は、反射法地震探査記録の屈折法解析による速度分布図[9]に、はぎとり法解析による 4.5km/s 層の上面の位置を記入したものである。関電は、「屈折法解析結果より、表層から 50m 程度で弾性波速度は 4km/s 以上となる。低速度帯の顕著な落ち込み等の特異な構造はなく、地下構造は水平方向に連続的である[9]」と記している。しかし、原子炉建屋付近では、 2.5km/s 以下の低速度帯が標高 -30m 付近にまで落ち込んでおり、はぎとり法解析の結果とも調和する。すなわち、原子炉建屋付近では、標高 0m 付近に $V_p=4.6\text{km/s}$ の解放基盤を設定することは不可能である。

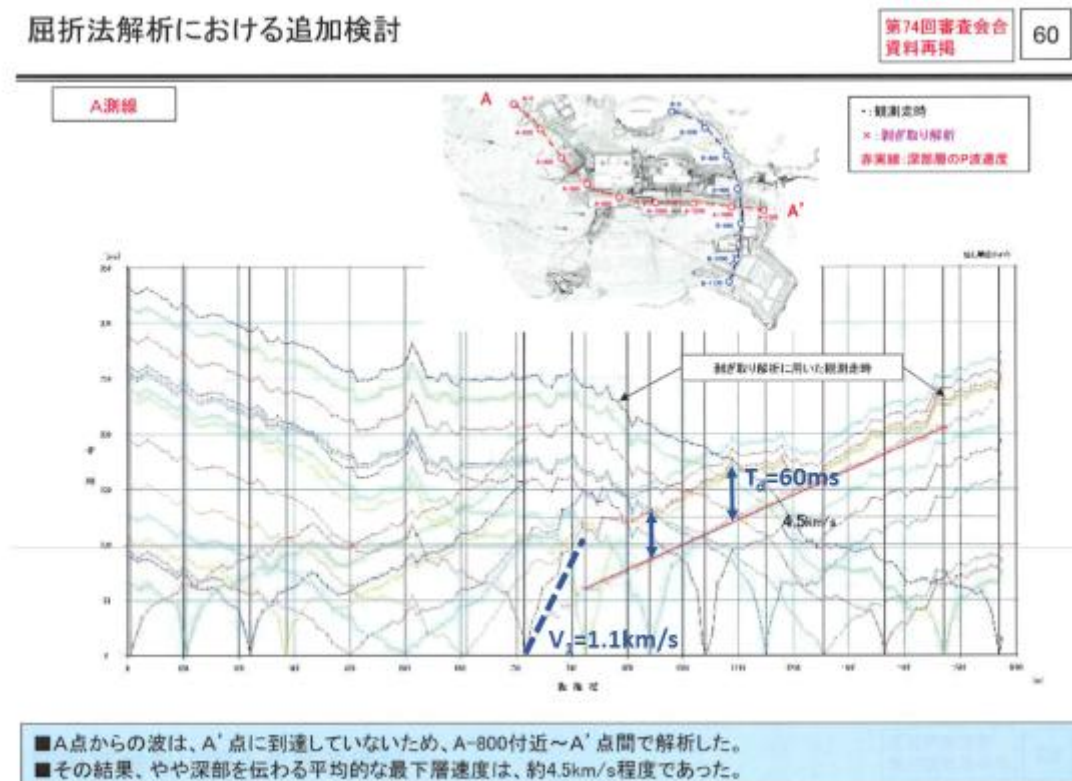


図 11. はぎとり法解析.

赤線: はぎとり曲線で、下層の地震波速度 $V_p=4.5\text{km/s}$ を表す.

青破線: はぎとった表層の平均速度、 $V_p=1.1\text{km/s}$

青矢印: 表層による走時のおくれ.

[9] 60 頁を引用、加筆.

