

柏崎刈羽原子力発電所7号機
タービン建屋の地震応答解析における
耐震壁及び補助壁の取扱いの
不適合について

平成21年 4月 6日



東京電力

不適合の概要（1）

- 7号機タービン建屋の弾塑性解析で用いる、汎用の表計算ソフトにより算出した建屋の復元力特性（応力-ひずみ関係）において、本来耐震壁と補助壁を考慮すべきところを補助壁が一部考慮されていなかった。
- 建屋の復元力特性の第一折れ点※以下は適正に評価されていたが第一折れ点以降の建屋の耐力を過小評価していた
 - ※第一折れ点：「JEAG4601-1991」により定められている、鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性上で最初に剛性が変化するポイント
- 平成21年4月2日
本事象について原子力安全・保安院へ報告、公表
- 同日指示文書受領
「柏崎刈羽原子力発電所7号機のタービン建屋の地震応答解析における耐震壁及び補助壁の取扱いの不適合について」（平成21・04・02原院第3号）

不適合の概要（2）

■建屋復元力特性の設定手順

①初期剛性の算定

振動モデルの初期せん断剛性 (K_s) = K_{s1} + K_{s2}

K_{s1} = 耐震壁のせん断断面積(A_w1) × せん断弾性係数(G)

K_{s2} = 補助壁のせん断断面積(A_w2) × せん断弾性係数(G)

正しく行われている

②復元力特性の折れ点の設定（JEAG4601の方法）

第一折れ点：耐震壁の諸元より JEAG4601 の方法により算定

第二折れ点：第一折れ点の位置より JEAG4601 の方法により算定

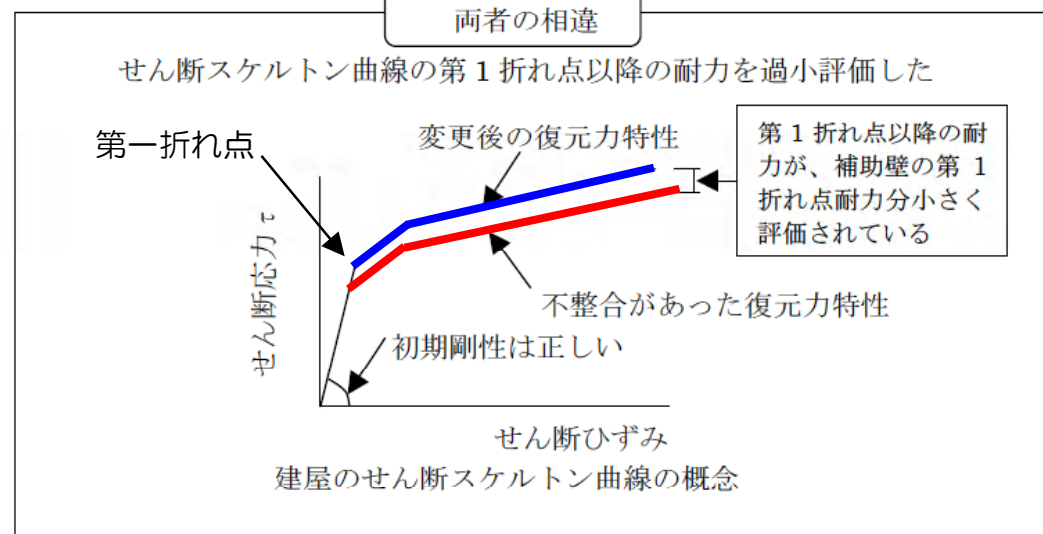
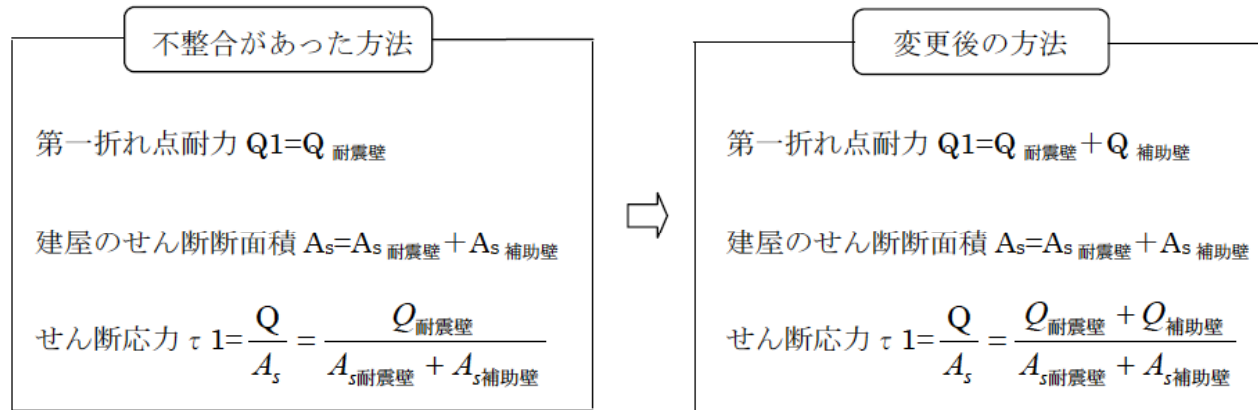
終局点：JEAG4601 の耐力評価式（広沢式等）により算定

