

柏崎刈羽原子力発電所1号機
「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の
改訂に伴う耐震安全性評価

原子炉建屋基礎地盤の安定性評価について

平成22年1月29日

東京電力株式会社



東京電力

目次

原子炉建屋基礎地盤の安定性評価

1. 評価方針
2. 地質概要
3. 評価方法
4. 評価結果
5. まとめ

1. 評価方針

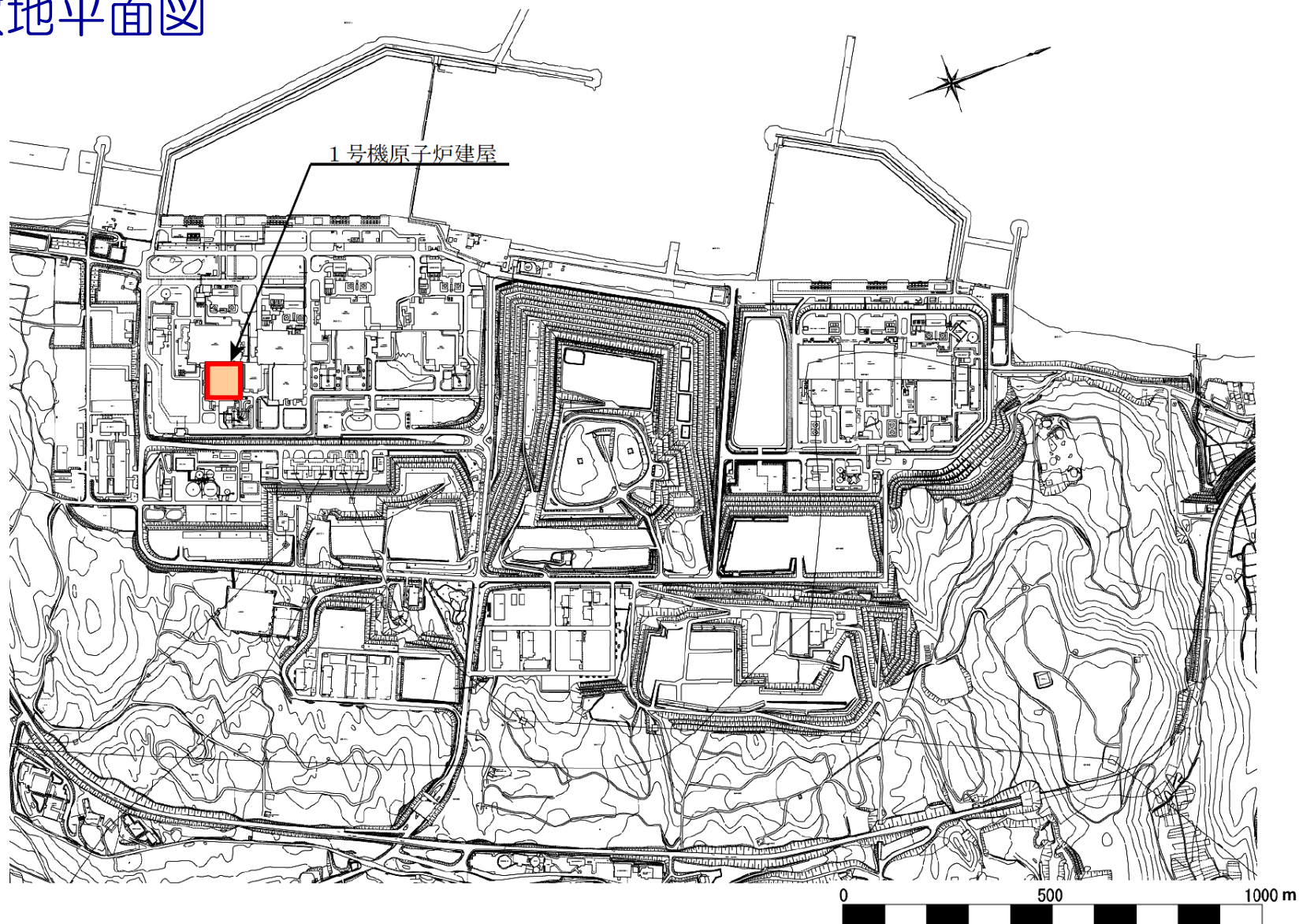
原子炉建屋基礎地盤について、基準地震動 S_s による地震力に対して十分な支持性能をもつことの評価を行う。

地震時の支持性能については下記項目により評価

- (1) 想定すべり線におけるすべり安全率
- (2) 原子炉建屋基礎底面の傾斜
- (3) 原子炉建屋基礎地盤の支持力

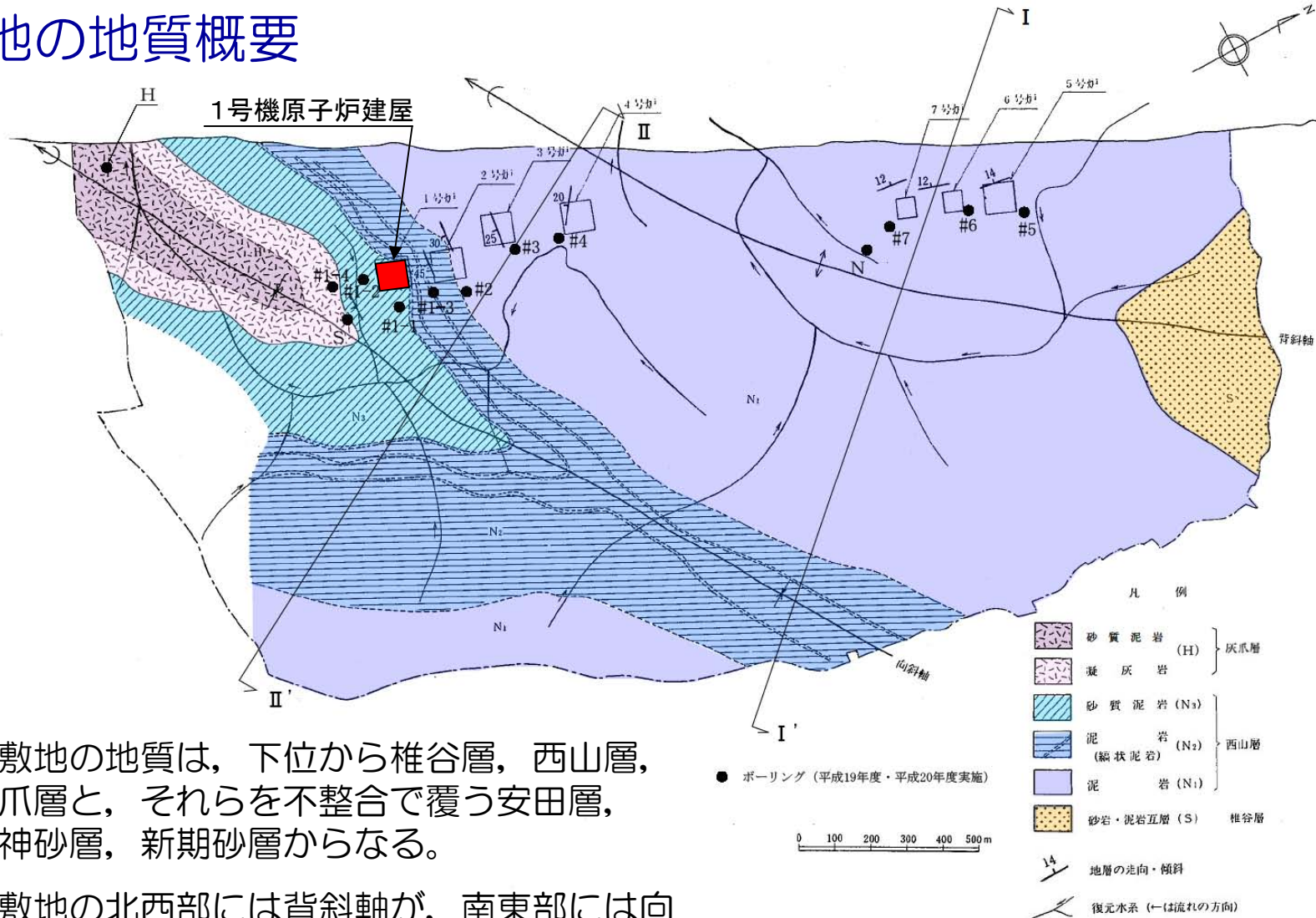
2. 地質概要

敷地平面図



2. 地質概要

敷地の地質概要



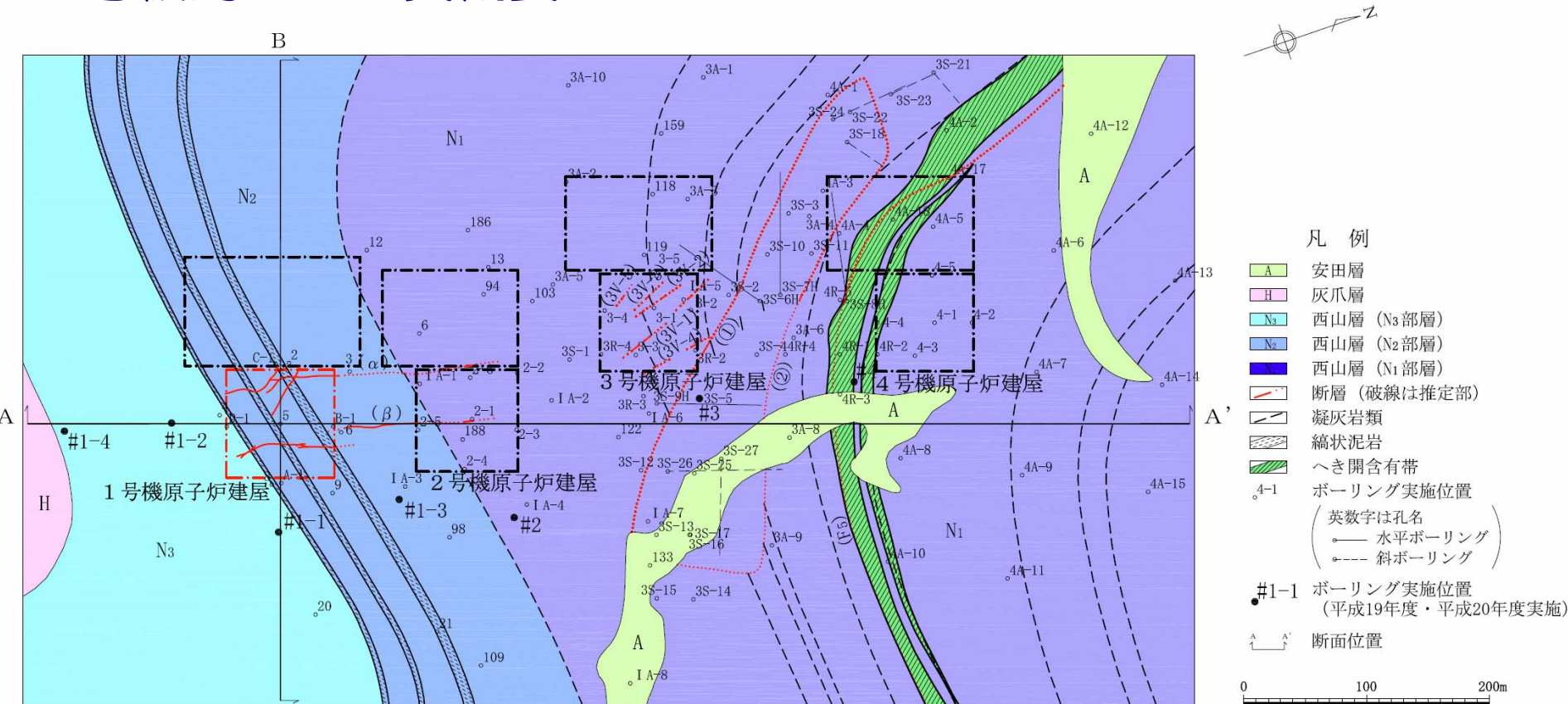
■敷地の地質は、下位から椎谷層、西山層、灰爪層と、それらを不整合で覆う安田層、番神砂層、新期砂層からなる。

