

女川原子力発電所 2 号機の安全性に
関する検討会 説明資料


論点番号 3 1 ~ 4 0
(意見番号 3 1 ~ 4 0)

* 資料は論点番号 8 (意見番号 1 6) および
論点番号 2 (意見番号 6) と重複するため省略

女川原子力発電所 2 号機の安全性に
関する検討会 説明資料

論点番号 4 1

(意見番号 6 2)



新規制基準適合性審査申請 自然現象等 ＜(1)地震:耐震設計方針＞他 (No. 33,45～50,61,62,64,85 関連)

令和元年10月11日
東北電力株式会社

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

All rights reserved. Copyrights © 2019, Tohoku Electric Power Co., Inc.



新規制基準に基づく耐震設計について

1

【目次】

- 1 新規制基準に基づく耐震設計の概要
- 2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点
 - (1)建物・構築物に係る論点
 - (2)土木構造物に係る論点
 - (3)機器・配管系に係る論点
- 3 検討会コメントへの回答

参考資料1 基準地震動 S_s の策定

参考資料2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点

参考資料3 東北地方太平洋沖地震等を踏まえた反映事項

用語	意味
安全機能	<p>「安全機能」とは、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能であって、次に掲げるものをいう。</p> <p>イ その機能の喪失により発電用原子炉施設に運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、これにより公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがある機能</p> <p>ロ 発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能</p>
耐震重要度分類 Sクラス Bクラス Cクラス	<p>「耐震重要度分類」とは、施設の耐震設計上の重要度を、地震により発生する可能性のある環境への放射線による影響の観点から、施設の種別に応じて、以下のとおり分類したものをいう。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Sクラス 地震により発生するおそれがある事象に対して、原子炉を停止し、炉心を冷却するために必要な機能を持つ施設、自ら放射性物質を内蔵している施設、当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設、これらの施設の機能喪失により事故に至った場合の影響を緩和し、放射線による公衆への影響を軽減するために必要な機能を持つ施設及びこれらの重要な安全機能を支援するために必要となる施設、並びに地震に伴って発生するおそれがある津波による安全機能の喪失を防止するために必要となる施設 ・ Bクラス 安全機能を有する施設のうち、機能喪失した場合の影響がSクラス施設と比べ小さい施設 ・ Cクラス Sクラスに属する施設及びBクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設
基準地震動 S_s	<p>「基準地震動」とは、安全上重要な施設の耐震安全性を確保する上での「基準」となる「地震動(地震に伴って生じる揺れ)」であり、その地震動による地震力が加わった際に原子力発電所の安全上重要な施設の安全機能が保持できるかどうかを確認するための役割を担う。</p> <p>最新の科学的・技術的知見を踏まえ、敷地及び敷地周辺の地質・地質構造、地盤構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から想定することが適切なものとして策定する地震動をいう。</p>

用語	意味
既工認	<p>「既工認」とは、新規規制基準施行前に認可を受けている女川2号機建設時の工事計画及び改造工事等の工事計画をいう。</p>
有効応力解析	<p>時刻歴応答解析手法の一つであり、地盤と地下水の相互作用を考慮できる手法である。</p> <p>一般的には、地下水位以深の飽和砂地盤のように、液状化が生じる可能性のある地盤を対象に適用される。女川では地下水位以深の盛土・旧表土を対象に、地震等の繰返し荷重により地盤の強度や剛性の低下を考慮するために用いている。</p>
弾性範囲	<p>「弾性範囲」とは、力と変形の関係が比例関係にあり、力の解放後には変形が残らずもとに戻る事が出来る範囲をいう。</p>
地震応答解析	<p>「地震応答解析」とは、施設が地震による揺れを受けたときに、施設を構成する各部位がどのくらいの力を受け、その力によって各部位が変形や破損が生じないかを計算により確認する手法をいう。なお、本資料における地震応答解析は、施設の構造強度評価等を含む。</p>
耐震壁	<p>鉄筋コンクリート造の建物などで、地震による揺れにより生じる水平力に耐えるように設計された壁のことで、強度と剛性が非常に高い。</p>
終局耐力	<p>耐震壁や柱の頂部に徐々に力を加えいくと、徐々に変形が進むとともに大きな力が加わり、最後にはそれ以上耐えられなくなり、崩壊する。このときの崩壊する際の大きな力(耐力)を終局耐力という。</p>

1 新規制基準に基づく耐震設計の概要

1 新規制基準に基づく耐震設計の概要

新規制基準に基づく耐震設計の概要(1/3)

従来の規制基準と新規制基準との比較

- ▶ 従来と比較すると、シビアアクシデントを防止するための基準を強化するとともに、万一シビアアクシデントやテロが発生した場合に対処するための基準を新設
- ▶ 耐震設計に係る規制要求事項として、基準地震動の策定、耐震評価方法などが強化

<従来の規制基準>

シビアアクシデントを防止するための基準(いわゆる設計基準)
(単一の機器の故障を想定しても炉心損傷に至らないことを確認)

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

<新規制基準>

意図的な航空機衝突への対応
放射性物質の拡散抑制対策
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
内部溢水に対する考慮(新設)
自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

(テロ対策)
新設
(シビアアクシデント対策)
新設

強化又は新設

強化

新規制基準に基づく耐震設計の概要(2/3)

➤ 基準地震動 S_s の策定

最新の科学的・技術的知見を踏まえ、「震源を特定して策定する地震動」および「震源を特定せず策定する地震動」について、水平方向、鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定する。

➤ 耐震重要度分類に基づく設計

発電所施設の耐震重要度に応じて、耐震Sクラス、耐震Bクラス、耐震Cクラスに分類し、耐震クラスに応じて適用する地震力に十分耐える設計とする。

また、耐震重要施設(耐震Sクラス)は、基準地震動 S_s による地震力に対して、安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。

➤ 波及的影響評価

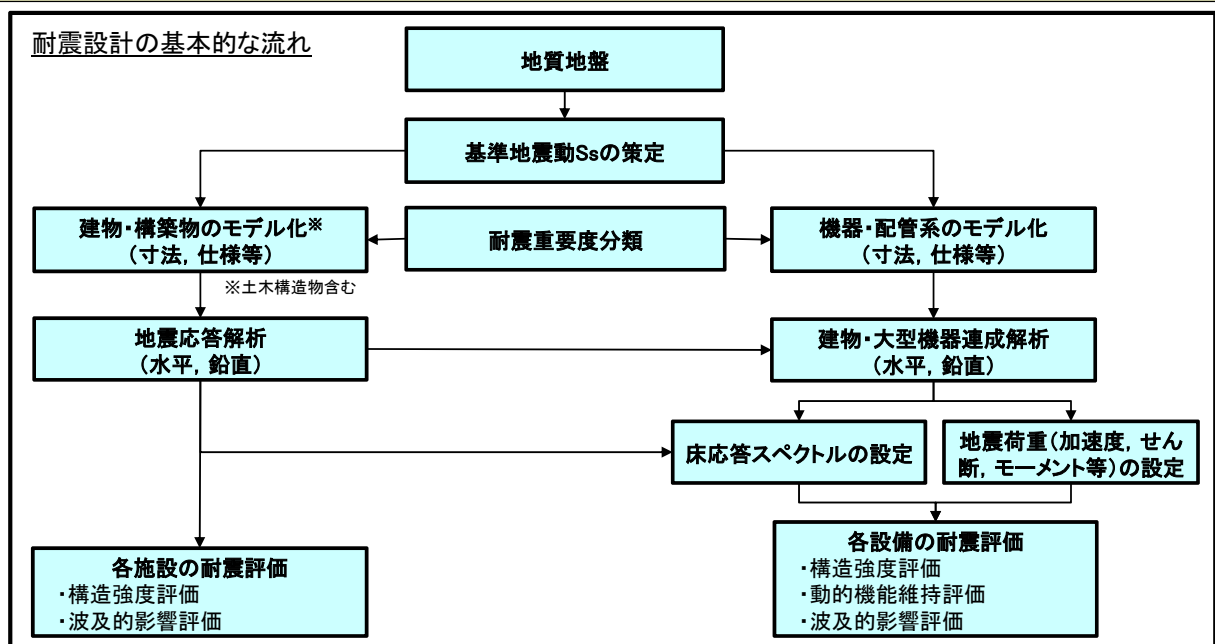
耐震重要施設(耐震Sクラス)は、耐震重要度分類が下位のクラス(耐震Bクラス、耐震Cクラス)に属する施設の波及的影響によって、耐震Sクラスの安全機能を損なわないように設計する。波及的影響の評価にあたっては、施設全体を俯瞰した調査・検討を行う。

➤ 地震力の組合せ

耐震設計に用いる地震力は、水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定する。影響が考えられる施設は、許容限界の範囲内であるとどまることを確認する。

新規制基準に基づく耐震設計の概要(3/3)

➤ 新規制基準に伴う耐震設計の要求事項に加えて、女川2号機の特徴を踏まえた耐震設計を行う。



追加検討・反映事項

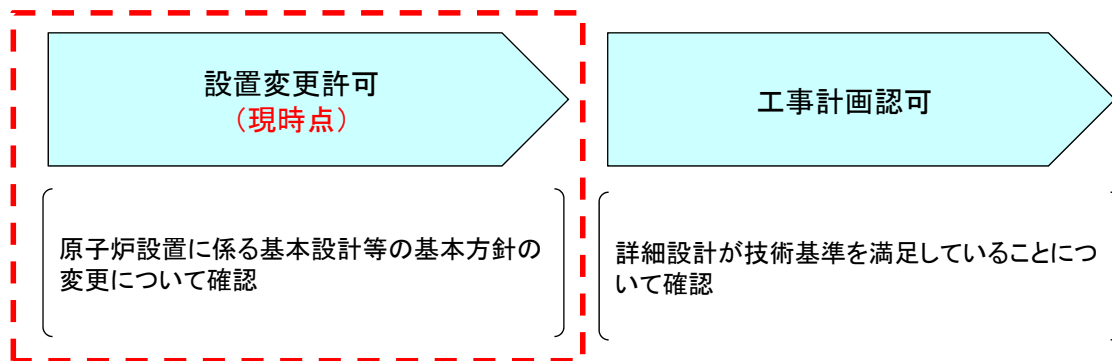
女川2号機の特徴

- ・東北地方太平洋沖地震等を踏まえた反映事項
- ・評価手法、評価条件等の既工認からの変更
- ・耐震対策工事等

2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点

2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点

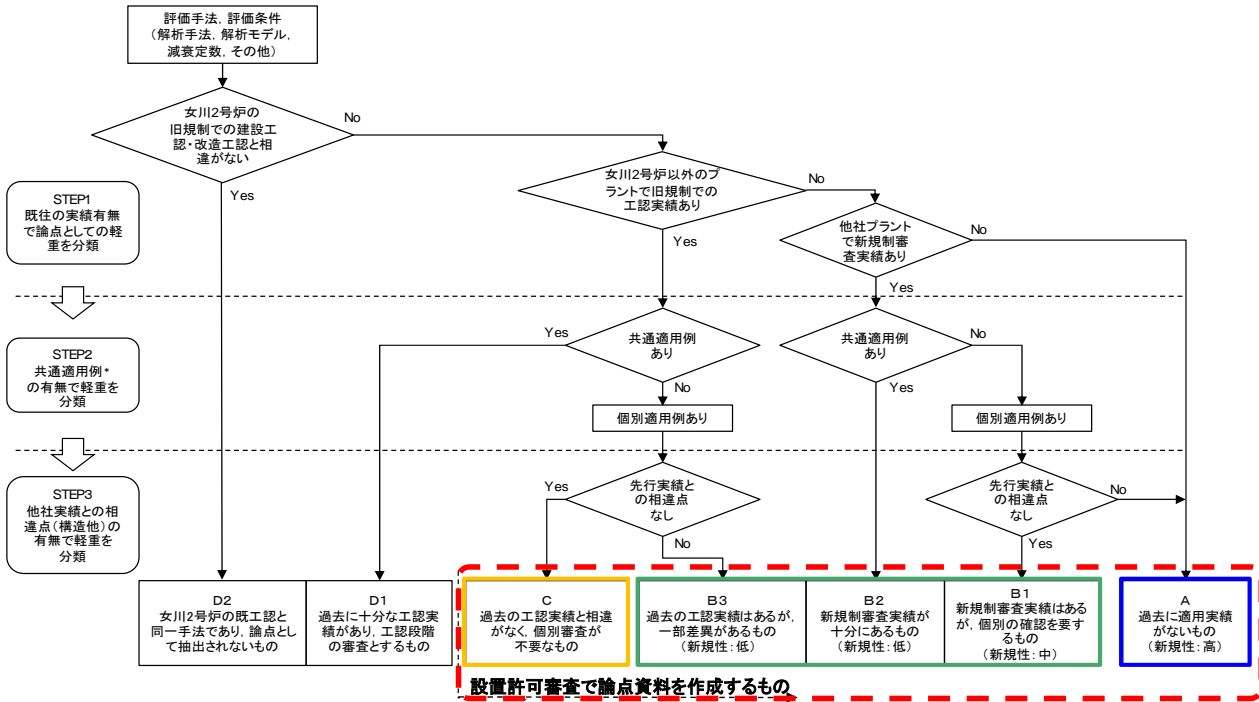
新規制基準に対する適合性審査(耐震設計)の流れ



- 女川2号機の適合性審査(耐震設計)では、各施設の詳細設計(工事計画認可)で採用予定の評価手法等が既工認から変更となる項目を論点として抽出し、その評価手法等の内容及び妥当性、採用した場合の成立見通しなどについて確認されている。
- 各施設の詳細設計に基づく耐震性(詳細評価結果)については、工事計画認可段階における適合性審査で確認がなされる。

耐震論点重み付け分類フロー

▶ 耐震設計に係る評価手法等が変更となる場合、分類フローに基づき、これまでの評価手法等との差異、審査実績との差異から、論点の重み付けを行い、このうち分類A～Cについて、設置変更許可段階での論点として説明している。



* 規格・基準類に基づき、プラントの仕様等によらず適用性が確認された手法、または他プラントで適用され工認実績、新規審査実績が複数あり自プラントへの適用性について確認した手法

(1) 建物・構築物に係る論点

論点の分類結果

論点の重み付け	項目	本資料上での論点概要記号
A	東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映 ・シミュレーション解析等に基づく初期剛低下を考慮 ・耐震補強工事を反映 ・周辺地盤による低減効果を考慮(E+F入力)	a.
B2	屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用	b.
B2	基礎版の解析モデルへの弾塑性解析の適用	c.

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

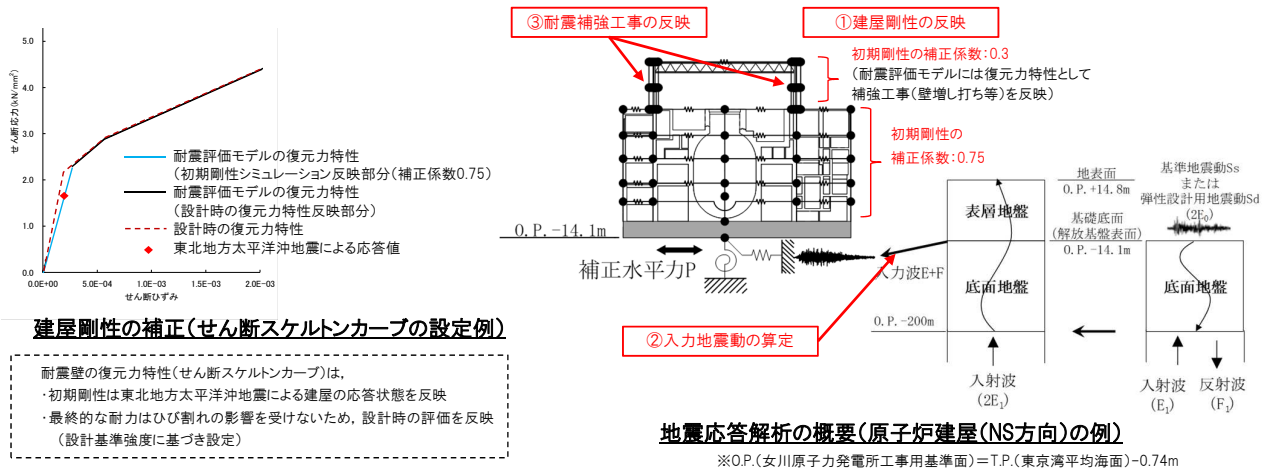
B2 : 新規制基準審査実績が十分にあるもの(新規性:低)

a. 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映(1/3)

(目的)

- 2011年東北地方太平洋沖地震等の観測記録に基づく原子炉建屋のシミュレーション解析から得られた知見を踏まえ、①建屋解析モデルの初期剛性、②周辺地盤による入力地震動の低減効果を考慮
- また、原子炉建屋は耐震補強工事を実施しているため、③建屋解析モデルに補強工事を反映