今回不整合があった

第一折れ点の設定が違ったことによる影響がでた

不適合の概要（3）

■ 建屋復元力特性の算定時における見直しの状況

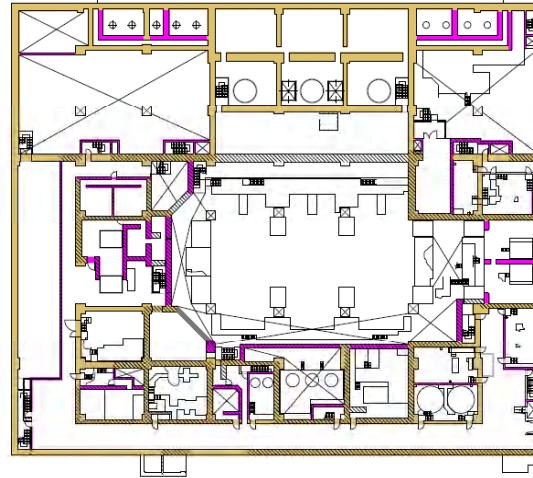


タービン建屋 耐震壁と補助壁

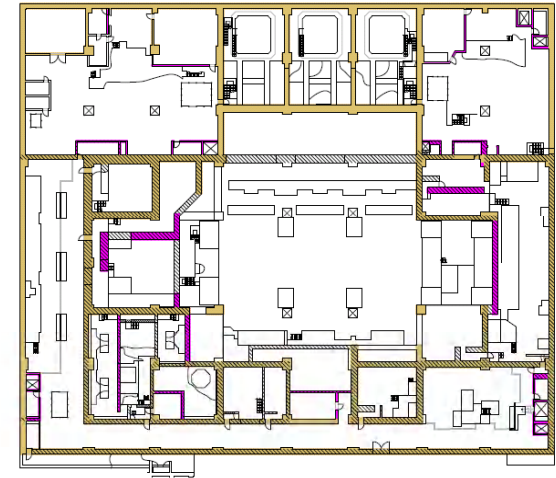
タービン建屋



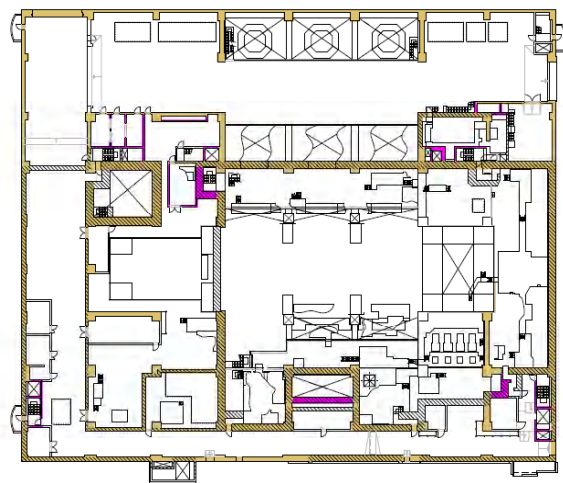
地下2階 (T.M.S.L.-5.1m)



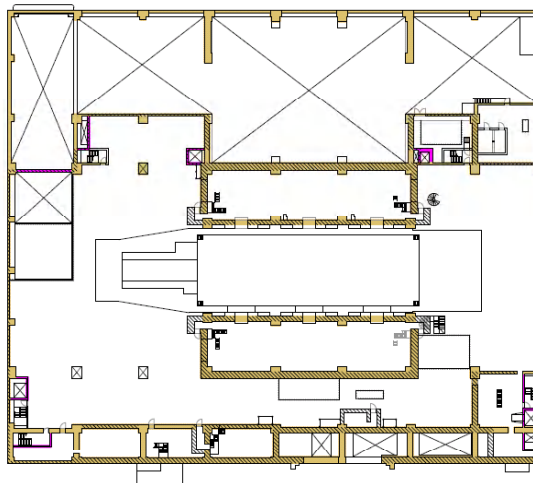
地下中2階 (T.M.S.L.-1.1m)






地下1階 (T.M.S.L. 4.9m)



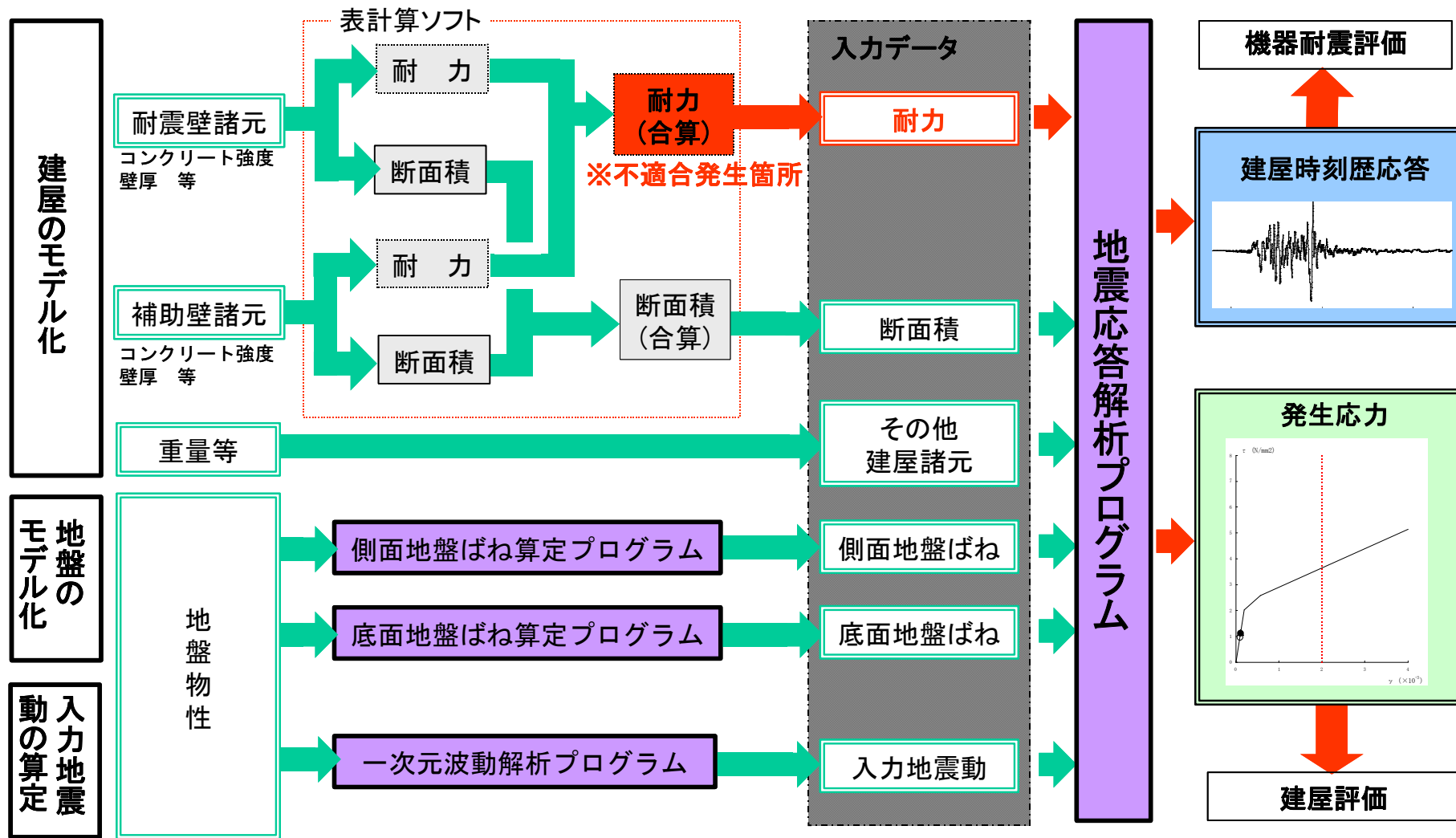
1階 (T.M.S.L. 12.3m)



