

福島第一原子力発電所 3 号機の
耐震安全性について

平成 2 2 年 5 月
東京電力株式会社

【目 次】

1. はじめに
2. 中越沖地震時の観測データに基づく主要施設の概略評価
3. 新耐震指針に照らした耐震安全性評価の基本方針
4. 敷地周辺・敷地近傍・敷地の地質及び地質構造
5. 基準地震動 S_s の策定
6. 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価
7. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価
8. 地震対策の取り組み
9. まとめ

1. はじめに

1. はじめに

福島第一原子力発電所3号機については、昭和47年に原子炉設置変更申請が許可になっている。この時点では、現行のような耐震指針は策定されていなかったものの、基本的には耐震指針と同様な考え方にに基づき耐震設計はなされている。その当時の耐震設計では、重要な建物、構築物、機器配管系は、基盤における最大加速度0.18g（約180ガル）の地震動に対して設計している。この場合、設計地震力は建築基準法に示された震度の3倍の震度から定まる値を下回らないよう設計している。また、原子炉格納容器並びに原子炉緊急停止系（制御棒、同駆動機構及びボロン注入施設）などのように安全対策上特に重要な施設については、基盤における最大加速度が0.18gの1.5倍の地震動に対して格納容器の機能が保持され、かつ安全に原子炉が停止できることを確認している。

昭和53年には「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が策定され、3号機についても本指針に基づき過去の地震、地質調査をもとに基準地震動 S_1 、 S_2 を策定し、耐震安全性が確保されていることを確認している。さらに、平成18年9月19日付けで「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改訂（以下、「新耐震指針」という。）された。これに伴い原子力安全・保安院より既設の発電用原子炉施設等について、新耐震設計に照らした耐震安全性の評価等を実施するよう求められ、当社も確認のための調査等に着手した。

この後、平成19年7月16日に新潟県中越沖地震が発生し、柏崎刈羽原子力発電所で従来の想定を上回る地震動が観測された。

原子力発電所に対する地元の方々の安全，安心の観点から，代表プラントによる中間報告を提出する計画を策定するとともに，中越沖地震で観測された原子炉建屋基礎版上の床応答スペクトルを用いて福島第一原子力発電所並びに福島第二原子力発電所の全プラントについて概略評価を実施し，安全上重要な機能を有する主要な機器の安全機能が維持されることを確認した。

新耐震指針に照らして各種調査を実施し，策定した基準地震動 S_s に基づく耐震安全性評価としては，代表プラントである福島第一原子力発電所 5 号機と福島第二原子力発電所 4 号機は，平成 20 年 3 月に報告書を国へ提出したが，中越沖地震の知見を反映するため全体的な作業工程が遅延することから，代表号機以外のプラントについても主要設備の評価を行うこととした。

以上のような最新の知見に基づく評価を中心とした活動を行う他，新潟県中越沖地震で経験した所内変圧器火災の対応や溢水対策等の様々な教訓に基づき，防災機能の向上に努めている。また，既存の評価結果等に基づき可能な範囲で耐震性を高める工事を順次実施することとした。具体的には，自衛消防隊の 24 時間体制など，防災組織・体制の見直しの他，緊急対策室の免震化，化学消防車の配備等の防災設備強化を実施した。原子力発電所設備についても，柏崎刈羽原子力発電所での機器・構築物損傷事例を踏まえ，変圧器基礎地盤の強化，電路サポートの強化，緊急車両用構内道路の補強等，耐震裕度の向上対策を進めている。

2. 中越沖地震時の観測データに基づく主要施設の概略評価

【目 次】

2.	中越沖地震の観測データに基づく主要施設の概略評価	
2.1	対象施設	2-1
2.2	使用する床応答スペクトル	2-2
2.3	検討方法	2-2
2.4	検討結果	2-3

2. 中越沖地震時の観測データに基づく主要施設の概略評価

平成 19 年新潟県中越沖地震において、柏崎刈羽原子力発電所で観測された「原子炉建屋基礎版上の床応答スペクトル」と、福島第一原子力発電所 3 号機における設計に用いた地震動（以下、「設計用地震動」という。）による「原子炉建屋基礎版上の床応答スペクトル」を比較する。それにより、柏崎刈羽原子力発電所原子炉建屋における観測地震動による福島第一原子力発電所 3 号機の主要施設の機能維持への影響を検討する。

また、多度津工学試験所での耐震実証試験など、過去に実施された評価等から得られる知見も必要に応じて活用する。

2.1 対象施設

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以下の主要な施設を対象とする。

- ① 原子炉圧力容器
- ② 炉心支持構造物
- ③ 残留熱除去系ポンプ
- ④ 残留熱除去系配管
- ⑤ 主蒸気系配管
- ⑥ 原子炉格納容器
- ⑦ 原子炉建屋
- ⑧ 制御棒（挿入性）

2.2 使用する床応答スペクトル

(1) 柏崎刈羽原子力発電所の床応答スペクトル

柏崎刈羽原子力発電所の床応答スペクトルは、最大の加速度を示した 1 号機と、短周期帯で比較的大きな応答のある 4 号機の原子炉建屋基礎版上で観測されたデータを用いる。

(2) 福島第一原子力発電所の床応答スペクトル

比較する床応答スペクトルは、建設時の設計用地震動による原子炉建屋基礎版上での床応答スペクトルを用いる。

2.3 検討方法

以下に示すステップで検討作業を行う。

(1) ステップ 1

柏崎刈羽原子力発電所の床応答スペクトル (K_s)、福島第一原子力発電所 3 号機の床応答スペクトル (F_s) を比較し、対象施設の固有周期において $K_s \leq F_s$ であるか、すなわち、「対象施設の固有周期における K_s と F_s の比率 ($K_s / F_s : \alpha$)」が 1 以下であるかを検討する。

α が 1 を超える施設については、保守的な簡易評価手法として、 α と「対象施設の設計用地震動における応答値と許容値の比率 (許容値 / 応答値 : β)」を比較し、 $\alpha \leq \beta$ であるかを検討する。

(2) ステップ 2

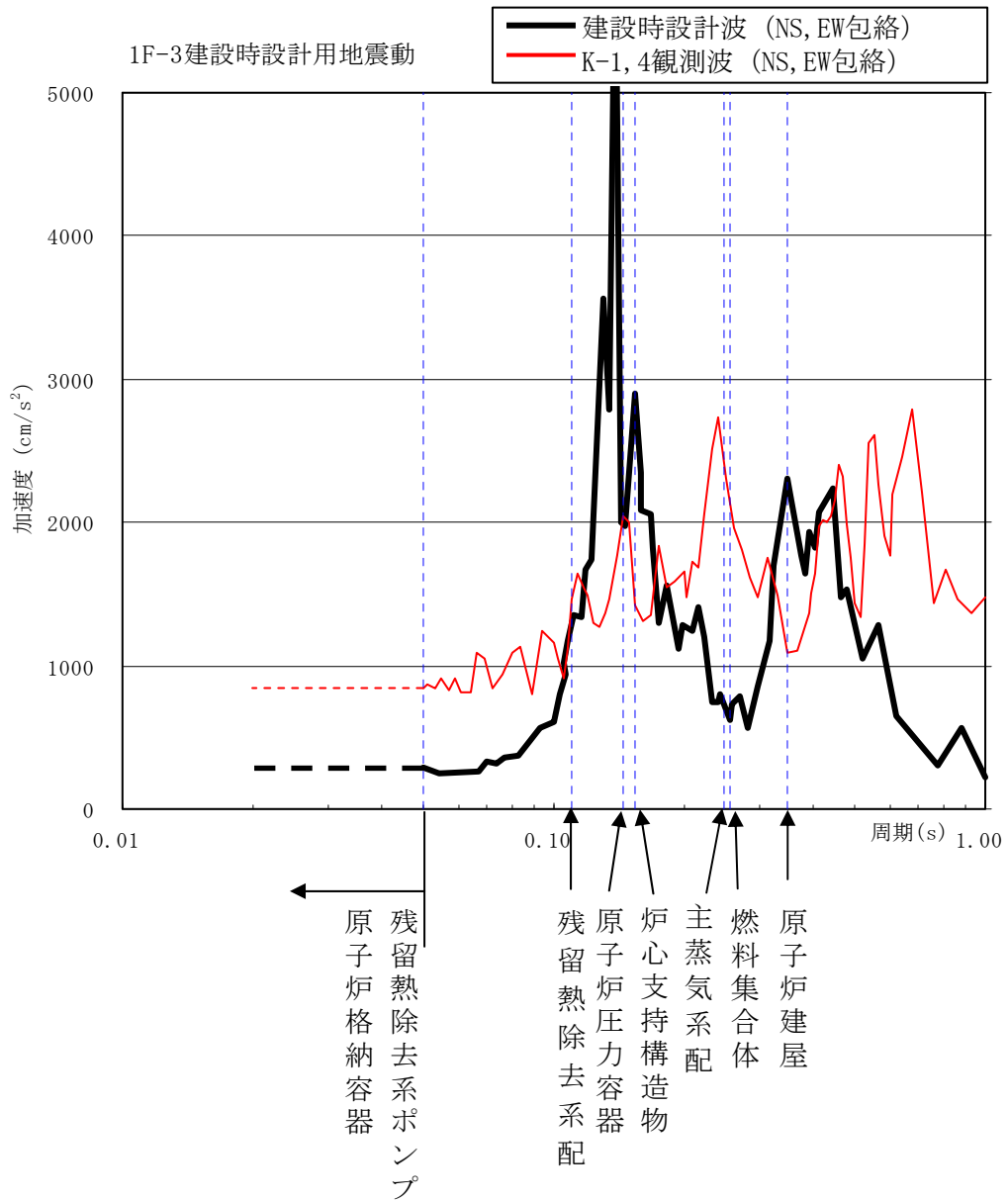
ステップ 1 において、 α が β を上回る施設については、個別に解析モデルを用いた詳細な解析を行うなどにより検討を実施する。

検討にあたっては，原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601）などの規格基準に基づき検討を行う。

2.4 検討結果

柏崎刈羽原子力発電所の床応答スペクトル（ K_s ）と福島第一原子力発電所3号機の床応答スペクトル（ F_s ）の比較図を第2.4-1図に，概略影響検討の結果を第2.4-1表に示す。

その結果から，平成19年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所原子炉建屋の揺れによっても，福島第一原子力発電所3号機の耐震設計上重要な施設の安全機能は維持されるものと考えられる。



第 2.4-1 図 福島第一 3 号機と柏崎刈羽 1, 4 号機の
基礎版上の床応答スペクトルの比較 (減衰定数 1%)

第 2.4-1 表 福島第一原子力発電所 3 号機 概略影響検討結果

対象施設 (評価部位)	固有 周期 (秒)	ステップ 1			ステップ 2 *2	判定
		α	β *1	許容値/応答 値 [MPa]		
原子炉圧力容器 (支持構造物)	0.145	1.04	1.61	222/137.3	—	○
炉心支持構造物 (シュラウトサポート)	0.154	1 以下	—	—	—	○
残留熱除去系ポンプ (基礎ボルト)	0.05 以下	2.99	3.03	185/61.0	—	○
残留熱除去系配管 (配管本体)	0.110	1.12	3.39	363/107	—	○
主蒸気系配管 (配管本体)	0.247	3.35	3.76	418/ 142(100) *3	—	○
原子炉格納容器 (ドライウエル)	0.05 以下	2.99	3.16	255/ 106(68.7) *4	—	○
原子炉建屋 (耐震壁)	0.348	1 以下	—	—	—	○
制御棒 (挿入性)	0.256	3.20	2.63	40mm/15.2mm	27.7mm*5 ≤ 40mm 応答値 許容値	○

*1 「—」は、 α が1以下であることより、機能維持が確認されたことを示す。

*2 「—」は、ステップ1で機能維持が確認されたことを示す。

*3 括弧内は地震による応答値を記載。地震以外の応答値は、地震の大きさにより変化しないため、以下の方法にて β を算出。

$$\beta = \frac{\text{許容値} - \text{地震以外の応答値}}{\text{地震による応答値}} = \frac{418 - (142 - 100)}{100} \div 3.76$$

*4 括弧内は地震による応答値を記載。地震以外の応答値は、地震の大きさにより変化しないため、以下の方法にて β を算出。

$$\beta = \frac{\text{許容値} - \text{地震以外の応答値}}{\text{地震による応答値}} = \frac{255 - (106 - 68.7)}{68.7} \div 3.16$$

*5 当該データは、1F-3炉内連成解析モデルにK-1, K-4観測波を入力し、詳細な検討として地震応答解析を実施した結果によるもの。この結果が許容値（燃料集合体変位40mm）を下回ることを確認した。

3. 新耐震指針に照らした耐震安全性評価の基本方針

3. 新耐震指針に照らした耐震安全性評価の基本方針

耐震安全性評価の基本方針を以下に示す。

- 1) 耐震安全性評価は、新耐震指針に照らして策定した基準地震動 S_s に対し、耐震安全上重要な施設の安全機能保持の観点から行う。
- 2) 評価対象施設は、新耐震指針による S クラスの施設のうち、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主要な施設を対象とする。
- 3) 耐震安全性評価は、平成 19 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震を受けた「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に反映すべき事項（中間取りまとめ）について（通知）」（平成 19・12・26 原院第 6 号）^{*1} および「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・08・29 原院第 10 号）^{*2} の知見を適切に反映する。

*1 平成 19 年 12 月 27 日経済産業省原子力安全・保安院長より通知

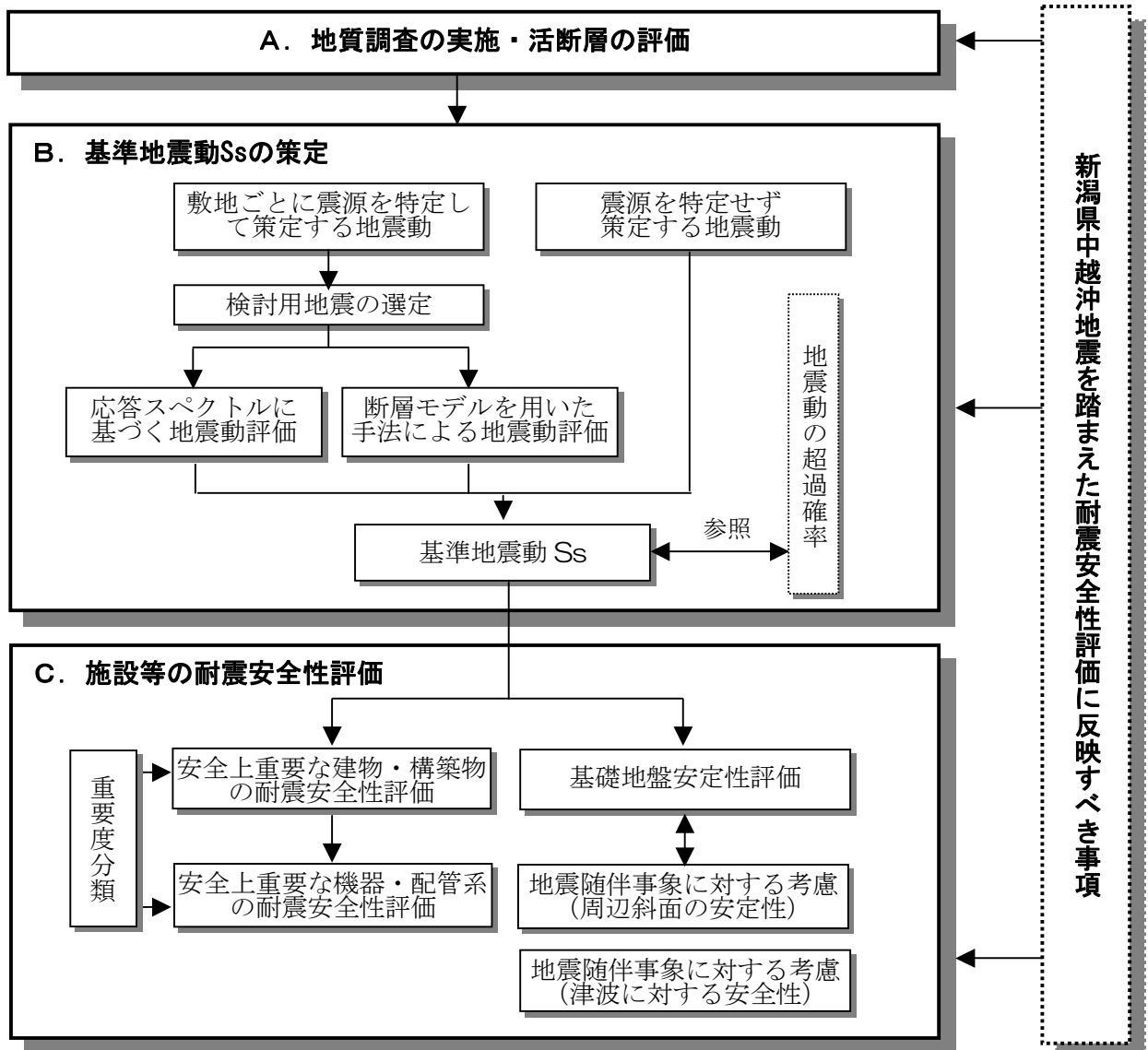
*2 平成 20 年 9 月 4 日経済産業省原子力安全・保安院長より通知

- 4) 施設に作用する地震力の算定、発生応力の算定、安全機能の評価等に用いる地震応答解析手法、解析モデル、許容値等については、従来の評価実績、最新の知見及び規格・基準等を考慮する。また、施設運用上の管理値や実測値などについても考慮する。

評価対象を第 3.1-1 表に、耐震安全性評価の全体フローを第 3.1-1 図に示す。

第 3.1-1 表 福島第一原子力発電所における評価対象

施設等の内訳	評価対象
建物・構築物	原子炉建屋
機器・配管系	炉心支持構造物，制御棒（挿入性），残留熱除去系ポンプ，残留熱除去系配管，原子炉压力容器，主蒸気系配管，原子炉格納容器



第 3.1-1 図 新耐震指針に照らした耐震安全性評価フロー

4. 敷地周辺・敷地近傍・敷地の地質及び地質構造

【目 次】

4. 敷地周辺・敷地近傍・敷地の地質及び地質構造	
4.1 地質調査の実施	4-1
4.2 活断層の評価	4-3

4. 敷地周辺・敷地近傍・敷地の地質及び地質構造

4.1 地質調査の実施

既往の設置許可申請時等を実施した地質調査結果および新耐震指針を先取りし、平成18年6月から実施した地質調査の結果を踏まえて活断層の評価を実施しました。主な調査項目は第4.2-1図のとおりです。

