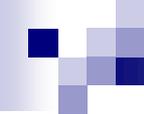


福島第一原子力発電所3号機の
耐震安全性評価結果について
(主要な施設の耐震安全性評価)

平成22年8月
原子力安全・保安院

目 次

1. 耐震設計の基本的考え方と
耐震バックチェックについて
2. 原子力安全・保安院の評価結果



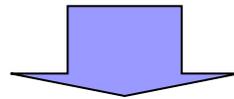
1. 耐震設計の基本的考え方と 耐震バックチェックについて

原子力発電所の耐震設計の基本的考え方

原子力発電所の耐震設計は、原子力安全委員会が定めた「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に従い設計

その基本的考え方は、

大きな地震があっても、発電所周辺に放射性物質の影響を及ぼさない



安全上重要な「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能が確保されるように設計

耐震設計の基本方針を実現するために

徹底した調査

- ・活断層調査、過去の地震等の調査



基準地震動の策定

- ・敷地ごとに震源を特定して策定する地震動
- ・震源を特定せず策定する地震動
(旧耐震指針のマグニチュード6.5の直下地震に代わるもの)



重要度に応じた耐震設計

- ・Sクラス(原子炉圧力容器など) 止める、冷やす、閉じ込める機能 基準地震動に対して安全機能保持 建築基準法の3.0倍※
- ・Bクラス(廃棄物処理設備など) 建築基準法の1.5倍※
- ・Cクラス(発電機など) 建築基準法の1.0倍※

※機器・配管は更に2割増し

自動停止機能

- ・一定以上の大きな揺れに対し、自動的に安全に停止

耐震設計審査指針の改訂について

原子力発電所の耐震安全性

福島第一原子力発電所をはじめ全国の原子力発電所については、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(昭和56年7月原子力安全委員会決定。いわゆる「旧耐震指針」)を踏まえ、耐震安全性評価を行うとともに、原子力発電所の設置許可後に生じた地震等から得られる科学的知見を踏まえ、耐震安全性についての確認を適宜行っており、原子力発電所の耐震安全性は十分確保されている。

耐震設計審査指針の改訂

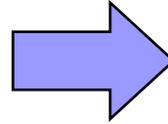
最近の地震学や耐震工学の成果など最新の知見を取り入れ、発電用原子炉施設の耐震安全性のより一層の向上に資するとの観点から、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(平成18年9月原子力安全委員会決定。いわゆる「新耐震指針」)が策定された。

新耐震設計審査指針のポイント

旧耐震指針

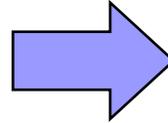
- ・考慮すべき活断層の活動時期の範囲
:5万年前以降
- ・マグニチュード6.5の「直下地震」の想定

より厳しい水準



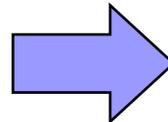
- ・文献調査、空中写真判読、現地調査等による活断層調査を実施

より入念な調査



- ・水平方向について、基準地震動を策定
- ・地震規模と震源からの距離に基づき経験式による地震動評価(応答スペクトル評価式)

より高度な手法



新耐震指針

最新知見を考慮した基準地震動の策定を要求

- ・考慮すべき活断層の活動時期の範囲
:12~13万年前以降に拡大
- ・マグニチュード6.5の直下地震に代えて、国内外の観測記録を基に、より厳しい「震源を特定せず策定する地震動」を設定

- ・従来の調査に加え、不明瞭な活断層を見逃さないよう、変動地形学的手法等を用いた総合的な活断層調査を実施

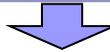
- ・水平方向に加え鉛直方向についても、基準地震動を策定
- ・応答スペクトル評価式に加え、地震発生メカニズムを詳細にモデル化できる断層モデルを地震動評価手法として全面的に採用

耐震設計審査指針の改訂に伴う対応

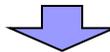
- ◆新耐震指針は、最近の地震学や耐震工学の成果に立脚
 - ⇒ 一層の耐震安全性の向上



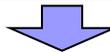
新耐震指針に照らした耐震安全性評価(バックチェック)が重要



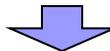
- バックチェック手法、確認基準の策定



- バックチェックを指示(平成18年9月20日)



- 新潟県中越沖地震を受け、実施計画の見直しを指示(平成19年7月20日)



- 事業者の中間評価^(注)結果報告(平成20年3月)
 - ⇒ 原子力安全・保安院として厳正に妥当性を確認

(注) 中間評価とあるが、基準地震動の策定、安全上重要な設備に関する耐震安全性の評価であり、発電所の基本的な耐震安全性の確認を行うもの

福島第一原子力発電所3号機の耐震安全性評価 (中間評価)に係る対応

- 平成20年3月 事業者から5号機に係る中間評価^(注)結果報告
- 平成21年4月 事業者から3号機に係る中間評価^(注)結果報告
- 平成21年7月 福島第一原子力発電所の基準地震動 S_s の策定及び5号機の主要な施設の耐震安全性に係る評価(中間評価)結果が妥当である旨公表
- 平成22年5月 耐震・構造設計小委員会構造WGにおいて、3号機の評価について、経済産業大臣指示に基づき特別な扱いとして実施することを説明。
- 平成22年7月 3号機の主要な施設の耐震安全性に係る評価(中間評価)結果が妥当である旨公表

(注)中間評価とは、基準地震動の策定、安全上重要な設備に関する耐震安全性の評価であり、発電所の基本的な耐震安全性の確認を行うもの

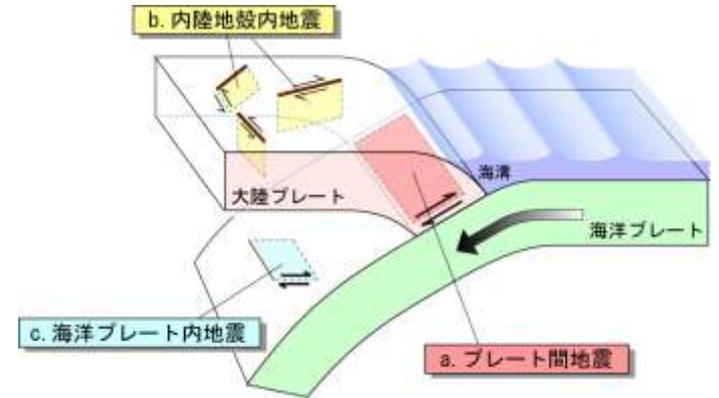
バックチェックの方法(基準地震動の策定)

敷地ごとに震源を特定して策定
する地震動

① 検討用地震の選定

- 発生様式毎に選定
- プレート間地震
- 内陸地殻内地震
- 海洋プレート内地震

(地震発生様式)



②

応答スペクトルに基づく
手法による地震動評価

断層モデルを用いた手法
による地震動評価

震源を特定せず策定
する地震動

(③地震動評価の不確かさを考慮)

④ 基準地震動 (S_s)