2階 (T.M.S.L. 20.4m)

-  耐震壁として剛性を評価する範囲 (設計時と同じ)
-  補助壁として剛性を評価する範囲
-  遮蔽壁

建屋の地震応答解析フロー



<凡例>

- : 正確なデータの流れ
- : 不正確なデータの流れ
- : 「解析実施状況調査」により当社が確認を実施した箇所を示す
- : 「許認可解析の検証マニュアル」に基づき妥当性を確認された解析コード

本不適合による影響範囲

■中越沖地震による健全性評価に対する影響

- 中越沖地震によるタービン建屋のせん断ひずみの応答結果が第一折れ点以下であることから、建屋の健全性評価に関して影響を及ぼさない。
- 建屋解析への影響がないため、設備への影響もない

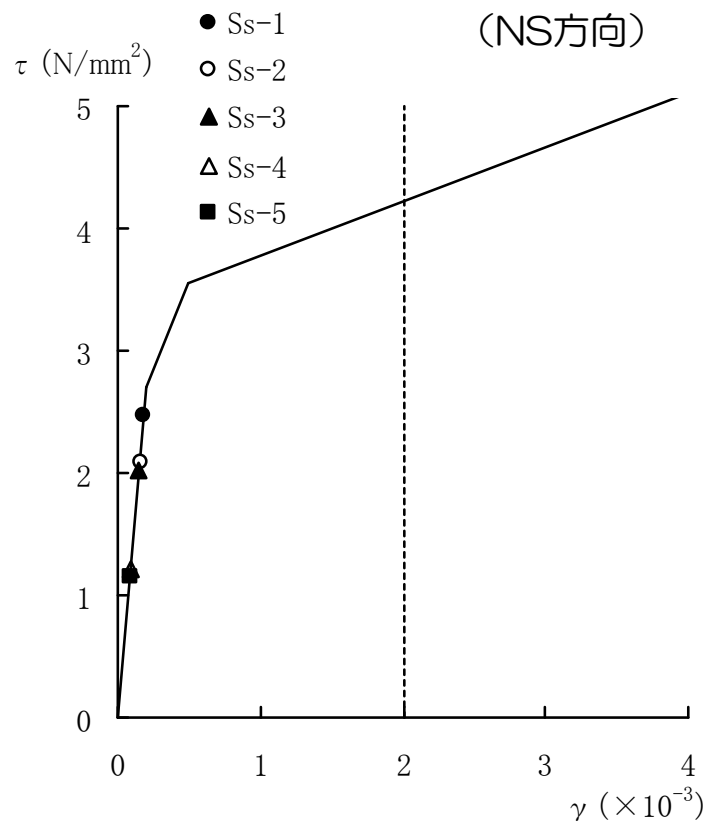
■基準地震動Ssによる耐震安全性評価に対する影響

- タービン建屋の応答が第一折れ点以下であれば結果への影響はないが、部位によっては第一折れ点を超える場合があることから耐震安全性の再評価が必要となる。
- タービン建屋の地震応答解析結果に影響するため、タービン建屋に設置されている耐震安全上重要な11設備の地震応答解析結果に対しても影響を与える。