変更項目	適合性審査(申請時)	既工認(建設時)
①建屋剛性の補正【重み付け評価:A】	シミュレーション解析に基づいた建屋初期剛性の採用	設計基準強度に基づく建屋剛性を設定
②入力地震動の算定【重み付け評価:A】	建屋は約29m掘り込まれており、周辺地盤による入力地震動の低減効果を考慮	基準地震動を建屋基礎下に直接入力(低減効果無視)
③耐震補強工事の反映【重み付け評価:A】	地震応答解析モデルに耐震補強工事を反映	-



a. 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映(2/3)

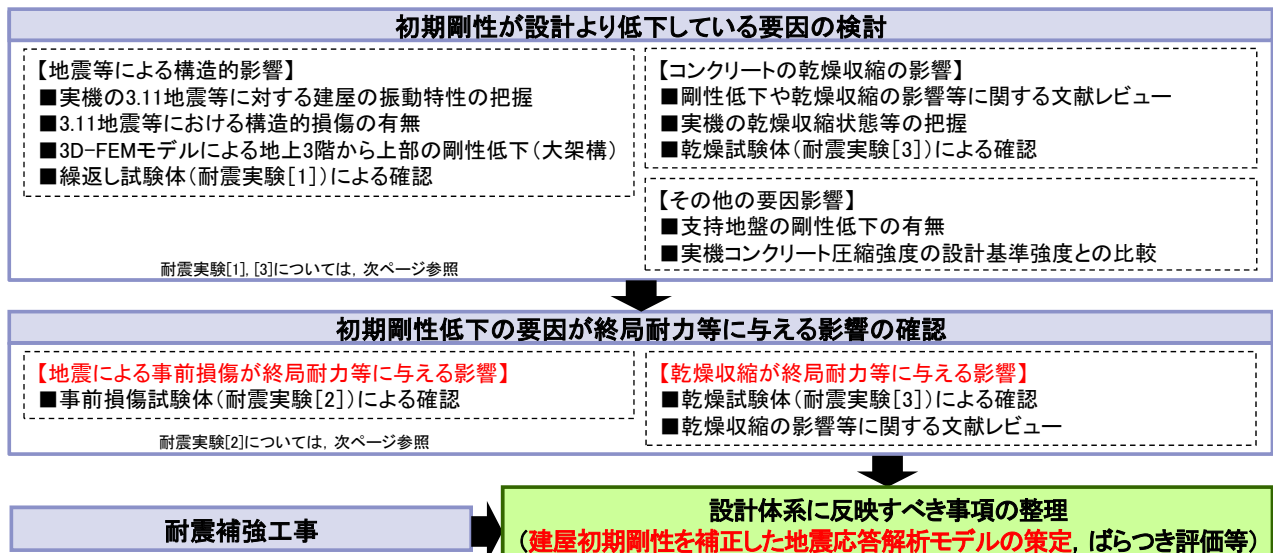
(適用によって期待する効果)

- より実現象に近い応答を再現する建屋モデル(建屋初期剛性補正モデル)により耐震性を評価することにより、各部応力や床応答スペクトルの精度を向上することができる

(適合性審査における確認事項)

- 建屋の初期剛性低下の要因分析、終局耐力等への影響について、以下のフローに基づき確認
- 基準地震動Ssに対する耐震安全性評価に対して適用可能な建屋モデルであることを説明

3.11地震等の施設への影響を踏まえた耐震性評価に反映すべき事項の検討の全体フロー



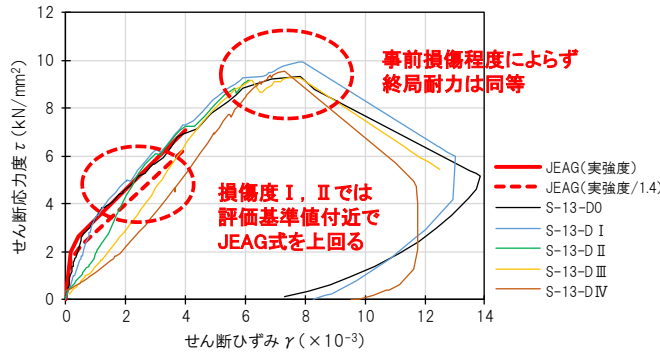
a. 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映(3/3)

◆ 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響の確認;耐震実験[1]~[3]の概要

耐震実験[1]	繰返し試験体により、小さな振幅の繰返しが初期剛性や終局強度等に及ぼす影響を確認
耐震実験[2]	事前損傷試験体により、事前加力による損傷が終局強度等に及ぼす影響を確認
耐震実験[3]	乾燥試験体により、乾燥収縮が初期剛性や終局強度等に及ぼす影響を確認

◆ 実験の目的, 得られた結果

- ▶ 初期剛性の低下の要因は、各種検討の結果、3.11地震等の地震動の影響とコンクリートの乾燥収縮の影響の重畳によるものと考えられる。
- ▶ 地震の繰返しやコンクリートの乾燥収縮により初期剛性が低下した状態であっても、終局耐力(建屋の強度)には影響がないことを確認する目的で、耐震実験を実施。
- ▶ 耐震実験の結果、地震による事前損傷や乾燥収縮の影響が、原子力施設建屋の基準地震動 S_{S1} に対する評価基準値(せん断ひずみ: 2.0×10^{-3})付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。



耐震実験:事前損傷が終局耐力に与える影響に関する耐震実験[2]結果(荷重-変形関係)

耐震実験:乾燥収縮が終局耐力に与える影響に関する耐震実験[3]状況

※JEAG: 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601

2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点

(2) 土木構造物に係る論点

論点の分類結果

論点の重み付け	項目	本資料上での論点概要記号
A	時刻歴応答解析(有効応力解析)を適用した防潮堤他の耐震評価 ・時刻歴応答解析(有効応力解析)の適用 ・すべり安全率による評価の適用 ・液状化影響の検討	a.
A	後施工せん断補強工法(セラミックキャップパー工法)の適用	b.
A	時刻歴応答解析(上部工-下部工(杭)-地盤の連成モデル)を適用した防潮壁の耐震評価 ・時刻歴応答解析(上部工-下部工(杭)-地盤の連成モデル)の適用 ・限界状態設計法の適用(曲げ系の破壊:降伏モーメント, せん断破壊:せん断耐力)	c.
A	3次元静的材料非線形解析を適用した海水ポンプ室他の耐震評価 ・3次元静的材料非線形解析(3次元非線形ソリッドモデル, 3次元非線形シェルモデル)の適用 ・限界状態設計法の適用(曲げ系の破壊:コンクリート主圧縮ひずみ, 鉄筋のひずみ, せん断破壊:せん断耐力)	d.
A	限界状態設計法の適用(引張強度及びせん断強度)	e.
B2	時刻歴応答解析(全応力解析)等の適用 ・時刻歴応答解析(全応力解析)の適用 ・部材非線形解析の適用 ・限界状態設計法の適用(曲げ系の破壊:層間変形角, せん断破壊:せん断耐力) ・構造物の履歴減衰, Rayleigh減衰の適用	

A :過去に適用実績がないもの(新規性:高)

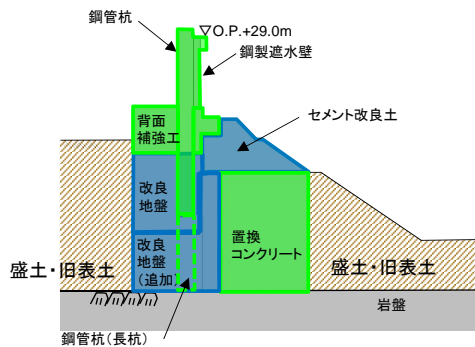
B2 :新規制基準審査実績が十分にあるもの(新規性:低)

a. 時刻歴応答解析(有効応力解析)を適用した防潮堤他の耐震評価(1/3)

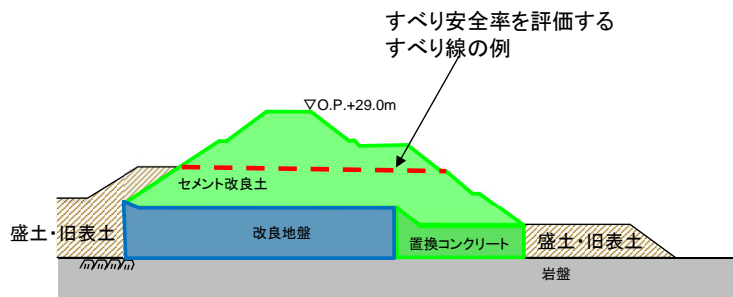
(目的)

- ▶ 防潮堤などの施設の周辺地盤として、盛土や旧表土といった土の層が存在する。女川の盛土・旧表土は、地震時でも支持力を失うような液状化の状態にはならないことを試験により確認しているが、剛性や強度が低下することは起こり得ると考えられる。
- ▶ この影響を考慮するため、地盤と地下水の相互作用を考慮できる時刻歴応答解析(有効応力解析)を実施する。
- ▶ また、防潮堤の盛土堤防などでは安定性を評価する必要があるため、安定性を評価する方法であるすべり安全率^{*}による評価も行う。

^{*}:地震等によりすべろうとする力とすべりに抵抗する力(強度)の比から、すべりに対する安全率を示す。



防潮堤(鋼管式鉛直壁)概要図



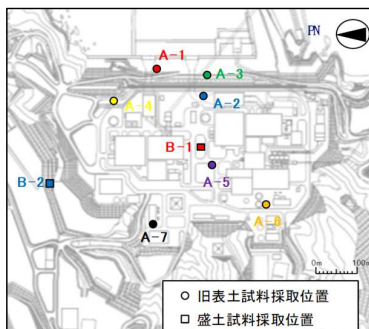
防潮堤(盛土堤防)概要図

a. 時刻歴応答解析(有効応力解析)を適用した防潮堤他の耐震評価(2/3)

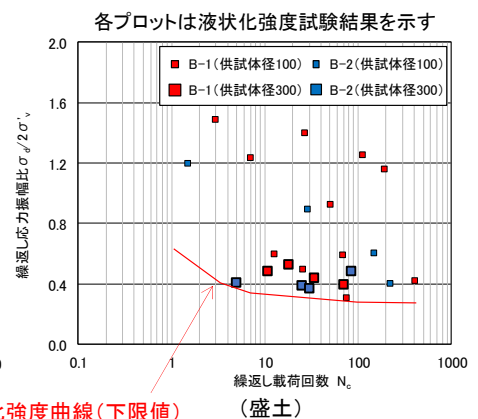
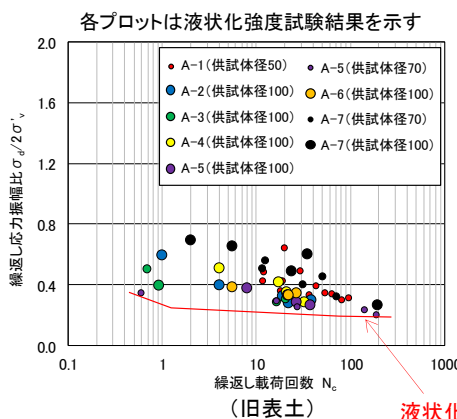
(適用によって期待する効果)

- ▶ 時刻歴応答解析の一つである有効応力解析を行うことで、地震による地盤の強度や剛性が低下した状態を考慮した評価ができる。
- ▶ 盛土・旧表土の液状化強度特性^{*}については、液状化強度試験結果の下限値に設定することで、地震による地盤の強度や剛性の低下を保守的に評価できる。
- ▶ 一部施設(盛土堤防など)にすべり安全率評価を適用することで、施設の安定性の評価ができる。

^{*}:地盤が液状化するまでの強度特性を示すもので、小さいほど液状化しやすい。



試料採取位置



液状化強度試験結果に基づく液状化強度曲線

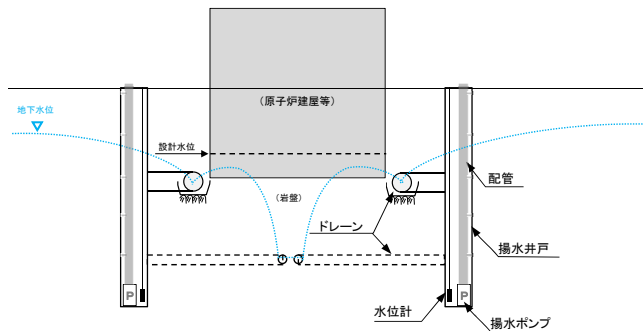
a. 時刻歴応答解析(有効応力解析)を適用した防潮堤他の耐震評価(3/3)

(適合性審査における確認事項)

- 防潮堤の代表的な断面に対し、時刻歴応答解析(有効応力解析)を適用した評価結果(すべり安全率評価を含む)を示し、防潮堤の構造成立性について確認。
- 液状化強度特性を設定するための液状化強度試験における盛土・旧表土の試料採取位置の代表性、試験結果及び試験結果に基づく液状化強度特性設定の妥当性について確認。
- 液状化等の耐震評価には地下水位が重要な要素となるが、その地下水位の設定に地下水位低下設備の機能を期待するため、地下水位低下設備を設計基準対象施設※1として位置付け、信頼性向上※2を図る方針について確認。

(工事計画認可申請に向けた対応)

- 基準地震動 S_s の地震応答に対し、本手法を用いて、防潮堤等の評価を行う。



地下水位低下設備断面図(イメージ)

※1: 発電用原子炉施設のうち、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の発生を防止し、又はこれらの拡大を防止するために必要となるもの。

※2: 地下水位低下設備は、耐震性を確保するとともに、多重化や非常用電源への接続などにより信頼性向上を図る。

2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点

(3) 機器・配管系に係る論点

機器・配管系

論点の重み付け	項目	本資料上での論点概要記号
A	サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更	a.
A	竜巻防護ネットへのゴム支承の適用	b.
A	一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価	c.
B1	原子炉本体の基礎の復元力特性の変更	d.
B1	使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の変更	e.
B1	規格適用範囲外の動的機能維持評価の実施	f.
B2	地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持	g.
B3	海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用	h.

A : 過去に適用実績がないもの(新規性:高)

B1 : 新規制基準審査実績はあるが、個別の確認を要するもの(新規性:中)

B2 : 新規制基準審査実績が十分にあるもの(新規性:低)

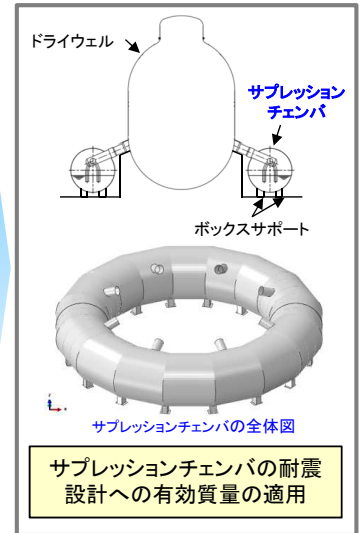
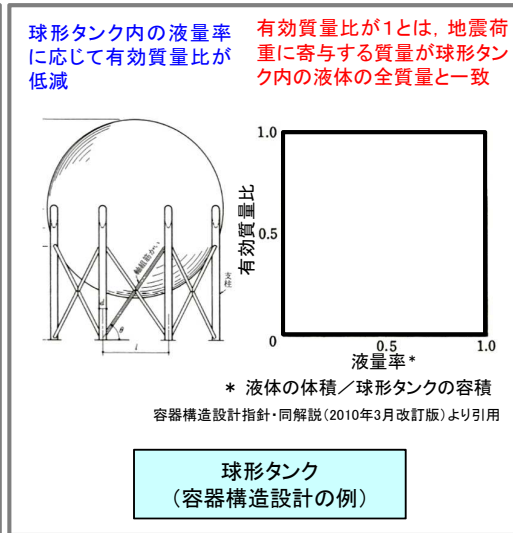
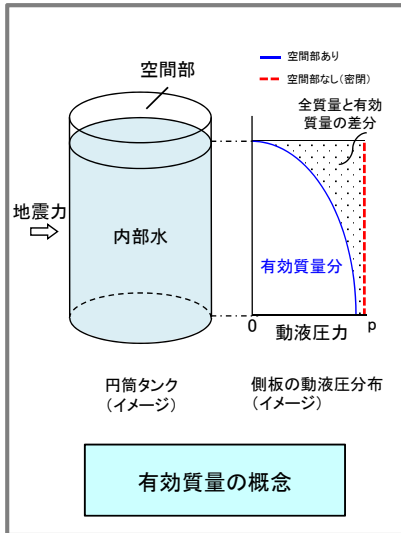
B3 : 過去の工認実績はあるが、一部差異があるもの(新規性:低)

a. サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更(1/3)

(目的)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

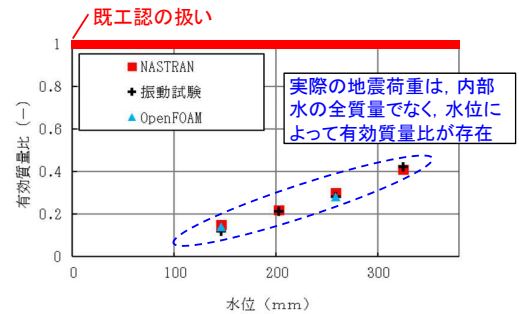
- 容器内に空間部をもって液体を貯蔵する球形タンクのような容器の耐震設計では、内部にある液体の全質量ではなく、実際の地震荷重として寄与する有効質量が適用される。
- 新規制基準に伴うサプレッションチェンバの耐震設計では、基準地震動 S_s の増大や重大事故時の水位増加を踏まえると地震荷重が大きくなるため、空間部をもって水を貯蔵するサプレッションチェンバ(円環形状容器)の内部水の扱いについて有効質量を適用する。



a. サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更(2/3)

