

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
不適合について

平成21年4月14日



東京電力

不適合の経緯

■ 3月30日

7号機タービン建屋の地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート構造物の復元力特性*について、本来耐震壁と補助壁の両方を考慮すべきところ、補助壁が一部考慮されていなかった旨、担当企業から報告を受ける。

■ 4月2日

本事象について当社にて詳細に事実確認の上、原子力安全・保安院、新潟県、柏崎市、刈羽村へ報告するとともに、事実を公表。
同日、原子力安全・保安院および新潟県から、不適合を補正して再評価を行うとともに、原因の究明および再発防止対策の報告を求める旨、指示を受ける。

■ 4月6日

原子力安全・保安院の設備健全性サブワーキンググループに再評価結果と原因を報告するとともに、中間報告書を提出。

■ 4月9日

原子力安全・保安院および新潟県へ再発防止対策を含め報告。




* 鉄筋コンクリートの応力とひずみの関係を示すもの（今回、汎用の表計算ソフトにより算出して地震応答解析に入力していた。）

タービン建屋の耐震壁と補助壁

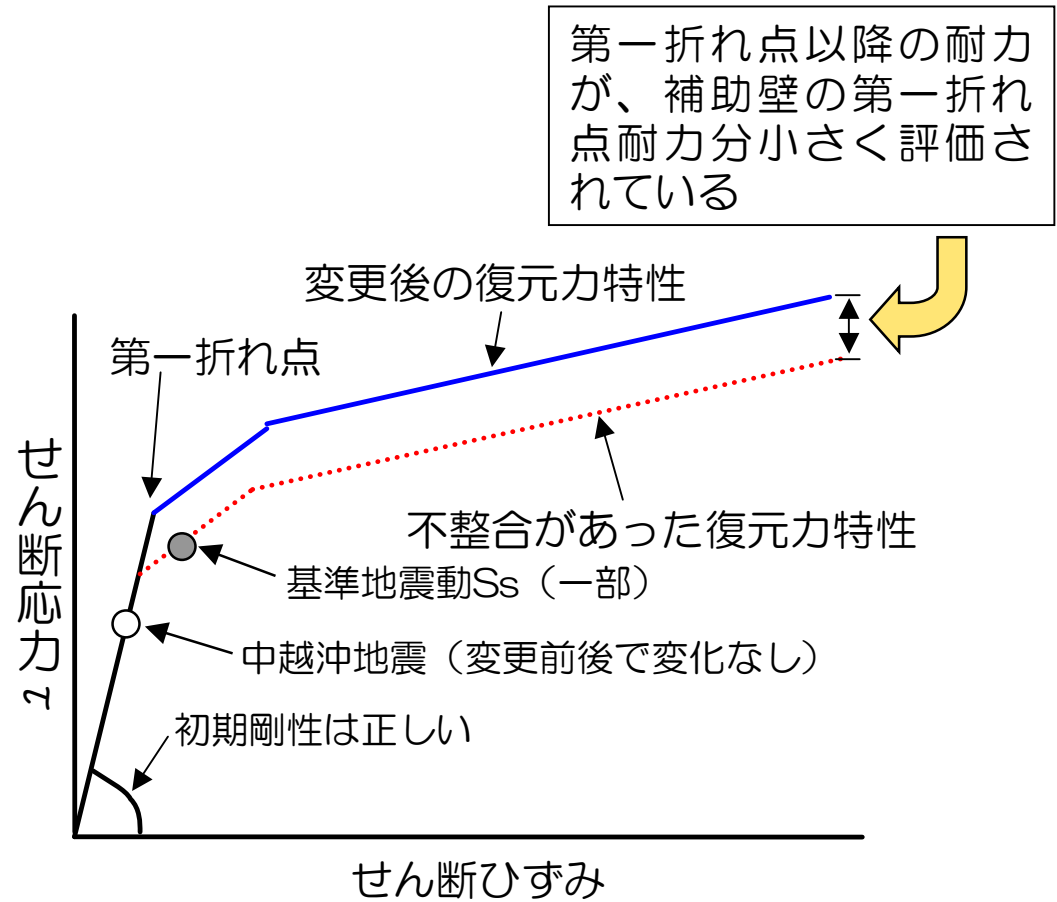
■タービン建屋



地下2階 (T.M.S.L.-5.1m)

