

女川原子力発電所2号炉 緊急時対策所の建屋構造変更について

平成30年5月8日
東北電力株式会社

審査会合での指摘事項(一覧)

番号	審査 会合日	項 目	説明資料(回答頁)
22	H29.10.26	緊急時対策所を免震構造から耐震構造に方針を変更しているが、その経緯を提示すること。	資料全般の見直し
81	H30. 3. 6	設備見直し理由について、記載を適正化すること。	記載を適正化(p15,16)
82	H30. 3. 6.	資料全体の構成を時系列と合うように見直すこと。	資料全般の見直し
83	H30. 3. 6	3.11, 4.7地震※の知見から、メリット及びデメリットを整理すること。	記載の修正(p6,20,21)
84	H30. 3. 6	構造成立性の当初検討の詳細を示すこと。	頁を追加(p9-14)
85	H30. 3. 6	将来的な余裕を考慮することの必要性を示すこと。	記載を追加(p23)

※3.11地震:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震, 4.7地震:平成23年4月7日宮城県沖の地震(以下, 同様)

目次

1. 設計方針の変遷の概要
2. 申請時の方針
3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討
 - (1) 免震重要棟の当初検討
 - (2) 建屋設計条件の見直し
 - (3) 建屋設計条件の見直しの影響
 - (4) 建屋構造の特徴の比較
 - (5) 検討結果
4. まとめ

1. 設計方針の変遷の概要

(1) 申請時の方針 (H25.12)

女川原子力発電所2号炉の緊急時対策所は、3号炉建屋内に設置することとしていた。

免震重要棟については、将来設置としており、別途許認可申請を行い、設置後に緊急時対策所を3号炉建屋内から移設することとしていた。

(2) 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討 (～H27.9)

3号炉建屋内への設置を取り止め、当初から重要棟内に設置する計画に変更することとしたため、重要棟を今回の申請に含めることとした。

その際、それまでの緊急時対策所に係る議論を踏まえ、検討を行った結果、免震構造から耐震構造へ変更することとした。

(3) 現在の状況 (～現在)

耐震構造に変更し、その後の緊急時対策所の設計条件に係る各項目の審査状況を確認し、必要に応じて設計に反映している。

1. 設計方針の変遷の概要

緊急時対策所の設計方針に係る主な経緯

時 期	経 緯
平成25年12月	女川原子力発電所2号炉の設置変更許可を申請 ・緊急時対策所を3号炉建屋内に設置 ・将来的に設置予定の免震重要棟に移設
平成27年2月	審査会合で当初申請内容を説明
平成27年9月	以下の方針を社内決定 ・3号炉建屋への設置を取り止め、将来設置としていた重要棟に一本化 ・重要棟を免震構造から耐震構造に変更
平成28年3月	審査会合で以下を説明 ・3号炉建屋内の設置を取り止め、将来設置としていた重要棟に一本化
平成28年4月	審査会合で以下を説明 ・重要棟を免震構造から耐震構造に変更
平成28年12月	審査会合で以下を説明 ・基準地震動Ss-D2(海洋プレート内地震)の見直し(当初申請Ss-2から見直し) ・基準地震動Ss-F1,F2(プレート間地震),D3(海洋プレート内地震)を追加 ・基準地震動Ss-N1(震源を特定せず策定する地震動)を追加
平成29年8月	審査会合で以下を説明 ・基準地震動Ss-D1(プレート間地震)の見直し(当初申請Ss-1から見直し) ・基準地震動Ss-F3(海洋プレート内地震)を追加

2. 申請時の方針

女川原子力発電所では、3.11／4.7地震時、免震構造の事務建屋（事務新館：竣工前）と耐震構造の事務建屋（事務本館・別館：耐震補強済み）があり、それぞれの地震を経験している。

地震後の確認において、どちらの事務建屋も構造的な被害はなく、居住性としても特に問題はなかったことから、新規制基準に適合する緊急時対策所の建屋構造としては、どちらでもその有効性には問題ないとの認識であった。（p6,7参照）

申請時には、以下の点で免震構造に優位性があるものと考えていた。

○機器について、一般汎用品を採用できる可能性がある。※

○耐震構造の主要建屋との、構造的な多様性を図ることができる。

※建屋の水平方向の揺れを大幅に低減できることから、一般汎用品でも、基準地震動に対する機能維持が可能となり、従来から原子力設備として実績のある機器に限らず、採用の選択肢を拡げられると考えていた。

