

2008・7・22

## 中越沖地震が明らかにした原発耐震指針の問題点

正協謙次

### 1. はじめに

2007年7月16日のM6.8の中越沖地震は柏崎刈羽原発（7機）から震央距離16km、震源距離23kmに発生したが、運転中の原発が速やかに停止したことは不幸中の幸いであった。もし、不幸にも1機の原発でも損傷が起きていたら、大変な事態をひきおきしていたかも知れないことを考えると、人々の心を震撼させるに十分な出来事であった。と同時に、そこから得られる多くのデータには、関係者は大変注目しており、IAEAからも詳細なデータの公開をすばやく指摘された。ほぼ1年経過し、この間、多量のデータが公開され、検討結果も頻繁に報告されるようになったので、これらの報告書を柏崎刈羽原発の耐震構造の健全性、また、原発耐震設計に与えた影響について検討する資料としてここに記述します。なお、広い分野にわたり検討されているが、すべてを話すには時間的にも無理なので、主として、耐震設計が今後どのように変わりうるかという点について公表されたデータをもとに検討する。なお、多くの資料は監督官庁のHPに公表されているので、それを詳読していただければ、中越沖地震が耐震設計指針に与えた影響について理解されるでしょう。

### 2. 原子炉停止と制御棒の損傷

当日、運転中の2号機（未臨界）、3号機（定格出力）、4号機（定格出力）、7号機（低出力運転）は、地震発生 of 信号を受信してスクラムにより自動停止に入り、1秒弱（設計値1.62秒、1.44秒）で全制御棒は挿入された。信号発信後、2秒後に全制御棒挿入信号を確認しているが、4号機でスクラム時間記録計が故障しており、記録は存在しない。相変わらず、計測器の未整備という問題が残る。なお、制御棒の挿入時間は規定で2.2秒であるので、規定内に停止したことになる。しかし、地震は数秒で収束するが、3時間あまり70気圧、温度300度の環境で構造物は維持されているので、制御棒が挿入されても安全とは言い難く、原子炉内の損傷により蒸気漏れが起きる可能性がある。注意は必要だろう。（図1参照）。

地震による制御棒の損傷については、過去（2005年8月）に、原子力安全基盤機構で耐震実験（加速度 $3 \times 9.8$ ）と解析を行っており、共振による損傷等は起きないというデータを報告している。ただし、制御棒は、単体では支持部の間を通過する間、かた持ち構造の振動をうけるので、大きく振れる可能性がある。この点についての検討はなされていない（PWRとBWRでは構造は異なる、図2参照）。

### 3. 地震波の解析と地下構造

K-NETで公表されている地震波（加速度）から、柏崎(サイトNIG018)の特徴としては他の周辺域の地震波と比較して、高周波より低周波域の振幅が高く、軟弱な地盤による減衰により非線形が強調されているように見える。これは原子炉にとって、不幸中の幸いといえることかもしれない。

原子炉建造物の固有振動数は高周波域に多くは存在しているため共振による大きな振れが発生しにくいからである。これが原因だと思うが、波形逆解析では、このサイトのデータを除外している。(図3参照)

柏崎原発では、通常、 $M=6.8$ 規模の地震波の1.5倍程度大きなゆれが起きていること、また、1-4号機と5-7号機で地震波の特徴が異なり、1-4号機の地震波が5-7号機大きなパルスが観察されることをから、震源モデルによる波形解析から、これらの理由について検討された。(図4参照)

東電と原子力安全基盤機構の震源モデルを用いた解析では、原発地下の地層構造が褶曲構造になっており、地震波が1-4号機では強調されることになることを指摘されている(この違いは、原発で観察された地震波の後半のパルスの大きさに注目)。すなわち、地下構造の違いに起因すると考えて解析されている。(図5参照)

断層に3つのアスペリティ(破壊要素)を想定して、強いパルスは原発に最も近い第3のアスペリティから生じたものと考えているようである。ここで発生した波が基礎基盤に伝わり上層の軟弱な地層を通過すると増幅された原子炉基礎盤に伝わる。地盤の褶曲が1-4号機で地震波を強めたと考えている。なお、地震計はサービスホール(-250m)と原子炉建屋内に設置されているので、観察波形と解析波の比較が可能である。

特に重要なのは、計算された、開放基盤上の最大加速度は1247.3ガルと648.8ガルであり、これにより原子炉基盤上では、699ガルと513ガルとなると評価されていることである。これらの値が設計で想定した地震の大きさ以上であることと、1-4号機が5-7号機より大きくなった原因であると考えている。建設当初、地震波の策定には、このような地域性(特殊な地層構造)を想定していないから、低周波域で大きな加速度が生じることなど予想されないのであるが、これとて地震波の不確定さに原因がある。すなわち、同じ震央距離であっても観察される加速度は通常、異なるのである(地層構造が異なるから)。

