

耐震設計審査指針の改訂に伴う

東京電力株式会社

福島第二原子力発電所 4 号機

耐震安全性に係る中間報告の評価について

平成 21 年 7 月 21 日

原子力安全・保安院

目 次

1. はじめに	3
2. 主な経緯	4
3. 検討結果	5
3. 1 耐震バックチェック中間報告に係る審議のポイント	5
3. 2 基準地震動の妥当性	7
(1) 敷地周辺の地質・地質構造の評価	7
1) 双葉断層の活動性及び連続性	7
2) 畑川断層の活動性	10
3) 大坂－芦沢リニアメントの活動性	11
4) 敷地前面海域に認められる断層の評価	12
(2) 地震動評価	13
1) 解放基盤表面の設定	13
2) 震源を特定して策定する地震動	14
① 検討用地震の選定	14
② 内陸地殻内地震	15
③ プレート間地震	18
④ 海洋プレート内地震	20
3) 震源を特定せず策定する地震動	22
4) 基準地震動 S_s の策定	23
5) 基準地震動の超過確率の参照	25
3. 3 施設の耐震安全性評価の妥当性	26
(1) 建物・構築物の耐震安全性評価	26
1) 原子炉建屋の地震応答解析モデル	26
2) 原子炉建屋の入力地震動の評価	30
3) 原子炉建屋の耐震安全性評価結果	31
(2) 機器・配管系の耐震安全性評価	32
1) 床応答スペクトル	33
2) 水平・鉛直方向地震力の組合せ方法	34
3) 地震応答解析手法及び応力評価手法	35
4) 減衰定数	37
5) 評価基準値	38
6) 機器・配管系の耐震安全性評価結果	39
4. まとめ	41
4. 1 基準地震動の妥当性	41

4. 2 施設の耐震安全性評価の妥当性	42
5. 今後の検討課題（本報告に反映すべき事項）	43
参考文献	66

1. はじめに

平成18年9月19日付けで原子力安全委員会により「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の耐震安全性に係る安全審査指針類が改訂された。

これを受け、原子力安全・保安院（以下「当院」という。）は、平成18年9月20日、「新耐震指針に照らした既設発電用原子炉施設等の耐震安全性の評価及び確認に当たっての基本的な考え方並びに評価手法及び確認基準について」（以下「バックチェックルール」という。）を策定するとともに、各電力会社等に対して、稼働中及び建設中の発電用原子炉施設等について、改訂された耐震指針に照らした耐震安全性評価（以下「耐震バックチェック」という。）の実施とそのための実施計画の作成を求めた。さらに平成19年7月16日に発生した新潟県中越沖地震を踏まえ、可能な限り早期かつ確実に評価を完了できるよう、実施計画の見直しを求めた。その結果、平成19年8月20日、実施計画が見直され、平成20年3月31日、東京電力株式会社（以下「東京電力」という。）から福島第一原子力発電所5号機及び福島第二原子力発電所4号機に係る耐震バックチェックの中間報告書が提出された。

当院においては、耐震バックチェックに係る審議を円滑に進めるため、「総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会」の下に設置されている「地震・津波ワーキンググループ」及び「地質・地盤ワーキンググループ」による「合同ワーキンググループ」並びに「構造ワーキンググループ」にサブグループを設置することとし、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所については「合同Aサブグループ」及び「構造Aサブグループ」において検討を行った。

各サブグループにおいては、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所のバックチェック中間報告の妥当性について検討するとともに、合同Aサブグループにおいては、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の敷地周辺及び敷地内の現地調査を実施した。

さらに、当院は、東京電力が福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の敷地前面海域において実施した海上音波探査結果を独自の立場からチェックするため、念のため別途海上音波探査を実施した。

本評価書は、中間報告において報告された福島第二原子力発電所に係る地質・地質構造、基準地震動及び施設の耐震安全性の評価について、合同Aサブグループ及び構造Aサブグループでの検討結果を踏まえ、当院としての評

価結果をとりまとめたものである。

2. 主な経緯

福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の耐震バックチェック報告に係る主な経緯は、以下のとおりである。

- (1) 平成18年9月19日 原子力安全委員会が「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の耐震安全性に係る安全審査指針類（以下「新耐震指針」という。）を改訂。
- (2) 平成18年9月20日 当院はバックチェックルールを策定するとともに、各電力会社等に対して、稼働中及び建設中の発電用原子炉施設等について、耐震バックチェックの実施とそのための実施計画の作成を求める。
- (3) 平成19年7月16日 新潟県中越沖地震発生。当院は本地震を踏まえ、各電力会社等に対して耐震バックチェック実施計画の見直しを求める。
- (4) 平成19年8月20日 東京電力は当院に耐震バックチェックの実施計画の見直し結果を報告。
- (5) 平成19年12月27日 当院は「新潟県中越沖地震を踏まえ原子力発電所等の耐震バックチェックに反映すべき事項の中間とりまとめについて」をとりまとめ、各電力会社等に対して、耐震バックチェックに反映するよう求める。
- (6) 平成20年3月31日 東京電力は当院に『福島第一原子力発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果 中間報告書』及び『福島第二原子力発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果 中間報告書』を提出。
- (7) 平成20年4月14日 合同Aサブグループ会合を開催し、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所に係る地質調査結果、基準地震動S_sの策定結果に係る妥当性確認を開始。平成21年5月25日までに、合計22回の合同Aサブグループ会合を開催し検討。
- (8) 平成20年4月～5月 当院は、福島沖の海上音波探査を実施。
- (9) 平成20年5月13日 構造Aサブグループ会合を開催し、福島第二原子力発電所4号機及び福島第一原子力発電所5号機の主要な設備の評

価結果に係る妥当性確認を開始。平成21年5月28日までに、合計20回のワーキンググループ会合を開催し検討。

- (10) 平成20年9月4日 当院は「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」をとりまとめ、各電力会社等に対して、耐震バックチェックに反映するよう求める。
- (11) 平成21年2月～同年4月 東京電力は、合同Aサブグループ及び構造Aサブグループに「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」の検討結果を報告。
- (12) 平成20年9月26日～27日 合同Aサブグループ委員による福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の敷地周辺等の現地調査を実施。双葉断層について、地形の状況、断層露頭、ボーリングコア等の確認を行った。また、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所について、サイト内ボーリングコア、海上音波探査記録等の確認を行った。
- (13) 平成21年6月24日及び同年7月13日 合同ワーキンググループ会合を開催し、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所に係る地質調査、基準地震動 S_s の策定に係る合同Aサブグループの検討結果を審議。
- (14) 平成21年6月17日及び同年7月15日 構造ワーキンググループ会合を開催し、福島第二原子力発電所4号機及び福島第一原子力発電所5号機の主要な設備の評価に係る構造Aサブグループの検討結果を審議。

3. 検討結果

3. 1 耐震バックチェック中間報告に係る審議のポイント

当院は、耐震バックチェック中間報告について、あらかじめ審議のポイントを明確にし、各サブグループで検討することとした。

福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所に係る審議のポイントは以下のとおりである。

(1) 地質・地質構造

1) 陸域

- ・ 双葉断層の活動性及び連続性

- ・ はたがわ 畑川断層*の活動性
- ・ おおさか あしざわ 大坂－芦沢リニアメント*の活動性

2) 海域

- ・ 敷地前面海域に認められる断層*の評価

* 中間報告において耐震設計上考慮すべき活断層とされていないが、敷地に比較的近いこと等を勘案して、その妥当性について確認する。

(2) 基準地震動 S_s

- 1) 双葉断層による地震の地震動評価(震源のモデル化を含む解析手法、パラメータの設定や不確かさの考慮について)
- 2) プレート間地震(しおやざき 塩屋崎沖の地震)の想定と地震動評価(震源のモデル化を含む解析手法、パラメータの設定や不確かさの考慮について)
- 3) 海洋プレート内地震の想定と地震動評価(震源のモデル化を含む解析手法、パラメータの設定や不確かさの考慮について)
- 4) 基準地震動 S_s の策定結果

(3) 施設の耐震安全性評価

- 1) 建物・構築物の評価
 - ・ 原子炉建屋の地震応答解析モデル
 - ・ 原子炉建屋の入力地震動の評価
- 2) 機器・配管系の評価
 - ・ 床応答スペクトル
 - ・ 水平・鉛直方向地震力の組合せ方法
 - ・ 地震応答解析手法及び応力評価手法
 - ・ 減衰定数

3. 2 基準地震動の妥当性

(1) 敷地周辺の地質・地質構造の評価

東京電力は、基準地震動を策定するため、発電所敷地周辺の地質・地質構造に関する調査を実施している。調査結果は以下のとおりであるが、当院は、東京電力が実施した調査が十分に行われているかどうかについて、新耐震指針、活断層等に関する安全審査の手引き（平成20年6月20日、原子力安全委員会了承）（以下「手引き」という。）及びバックチェックルールに照らして確認した。その結果、東京電力が、敷地からの距離に応じて、既存文献の調査、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査等を実施し、その内容が要求されている事項を満足していることから、基本的に必要な調査は実施されていると判断した。また、当院及び合同Aサブグループによる現地調査を実施し、合同Aサブグループでは、その結果を踏まえて敷地周辺の地質・地質構造について検討した。

合同Aサブグループにおける検討内容及びその検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

1) 双葉断層の活動性及び連続性

東京電力による調査結果及び評価は、以下のとおりである。

双葉断層に係る主な調査位置及び評価を図－1に示す。

東京電力は、双葉断層について、変動地形の可能性のある地形（以下「リニアメント」という。）が宮城県角田市鳩原から福島県いわき市久之浜に至る間に、一部断続するもののほぼ連続して判読されるとしている。また、双葉断層の東側に位置する相馬断層（地震調査研究推進本部⁽¹⁾が示す双葉断層北部）に沿うリニアメントが、亘理町逢隈上郡から南相馬市原町区石神付近に至る間に、断続的に判読されるとしている。

双葉断層の活動性については、南相馬市鹿島区栃窪及び同市鹿島区榎原において、それぞれL₂段丘堆積物（海洋酸素同位体ステージ（以下「MIS」という。）3）及びL₃段丘堆積物（MIS2）の基底面に変位が認められ、後期更新世における活動があったものと評価している。

双葉断層の北部については、相馬市萱倉南西以北において、それ以南の断層に対応した直線状のリニアメントとは異なり、リニアメントと断層の位置は大部分で一致せず、断層は西側の花崗岩類及び変成岩類と東側の相馬中村層群とを境し、直線性に乏しく不規則な配列を呈している

としている。また、これらリニアメントの北方に位置する角田市島田（当初「小斎東方」と呼称）付近において、断層推定位置の M_1' 面（約10万年前～12万年前）に変位・変形は認められないとしている。これらのことから、双葉断層について耐震設計上考慮する北端を島田としている。

双葉断層の南部については、リニアメント延長上の南相馬市原町区馬場付近に分布する M_2 面（ $MIS5c$ ）に変位・変形が認められず、また、馬場地点において行ったボーリング調査によっても、断層推定位置の M_2 段丘堆積物に変位・変形は認められないとしている。

馬場以南のいわき市久之浜付近に至る間においては、 L_D 、一部 L_C リニアメントが断続的に判読されるが、リニアメントあるいは断層の延長部に分布する M_1 面（ $MIS5e$ ）、 M_1' 面及びそれより低位のいずれの段丘面にも変位地形、撓み、高度不連続は認められないとしている。これらのことから、双葉断層について耐震設計上考慮する南端を馬場としている。

相馬断層については、亘理町上郡から南相馬市原町区石神付近に至る間について、この間に認められるリニアメント付近に分布する低位、中位及び高位段丘面にリニアメントは判読されず、変位地形も認められないとしている。リニアメントは、中古生層と新第三系との境界あるいは新第三系の岩質境界に対応していることから、岩質の差を反映した侵食地形と判断されるとしている。

以上のことから、双葉断層の耐震設計上考慮する長さを、最終間氷期の地層に変位・変形が認められないことを確認した島田から馬場に至る約37kmと評価している。

なお、双葉断層の東方に分布する相馬断層については、中間報告の報告時点においては、地質調査結果のとりまとめ中であつたことから、双葉断層全体の長さを暫定的に地震調査研究推進本部が示す亘理町長瀬までの約47.5kmについて活動性を考慮するとしていた。

合同Aサブグループにおける検討内容及びその検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

双葉断層の活動性の検討については、現地調査において、活動性を検討している区間の南方及び北方も含め、航空レーザ計測などを実施し広範に詳細な地形データを取得することが望ましいとの指摘があり、東京電力に検討を求めた。その結果、東京電力は航空レーザ測量を実施するとともに航空レーザ測量に基づく数値標高モデル（DEM）を用いて地形分析を実施するとともに、必要に応じて地表地質調査を追加的に実施

した。合同Aサブグループでは、これらの分析結果及び調査結果を踏まえて検討を行った。

双葉断層の北端については、リニアメントの北方に位置する島田地点の評価について、現地調査において、東京電力に対し、断層露頭に断層そのものが現れているか確認を求めるとともに、地形面の変形について詳細かつ広範な確認を求め、検討を行った。その検討結果に基づき当院は、断層露頭を拡張した調査から双葉断層本体と考えられる高角断層2条を確認するとともに、それらの断層が M_1' 段丘堆積物に変位・変形を与えていないことを確認した。また、航空レーザ測量に基づく数値標高モデル（DEM）による地形分析の結果から、島田地点の M_1' 面上に変動地形が認められないことを確認した。さらに、 M_1' 面に認められる不陸が、現地の状況から人工改変によるものであることを確認した。

双葉断層の南端については、リニアメント延長上の馬場付近の評価について、現地調査において、南北ともに高位面が明らかに切れていると解釈されることから後期更新世の活動がないことをいうためには強い根拠が必要であるとの指摘があり、東京電力に対し、地形面の年代について直接的な確認を求めるとともに、地形面の変形について詳細かつ広範な確認を求め、検討を行った。その検討結果に基づき当院は、段丘面から採取した試料の火山灰分析結果から、当初 L_1 面（MIS5a）としていた段丘面が M_2 面（MIS5c）であることを確認し、馬場地点において行ったボーリング調査結果から、断層推定位置に分布する M_2 段丘堆積物（MIS5c）に変位・変形が認められないことを確認した。また、航空レーザ測量データに基づき、断層推定位置を含む広範囲の地形面に変動地形が認められないことを確認した。さらに、航空レーザ測量に基づく数値標高モデル（DEM）による傾向面分析の結果から、馬場地点の M_2 面上に変動地形が認められないこと、現地の状況から、 M_2 面上に認められる不陸が人工改変によるものであることを確認した。

双葉断層の活動性及びその地域的特徴については、双葉断層の形成史も踏まえて検討を行った。その検討結果に基づき当院は、双葉断層の北部では、栃窪において L_2 段丘堆積物基底面に鉛直約 1.2m、檜原において L_3 段丘堆積物基底面に鉛直約 1.3m のいずれも西上がりの鉛直変位があること、栃窪の北方付近において尾根・水系に左屈曲が見られ、その屈曲量が高度不連続量と比べ相対的に大きい傾向にあること、さらに、栃窪において、福島県(1999)⁽²⁾ のトレンチ調査結果により鉛直約 0.6m、左横ずれ約 1.5m の最新活動における変位量が認められることを確認した。それに対して、双葉断層の南部では、浪江町大堀南において M_1'

段丘堆積物基底に断層による変位・変形が認められないこと、富岡町上手岡^{かみて}においてボーリング調査結果及びS波による反射法地震探査結果からM₂段丘堆積物上面に断層による変位・変形が認められないこと、さらに、大熊町山神^{やまがみ}において、福島県(1999)のトレンチ調査結果によりM₂段丘堆積物堆積以降の活動が認められないことを確認し、広域的に見た場合、双葉断層の北部では後期更新世以降の西上がりに伴う断層運動が認められるが、双葉断層の南部ではそれが認められないことを確認した。

相馬断層の活動性については、現地調査において、「活断層詳細デジタルマップ」(2002)⁽³⁾による推定活断層及び空中写真判読によるリニアメントの活動性を否定する場合には、否定する根拠を充実させる必要があるとの指摘があり、東京電力に対し、地形面の変形について詳細かつ広範な確認を求め、検討を行った。その検討結果に基づき当院は、文献により相馬断層が示されている付近が、中新統及び鮮新統の撓曲構造により特徴付けられ、「活断層詳細デジタルマップ」(2002)による推定活動層及び空中写真判読によるリニアメントが、当該撓曲付近に位置していること、東京電力が行った航空レーザ測量に基づく地形面の分析結果から、多数の地点で岩質の差を反映した侵食地形であると判断されること、撓曲構造に対応して分布する中位から高位の地形面に変位・変形が認められないことを確認したことから、相馬断層について後期更新世以降の活動はないと評価していることは妥当なものと判断した。

以上のことから、当院は、双葉断層の耐震設計上考慮する長さを、島田地点から馬場地点までの約 37km と評価していることは妥当なものと判断した。

なお、後述するように、当院は、双葉断層による地震動評価について、耐震バックチェック中間報告が提出された当初の長さ約 47.5km の暫定評価に対する合同Aサブグループの検討結果に基づき、評価の妥当性を判断した。

2) 畑川断層の活動性

東京電力は、畑川断層に沿うリニアメントについて、飯舘村野手上山^{いいたて の て がみやま}以北には判読されないが、野手上山北付近から南方へ浪江町畑川を経ていわき市戸渡^{とわだ}北東まで一部で断続するものの、ほぼ連続して判読されとしている。地表地質調査結果によると、野手上山付近以北では、3条の断層が認められるが、露頭では断層破碎部は固結しているとしている。野手上山付近から川内村毛戸^{もうど}付近に至る間の断層露頭では、軟質部が認

められるものの、破碎組織が認められないことから地表水により軟質化したと推定している。毛戸以南における断層露頭では、断層面が癒着し、断層破碎部が固結しており、約5万年前の崖錐堆積物及びそれより古いと推定される崖錐堆積物に変位・変形が認められないとしている。