また、地震時の機能維持の説明については、構造強度計算によらずとも、加振試験での検証により構造強度評価が可能と考えていた。

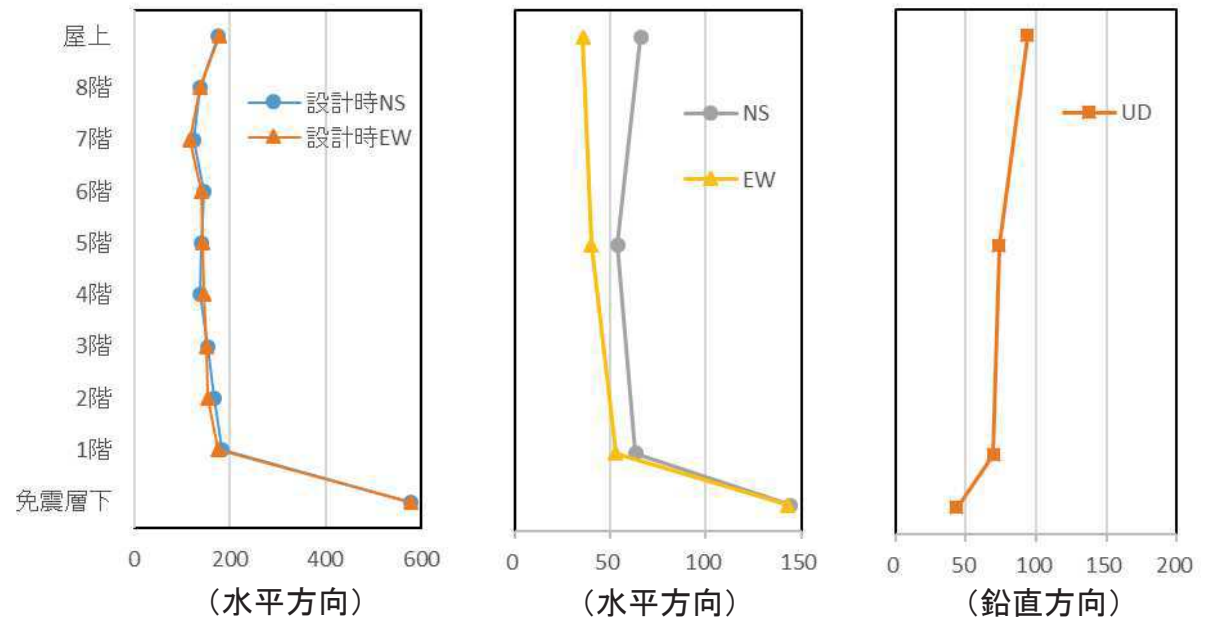
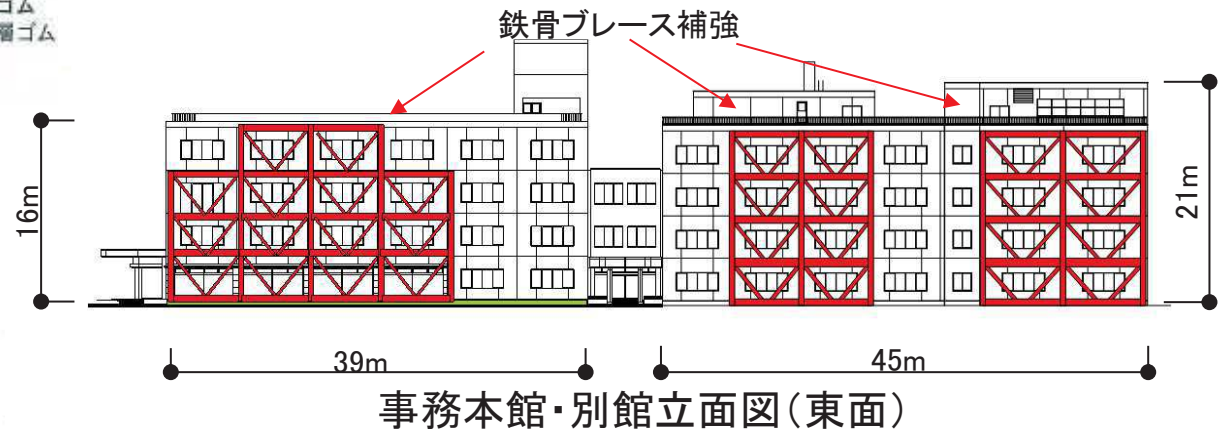
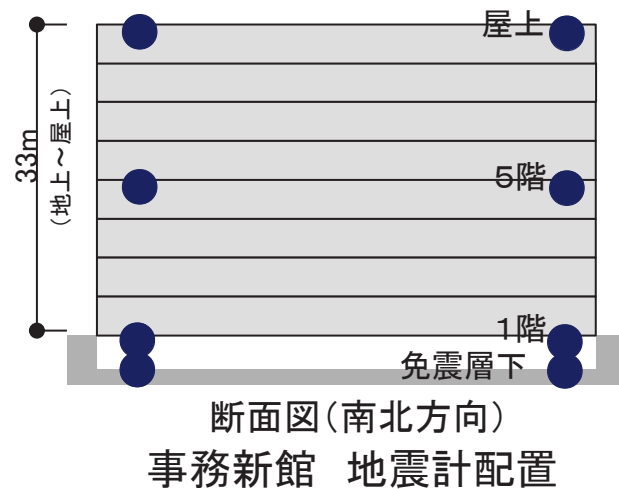
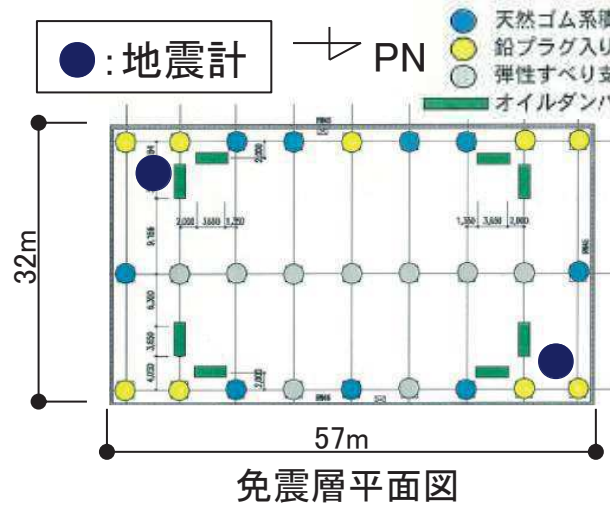
2. 申請時の方針

3.11 / 4.7地震時の事務建屋の状況

		事務新館	事務本館・別館
建屋構造		免震構造 (竣工前, 平成23年10月完成)	耐震構造 (平成22年3月 鉄骨ブレース補強済み)
(参考) 設計条件他		免震層 水平せん断ひずみ 250%以下 鉛直引張面圧 1N/mm ² 以下 ・設計時(サイト波※): 免震層下 580Gal, 1階 184Gal	補強設計 保有水平耐力/必要保有水平耐力 ≥ 1.5
地震時の状況 ／ 反映状況	構造部材	・建屋に目視で確認できる残留変形は無かった ・基礎や梁, 接合部等の損傷は無かった →大きな被害なし	・建屋に目視で確認できる残留変形は無かった ・コンクリートの剥落や鉄筋の露出等は無かった →大きな被害なし
	意匠・設備	内装ボードの軽微な欠け (3.11地震)	食堂天井ボードの一部落下 (4.7地震)
	什器類	工事中であり什器なし	固定により転倒なし
	備考	完成後の最大の地震計観測記録 ・2013年8月4日宮城県沖の地震の観測記録(南側地震計): (水平)免震層下 144Gal, 1階 63Gal (鉛直)免震層下 43Gal, 1階 70Gal	地震計なし 緊対所機能に問題なし

※設計時は告示波(建設省告示第1461号による極めて稀に発生する地震動レベル)やサイト波(2005年8月16日宮城県沖の地震時の観測記録の特徴を踏まえ事務新館設計用として設定, 最大加速度580Gal)を用いて検討しており, ここでは入力加速度が最大となるサイト波による応答結果を記載。

2. 申請時の方針



設計時(サイト波)

2013年8月4日宮城県沖の地震の観測記録(南側)

事務新館最大加速度(Gal)