#### 4. 原発のバックチェックへの影響

2006年9月に設計指針が改定され、各原発で新設計指針に照らした活断層評価が各原発で行われた。その内容は

1. 改定指針で活断層の評価対象期間が5万年前以降から後期更新世以降(約12~13万年前以降)となったことで対象となる活断層の数が増加
2. 改定指針で地球物理学的調査や地下構造を踏まえた評価の重要性が明記されたので、正常の類似した近接する断層群一連としたことにより断層の寸法の変化
3. 改定指針で変動地形学的調査の重要性が明記されたため、これらの調査検査に基づく変更。
4. 詳細地表地質調査やトレンチ調査等により入念な調査結果に基づく変更
5. 最新の調査技術を用いた高精度の海上音波探査の結果等

とあり、性状が類似した活断層群については一連として評価長さを設定

1) 一連の地形を形成してきたと判断 2) 地下構造が不連続ではなく、断層面の走向、傾斜など類似していると判断した場合 3) 活断層による地層のずれ量が終息傾向にないと判断、近接する活断層を一連とする。

しかし、これらから実在する断層を活断層と判断するのは容易ではないだろう。したがって、い

まなお、議論がなされている。

中越沖地震を教訓として、原発のバックチェックにおいては、地層検査により3次元構造を明らかにした上で、設計用地震波を策定することになったようである。

各原発から2008年3月20日にバックチェックの中間報告書が保安院に提出された。そこでは、設計当初、策定された地震波と新たな耐震設計指針により策定された地震波が記載されている。

( ) は設計当初策定されたもの。(表1参照)

想定された活断層の大きさの変更が加わり、応答スペクトル法と断層モデルを用いて計算した値から保守的に設定したことになっている。再評価では、いずれの原発も建設当時より約1.5倍高く設定されており、この値を用いて建屋、建造物の強度面からの安全性を再評価している。ただし、弾性域では応答倍率法で短時間に評価されている(ただし、配管ではモーダル解析を行っている)。

各事業者は新耐震設計指針でも、設計原発の安全性は確保されているというのが結論である。さて、ここで問題とされているのは断層の大きさである。アスペリティが広くなれば、各アスペリティから発生する波の数は当然、多くなり、観測点ではそれらが合成されるから、地震波は大きくなる傾向にある。しかし、接近した断層が連結するあるいは活動化するのかの判断は難しい。

しかし、日本原電、関西電力、日本原子力研究開発機構(2008年6月13日)の報告書では、各断層からの影響を活動セグメント間の力学的相互作用を考慮したとする検討が記載されている。それによれば、各断層に初期応力を設定(未知なので乱数で与える)し、広域応力を長期間断層に作用させたに蓄積される応力を計算して、各セグメントが破壊のしきい値を超えるかどうかの判断を行うというモデルであるが、三次元構造の取り扱いや広域応力の求め方など不明で、まだ、信頼性を得るところまでモデルは達していないように思う。(図6参照)

## 5. IAEA 調査団のコメント

来日した IAEA 調査団の報告書では、運転中のプラントは自動停止、地震中も地震後もすべてプラントは安全な挙動で、発生直後、極少量の放射性物質の放出はあったものの、3つの基本的安全機能(反応度制御、炉心からの熱除去、放射性物質の閉じ込め)は確保されたと述べ、強い地震であったにもかかわらず、目に見える損傷はなく、全般的に予想よりかなり良好な状態であったのは、おそらく設計過程のさまざまな段階で保守的手法が採用されていたことによるのではないかと述べ、現時点から見れば、設計当時の利用可能なデータ、適用可能な手法には不確実な点は存在し、結果的には設計基準時振動の過小評価につながったが、これらの保守的手法の相乗効果により不確実性は十分補われたとしている。

また、考慮すべきは、通常運転の条件では機能を維持し続ける機器であっても、隠れた損傷を有している可能性のあるという点である。このことが、事故時や運転長期化により要求される機能の性能に影響を及ぼす可能性がある。運転再開に前に分析され検査されるべきである。また、経年劣化の加速についても将来の検査プログラムを検討する上で重要な事項となろうと指摘している。これらの指摘は当然のことで、これを謙虚に受け止めて、原発の点検作業は念入りに行わなければ今後、安全性は保てないだろう。

## 6. 断層モデルによる地震波策定の不確実性

近年、地震波策定に強振予測レシピ(断層モデル)と応答スペクトル法が用いられる。

断層モデルは、断層に震源と破壊領域（アスペリティ）を設定して、各アスペリティにすべり量（分布）、すべり方向を与えて、わずかに遅れてアスペリティが連続的破壊時において瞬発的に発生する地震波を観察点で合成する手法であるが、伝播媒体である地層構造、物理的性質、異層境界（断層）等の断層の性質をあらゆる複数のパラメータを正確に設定しなければならない。一度活動した断層から地震波が観察されていれば（経験的グリーン関数として用いる）、逆解析によって震源の地震波は評価されるが、しかし、設定モデルによって異なる結果が得られることは中越沖地震の解析でも明らかとなっている。これも不確実性の要因が多いためである。レシピの目的とする、誰が行っても同じ結果が得られるモデルの構築にはまだ至っていない。正確に評価を行おうとすれば3次元地下構造のデータが必要不可欠であるが、このデータの習得は容易ではないことは明白である。したがって、地震波観察データが存在しない断層が活動することを仮定して、断層モデルで地震波を策定することは手法として可能ではあるが、検証がない事実は不確実なものと考えざるを得ない。事実、今回は、経験的データが多数存在してもなお、断層モデルは確定できなかったのだから。