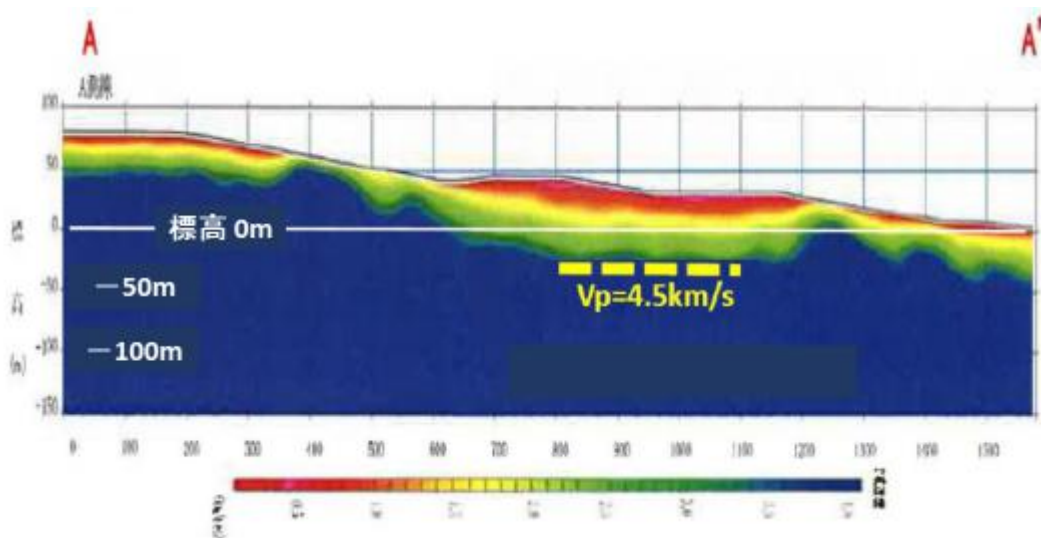


図 12. はざとり法解析による最下層 ($V_p=4.5\text{km/s}$ 層) 上面位置 (黄破線).

はざ取った表層の厚さは 66m、平均速度は $V_p=1.1\text{km/s}$

屈折法解析の速度分布では、標高 -30m まで 2.5km/s 以下の速度層が落ち込む

原子炉建屋付近では、標高 0m の解放基盤は $V_p=4.6\text{km/s}$ ではない。

[9] 57 頁を一部引用、加筆。

5. まとめ

本論では、大飯サイトの地盤構造について、(1) 地震干渉法・微動アレイ観測による地盤モデル、(2) 地震波伝播速度の異方性、(3) はざとり法解析結果に的を絞って、関電がこれらの調査結果を恣意的に解釈し、あるいは不都合なデータを無視するなどして、均質で堅固な地盤モデルを捏造し、以て基準地震動を過小に評価していること、これを原子力規制委員会は見過ごして、新規制基準に適合していると誤って確認したことを指摘した。指摘した内容を以下に纏める。

(1) 地震干渉法・微動アレイ観測による地盤モデル

各種の調査結果 (PS 検層、試掘坑弾性波探査、反射法地震探査屈折法解析、単点微動観測(H/V)など、) が原子炉建屋の立地する標高 0m の基礎岩盤の速度が、関電が主張する解放基盤の速度 $V_p=4.6\text{km/s}$ 、 $V_s=2.2\text{km/s}$ より大幅に低いことを示しているにも拘らず、位相速度の逆解析によって、標高 0m を解放基盤とする基準地震動評価用地盤モデルを作成した。その結果、原子炉建屋の 30m 以上も下方に解放基盤相当層が存在することになった。

観測サイト位相速度は、地表面の起伏や地盤構造の不均質に拘わらず測定される。観測位相速度の逆解析は、成層構造モデルを前提に行われるので、解析結果は不均質構造を否定するものではない。審査ガイドでは地下構造における不確かさの分析を適切に行うことを要求している[10]が、観測位相速度の不確かさ（観測と解析誤差）の評価が行われていない、求まった地盤モデルの妥当性および信頼性を検証するための、モデルと反射法地震探査の反射深度断面（反射層の深さ）、その解析で求まる速度分布（関電は公開していない）などとのクロスチェックが行われていない。規制委員会はこれらを審査すべきである。

