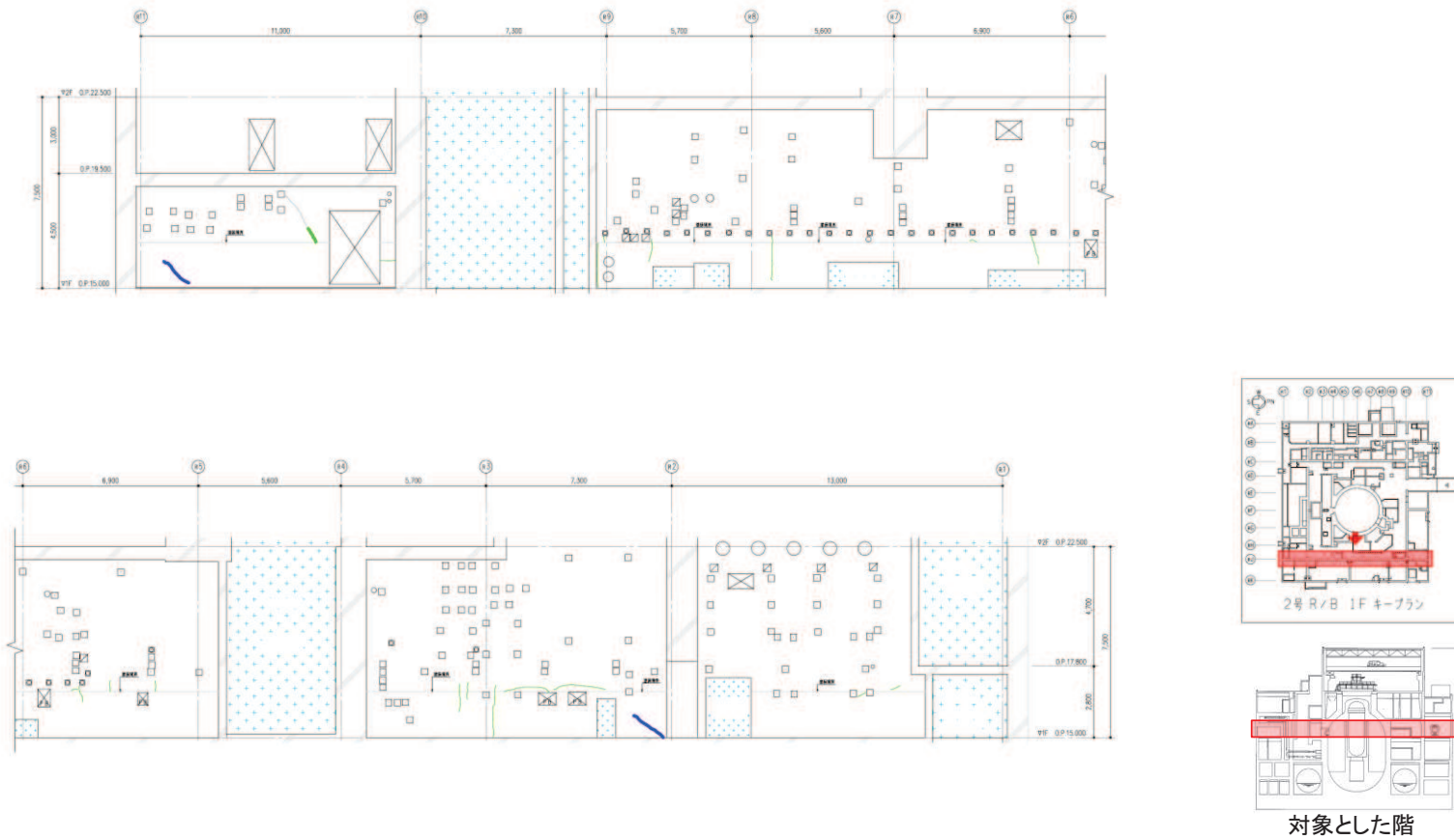


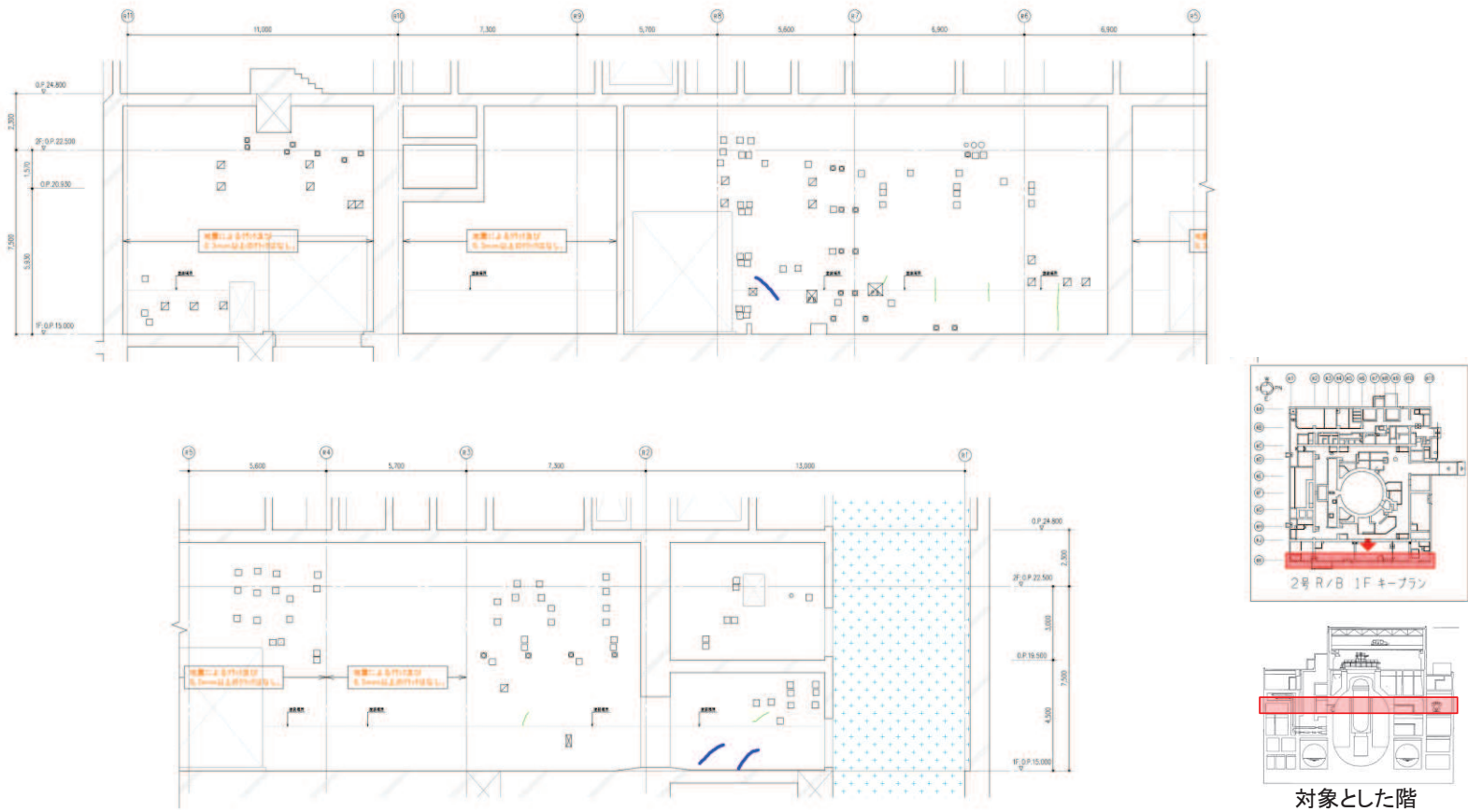
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 35 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (35) 地上 1 階 RC 通り



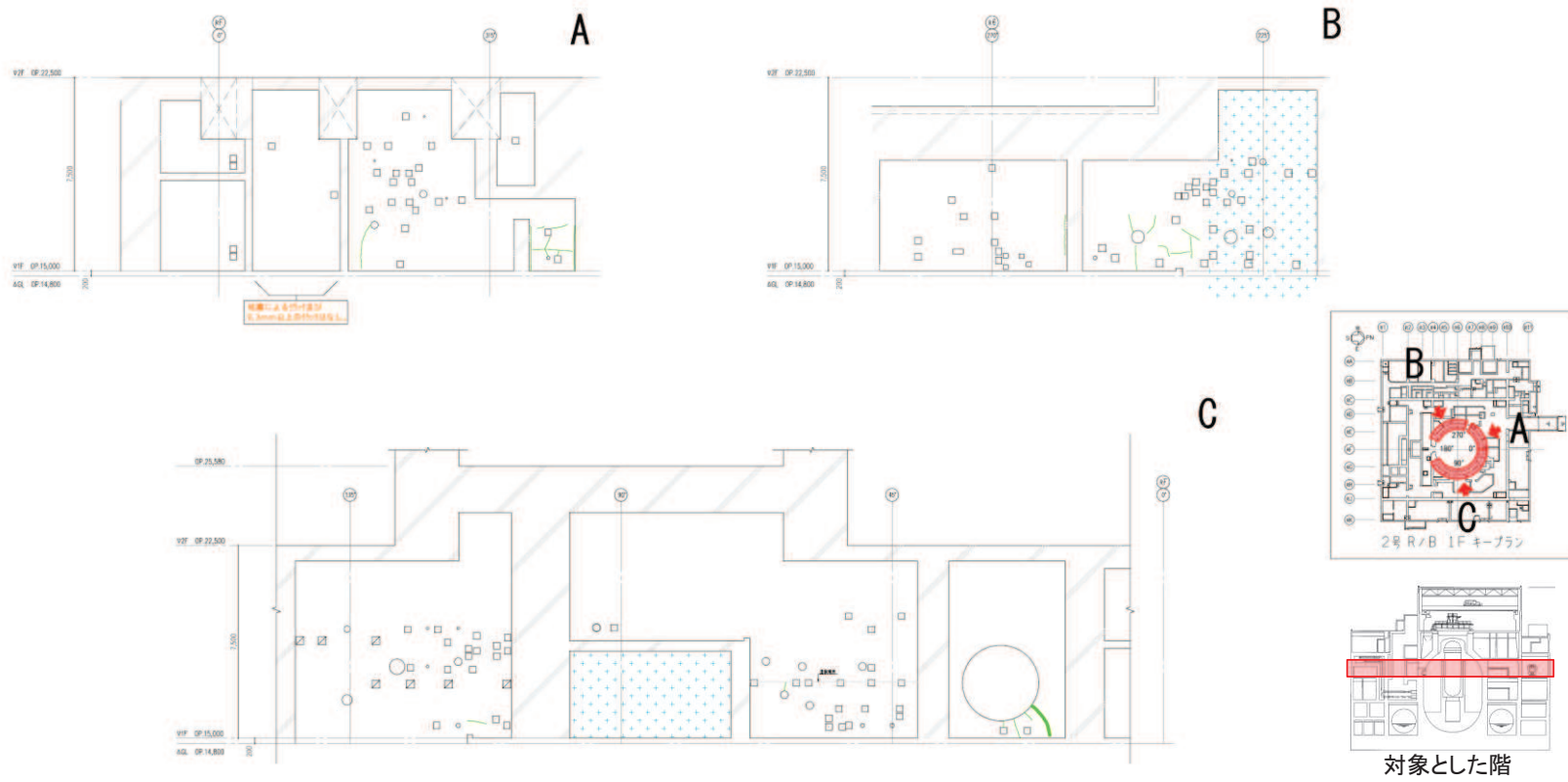
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 36 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (36) 地上1階 RJ 通り



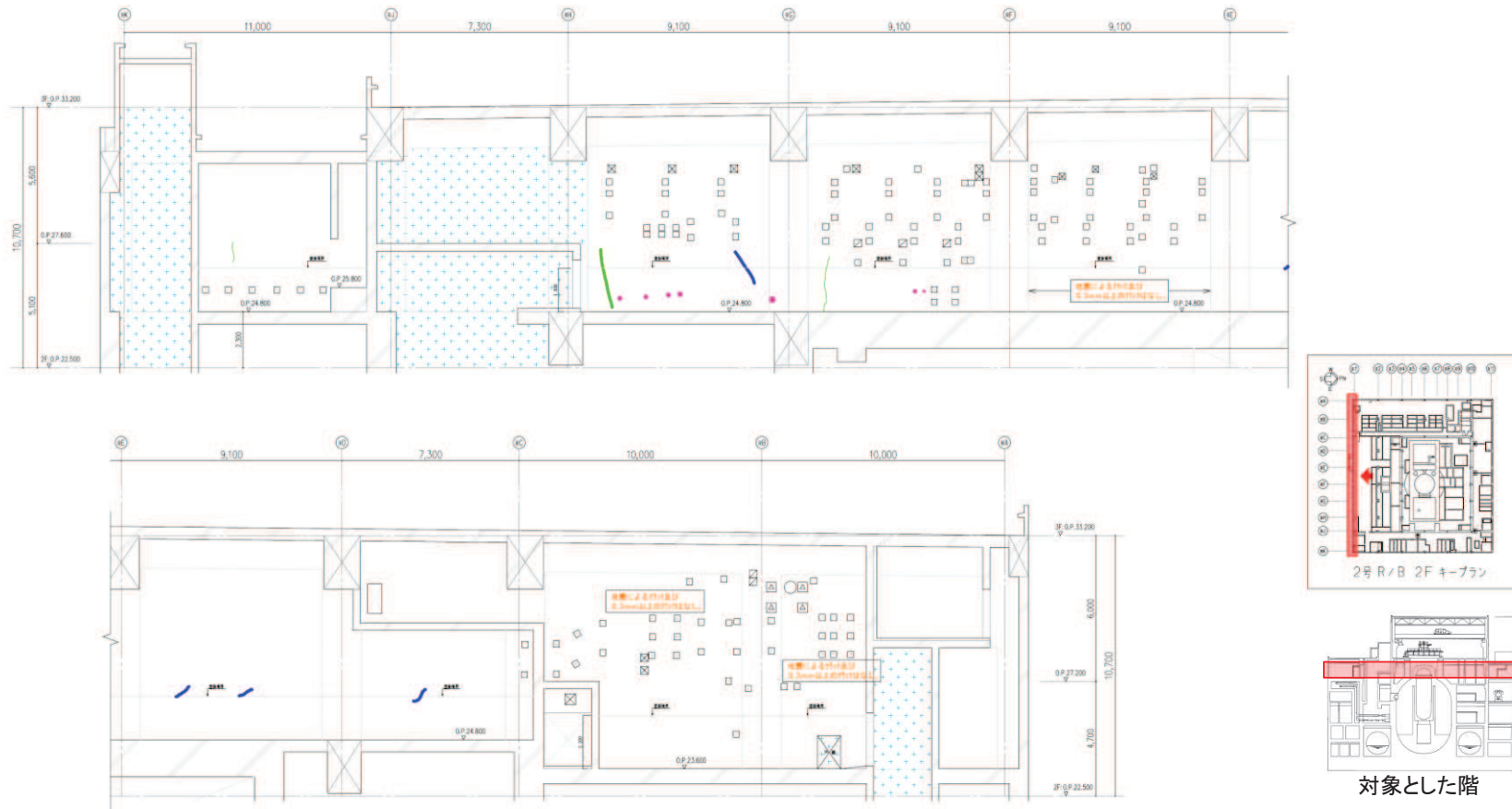
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 37 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (37) 地上 1 階 RK 通り



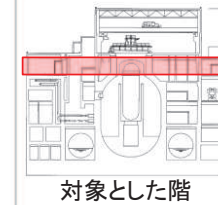
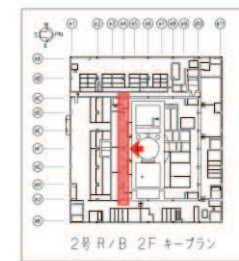
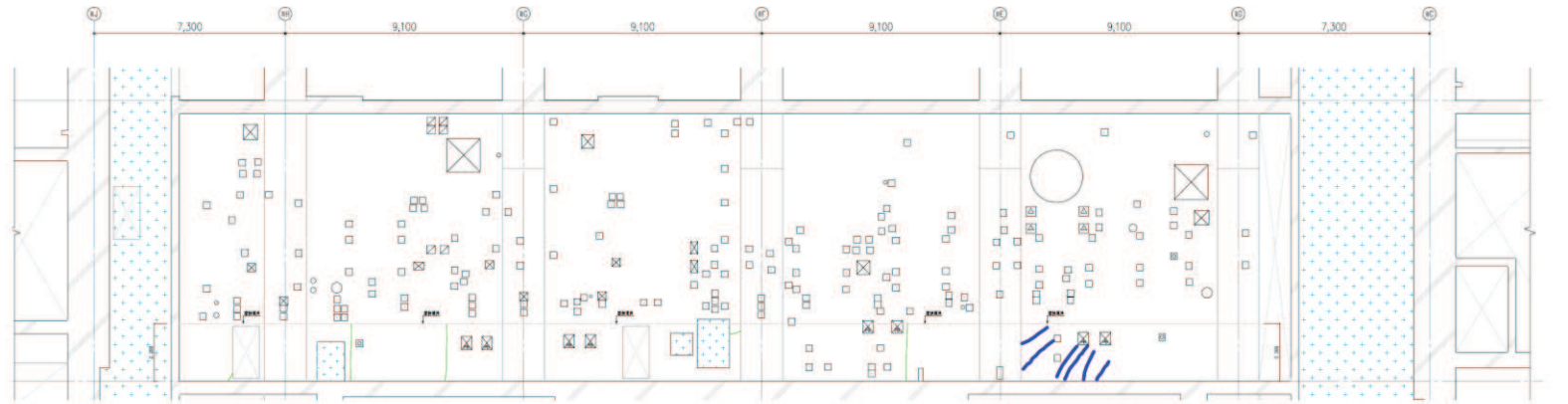
地震による		地震以外		
	0.3mm未満			幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満	はくらく
	1.0mm以上		1.0mm以上	確認不能の範囲

図 38 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (38) 地上 1 階 シェル壁



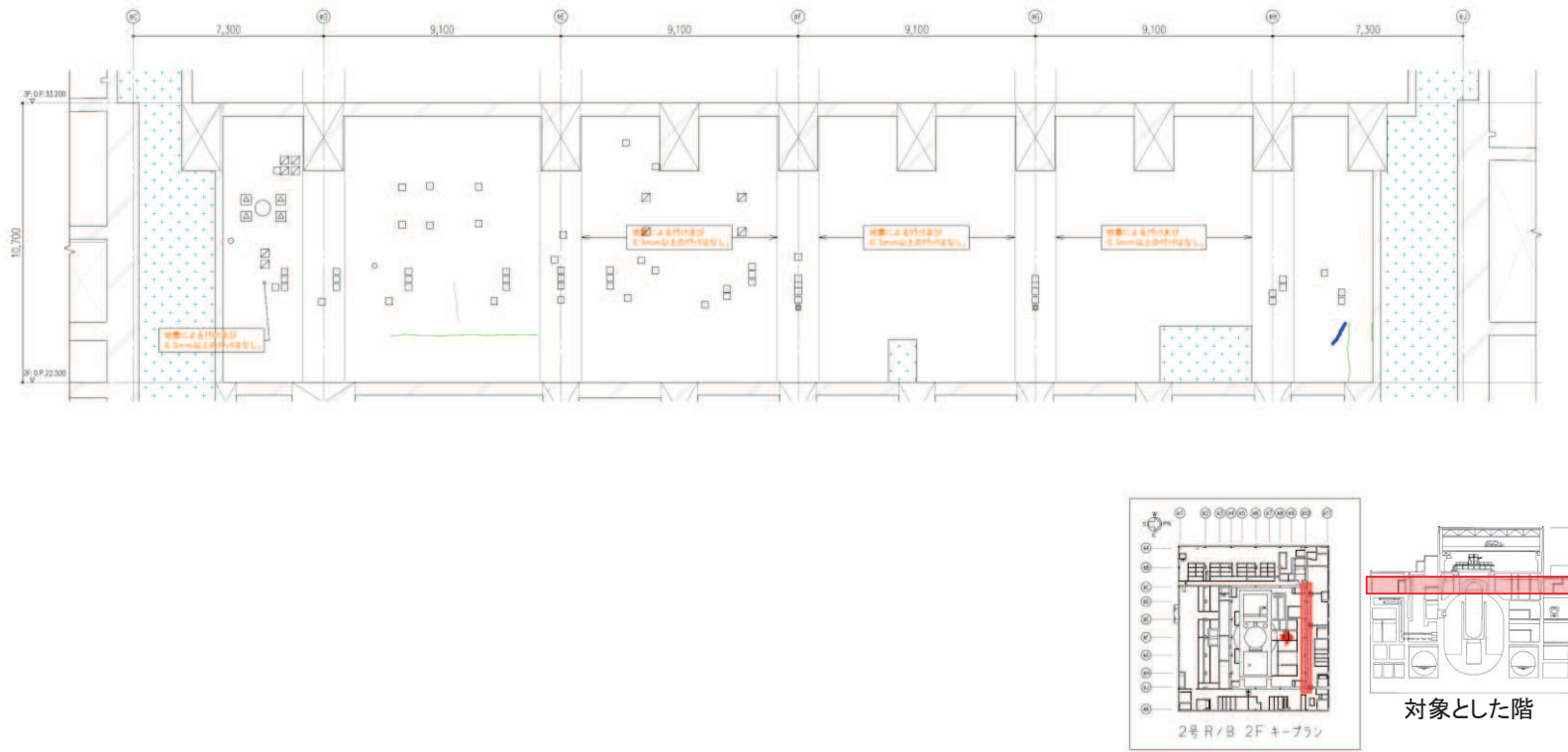
地震による		地震以外		
—	0.3mm未満	—	0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
—	0.3mm以上～1.0mm未満	—	1.0mm以上	はくらく
—	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 39 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (39) 地上 2 階 R1 通り



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 40 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (40) 地上 2 階 R4 通り



地震による		地震以外		
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上	はくらく
	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 41 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (41) 地上 2 階 R10 通り

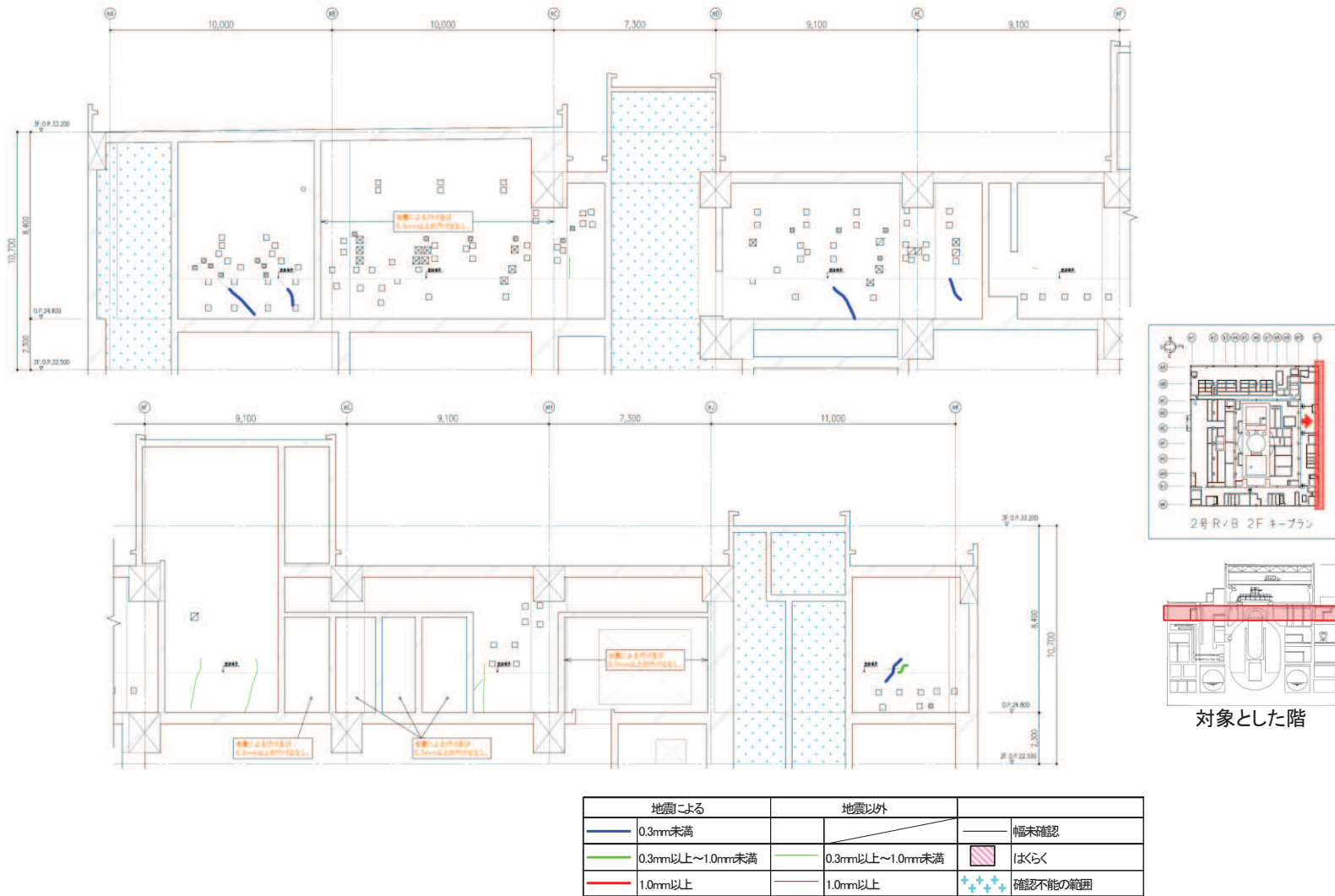
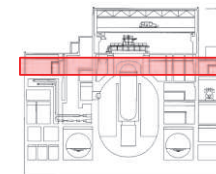
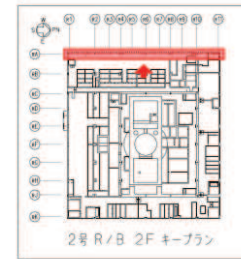
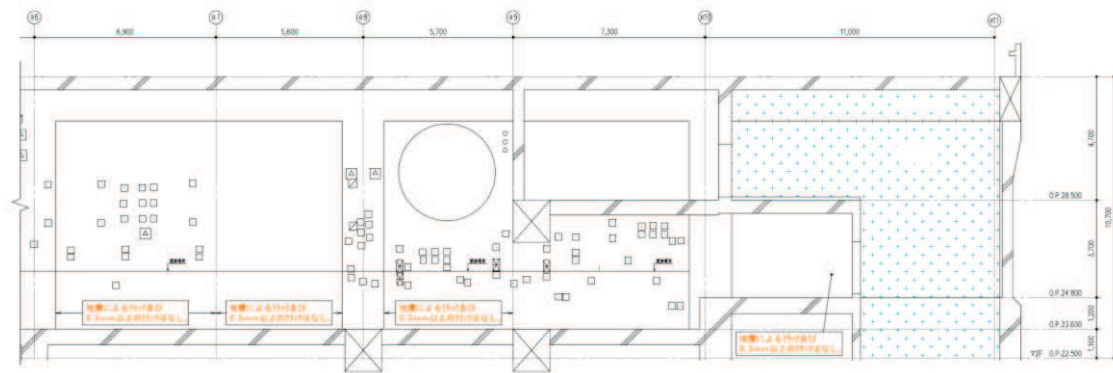
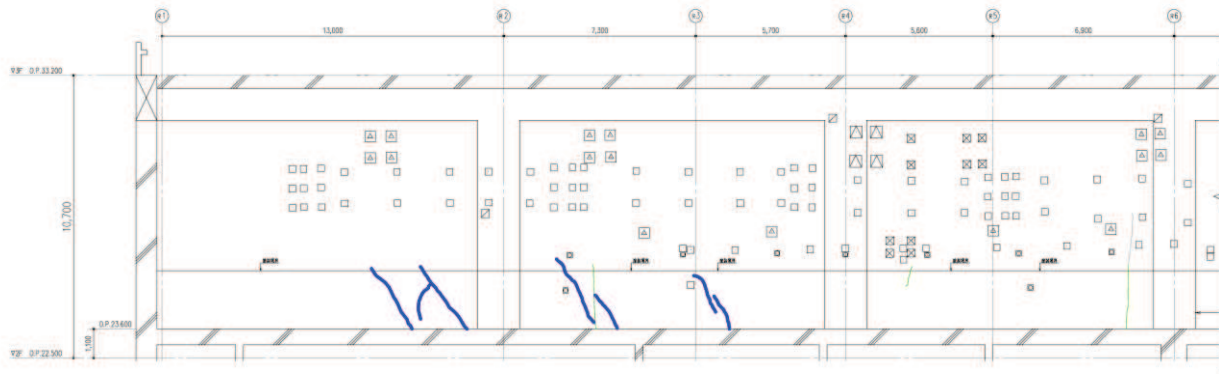


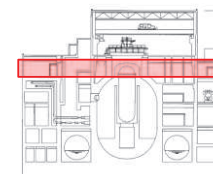
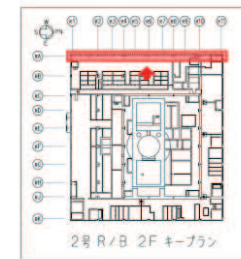
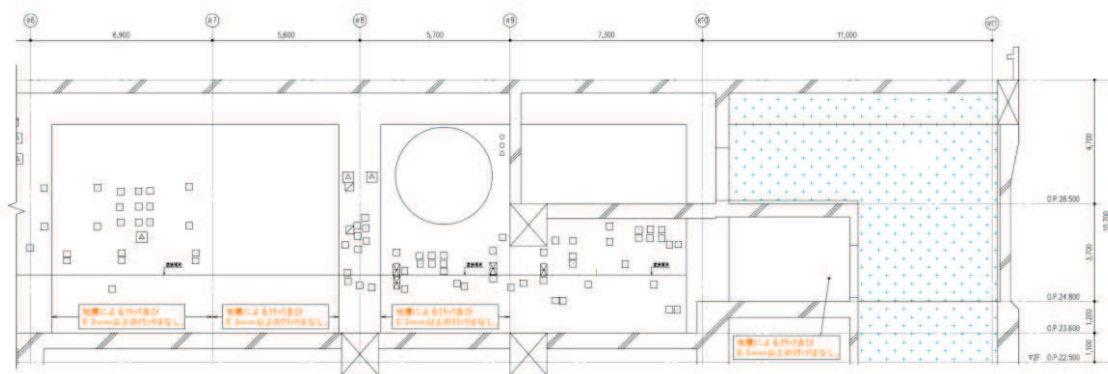
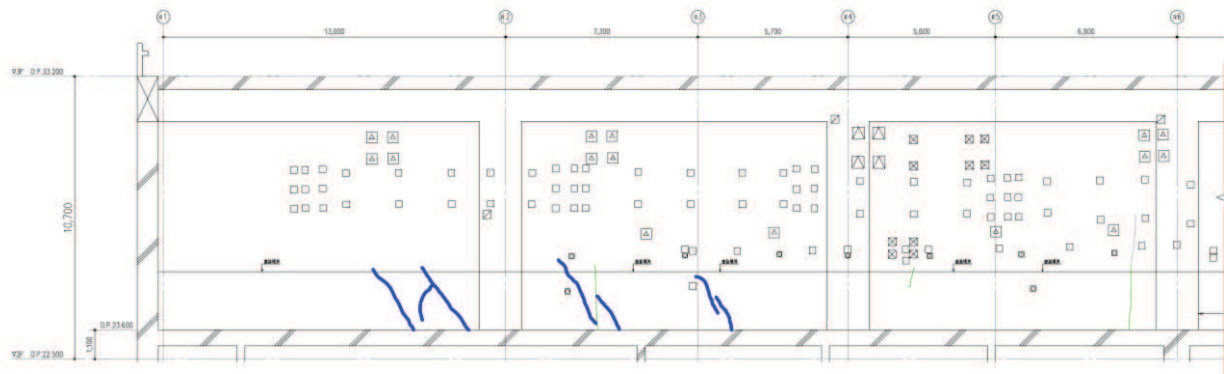
図 42 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (42) 地上 2 階 R11 通り



対象とした階

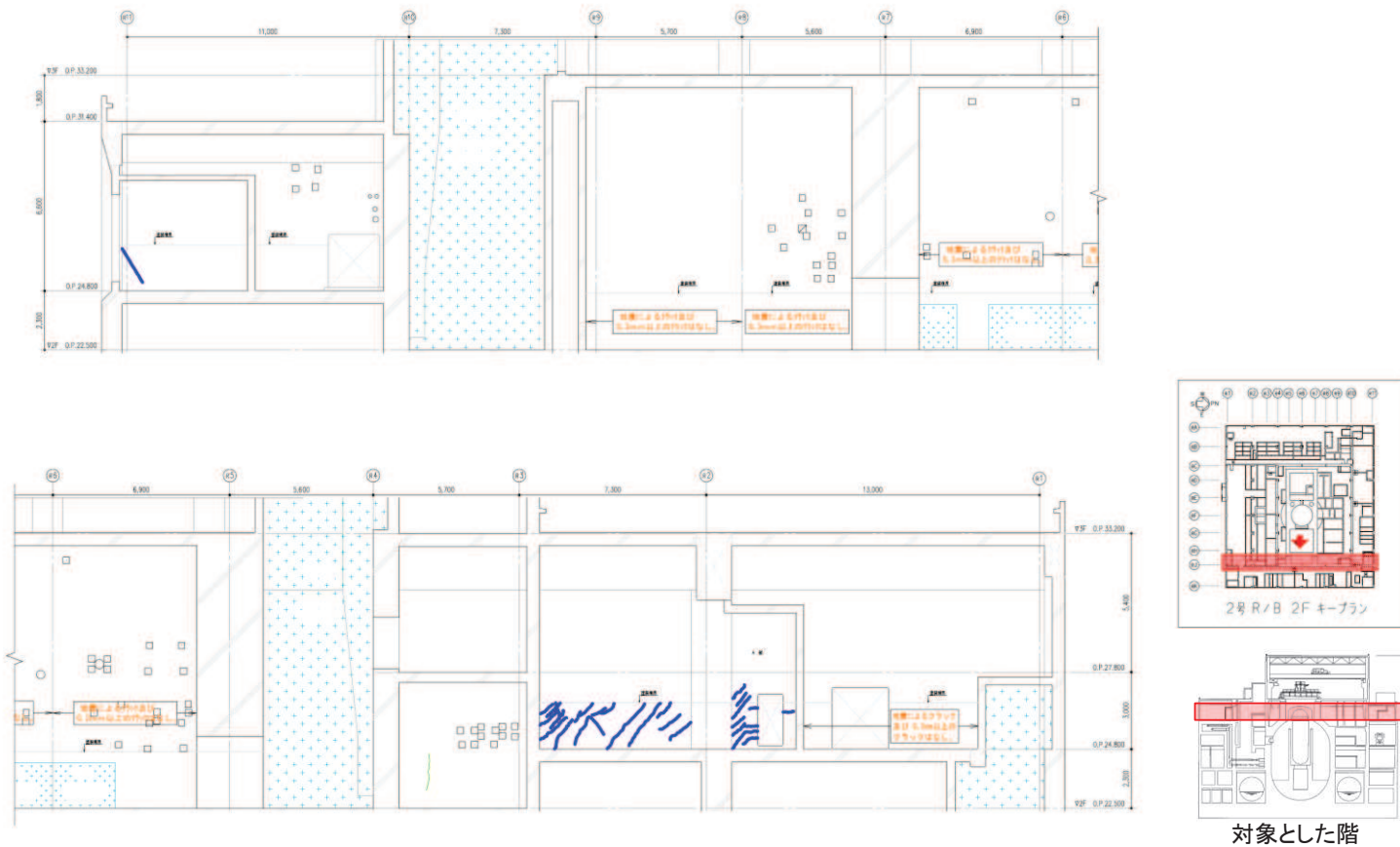
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 43 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (43) 地上 2 階 RA 通り



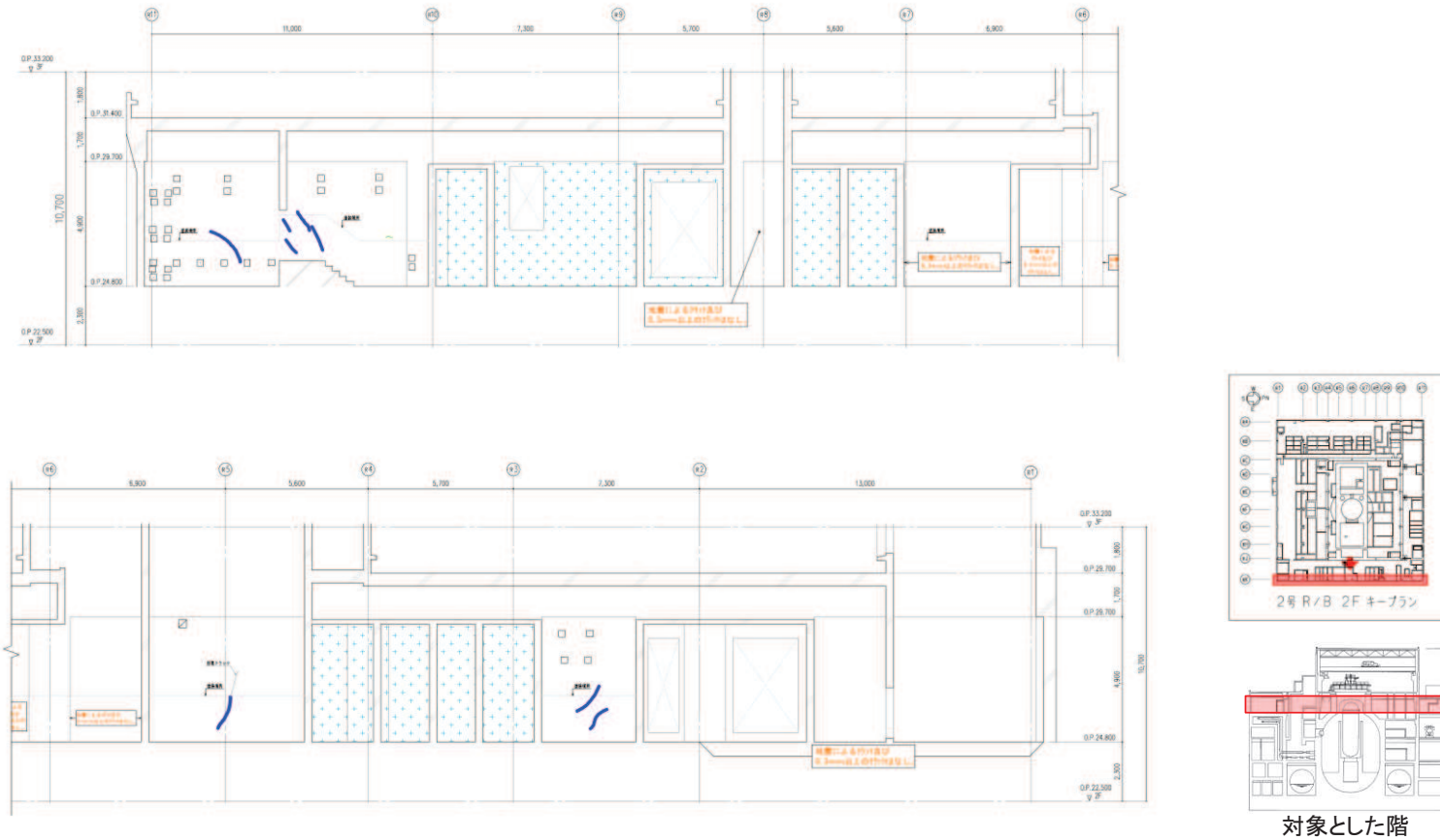
地震による		地震以外		
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上	はくらく
	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 44 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (44) 地上 2 階 RC 通り



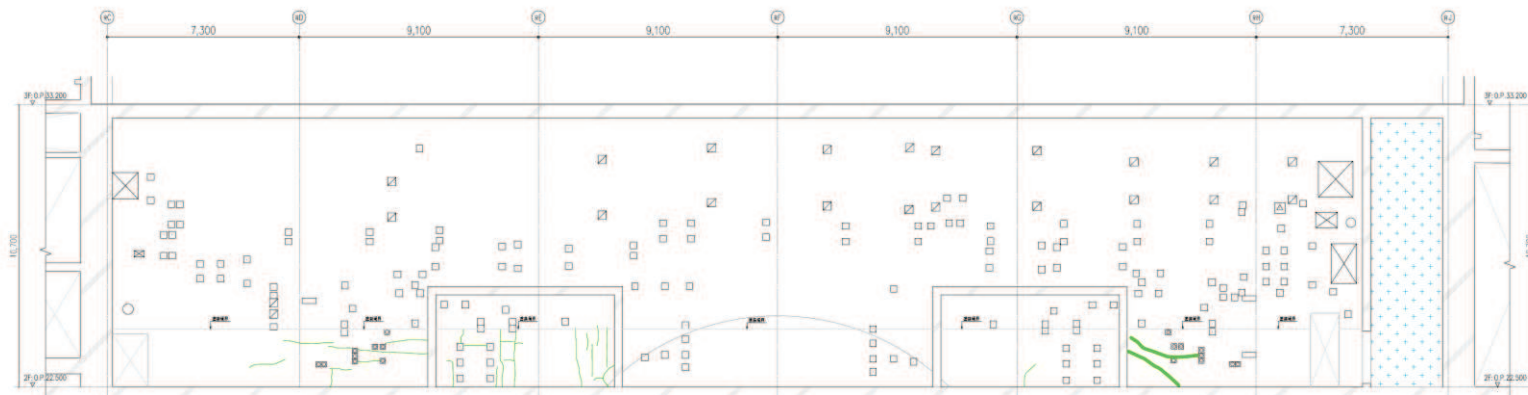
地震による		地震以外		
	0.3mm未満			幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	はくらく
	1.0mm以上		1.0mm以上	確認不能の範囲

図 45 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (45) 地上 2 階 RJ 通り

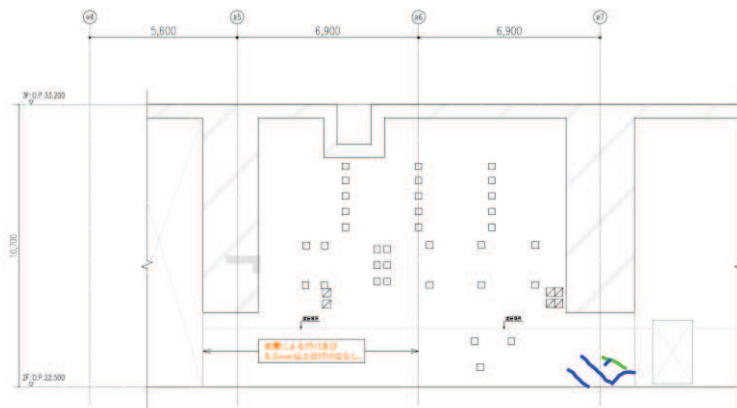


地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

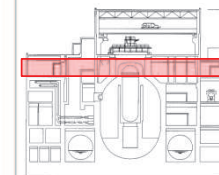
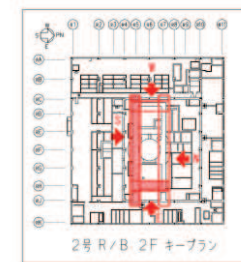
図 46 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (46) 地上 2 階 RK 通り



(南面 立面図)



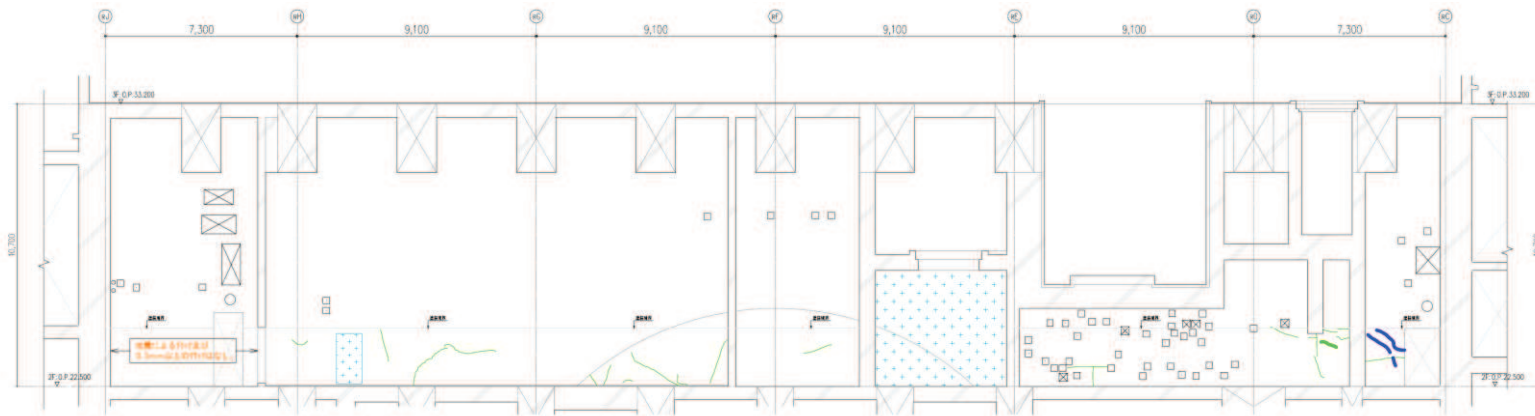
(東面 立面図)



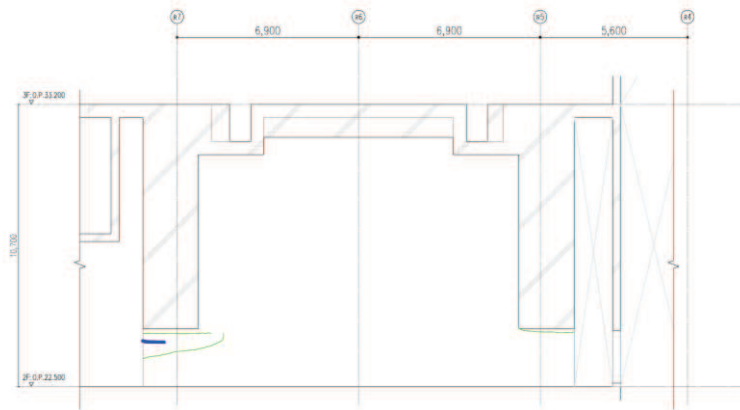
対象とした階

地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

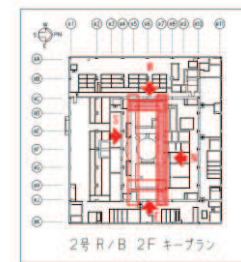
図 47 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (47) 地上 2 階 一部シェル壁 (1)



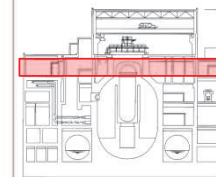
(北面 立面図)



(西面 立面図)



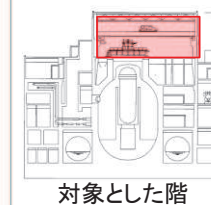
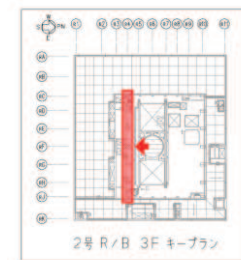
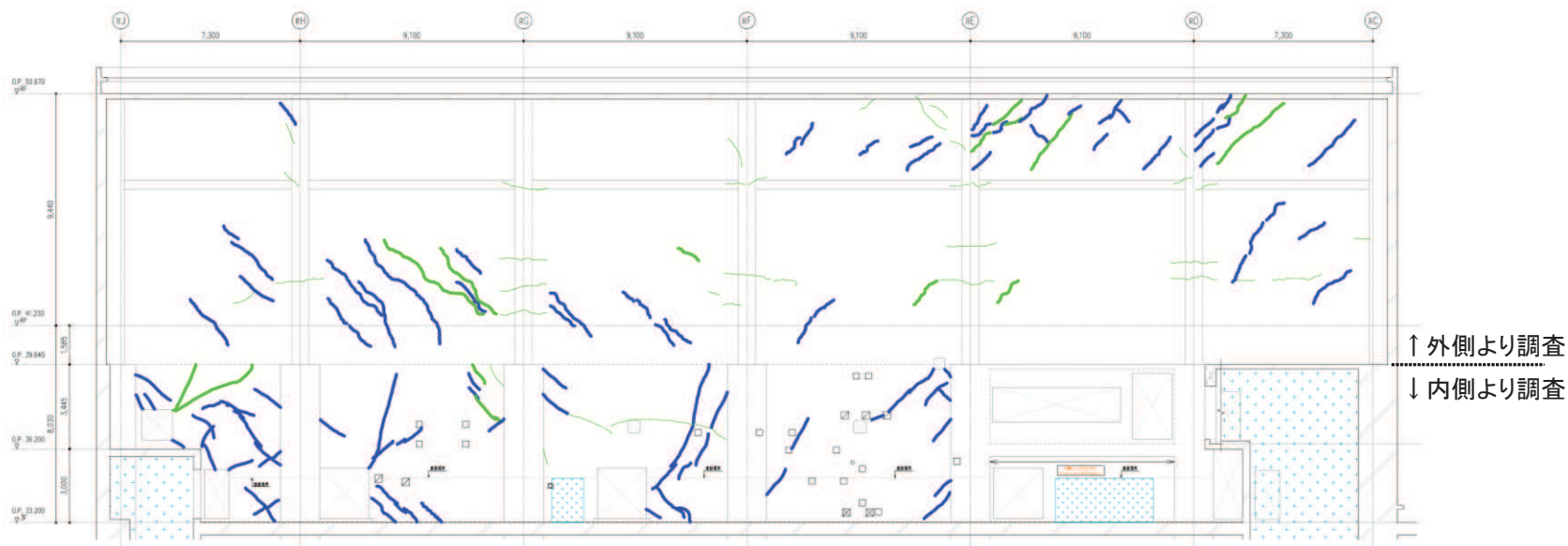
2号 R/B 2F キープラン



対象とした階

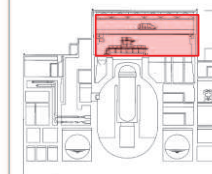
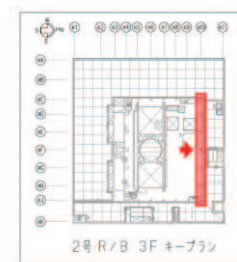
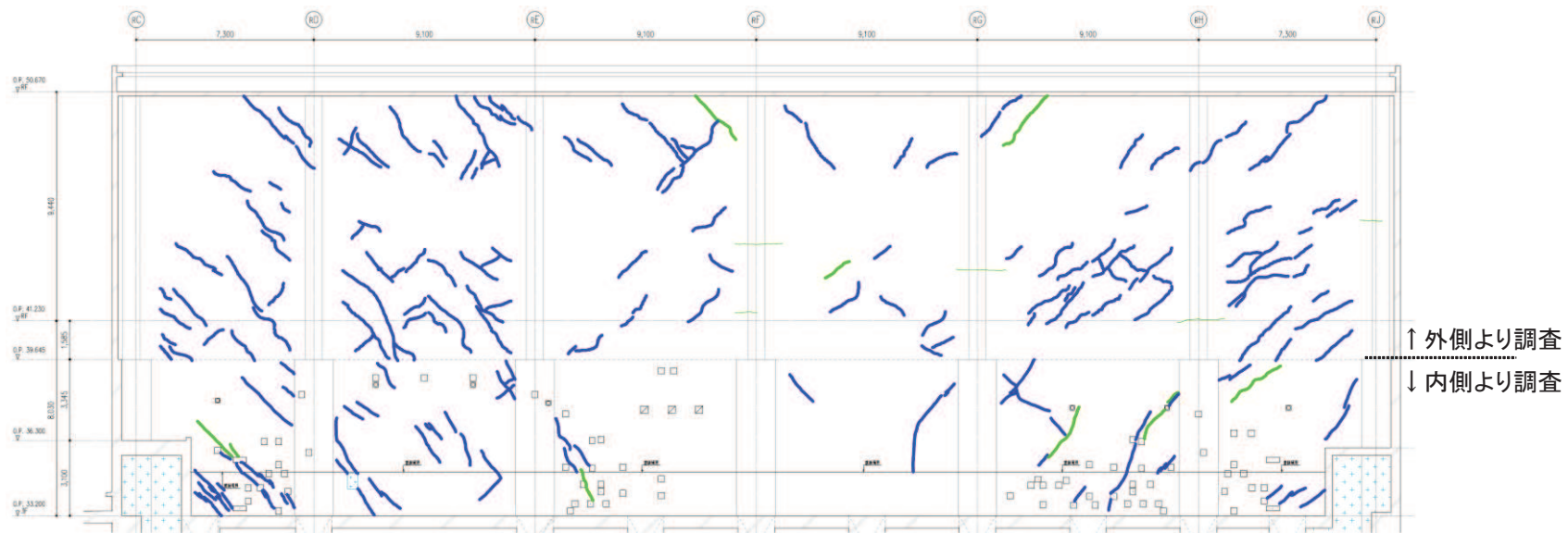
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 48 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (48) 地上 2 階 一部シェル壁 (2)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

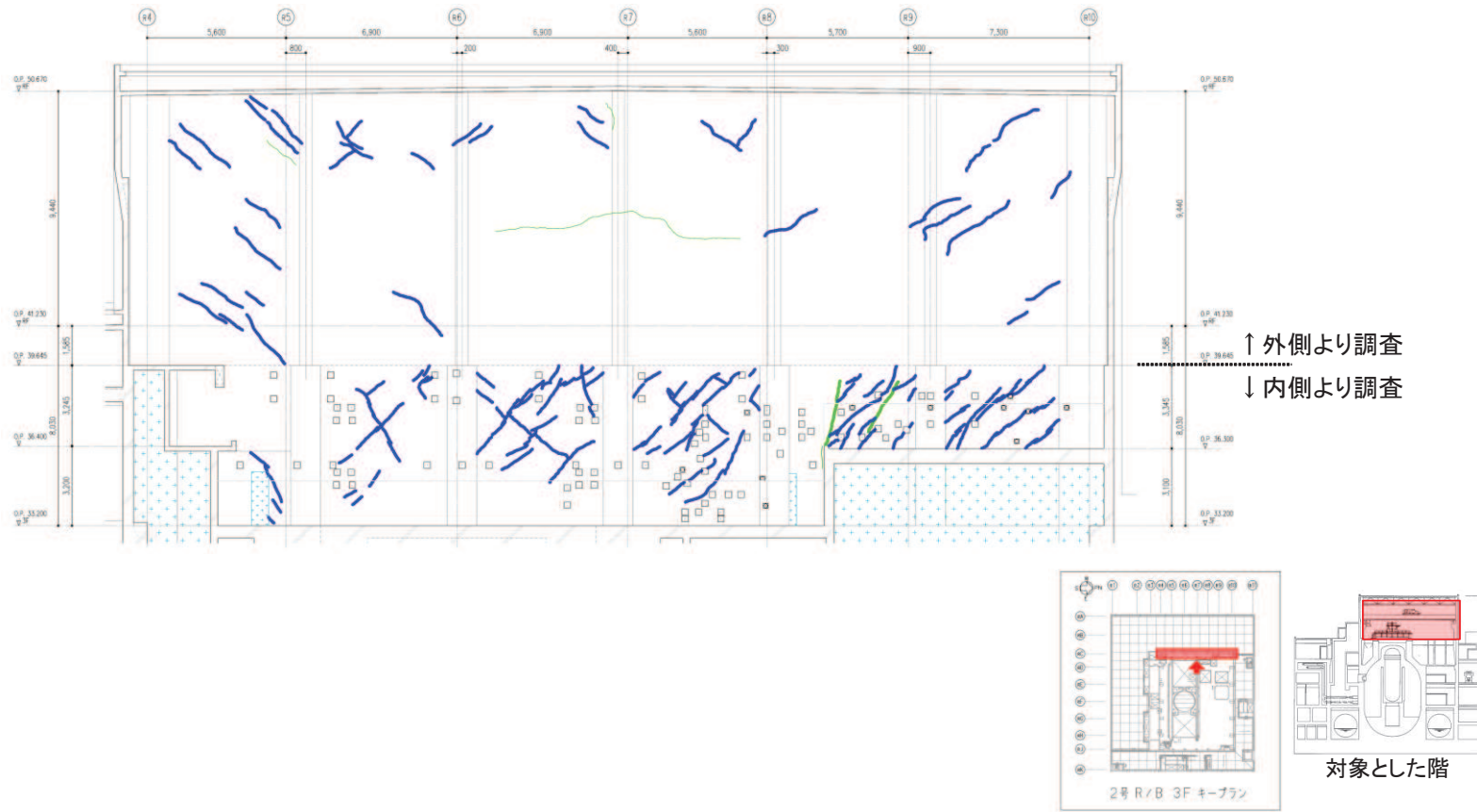
図 49 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (49) 地上 3 階 R4 通り