#### 7. 建造物の耐震性のバックチェックからの教訓

応答倍率法により再計算した評価値はすべて許容値を下回り、保守性が確認されているが、地震波策定には、いずれの方法も不確実な値の設定を余儀なくされている（パラメータの設定過程で明白）のである。したがって、保守的といえるかどうか不明である。

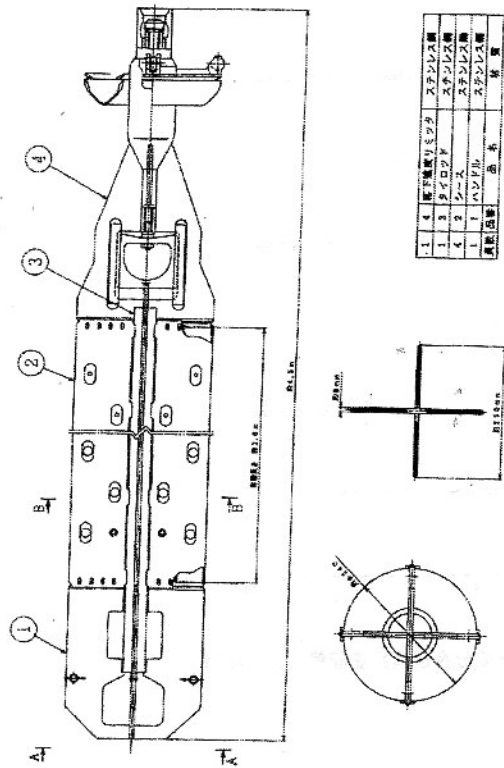
中越沖地震が原発直下の活断層で発生した地震とするならば、被害が予想よりも小さいことは、まさに不幸中の幸いである。他の原発で、同様の地震が発生した場合、不幸中の幸いで終わる保障はないことを肝に銘じてほしい。すなわち、地震波の策定に十分注意を払い、保守的に評価しなければ禍根を残すことになる。

#### 7. おわりに

新耐震設計指針の方針にのっとり、各原発がバックチェックの途上で発生した中越沖地震は原発に大きな被害を出さずに終止したように見えるが、地震波の策定に地層構造の把握の重要性を示唆しており、この点、原発の安全性から教訓として生かさねばならない。

現在、他の原発の中間報告については検討途上にあるようで、柏崎の教訓を生かされているかどうか、どのように保安院が結論を出すか見守りたい。

参考文献 省略（監督官庁のHPに掲載されている中間報告書など）



付図 B-1-11 制御棒構造図

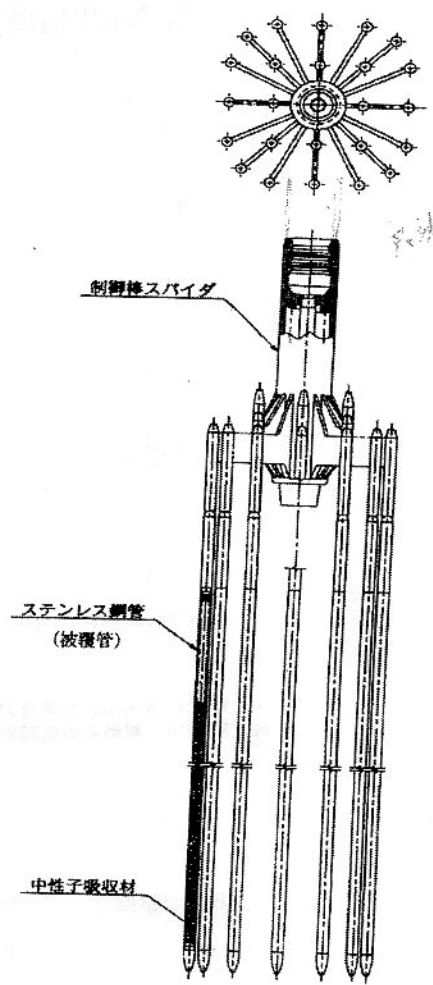
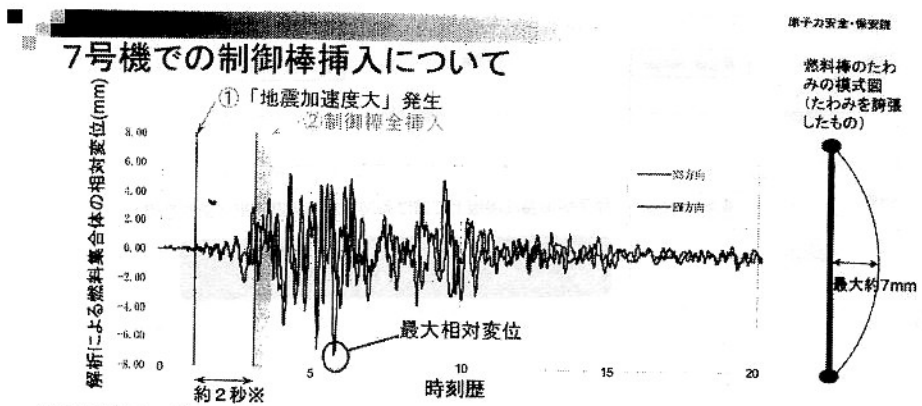