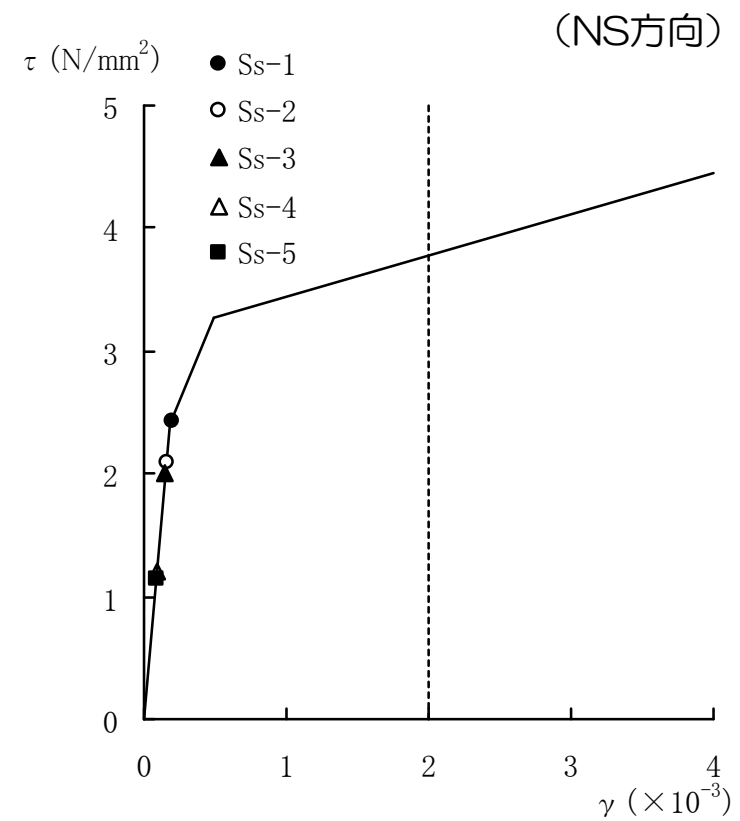
せん断スケルトン上の応答値（例）

■部材No.7の応答値（T.M.S.L.-5.1m~-1.1m）

再評価後のせん断スケルトン



<参考>再評価前のせん断スケルトン



耐震安全性の再評価結果 (タービン建屋(1/3))

機能維持部位における耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS方向)

a軸 (×10⁻³)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	評価基準値
B2F	0.19	0.16	0.15	0.09	0.09	2.0
	0.19	0.16	0.15	0.09	0.09	

b軸 (×10⁻³)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	評価基準値
1F	0.11	0.08	0.09	0.05	0.05	2.0
	0.11	0.08	0.09	0.05	0.05	
B1F	0.11	0.09	0.09	0.05	0.05	
	0.11	0.09	0.09	0.05	0.05	
MB2F	0.12	0.10	0.09	0.05	0.05	
	0.12	0.10	0.09	0.05	0.05	
B2F	0.15	0.13	0.12	0.06	0.07	
	0.15	0.13	0.12	0.06	0.07	

※ 上段がタービン建屋応答解析結果の見直し前、下段が見直し後の値

耐震安全性の再評価結果 (タービン建屋(2/3))

機能維持部位における耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW方向)

a軸 (×10⁻³)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	評価基準値
B1F	0.13	0.12	0.11	0.10	0.11	2.0
	0.13	0.12	0.11	0.10	0.11	
MB2F	0.16	0.16	0.12	0.13	0.14	
	0.16	0.16	0.12	0.13	0.14	
B2F	0.17	0.17	0.12	0.14	0.14	
	0.17	0.17	0.12	0.14	0.14	

e軸 (×10⁻³)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	評価基準値
B1F	0.09	0.08	0.07	0.06	0.07	2.0
	0.08	0.08	0.07	0.06	0.07	
MB2F	0.13	0.12	0.09	0.09	0.10	
	0.12	0.12	0.09	0.09	0.10	
B2F	0.15	0.14	0.11	0.11	0.12	
	0.14	0.14	0.11	0.11	0.12	



※ 上段がタービン建屋応答解析結果の見直し前、下段が見直し後の値

耐震安全性の再評価結果 (タービン建屋(3/3))

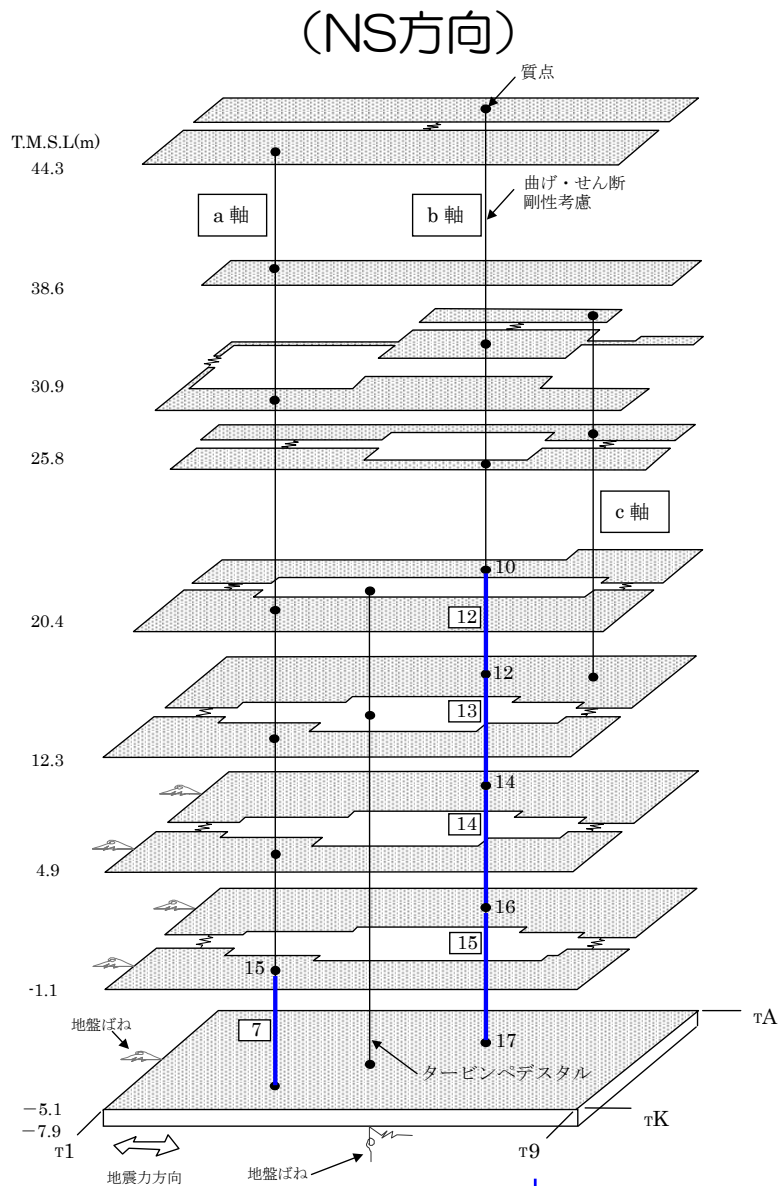
機能維持部位における耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW方向)