女川原子力発電所の事務建屋

⚡ 東北電力

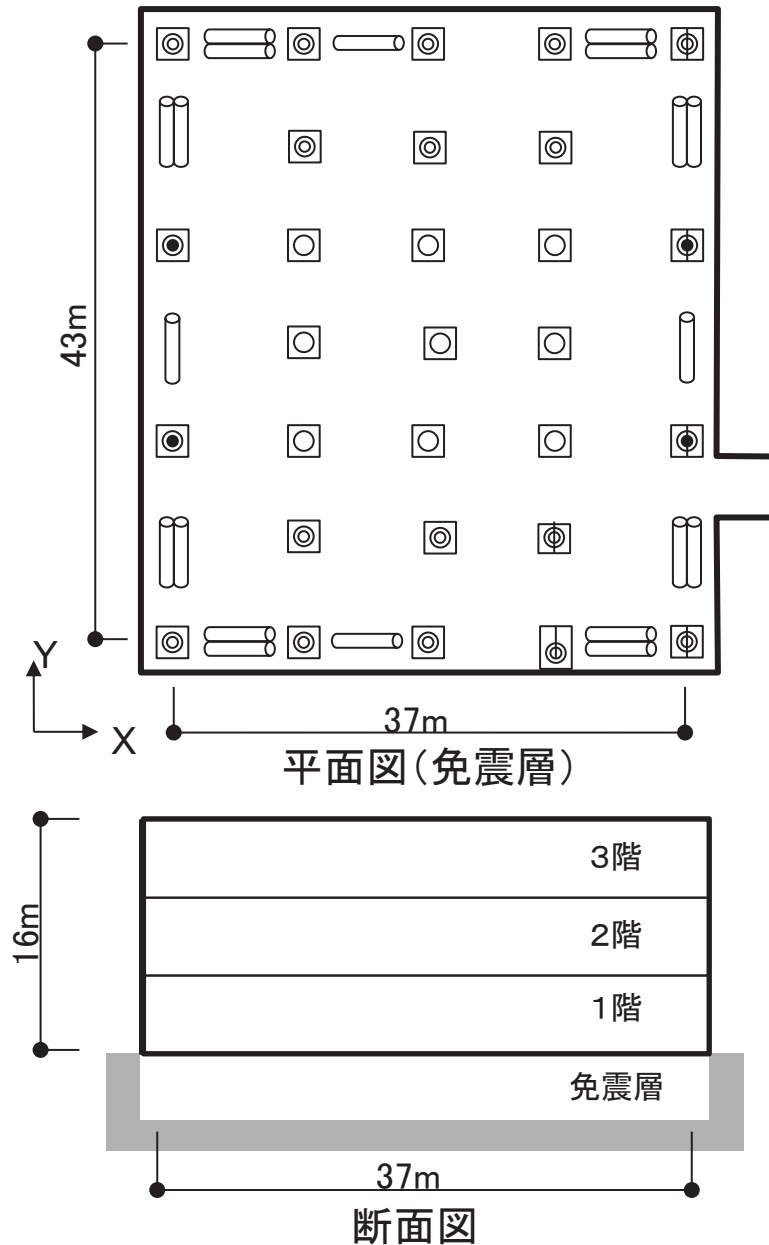
3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(1) 免震重要棟の当初検討

- 免震重要棟は将来設置であり、別途申請するとしていたものの、社内的に構造設計を徐々に進めていた。
- 免震重要棟の当初検討では基準地震動の増大・追加を想定し、免震装置の特性のばらつきを考慮した地震応答解析により、免震構造の裕度について検討していた。

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(1) 免震重要棟の当初検討(構造概要)



【凡例】

- ☉ 天然ゴム系積層ゴム(Φ1500)
- ⊙ 天然ゴム系積層ゴム(Φ1400)
- 鉛プラグ入り積層ゴム(Φ1500)
- ⦿ 鉛プラグ入り積層ゴム(Φ1400)
- すべり支承
- オイルダンパー

【固有周期】

水平方向: 約4秒

鉛直方向: 約0.06秒

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(1) 免震重要棟の当初検討(裕度検討ケース)

- ・免震重要棟設置地盤の特性を踏まえて申請時の基準地震動 S_s-2 から入力地震動を算定
また、免震構造の特性を踏まえ長周期成分が卓越する告示波^{※1}を入力地震動に設定
- ・免震重要棟の当初検討では基準地震動の増大・追加や免震設計用基準地震動が追加となる可能性等を考慮して入力地震動を1.2倍^{※2}
- ・免震要素のばらつきを考慮(標準剛性, 剛性大, 剛性小)