(適用によって期待する効果)

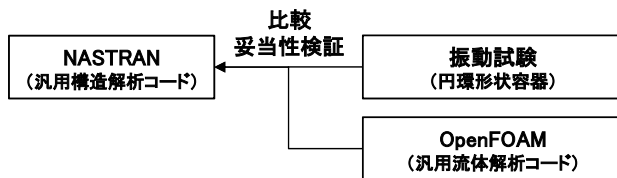
- 既工認の耐震設計では、簡便で保守的な扱いとして、サプレッションチェンバに貯蔵される内部水の全質量(有効質量比1)を用いて地震荷重を評価。
- サプレッションチェンバの地震荷重に寄与する内部水の質量は、全質量の一部(有効質量)であるため、有効質量比を適用することによって、より実態に即した地震荷重を評価することが可能。



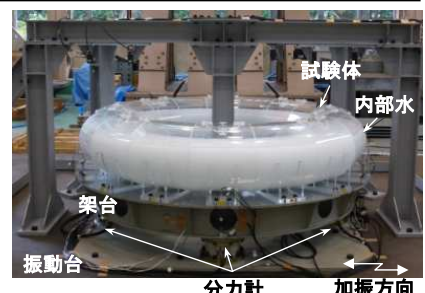
(適合性審査における確認事項)(1/2)

円環形状容器内水位と有効質量比の関係(妥当性検証の結果)

- サプレッションチェンバの有効質量は、汎用構造解析コード(NASTRAN)にて算出するため、この妥当性検証として、サプレッションチェンバを縮小(1/25)模擬した円環形状容器を用いた振動試験及び汎用流体解析コード(OpenFOAM)による有効質量と比較し、概ね一致する結果(NASTRANによる算出値がやや保守的)となることを説明した。



振動試験等によるNASTRANの妥当性検証



円環形状容器を用いた振動試験の状況

a. サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更(3/3)

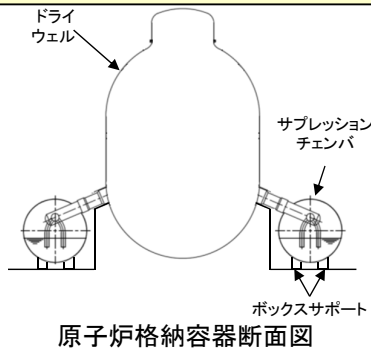
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(適合性審査における確認事項)(2/2)

- サプレッションチェンバの地震応答解析(水平方向)にあたっては、内部水を有効質量として設定し、3次元はりモデルを用いた動的解析(スペクトルモーダル解析等)を実施する方針を説明している。なお、鉛直方向は、内部水を全質量として扱う。
- サプレッションチェンバ内部水の揺動(スロッシング)による荷重は、流体解析により個別評価し、地震荷重と保守的に組み合わせる方針を説明している。

(工事計画認可申請に向けた対応)

- 詳細設計段階では、更に、サプレッションチェンバの地震応答解析(解析モデル、解析手法など)に係る妥当性を定量的に示すため、サプレッションチェンバの実機構造(円環形状容器、ボックスサポートの接続部、強め輪など)に着目した詳細な解析を行う。
- 上記確認結果を踏まえ、基準地震動 S_s に対して、サプレッションチェンバの耐震性が確保されることを評価する。



3 検討会コメントへの回答

これまでの検討会でいただいたコメント一覧(1/2)

本資料 上での No.	論点一覧 の意見No.	内容	本資料上での 該当ページ
13	2.(1).45	施設の耐震性能評価において、地震動の継続時間の影響についてどのように考慮しているか説明してもらいたい。(第13回) (源栄委員)	P.26~27
14	2.(1).45	基準地震動は今後も超過する可能性があるが、建屋や各設備の耐震性裕度について定量的に示して欲しい。(第13回) (栗田委員)	P.28~29
15	2.(1).47	耐震工事に関して、どのような基準と体制で実施箇所を選定しているのかについて確認したい。特に、基準を満たしているかどうかを判断する専門家の技術レベルを確認したい。また、今回の地震を含む過去の地震の実経験から、選定基準が妥当であったか、また、抜けがあったのかという観点からの説明してほしい。(対策を実施した場所とそうでない場所での影響の有無を評価するなどが考えられるが、影響については、機器が予想に反して壊れたかどうかという観点と、安全への影響で見過ごしがなかったかという観点がある。壊れても安全への影響がなく耐震裕度を持たせてなかったという判断はあってもよい。)(兼本委員)	P.30~32
16	2.(1).46	使用済燃料プールの耐震安全性(裕度)は十分か説明してもらいたい。(長谷川委員)	P.33
17	2.(1).48	配管系の耐震対策として、固定部を増やす剛構造化には賛成できないので示されたようなスナッパやダンパーを導入する手法は良いと考える。発展の目覚ましい、機器レベルでの制振、免震技術の活用について説明してもらいたい。(鈴木委員)	P.34~35
18	2.(1).49	タンク以外の屋外設備、屋外配管、その他、低重要度の設備の対策について説明してもらいたい。(鈴木委員)	P.36
19	1.(7).62 2.(1).62 (再掲)	重油タンクの倒壊について、この被災状況、今後の対応については了解したが、その他の液体貯槽について、対津波、対地震対策は新たな検討がなされたのか伺いたい。特に、機器系について耐震重要度別に軽微な被害を含めて被害(無被害)状況と今後への教訓について説明してもらいたい。(鈴木委員)	P.36

これまでの検討会でいただいたコメント一覧(2/2)

本資料 上での No.	論点一覧 の意見 No.	内容	本資料上での 該当ページ
20	2.(1).50	高圧電源盤の焼損について、本装置の復旧対応については了解した。ただし、地震による電流の短絡、アーク発生の可能性のある機器は他にもある。構造と電気系が相関している機器系の耐震安全対策について説明してもらいたい。(鈴木委員)	P.37
21	2.(3).64	構造物の耐震性評価では、必ず地震荷重に対して津波荷重や外部事象(飛行機がぶつかった時など)の荷重とか、荷重の比較というものがある。複合荷重として、どういう部材がどういう荷重で決まっているのかということを含めて明確にする必要がある。(第2回)【(1)地震-耐震設計方針で説明】(源栄委員)	P.38
22	3.(1).61	今回の被災のみではなく、東電の柏崎刈羽発電所の被害など過去の地震被害の教訓を受けて被害想定をどのように想定して今後の地震対策のシナリオを作成したかを伺いたい。(鈴木委員)	P.39
23	1.(7).33	燃料プールへの塗膜片落下事象があったことから、燃料プール上部からの落下物に対する対策を検討して欲しい。(第5回) (源栄委員)	P.40
24	3.(3).85	地震後の健全性評価、改良対策等で、学会のような第三者の評価を受ける場所での公開実績を説明してもらいたい。(兼本委員)	P.41

コメント回答(No.13;地震継続時間の影響) (1/2)

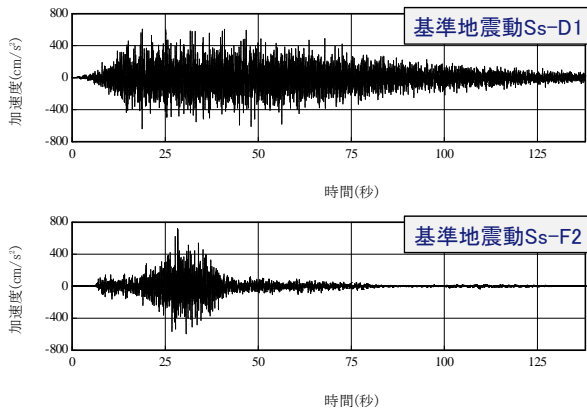
コメント内容

No.13:施設の耐震性能評価において、地震動の継続時間の影響についてどのように考慮しているか説明してもらいたい。(第13回)(源栄委員)

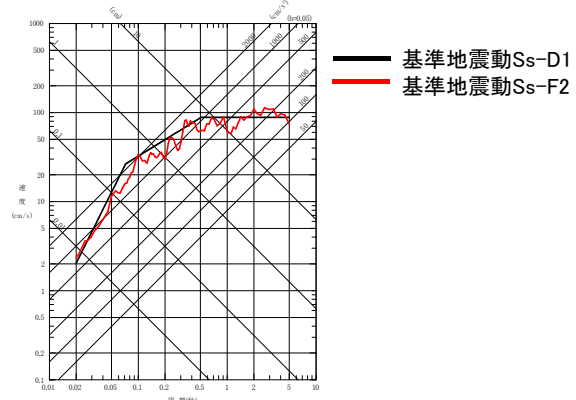
■ 地震動の策定について

- 基準地震動Ssの時刻歴波形の経時変化は、Noda et al.(2002)^{*}の方法(実際の観測記録に基づく保守的な方法)により考慮して設定している。
- プレート間地震(東北地方太平洋沖型地震, M9)による基準地震動(Ss-D1; 応答スペクトル手法, Ss-F2; 断層モデル手法)の時刻歴波形と応答スペクトルの比較を下図に示す。
- それぞれの応答スペクトルは、Ss-F2が長周期で一部大きいのが、継続時間は主要動部分も含めてSs-D1が長く作成されており、施設に対して保守的な地震動となっている。

※Noda et al.(2002): Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, OECD/NEA Workshop.



基準地震動の時刻歴波形

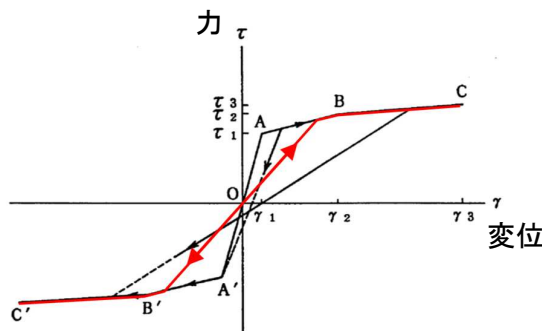


基準地震動の応答スペクトル

コメント回答(No.13;地震継続時間の影響) (2/2)

■ 施設への影響

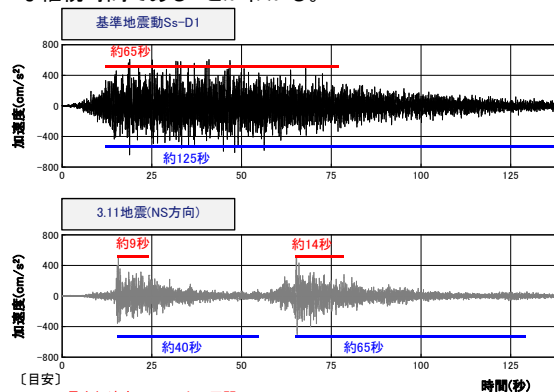
- 施設の耐震評価においては、基準地震動Ssの時刻歴波形を用いて、時刻歴の非線形応答解析を実施している。
- 建屋の非線形の地震応答解析においては、下図に示すような耐震壁の時々刻々の復元力特性(力-変位関係)を考慮した解析を実施していることにより、継続時間等の地震動の影響を解析に取り入れている。
- 機器・配管系に与える影響については、地震動の継続時間は、疲労評価に影響を与えるため、地震の等価繰返し回数の設定にあたっては、地震動の継続時間を考慮した設定条件へ見直すことで、設備の疲労評価に対し地震動の継続時間を考慮する。



初期剛性を低下させた耐震壁せん断力復元力特性の設定

○ [参考]加速度時刻歴波形の比較

基準地震動Ss-D1が3.11地震の観測記録と比較して、十分な継続時間であることがわかる。



[目安]
 赤線 最大加速度の1/2以上の区間
 青線 最大加速度の1/10になるまでの区間

コメント回答(No.14;耐震裕度) (1/2)

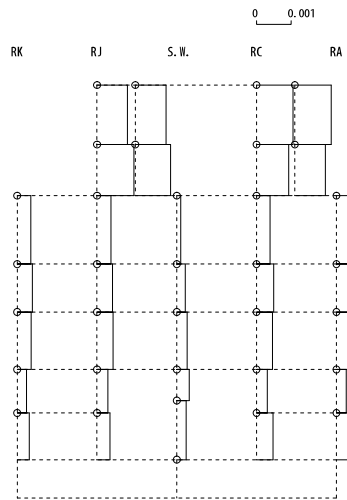
コメント内容

No.14: 基準地震動は今後も超過する可能性があるが、建屋や各設備の耐震性裕度について定量的に示して欲しい。(第13回) (栗田委員)

■ 建物・構築物

- 新規制基準では、Sクラスの建物・構築物に対して、終局耐力に対し妥当な安全余裕を有していることが要求されている。
- 耐震壁の評価に用いる最大応答せん断ひずみの評価基準値である「 2.0×10^{-3} 」は、終局点^{*}のせん断ひずみ (4.0×10^{-3}) に対して2倍の余裕を有している。
- 基準地震動を用いた地震応答解析の結果、原子炉建屋のせん断ひずみは、右図のとおり、最大で 1.0×10^{-3} 程度であり、評価基準値 (2.0×10^{-3}) に対して十分な余裕を有している。

^{*}終局点のせん断ひずみの値は、実験値のパラッキや下限値を参考に定められている。



(単位: $\times 10^{-3}$)

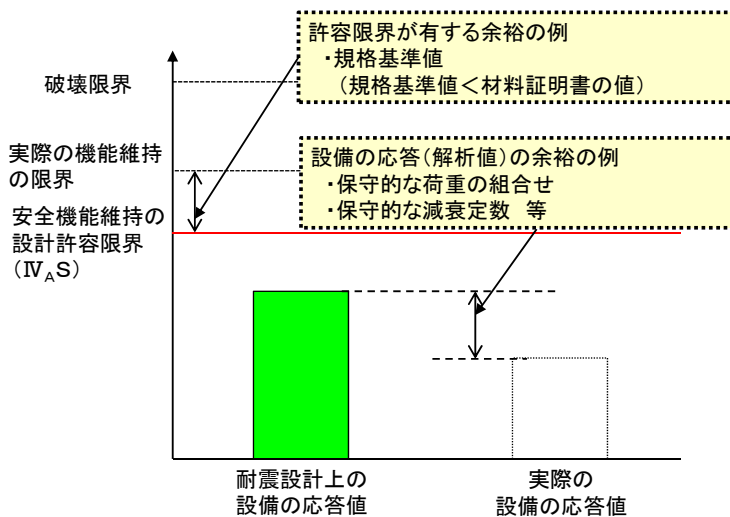
	RK	RJ	S. W.	RC	RA
OP=50.5 M					
OP=41.2 M		0.881	0.882	1.049	1.050
OP=33.2 M		1.059	1.018	0.922	0.883
OP=22.5 M	0.393	0.405	0.116	0.384	0.371
OP=15.0 M	0.431	0.446	0.241	0.497	0.430
OP=+6.0 M					
OP=+1.15M(SN)	0.402	0.465	0.298	0.458	0.448
OP=-0.8 M	0.265	0.312	0.357	0.311	0.283
OP=-8.1 M					
OP=-14.1 M	0.345	0.379	0.275	0.474	0.405

基準地震動に対する原子炉建屋の地震応答解析結果 (最大応答せん断ひずみ, 基準地震動Ss-F3, NS方向)

コメント回答(No.14;耐震裕度) (2/2)

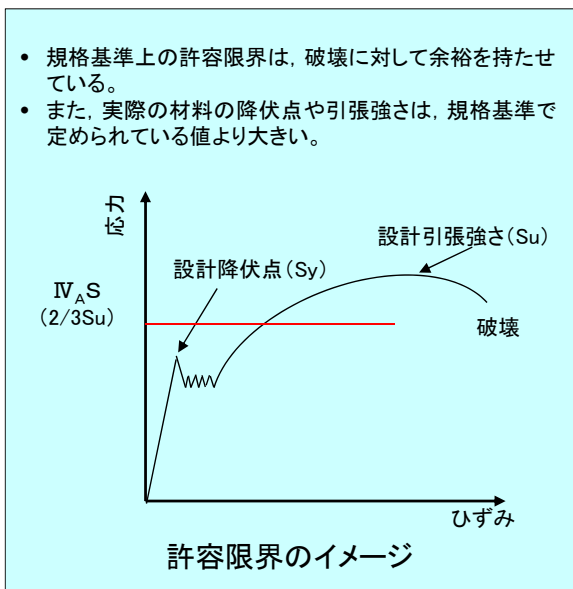
■ 機器・配管系

- Sクラス設備は、基準地震動Ssによる地震力に対して、施設の安全機能が維持できるように設計している。
- 耐震設計上の設備の応答値、許容限界 ($IV_A S$) は、余裕を持たせている。
- 耐震工事により設備の応答低減や強度の増加により耐震性を向上させている。