※3号機の主要な施設の耐震安全性評価については、5号機の検討に際して策定した福島第一原子力発電所の基準地震動を用いた。

3号機の評価に用いる基準地震動Ss

既に5号機の評価において(平成21年7月21日に公表済)、福島第一原子力発電所の基準地震動Ssは妥当なものと判断している。

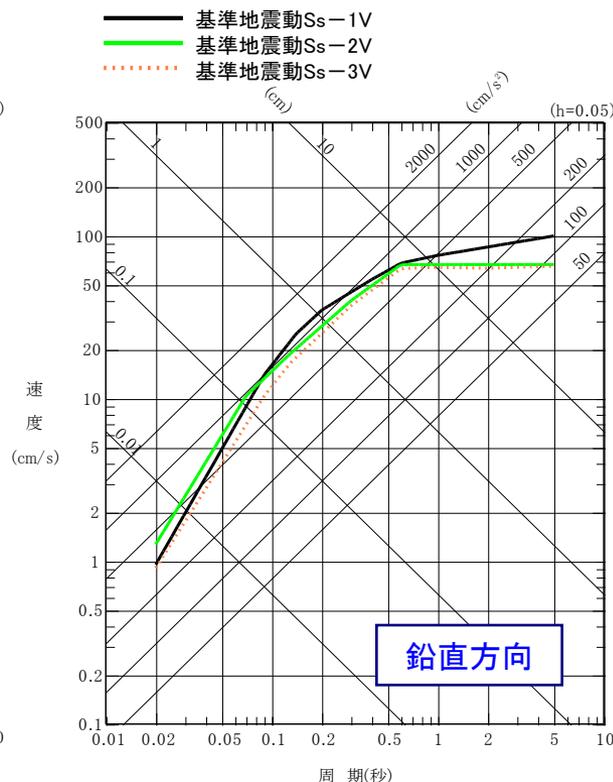
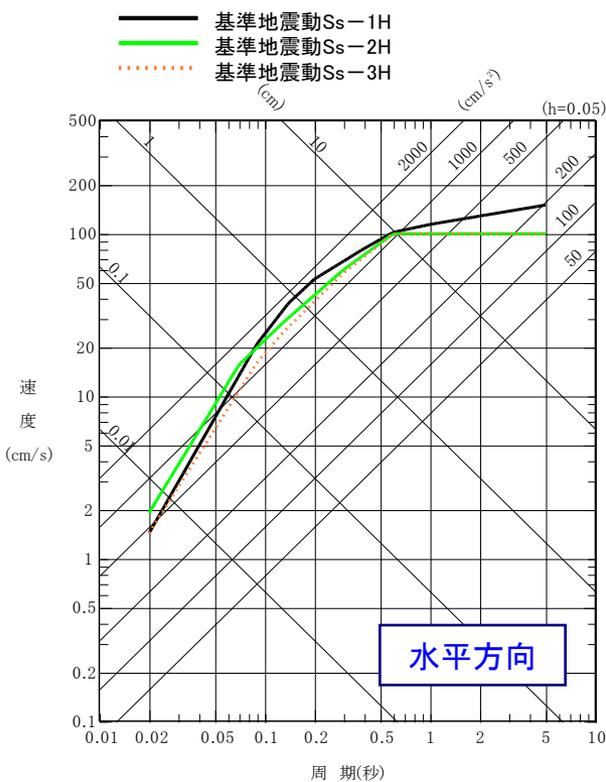
基準地震動の最大加速度値*

	水平方向	鉛直方向
Ss-1	450Gal	300Gal
Ss-2	600Gal	400Gal
Ss-3	450Gal	300Gal

※ Ss-2の応答スペクトルは福島第一・福島第二原子力発電所で異なるものの、最大加速度値は両サイト同一の値となっている。

参考: 旧耐震指針における最大加速度値(水平方向)

S1	180Gal
S2	270Gal
S2(直下地震)	370Gal



基準地震動Ssの設計用応答スペクトル(福島第一原子力発電所)

バックチェックの方法(耐震安全性評価)

基準地震動 S_s を策定し、下記の施設等の耐震安全性評価を実施。

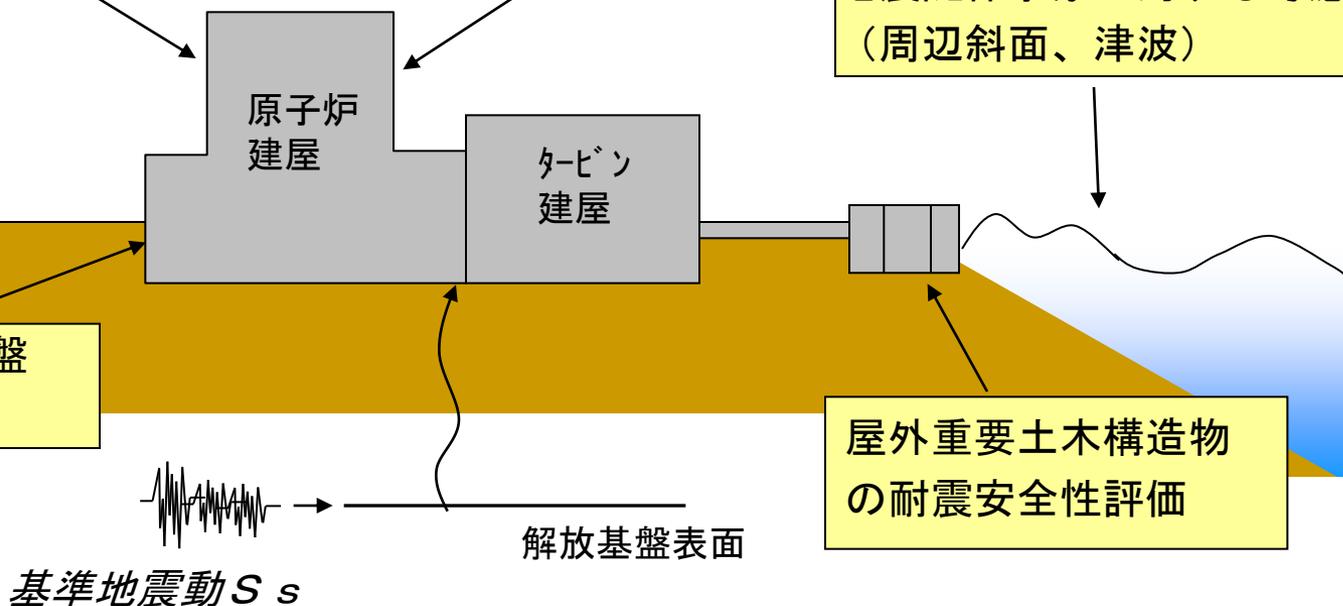
安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価
(原子炉建屋)

安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

地震随伴事象に対する考慮
(周辺斜面、津波)