以上のことから、畑川断層の後期更新世以降における活動はないものと評価している。

合同Aサブグループでは、畑川断層の活動性の評価の妥当性について検討を行った。

畑川断層の断層露頭で認められる断層面の癒着及び断層破碎部の固結について、双葉断層の活動的な部分と非活動的な部分との比較検討を行った上で、双葉断層の非活動的な部分と畑川断層との比較検討を行った。その検討結果に基づき当院は、畑川断層の破碎部性状が、後期更新世の活動性を評価している双葉断層の破碎部性状と異なることを確認したことから、畑川断層の後期更新世以降における活動はないと評価していることは妥当なものと判断した。なお、説明性向上の観点から、畑川断層、双葉断層の活動的な区間及び非活動的な区間の断層露頭で認められる断層破碎部の性状について、微小構造分析、色調解析、X線回折分析及び化学分析を行い、その結果の比較検討を試みた。その検討結果に基づき当院は、畑川断層の破碎部性状が、双葉断層の活動的な区間のうち活動性が高いと評価されている地点の破碎部性状と異なる傾向が認められることを確認した。

3) 大坂－芦沢リニアメントの活動性

東京電力は、大坂－芦沢リニアメントが示されている阿武隈山地と広野丘陵との境界付近には、檜葉町上小埜^{かみこぼな}付近から同町大坂付近に至る約4km間において、リニアメントが断続的に判読されとしている。地表地質調査結果によると、同リニアメントの位置付近には断層は認められず、リニアメントは西側の古生層及び花崗岩類と東側の白水層群石城層との境界に対応していることから、岩質の差を反映した侵食地形と判断されとしている。

合同Aサブグループでは、大坂－芦沢リニアメントの活動性の評価の妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、大坂－芦沢リニアメントが、岩相境界に対応していること、周辺の地層がいずれ

も 10° ～ 20° 東傾斜の同斜構造を示し、断層、撓曲構造が認められないことから、大坂－芦沢リニアメントに対応する断層は存在せず、両側の岩質の差を反映した侵食地形であると評価していることは妥当なものと判断した。

4) 敷地前面海域に認められる断層の評価

東京電力は海上音波探査結果から、敷地前面海域において多数の断層が認められるとしている。敷地前面部においては多数の正断層が確認されるが C_2 層（上部鮮新統）に変位を与えていない、若しくは深部へ連続していないとしている。また、一部、逆断層が想定される箇所があるが、少なくとも断層が C_1 層（下部更新統）に変位・変形を与えていないとしている。さらに、敷地南東部においては正断層が多数確認されるが、大部分のものは深部へ連続せず、また、深部への連続が不明瞭な断層については正断層の形態を示し、現在の応力場において地震を発生されることはないとは評価している。

以上のことから、敷地前面海域に認められる断層はいずれも活断層ではないとしている。

合同 A サブグループでは、東京電力が実施した海上音波探査結果等を基に、敷地前面海域に認められる断層の活動性について、当院が実施した海上音波探査結果も加えて検討を行った。その検討結果に基づき当院は、地質層序について、旧石油公団等による基礎試錐と音波探査記録との対比により層序を検討していること、敷地前面部に認められる正断層について、深部へ連続しないか、または深部への連続が不明瞭であっても更新統以浅に変位、変形を与えていないこと、逆断層について、更新統以浅に変位、変形を与えていないこと、敷地南東部に認められる断層について、大部分のものは深部へ連続せず、また、深部への連続が不明瞭な断層について、正断層の形態を示しており、かつ更新統以浅に変位・変形を与えていないことを確認した。また、敷地前面部及び敷地南東部に認められる正断層のうち深部への連続が不明瞭なものについて、断層の形態が深部から表層まで正断層であり、更新統にインバージョンは認められないことから、現在の圧縮応力場において逆断層として地震を発生させることはないとは評価していることは妥当なものと判断した。

以上のことから、当院は、敷地前面海域に認められる断層が、いずれも活断層ではないとは評価していることは妥当なものと判断した。

(2) 地震動評価

新耐震指針では、基準地震動 S_s の策定方針として、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、敷地の解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動として策定することを要求している。

合同 A サブグループでは、東京電力による「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、合同 A サブグループにおける敷地周辺の地質・地質構造に係る検討結果、新耐震指針、バックチェックルール、「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震バックチェックに反映すべき事項の中間とりまとめについて」（平成 19 年 12 月 27 日）及び「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」（平成 20 年 9 月 4 日）を踏まえ検討を行った。

合同 A サブグループにおける検討内容及びその検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

なお、当院は、双葉断層の耐震設計上考慮する長さについて、最終的に約 37km を妥当なものとしたが、双葉断層による地震動評価について、耐震バックチェック中間報告が提出された当初の長さ約 47.5km の暫定評価に対する合同 A サブグループの検討結果に基づき、評価の妥当性を判断した。

1) 解放基盤表面の設定

東京電力は、敷地の地質については、文献調査、地表地質調査、ボーリングの調査等より新第三紀の泥岩等からなる富岡層が敷地の全域にわたりほぼ同じ層厚で分布し、その下位には新第三紀の多賀層群が分布するとしており、既往のボーリング調査及び弾性波探査の結果から S 波速度が 0.7km/sec 以上となる標高 -168m に解放基盤表面を設定している。

合同 A サブグループでの検討結果に基づき当院は、解放基盤表面の設定位置（中新統の多賀層群の上面にほぼ相当）が、S 波速度 0.7km/sec 以上の硬質地盤であること、後述するように、観測記録による検討結果から、地下構造が地震動特性に及ぼす影響は小さく、地震動評価上ほぼ成層構造とみなして支障ないことを確認した。これらのことから、東京電力による解放基盤表面の設定は支障ないものと判断した。

2) 震源を特定して策定する地震動

① 検討用地震の選定

東京電力は、敷地周辺の地震発生様式を考慮し、敷地周辺の活断層の分布状況、地震の発生状況から、基準地震動の策定に際しては内陸地殻内地震、プレート間地震及び海洋プレート内地震を考慮している。検討用地震の抽出に際しての敷地への影響は、候補となる過去の地震、活断層による地震等のそれぞれについて、Noda et al. (2002)⁽⁴⁾による距離減衰式（以下「耐専式」という。）を用いて評価した応答スペクトルを比較することにより検討している。活断層による地震について、敷地への影響を検討する際に想定する地震規模は、断層長さから松田(1975)⁽⁵⁾の関係式を用い算定している。

敷地への影響の検討の結果、内陸地殻内地震については双葉断層による地震（長さ約 47.5km）を、プレート間地震については 1938 年塩屋崎沖地震群の 4 地震 (M7.0～M7.5) のうち敷地への影響が大きい塩屋崎沖の地震② (M7.5) 及び塩屋崎沖の地震③ (M7.3) を、海洋プレート内地震については想定敷地下方の地震 (M7.1) を検討用地震として選定している。

合同 A サブグループでは、検討用地震の選定の妥当性について、敷地周辺の地震発生状況、活断層の分布状況を踏まえて検討を行った。その検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

内陸地殻内地震については、双葉断層による地震（長さ約 47.5km）が、福島盆地西縁断層帯による地震及び井戸沢断層による地震に比べて、敷地への影響が大きいことから、双葉断層による地震（長さ約 47.5km）を検討用地震として選定していることは妥当なものと判断した。

プレート間地震については、敷地へ最も影響を与えるプレート間地震として、敷地前面のプレート境界付近で発生した 1938 年塩屋崎地震群を選定し、この中から、敷地への影響が大きい塩屋崎沖の地震② (M7.5) 及び塩屋崎沖の地震③ (M7.3) を検討用地震として選定していることは妥当なものと判断した。

海洋プレート内地震については、地震調査研究推進本部(2006)⁽⁶⁾において敷地を含む領域における海洋プレート内地震の最大規模が 2003 年宮城県沖の地震の M7.1 とされていること及び海洋プレート内地震の観測記録が少ないことの 2 点を踏まえ、安全評価上、震源位置

の不確かさを予め考慮し、仮に敷地下方の海洋プレート内に 2003 年宮城県沖の地震と同様の地震が発生するものとして、想定敷地下方の地震（M7.1）を検討用地震として選定していることは妥当なものと判断した。

② 内陸地殻内地震

(a) 双葉断層による地震の震源モデル

基準地震動の設定に当たっては、検討用地震について基本震源モデルを設定するとともに、震源パラメータの不確かさを考慮した震源モデルを設定する必要がある。

東京電力は、中間報告において暫定的に評価した双葉断層による地震（長さ約 47.5km）について、基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルを設定して敷地の地震動の評価を行っている

東京電力は、前述のとおり、双葉断層の耐震設計上考慮する長さを約 37km と評価したことを踏まえ、双葉断層による地震（長さ約 37km）の地震動評価については、本報告までに行うこととしている。

双葉断層の基本震源モデルのパラメータとしては、ア）地質調査の結果に基づき評価された双葉断層の長さをもとに設定、イ）地震規模（気象庁マグニチュード）は断層長さから松田（1975）の関係式をもとに設定、ウ）断層幅は微小地震の観測結果等に基づく地震発生層の厚さに不確かさを考慮して設定、エ）その他のパラメータは地震調査研究推進本部（2006）等を参考に設定したとしている。また、震源要素の不確かさとして、断層傾斜角、アスペリティ位置、破壊開始点及び応力降下量の不確かさを考慮した震源モデルを設定したとしている。

双葉断層の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルのパラメータを表－1に、基本震源モデル及び不確かさを考慮したケースの震源モデルを図－2に示す。

合同 A サブグループでは、東京電力が設定した双葉断層による地震（長さ約 47.5km）の震源モデルの妥当性について検討を行った。その検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

地震発生層については、気象庁地震カタログ（1997 年 10 月～2008 年 5 月）を用いた敷地周辺の 100km 程度以内の範囲の微小地震分布による検討、敷地周辺の速度構造に関する検討等から、地震発生層

の上端深さを 6km、下端深さを 18km としていること、地震発生層の下端深さの設定が地殻熱構造やコンラッド面に関する知見に概ね対応していること、双葉断層の位置する敷地の北方では微小地震分布が相対的に浅くなる傾向がみられるため、双葉断層による地震の地震動評価に当たって、不確かさを予め考慮して地震発生層の上端深さを 3km としていることを確認した。

不確かさを考慮した震源モデルのパラメータのうちアスペリティの位置については、敷地に最も近い南端に設定していること、破壊開始点については、敷地に及ぼす影響が最も大きい巨視的断層面の下端に設定していることを確認した。また、断層傾斜角については、地質調査結果から双葉断層は左横ずれ西上がりの断層であること及び現在の応力場が東西圧縮であることの 2 点を踏まえると、双葉断層が西傾斜の断層であると推定されるものの、地震動評価の観点から断層傾斜角の不確かさケースとして敷地に与える影響の大きい東傾斜 70° を設定していることを確認した。

新潟県中越沖地震の震源断層の応力降下量が 1.5 倍程度大きかったことを踏まえた対応については、双葉断層の基本震源モデルの応力降下量を 1.5 倍した場合の応答スペクトルと基準地震動 Ss-1 を比較し、応力降下量の不確かさケースを考慮した応答スペクトルが、基準地震動 Ss-1 を下回ることを確認した。

なお、双葉断層による地震の断層長さを約 47.5km から約 37km に見直すことによる基準地震動に及ぼす影響については、双葉断層による地震（断層長さ約 37km）の基本震源モデルを対象としたハイブリッド法による地震動評価を実施した結果から、その影響が小さいことを確認した。

以上より、当院は、双葉断層の震源モデルのパラメータ及びその不確かさとして断層傾斜角等を考慮した震源モデルのパラメータは妥当なものと判断した。

(b) 応答スペクトルによる手法に基づく地震動評価

基準地震動の設定に当たっては、応答スペクトルによる手法（以下「応答スペクトル手法」という。）に基づいて地震動の評価を行う必要がある。

東京電力は、双葉断層による地震（長さ約 47.5km）の応答スペクトル手法として、耐専式を用いて地震動の評価を行っているが、耐

専式の適用に当たっては、敷地周辺で発生した内陸地殻内地震の観測記録が得られていないことを踏まえ、Noda et al. (2002)による内陸地殻内地震の補正による低減を考慮せず相対的により厳しい評価となるように敷地の地震動を評価したとしている。

合同Aサブグループでは、東京電力の応答スペクトル手法に基づく地震動評価の妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、応答スペクトル手法として耐専式を用いた地震動評価を行うに当たって、敷地周辺で発生した内陸地殻内地震の観測記録が得られていないことを踏まえ、内陸補正係数を適用した場合と比べて相対的により厳しい評価となるようにNoda et al. (2002)による内陸地殻内地震の補正による低減を適用しないとしていることは妥当なものと判断した。

(c) 断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価

基準地震動の設定に当たっては、断層モデルを用いた手法に基づいて地震動の評価を行う必要がある。

東京電力は、双葉断層の震源モデルをもとに断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価を実施している。

双葉断層の断層モデルによる地震動の評価に際しては、敷地において要素地震として適切な観測記録が得られていないことから、統計的グリーン関数法及び理論的手法を用いたハイブリッド合成法を用いて実施したとしている。

また、地下構造モデルは、解放基盤表面から地震基盤までは水平／上下スペクトル振幅比の逆解析による地下構造推定法(小林ほか、2005)⁽⁷⁾に基づき設定し、地震基盤以深は福山ほか(1998)⁽⁸⁾に基づいて設定したとしている。

合同Aサブグループでは、東京電力による断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価の妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、断層モデルによる評価に際して、敷地において波形合成法の要素地震として適切な内陸地殻内地震の観測記録が得られていないことから、統計的グリーン関数法及び理論的手法を用いたハイブリッド合成法を用いていることを確認した。

また、合同Aサブグループでは、新潟県中越沖地震を踏まえ、福

島第二サイトの地下構造が地震動評価に与える影響について検討を行った。その過程で、東京電力から、地震観測点における PS 検層結果に加え、中間報告書提出以降に得られた調査結果として、大深度ボーリング調査、反射法地下探査、ベイケーブル探査、微動アレイ探査がそれぞれ独立した情報として提示されたが、手法によりモデルに若干の不整合が生じたため、データの整合性を考慮した総合的かつ統一的な説明を求めた。そして、東京電力が中間報告書提出以降の地質調査結果、微動アレイ探査結果等を踏まえて再構築した地下構造モデルについて検討した。その検討結果に基づき当院は、地下構造モデル再構築の前後における地震基盤面から解放基盤表面までの増幅特性に大きな差が見られないことを確認した。また、新たな地下構造モデルを用いることによって基準地震動に及ぼす影響については、再構築した地下構造モデルに基づき、双葉断層による地震（断層長さ 47.5km）の基本震源モデルを対象としたハイブリッド法による地震動評価を実施した結果から、地下構造モデルの見直し前後で地震動評価結果に大きな差がないことを確認した。

さらに、合同 A サブグループでは、福島第二サイトの地下構造が地震動の増幅特性に及ぼす影響について、福島第二サイトの地震観測記録の富岡観測点の観測記録に対する応答スペクトル比の平均値を算定し、震央の方位毎に整理し比較検討を行った。その検討結果に基づき当院は、震央の方位により応答スペクトル比が大きく変化することはなく、サイト周辺の地下構造が地震動の増幅特性に及ぼす影響が小さいことを確認した。

これらのことから、当院は、断層モデルを用いて行った双葉断層による地震（長さ約 47.5km）の地震動評価は妥当なものと判断した。

③ プレート間地震

(a) 塩屋崎沖の地震の震源モデル

東京電力は、塩屋崎沖の地震について、基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルを設定し、敷地の地震動の評価を行っている。

塩屋崎沖の地震②（M7.5）及び塩屋崎沖の地震③（M7.3）の基本震源モデルのパラメータは、既往の知見に基づき設定している。また、不確かさを考慮したケースとして、塩屋崎沖の地震①～③の3つの地震が連動する場合を想定し、これを「仮想塩屋崎沖の地震」として設定している。

塩屋崎沖の地震②及び塩屋崎沖の地震③の基本震源モデル並びに不確かさを考慮した仮想塩屋崎沖の地震の震源モデルのパラメータを表－２に、これらの震源モデルを図－３に示す。

合同Ａサブグループでは、東京電力が設定した塩屋崎沖の地震の震源モデルの妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、基本震源モデルとして、塩屋崎沖の地震②及び塩屋崎沖の地震③をそれぞれ単独で考慮し、基本震源モデル及びその断層パラメータとして、池田ほか(2008)⁽⁹⁾による1938年塩屋崎沖地震の波形インバージョン解析結果に基づく特性化震源モデルを参考に設定していることを確認した。不確かさを考慮した震源モデルのパラメータとしては、1938年塩屋崎沖の地震群が約半年の間に連続して発生していることを踏まえ、塩屋崎沖の地震①を含めた塩屋崎沖地震群の3つの地震が連動する場合を想定していることを確認した。また、破壊開始点について、敷地に近づく方向に設定していることを確認した。

以上のことから、当院は、塩屋崎沖の地震の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルは妥当なものと判断した。

(b) 応答スペクトルによる手法に基づく地震動評価

東京電力は、塩屋崎沖の地震の応答スペクトル手法として、耐専式を用いて地震動の評価を行っており、敷地の地下構造による影響を考慮するため、プレート間で発生した地震の観測記録から求められた解放基盤表面の応答スペクトルと耐専式による応答スペクトルの比率をサイト補正係数として、塩屋崎沖の地震の震源モデルから求められる耐専式による応答スペクトルを補正し、地震動を評価している。

合同Ａサブグループでは、東京電力の応答スペクトル手法に基づく地震動評価の妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、応答スペクトル手法として耐専式を用いて地震動の評価を行っていること、また、プレート間で発生した観測記録を基に耐専式の応答スペクトルを補正し地震動を評価していることは妥当なものと判断した。

(c) 断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価

東京電力は、塩屋崎沖の地震の震源モデルをもとに断層モデルを用いた手法に基づき敷地の地震動を評価している。

断層モデルによる地震動の評価に際しては、敷地で得られた地震観測記録を要素地震とした経験的グリーン関数法を用いている。

要素地震については、想定する地震の震源域で発生した 2003 年 3 月 3 日の福島県沖の地震 (M5.9) 及び 2004 年 9 月 1 日の福島県沖の地震 (M5.6) を採用している。

合同 A サブグループでは、東京電力の断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価の妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、断層モデルによる評価に際して、想定する地震の震源域で発生したプレート境界地震の敷地における観測記録を要素地震とした経験的グリーン関数法を実施し震源の特性、敷地までの伝播特性及び敷地における増幅特性を考慮していることを確認した。