図 3.1.4 制御棒クラスタ構造図

BWR  
図 2



※中央制御室のプロセス計算機の打ち出しデータから、「地震加速度大」信号発生から制御棒全挿入までに要した時間を約2秒と推定。

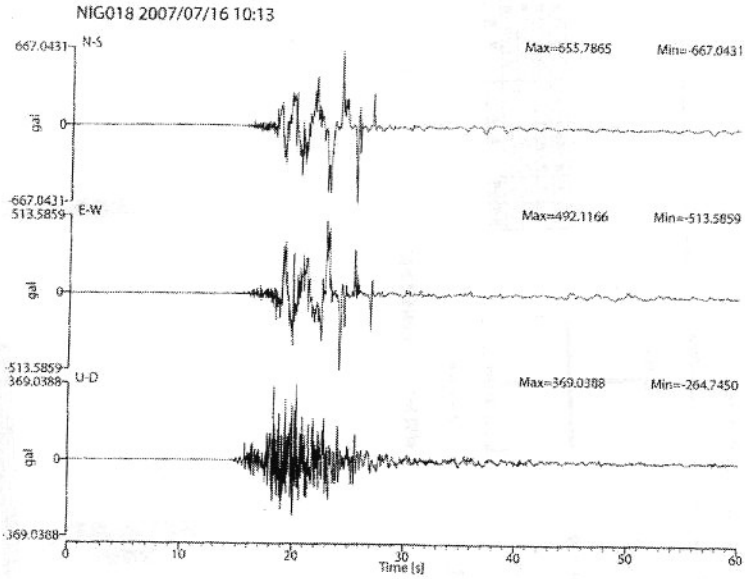
| 解析による燃料集合体の最大相対変位 | 機能確認済相対変位 |
|-------------------|-----------|
| 7.1 mm            | 40 mm     |

制御棒は燃料集合体が最大相対変位を生じる時刻よりも前に挿入されたと評価。また、解析により算出される最大相対変位は、機能確認済相対変位と比較し余裕があると評価。

なお、水圧制御ユニットにおける発生応力の解析値(36MPa)についても、基準値(211MPa)を下回ると評価。

図 1

# K-NET柏崎 (NIG018) 観測点の強震動波形



・ K-NET・KiK-net観測点の中で最大加速度 (813gal、三成分合成値) を記録したK-NET柏崎 (NIG018) 観測点の強震動波形。

図3

## 現象の整理② (号機間の揺れの比較)

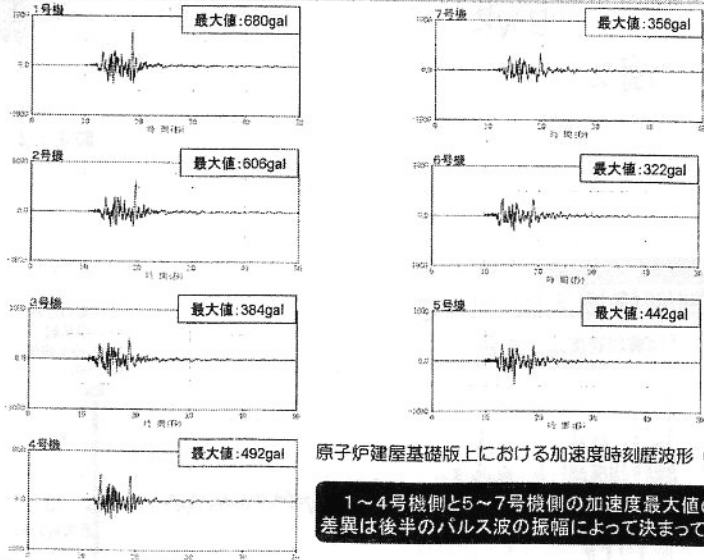
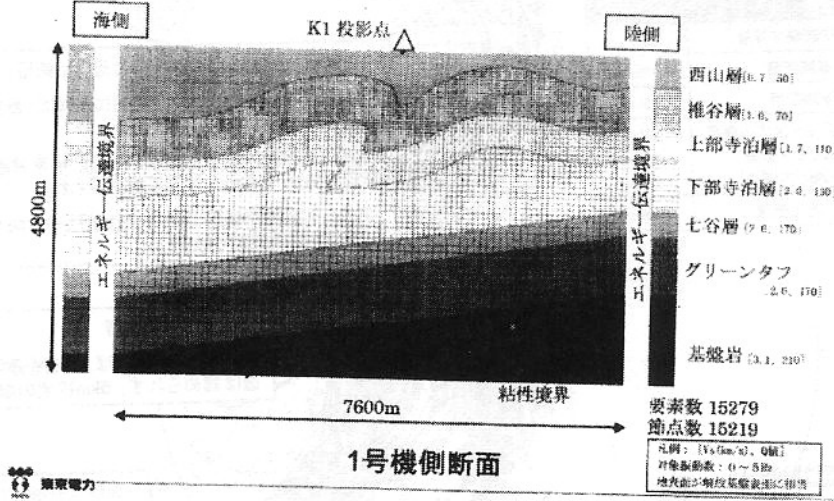