原子炉建屋基礎地盤
の耐震安定性評価

屋外重要土木構造物
の耐震安全性評価



※福島第一原子力発電所3号機の評価においては、5号機と同様に

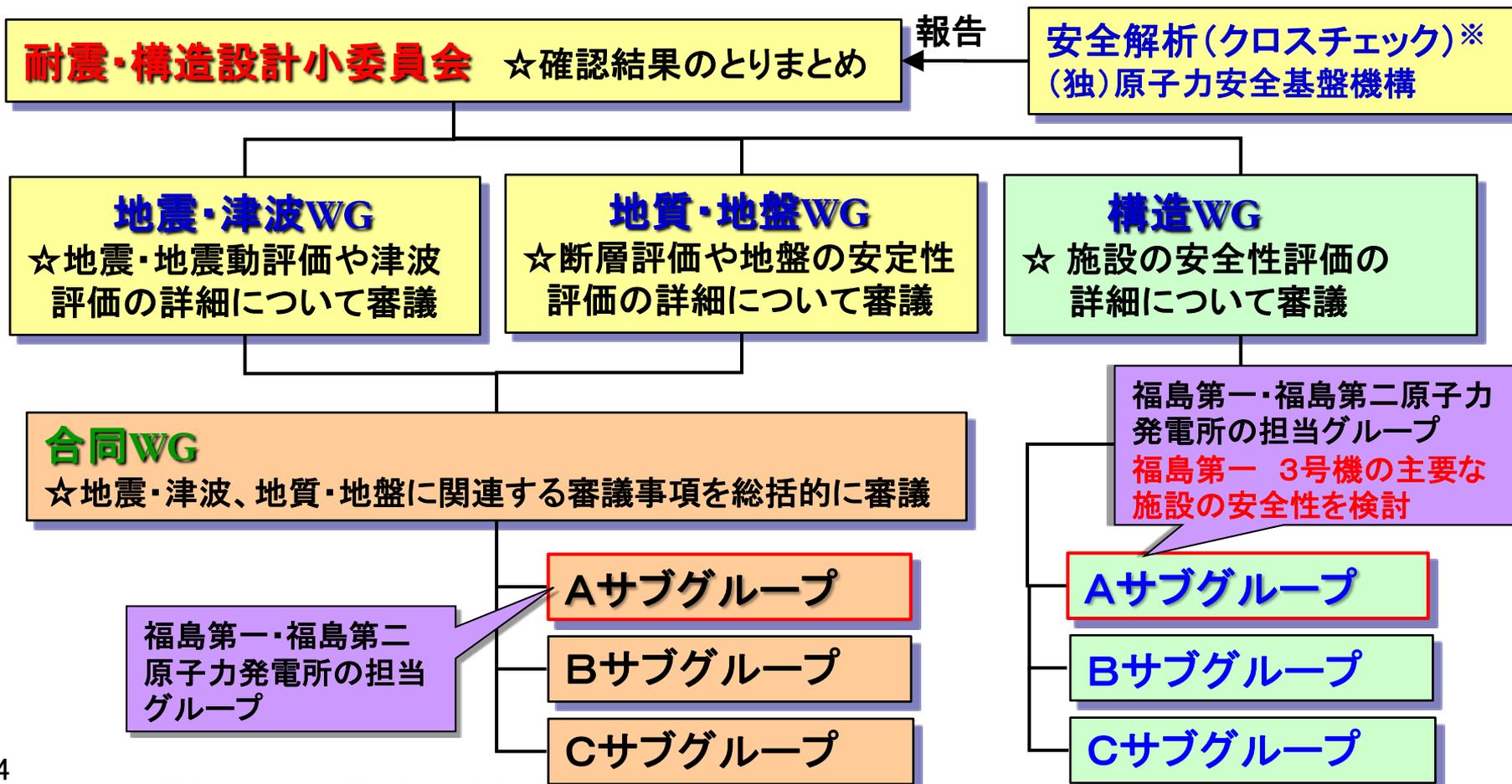
 で囲った施設のうち重要なものについて評価

2. 原子力安全・保安院の評価結果※

※ 専門家による審議に基づく原子力安全・保安院の評価結果
(3号機の主要な施設の耐震安全性)については、
平成22年7月26日、東京電力に通知するとともに、
HP(<http://www.nisa.meti.go.jp/>)にて公表済み

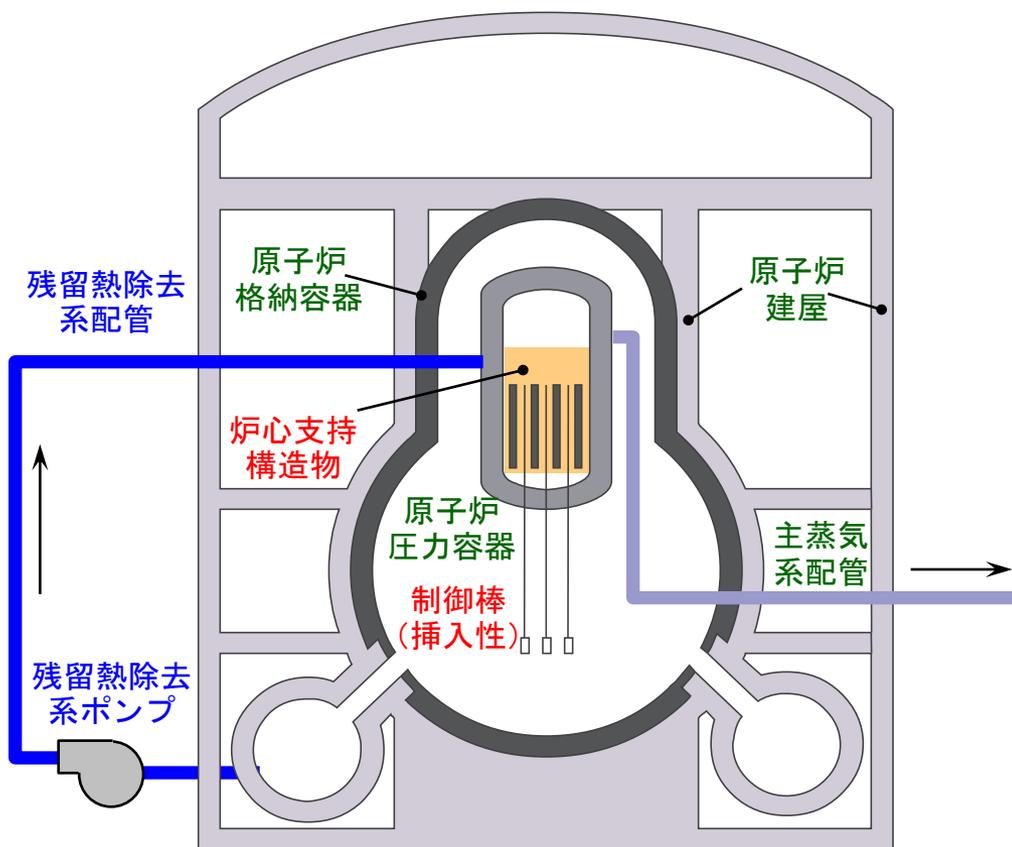
バックチェック結果の審議体制

原子力安全・保安院は、事業者が実施したバックチェック結果について、耐震・構造設計小委員会、各ワーキンググループ及びサブグループにおいて、関連する分野の専門家(約40人)による審議を踏まえ厳正に確認することとしている。



評価対象施設 (福島第一原子力発電所3号機)