以上のことから、当院は、断層モデルを用いて行ったプレート間地震による地震動評価は妥当なものと判断した。

④ 海洋プレート内地震

(a) 想定敷地下方の地震の震源モデル

東京電力は、想定敷地下方の地震について、基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルを設定し、敷地の地震動の評価を行っている。

基本震源モデルの設定に当たっては、敷地周辺での海洋プレート内地震の既往最大の規模である M7.1 を想定し、また、発生位置は、敷地における観測記録がプレート間地震と比べて少ないことを踏まえ、敷地に最も大きな影響を及ぼすと考えられる敷地下方の太平洋プレート内に設定しており、その他のパラメータは浅野ほか (2004) ⁽¹⁰⁾ による 2003 年宮城県沖の地震 (M7.1) の特性化震源モデルを参考に設定している。

不確かさを考慮した震源モデルについては、発生位置の不確かさを考慮して、基本震源モデルの断層上端を太平洋プレート上面位置に設定 (断層面を 9km 浅く設定) している。

想定敷地下方の地震の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルのパラメータを表-3 に、これらの震源モデルを図-4 に示す。

合同 A サブグループでは、東京電力が設定した想定敷地下方の地震の震源モデルの妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、不確かさを考慮した震源モデルのパラメータについて、地震規模として敷地周辺の海洋プレート内地震の既往最大を設定していること、発生位置として敷地下方の太平洋プレート内に設定していること、さらに、発生位置の不確かさとして基本震源モデルの断層上端を太平洋プレート上面位置に設定(断層面を 9km 浅く設定)していること、その他のパラメータとして浅野ほか(2004)による 2003 年宮城県沖の地震(M7.1)の特性化震源モデルを参考に設定していることは妥当なものと判断した。

(b) 応答スペクトルによる手法に基づく地震動評価

東京電力は、想定敷地下方の地震の応答スペクトル手法として、耐専式を用いて地震動の評価を行っており、海洋プレート内地震の震源特性を考慮するため、震源直上の KiK-net 観測点における 2003 年宮城県沖の地震の観測記録から求められた応答スペクトルと耐専式による応答スペクトルの比率をサイト補正係数として、想定敷地下方の地震の震源モデルから求められる耐専式による応答スペクトルを補正し、地震動を評価している。

合同 A サブグループでは、東京電力の応答スペクトル手法に基づく地震動評価の妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、応答スペクトル手法として耐専式を用いて地震動の評価を行っていること、また、海洋プレート内地震の震源特性を考慮するため、海洋プレート内で発生した地震の観測記録を基に耐専式の応答スペクトルを補正し地震動を評価していることは妥当なものと判断した。

(c) 断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価

東京電力は、想定敷地下方の地震の震源モデルをもとに断層モデルを用いた手法に基づき敷地の地震動を評価している。

断層モデルによる地震動の評価に際しては、想定する地震の震源域で発生した海洋プレート内地震の敷地で得られた地震観測記録を要素地震とした経験的グリーン関数法を用いている。

要素地震については、想定する地震の震源域で発生した 2003 年 2

月 16 日の福島県沖の地震 (M5. 2) を採用している。

合同 A サブグループでは、東京電力の断層モデルを用いた手法に基づく地震動評価の妥当性について検討を行った。その検討結果に基づき当院は、断層モデルによる評価に際して、想定する地震の震源域で発生した二重深発地震面上面の DC (ダウン・アップ・コンプレッション) 型の海洋プレート内地震の敷地における観測記録を要素地震とした経験的グリーン関数法を実施し震源の特性、敷地までの伝播特性及び敷地における増幅特性を考慮していること、想定する震源付近で発生した地震を要素地震として選定していることを確認した。

これらのことから、当院は、断層モデルを用いて行った海洋プレート内地震による地震動評価は妥当なものと判断した。

3) 震源を特定せず策定する地震動

震源を特定せず策定する地震動については、震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に策定することが要求される。

東京電力は、敷地周辺の地震発生層から震源と活断層とを関連付けることが困難な地震の最大規模については、地震発生層を飽和する震源断層による地震の地震規模であると考え、地震発生層の上端から下端まで広がる断層幅及びそれに等しい断層長さをもつ震源断層を設定した場合、敷地周辺における震源を事前に特定できない地震の最大規模は、加藤ほか (2004) ⁽¹¹⁾ が提案する際に基づいた地震規模と同程度以下と推定されるため、敷地の地盤物性を考慮し、加藤ほか (2004) が提案した S 波速度 0.7km/sec 相当の岩盤上における地震動レベルを「震源を特定せず策定する地震動」として設定している。なお、地震発生層については、前述のように、気象庁地震カタログ (1997 年 10 月～2008 年 5 月) を用いた敷地周辺の微小地震分布による検討、敷地周辺の速度構造に関する検討等から、深さが 6km～18km、厚さが 12km と設定している。

さらに、「震源を特定せず策定する地震動」について、1 年間にそれを超える地震動が発生する確率 (以下「年超過確率」という。) と、独立行政法人原子力安全基盤機構 (2005) ⁽¹²⁾ による南東北・関東・中部地域における震源を特定しにくい地震動の一樣ハザードスペクトルとを比較した結果、 10^{-4} ～ 10^{-6} 程度であるとしている。また、原子力学会標準 (2007)

(13)に基づいて算定した領域震源の一樣ハザードスペクトルと比較した結果、 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度であることを確認したとしている。

合同 A サブグループの検討結果に基づき当院は、地震調査研究推進本部(2006)による敷地を含む領域の「陸域の震源断層を予め特定しにくい地震」の最大マグニチュードは M6.7 程度とされていること、敷地を含む北関東及び東北の太平洋側の領域において震源と活断層とを関連付けることが困難な地震の最大規模は M6.5 であること、地震発生層(厚さ 12km)から推定される地震の規模は、敷地周辺の断層が日本海の形成時に伸張応力場で形成された古い地質構造に規制され断層傾斜角が高角となりやすいことを考慮し傾斜角 $90^{\circ} \sim 60^{\circ}$ とした場合、M6.1～M6.5 程度、仮に傾斜角 45° としても M6.6～M6.8 程度であることを確認し、加藤ほか(2004)においては、これらと同等の規模の地震をスペクトル設定時の検討対象に加えていることから、加藤ほか(2004)が提案した S 波速度 0.7km/sec 相当の岩盤上における地震動レベルを「震源を特定せず策定する地震動」として設定していることは妥当なものと判断した。

4) 基準地震動 S_s の策定

① 基準地震動 S_s

東京電力は、検討用地震について不確かさを考慮した応答スペクトル手法による地震動及び断層モデルを用いた手法による地震動をもとに、基準地震動 S_s を策定している。

基準地震動 S_s-1 は、内陸地殻内地震及びプレート間地震の地震動評価結果(応答スペクトル、断層モデル)を包絡させた水平方向の設計用応答スペクトル S_s-1H 及び鉛直方向の設計用応答スペクトル S_s-1V として設定している。

基準地震動 S_s-2 は、海洋プレート内の地震動評価結果(応答スペクトル、断層モデル)を包絡させた水平方向の設計用応答スペクトル S_s-2H 及び鉛直方向の設計用応答スペクトル S_s-2V として設定している。

基準地震動 S_s-3 は、震源を特定せず策定する地震動の評価結果に基づき水平方向の設計用応答スペクトル S_s-3H 及び鉛直方向の設計用応答スペクトル S_s-3V として設定している。

応答スペクトル手法に基づく地震動の評価結果、断層モデルを用いた手法による地震動の評価結果及び基準地震動 S_s を図-5 及び図-

6に示す。

合同Aサブグループの検討結果に基づき当院は、東京電力が「震源を特定して策定する地震動」を包絡させた設計用応答スペクトルを基準地震動 Ss-1 及び Ss-2 とし、また、また、「震源を特定せず策定する地震動」による設計用応答スペクトルを基準地震動 Ss-3 として設定していることは妥当なものと判断した。

その後、合同ワーキンググループにおいて、津波堆積物の調査結果を踏まえた 869 年貞観の地震に関する文献⁽¹⁴⁾を考慮した検討をすべきとの意見があったため、当該文献において提案された津波シミュレーションに基づく波源モデルを震源断層と仮定した上で、耐専式により地震動評価を実施し、基準地震動 Ss に及ぼす影響を検討した。その検討結果に基づき当院は、869 年貞観の地震の津波評価における波源モデルを震源断層と仮定した地震動評価結果が、プレート間地震を考慮して策定された基準地震動 Ss-1 の設計用応答スペクトルを全周期帯において下回り、周期ごとの最大振幅値の比率として $2/3$ 程度以下であることを確認した。なお、現在、研究機関等により 869 年貞観の地震に係る津波堆積物や津波の波源等に関する調査研究が行われていることを踏まえ、当院は、今後、事業者が津波評価及び地震動評価の観点から、適宜、当該調査研究の成果に応じた適切な対応を取るべきと考える。

② 基準地震動 Ss の模擬地震波

東京電力は、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 の模擬地震波として、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 の設計用応答スペクトルをもとに振幅包絡線の経時的变化を Noda et al. (2002) の文献に基づく形状とし、乱數位相をもつ正弦波の重ね合わせにより作成したとしている。その結果、模擬地震波の設計用応答スペクトルに対する適合性は、応答スペクトル比の最小値が 0.85 以上かつ応答スペクトル強さ (0.1 秒から 2.5 秒) の比が 1 以上とした条件を満たすとしている。

合同Aサブグループでは、東京電力が模擬地震波の作成の際に位相特性として乱數位相を用いていることを踏まえ、震源の破壊過程、波動伝播及び地盤特性を考慮した断層モデルによる評価結果の位相特性を用いて模擬地震波を作った場合に、最大加速度振幅値がどの程度変わるか把握することにより、ある特定の周期帯の波の位相が重なり合

っていないかについて検討を行った。その検討結果に基づき当院は、プレート間地震の断層モデルによる評価結果の位相特性を用いて作成された模擬地震波と、位相特性を一様乱数としている基準地震動 Ss-1 の模擬地震波を比較した結果から、適合条件（スペクトル比の最小値 ≥ 0.85 及び応答スペクトル強さの比 ≥ 1.0 ）を満足するように作成した模擬地震波の最大加速度振幅値の差異が、2%程度であり、最大加速度振幅値への影響が小さく、ある特定の周期帯の波の位相が重なり合っていないことを推定した。

以上のことから、当院は、作成された基準地震動 Ss-1 の模擬地震波は妥当なものと判断した。

5) 基準地震動の超過確率の参照

新耐震指針においては、策定された地震動の応答スペクトルがどの程度の超過確率に相当するかを把握しておくことが望ましいとの観点から、安全審査においても超過確率を参照することを求めている。また、当院が平成20年9月4日にとりまとめた「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」においても、不確かさを考慮して策定された基準地震動の超過確率を参照することとしている。

東京電力は、解放基盤表面での地震動の最大加速度と1年間にそれを超える地震動が発生する確率（以下「年超過確率」という。）の関係を日本原子力学会標準(2007)に基づき算定し、その結果、基準地震動 Ss の年超過確率は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度としている。

3. 3 施設の耐震安全性評価の妥当性

構造 A サブグループでは、東京電力による施設の耐震安全性評価（中間報告）について、新耐震指針、バックチェックルール並びに「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」（平成 20 年 9 月 4 日）を踏まえ検討を行った。

（1）建物・構築物の耐震安全性評価

東京電力は、福島第二原子力発電所 4 号機の耐震安全性に係る中間報告において、建物・構築物の評価対象施設として原子炉建屋を選定している。

原子炉建屋の耐震安全性評価に当たっては、構造物全体として変形能力について十分な余裕を有し、建物の終局耐力に対し妥当な安全余裕を有していることを確認するため、水平方向及び鉛直方向の地震応答解析モデルを構築し、基準地震動 S_s に基づく地震応答解析を行い、各層の鉄筋コンクリート造（以下「RC 造」という。）耐震壁の最大応答せん断ひずみが評価基準値である 2.0×10^{-3} を超えないこととしている。

構造 A サブグループにおける建物・構築物の耐震安全性評価に係る検討内容及びその検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

1) 原子炉建屋の地震応答解析モデル

東京電力による評価は以下のとおりである。

原子炉建屋の水平方向の地震応答解析モデルとしては、耐震壁のせん断剛性と曲げ剛性を考慮した 1 軸多質点系とし、（社）日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」⁽¹⁵⁾（以下「JEAG4601-1991 追補版」という。）に基づき、建屋と底面・側面地盤との相互作用を考慮した水平・回転地盤ばねを基礎底面及び建屋側面に付加するとともに、耐震壁の非線形復元力特性及び基礎の浮き上がりによる地盤の回転ばねの幾何学的非線形性を考慮したとしている。なお、工事計画認可における計算書（以下「既往評価」という。）からのモデル化に係る主な変更点は、建屋－地盤連成系を格子モデルから埋込み SR モデルとして、建屋と底面・側面地盤との相互作用を考慮した底面ばね及び側面ばね（水平成分及び回転成分）を付加していること、耐震壁及び底面回転ばねに非線形性を考慮したことの 2 点である。

原子炉建屋の鉛直方向の地震応答解析モデルとしては、耐震壁及び柱の軸剛性を考慮して各質点を連結した 1 軸多質点系とし、JEAG4601-1991 追補版に基づき、建屋と底面地盤との相互作用を考慮した鉛直地盤ばねを基礎底面位置に付加したとしている。なお、屋根部については、柱通り芯位置に質点を設け、屋根トラスのせん断剛性と曲げ剛性を考慮した多質点系の対称モデルとし、建屋部分との接続部には、鉄骨鉄筋コンクリート造（以下「SRC 造」という。）の柱等による拘束効果を考慮した回転ばねを付加したとしている。

原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析モデルを図 7 に示す。

当該モデルの物性として、RC 造部の剛性はコンクリートの実強度により評価し、RC 造部及び鉄骨造（以下「S 造」という。）部の減衰定数は、それぞれ 5%、2%と設定したとしている。なお、既往評価からの物性の設定に係る主な変更点は、RC 造部の剛性評価をコンクリートの設計基準強度から実強度により評価したこととしている。

構造 A サブグループでは、東京電力が作成した原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析モデルの妥当性について検討した。

水平方向の地震応答解析モデルについては、既往評価におけるモデルに対して、最新の知見及び基準等を反映したモデルに変更していることから、モデル化や物性の設定に係る変更点の詳細について検討した。

その検討結果に基づき当院は、変更点として、建屋-地盤連成系モデルを格子型モデルから埋込み SR モデルに変更したこと、それに伴い、水平方向及び回転方向の地盤ばねの剛性及び減衰の評価方法を変更し、特に地盤ばねの減衰について、水平方向の減衰として各モードで表層部を 8%、岩盤部を 5%及び回転方向の減衰として各モードで 10%の評価から、JEAG4601-1991 追補版を基に近似法による減衰係数をモード減衰に等価な建屋の減衰マトリクスに後から組み込む評価に変更したこと、RC 造部の剛性について、コンクリートの設計基準強度による評価からコンクリートの実強度による評価に変更したことを確認した。

原子炉建屋の水平方向の地震応答解析モデルにおいて側面地盤ばねの評価手法として、JEAG4601-1991 追補版に例示された NOVAK の方法を適用したことについては、原子炉建屋が地表から基礎下端まで 18.5m 埋め込まれ、その周辺にタービン建屋及びコントロール建屋（一部）が隣接し、原子炉建屋の地下部側面と地盤がほぼ 3 面（接地している側面の面積比率は 70.4%）で密着しているが、既往の研究⁽¹⁶⁾において、軟岩サイ

トを対象に 20m 及び 40m の埋込み深さ毎にそれぞれ側面地盤に関して 1 面～全面の接地の計 12 ケースについてパラメータスタディされ、20m の埋込み深さで振動方向に正対する 1 面を含む、ほぼ 3 面が側面地盤に接地していれば、伝達特性及び減衰特性の観点から全 4 面が埋め込まれている場合とほぼ同等とみなせるとの知見が得られていることを踏まえ、埋込み部分の建屋側面の地盤ばねの評価に NOVAK の方法を適用して支障がないことを確認した。なお、側面回転ばねについては、建屋の回転（ロッキング）変形に伴う側面地盤の抵抗（摩擦力）を評価するために考慮しているが、側面回転ばねの有無をパラメータとしたパラメータスタディを実施した結果から、側面回転ばねの有無が水平方向の建屋応答に与える影響は小さいことを把握した。

原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析モデルの物性のうち、RC 造部の剛性を評価する際に用いるコンクリート強度については、新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の健全性評価において、コンクリートの実強度により RC 造部の剛性を求め、より実状に近づけることで概ね地震観測記録を再現できるという知見が得られたとして、過去に原子力発電所内で実施されたコンクリート健全性評価及び建築設備点検等における圧縮強度試験結果から推定した実強度として、圧縮強度のばらつきや同程度の設計基準強度でデータ量が豊富な福島第一原子力発電所の実強度の設定値を考慮し、平均値を下回る値を採用していることを確認した。RC 造部の剛性評価に用いるコンクリート強度をパラメータとしたパラメータスタディを実施した結果から、コンクリート強度について実強度として設定した値か設計基準強度かで水平方向及び鉛直方向の建屋応答に与える影響は小さいことを把握した。

構造 A サブグループでは、既往評価から水平方向の地震応答解析モデルを変更したことによる影響について、耐震安全性評価の地震応答解析モデルに、既往評価における入力地震動である、旧指針に基づく基準地震動 S_2 （以下「 S_2 地震動」という。）を入力とした地震応答解析を実施し、既往評価の結果または基準地震動 S_s による耐震安全性評価の結果と比較した。その結果に基づき当院は、 S_2 地震動を耐震安全性評価の地震応答解析モデルに入力した場合と既往評価の最大応答加速度はほぼ同等となっており、地震応答解析モデルの設定方法や入力方法を変更したことによる応答解析結果の違いが比較的小さいことを把握した。さらに、構造 A サブグループでは、既往評価から地震動を変更したことによる影響について検討した。その検討結果に基づき当院は、基準地震動 S_s を入力した場合の最大応答加速度分布が、 S_2 地震動を入力とした場合の約 2 倍