■敷地の北西部には背斜軸が、南東部には向斜軸が存在する。これら褶曲軸は全体として南西方向にプランジしている。

注:本図は新第三系の分布を各層上限面に投影したものである。

2. 地質概要

1号機周辺の地質概要

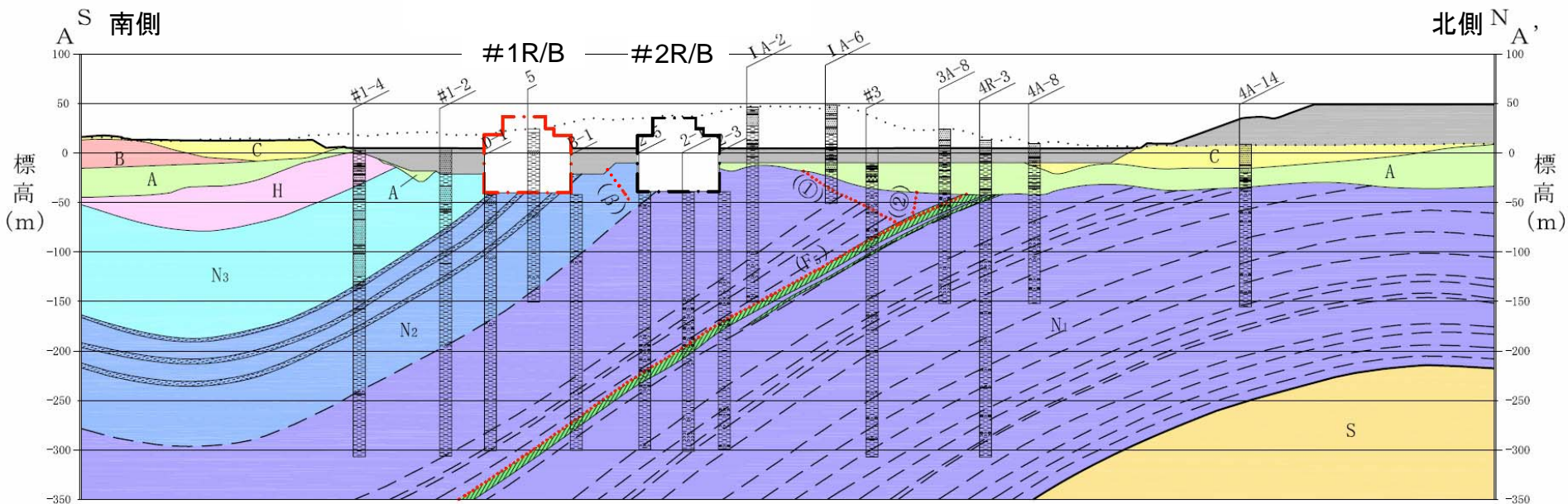


1号機付近地質水平断面図(標高-40m)

- 1号機基礎地盤は西山層からなる。西山層は、塊状無層理の泥岩を主体としている。
- 小断層としては高角度のα断層，β断層およびV系断層，低角度のF系断層，地すべりに起因する①・②断層などが認められる。

2. 地質概要

地質鉛直断面図(A-A')



D-1孔, B-1孔, 2-5孔, 2-1孔, 2-3孔, IA-2孔, IA-6孔, 3A-8孔, 4R-3孔, 4A-8孔, 4A-14孔, #1-4孔及び#3孔は断面線に投影

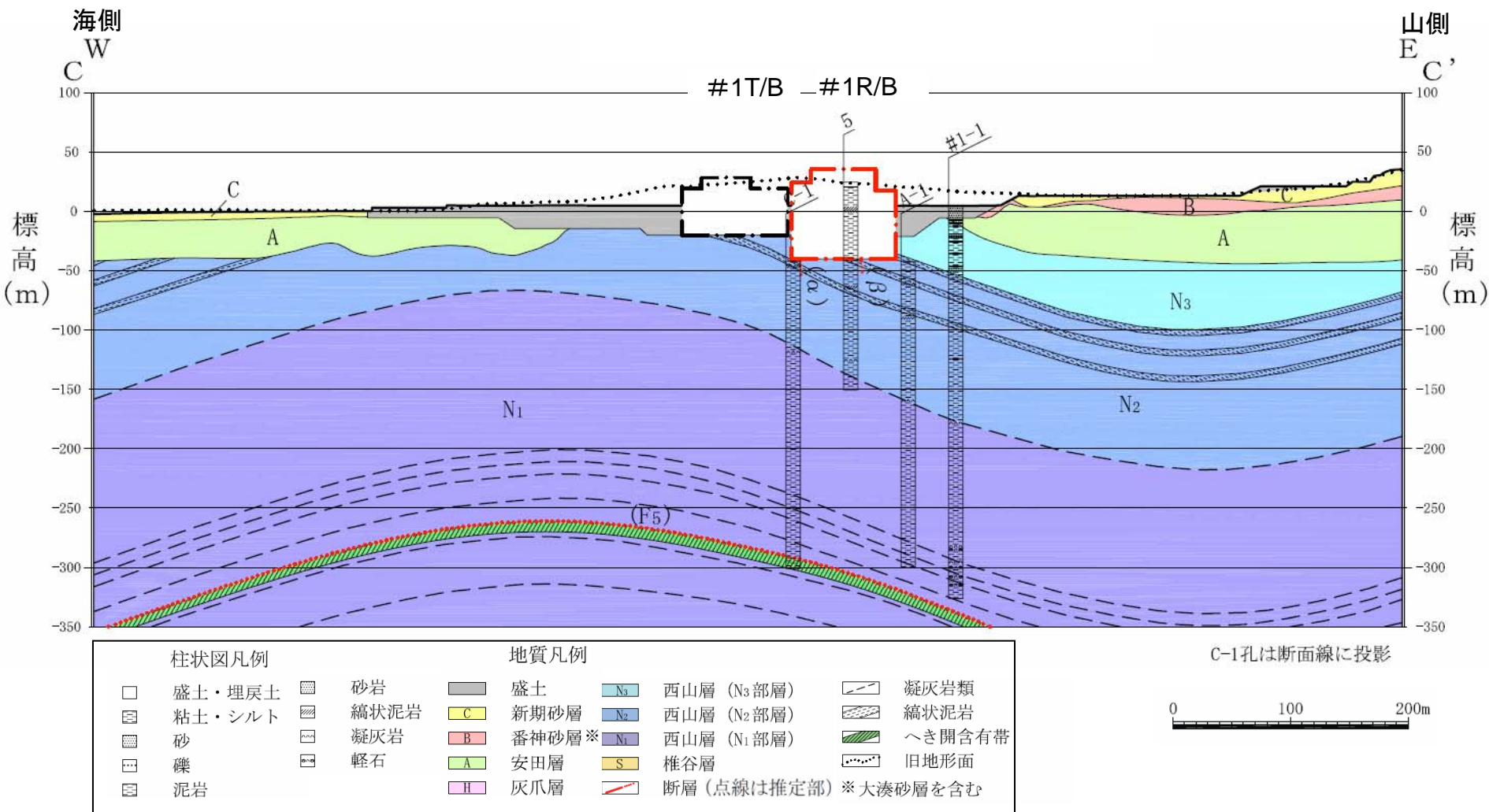
柱状図凡例		地質凡例	
	盛土・埋戻土		砂岩
	粘土・シルト		凝灰岩
	砂		軽石
	礫		粘状泥岩
	泥岩		N ₃ 西山層 (N ₃ 部層)
	盛土		N ₂ 西山層 (N ₂ 部層)
	新期砂層		N ₁ 西山層 (N ₁ 部層)
	番神砂層※		S 椎谷層
	安田層		断層 (点線は推定部)
	灰爪層		凝灰岩類
			粘状泥岩
			へき開含有帯
			旧地形面
			※ 大湊砂層を含む



- 1号機は北側の背斜構造と南側の向斜構造の間に位置する。
- 4号炉試掘坑で確認された低角度のF5断層は、標高-300m付近以深に分布する。
- へき開含有帯は、F5断層に沿って分布し、浅部では2層準分布している。

2. 地質概要

地質鉛直断面図(B-B')



■ 1号機は海側の背斜構造と山側の向斜構造の間に位置する。

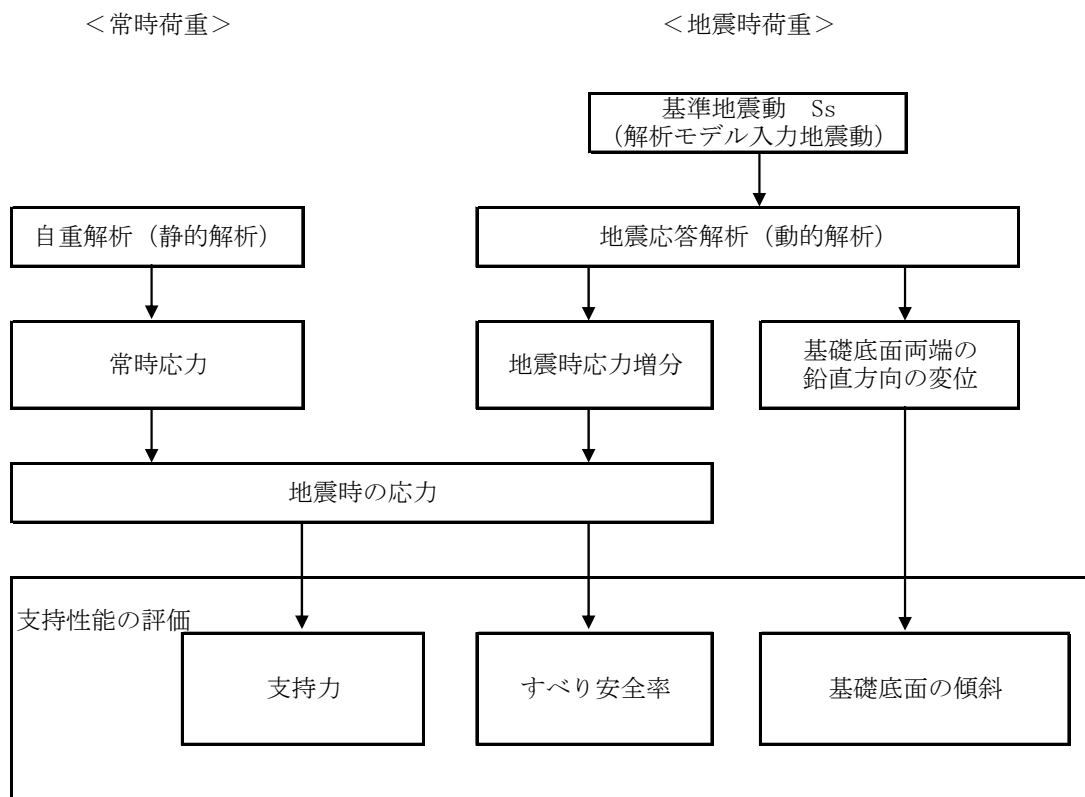
3. 評価方法

解析手法・評価フロー

【解析手法】

- ①二次元静的有限要素法解析
・施工過程を考慮した自重解析
- ②二次元動的有限要素法解析
・水平地震動と鉛直地震動の同時入力
・等価線形化法による周波数応答解析手法