対象とした階

地震による		地震以外		
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上	はくらく
	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 50 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (50) 地上 3 階 R10 通り



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 51 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (51) 地上 3 階 RC 通り

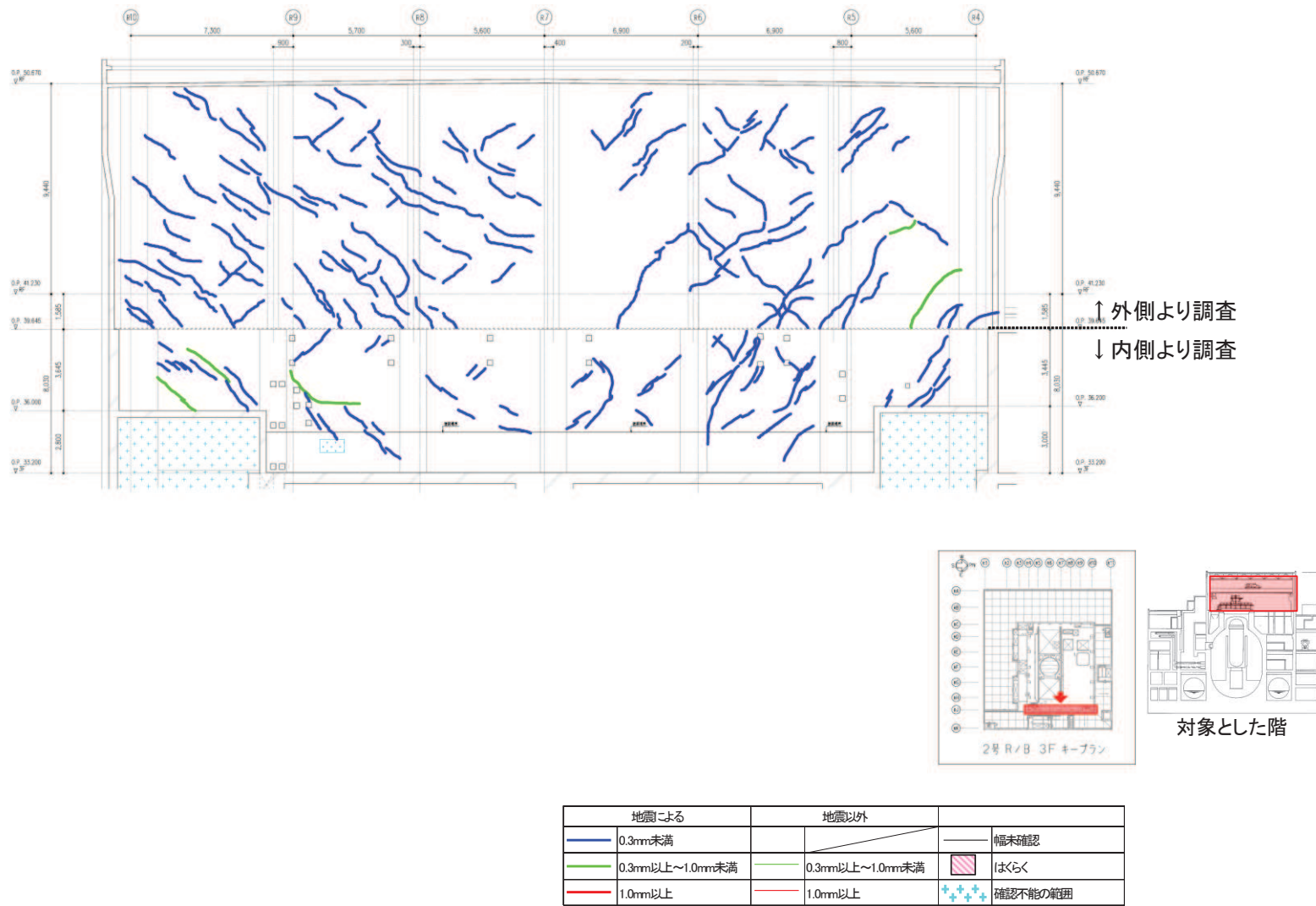
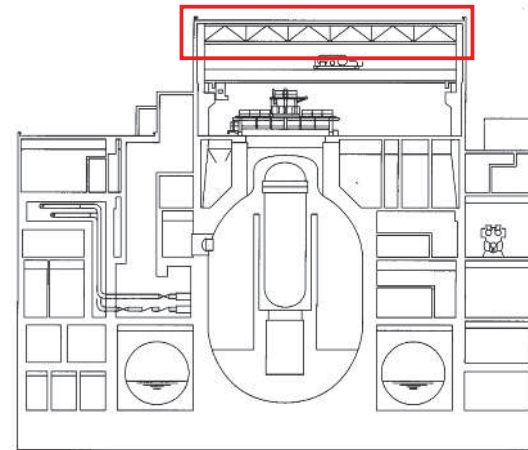
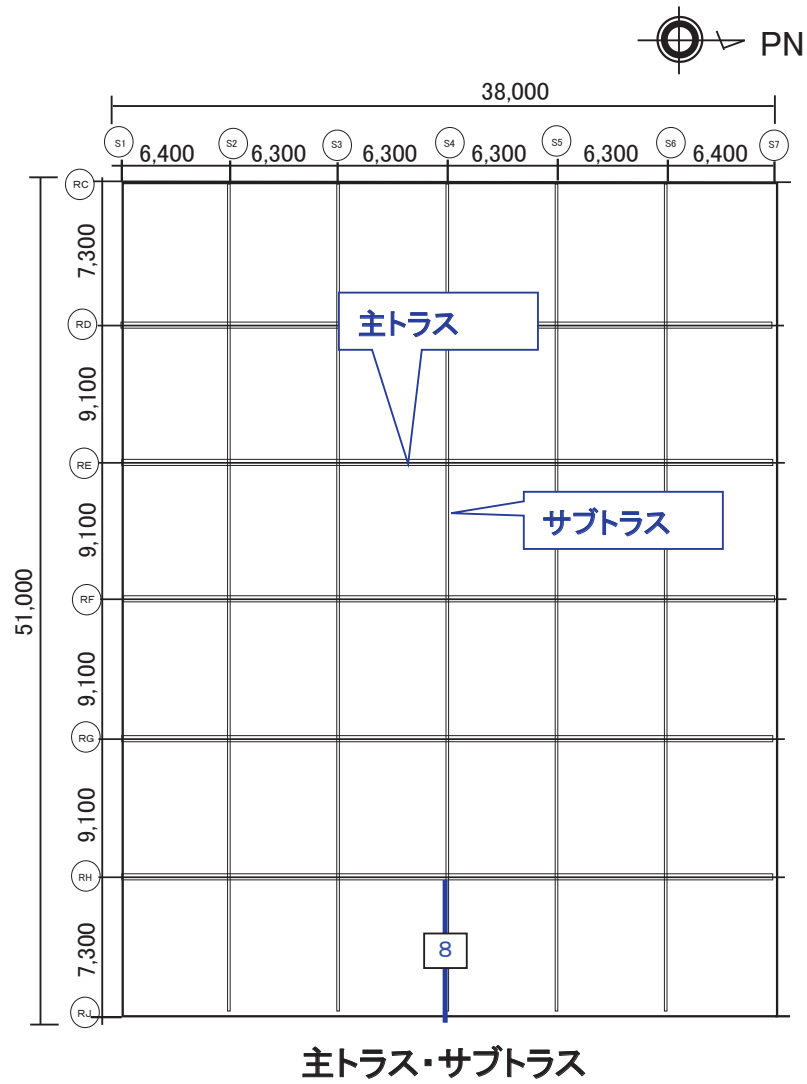


図 52 原子炉建屋のひび割れ分布 耐震壁 (52) 地上 3 階 RJ 通り

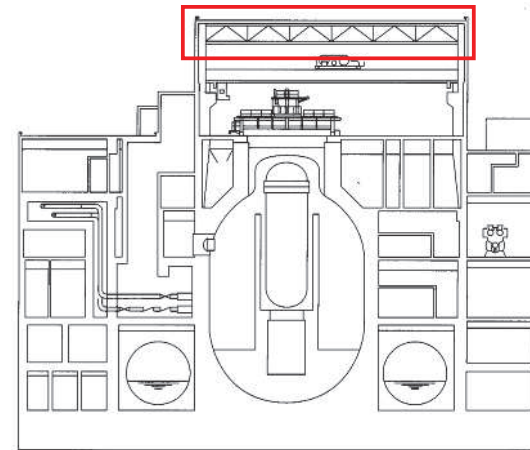
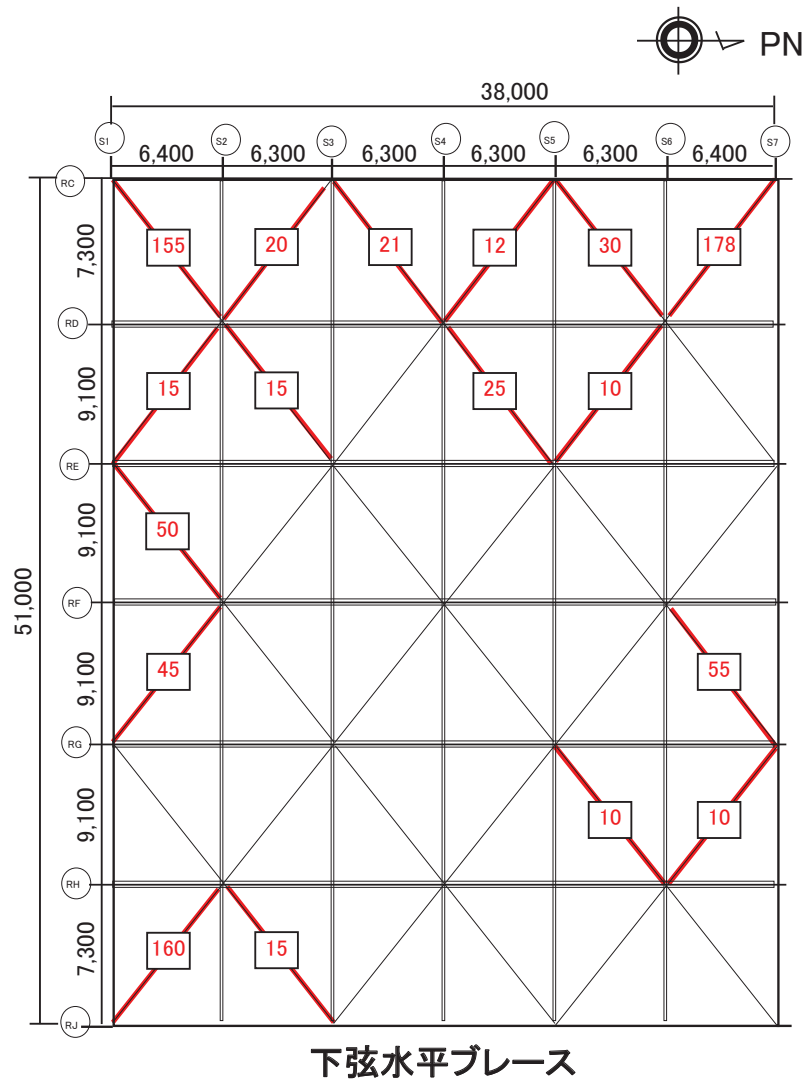
別紙 3-2 原子炉建屋屋根トラスの点検結果



断面図(NS方向)

- : サブトラス変形箇所(ただし、目安とした10mm未満の変形)
- : 部材変形量(mm)

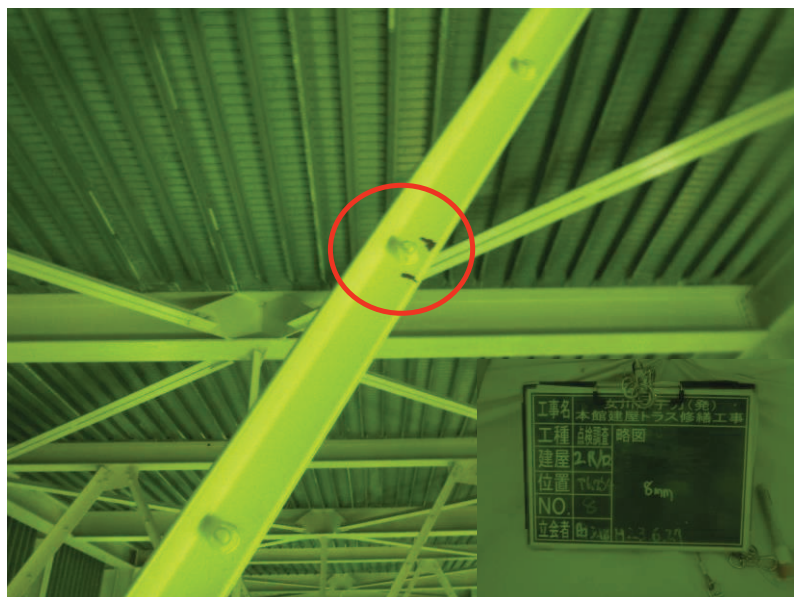
図1 原子炉建屋屋根トラスの点検結果 構造部材の変形量



断面図(NS方向)

- : 下弦水平ブレース変形箇所
- : 部材変形量(mm)

図2 原子炉建屋屋根トラスの点検結果 仮設部材の変形量



サブトラス(構造部材) 斜材 8mm変形



下弦水平ブレース(仮設部材) 160mm変形

図3 原子炉建屋屋根トラスの点検結果の例 変形状況 (写真)

別紙 4 東北地方太平洋沖地震等に対する構造的影響評価
(追加評価に係る点検結果)

目 次

1. 追加評価に係る点検項目.....	別紙 4-1
2. オペフロ上部の柱の点検結果.....	別紙 4-2
3. シェル壁（ベント管開口部周り）の点検結果.....	別紙 4-2
4. 基礎版の点検結果.....	別紙 4-3
5. まとめ.....	別紙 4-5

別紙 4-1 オペフロ上部の柱の点検結果

別紙 4-2 シェル壁（ベント管開口部周り）の点検結果

別紙 4-3 基礎版の点検結果

1. 追加評価に係る点検項目

3.11 地震の影響に関し、建屋の構造的影響評価に関する点検は、耐震壁を対象として実施しているが、原子炉建屋の 3 次元 FEM 等価線形解析の結果も踏まえ、追加評価に係る点検結果をとりまとめた。具体的には、以下の 3 つの点検についてとりまとめた。

① オペフロ上部の柱

フレーム部材は基本的には耐震壁の変形に追従する部材として設計しており、地震力を負担していない。また、3 次元 FEM 等価線形解析結果でもオペフロ下部では特に大きなひずみは得られていない。

そこで、代表的に、変形の大きいオペフロ上部の柱について点検結果をとりまとめた。追加点検の判断の目安は表 1-1 に示すとおりである。

② シェル壁（ベント管開口部周り）

耐震壁の点検は、ひび割れの分布の特徴等も踏まえ耐震壁の下部を中心に実施しているが、耐震壁の上部に位置するベント管開口部周りでは 3 次元 FEM 等価線形解析結果がひび割れ発生の目安値相当となっていることから、念のため点検を行った。

③ 基礎版

基礎版の設計では上部構造物からの地震荷重を考慮した設計としている。3 次元 FEM 等価線形解析結果では、健全と確認されたが、念のため点検を行った。

表 1-1 点検・評価計画書（建物・構築物編）の「判定基準例一覧」

点検対象	判定基準
生体遮へい装置	・遮へい性能に影響を与える断面欠損がないこと
原子炉格納施設	・構造上問題となるひび割れがないこと （幅1.0mm以上のひび割れがないこと※1） ・構造上問題となる剥離・剥落がないこと

※1 EPRI NP-6695 Guidelines for Nuclear Plant Response to an Earthquake における以下の記載等を参考に設定。

- ① 幅 0.06 インチ（約 1.5mm）を超えて新しく地震によって生じたひび割れ、コンクリートの剥離、目視で確認できるフレームの変形を重大な損傷とする。（0.06 インチ以上のコンクリートひび割れは鉄筋の降伏を示している）
- ② コンクリート構造物のわずかなヘアークラックのような微細なひび割れは重要な被害ではない。

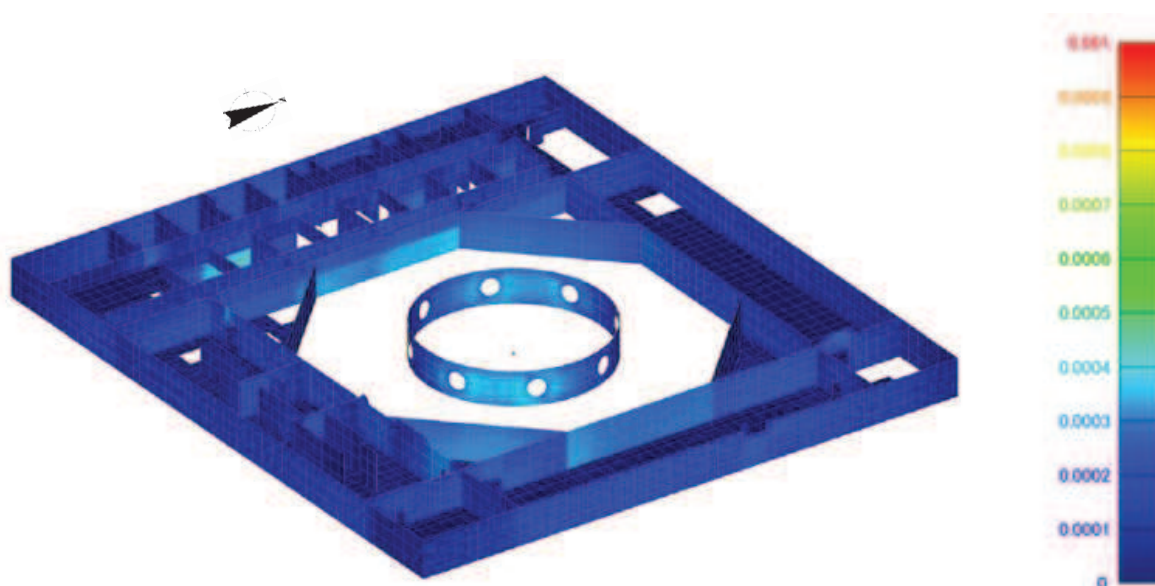
2. オペフロ上部の柱の点検結果

地震により発生したひび割れは確認されなかった。

ひび割れ調査結果を別紙 4-1 に示す。

3. シェル壁（ベント管開口部周り）の点検結果

耐震壁の点検は、ひび割れの分布の特徴等も踏まえ耐震壁の下部を中心に実施しているが、耐震壁の上部に位置するベント管開口部周りでは以下に示す 3 次元 FEM モデルによるせん断ひずみがひび割れ発生の目安値相当となっていることから、念のため点検を行った。3 次元 FEM モデルによる解析結果を図 3-1 に、点検結果を別紙 4-2 に示す。



南東面

原子炉建屋 地下 2 階 (O.P. -800)

図 3-1 建屋全体 3 次元 FEM モデルによるせん断ひずみ分布

4. 基礎版の点検結果

建屋全体の 3 次元 FEM 等価線形解析結果について、面内せん断ひずみを図 4-1 に、面外せん断応力度を図 4-2 に示す。耐震壁付近で若干大きい値を示すが、全体的にひび割れが入る目安値以下となっている。解析的検討から基礎版の健全性については問題無いと判断したが、念のため点検を行った。点検結果を別紙 4-3 に示す。点検結果から次のことが分かる。

- ① 幅 0.3mm 以上のひび割れには分布に偏りがある。ひび割れが認められない箇所は、3.11 地震前に補修を実施した箇所である。
- ② ひび割れ分布は 3 次元 FEM 等価線形解析結果の傾向とも整合していない。

以上のことから、基礎版に認められるひび割れは乾燥収縮等によるひび割れであり、地震によるひび割れではないと判断した。

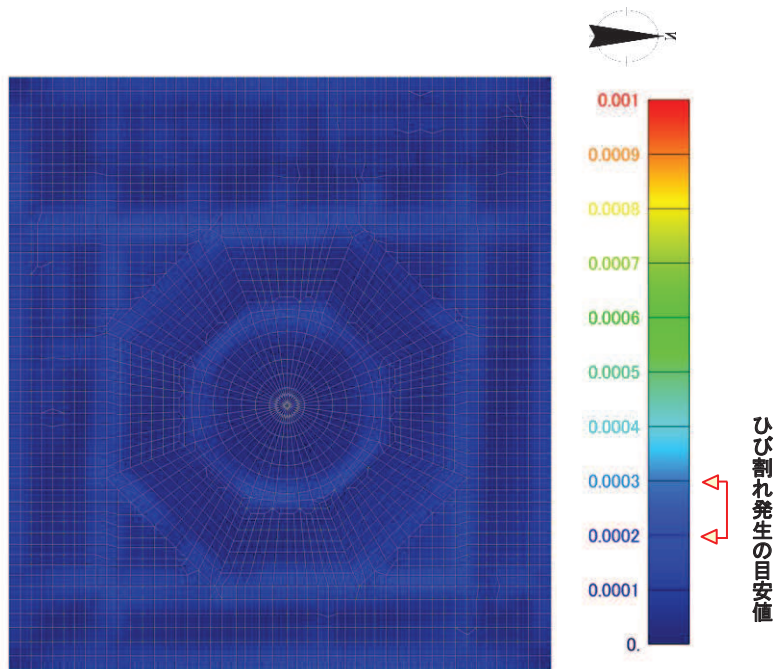


図 4-1 面内せん断ひずみコンター図 地下 3 階
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

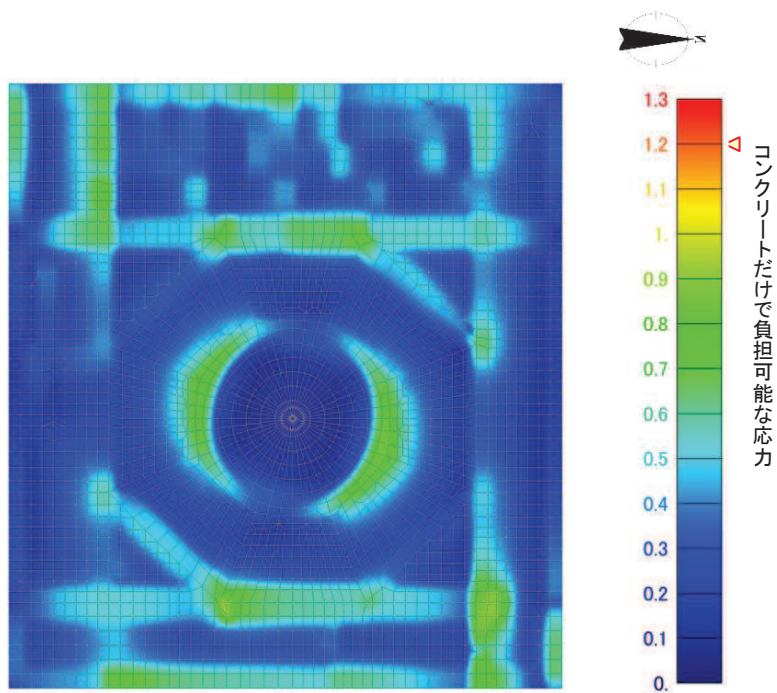


図 4-2 面外せん断応力度コンター図 地下 3 階
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

5. まとめ

3.11 地震による建屋の構造的影響評価に関する点検は耐震壁を対象として実施しているが、原子炉建屋の3次元FEM等価線形解析の結果も踏まえ、追加評価に係る点検結果をとりまとめた。

具体的には、オペフロ上部の柱、シェル壁（ベント管開口部周り）、基礎版のひび割れ点検を行った結果、地震によって発生したと思われるひび割れは認められなかった。

別紙 4-1 オペフロ上部の柱の点検結果

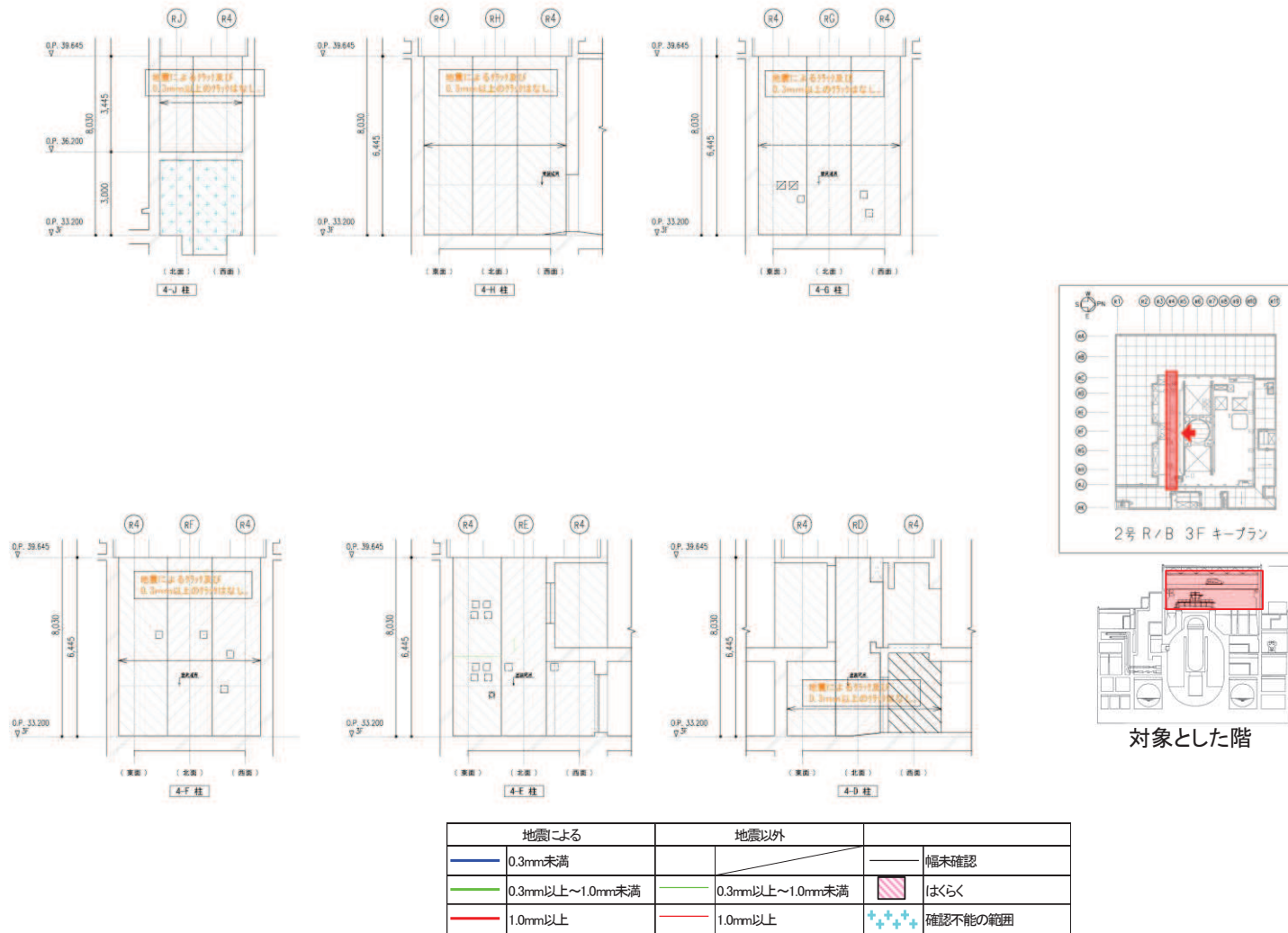
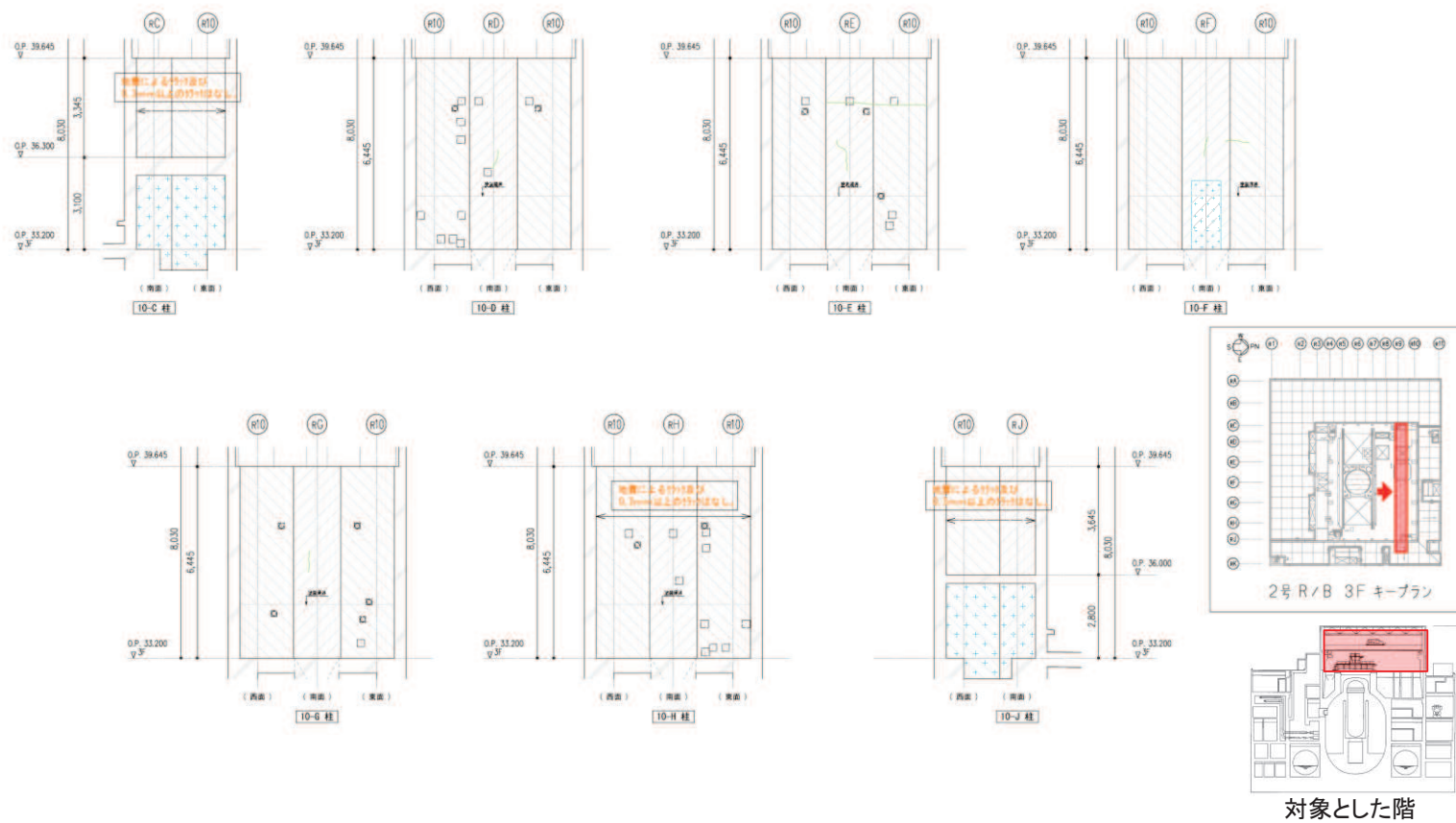


図1 オペフロ上部の柱の点検結果（地上3階）（1）



地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	はくらく	
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 2 オペフロ上部の柱の点検結果（地上 3 階）（2）

別紙 4-2 シェル壁（ベント管開口部周り）の点検結果

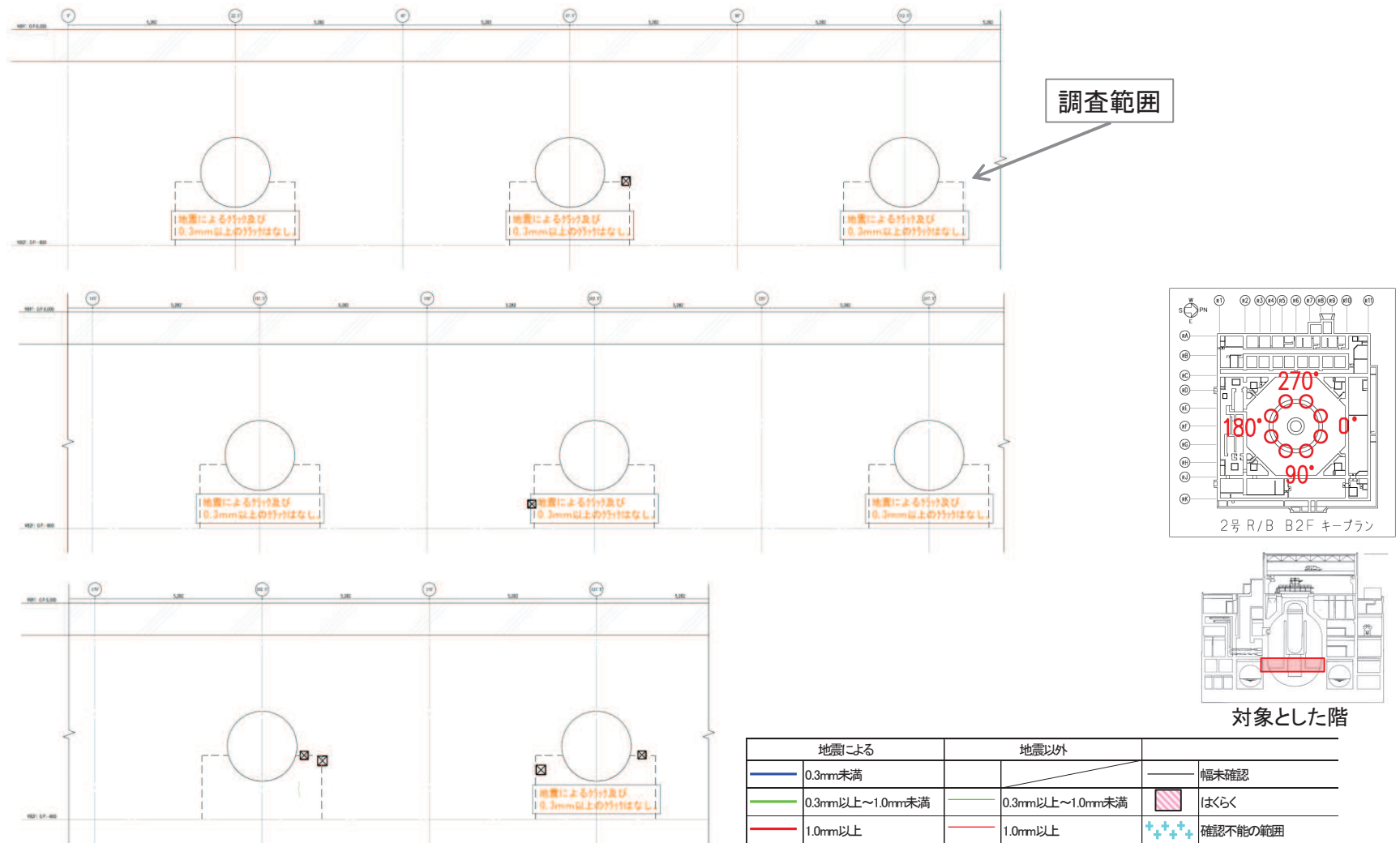


図1 シェル壁（ベント管開口部周り）の点検結果

別紙 4-3 基礎版の点検結果

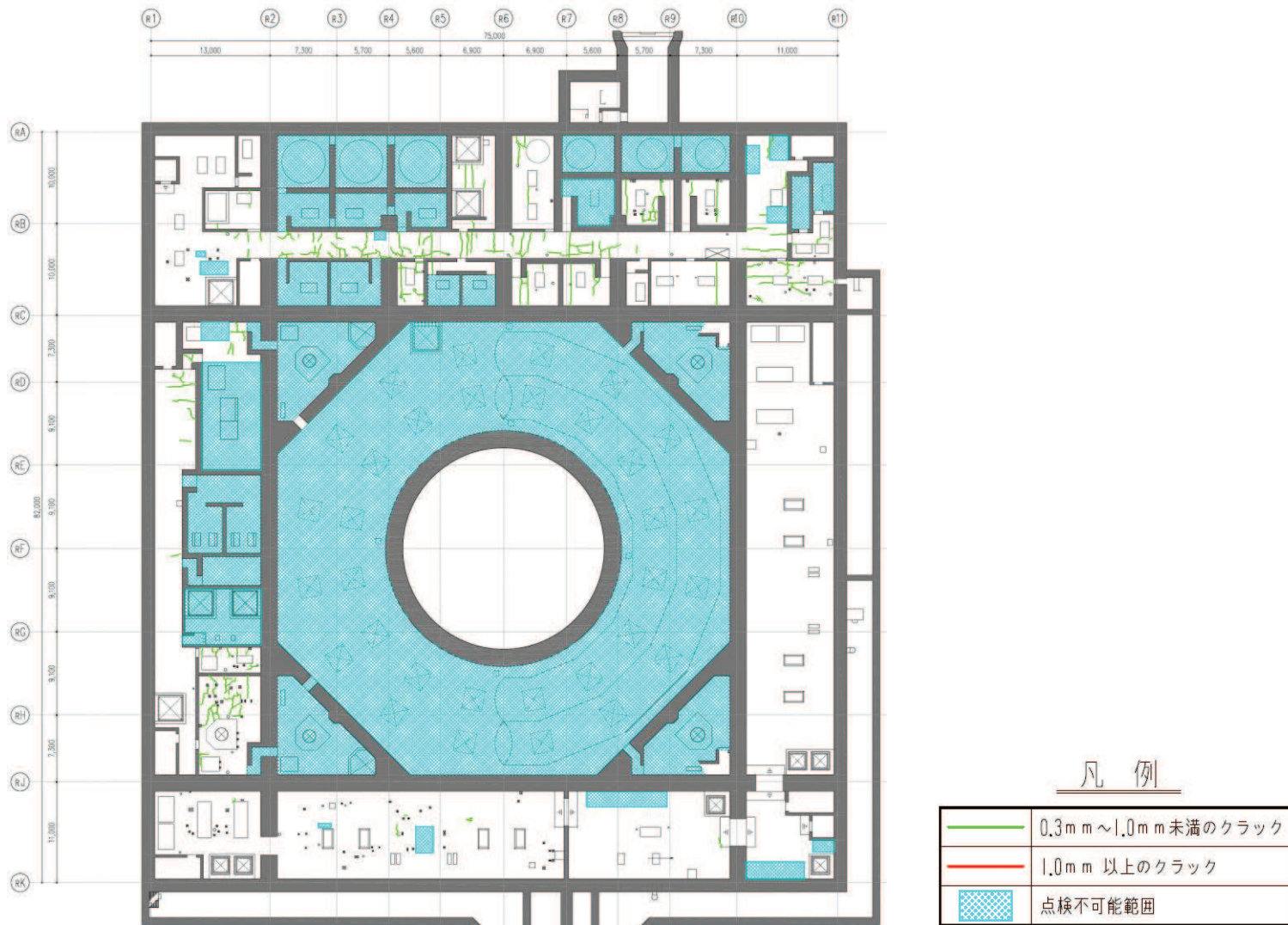


図1 基礎版の点検結果

別紙 5 3次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析
(原子炉建屋)

目 次

1. 検討の目的.....	1
2. 3次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析	2
2.1 解析モデルの概要.....	2
2.1.1 建屋モデル.....	2
2.1.2 入力地震動の算定.....	10
2.2 地震応答解析結果.....	12
2.2.1 最大加速度分布の比較.....	12
2.2.2 観測記録の床応答スペクトルとの比較.....	15
2.2.3 シミュレーション解析結果に対する考察.....	20
2.2.4 面内せん断ひずみ分布と点検結果との比較.....	25
2.2.5 地震による建屋の構造的影響評価.....	45
3. 評価結果のまとめ.....	46

1. 検討の目的

3.11 地震及び 4.7 地震の 2 つの地震について、原子炉建屋の 3 次元 FEM 等価線形モデルにより建屋内に設置された地震計の観測記録を用いてシミュレーション解析を行う。

本検討は、3 次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析結果から、3.11 地震時及び 4.7 地震時に建屋各部に発生する面内せん断ひずみを算定し、耐震壁の点検結果との整合性確認を行った上で、3.11 地震及び 4.7 地震時の建屋の構造的影響評価を行うことを目的とする。

2. 3次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析

2.1 解析モデルの概要

2.1.1 建屋モデル

原子炉建屋 3次元 FEM モデルによる地震応答解析は、基礎版上における水平方向の地震観測記録を用いた周波数応答解析（線形解析）とする。建屋モデルは等価線形モデルとする。

解析モデルへの入力地震動は、原子炉建屋の基礎版上での観測記録を解析モデルの基礎版上に入力する。

解析結果と観測記録の整合性は、最大応答加速度及び加速度応答スペクトルについて観測記録との比較によって確認する。

建屋モデルの概要を以下に示す。水平方向解析モデルの諸元の設定について表 2-1 に示す。

①モデル化範囲

質点系モデルで考慮した耐震壁，主要な補助壁，床スラブ（基準階のみ），基礎スラブ，柱，梁及び屋根トラス

②地盤ばね

水平方向地震応答解析モデルでは，アドミッタンス理論により算定される基礎底面水平地盤ばね及び回転地盤ばね（J E A Gによる近似法）を基礎版底面の節点に取りつく離散化ばねとしてモデル化する。なお，側面地盤ばねは考慮しないものとする。

③質量

壁と床はシェル要素でモデル化し，厚さに応じたコンクリート重量を与える。基準階ごとに，上下の階高の1/2の範囲を支配高さとして重量を算定し，質点系モデルの重量から不足する重量（機器荷重や配管荷重等に相当）は，床面に等分布荷重として与えて，質点系モデルの重量と等しくなるようにする。

④鉄筋コンクリート剛性

設計剛性を基本とし，壁については建屋各部の地震観測シミュレーションにより，オペフロ上部とオペフロ下部で最適な剛性を設定する。また，質点系シミュレーションモデルの剛性も参考にして，NS方向の壁とEW方向の壁は独立に剛性を設定する。なお，シェル壁と火打ち壁については方向性がないため，NS方向とEW方向の壁の剛性の平均値とする。床スラブは設計剛性とする。

⑤減衰

RC部分は7%の一定減衰とする。

各階のモデル化範囲および解析モデル図を図2-1に示す。また，解析モデルに用

いる物性値を表2-2 に示す。図2-2及び図2-3に解析モデルのNS方向及びEW方向の1次固有モードを示す。1次固有モードは刺激関数が最大となるモードとして選定した。

表2-1 解析モデル諸元の設定（水平方向）

項 目		シミュレーション解析 (当該地震による評価)
応答計算法		周波数応答解析(線形解析)
入力地震動		原子炉建屋の基礎版上での観測記録を解析モデルの基礎版上に入力
剛性 評価	考慮範囲	耐震壁，主要な補助壁，床スラブ，基礎スラブ，柱，梁，屋根トラス
	ヤング係数(E) せん断弾性係数 (G)	壁要素のみ観測記録との適合性を踏まえ再設定 床要素，柱，梁は設計剛性
	剛性・復元力特性 の設定の考え方	観測記録と整合する等価な剛性のモデル化は，壁のヤング係数・せん断弾性係数をNS，EW方向別に再設定することにより行う。特にオペフロ上部はオペフロ下部と分けて設定。
減衰 定数	鉄筋コンクリート	観測記録との適合性も踏まえ7%に再設定 (一定減衰)
	減衰定数設定の 考え方	埋込み効果分も含め，観測記録のみかけの減衰に対して，解析では全て鉄筋コンクリート部の減衰に代表させた。なお，水平2方向は同じ値を採用。
解析 モデル	建屋-地盤相互作用	離散化ばね（水平2方向，鉛直）を基礎版底面の全節点に支配面積比で分配する。 (側面地盤との相互作用は考慮しない)
	建屋モデル	3次元FEMモデル（壁，床はシェル要素，柱，梁はビーム要素，基礎スラブはソリッド要素） (剛域などの拘束条件は設定していない)
	地盤ばね	J E A Gによる近似法により評価したばねを離散化ばねとする

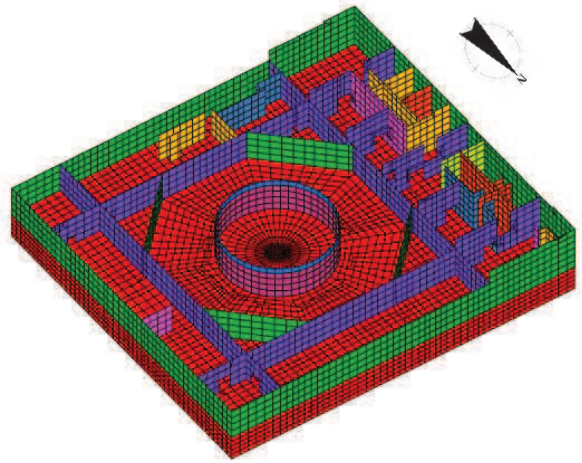
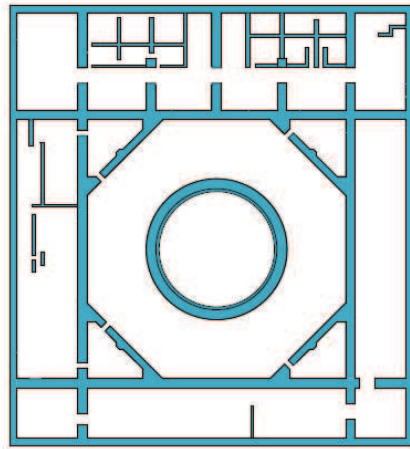


図 2-1(1) モデル化範囲及び 3 次元 FEM モデル図 (O.P. -8.1m)

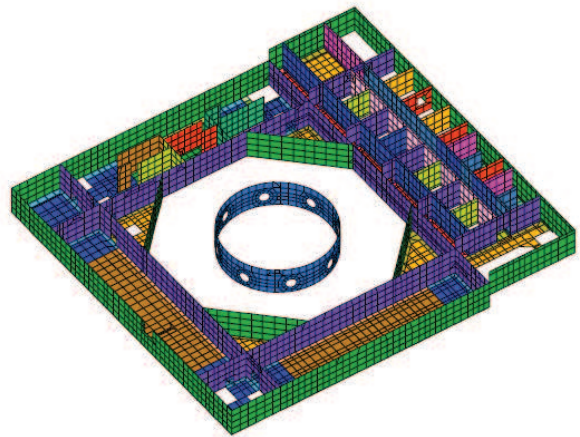
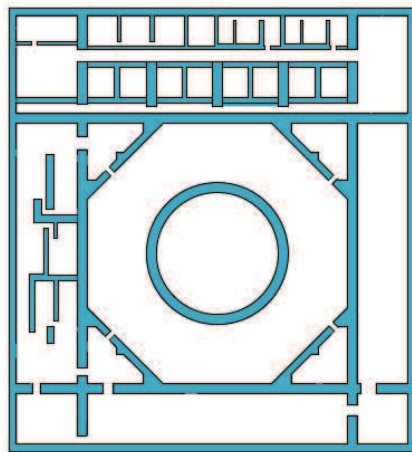


図 2-1(2) モデル化範囲及び 3 次元 FEM モデル図 (O.P. -0.8m)

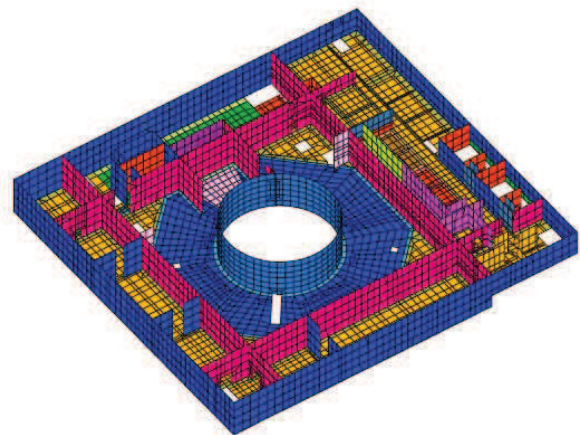
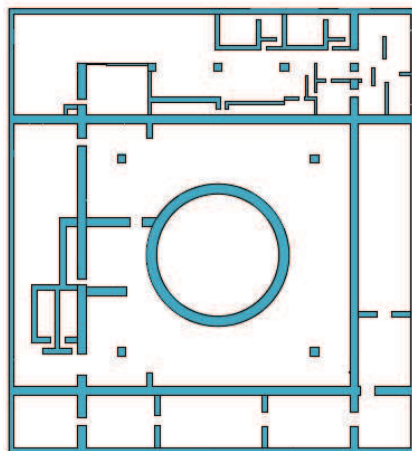


図 2-1(3) モデル化範囲及び 3 次元 FEM モデル図 (O.P. 6.0m)

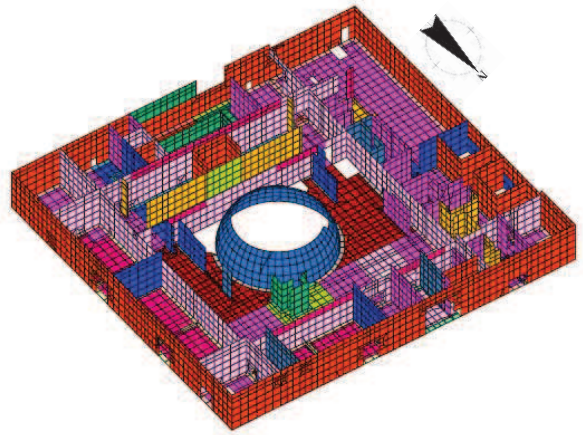
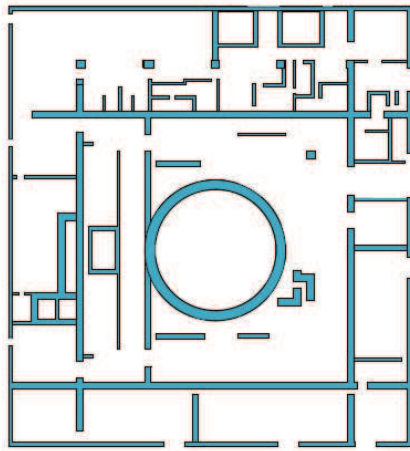


図 2-1(4) モデル化範囲及び 3 次元 FEM モデル図 (0. P. 15. 0m)

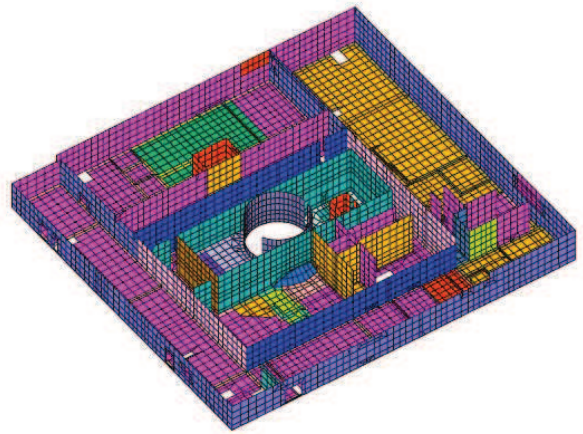
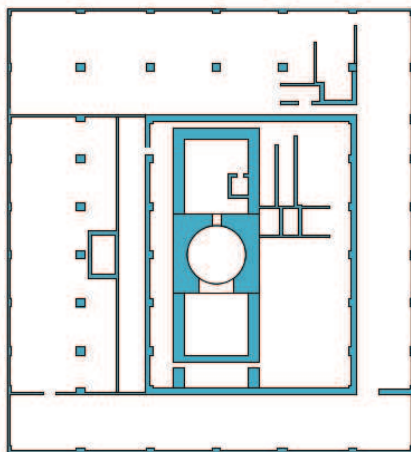


図 2-1(5) モデル化範囲及び 3 次元 FEM モデル図 (0. P. 22. 5m)

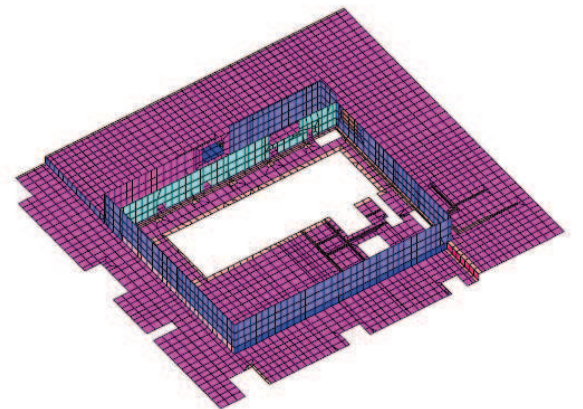
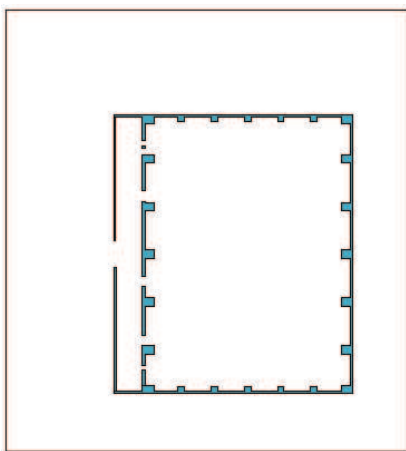


図 2-1(6) モデル化範囲及び 3 次元 FEM モデル図 (0. P. 33. 2m)

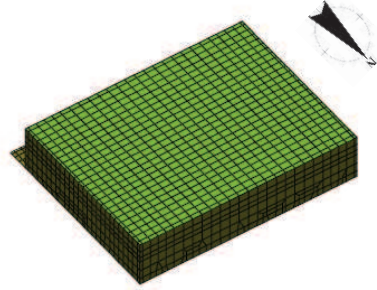
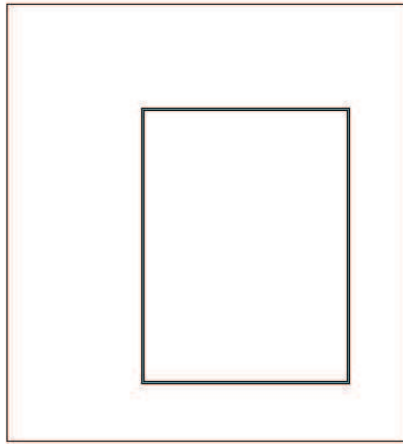


図 2-1(7) モデル化範囲及び 3 次元 FEM モデル図 (0. P. 41. 2m)