- 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次の主要な施設



「止める」

- ・ 制御棒 (挿入性)
- ・ 炉心支持構造物

「冷やす」

- ・ 残留熱除去系ポンプ
- ・ 残留熱除去系配管

「閉じ込める」

- ・ 原子炉圧力容器
- ・ 主蒸気系配管
- ・ 原子炉格納容器
- ・ 原子炉建屋

審議のポイント

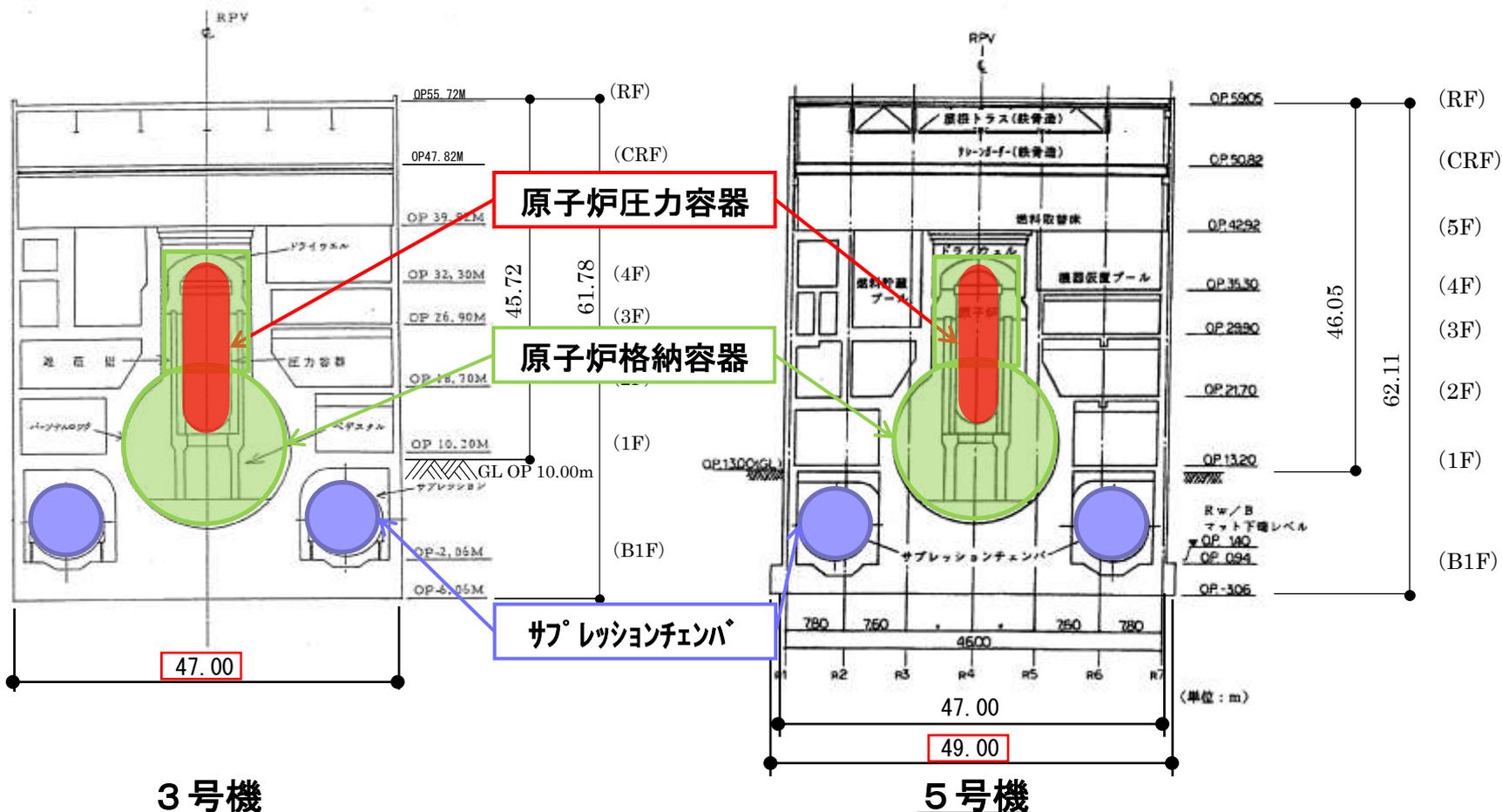
- ◇ 主要な施設の耐震安全性に係る審議については、5号機の主要な施設との類似点に着目し、耐震設計審査指針の改訂に伴う5号機の耐震安全性にかかる当院の評価結果(平成21年7月21日に公表済)を最大限に活用するとともに、相違点に着目して審議の重点化を図った。

- ◇ 主要施設を対象に仕様、評価条件等の類似点、相違点を考察した結果、3号機と5号機の多くの施設に類似点が多いものの、若干の差異が認められた。
 - ・ 主な類似点: 原子炉建屋の形状、主要な機器等の基本的な配置、解析・評価の手法、解析・評価の条件
 - ・ 主な相違点: 原子炉建屋の基礎の形状、地上部の耐震壁の壁厚、配管経路及び支持構造物の設置位置等の詳細、配管の減衰定数
等

- ◇ これらの差異に着目した審議のポイントについては、次のとおり。
 - ・ 建物・構築物: 中越沖地震を踏まえた反映事項に係る対応のうち地震応答解析モデルの妥当性の検討
 - ・ 機器・配管系: 残留熱除去系配管及び主蒸気系配管の評価の詳細検討
等

補足：3号機と5号機の主要施設の主な類似点、相違点(例示)

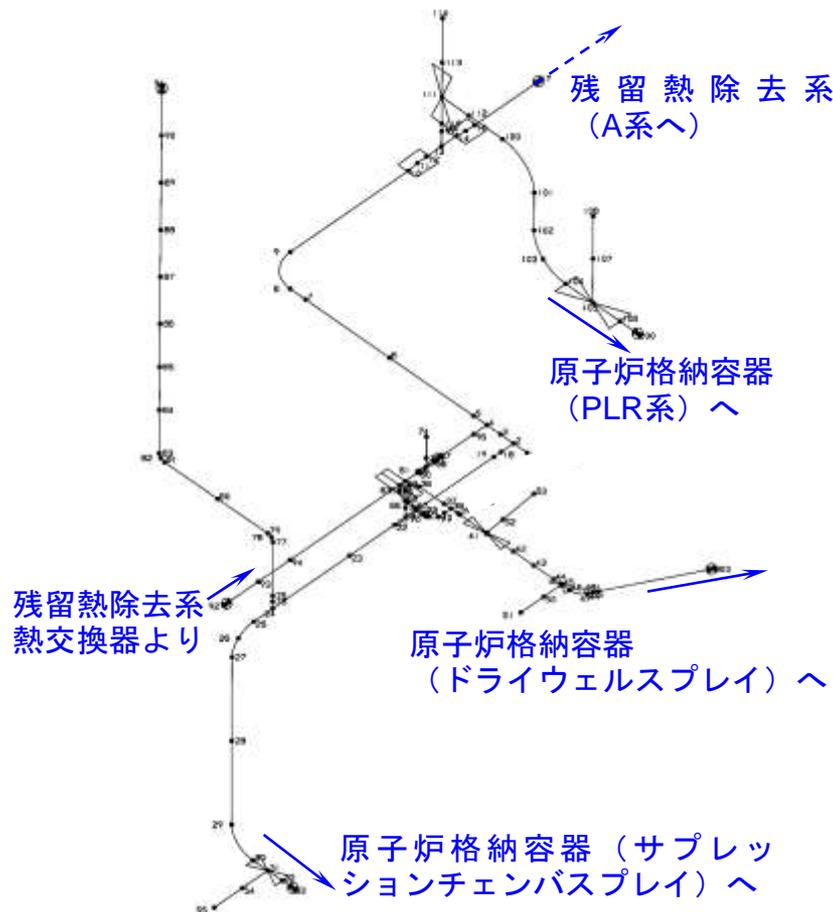
- ・原子炉建屋の形状、建物高さ、階高、主要な機器の基本的な配置はほぼ同じである。
- ・原子炉建屋の基礎の形状、地上部の耐震壁の壁厚(P22、23「補足：3号機と5号機の評価結果の比較(原子炉建屋)」を参照)が若干異なる。



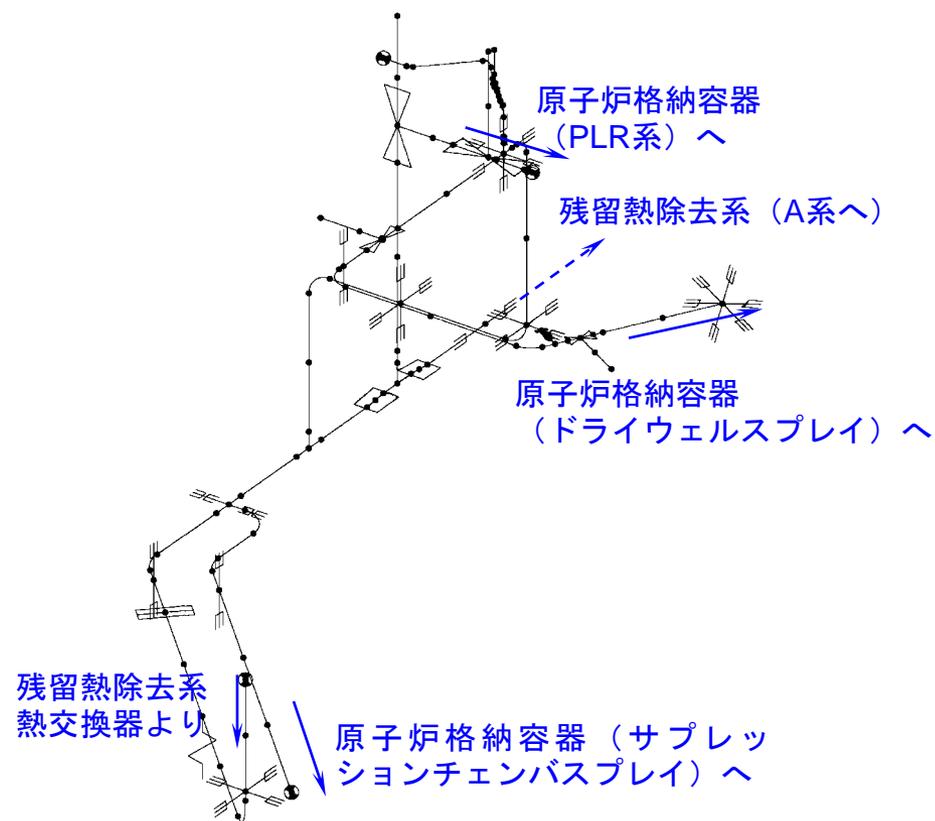
原子炉建屋断面図 (NS方向)