耐震設計における余裕^{*}のイメージ

^{*} 耐震設計における余裕は、設備の分類、構造、材料等により異なるため、一概に示すことは難しい



許容限界のイメージ

コメント回答(No.15;耐震工事の体制, 基準, 妥当性) 1/3

コメント内容

No.15: 耐震工事に関して、どのような基準と体制で実施箇所を選定しているのかについて確認したい。特に、基準を満たしているかどうかを判断する専門家の技術レベルを確認したい。また、今回の地震を含む過去の地震の実経験から、選定基準が妥当であったか、また、抜けがあったのかという観点からの説明してほしい。(対策を実施した場所とそうでない場所での影響の有無を評価するなどが考えられるが、影響については、機器が予想に反して壊れたかどうかという観点と、安全への影響で見過ごしがなかったかという観点がある。壊れても安全への影響がなく耐震裕度を持たせてなかったという判断はあってもよい。)(兼本委員)

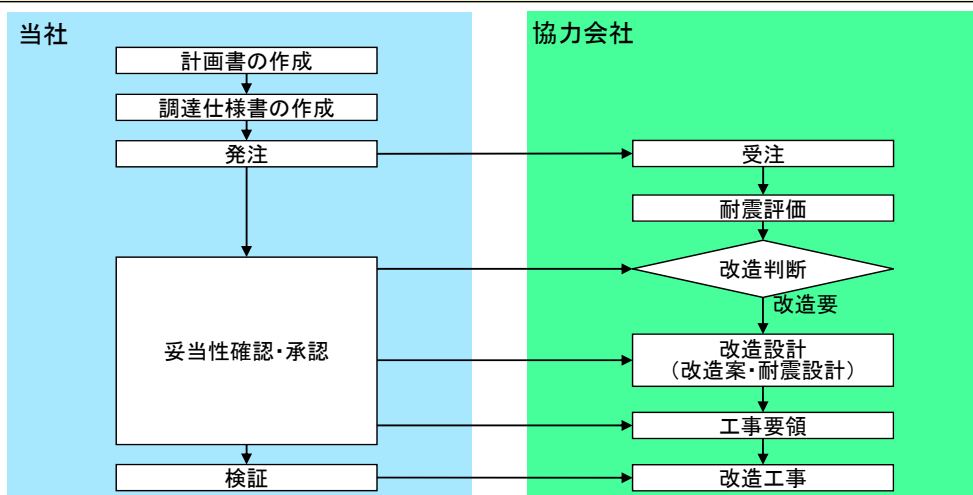
■ 耐震工事の実施について

- 耐震工事は、新たな知見などを踏まえ、耐震設計条件である基準地震動の見直しや評価項目の追加などが必要となった場合、国や学協会における規格基準などにに基づき、一連の耐震設計に係る検討・評価・施工を行い、その結果の妥当性を確認した上で実施している。
- 耐震工事の実施にあたっては、社内品質保証マニュアルに基づき、業務計画を作成し、業務内容などに応じた体制(原子力部、発電所)を構築し、力量・経験等を有する技術者が一連の耐震設計に係る業務を実施している。
- また、耐震評価(対策検討含む)、耐震工事を実施する協力会社(プラントメーカー等)については、品質保証マニュアルに基づき、要求事項に係る技術的能力、品質保証に係る運用・管理の妥当性、耐震設計の実績を有することなどを確認している。
- 耐震工事に係る一連の耐震設計については、適宜、関係者間(社内、当社と協力会社)で、各段階における検討・評価・施工の進捗、妥当性などを確認しながら業務を進めている。

次頁に耐震工事に係る業務フロー及び適用する規格基準の一例を示す。

コメント回答(No.15;耐震工事の体制, 基準, 妥当性) 2/3

- 当社は、耐震工事の発注段階において協力会社の供給者能力評価を実施し、技術的能力や品質保証体制などが適切であることを確認している。
- 耐震工事の各段階では、規格基準等に基づき、各設備に対する耐震評価、改造判断、改造設計、工事要領が妥当性あることを確認・承認した上で、改造工事を実施している。



耐震工事に係る業務概要フロー

耐震工事に適用する規格基準(一例)

- ・実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
- ・実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則
- ・原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601)
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格(JSME S NC1) ・鋼構造設計指針 等

コメント回答(No.15;耐震工事の体制, 基準, 妥当性) 3/3

➤ 3. 11地震及び4. 7地震の観測記録は, 当時の基準地震動を一部周期帯で上回ったが, 安全機能に影響を及ぼす事象は確認されず, 原子炉が安全に停止し, 維持されたことを踏まえると, 過去に実施した耐震性向上工事の実施個所の選定は, 妥当であったと考えられる。

発生日	地震	安全機能への影響	主な被害状況
2003年5月26日	宮城県沖の地震(M7.0)	無	・主変圧器避圧弁の作動 ・タービン建屋フローアウトパネル開放 等
2005年8月16日	宮城県沖の地震(M7.2)	無	・主変圧器避圧弁の作動 ・見学者用ギャラリー室のガラスにひび 等
2008年～2010年 耐震性向上工事の実施 (約6600箇所:3基合計)			
2011年3月11日	東北地方太平洋沖の地震(M9.0)	無	・主タービンの内部構造物の接触痕 ・主タービン中間軸受箱の基礎ボルトの曲がり 等
2011年4月 7日	宮城県沖の地震(M7.2)		

コメント回答(No.16;使用済燃料プールの耐震安全性)

コメント内容

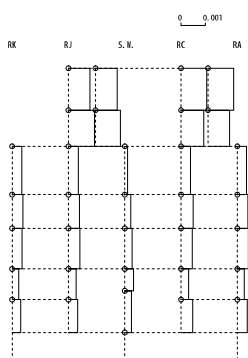
No.16:使用済燃料プールの耐震安全性(裕度)は十分か説明してもらいたい。(長谷川委員)

(使用済燃料プールの構造概要)

➤ 使用済燃料プールは, 部材断面の厚い鉄筋コンクリートの壁, 床で構成されている。また, 内面には漏水防止のために, ステンレス鋼板ライニングが施されている。

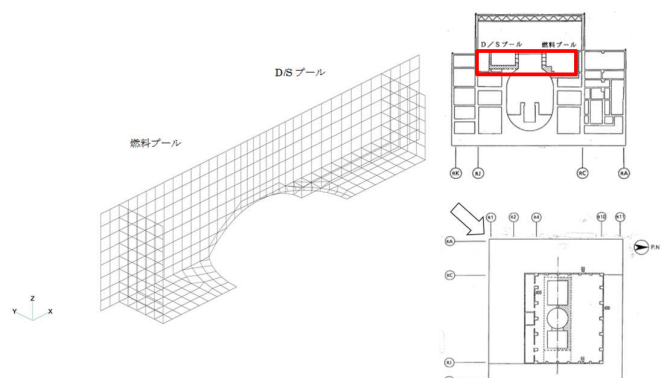
(使用済燃料プール設置位置のせん断ひずみ)

➤ 建屋全体の質点系モデルを用いた地震応答解析により, 使用済燃料プールの鉄筋コンクリート部分が評価基準値に対して十分な余裕(基準値 2.0×10^{-3} に対して発生値 0.5×10^{-3} 程度)があることを確認している。(左下図)
 ➤ 使用済燃料プールの部分詳細モデル(FEMモデル)による評価を実施することにより, 各荷重(鉛直荷重, 地震荷重, 水圧(静水圧, 動水圧), 熱荷重, シェル壁の温度膨張による強制変形)に対して安全であることを確認する。(右下図)



(単位: $\times 10^{-3}$)

	RK	RJ	S.W.	RC	RA
0F+0.5 M		0.881	0.882	1.049	1.050
0F+1.2 M		1.059	1.018	0.922	0.883
0F+3.2 M	0.393	0.405	0.116	0.384	0.371
0F+22.5 M	0.431	0.446	0.241	0.497	0.430
0F+15.0 M	0.402	0.465	0.298	0.458	0.448
0F+6.0 M	0.265	0.312	0.357	0.311	0.283
0F-1.128(M)	0.345	0.339	0.275	0.474	0.405
0F-8.1 M					
0F-14.1 M					



建屋全体の質点系モデルを用いた地震応答解析結果(最大応答せん断ひずみ, 基準地震動Ss-F3, NS方向)

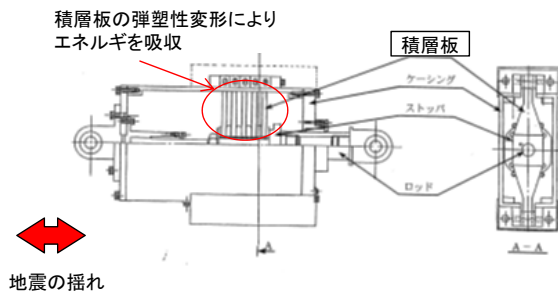
使用済燃料プールの部分詳細モデル図(例)

コメント回答(No.17;制振,免震技術) 1/2

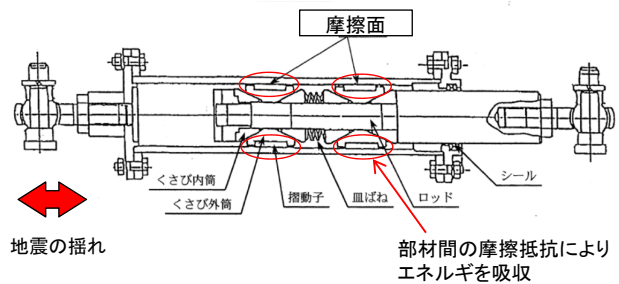
コメント内容

No.17:配管系の耐震対策として、固定部を増やす剛構造化には賛成できないので示されたようなスナッパやダンパーを導入する手
法は良いと考える。発展の目覚ましい、機器レベルでの制振,免震技術の活用について説明してもらいたい。(鈴木委員)

- 機器・配管系の耐震対策については、地震に伴う振動エネルギーを機器・配管系の支持構造物に積極的に吸収させて地震応答を低減する耐震設計法として、機器・配管系に制振サポートを用いた方法が「原子力発電所耐震設計技術規程:JEAC4601」にて規定されている。
- 制振サポートの種類としては、弾塑性ダンパ、摩擦ダンパ、鉛ダンパがある。
 - ① 弾塑性ダンパ:鋼板の弾塑性変形によりエネルギーを吸収する
 - ② 摩擦ダンパ:部材間の摩擦抵抗によりエネルギーを吸収する
 - ③ 鉛ダンパ:鉛の塑性変形によりエネルギーを吸収する



制振サポート(弾塑性ダンパ)の例



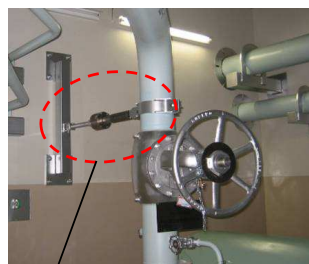
制振サポート(摩擦ダンパ)の例

コメント回答(No.17;制振,免震技術) 2/2

- 女川原子力発電所での耐震対策としては、これまでの許認可で実績のある耐震対策(サポート,スナッパの追設等)を基本としているが、耐震対策の検討にあたっては、単純に剛構造化(サポート数の増加)するのではなく、設備のメンテナンス性やアクセス性、運転による機器の熱膨張等を総合的に考慮して対策を決定している。
- 今回の新規基準に伴う耐震対策としては、上記以外の対策として、排気筒へのオイルダンパの設置、海水ポンプ室上部に設置する竜巻防護ネットへのゴム支承の採用などを計画している。

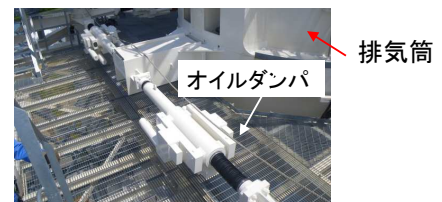


サポート追設

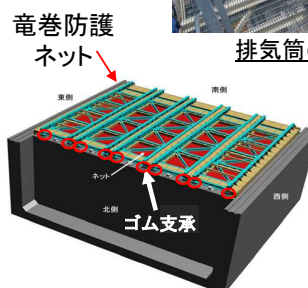


スナッパ追設

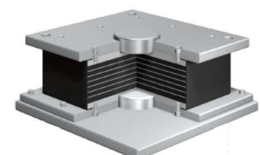
女川での耐震対策例



排気筒の耐震対策



竜巻防護ネットの耐震対策



ゴム支承(イメージ)

コメント回答(No.18, 19; 下位クラス施設の波及的影響)

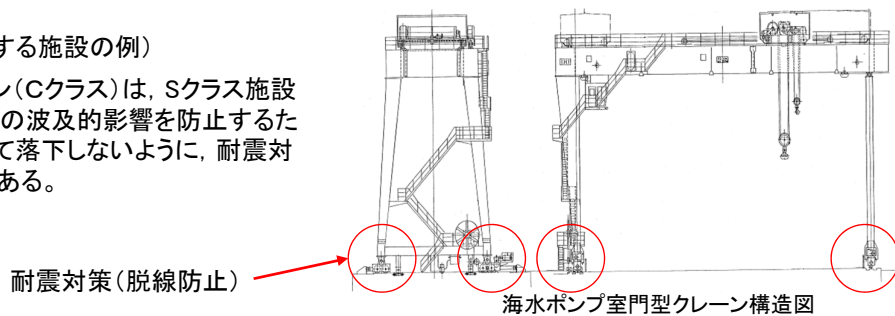
コメント内容

No.18: タンク以外の屋外設備, 屋外配管, その他, 低重要度の設備の対策について説明してもらいたい。(鈴木委員)
 No.19: 重油タンクの倒壊について, この被災状況, 今後の対応については了解したが, その他の液体貯槽について, 対津波, 対地震対策は新たな検討がなされたのか伺いたい。特に, 機器系について耐震重要度別に軽微な被害を含めて被害(無被害)状況と今後への教訓について説明してもらいたい。(鈴木委員)

- 屋外の低重要度の各設備(B, Cクラス)については, その設備の地震による波及的影響によって, 耐震重要施設(Sクラス)の有する安全機能を損なわないように耐震設計する。
- 波及的影響評価は, 新規制基準上, 下記に示す観点から, 施設全体を俯瞰した調査・検討を行い, 耐震重要施設の安全機能が損なわれないことが要求されている。
 - ・ 設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響
 - ・ 耐震重要施設と下位のクラスの施設との接続部における相互影響
 - ・ 建屋内外における下位のクラスの施設の損傷, 転倒及び落下等による耐震重要施設への影響
- 3.11地震及び4.7地震において, 低重要度の設備の波及的影響によるSクラス施設への被害はなかったが, 新規制基準を踏まえ, 屋外の液体貯槽を含む低重要度の設備の波及的影響によってSクラス施設の安全機能を損なわないことについて, 設計図書類を用いた机上検討, 現地調査及び耐震評価等を実施する。

(波及的影響評価を実施する施設の例)

海水ポンプ室門型クレーン(Cクラス)は, Sクラス施設(非常用海水ポンプ等)への波及的影響を防止するため, 基準地震動 S_s に対して落下しないように, 耐震対策補強を実施する計画である。



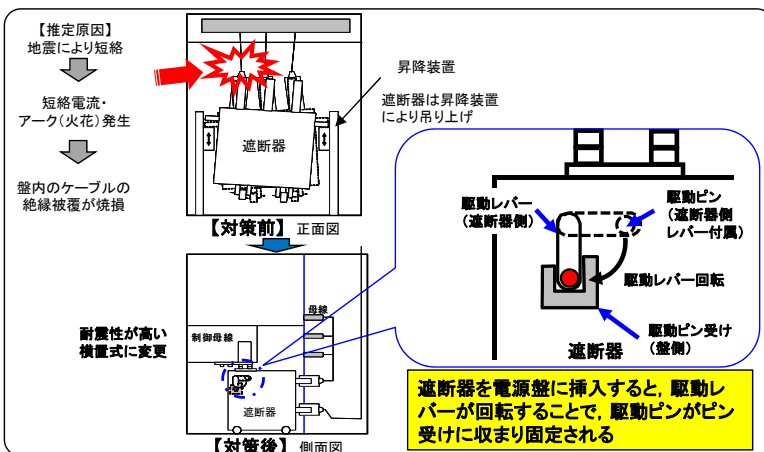
コメント回答(No.20; 電源盤の安全対策)

第1回検討会資料一部修正

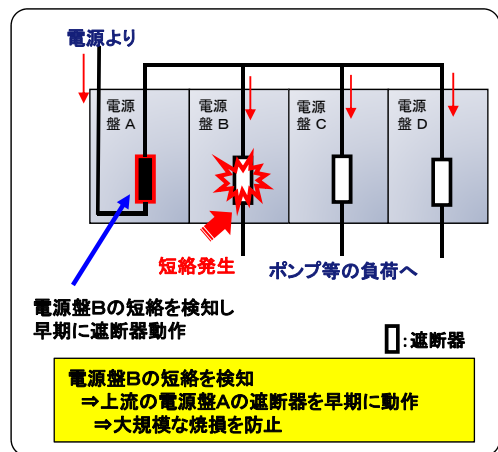
コメント内容

No.20: 高圧電源盤の焼損について, 本装置の復旧対応については了解した。ただし, 地震による電流の短絡, アーク発生の可能性のある機器は他にもある。構造と電気系が相関している機器系の耐震安全対策について説明してもらいたい。(鈴木委員)