図4

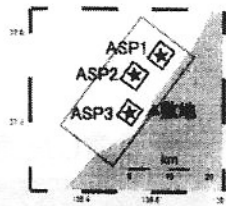
# 2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 地盤モデル

## FEMメッシュモデル



## 震源モデルの設定

III-2(4)



### 【点震源モデル】

|      | Mo (Nm)               | 深さ (km) | 走向 (度) | 傾斜角 (度) | すべり角 (度) |
|------|-----------------------|---------|--------|---------|----------|
| ASP1 | $1.69 \times 10^{18}$ | 10      | 40     | 40      | 90       |
| ASP2 | $1.69 \times 10^{18}$ | 8.3     | 40     | 40      | 90       |
| ASP3 | $1.02 \times 10^{18}$ | 11.3    | 40     | 30      | 90       |

震源時間関数: 三角形型時間関数、継続時間: 1秒

### 【震源断層モデル1】



ASP1: 傾斜角40度  
Mo= $1.69 \times 10^{18}$  Nm  
(分布=中央2: 周辺1)

ASP2: 傾斜角40度  
Mo= $1.69 \times 10^{18}$  Nm  
(分布: 一定)

ASP3: 傾斜角30°  
Mo= $1.02 \times 10^{18}$  Nm  
(分布=中央2: 周辺1)

### 【震源断層モデル2】

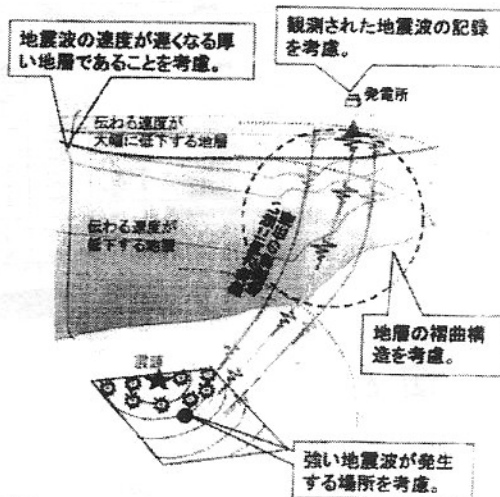


ASP1: 傾斜角40度  
Mo= $1.33 \times 10^{18}$  Nm  
(分布=中央2: 周辺1)

ASP2: 傾斜角40度  
Mo= $2.00 \times 10^{18}$  Nm  
(分布: 一定)

ASP3: 傾斜角40°  
Mo= $2.00 \times 10^{18}$  Nm  
(分布=中央2: 周辺1)

19



# 活動セグメント及び起震断層の評価

活動セグメント  
起震断層

| 起震断層          | 長さ   |
|---------------|------|
| 和布-千飯崎冲断層     | 32km |
| 甲斐城断層         | 19km |
| 柳ヶ瀬断層         | 28km |
| ウツロギ峠北方-池河内断層 | 23km |
| 浦底-内池見断層      | 18km |
| 浦底-池河内断層      | 25km |
| 白木-丹生断層       | 15km |



- ・走向が大きく屈曲し、千飯崎付近では断層の分岐も認められる
- ・調査から推定される走向・傾斜によれば、断層は地下で収斂する関係にはない
- ・和布-千飯崎冲断層は縦ずれ卓越、甲斐城断層は横ずれ卓越の断層であり、変位センスに差異が見られる
- ・和布-千飯崎冲断層の累積変位量は千飯崎付近で終息し、甲斐城断層とは連続的ではない