補足: 3号機と5号機の主要施設の主な類似点、相違点(例示)

- 評価設備のうち残留熱除去系配管及び主蒸気系配管については、同一の系統であっても配管経路や支持構造物の設置位置等、細部の仕様が異なる。(その結果、解析モデル、解析結果も異なる。)



3号機の解析モデル



5号機の解析モデル (3号機と対応する部分)

残留熱除去系配管 (B系) の配管経路

施設の耐震安全性の評価

基準地震動Ss-1、Ss-2及びSs-3による施設の耐震安全性評価等に対する保安院の検討結果は、以下のとおりである。

(1) 建物・構築物

原子炉建屋の地震応答解析モデル、入力地震動の評価等は妥当なものと判断するとともに、その解析結果である耐震壁のせん断ひずみの最大値は、機能維持が確保されるせん断ひずみに余裕をみて設定された基準値以下であることを確認し、福島第一原子力発電所3号機の原子炉建屋の耐震安全性が確保されると判断した。

3号機 原子炉建屋の評価結果

基準 地震動 Ss	NS方向		EW方向		評価基準値
	最大応答 せん断ひずみ	部位	最大応答 せん断ひずみ	部位	
Ss-1	0.13×10^{-3}	1階	0.12×10^{-3}	1階及び5階	2.0×10^{-3} 以下
Ss-2	0.13×10^{-3}	1階	0.12×10^{-3}	1階	
Ss-3	0.12×10^{-3}	1階	0.10×10^{-3}	1階	

施設の耐震安全性の評価

(2) 機器・配管系

機器・配管系の評価に主に用いられた手法は、これまで工事計画認可等において用いられた実績のあるものであり、それらの手法により行った構造強度評価結果は、評価基準値以下であることを確認した。また、制御棒挿入性に関する評価については、燃料集合体の相対変位が、評価基準値以下であることを確認した。

以上より、福島第一原子力発電所3号機の耐震安全上重要な機器・配管系の耐震安全性が確保されると判断した。

3号機 耐震安全上重要な機器・配管系の評価結果

区分	評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
止める	炉心支持構造物	シュラウド サポート	軸圧縮	33	208
			膜応力	85	300
	制御棒（挿入性）	燃料集合体	相対変位	14.8mm	40mm
冷やす	残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	引張応力	29	202
		電動機取付け ボルト	引張応力	42	185
	残留熱除去系配管	配管本体	一次応力	268	363
閉じ 込める	原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張応力	36	222
	主蒸気配管	配管本体	一次応力	183	417
	原子炉格納容器	本 体	膜応力	199	255

補足：審議のポイントに関する検討結果

〔地震応答解析モデルの妥当性の検討(中越沖地震の知見反映)について〕

「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」(平成20年9月4日、原子力安全・保安院)に基づき、床などの柔軟性を考慮した解析(床柔モデルによる解析)および地震観測記録に基づいた解析(シミュレーション解析)を実施し、床柔モデルによる解析結果に特異な応答性状が現れていないこと、シミュレーション解析結果と建屋上層階の観測記録が整合することから、耐震バックチェックで用いた原子炉建屋の地震応答解析モデル(水平方向)による耐震安全性評価に問題がないものと判断した。

〔残留熱除去系配管及び主蒸気系配管の評価の詳細検討について〕

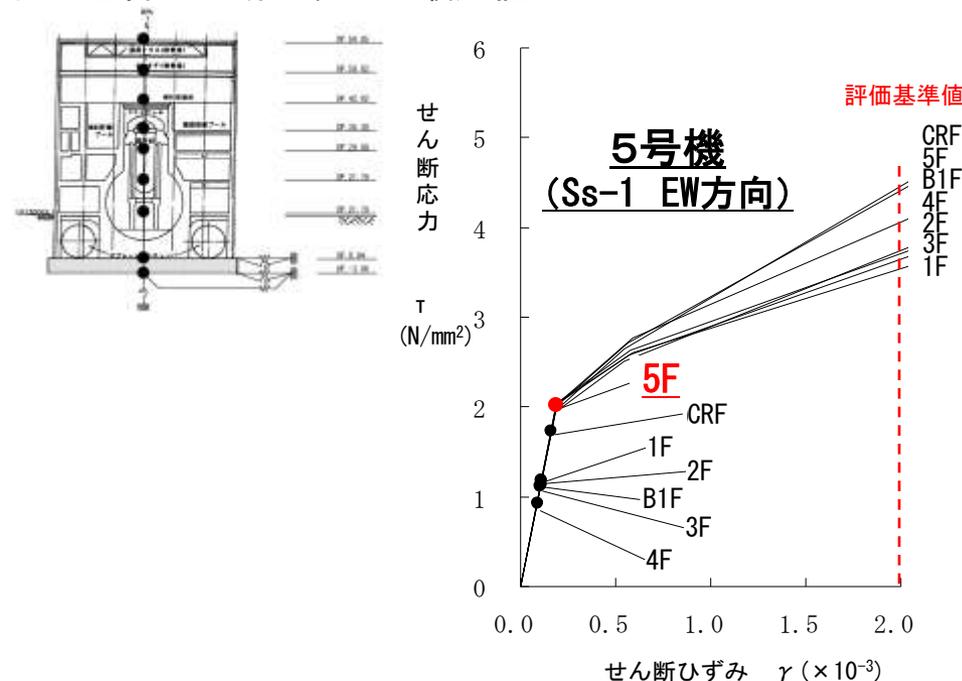
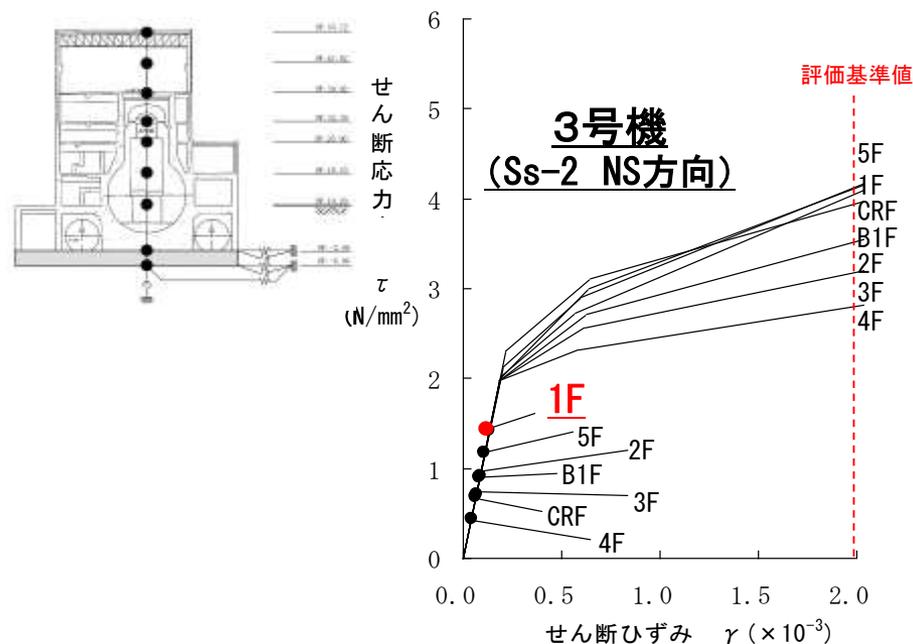
- ・無機多孔質保温材の付加減衰定数について、既往の振動試験データの再整理を行った上で安全側(小さめ)の値として設定されていること(設定の妥当性)、残留熱除去系配管の評価において、無機多孔質保温材の取付け範囲の割合及び支持部材の設置条件が当該減衰定数の適用条件を満たしていること(適用の妥当性)を確認した。
- ・評価プロセスの詳細を検討した結果、構造強度評価を実施するために必要な大型機器連成地震応答解析及び建屋地震応答解析、配管系のスペクトルモーダル解析について、工事計画認可等において実績のあるモデル、解析手法が用いられていることを確認した。
- ・3号機と5号機の配管系の評価結果における相違点とその主な要因を検討し、評価結果における相違点が合理的に説明できる要因を推定した。(その結果は、P24～27「補足：3号機と5号機の評価結果の比較(機器・配管系)」を参照。)