階	h軸					評価基準値
	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	
1F	0.13	0.13	0.11	0.12	0.12	2.0
	0.14	0.14	0.11	0.12	0.12	
B1F	0.22	0.22	0.13	0.14	0.15	
	0.17	0.17	0.13	0.14	0.15	

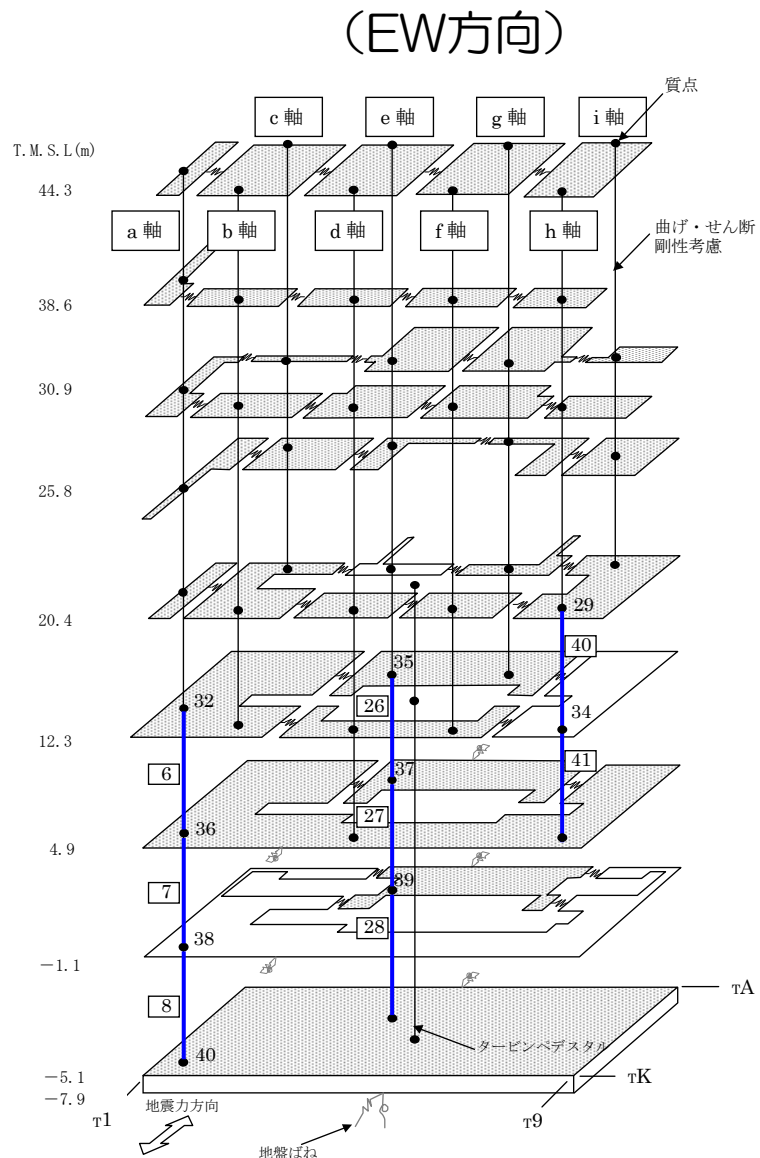
※ 上段がタービン建屋応答解析結果の見直し前、下段が見直し後の値

耐震安全性の再評価結果

(タービン建屋解析モデル)



：機能維持範囲を含む部位



：機能維持範囲を含む部位

耐震安全性評価の再評価結果（機器構造強度評価(1/2)）

確認対象	評価部位	応力分類	発生応力 MPa ※1	評価基準値 MPa	評価 方法※2	備考
原子炉補機冷却水 系熱交換器	サポ-トアソカボルト	せん断	76	159	B	※3
			77			
原子炉補機冷却水 系ポンプ	原動機取付ボルト	せん断	13	146	A	
			13			
原子炉補機冷却海 水系ポンプ	原動機取付ボルト	せん断	70	118	A	
			70			
原子炉補機冷却海 水系ストレナ	基礎ボルト	せん断	7	366	A	
			7			

※1 上段がタービン建屋応答解析結果の見直し前で下段が見直し後の値

※2 「評価方法」の欄に記載されている[A], [B]の凡例は、以下のとおり。

A：応答倍率法において、基準地震動Ssによる床応答スペクトル等と、既往評価で用いた床応答スペクトル等から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を用いた評価方法

B：詳細評価（スペクトルモーダル解析法等による評価）

※3 耐震強化工事実施

耐震安全性評価の再評価結果（機器構造強度評価(2/2)）

確認対象	評価部位	応力分類	発生応力 MPa ※1	評価基準値 MPa	評価方法※2	備考
給水系配管本体	配管本体	一次	195	380	B	※3
			201			
給水系配管サポート	サポート部材	組合せ	247	280	B	※3
			247			
原子炉補機冷却水系配管本体	配管本体	一次	156	344	B	※3
			161			
原子炉補機冷却水系配管サポート	サポート部材	組合せ	0.91	1.0	B	※3
			0.91			※4
原子炉補機冷却海水系配管本体	配管本体	一次	66	354	B	※3
			66			
原子炉補機冷却海水系配管サポート	サポート部材	組合せ	189	280	B	※3
			190			

※1 上段がタービン建屋応答解析結果の見直し前で下段が見直し後の値

※2 「評価方法」の欄に記載されている[B]の凡例は、以下のとおり。

B：詳細評価（スペクトルモーダル解析法等による評価）

※3 耐震強化工事実施

※4 圧縮力と曲げ応力を受ける部材の組合せ応力は次式を満足しなければならない

$$\left(\frac{\text{圧縮応力}}{\text{許容圧縮応力}}\right) + \left(\frac{\text{曲げ応力}}{\text{許容曲げ応力}}\right) \leq 1$$