裕度検討ケース

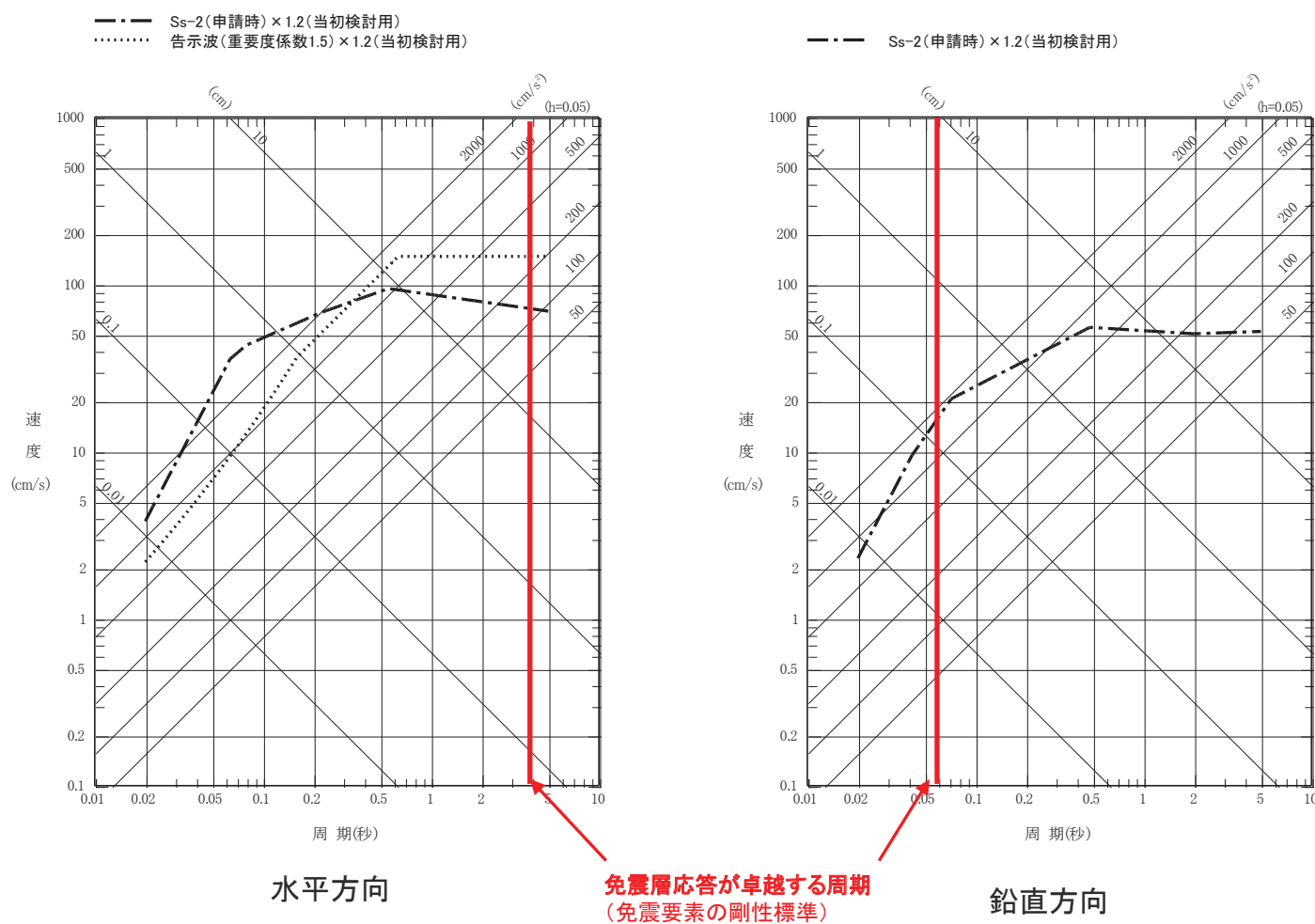
地震動 ^{※2}	入力方向	免震要素ばらつき
$S_s-2 \times 1.2$	水平1方向(X方向) + 鉛直方向	標準
		剛性大
		剛性小
	水平1方向(Y方向) + 鉛直方向	標準
		剛性大
		剛性小
告示波 ^{※1} $\times 1.2$	水平1方向(X方向)	標準
		剛性大
		剛性小
	水平1方向(Y方向)	標準
		剛性大
		剛性小

※1: 建設省告示第1461号による極めて稀に発生する地震動レベルに重要度係数1.5を考慮して設定。

※2: 当初検討時点では、基準地震動の増大・追加や免震設計用基準地震動が追加となる可能性、国土交通大臣の認定を受けるにあたり評価機関からもとめられる裕度検討への対応を考慮し、設計者判断として1.2倍を考慮。

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(1) 免震重要棟の当初検討(検討用地震動)

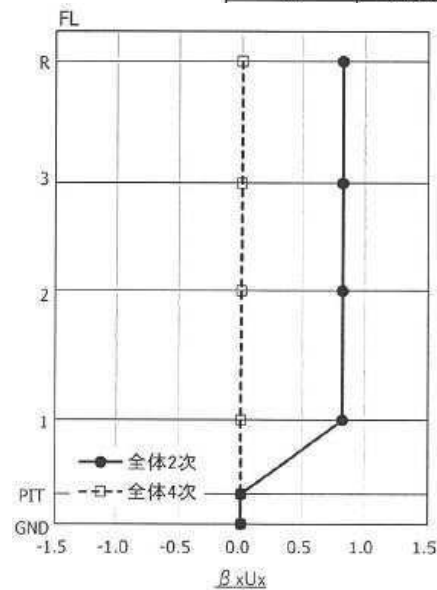


免震重要棟の当初検討用地震動

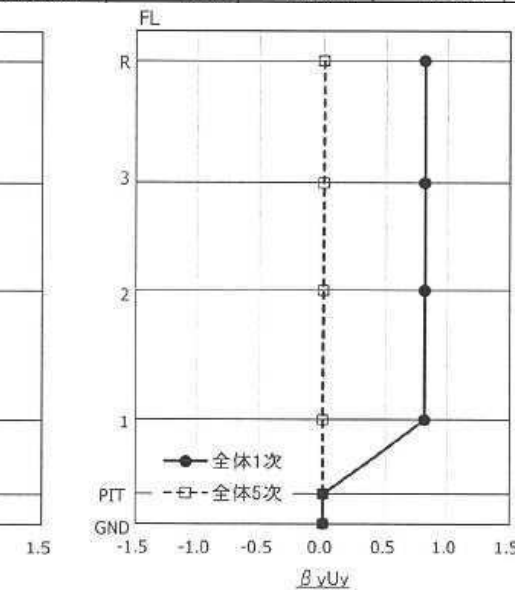
3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(1) 免震重要棟の当初検討(固有モード)

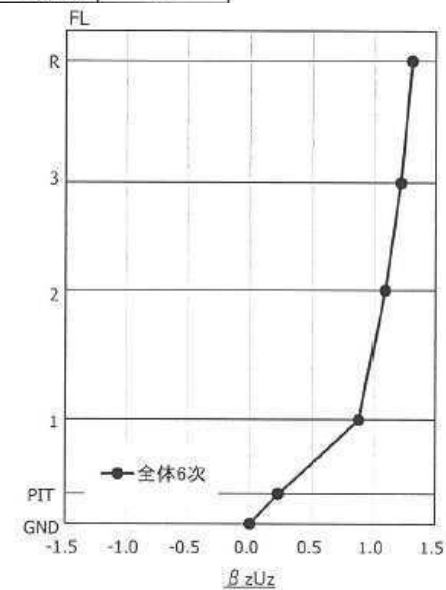
次数	周期 (秒)	振動数 (Hz)	刺激係数			卓越方向
			β_x	β_y	β_z	
1	4.041	0.247	0.383	0.837	0.000	Y
2	4.035	0.248	0.827	0.379	0.000	X
3	3.336	0.300	0.006	0.014	0.000	振れ
4	0.0856	11.7	0.005	0.000	0.025	X
5	0.0799	12.5	0.000	0.005	0.024	Y
6	0.0639	15.7	0.001	0.000	1.320	Z



(X方向)



(Y方向)



(Z方向)