文献調査（敷地から半径約 100km の範囲）

変動地形学的調査（範囲①）

地表地質調査（範囲①）

文献調査の結果を踏まえて、敷地を中心とする半径約 30km の範囲の陸域について変動地形学的調査並びに地表地質調査を、さらに、同範囲以遠に分布する主要断層沿いについて同様の調査

変動地形学的調査（範囲④）

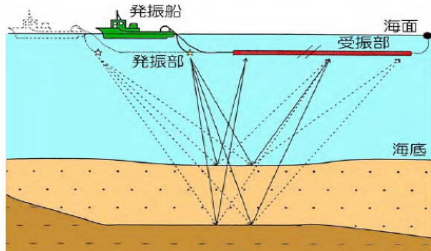
地表地質調査（範囲④）

敷地近傍の地質及び地質構造を高精度で把握するため、敷地を中心とする半径 5km の範囲において、詳細な変動地形学的調査、地表地質調査を実施した。

海上音波探査（範囲②、③）

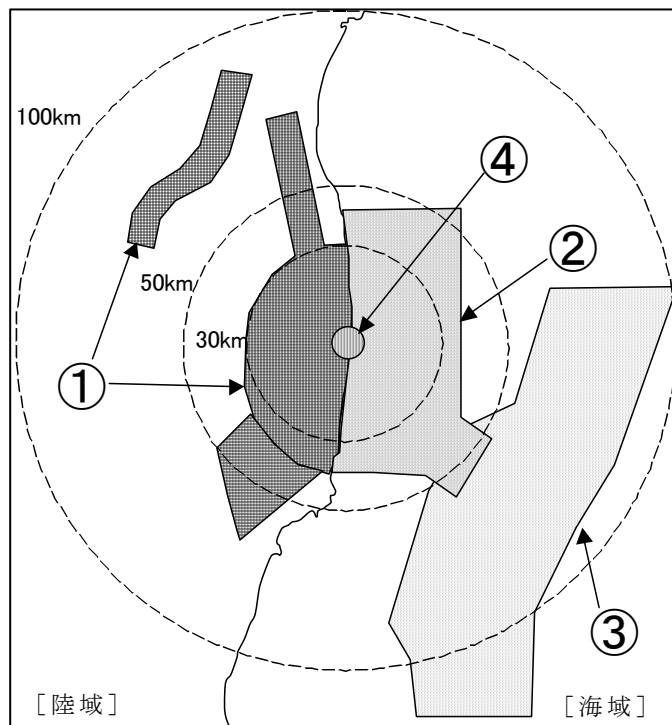
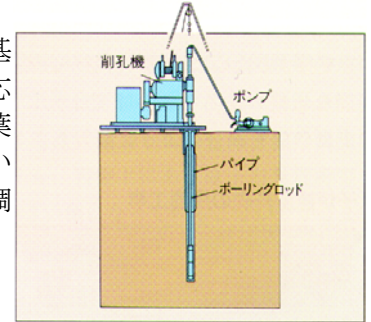
同記録解析（敷地から半径約 100km の範囲）

敷地を中心として、汀線方向約 80km、汀線直交方向約 30km の範囲の海域について海上音波探査を実施した。さらに、敷地前面海域よりも外海の周辺海域においては海上音波探査記録についても解析を行った。



ボーリング調査（範囲①）

活断層の認定基準の変更に対応するため、双葉断層周辺においてボーリング調査を実施した。



【地質調査の範囲】

第 4.2-1 図 主な調査項目

4.2 活断層の評価

活断層評価にあたっては、「新耐震指針」や「中越沖地震を踏まえ反映すべき事項」（平成19年12月27日，原子力安全・保安院）における活断層評価の考え方や趣旨を踏まえ，変動地形学的観点からの地形判読などを行い，また，設置許可以降の文献等も考慮しながら安全側に評価を行いました（第4.2-1表，第4.2-1図）。

従来の活断層評価が変更となった考え方のポイントは以下のとおりです。

- (1) 活断層評価対象期間が5万年から12～13万年前までに変更になったことによるもの
- (2) 文献調査に基づき地震地体構造上想定する地震として評価していたものを詳細な地質調査に基づき再評価したもの
- (3) 文献調査に基づき評価していたものを詳細な地質調査に基づき再評価したもの
- (4) 最新の文献調査等に基づく不確かさを考慮した安全側の評価によるもの

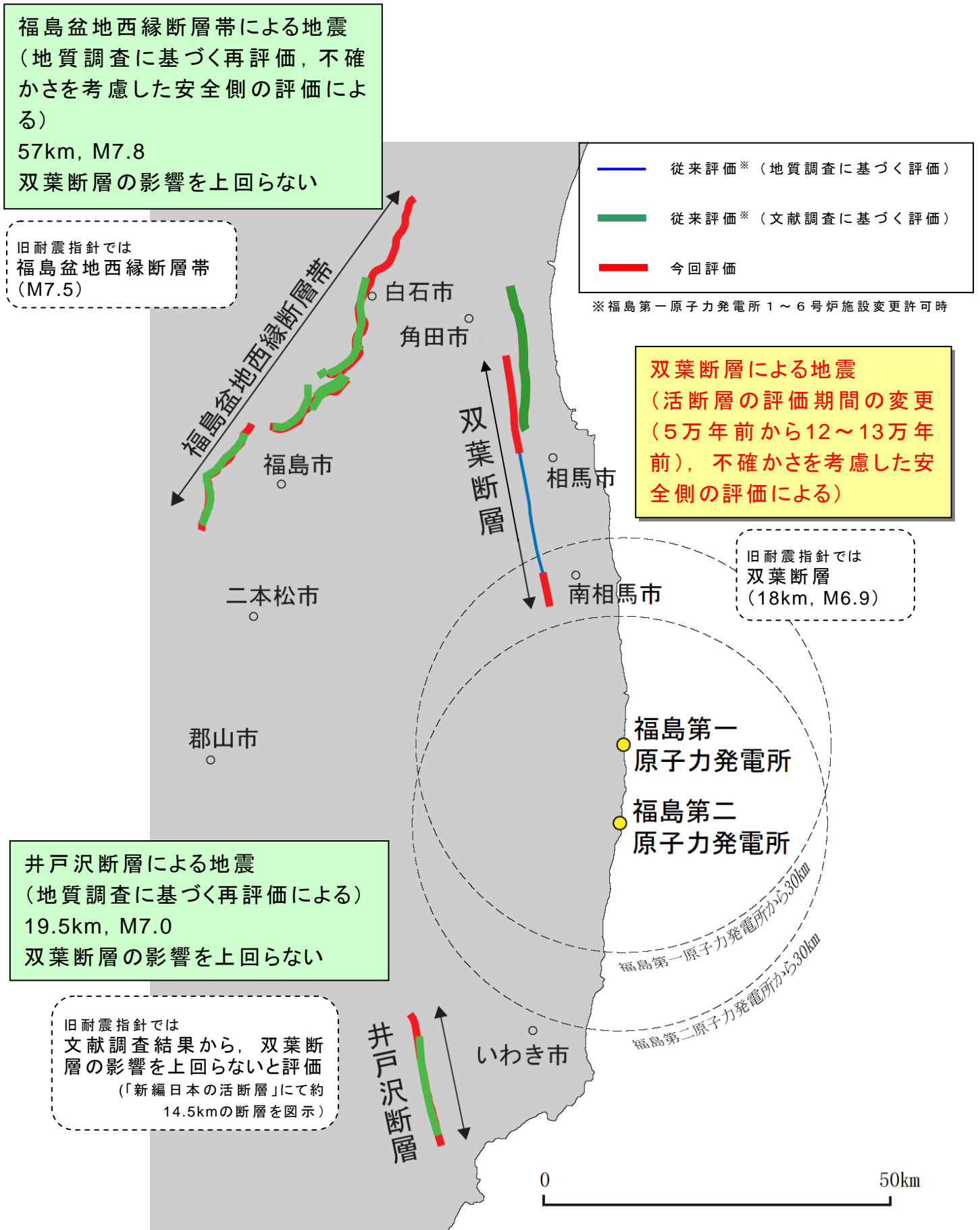
第4.2-1表 新旧指針に基づいた活断層の評価

	新耐震指針における評価			旧耐震指針における評価		変更理由 ^{※1}
	断層名	断層長さ	マグニチュード [°] (M)	原子炉設置許可申請書に記載の断層長さ	マグニチュード [°] (M)	
陸域	① 双葉断層	37km	7.4	18km	6.9	1・4
	② 福島盆地西縁断層帯	57 km	7.8	—	7.5 ^{※2}	2・4
	③ 井戸沢断層	19.5 km	7.0	— ^{※3}	—	3

※1) 文章中の「従来の活断層評価が変更となった考え方のポイント」の記号を示す。

※2) 地震地体構造上想定する地震として，M7.5の地震を想定。

※3) 断層の長さと敷地からの距離を考慮すると敷地に与える影響は小さいと評価。



第 4.2-1 図 新耐震指針に照らした耐震安全性評価において考慮する断層

5. 基準地震動 S_s の策定

【目 次】

5. 基準地震動 S_s の策定

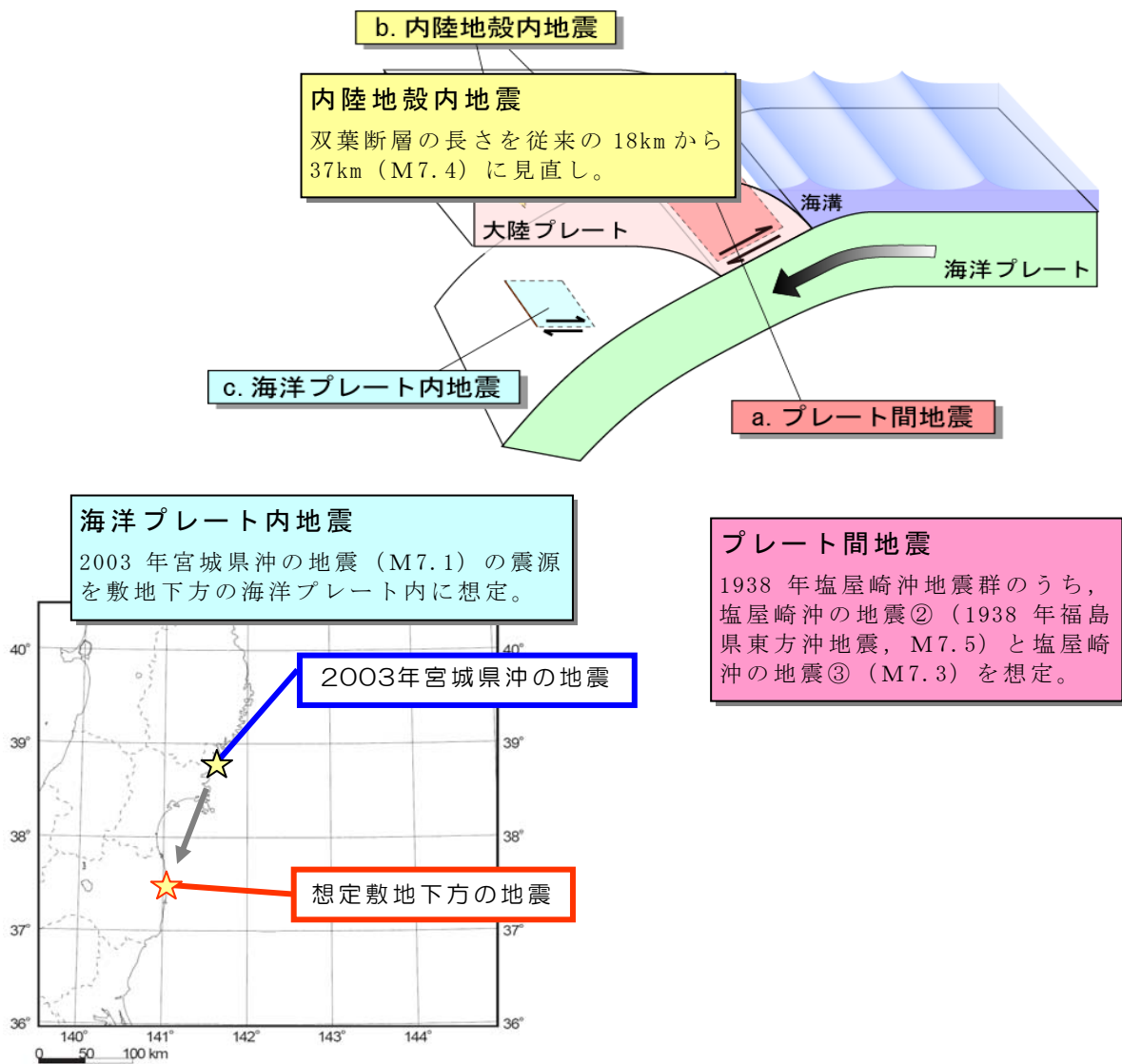
5.1	検討用地震の選定	5-1
5.2	検討用地震の地震動評価	5-3
5.3	「震源を特定せず策定する地震動」	5-4
5.4	基準地震動 S_s の策定のまとめ	5-5

5. 基準地震動 S_s の策定

5.1 検討用地震の選定

活断層調査結果や既往の研究成果を踏まえ、特に敷地に大きな影響を及ぼすと考えられる地震を地震発生様式ごとに検討用地震として選定しました（第 5.1-1 図）。

- ・双葉断層については、耐震設計審査指針改訂に伴う活断層の評価基準の変更を踏まえ、その断層長さを従来の 18km から 37km (M7.4) に見直し、耐震設計に考慮しました。その結果、考慮すべき活断層による内陸地殻内地震の中で、双葉断層による地震が最も発電所に影響が大きいことから、これを検討用地震として選定しました。
- ・プレート間地震については、1938 年に発電所の敷地沖合で発生した福島県東方沖地震をはじめとする一連の地震（以下、塩屋崎沖地震群）のうち、敷地への影響が最も大きい塩屋崎沖の地震②（1938 年福島県東方沖地震，M7.5）と塩屋崎沖の地震③（M7.3）を検討用地震として選定しました。
- ・海洋プレート内地震については、現時点で具体的な発生位置の特定が困難なことから、2003 年宮城県沖の地震（M7.1）の震源を敷地下方の海洋プレート内に想定し、これを検討用地震として選定しました。



第 5.1-1 図 地震発生様式ごとの検討用地震の選定

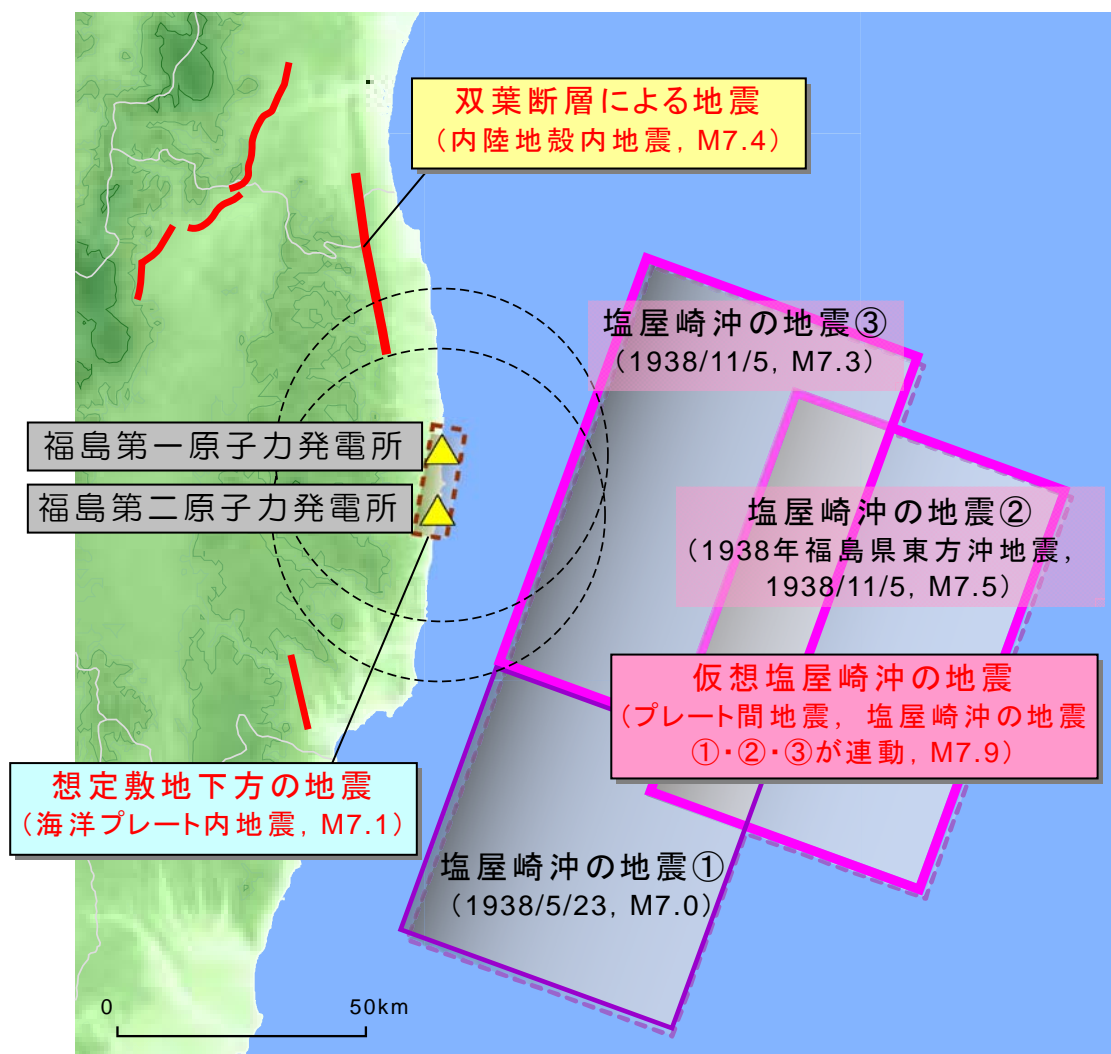
5.2 検討用地震の地震動評価

選定した検討用地震について、応答スペクトルに基づく地震動評価および断層モデルを用いた手法による地震動評価をそれぞれ実施しました。なお、評価にあたっては、地震の発生様式に応じた地震動特性や、敷地地盤の振動特性を考慮しています。

また、この地震動評価にあたっては、その評価結果に及ぼす影響が大きいと考えられる震源要素（震源の位置・規模など）を選定し、その不確かさを適切に考慮することで、安全側な評価を実施しています。

このうちプレート間地震については、検討用地震として選定した塩屋崎沖の地震②（M7.5）と塩屋崎沖の地震③（M7.3）の地震動評価に加え、不確かさを考慮して①から③の一連のプレート間地震が同時活動するケースを仮想塩屋崎沖の地震（M7.9）として設定し、その地震動を評価しました（第5.2-1図）。