-  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

■建屋のせん断スケルトン曲線の概念



不適合の概要

■ 建屋復元力特性の設定手順

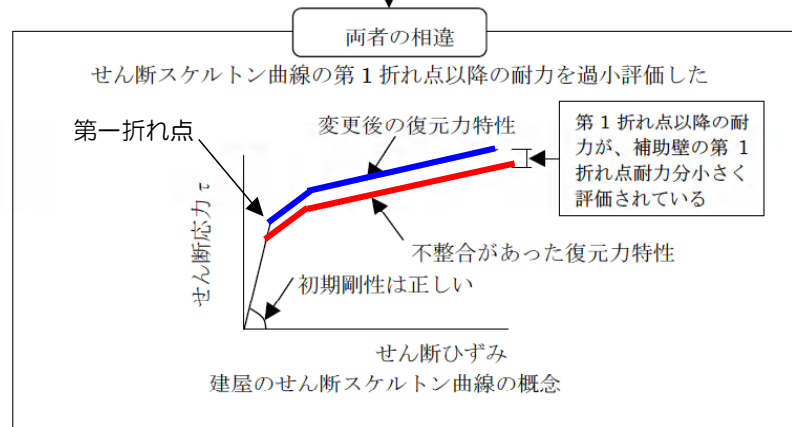
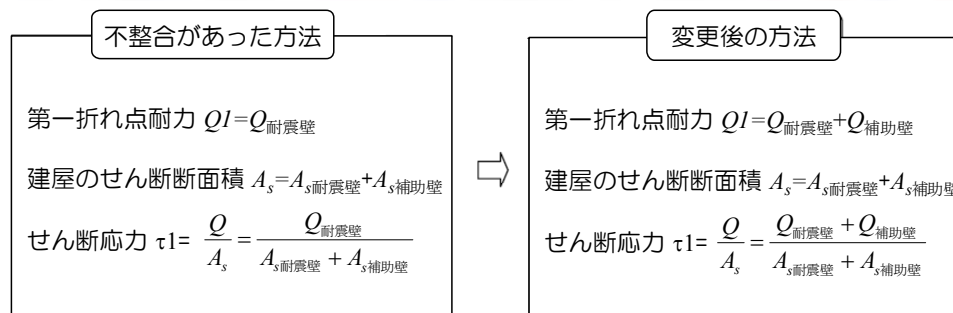
① 初期剛性の算定

$$\text{振動モデルの初期せん断剛性 } (K_s) = K_{s1} + K_{s2}$$

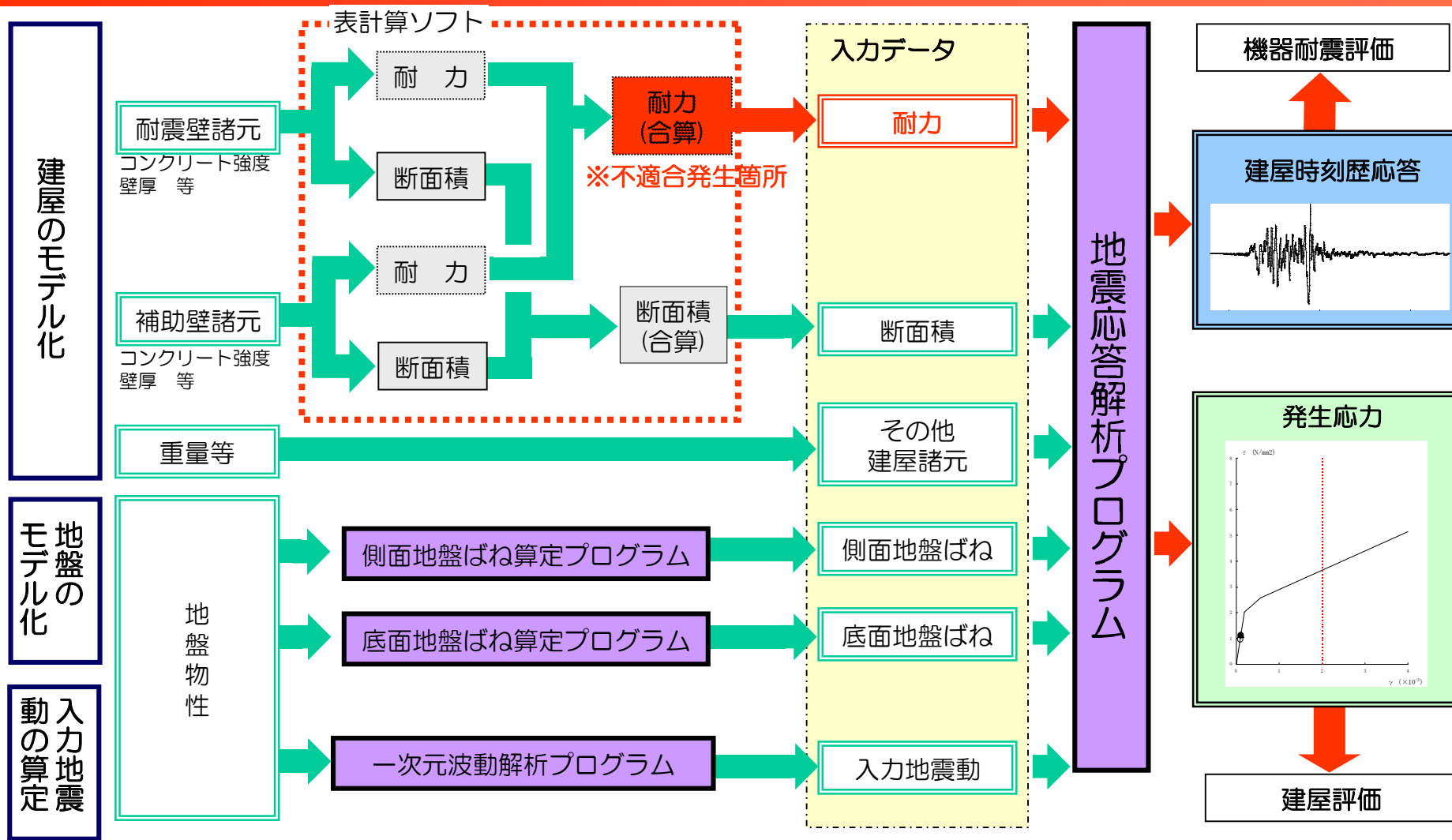
$$K_{s1} = \text{耐震壁のせん断断面積}(A_w1) \times \text{せん断弾性係数}(G)$$