【安全性評価フロー】



3. 評価方法

解析モデル

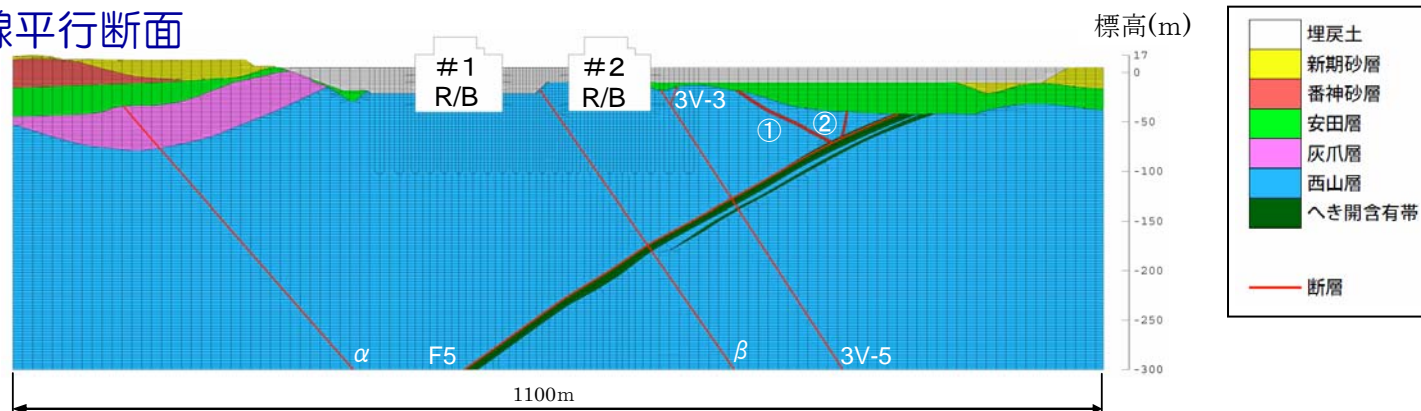
【地盤モデル】

解析モデルは地質断面図をもとに作成。F5断層、V系断層、①・②断層、 α ・ β 断層を考慮

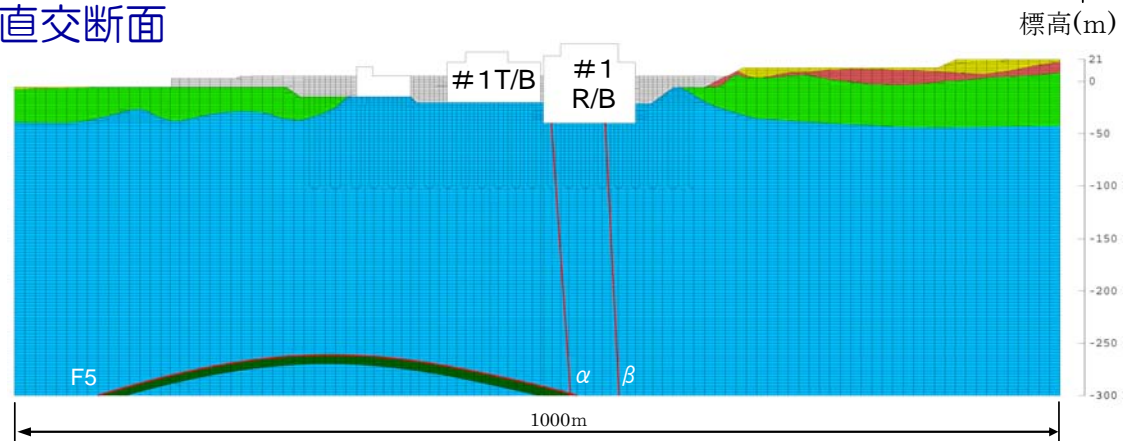
【建屋モデル】

原子炉建屋，タービン建屋の質点系モデルを基に作成

原子炉建屋汀線平行断面



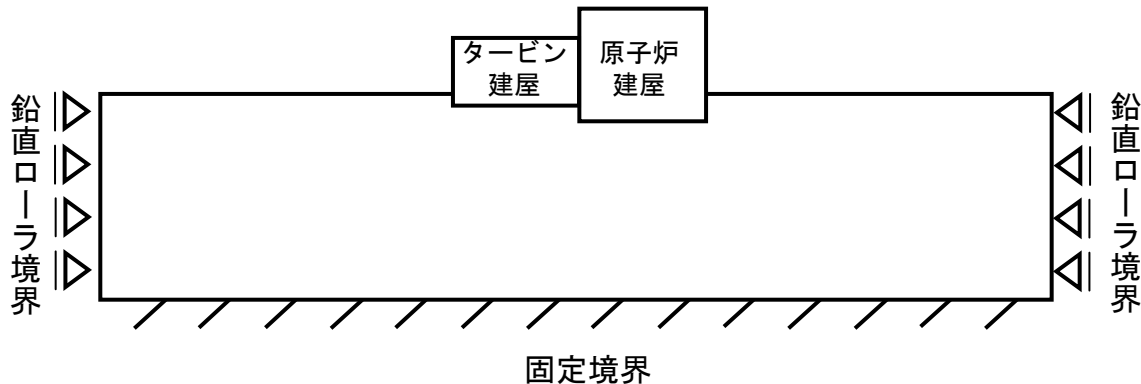
原子炉建屋汀線直交断面



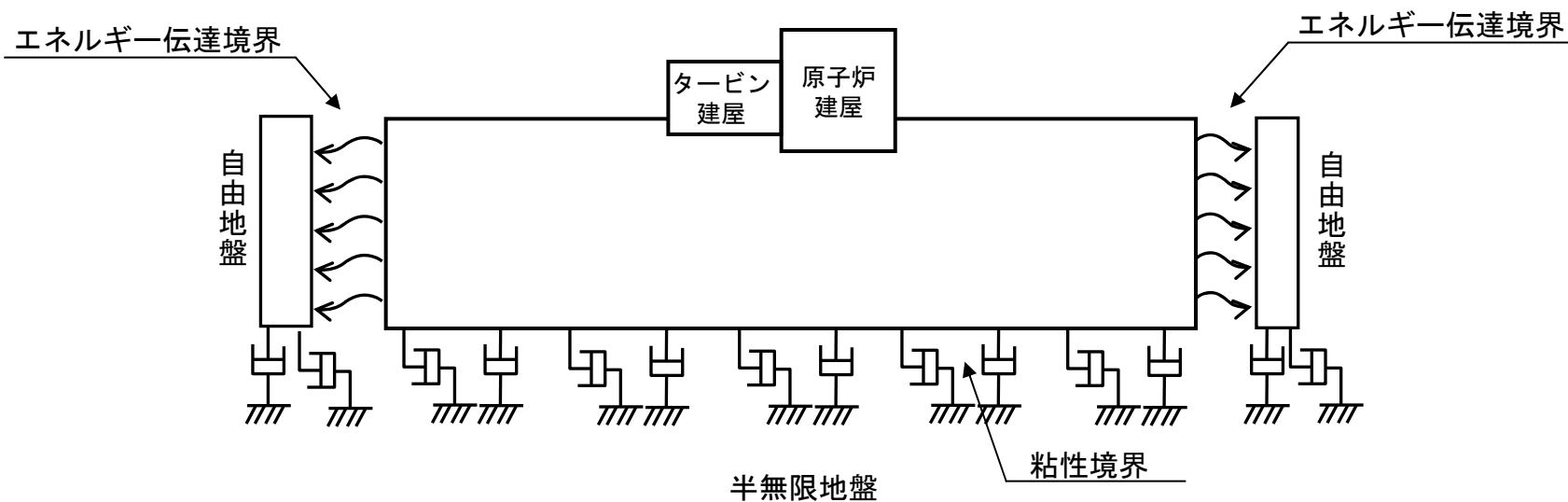
3. 評価方法

境界条件

【自重解析（静的解析）】



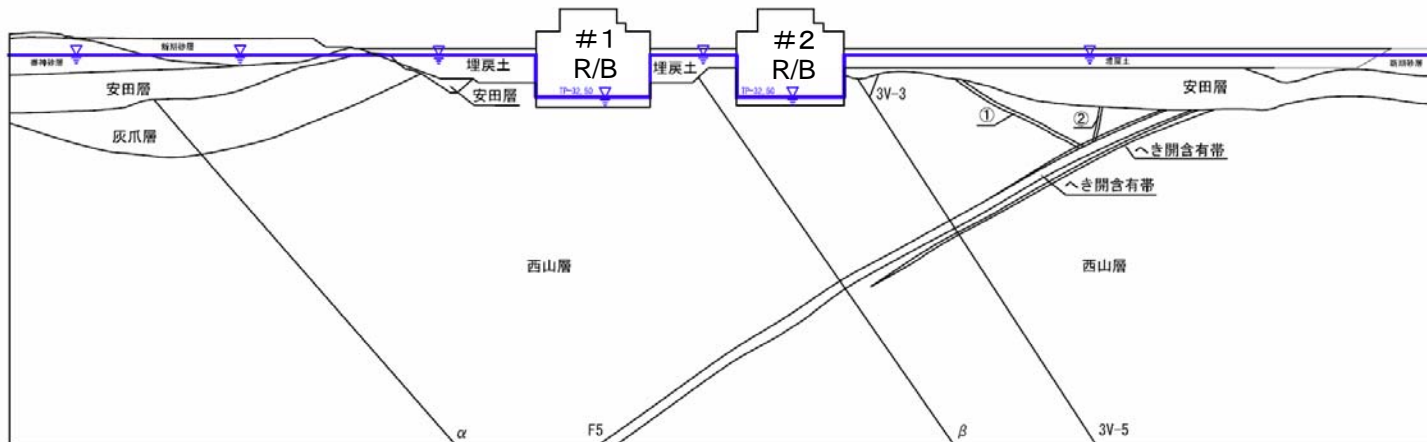
【地震応答解析（動的解析）】



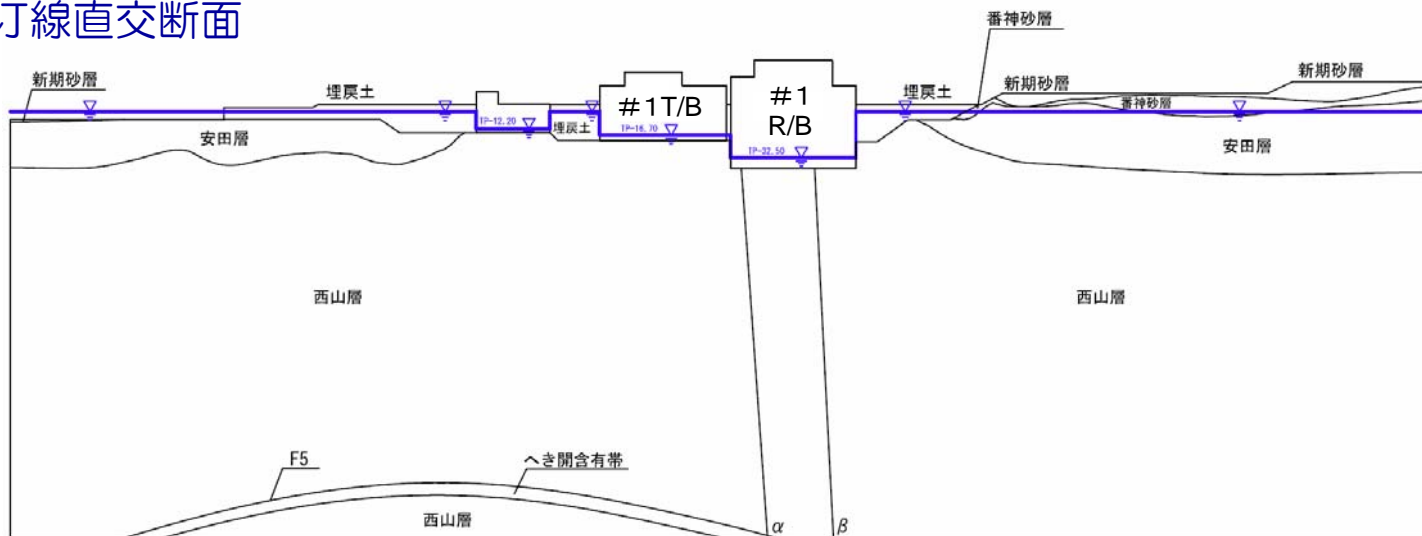
3. 評価方法

地下水位条件

原子炉建屋汀線平行断面

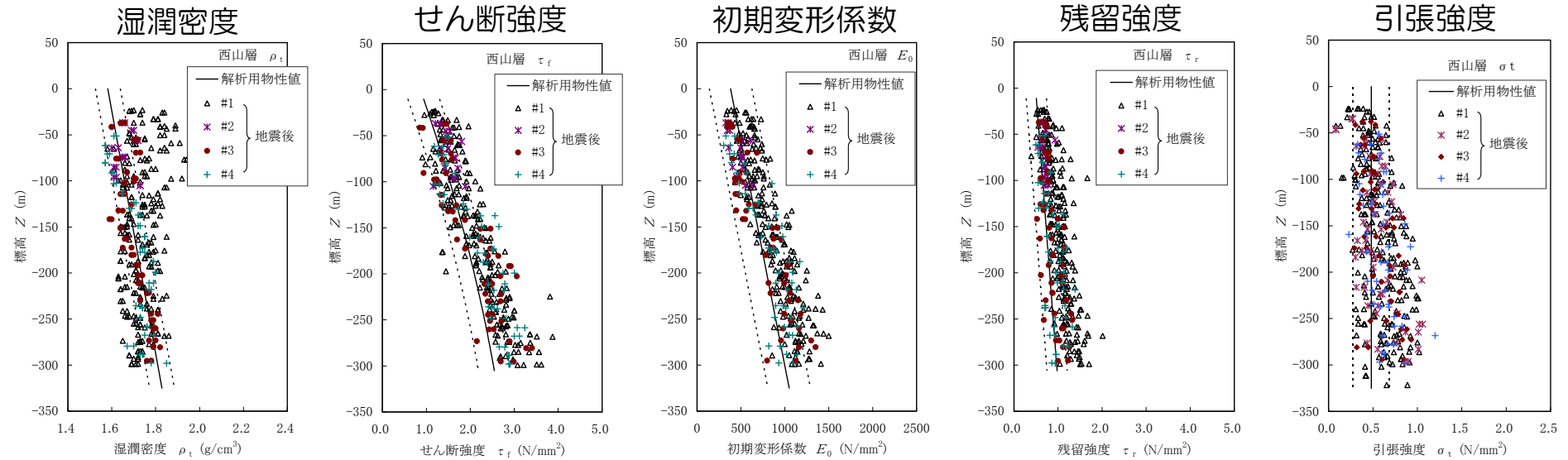


原子炉建屋汀線直交断面



3. 評価方法

既往解析用物性値と地震後取得した物性値の比較



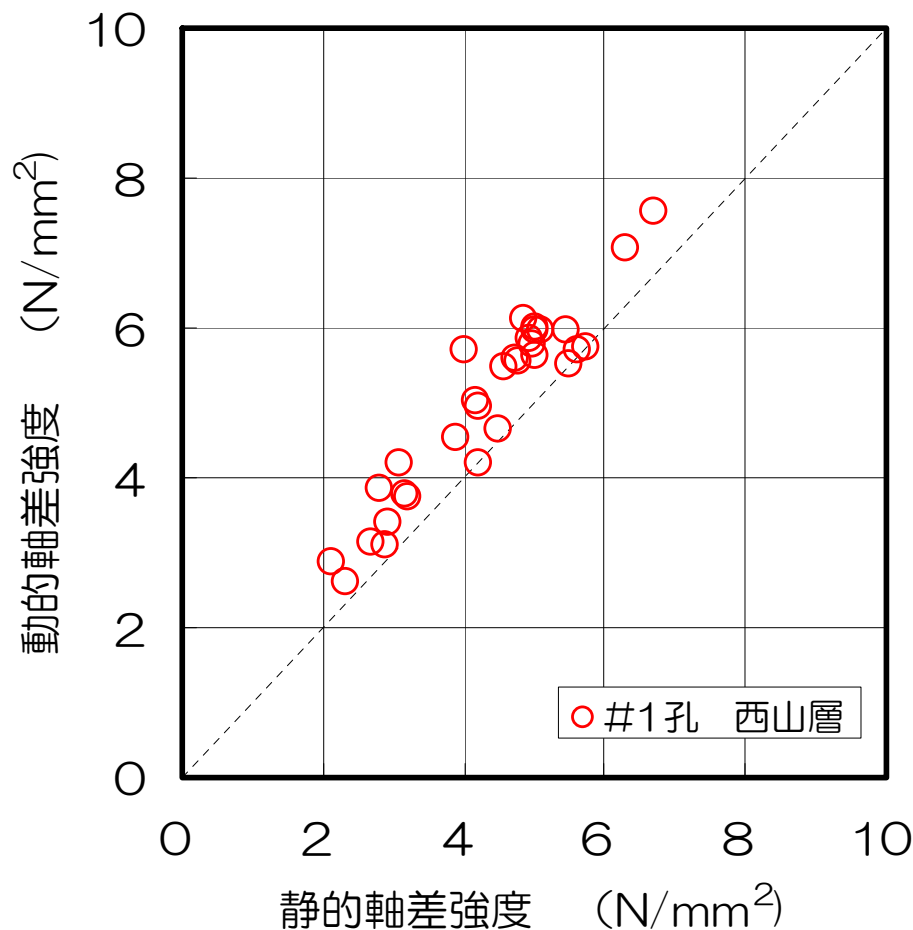
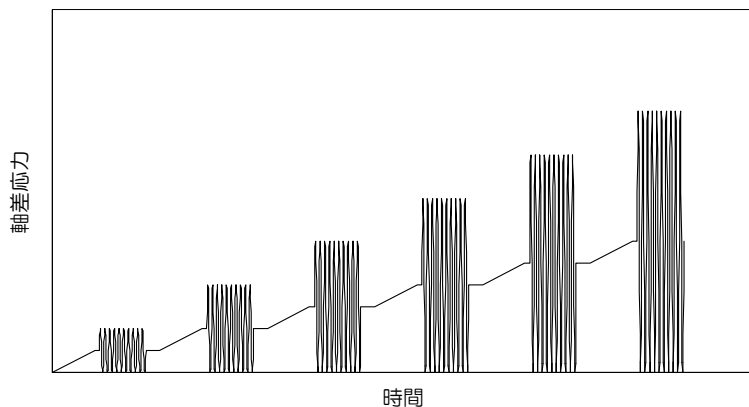
- 地震後の荒浜側調査ボーリング物性値は3・4号増設時既往解析用物性値と概ね整合することから、解析には当該物性値（3・4号増設時）を用いることを基本とする。

3. 評価方法

(参考) 繰返し三軸試験結果

繰返し三軸試験（強度特性）の試験条件

試験条件	圧密非排水条件	
拘束圧	有効土被り圧相当	
供試体寸法	直径約5cm×高さ約10cm	
載荷方法	応力制御法	
静的載荷	載荷荷重	各段階の前に繰返し載荷の最大軸差応力の1/2の軸差応力を載荷
	載荷速度	西山層：0.07 N/mm ² /min程度 椎谷層：0.10 N/mm ² /min程度
多段階繰返し載荷	波形	正弦波 (0.5 Hz)
	載荷回数	各段階で10回
	載荷荷重	最大軸差応力を段階的に増加



繰返し三軸試験による強度は三軸試験による強度を上回る。

3. 評価方法

解析用物性値設定（試験方法）

		西山層（泥岩） 西山層（へき開含有帯）	灰爪層*	断層部
物理特性	密度	密度試験結果		
静的変形特性	静弾性係数	三軸圧縮試験結果		
	静ポアソン比	三軸圧縮試験結果		
動的変形特性	初期動せん断弾性係数	P S 検層によるS波速度 および密度より算定		弾性波速度測定試験結果
	動せん断弾性係数のひずみ依存性	動的単純せん断試験結果	繰返し三軸試験結果	動的単純せん断試験結果
	動ポアソン比	P S 検層によるP波速度，S波速度により算定		弾性波速度測定試験結果
	減衰定数	動的単純せん断試験結果	繰返し三軸試験結果	動的単純せん断試験結果
強度特性	ピーク強度	C_u	三軸圧縮試験結果	
		σ_t	圧裂試験結果 一軸引張試験結果	—
	残留強度	三軸圧縮試験結果		

* 灰爪層は地震後の調査結果より設定

3. 評価方法

解析用物性値（西山層，灰爪層）

		西山層（泥岩）	西山層（へき開含有帯）	灰爪層	
物理特性	単位体積重量 (g/cm ³)	1.58-0.00076·Z	1.61	1.71	
静的変形特性	静弾性係数 E_0 (N/mm ²)	381-2.07·Z	193+178·P	255+434·P	
	静ポアソン比 ν	0.46	0.43	0.49	
動的変形特性	初期動せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²)	251-2.10·Z	332	395	
	動せん断弾性係数のひずみ依存性	$1/(1+2.65\gamma^{1.37})$	$1/(1+2.97\gamma^{0.95})$	$1/(1+3.03\gamma^{0.852})$	