以上となっており、建屋-地盤連成系の一次固有周期の 0.45 秒前後における双方の入力地震動の加速度応答スペクトルの関係と整合的であることを把握した。これらの結果から、建屋応答に与える影響については、地震応答解析モデルの設定方法や入力方法の変更よりも、入力地震動の変更の方が相対的に大きいことを確認した。

また、構造 A サブグループでは、新潟県中越沖地震を踏まえ、床などの柔性を考慮した解析あるいは地震観測記録に基づいた解析などにより、耐震バックチェックで用いた水平方向の地震応答解析モデルによる耐震安全性評価に問題がないことを検討した。その検討結果に基づき当院は、福島第二原子力発電所において、2008 年 6 月 14 日の岩手・宮城内陸地震（M7.2）の際に、建屋の応答としてはひずみが極めて小さい領域であるが観測記録（基礎版上の水平方向で約 20Gal 程度）が得られており、この観測記録のうち基礎版上の観測記録を入力とし床などを剛としたモデル（以下「床剛モデル」という。）によるシミュレーション解析結果から、床剛モデルによる解析結果と観測記録が概ね整合していることを確認した。さらに、前述の地震による観測記録を入力とし床などの柔性を考慮したモデル（以下「床柔モデル」という。）によるシミュレーション解析結果から、床柔モデルによる解析結果が床剛モデルによる解析結果と概ね良い対応を示し、床柔モデルの場合であっても、柏崎刈羽原子力発電所 4 号機の間階位置で見られたような応答性状（クレーンガーダ直交方向にシェル壁とボックス壁（内壁、外壁）とが異なる応答性状を示し、シェル壁の応答値が相対的に大きくなる傾向が大きいこと）が、建屋の応答性状として現れていないことを確認した。以上より、当院は、新潟県中越沖地震を踏まえても耐震バックチェックで用いた水平方向の地震応答解析モデルによる耐震安全性評価に問題がないことを確認した。

構造 A サブグループでは、RC 造部の減衰定数を 5%としていることの妥当性について、建屋と地盤のそれぞれの減衰の設定方法と運動方程式における粘性減衰系マトリクスの構成方法に係る検討を行った。その検討結果に基づき当院は、建屋の減衰を振動数に対して一定とし、地盤ばねに与える減衰を除いた建屋のモード減衰をひずみエネルギーに比例するものとして求めた上で、これに等価な建屋の粘性減衰系マトリクスを構成させていること、地盤ばねの減衰として、JEAG4601-1991 追補版による相互作用ばねの評価に基づき粘性減衰係数を設定していること、建屋の粘性減衰系マトリクスと地盤の粘性減衰係数を併せて建屋・地盤連成系の粘性減衰マトリクスを構成させていることを確認した。これらを踏まえ、構造 A サブグループでは、各次モードの振動数に応じた地盤の減

衰定数を算定し、全体系の各次の振動数における建屋及び地盤それぞれのひずみエネルギーの比率に応じたモード減衰（全体系のひずみエネルギー比例型モード減衰定数）を算定し、それらの比較検討を行った。その検討結果に基づき当院は、原子炉建屋の水平方向の地震応答解析モデルについて、全体系の減衰に対して地盤の逸散減衰の占める割合が相対的に高く、建屋の減衰の占める割合が相対的に低い傾向が現れていること（福島第二原子力発電所が比較的軟質な岩盤上に設置され周辺地盤に埋め込まれていることと整合的）を確認した。また、RC 造部の減衰定数をパラメータとしたパラメータスタディを実施した結果から、RC 造部の減衰定数が 5%か 3%かで水平方向及び鉛直方向の建屋応答に与える影響は小さいことから、建屋・地盤を含めた全体系の減衰の中で RC 造部の減衰定数を 5%と設定して支障無いものと判断した。

以上のことから、当院は、東京電力が作成した原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析モデルは妥当なものと判断した。

2) 原子炉建屋の入力地震動の評価

東京電力による評価は以下のとおりである。

原子炉建屋の水平方向の入力地震動については、一次元波動論に基づき、解放基盤表面に想定する基準地震動 S_s に対する地盤の応答を評価している。具体的には、解放基盤表面（O. P. -168. 0m、 $V_s=714\text{m/sec}$ ）で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から地表面（O. P. +12. 0m）までの速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行い、原子炉建屋基礎底面位置（O. P. -6. 5m）及び側面ばね位置（O. P. +0. 0m、O. P. +6. 0m 及び O. P. +12. 0m）での地震動を求め、これを入力地震動としている。また、建屋基礎底面位置におけるせん断力（切欠き力）を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮している。水平方向の地盤モデルについては、せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を考慮した等価線形解析により、基準地震動 S_s-1 、 S_s-2 及び S_s-3 のそれぞれについて個別に設定している。

原子炉建屋の鉛直方向の入力地震動については、一次元波動論に基づき、解放基盤表面に想定する基準地震動 S_s に対する地盤の応答を評価している。具体的には、解放基盤表面（O. P. -168. 0m、 $V_p=1923\text{m/sec}$ ）で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から原子炉建屋基礎底面位置（O. P. -6. 5m）までの速度構造を成層と仮定したモデルを用いた

一次元波動論による地震応答解析を行い、原子炉建屋基礎底面位置（0.P. -6.5m）での地震動を求め、これを入力地震動とし、基礎底面レベルに取り付く鉛直地盤ばねを介して直接入力している。鉛直方向の地盤モデルについては、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 に対する水平方向の地盤モデルの等価 S 波速度とポアソン比から P 波速度を求めることを基本に設定している。

原子炉建屋の入力地震動の評価法を図－8に示す。

構造 A サブグループでは、東京電力による原子炉建屋の水平方向の入力地震動の評価の妥当性について検討した。その検討結果に基づき当院は、地盤モデルが、地盤調査結果を踏まえた地盤の剛性、減衰等を基に、基準地震動 Ss による応答ひずみに応じて設定されていることを確認した。

また、構造 A サブグループでは、福島第二原子力発電所の敷地内で比較的大きな加速度を観測した 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖の地震(M7.1)による観測記録（4 号機原子炉建屋の炉心位置から約 550m 離れた地点の地中（解放基盤表面位置）観測記録）を用いた一次元波動論によるシミュレーション解析を実施し、入力地震動評価法の検証を行った。その検討結果に基づき当院は、最大加速度値について、NS 方向、EW 方向とも解析結果は観測記録にほぼ対応していること、鉛直方向の解析結果は観測記録に比べ大きめの値を算定していることを確認した。なお、鉛直方向の解析結果が観測記録に比べ大きめの値を算定することについては、軟岩サイトの弾性係数や減衰の評価方法等の要因が考えられるが、要因の詳細な分析とその絞り込み等、精度向上に向けた取り組みについては、今後の研究課題と考えられる。

以上のことから、当院は、東京電力が作成した原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の入力地震動の評価は支障ないものと判断した。

3) 原子炉建屋の耐震安全性評価結果

東京電力による評価は以下のとおりである。

水平方向の地震応答解析の結果、耐震壁のせん断ひずみの最大値は、基準地震動 Ss-1 に対して 0.14×10^{-3} (0.P. +0.0m～0.P. +6.0m NS 方向及び 0.P. +18.0m～0.P. +24.3m EW 方向)、基準地震動 Ss-2 に対して 0.13×10^{-3} (0.P. +50.5m～0.P. +58.5m NS 方向及び 0.P. +18.0m～0.P. +24.3m EW 方向)、基準地震動 Ss-3 に対して 0.12×10^{-3} (0.P. +0.0m～0.P. +6.0m

NS 方向及び 0. P. +18. 0m~0. P. +24. 3m EW 方向) であり、評価基準値 2.0×10^{-3} を超えないとしている。

基準地震動 Ss による 4 号機原子炉建屋の最大応答せん断ひずみを表-4 に示す。

また、地震応答解析から得られる最大転倒モーメントを用いて算定した原子炉建屋の接地率は、基準地震動 Ss-1 に対して 100% (NS 方向及び EW 方向)、基準地震動 Ss-2 に対して 100% (NS 方向及び EW 方向)、基準地震動 Ss-3 に対して 100% (NS 方向及び EW 方向) であり、JEAG4601-1991 追補版において基礎浮上り非線形性を考慮した地震応答解析の適用条件とされている「接地率 65%以上」をいずれも満足するとしている。

構造 A サブグループでは、原子炉建屋の耐震安全性評価結果の妥当性について検討した。その検討結果に基づき当院は、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 による地震応答解析の結果の最大応答せん断ひずみの値が、いずれも RC 造耐震壁のせん断ひずみの評価基準値である 2.0×10^{-3} を超えないことを確認した。

以上のことから、当院は、東京電力が中間報告において実施した建物・構築物(原子炉建屋)の耐震安全性評価結果は概ね妥当なものと判断した。

なお、新耐震指針において、鉛直方向の地震力を地震応答解析により算定することとなったため、東京電力は、原子炉建屋の鉛直方向の地震応答解析モデルを構築し、基準地震動 Ss に基づく地震応答解析を実施している。原子炉建屋の構造部材のうち、屋根鉄骨部などの水平部材については、水平方向及び鉛直方向の地震動による影響を同時に受けるとともに、鉛直方向の地震動による影響が大きいと考えられるため、今後、波及的影響の防止の観点から詳細評価を実施する必要がある。

(2) 機器・配管系の耐震安全性評価

東京電力は、福島第二原子力発電所 4 号機の耐震安全性に係る中間報告において、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する S クラスの設備のうち 7 設備 (原子炉圧力容器 (以下 RPV と称す)、原子炉格納容器 (以下 PCV と称す)、炉心支持構造物、残留熱除去系ポンプ、残留熱除去系配管、主蒸気系配管及び制御棒 (挿入性)) を評価対象とし、これらの機器・配管系について、基準地震動 Ss

に対する安全機能の保持を確認するため、基準地震動 S_s による地震力と地震以外の荷重を組み合わせた構造強度評価（評価対象設備の評価部位に発生する応力が評価基準値を超えないことの確認）を実施するとともに、動的機能が要求される制御棒について、基準地震動 S_s に対しての挿入性を確認したとしている。中間報告における評価対象設備を図-9に示す。

機器・配管系の構造強度評価に当たっては、評価対象設備の既往評価の結果を参考に耐震裕度が小さい部位を評価部位として選定し、「通常運転時」、「運転時の異常な過渡変化時」に生じる荷重と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせた応力評価を実施し、評価部位に発生する応力が評価基準値を超えないことを確認するとしている。ただし、事故時に生じる荷重と組み合わせる地震力については、（社）日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-補 1984」⁽¹⁷⁾（以下「JEAG4601-補 1984」という。）の考え方を基に、事故事象の発生確率が 10^{-4} /年から 10^{-7} /年と想定されること、基準地震動 S_s の年超過確率の試算値が 10^{-4} /年から 10^{-6} /年であることを踏まえ、事故の状態が継続している間に基準地震動 S_s が同時に発生する確率は 10^{-7} /年以下とその可能性が極めて小さいことから、事故時に生じる荷重と基準地震動 S_s を組み合わせる必要はないとしている。

制御棒の挿入性に関する評価に当たっては、基準地震動 S_s による燃料集合体の相対変位が、試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認するとしている。

構造 A サブグループにおける機器・配管系の耐震安全性評価に係る検討内容及びその検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

1) 床応答スペクトル

東京電力による評価は以下のとおりである。

比較的小型で、かつ建屋と非連成で評価して差し支えない機器・配管系（評価対象設備では残留熱除去系ポンプ及び残留熱除去系配管がこれに該当）の構造強度評価においては、原子炉建屋の地震応答解析から得られる当該設備の設置箇所における水平方向及び鉛直方向の床応答スペクトルまたは最大応答加速度を評価に用いたとしている。また大型機器である PCV 及び RPV につながる機器・配管系（評価対象設備では主蒸気配管がこれに該当）の構造強度評価においては、地盤・建屋とこれら大型機器を連成させた地震応答解析から得られる当該設備の設置箇所における水平方向及び鉛直方向の床応答スペクトルを評価に用いたとしてい

る。

水平方向及び鉛直方向の床応答スペクトルの算定に当たっては、地盤や建屋の物性等のばらつきが床応答スペクトルに与える影響を考慮し、(社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」⁽¹⁸⁾(以下「JEAG4601-1987」という。)等を参考に、周期軸方向に±10%拡幅したとしている。

構造 A サブグループでは、鉛直方向の床応答スペクトルの算定に当たって周期軸方向に±10%拡幅することの妥当性について検討した。その検討結果に基づき当院は、(社)日本電気協会の耐震設計分科会資料「鉛直方向の設計用床応答スペクトルの拡幅率」⁽¹⁹⁾において、拡幅率を±10%とすれば地盤剛性の±50%及び建屋剛性の±30%にわたる変動幅をカバーでき、現実的な地盤剛性の±20%及び建屋剛性の 0%~+20%の変動幅に対して、拡幅率を±10%とすれば十分であるとされていることを確認した。また、福島第二原子力発電所 4 号機について、原子炉建屋のコンクリート実強度による建屋剛性の変動幅や設置岩盤のせん断波速度による地盤剛性の変動幅が、拡幅率 10%とした場合にカバーできる範囲に入っていることを確認した。

以上のことから、当院は、既往評価において実績のある水平方向の拡幅率(±10%)と同様に、鉛直方向についても周期軸方向に±10%拡幅し床応答スペクトルを算定していることは妥当なものと判断した。

2) 水平・鉛直方向地震力の組合せ方法

東京電力による評価は以下のとおりである。

水平方向及び鉛直方向の動的な地震力の組合せ方法として、中間報告における配管の応力評価では、二乗和平方根(SRSS)法を用い、その他の機器の応力評価では絶対値和を用いたとしている。SRSS 法は、水平方向及び鉛直方向の地震動を同時に入力した場合の最大荷重と同等かそれ以上の値を算定する傾向にあるとしている。

構造 A サブグループでは、機器・配管系の応力評価において水平・鉛直方向地震力の組合せ方法として SRSS 法を適用して安全上支障無いことについて、新耐震指針において鉛直方向の地震力を動的に評価することとされていることも踏まえ検討した。その検討結果に基づき当院は、SRSS 法が、互いに独立な事象として取り扱うことができる多入力外力

（ここでは、水平方向及び鉛直方向の地震動）を同時に入力する場合に、時間変動する応答成分を組み合わせる方法として広く用いられてきている方法であることより、水平、鉛直方向の地震力の組合せ方法として今回の評価においても適用できるものと判断した。また、既往評価では、動的に評価された水平方向の地震力と静的に（水平方向の基準地震動の最大加速度振幅の 1/2 を高さ方向に一定の震度として）評価された鉛直方向の地震力を組み合わせる方法として絶対和法を適用していたが、新耐震指針に照らした耐震安全性評価においては、動的に評価された水平方向及び鉛直方向の地震力の組合せ方法として SRSS 法を適用するとともに、より簡便な組合せ方法として絶対和法を必要に応じて適用することは、安全上支障無いものと判断した。

3) 地震応答解析手法及び応力評価手法

東京電力による評価は以下のとおりである。

中間報告における機器・配管系の構造強度評価及び制御棒の挿入性に関する評価では、基本的に評価対象設備の既往評価と同等の地震応答解析手法及び応力評価手法を適用している。

機器・配管系の地震応答解析モデルは、その振動性状に応じて、代表的な振動モードが適切に表現でき、応力評価等に用いる地震荷重を適切に算定できるものとし、水平方向については、既往評価と同等か、一部の解析条件を変更して実績のあるモデル、鉛直方向については、(財)原子力発電技術機構で行われた「耐震設計高度化調査 原子炉建屋・機器の水平・上下応答評価法の調査報告書」⁽²⁰⁾を参考として設定したモデルとしている。具体的には、機器等を多質点系でモデル化し、水平方向については機器等の曲げ剛性及びせん断剛性を考慮したはり要素またはばね要素により質点間を接続し、鉛直方向については機器等の軸剛性を有するばね要素により質点間を接続したとしている。PCV、RPV 及び炉内構造物等の大型機器は、地震時の挙動として建屋と相互に影響を及ぼし合っているため、基準地震動 S_s に対して、建屋と連成した地震応答解析を時刻歴応答解析法により実施したとしている。建屋と連成させた大型機器の地震応答解析モデルとしては、PCV、RPV、原子炉遮へい壁及び原子炉本体の基礎等の地震力を算定するための PCV-RPV 解析モデルと、RPV 内の気水分離器、燃料集合体、炉心シュラウド及び制御棒案内管等の地震力を詳細に算定するための炉内構造物解析モデルを用いたとしている。PCV-RPV 解析モデル及び炉内構造物解析モデルを図－１０及び図－１１

に示す。

機器・配管系の構造強度評価において、評価対象設備及びその評価部位のうち、RPVの基礎ボルト、PCVのナックルと球殻部の接合部及び炉心支持構造物のシュラウドサポートの基準地震動 S_s による応力評価は、大型機器の地震応答解析の結果から設備に作用する地震力を求め、これを荷重としたFEM解析等により評価部位に作用する応力を評価したとしている。なお、PCVのナックルと球殻部の接合部については、応答倍率法を適用しており、大型機器の地震応答解析により求められた荷重効果を評価部位に作用する地震荷重とみなし、それから水平方向及び鉛直方向における設計時との荷重比を求め、それらの最大値を設計時のそれぞれの応力に乗じて、評価部位に作用する応力を算出したとしている。

残留熱除去ポンプの基礎ボルトの基準地震動 S_s による応力評価は、建屋の地震応答解析の結果から設備の設置箇所における最大応答加速度（水平震度及び鉛直震度）を求め、これらと設計時の水平震度及び鉛直震度を用い、水平方向及び鉛直方向の荷重を組み合わせた応答倍率法を適用して評価部位に作用する応力を評価したとしている。残留熱除去系配管、主蒸気系配管の基準地震動 S_s による応力評価は、建屋の地震応答解析または大型機器の地震応答解析の結果から配管の設置箇所における床応答スペクトルを求め、これを基に設定した設計用床応答スペクトルを入力としたスペクトルモーダル解析により評価部位に作用する応力を評価したとしている。なお、配管系のスペクトルモーダル解析に用いるモデルについては、従来より3次元多質点系はりモデルを採用しており、鉛直方向の地震応答解析についても水平方向と同じモデルを用いたとしている。

制御棒の挿入性に関する評価においては、炉内構造物解析モデルによる時刻歴応答解析の結果から燃料集合体の上端及び下端に対する高さ方向中央の最大相対変位を燃料集合体の相対変位として評価したとしている。