なお、内陸地殻内地震として考慮している双葉断層の断層長さは37km（M7.4）ですが、基準地震動 S_s は、福島第一原子力発電所5号機中間報告時（平成20年3月）の暫定評価（断層長さ47.5km, M7.6）に基づき策定しています。また、双葉断層の断層長さを暫定評価の47.5kmから37kmに見直した場合においても、基準地震動 S_s に変更はありません。



第 5.2-1 図 基準地震動 S_s の策定に当たって考慮した地震

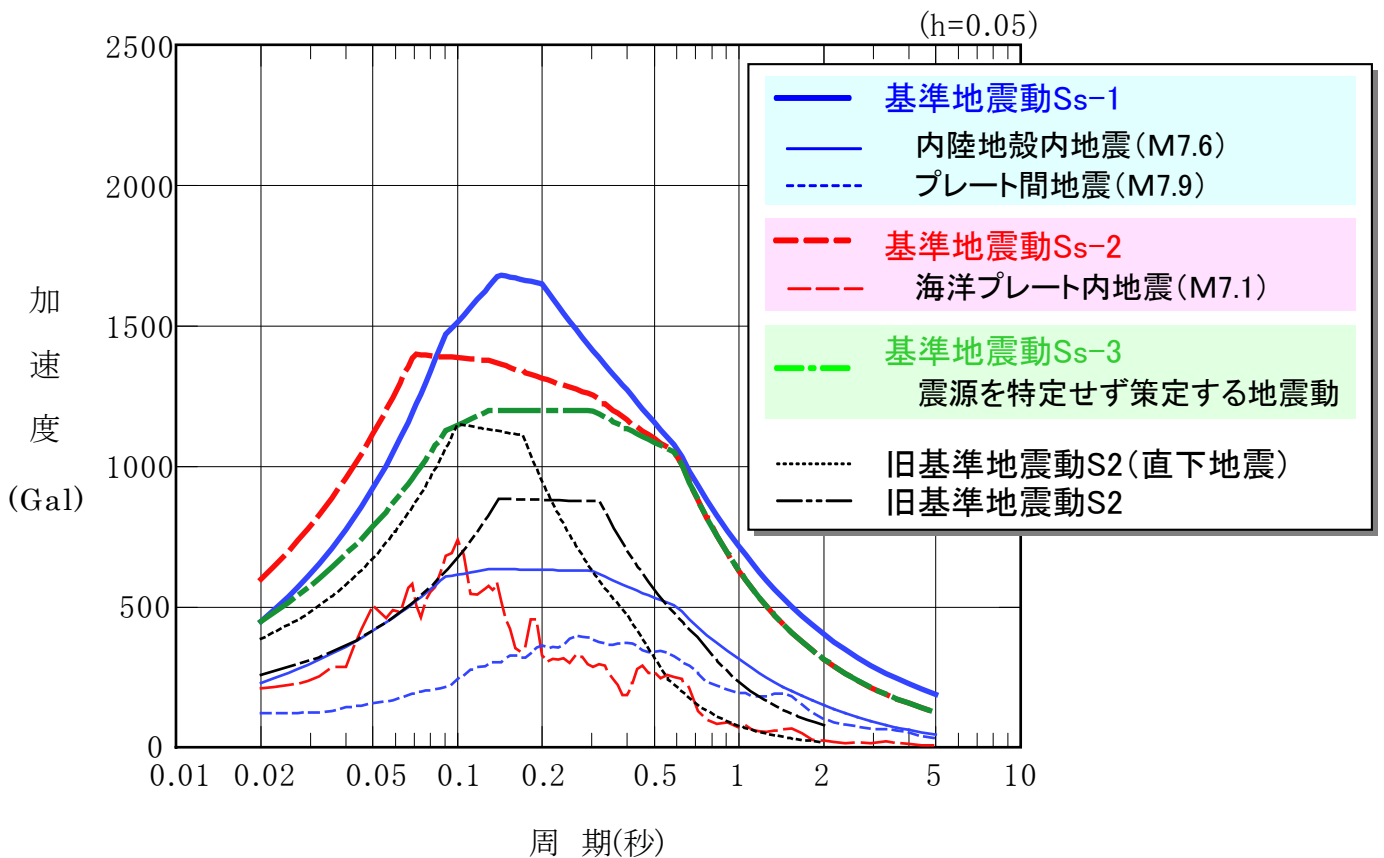
5.3 「震源を特定せず策定する地震動」

新耐震指針に照らして、「震源を特定せず策定する地震動」を基準地震動の策定において考慮しました。「震源を特定せず策定する地震動」としては、詳細な地質学的調査によっても震源位置と地震規模を予め特定できない地震による震源近傍の岩盤上の強震記録に基づき、解放基盤表面上の応答スペクトルが提案されており、敷地周辺の地域性を考慮した上でも妥当なものと考えられることから、これを採用しました。

5.4 基準地震動 S_s の策定のまとめ

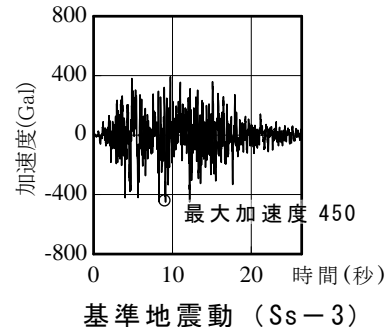
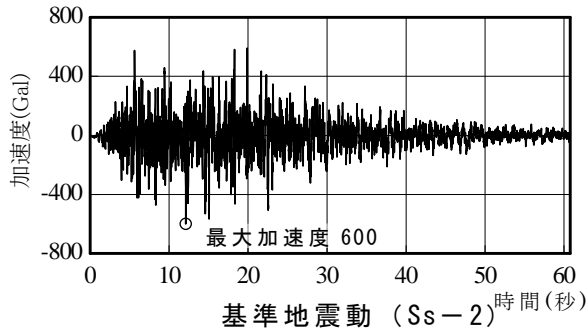
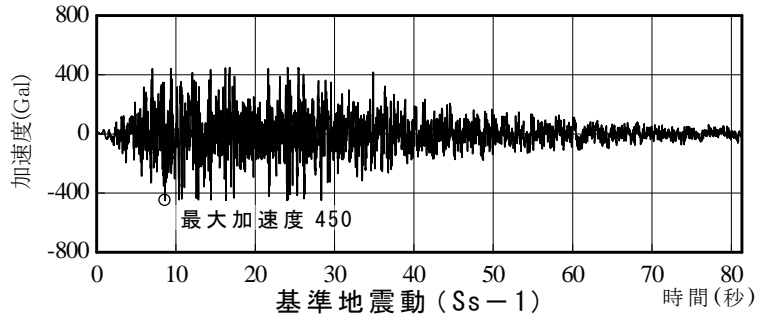
地震動評価結果に基づき，以下の通り3種類の基準地震動 S_s を策定しました（第5.4-1，2図）。

- ・ 基準地震動 S_s-1 (最大加速度 450 ガル)：内陸地殻内地震・プレート間地震の評価結果を上回るように設定
- ・ 基準地震動 S_s-2 (最大加速度 600 ガル)：海洋プレート内地震の評価結果を上回るように設定
- ・ 基準地震動 S_s-3 (最大加速度 450 ガル)：震源を特定せず策定する地震動

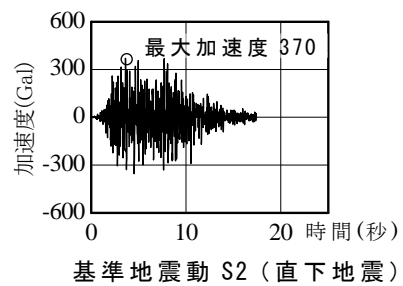
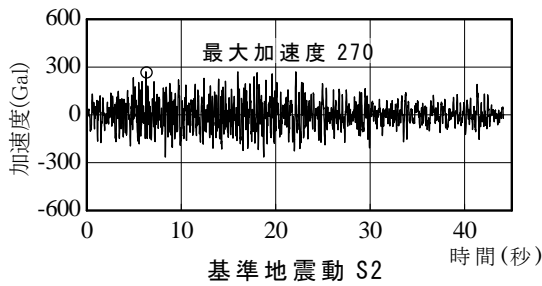


第5.4-1図 策定した3種類の基準地震動の応答スペクトル(水平動)

【新耐震指針に基づく基準地震動 S_s の加速度波形（水平動）】



【参考 旧耐震指針に基づく基準地震動 S_2 の加速度波形（水平動）】



第 5.4-2 図 福島第一原子力発電所における
基準地震動の加速度波形（水平動）

6. 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

【目 次】

6.	安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価	
6.1	評価方針	6-1
6.2	3号機原子炉建屋の耐震安全性評価	6-2
6.2.1	地震応答解析	6-2
6.2.2	評価基準	6-36
6.2.3	耐震安全性評価結果	6-37

6. 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

6.1 評価方針

安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価は、基準地震動 S_s に対する耐震設計上重要な施設の安全機能を保持する観点から実施する。

耐震指針によるSクラスの施設を内包している建物・構築物としては、原子炉建屋があり、これに対しては「遮へい機能」、「耐漏洩機能（気密性）」、「支持機能」および「波及的影響の防止機能」の保持が地震時に要求される。

建物・構築物の評価は原子炉建屋を評価対象とする。

建物・構築物の耐震安全性評価は、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析（時刻歴応答解析法）によることとし、建物・構築物や地盤の特性を適切に表現できるモデルを設定した上で行う。

耐震安全性の評価は、地震応答解析により得られた耐震壁のせん断ひずみと評価基準値との比較により行う。

6.2 3号機原子炉建屋の耐震安全性評価

6.2.1 地震応答解析

(1) 原子炉建屋の概要

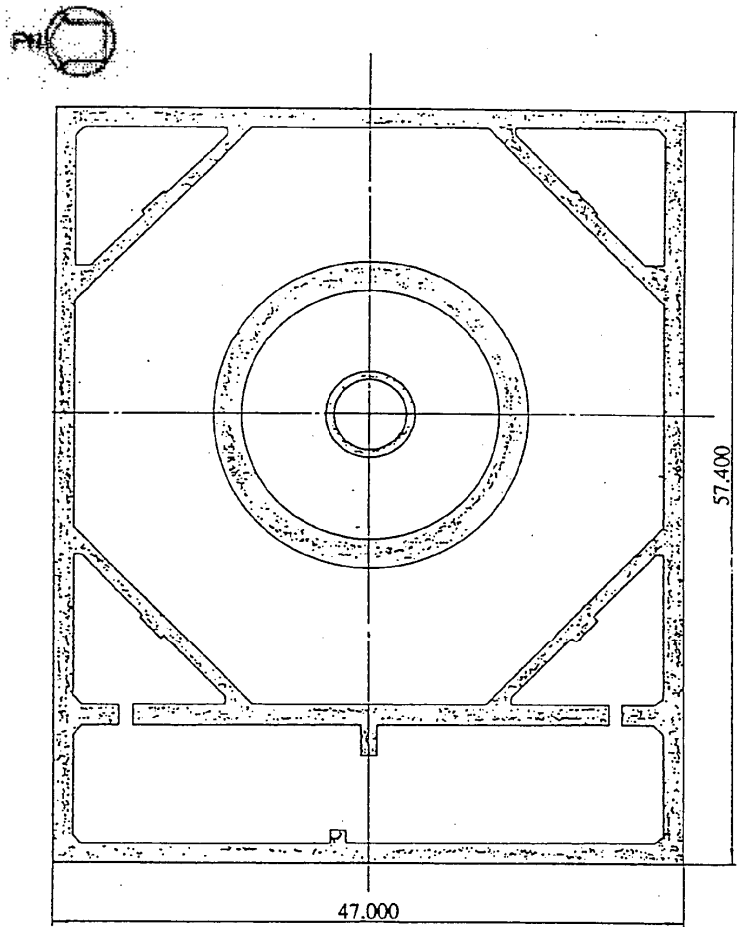
原子炉建屋は、地上5階、地下1階建ての鉄筋コンクリート造を主体とした建物で、屋根部分が鉄骨造（トラス構造）となっている。原子炉建屋の概略平面図および概略断面図を第6.2.1-1図および第6.2.1-2図に、物性値を第6.2.1-1表に示す。

原子炉建屋は原子炉棟と付属棟より構成されており、それら両棟は同一基礎版上に設置された一体構造である。原子炉建屋の平面は、地上部分では1,2階で47.0m^{※1}（NS方向）×47.0m^{※1}（EW方向）、3,4,5階で47.0m^{※1}（NS方向）×35.2m^{※1}（EW方向）の正方形又は長方形で、地下部分が47.0m^{※1}（NS方向）×57.4m^{※1}（EW方向）の長方形である。基礎版底面からの高さは61.78mであり、地上高さは45.72mである。また、原子炉建屋は隣接する他の建屋と構造的に分離している。

原子炉建屋の基礎は、厚さが4.0mのべた基礎で、支持地盤である新第三紀層の泥岩盤上に設置している。

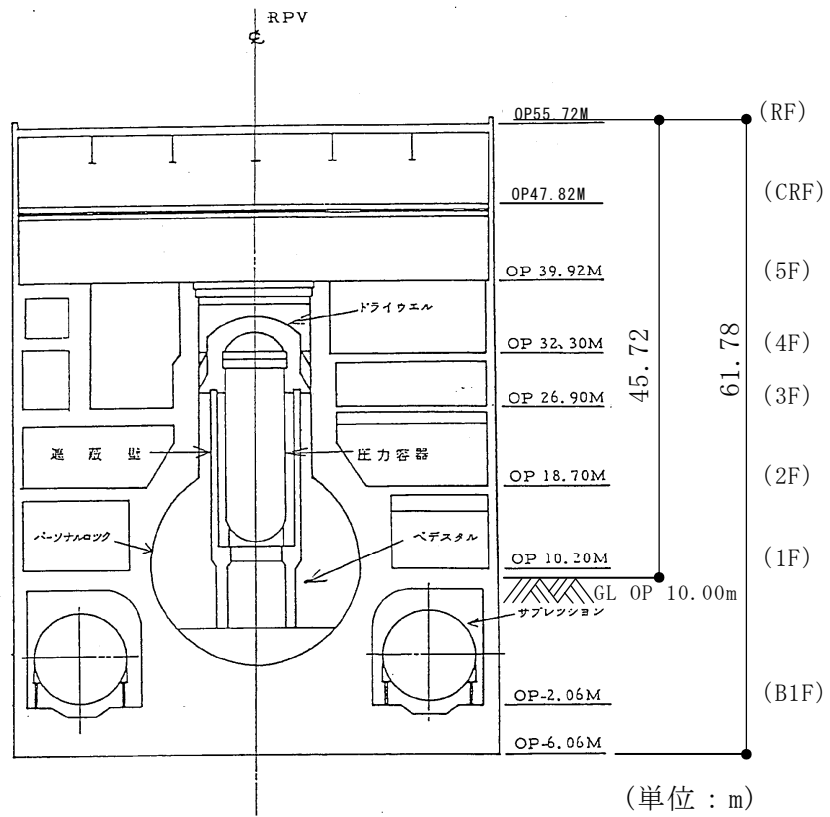
建屋の中央部には原子炉圧力容器を収容している原子炉格納容器があり、その周りを囲んでいる鉄筋コンクリート造の原子炉一次遮へい壁は、上部が円筒形、中央部が円すい台形、下部が円筒形で基礎版上に固定している。

※1 建屋寸法は壁外面押えとする。

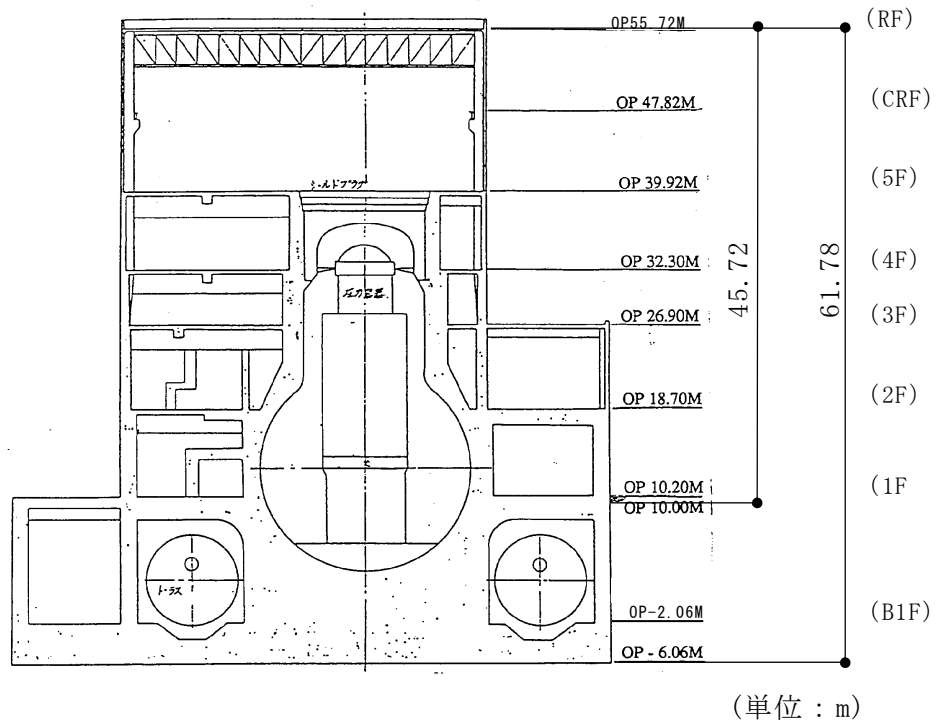


(単位：m)

第 6.2.1-1 図 原子炉建屋の概略平面図



NS 方向断面



EW 方向断面

第 6.2.1-2 図 原子炉建屋の概略断面図

第 6.2.1-1 表 原子炉建屋の物性値

コンク リート	強度*1 F _c (N/mm ²)	ヤング係数*2 E (N/mm ²)	せん断弾性係数*2 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量*3 γ (kN/m ³)
	35.0	2.57×10 ⁴	1.07×10 ⁴	0.2	24
鉄筋	SD345相当 (SD35)				
鋼材	SS400相当 (SS41)				

*1：実強度を採用した。実強度の設定は、過去の圧縮強度試験データを収集し試験データのばらつきを考慮し圧縮強度平均値を小さめにまるめた値とした。

*2：実強度に基づく値を示す。

*3：鉄筋コンクリートの値を示す。

(2) 地震応答解析モデル

(a) 水平方向の地震応答解析モデル

水平方向の地震応答解析モデルは、地盤との相互作用を考慮した、曲げおよびせん断剛性を考慮した質点系モデルとする。地震応答解析モデルを第6.2.1-3図に、解析モデルの諸元を第6.2.1-2表に示す。