	動ポアソン比 ν_d	0.463+0.00017·Z	0.44	0.46	
	減衰定数	$27.4\gamma^{1.00}+0.7$	$23.0\gamma^{0.93}+2.3$	$8.49\gamma^{0.323}$	
強度特性	ピーク強度 (N/mm ²)	C_u	低圧部： $\tau_R = 0.58-0.0011\cdot Z$ 高圧部： $C_u = 0.83-0.0056\cdot Z$ $\phi = 6.5+0.021\cdot Z$	0.42+0.31·P	0.98+0.66·P
		σ_t	0.48	—	
	残留強度 C_{ur} (N/mm ²)		0.49-0.0016·Z	0.42+0.22·P	0.62+0.72·P

注：Zは標高(m)を示す。注：Pは地下水位を考慮した圧密圧力(N/mm²)を示す。*各要素ごとにZとPを算定して解析用物性値を設定している。

3. 評価方法

解析用物性値（F5断層，V系断層，①・②断層）

		F5断層*	V系断層, $\alpha \cdot \beta$ 断層	①・②断層
物理特性	単位体積重量 (g/cm ³)	粘土部：1.95、破砕部：1.58 層厚の重み付き平均 = 1.77	1.58	1.59
静的変形特性	静弾性係数 E_0 (N/mm ²)	粘土部：96.1+147 $\cdot P$ 破砕部：135+159 $\cdot P$	135+159 $\cdot P$	118+135 $\cdot P$
	静ポアソン比 ν	0.46	0.46	0.44
動的変形特性	初期動せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²)	粘土部：108、破砕部：228 層厚の重み付き平均 = 147	228	158
	動せん断弾性係数のひずみ依存性	$0.00134 G_1 \cdot G_2 / (G_1 + G_2)$ 粘土部： $G_1 = 1100 / (1 + 2.94 \gamma^{0.99})$ 破砕部： $G_2 = 2320 / (1 + 2.80 \gamma^{0.77})$	$1 / (1 + 2.80 \gamma^{0.77})$	$1 / (1 + 2.68 \gamma^{0.75})$
	動ポアソン比 ν_d	粘土部：0.49、破砕部：0.45 層厚の重み付き平均 = 0.47	0.45	0.45
	減衰定数	$(h_1 G_2 + h_2 G_1) / (G_1 + G_2)$ 粘土部： $h_1 = 21.3 \gamma^{0.96} + 2.8$ 破砕部： $h_2 = 12.7 \gamma^{0.57} + 1.8$	$12.7 \gamma^{0.57} + 1.8$	$11.0 \gamma^{0.55} + 2.0$
強度特性	ピーク強度 C_u (N/mm ²)	$0.40 + 0.06 \cdot P$	低圧部： $0.32 + 0.61 \cdot P$ 高圧部： $0.73 + 0.18 \cdot P$	$0.41 + 0.19 \cdot P$
	残留強度 C_{ur} (N/mm ²)	$0.23 + 0.24 \cdot P$	低圧部： $0.31 + 0.61 \cdot P$ 高圧部： $0.54 + 0.19 \cdot P$	$0.40 + 0.18 \cdot P$

注：Pは地下水位を考慮した圧密圧力(N/mm²)を示す。

* 試掘坑等での観察結果の粘土部、破砕部の積層構造を考慮し、等価物性を設定

注： $\alpha \cdot \beta$ 断層の解析用物性値は、V系断層と同じ試験結果を用いている。* 各要素ごとにPを算定して解析用物性値を設定している。

3. 評価方法

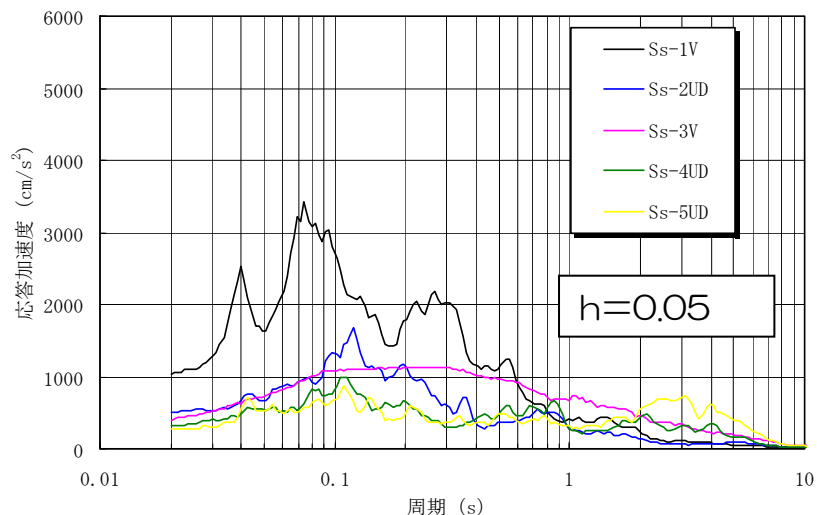
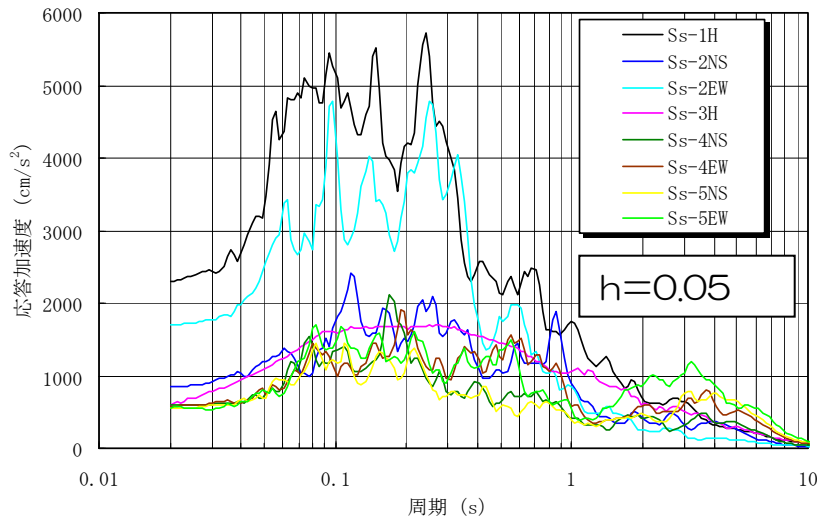
入力地震動