(2) 地震波伝播速度の異方性

関電は、原子炉建設前に試掘坑弾性波探査を実施している。その試掘坑に沿う屈折法探査結果についてのみ解析結果を示し、原子炉建屋の基礎岩盤は均質で堅固な岩盤であり、地震波速度の異方性はないと主張している。同時期に、坑間弾性波探査が行われているが、そのデータは解析されずに図示されているだけで、審査会合では議論されていない。このデータを読み取って分析したところ、原子炉建屋敷地の基礎岩盤では、P波速度は西から東に系統的に低下し、3号炉直下ではP波速度は4.0km/s以下であること、地震波速度に異方性があること（南北方向に比べ東西方向が小さい）、さらに、これら地震波速度の不均質性は基礎岩盤に存在する断層破碎帯の分布密度と走向方向に依存していることが明らかになった。坑間弾性波探査のデータは、事業者ヒアリングの資料には掲載されているが、審査会合では説明されていない。関電は、不都合なデータを隠蔽している。規制委員会はこの事実を見逃している。

(3) はぎとり法解析結果

関電は、反射法地震探査の記録を用いて、屈折法解析のはぎとり法解析の結果「やや深部を伝わる平均的な最下層速度は、A測線で約4.5km/s程度、B測線で約4.8km/s程度であった」しているが、最下層に至る表層の速度、やや深部の深さは示していない。原子炉建屋に近接するA測線の走時曲線を分析して、表層のP波速度は約1.1km/sで厚さは約66m、 $V_p=4.5\text{km/s}$ の「最下層」の標高は-30m程度であることが判った。同じデータソースを用いているのであるから当然のことであるが、4.5km/s層の深さが標高-30mであることは、関電の屈折法解析による速度分布図と整合する。解放基盤を $V_p=4.6\text{km/s}$ として標高0mに設定することは到底不可能である。

関電の各種調査データは、共通して、原子炉建屋の基礎岩盤の地震波速度が、基準地震動評価用の地盤モデルとは大きく異なって低速度であり、不均質であることを示している。新規制基準が求めるように、3次元構造を評価したうえで地盤構造モデルを策定しなければならない。

引用文献

- [1] 甲第 357 号証、赤松純平、大飯発電所基準地震動の策定における問題点 ― 地盤の速度構造(地盤モデル)について ―、2017 年 4 月 17 日.
- [2] 甲第 422 号証、赤松純平、大飯発電所基準地震動策定における問題点 ―地盤構造モデルについて―、2018 年 1 月 9 日.
- [3] 関電、準備書面(17)、平成 30 年 5 月 29 日.
- [4] 関電、第 113 回審査会合 資料 3-1 高浜発電所・大飯発電所 地下構造評価について (コメント回答) 平成 26 年 5 月 16 日.
- [5] 原子力規制委員会、第 89 回審査会合議事録 (78 頁)、平成 26 年 3 月 5 日.
- [6] 甲第 468 号証 関電、大飯発電所 3、4 号機の地震等に係る新基準適合性審査に関する事業者ヒアリング(65) 資料：大飯 3、4 号炉 設置許可基準規制等への適合性について(地盤) (159 頁)、平成 28 年 2 月 23 日
- [7] 丙第 178 号証 関電、上記事業者ヒアリング(65) 添付資料六 (105～108 頁)
- [8] 関電、第 332 回審査会合 資料 1-2-1 大飯発電所地盤 (敷地の地質・地質構造) について (27 頁)、平成 28 年 2 月 19 日.
- [9] 甲第 474 号証 関電、第 89 回審査会合 資料 3 大飯発電所の地盤モデルの評価について (60～63 頁) 平成 26 年 3 月 5 日.
- [10] 丙第 28 号証 原子力規制委員会、基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド、平成 25 年 6 月.