- 被害を受けた女川1号機高圧電源盤に対する今後の教訓を踏まえた対策は以下のとおり。
 - 女川1号機高圧電源盤に対しては, 遮断器を耐震性の高い構造とする対策を実施済み。(第1回検討会にてご説明済み)
- (電源盤の耐震安全対策)
- ・ 安全上重要な電源盤は盤フレームの補強や, 盤正面扉のフレームへのボルト締め等により耐震安全対策を行っている。
- (短絡・アークによる損傷対策, 新規制基準におけるガイドを踏まえた対策)
- ・ 通常, 短絡が起きた場合は, 電源上流の遮断器により電流を断つ設計としている。さらに, 安全上重要な機器に電源を供給する電源盤に対し, 大規模な焼損に至る前に, 上流の遮断器を更に早期に動作させ, 電流を断つ対策を行うこととしている。



女川1号機高圧電源盤の対策



短絡・アークによる損傷対策例

コメント回答(No.21;外部荷重の組合せ)

コメント内容
 No.21: 構造物の耐震性評価では、必ず地震荷重に対して津波荷重や外部事象(飛行機がぶつかった時など)の荷重とか、荷重の比較というものがある。複合荷重として、どういう部材がどういう荷重で決まっているのかということを含めただけではなく明確にする必要がある。(第2回)【(1)地震-耐震設計方針で説明】(源栄委員)

- 自然現象の組合せについて網羅的に検討した上で、地震との組合せを考慮する自然現象として風(台風)および積雪を選定し、施設の設置場所、構造等を踏まえて荷重の組合せについて評価を実施している。
 - 風荷重(台風)として、建築基準法に基づく設計基準風速(30m/s, 10分間平均)による荷重を考慮する。
 - 積雪荷重として、観測記録(石巻特別地域気象観測所 1887年~2017年)の既往最大値に基づく設計基準積雪量(43cm)による荷重を考慮する。

地震との組合せを考慮する自然現象の選定結果は以下のとおり。
 組合せを考慮する自然現象の選定にあたっては、事象を組み合わせることにより影響が増長する、かつ同時に発生する可能性が高い等の観点から評価を実施している。

	自然現象									
	風(台風)	竜巻	凍結	降水	積雪	落雷	火山の影響	生物学的事象	森林火災	津波
地震との組合せ	○	×	×	×	○	×	×	×	×	※

○: 組合せを考慮する ×: 組合せを考慮しない ※ 津波は、余震による荷重を考慮する

コメント回答(No.22;過去の地震を踏まえた地震対策)

コメント内容
 No.22: 今回の被災のみではなく、東電の柏崎刈羽発電所の被害など過去の地震被害の教訓を受けて被害想定をどのように想定して今後の地震対策のシナリオを作成したかを伺いたい。(鈴木委員)

- 女川原子力発電所においては、建設時以降の地震経験、耐震安全性に係る知見、国の規格基準等を踏まえ、耐震設計に用いる地震動の見直し、耐震対策工事の実施など、継続的に発電所の耐震性向上に取り組んでいる。
 - 2005年宮城県沖地震、2006年耐震設計審査指針改訂に対しては、当時基準地震動を一部超過したことの要因分析結果や地質調査結果等を踏まえ、基準地震動を580ガルに見直し、耐震性向上を目的としたSクラス設備の耐震対策工事を実施した。
 - 2007年新潟県中越沖地震に対しては、柏崎刈羽原子力発電所での分析結果を踏まえ、主要設備や屋外施設(主変圧器など)の耐震性確認、事務本館の耐震工事、事務新館(免震構造)の新設、自衛消防体制の強化(消防車の追加配置、大型消火器の増設)や迅速かつ厳格な事故報告体制の構築を図った。
 - 現在の新規制基準は、2011年東北地方太平洋沖地震の教訓などを踏まえ、基準地震動の策定、耐震評価方法などの耐震設計の強化が図られており、発電所の安全性向上に係る対策を実施中。
- 今後とも継続的に新たな知見を収集・分析し、原子力発電所の耐震安全性の一層の向上に努めていく。

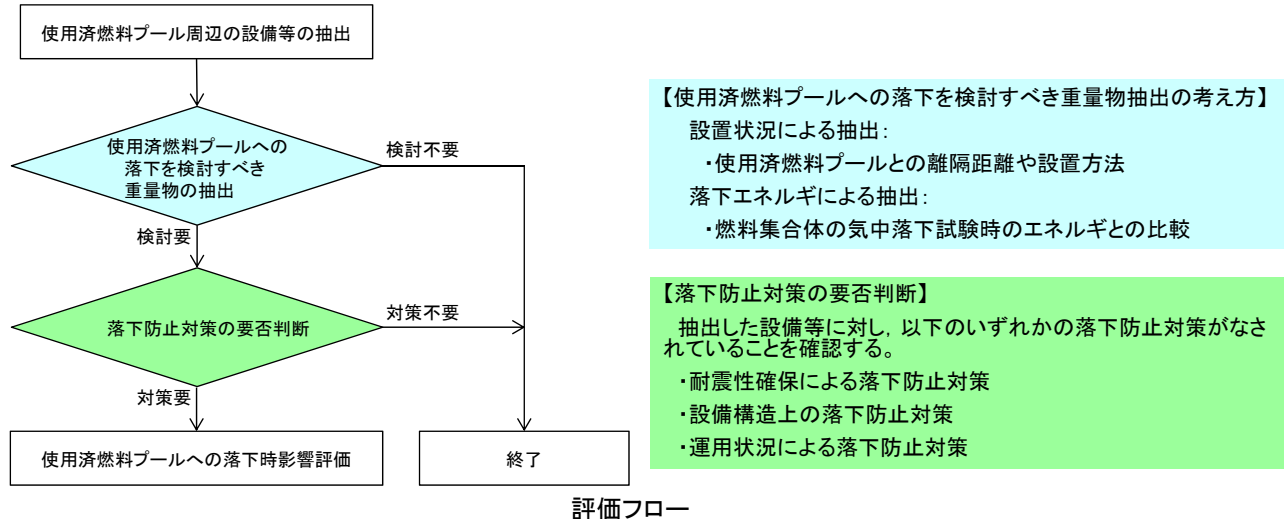
	2005年 宮城県沖地震 2006年 耐震設計審査指針改訂 2007年 新潟県中越沖地震	2011年 東北地方太平洋沖地震 2013年 新規制基準施行	
基準地震動	375ガル	580ガル	1000ガル
耐震対策工事	—	約6600箇所 (3基合計) 事務本館の耐震対策工事 事務新館(免震構造)の新設	約3600箇所 (女川2号機、継続実施中) 緊急時対策所の新設

コメント回答(No.23; 燃料プールへの落下物対策)

コメント内容

No.23: 燃料プールへの塗膜片落下事象があったことから、燃料プール上部からの落下物に対する対策を検討して欲しい。(第5回)
(源栄委員)

- 新規基準においては、使用済燃料プールへ重量物が落下した場合にも、使用済燃料プールの機能が維持されることが要求されており、以下の評価フローに従い、使用済燃料プール周辺の設備等の抽出、使用済燃料プールへの落下を検討すべき重量物の抽出、落下防止対策の要否判断について、網羅的に評価している。
- 評価の結果、対策が必要と判断された設備等に対して、落下防止対策(耐震性評価、設備構造、運用)を行う。
- 耐震性評価による落下防止対策として、燃料交換機、原子炉建屋クレーン、原子炉建屋原子炉棟(屋根トラス等)について、基準地震動 S_s に対して耐震評価を実施し、使用済燃料プールに落下しない設計とする。



コメント回答(No.24; 学会発表等)

コメント内容

No.24: 地震後の健全性評価、改良対策等で、学会のような第三者の評価を受ける場所での公開実績を説明してもらいたい。
(兼本委員)

- 2012年度以降、国内学会だけではなく、国際会議でも、地震後の設備点検状況、3.11地震の観測記録の分析結果やシミュレーション解析結果、耐震補強工事等について積極的に報告・議論するとともに、3.11地震で当社が得た貴重な知見を広く発信している。

①地震後の健全性確認点検

- ・保全学会(第10回学術講演会:2013.7)、保全学会(第6回:2014.5)、保全学会(第2回ICMST, 2014.11)
- ・保全学会(第11回学術講演会:2014.7) ・土木学会(2012) ・電力土木(2012)

②3.11地震に対する建物・構築物の各種シミュレーション解析

- ・WCEE(世界地震工学会議)(第15回:リスボン, 2012.9)(第16回:サンチアゴ, 2017.1)
- ・SMiRT(国際原子力構造力学学会議)(第22回:サンフランシスコ, 2013.8)(第23回:マンチェスター, 2015.8)(第24回:釜山, 2017.8)(第25回:シャーロット, 2019.8)
- ・IAEA work shop(2014.6) ・建築学会(2012~2019) ・土木学会(2012~2013) ・電力土木(2012)

③耐震補強工事

- ・WCEE(世界地震工学会議)(第16回:サンチアゴ, 2017.1) ・建築学会(2013~2016)
- ・電力土木(2017)

④耐震実験

- ・WCEE(世界地震工学会議)(第16回:サンチアゴ, 2017.1)
- ・SMiRT(国際原子力構造力学学会議)(第24回:釜山, 2017.8)
- ・構造工学論文集(2017.3) ・建築学会(2015~2019) ・コンクリート工学会(2017~2019)
- ・保全学会(第13回学術講演会:2016.7)

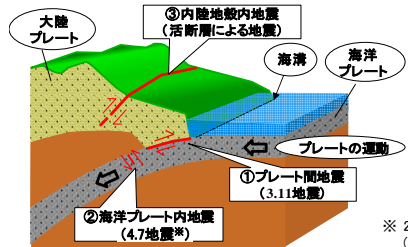
参考資料1 基準地震動Ssの策定

参考資料1 基準地震動Ssの策定

基準地震動Ssの策定(1/2)

➤ 基準地震動Ssの策定にあたっては、敷地における地震観測記録を踏まえて、地震発生様式、地震波の伝播経路等に応じた諸特性を十分に考慮して策定した。

地震の種類		地震動の評価手法	基準地震動	最大加速度(Gal)	
				水平	鉛直
震源を 特定して 策定する 地震動	①プレート間地震	応答スペクトルに基づく評価	Ss-D1	640	430
		断層モデルを用いた評価	Ss-F1	717	393
			Ss-F2	722	396
	②海洋プレート内地震	応答スペクトルに基づく評価	Ss-D2	1000	600
			Ss-D3	800	500
		断層モデルを用いた評価	Ss-F3	835	443
③内陸地殻内地震	Ss-D1, Ss-D2, Ss-D3を下回る				
震源を特定せず策定する地震動		応答スペクトルに基づく評価	Ss-N1	620	320



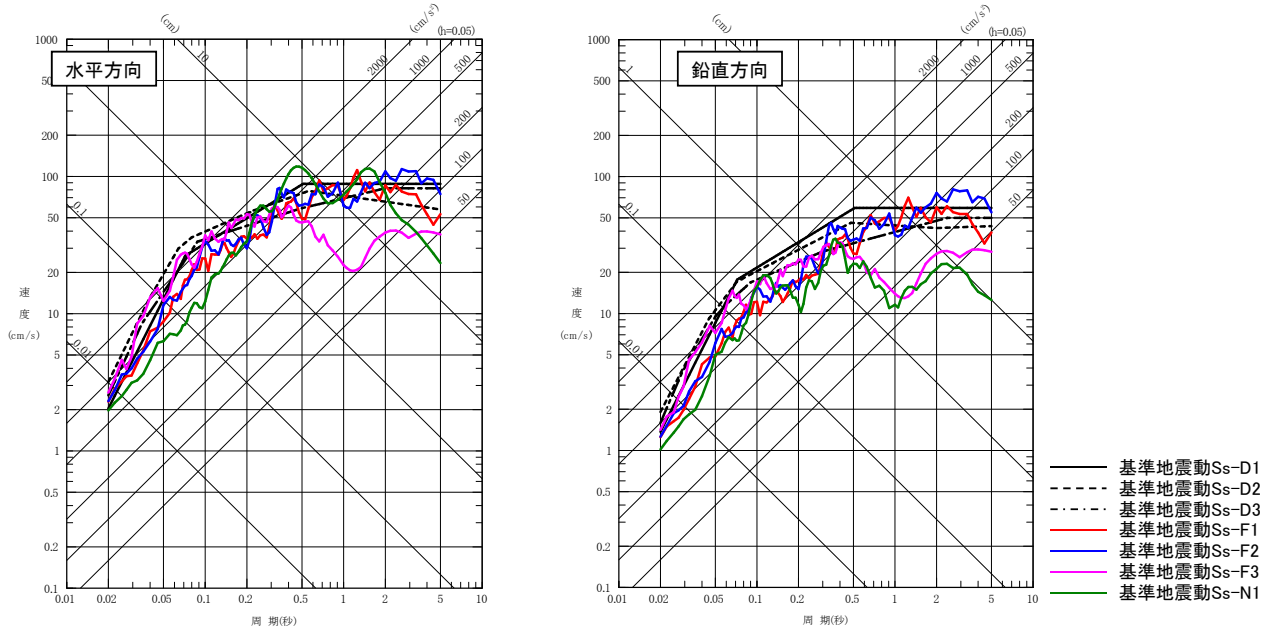
基準地震動Ssの名称について
 Ss-D: Design(デザイン)の略
 Ss-F: Fault model(断層モデル)の略
 Ss-N: Near(近傍)の略

※ 2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2), 以下「4.7地震」という。

[参考] 地震発生様式のイメージ

基準地震動Ssの策定(2/2)

▶ 適合性審査におけるコメントを踏まえ、応答スペクトルに基づく基準地震動Ss-D1～D3, 断層モデルを用いた手法による基準地震動Ss-F1～F3, 震源を特定せず策定する地震動による基準地震動Ss-N1の計7波を策定した。



参考資料2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点(建物・構築物)

b. 屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用

(目的)

- 入力地震動の増大に伴い、屋根トラスの弾塑性挙動を適切に評価する

(適用によって期待する効果)

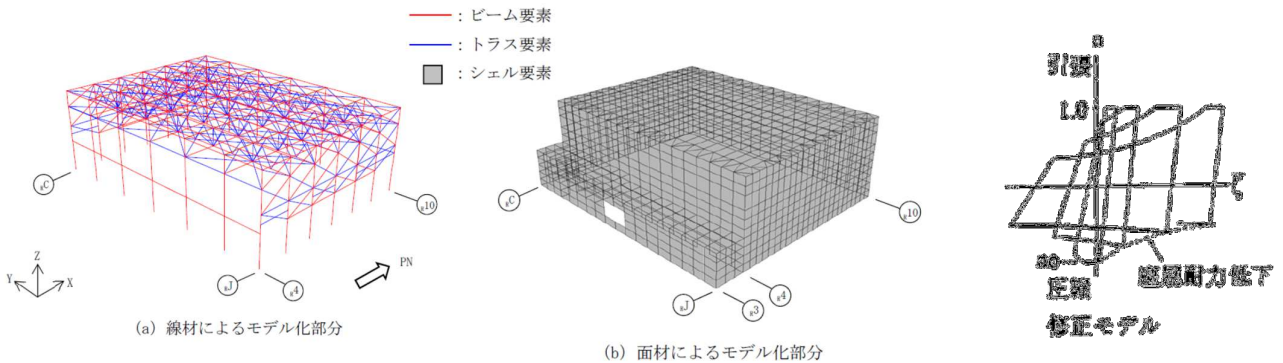
- より実現象に近い詳細な解析モデルにより応力やひずみを適切に評価する

(適合性審査における確認事項)

- モデル化範囲や弾塑性解析で使用する材料構成則の設定等(例:鉄骨部材について、実機の特徴を反映した実験に基づくモデル(修正若林モデル※)を採用)
- 基準地震動Ssに対する耐震安全性評価に対して適用可能なモデルであることを確認

(工事計画認可申請に向けた対応)

- 基準地震動Ssに対して、屋根スラブも含めて屋根トラスの耐震安全性評価を行う



解析モデルの概要

修正若林モデルの弾塑性特性

※修正若林モデル: 谷口ほか: 鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集Vol.37B号, 1991年3月

c. 基礎版の解析モデルへの弾塑性解析の適用

(目的)

- 入力地震動の増大に伴い、入力レベルに応じた構造物の挙動を適切に評価する

(適用によって期待する効果)