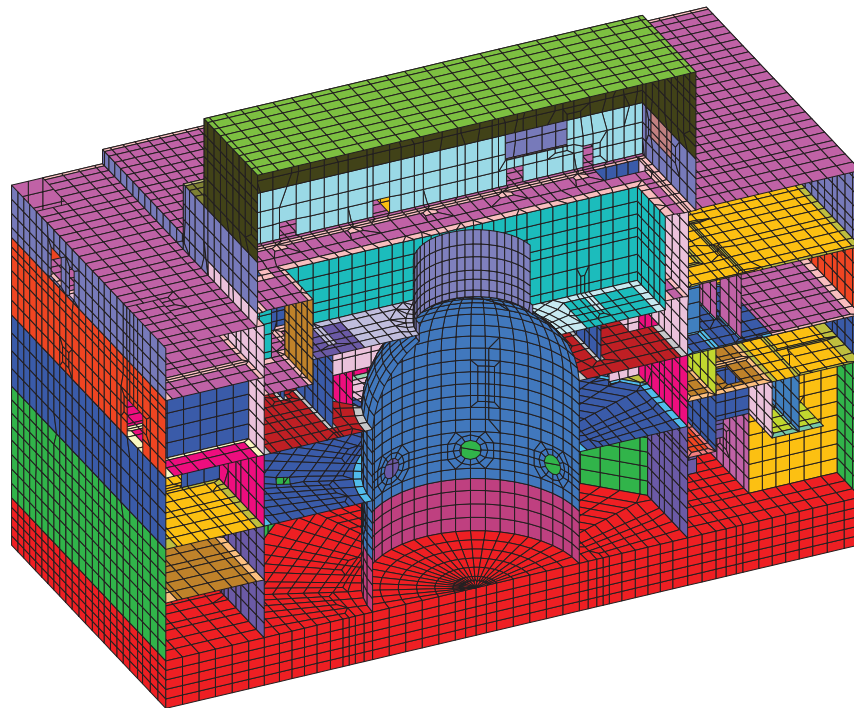
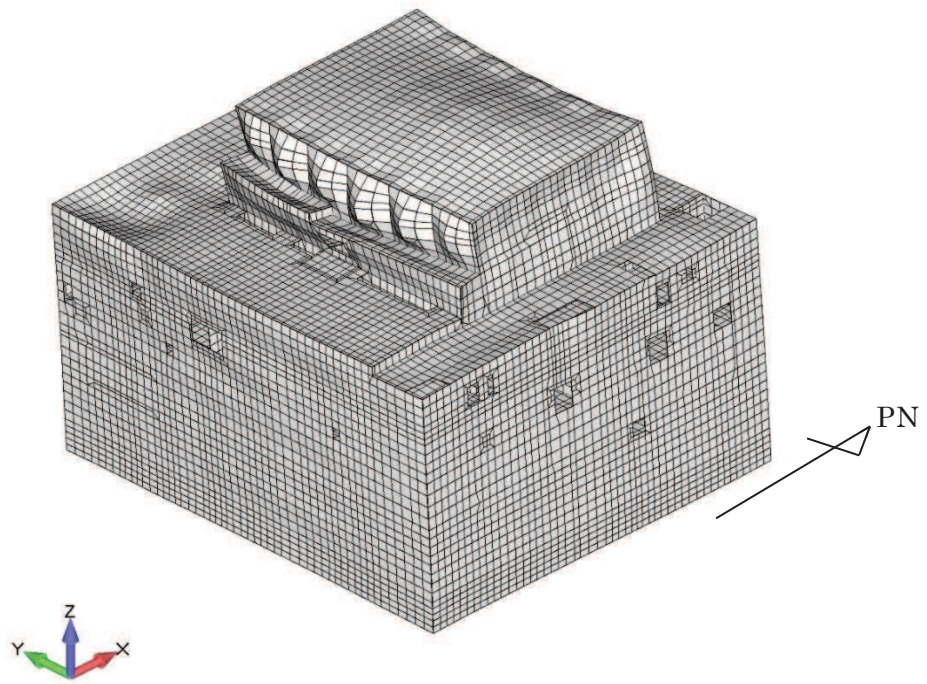


図2-1(8) 3次元FEMモデル断面図

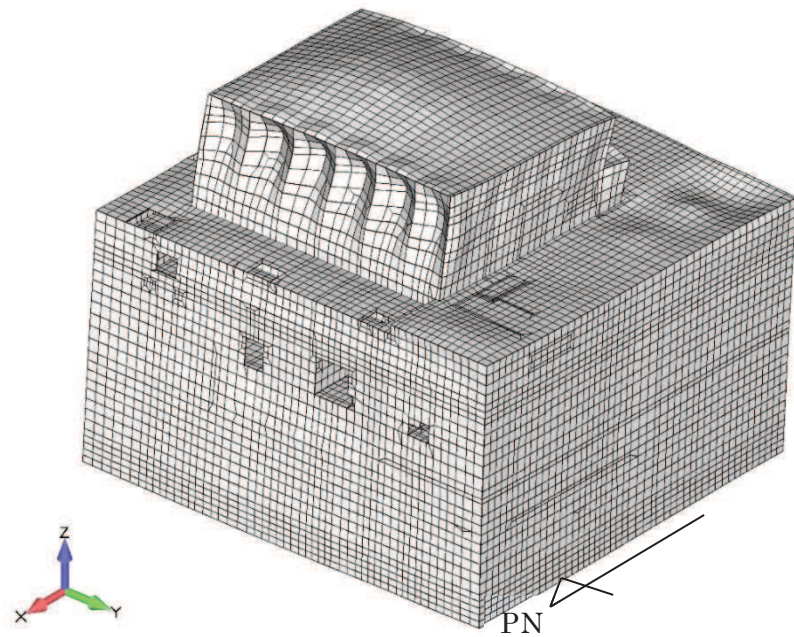
表2-2 解析モデルに用いる物性値（水平方向）

材 料		方 向	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
コン ク リ ー ト	オペフロ上部	NS	7.94×10^3	3.41×10^3	7
		EW	13.24×10^3	5.69×10^3	7
	オペフロ下部	NS	19.86×10^3	8.53×10^3	7
		EW	21.18×10^3	9.10×10^3	7
鉄 骨			20.59×10^4	7.94×10^4	2

注記：設計値 ヤング係数 2.65×10^4 N/mm²
せん断弾性係数 1.14×10^4 N/mm²

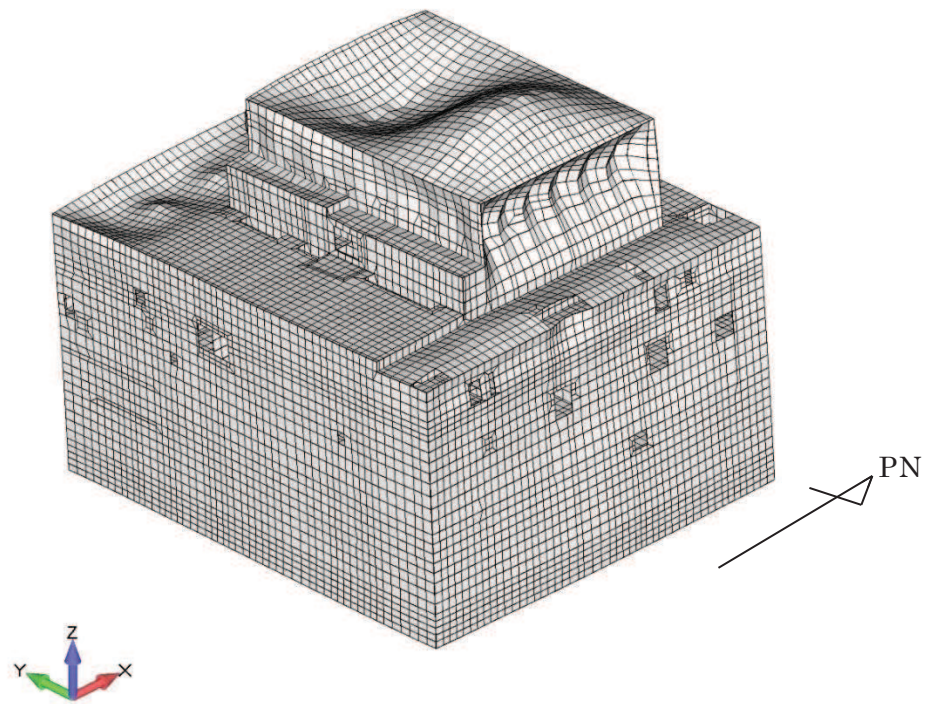


(南東)

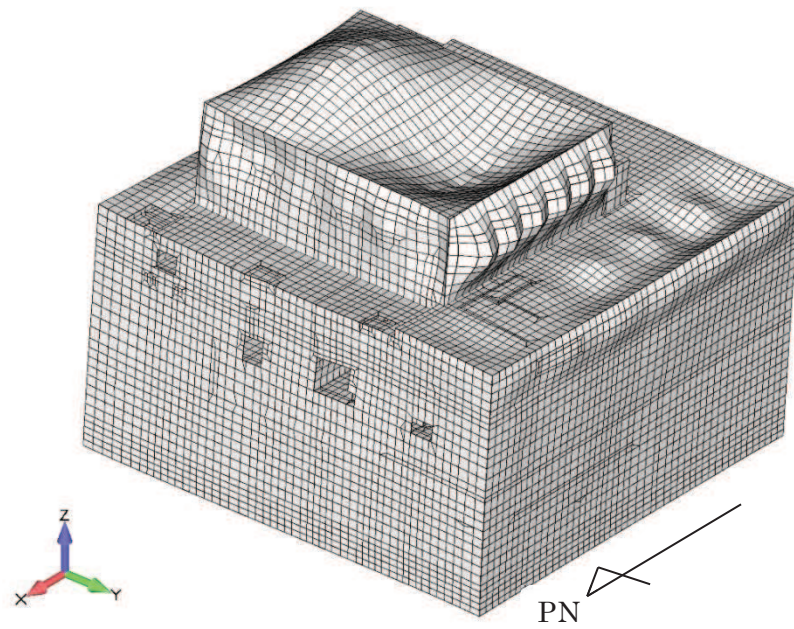


(北西)

図2-2 3次元FEMモデルNS方向1次（全体2次）固有モード図
（周期0.245秒）



(南東)



(北西)

図 2-3 3次元 FEM モデル EW 方向 1 次 (全体 3 次) 固有モード図
(周期 0.233 秒)

2.1.2 入力地震動の算定

解析モデルへの入力地震動は，原子炉建屋の基礎版上での観測記録を線形解析モデルの基礎版上に入力し，建屋各部の応答を算定する。基礎版上の観測記録の選定にあたっては，3 方向成分を観測していること，また，各階の地震計位置と整合しておりシミュレーション解析に適していることから，2RB-6 の地震計の観測記録を用いた。入力地震動の概念を図 2-4 に示す。また，原子炉建屋における地震計配置図（断面図及び平面図）を図 2-5 に示す。

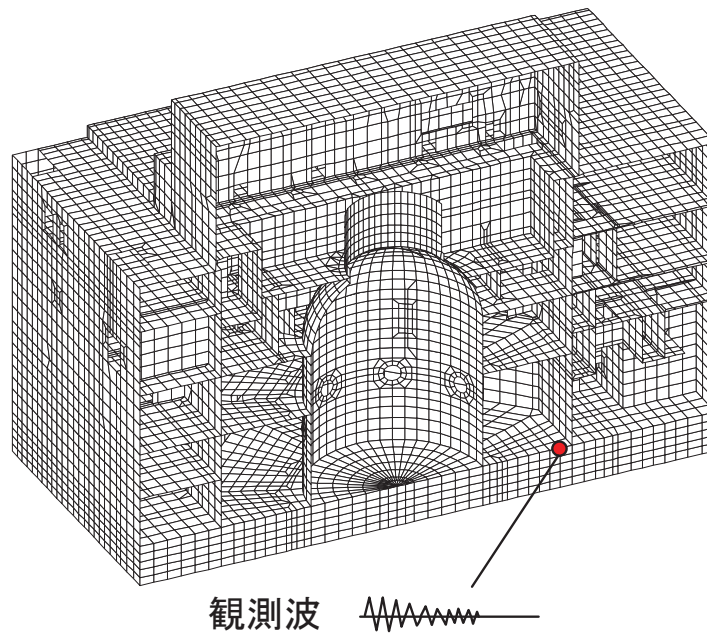


図 2-4 入力地震動（基礎上の節点（2RB-6）に観測波を入力）

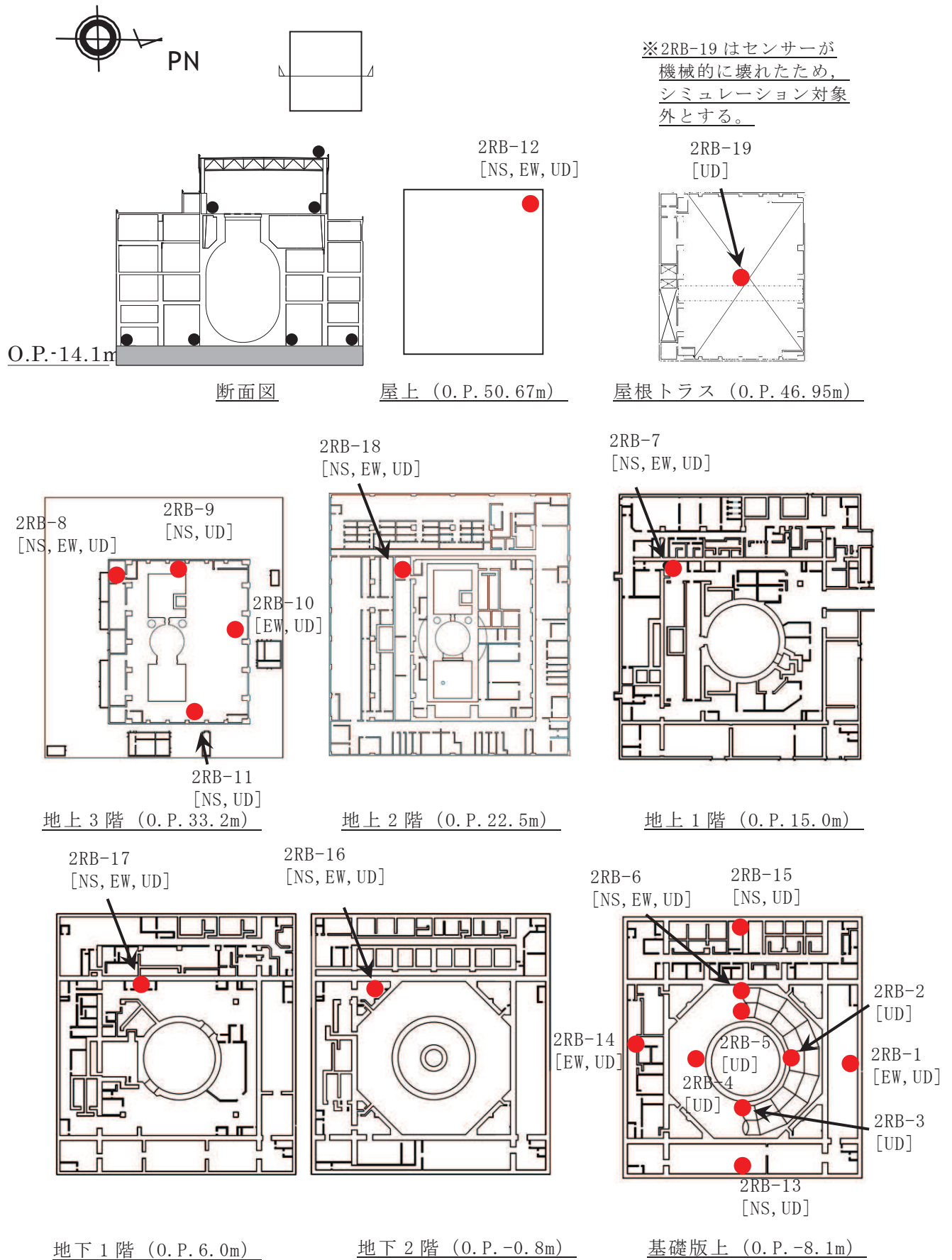


図 2-5 原子炉建屋 地震計配置図

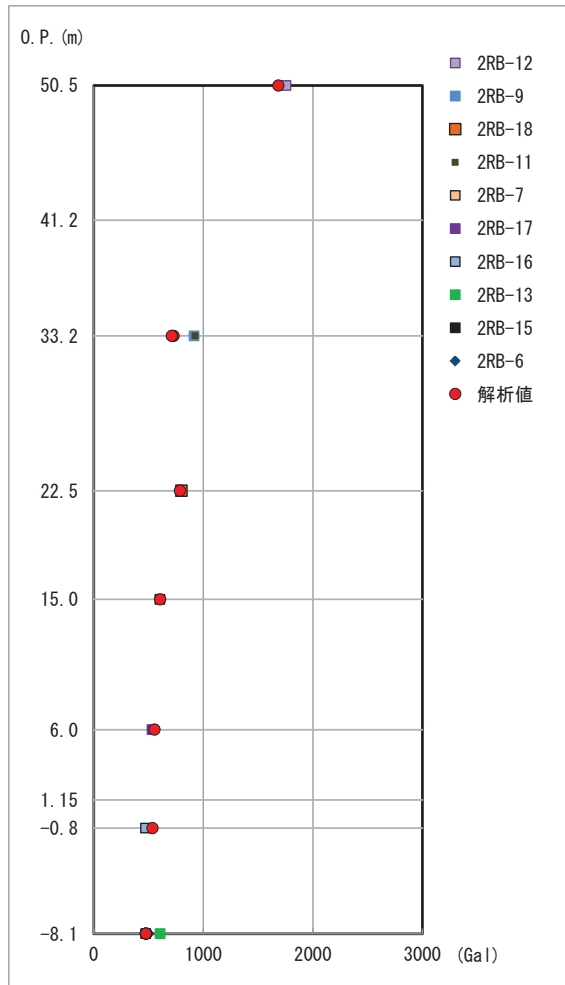
2.2 地震応答解析結果

作成した3次元FEMモデルの妥当性を確認するため、地震観測記録のシミュレーション解析を行う。

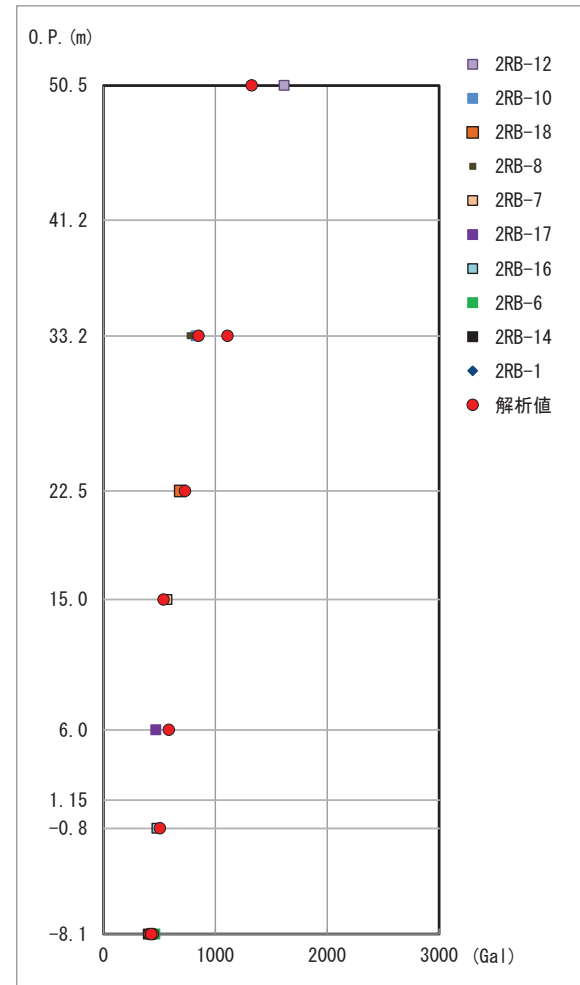
2.2.1 最大加速度分布の比較

3.11地震及び4.7地震の3次元FEMモデルにより算定した応答波形の最大加速度分布を観測記録と比較して図2-6～図2-7に示す。比較にあたっては、図2-5に示す地震計位置で得られた観測記録の最大加速度と、地震計位置に相当する解析モデルの節点における解析結果とを比較して示している。

3次元FEMモデルにより算定した応答波形の最大加速度は、4.7地震の屋上で観測記録より小さくなっているものの、オペフロ下部では観測記録と概ね整合している。

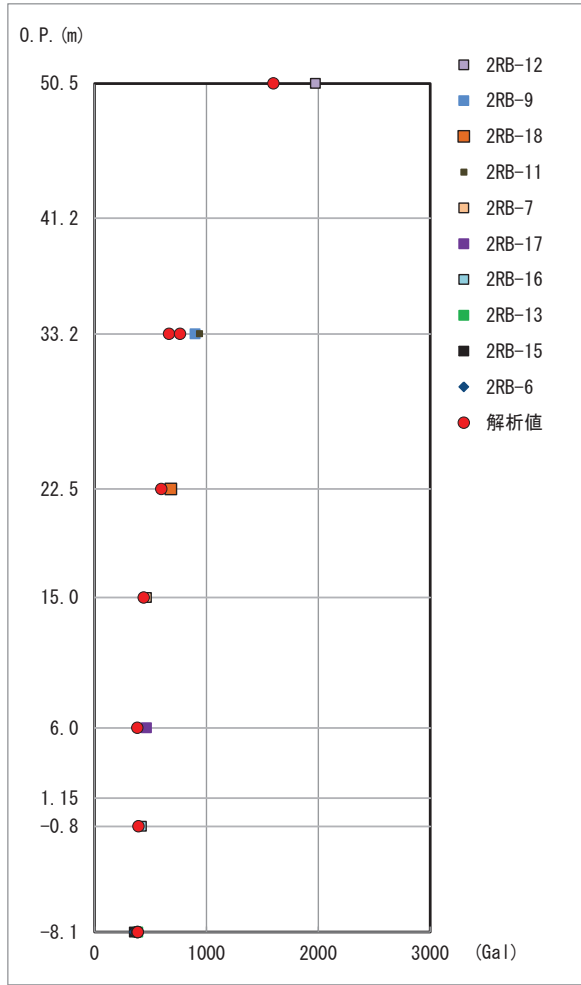


NS方向

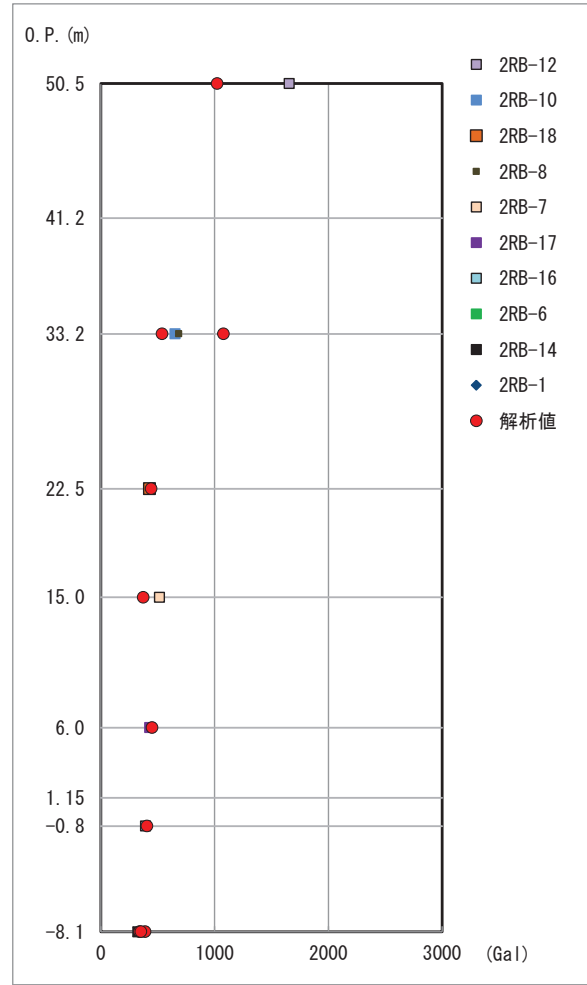


EW方向

図2-6 3次元FEMモデルと観測記録の最大加速度分布 (3.11地震)



NS方向



EW方向

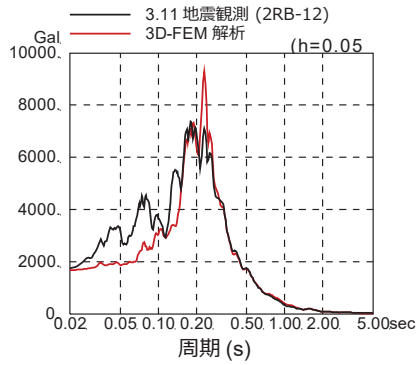
図2-7 3次元FEMモデルと観測記録の最大加速度分布 (4.7地震)

2.2.2 観測記録の床応答スペクトルとの比較

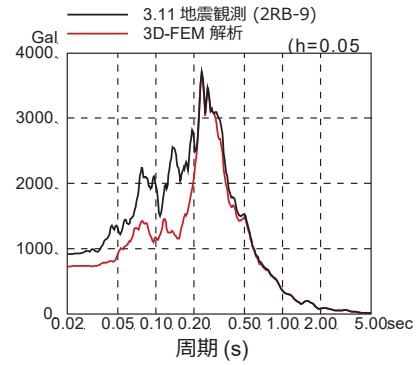
3次元FEMモデルのシミュレーション解析による床応答スペクトルと3.11地震及び4.7地震の観測記録の床応答スペクトルを比較して図2-8～図2-11に示す。比較にあたっては、図2-5に示す地震計位置で得られた観測記録の床応答スペクトルと、地震計位置に相当する解析モデルの節点における解析結果とを比較して示している。

3次元FEMモデルのシミュレーション解析による床応答スペクトルは、3.11地震のNS方向については屋上と地上3階と地上2階で高次成分のピーク位置に差が見られるものの、地上1階以下では高次のピークまで概ね観測記録と対応している。3.11地震のEW方向では、屋上と地上3階の1箇所の高次成分のピークに差が見られるが、それ以外の観測点については概ね対応している。

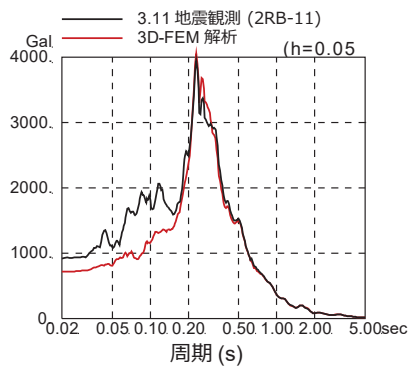
4.7地震のNS方向については、3.11地震に比べると高次成分の差が大きいが、EW方向については3.11と同様に屋上と地上3階の1箇所の高次成分のピークに差が見られるが、それ以外の観測点については概ね対応している。



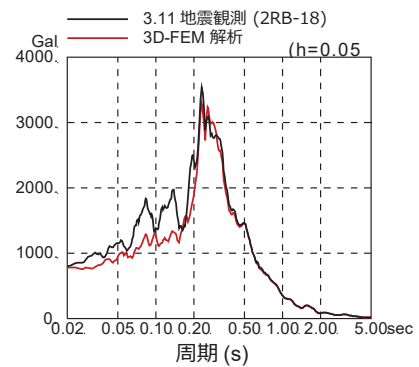
屋上 (O.P. 50.5m)



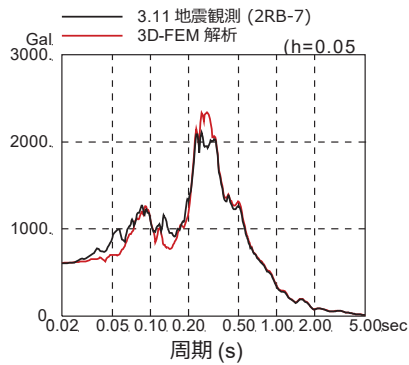
地上3階 (O.P. 33.2m)



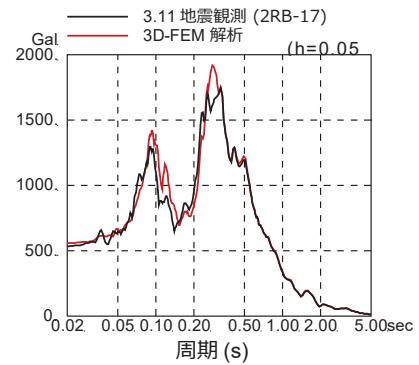
地上3階 (O.P. 33.2m)



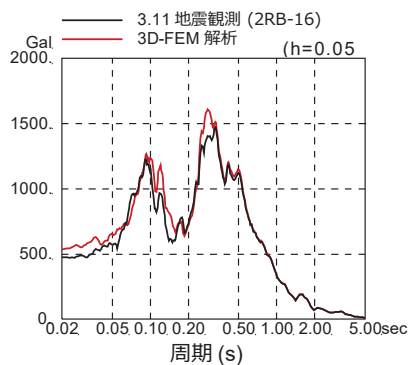
地上2階 (O.P. 22.5m)



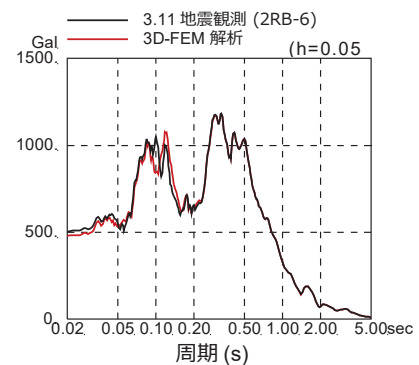
地上1階 (O.P. 15.0m)



地下1階 (O.P. 6.0m)

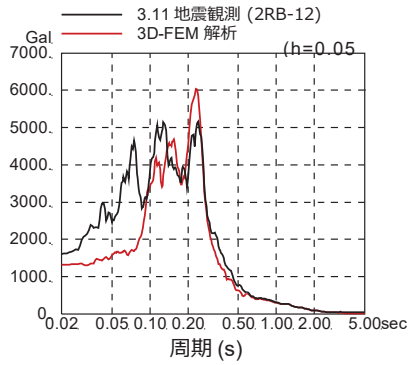


地下2階 (O.P. -0.8m)

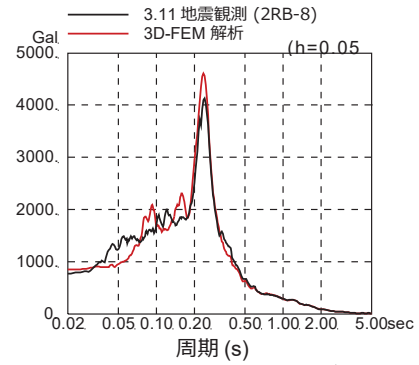


基礎版上 (O.P. -8.1m)

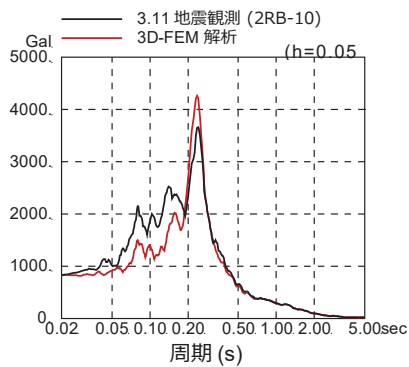
図2-8 3次元FEMモデルと3.11地震の床応答スペクトルの比較 (NS方向)



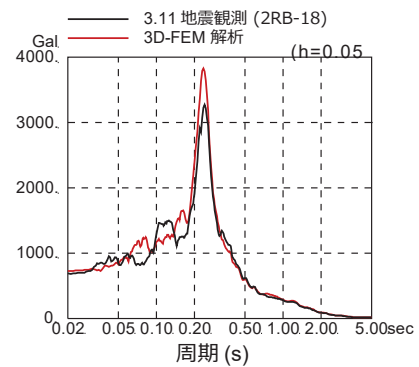
屋上 (O. P. 50.5m)



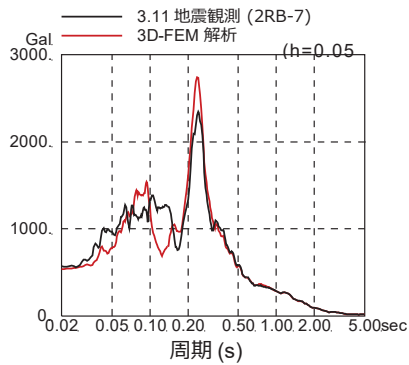
地上3階 (O. P. 33.2m)



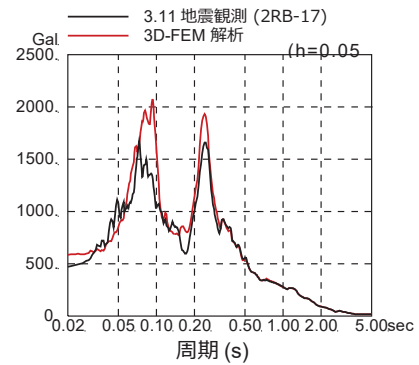
地上3階 (O. P. 33.2m)



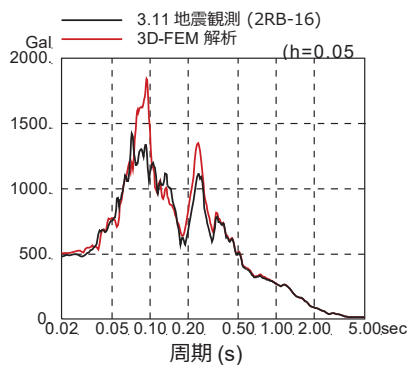
地上2階 (O. P. 22.5m)



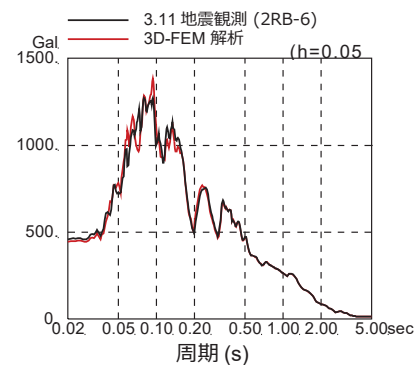
地上1階 (O. P. 15.0m)



地下1階 (O. P. 6.0m)

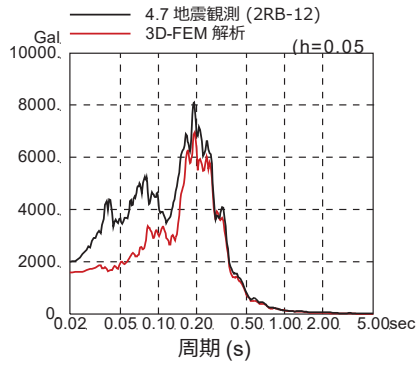


地下2階 (O. P. -0.8m)

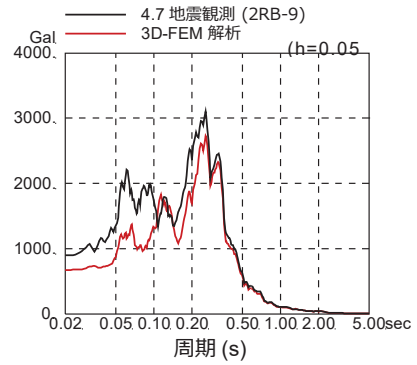


基礎版上 (O. P. -8.1m)

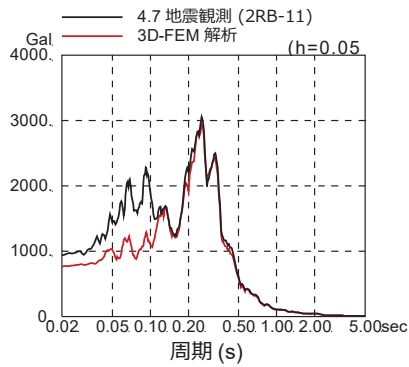
図2-9 3次元FEMモデルと3.11地震の床応答スペクトルの比較 (EW方向)



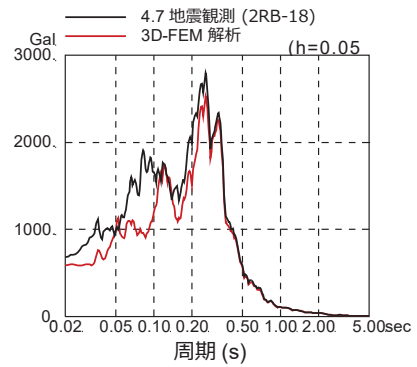
屋上 (0. P. 50.5m)



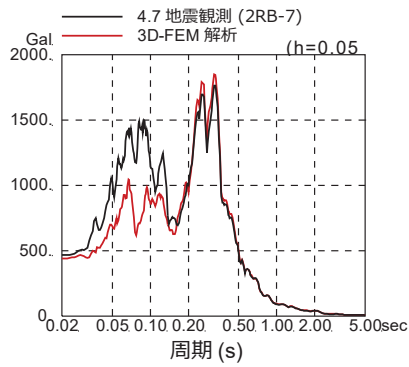
地上3階 (0. P. 33.2m)



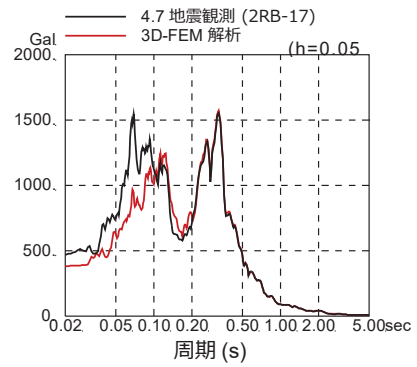
地上3階 (0. P. 33.2m)



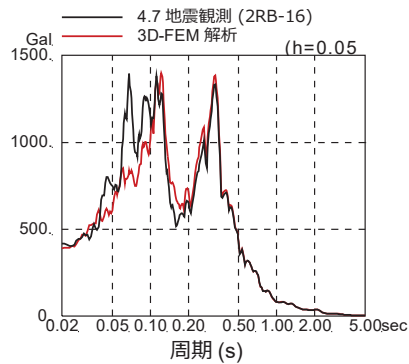
地上2階 (0. P. 22.5m)



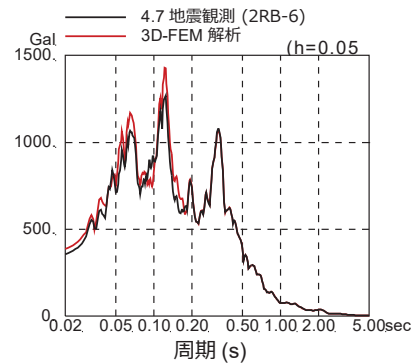
地上1階 (0. P. 15.0m)



地下1階 (0. P. 6.0m)

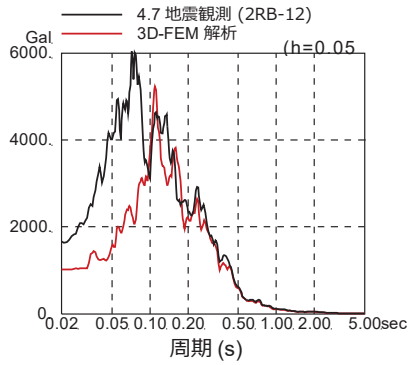


地下2階 (0. P. -0.8m)

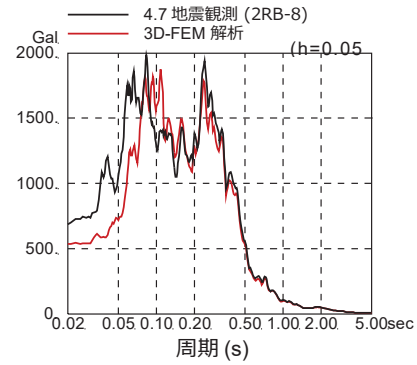


基礎版上 (0. P. -8.1m)

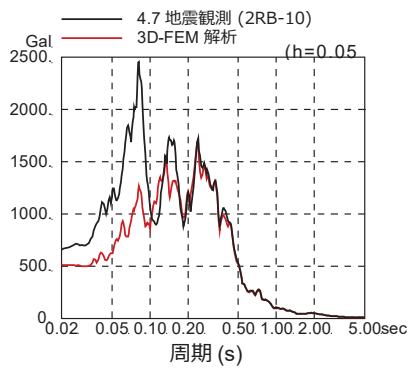
図2-10 3次元FEMモデルと4.7地震の床応答スペクトルの比較 (NS方向)



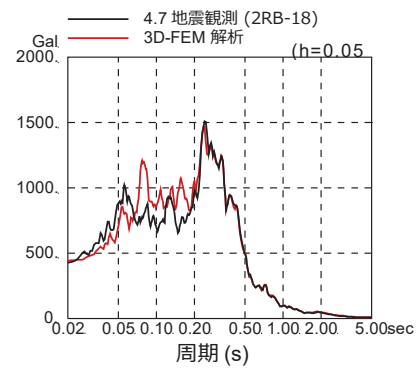
屋上 (O. P. 50.5m)



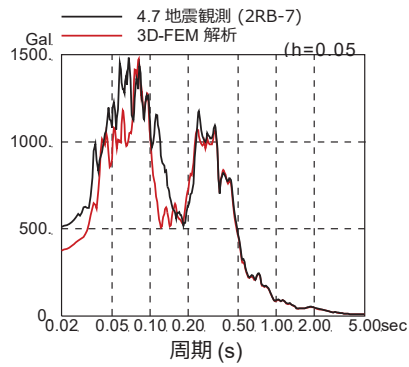
地上3階 (O. P. 33.2m)



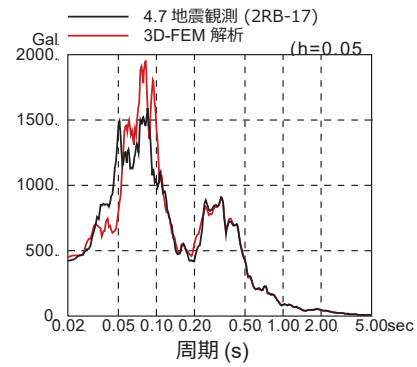
地上3階 (O. P. 33.2m)



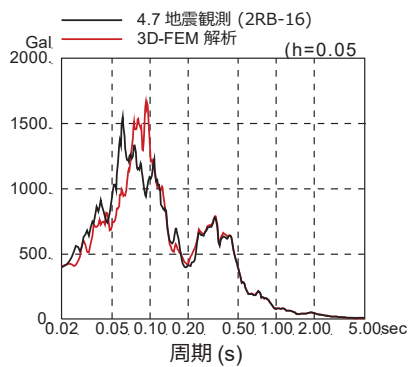
地上2階 (O. P. 22.5m)



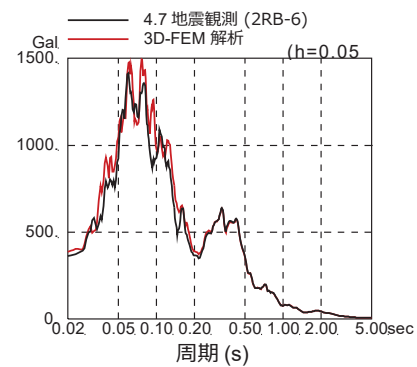
地上1階 (O. P. 15.0m)



地下1階 (O. P. 6.0m)



地下2階 (O. P. -0.8m)



基礎版上 (O. P. -8.1m)

図2-11 3次元FEMモデルと4.7地震の床応答スペクトルの比較 (EW方向)

2.2.3 シミュレーション解析結果に対する考察

図2-7で、4.7地震のEW方向屋上で3次元FEMモデルの最大応答加速度は観測記録よりも小さく評価されているものの、**別紙1**の質点系モデルによるシミュレーション解析の最大応答加速度では同等の評価結果が得られている。一方で、3.11地震のEW方向屋上では質点系のシミュレーション解析モデルによる最大応答加速度が過大評価であったことから、この解析結果に対する考察を、3.11地震及び4.7地震の周期特性、また、解析モデルの伝達特性に着目して以下に示す。なお、質点系モデルと3次元FEMモデルの応答性状の差が顕著に表れているのはEW方向であるため、EW方向に着目して検討する。

図2-12に3.11地震と4.7地震の基礎上観測記録の加速度応答スペクトルを示す。図2-13に質点系モデルと3次元FEMモデルの基礎上観測点位置の床応答時刻歴波形に対する屋上観測点位置の3.11地震と4.7地震の床応答時刻歴波形の伝達関数を示す。図2-13には観測記録の伝達関数も比較のため示す。図2-14に3.11地震と4.7地震の屋上観測記録と質点系モデル及び3次元FEMモデルの屋上の加速度応答スペクトルを比較して示す。

図2-13の3.11地震EW方向の伝達関数に着目すると、質点系モデルでは8Hz付近では質点系モデルの伝達関数がピークになっているのに対し、3次元FEMモデルの伝達関数は8Hz付近で谷になっている。図2-12より、8Hzに対応する周期0.125秒付近の基礎上観測記録の加速度応答スペクトルは、3.11地震のほうが4.7地震より大きい。図2-14の屋上観測点における3.11地震EW方向の加速度応答スペクトルでは、質点系モデルの周期0.12秒付近に大きなピークがあり、これより短周期側で応答が大きくなっている。従って、質点系モデルの3.11地震EW方向の応答加速度が大きくなるのは8Hz付近の伝達関数のピークの影響と考えられる。

図2-14の3次元FEMモデルにおける屋上観測点位置での加速度応答スペクトル（4.7地震、EW方向）は、周期0.1秒より短周期側が観測記録より小さくなっているため、最大応答加速度が観測記録より過小評価になっている。図2-13の伝達関数では、11Hz付近にある観測記録の伝達関数のピーク付近で3次元FEMモデルの伝達関数が小さくなっている。図2-12の基礎上観測記録の4.7地震EW方向の加速度応答スペクトルは周期0.08～0.09秒付近にピークがあるが、この周期は観測記録の伝達関数の11Hz付近のピークに対応している。3次元FEMモデルでは、この周期成分の伝達関数が過小評価となっており、入力波の成分が建屋上部の応答に反映されないため、建屋上部の応答が過小になったと考えられる。これは、図2-14の3次元FEMモデルにおける屋上観測点位置での加速度応答スペクトル（4.7地震、EW方向）が、周期0.1秒より短周期側で観測記録より小さいことに対応する。

以上のことから、シミュレーション解析の最大応答加速度のフィッティングには8～11Hzの成分の増幅特性が影響しており、3.11地震と4.7地震の周期特性が異なる

ため、それぞれの地震の質点系モデルと3次元FEMモデルのシミュレーション解析結果の傾向に差異が生じたものと考えられる。

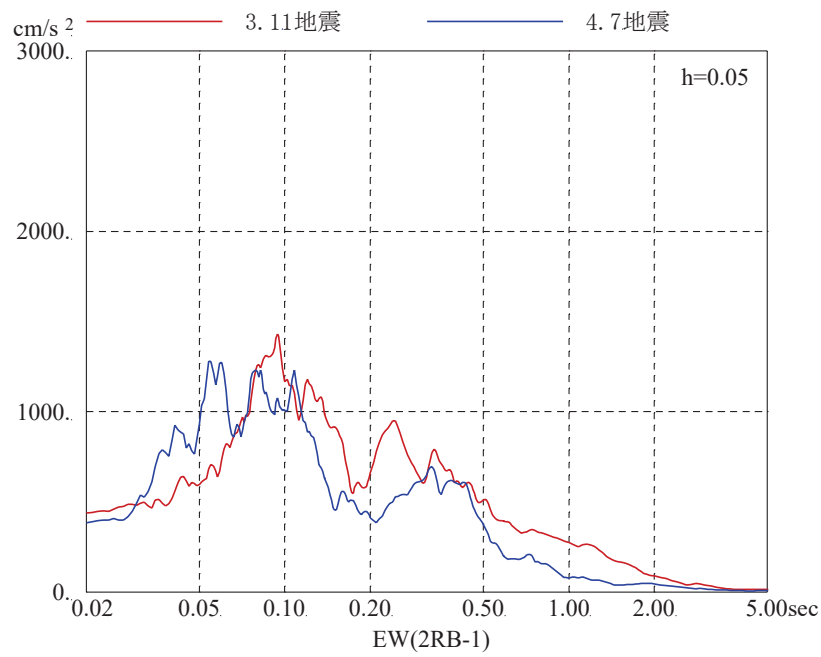
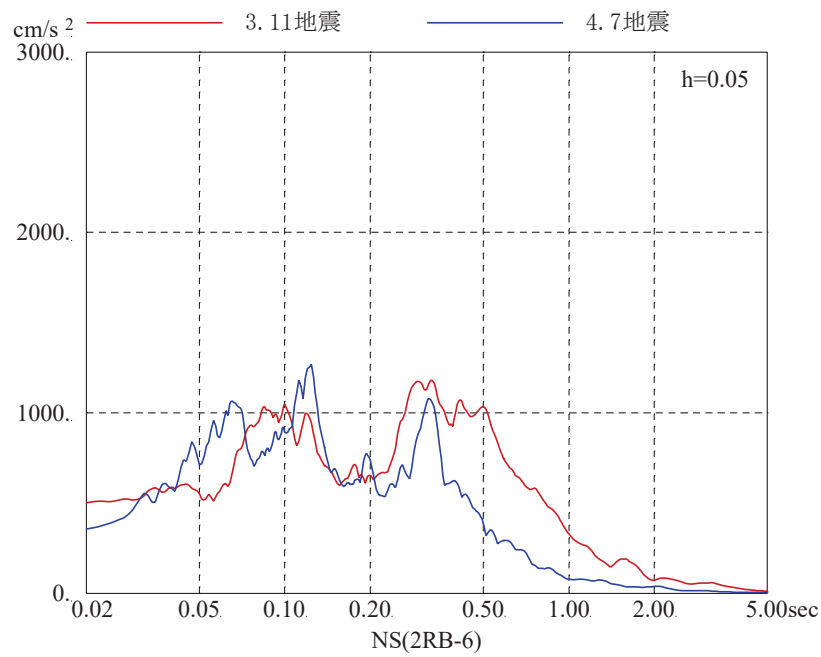
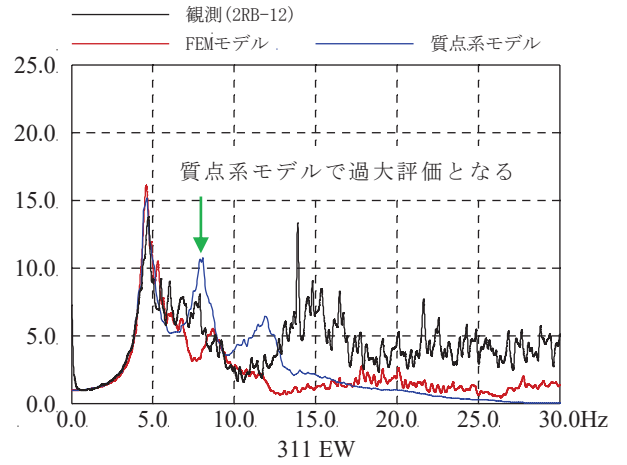
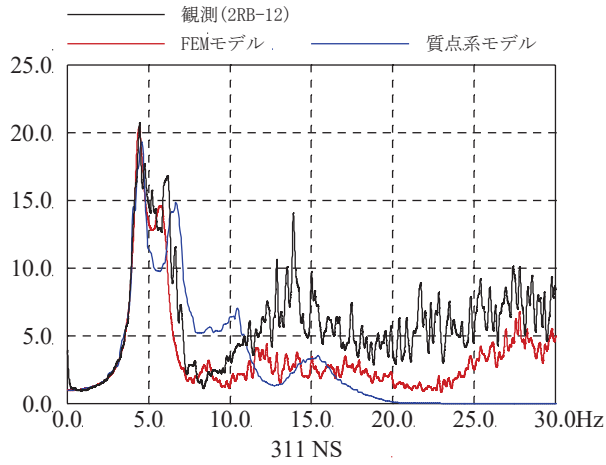
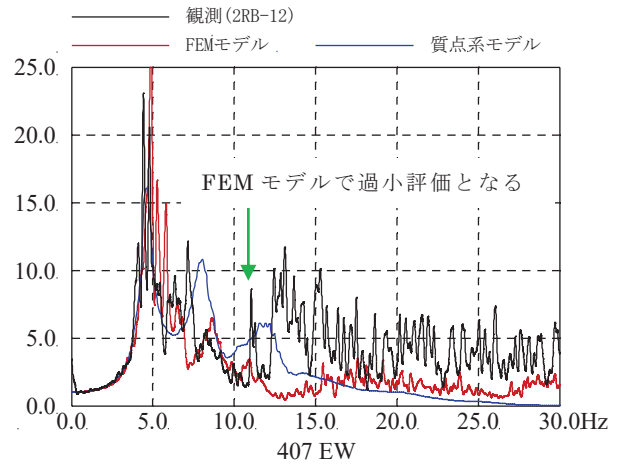
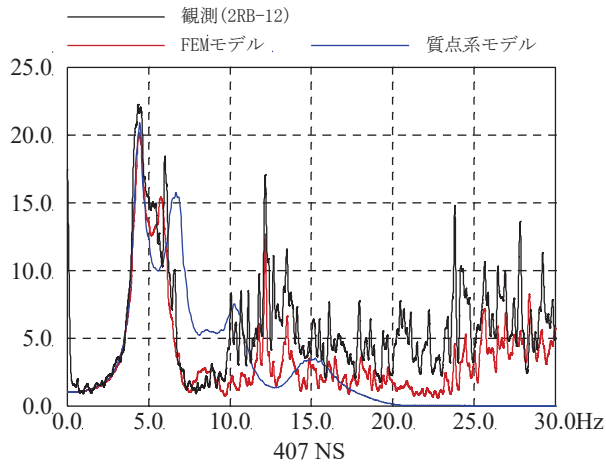


図 2-12 基礎上観測記録の加速度応答スペクトルの比較



3.11 地震



4.7 地震

図 2-13 床応答時刻歴波形の伝達関数 (屋上観測点/基礎上観測点)

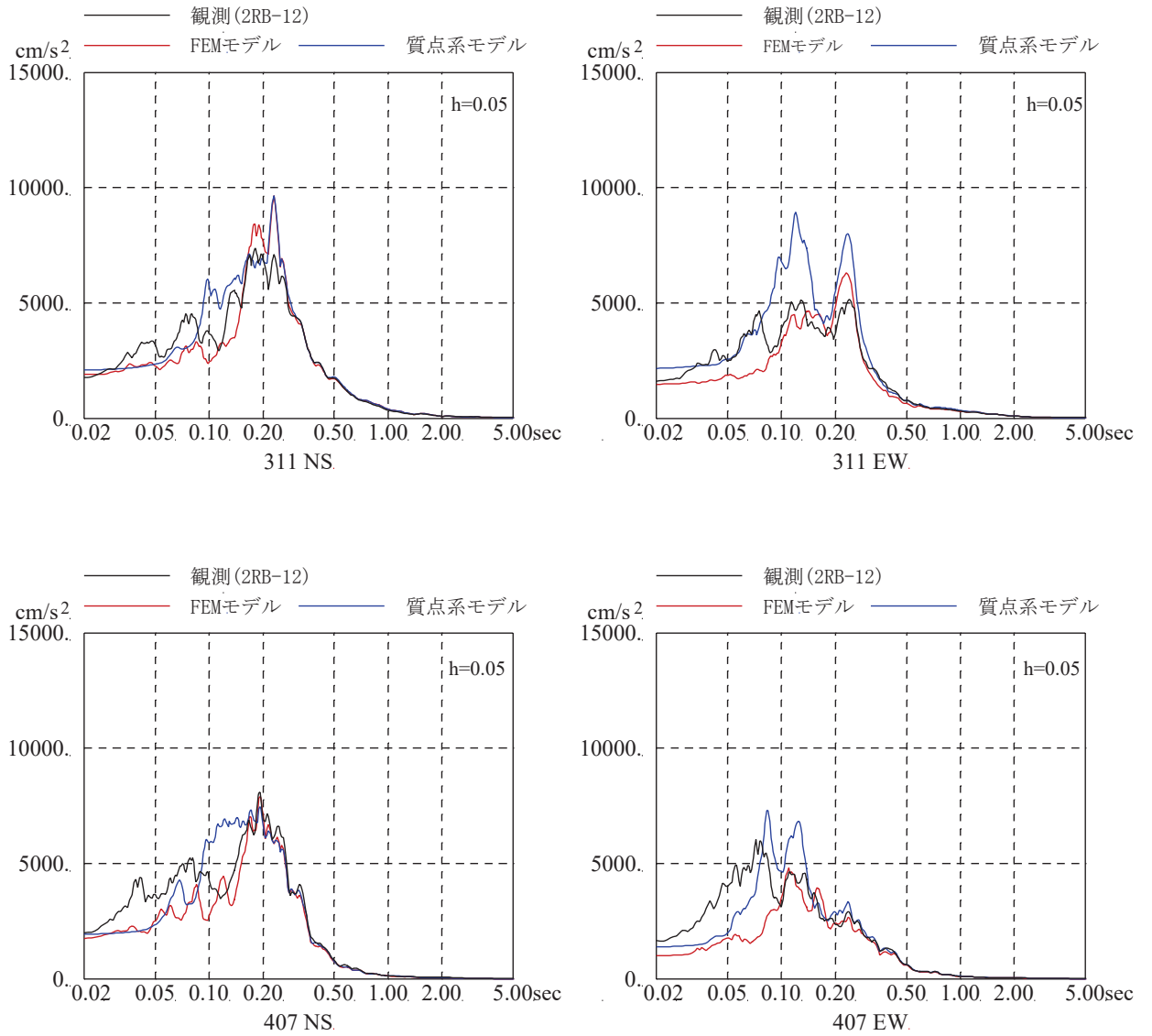


図 2-14 屋上観測点の加速度応答スペクトルの比較

2.2.4 面内せん断ひずみ分布と点検結果との比較

3次元FEMモデルによる3.11地震及び4.7地震のシミュレーション解析による建屋各部の面内せん断ひずみコンター図を図2-15～図2-52に示す。ここで、面内せん断ひずみを評価対象としたのは、剛性低下を考慮した等価線形モデルとしてシミュレーション解析を行っているため、剛性低下を考慮した部材と考慮していない部材の応答の大きさを比較するためには、面内せん断ひずみで比較した方が適切となる。また、せん断ひずみについては、コンクリートにひび割れが発生するせん断ひずみの目安値 0.00025^* (0.25×10^{-3}) との比較からその影響度合いについて評価可能になる。