耐震安全性評価の再評価結果（機器動的機能維持評価(1/2)）

■床置き設備

確認対象	評価部位	水平加速度 (G※1)		上下加速度 (G ※1)		詳細評価
		応答加速度※2	機能確認済加速度	応答加速度※2	機能確認済加速度	
原子炉補機冷却水系ポンプ	軸位置	0.86	1.4	0.74	1.0	—
		0.87		0.74		
原子炉補機冷却海水系ポンプ	コラム先端部	0.86	10.0	0.74	1.0	—
		0.87		0.74		

※1 G=9.80665 (m/s²)

※2 上段がタービン建屋応答解析結果の見直し前で下段が見直し後の値

耐震安全性評価の再評価結果（機器動的機能維持評価(2/2)）

■ 弁

確認対象	評価部位	水平加速度 (G※1)		上下加速度 (G ※1)		詳細評価
		応答 加速度※2	機能確認済 加速度	応答 加速度※2	機能確認済 加速度	
残留熱除去系 (RHR 注入弁 (A))	弁駆動部	4.0	6.0	1.0	6.0	—
		5.2		1.0		
給水系 (FDW原子炉 給水ライン外側隔離弁 (A))	弁駆動部	1.5	6.0	1.0	6.0	—
		1.5		1.0		
原子炉補機冷却水系 (RCWポンプ (A) 吐出逆止弁)	弁駆動部	1.1	6.0	1.0	6.0	—
		1.2		1.0		
原子炉補機冷却海水系 (RSW海水ストレ ーナ (C) ブロー弁)	弁駆動部	1.1	6.0	0.9	6.0	—
		1.1		0.9		

※1 G=9.80665 (m/s²)

※2 上段がタービン建屋応答解析結果の見直し前で下段が見直し後の値

本不適合の類似事象の有無について

- 本不適合は7号機のタービン建屋に関するものであるが、既に報告書提出済みの施設である7号機原子炉建屋、6号機原子炉建屋、6号機タービン建屋及び6/7号機コントロール建屋の計4建屋について、建屋の地震応答解析結果が妥当であることを確認した。

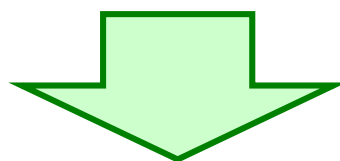
- 確認方法

以下の2点についての確認を実施。

- ① 各層の耐力を算出する際に、耐震壁に加え補助壁が適切に考慮されていること
- ② 各層の耐力以外の入力データについても、その計算過程も含め誤りがないこと

本不適合の影響のまとめ

- タービン建屋の耐震安全性を再評価した結果、せん断ひずみが基準値を下回っていることから、耐震安全性が確保されていることを確認
- タービン建屋に設置されている11設備の耐震安全性を再評価した結果、いずれも評価基準値を下回っていることから、耐震安全性が確保されていることを確認



- 本不適合により、7号機の設備健全性および耐震安全性が確保されていることを確認

7号機タービン建屋解析メーカーにおける問題点（1/2）

■ 7号機タービン建屋解析メーカーにおける問題点

- ① 復元力特性を算出するに当たり、表計算ソフトを用いているが、表の計算の作成等は解析担当者個人に委ねられており、検算等による表計算の検証を行っていなかった。
- ② 確認者・実施責任者（審査者）も解析担当者が表計算ソフトの計算式について検証したか否か確認せず、またその計算式の内容について確認を行っていなかった。

■ 解析プログラムの状況（P5のフロー図参照）

- 地震応答解析プログラム
- 側面地盤ばね算定プログラム
- 底面地盤ばね算定プログラム
- 1次元波動解析プログラム

→ 上記許認可申請に係る解析プログラムについて、全て適切に検証が行われているものであった。

7号機タービン建屋解析メーカーにおける問題点（2/2）

■入力データを誤った背景

- 当社は従来考慮していなかった補助壁を考慮するよう解析メーカーに指示した。
- 解析担当者は、その指示により補助壁の諸元を表計算ソフトに入力したものの、表計算ソフトの加算範囲を変更しなかった。またその計算式の検証を行っていなかったため、入力データ作成時に補助壁の耐力が地震応答解析プログラムへの入力値として加算されていないことに気づかなかった。
- その結果、設備の耐震安全性評価に用いる建屋応答データは補助壁の耐力が考慮されていないものが算出され、そのデータを機器メーカーに受け渡した。

過去の解析業務の不適合への対応状況(1/2)

- 許認可申請に係る解析の不適合（平成17年）を受けて、「許認可解析検証マニュアル」を制定し、解析メーカーに以下の要求事項を明確化
 - ① 解析実施前に設計・検証計画を立案し提出すること
 - ② 解析作業手順書に基づいて解析を行うこと
 - ③ 解析プログラムへの入力値について入力根拠書を作成すること
 - ④ 許認可解析に新規性がある場合にはデザインレビュー会議にて解析の妥当性を確認すること
 - ⑤ 解析業務の記録を適正に保管すること

- 解析実施状況調査により、許認可解析の信頼性を向上

過去の解析業務の不適合への対応状況(2/2)

- 「当社原子力発電所における配管の構造強度評価結果の一部誤り」（平成20年）を受け、「許認可解析の検証マニュアル」を改訂し、解析メーカーへの要求・確認事項として明確化
 - ①解析に使用するプログラムは過去の実績以外の方法（簡易モデル・標準問題を用いた解析結果との比較、手計算・理論解による検証等）で、妥当性の検証を行うこと
 - ②データの授受を行う解析プログラムがある場合に、データ間のインターフェース仕様を確認の上、プログラム検証が行われていること
- 当社設備の許認可申請等に係る解析プログラムについて点検を実施し、現在使用されている許認可申請に係る解析プログラムが、解析メーカー各々の管理により適切に検証が行われていることを確認