地盤は、地盤調査に基づき水平成層地盤とし、基礎底面地盤ばねについては、「JEAG 4601 - 1991」により、成層補正を行ったのち、振動アドミッタンス理論に基づいて、スウェイおよびロッキングばね定数を近似法により評価する。基礎底面地盤ばねには、基礎浮き上がりによる幾何学的非線形性を考慮する。第6.2.1-4図に回転ばねの曲げモーメントと回転角の関係を示す。

また、埋め込み部分の建屋側面地盤ばねについては、建屋側面位置の地盤定数を用いて、水平および回転ばねを「JEAG 4601 - 1991」によりNOVAKばね⁽¹⁾に基づいて近似法により評価する。

なお、第6.2.1-3表に地盤調査に基づく地盤定数を、第6.2.1-4表に地震応答解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数を示す。

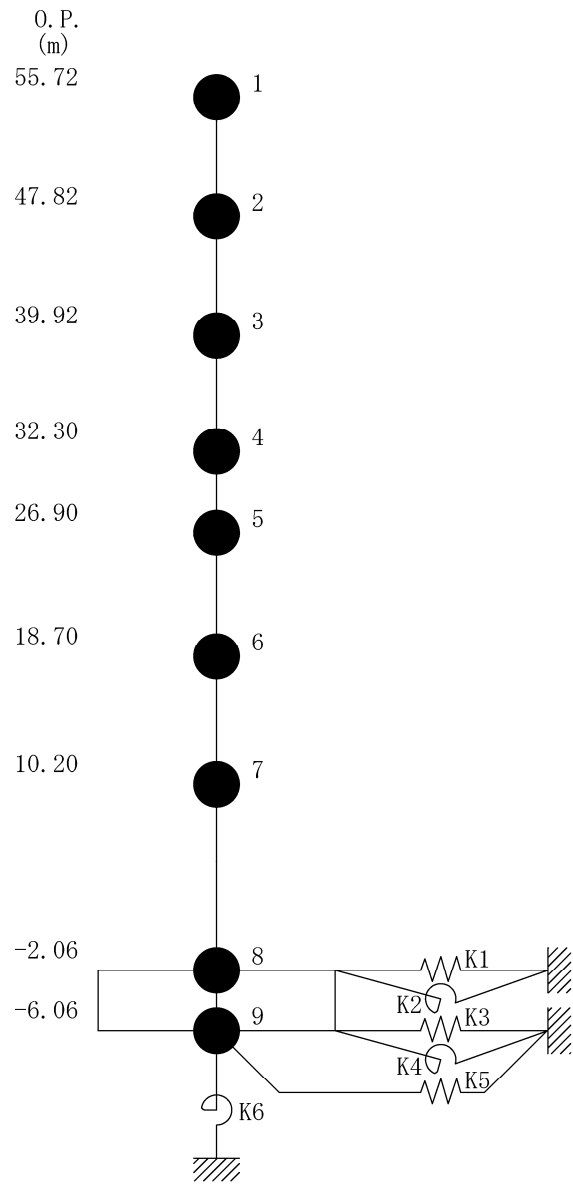
復元力特性は、建屋の方向別に、層を単位とした水平断面形状より「JEAG 4601 - 1991」に基づいて設定する。

水平方向の地震応答解析は、上記復元力特性を用いた弾塑性時刻歴応答解析とする。

入力地震動は、解放基盤表面レベルに想定する基準地震動 S_s を用いることとする。

なお、埋め込みを考慮した水平モデルであるため、モデルに入力する地震動は、一次元波動論に基づき、解放基盤表面レベルに想定する基準地震動 S_s に対する地盤の応答として評価する。また、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する。第6.2.1-5図に，地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図を示す。



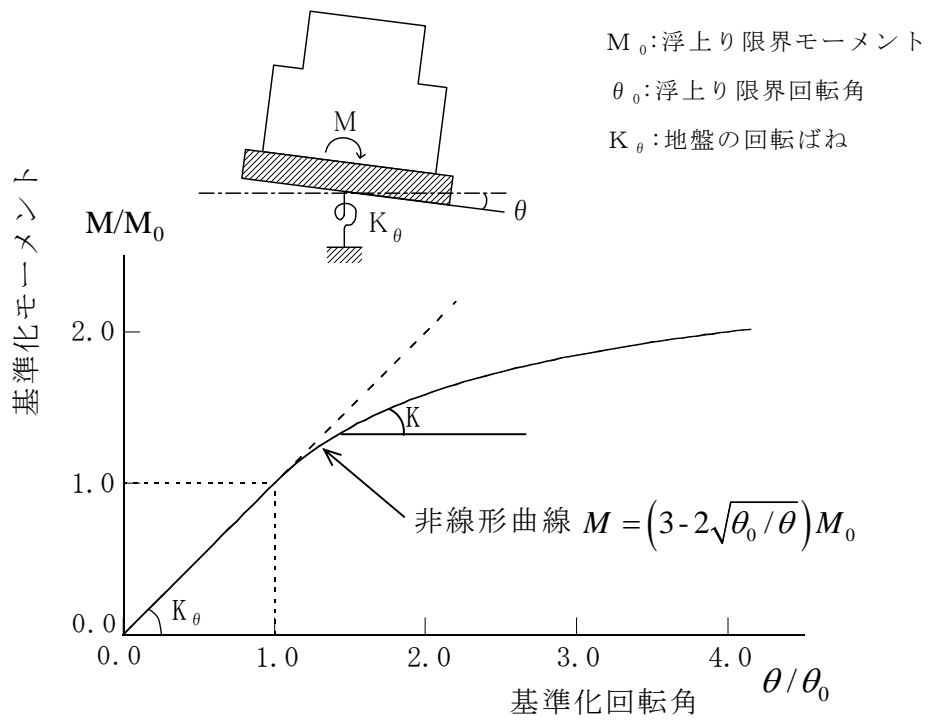
第 6. 2. 1-3 図 地震応答解析モデル (水平方向)

第 6.2.1-2 表 解析モデルの諸元
(NS 方向)

質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント I (m^4)
1	18,890	34.81		
			28.2	14,571
2	15,670	28.83		
			28.2	15,986
3	74,990	138.08		
			206.3	27,958
4	88,070	162.10		
			212.2	38,723
5	109,640	201.82		
			237.3	56,230
6	130,160	239.58		
			208.6	60,144
7	226,760	417.47		
			458.7	112,978
8	301,020	554.17		
			2,697.8	496,620
9	127,000	233.79		
合計	1,092,200			
		ヤング係数 E_c	2.57×10^7 (kN/m ²)	
		せん断弾性係数 G	1.07×10^7 (kN/m ²)	
		ポアソン比 ν	0.20	
		減衰 h	5%	
		基礎形状	47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)	

(EW 方向)

質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント I (m^4)
1	18,890	19.52		
			21.1	8,529
2	15,670	16.18		
			28.2	9,057
3	74,990	77.47		
			103.2	14,172
4	88,070	90.91		
			150.8	21,844
5	109,640	201.82		
			204.1	41,352
6	130,160	239.58		
			226.6	61,084
7	226,760	622.62		
			431.3	135,128
8	301,020	826.50		
			2,697.8	740,717
9	127,000	348.72		
合計	1,092,200			
		ヤング係数 E_c	2.57×10^7 (kN/m ²)	
		せん断弾性係数 G	1.07×10^7 (kN/m ²)	
		ポアソン比 ν	0.20	
		減衰 h	5%	
		基礎形状	47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)	



第 6.2.1-4 図 回転ばねの曲げモーメントと回転角の関係

第 6.2.1-3 表(1) 地盤定数
(Ss-1H)

標高 O. P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^5$ kN/m)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
10.0										
1.9	砂岩	380	17.8	0.473	2.23	2.62	0.85	6.57	3	8.1
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.66	3.41	0.78	7.79	3	11.9
-80.0		500	17.1	0.455	3.40	4.36	0.78	9.89	3	70.0
-108.0		560	17.6	0.446	4.39	5.63	0.78	12.70	3	28.0
-196.0		600	17.8	0.442	5.09	6.53	0.78	14.68	3	88.0
		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

第 6.2.1-3 表(2) 地盤定数
(Ss-2H)

標高 O. P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^5$ kN/m)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
10.0										
1.9	砂岩	380	17.8	0.473	2.23	2.62	0.85	6.57	3	8.1
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.76	3.41	0.81	8.08	3	11.9
-80.0		500	17.1	0.455	3.53	4.36	0.81	10.27	3	70.0
-108.0		560	17.6	0.446	4.56	5.63	0.81	13.19	3	28.0
-196.0		600	17.8	0.442	5.29	6.53	0.81	15.26	3	88.0
		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

第 6. 2. 1-3 表(3) 地盤定数
(Ss-3H)

標高 O. P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^5$ kN/m)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
10.0										
1.9	砂岩	380	17.8	0.473	2.25	2.62	0.86	6.63	3	8.1
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	2.66	3.41	0.78	7.79	3	11.9
-80.0		500	17.1	0.455	3.40	4.36	0.78	9.89	3	70.0
-108.0		560	17.6	0.446	4.39	5.63	0.78	12.70	3	28.0
-196.0		600	17.8	0.442	5.09	6.53	0.78	14.68	3	88.0
		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

第6.2.1-4表(1) 地震応答解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰係数
(NS方向, Ss-1H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K5	9	底面・並進	5.37 × 10 ⁷	0.00	2.07 × 10 ⁶	2.53
K6	9	底面・回転	3.87 × 10 ¹⁰	0.00	3.21 × 10 ⁸	2.53

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW方向, Ss-1H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K5	9	底面・並進	5.27 × 10 ⁷	0.00	1.99 × 10 ⁶	2.65
K6	9	底面・回転	5.16 × 10 ¹⁰	0.00	5.51 × 10 ⁸	2.65

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

第6.2.1-4表(2) 地震応答解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰係数
(NS方向, Ss-2H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.56
K2	8	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	8.94 × 10 ⁷	2.56
K3	9	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.56
K4	9	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	8.94 × 10 ⁷	2.56
K5	9	底面・並進	5.56 × 10 ⁷	0.00	2.10 × 10 ⁶	2.56
K6	9	底面・回転	4.02 × 10 ¹⁰	0.00	3.25 × 10 ⁸	2.56

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW方向, Ss-2H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.69
K2	8	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	9.06 × 10 ⁷	2.69
K3	9	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.69
K4	9	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	9.06 × 10 ⁷	2.69
K5	9	底面・並進	5.45 × 10 ⁷	0.00	2.02 × 10 ⁶	2.69
K6	9	底面・回転	5.35 × 10 ¹⁰	0.00	5.60 × 10 ⁸	2.69

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

第6.2.1-4表(3) 地震応答解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰係数
(NS方向, Ss-3H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K5	9	底面・並進	5.37 × 10 ⁷	0.00	2.07 × 10 ⁶	2.53
K6	9	底面・回転	3.87 × 10 ¹⁰	0.00	3.21 × 10 ⁸	2.53

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

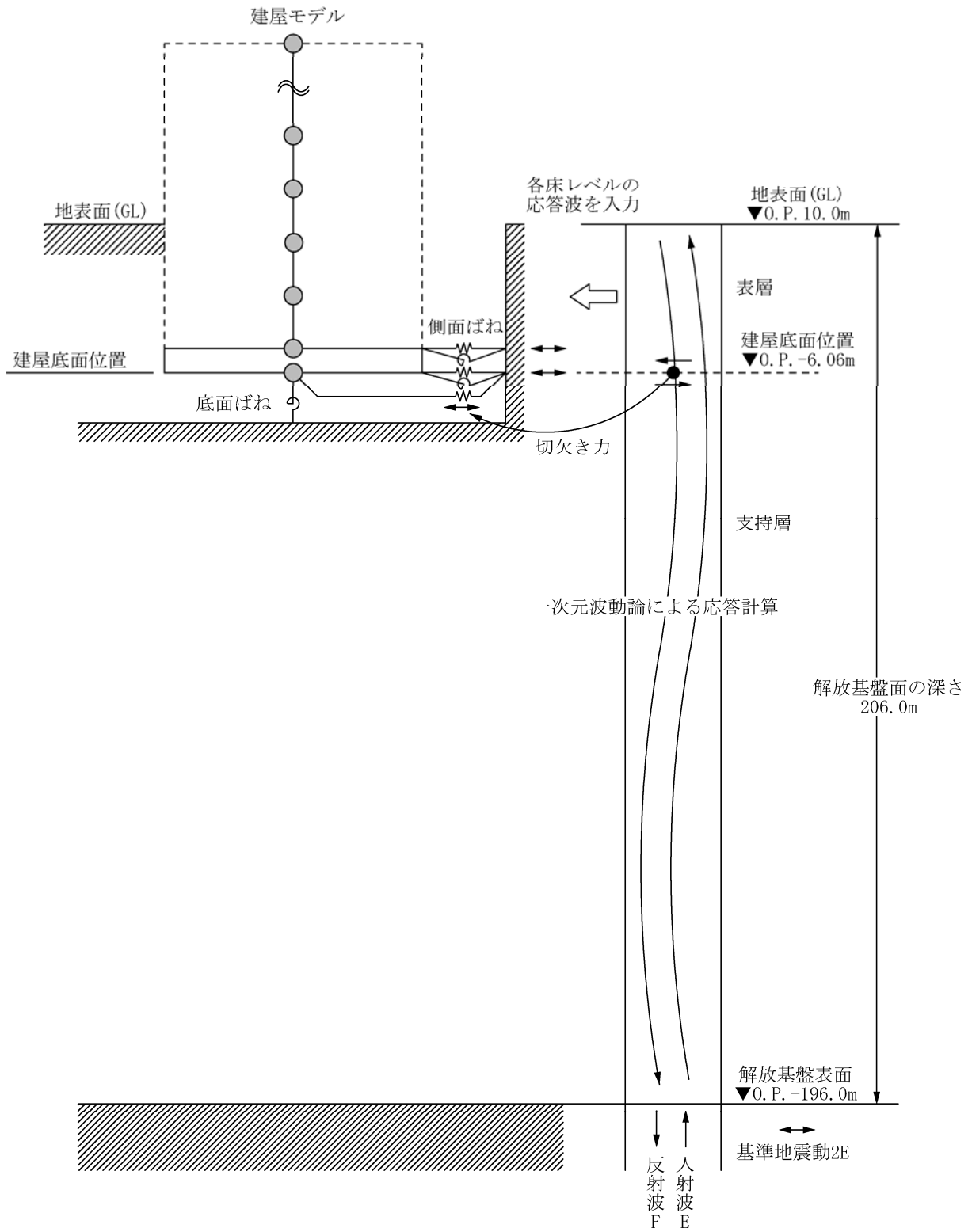
(EW方向, Ss-3H)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K5	9	底面・並進	5.27 × 10 ⁷	0.00	1.99 × 10 ⁶	2.65
K6	9	底面・回転	5.16 × 10 ¹⁰	0.00	5.51 × 10 ⁸	2.65

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数



第 6. 2. 1-5 図 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図
(水平方向)

(b) 鉛直方向の地震応答解析モデル

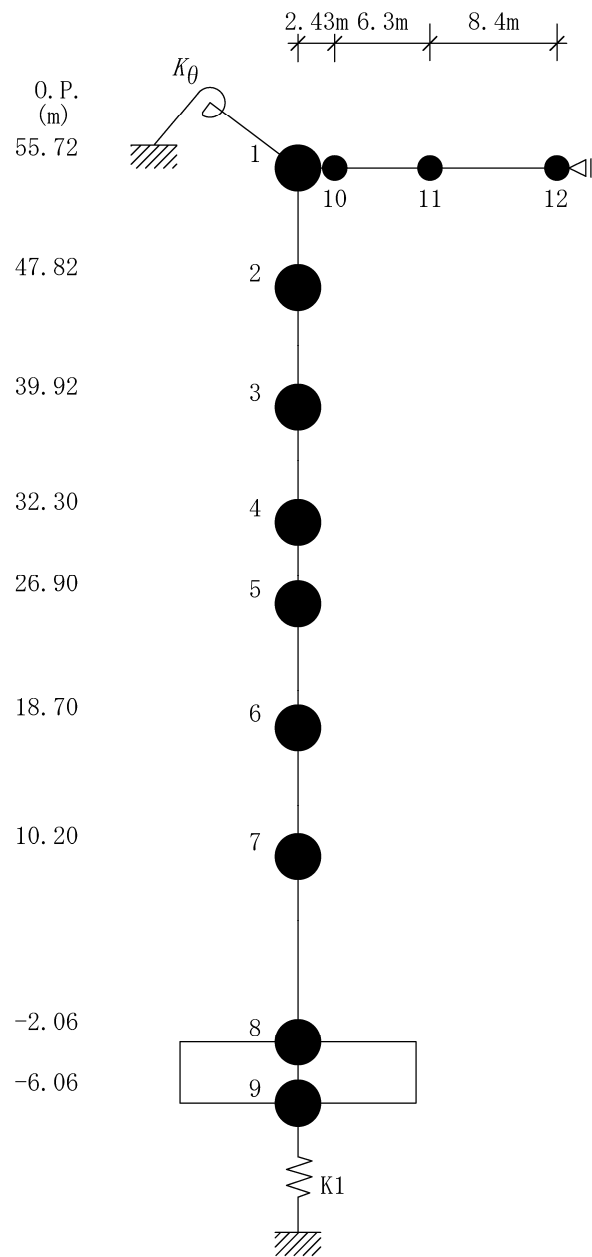
鉛直方向の地震応答解析モデルは、耐震壁の軸剛性および屋根トラスの曲げせん断剛性を評価した上下質点系モデルとする。鉛直方向の地震応答解析モデルを第6.2.1-6図に、解析モデルの諸元を第6.2.1-5表に示す。

地盤は、地盤調査に基づき水平成層地盤とし、基礎底面地盤ばねについては、スウェイおよびロッキングばね定数の評価法と同様、成層補正を行ったのち、振動アドミタンス理論に基づいて、鉛直ばね定数を近似法により評価する。

第6.2.1-6表に地震応答解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数を示す。なお、地盤調査に基づく地盤定数は第6.2.1-3表に示すとおりである。

鉛直方向の地震応答解析は、弾性時刻歴応答解析とする。

入力地震動は、一次元波動論に基づき、解放基盤表面レベルに想定する基準地震動 S_s に対する地盤の応答として評価したものであり、基礎底面レベルに直接入力する。第6.2.1-7図に、地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図を示す。



第 6.2.1-6 図 地震応答解析モデル（鉛直方向）

第 6.2.1-5 表 解析モデルの諸元
(鉛直方向)