入力地震動は基準地震動 S_s を用いる。

解析モデルの下端 (T.M.S.L - 300m) へ直接基準地震動 S_s を入力する。

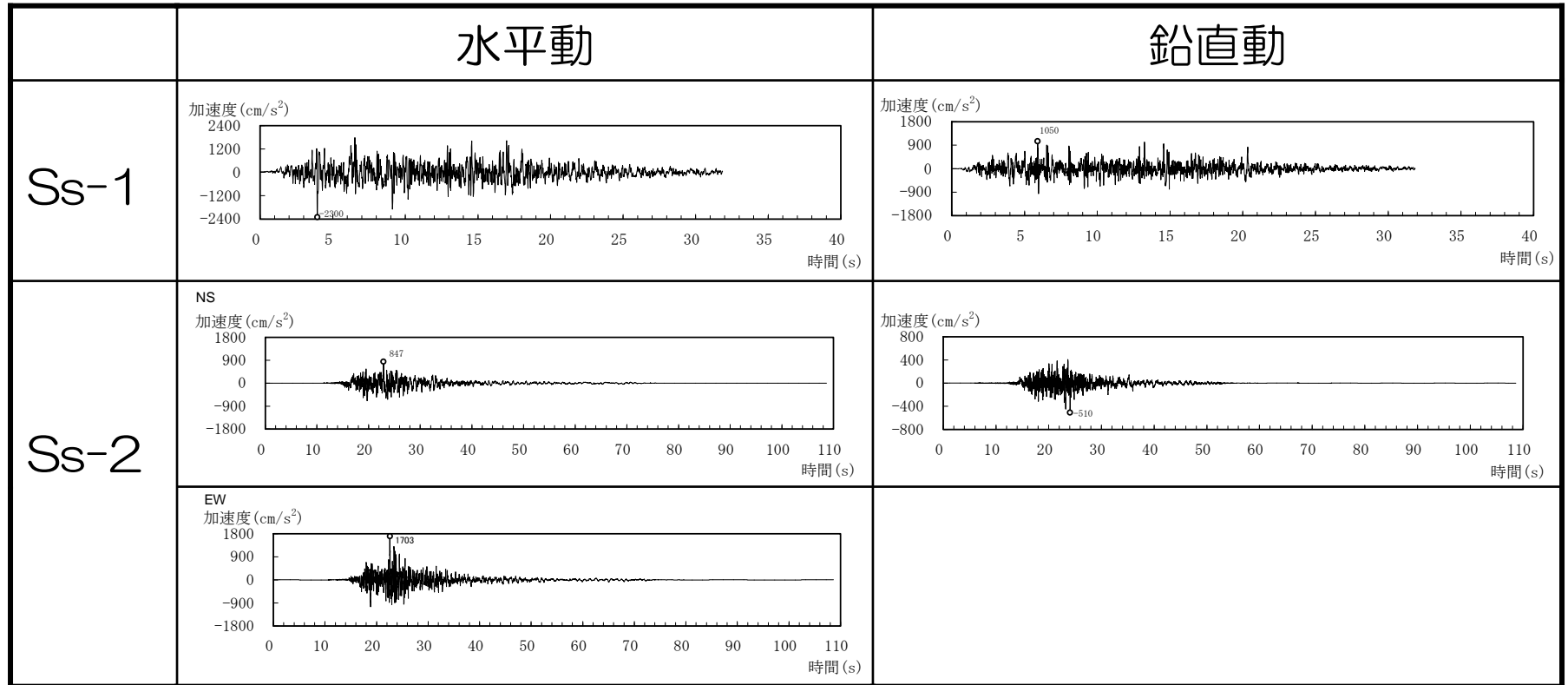
地震動		内容	方向	最大加速度 (gal)
F-B断層	Ss-1	応答スペクトルに基づく地震動評価	水平	2300
			鉛直	1050
	Ss-2	断層モデルを用いた手法による地震動評価	水平(NS)	847
			水平(EW)	1703
長岡平野西縁断層帯	Ss-3	応答スペクトルに基づく地震動評価	水平	600
			鉛直	400
	Ss-4	断層モデルを用いた手法による地震動評価	水平(NS)	589
			水平(EW)	574
			鉛直	314
	Ss-5	断層モデルを用いた手法による地震動評価	水平(NS)	553
水平(EW)			554	
			鉛直	266

【基準地震動 S_s 】



3. 評価方法

入力地震動



3. 評価方法

	水平動	鉛直動
Ss-3	<p>加速度(cm/s^2)</p> <p>時間(s)</p>	<p>加速度 (cm/s^2)</p> <p>時間 (s)</p>
Ss-4	<p>NS</p> <p>加速度 (cm/s^2)</p> <p>時間 (s)</p>	<p>加速度 (cm/s^2)</p> <p>時間 (s)</p>
	<p>EW</p> <p>加速度 (cm/s^2)</p> <p>時間 (s)</p>	
Ss-5	<p>NS</p> <p>加速度 (cm/s^2)</p> <p>時間 (s)</p>	<p>加速度 (cm/s^2)</p> <p>時間 (s)</p>
	<p>EW</p> <p>加速度 (cm/s^2)</p> <p>時間 (s)</p>	

3. 評価方法

評価内容

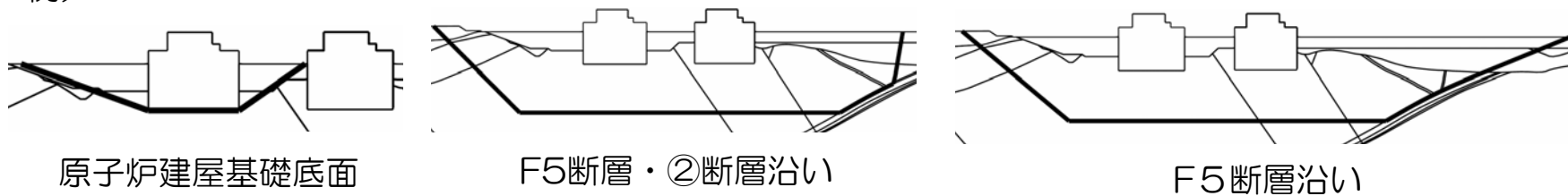
(1) すべり安全率

想定したすべり線上の応力状態をもとに、すべり線上のせん断抵抗力の和をすべり線上のせん断力の和で除して求める。

(想定すべり線)

原子炉建屋基礎底面沿い、断層沿いとする。

例)



(2) 原子炉建屋基礎底面の傾斜

基礎底面両端それぞれの鉛直方向の変位の差を基礎底面幅で除す。

3. 評価方法

(3) 原子炉建屋基礎地盤の支持力

動的FEM解析結果

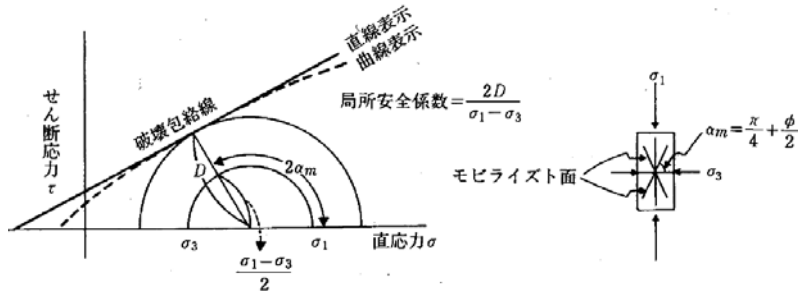
着目時刻の応答値の抽出

連続したすべり面の形成の有無の確認

- ①原子炉建屋の基礎底面の地盤に作用する鉛直方向の合力が最大となる時刻
- ②原子炉建屋の基礎底面に接する地盤要素の鉛直応力が最大となる時刻

- 要素ごとの安全係数分布
安全係数が1を下回る要素が連続するか？
- モビライズド面（潜在すべり面）
安全係数が1を下回る要素に連続性がある場合、それらが潜在すべり面の向きと整合し、連続するすべり線として想定することができるか？

要素ごとの安全係数およびモビライズド面の算出



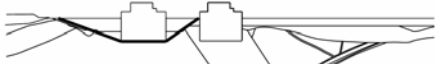


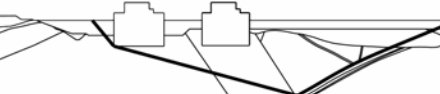

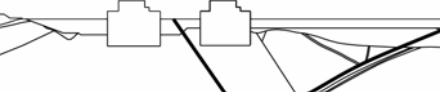
σ_1, σ_3 : それぞれ最大, 最小主応力 (圧縮を正)
 D : モール円の中心から破壊包絡線への最短距離

原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-2008, pp198

4. 評価結果

すべり安全率（汀線平行方向）

※S_s-1に対する評価においてすべり安全率が最小

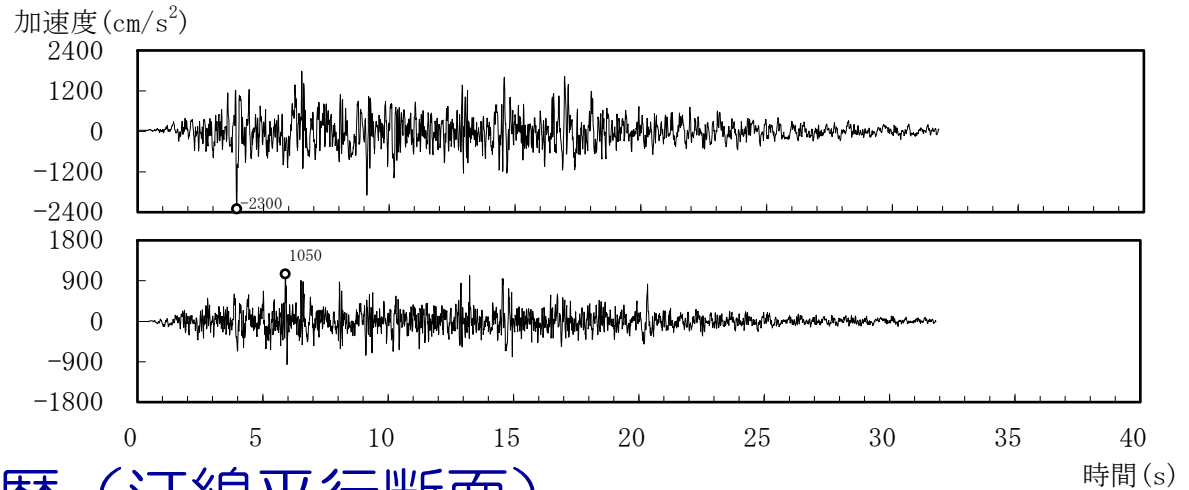
すべり線形状のパターン	S _s -1	S _s -2	S _s -3	S _s -4	S _s -5
 建屋底面のすべり	3.1	4.3	4.0	7.1	4.6
 建屋底面のすべり	2.7	3.8	3.6	6.4	4.0
 F5断層+②断層のすべり	2.0	3.7	3.1	5.8	3.3
 F5断層のすべり	2.1	3.4	3.0	5.2	3.0
 F5断層のすべり	1.9	3.4	2.9	5.2	3.0
 F5断層+β断層のすべり	3.8	6.6	5.9	10.3	6.0