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

正しく行われている



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」に基づき妥当性が確認済の解析コード

表計算ソフトの計算式

耐震壁の第一折れ点の耐力の合計(A)

補助壁の第一折れ点の耐力(B×C)が算入されていない

耐震壁の第一折れ点の耐力 [BL5]~[BL9]^{B0}

要素番号	壁番号	位置	D(m)	T(m)	Q1	γ ₁	Q2	γ ₂	Q3	γ ₃
342	C2*4		13.40	0.30	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	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	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	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	4.896E+07	1.714E-04	6.610E+07	5.143E-04	7.4.E+07	4.000E-03

耐震壁の第一折れ点の耐力の合計 ..A [BO181]

補助壁の第一折れ点の耐力 ..B

耐震壁+補助壁の第一折れ点の耐力 (表示数式により算出)

間仕切り込み+
tau1(N/mm2) 2.36.E+00
Q1(N) 3.46.E+08
SLOOP 1.9106E+12
間仕切り考慮γ1 1.331E-04

γ1	γ2	γ3
Q1	Q2	Q3
2.543E+08	3.483E+08	3.347E+08

γ1 γ2 γ3
Q1(N) Q2(N) Q3(N)
=BO181 3.344E+08 3.344E+08

Microsoft Excel - 342.xls

	A	B	C	D	E
		壁厚 m	壁長さ m	せん断断面積m2	
30					
31	TC~TDの合計			12.13	
32	T2~T3	0.3	10.4	3.12	
33	T3~T4	0.3	8.45	2.54	
34	T3~T4	0.3	4	1.20	
35	T7~T8	0.3	2.6	0.78	
36	T7~T8	0.7	2.6	1.82	
37	T7~T8	0.3	6.3	1.89	
38	T8~T9	0.3	2.6	0.78	
39	TD~TEの合計			9.18	
40	T3~T4	1.4	5.4	7.56	
41	T3~T4	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底減率0.6を考慮して			12.8 m2	

補助壁の断面積 ..C

本不適合の影響について

- 7号機タービン建屋の中越沖地震健全性評価への影響
 - 中越沖地震の応答は第一折れ点以下であり、弾性変形範囲であることから、建屋・設備の健全性評価に影響は無い。
- 7号機タービン建屋の基準地震動 S_s による耐震安全性評価への影響
 - 地震応答解析結果が、軽微ながら変更になるためタービン建屋及び耐震安全上重要なタービン建屋の11設備の地震応答解析を再実施。
 - 地震応答解析の評価基準値より小さいことを確認。
- その他の建屋・土木構造物や機器・配管系への影響
 - 7号機タービン建屋再評価に加え、原子炉建屋や6/7号機コントロール建屋に関し、補助壁の扱いが適正に行われていることを確認。
 - 耐震安全性評価の報告対象となった土木構造物や機器・配管系等についても、解析プログラムの入力データが適切に検証されていることを確認。

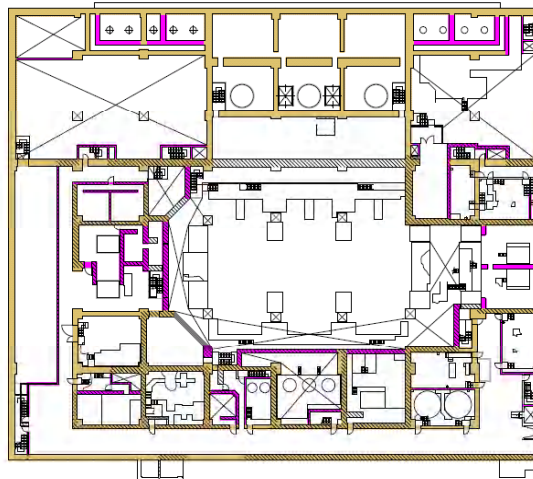
本不適合の影響は限定的。影響のあったタービン建屋及び全ての設備について再評価し、耐震安全性を確認した。