面内せん断ひずみ分布の特徴は以下のとおり。

- ① 面内せん断ひずみが大きくなる部位は、オペフロ上部の東面と西面の耐震壁である。
- ② オペフロ下部ではコンクリートにひび割れが発生するせん断ひずみの目安値 0.00025 (0.25×10^{-3}) 以下の部分がほとんどであるが、地下3階及び地下2階の内部ボックス壁や火打ち壁周り、及び地下1階から地上2階までの内部ボックス壁の一部でせん断ひずみが目安値を上回る箇所が認められる。部分的な最大値は 0.43×10^{-3} である。なお、床スラブは基本的にはせん断ひび割れ発生目安値 0.00025 (0.25×10^{-3}) 以下である。

面内せん断ひずみ分布と耐震壁のひび割れ点検結果の比較を別紙5-1に示す。オペフロ上部でせん断ひずみが大きいこと、また、オペフロ下部では部分的にひび割れが発生するせん断ひずみの目安値を超えている箇所があることは、耐震壁の点検調査結果（オペフロ上部に比較的多くのひび割れが認められる一方、オペフロ下部では部分的に地震によるひび割れが認められる程度）と良く対応している。

* 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会, 1999）

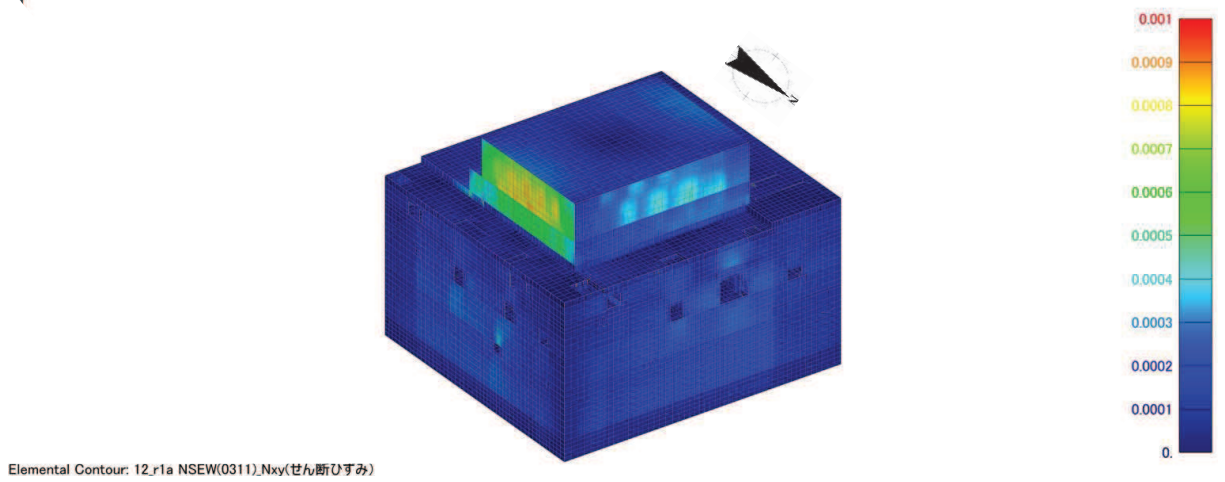


図 2-15 面内せん断ひずみコンター図（全体）北東面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

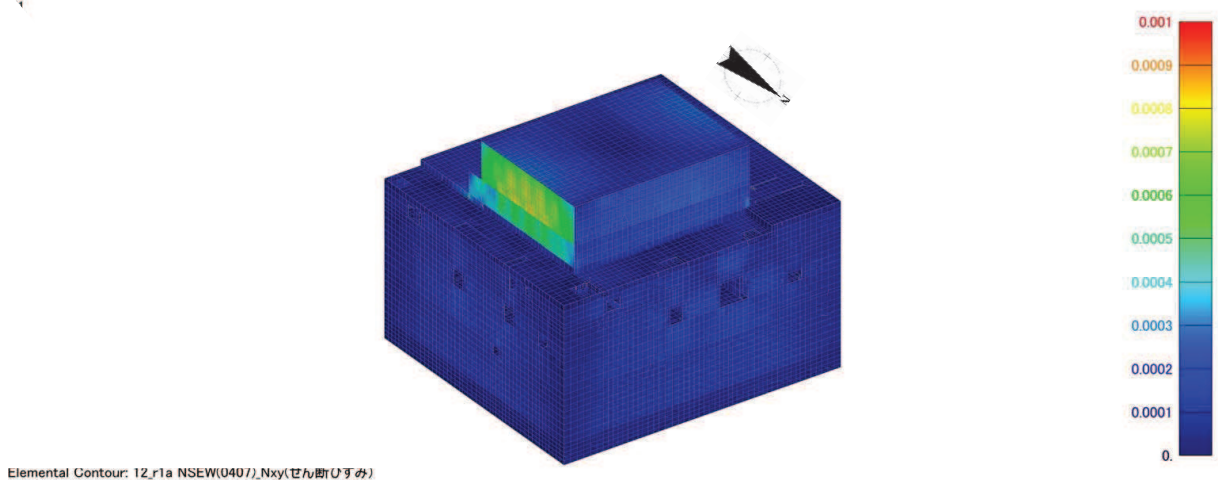


図 2-16 面内せん断ひずみコンター図（全体）北東面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

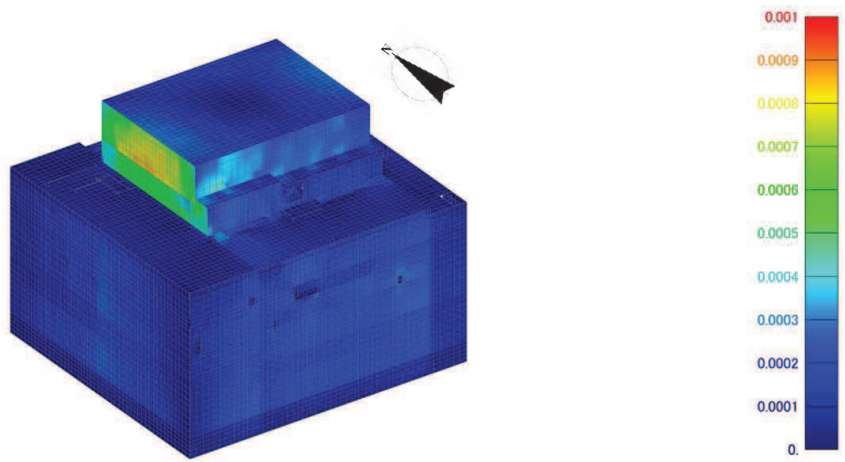


図 2-17 面内せん断ひずみコンター図（全体）南西面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

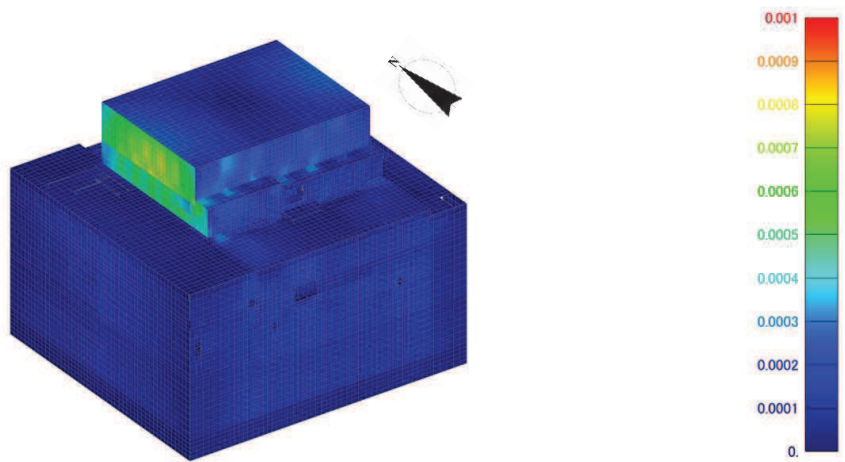
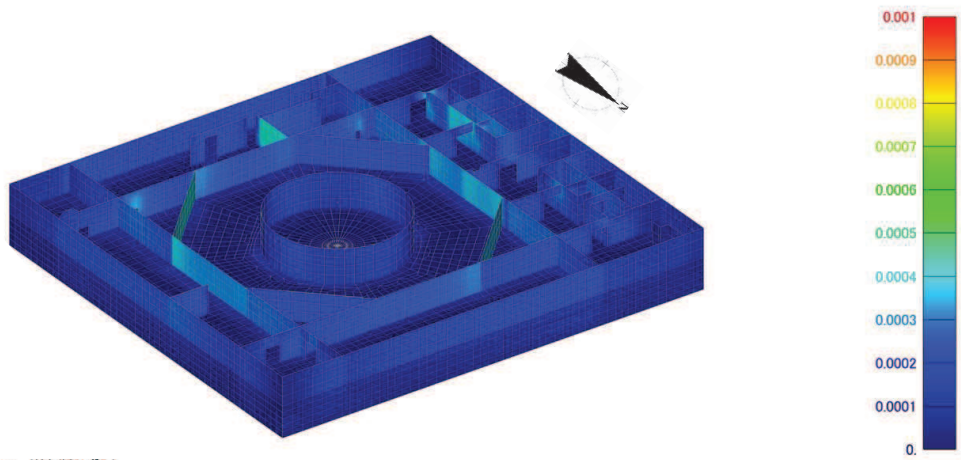
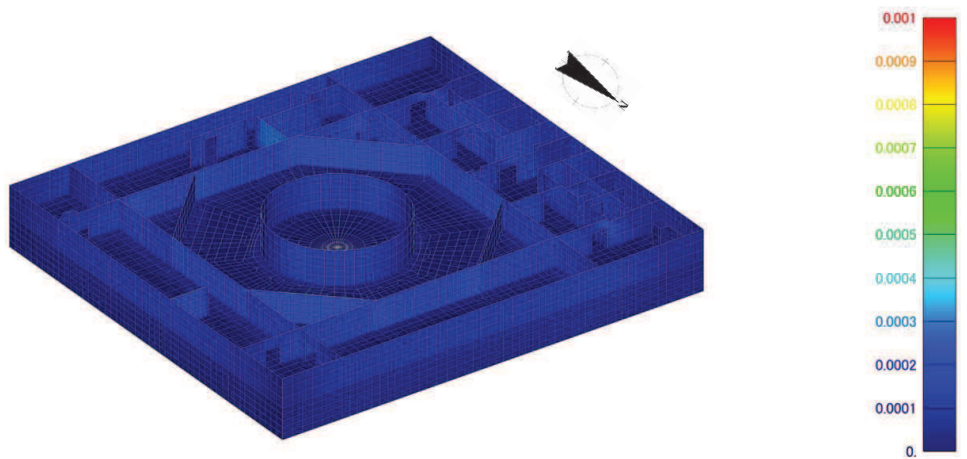


図 2-18 面内せん断ひずみコンター図（全体）南西面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力



Elemental Contour: 12_r1a NSEW(0311).Nxy(せん断ひずみ)

図 2-19 面内せん断ひずみコンター図（地下 3 階）北東面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力



Elemental Contour: 12_r1a NSEW(0407).Nxy(せん断ひずみ)

図 2-20 面内せん断ひずみコンター図（地下 3 階）北東面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

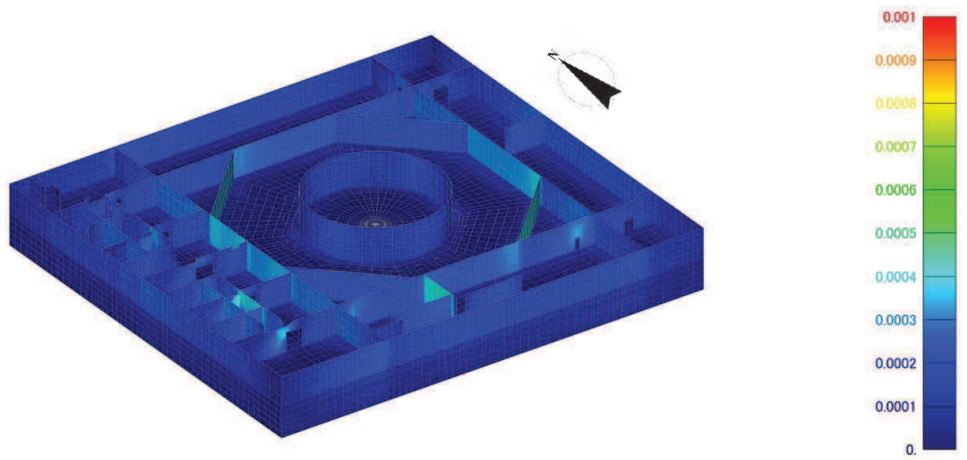


図 2-21 面内せん断ひずみコンター図（地下 3 階）南西面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

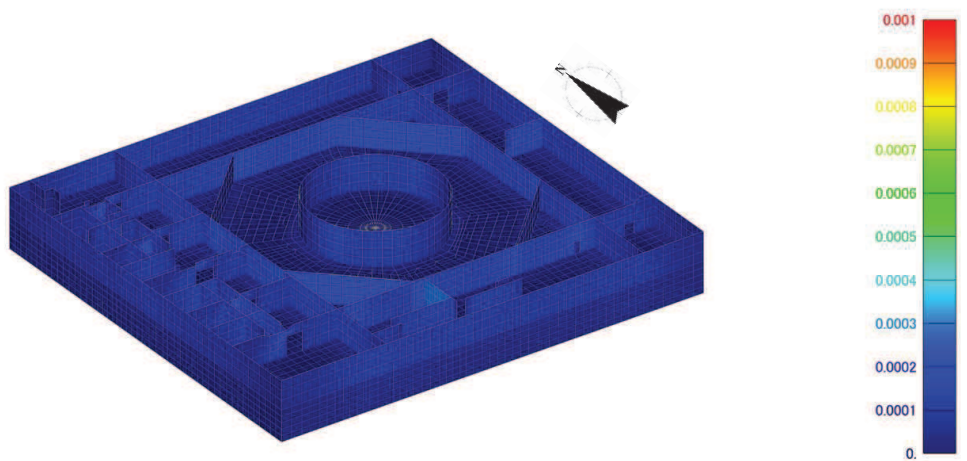


図 2-22 面内せん断ひずみコンター図（地下 3 階）南西面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

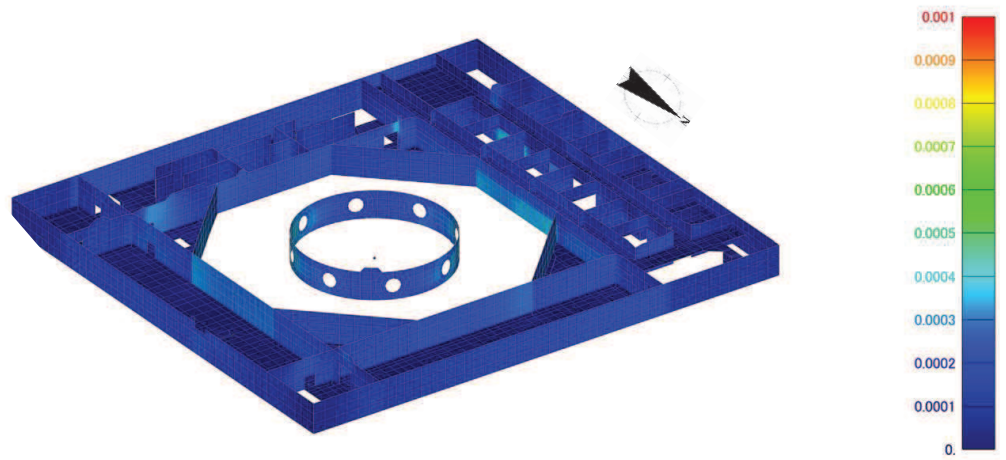


図 2-23 面内せん断ひずみコンター図（地下 2 階）北東面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

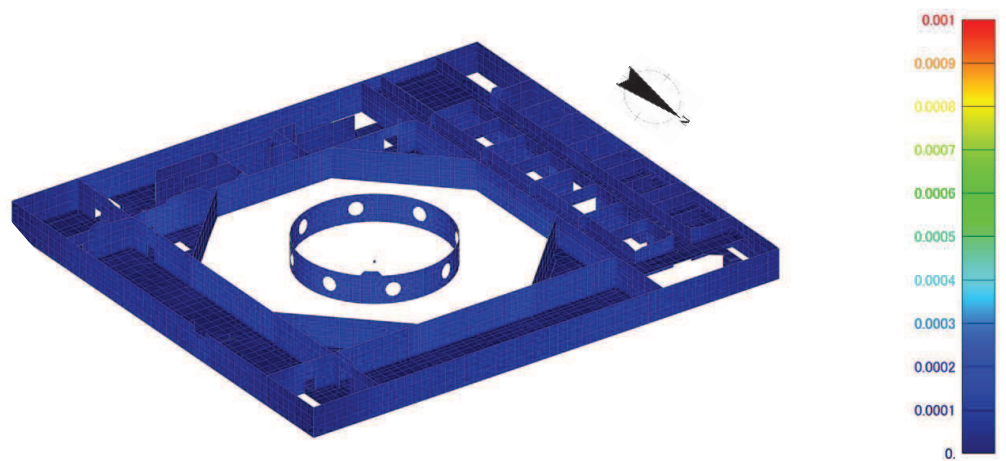


図 2-24 面内せん断ひずみコンター図（地下 2 階）北東面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

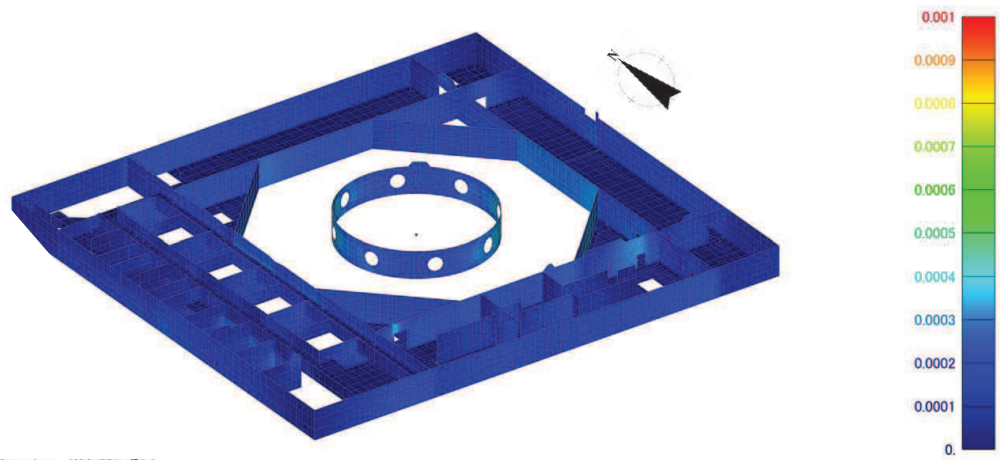


図 2-25 面内せん断ひずみコンター図（地下 2 階）南西面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

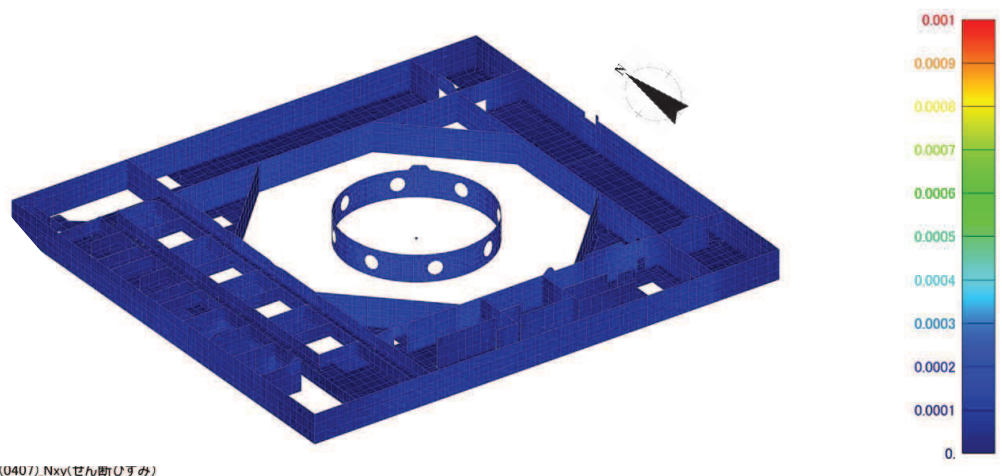
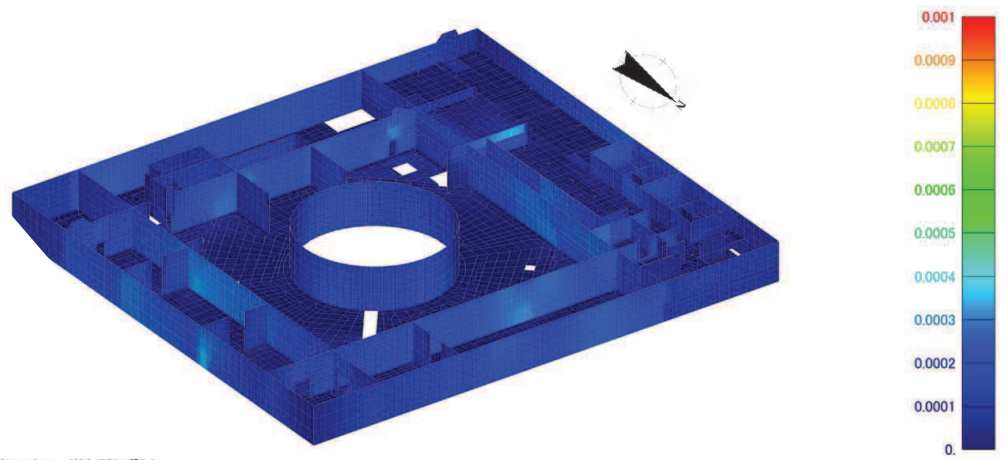
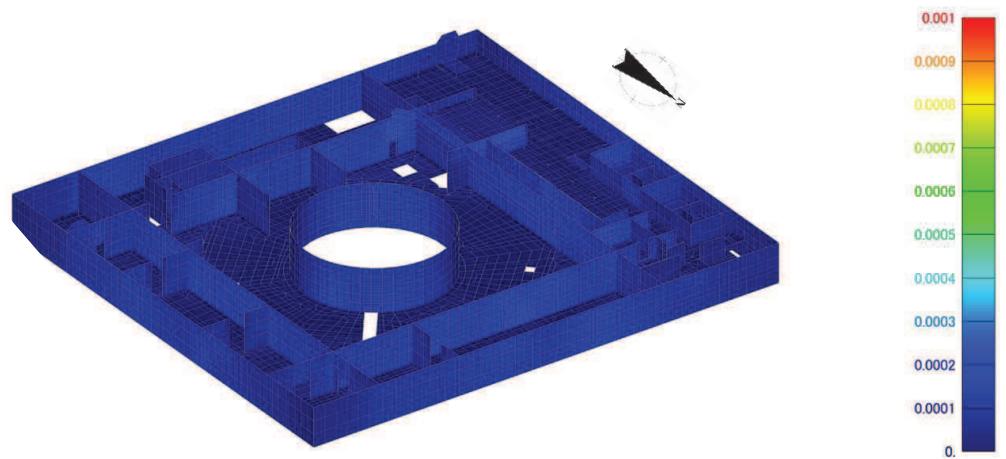


図 2-26 面内せん断ひずみコンター図（地下 2 階）南西面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力



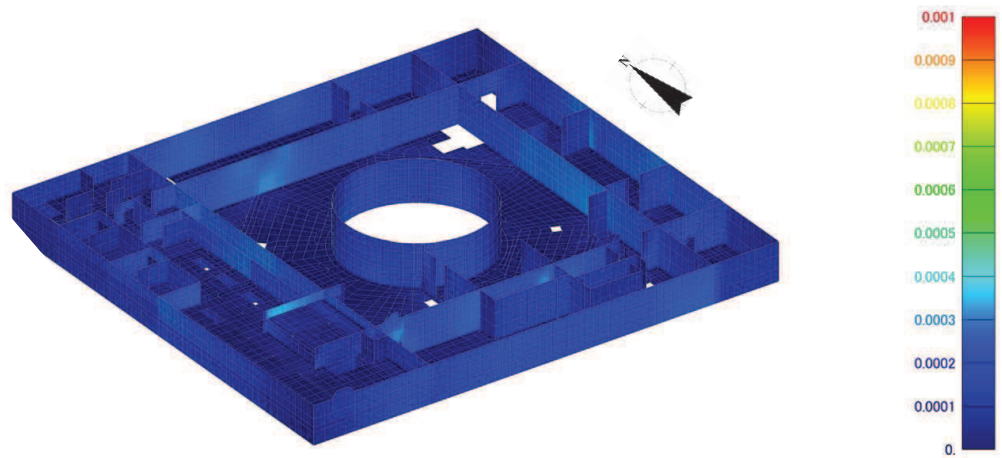
Elemental Contour: 12_r1a NSEW(0311),Nxy(せん断ひずみ)

図 2-27 面内せん断ひずみコンター図（地下 1 階）北東面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力



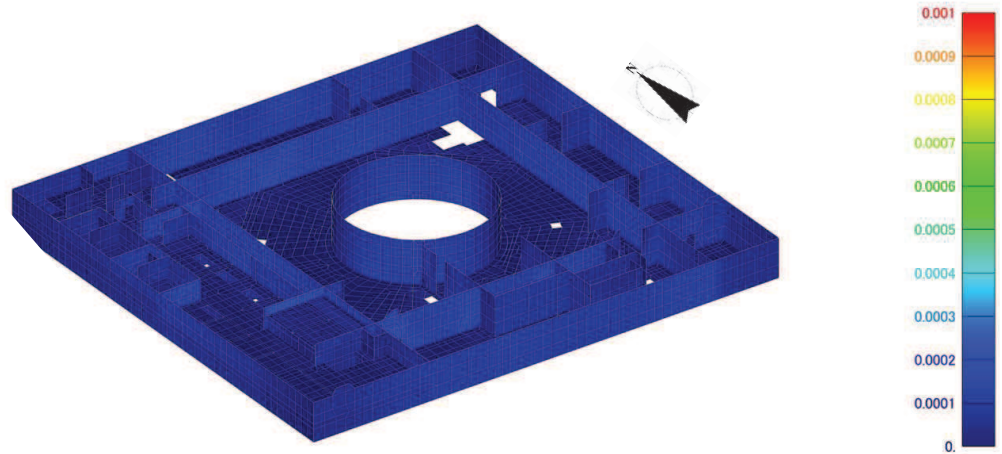
Elemental Contour: 12_r1a NSEW(0407),Nxy(せん断ひずみ)

図 2-28 面内せん断ひずみコンター図（地下 1 階）北東面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力



Elemental Contour: 12_r1a NSEW(0311).Nxy(せん断ひずみ)

図 2-29 面内せん断ひずみコンター図（地下 1 階）南西面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力



Elemental Contour: 12_r1a NSEW(0407).Nxy(せん断ひずみ)

図 2-30 面内せん断ひずみコンター図（地下 1 階）南西面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

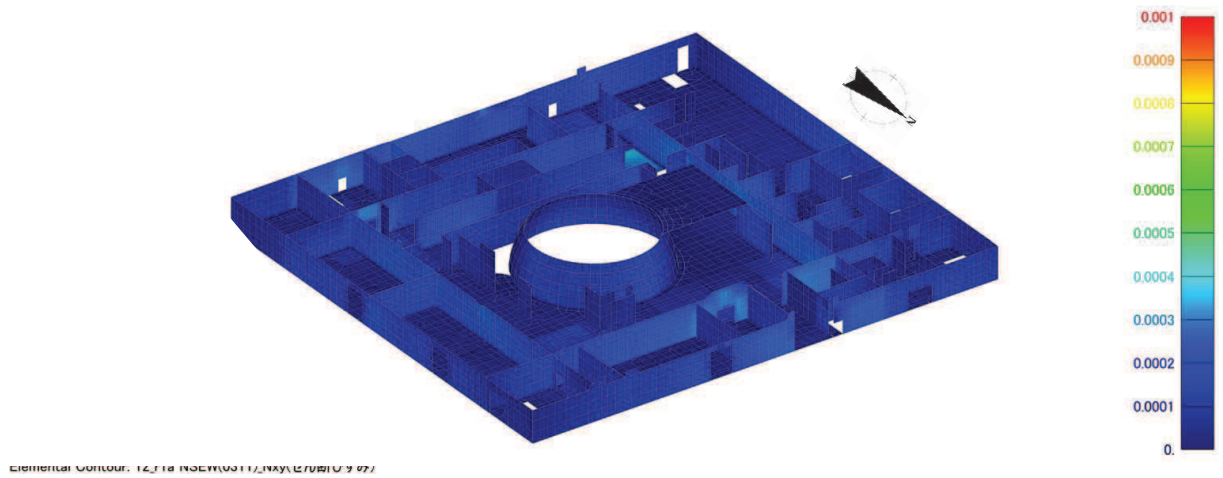


図 2-31 面内せん断ひずみコンター図（地上 1 階）北東面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

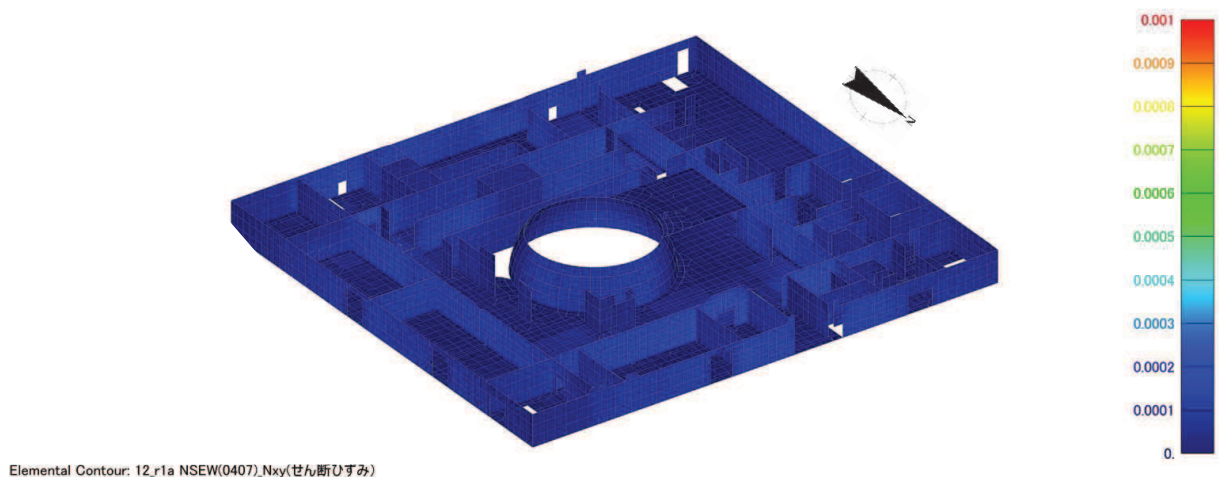


図 2-32 面内せん断ひずみコンター図（地上 1 階）北東面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

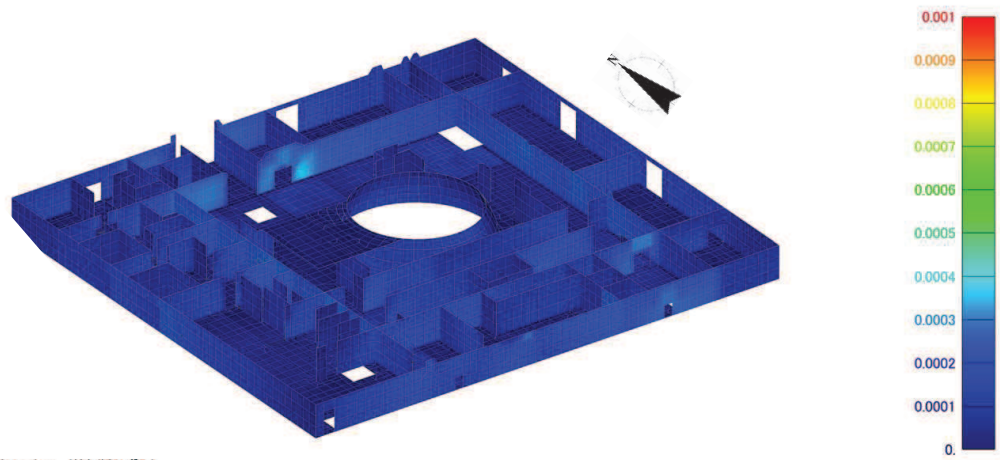


図 2-33 面内せん断ひずみコンター図（地上 1 階）南西面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

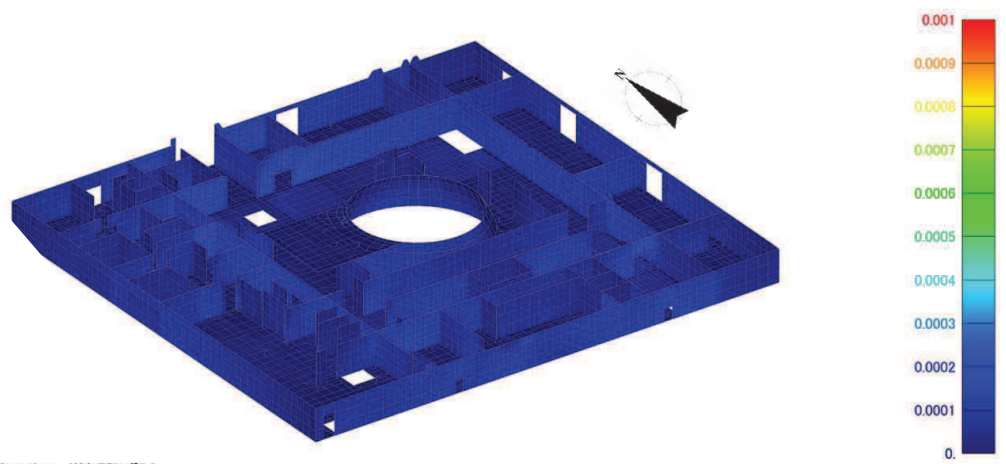


図 2-34 面内せん断ひずみコンター図（地上 1 階）南西面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

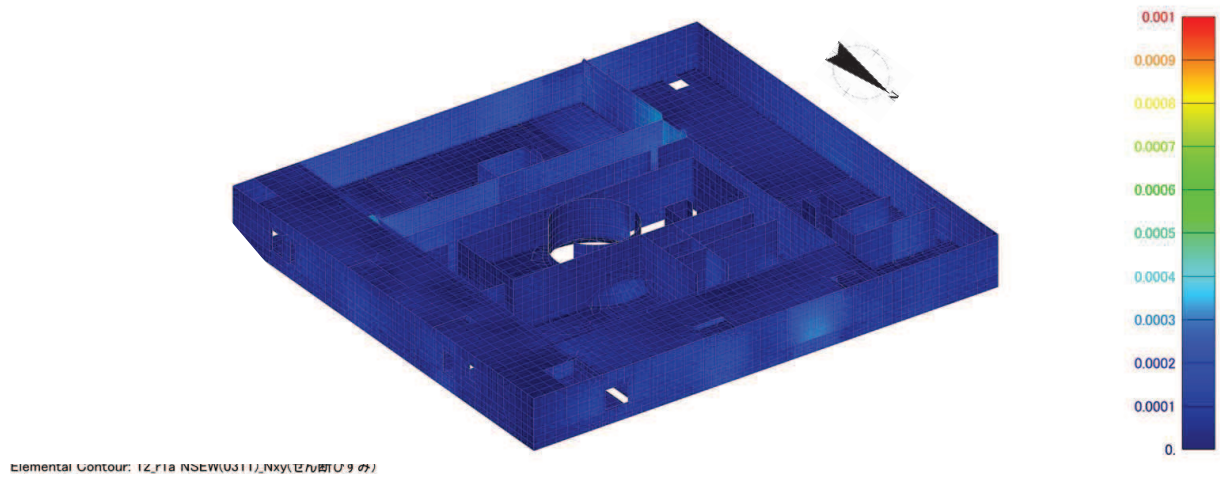


図 2-35 面内せん断ひずみコンター図（地上 2 階）北東面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

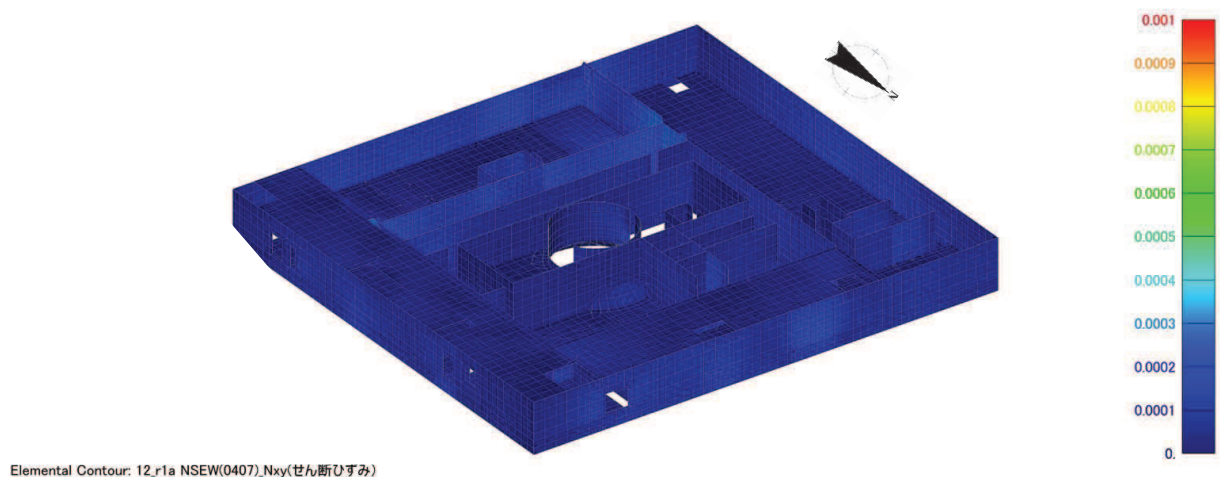
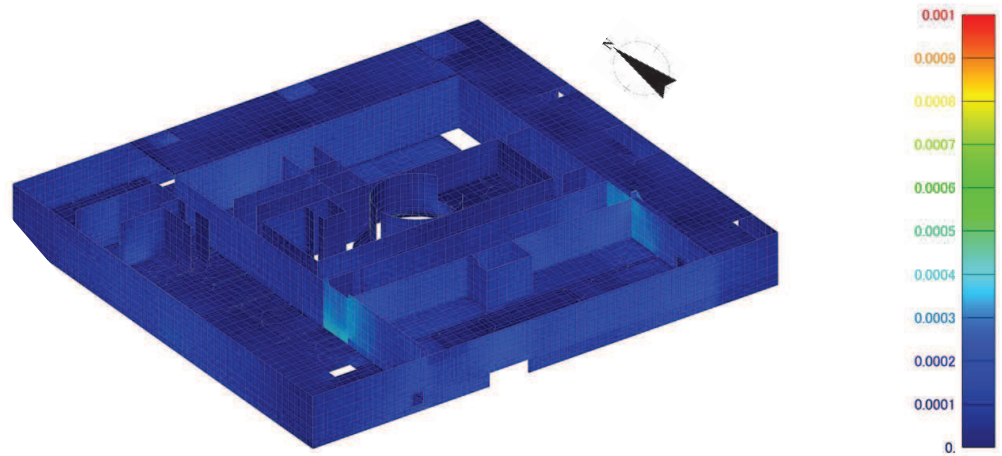
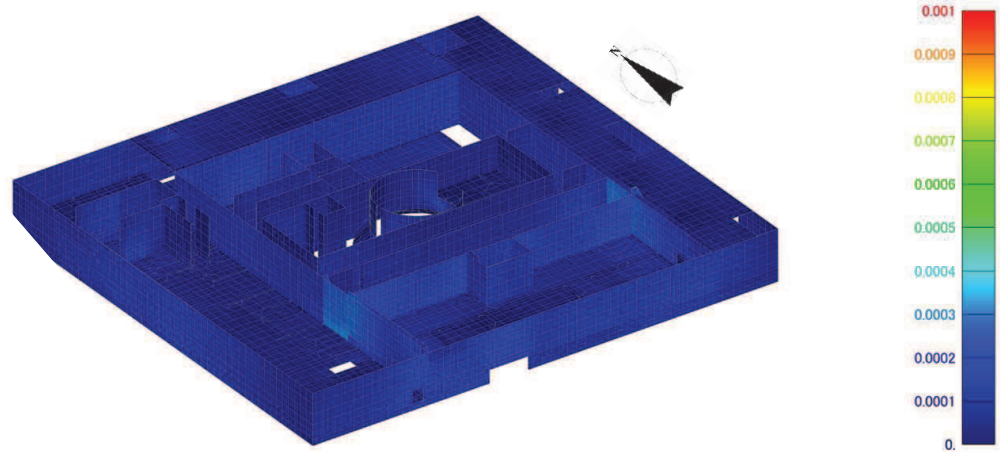


図 2-36 面内せん断ひずみコンター図（地上 2 階）北東面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力



Elemental Contour: 12_r1a NSEW(0311).Nxy(せん断ひずみ)

図 2-37 面内せん断ひずみコンター図（地上 2 階）南西面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力



Elemental Contour: 12_r1a NSEW(0407).Nxy(せん断ひずみ)

図 2-38 面内せん断ひずみコンター図（地上 2 階）南西面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

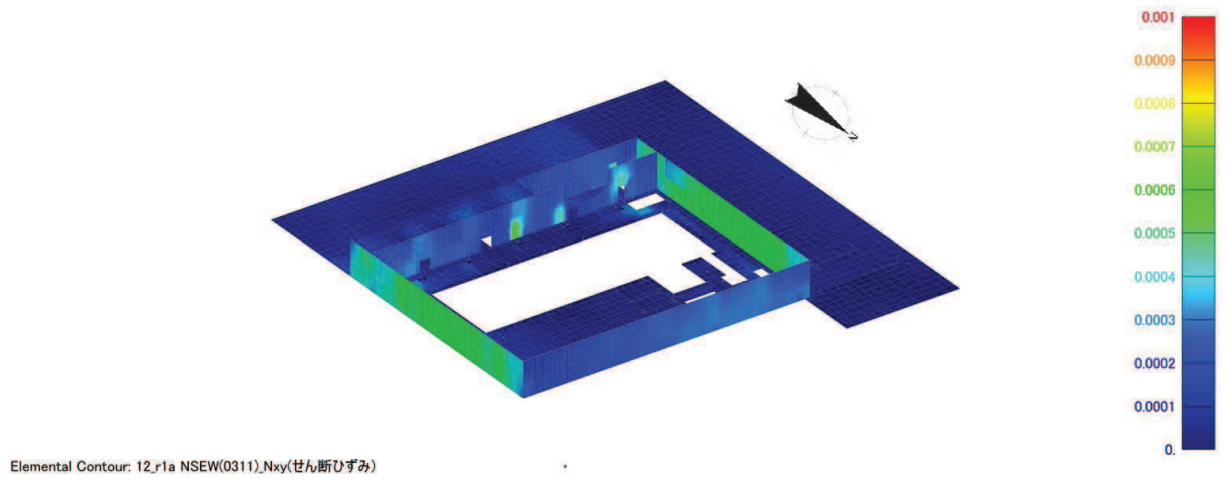


図 2-39 面内せん断ひずみコンター図（地上 3 階）北東面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

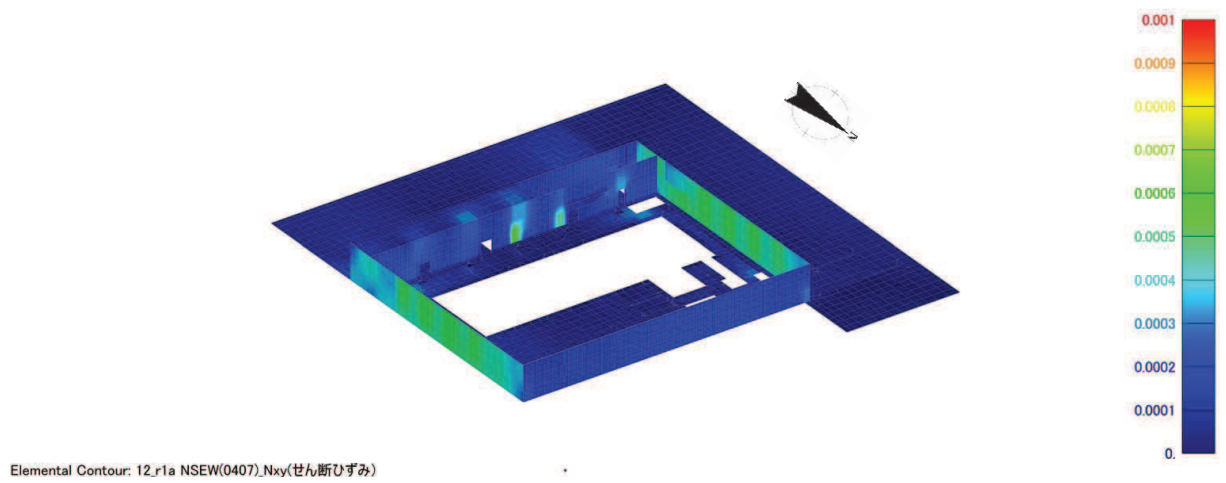


図 2-40 面内せん断ひずみコンター図（地上 3 階）北東面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

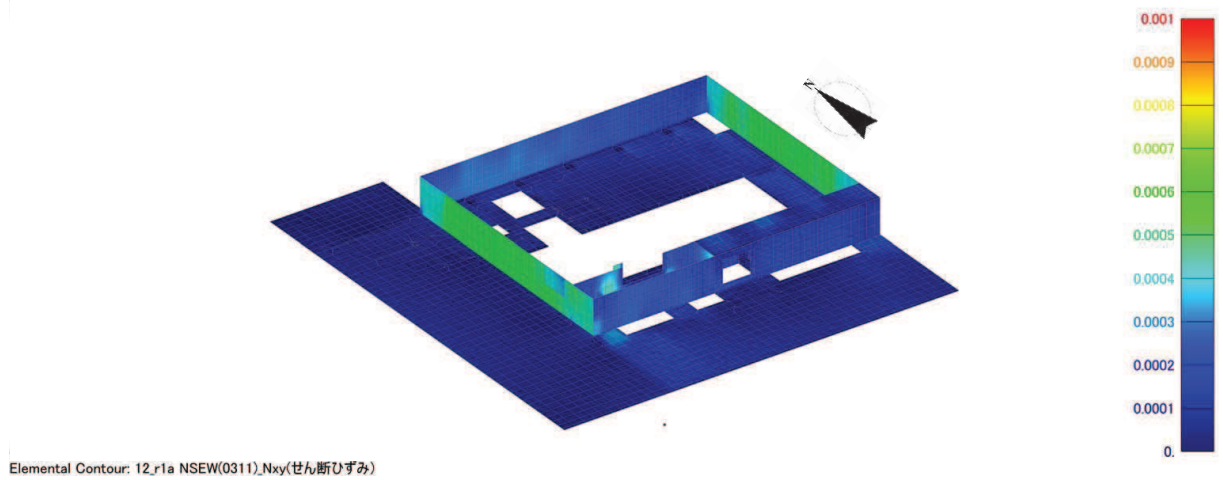


図 2-41 面内せん断ひずみコンター図（地上 3 階）南西面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

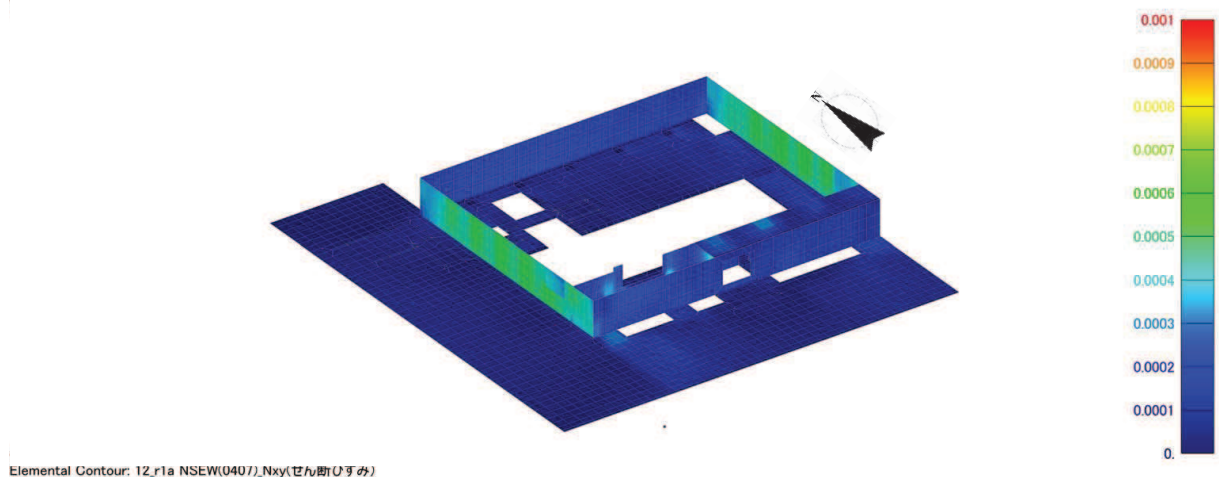


図 2-42 面内せん断ひずみコンター図（地上 3 階）南西面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

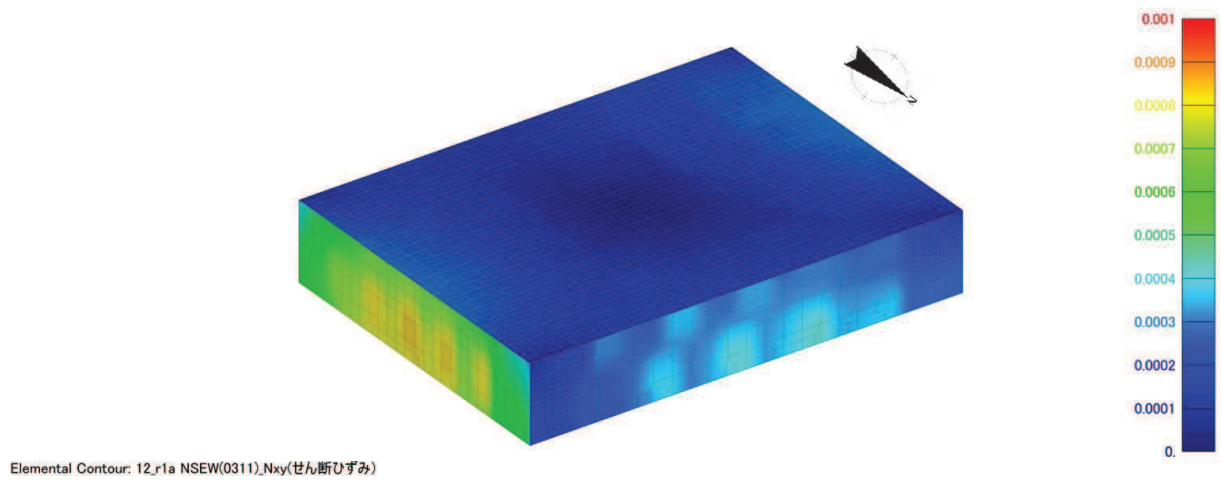


図 2-43 面内せん断ひずみコンター図（屋上階）北東面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

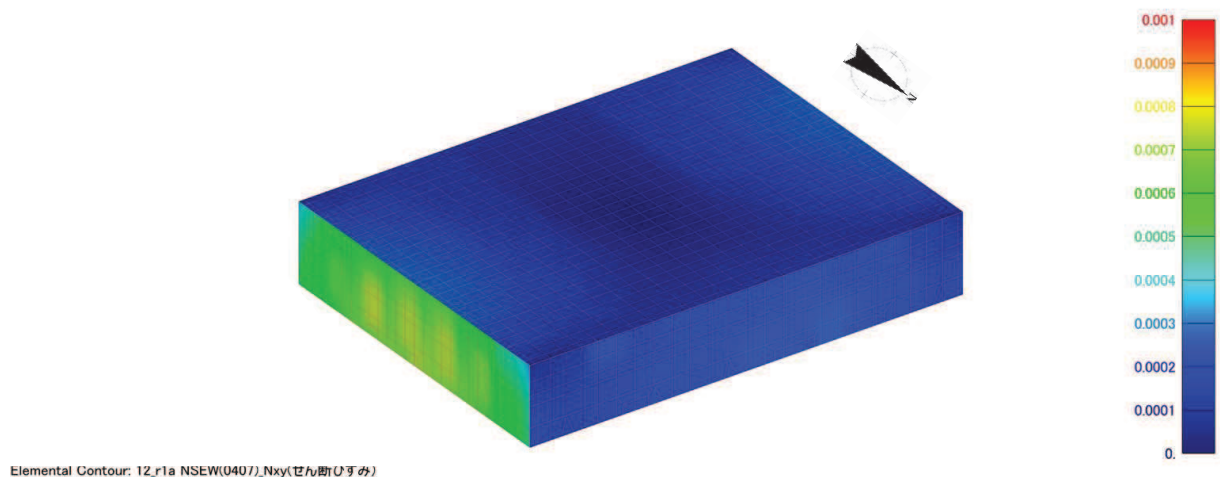


図 2-44 面内せん断ひずみコンター図（屋上階）北東面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