建屋				屋根			
質点番号	質点重量 W (kN)	軸断面積 A _N (m ²)	軸ばね剛性 K _N (×10 ⁸ kN/m)	質点番号	質点重量 W (kN)	せん断断面積 A _S (×10 ⁻² m ²)	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	12,026			1	-		
		68.0	2.21			13.03	0.852
2	15,670			10	1,881		
		74.9	2.44			11.56	0.852
3	74,990			11	3,172		
		293.3	9.89			5.96	0.852
4	88,070			12	1,811		
		373.0	17.75				
5	109,640						
		431.7	13.53				
6	130,160						
		423.0	12.79				
7	226,760						
		691.2	14.49				
8	301,020						
		2,697.8	173.33				
9	127,000						
合計	1,092,200						

①コンクリート部
 ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%

②鉄骨部
 ヤング係数 E_s 2.05×10^8 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 7.90×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.30
 減衰 h 2%

トラス端部回転拘束ばね K_θ 2.36×10^7 (kN・m/rad)
 基礎形状 47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)

第6.2.1-6表(1) 地震応答解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰係数

(Ss-1V)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc (kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc (kN・s/m)	採用振動数 ^(*1) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.83×10^7	0.00	4.77×10^6	4.41

(*1) f₁は連成系の1次固有振動数

第6.2.1-6表(2) 地震応答解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰係数

(Ss-2V)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc (kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc (kN・s/m)	採用振動数 ^(*1) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	9.16×10^7	0.00	4.87×10^6	4.49

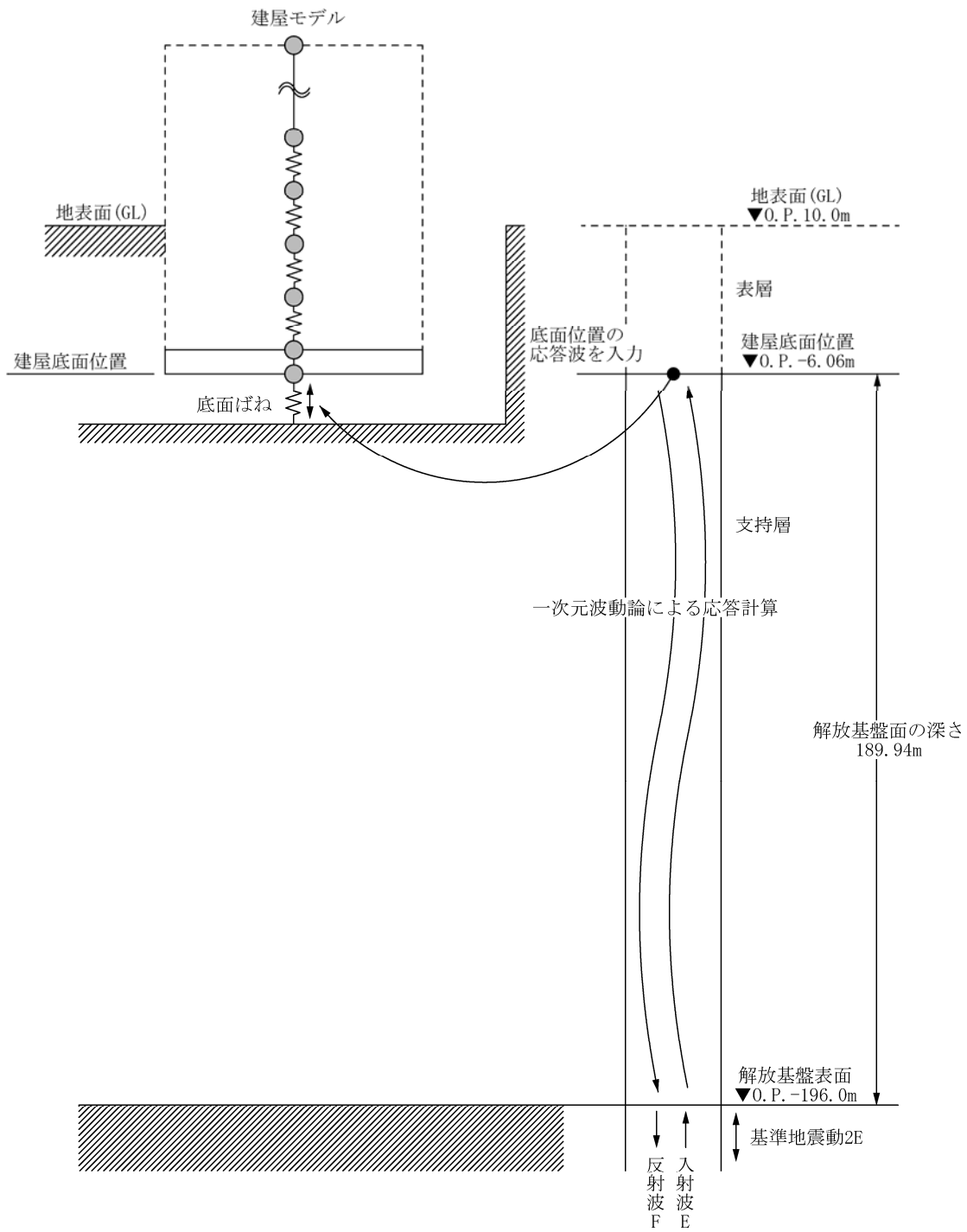
(*1) f₁は連成系の1次固有振動数

第6.2.1-6表(3) 地震応答解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰係数

(Ss-3V)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc (kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc (kN・s/m)	採用振動数 ^(*1) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.83×10^7	0.00	4.77×10^6	4.41

(*1) f₁は連成系の1次固有振動数



第 6. 2. 1-7 図 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図
(鉛直方向)

(3) 地震応答解析結果

地震応答解析モデルの固有値（固有周期，固有振動数）および刺激係数を第6.2.1-7表および第6.2.1-8表に示す。

基準地震動 S_s （水平）による最大応答値を，それぞれ第6.2.1-8図～第6.2.1-13図に示す。

基準地震動 S_s （鉛直）による最大応答値を，それぞれ第6.2.1-14図および第6.2.1-15図に示す。

第 6.2.1-7 表(1) 固有値(固有周期, 固有振動数)および刺激係数
(水平方向)

(NS 方向, S_s-1H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.396	2.53	1.755	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	
3	0.078	12.85	0.219	
4	0.060	16.59	-0.016	
5	0.051	19.73	-0.059	

(NS 方向, S_s-2H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.390	2.56	1.759	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.73	-0.932	
3	0.078	12.88	0.228	
4	0.060	16.63	-0.016	
5	0.051	19.74	-0.061	

(NS 方向, S_s-3H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.396	2.53	1.755	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	
3	0.078	12.85	0.219	
4	0.060	16.59	-0.016	
5	0.051	19.73	-0.059	

第 6.2.1-7 表(2) 固有値(固有周期, 固有振動数)および刺激係数
(水平方向)

(EW 方向, S_s-1H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.377	2.65	1.774	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.72	-0.980	
3	0.089	11.26	0.225	
4	0.065	15.41	0.032	
5	0.050	19.87	-0.063	

(EW 方向, S_s-2H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.372	2.69	1.780	地盤建屋連成一次
2	0.172	5.80	-0.995	
3	0.089	11.29	0.236	
4	0.065	15.44	0.032	
5	0.050	19.87	-0.065	

(EW 方向, S_s-3H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.377	2.65	1.774	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.72	-0.980	
3	0.089	11.26	0.225	
4	0.065	15.41	0.032	
5	0.050	19.87	-0.063	

第 6. 2. 1-8 表 固有値(固有周期, 固有振動数)および刺激係数
(鉛直方向)

(S_S-1V)

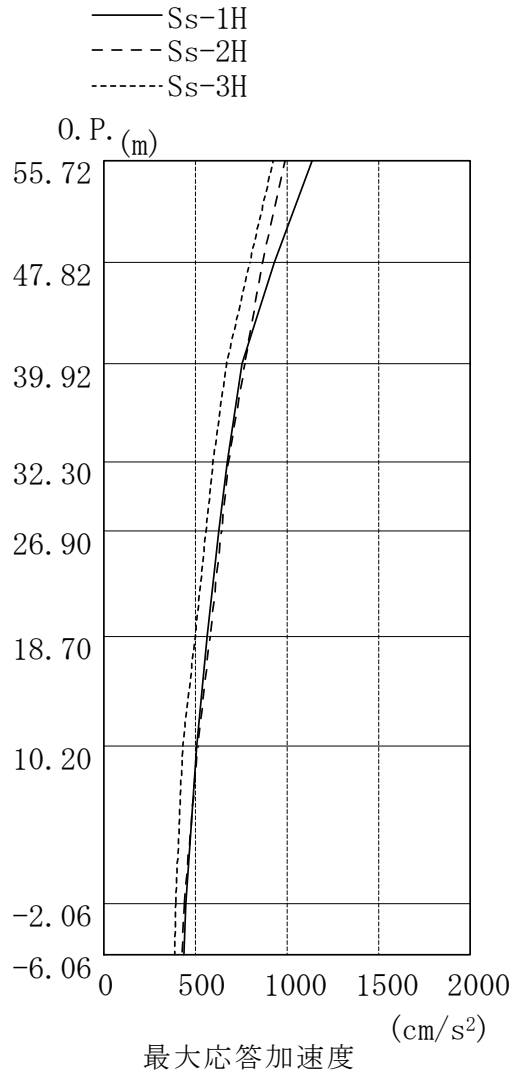
次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.292	3.43	3.474	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	
4	0.045	22.39	-0.266	
5	0.039	25.65	0.215	

(S_S-2V)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.292	3.43	3.308	屋根トラス一次
2	0.223	4.49	-2.410	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.113	
4	0.045	22.40	-0.277	
5	0.039	25.65	0.224	

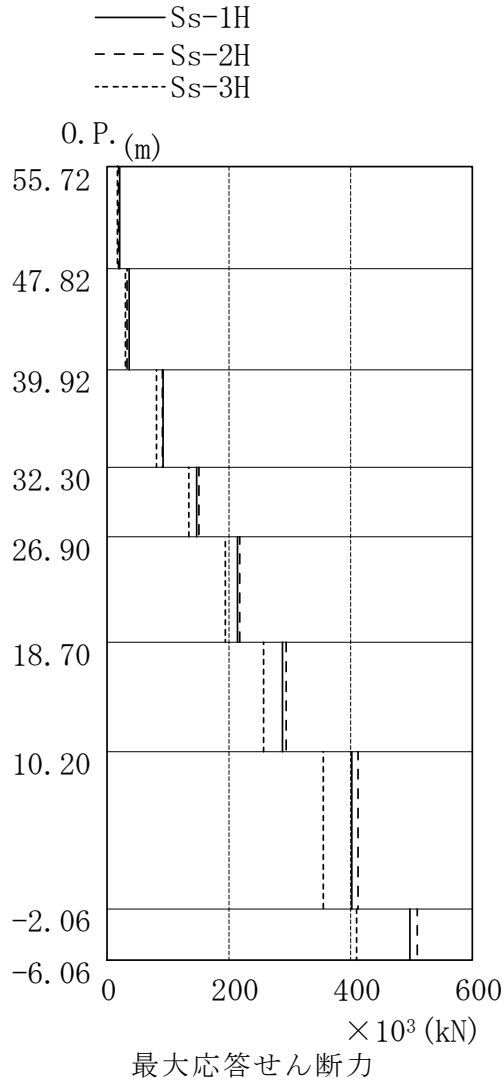
(S_S-3V)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.292	3.43	3.474	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	
4	0.045	22.39	-0.266	
5	0.039	25.65	0.215	



(cm/s ²)		
Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H
1136	990	925
933	866	798
754	770	670
675	681	597
629	643	558
564	580	499
509	514	431
449	440	393
437	427	387

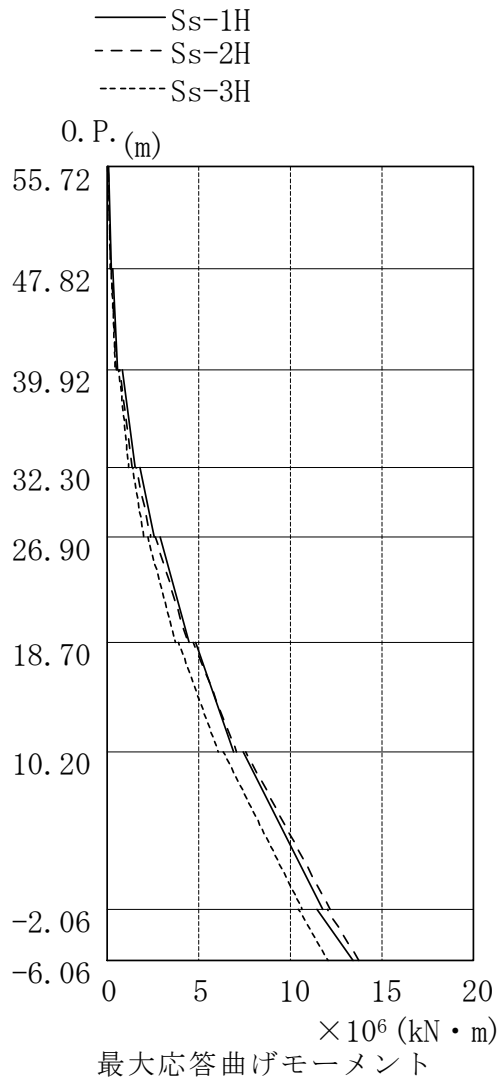
第 6. 2. 1-8 図 最大応答加速度 (NS 方向)



$\times 10^3$ (kN)

Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H
21.63	19.22	17.51
36.22	33.05	30.04
91.94	91.35	81.06
147.51	151.61	134.14
214.24	218.40	194.48
288.10	294.73	257.71
401.96	412.71	355.48
497.11	509.66	410.55

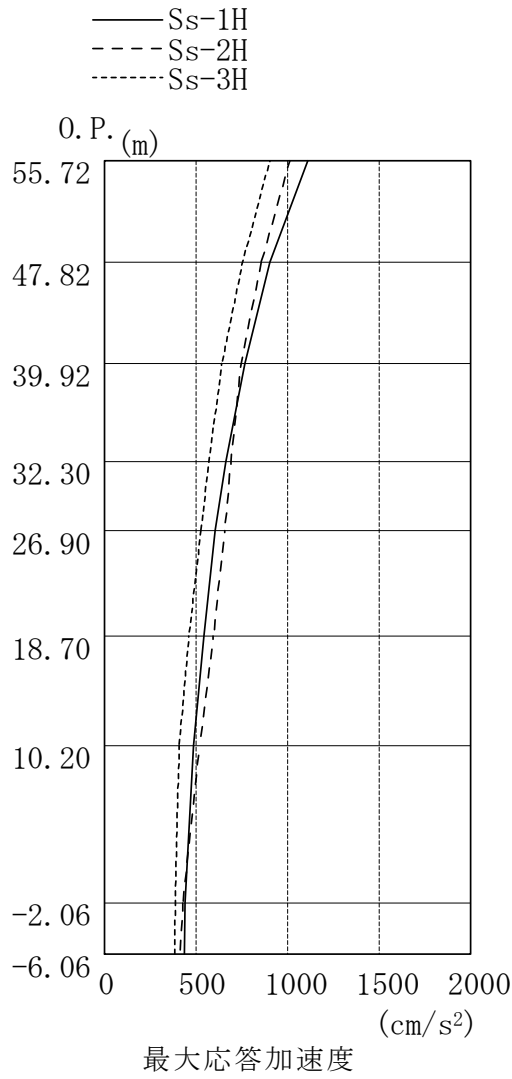
第 6.2.1-9 図 最大応答せん断力 (NS 方向)



$\times 10^6$ (kN·m)

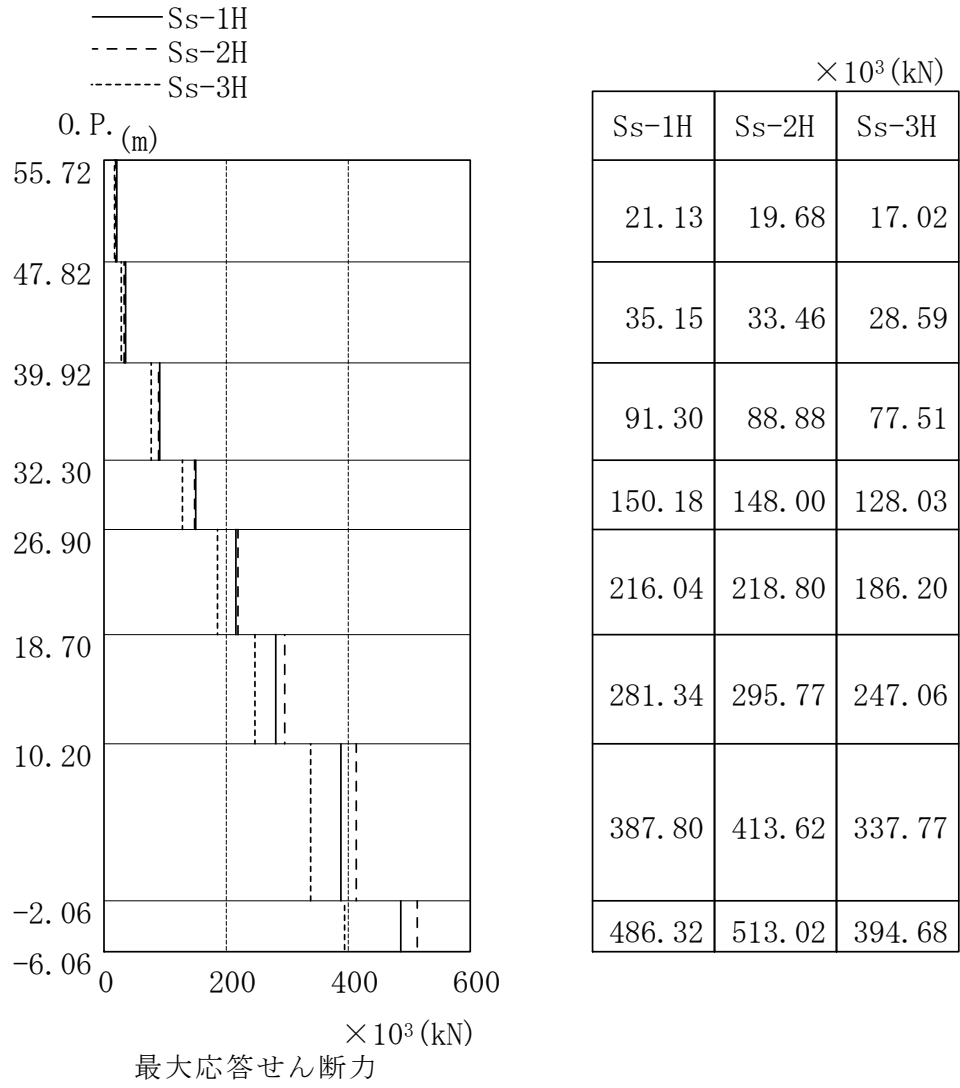
	Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H
	0.08	0.06	0.05
	0.25	0.20	0.19
	0.31	0.25	0.23
	0.59	0.51	0.46
	0.86	0.70	0.65
	1.53	1.38	1.19
	1.82	1.59	1.40
	2.57	2.39	2.01
	2.90	2.65	2.23
	4.49	4.41	3.74
	4.85	4.71	3.90
	6.92	7.09	6.08
	7.46	7.57	6.35
	11.76	12.18	10.65
	11.48	12.02	10.44
	13.43	13.75	12.07