◎評価基準値1.5を上回っている。

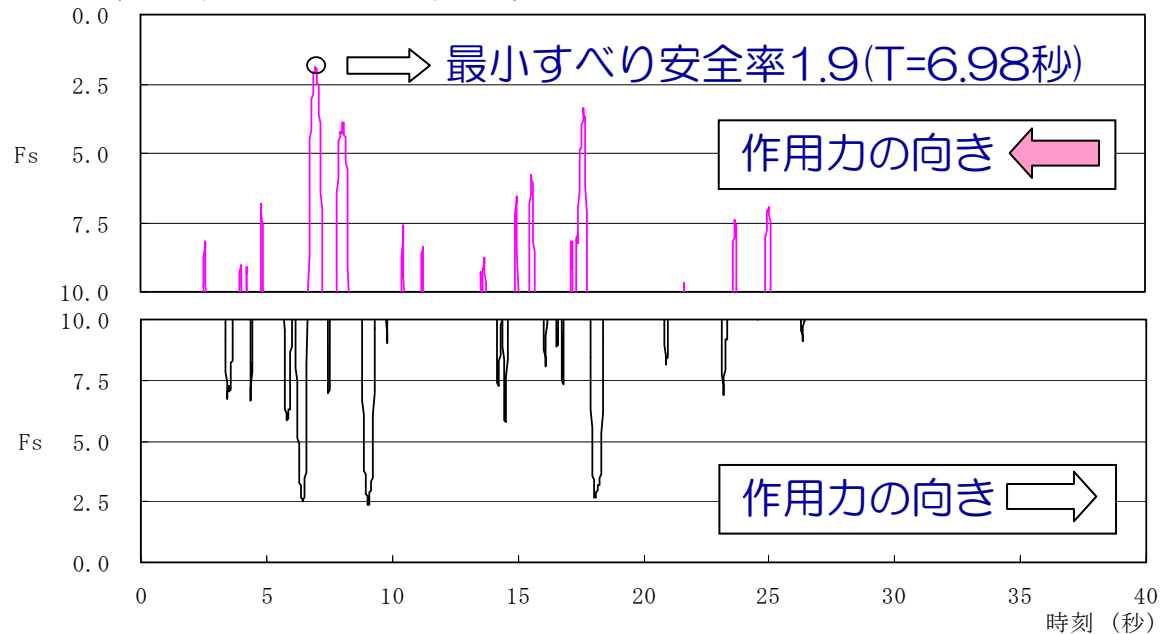
4. 評価結果

入力地震動Ss-1
水平動

鉛直動

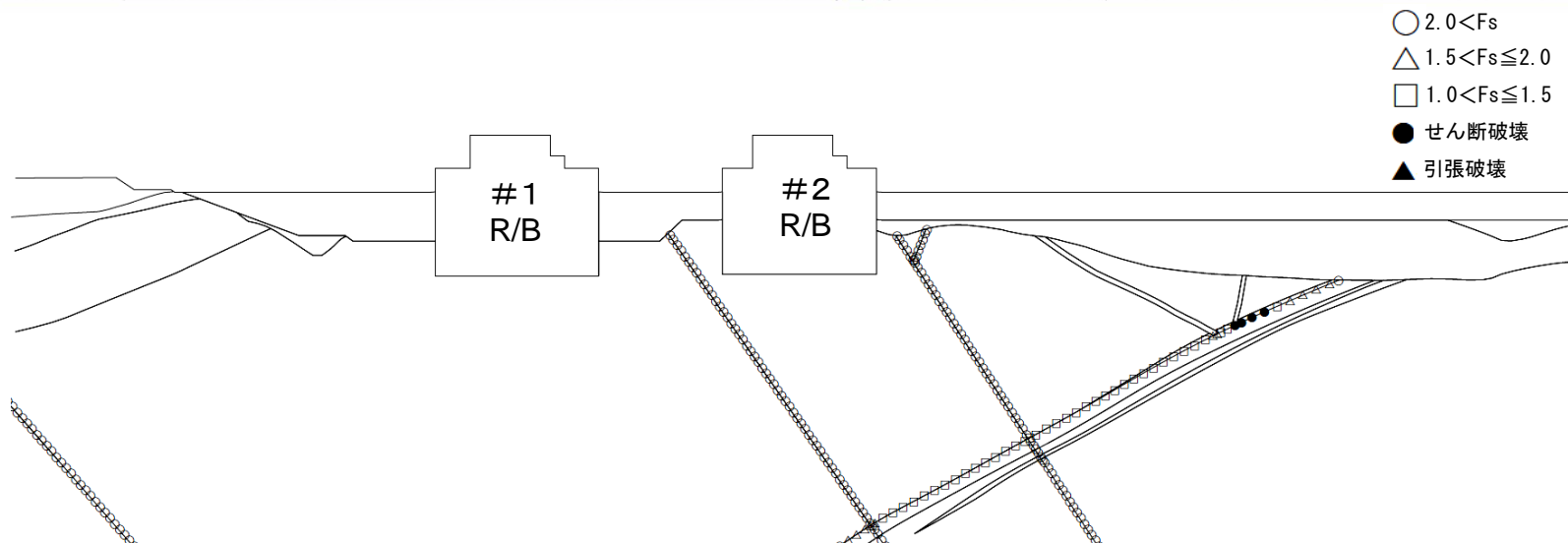
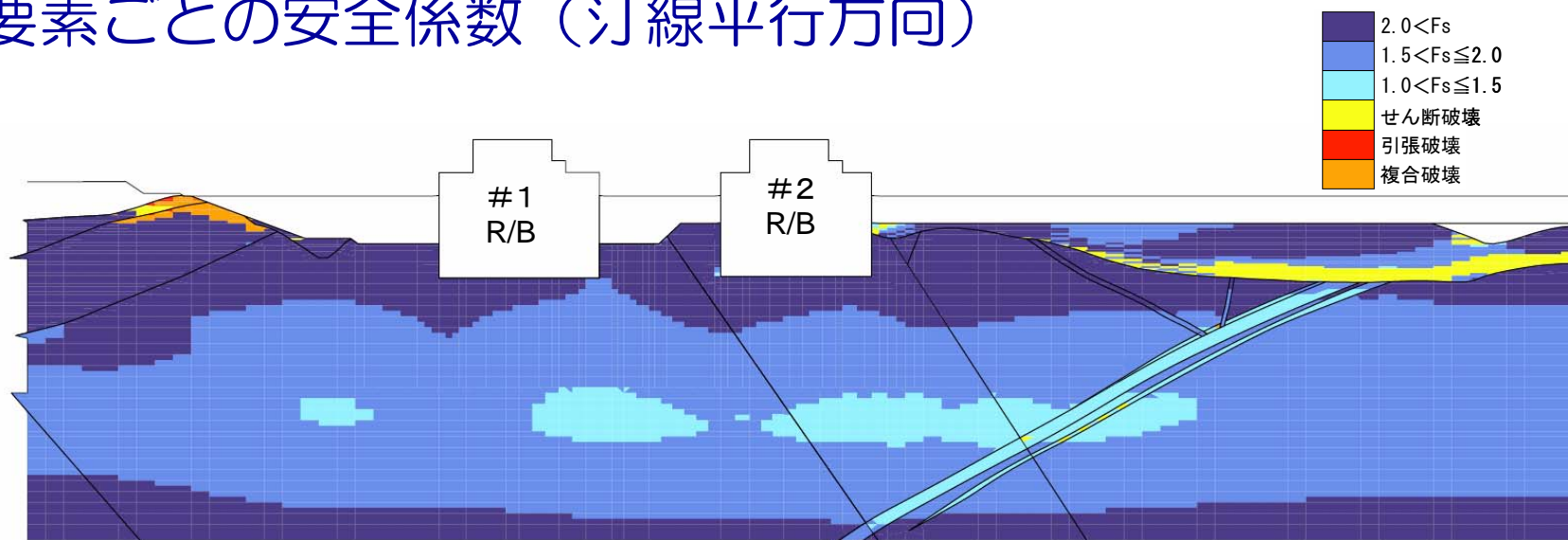


すべり安全率の時刻歴 (汀線平行断面)



4. 評価結果

要素ごとの安全係数（汀線平行方向）

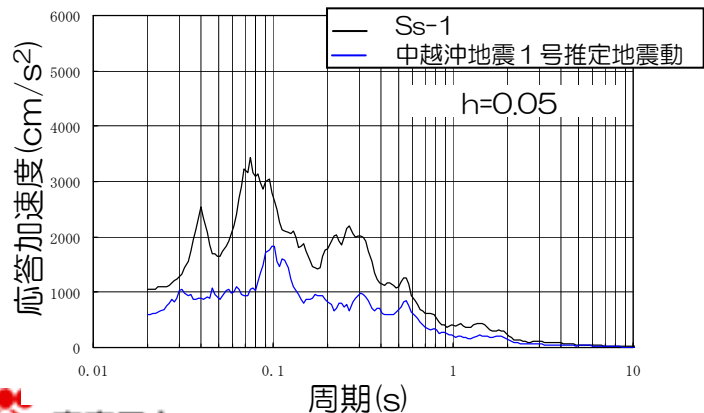
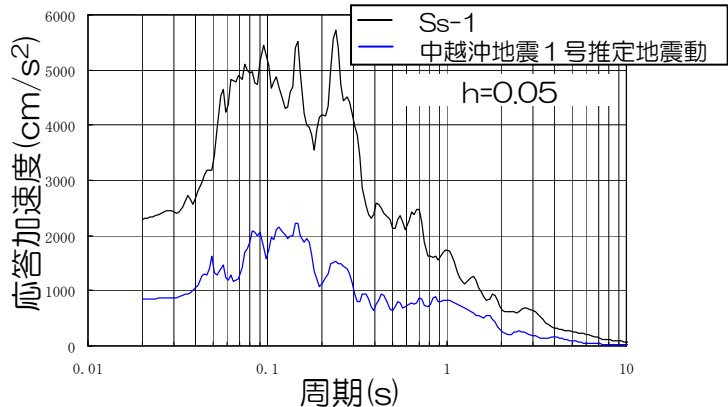


1号機汀線平行断面要素ごとの安全係数[Ss-1, 最小すべり安全率発生時刻6.98秒]

要素ごとの安全係数（中越沖地震1号機推定地震動）

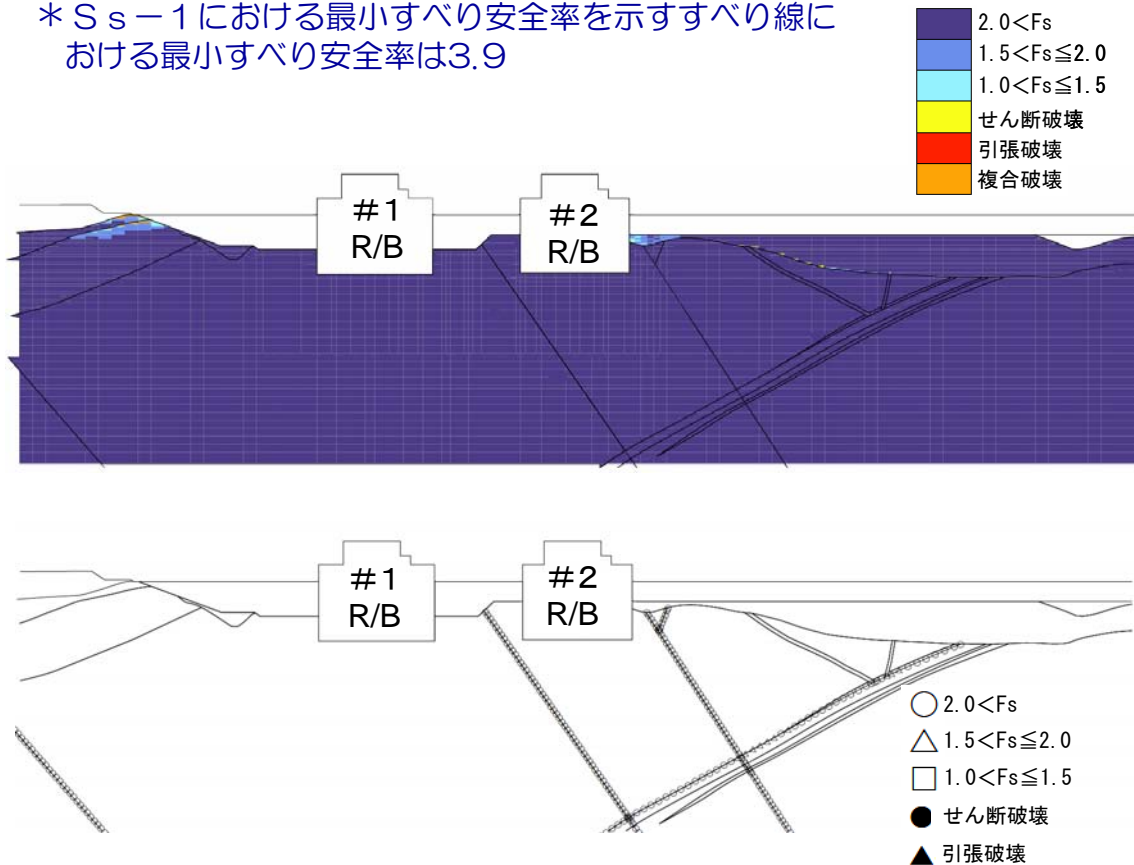
中越沖地震1号機推定地震動の概要

地震動	方向	最大加速度 (gal)
中越沖地震1号機推定地震動	水平(NS)	842
	鉛直	591
Ss-1	水平	2300
	鉛直	1050



要素ごとの安全係数

* Ss-1における最小すべり安全率を示すすべり線における最小すべり安全率は3.9



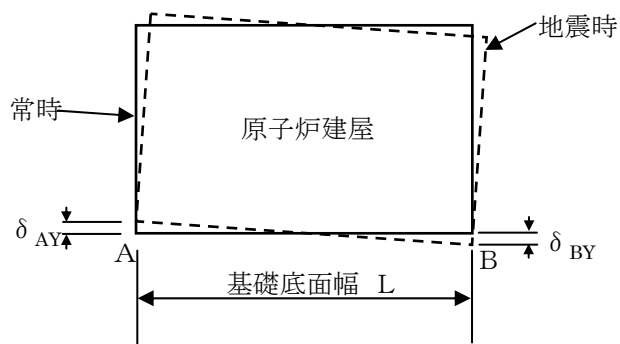
(汀線平行断面, 最小すべり安全率時刻4.20秒)