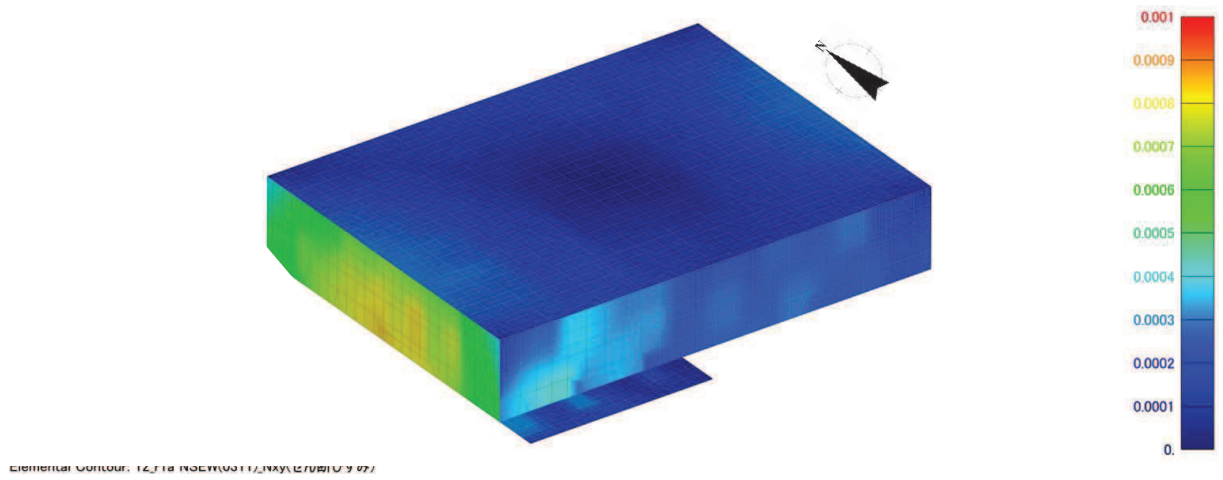


図 2-45 面内せん断ひずみコンター図（屋上階）南西面
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

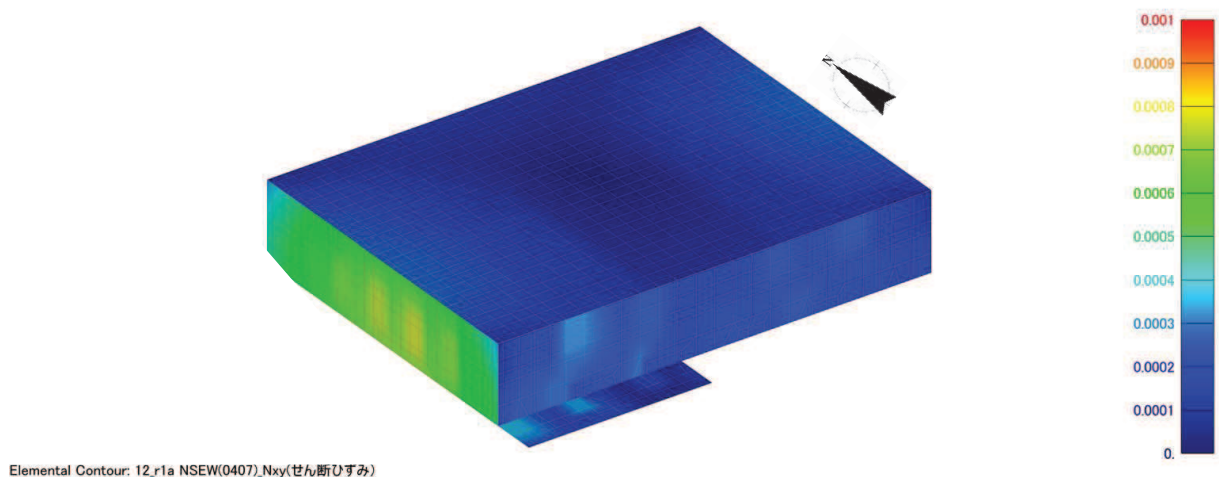


図 2-46 面内せん断ひずみコンター図（屋上階）南西面
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

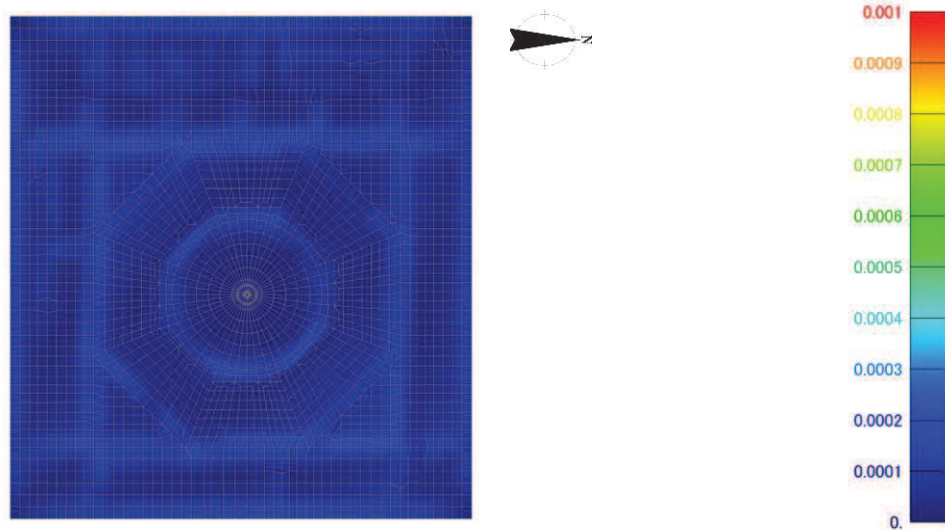


図 2-47 面内せん断ひずみコンター図（基礎版）
3.11 地震観測記録・NS, EW 入力

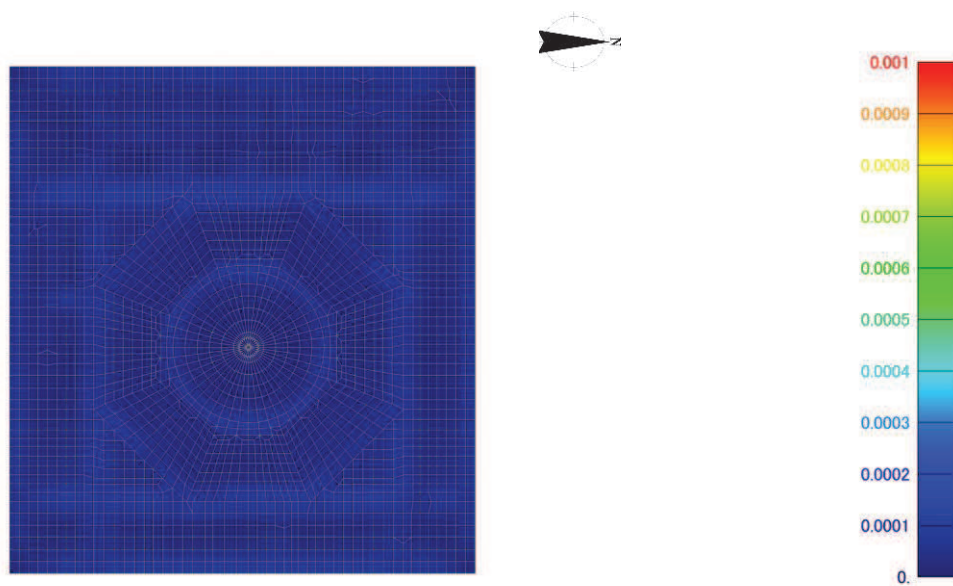


図 2-48 面内せん断ひずみコンター図（基礎版）
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力

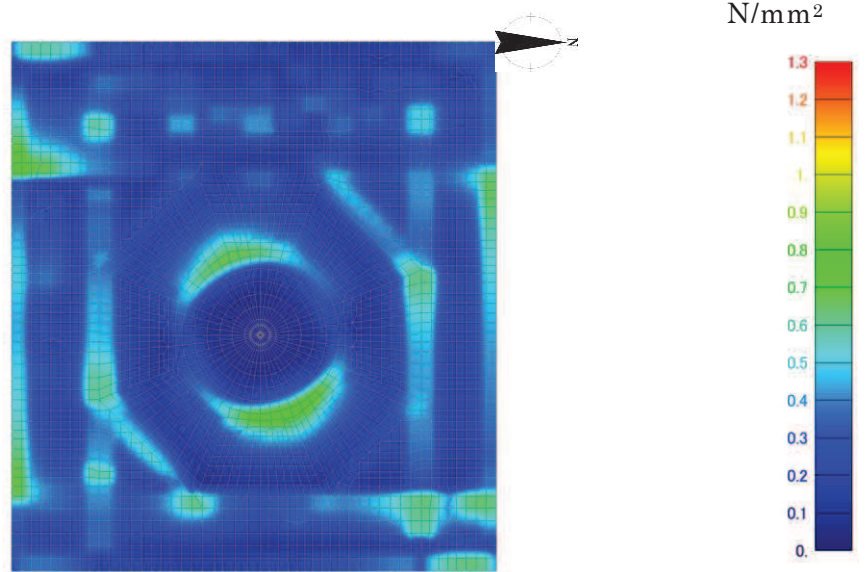


図 2-49 面外せん断応力度コンター図（基礎版）
 3.11 地震観測記録・NS, EW 入力（東西断面）

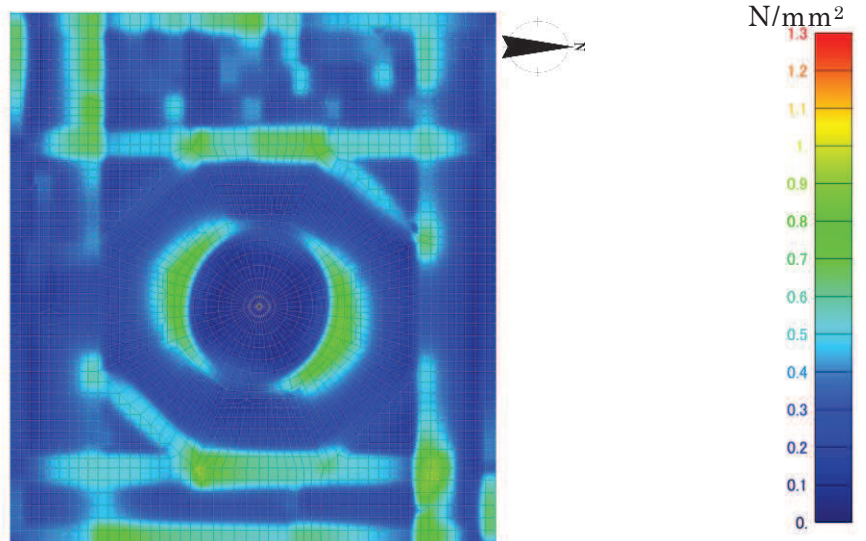


図 2-50 面外せん断応力度コンター図（基礎版）
 3.11 地震観測記録・NS, EW 入力（南北断面）

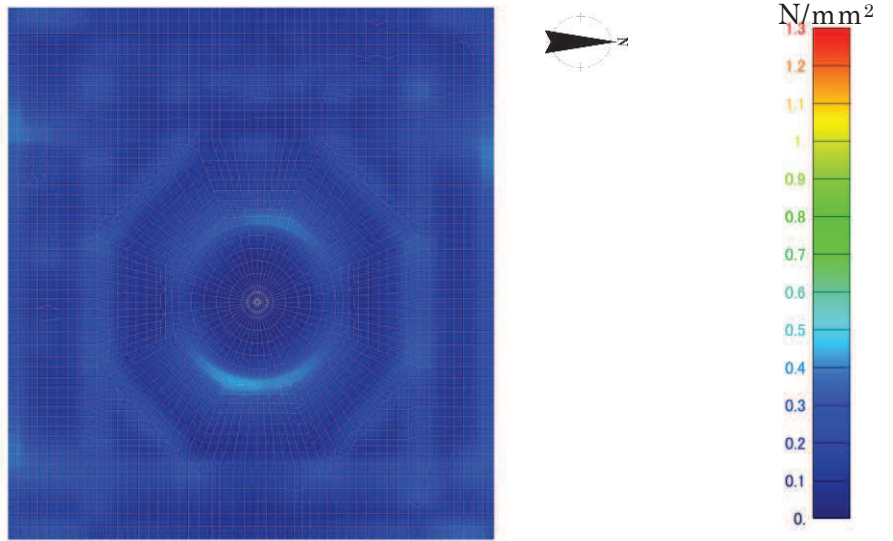


図 2-51 面外せん断応力度コンター図（基礎版）
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力（東西断面）

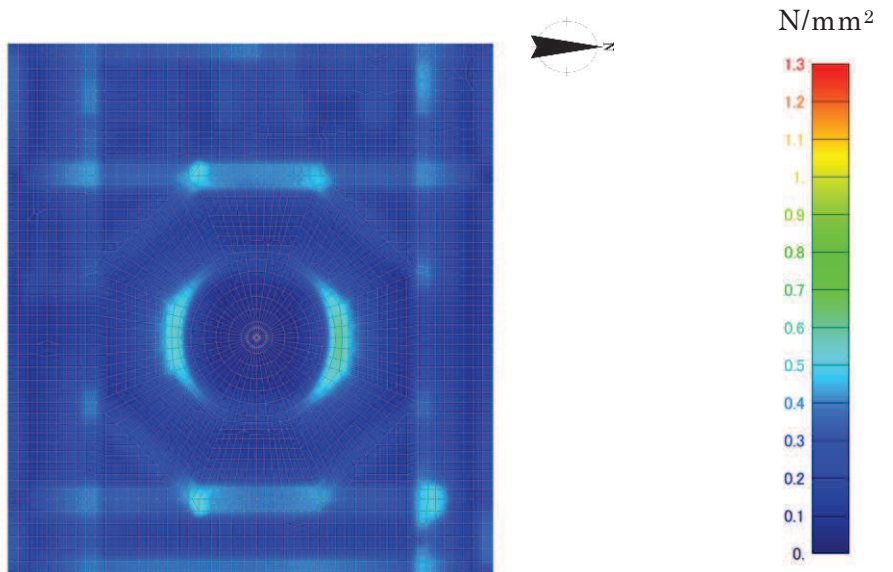


図 2-52 面外せん断応力度コンター図（基礎版）
4.7 地震観測記録・NS, EW 入力（南北断面）

2.2.5 地震による建屋の構造的影響評価

(1) 耐震壁，梁，柱，床スラブ

耐震壁，梁，柱，床スラブの面内せん断ひずみ分布において，せん断ひずみが最も大きい傾向を示すのはオペフロ上部の東面と西面の耐震壁であり，解析モデルの最大値は 0.83×10^{-3} である。オペフロ上部の耐震壁については，別途3次元FEM非線形モデルによる検討（別紙6参照）により，鉄筋が弾性範囲であったことを確認している。

その他の部材では，部分的に耐震壁の一部でせん断ひび割れの目安値を超える箇所はあるものの，最大でもオペフロ上部のひずみの半分程度であり，鉄筋の健全性は確保されているものと判断される。

床スラブの面内せん断ひずみは基本的にはせん断ひび割れ発生の目安値以下であり，鉄筋の健全性は確保されているものと判断される。

(2) 基礎版

基礎版に生じる面内せん断ひずみについては，耐震壁付近が若干大きいですが，全体的にはひび割れが入る目安値以下となっている。面外力についても，耐震壁付近が若干大きいですが，全体的にはひび割れが入る目安値以下となっており，鉄筋損傷に至るレベルには至っていない。

上記より，鉄筋の健全性は確保されているものと判断される。

3. 評価結果のまとめ

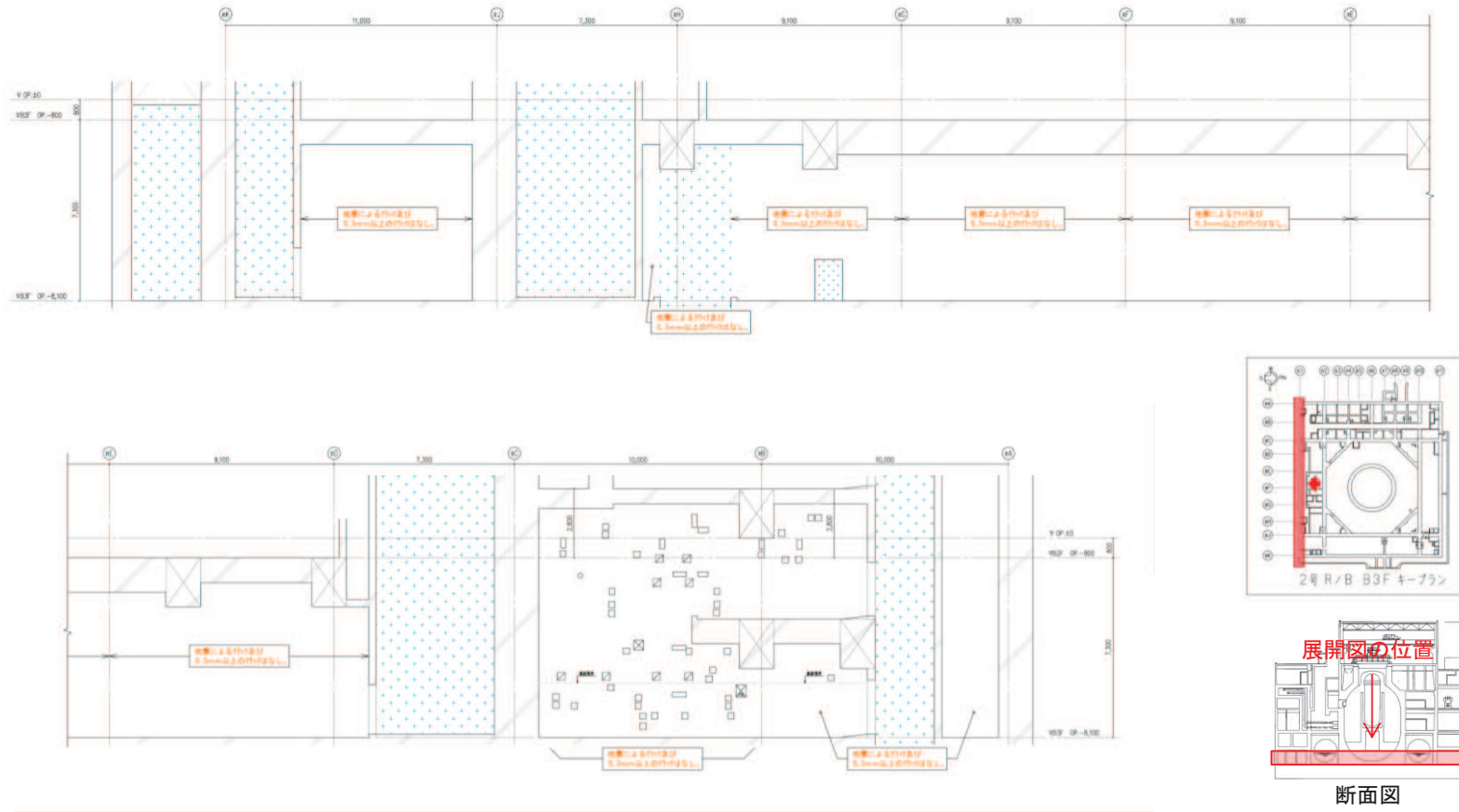
3次元FEM等価線形モデルによる地震応答シミュレーション解析を行い、3.11地震及び4.7地震時の建屋の構造的影響評価を行った。検討結果は以下のとおりである。

- ① 3次元FEM等価線形モデルによるシミュレーション解析結果は、観測記録と概ね整合することを確認した。
- ② 3次元FEM等価線形モデルによるシミュレーション解析に基づき算定したせん断ひずみ分布は耐震壁の点検結果と整合することを確認した。
- ③ 3次元FEM等価線形モデルによるひずみ分布の値や基礎版の面外応力の値、オペフロ上部の3次元FEM非線形解析（別途実施、別紙6参照）により、建屋の鉄筋が弾性範囲であることを確認した。従って、原子炉建屋の鉄筋が損傷を受けていないことを確認した。

[参考文献]

- (1) 女川原子力発電所における平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析及び津波の調査結果に係わる報告書
平成 23 年 4 月 7 日 東北電力株式会社
- (2) 女川原子力発電所における 2011 年 4 月 7 日宮城県沖の地震時に取得された地震観測記録の分析結果に係わる報告書
平成 23 年 4 月 25 日 東北電力株式会社
- (3) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (日本建築学会, 1999)

別紙 5-1 3次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析
と点検結果の比較



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 1 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 R1 通り)

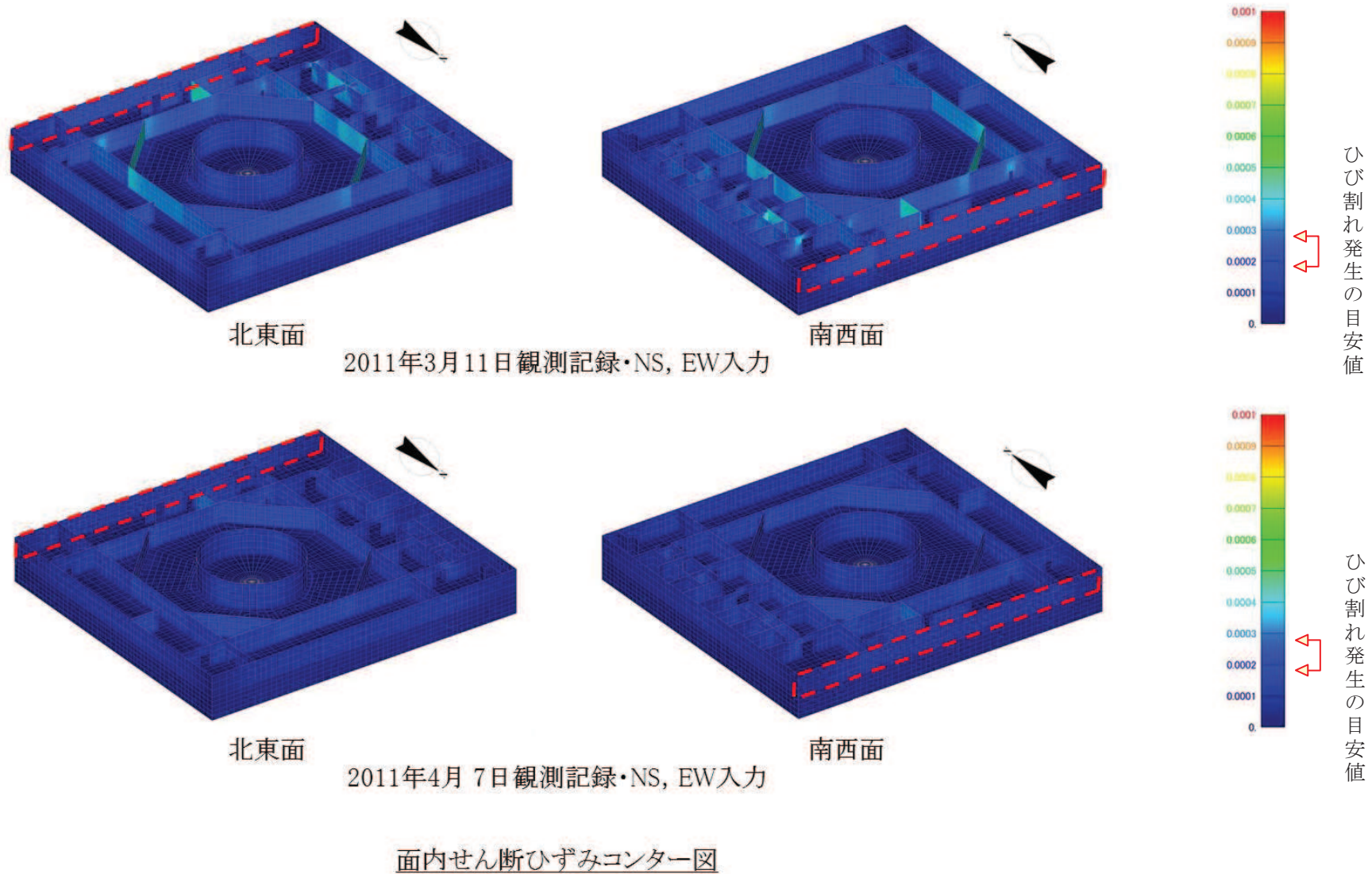
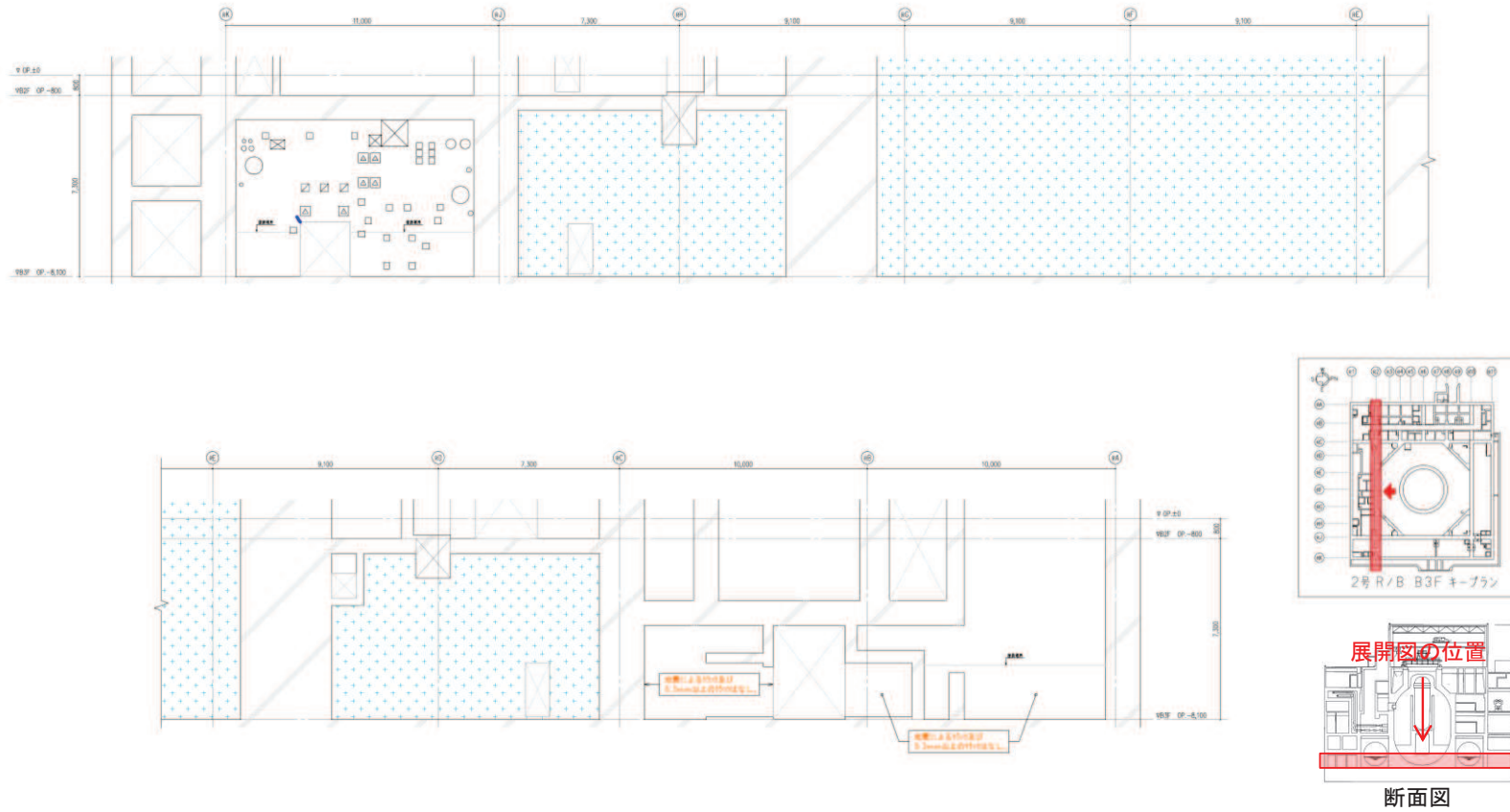
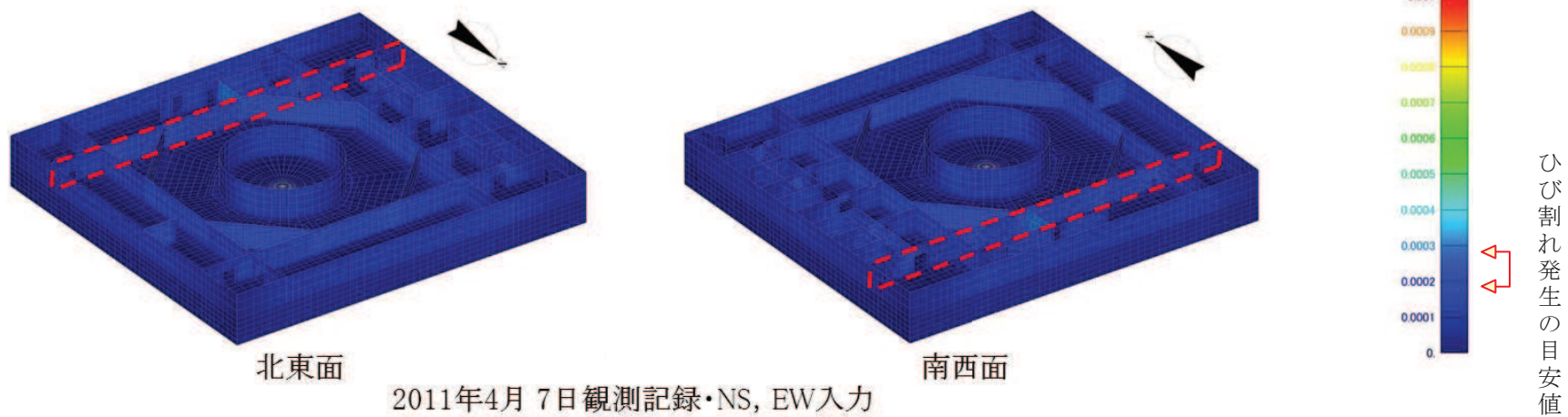
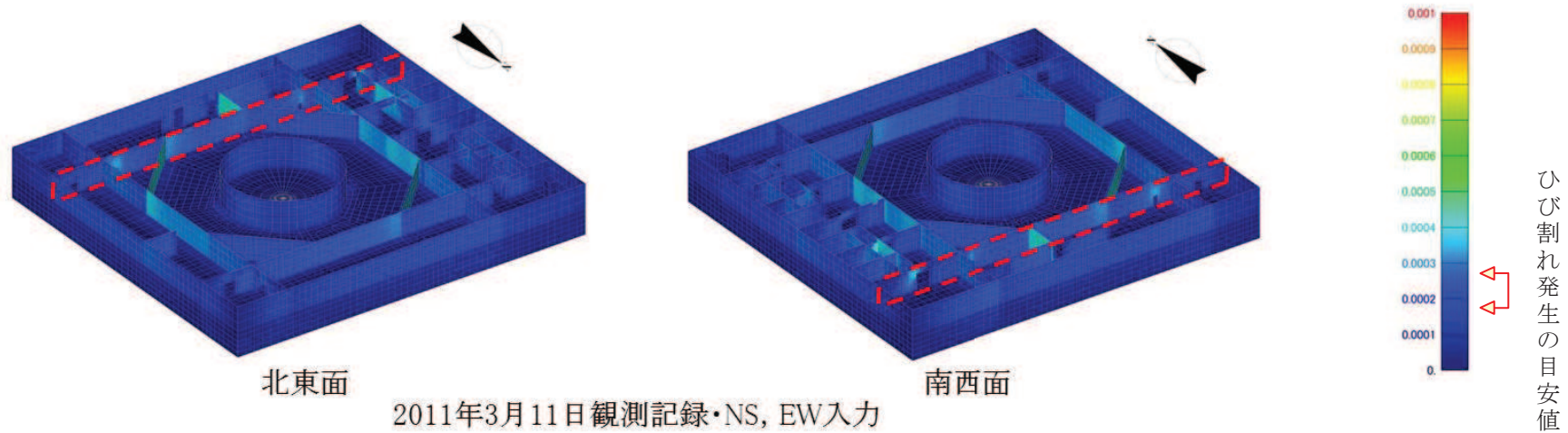


図 1 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 R1 通り)



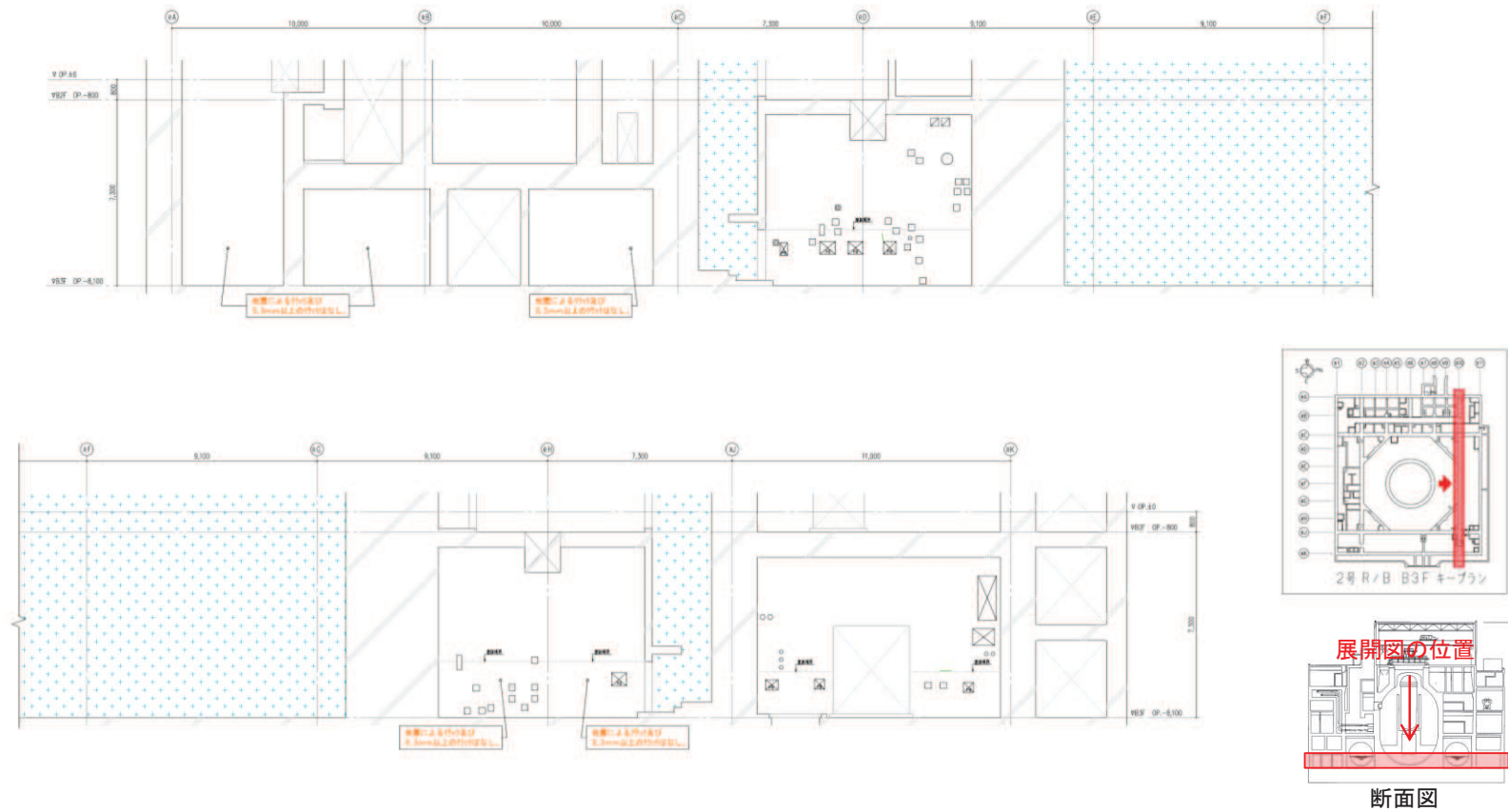
地震による		地震以外		
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上	はくらく
	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 2 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 R2 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 2 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 R2 通り)



地震による		地震以外		
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上	はくらく
	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 3 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 R10 通り)

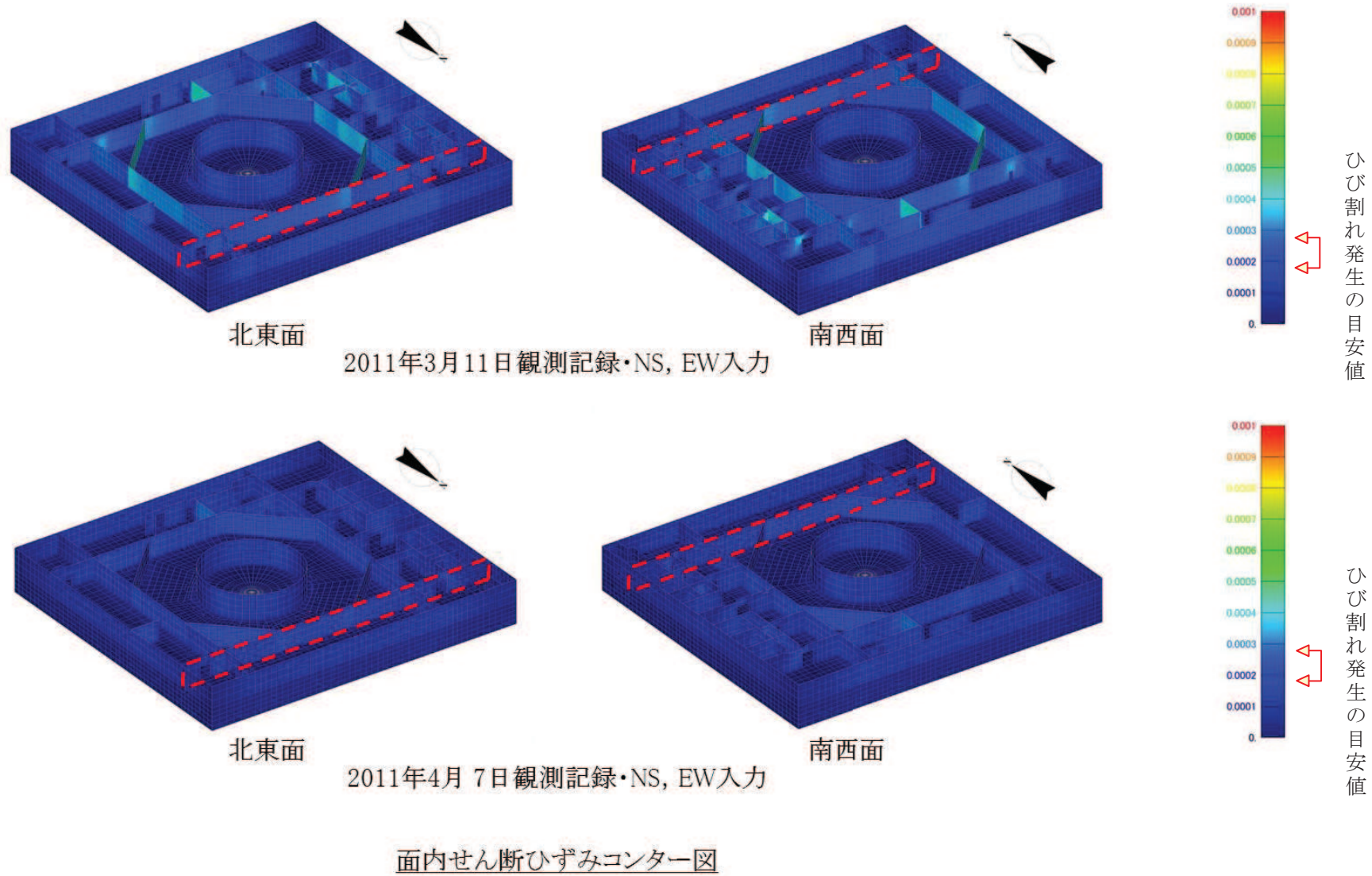
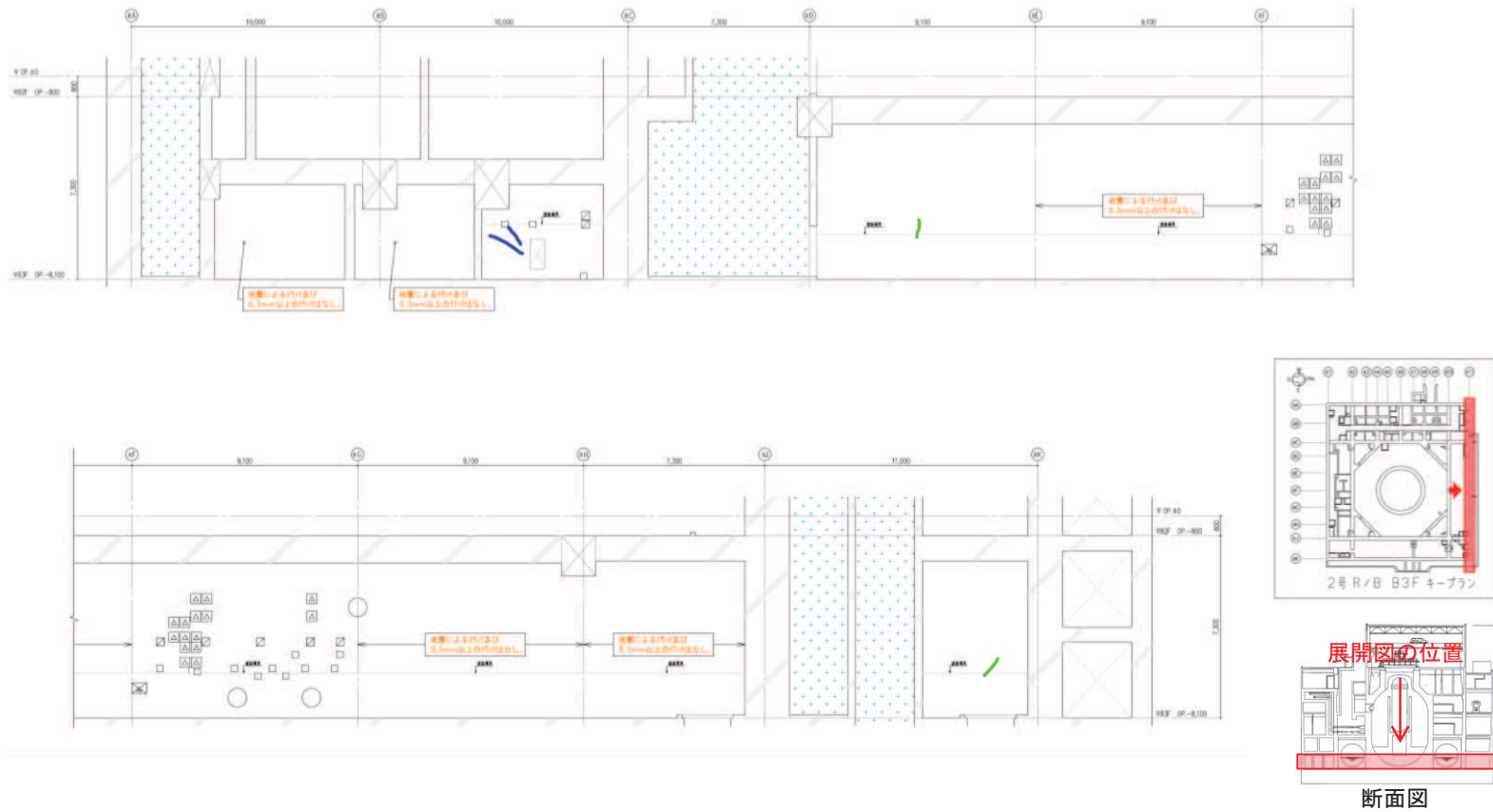


図 3 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 R10 通り)



地震による		地震以外		
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上	はくらく
	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 4 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 R11 通り)

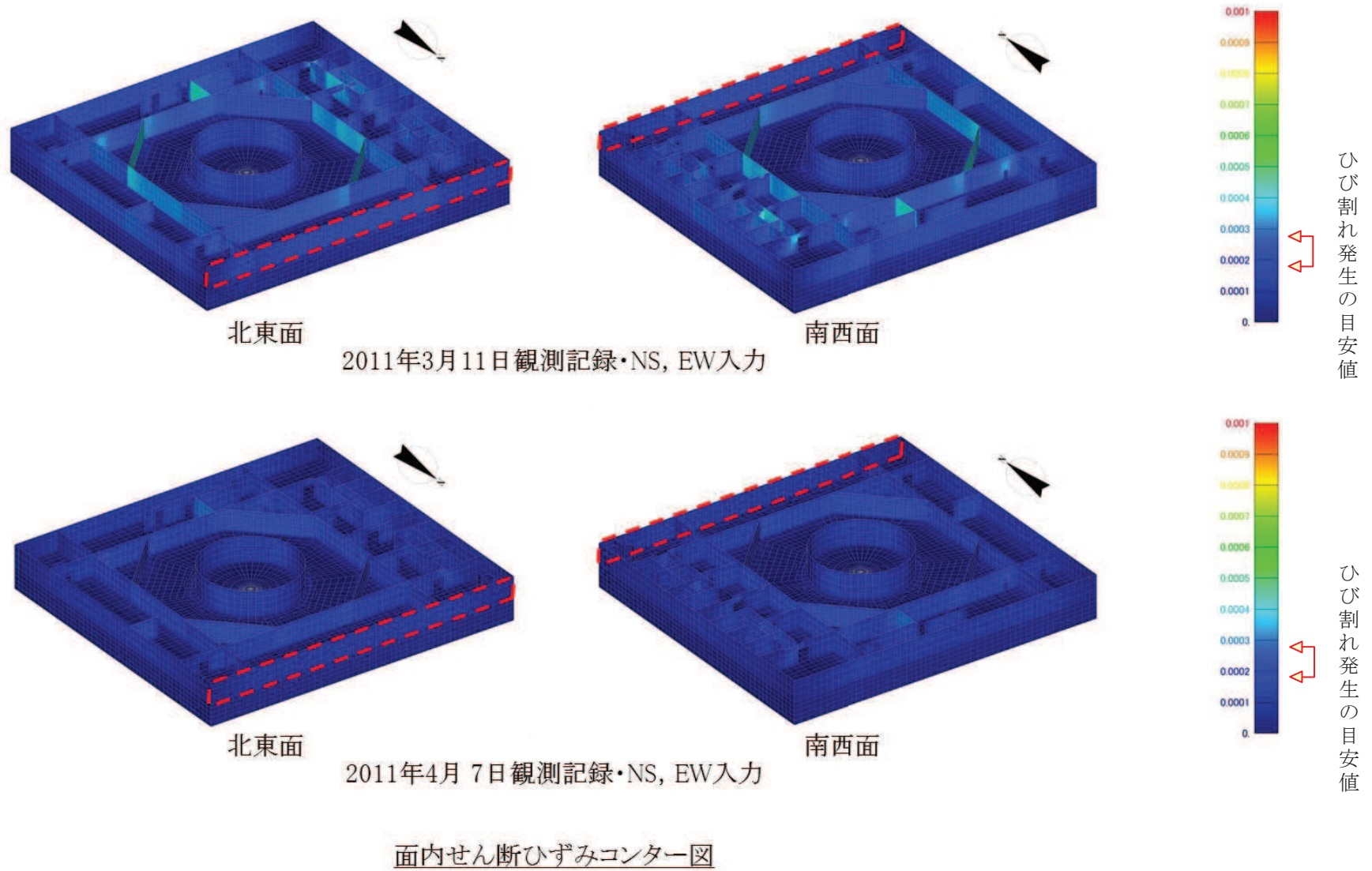
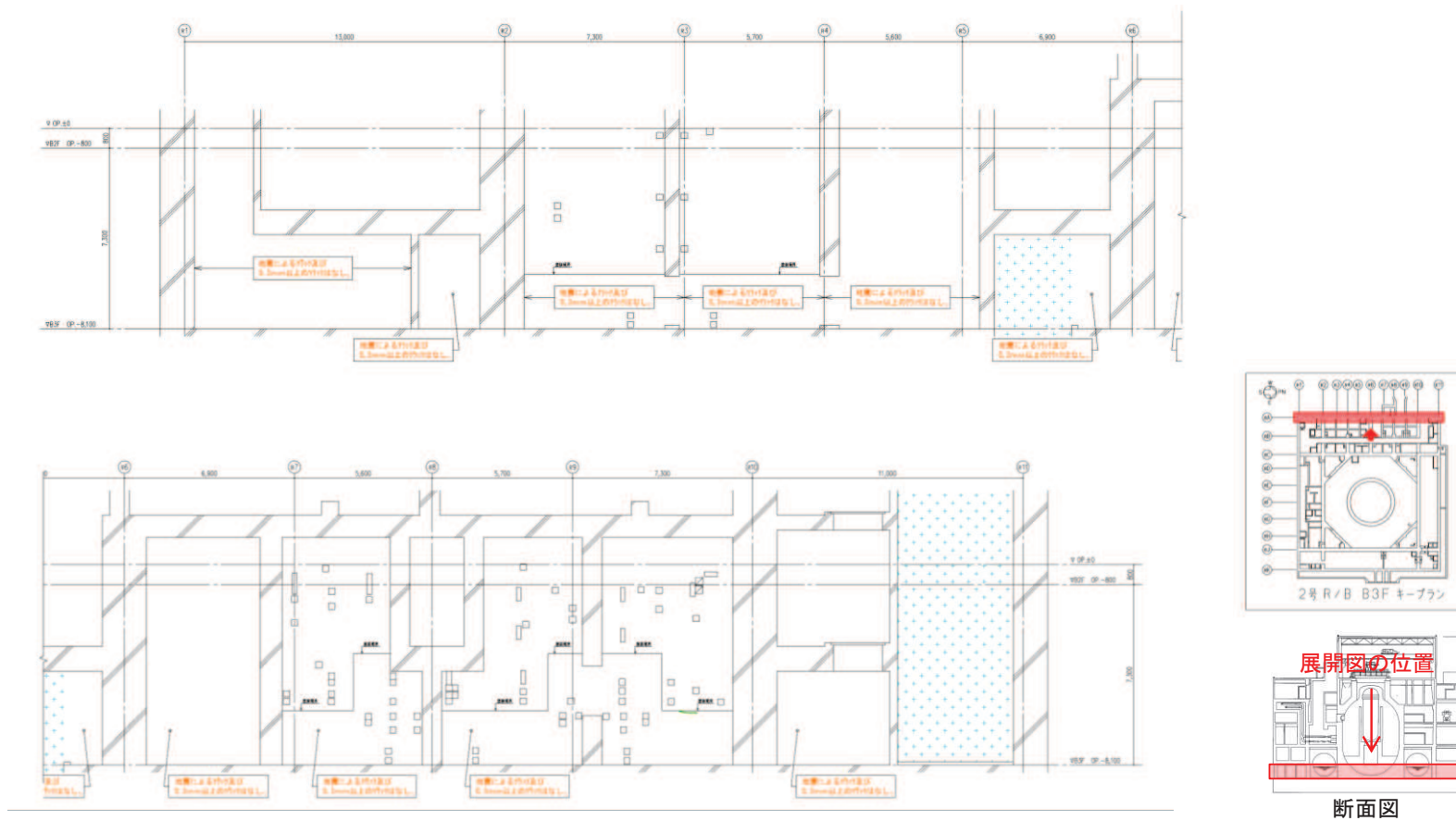


図 4 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 R11 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 5 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 RA 通り)

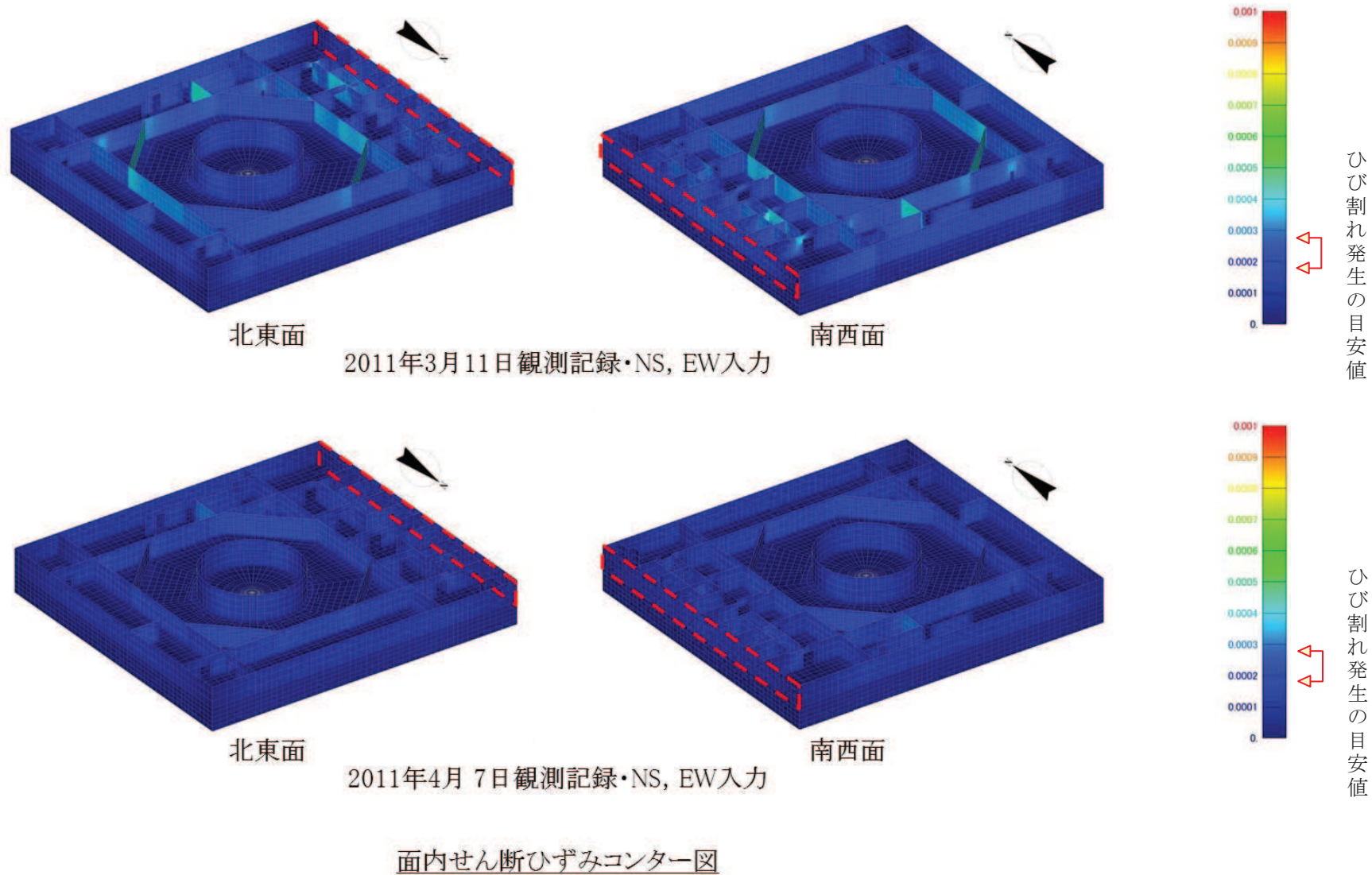
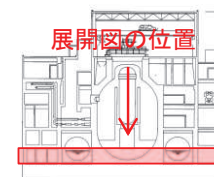
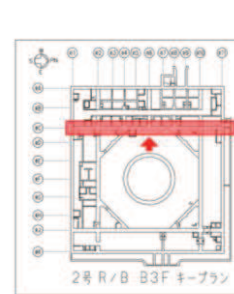
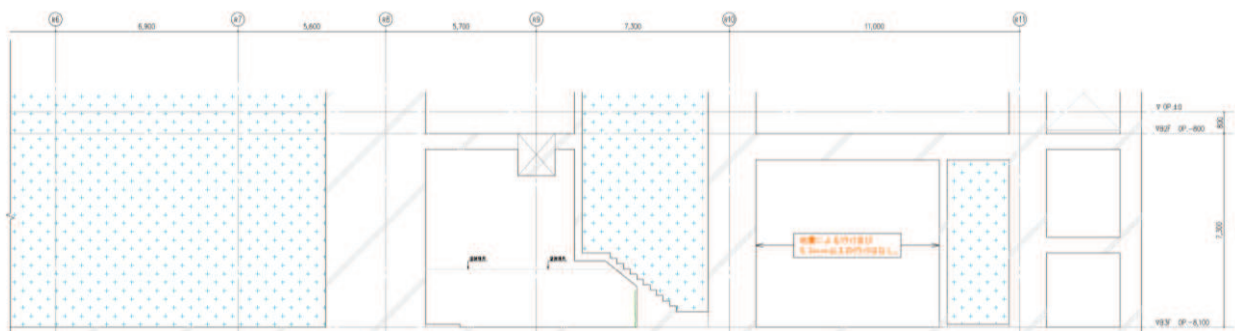
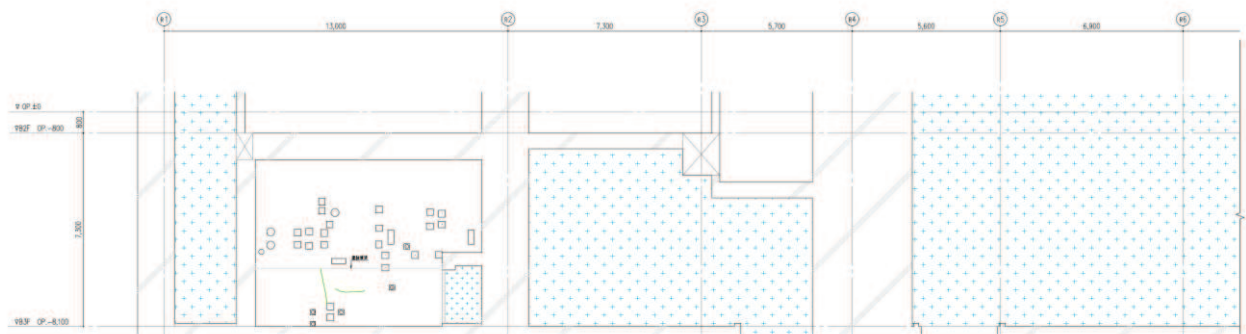