補足：3号機と5号機の評価結果の比較（原子炉建屋）

原子炉建屋の評価結果（3号機と5号機の比較）

基準 地震動 Ss	最大応答せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$) []内は部位				評価 基準値 ($\times 10^{-3}$)
	3号機		参考：5号機		
	NS方向	EW方向	NS方向	EW方向	
Ss-1	<u>0.13</u> [1階]	0.12 [1階, 5階]	0.15 [1階]	<u>0.19</u> [5階]	2.0 以下
Ss-2	<u>0.13</u> [1階]	0.12 [1階]	0.16 [1階]	0.18 [5階]	
Ss-3	0.12 [1階]	0.10 [1階]	0.13 [1階]	0.16 [5階]	

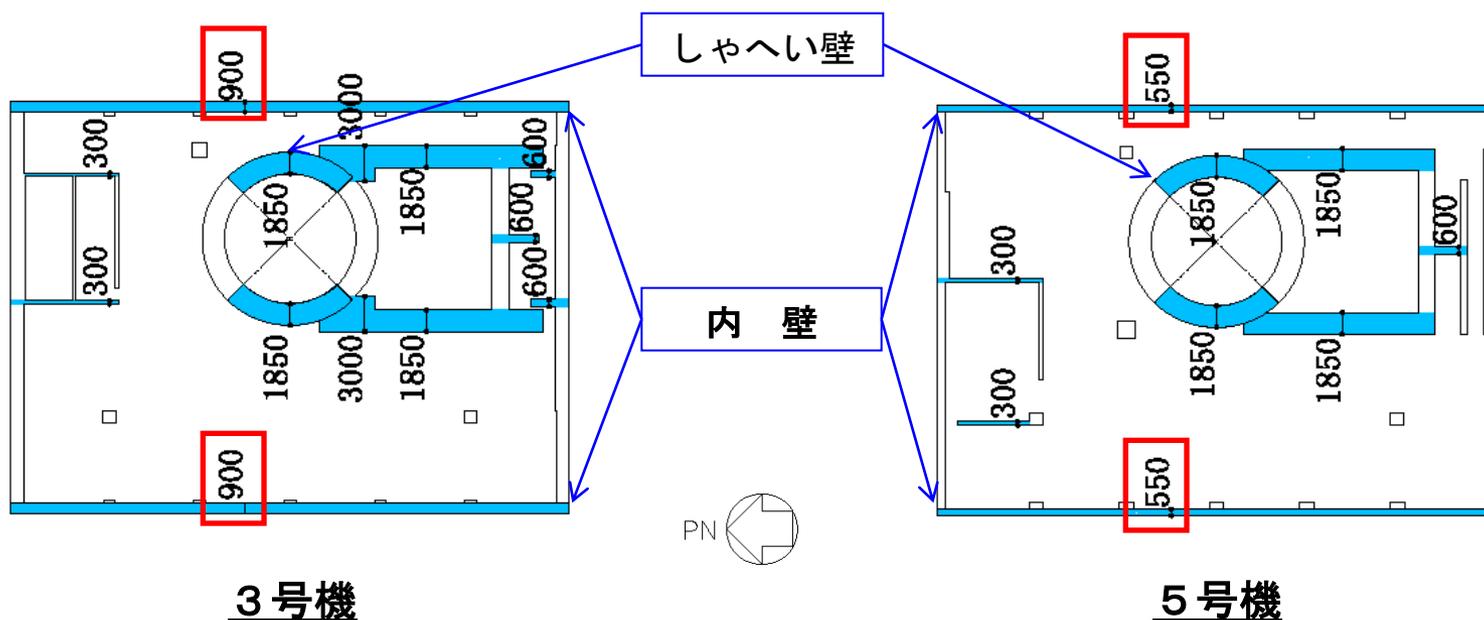
※ 網掛けの下線部は、3号機と5号機のそれぞれの応答せん断ひずみの最大値



せん断スケルトン曲線上の最大応答値の比較

補足：3号機と5号機の評価結果の比較（原子炉建屋）

- ・原子炉建屋の評価結果における3号機と5号機の主な相違点としては、耐震壁の最大応答せん断ひずみについて、3号機の方がほぼ全ての層において5号機より小さい傾向にあることを確認した。
- ・その傾向については、最大応答せん断力が3号機と5号機でほぼ同等であるものの、3号機において内壁の壁厚が厚いことからせん断断面積が相対的に大きく、せん断応力度及びせん断ひずみが小さめに算定されていることによるものと考えた。



耐震壁として考慮した壁の範囲（NS方向、3F）

補足：3号機と5号機の評価結果の比較（機器・配管系）

耐震安全上重要な機器・配管系の評価結果

区分	評価対象 設備等	評価部位	3号機				参考：5号機			
			応力 分類	計算値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)	評価 手法※1	応力 分類	計算値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)	評価 手法※1
止める	炉心支持 構造物	シユラ ウド サポート	軸圧縮	33	208	①	軸圧縮	24	231	②
			膜	85	300	②	膜	86	300	②
	制御棒 挿入性	燃料 集合体	相対 変位	14.8 [mm]	40.0 [mm]	②	相対 変位	13.8 [mm]	40.0 [mm]	②
冷やす	残留熱系 除去 ポンプ	基礎 ポルト	引張	29	202	②	引張	29	202	②
		電動機 取付 ポルト	引張	42	185	②	引張	42	185	②
	残留熱系 除去 配管	配管本体	一次	<u>268</u> ※2	363	②	一次	<u>197</u> ※2	364	②
閉じ 込める	原子炉 压力容器	基礎 ポルト	引張	36	222	②	引張	39	222	②
	主蒸気系 配管	配管本体	一次	<u>183</u> ※2	417	②	一次	<u>356</u> ※2	417	②
	原子炉 格納容器	ドライ ウェル	膜	<u>199</u> ※2	255	①	膜	<u>90</u> ※2	255	①

※1 ①応答倍率法による評価 ②詳細評価（工事計画認可において実績のある手法による評価）

※2 網掛けの下線部は、3号機と5号機の計算値について差異が比較的大きなもの。

補足：3号機と5号機の評価結果の比較（機器・配管系）

耐震安全上重要な機器・配管系の評価結果における3号機と5号機の主な相違点とその主な要因は以下のとおり。

【残留熱除去系配管（配管本体）】

- ・相違点としては、一次応力の計算値について3号機の方が5号機の約1.4倍と大きい。
- ・主な要因としては、3号機と5号機で最大応力発生点付近の配管系の引き回し、支持構造物の設置位置が異なっており、モデルの形状、解析条件及び応答性状が異なることと推定した。