構造Aサブグループでは、中間報告における評価対象設備及び評価部位について、東京電力が機器・配管系の構造強度評価及び制御棒の挿入性に関する評価に適用した地震応答解析手法及び応力評価手法の妥当性について検討した。その検討結果に基づき当院は、機器・配管系の構造強度評価及び制御棒の挿入性に関する評価に用いる荷重効果を算定するための大型機器地震応答解析及び建屋地震応答解析、機器の応力評価におけるFEM解析及び定式化された評価式を用いた解析、配管の応力評価

におけるスペクトルモーダル解析について、既往評価や工事計画認可において実績のあるモデル、解析手法が用いられており、地震応答解析手法及び応力評価手法は妥当なものと判断した。

PCV（ナックルと球殻部の接合部）及び残留熱除去系ポンプの応力評価に応答倍率法を適用していることについては、東京電力が応答倍率法を詳細評価に先立つスクリーニング方法と位置付け、適用する設備及び適用しない設備の考え方を示すなど、適用に係る考え方を明らかにした上で、応答倍率法を適用していることを確認した。

以上のことから、当院は、機器・配管系の構造強度評価及び制御棒の挿入性に関する評価において東京電力が適用した地震応答解析手法及び応力評価手法について、中間報告における評価対象設備及び評価部位に適用して支障無いものと判断した。

なお、構造Aサブグループが機器・配管系の応力評価において応答倍率法を適用することの妥当性について検討した結果は、「構造WG Aサブグループにおける応答倍率法の適用性に係る審議状況」（平成21年3月10日 原子力安全・保安院）にまとめられており、その結論の一つとして、大きめの数値を算定するための「条件整理」を行い、その範囲で応答倍率法を適用することを可とすることとしている。当院は、本報告において、東京電力が応答倍率法を適用する場合は、十分な条件整理が必要であると考ええる。

また、当院は、バックチェックが、安全上重要な施設を対象としており、施設の安全性に対する説明性のより一層の向上の観点から、今後、応答倍率法を用いて応力評価がなされ、かつその結果として耐震裕度が比較的小さい設備について、正確な耐震裕度を把握するために詳細評価を実施することが望ましいと考える。

4) 減衰定数

東京電力による評価は以下のとおりである。

水平方向の減衰定数については、JEAG4601-1991 追補版に規定された値としている。また、鉛直方向の減衰定数については、基本的に水平方向と同一の値とするが、鉛直地震動に対し剛体挙動する設備は1%としたとしている。

構造Aサブグループでは、機器・配管系の水平方向及び鉛直方向の減衰定数の設定の妥当性について検討した。その検討結果に基づき当院は、

機器系の減衰定数のうち、水平方向について、既往評価と同じ値を採用していること、鉛直方向について、基本的に水平方向と同一の値、または鉛直方向の地震動に対し剛体挙動するとして、全ての対象設備に1%を採用していることを確認した。また、配管系の減衰定数については、保温材を有する配管系及びリボルト支持配管系の減衰定数を含めて、既往評価において実績のある値として水平方向及び鉛直方向で同一の値を採用していることを確認した。

以上のことから、当院は、機器・配管系の減衰定数の設定は妥当なものと判断した。

5) 評価基準値

東京電力による評価は以下のとおりである。

中間報告において用いている構造強度評価の評価基準値については、JEAG4601-補 1984、JEAG4601-1987、JEAG4601-1991 追補版及び日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME SNC1-2005」⁽²¹⁾（以下「設計・建設規格」という。）に準拠した値とするとしている。

また、制御棒挿入性の評価基準値については、試験により地震時の制御棒挿入性が確認されている燃料集合体の相対変位を用いたとしている。

構造 A サブグループでは、構造強度評価及び制御棒の挿入性に関する評価の評価基準値の妥当性について検討した。その検討結果に基づき当院は、構造強度評価の評価基準値について、既往評価において実績のある値が用いられていること、また、制御棒の挿入性に関する評価の評価基準値について、制御棒挿入性試験（制御棒、燃料集合体及び制御棒駆動機構を模擬した試験装置の加振中に制御棒を挿入する試験）により、地震時においても制御棒を規定時間内（全ストロークの 75% 挿入において 1.62 秒以下、定格圧力時で全炉心平均）に挿入可能と確認された燃料集合体の相対変位が用いられていることを確認した。なお、この規定時間は、設置許可に係る安全審査における安全解析の条件として安全評価に対して厳しい値として設定され、基本的設計条件として位置付けられている値である。

以上のことから、当院は、構造強度評価及び制御棒の挿入性に関する評価の評価基準値の設定は妥当なものと判断した。

6) 機器・配管系の耐震安全性評価結果

東京電力による評価は以下のとおりである。

機器・配管系の構造強度評価については、基準地震動 Ss-1 及び Ss-2、Ss-3 のうち、最も大きい荷重効果を与える基準地震動による地震荷重と地震以外の荷重を組み合わせで算定した評価部位の発生応力が、評価基準値以下であることを確認したとしている。

4号機の構造強度評価結果を表-5に示す。

制御棒の挿入性に関する評価については、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 による燃料集合体の相対変位が試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認したとしている。福島第二原子力発電所 4号機の制御棒の挿入性に関する評価結果を表-6に示す。

構造 A サブグループでは、中間報告における評価対象設備の構造強度評価及び動的機能維持評価結果の妥当性について検討した。その検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

機器・配管系の構造強度評価結果については、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 のうち、最も大きい荷重効果を与える基準地震動による地震荷重と地震以外の荷重を組み合わせで算定した評価部位の発生応力が、いずれも評価基準値以下であることを確認した。なお、バックチェックルールでは、構造物の破壊に直結する一次応力が評価基準値（許容応力状態Ⅳ_AS）を超えないことの確認を基本としているが、中間報告における評価対象設備について、基準地震動 Ss に対する応力値が許容応力状態Ⅲ_AS を下回っていることから、簡易弾塑性解析または疲れ解析の実施が必要になる応答領域に達していないことを確認した。炉心の崩壊熱除去可能な形状の保持については、東京電力が、JEAG4601-補 1984 により燃料集合体を支持している炉心支持構造物の健全性が要求されることから、炉心支持構造物のうち耐震裕度が小さいシュラウドサポートを評価対象部位として選定し強度評価を実施したとしているが、冷却材の流量確保の観点から定量的な評価を実施しておくことが望ましいと考えられる燃料被覆管等の評価について、本報告において別途、必要に応じて確認することとする。

制御棒の挿入性に関する評価については、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 による燃料集合体の相対変位が、評価基準値以下であることを確認した。

以上のことから、当院は、東京電力が中間報告において実施した機器・配管系の耐震安全性評価結果は妥当なものと判断した。

なお、中間報告においては、建物・構築物と機器・配管系のそれぞれの耐震安全性に主眼をおいて評価結果の妥当性を確認したが、本報告においては、安全性への説明性をより一層向上させるとの観点から、安全上重要な建物・構築物及び機器・配管系の相互接合部位について、必要に応じて評価結果を確認することとする。

4. まとめ

4. 1 基準地震動の妥当性

合同Aサブグループにおける福島第二原子力発電所の基準地震動 S_s の策定に係る検討結果に基づく当院の評価は、以下のとおりである。

- (1) 敷地からの距離に応じて、既存文献の調査、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査等を実施し、その内容は要求されている事項を満足していることから、基本的に必要な調査は実施されていると判断した。
- (2) 敷地周辺陸域及び海域の活断層の評価は、妥当なものと判断した。なお、双葉断層の耐震設計上考慮する長さについては、最終的に約 37km を妥当なものとしたが、双葉断層による地震動評価については、耐震バックチェック中間報告が提出された当初の長さ約 47.5km の暫定評価に対する合同Aサブグループの検討結果に基づき、評価の妥当性を判断した。
- (3) 「震源を特定して策定する地震動」として、双葉断層による地震（長さ 47.5km、M7.6）、塩屋崎沖の地震②（M7.5）及び塩屋崎沖の地震③（M7.3）並びに想定敷地下方の地震（M7.1）を検討用地震としていることは妥当なものと判断した。
- (4) 双葉断層による地震（長さ約 47.5km）の基本震源モデル及びその不確かさとして断層傾斜角等を考慮した震源モデルのパラメータについては、妥当なものと判断した。また、塩屋崎沖の地震の基本震源モデル及びその不確かさとして塩屋崎沖の3つの地震が連動する場合を想定した「仮想塩屋崎沖の地震」の震源モデルのパラメータについては、妥当なものと判断した。さらに、想定敷地下方の地震の基本震源モデル及び発生位置の不確かさを考慮した震源モデルのパラメータについては、妥当なものと判断した。
- (5) 双葉断層による地震（長さ約 47.5km）、仮想塩屋崎沖の地震及び想定敷地下方の地震の震源モデルをもとにした、応答スペクトル手法として耐専式を用いた地震動の評価は、敷地の地下構造特性等を考慮しており、妥当なものと判断した。

- (6) 双葉断層による地震（長さ約 47.5km）の震源モデルをもとにした、断層モデルを用いた手法による地震動の評価は、短周期側に統計的グリーン関数法、長周期側に理論的方法を適用したハイブリッド合成法を用いて、敷地の地下構造特性を考慮しており、妥当なものと判断した。また、仮想塩屋崎沖の地震及び想定敷地下方の地震の震源モデルをもとにした、断層モデルを用いた手法による地震動の評価は、敷地で得られた地震観測記録を要素地震とした経験的グリーン関数法を用いて、敷地の地下構造特性等を考慮しており、妥当なものと判断した。
- (7) 震源を特定して策定する地震動のうち、内陸地殻内地震とプレート間地震の評価結果を包絡させた設計用応答スペクトルを基準地震動 Ss-1 とし、また、海洋プレート内地震の評価結果を包絡させた設計用応答スペクトルを基準地震動 Ss-2 とし、さらに、「震源を特定せず策定する地震動」による設計用応答スペクトルを基準地震動 Ss-3 として設定していることは妥当なものと判断した。
- (8) 基準地震動 Ss の年超過確率は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度であった。
- (9) 以上のことから、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 は妥当なものと判断した。

4. 2 施設の耐震安全性評価の妥当性

構造 A サブグループにおける福島第二原子力発電所 4 号機の建物・構築物及び機器・配管系の耐震安全性評価に係る検討結果に基づく当院の評価は以下のとおりである。

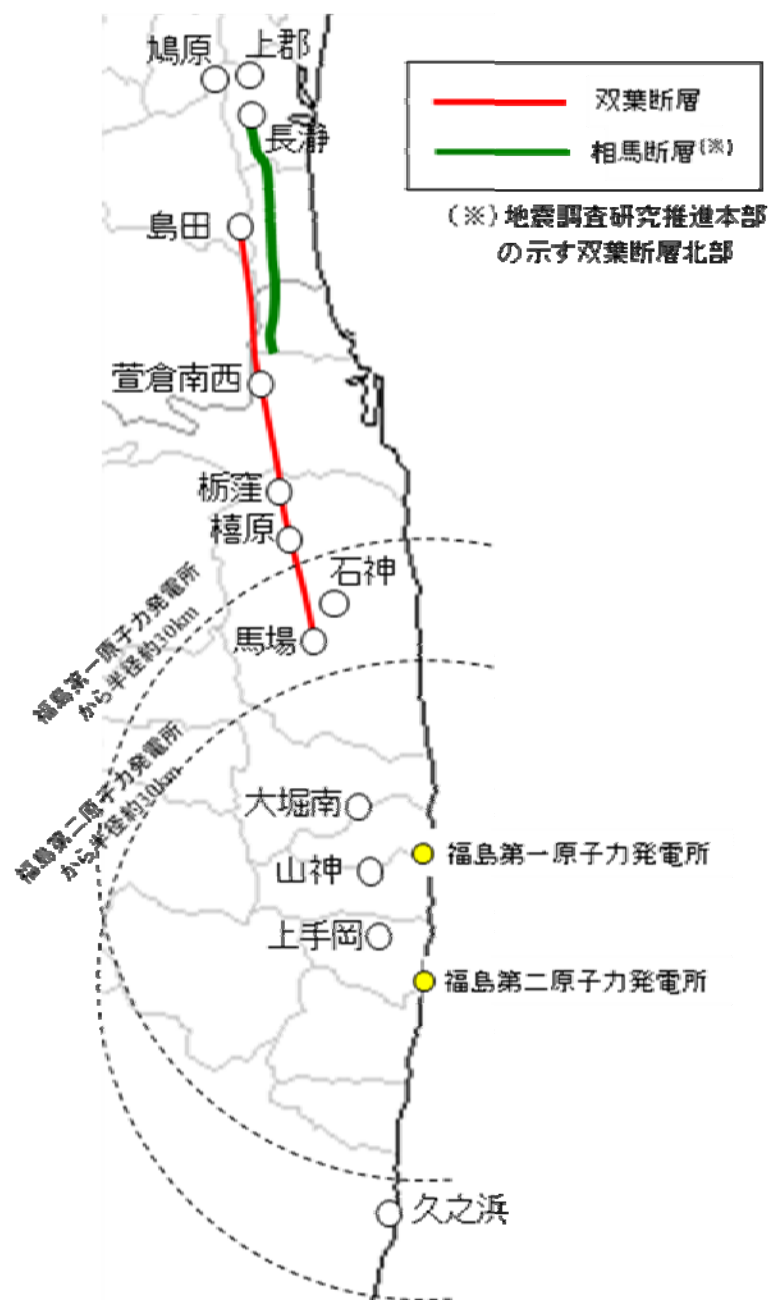
- (1) 原子炉建屋の耐震安全性評価に用いられた地震応答解析モデル及び入力地震動の評価は妥当なものと判断した。また、基準地震動 Ss-1、Ss-2 及び Ss-3 による地震応答解析の結果、原子炉建屋の耐震壁のせん断ひずみの最大値は、評価基準値以内であることから、4 号機の原子炉建屋の耐震安全性が確保されるものと判断した。
- (2) 耐震安全上重要な機器・配管系の構造強度評価に用いられた地震応答解析手法、応力評価手法、床応答スペクトルの拡張、水平・鉛直方向地

震力の組合せ方法、減衰定数及び評価基準値、また、制御棒挿入性に関する評価に用いられた地震応答解析手法、減衰定数及び評価基準値は、それぞれ妥当なものと判断した。そして、機器・配管系の構造強度評価については、基準地震動 S_s-1 , S_s-2 及び S_s-3 による地震力と地震以外の荷重を組み合わせで算定した評価部位の発生応力が、いずれも評価基準値以下であること、制御棒の挿入性に関する評価については、基準地震動 S_s-1 , S_s-2 及び S_s-3 による燃料集合体の相対変位が、試験により挿入性が確認された相対変位以下であることから、4号機の耐震安全上重要な機器・配管系の耐震安全性は確保されるものと判断した。

- (3) 以上のことから、東京電力の中間報告における4号機の建物・構築物（原子炉建屋）及び機器・配管系は基準地震動 S_s に対しても耐震安全性が確保されるものと判断した。

5. 今後の検討課題（本報告に反映すべき事項）

- (1) 主要8施設以外の安全上重要な施設に係る耐震安全性評価の妥当性
- (2) 主要8施設の中間報告における評価対象部位以外の部位の評価結果の確認
(中間報告においては、既往評価結果を参考に耐震裕度が小さい部位として選定された評価対象部位について評価結果を確認したが、安全性への説明性をより一層向上させるとの観点から、中間報告における評価対象部位以外の評価部位についても、本報告において、必要に応じて評価結果を確認することとする。)



図ー１ 双葉断層に係る主な調査位置及び評価

表ー１ 双葉断層の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルの断層パラメータ

基本震源モデル

破壊開始点の不確かさ考慮モデル

アスペリティ位置の不確かさ考慮モデル

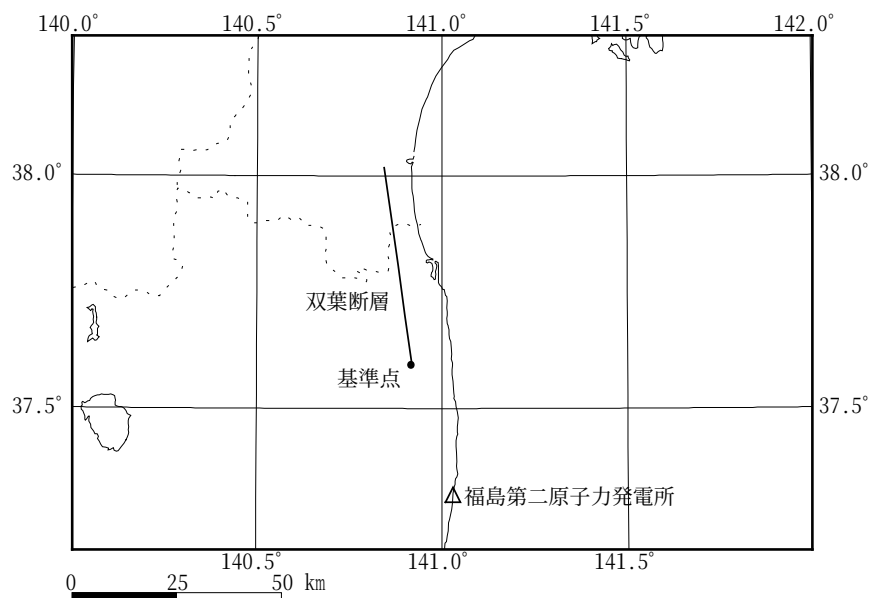
項 目			設定値
巨視的断層面	気象庁マグニチュード		7.6
	モーメントマグニチュード		6.9
	基準点	東経 (°)	140.92
		北緯 (°)	37.60
	断層上端深さ (km)		3
	断層長さ (km)		47.5
	断層幅 (km)		15.0
	断層面積 (km ²)		713
	走向 (°)		350
	傾斜角 (°)		90
	破壊伝播形式		同心円状
	S波速度 (km/s)		3.55
	破壊伝播速度 (km/s)		2.6
	地震モーメント (N・m)		2.8×10^{19}
	短周期レベル (N・m/s ²)		1.6×10^{19}
アスペリティ	面積 (km ²)		204
	地震モーメント (N・m)		1.6×10^{19}
	平均すべり量 (cm)		242
	実効応力 (MPa)		13
背景領域	面積 (km ²)		509
	地震モーメント (N・m)		1.2×10^{19}
	平均すべり量 (cm)		73
	実効応力 (MPa)		2.1