タービン建屋 耐震壁と補助壁

タービン建屋



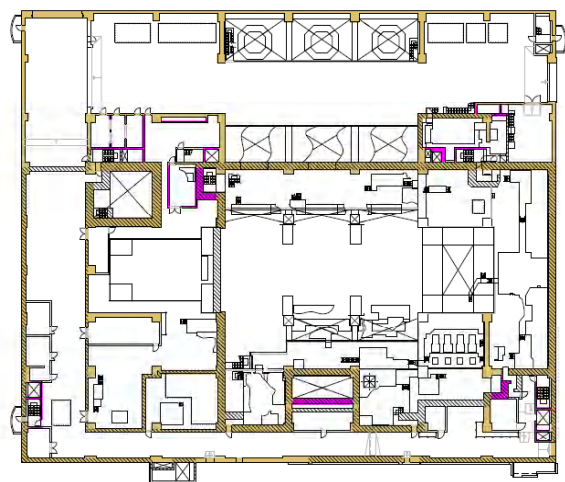
地下2階 (T.M.S.L.-5.1m)



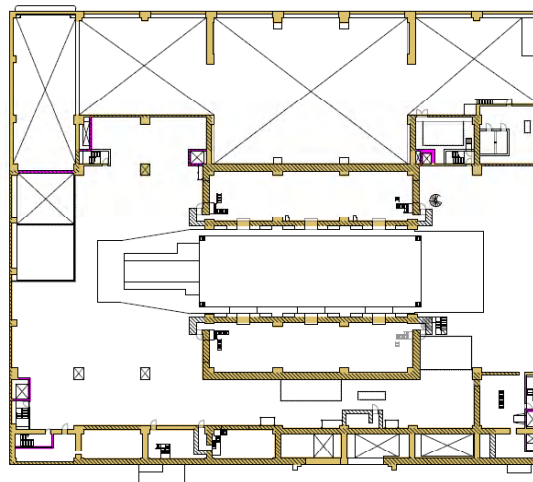
地下中2階 (T.M.S.L.-1.1m)






地下1階 (T.M.S.L. 4.9m)



1階 (T.M.S.L. 12.3m)

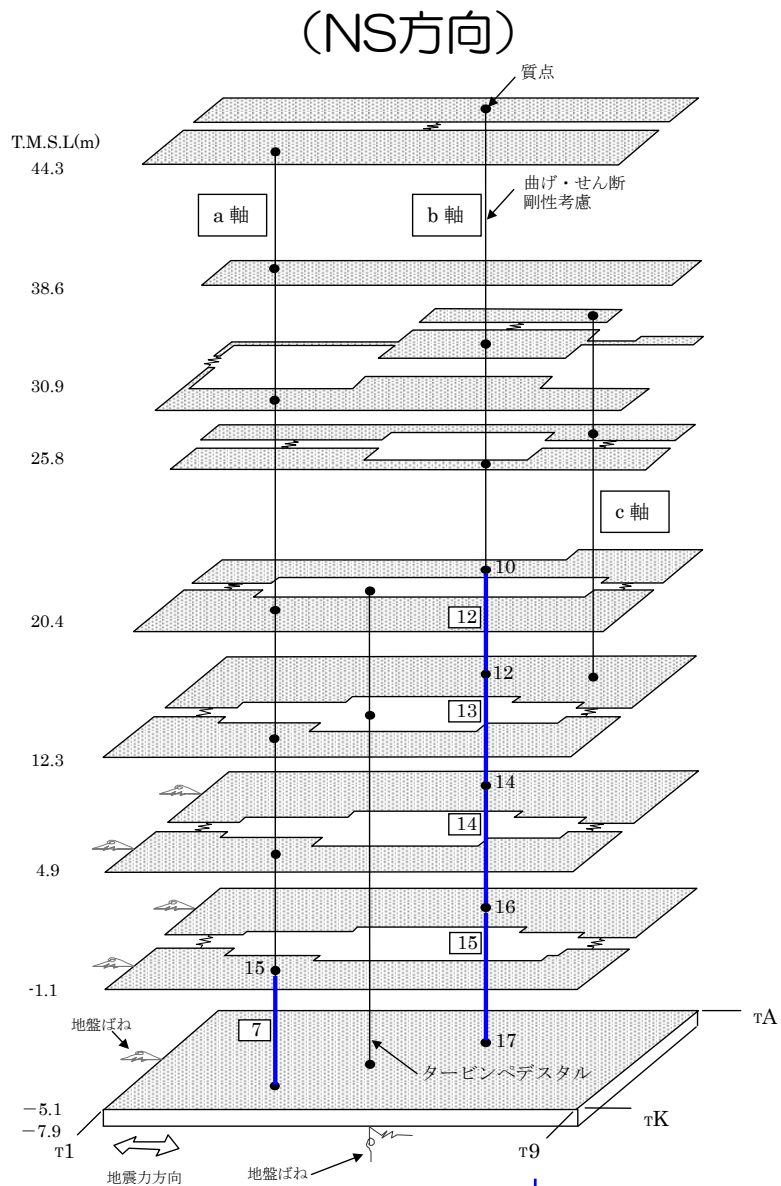


2階 (T.M.S.L. 20.4m)