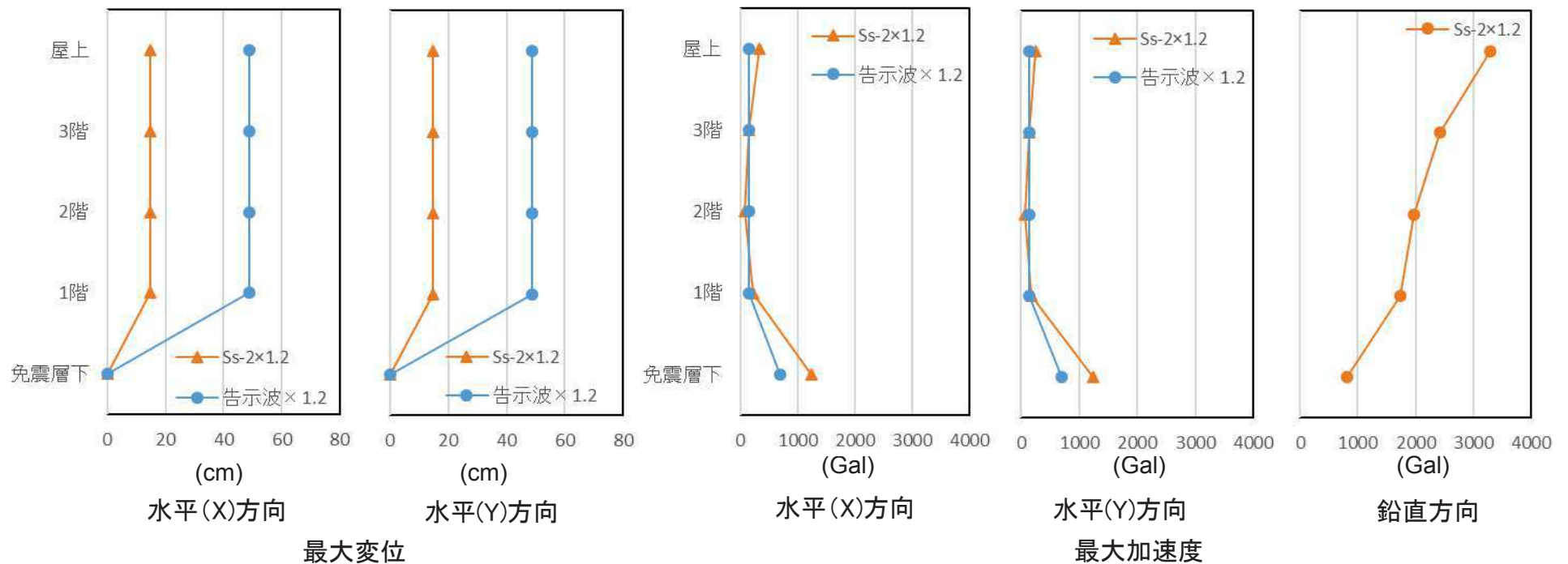
水平方向

鉛直方向

免震重要棟の当初検討における固有モード
(免震層のせん断ひずみ100%変形時, 免震要素の剛性標準)

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(1) 免震重要棟の当初検討(最大変位分布, 最大加速度分布)



免震重要棟の当初検討における最大変位／加速度分布

- ・最大変位分布は免震層の変位が主であり、1次固有周期(4秒程度)における地震動の大小関係に対応し、告示波の方が大きい。
- ・最大加速度は、免震層により水平方向では告示波もSs-2も同程度に低減し、鉛直方向は増幅する傾向となっている。

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(1) 免震重要棟の当初検討(免震装置の応答解析結果)

応答解析結果一覧

地震動	方向	免震要素 ばらつき	水平せん断 ひずみ(%)	最小面圧(N/mm ²) (+:圧縮側, -:引張側)
Ss-2 × 1.2	水平1方向(X方向) + 鉛直 方向	標準	50	-0.87
		剛性大	50	-0.87
		剛性小	50	-0.87
	水平1方向(Y方向) + 鉛直 方向	標準	50	-0.87
		剛性大	50	-0.87
		剛性小	50	-0.86
告示波 × 1.2	水平1方向(X方向)	標準	180	1.46
		剛性大	150	1.41
		剛性小	200	1.51
	水平1方向(Y方向)	標準	180	1.35
		剛性大	150	1.31
		剛性小	210	1.39

210 : 免震重要棟の構造成立性に係る試算に用いた値

水平せん断ひずみ: 210% < 許容値※: 250%

鉛直引張面圧: 0.87N/mm² < 許容値※: 1N/mm² ※: 免震構造の試評価及び試設計例((独)JNES, 2014)における設計目標

- ・免震層の水平せん断ひずみは、告示波の方が大きい。
- ・常時の面圧は4~8N/mm²(圧縮)である。地震時の引張面圧は、告示波(水平1方向のみのロッキングによる影響)よりも、Ss-2(水平1方向のロッキングによる影響+鉛直動による影響)の方が大きくなっており、鉛直動による影響が大きい。

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(2) 建屋設計条件の見直し

① 建屋・設備の仕様変更等に伴う重量増加

重量増加の主な要因は以下のとおりであり、建屋壁厚の影響が最も大きく、支配的である。

○ 建屋壁厚の増強

3号炉建屋内に緊急時対策所を設置する段階では、申請号炉のみが運転中であり、未申請号炉は停止中の事故を想定することとしていたが、重要棟の設計に当たっては申請号炉以外も運転中の事故を想定し、遮へい能力の強化を図ることとした。

これにより、建屋の構造検討において、壁厚を増加し、遮へい能力を強化した。

○ 空調設備、通信連絡設備、プラント状態監視設備、電源設備の耐震化

先行プラントの緊急時対策所の基準適合性審査において、建屋が免震構造で、水平方向の応答加速度が大幅に低減されたとしても、固定機器については従来と同様に構造強度計算による耐震性を示すことが必要との状況になっていた。

これにより、加振試験での検証による構造強度評価を想定していた一般汎用品では、構造強度計算に必要なデータを整備するのは困難であり、原子力設備としての構造強度計算の実績のある機器に変更することにしたため、重量が増加した。

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

○建屋内の加圧用ボンベ追加

被ばく線量の評価条件として、「実用発電用原子炉に係る重大事故時の制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価に関する審査ガイド」に基づき、放射性物質の放出継続時間10時間と設定し、そのうち1時間はボンベ加圧し、その他は換気設備による加圧をすることとしていたが、換気設備による加圧時における放射性物質の取り込みに起因した線量影響を低減させる観点から、10時間のボンベ加圧とするようボンベ本数を追加した。

②基準地震動の増大・追加

○先行プラントの基準地震動の策定に係る審査において、断層モデル波の追加や応答スペクトル波のかさ上げ等、申請時の基準地震動が大きく見直されており、女川においても当初設計での想定を更に上回る見直しが想定される状況であった。