当社における解析実施状況調査結果

- 解析実施状況調査チェックシートに基づき以下のとおり2回調査を実施したが、入力値の妥当性確認が不足していた
 - ①（平成20年6月25日）中越沖地震による7号機タービン建屋健全性評価に対して以下を確認
 - ◆ 入力値の妥当性については、解析メーカーが作成した入力根拠書が工事計画認可申請時のデータ等を用いて適正に作成されており、かつこのことが解析メーカー社内でチェックされていること
 - ◆ 入力根拠書に記載されている数値が適切に解析プログラムに入力されていること
 - ◆ 過去の類似解析結果と固有値や応答の傾向が整合していること
 - ◆ 解析プログラムのアウトプットが適切に報告書に記載されていること
 - ②（平成20年11月21日）7号機のタービン建屋の基準地震動Ssによる耐震安全性評価結果に対して以下を確認
 - ◆ 入力値の妥当性について中越沖地震による健全性評価からの変更箇所を中心として入力根拠書により確認
 - ◆ ひずみの応答結果が評価基準値と比較して十分余裕があり、中越沖地震による健全性評価結果を含む過去の類似解析結果と応答の傾向等が整合していたことから、解析結果が妥当であると判断
 - ◆ 解析プログラムのアウトプットが適切に報告書に記載されていること

当社における調査結果（当社における問題点）

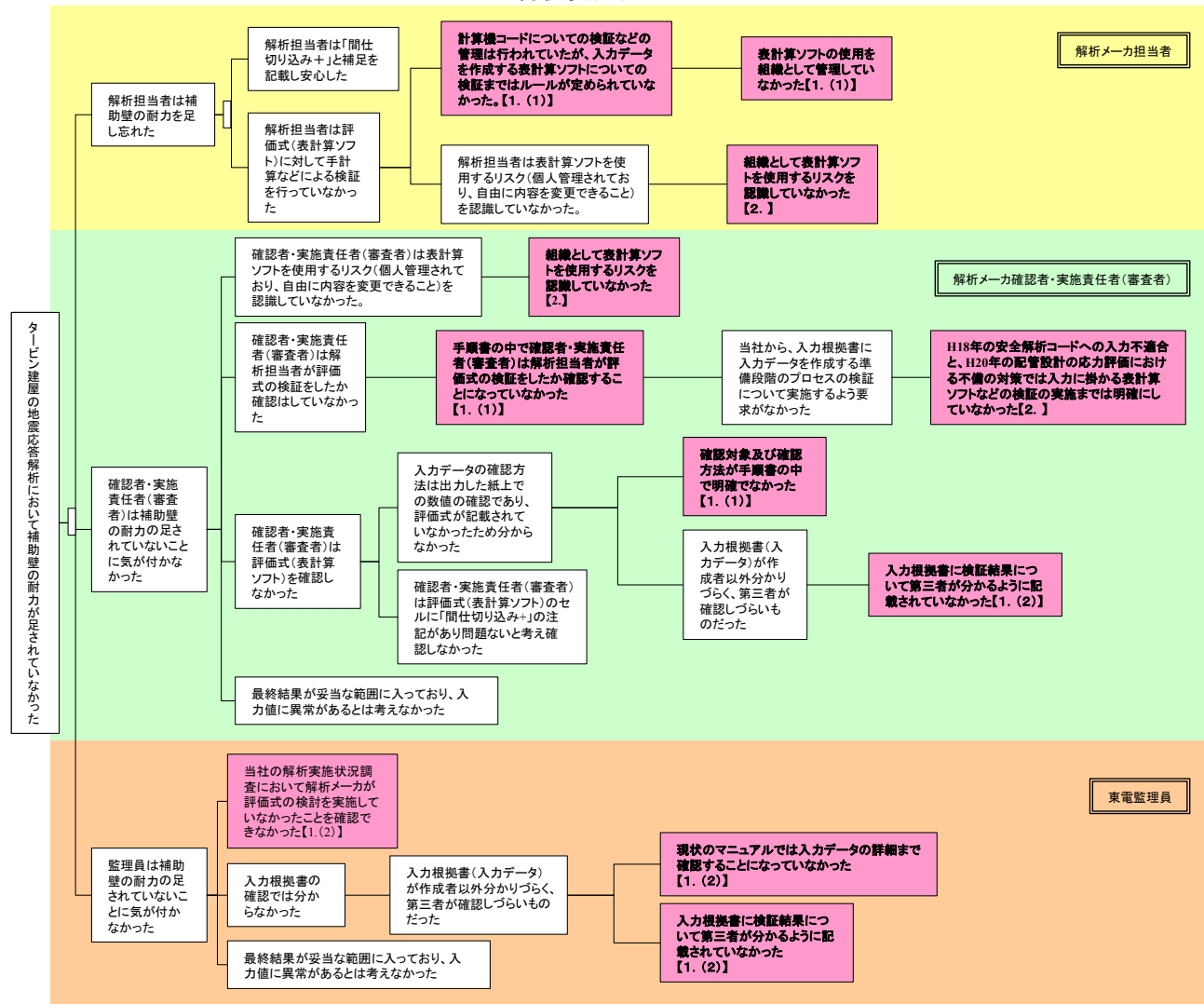
- 当時の当社の解析実施状況調査では、入力根拠書は表計算ソフトの算出結果について第三者的にたどっていける内容となっておらず、当社の確認として、不十分な点があった。
- 従来考慮していなかった補助壁を考慮するにあたり、7号機タービン建屋解析メーカーに対して十分な注意喚起ができていなかった。