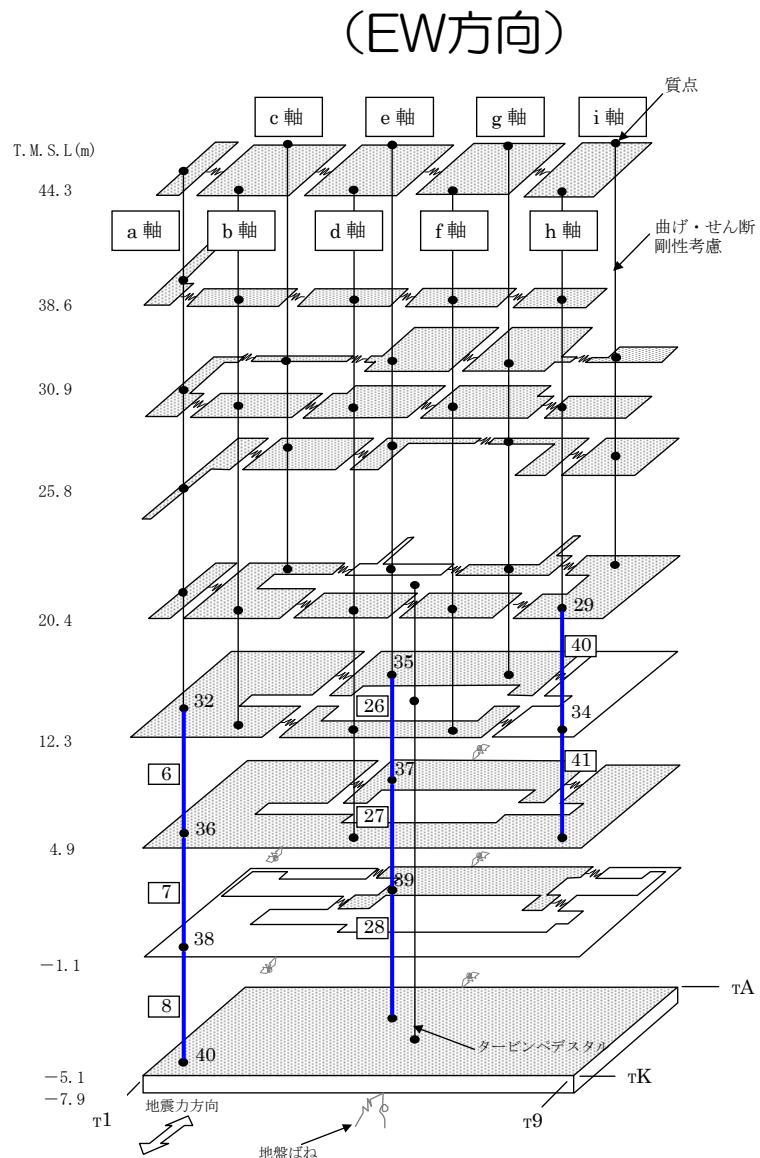
-  耐震壁として剛性を評価する範囲 (設計時と同じ)
-  補助壁として剛性を評価する範囲
-  遮蔽壁

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						($\times 10^{-3}$)
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						($\times 10^{-3}$)
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					($\times 10^{-3}$)
	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	評価基準値
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	サホ-トアソカホ 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

原因・問題点について

- 地震応答解析のプロセスや解析メーカーの業務状況について、調査・分析を実施し、以下の事実が判明。

①解析担当者は、入力データを作成する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こと。

②また、確認者・実施責任者も解析担当者が入力データを作成する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こと。

③さらに、当社においてもこのことを確認出来ていなかったこと。

背後要因について

(1) 入力データを確実にする点に関する問題

① 組織として表計算ソフトを管理していなかったこと

- ▶ 当該解析メーカーでは、表計算ソフトが個人管理になっていることのリスクを認識していなかった。
- ▶ 当社は、解析メーカーの作成する入力根拠書で入力データの適切性が確認できると考えていたため、表計算ソフトに対する検証の実施や組織的管理について明確に要求していなかった。