○特に、固有周期が長周期側にある免震構造の安全性・信頼性を高めるために、新たな基準地震動の追加も想定される状況であった。

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(3) 建屋設計条件見直しの影響

○建屋設計条件の見直し前においても、免震装置の地震応答解析結果は許容値に対して裕度が少ない状況であった。

○建屋・設備の仕様変更等に伴う重量増加、基準地震動の増大・追加に対して、設計を進める過程で既存の免震装置を採用した設計が成立しなくなる可能性が考えられた。(p14,18,19参照)

○以上のことから、緊急時対策所を設ける建屋の構造について、免震構造だけでなく耐震構造も視野に入れ再度判断することとした。

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

免震重要棟の当初検討に基づく試算※1

H27.9当初検討以降の基準地震動の増大・追加の可能性や重量増の影響を試算すると、既製品最大径の免震装置を採用しても余裕を確保できない可能性



既成サイズを超える免震装置を新規設計し性能実証が必要

※1:平成27年9月時点では、当初検討結果から定性的に見通しを立てて判断しているが、現時点において当時の見通しに基づく試算結果を参考として示す。

※2:免震構造の試評価及び試設計例((独)JNES, 2014)における設計目標。

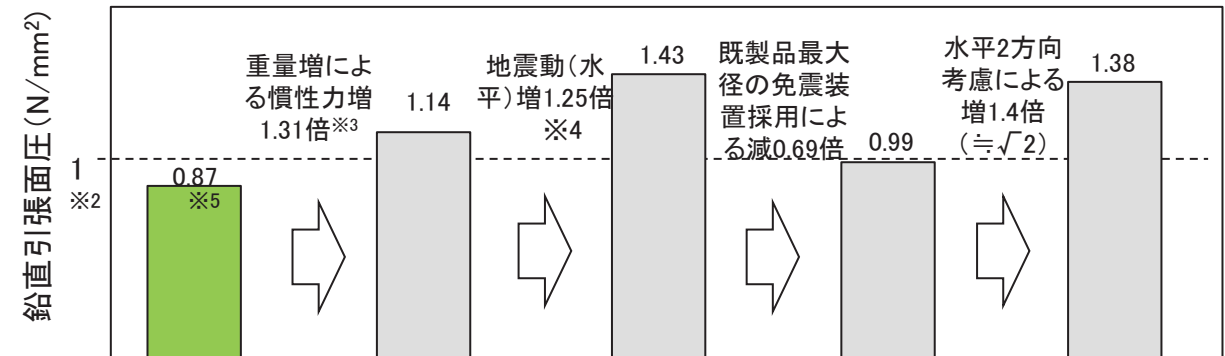
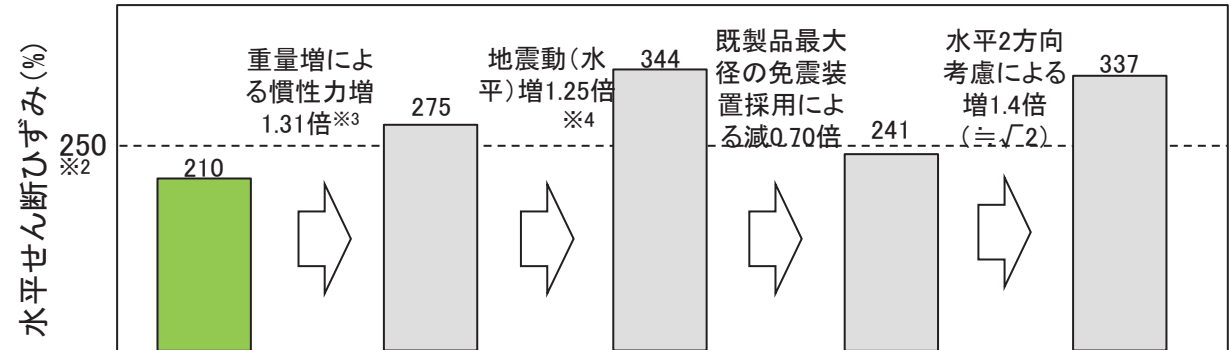
※3:最も重量増加の大きいケースとして、建屋壁厚の増強約 $68 \times 10^3 \text{kN}$ 、その他約 $1 \times 10^3 \text{kN}$ で試算

※4:免震層の固有周期帯における加速度応答スペクトルの、当初申請時 S_s に対する見直し後 S_s のおおよその比率に相当。また、告示波についても同等の比率を使用。

※5:当初検討の鉛直引張面圧の最大時は、上向きに約1Gの鉛直加速度が発生しており、自重による面圧を打ち消していることから、鉛直引張面圧は水平動によるロッキングによるものと想定。