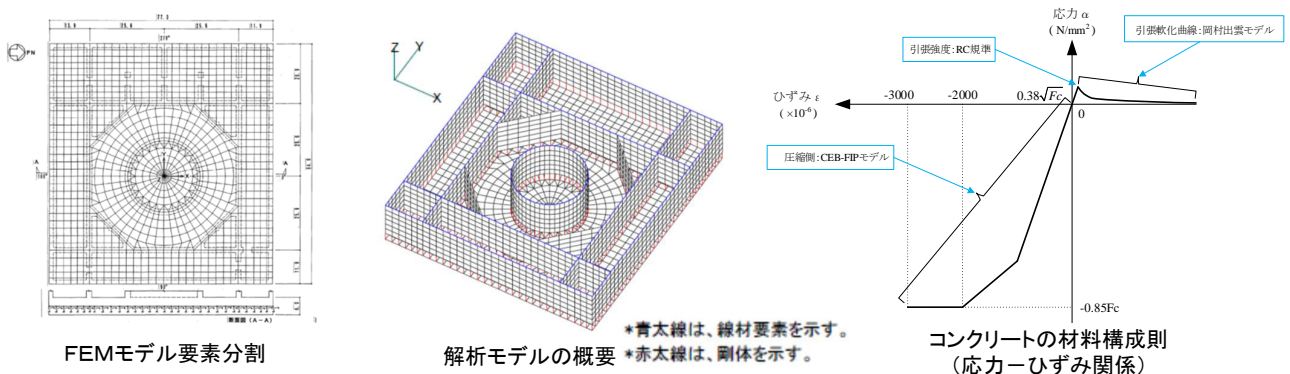
- より実現象に近い詳細な解析モデルにより応力やひずみを適切に評価する

(適合性審査における確認事項)

- モデル化範囲や弾塑性解析で使用する材料構成則の設定等(例:コンクリートの圧縮側についてはCEB-FIPモデル※1, 引張側については岡村・出雲モデル※2, 鉄筋については「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 JSME S NE1-2003」に基づき完全弾塑性型として設定)
- 基準地震動Ssに対する耐震安全性評価に対して適用可能なモデルであることを確認

(工事計画認可申請に向けた対応)

- 基準地震動Ssに対して、初期剛性低下等も考慮して耐震安全性評価を行う



FEMモデル要素分割

解析モデルの概要 *青太線は、線材要素を示す。 *赤太線は、剛体を示す。

コンクリートの材料構成則 (応力-ひずみ関係)

※1 Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE),1993

※2 岡村・出雲モデル: 出雲, 島, 岡村: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9,1987.9

参考資料2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点(土木構造物)

参考資料2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点(土木構造物)

49

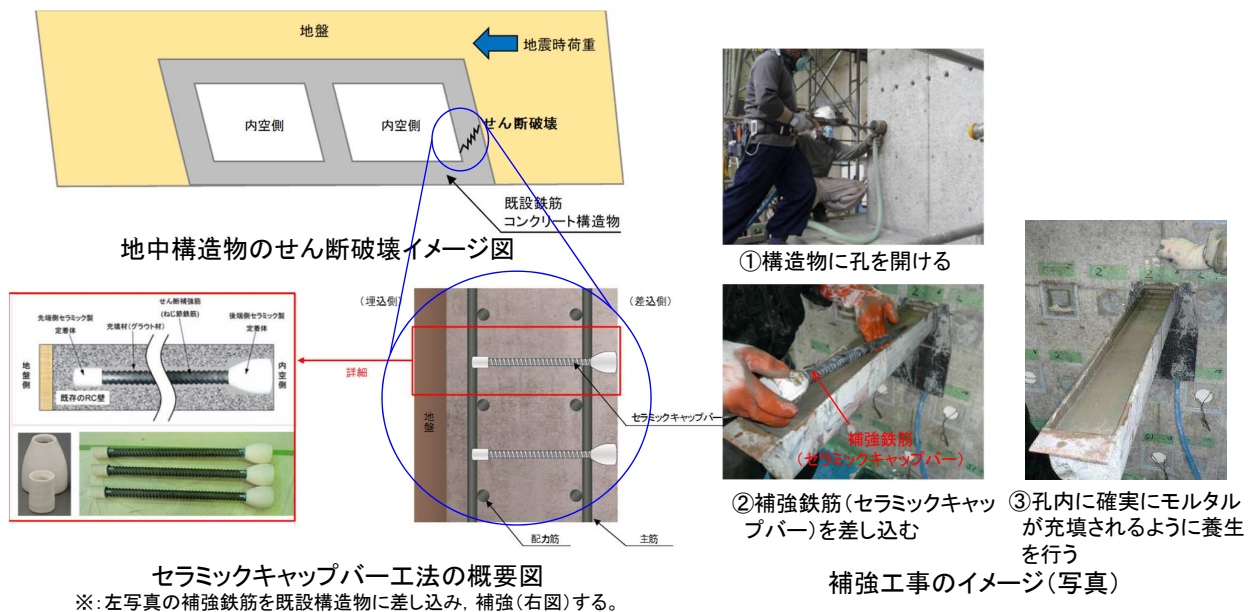
b. 後施工せん断補強工法(セラミックキャップバー工法)の適用(1/2)

(目的)

- 入力地震動の増大(大加速度化)に伴い耐震補強が必要となる土木構造物に対して、耐力を向上できる後施工せん断補強工法(セラミックキャップバー工法)を適用する。

(適用によって期待する効果)

- セラミックキャップバー工法を適用することで、部材の耐力を向上させ、安全性を確保することができる。



b. 後施工せん断補強工法(セラミックキャップバー工法)の適用(2/2)

(適合性審査における確認事項)

- 原子力施設での使用実績がないセラミックキャップバー工法による耐震補強の適用性(女川のような厚い壁への適用性, 3.11地震後の状態への適用性等)について, 建設技術審査証明報告書※の実験結果や厚い壁の数値解析結果等により適用性を確認。

※:セラミックキャップバー工法は, 高度な技術を有する第三者機関である一般財団法人土木研究センターより審査証明を受けており, 建設技術審査証明報告書は, 審査証明の詳細が記載された図書である。

ケース	変形状況	ひび割れ状況	鉄筋降伏状況
従来工法の解析結果 (予めせん断補強を実施)			
セラミックキャップバーの解析結果 (後にせん断補強を実施)			

セラミックキャップバー工法は既設の構造物に補強鉄筋を差し込む工法であるが, 仮に先に補強鉄筋を施した場合との比較を行い, 同等の補強が可能であることを確認(女川2号機の部材の一部を例に解析・比較した結果を例示)

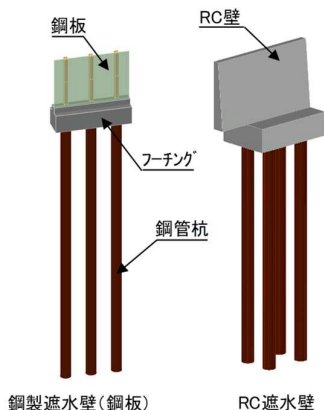
(工事計画認可申請に向けた対応)

- 基準地震動 S_s に対する評価結果から必要に応じて, 後施工せん断補強工法(セラミックキャップバー工法)により耐震補強を行い, 補強効果を見込んだ耐震評価を行う。

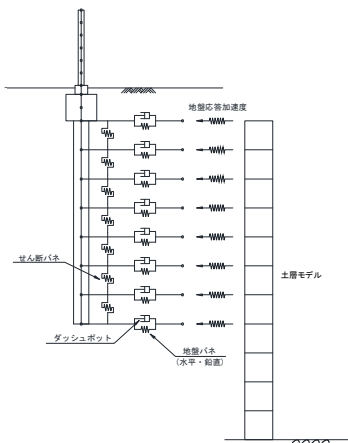
c. 時刻歴応答解析(上部工-下部工(杭)-地盤の連成モデル)を適用した防潮壁の耐震評価(1/2)

(目的)

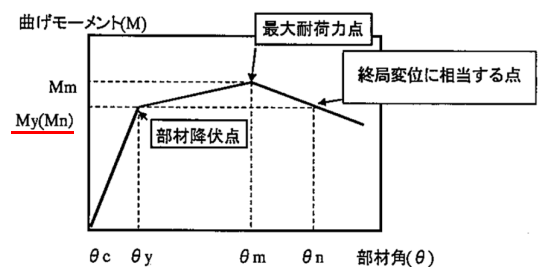
- 2号機及び3号機の取放水路から敷地への津波の流入を防止するため, 敷地内の開口部周辺(海水ポンプ室等)に杭基礎構造の防潮壁を設置する。
- 防潮壁の耐震設計においては, 地震時の挙動を精緻に評価するため, 上部工(遮水壁)-下部工(鋼管杭)-地盤の相互作用を考慮できるモデル(連成モデル)を適用する。
- また, 構造部材の評価においては, 津波防護施設としての機能を保持するために概ね弾性状態に留まることとし, 発生応力が降伏モーメント(M_y)を超えないことを確認する。



防潮壁の構造例



連成モデルの概要
(遮水壁-鋼管杭-地盤)



降伏モーメント(M_y)の概要
(鉄筋コンクリート部材の例)

c. 時刻歴応答解析(上部工—下部工(杭)—地盤の連成モデル)を適用した防潮壁の耐震評価(2/2)

(適用によって期待する効果)

- 防潮壁は、上部工である遮水壁(鋼製又はRC製)を、鋼管杭により岩盤支持する構造である。
- よって、地震時においては、遮水壁に生じる慣性力と鋼管杭に作用する地盤変形の影響により、構造全体系として複雑な挙動を示す可能性があることから、上部工(遮水壁)—下部工(鋼管杭)—地盤を繋ぎ合わせた解析モデル(連成モデル)で耐震評価を行うことで、その動的挙動を適切に評価することが可能である。

(適合性審査における確認事項)

- 本手法は、日本電気協会の技術規程等に準拠した手法であるが、他プラントを含む既工認及び新規制基準審査での適用例はない。
- よって、本手法を用いることの妥当性を確認するため、構造物のモデル化方法の比較(質点系モデル、3次元薄層要素法)を行い、両者の応答(部材に発生する変位、加速度等)が概ね一致することを確認した。

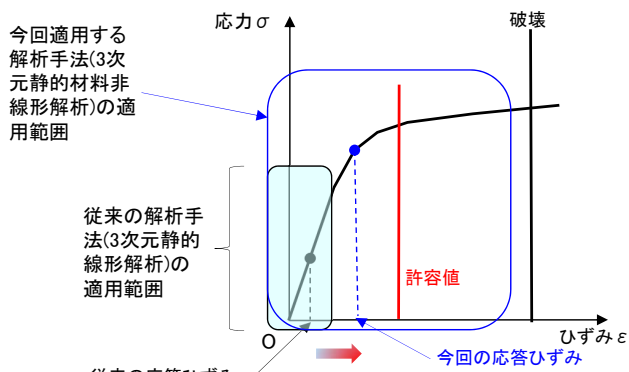
(工事計画認可申請に向けた対応)

- 基準地震動 S_s の地震応答に対し、本手法を用いて、防潮壁の安全性評価を行う。

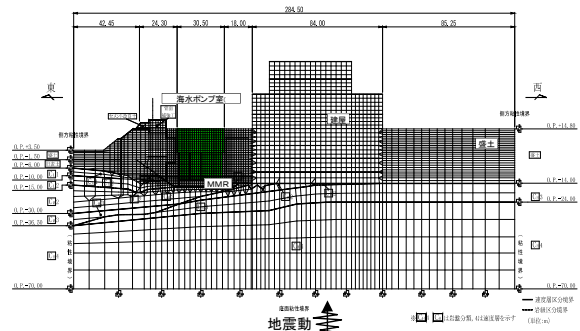
d. 3次元静的材料非線形解析を適用した海水ポンプ室他の耐震評価(1/2)

(目的)

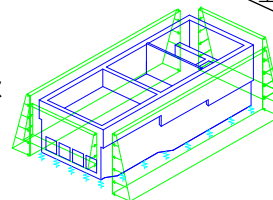
- 入力地震動の増大(大加速度化)に伴い、構造物が非線形性を示すレベルとなることから、海水ポンプ室他の複雑な箱型構造物の地震時の挙動を精緻に再現するため3次元静的材料非線形解析を適用する。



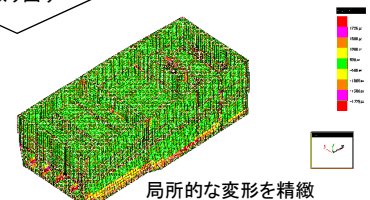
入力地震動の増大(大加速度化)に伴う構造物の非線形性の考慮(イメージ)



地震応答解析により地震時の荷重を取り出す



3次元静的材料非線形モデルへ荷重を載荷(海水ポンプ室の例)



3次元静的材料非線形解析結果(地震後のひずみ分布の例)

局所的な変形を精緻に表現できる

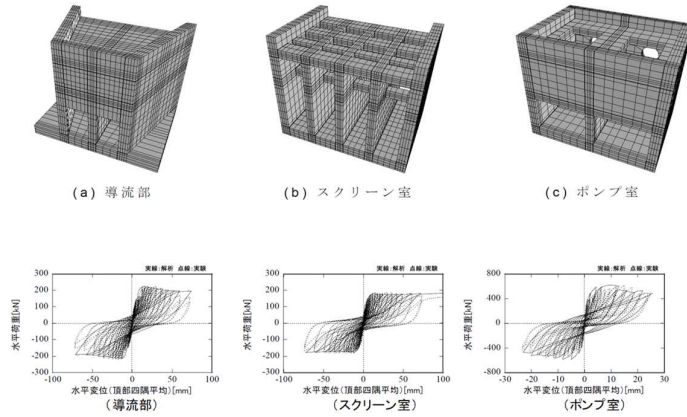
d. 3次元静的材料非線形解析を適用した海水ポンプ室他の耐震評価(2/2)

(適用によって期待する効果)

- 3次元静的材料非線形解析を適用することで、海水ポンプ室のような複雑な構造の鉄筋コンクリート構造物の各材料(鉄筋、コンクリート)のひずみ等を精緻に評価できるため、構造的弱点を詳細に把握し、合理的な耐震補強対策が可能となる。

(適合性審査における確認事項)

- 実験と本解析手法との比較や論文等から得られる知見から、3次元静的材料非線形解析の女川2号機の土木構造物への適用性について確認。



実験と3次元静的材料非線形解析の比較による解析の妥当性確認※

※: 宮川義範: 頂部の沈下と部材の厚さ方向の膨張に着目した鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性評価, 東京大学学位論文, 2015

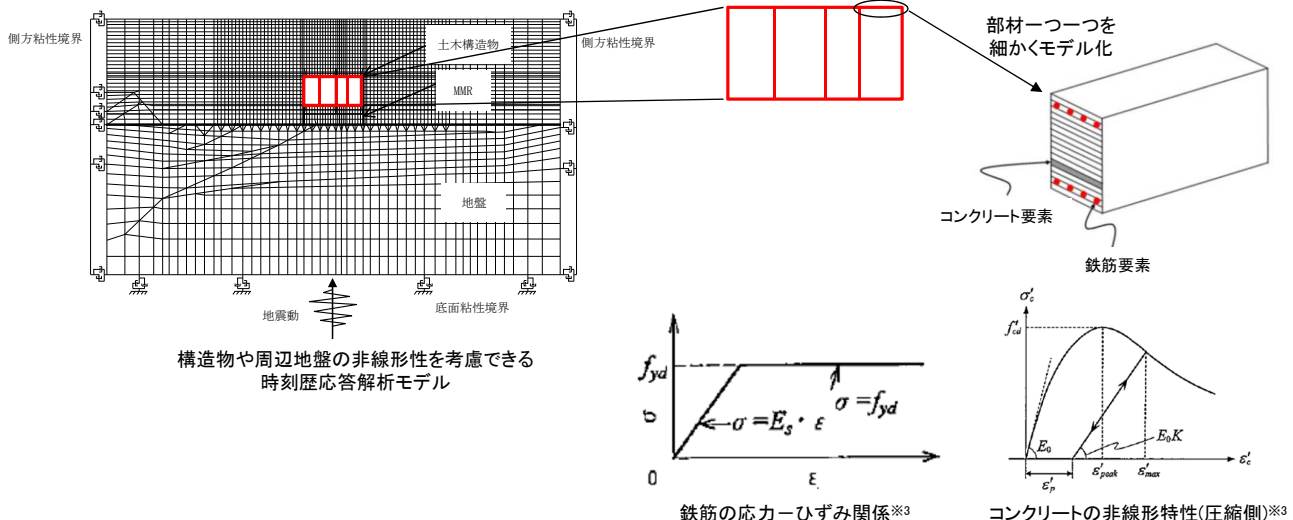
(工事計画認可申請に向けた対応)

- 基準地震動 S_s に対し3次元静的材料非線形解析を用いた詳細な評価により耐震安全性を確認していく。

e. 限界状態設計法の適用, 時刻歴応答解析(全応力解析)等の適用(1/2)

(目的)

- 入力地震動の増大(大加速度化)により構造物や周辺地盤が従来より非線形化(大きな変形)することから、これらの状況をより精緻に再現できる時刻歴応答解析(2次元動的な非線形解析)※1を適用する。
 ※1 時刻歴応答解析を用いるにあたり、非線形の程度に応じた減衰(履歴減衰)を考慮する。
- また、時刻歴応答解析の適用に併せて、構造物の大きな変形時にも適用可能な限界状態設計法(曲げ系の破壊: 層間変形角, せん断破壊: せん断耐力)による評価を行うことで安全性を確認する。※2
 ※2 なお、平面ひずみ要素でモデル化した無筋コンクリート構造物の安全性は、コンクリートをモデル化した要素に発生する応力が引張強度又はせん断強度を超えないことを確認する。