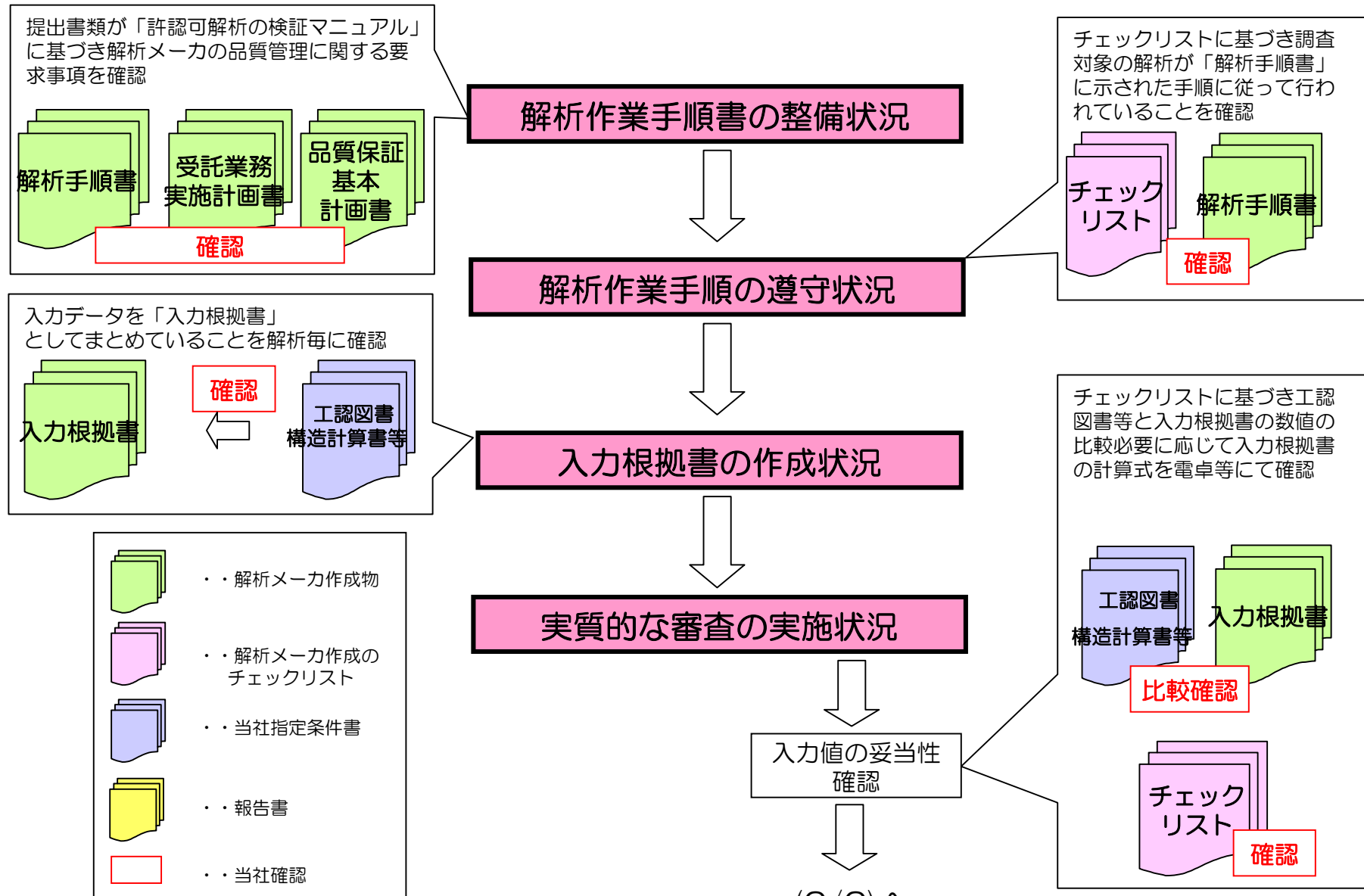
② 当社として確認が不十分だったこと

- ▶ 入力根拠書を確認する際、解析メーカーにより当該箇所にチェックチェックマークが付けられていたことと、入力値及び最終結果が妥当な範囲に入っていたことから、表計算ソフトの算出プロセスに異常があると考えなかった。
- ▶ 補助壁を追加して解析を実施することについて、関係メーカーに会議の都度注意喚起してきたため、反映されていると考えていた。