※6:試算は当初検討と同じ免震装置の配置を前提とした。

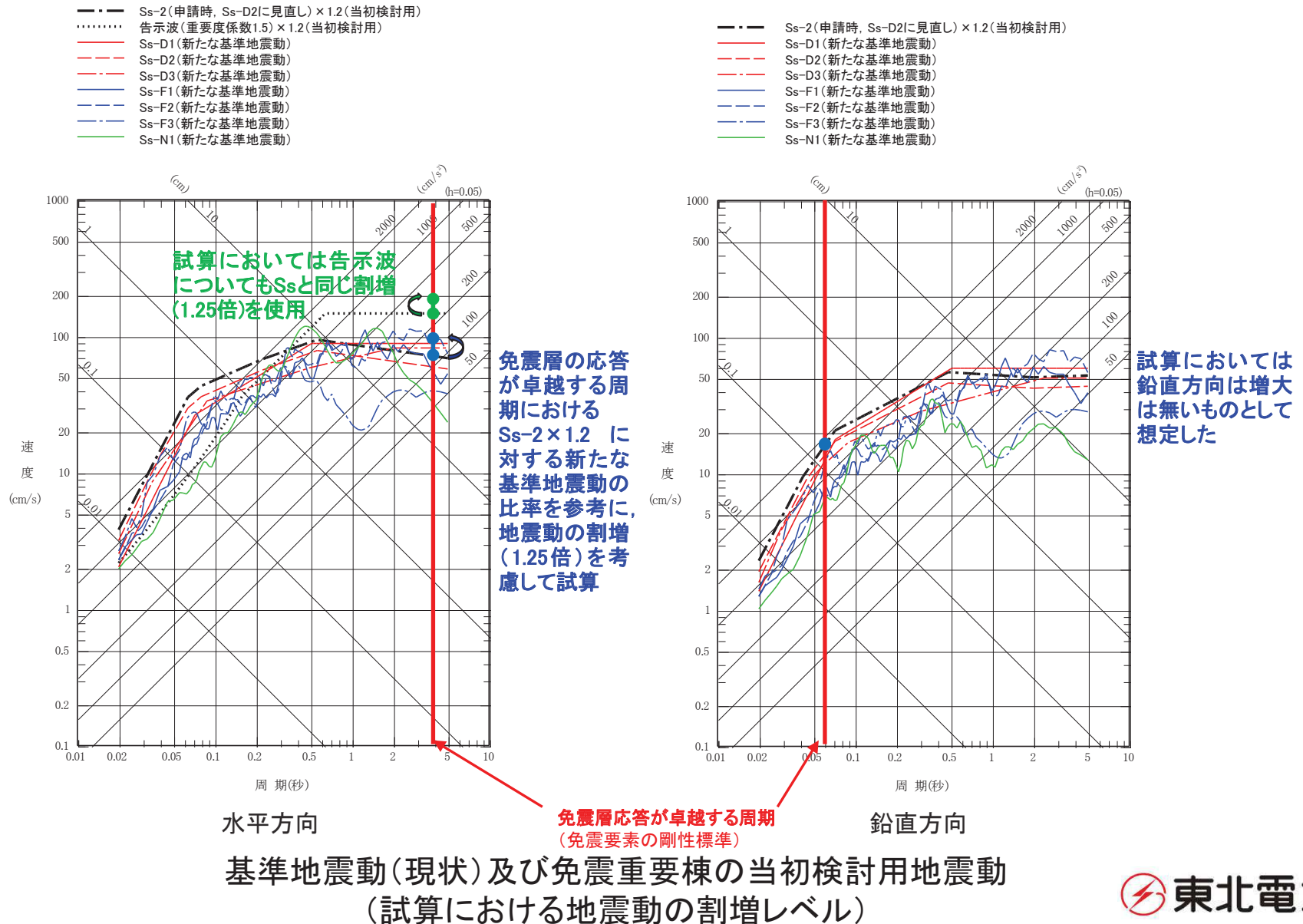
※7:告示波は鉛直方向の検討なし。



	当初検討※6	試算	試算	試算	試算
上部重量:	226 × 10³kN	約69 × 10³kN増※3	→	→	→
入力地震動:	S _s -2 × 1.2 告示波 × 1.2	→	見直し後S _s ※4 相当	→	→
免震装置径:	Φ 1500	→	→	Φ 1800	→
多方向組合せ:	水平1方向・鉛直方向※7	→	→	→	水平2方向・鉛直方向※7

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

免震重要棟の当初検討に基づく試算(地震動の割増レベル)



3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(4) 建屋構造の特徴の比較

① 免震構造

(メリット)

○ 水平方向の応答加速度が入力に対して大幅に低減する(p6,7参照)

- ・ 執務室内の居住環境維持に優れる
- ・ 機器の耐震設計の合理化が期待できる

(デメリット)

○ 鉛直方向の応答加速度が入力に対して増幅する

- ・ 機器の構造設計及び加振試験の条件設定において配慮が必要

○ 外部との水平方向の相対変位が大きい

- ・ 外部と接続するケーブル類の設計に配慮が必要

○ 建物の機能維持は免震装置の裕度に依存する

- ・ 免震装置の裕度が少ない場合は、万一の設計基準を超える地震発生時に機能を維持できない可能性がある
- ・ 免震装置の既成サイズは限られていることから、新規設計となる場合には性能実証が必要であり、検討期間の長期化・実現が困難となるリスクがある
- ・ 特に地震力の増大による鉛直方向の成立性が課題

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

②耐震構造

(メリット)

○地震力に応じた設計が可能

- ・設計条件の変更に対して、従来の設計経験に基づき的確に対応可能

(デメリット)

○水平方向、鉛直方向とも応答加速度が入力に対して増幅する

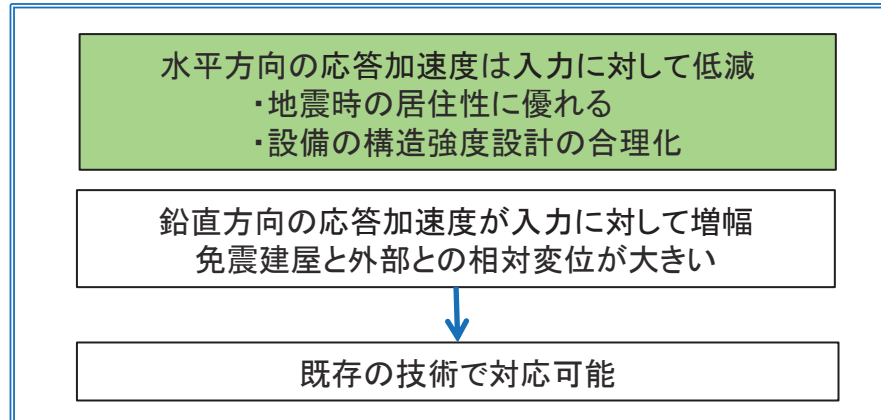
- ・居住性：什器の転倒防止措置、天井ボードを設置しない等により対応が可能

(p6,7参照)

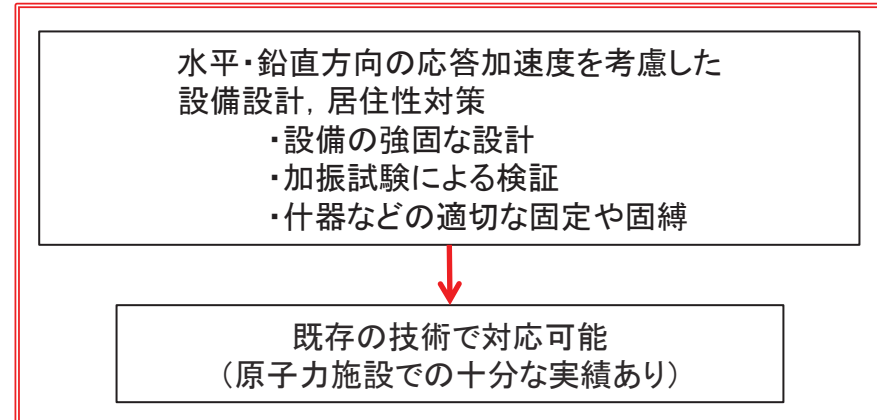
- ・機器設計：固定式の設備は強固な構造設計により機能維持が可能
可搬式の設備は加振試験により地震時の機能維持確認が可能