4. 評価結果

原子炉建屋基礎底面の傾斜（汀線平行方向）

※ S s - 1 に対する評価において基礎底面の傾斜が最大

	S s - 1	S s - 2	S s - 3	S s - 4	S s - 5
原子炉建屋基礎底面両端の鉛直方向の相対変位の最大値 $\max(\delta_{AY} - \delta_{BY})$	4.0 cm	2.1 cm	2.1 cm	1.1 cm	1.3 cm
原子炉建屋基礎底面の傾斜の最大値 $\max(\delta_{AY} - \delta_{BY} / L)$	1/2,100	1/4,200	1/4,100	1/8,200	1/6,700



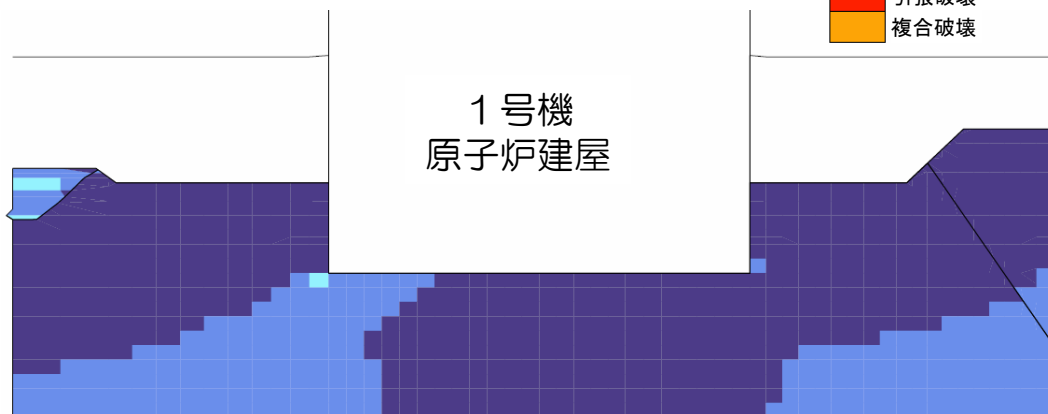
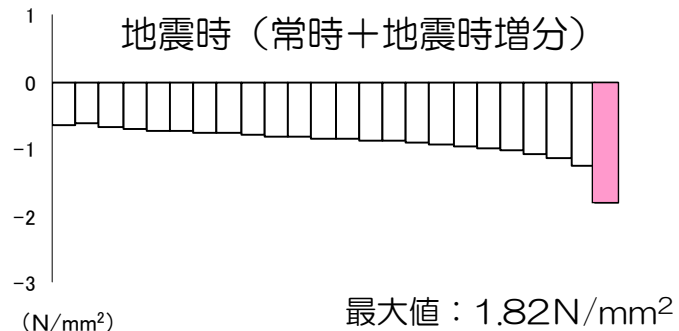
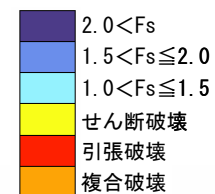
※安全上重要な機器・配管系の安全機能に支障を与えるものではない。

* 1/1,000までの建屋傾斜は機器に対して影響ないことを確認済
(運営管理・設備健全性評価WG設備健全性評価SWG(第6回)において報告)

4. 評価結果

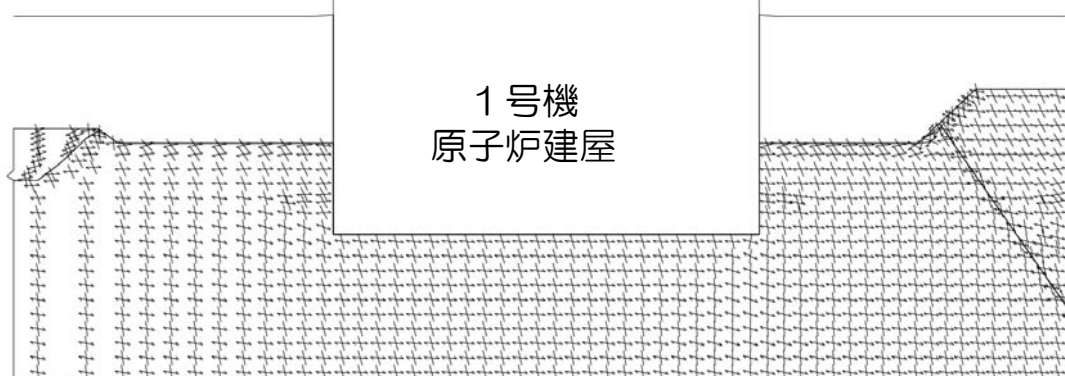
原子炉建屋基礎地盤の支持力（汀線平行方向）

Ss-1, 要素鉛直応力最大時 (T=9.09秒)

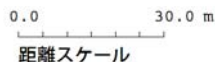


破壊表示は当該時刻で判定

要素ごとの安全係数分布



破壊表示は当該時刻で判定



モビライズド面

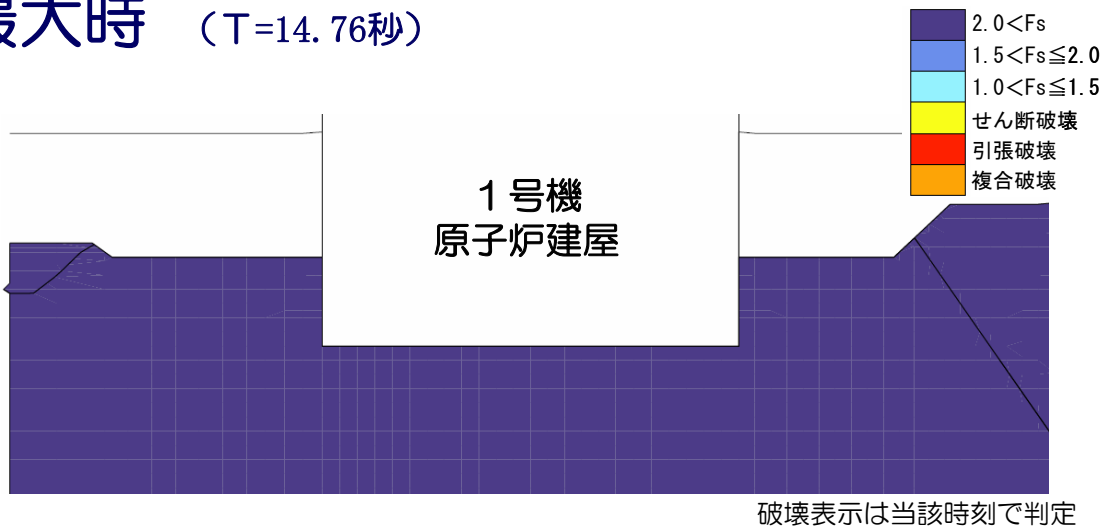
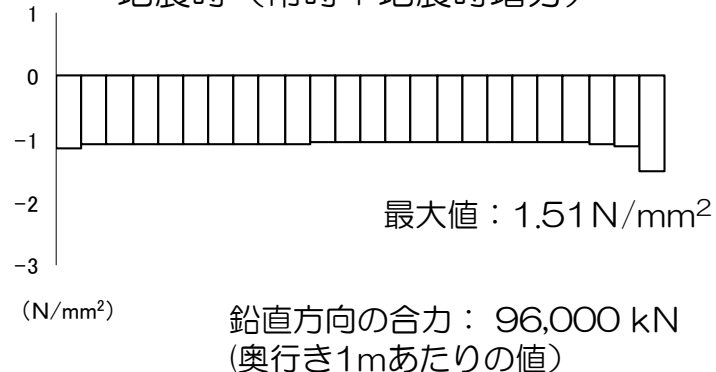
モビライズド面	破壊状況
↔	せん断破壊
→ ←	引張破壊
↔	複合破壊

安全係数が1を下回る要素が連続せず，連続するすべり線を想定できない

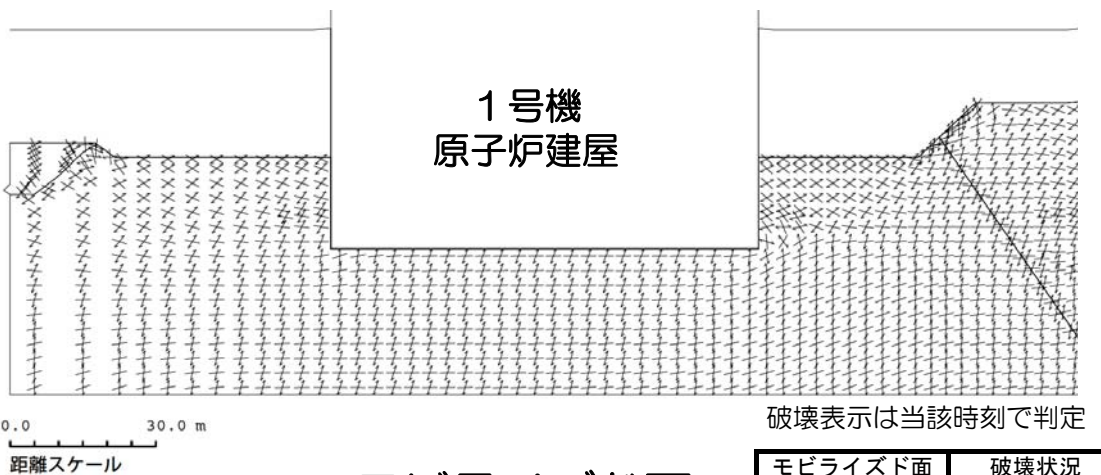
4. 評価結果

Ss-1, 鉛直方向の合力最大時 (T=14.76秒)

地震時 (常時+地震時増分)