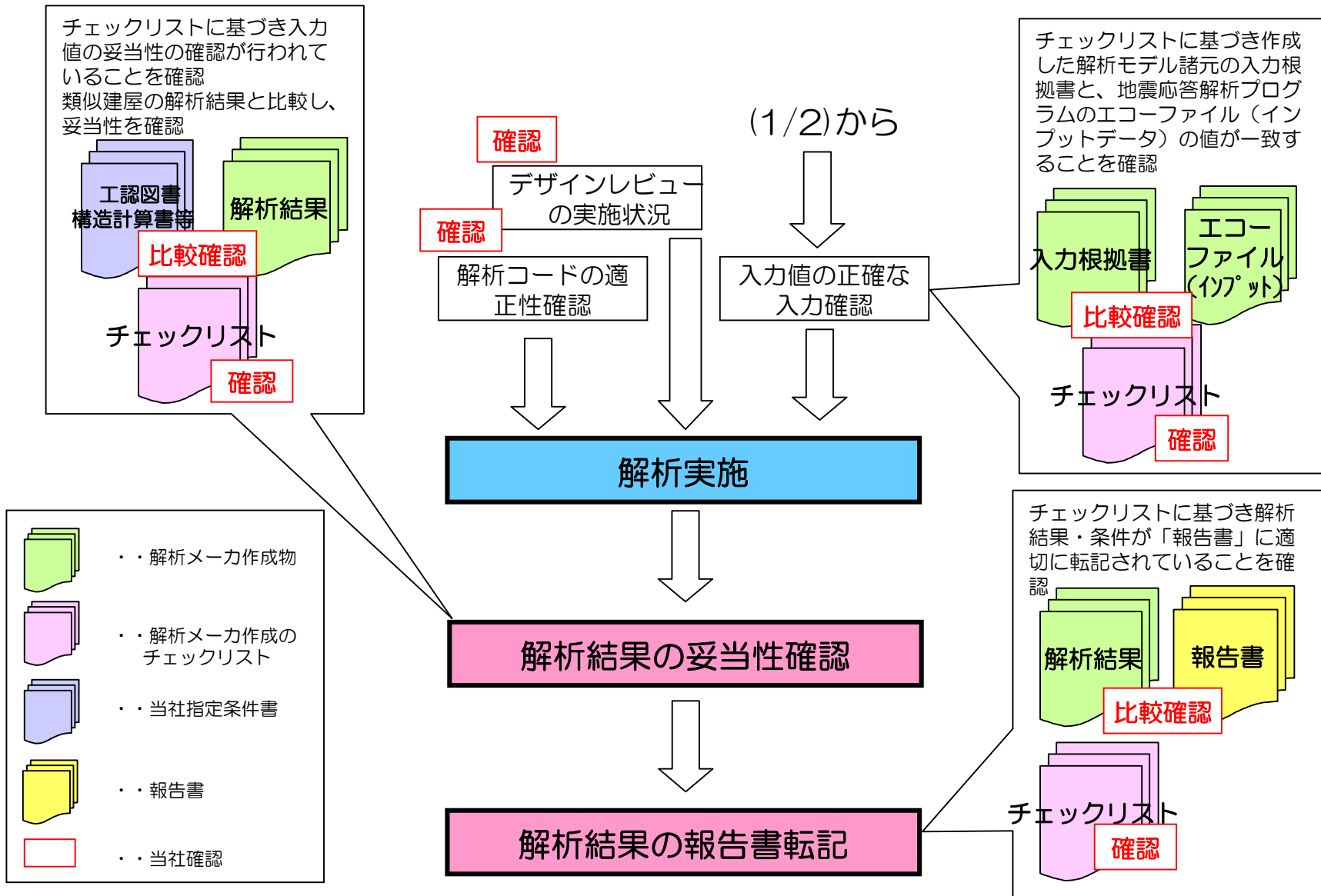
(2) 解析業務の不適合に対するこれまでの対策の評価

- ▶ 当社は、過去の不適合に対する種々の対策の一つとして、許認可解析に用いる解析プログラムの検証を行ってきたが、入力データを作りこむプロセスに表計算ソフトを使用する場合のリスクを認識していなかった。
- ▶ 品質向上に努める取り組みが不足していた。