図 5 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 RA 通り)



断面図

地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	はくらく	
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 6 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 RC 通り)

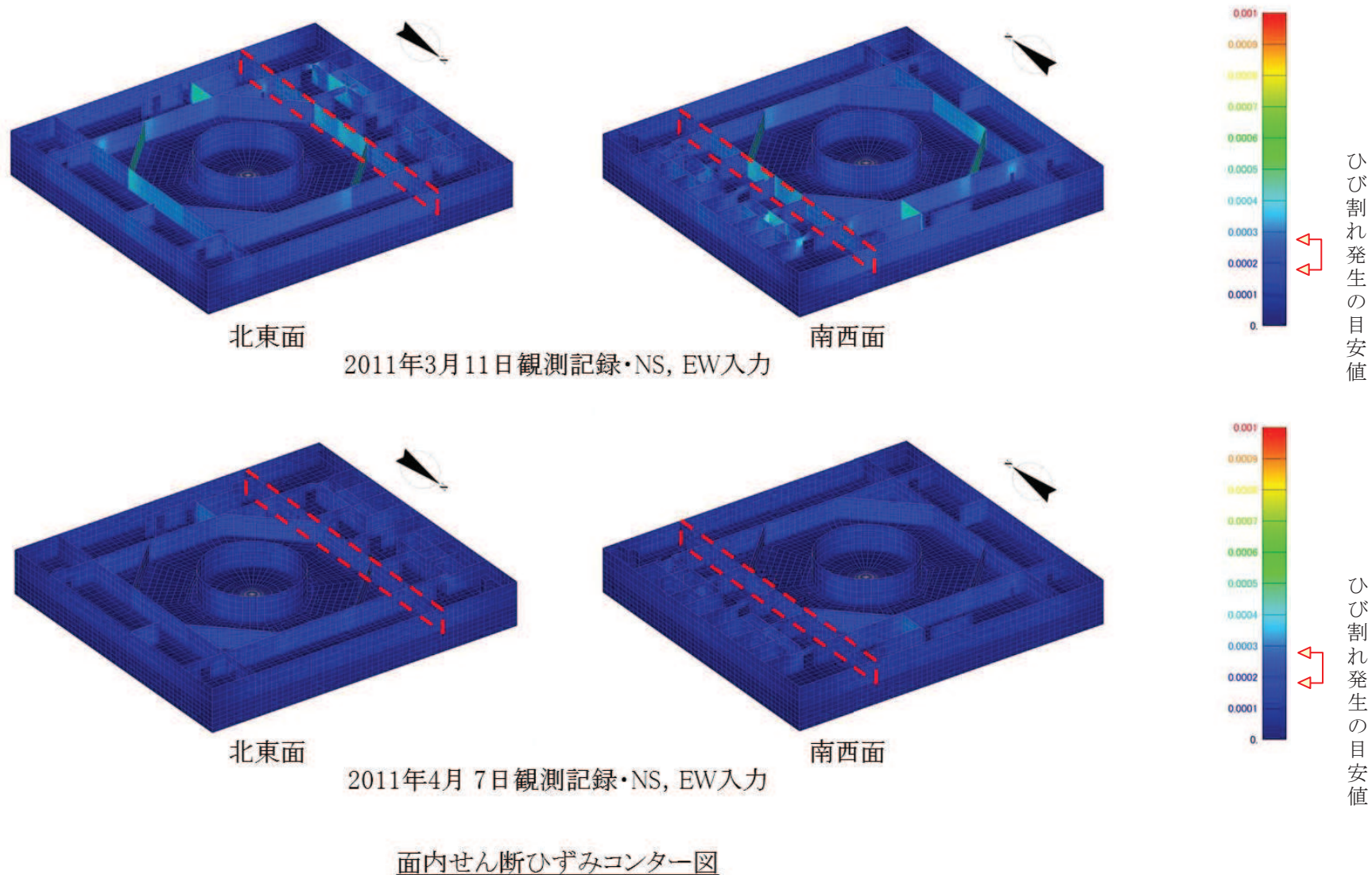
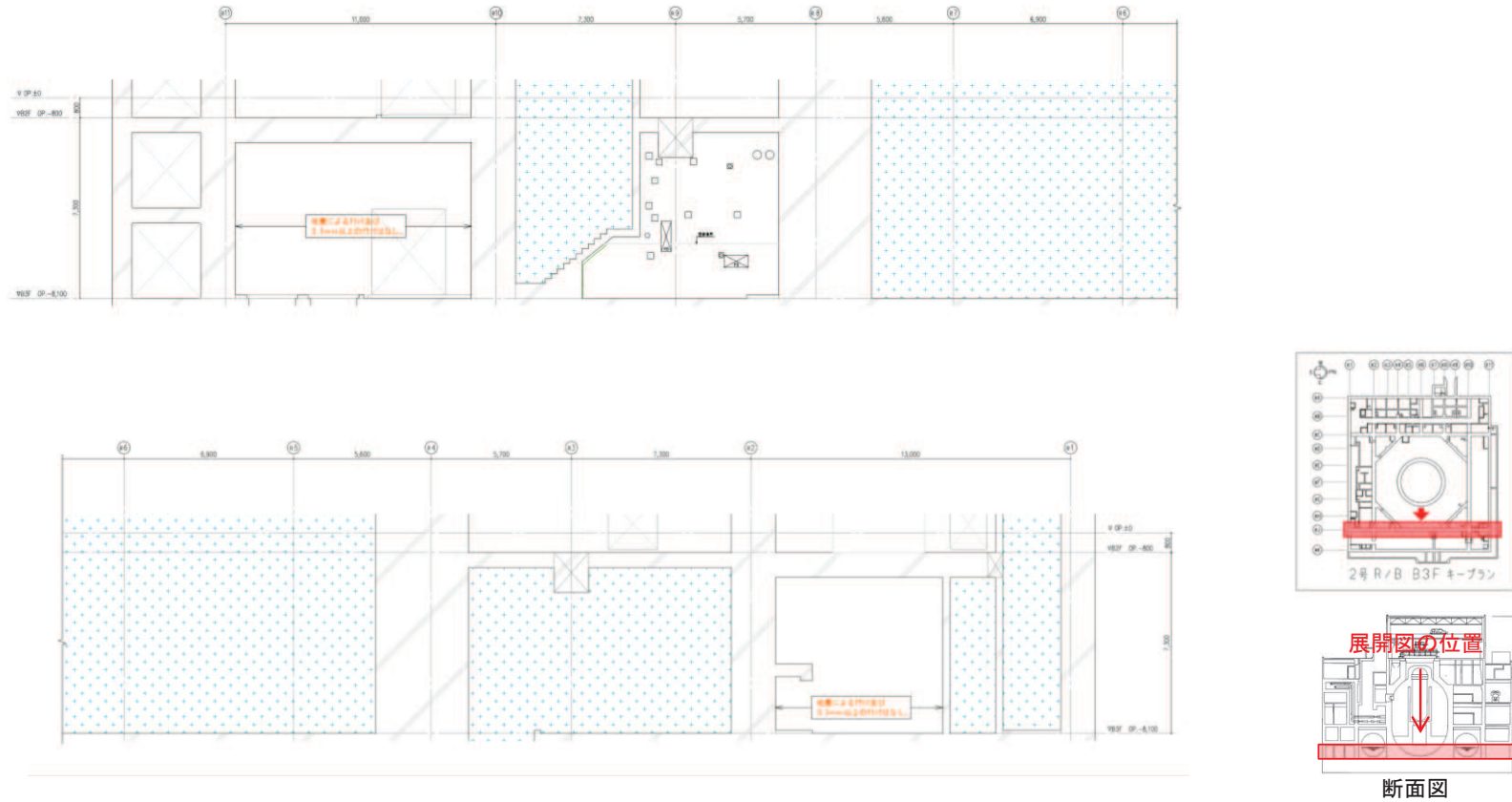


図 6 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 RC 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	はくらく	
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 7 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 RJ 通り)

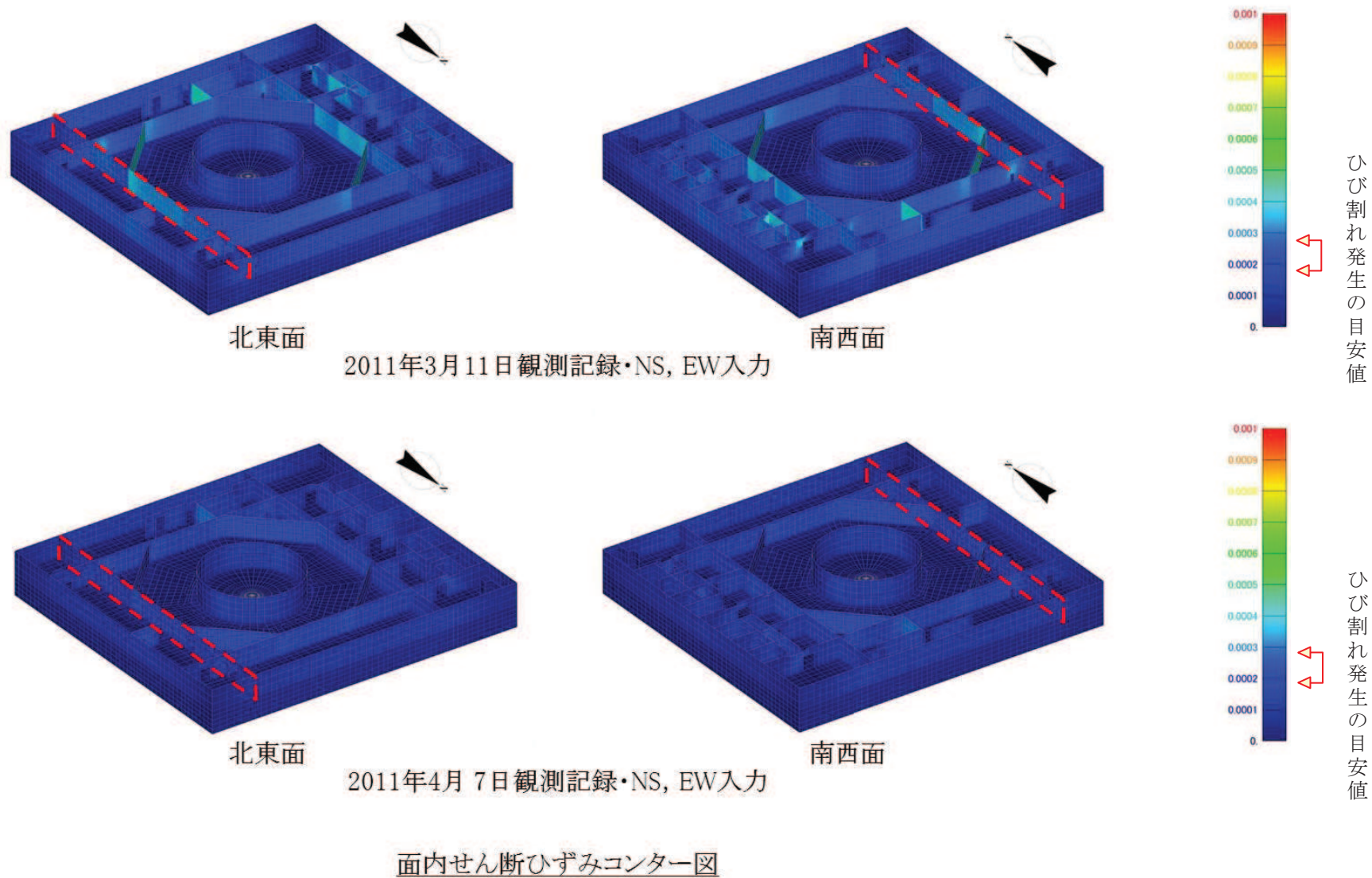
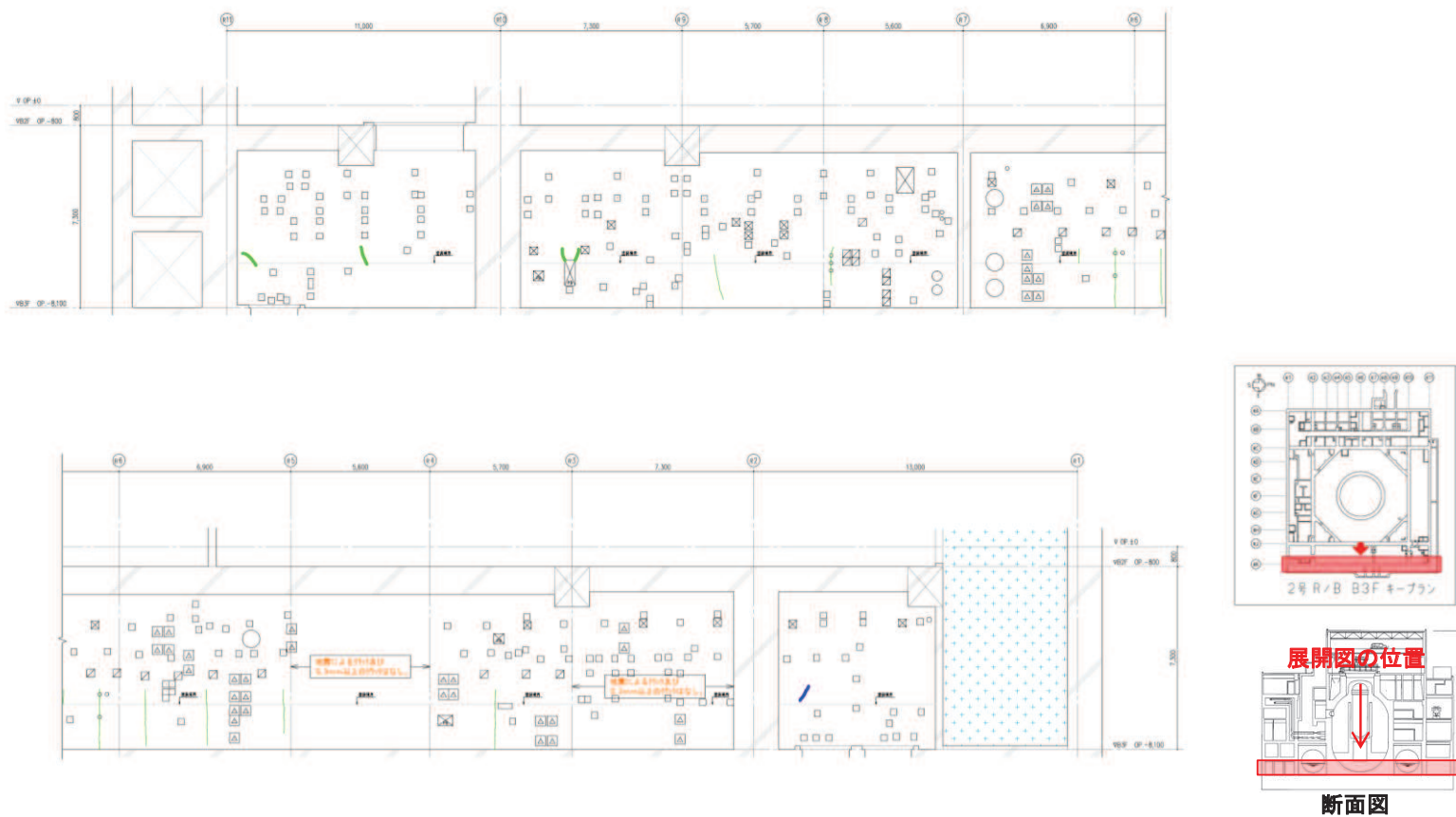
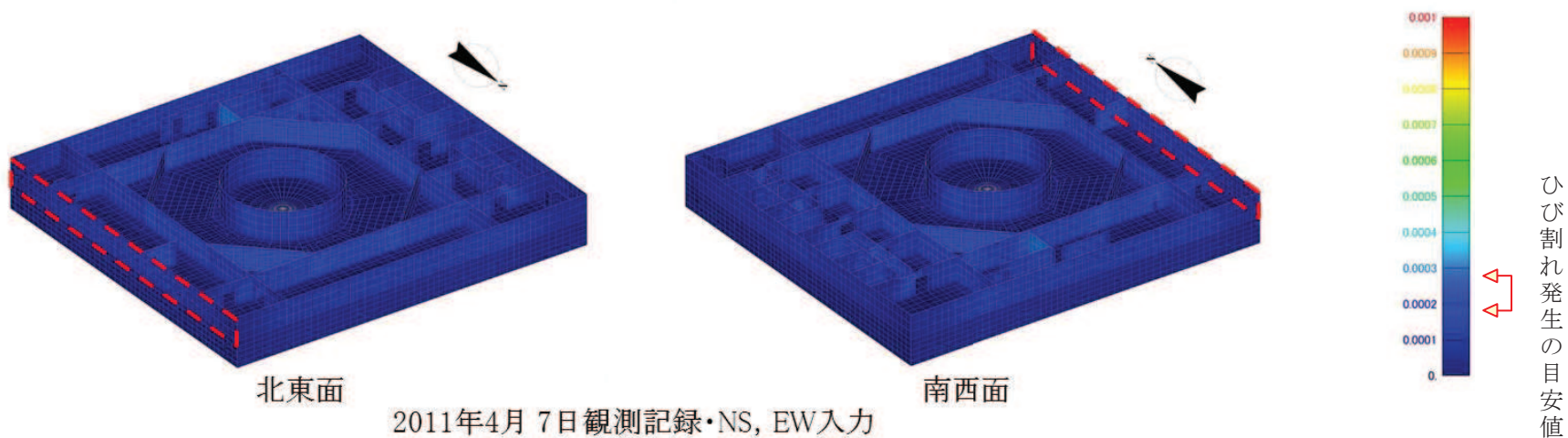
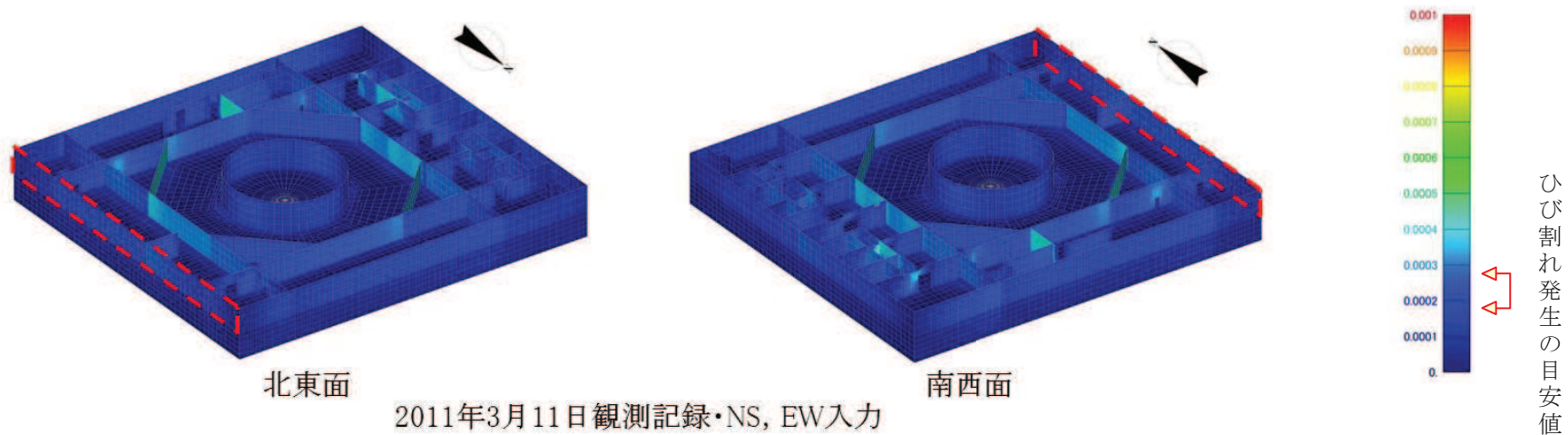


図 7 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 RJ 通り)



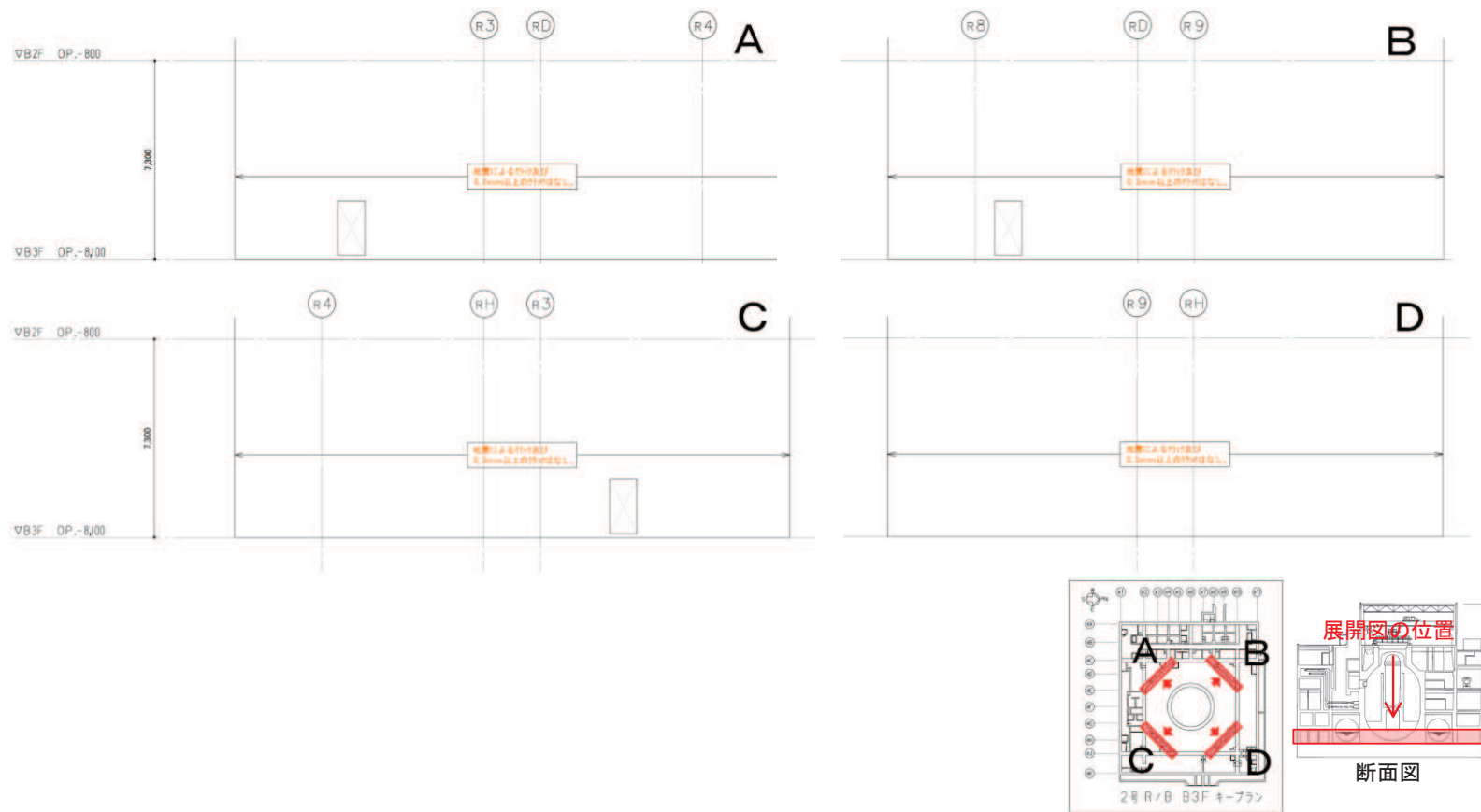
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 8 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 RK 通り)



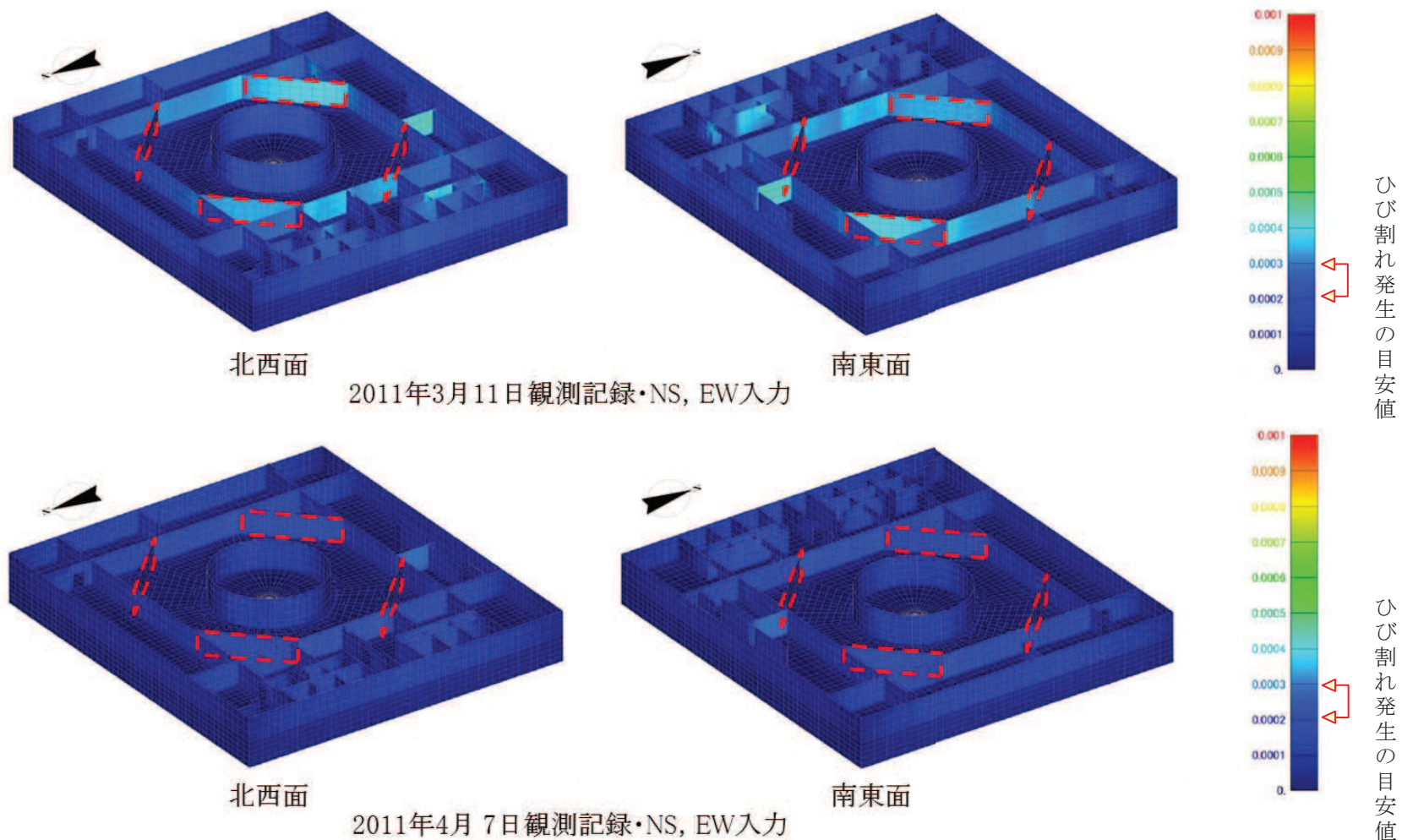
面内せん断ひずみコンター図

図 8 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下 3 階 RK 通り)



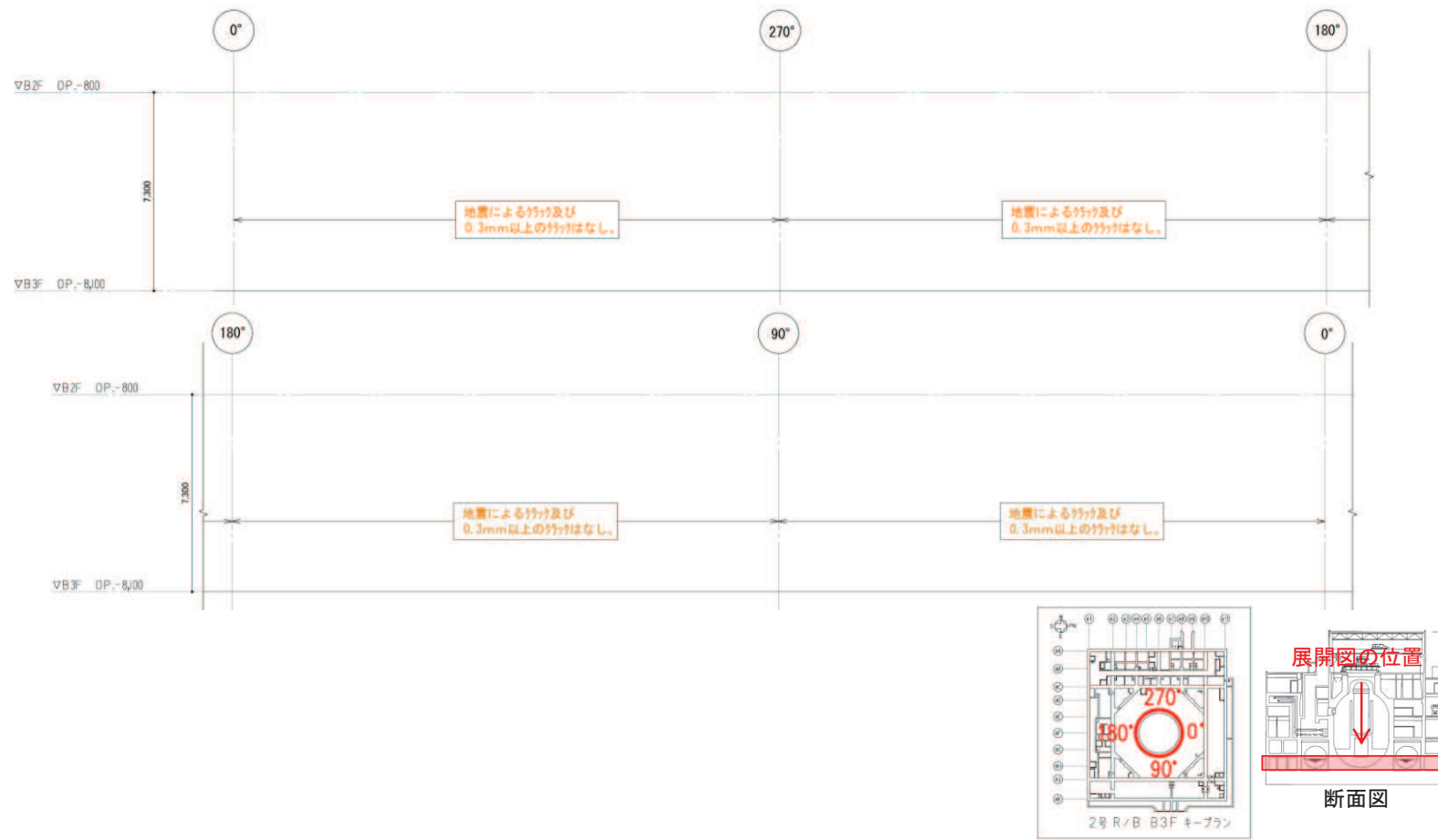
地震による		地震以外		
—	0.3mm未満	—	0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
—	0.3mm以上～1.0mm未満	—	1.0mm以上	はくらく
—	1.0mm以上	+		確認不能の範囲

図 9 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 火打ち壁)



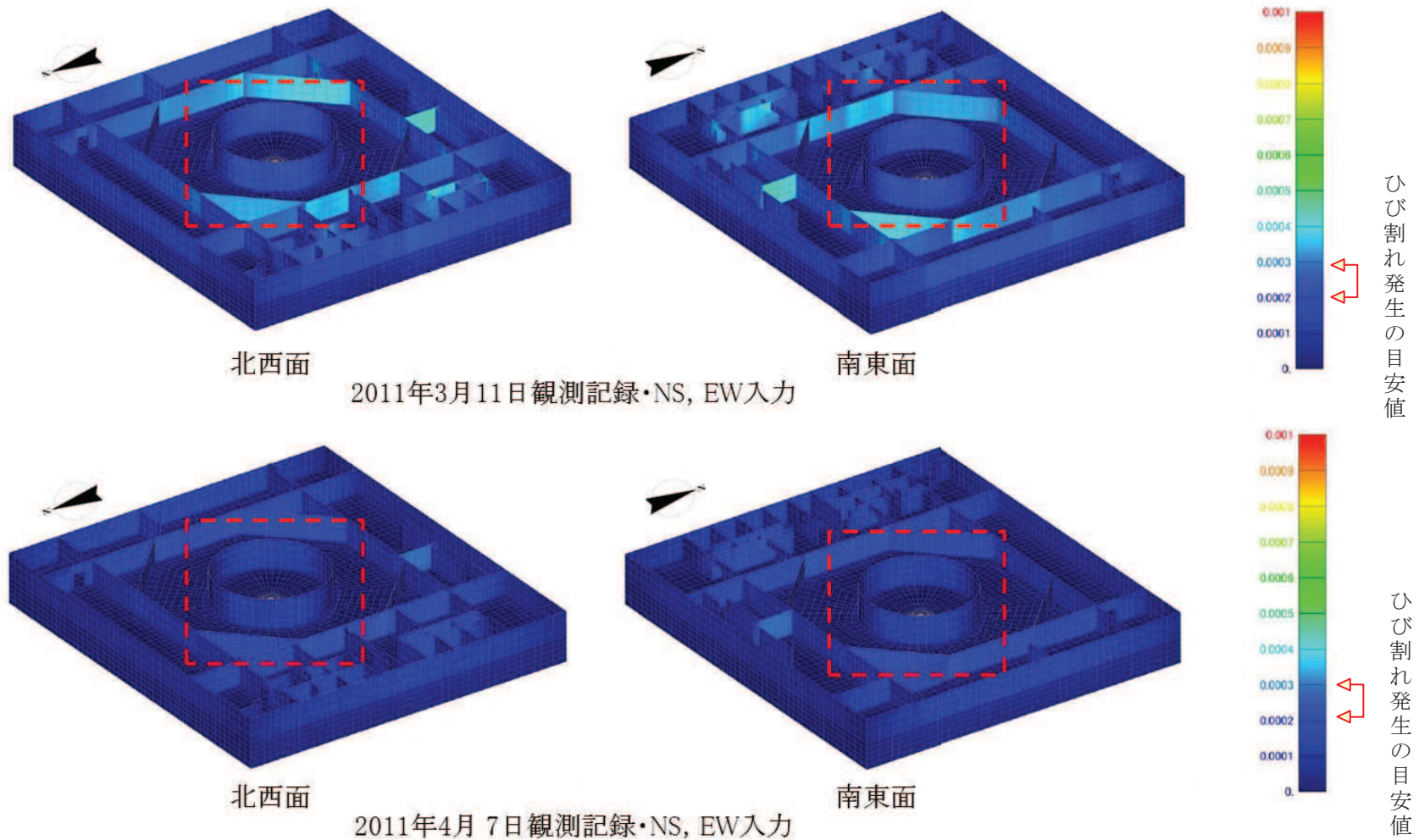
面内せん断ひずみコンター図

図 9 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 火打ち壁)



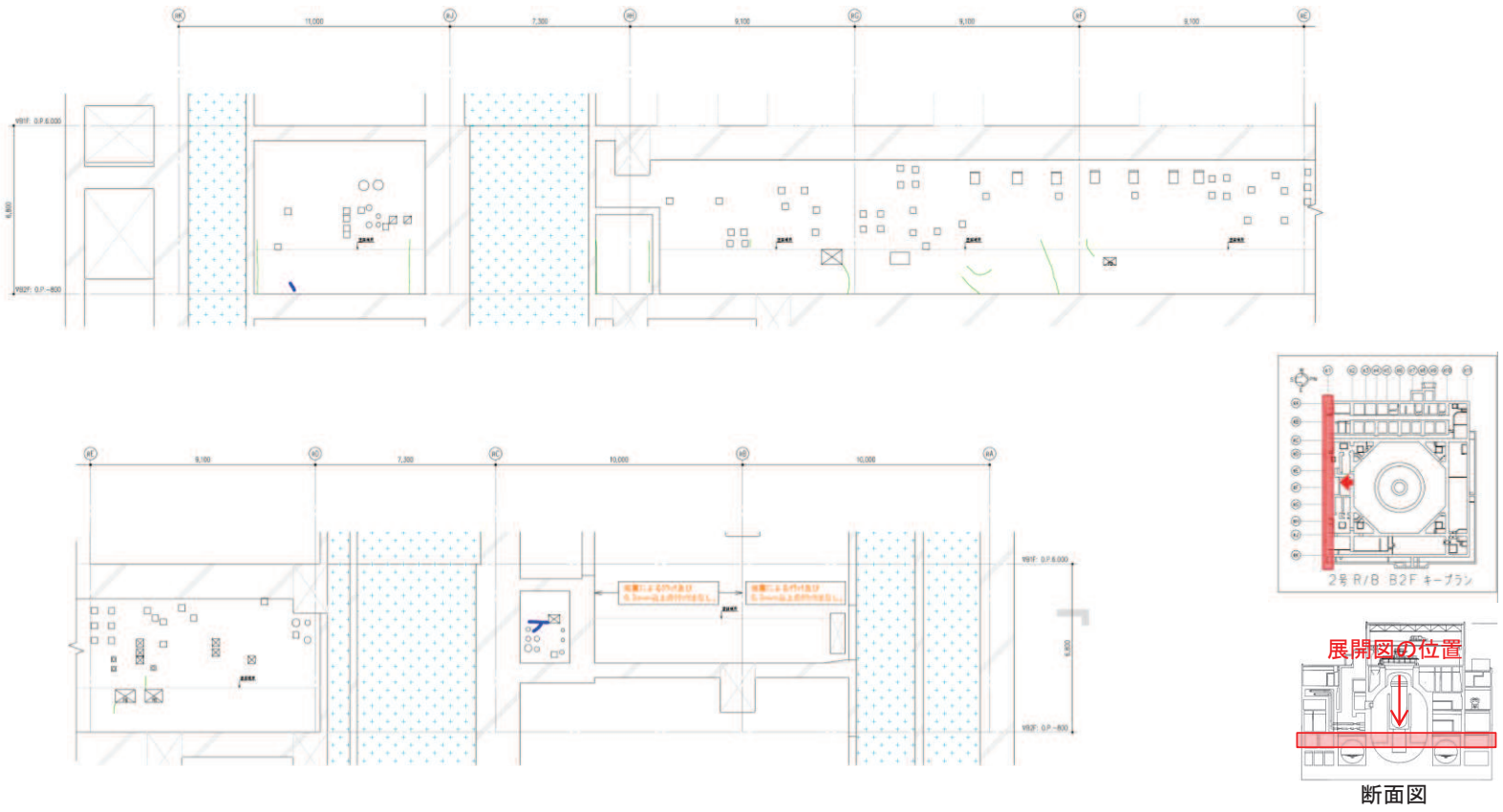
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 10 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 3 階 シェル壁)



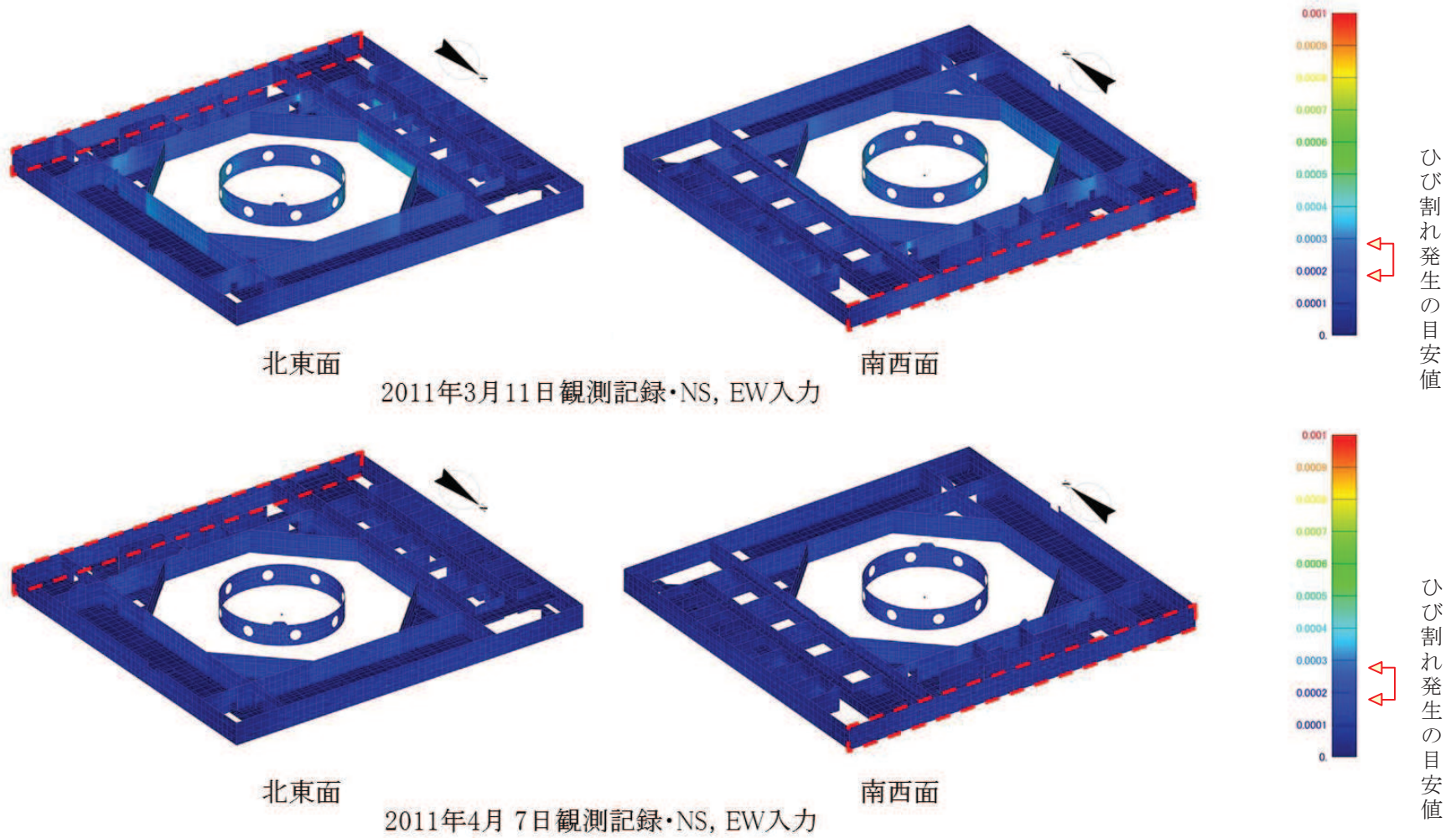
面内せん断ひずみコンター図

図 10 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下3階 シェル壁)



地震による		地震以外		
	0.3mm未満			幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	はくらく
	1.0mm以上		1.0mm以上	確認不能の範囲

図 11 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下2階 R1 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 11 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 R1 通り)

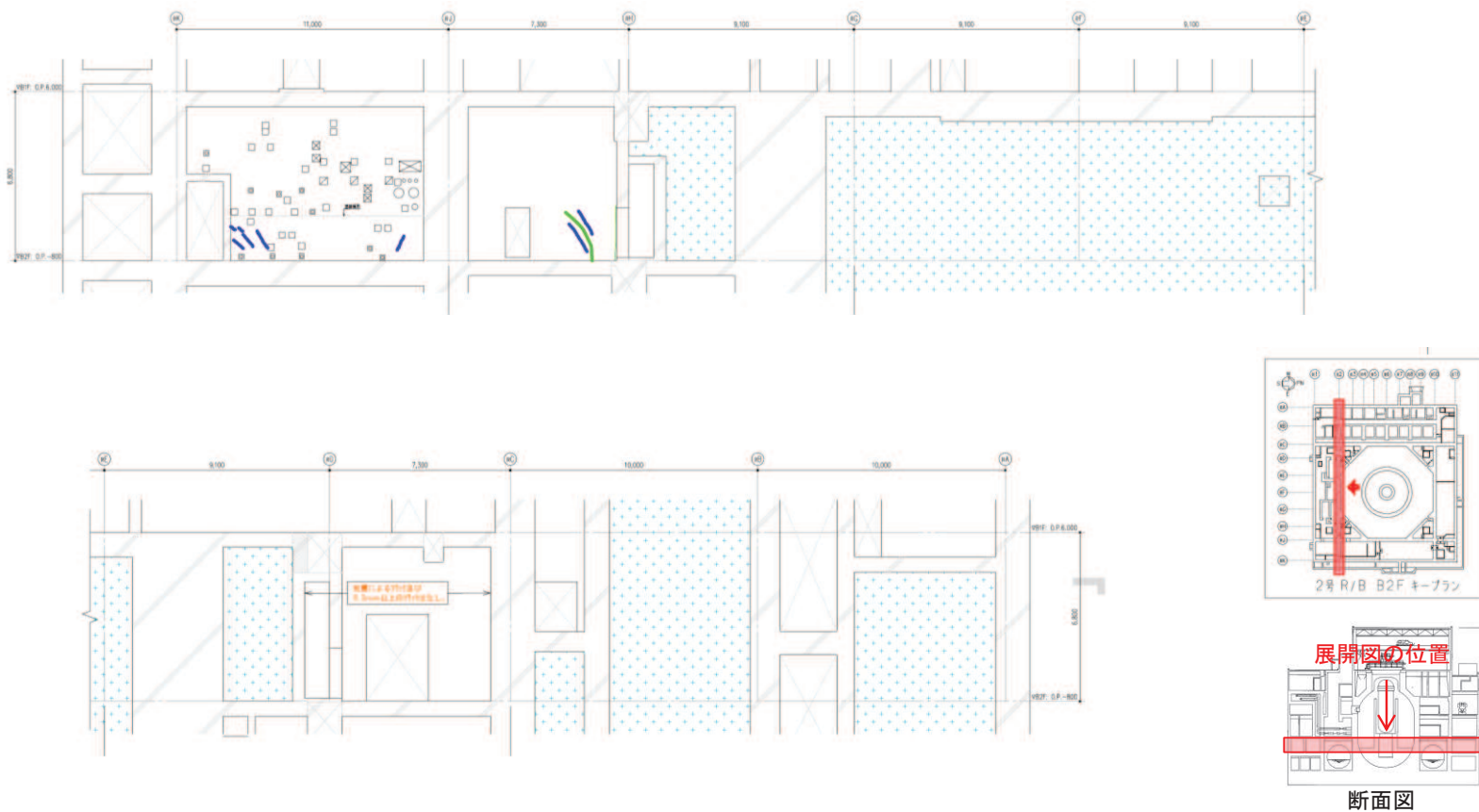
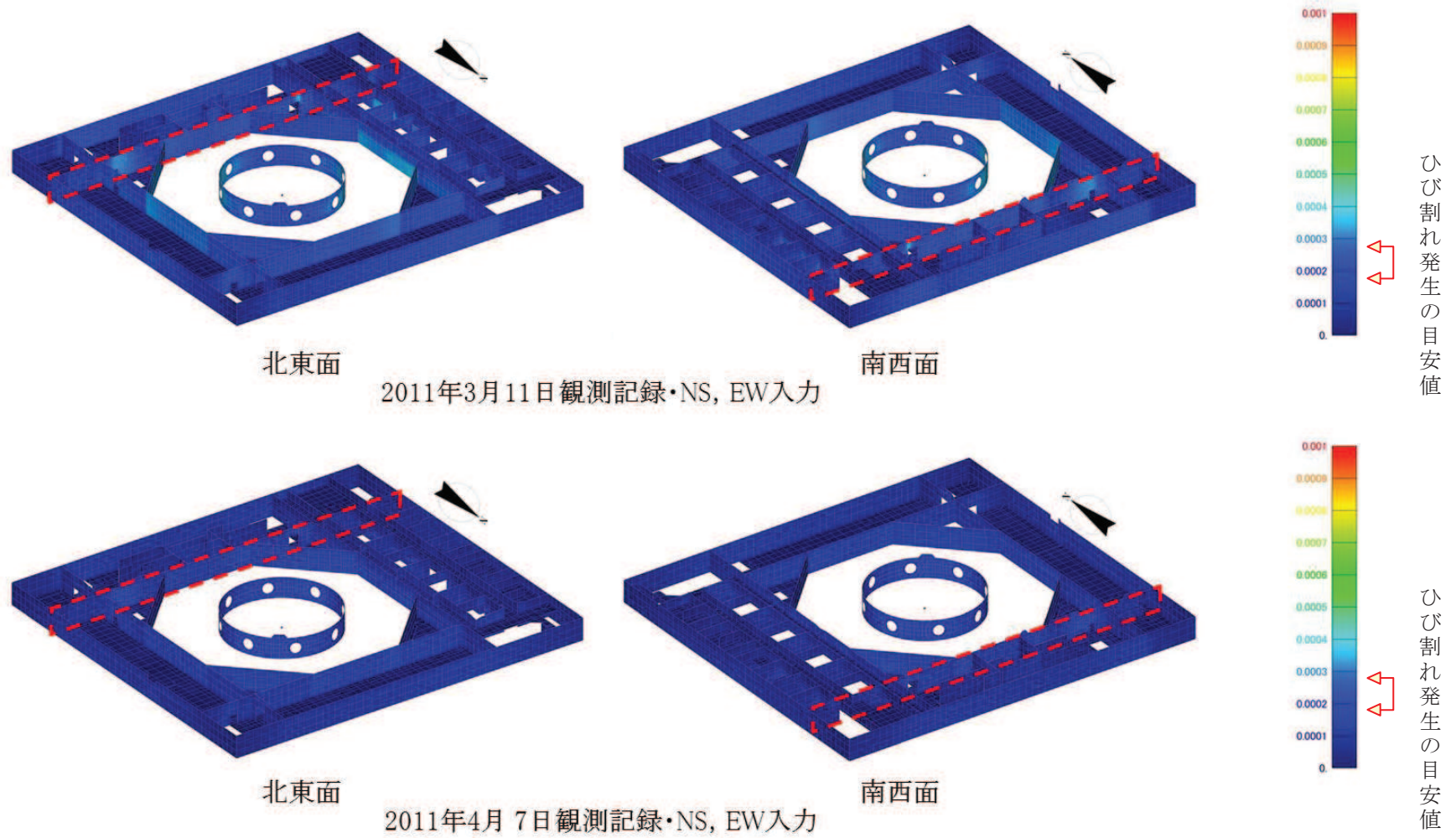
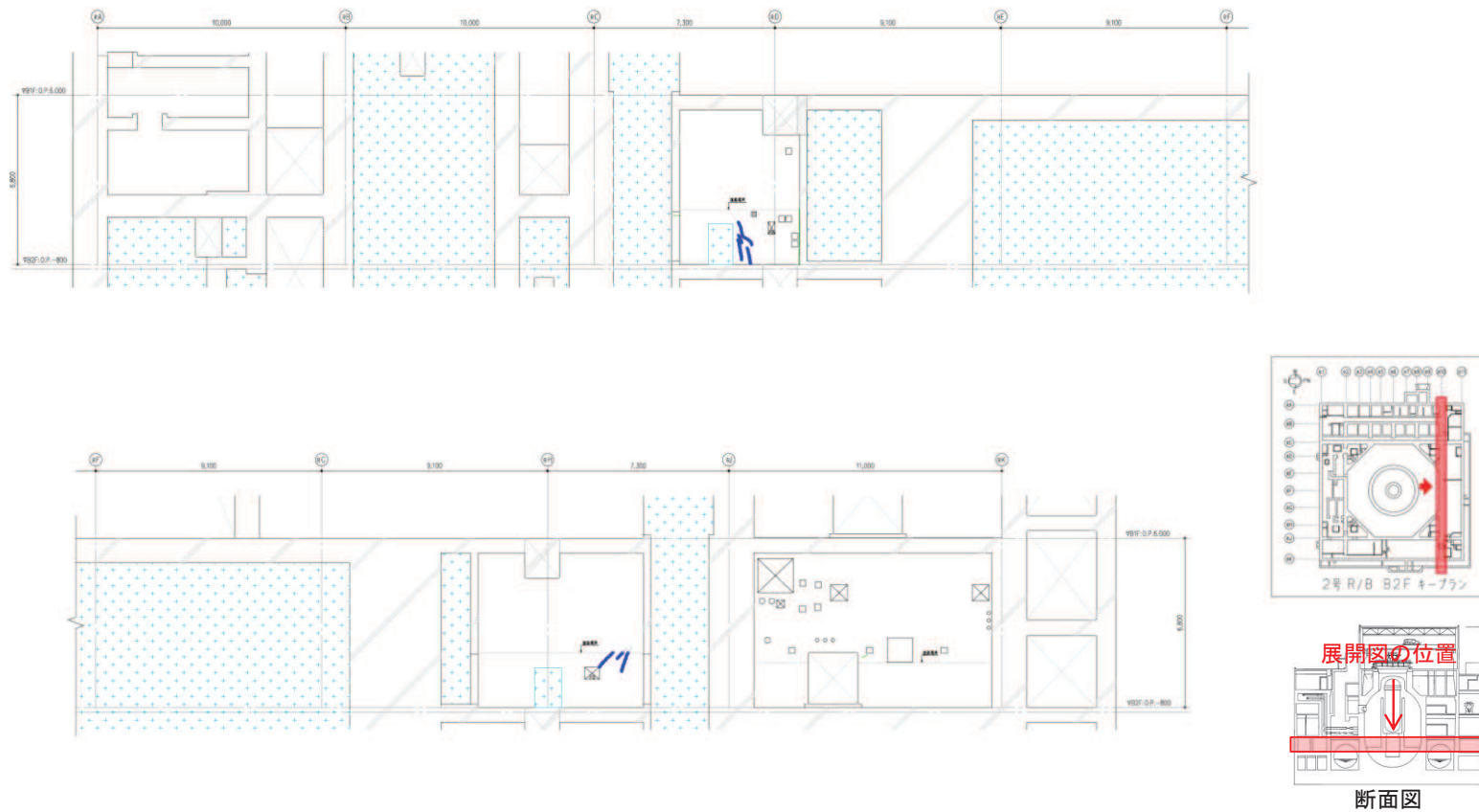