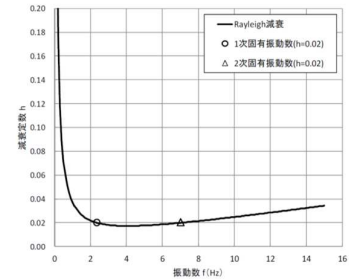
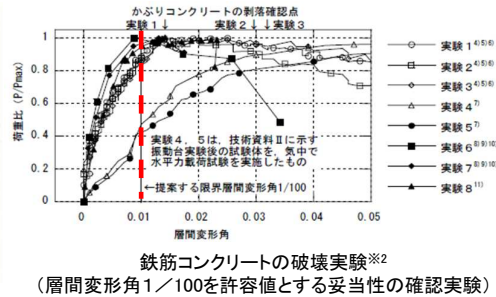
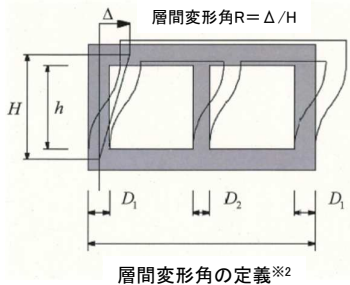
鉄筋の応力-ひずみ関係※3 コンクリートの非線形特性(圧縮側)※3

※3: コンクリート標準示方書[設計編](土木学会, 2012年制定)

e. 限界状態設計法の適用, 時刻歴応答解析(全応力解析)等の適用(2/2)

(適用によって期待する効果)

- 構造物や周辺地盤の非線形性を考慮した時刻歴応答解析^{※1}を適用することで, 構造物や周辺地盤の大きな変形に対して精緻な解析をすることができる。
 ※1 時刻歴応答解析を用いるにあたり, 非線形化の程度に応じて計算安定用のRayleigh減衰を適用する。
- 精緻な解析を行うことにより, 構造物の挙動を正しく把握できるため, 精度の高い耐震評価が可能となる。



限界状態の設定例(実験結果から設定)

※2 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル(土木学会, 2005)に加筆

(適合性審査における確認事項)

- 時刻歴応答解析や限界状態設計法は, 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル(土木学会, 2005)に則った手法であり, 女川2号機における本手法の適用性を確認。

(工事計画認可申請に向けた対応)

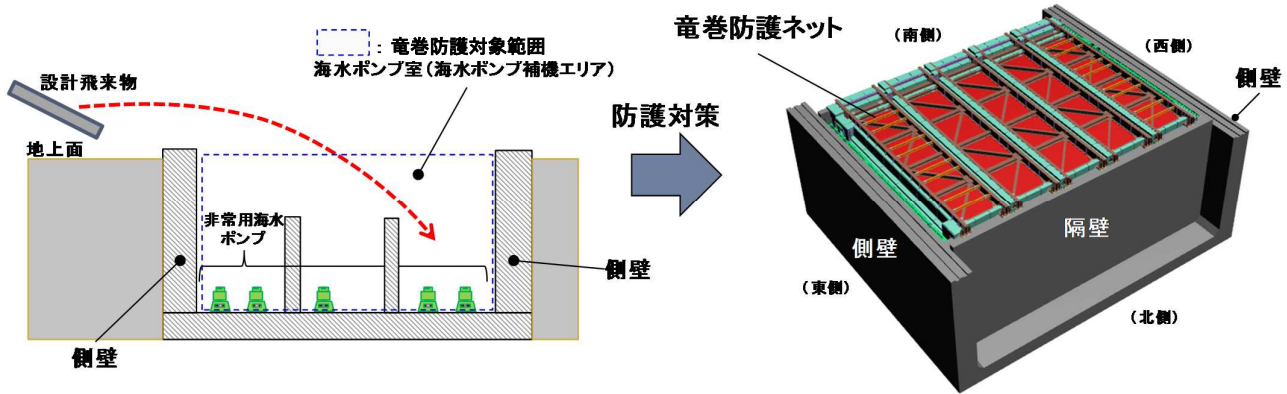
- 基準地震動 S_s の地震応答に対し, 本手法を用いて構造物の耐震安全性評価を行うことにより大きな変形に対する評価を確実に実施する。

参考資料2 女川2号機の耐震設計に係る適合性審査の論点(機器・配管系)

b.竜巻防護ネットへのゴム支承の適用(1/3)

(目的)

- 海水ポンプ室に設置している安全上重要な機器(非常用海水ポンプ等)を竜巻発生時の飛来物から防護するために、竜巻防護ネットを設置する。
- 竜巻防護ネットは、安全上重要な機器の上部に設置することから、地震時の損傷や落下による波及的影響を防止するため、基準地震動 S_s に対して落下しない設計が要求される。
- 竜巻防護ネットは、海水ポンプ室を覆う大型の構造物であり重量が大きいことから、地震時に発生する荷重を抑制するため、ゴム支承などの支承構造を採用する。



竜巻防護ネットの概要

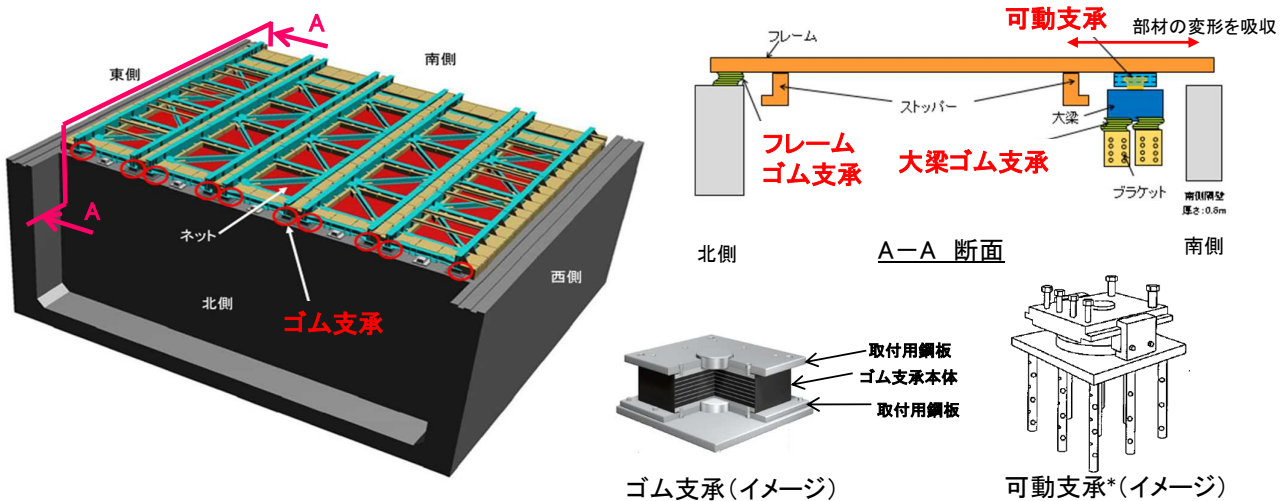
b.竜巻防護ネットへのゴム支承の適用(2/3)

(適用によって期待する効果)

- ゴム支承※1という支承構造を採用することで、竜巻防護ネット構造全体の地震時の揺れをやや長周期化することで、地震の揺れによる荷重を低減する。
- 可動支承※2という支承構造を採用することで、竜巻防護ネットが日光の照射などで部材が熱伸びした場合の変形を吸収することで、過大な力の発生を抑制する。

※1 橋梁等で多数の採用実績があり、地震時にゴムが変形することで地震力を低減させる効果のある支持構造

※2 橋梁等で多数の採用実績があり、1方向についてのみ自由に移動が可能となっている支持構造



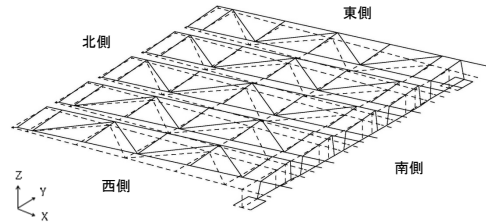
b. 竜巻防護ネットへのゴム支承の適用(3/3)

(適合性審査における確認事項)

- ゴム支承および可動支承という支承構造を適用した場合の構造の成立性について、暫定の地震荷重条件に対して十分な強度を有しているかなどを説明している。
- 詳細設計段階の耐震設計では、保守性を考慮し、地震応答の不確かさや製品のばらつきなどがあっても、地震に対して十分な強度を有した設計とすることを説明している。
- 特に、支承部の設計に当たっては、既往の知見の調査や当社独自でゴム支承の物性試験を実施するなどして、設計内容の妥当性について十分な確認を行っていることを説明している。

主要モードの固有周期

主要モード	固有周期 (秒)
大梁 水平X方向1次	0.50
大梁 水平Y方向 1次	0.86
大梁 鉛直Z方向 1次	0.34
フレーム 水平X方向 1次	0.77
フレーム 水平Y方向 1次	0.43
フレーム 鉛直Z方向 1次	0.29



モード図の例(大梁水平Y方向1次)

(工事計画認可申請に向けた対応)

- 竜巻防護に対する詳細設計も反映し、基準地震動 S_s に対しても十分な構造強度を有し、安全上重要な機器への波及的影響を防止できることを評価する。
- 詳細設計段階では、試験等で得られたデータを活用し、保守性を考慮する。

c. 一定の余裕を考慮した弁の動的機能維持評価

(目的)

- 新規基準(工認審査ガイドの改正)を踏まえ、弁の動的機能維持評価については、当該機器を支持する配管系の地震応答の影響を考慮し、一定の余裕を見込んだ評価を行う。

(適合性審査における確認事項)

- 弁の動的機能維持評価については、先行プラントでの審査進捗(新規基準)を考慮し、女川2号機においても、これまでの評価に対して一定の余裕を見込むことの評価方針を説明している。

配管系の固有周期	これまでの評価	今回の評価
剛の場合※1	最大応答加速度を適用	最大応答加速度を1.2倍した値を適用
柔の場合※1	スペクトルモーダル解析により算出した弁駆動部の応答を適用	スペクトルモーダル解析により算出した弁駆動部の応答※2又は最大応答加速度を1.2倍した値のいずれか大きい方を適用

※1 配管系の固有周期が20Hz以上は「剛」、20Hz未満は「柔」と判定し、「剛」の場合は最大応答加速度を用いた静的解析を行い、「柔」の場合は、建物・構築物と共振するおそれがあるため、動的解析(スペクトルモーダル解析)を行う。

※2 スペクトルモーダル解析を実施する場合、高振動数領域(20Hz以上)の振動モードまで考慮した地震応答解析を実施する。

(工事計画認可申請に向けた対応)

- 基準地震動 S_s に対して動的機能維持が要求される弁の耐震性が確保されることを評価する。

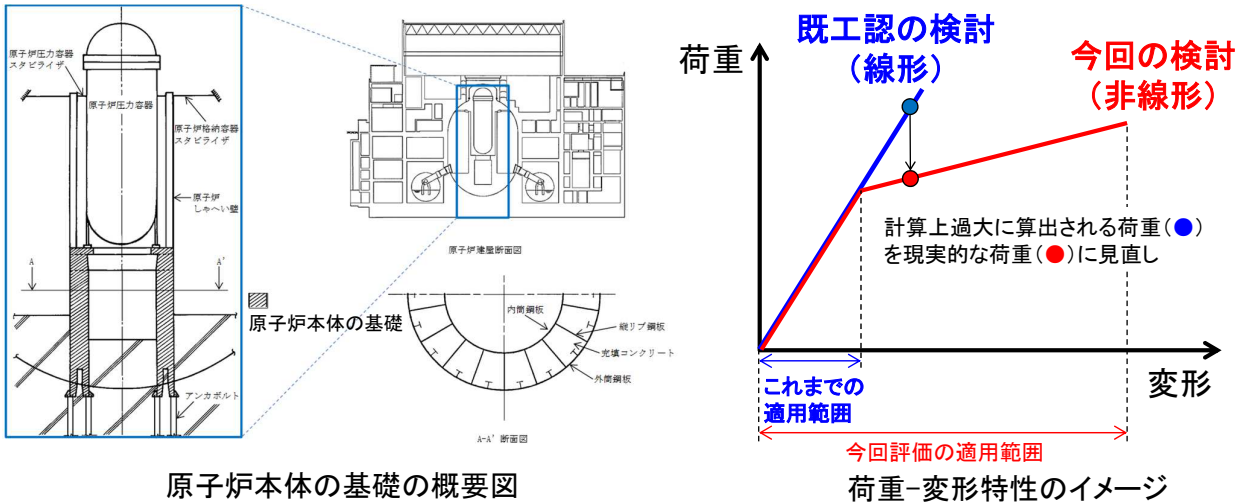
d. 原子炉本体の基礎の復元力特性の変更(1/2)

(目的)

- 原子炉本体の基礎の復元力特性(荷重を受けたときの变形特性)については、既工認の地震応答が線形範囲のため、線形特性としていたが、新規制基準での地震動レベルの増大を踏まえ、実態に合わせた非線形特性を考慮する。

(適用によって期待する効果)

- 既工認の検討(線形)の場合、原子炉本体の基礎に地震荷重を過度に作用させることになるが、非線形特性を考慮することで、実態に合った評価をすることができる。



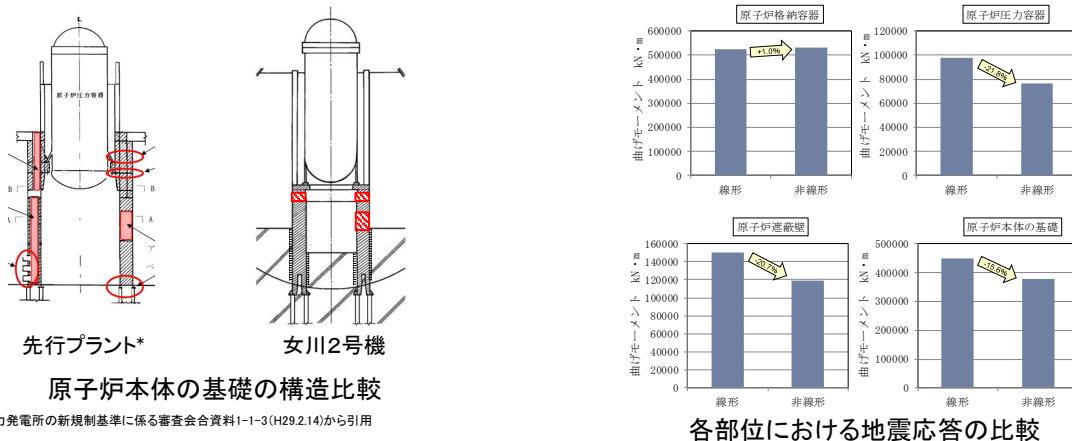
原子炉本体の基礎の概要図

荷重-変形特性のイメージ

d. 原子炉本体の基礎の復元力特性の変更(2/2)

(適合性審査における確認事項)

- 他社プラントでの審査実績(新規制基準)があるため、女川2号機との構造特徴の差異などを踏まえた追加検討を行い、女川2号機の原子炉本体の基礎に非線形特性を適用することが妥当であることを説明している。
- 非線形特性の適用した場合の地震応答解析を行い、女川2号機の主要な設備の構造成立性について説明している。



原子炉本体の基礎の構造比較

各部位における地震応答の比較

* 第442回原子力発電所の新規制基準に係る審査会合資料1-1-3(H29.2.14)から引用

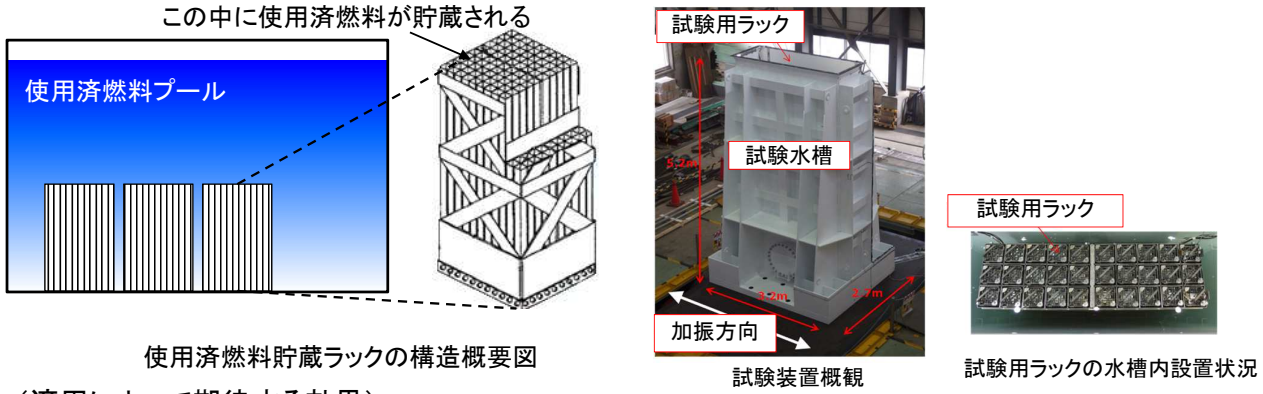
(工事計画認可申請に向けた対応)