要素ごとの安全係数分布



安全係数が1を下回る要素が連続せず、連続するすべり線を想定できない


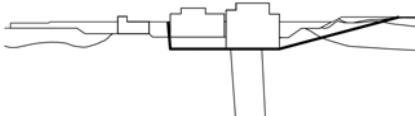



モビライズド面

モビライズド面	破壊状況
← : →	せん断破壊
— : ←	引張破壊
— : →	複合破壊

4. 評価結果

すべり安全率（汀線直交方向）

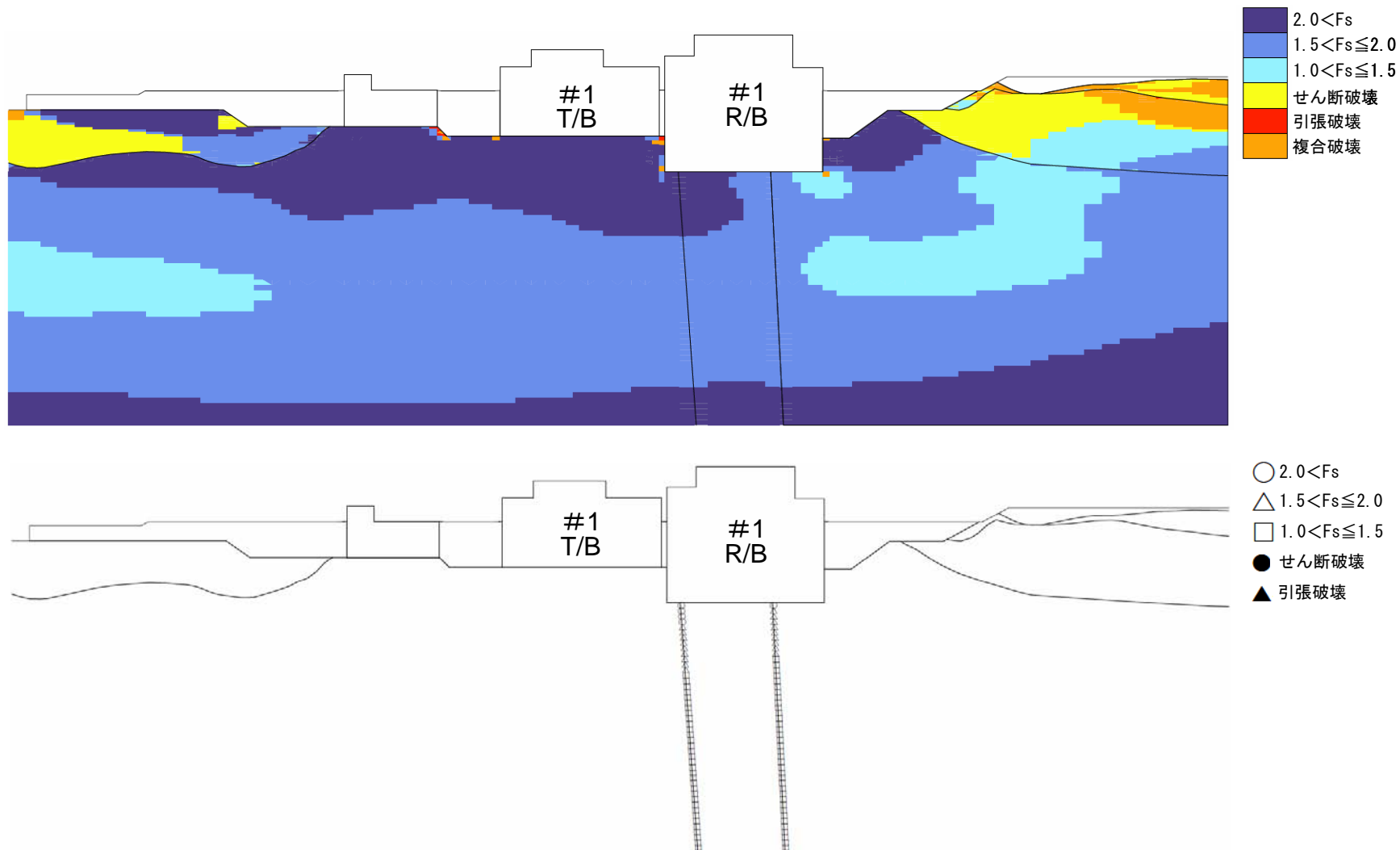
※S_s-1に対する評価においてすべり安全率が最小

すべり線形状のパターン	S _s -1	S _s -2	S _s -3	S _s -4	S _s -5
 建屋底面のすべり	2.1	3.1	3.5	4.4	3.7
 建屋底面のすべり	2.4	2.6	3.4	4.3	3.4
 建屋底面のすべり	2.4	2.5	3.4	3.9	3.2
 α断層のすべり	2.7	3.4	4.1	5.2	4.1
 β断層のすべり	3.1	3.7	4.7	5.4	4.7

◎評価基準値1.5を上回っている。

4. 評価結果

要素ごとの安全係数（汀線直交方向）



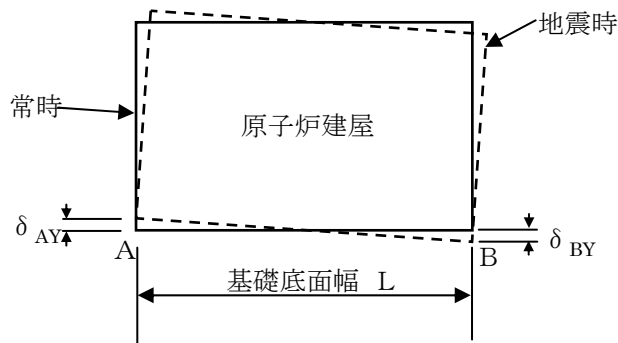
1号機汀線直交断面要素ごとの安全係数[Ss-1, 最小すべり安全率発生時刻7.02秒]

4. 評価結果

原子炉建屋基礎底面の傾斜（汀線直交方向）

※S s - 1 に対する評価において基礎底面の傾斜が最大

	S s - 1	S s - 2	S s - 3	S s - 4	S s - 5
原子炉建屋基礎底面両端の鉛直方向の相対変位の最大値 $\max(\delta_{AY} - \delta_{BY})$	3.2cm	2.0cm	1.6cm	1.6cm	1.1cm
原子炉建屋基礎底面の傾斜の最大値 $\max(\delta_{AY} - \delta_{BY} /L)$	1/2,700	1/4,400	1/5,400	1/5,500	1/7,800



※安全上重要な機器・配管系の安全機能に支障を与えるものではない。

* 1/1000までの建屋傾斜は機器に対して影響ないことを確認済
(運営管理・設備健全性評価WG設備健全性評価SWG(第6回)において報告)

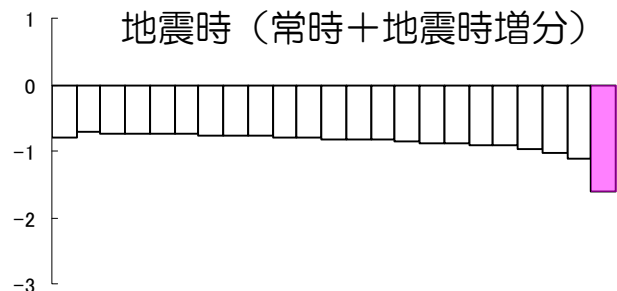
4. 評価結果

原子炉建屋基礎地盤の支持力（汀線直交方向）

Ss-1, 要素鉛直応力最大時

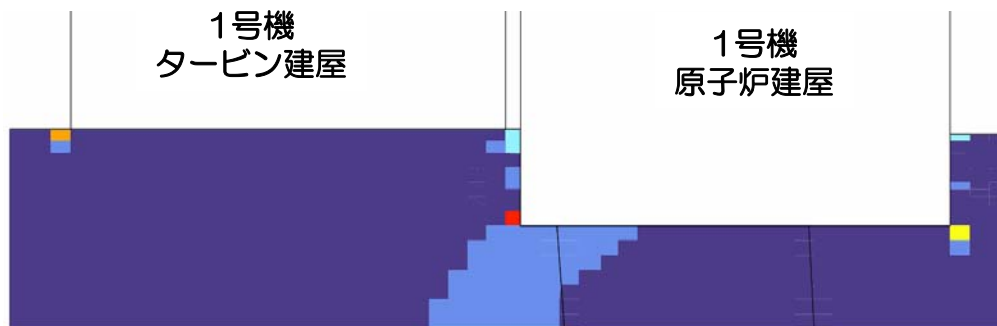
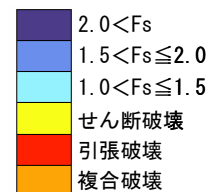
(T=9.09秒)

地震時（常時+地震時増分）



(N/mm²)

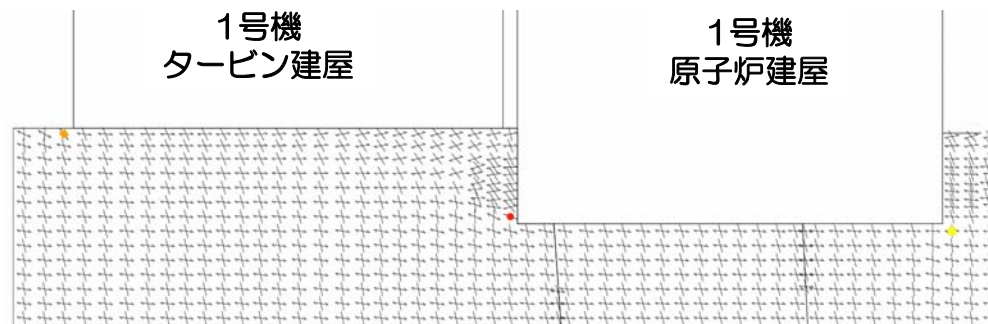
最大値：1.60N/mm²



破壊表示は当該時刻で判定

要素ごとの安全係数分布

安全係数が1を下回る要素が連続せず，連続するすべり線を想定できない



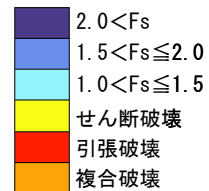
0.0 20.0 m
距離スケール

モビライズド面

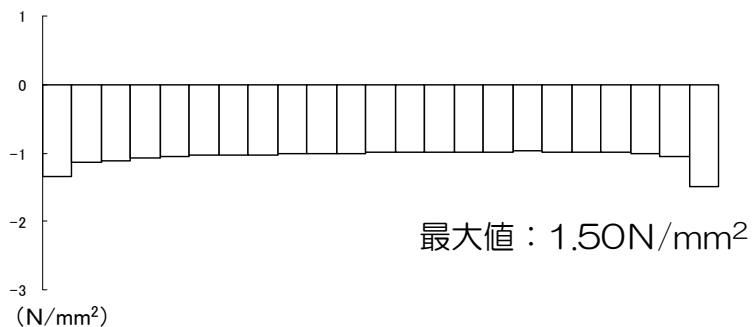
モビライズド面	破壊状況
↖ : ↗	■ : せん断破壊
— : ↗	● : 引張破壊
— : ↖	■ : 複合破壊

4. 評価結果

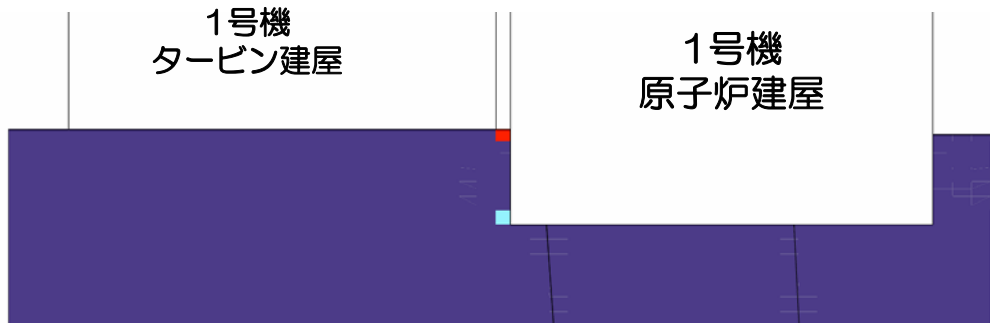
Ss-1, 鉛直方向の合力最大時 (T=14.76秒)



地震時 (常時+地震時増分)

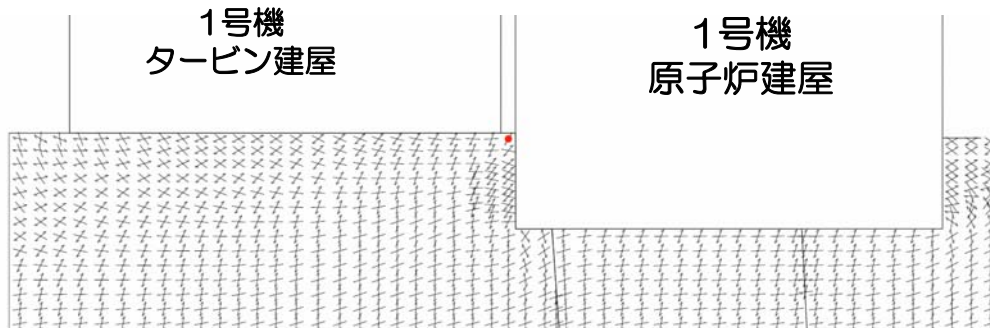


鉛直方向の合力: 93,000 kN
(奥行き1mあたりの値)



破壊表示は当該時刻で判定

要素ごとの安全係数分布



0.0 20.0 m
距離スケール

モビライズド面

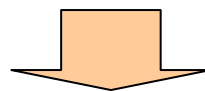
モビライズド面	破壊状況
↙ : ↘	■ : せん断破壊
— : ←	● : 引張破壊
	■ : 複合破壊

安全係数が1を下回る要素が連続せず、連続するすべり線を想定できない

5. まとめ

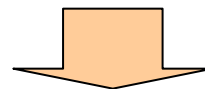
【評価方針】 地震時の支持性能について、下記により評価

- (1) 想定すべり線におけるすべり安全率
- (2) 原子炉建屋基礎底面の傾斜
- (3) 原子炉建屋基礎地盤の支持力



【評価結果】

- (1) 想定すべり線における安全率
評価基準値1.5を上回っている。
- (2) 原子炉建屋基礎底面の傾斜
安全上重要な機器・配管系の安全機能に支障を与えるものではない。
- (3) 原子炉建屋基礎地盤の支持力
安全係数が1を下回るような連続したすべり線は形成されない。



原子炉建屋基礎地盤が基準地震動 S_s による地震力に対して十分な支持性能をもつことを確認した。