第 6.2.1-10 図 最大応答曲げモーメント (NS 方向)

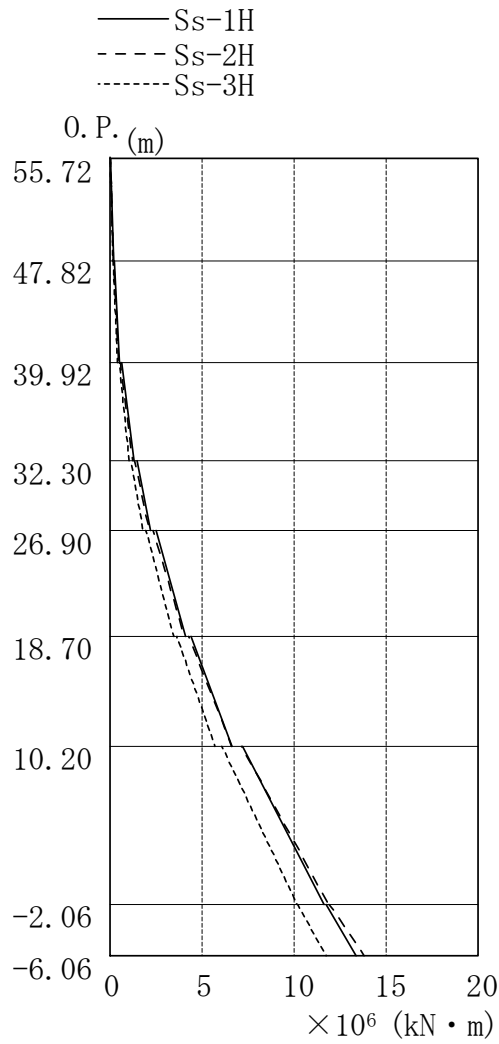


(cm/s ²)		
Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H
1112	1013	904
903	858	756
767	747	643
664	692	572
604	658	527
546	596	463
489	520	409
441	429	387
437	414	384

第 6.2.1-11 図 最大応答加速度 (EW 方向)



第 6.2.1-12 図 最大応答せん断力 (EW 方向)

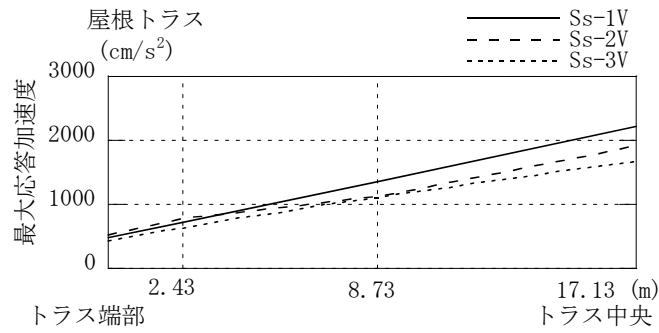


× 10⁶ (kN · m)

Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H
0.04	0.03	0.03
0.21	0.19	0.16
0.24	0.21	0.18
0.52	0.47	0.41
0.65	0.57	0.51
1.32	1.25	1.05
1.46	1.35	1.15
2.22	2.13	1.81
2.51	2.35	1.96
4.13	4.05	3.47
4.42	4.28	3.63
6.64	6.62	5.71
7.21	7.13	6.08
11.65	11.88	10.17
11.74	11.93	10.19
13.37	13.82	11.74

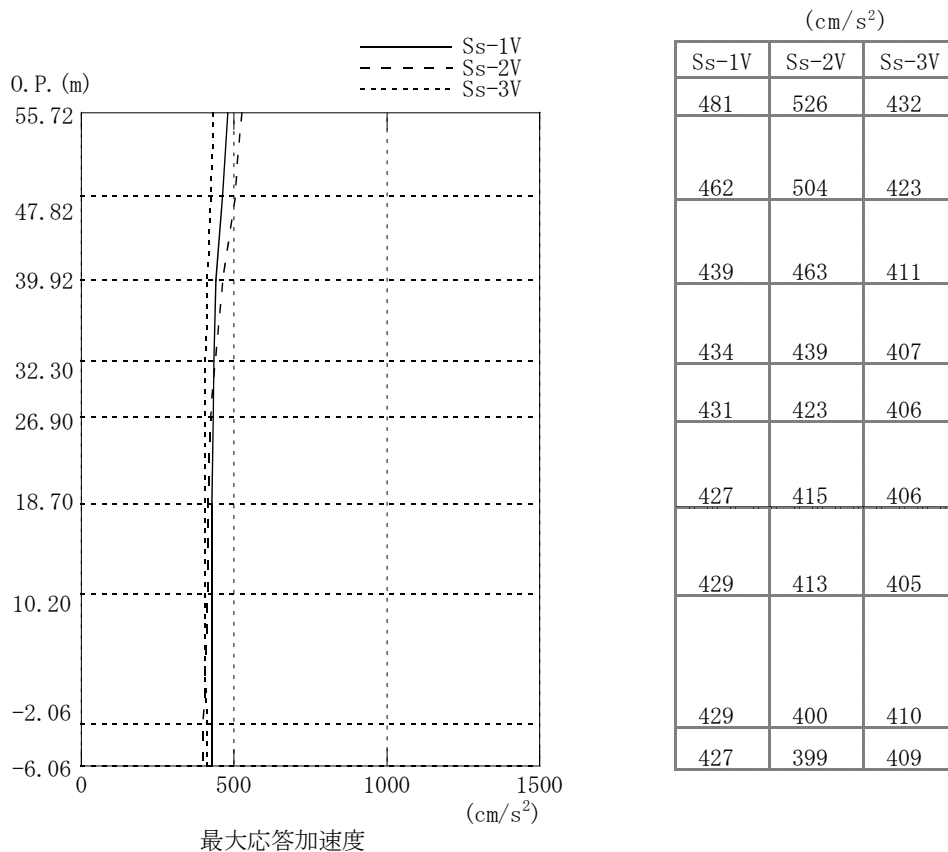
最大応答曲げモーメント

第 6.2.1-13 図 最大応答曲げモーメント (EW 方向)

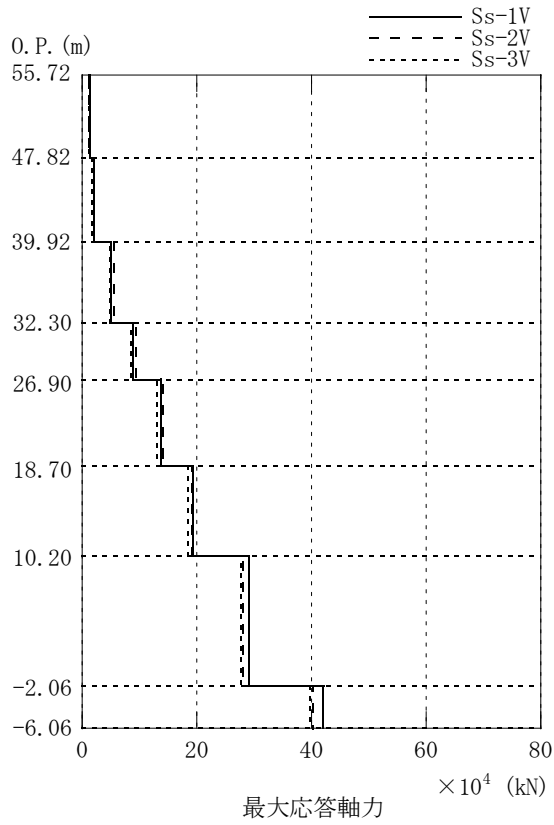


屋根トラス (cm/s^2)

Ss-1V	481	723	1353	2224
Ss-2V	526	783	1123	1920
Ss-3V	432	627	1106	1671



第 6.2.1-14 図 最大応答加速度 (鉛直方向)



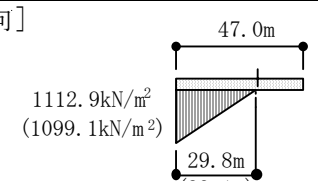
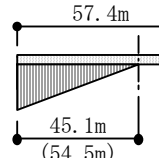
$\times 10^4$ (kN)		
Ss-1V	Ss-2V	Ss-3V
1.40	1.13	1.12
2.00	1.94	1.79
5.09	5.52	4.95
8.85	9.45	8.61
13.68	14.08	13.09
19.35	19.21	18.46
29.16	28.06	27.76
42.15	40.23	39.75

第 6.2.1-15 図 最大応答軸力 (鉛直方向)

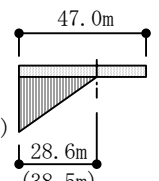
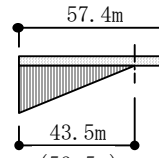
基準地震動 S_s による地震応答解析結果^{※1}に基づく接地圧を第6.2.1-9表に示す。地盤の短期許容支持力度は、 $3,922.6\text{kN/m}^2$ (400tf/m^2) であり、地震時接地圧に対して十分な余裕がある。

※1 水平地震動による応力と組み合わせる場合の鉛直地震動による応力（鉛直力）は、組み合わせ係数法により、係数0.4を考慮する。

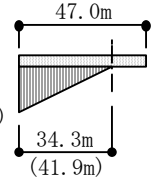
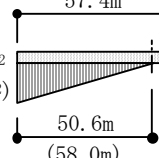
第6.2.1-9表 基準地震動Ssによる地震応答解析結果に基づく接地圧

		Ss-1H		反力分布図 ()内は下向き地震時
		NS	EW	
鉛直力 N (kN)	上向き	950,252		[NS方向] 
	下向き	1,234,148		
転倒モーメント M (×10 ⁵ kN・m)		129.07	130.02	[EW方向] 
最大接地圧※ (kN/m ²)	上向き	1112.9	897.5	
	下向き	1099.1	963.7	

※：支持地盤の短期許容支持力度 3,922.6kN/m²

		Ss-2H		反力分布図 ()内は下向き地震時
		NS	EW	
鉛直力 N (kN)	上向き	946,452		[NS方向] 
	下向き	1,237,948		
転倒モーメント M (×10 ⁵ kN・m)		132.21	134.32	[EW方向] 
最大接地圧※ (kN/m ²)	上向き	1153.3	925.3	
	下向き	1121.5	983.7	

※：支持地盤の短期許容支持力度 3,922.6kN/m²

		Ss-3H		反力分布図 ()内は下向き地震時
		NS	EW	
鉛直力 N (kN)	上向き	964,060		[NS方向] 
	下向き	1,220,340		
転倒モーメント M (×10 ⁵ kN・m)		116.44	114.17	[EW方向] 
最大接地圧※ (kN/m ²)	上向き	980.3	811.2	
	下向き	1015.4	894.7	

※：支持地盤の短期許容支持力度 3,922.6kN/m²

6.2.2 評価基準

耐震安全性の評価に当たっては、建物が構造物全体として変形能力（終局耐力時の変形）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観点から、原子炉施設の主たる耐震要素である耐震壁の安全性について評価する。

評価は、基準地震動 S_s による各層の鉄筋コンクリート耐震壁の最大せん断ひずみが、評価基準値（ 2.0×10^{-3} ）を超えないことを確認する。

6.2.3 耐震安全性評価結果

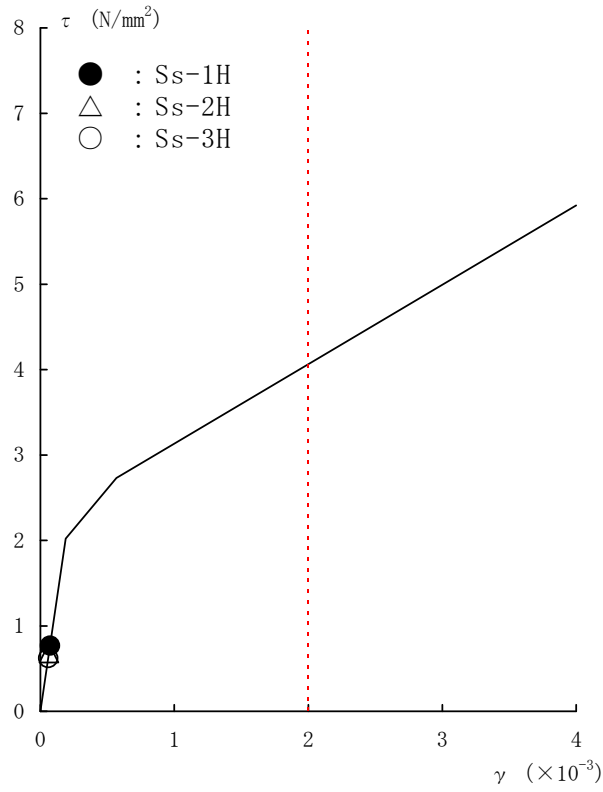
第6.2.3-1表および第6.2.3-2表に耐震壁のせん断ひずみ一覧を示す。また、第6.2.3-1図～第6.2.3-14図に基準地震動 S_s に対する最大応答値を耐震壁のせん断スケルトン曲線上に示す。せん断ひずみは、最大で 0.13×10^{-3} (S_s -2H, NS方向, 1F) であり、評価基準値 (2.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。なお、スケルトン曲線は、建屋の方向別に、層を単位とした水平断面形状より「JEAG 4601 - 1991」に基づいて設定したものである。

第6.2.3-1表 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS方向)

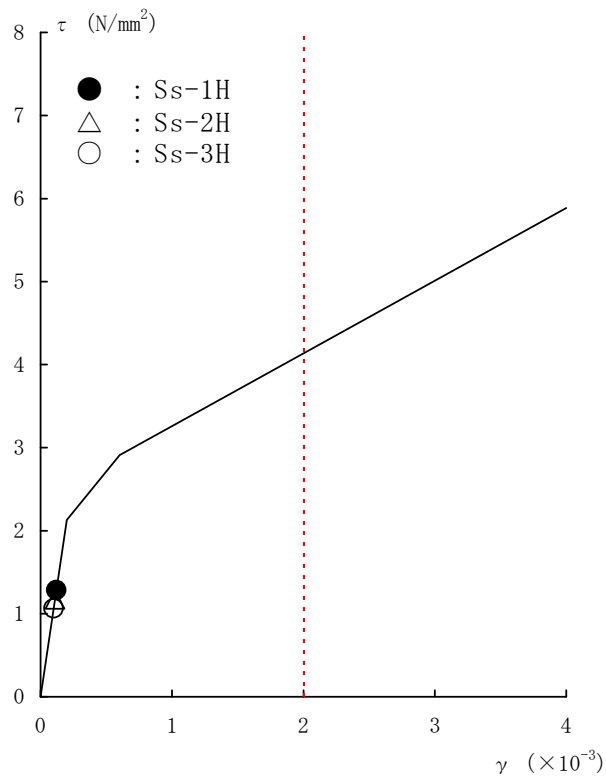
階	$(\times 10^{-3})$			評価基準値
	S_s -1H	S_s -2H	S_s -3H	
CRF	0.07	0.06	0.06	2.0以下
5F	0.12	0.11	0.10	
4F	0.04	0.04	0.04	
3F	0.06	0.07	0.06	
2F	0.08	0.09	0.08	
1F	0.13	0.13	0.12	
B1F	0.08	0.08	0.07	

第6.2.3-2表 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW方向)

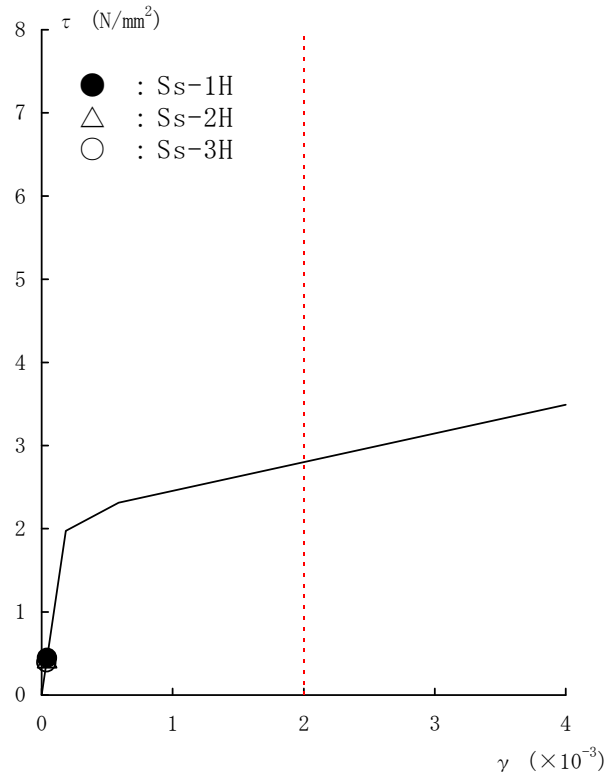
階	$(\times 10^{-3})$			評価基準値
	S_s -1H	S_s -2H	S_s -3H	
CRF	0.09	0.09	0.08	2.0以下
5F	0.12	0.11	0.09	
4F	0.08	0.08	0.07	
3F	0.09	0.09	0.08	
2F	0.10	0.10	0.09	
1F	0.12	0.12	0.10	
B1F	0.08	0.09	0.07	



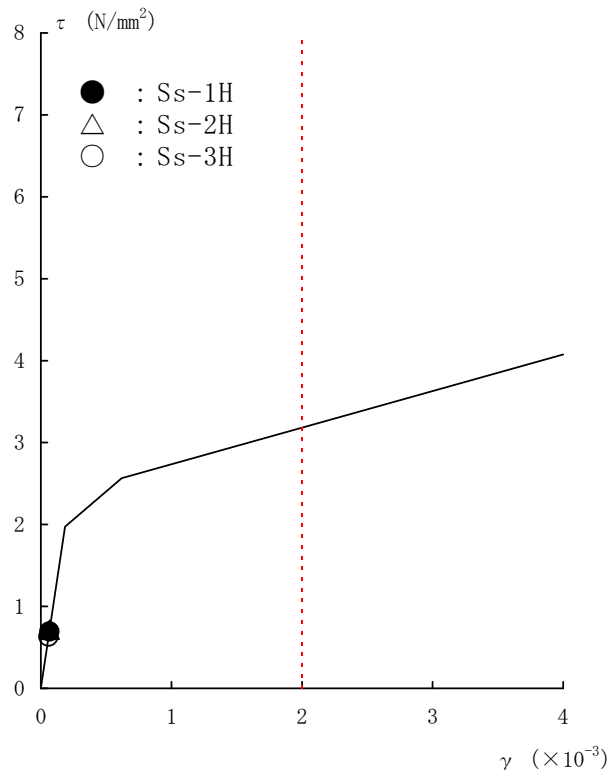
第 6.2.3-1 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, CRF)