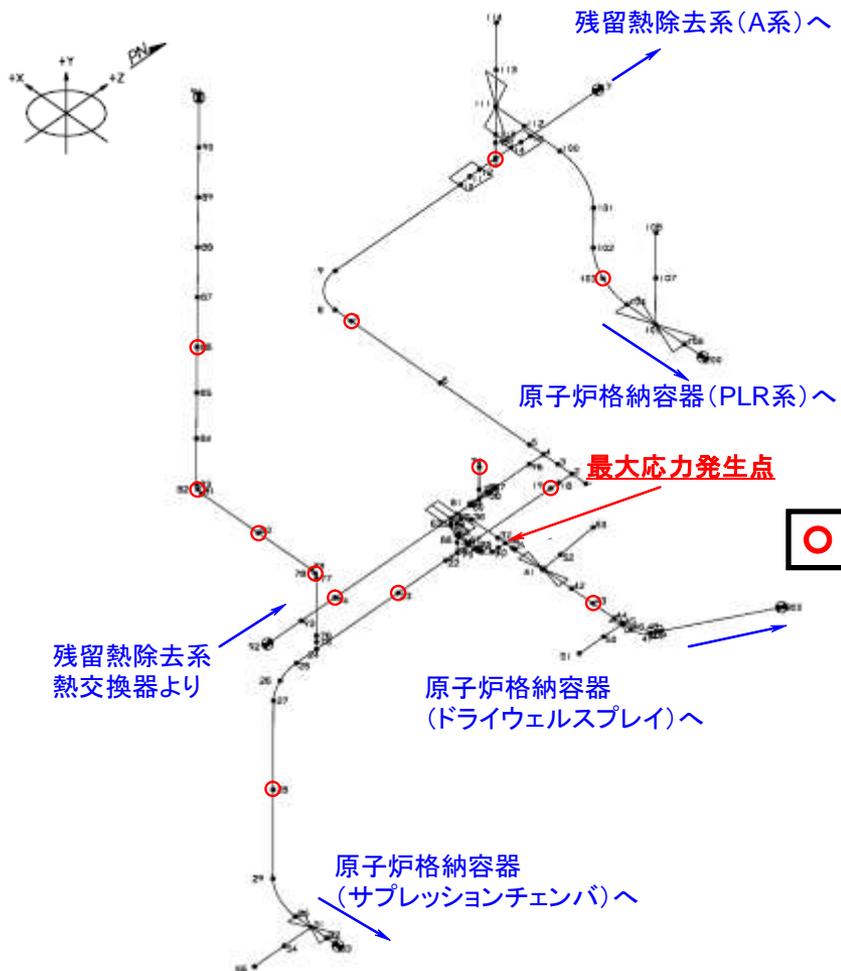
【主蒸気系配管（配管本体）】

- ・相違点としては、一次応力の計算値について3号機の方が5号機の約0.5倍と小さい。
- ・主な要因としては、上記の残留熱除去系配管（配管本体）と同様にモデルの形状、解析条件及び応答性状が異なることと推定した。

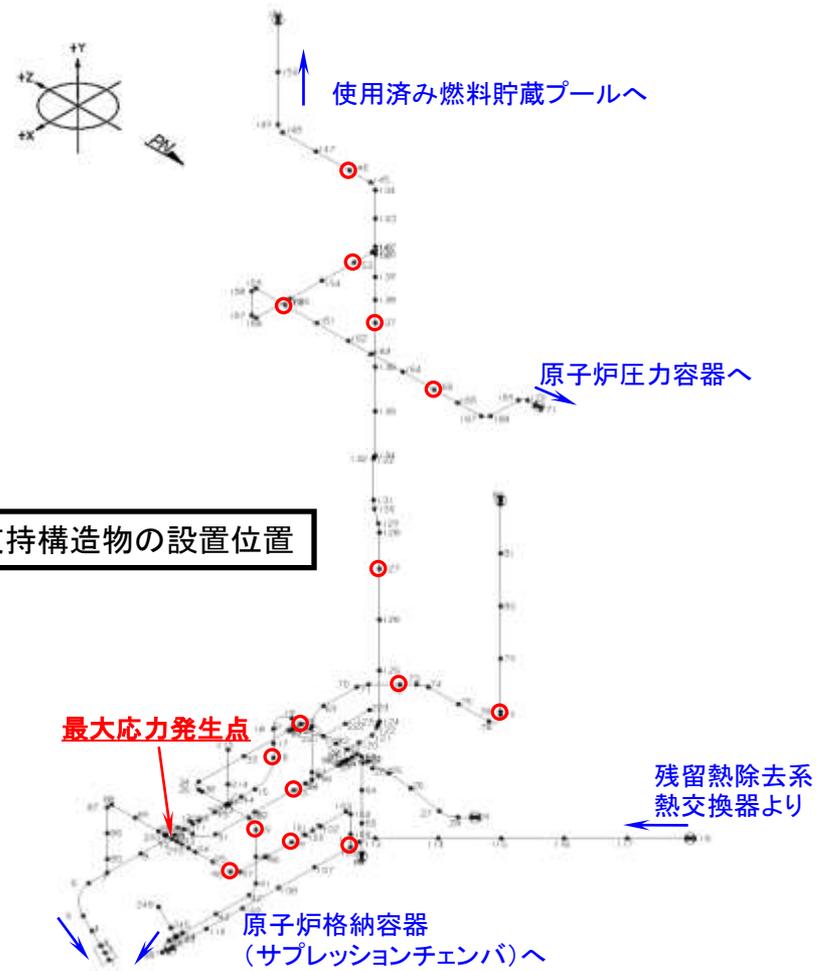
【原子炉格納容器（ドライウエル）】

- ・相違点としては、膜応力の計算値について3号機の方が5号機の約2.2倍と大きい。
- ・3号機も5号機も応答倍率法を適用して応力を評価しているが、主な要因としては、既往評価に対する応答比の算定方法について、3号機では5号機の審議における専門家の意見を踏まえ、より大きな余裕を見込んだ方法に変更したことと推定した。