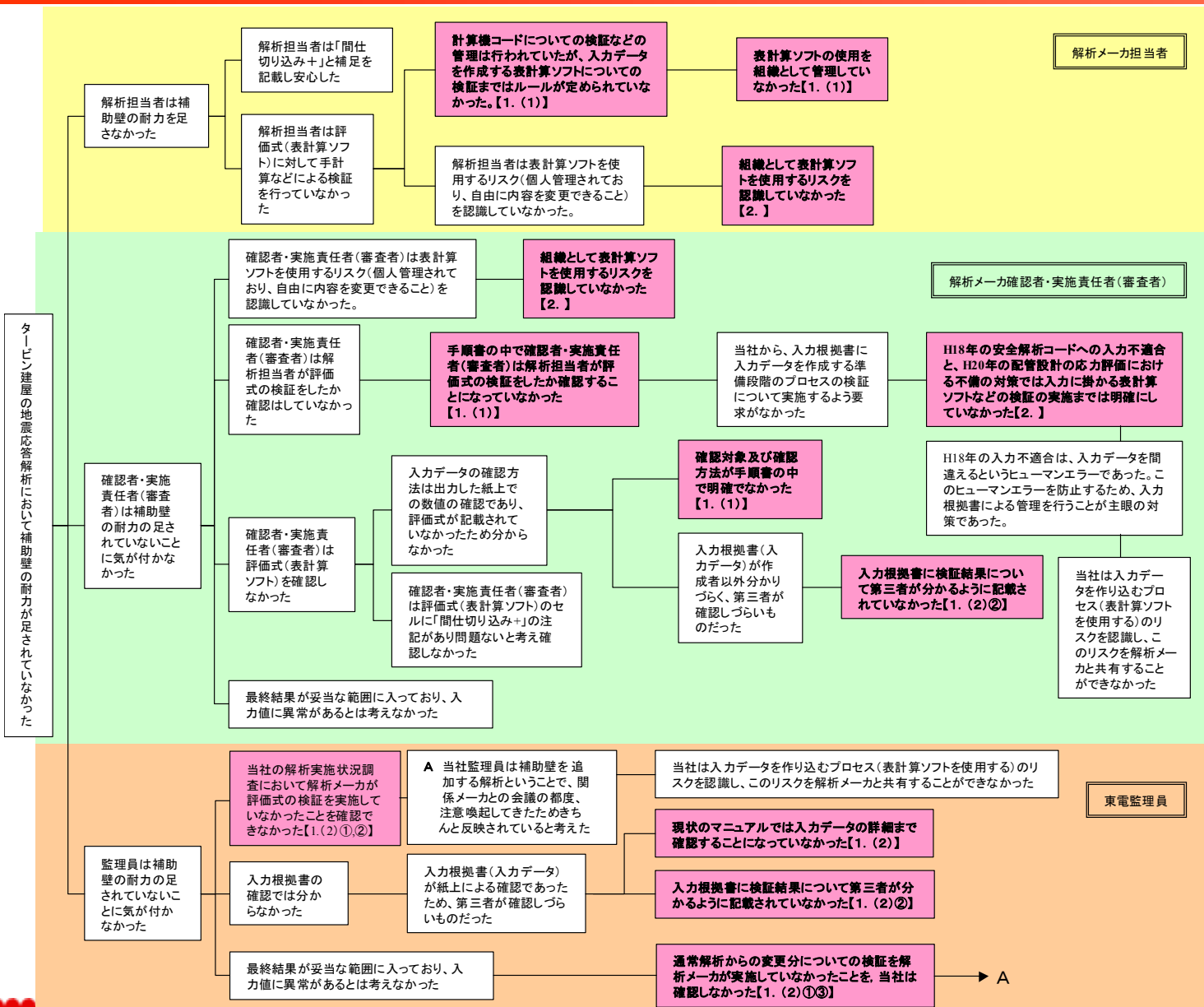
「解析実施状況調査チェックシート」による確認例（1/2）



「解析実施状況調査チェックシート」による確認例 (2/2)



背後要因図



再発防止対策

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対策
今回の不適合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、当社は解析メーカに対して、解析業務において表計算ソフトを含む入力データを作りこむプロセスについて検証を行い、標準化を図る等、組織としてこのプロセスを管理することを要求する。
 - (2) 当社における対策
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、解析メーカが表計算ソフトを含む入力データを作り込むプロセスについて検証を行い、標準化を図る等、組織としてこのプロセスを管理していることを確認する。また、当社は自らサンプリングでそのプロセスが適切であることを確認する。なお新規に行う解析や解析条件に変更等を伴う解析の場合には必ずその対象とする。
②解析業務において表計算ソフトを含む入力データを作り込むプロセスの検証結果を入力根拠書の中に明記し、追跡できるようにすることを解析メーカに要求するとともに、これを確認する。
③新規に行う解析や、解析条件等に変更を伴う解析の場合には、特に不適合が生じやすいことを認識して解析メーカとの打合せの場等で注意喚起するとともに、解析メーカに実施計画書等に具体的な取り組み事項を明記させ、当社が実施状況を確認する。
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効な対策であり、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管理の明確化をしていなかったことに鑑み、また、入出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当社関連部門を含め事業者及び解析メーカで情報を共有する場を設ける。



再発防止対策

■解析メーカー

- 解析において表計算ソフトを含む入出力データを作り込むプロセスの検証を行い、標準化を図る等、組織として管理することを解析メーカーに要求。

■東京電力

- 今後の解析実施状況調査において、解析メーカーが上記の通りプロセスを適切に管理していることを、当社自らサンプリングにより確認。
- 解析業務において表計算ソフトを含む入出力データを作り込むプロセスの検証結果を入力根拠書の中に明記し、追跡できるようにすることを解析メーカーに要求するとともに、これを確認。
- 新規に行う解析や、解析条件等に変更を伴う解析の場合、不適合が生じやすいことを認識して解析メーカーに注意を喚起し、解析メーカーに具体的な取り組み事項の計画を作成させ、実施状況を確認する。

■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、当社関連部門を含め事業者及び解析メーカーで情報を共有する場を設ける。

まとめ

- 平成17年に発生した許認可申請に係る解析の不適合を受けて、「許認可解析の検証マニュアル」を制定し、信頼性の向上に努めてきたが、解析メーカーにおける組織としての管理や当社における確認が不十分でした。
- 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すが、その影響は限定的であり、地震応答解析全体の大きな余裕の中に包含されることから、健全性評価や耐震安全性評価の結果に影響を及ぼすものではないと判断します。
- 今回の反省を踏まえ、再発防止対策を確実に実施し、解析業務の継続的品質改善に努力してまいります。