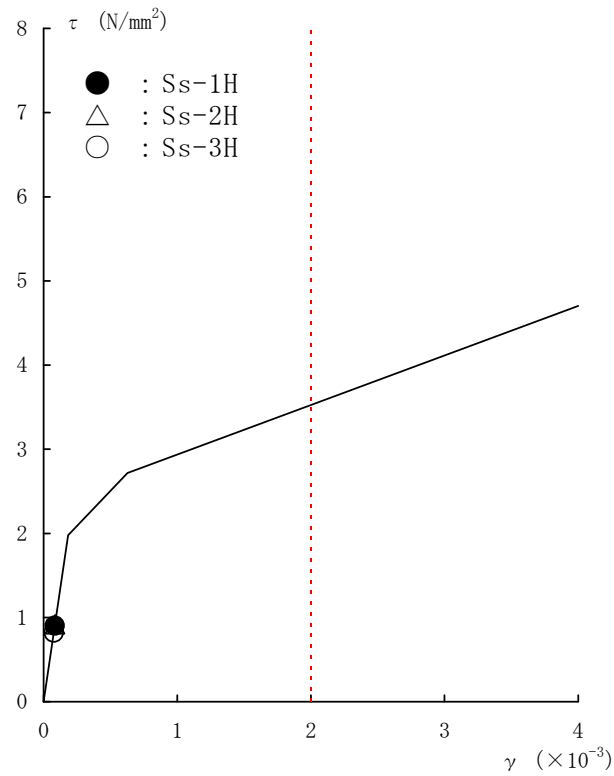
第 6.2.3-2 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 5F)



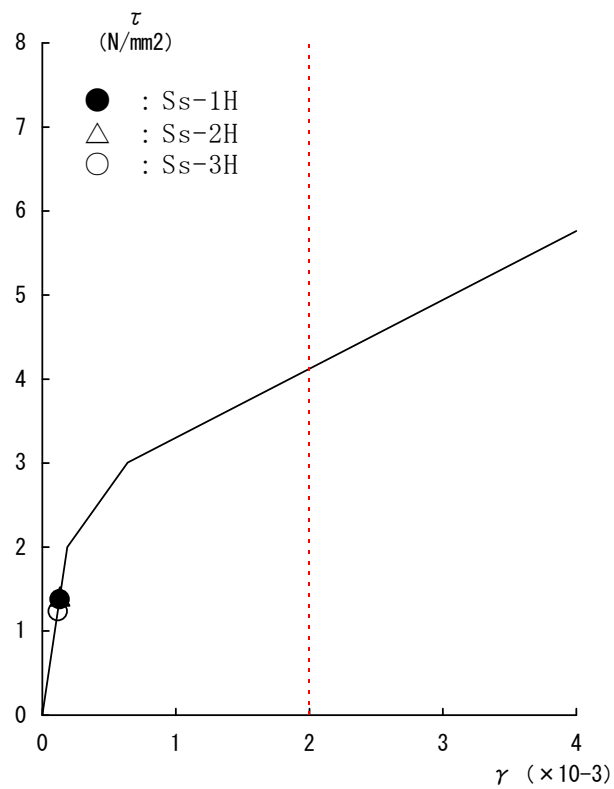
第 6.2.3-3 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 4F)



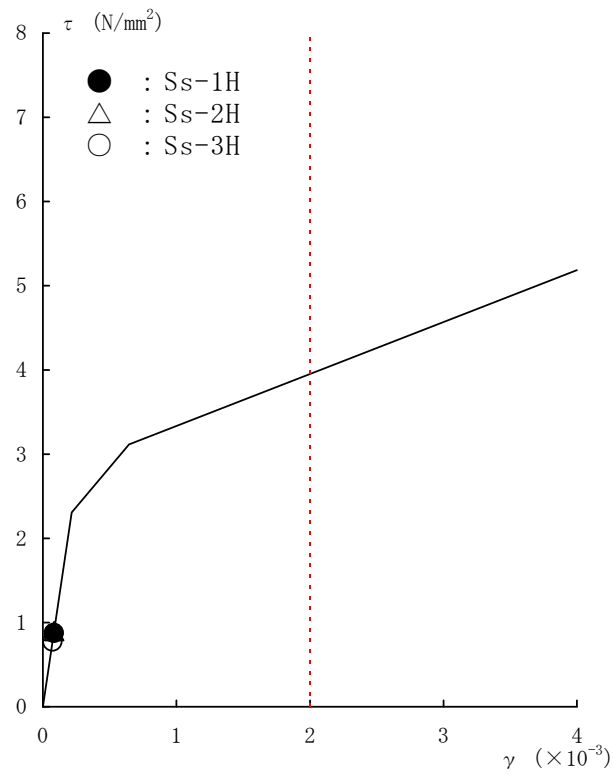
第 6.2.3-4 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 3F)



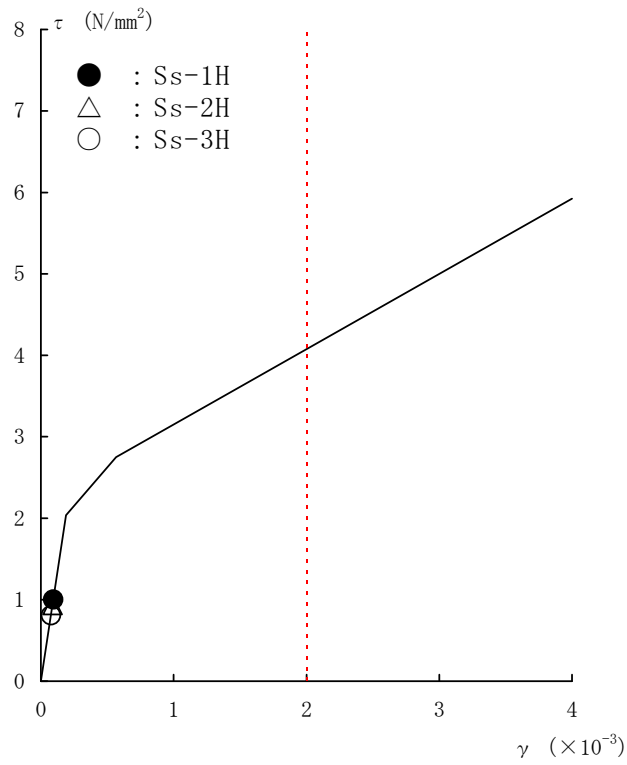
第 6.2.3-5 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 2F)



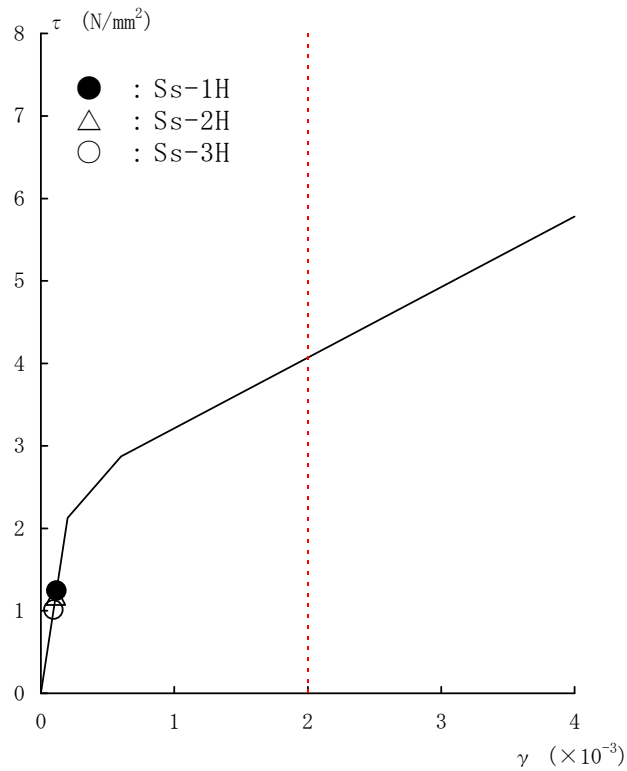
第 6.2.3-6 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 1F)



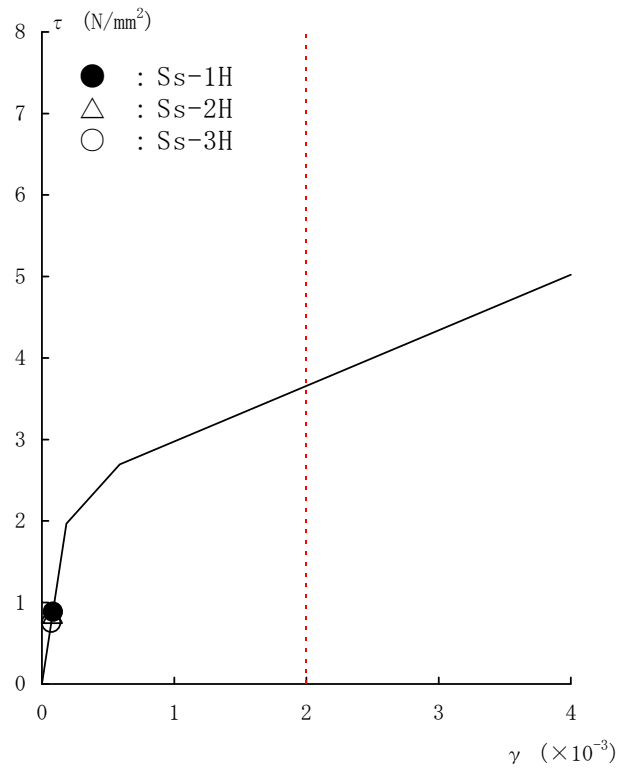
第 6.2.3-7 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, B1F)



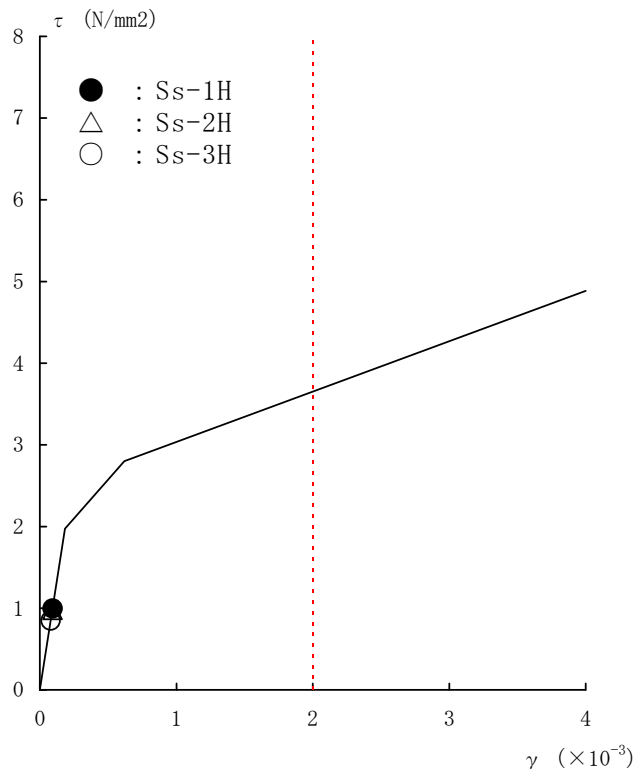
第 6.2.3-8 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, CRF)



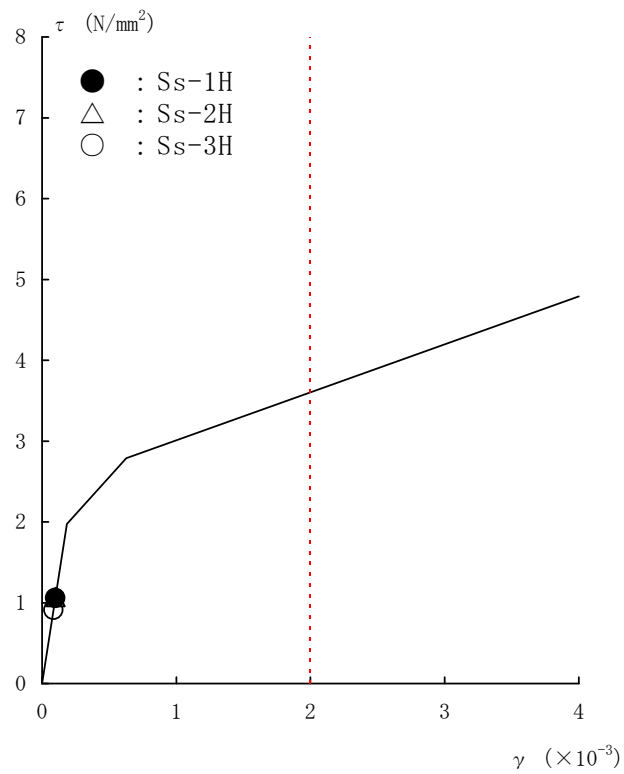
第 6.2.3-9 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 5F)



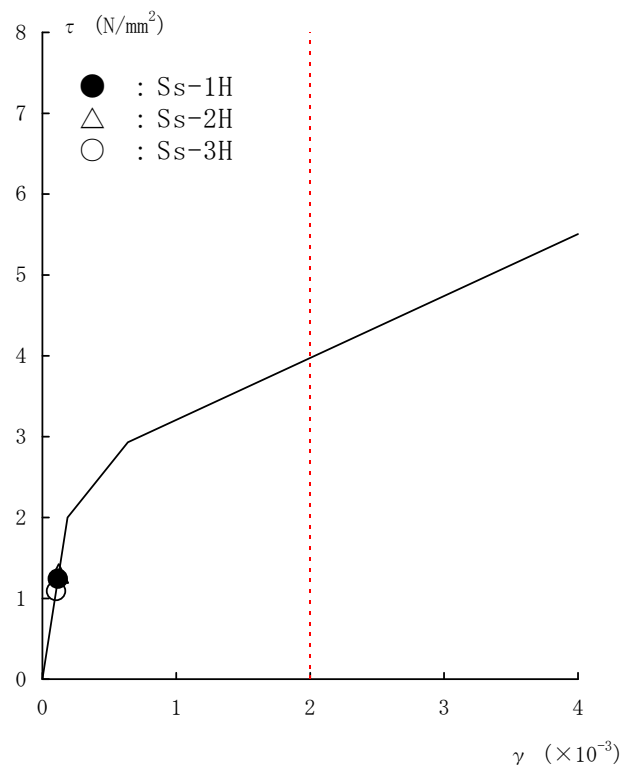
第 6.2.3-10 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 4F)



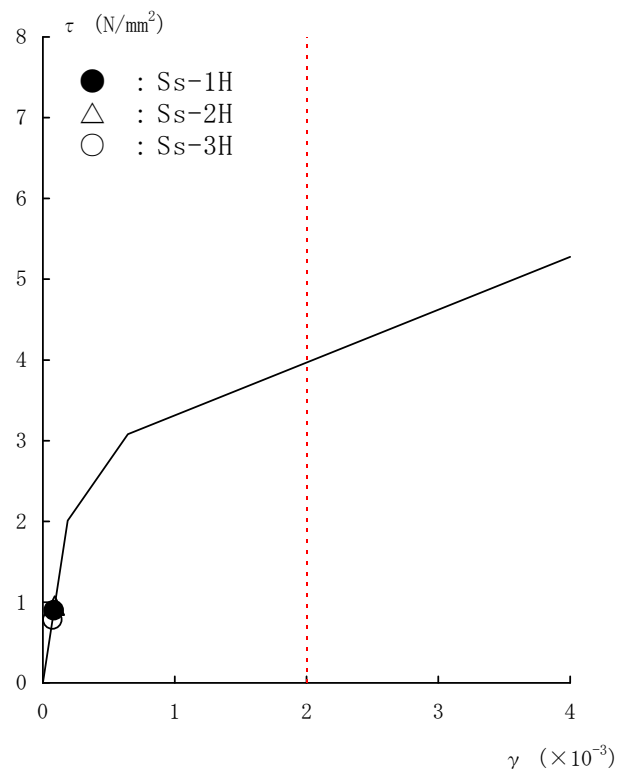
第 6.2.3-11 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 3F)



第 6.2.3-12 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 2F)



第 6.2.3-13 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 1F)



第 6.2.3-14 図 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, B1F)

7. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

【目 次】

7.	安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価	
7.1	評価方針	7-1
7.2	評価方法	7-1
7.2.1	構造強度の評価方法	7-1
7.2.2	動的機能維持の評価方法	7-2
7.3	地震応答解析	7-3
7.3.1	地震応答解析モデル	7-3
7.3.2	大型機器の地震応答解析	7-3
7.3.3	床応答スペクトル	7-3
7.3.4	減衰定数	7-4
7.4	荷重の組合せ	7-5
7.5	評価基準	7-5
7.5.1	構造強度の評価基準	7-5
7.5.2	動的機能維持の評価基準	7-5
7.6	評価結果	7-5
7.6.1	構造強度の評価結果	7-5
7.6.2	動的機能維持の評価結果	7-5

7. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

7.1 評価方針

第3章で記載した安全上重要な機器・配管系の主要設備について、基準地震動 S_s に対する安全機能の保持の観点から構造強度評価を実施するとともに、制御棒（挿入性）については、動的機能維持評価を実施する。

地震時の安全性評価は、基準地震動 S_s を用いた動的解析によることを基本とし、機器・配管系の応答性状を適切に表現できるモデルを設定した上で応答解析を行い、その結果求められた応答値をもとに評価する。

基準地震動 S_s による応答解析によって求められる水平方向および鉛直方向の応答結果の組み合わせ方法については、二乗和平方根 (SRSS) 法等を用いる。

構造強度評価に際しては、当該施設の耐震安全性を確認する観点から重要な評価部位を既往評価の評価範囲を参考に選定する。その中で、同一仕様・同一設計の複数の設備が存在する場合は、代表設備について評価する。また、配管系のように類似設備が多数存在する場合は、既往評価、仕様、使用条件等を考慮して代表設備を適切に選定する。

7.2 評価方法

7.2.1 構造強度の評価方法

構造強度に関する評価は、応答倍率法による評価、または詳細評価により実施する。構造強度の評価手順を第7.2.1図に示す。

(1) 応答倍率法による評価

大型機器である原子炉格納容器，原子炉圧力容器および炉内構造物については，基準地震動 S_s による地震力（加速度，せん断力，モーメント，軸力）と設計時における地震力との比を求め，設計時の応力を乗じることにより発生値を算定し，評価基準値と比較する。