図 12 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 2 階 R2 通り)



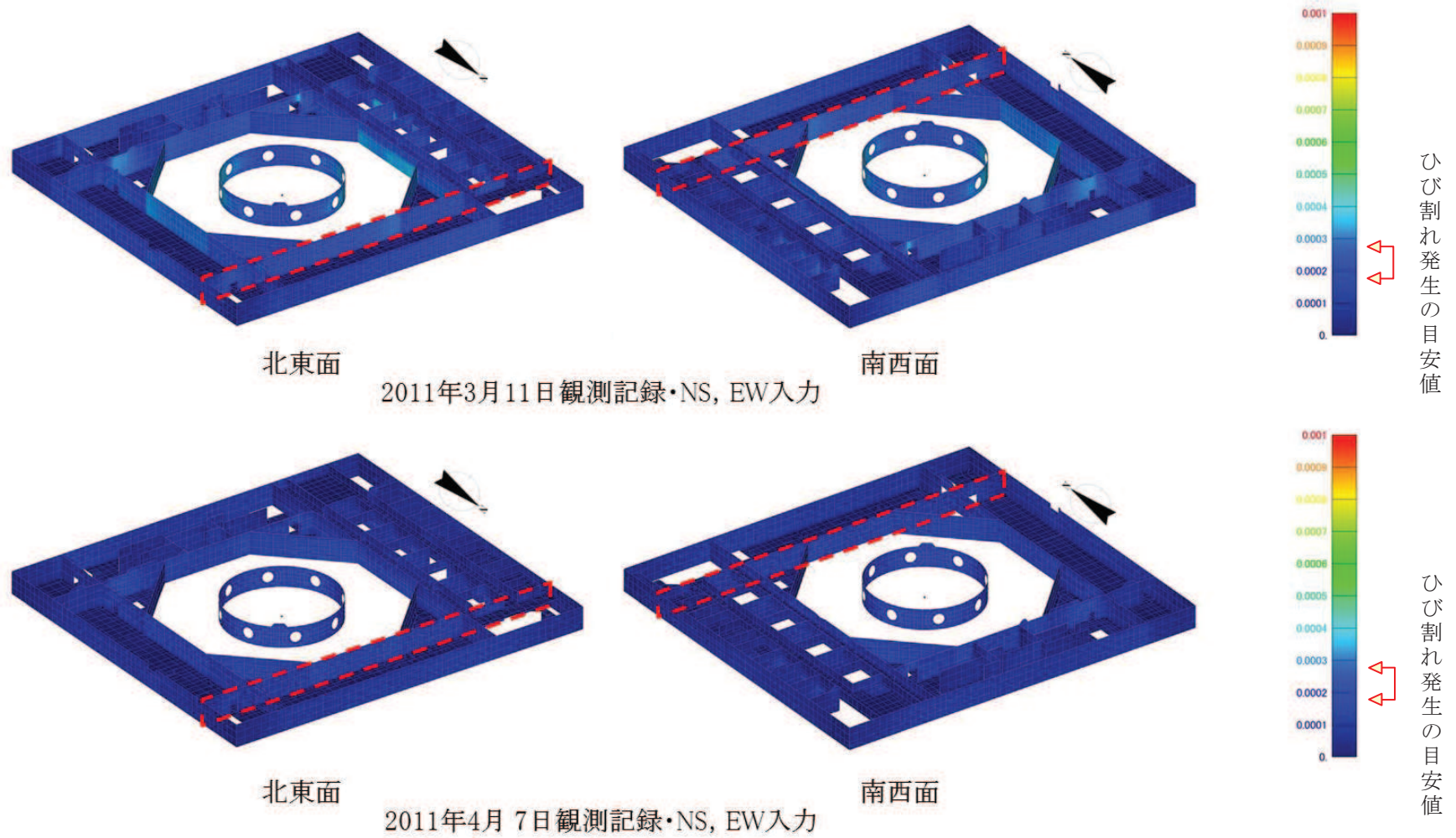
面内せん断ひずみコンター図

図 12 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 R2 通り)



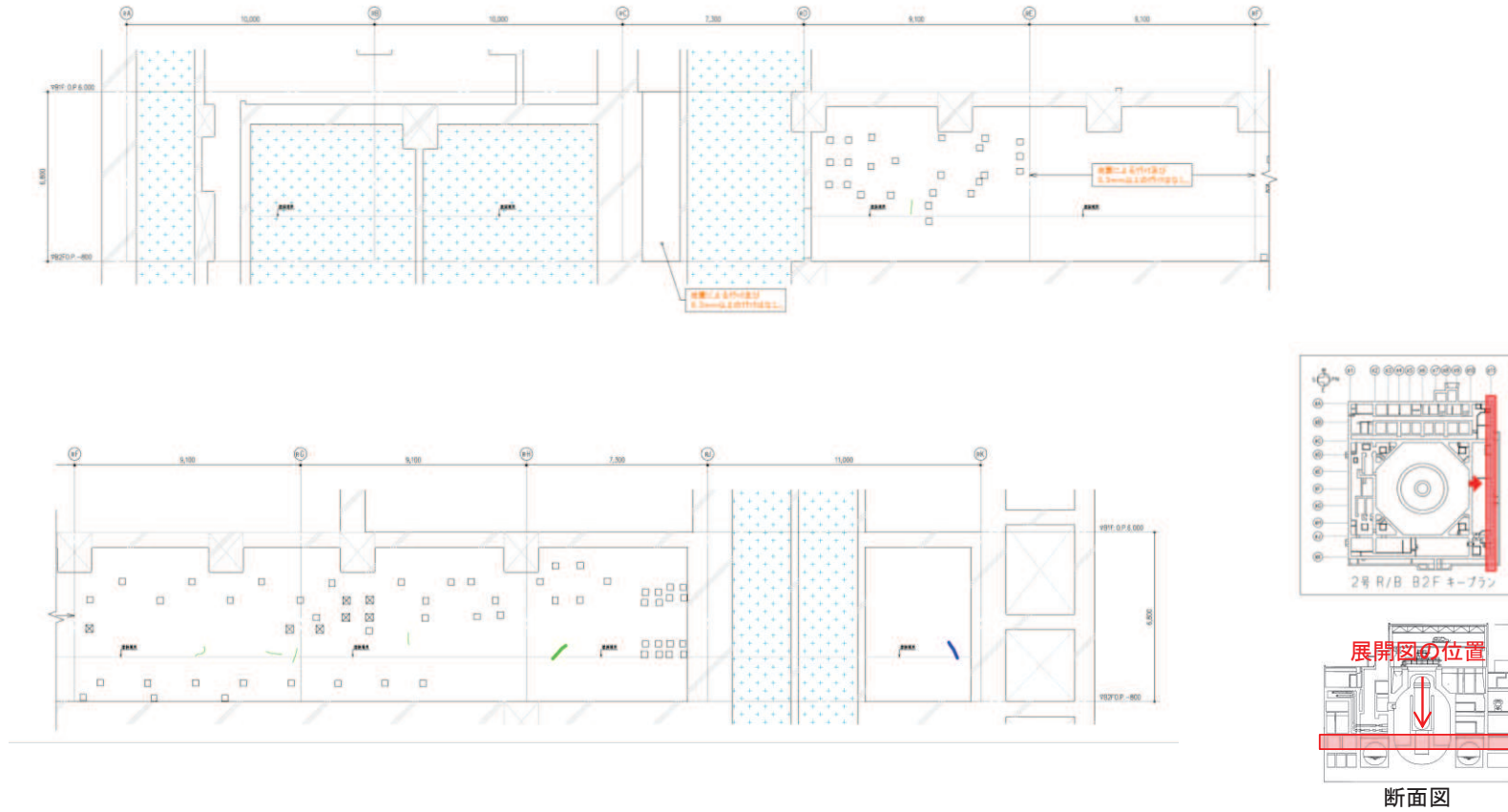
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 13 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 2 階 R10 通り)



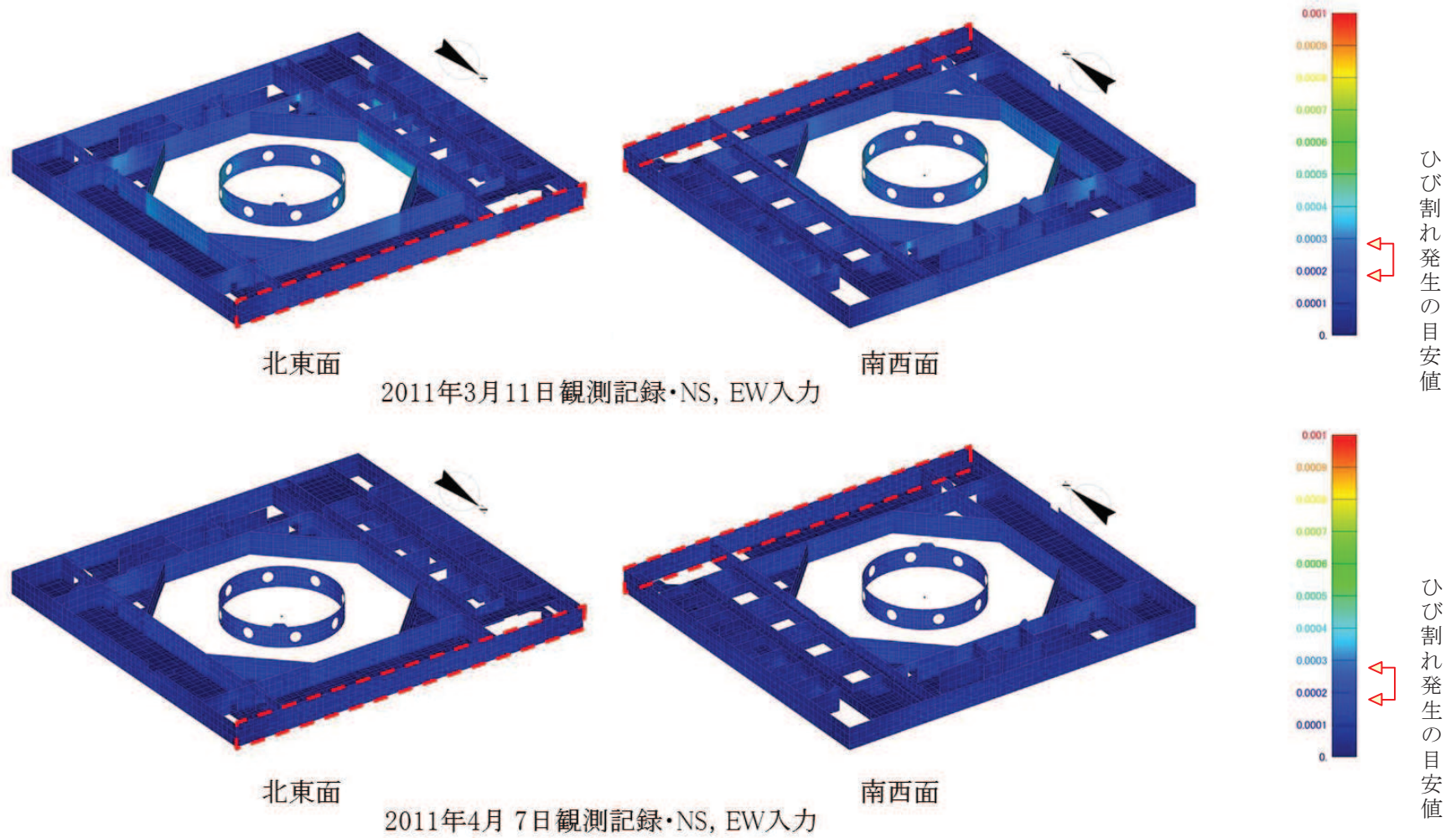
面内せん断ひずみコンター図

図 13 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 R10 通り)



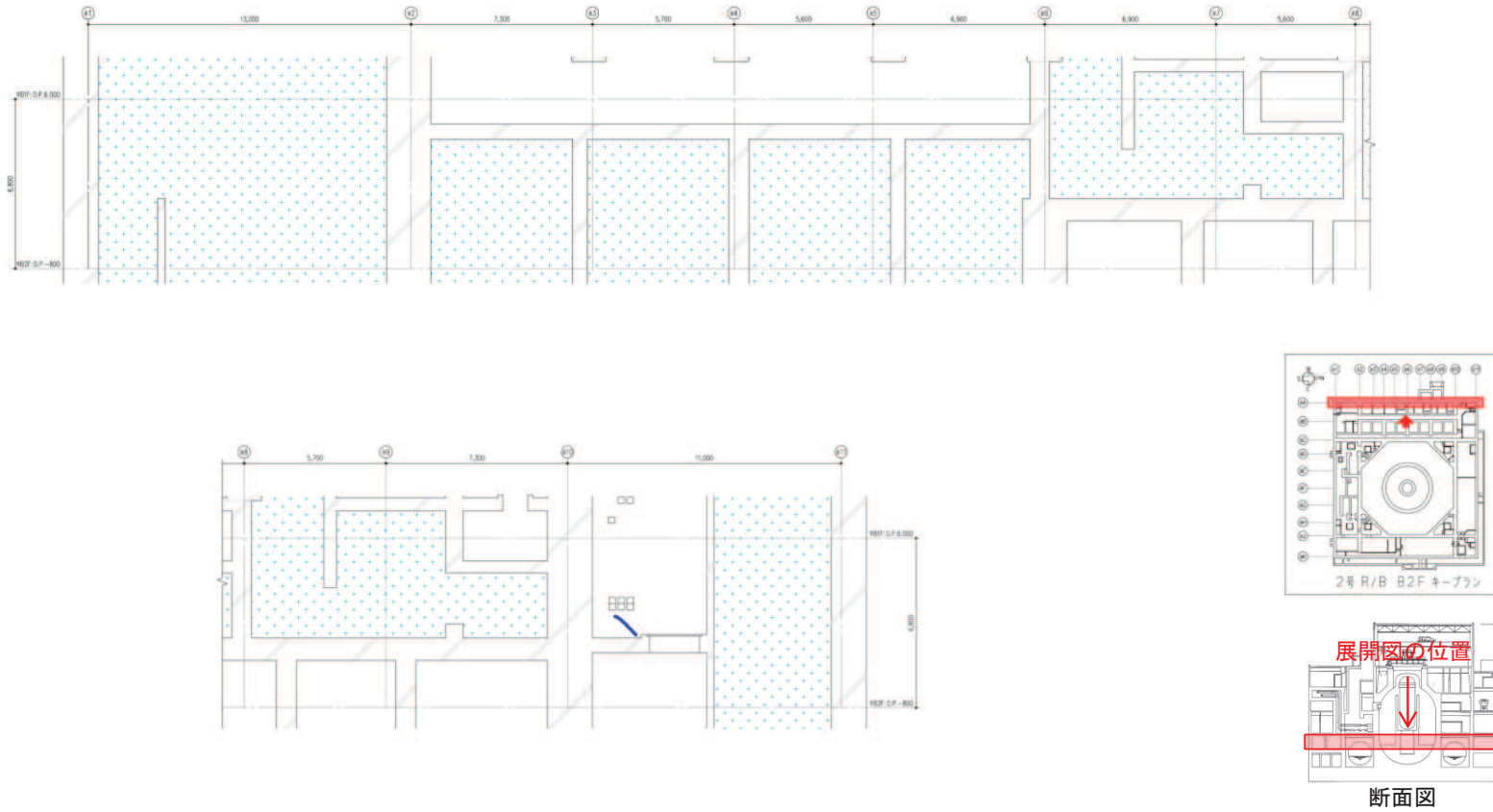
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 14 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布（耐震壁 地下 2 階 R11 通り）



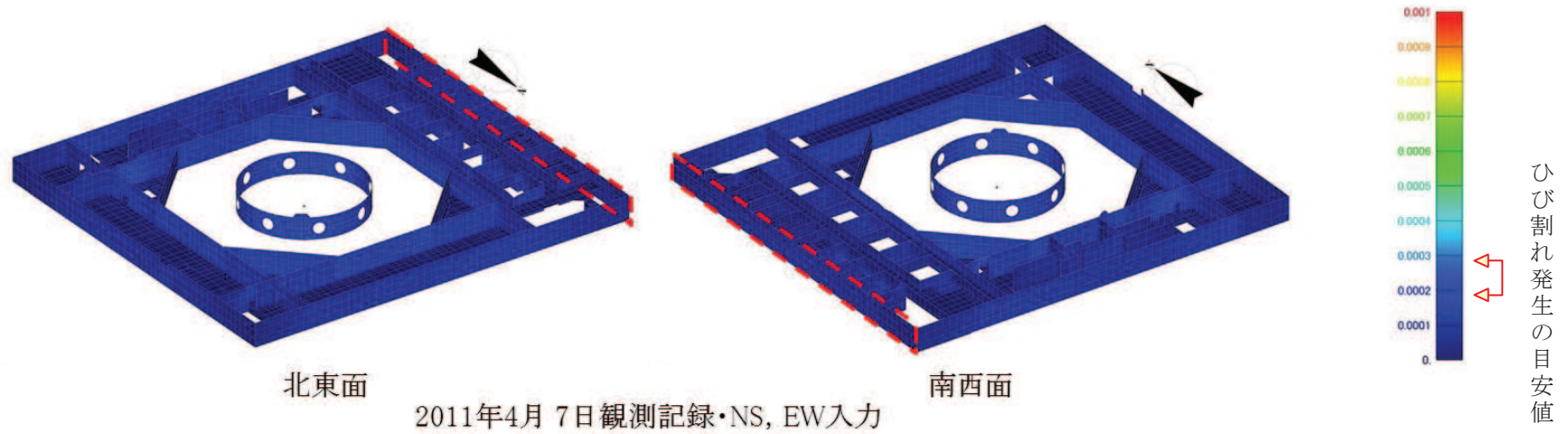
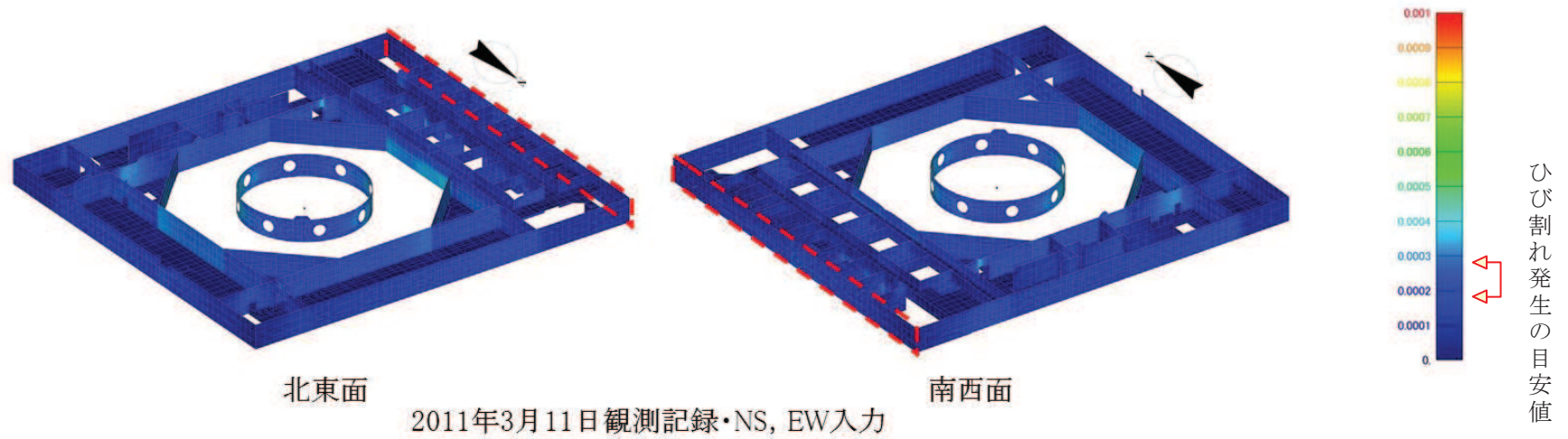
面内せん断ひずみコンター図

図 14 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 R11 通り)



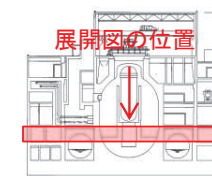
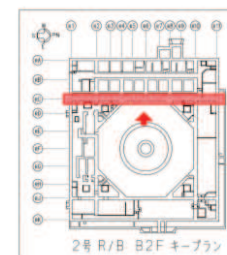
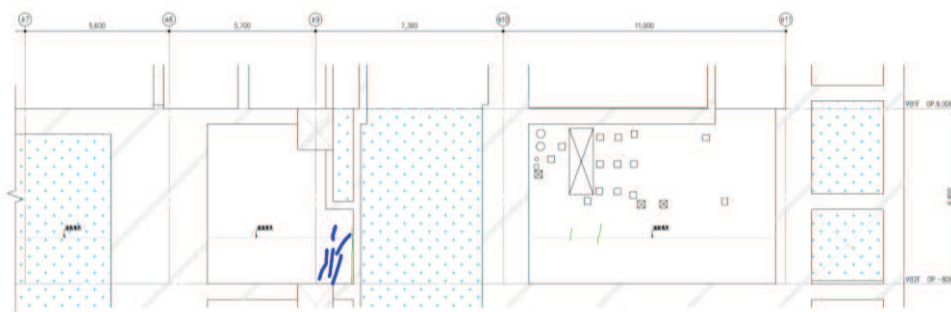
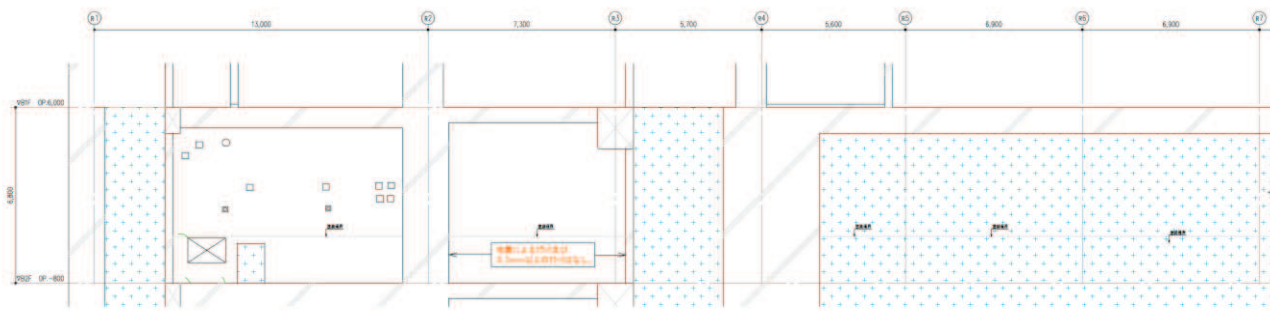
地震による		地震以外		
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上	はくらく
	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 15 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 2 階 RA 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 15 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 RA 通り)



断面図

地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 16 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 2 階 RC 通り)

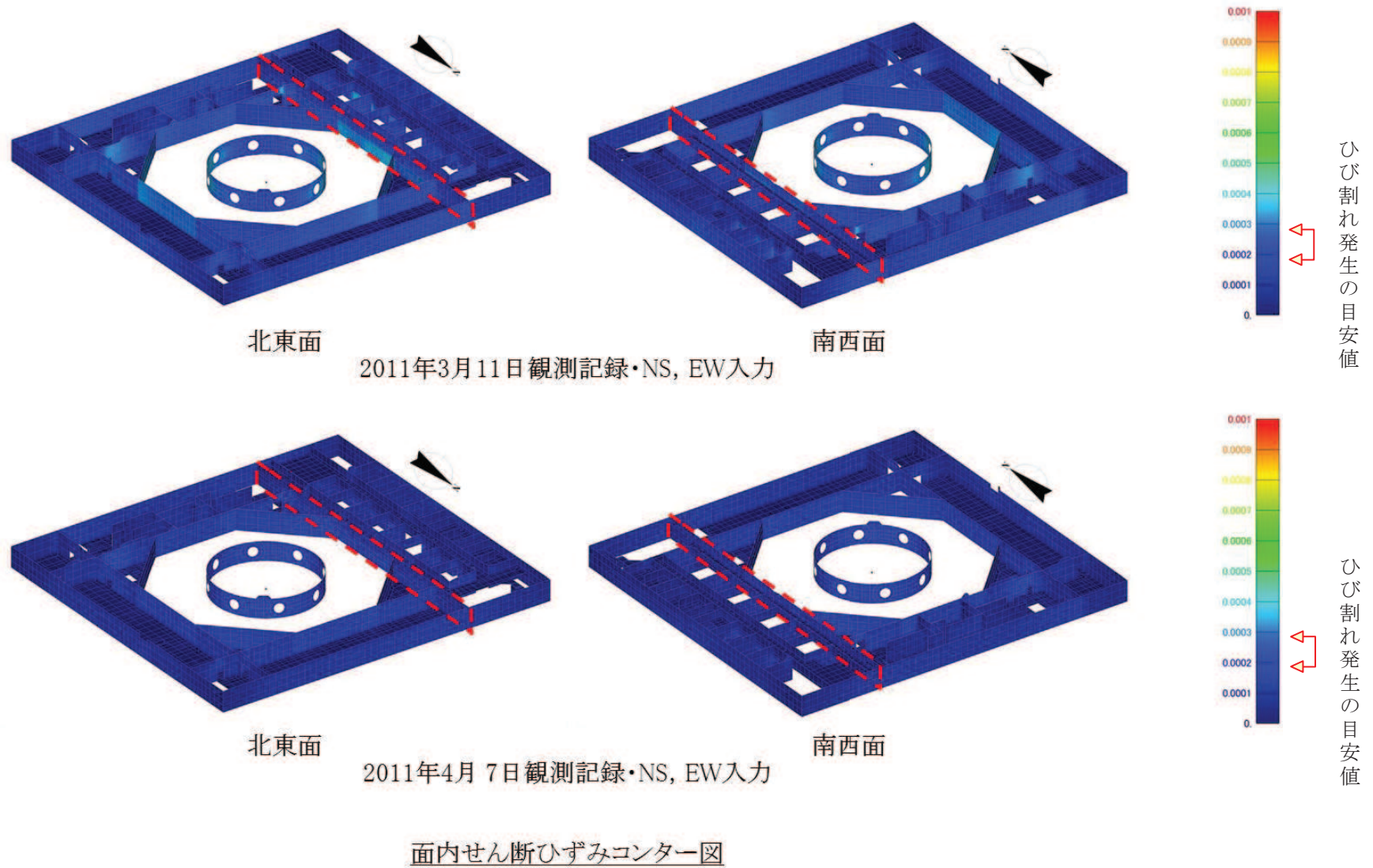
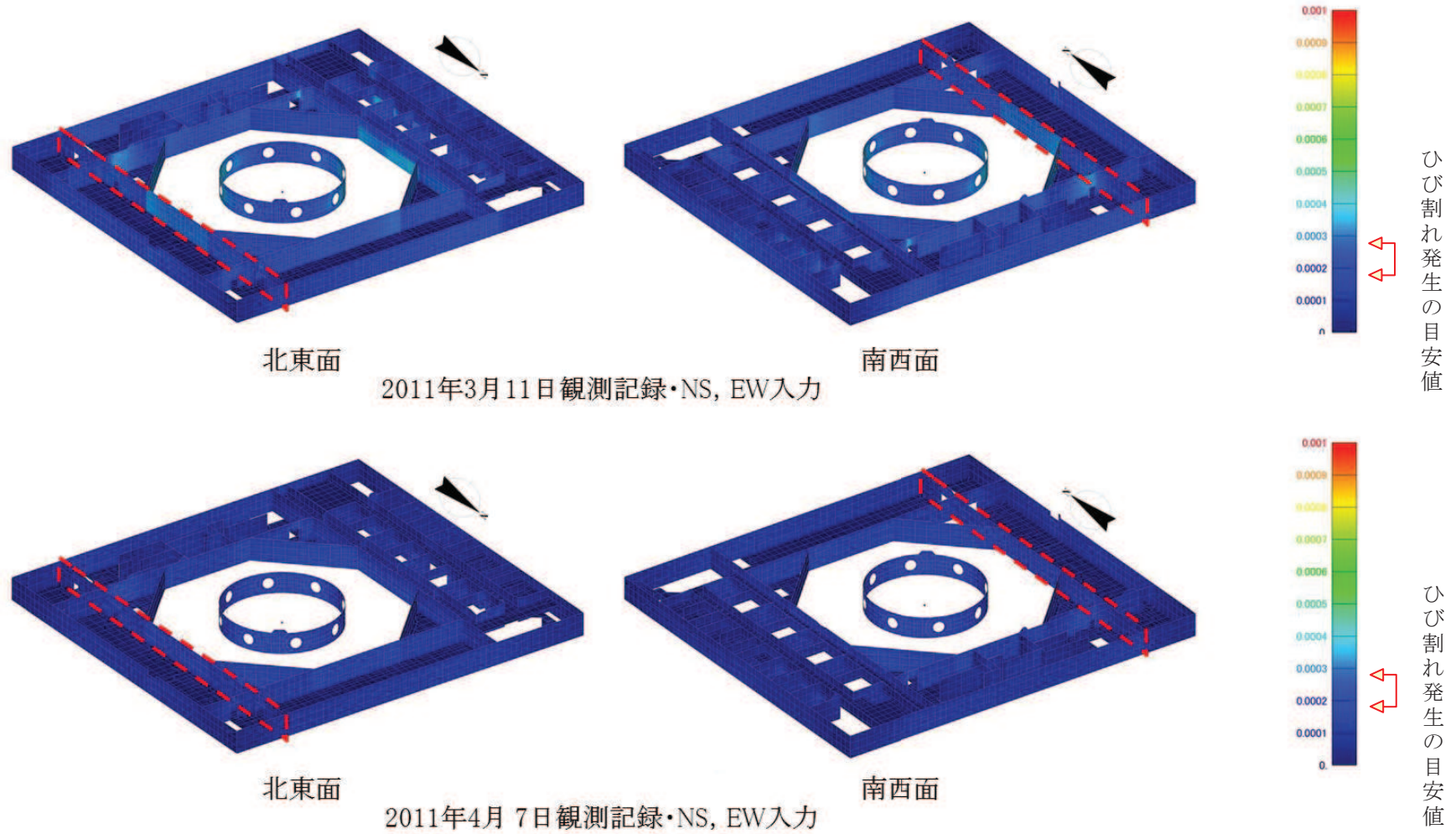


図 16 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 RC 通り)



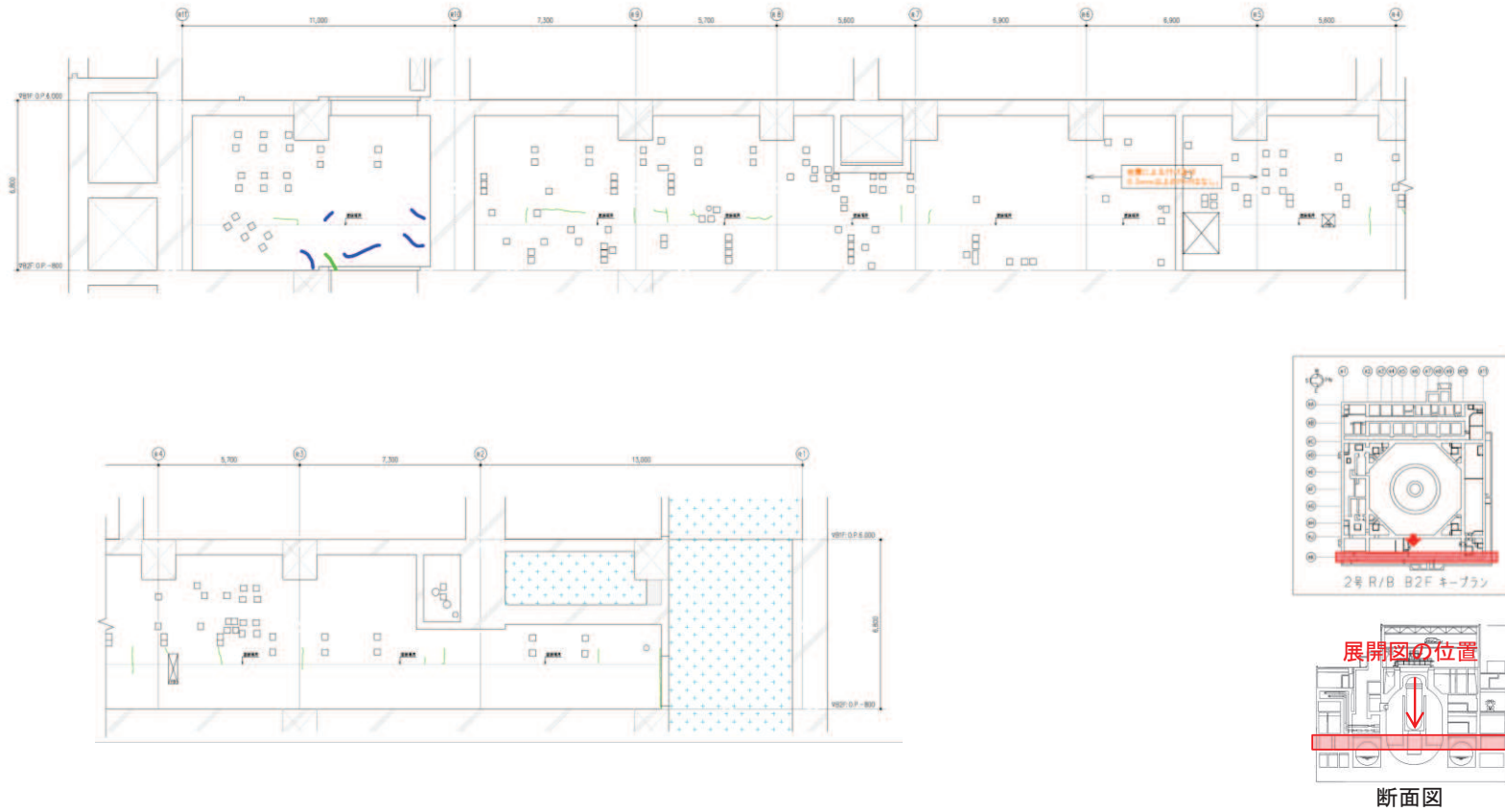
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 17 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 2 階 RJ 通り)



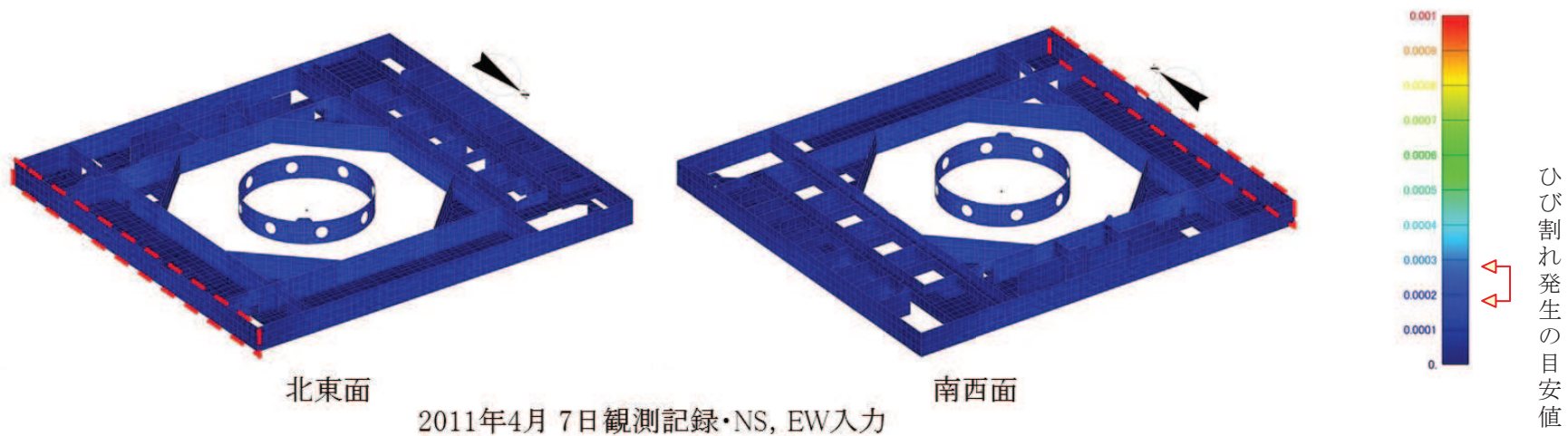
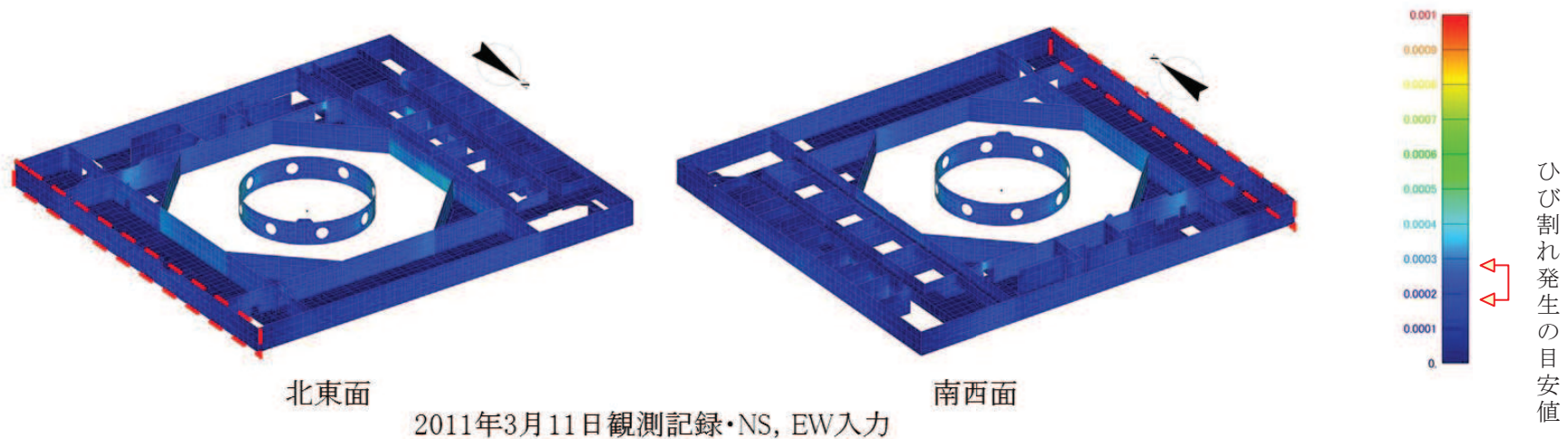
面内せん断ひずみコンター図

図 17 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 RJ 通り)



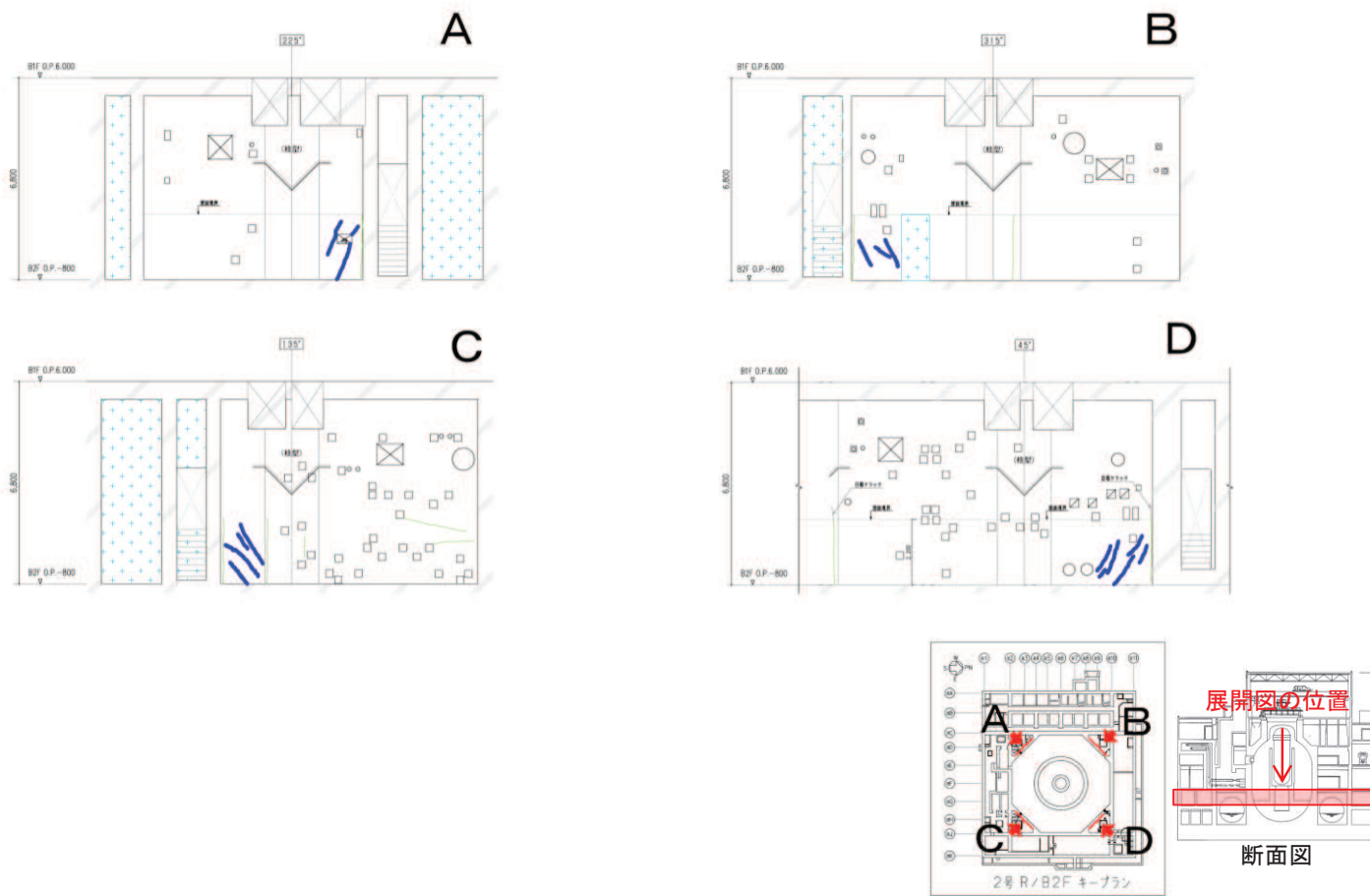
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 18 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 2 階 RK 通り)



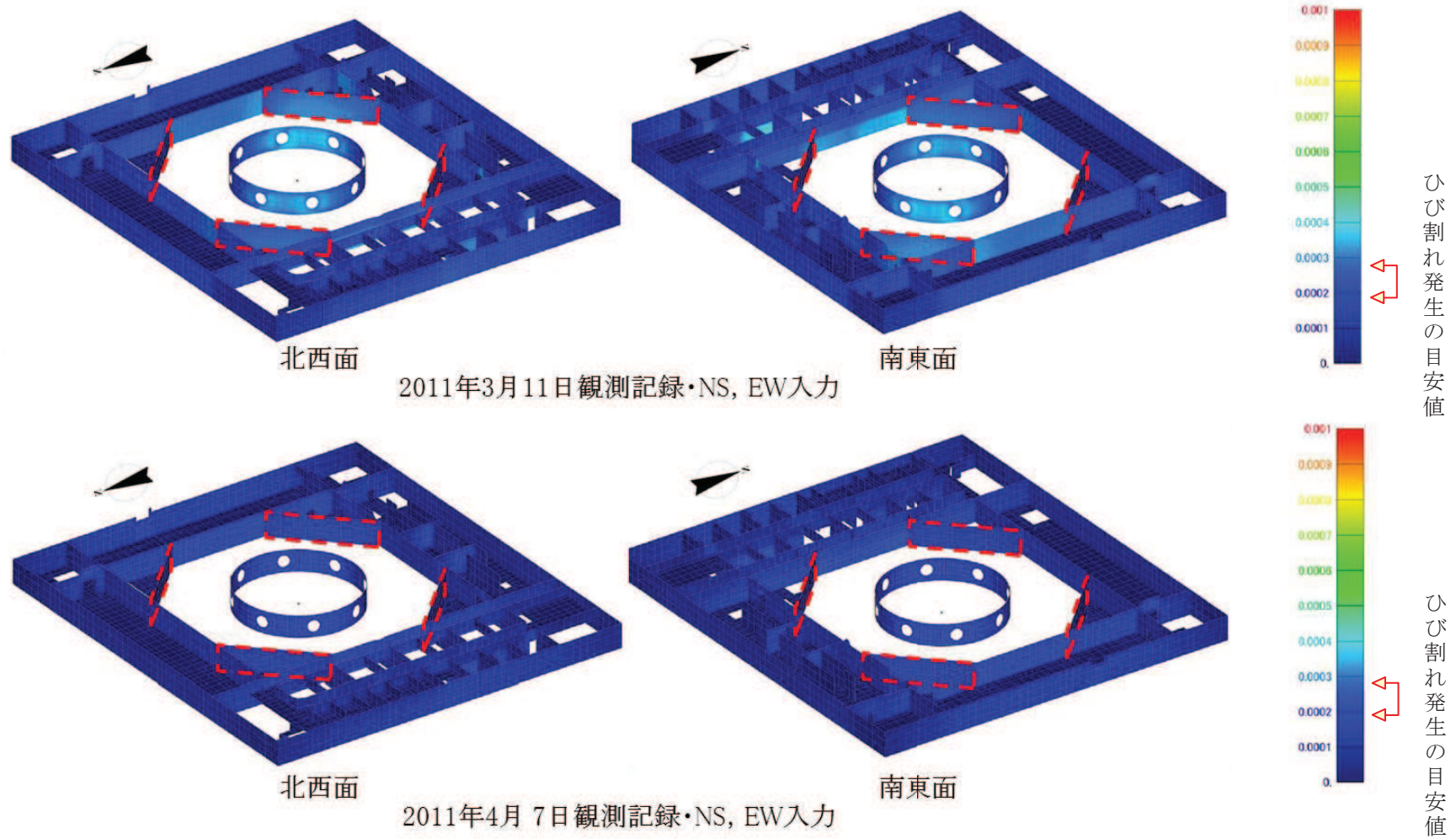
面内せん断ひずみコンター図

図 18 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 RK 通り)



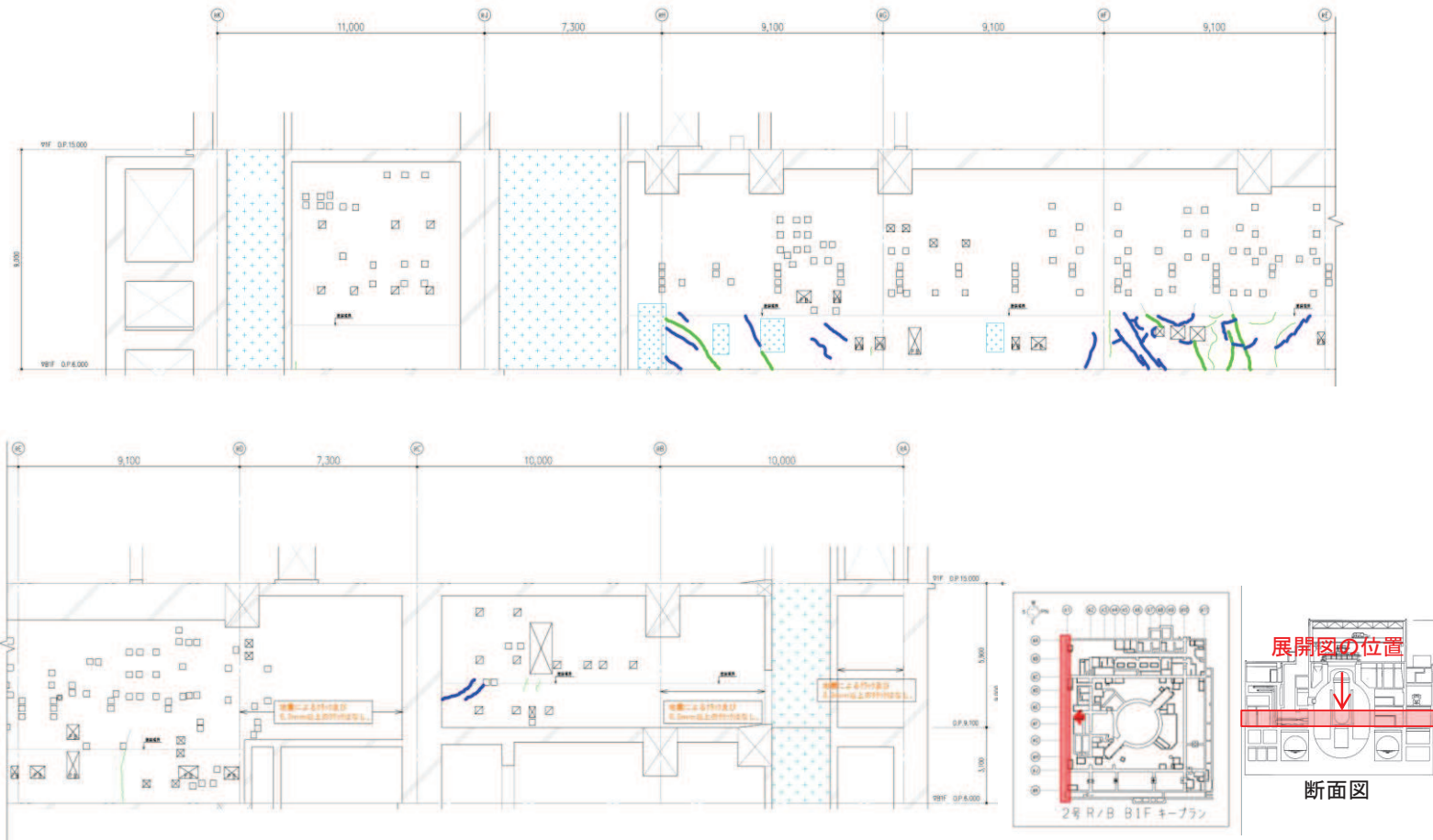
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 19 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 2 階 火打ち壁)



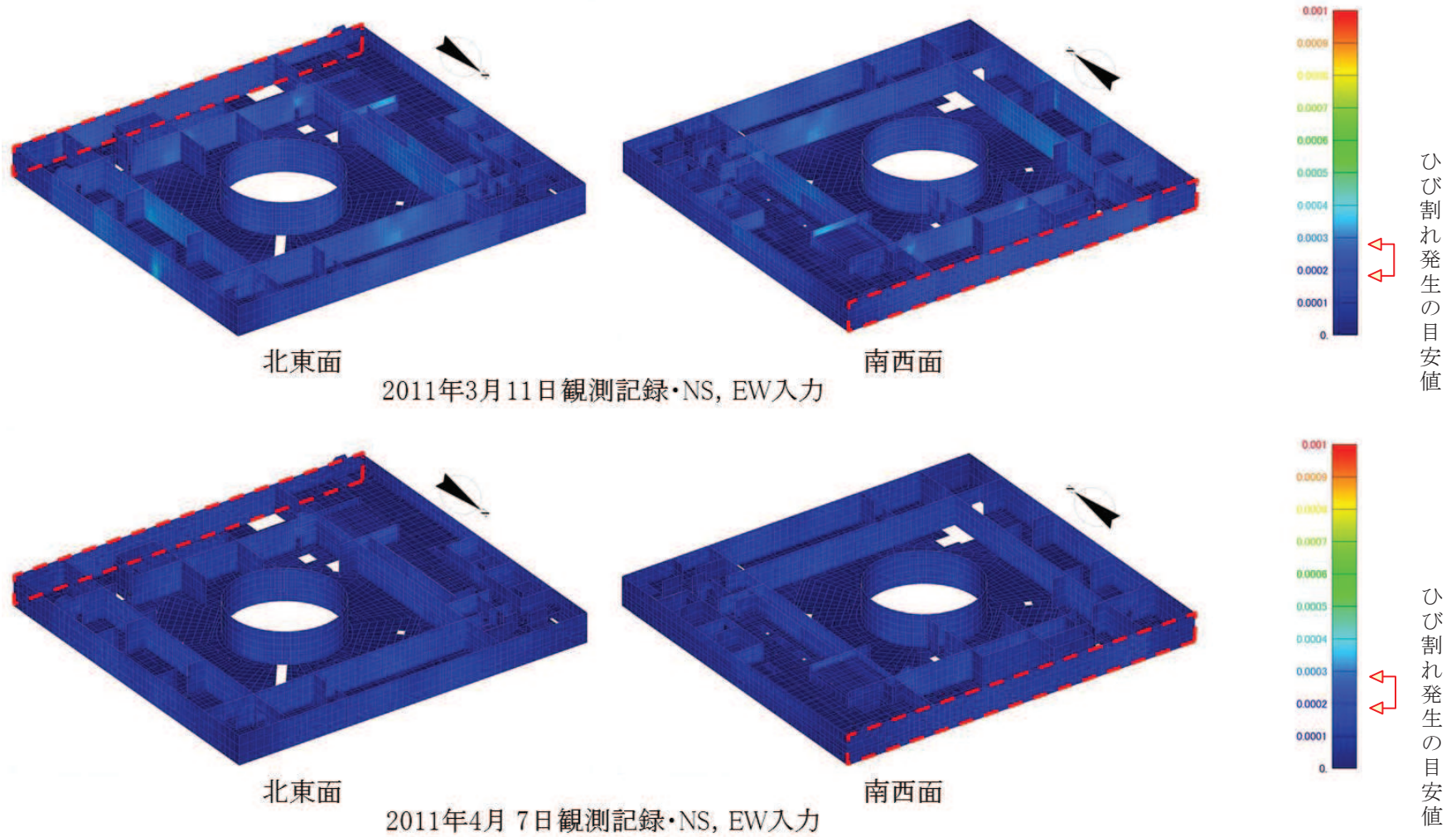
面内せん断ひずみコンター図

図 19 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下2階 火打ち壁)