- 詳細設計段階では、地震応答解析に係るばらつき(コンクリートの剛性など)、重大事故時の環境(周辺温度など)を考慮した評価を実施する。

e. 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の変更(1/2)

(目的)

- 既工認の使用済燃料貯蔵ラックに対する耐震設計では、保守的な扱いとして、気中条件での設計用減衰定数(溶接構造物:1.0%)を用いていたが、実際の使用済燃料貯蔵ラックは、水中環境下に設置されているため、水の抵抗等による大きな減衰効果があると考えられる。
- 新規基準に伴う使用済燃料貯蔵ラックの耐震設計では、水中環境下での実物大加振試験結果を踏まえ、より実際に合った設計用減衰定数を適用する。



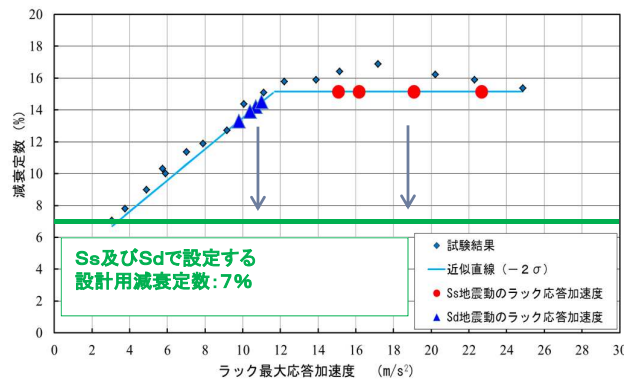
(適用によって期待する効果)

- 地震時の使用済燃料ラックは、使用済燃料ラック及び燃料集合体が水中を振動すること、使用済燃料ラックと燃料集合体が摩擦することなどにより、運動エネルギーが消散するため、大きな減衰効果が得られ、より実態にあった地震荷重を評価することができる。

e. 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の変更(2/2)

(適合性審査における確認事項)

- 水中環境下での実物大加振試験結果によって得られた使用済燃料ラックの減衰定数の妥当性、実機への適用性について説明している。
- 使用済燃料ラックの減衰定数は、保守性を考慮し、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の耐震設計に用いる設計用減衰定数として、7.0%を適用することを説明している。



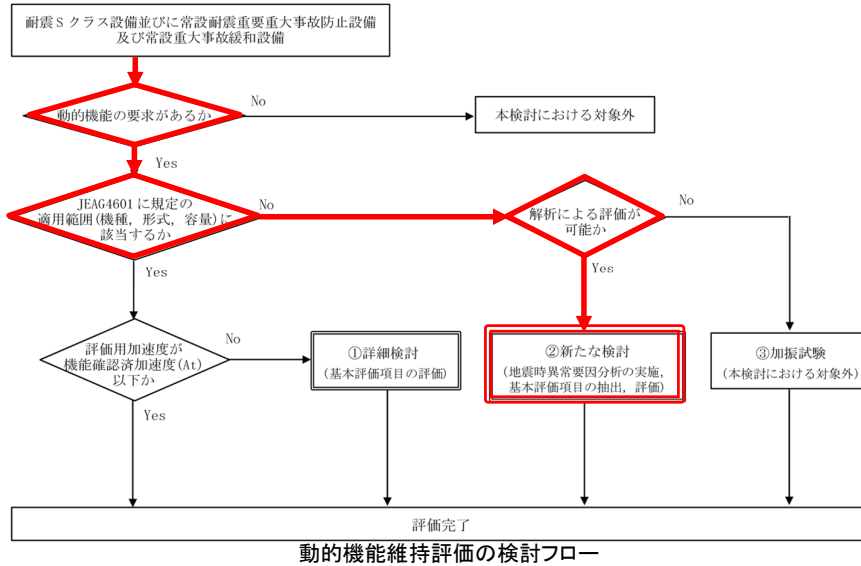
(工事計画認可申請に向けた対応)

- 詳細設計段階では、基準地震動 S_s の地震応答解析におけるばらつき条件(建屋コンクリート剛性など)を考慮した地震荷重に対して、使用済燃料ラックの耐震性が確保されることを評価する。

f. 規格適用範囲外の動的機能維持評価の実施(1/2)

(目的)

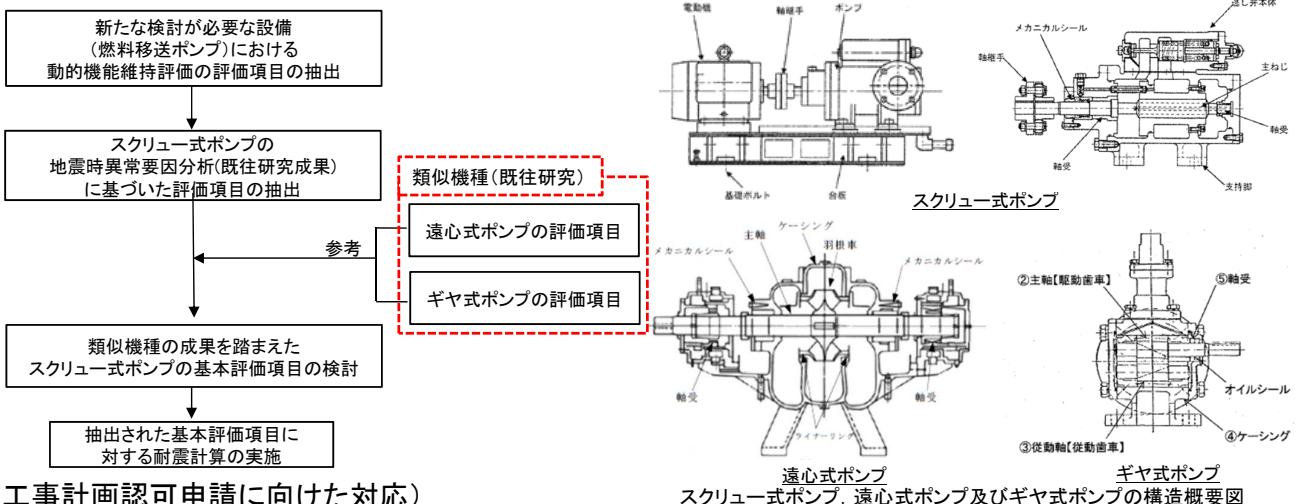
- 地震時又は地震後に動的機能が要求される設備(ポンプ, ファン, 弁など)については, 規格基準(原子力発電所耐震設計技術指針: JEAG4601)に基づき, 動的機能が維持されることを評価する。
- JEAG4601の適用範囲に該当しない場合, 解析による評価の可否によって検討方法が分類され, 新たな検討として既往研究の知見などを踏まえた評価又は, 加振試験(適合性審査の論点外)により動的機能が維持されることを確認する。



f. 規格適用範囲外の動的機能維持評価の実施(2/2)

(適合性審査における確認事項)

- 燃料移送ポンプは, 新たな検討として既往研究の知見などを踏まえた評価を実施しており, ポンプ型式(スクリー式ポンプ)を考慮し, 類似機種である遠心式ポンプおよびギヤ式ポンプの既往研究の知見(評価項目)と比較・検討し, 抽出したスクリーポンプの動的機能に係る評価項目の妥当性について説明している。
- なお, 燃料移送ポンプ(スクリー式ポンプ)の動的機能に係る評価項目は, 類似機種である遠心式ポンプおよびギヤ式ポンプと同様となった。



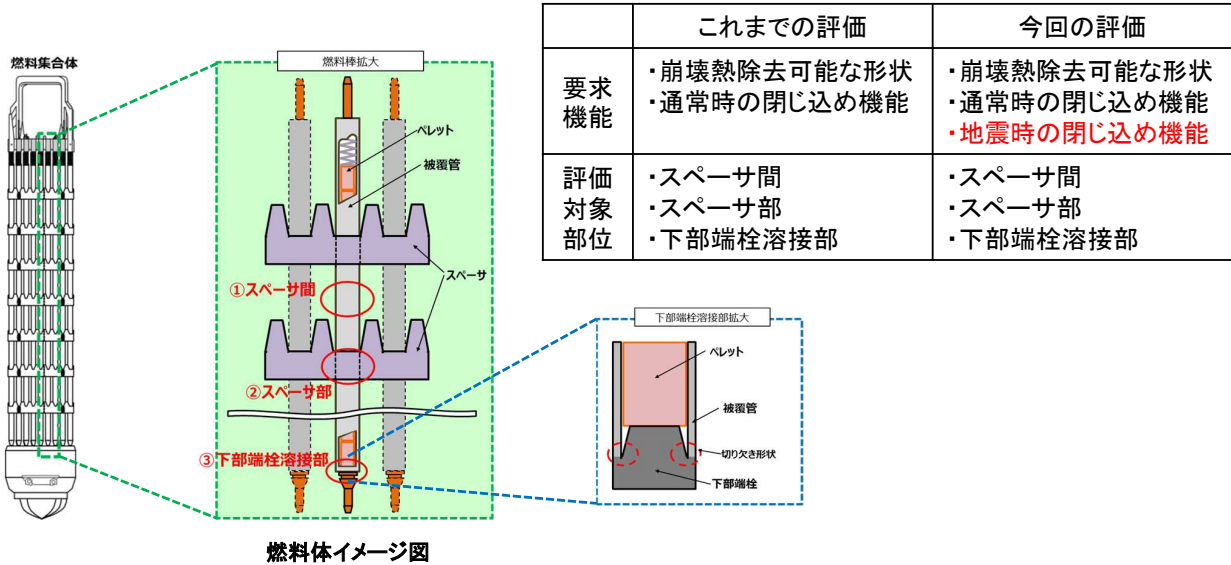
(工事計画認可申請に向けた対応)

- 詳細設計段階では, 基準地震動 S_s の地震応答解析におけるばらつき条件(建屋コンクリート剛性など)を考慮した地震荷重に対して, 燃料移送ポンプの動的機能が維持されることを評価する。

g. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持(1/2)

(目的)

- 新規基準の追加要求事項を踏まえ、これまでの評価に加えて、地震時の燃料被覆管に対する閉じ込め機能の評価を実施する。



g. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持(2/2)

(適合性審査における確認事項)

- 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価方法の妥当性、暫定の地震荷重条件に対する評価結果として、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能が維持される見通しであることを説明している。

<通常運転時及び異常な過渡変化時>

- 被覆管温度・燃料棒内圧
- 被覆管寸法 等

<地震時>

地震動(燃料集合体の応答)

応力評価

(Sdを考慮)一次応力+二次応力 \leq Sy
(Ssを考慮)一次応力+二次応力 \leq Su

疲労評価

(地震動考慮)疲れ累積係数 $<$ 1.0

【暫定評価結果】

応力設計比の最大値:0.73
(1.0以下が弾性応答範囲)

地震による疲れ累積係数の最大値:0.011
(1.0以下が疲れ累積係数の許容範囲)

燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価フロー

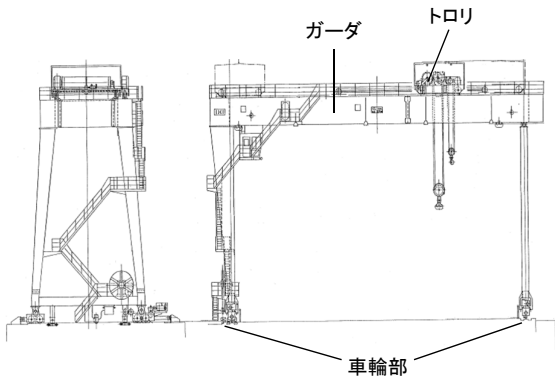
(工事計画認可申請に向けた対応)

- 詳細設計段階では、基準地震動Ssの地震応答解析におけるばらつき条件(建屋コンクリート剛性など)を考慮した地震荷重に対して、燃料被覆管の耐震性が確保されることを評価する。
- 鉛直地震動による燃料の浮上りによる影響を確認する。

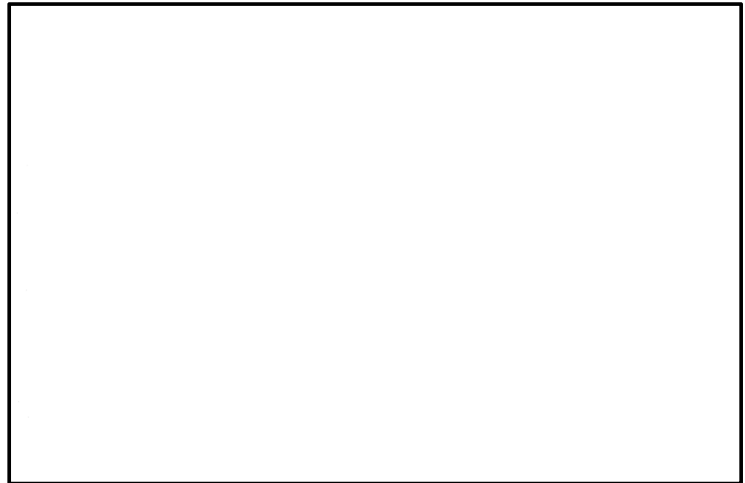
h. 海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用(1/2)

(目的)

- 海水ポンプ室門型クレーンは、Sクラス施設の非常用海水ポンプ室上部を跨いで使用する設備であることから、Sクラス施設への波及的影響を防止するため、基準地震動 S_s に対して落下しない設計が要求される。
- 新規制基準に伴う海水ポンプ室門型クレーンの耐震設計では、基準地震動 S_s による浮き上がりや構造特徴を踏まえた詳細な解析が必要となるため、原子炉建屋クレーンで適用実績のある、浮き上がりやすべりを考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を適用する。



海水ポンプ室門型クレーン構造図



海水ポンプ室門型クレーン設置位置概要

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

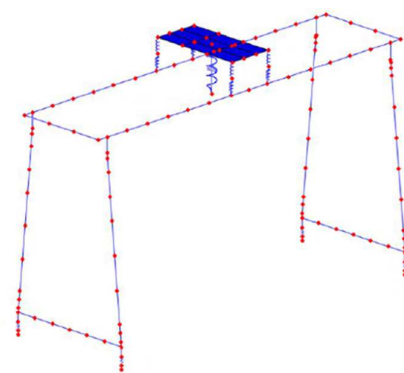
h. 海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用(2/2)

(適合性審査における確認)

- 他社プラントでの審査実績(旧規制)があるため、女川2号機との構造や評価手法の差異を比較・検討し、女川2号機海水ポンプ室門型クレーンに対して、非線形時刻歴解析を適用することの妥当性を説明している。

項目	先行他社クレーン	女川2号機海水ポンプ室門型クレーン	
構造比較	構造概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2本のレール間を跨ぐ構造 ・ ガーダ上にトロリを設置 ・ 車輪を介してレール上に設置 	同左
	主要構造物	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガーダ ・ サドル ・ トロリ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガーダ ・ サドル ・ トロリ ・ 脚
	構造形状	<ul style="list-style-type: none"> 鋼構造物(炭素鋼) 溶接構造物 	同左
評価手法比較	解析手法	非線形時刻歴応答解析	同左
	解析モデル	3次元FEM解析モデル	同左
	車輪-レール間の境界条件	すべり、浮上がり、衝突考慮	同左

他社プラントとの比較検概要



女川2号機海水ポンプ室門型クレーンの解析モデル

(工事計画認可申請に向けた対応)

- 詳細設計段階では、基準地震動 S_s に対する海水ポンプ室の地震応答解析結果を踏まえ、海水ポンプ室門型クレーンの耐震性を評価する。

参考資料3 東北地方太平洋沖地震等を踏まえた反映事項

参考資料3 東北地方太平洋沖地震等を踏まえた反映事項

東北地方太平洋沖地震等を踏まえた反映事項

(反映事項の検討方法, 地震後の設備健全性確認の結果)

- ▶ 東北地方太平洋沖地震等による損傷が地震応答解析及び構造強度評価に影響を与える場合, 耐震設計への反映が必要となるため, 施設が地震影響によって損傷(変形, 割れなど)し, 補修・取替等が困難で, その状態のまま再使用する場合を整理する。
- ▶ 設備点検および地震応答解析の結果, Sクラス設備に地震による損傷はなく, 地震応答は弾性応答範囲内であることを確認した。また, 異常を確認したB, Cクラス設備は, 取替, 補修等により原形復旧するため, 地震による損傷は残らない。
- ▶ 原子炉建屋は, 地震による異常はなかったものの, 建屋の観測記録および建屋シミュレーションの結果, 初期剛性低下が確認された。

(反映事項の検討結果)

- ▶ 機器・配管系の設備健全性確認の観点からは, 耐震設計へ反映すべき事項はないが, 建屋の乾燥収縮及び地震による影響の観点からは, 機器・配管系の耐震設計について, 建屋初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルを反映する。なお, 疲れ累積係数による疲労評価を実施する場合は, 許容限界に対して余裕があることに留意する。