原因究明の結果

- 根本的な原因を究明するため、次の問題点に対し背後要因の分析を実施（次項参照）
 - ① 7号機タービン建屋解析メーカーの解析担当者は、表計算ソフトの計算式について、自ら検証を行っていなかった。
 - ② 確認者・実施責任者(審査者)も解析担当者が表計算ソフトの計算式について検証したか否か確認せず、また計算式の内容について確認を行っていなかった。
 - ③ 当社においてもこのことを確認出来ていなかった。
- 背後要因分析の結果
 - 組織として表計算ソフトを管理していなかったこと
 - ⇒ ①、②の背後要因
 - 当社としても確認が不十分だったこと
 - ⇒ ②、③の背後要因
 - 表計算ソフトの検証や組織的管理の要求を明確にしていなかったこと
 - ⇒ ①、②の背後要因

背後要因図

背後要因図



対策項目

1. 入力データをより確実にするための対策

(1) 解析メーカにおける再発防止対策
今回の問題の大きな要因である表計算ソフトの管理の明確化として、当社は、全ての解析メーカに対して、解析業務のために表計算ソフトを用いて入力データを作成する場合、そのソフトの検証を行い、標準化を図る等、組織として管理を行うことを要求する。

(2) 当社における再発防止対策
解析業務における当社の管理プロセス、特にその確認プロセスの改善として以下の対策を実施する。
①当社は、今後の解析実施状況調査において、上記の実施状況を確認する。

②解析業務において表計算ソフトを用いる場合、入力根拠書の中で表計算ソフトの検証結果が分かるようにすることを解析メーカに要求し、これを確認する。

③通常解析からの変更分については入力データの詳細について確認する。

2. 今後解析業務の品質を向上させるための対策

平成17年の許認可申請に係る解析の不適合と、平成20年の配管設計の応力評価における不備の対策は解析コードについての検証や入力データ管理の上では現在も有力な対策であり、今後も継続して取り組む。しかしながら、入力データを作り込むプロセスの検証及び表計算ソフトの組織的の管理の明確化をしていなかったことに鑑み、また、入力データ作成における表計算ソフトを使用するリスクを解析メーカと共有できなかったという反省にたち、今後解析業務に係わるヒヤリ・ハットを収集したり、良好事例を紹介したりして、不適合の発生を未然に防止することを目的として事業者と解析メーカで情報を共有し検討する場を設ける。

層の耐力算出シート図（表計算ソフト）

耐震壁の耐力の合計(A)

補助壁の耐力(B×C)が算入されていない

要素番号	壁番号	位置	D(m)	T(m)	せん断曲げ	Q1	γ1	Q2	γ2	Q3	γ3
342	C2*4		13.40	0.30	0	1.665E+07	1.749E-04	2.248E+07	5.247E-04	3.0.E+07	4.000E-03
	C7*9		25.00	0.40	0	2.254E+07	1.800E-04	3.043E+07	5.401E-04	4.3.E+07	4.000E-03
	D2*4	D2*9	25.40	1.10	0	7.470E+07	1.828E-04	1.008E+08	5.483E-04	8.7.E+07	4.000E-03
	D7*9		25.00	1.40	0	9.147E+07	1.883E-04	1.235E+08	5.650E-04	1.0.E+08	4.000E-03
	E2*3		13.70	1.60	0	4.896E+07	1.714E-04	6.610E+07	5.143E-04	7.4.E+07	4.000E-03

耐震壁の耐力 [BL5]~[BL9]

耐震壁の耐力の合計 ..A [BO181]

補助壁の応力 ..B [BP185]

層の耐力 (表示数式により算出)

	A	B	C	D	E
	壁厚 m	壁長さ m	せん断断面積m2		
30					
31	T0~TDの合計			12.13	
32		0.3	10.4	3.12	
33		0.3	8.45	2.54	
34		0.3	4	1.20	
35		0.3	2.6	0.78	
36		0.7	2.6	1.82	
37		0.3	6.3	1.89	
38		0.3	2.6	0.78	
39	TD~TEの合計			9.18	
40		1.4	5.4	7.56	
41		0.3	5.4	1.62	
42	間仕切り壁のせん断断面積の合計は				
43	合計 m2				21.31 m2
44	間仕切り壁のせん断断面積は開口部減率0.6を考慮して				12.8 m2

補助壁の断面積 ..C

再発防止対策について

■解析メーカー

- 解析業務のために表計算ソフトを用いて入力データを作成する場合、ソフトの検証を行い、標準化を図る等の、組織としての管理を行うことを要求

■当社

- 解析実施状況調査において、上記の実施状況を確認
- 解析業務において表計算ソフトを用いる場合、入力根拠書の中で表計算ソフトの検証結果が分かるようにすることを解析メーカーに要求し、これを確認
- 通常解析からの変更分について、入力データの実際の処理を確認

■解析業務の品質向上

- 解析業務に係わるヒヤリ・ハットの収集、良好事例の紹介を通じ、不適合の発生を未然に防止することを目的として、事業者と解析メーカーで情報を共有し検討する場を設置

まとめ

- 今回確認された不適合は、7号機タービン建屋の弾塑性解析で用いる、汎用の表計算ソフトにより算出した建屋の復元力特性（応力-ひずみ関係）において補助壁が一部考慮されていなかったため、第一折れ点以降の耐力を過小評価していた。
- 解析メーカーにおける組織としての表計算の管理や当社における確認が不十分であったことが根本的な原因としてあげられる。
- 補助壁を適切に評価した復元力特性を設定した上で耐震安全性の再評価を実施した結果、耐震安全性が確保されていることを確認した。
- 今回の不適合は、地震応答解析における一部の解析条件の誤りであるが、その影響は地震応答解析全体の余裕度の中に包含されることから、7号機の中越沖地震による健全性評価結果並びに耐震安全性評価結果に影響を及ぼすものではない
- 今回の反省を踏まえ、再発防止対策を実施し、解析業務の品質向上に努める