補足：3号機と5号機の評価結果の比較（機器・配管系）



3号機（B系）

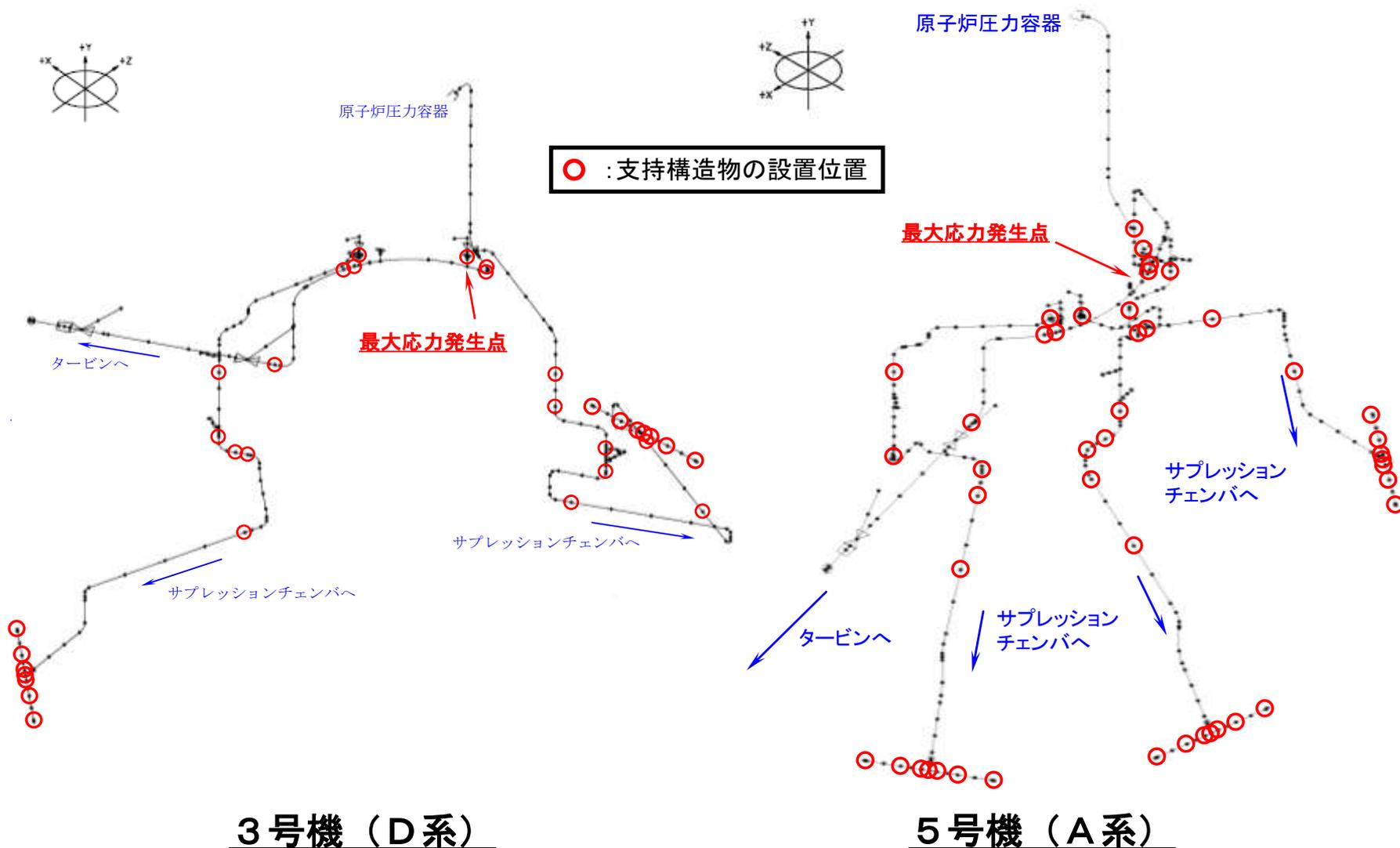


5号機（B系*）

残留熱除去系配管の解析モデル

※ 3号機と同じB系であるが、最大応力が発生する部位が異なる。

補足：3号機と5号機の評価結果の比較（機器・配管系）



主蒸気系配管の解析モデル

福島第一原子力発電所3号機の耐震安全性

以上のことから、原子力安全・保安院は、新耐震指針に照らした基準地震動に対しても、福島第一原子力発電所3号機の「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する主要施設の耐震安全性が確保されると判断した。



福島第一原子力発電所

東京電力HPから

用語解説

【用語解説】(本資料中に使われていない用語も含めて解説)

「変動地形学的調査」

空中写真判読により、地形の成因を考慮して活断層の可能性のある地形を抽出する調査である。崖や谷、山の尾根などの地形的な特徴が直線的にまたは緩やかな曲線状に続く地形だけではなく、段丘面の傾きや河川や尾根の屈曲などに着目し、活断層の可能性のある地形として判読するものである。

「地球物理学的調査」

地下の地質構造などを地震波、電磁気、重力などを利用して調査する方法である。主なものとして、陸上で行う反射法地震探査、電気探査、重力探査、海上で行う海上音波探査がある。

「空中写真判読」

調査対象範囲を上空から撮影した写真を観察することにより、地形を立体的に見て、変動地形やリニアメントなどの地形を読み取る方法である。

「航空レーザ計測」

航空機(飛行機またはヘリコプター)から地上に向けて多数のレーザパルスを発射し、地表面や地物で反射して戻ってきたレーザパルスから、高密度な三次元デジタルデータを取得する新しい測量技術である。

「トレンチ調査・表土剥ぎ調査」

トレンチとは溝のことで、活断層が通過する地点に調査溝を掘り、表土はぎ調査とは活断層が通過する地点の表土をはぎ取り、岩盤を露出させ、断層やその周辺の地層断面を詳細に観察する方法である。

「ボーリング調査」

地盤を構成する岩石などを棒状のコアとして連続的に採取し、これを観察して地質状況を調査する方法である。

「高密度重力探査」

重力探査は、地盤を構成する土や岩の密度差を利用して地下構造を調査する方法である。柔らかい堆積層に比べて固い岩盤は密度が大きいため、岩盤が浅い場所は重力値が大きく、深い場所には重力値が小さくなる。このため、観測された重力値の変動(重力異常)を基に地盤構造を推定することができる。

「反射法地震探査」

地面を人工的に振動させて弾性波と呼ばれる波を発生させ、その反射波を捉えて、地下の地質構造を調査する方法である。

「微動アレー探査」

微動アレー探査とは、常に地表付近で発生している微小な振動(常時微動)を、地表に設置した複数の地震計で同時に測定し、測定したデータを解析することで地下の速度構造を推定する調査手法である。

「海上音波探査」

海上において実施される反射法地震探査の一種で、海底下の地層の境界で反射してくる弾性波を利用して、海底下の地質構造を明らかにするものである。

「リニアメント」

谷や尾根の傾斜急変部、屈曲等の地形的特徴が直線ないしそれに近い状態で配列している場合、その線状の地形をいう。

「変動地形」

地震や火山活動による地殻の変動に起因する特徴的な地形をいい、地形の切断、屈曲、撓曲、傾動、逆傾斜として確認される。

【用語解説】(本資料中に使われていない用語も含めて解説)

「基準地震動Ss」

基準地震動Ssとは、施設の耐震設計において基準とする地震動で、敷地周辺の地質・地質構造(地層の立体的な分布や相互関係)ならびに地震活動性等の地震学および地震工学的見地から、施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与える恐れがあると想定することが適切な地震動をいう。

なお、地震動とは地震波がある地点に到達することによって生じる地盤の揺れをいう。地震の発生によって放出されたエネルギーは、地震波として震源から地殻内のあらゆる方向に伝わっていき、これがある地点に到達すると、その地盤を揺らす。地震動は、加速度時刻歴、応答スペクトル等によって表される。

「応答スペクトル法に基づく地震動評価」

地震のマグニチュードと震源からの距離などの関係をもとに、断層モデルによる手法より少ない変数で簡易的に地震動を評価する方法である。

「断層モデルを用いた地震動評価」

断層モデルとは、震源の断層面を地震動を求める計算手法として用いるためにモデル化したものをいう。従来は、震源を点として考え、その震源までの距離およびマグニチュードによって地震動の計算を行っていた。しかし、震源が近く、その震源断層面の広がりや形状を考慮することがより適切であると考えられる場合には、その断層の形状および破壊形式を考えて地震動を計算する方がより合理的である。このため、地震の原因となる断層をモデル化して地震動を計算する手法がいくつか提案されている。

「アスペリティ」

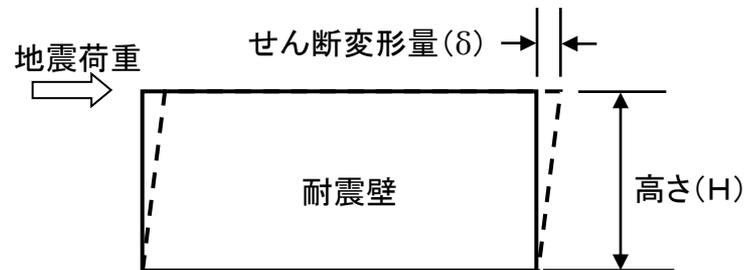
断層面におけるすべりの大きい部分、つまりアスペリティ以外の部分に比べ放出されるエネルギーが大きい部分のこと。

「応力降下量」

断層が破壊すると、そこに蓄えられていたエネルギーが解放されるため、岩盤中の応力が降下する。応力降下量とは、断層破壊(地震)の直前の応力と直後の応力との差をいう。

「せん断ひずみ」

地震等の外力を受けた際に、そのせん断力(部材をずらそうとする力)によって発生するひずみのこと(下図参照)。なお、単位はrad(ラジアン)で表される。



$$\text{せん断ひずみ} = \text{せん断変形量}(\delta) \div \text{耐震壁の高さ}(H)$$