- ・左ステップで雁行
- ・調査結果によれば、両者を連続する活構造は認められず、5km程度の離隔あり

- ・断層は分岐しており、南方の鍛冶屋断層とは走向が大きく異なっている
- ・反射法地震探査結果によれば、両者を連続する明瞭な活構造は推定されない

柳ヶ瀬断層は褶曲軸に位置する直線性の高い活断層であり、雁行配列するウツロギ峠北方-池河内断層とは異なる

地表地質調査によれば、両者を連続する活構造は認められない

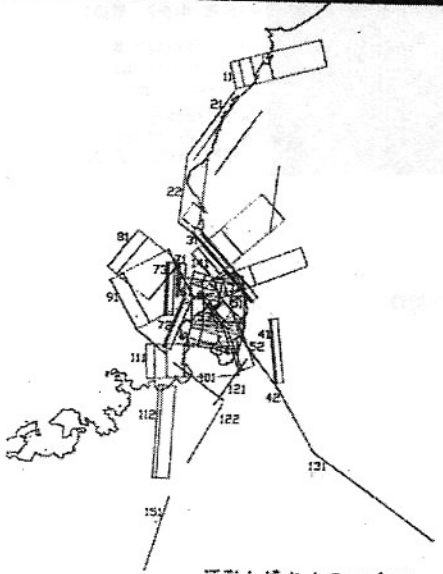
北東半島を中心とする30kmの範囲

## 活動セグメント間の力学的相互作用を考慮した連動検討

- ・起震断層の評価は、地形・地質調査結果を踏まえて判断
- ・ただし、断層が近接して分布している場合、起震断層の範囲を越えて断層破壊の乗り移りが生じる可能性を完全には否定出来ない



連動の可能性について、活断層の幾何学的配列状況と断層間の力学的相互作用に着目して検討



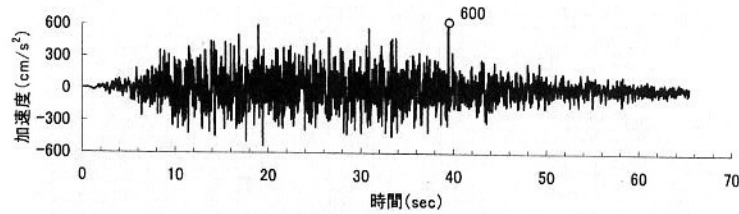
| 活動セグメント       | セグメント番号 | セグメント長さ (km) | 傾斜内 (C°) | 走向 (C°) | 連動性 |
|---------------|---------|--------------|----------|---------|-----|
| 和布-千飯崎冲断層     | 11      | 32           | 45-90    | 345     | 連動  |
|               | 21      | 32           | 70       | 34      | A連  |
| 柳ヶ瀬断層         | 31      | 28           | 45       | 3       | A連  |
|               | 41      | 28           | 85       | 310     | A連  |
| ウツロギ峠北方-池河内断層 | 42      | 23           | 85       | 282     | B連  |
|               | 121     | 23           | 85       | 289     | A連  |
| 浦底-内池見断層      | 122     | 18           | 85       | 285     | B連  |
|               | 151     | 18           | 85       | 285     | B連  |
| 浦底-池河内断層      | 152     | 25           | 85       | 282     | B連  |
|               | 151     | 25           | 85       | 282     | B連  |
| 白木-丹生断層       | 151     | 15           | 85       | 282     | B連  |
|               | 152     | 15           | 85       | 282     | B連  |
| 鍛冶屋断層         | 81      | 15           | 85       | 282     | B連  |
|               | 82      | 15           | 85       | 282     | B連  |
| 甲斐城断層         | 21      | 19           | 85       | 282     | B連  |
|               | 22      | 19           | 85       | 282     | B連  |
| 和布-千飯崎冲断層     | 11      | 32           | 45-90    | 345     | 連動  |
|               | 21      | 32           | 70       | 34      | A連  |
| 柳ヶ瀬断層         | 31      | 28           | 45       | 3       | A連  |
|               | 41      | 28           | 85       | 310     | A連  |
| ウツロギ峠北方-池河内断層 | 42      | 23           | 85       | 282     | B連  |
|               | 121     | 23           | 85       | 289     | A連  |
| 浦底-内池見断層      | 122     | 18           | 85       | 285     | B連  |
|               | 151     | 18           | 85       | 285     | B連  |
| 浦底-池河内断層      | 152     | 25           | 85       | 282     | B連  |
|               | 151     | 25           | 85       | 282     | B連  |
| 白木-丹生断層       | 151     | 15           | 85       | 282     | B連  |
|               | 152     | 15           | 85       | 282     | B連  |
| 鍛冶屋断層         | 81      | 15           | 85       | 282     | B連  |
|               | 82      | 15           | 85       | 282     | B連  |
| 甲斐城断層         | 21      | 19           | 85       | 282     | B連  |
|               | 22      | 19           | 85       | 282     | B連  |

活動セグメント毎に地形・地質調査結果

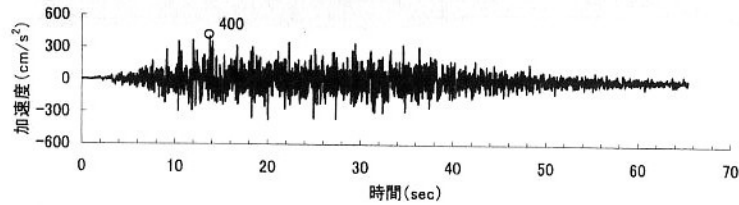


# 基準地震動Ssの時刻歴波形

基準地震動Ss-D

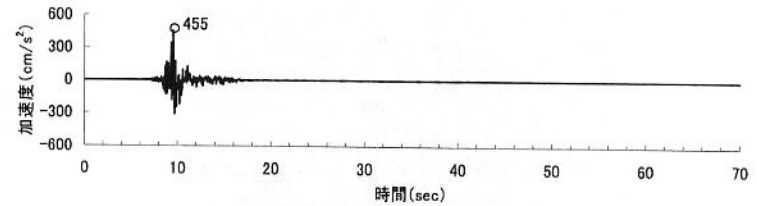


加速度 (水平方向: Ss-DH)