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

免震構造の特徴



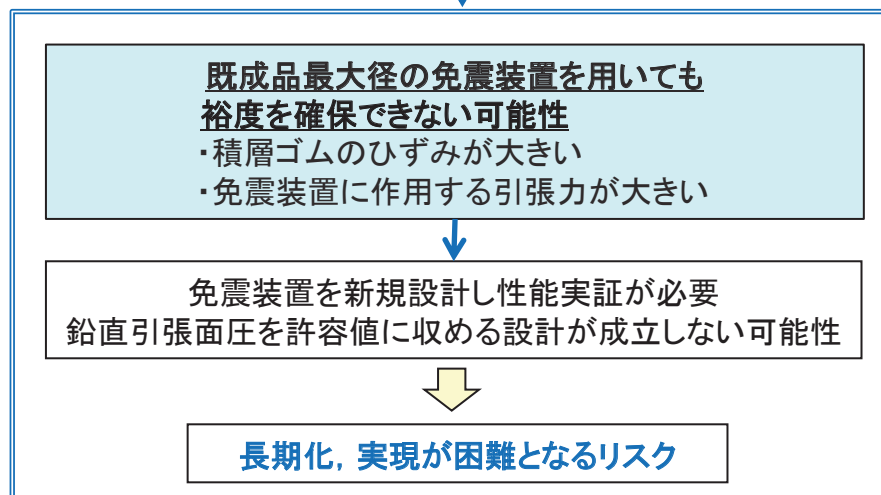
耐震構造の特徴



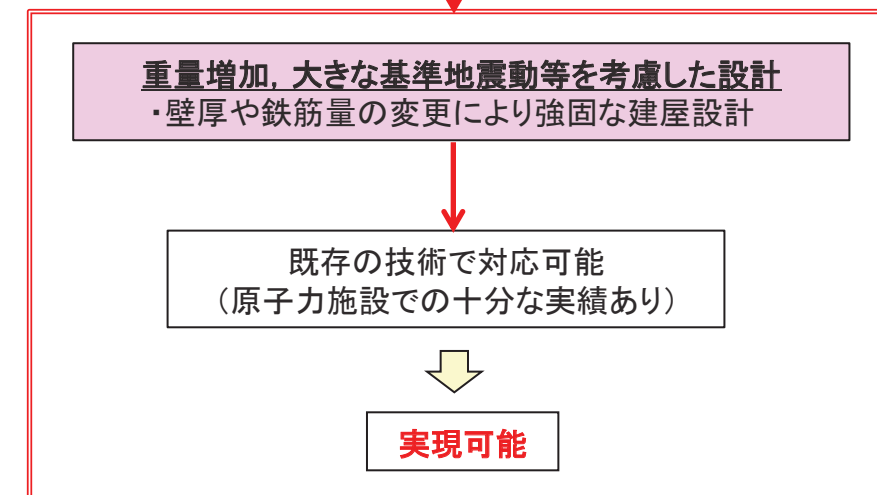
設計条件の見直し



免震構造の成立性



耐震構造の成立性



免震構造と耐震構造の比較検討

3. 3号炉建屋内への設置取り止めに伴う検討

(5) 検討結果

- 女川原子力発電所の緊急時対策所については、更なる基準地震動の増大・追加の可能性や建屋・設備の仕様変更・追加に伴う重量増加といった設計条件の見直しが必要となっていた。
- 設計条件見直しに対して、免震構造では既存の免震装置を採用した設計が成立しなくなる可能性があり、十分な裕度を確保できる免震装置を新規設計する場合には、検討期間の長期化・実現が困難となるリスクがあることから、従来から原子力施設として実績のある耐震構造へ見直すことが適切と判断した。
- これにより、構造上の設計余裕を確保することができ、また、自然事象の観測記録や研究開発による成果の反映、関連規格の見直しによる設計条件の変更にも対応性が高まることが期待できる。
- なお、免震構造の適用性に係る最新の免震装置仕様やクライテリア等の知見については、今後も継続して収集を行う。

4. まとめ

○緊急時対策所の設計条件見直しに対して、免震構造では既存の免震装置での設計が成立しなくなる可能性があり、免震装置を新規設計する場合には、検討期間の長期化・実現が困難となるリスクがあることから、原子力施設として実績のある耐震構造へ見直す。

○設置場所は免震重要棟の計画のまま、O.P.+62mの高台とする。

○建屋構造以外の緊急時対策所として必要な各機能の基本的な設計方針については変更せず、建屋構造変更前と同様とする。

○耐震構造であっても免震構造と比べて遜色がない性能とするために、以下の設計方針とする。

- ・耐震構造の建屋の耐震性能等に対する評価基準は、耐震壁のせん断ひずみ (2.0×10^{-3}) によることが考えられるが、本建屋は免震構造と同様に基準地震動に対して躯体を短期許容応力度以内に収める設計とする。
これにより、建屋の構造体全体の信頼性を確保し、遮へい性能を担保するとともに、換気設備の性能とあいまって十分な気密性を確保する設計とする。
- ・免震構造のメリットを補うため、以下の対応を行う。
 - ✓設備は、原子力施設で十分実績のある強固な耐震構造とする
 - ✓什器の転倒防止措置、天井ボードを設置しない等により居住性に配慮する

4. まとめ

設置許可基準規則への適合状況

設置許可 基準規則	免震重要棟 (見直し前:免震構造)	緊急時対策建屋 (見直し後:耐震構造)
38条 地盤	基準地震動による地震力に対して十分に支持することができる	同左 (設置場所の変更なし)
	変形した場合でも機能が損なわれるおそれがない	
	変位が生じるおそれがない	
39条 地震による 損傷の防止	基準地震動による地震力に対して、免震構造では必要な機能を確保できないおそれ	基準地震動による地震力に対して必要な機能が損なわれるおそれのない設計
	周辺の斜面による影響がない	同左 (設置場所の変更なし)
40条 津波による 損傷の防止	基準津波によって機能が損なわれるおそれがない (O.P.+62mの高台に設置)	同左 (設置場所の変更なし)
61条 緊急時対策所	重大事故等に対処するために適切な措置を講じることができる設計とする ・居住性の確保 ・情報の把握 ・通信連絡手段の確保 ・電源の確保	同左 (基本的な設計方針の変更なし)