大型機器以外の機器については，基準地震動 S_s による床の最大応答加速度と設計時における床の最大応答加速度の比，または，それぞれの床応答スペクトルとの比を求め，設計時の応力に乗じることにより発生値を算定し，評価基準値と比較する。

(2) 詳細評価

配管系は，スペクトルモーダル解析法等による詳細評価を行い，発生値を算定し，評価基準値と比較する。

応答倍率法による評価の結果，詳細評価が必要と判断された設備もしくは比較的容易に詳細評価が実施できる設備は，応答倍率法は実施せず，以下に示す解析法を用いて発生値を算定し，評価基準値と比較する。

- a. スペクトルモーダル解析法
- b. 時刻歴応答解析法
- c. 定式化された評価式を用いた解析法（床置き機器等）

7.2.2 動的機能維持の評価方法

制御棒の挿入性については，基準地震動 S_s による燃料集合体の相対変位を求め，その相対変位が，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。

制御棒挿入性の評価手順を第 7.2.2 図に示す。

7.3 地震応答解析

7.3.1 地震応答解析モデル

機器・配管系の動的解析のモデルは、その振動特性に応じて、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算定できるものとする。また、解析モデルは、既往評価で用いたもののほか、有限要素法等実績がある手法によるモデルを使用する。

モデル化に使用する物性値等については、既往評価で用いられたもののほか、施設運用上の管理値や実測値などを考慮して設定する。

7.3.2 大型機器の地震応答解析

原子炉建屋内の大型機器（原子炉格納容器，原子炉圧力容器および炉内構造物等）は、大規模構造物で、建屋から各点で支持されているため、建屋からの各入力をより厳密に評価することを目的とし、地盤・建屋と大型機器を連成した解析モデルにより基準地震動 S_s による地震応答解析を時刻歴応答解析で実施する。解析は、水平方向（N S および E W 方向）および鉛直方向について実施する。

7.3.3 床応答スペクトル

床応答スペクトルは、建物・構築物の地震応答解析、または

地盤・建屋と大型機器を連成した解析モデルによる地震応答解析で得られた床応答時刻歴を用いて水平方向および鉛直方向について算定する。

評価にあたっては、地盤や建屋の物性等のばらつきが床応答に与える影響を考慮し、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」等を参考に周期軸方向に±10%拡幅する。

7.3.4 減衰定数

機器・配管系の地震応答解析に用いる減衰定数を第 7.3.4 表に示す。

水平方向の減衰定数は、原則として「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に規定された値とするが、試験等で妥当性が確認された値も用いる（添付資料 7-1 参照）。

鉛直方向の減衰定数には、基本的に水平方向と同様とする。

第 7.3.4 表 機器・配管系の減衰定数

対象施設	減衰定数 (%)	
	水平方向	鉛直方向
溶接構造物	1.0	1.0
ポンプ・ファン等の 機械装置	1.0	1.0
燃料集合体	7.0	1.0
配管系	0.5～3.0	0.5～3.0

7.4 荷重の組み合わせ

通常運転時に生じる荷重および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て評価する。

7.5 評価基準

7.5.1 構造強度の評価基準

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG-補・1984, JEAG4601-1987, JEAG4601-1991 追補版」, および「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005」に準拠するとともに, 他の規格基準で規定されている値および実験等で妥当性が確認されている値等を用いる。

7.5.2 動的機能維持の評価基準

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に準拠するとともに, 試験等で妥当性が確認された値を用いる。

7.6 評価結果

7.6.1 構造強度の評価結果

福島第一原子力発電所 3号機における評価対象設備に対する構造強度の評価結果を第 7.6.1 表に示す。

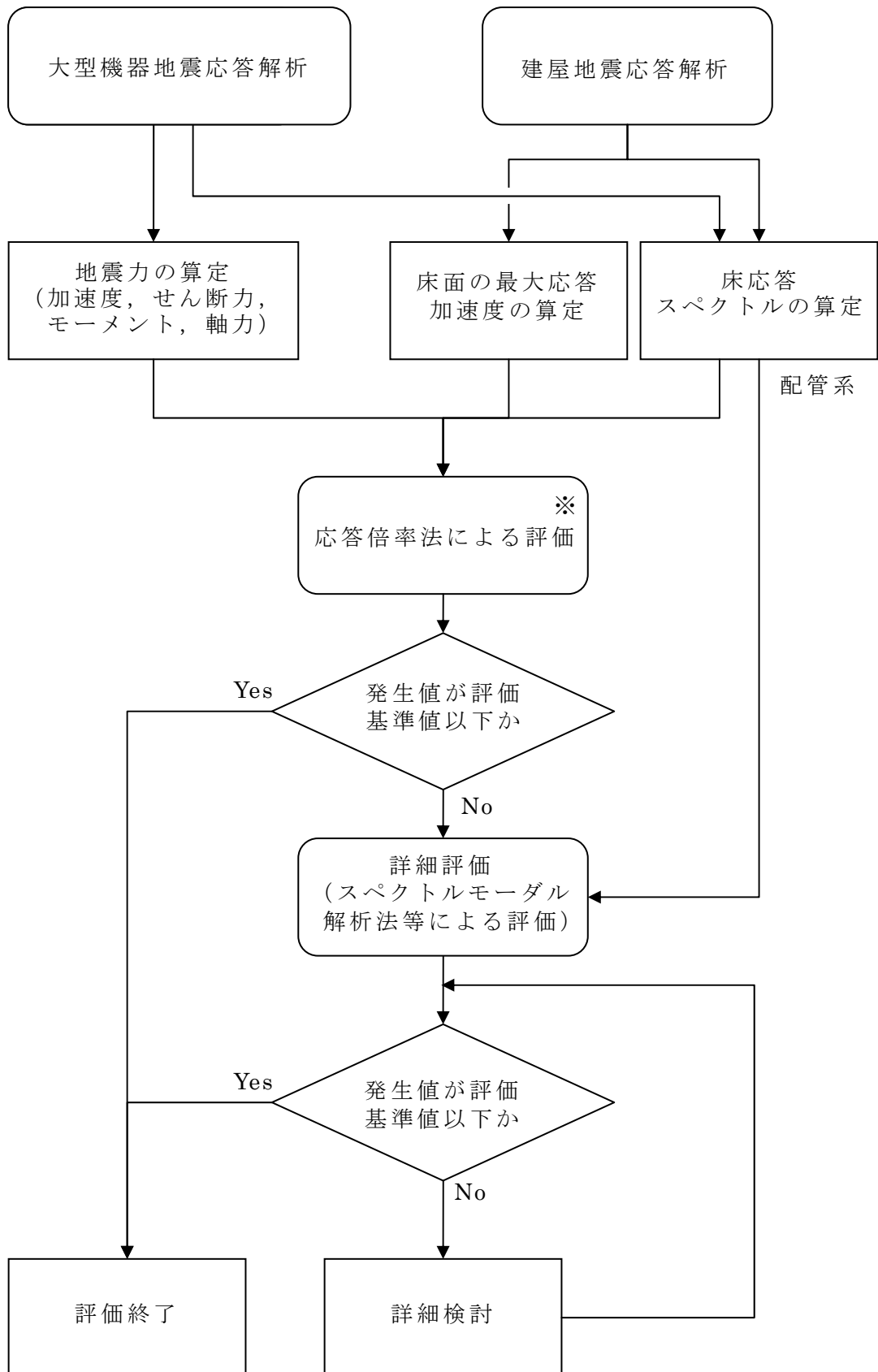
評価対象設備の地震による発生値は, いずれも評価基準値以下であることを確認した。

7.6.2 動的機能維持の評価結果

福島第一原子力発電所 3号機における制御棒に対する動的機

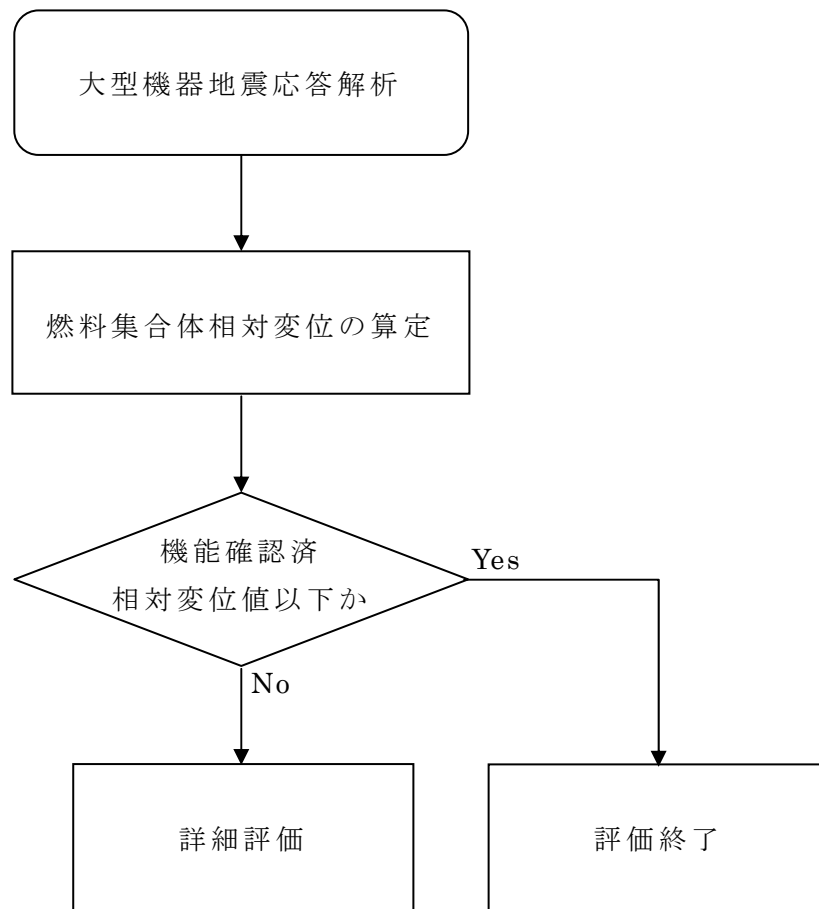
能維持の評価結果を第 7.6.2 表に示す。

制御棒の地震時挿入性については，地震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。



※応答倍率法による評価によらず，詳細評価する場合がある。

第 7.2.1 図 構造強度の評価手順



第 7.2.2 図 動的機能維持（制御棒挿入性）の評価手順

第 7.6.1 表 構造強度評価結果（福島第一 3 号機）

評価対象設備	評価部位	応力 分類	応答値 (MPa)	基準値 (MPa)	評価 手法 ※1
原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張	36	222	②
原子炉格納容器	ドライウエル	膜	199	255	①
炉心支持構造物	シュラウド サポート	軸圧縮	33	208	①
残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	引張	42	185	②
残留熱除去系配管	配管本体	一次	268	363	②
主蒸気系配管	配管本体	一次	183	417	②

※ 1 ①：応答倍率法による評価 ②：詳細評価

第 7.6.2 表 動的機能維持評価結果（福島第一 3 号機）

評価対象設備	地震時の相対変位 (mm)	基準値 (mm)
制御棒（挿入性）	14.8	40.0

配管系の減衰定数について

配管系の設計用減衰定数は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に規定されているが、新たに実施した振動試験等をもとに、保温材の付加減衰定数及びUボルトを用いた支持具を有する配管系の減衰定数を定め、配管系の耐震安全性評価に用いる。(表-1)

保温材とUボルト支持配管系の減衰定数に関する検討結果を以下に示す。

(1) 保温材の付加減衰定数

現行の保温材による設計用付加減衰定数(0.5%)を設定するために用いられたデータと、その後実施された無機多孔質保温材を対象とした試験データを再整理した結果、配管強度上問題とならない小変位領域を除き、付加減衰比が1.0%以上確保されていることから、保温材の付加減衰定数として1.0%を使用する。

金属保温材については、原子力工学試験センターの耐震信頼性実証試験において、無機多孔質保温材と金属保温材が混在する配管系の振動試験が行われており、その試験結果を調査したところ、金属保温施工範囲が配管全長の40%以下の場合には付加減衰定数を1.0%として問題ないことを確認したことから、これを使用する。なお、金属保温材施工範囲が配管全長の40%を超える配管系

については，従来の付加減衰定数 0.5% を使用する。

(2) Uボルトを用いた支持具を有する配管系の減衰定数

現行のスナッパ及び架構レストレイント支持主体の配管系の減衰定数は，消散エネルギー評価式を用いた減衰推算法により設定されているが，Uボルト支持配管系についてはこのような検討がされていない。そこで，Uボルト支持配管系の消散エネルギー評価法を用いた減衰推算法を策定し，実規模配管系による振動試験により，その妥当性を確認した。

この減衰推算法により，実機のUボルト支持配管系の解析評価を行った結果，配管の自重を受けるUボルト支持具が4個以上の配管系に対する減衰定数が2.0%であったことから，これを使用する。

表－1 耐震安全性評価に使用する配管系の減衰定数

配管区分		減衰定数（％）※1	
		保温材有	保温材無
I	スナッパ及び架構レストレイント支持主体の配管系で，その支持具（スナッパ又は架構レストレイント）の数が4個以上のもの	<u>3.0</u>	2.0
II	スナッパ，架構レストレイント，ロッドレストレイント，ハンガ等を有する配管系で，アンカ及びUボルトを除いた支持具の数が4個以上であり，配管区分Iに属さないもの	<u>2.0</u>	1.0
III	Uボルトを有する配管系で，架構で水平配管の自重を受けるUボルトの数が4個以上のもの	<u>3.0</u>	<u>2.0</u>
IV	配管区分I，II及びIIIに属さないもの	<u>1.5</u>	0.5

※1 「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」から変更した箇所を下線で示す。

【参考文献】

（社）日本電気協会（2006）：配管系設計用減衰定数適正化に関する検討，第9回機器・配管系検討会資料 No.9-3-2-2(5)，平成18年5月12日

8. 地震対策の取り組み

【目 次】

8. 地震対策の取り組み	
8.1 防災機能の強化	8-1
8.1.1 防災組織・体制の強化	8-1
8.1.2 防災設備の強化	8-2
8.2 耐震裕度向上の取り組み	8-3

8. 地震対策の取り組み

8.1 防災機能の強化

8.1.1 防災組織・体制の強化

平成19年7月の柏崎刈羽原子力発電所の地震災害から得られた様々な教訓をもとに、防災組織・体制の強化に取り組んでいる。

複合した災害への迅速・適切な対応のため、防災並びに安全の一元管理を目的とした防災安全部の設置や火災に対する迅速な初期対応のために自衛消防隊の24時間体制化を実施している。また、実効的な防災体制となるよう、原子力災害発生を想定した訓練、自衛消防隊や所員の消火訓練等、様々な訓練を継続して実施している。



第 8.1.1-1 図 原子力総合防災訓練



第 8.1.1-2 図 自衛消防隊による訓練

8.1.2 防災設備の強化

災害時の迅速・確実な初期対応を確保するため、震度7クラスの地震にも耐えられる免震化構造の緊急時対策室の設置工事を実施している。本年6月には竣工を予定している。

また、火災発生時の対応強化として、化学消防車や水槽付消防車を配備している他、消火配管の地上化、防火水槽の設置により消火水源の確保を図っている。



第 8.1.2-1 図 緊急時対策室の設置



第 8.1.2-2 図 化学消防車（右）水槽付消防車（中央）の配備



第 8.1.2-3 図 消火配管の地上化



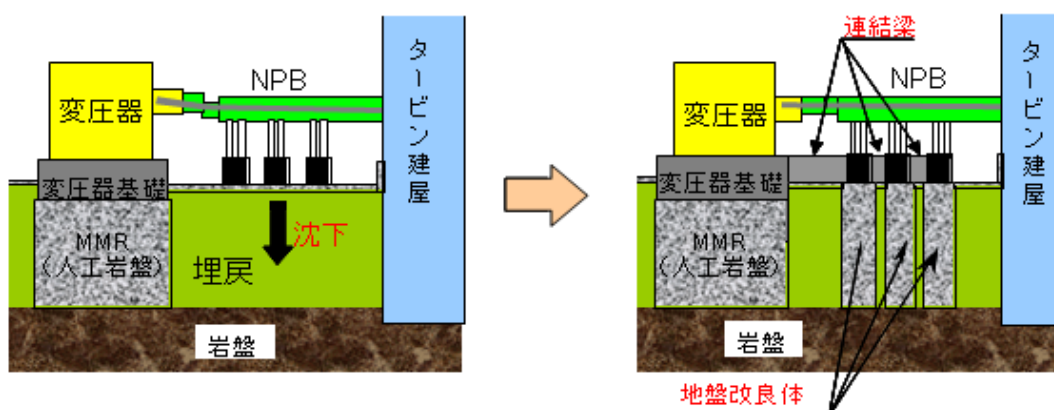
第 8.1.2-4 図 防火水槽の設置

8.2 耐震裕度向上の取り組み

柏崎刈羽原子力発電所の機器・構築物の損傷事例も踏まえ、先行的に耐震裕度向上に向けた対策を展開している。

対策としては、平成18年から電路や非常用空調設備のサポートの追加、空調機架台の補強等を実施しており、その後の新潟県中越沖地震での柏崎刈羽原子力発電所の損傷事例を反映して、変圧器基礎の対策も実施している。

変圧器周辺の基礎については、沈下対策として地盤改良体にて基礎地盤の強化を図るとともに、変圧器の防油堤内に遮水シートを敷設し防油堤からの漏油の防止を図ることを計画しており、対策については、順次着手している。



第 8.2-1 図 変圧器基礎地盤の沈下対策



第 8.2-2 図 防油堤の油漏えい対策
(遮水シートの敷設)

また、地盤対策として、緊急車両通行のため、1～4号機防護本部前の構内道路の補強や5・6号機西側道路斜面の盛土の切り取りを実施しており、今後も、重要施設に近接している斜面を対象に強化対策を講じる。



第 8.2-3 図 斜面の対策

上記のとおり、地震対策については柏崎刈羽原子力発電所の災害を踏まえた対策を中心に取り組んでいるが、今後も様々な地震対策について検討し、積極的に取り組んでいく。

9. まとめ

9. まとめ

新耐震指針並びに最新知見に照らした各種調査・評価結果を踏まえ、「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」を考慮して、基準地震動 S_s を策定した。

中越沖地震において柏崎刈羽原子力発電所で観測された地震波データを用いた概略評価の結果、並びに基準地震動 S_s を用いて評価した結果、福島第一原子力発電所3号機の原子炉を「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主要な施設については、耐震安全性が確保されていることを確認した。

以 上