傾斜角の不確かさ考慮モデル

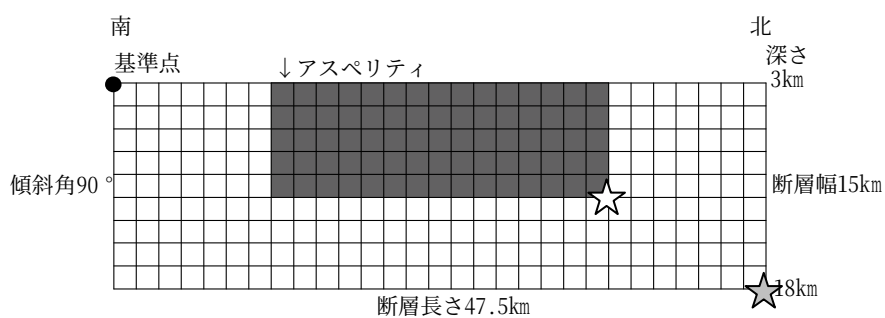
項 目			設定値
巨視的断層面	気象庁マグニチュード		7.6
	モーメントマグニチュード		6.9
	基準点	東経 (°)	140.93
		北緯 (°)	37.60
	断層上端深さ (km)		3
	断層長さ (km)		47.5
	断層幅 (km)		16.0
	断層面積 (km ²)		760
	走向 (°)		350
	傾斜角 (°)		70(東傾斜)
	破壊伝播形式		同心円状
	S波速度 (km/s)		3.55
	破壊伝播速度 (km/s)		2.6
	地震モーメント (N・m)		3.2×10^{19}
	短周期レベル (N・m/s ²)		1.7×10^{19}
アスペリティ	面積 (km ²)		227
	地震モーメント (N・m)		1.9×10^{19}
	平均すべり量 (cm)		258
	実効応力 (MPa)		13
背景領域	面積 (km ²)		533
	地震モーメント (N・m)		1.3×10^{19}
	平均すべり量 (cm)		74
	実効応力 (MPa)		2.2

応力降下量の不確かさ考慮モデル

項 目			設定値
巨視的断層面	気象庁マグニチュード		7.6
	モーメントマグニチュード		6.9
	基準点	東経 (°)	140.92
		北緯 (°)	37.60
	断層上端深さ (km)		3
	断層長さ (km)		47.5
	断層幅 (km)		15.0
	断層面積 (km ²)		713
	走向 (°)		350
	傾斜角 (°)		90
	破壊伝播形式		同心円状
	S波速度 (km/s)		3.55
	破壊伝播速度 (km/s)		2.6
	地震モーメント (N・m)		2.8×10^{19}
	短周期レベル (N・m/s ²)		1.6×10^{19}
アスペリティ	面積 (km ²)		204
	地震モーメント (N・m)		1.6×10^{19}
	平均すべり量 (cm)		242
	実効応力 (MPa)		19
背景領域	面積 (km ²)		509
	地震モーメント (N・m)		1.2×10^{19}
	平均すべり量 (cm)		73
	実効応力 (MPa)		3.2



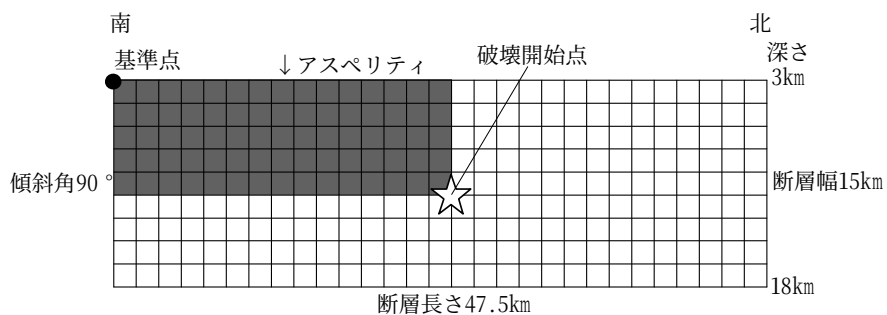
(1) 巨視的断層面の位置



☆ : 基本震源モデル及び応力降下量の不確かさ考慮モデルの破壊開始点

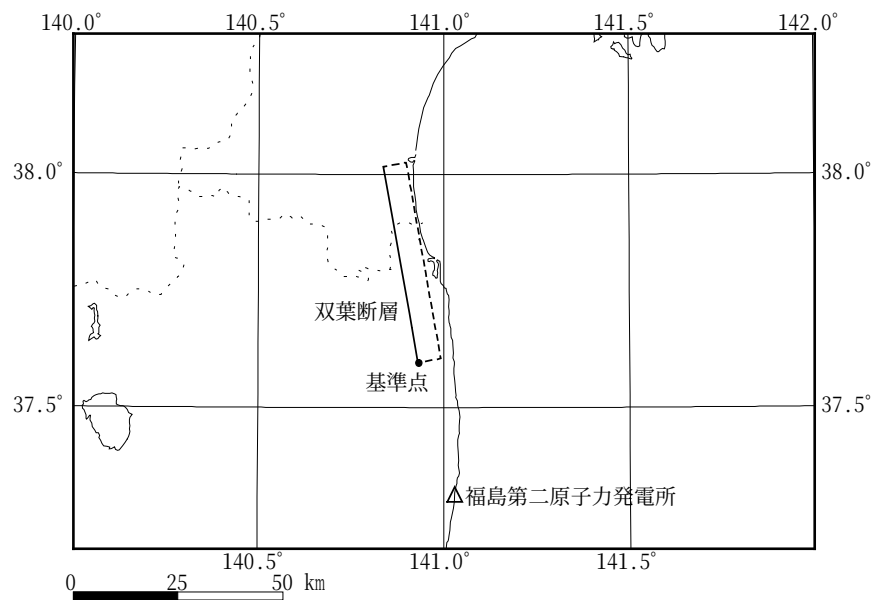
☆ : 破壊開始点の不確かさ考慮モデルの破壊開始点

(2) 基本震源モデル、破壊開始点及び応力降下量の不確かさ考慮モデルの断面図

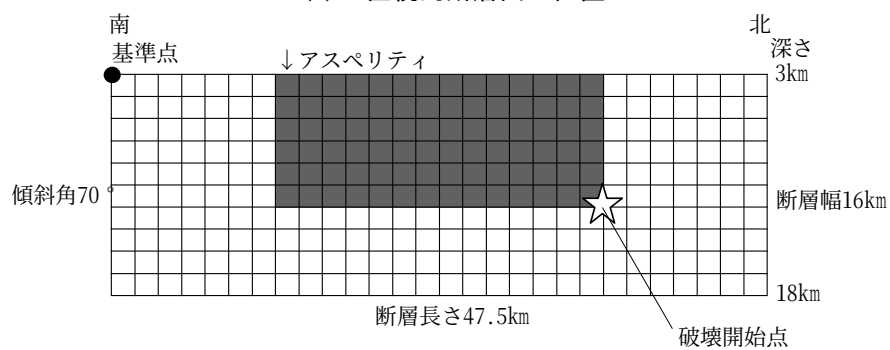


(3) アスペリティ位置の不確かさ考慮モデルの断面図

図ー 2 (1) 双葉断層の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデル (その1)



(1) 巨視的断層面の位置



(2) 断層傾斜角の不確かさを考慮モデルの断面図

図ー 2 (2) 双葉断層の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデル (その2)

表－２（１） 塩屋崎沖の地震の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルの
断層パラメータ（その１）

塩屋崎沖の地震②

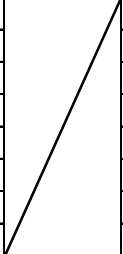
項 目			設定値
巨視的断層面	気象庁マグニチュード		7.5
	モーメントマグニチュード		7.6
	基準点	東経（°）	142.44
		北緯（°）	37.35
	断層上端深さ（km）		13
	断層長さ（km）		85.0
	断層幅（km）		60.0
	断層面積（km ² ）		5100
	走向（°）		200
	傾斜角（°）		20
	破壊伝播形式		同心円状
	S波速度（km/s）		3.75
	破壊伝播速度（km/s）		3.2
地震モーメント（N・m）		3.7×10 ²⁰	
アスペリティ 1	基準点	東経（°）	142.31
		北緯（°）	37.05
	断層長さ（km）		50.0
	断層幅（km）		18.0
	面積（km ² ）		900
	地震モーメント（N・m）		1.1×10 ²⁰
	平均すべり量（cm）		369
	実効応力（MPa）		22
	アスペリティ 2	基準点	東経（°）
北緯（°）			37.15
断層長さ（km）		20.0	
断層幅（km）		24.0	
面積（km ² ）		480	
地震モーメント（N・m）		6.4×10 ¹⁹	
平均すべり量（cm）		327	
実効応力（MPa）		22	
背景領域	面積（km ² ）		3720
	地震モーメント（N・m）		1.9×10 ²⁰
	平均すべり量（cm）		132
	実効応力（MPa）		3.6

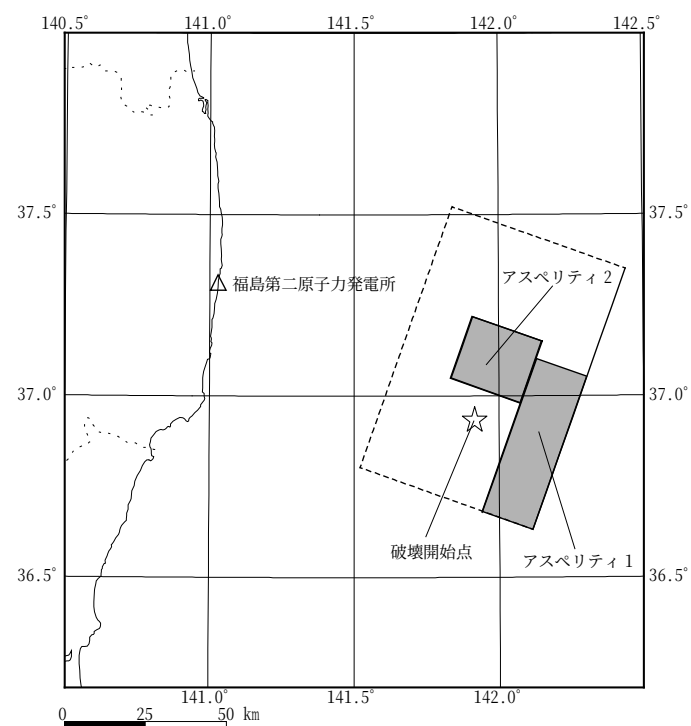
塩屋崎沖の地震③

項 目			設定値
巨視的断層面	気象庁マグニチュード		7.3
	モーメントマグニチュード		7.7
	基準点	東経（°）	142.10
		北緯（°）	37.59
	断層上端深さ（km）		27
	断層長さ（km）		85.0
	断層幅（km）		60.0
	断層面積（km ² ）		5100
	走向（°）		200
	傾斜角（°）		20
	破壊伝播形式		同心円状
	S波速度（km/s）		3.75
	破壊伝播速度（km/s）		3.5
	地震モーメント（N・m）		4.0×10 ²⁰
アスベリティ 1	基準点	東経（°）	141.99
		北緯（°）	37.34
	断層長さ（km）		20.0
	断層幅（km）		12.0
	面積（km ² ）		240
	地震モーメント（N・m）		2.9×10 ¹⁹
	平均すべり量（cm）		295
	実効応力（MPa）		22
	アスベリティ 2	基準点	東経（°）
北緯（°）			37.63
断層長さ（km）		35.0	
断層幅（km）		18.0	
面積（km ² ）		630	
地震モーメント（N・m）		1.1×10 ²⁰	
平均すべり量（cm）		297	
実効応力（MPa）		22	
アスベリティ 3		基準点	東経（°）
	北緯（°）		37.68
	断層長さ（km）		25.0
	断層幅（km）		30.0
	面積（km ² ）		750
	地震モーメント（N・m）		1.4×10 ²⁰
	平均すべり量（cm）		291
	実効応力（MPa）		22
	背景領域	面積（km ² ）	
地震モーメント（N・m）		1.3×10 ²⁰	
平均すべり量（cm）		68	
実効応力（MPa）		2.1	

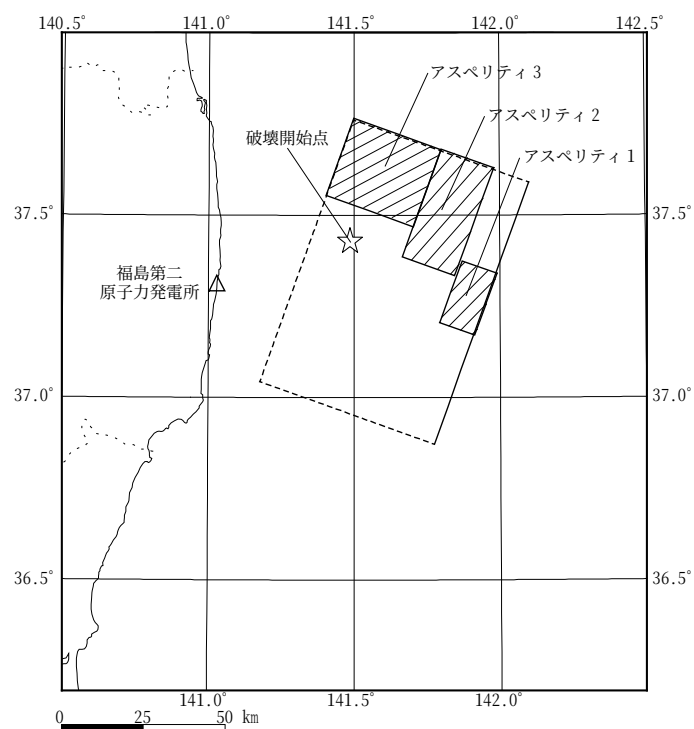
表－２（２） 塩屋崎沖の地震の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルの
断層パラメータ（その２）

仮想塩屋崎沖の地震

項 目			設定値		
			塩屋崎沖の 地震①	塩屋崎沖の 地震②	塩屋崎沖の 地震③
巨視的 断層面 （全体）	気象庁マグニチュード		7.9		
	モーメントマグニチュード		7.9		
	破壊伝播形式		同心円状		
	地震モーメント (N・m)		1.0×10^{21}		
巨視的 断層面 （各地震）	基準点	東経 (°)	141.77	142.44	142.10
		北緯 (°)	36.87	37.35	37.59
	断層上端深さ (km)		27	13	27
	断層長さ (km)		59.5	85.0	85.0
	断層幅 (km)		59.5	60.0	60.0
	断層面積 (km ²)		3540	5100	5100
	走向 (°)		200	200	200
	傾斜角 (°)		20	20	20
	S波速度 (km/s)		3.75	3.75	3.75
	破壊伝播速度 (km/s)		3.5	3.2	3.5
	地震モーメント (N・m)		2.5×10^{20}	3.7×10^{20}	4.0×10^{20}
アスペリティ 1	基準点	東経 (°)	141.69	142.31	141.99
		北緯 (°)	36.69	37.05	37.34
	断層長さ (km)		17.5	50.0	20.0
	断層幅 (km)		17.9	18.0	12.0
	面積 (km ²)		312	900	240
	地震モーメント (N・m)		4.6×10^{19}	1.1×10^{20}	2.9×10^{19}
	平均すべり量 (cm)		358	369	295
	実効応力 (MPa)		37	22	22
アスペリティ 2	基準点	東経 (°)	141.77	142.15	141.98
		北緯 (°)	36.87	37.15	37.63
	断層長さ (km)		7.0	20.0	35.0
	断層幅 (km)		23.8	24.0	18.0
	面積 (km ²)		167	480	630
	地震モーメント (N・m)		2.2×10^{19}	6.4×10^{19}	1.1×10^{20}
	平均すべり量 (cm)		283	327	297
	実効応力 (MPa)		37	22	22
アスペリティ 3	基準点	東経 (°)	141.26		141.80
		北緯 (°)	36.92		37.68
	断層長さ (km)		17.5		25.0
	断層幅 (km)		11.9		30.0
	面積 (km ²)		208		750
	地震モーメント (N・m)		2.9×10^{19}		1.4×10^{20}
	平均すべり量 (cm)		217		291
	実効応力 (MPa)		37		22
背景領域	面積 (km ²)		2853	3720	3480
	地震モーメント (N・m)		1.6×10^{20}	1.9×10^{20}	1.3×10^{20}
	平均すべり量 (cm)		96	132	68
	実効応力 (MPa)		3.1	3.6	2.1