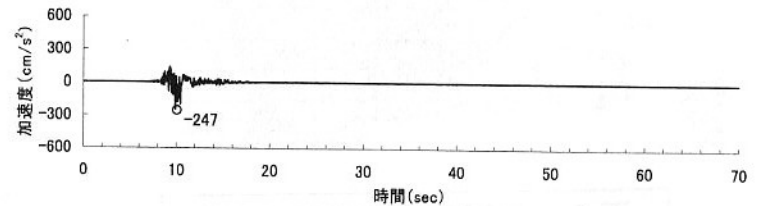


加速度 (鉛直方向: Ss-DV)

基準地震動Ss-1

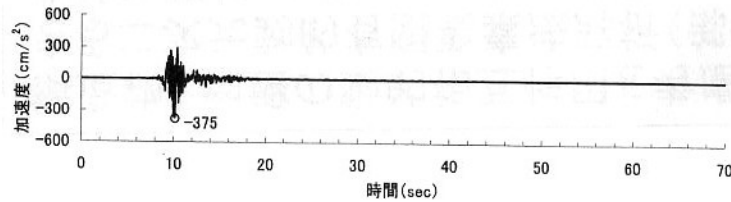


加速度 (水平方向: Ss-1H)

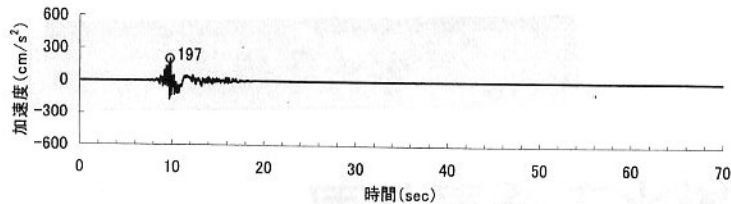


加速度 (鉛直方向: Ss-1V)

基準地震動Ss-2

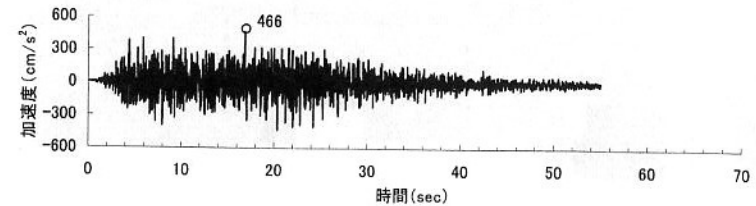


加速度 (水平方向: Ss-2H)



加速度 (鉛直方向: Ss-2V)

(旧) 基準地震動S2

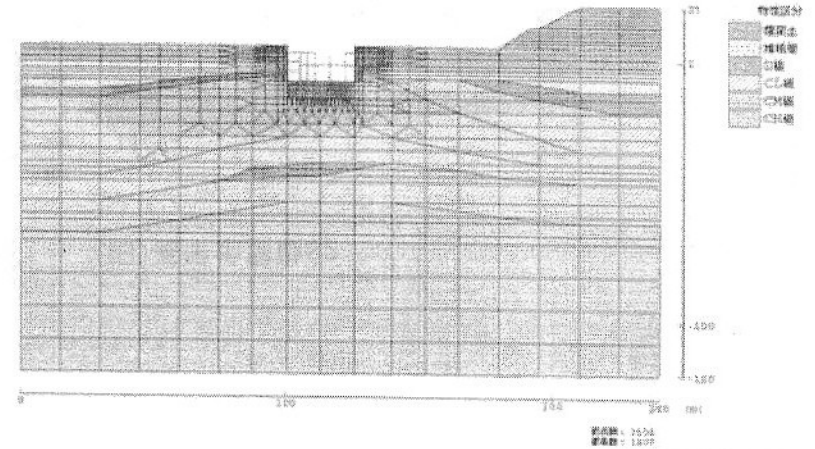


参

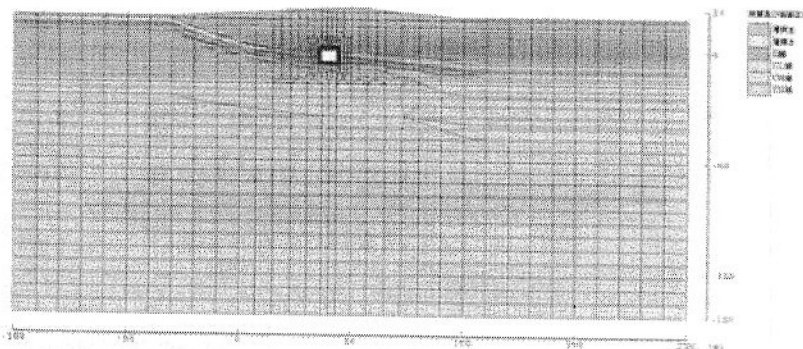
# 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価