塩屋崎沖の地震②



塩屋崎沖の地震③

図ー3 (1) 塩屋崎沖の地震の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデル

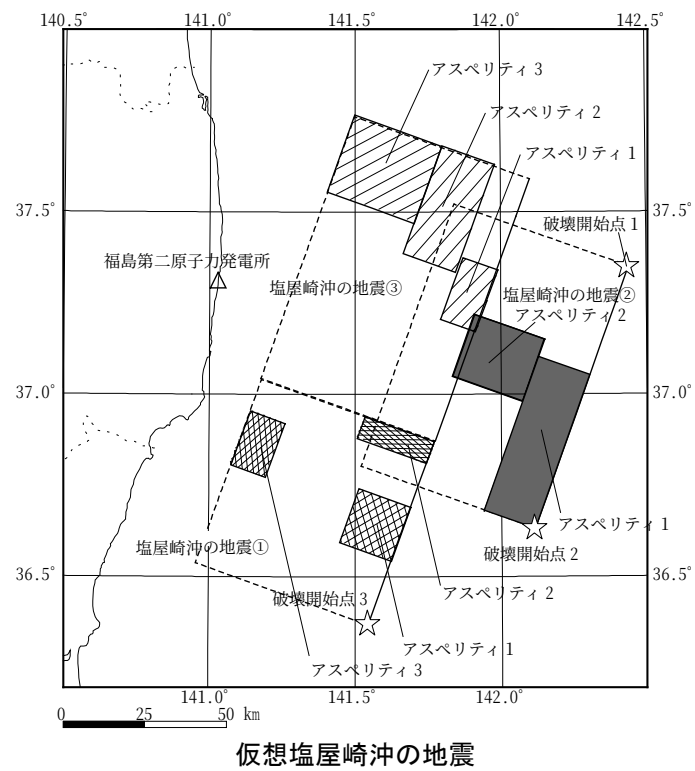


図-3 (2) 塩屋崎沖の地震の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデル

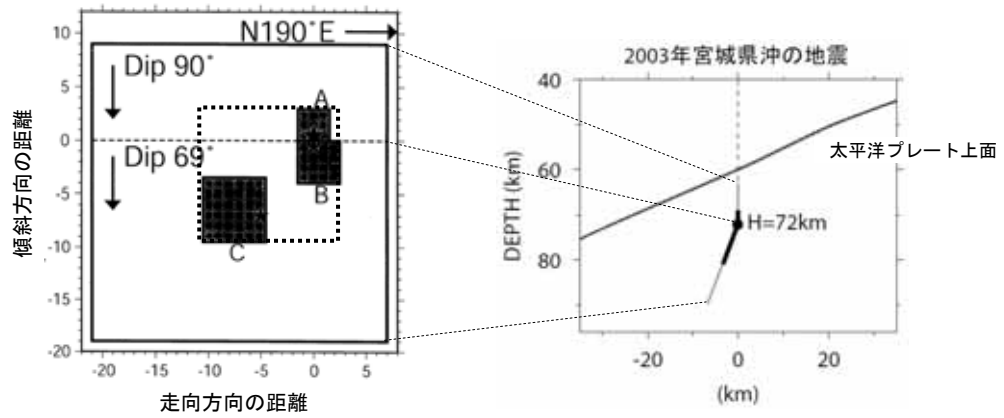
表ー３ 想定敷地下方の地震の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルの断層パラメータ

基本震源モデル

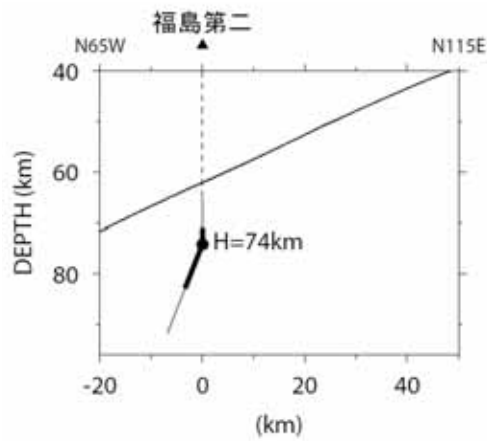
項 目			設定値
巨視的断層面	気象庁マグニチュード		7.1
	モーメントマグニチュード		7.0
	破壊伝播形式		同心円状
	S波速度 (km/s)		3.75
	破壊伝播速度 (km/s)		2.75
	地震モーメント (N・m)		3.5×10^{19}
アスベリティ A	基準点	東経 (°)	141.03
		北緯 (°)	37.30
	断層長さ (km)		3.0
	断層幅 (km)		3.0
	断層上端深さ (km)		71
	走向 (°)		190
	傾斜角 (°)		90
	面積 (km ²)		9
	地震モーメント (N・m)		1.2×10^{18}
	実効応力 (MPa)		105
アスベリティ B	基準点	東経 (°)	141.03
		北緯 (°)	37.30
	断層長さ (km)		4.0
	断層幅 (km)		4.0
	断層上端深さ (km)		74
	走向 (°)		190
	傾斜角 (°)		69
	面積 (km ²)		16
	地震モーメント (N・m)		2.8×10^{18}
	実効応力 (MPa)		105
アスベリティ C	基準点	東経 (°)	141.03
		北緯 (°)	37.38
	断層長さ (km)		6.0
	断層幅 (km)		6.0
	断層上端深さ (km)		77.3
	走向 (°)		190
	傾斜角 (°)		69
	面積 (km ²)		36
	地震モーメント (N・m)		9.3×10^{18}
	実効応力 (MPa)		105

発生位置の不確かさ考慮モデル

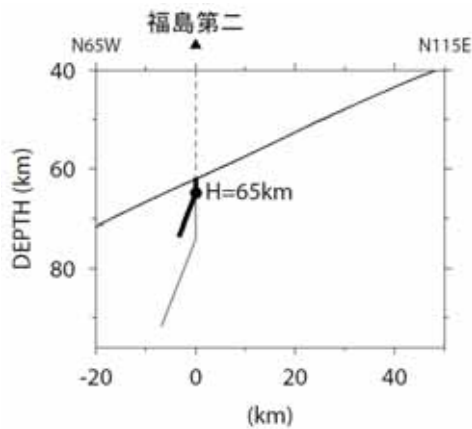
項 目			設定値
巨視的断層面	気象庁マグニチュード		7.1
	モーメントマグニチュード		7.0
	破壊伝播形式		同心円状
	S波速度 (km/s)		3.75
	破壊伝播速度 (km/s)		2.75
	地震モーメント (N・m)		3.5×10^{19}
アスベリティ A	基準点	東経 (°)	141.03
		北緯 (°)	37.30
	断層長さ (km)		3.0
	断層幅 (km)		3.0
	断層上端深さ (km)		62
	走向 (°)		190
	傾斜角 (°)		90
	面積 (km ²)		9
	地震モーメント (N・m)		1.2×10^{18}
	実効応力 (MPa)		105
アスベリティ B	基準点	東経 (°)	141.03
		北緯 (°)	37.30
	断層長さ (km)		4.0
	断層幅 (km)		4.0
	断層上端深さ (km)		65
	走向 (°)		190
	傾斜角 (°)		69
	面積 (km ²)		16
	地震モーメント (N・m)		2.8×10^{18}
	実効応力 (MPa)		105
アスベリティ C	基準点	東経 (°)	141.03
		北緯 (°)	37.38
	断層長さ (km)		6.0
	断層幅 (km)		6.0
	断層上端深さ (km)		68.3
	走向 (°)		190
	傾斜角 (°)		69
	面積 (km ²)		36
	地震モーメント (N・m)		9.3×10^{18}
	実効応力 (MPa)		105



(1) 2003 年宮城県沖の地震の断層面及び太平洋プレート上面との位置関係

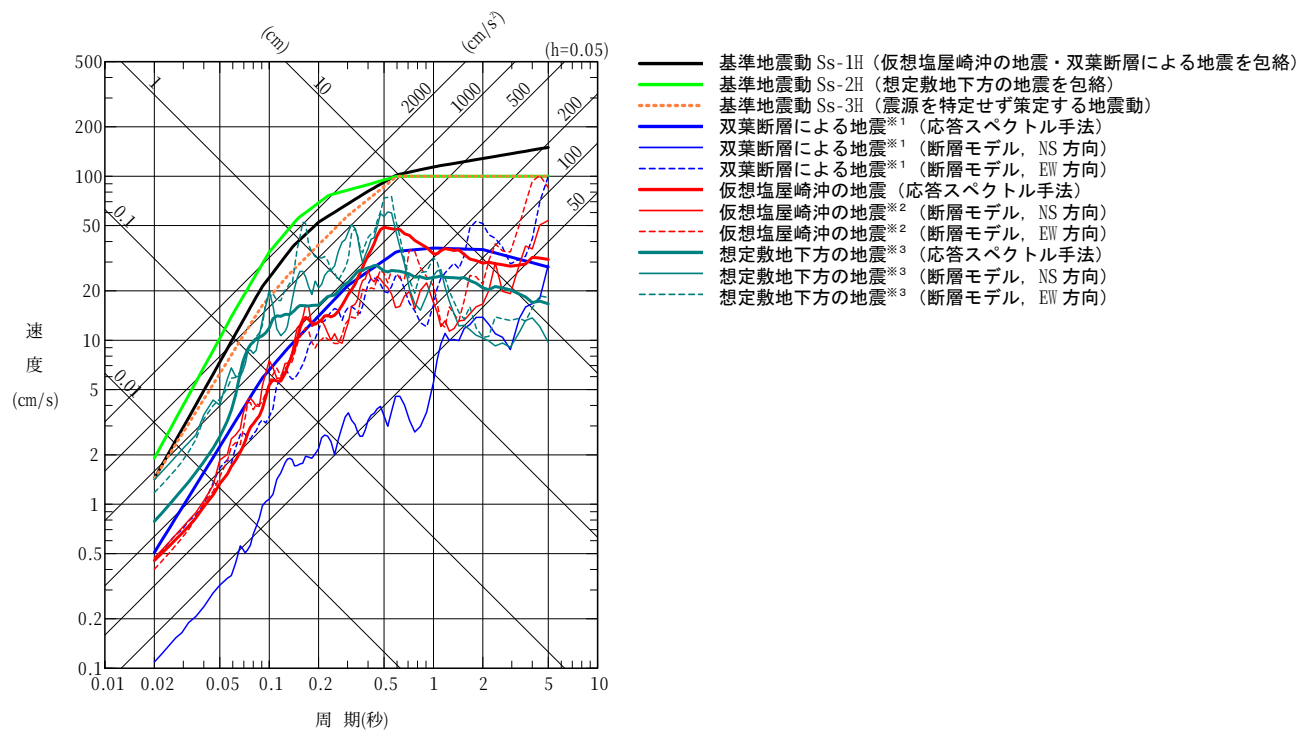


(2) 基本震源モデルの太平洋プレート上面との位置関係

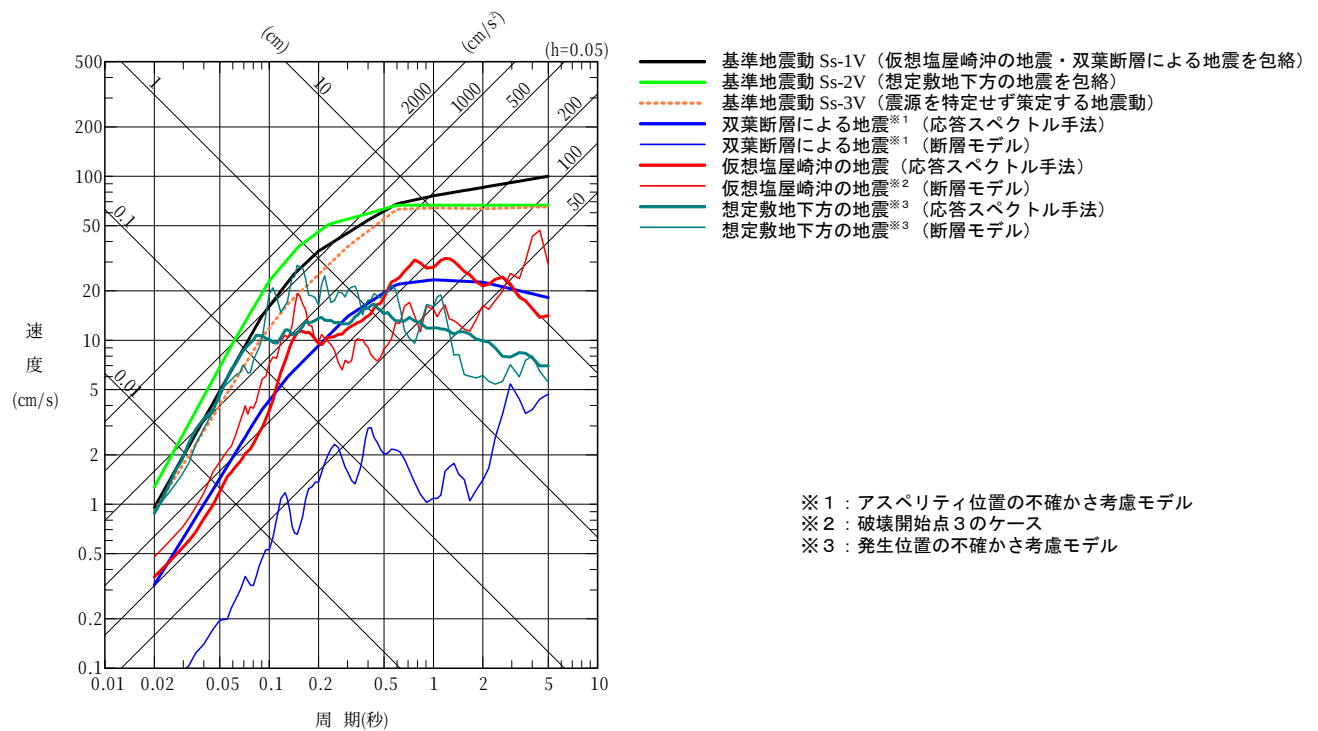


(3) 発生位置の不確かさ考慮モデルの太平洋プレート上面との位置関係

図ー4 想定敷地下方の地震の基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデル

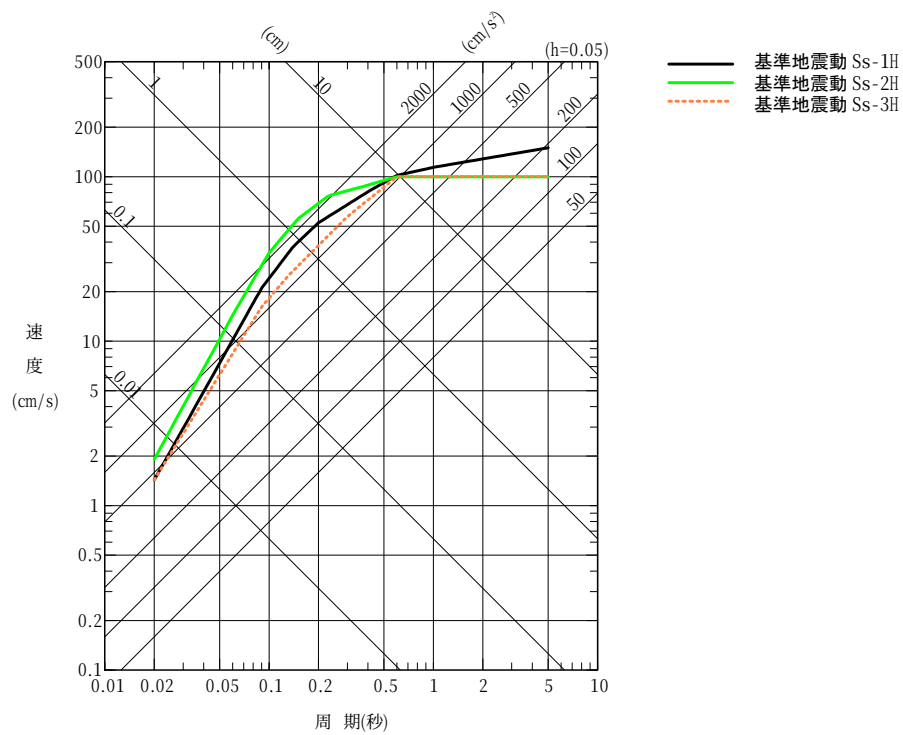


(1) 水平方向

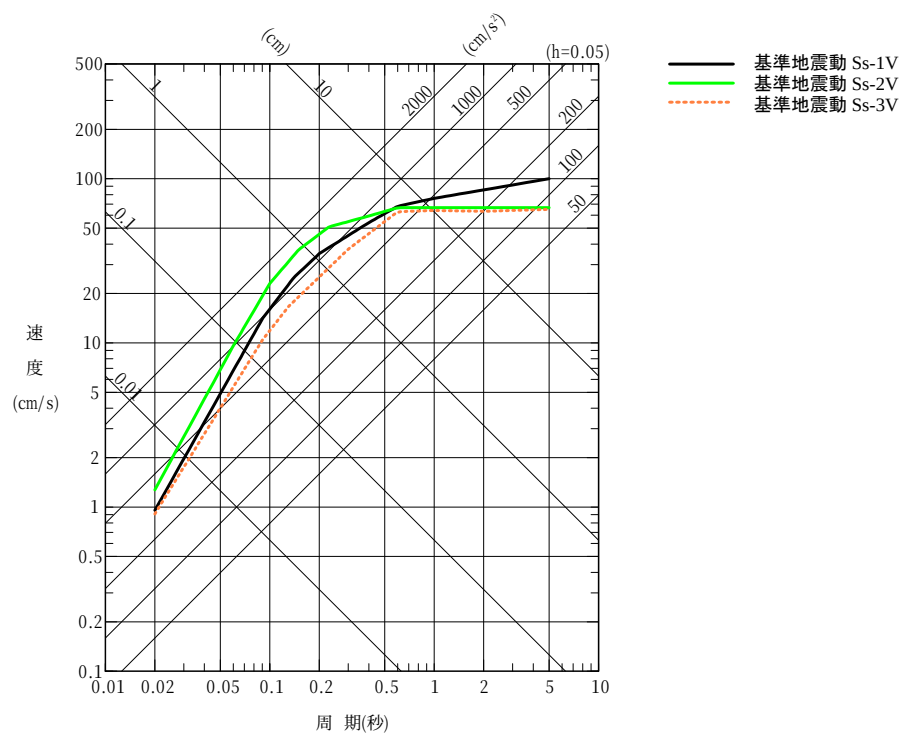


(2) 鉛直方向

図ー5 地震動評価結果及び基準地震動 Ss

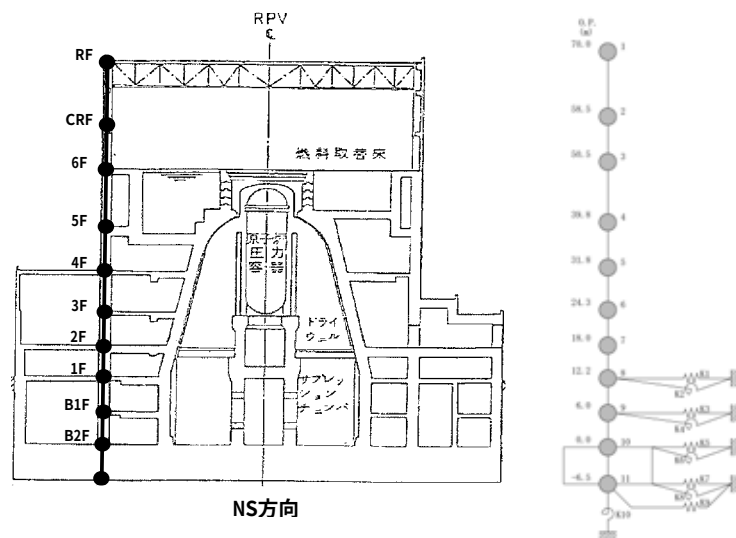


(1) 水平方向

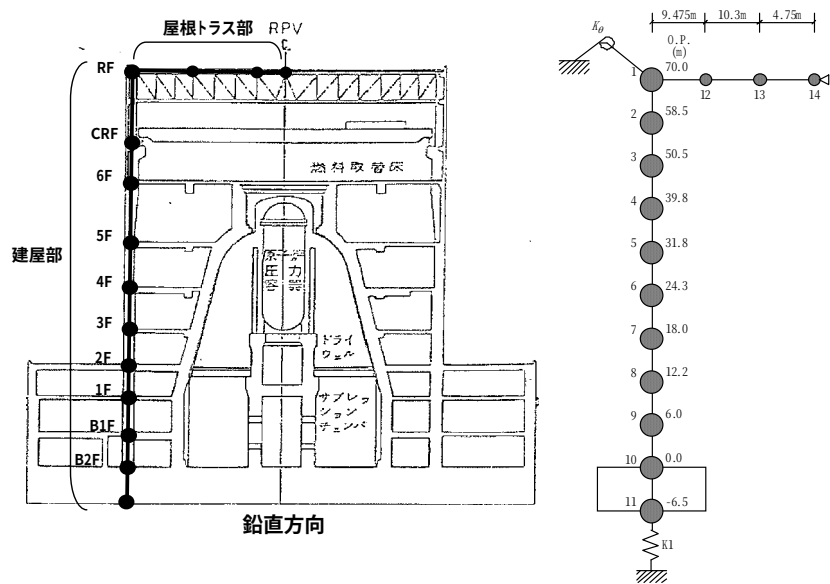


(2) 鉛直方向

図-6 基準地震動 Ss

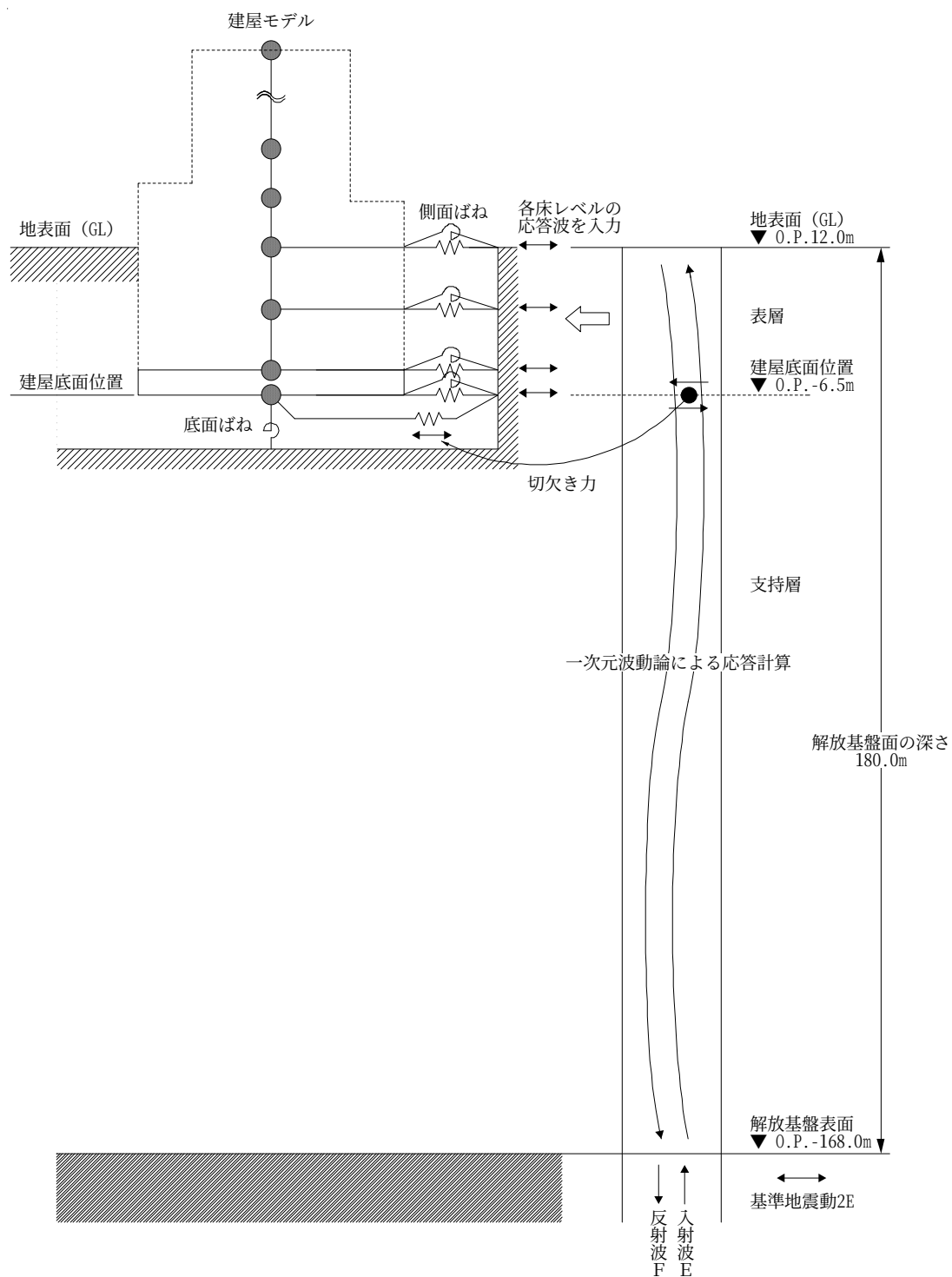


【水平方向】

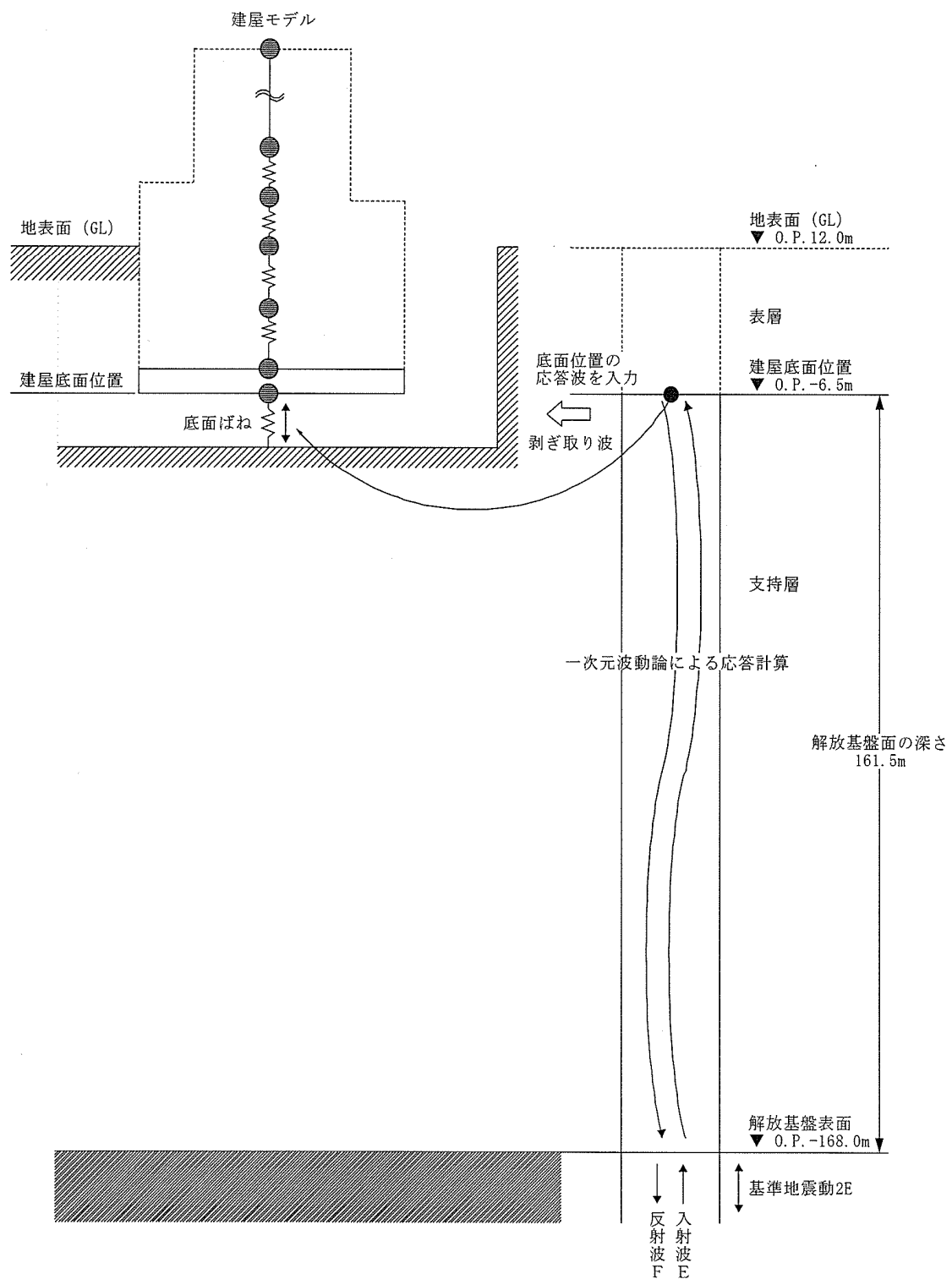


【鉛直方向】

図ー7 福島第二4号機 原子炉建屋の地震応答解析モデル



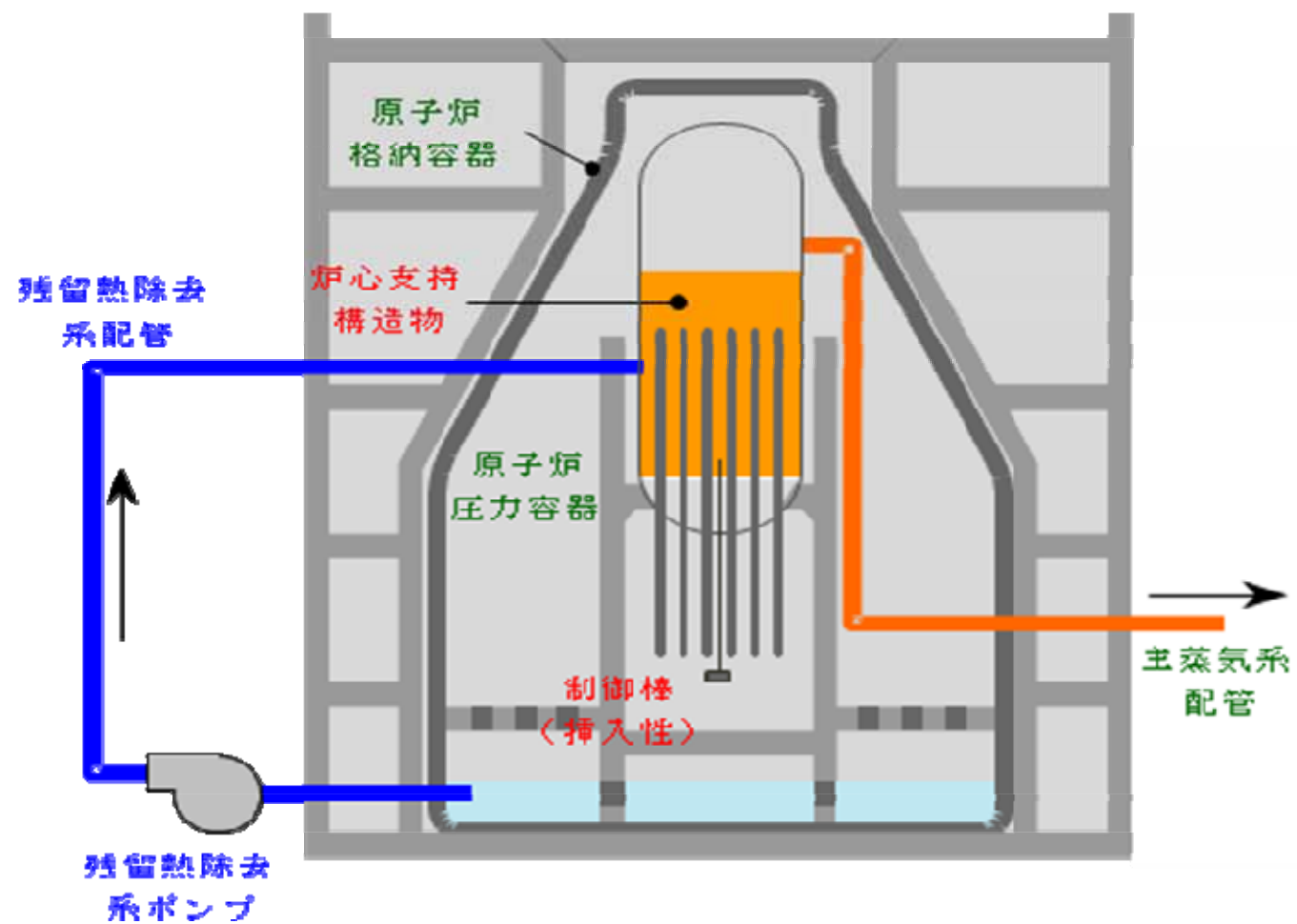
図－８（１） 福島第二４号機 原子炉建屋の入力地震動の評価法（水平方向）



図－8（2） 福島第二4号機 原子炉建屋の入力地震動の評価法（鉛直方向）

表－４ 福島第二４号機 原子炉建屋の最大応答せん断ひずみ

基準 地震動 Ss	NS 方向		EW 方向	
	最大応答 せん断ひずみ	部位	最大応答 せん断ひずみ	部位
Ss-1	0.14×10^{-3}	地下２階	0.14×10^{-3}	２階
Ss-2	0.13×10^{-3}	６階	0.13×10^{-3}	２階
Ss-3	0.12×10^{-3}	地下２階	0.12×10^{-3}	２階



図－9 中間報告における評価対象設備

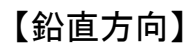
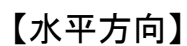


図-1-1 炉内構造物解析モデル

表-5 機器・配管系の構造強度評価結果

構造強度評価	区分	評価対象設備	評価部位	応力分類	中間報告記載値		評価手法
					発生値 [MPa]	基準値 [MPa]	
	止める	①炉心支持構造物	シュラウド サポート	軸圧縮応力	89	247	詳細評価
	冷やす	②主蒸気配管	配管本体	一次応力	157	309	詳細評価
		③残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	せん断応力	4	342	応答倍率法
		④残留熱除去系配管	配管本体	一次応力	165	321	詳細評価
	閉じ込める	⑤原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張応力	11	492	詳細評価
		⑥原子炉格納容器	本 体	膜＋曲げ応力	38	380	応答倍率法※1

※1 原子炉格納容器、原子炉圧力容器連成応答解析による荷重効果（せん断力、モーメント、鉛直震度）に関し、既往評価の当該荷重効果をそれぞれ比較して、

せん断力、モーメント毎に応答比を求め大きい方を水平方向応答比とし、鉛直方向は鉛直荷重の応答比を鉛直方向応答比としている。
応力発生値は、この応答比を既往評価時の応力を乗ずることで算出している。

表-6 制御棒挿入性に関する評価結果

動的機能維持評価	区分	評価対象設備	評価項目	中間報告記載値		評価手法
				燃料集合体 相対変位発生値 [mm]	燃料集合体 相対変位基準値 [mm]	
	止める	① 制御棒（挿入性）	燃料集合体 相対変位	14.1	40	詳細評価

参考文献

- (1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2005)：双葉断層の評価
- (2) 福島県(1999)：双葉断層に関する調査成果報告書（概要版）
- (3) 中田高・今泉俊文編(2002)：活断層詳細デジタルマップ、東京大学出版会
- (4) S.Noda, K.Yashiro, K.Takahashi, M.Takemura, S.Ohno, M.Tohdo, and T.Watanabe (2002)：RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD Workshop on the Relations Between Seismological DATA and Seismic Engineering, Oct.16-18, Istanbul, 399-408.
- (5) 松田時彦（1975）：活断層から発生する地震の規模と周期について、地震第2輯、第28巻、269-283
- (6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2006)：「全国を概観した地震動予測地図」報告書 2006年版
- (7) 小林喜久二・植竹富一・土方勝一郎（2005）：地震動の水平／上下スペクトル振幅比の逆解析による地下構造推定法の標準化に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、構造Ⅱ、185-186
- (8) 福山英一・石田瑞穂・D. S. Dreger・川井啓廉（1998）：オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定、地震第2輯、第51巻、149-156
- (9) 池田孝・加藤研一・植竹富一・敦賀隆史（2008）：1938年塩屋崎沖地震群の震源モデルの特性化と地震動評価、日本建築学会構造系論文集、第73巻、第633号、1951-1958
- (10) 浅野公之・岩田知孝・入倉孝次郎（2004）：2003年5月26日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション、地震第2輯、第57巻、171-185
- (11) 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大栄・上田圭一・壇一男（2004）：震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベルー地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討ー、日本地震工学会論文集、第4巻、第4号、46-86
- (12) 独立行政法人 原子力安全基盤機構（2005）：震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書（平成16年度）、JNES/SAE05-004、平成17年6月
- (13) 社団法人 日本原子力学会（2007）：原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2007、日本原子力学会標準、AESJ-SC-P006：2007、2007年9月

- (14) 佐竹健治・行谷祐一・山木滋 (2008) : 石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション、活断層・古地震研究報告、No. 8、71-89
- (15) 社団法人 日本電気協会 (1991) : 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版
- (16) 吉田一博、萩原哲也 (2002) : 埋込み基礎の側面の接触状況が構造物の応答に与える影響について, 第 11 回日本地震工学シンポジウム 1287-1292
- (17) 社団法人 日本電気協会 (1984) : 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601・補-1984
- (18) 社団法人 日本電気協会 (1987) : 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987
- (19) 社団法人 日本電気協会 : 鉛直方向の設計用床応答スペクトルの拡幅率」、第 29 回耐震設計分科会資料 No. 29-4-5-7、平成 20 年 1 月 18 日
- (20) 財団法人 原子力発電技術機構 (2001) : 平成 12 年度 耐震設計高度化調査 原子炉建屋・機器の水平・上下応答評価法の調査 報告書
- (21) 社団法人 日本機械学会 (2005) : 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME SNC1-2005