## 解析モデル

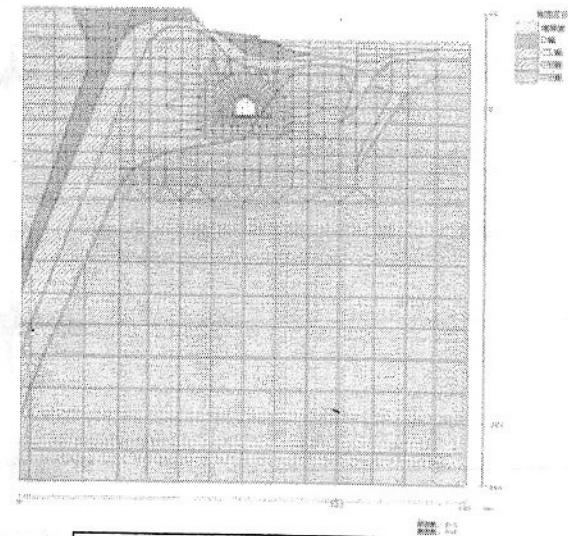
構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる二次元動的有限要素法解析(部材非線形解析)を用いて、水平地震動と鉛直地震動による時刻歴応答解析を行う



原子炉補機冷却系海水ポンプ室



送水管路カルバート部



送水管路トンネル部

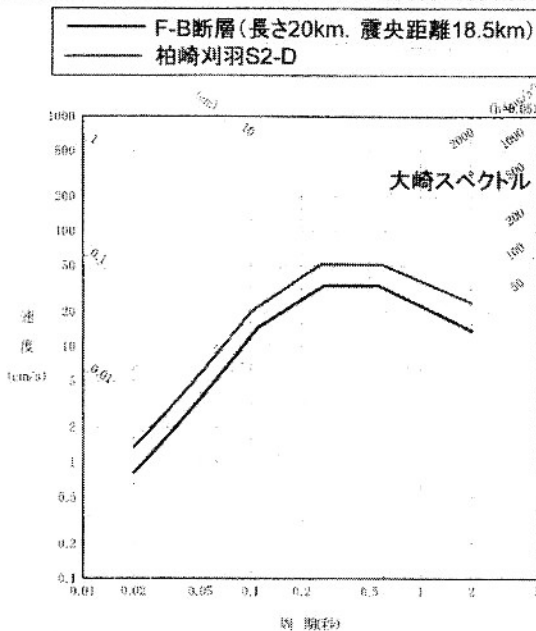
◇国の新耐震指針に基づく原発などの地震の新たな想定

| 原発名    | 活断層・地震名                     | 揺れの加速度 (ガル) |
|--------|-----------------------------|-------------|
| 泊      | ※                           | 550 (370)   |
| 女川     | 想定宮城県沖地震 (M8. 2)            | 580 (375)   |
| 東通     | ※                           | 450 (375)   |
| 福島第1   | 敷地下方の地震 (M7. 1)             | 600 (370)   |
| 福島第2   | 同上                          | 600 (370)   |
| 浜岡     | 想定東海地震 (M8. 0) など           | 800 (600)   |
| 志賀     | 笹波沖断層 (M7. 6)               | 600 (490)   |
| 美浜     | C断層 (M6. 9)                 | 600 (405)   |
| 高浜     | F <sub>0</sub> -A断層 (M6. 9) | 550 (370)   |
| 大飯     | 同上                          | 600 (405)   |
| 島根     | 宍道断層 (M7. 1)                | 600 (456)   |
| 伊方     | 中央構造線の一部 (M7. 6)            | 570 (473)   |
| 玄海     | ※                           | 500 (370)   |
| 川内     | ※                           | 540 (372)   |
| 敦賀     | 浦底-内池見断層 (M6. 9) など         | 650 (532)   |
| 東海第2   | ※                           | 600 (380)   |
| もんじゅ   | C断層 (M6. 9)                 | 600 (466)   |
| 六ヶ所再処理 | 出戸西方断層 (M6. 5)              | 450 (375)   |

※は震源を特定せず全原発で共通に想定する地震でM6. 8相当

表1

評価結果 (F-B断層：大崎スペクトル)



OH15年当時は大崎スペクトルによる評価により、S2を上回らないと判断

○その後、耐震設計審査指針が改訂され、変動地形的調査等の要求、活断層の認定基準(年代)の変更等が行われた

○上記改訂指針に対するバックチェック報告を念頭に、他地点の安全審査の状況も踏まえて、海域活断層の再評価を継続的に進めていた