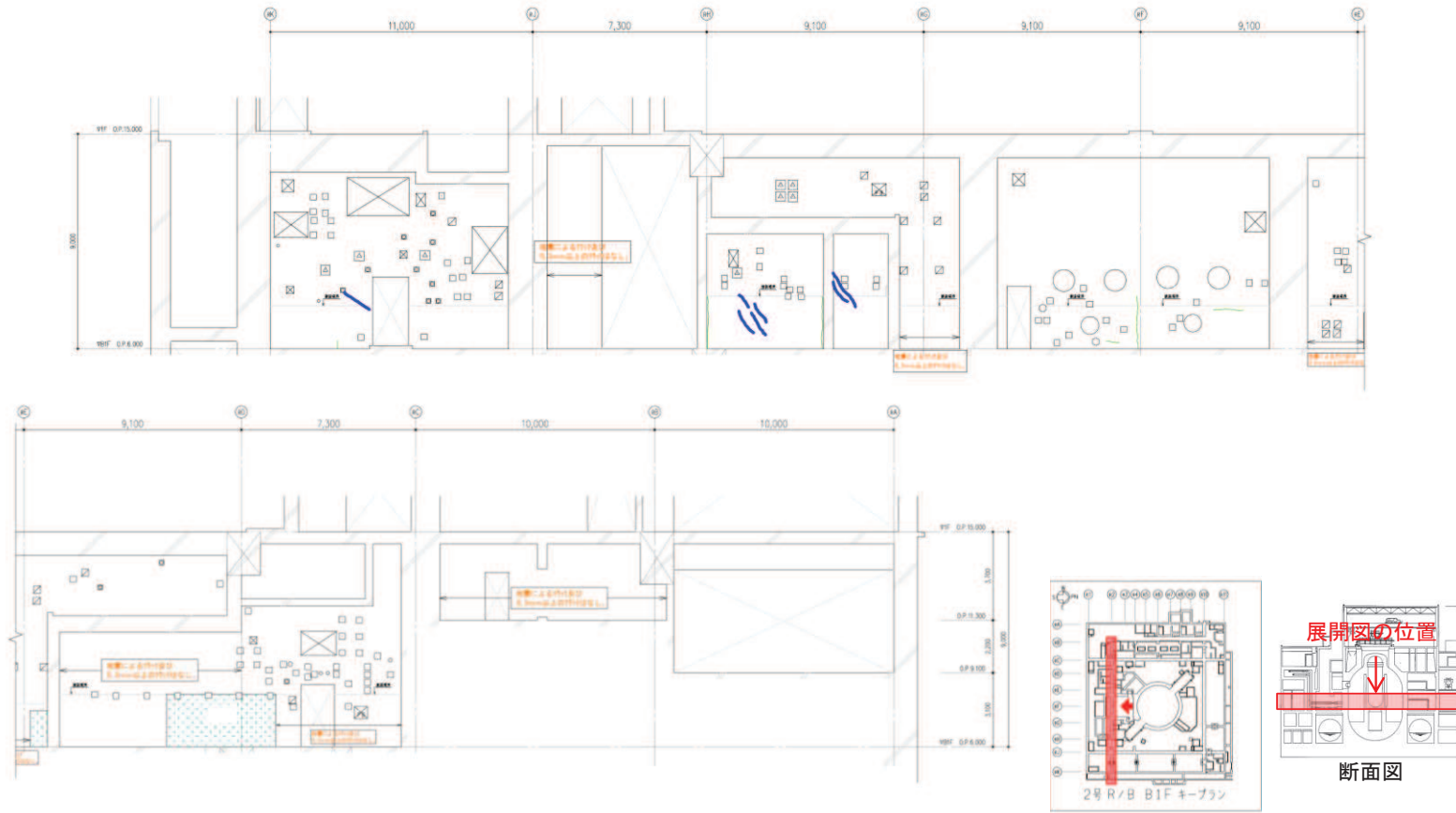
地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		はくらく
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 20 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下1階 R1 通り)



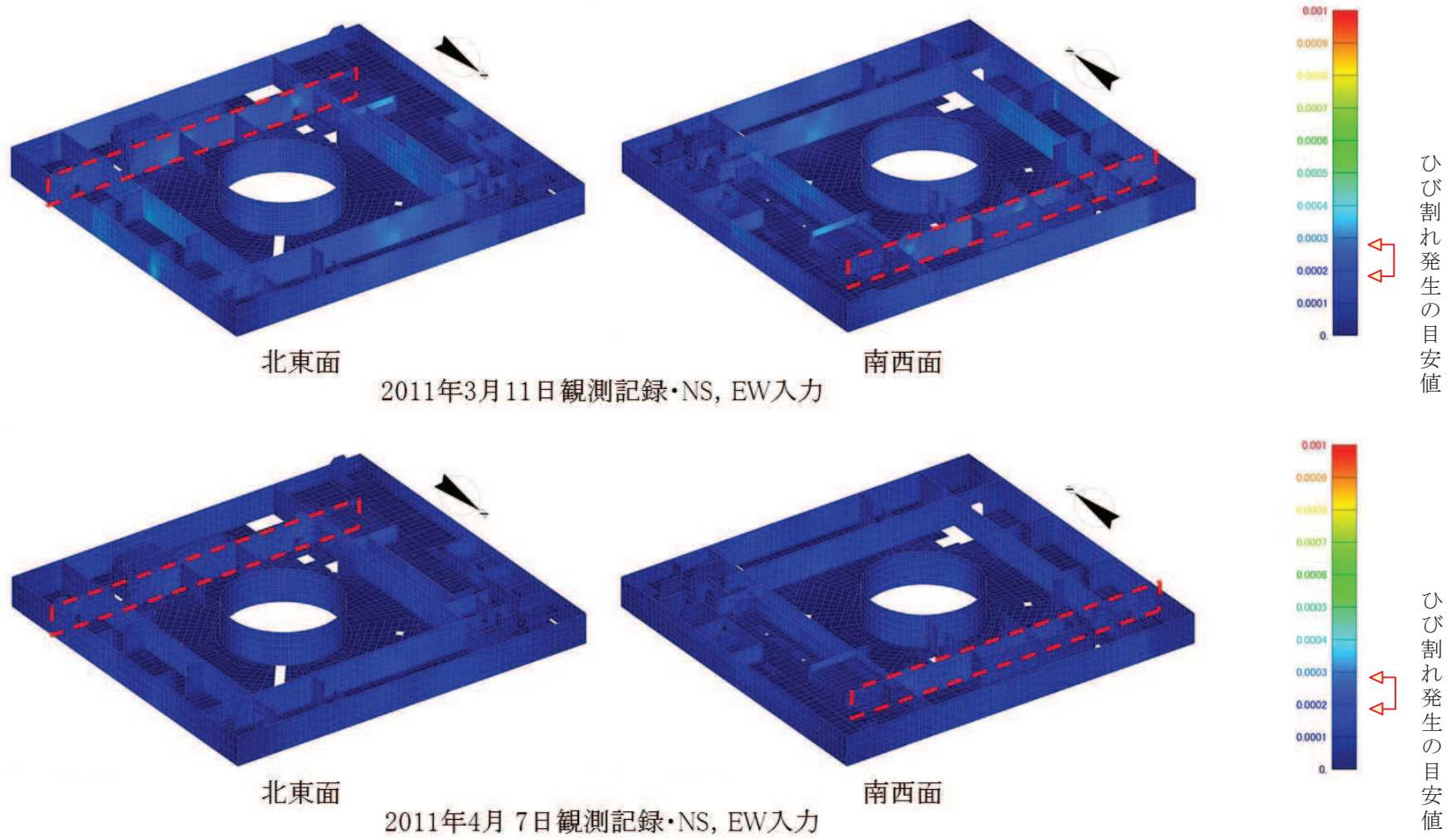
面内せん断ひずみコンター図

図 20 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 R1 通り)



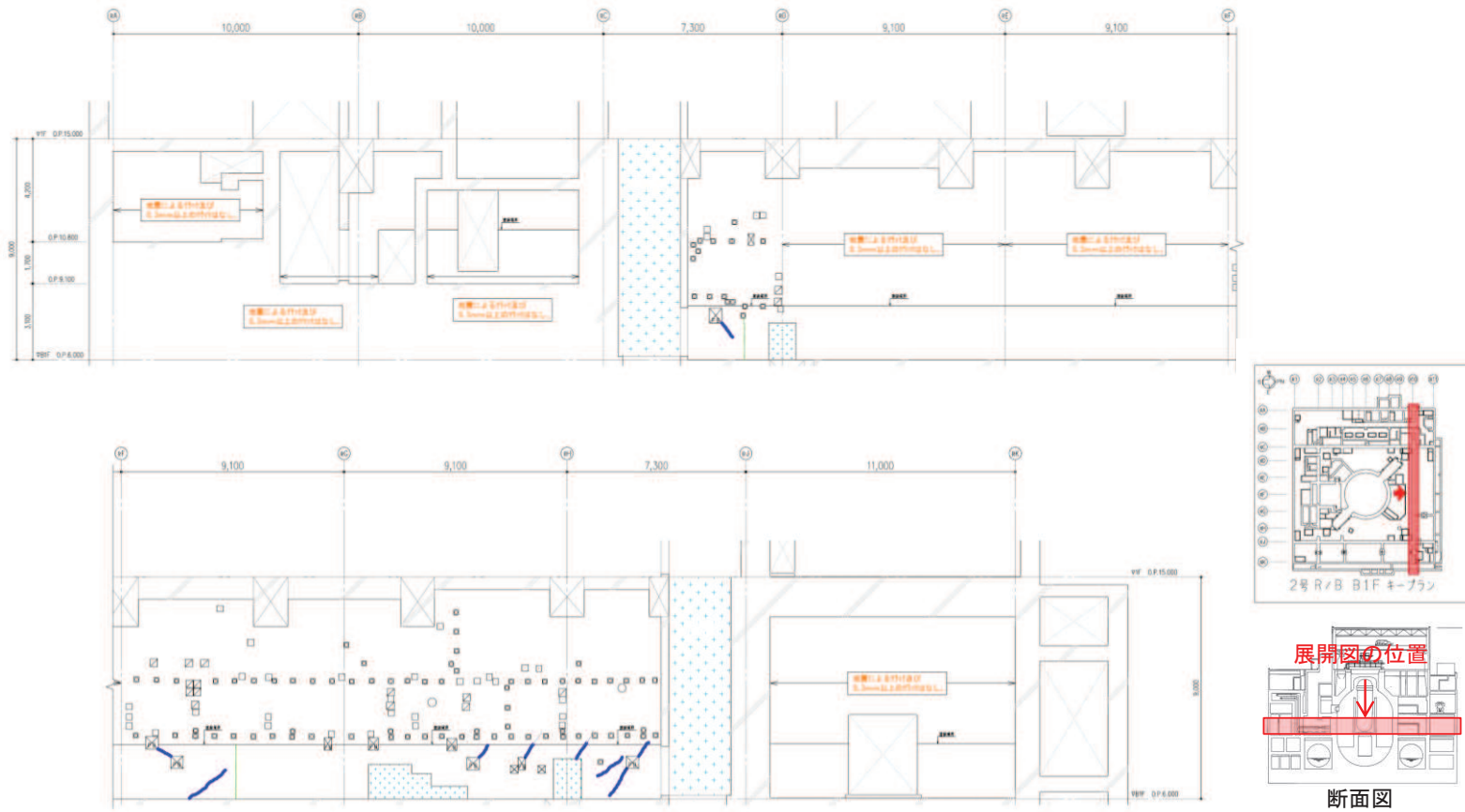
地震による		地震以外		
—	0.3mm未満	—	0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
—	0.3mm以上～1.0mm未満	—	1.0mm以上	はくらく
—	1.0mm以上	+		確認不能の範囲

図 21 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 1 階 R2 通り)



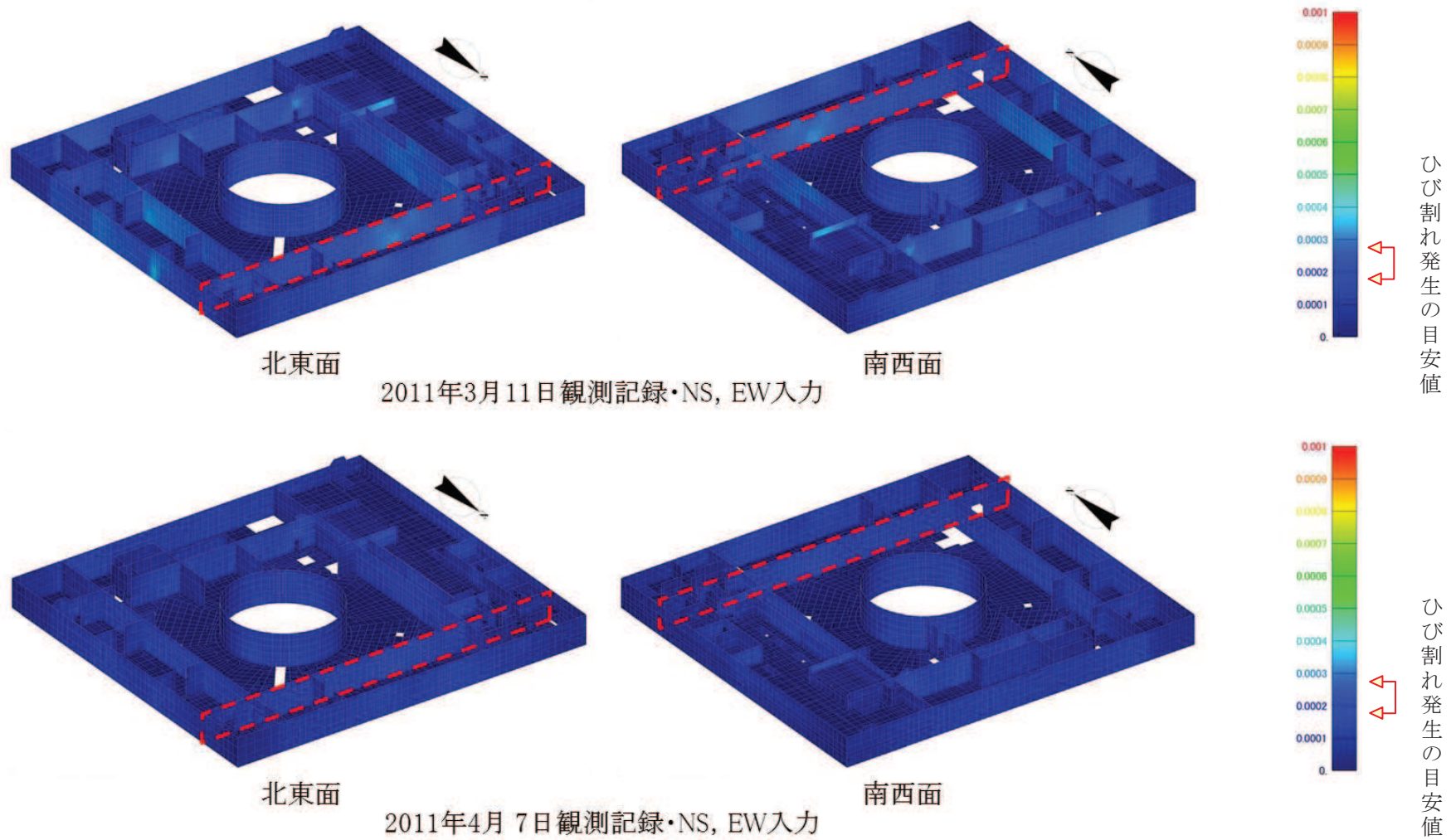
面内せん断ひずみコンター図

図 21 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 R2 通り)



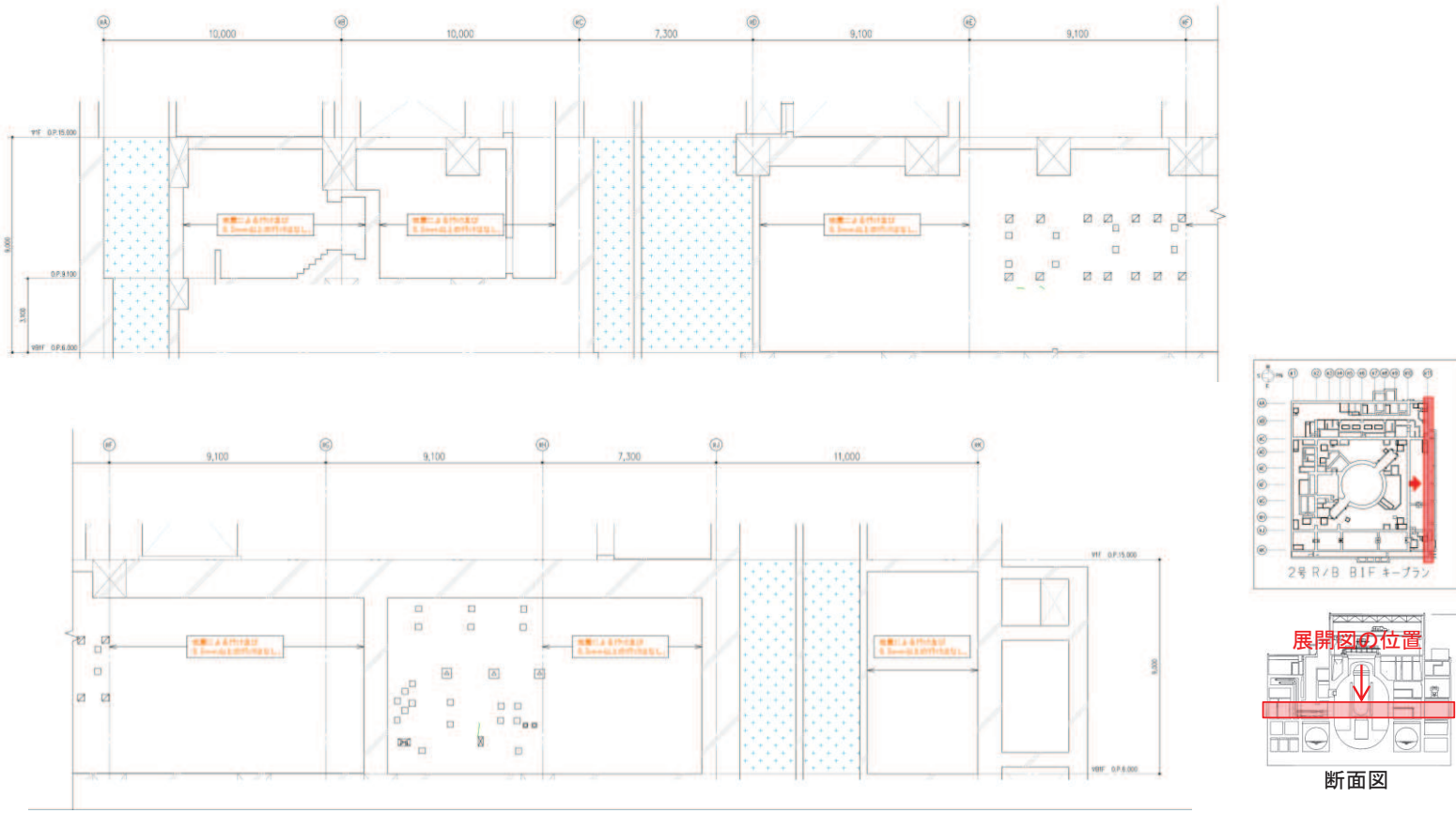
地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	はくらく	
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 22 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 1 階 R10 通り)



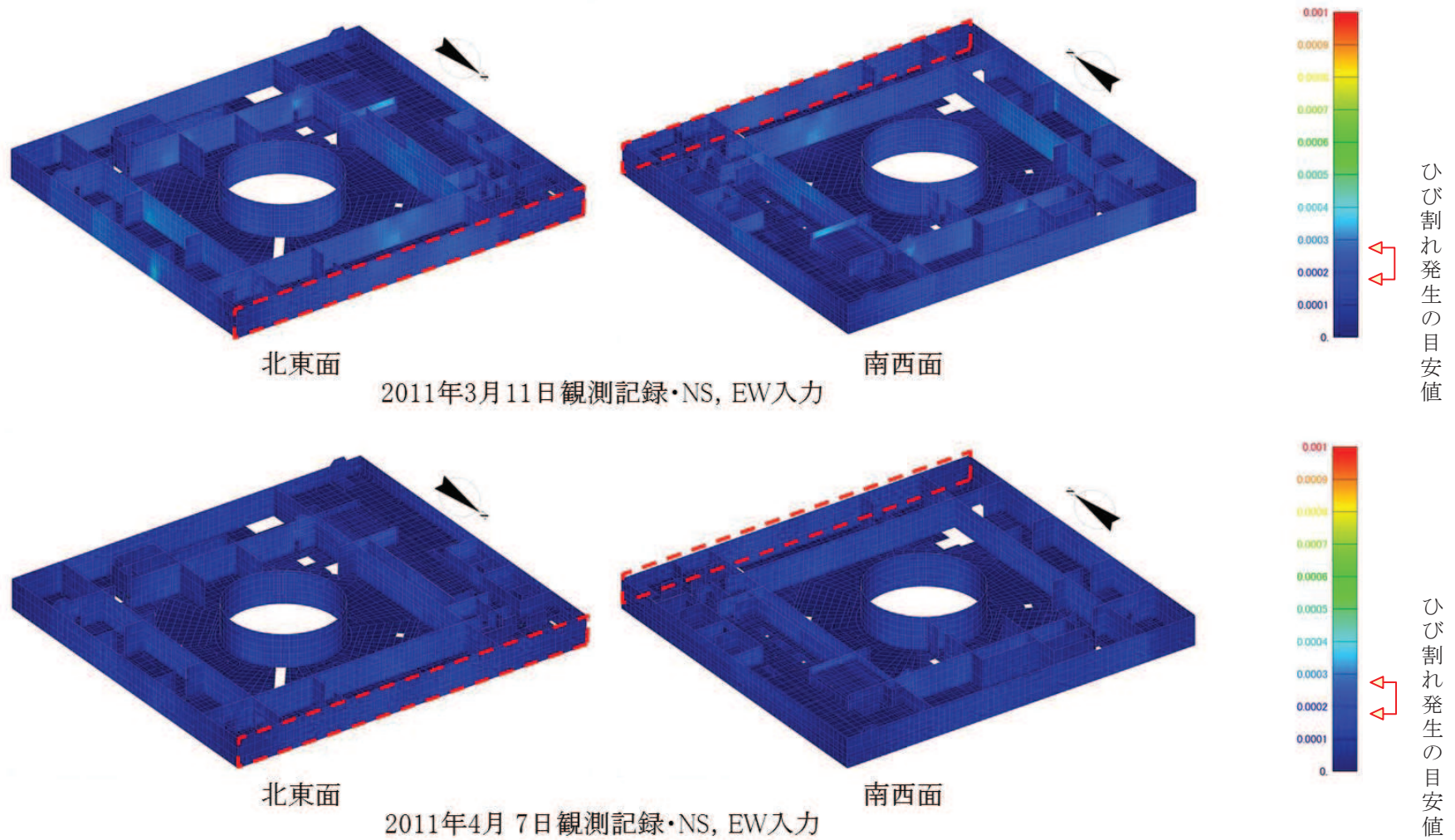
面内せん断ひずみコンター図

図 22 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 R10 通り)



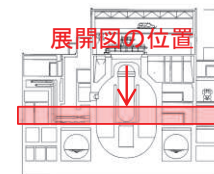
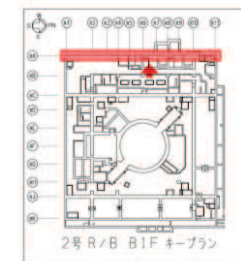
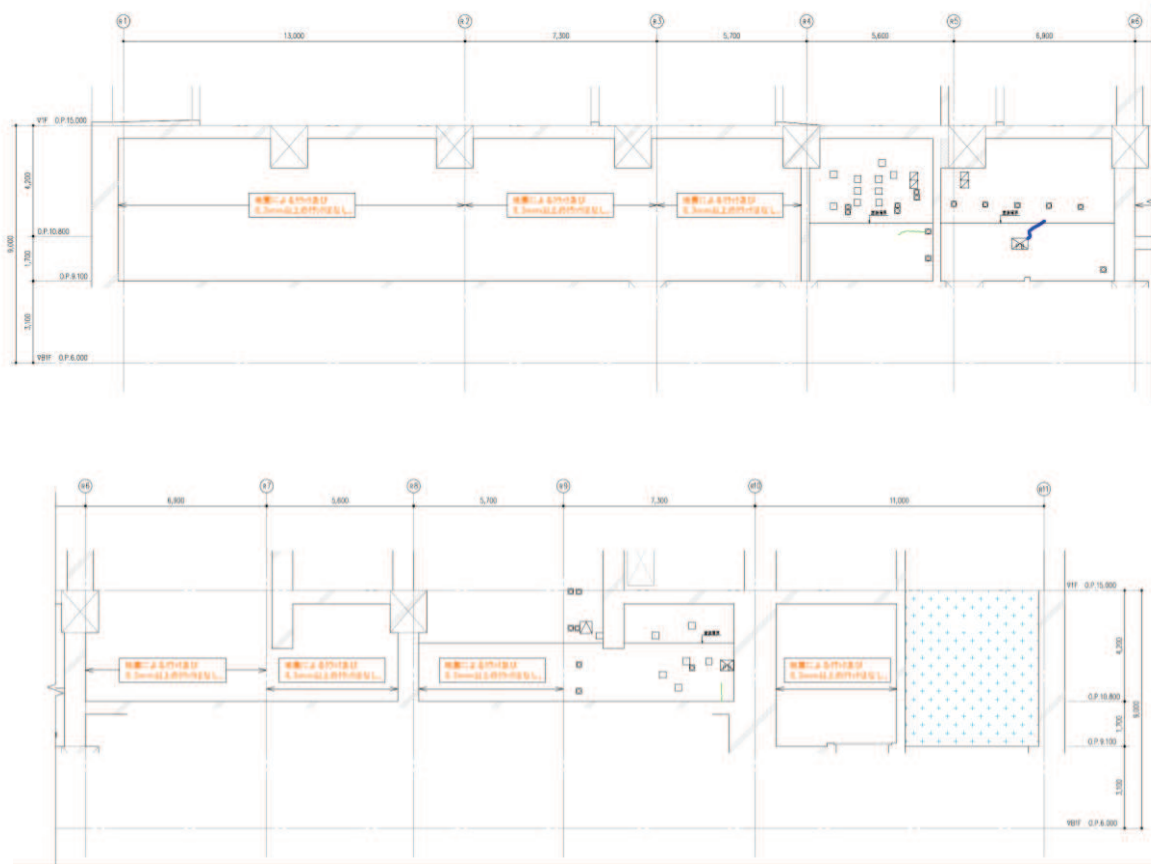
地震による		地震以外		
—	0.3mm未満	—	0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
—	0.3mm以上～1.0mm未満	—	1.0mm以上	はくらく
—	1.0mm以上	*		確認不能の範囲

図 23 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 1 階 R11 通り)



面内せん断ひずみコンター図

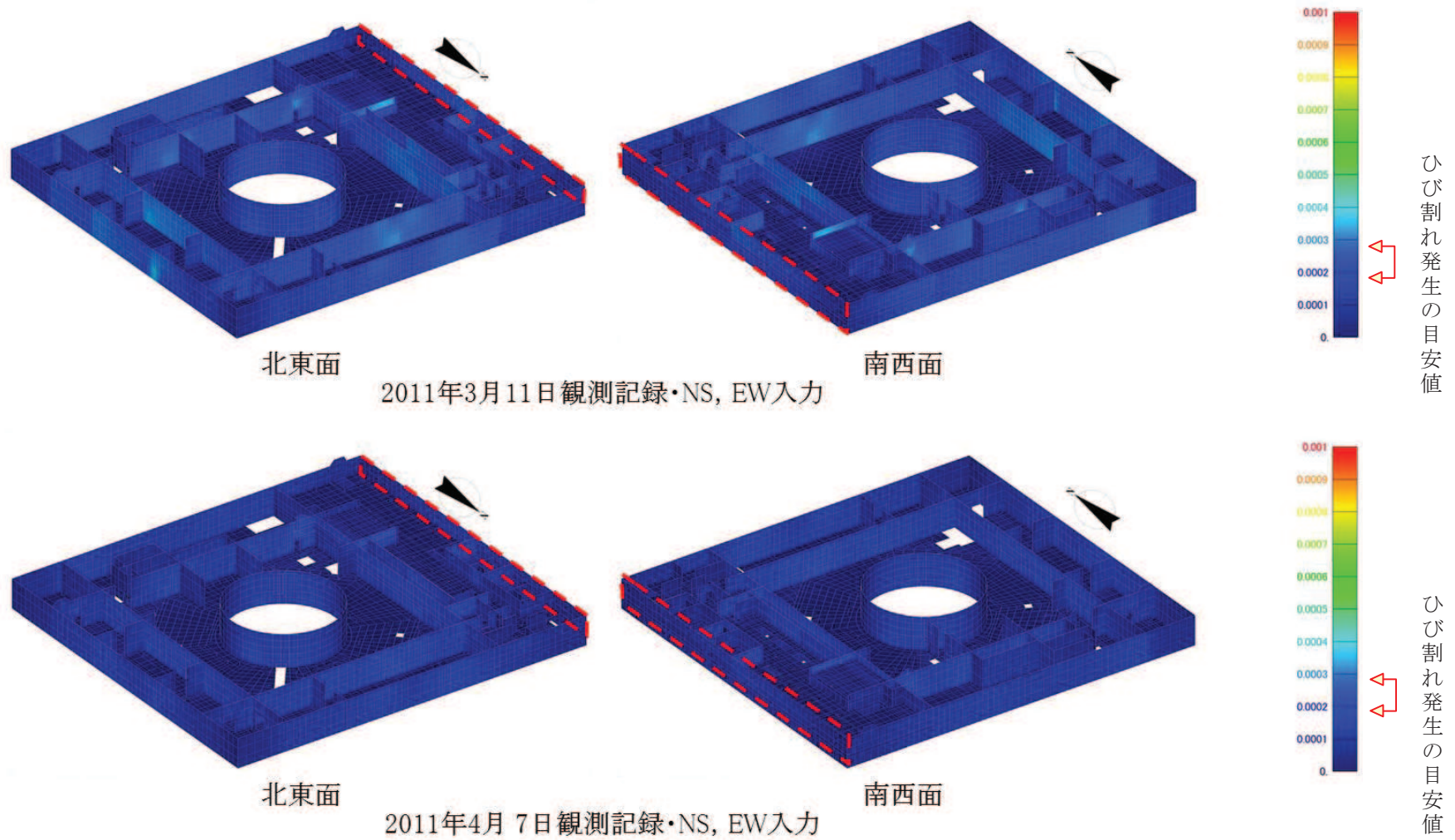
図 23 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 R11 通り)



断面図

地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 24 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 1 階 RA 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 24 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 RA 通り)

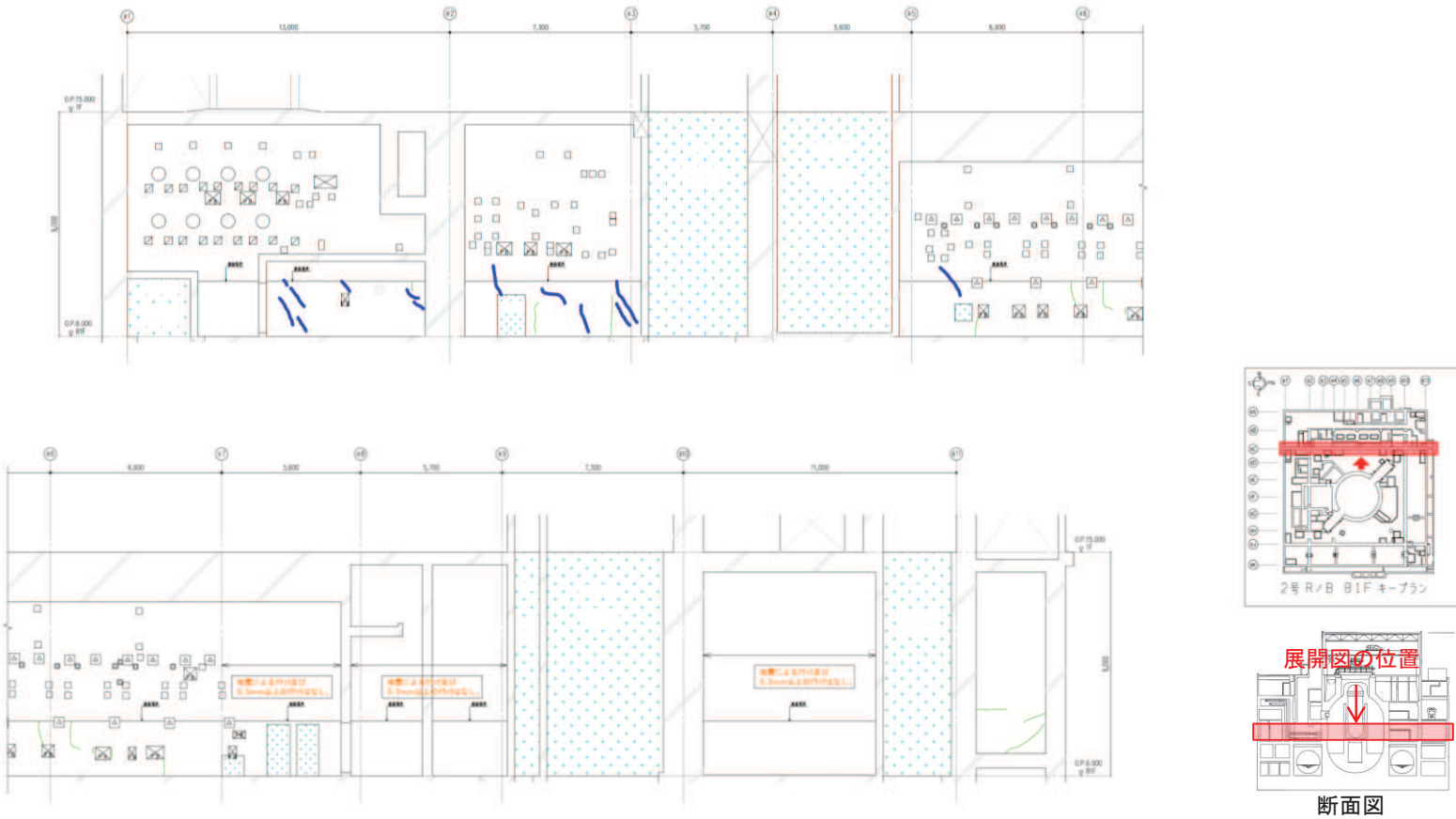
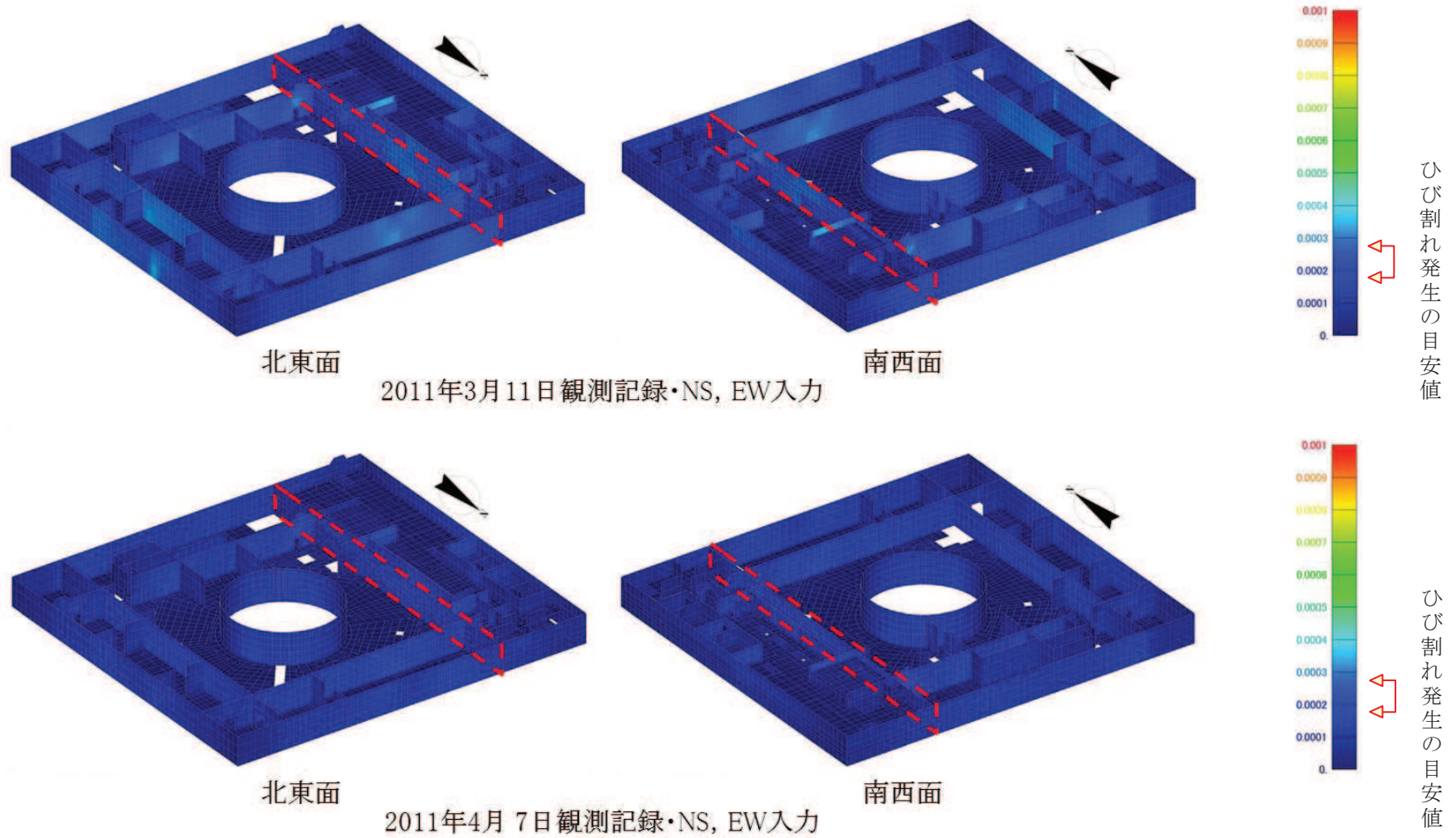
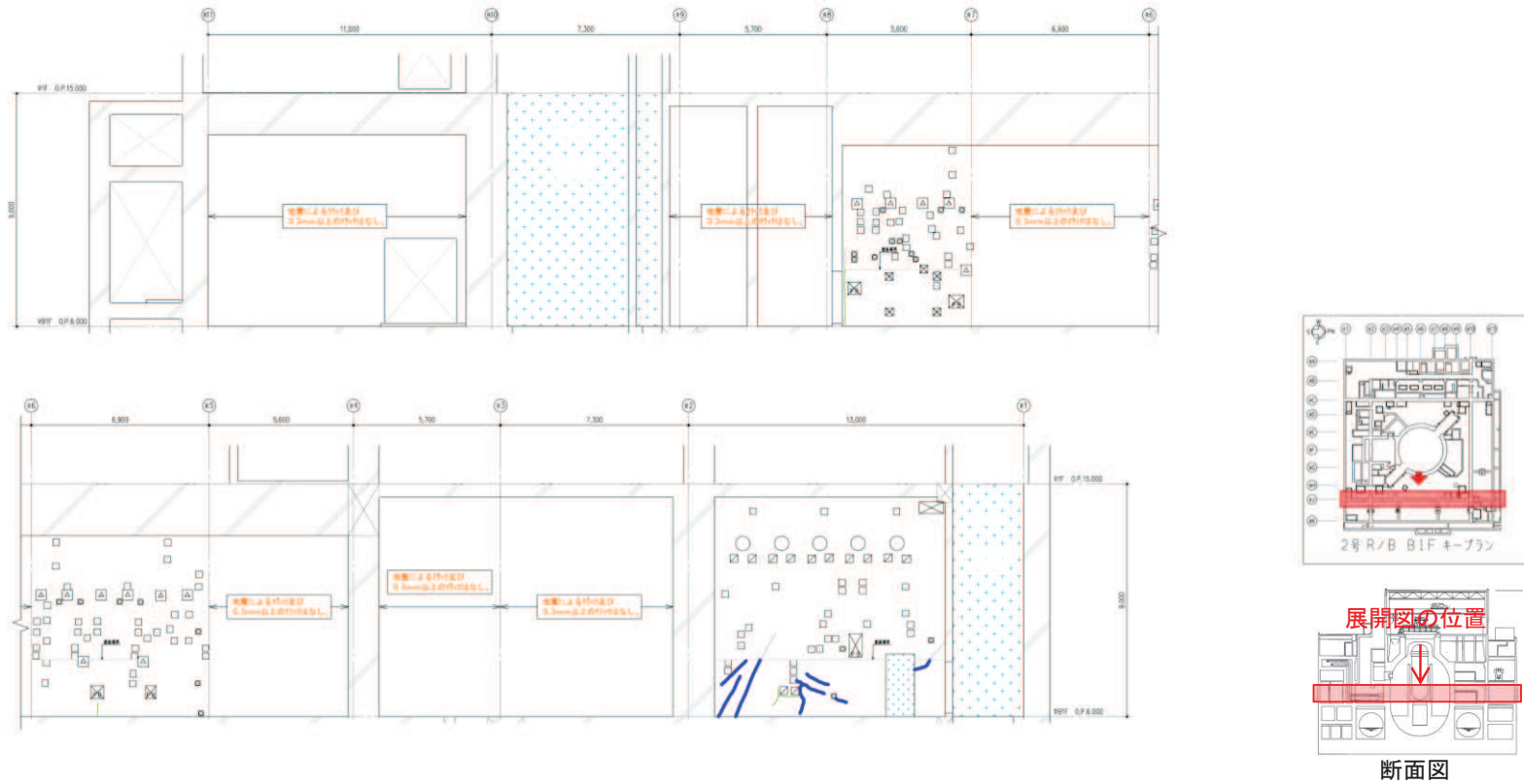


図 25 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下1階 RC 通り)



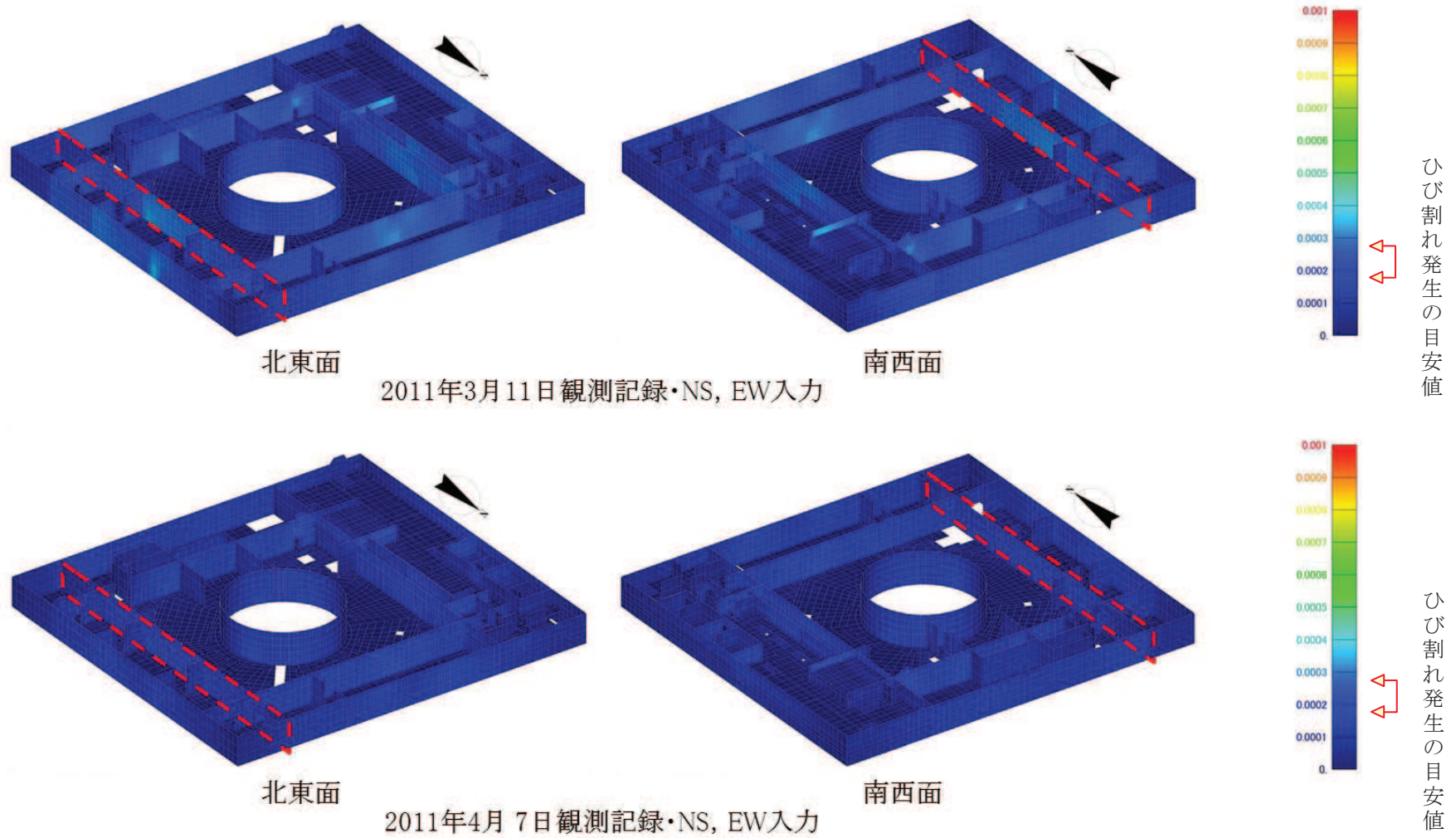
面内せん断ひずみコンター図

図 25 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 RC 通り)



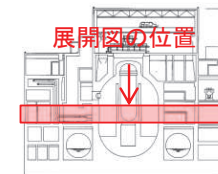
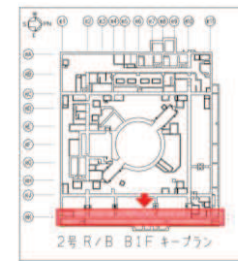
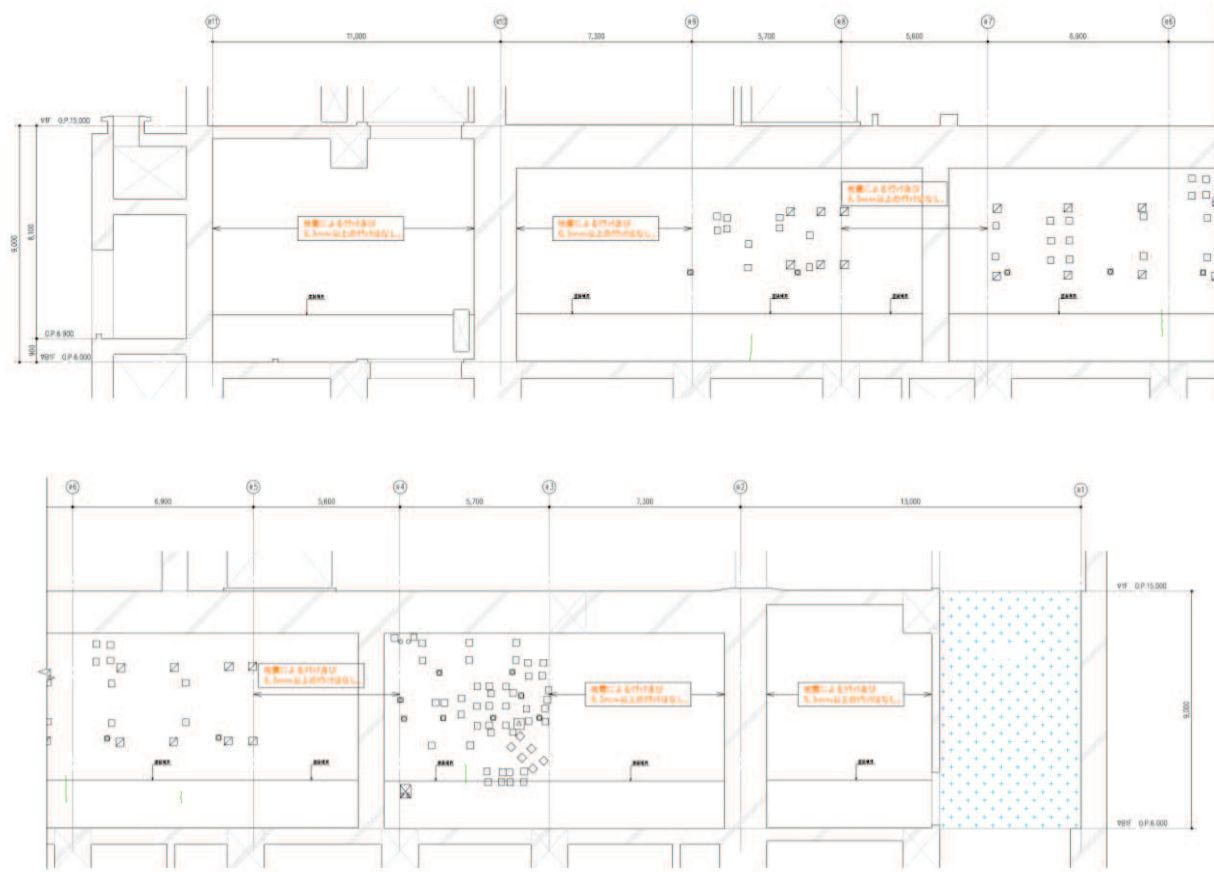
地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		はくらく
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 26 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下1階 RJ 通り)



面内せん断ひずみコンター図

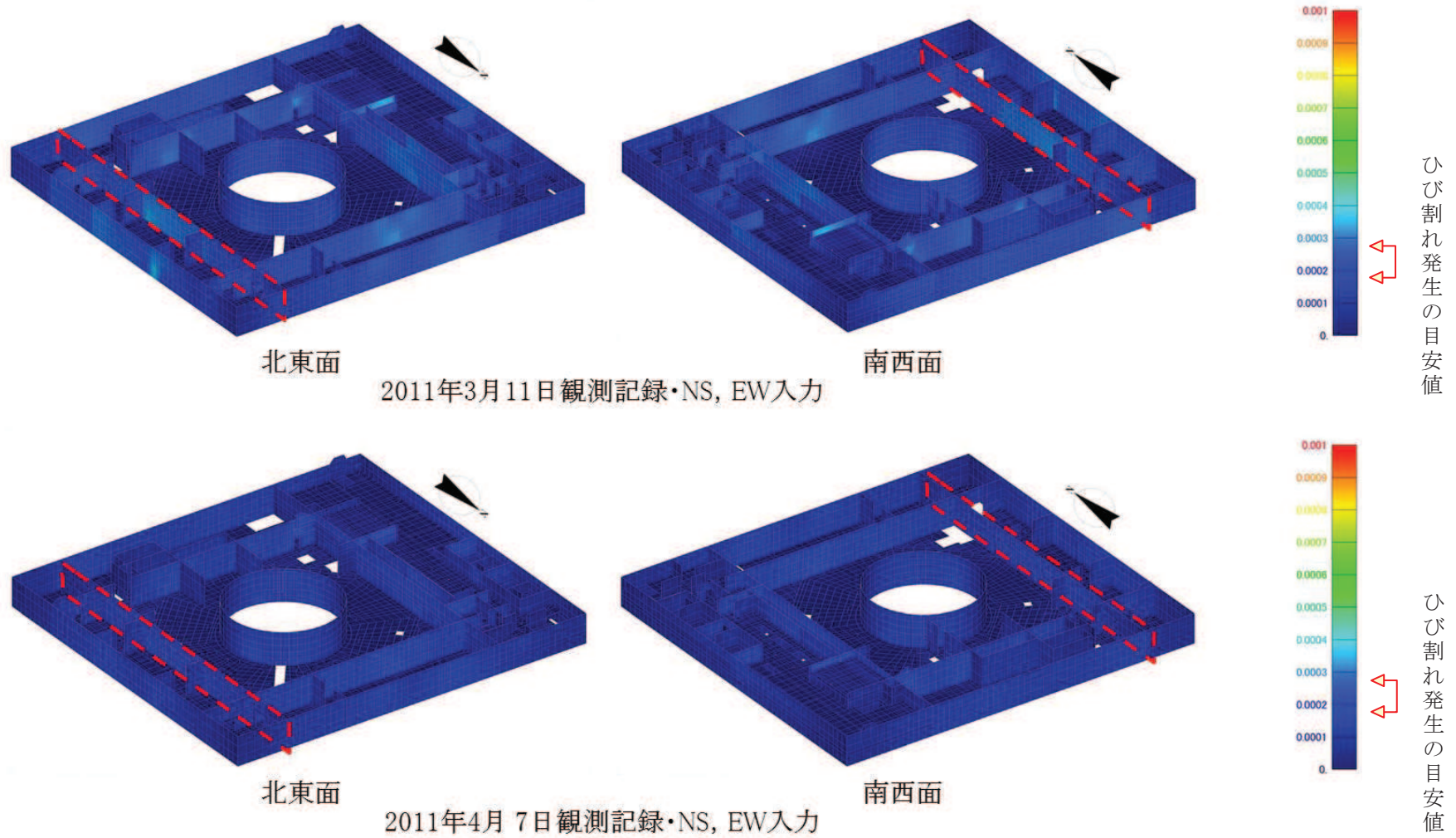
図 26 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 RJ 通り)



断面図

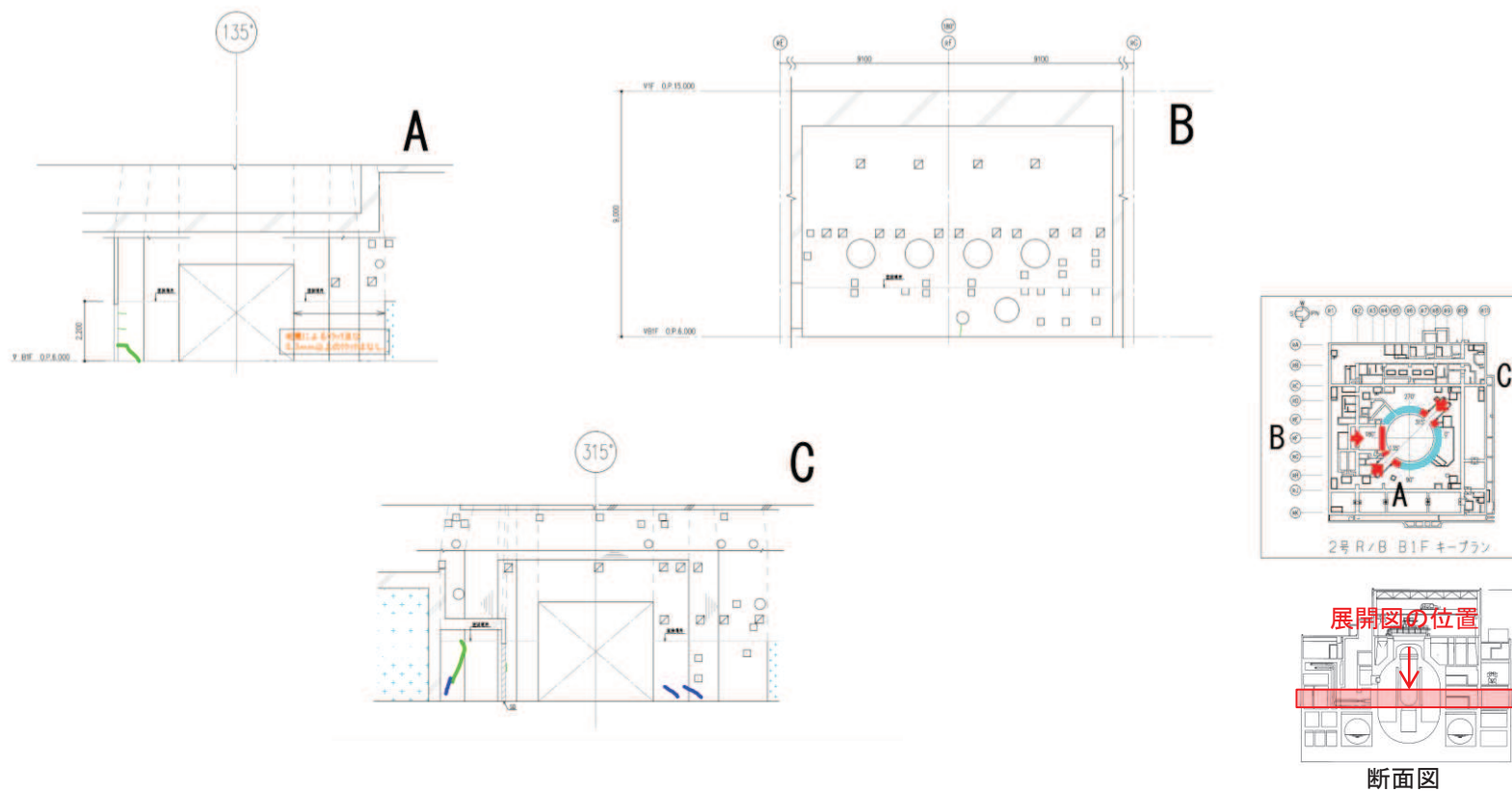
地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	はくらく	
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 27 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下1階 RK 通り)



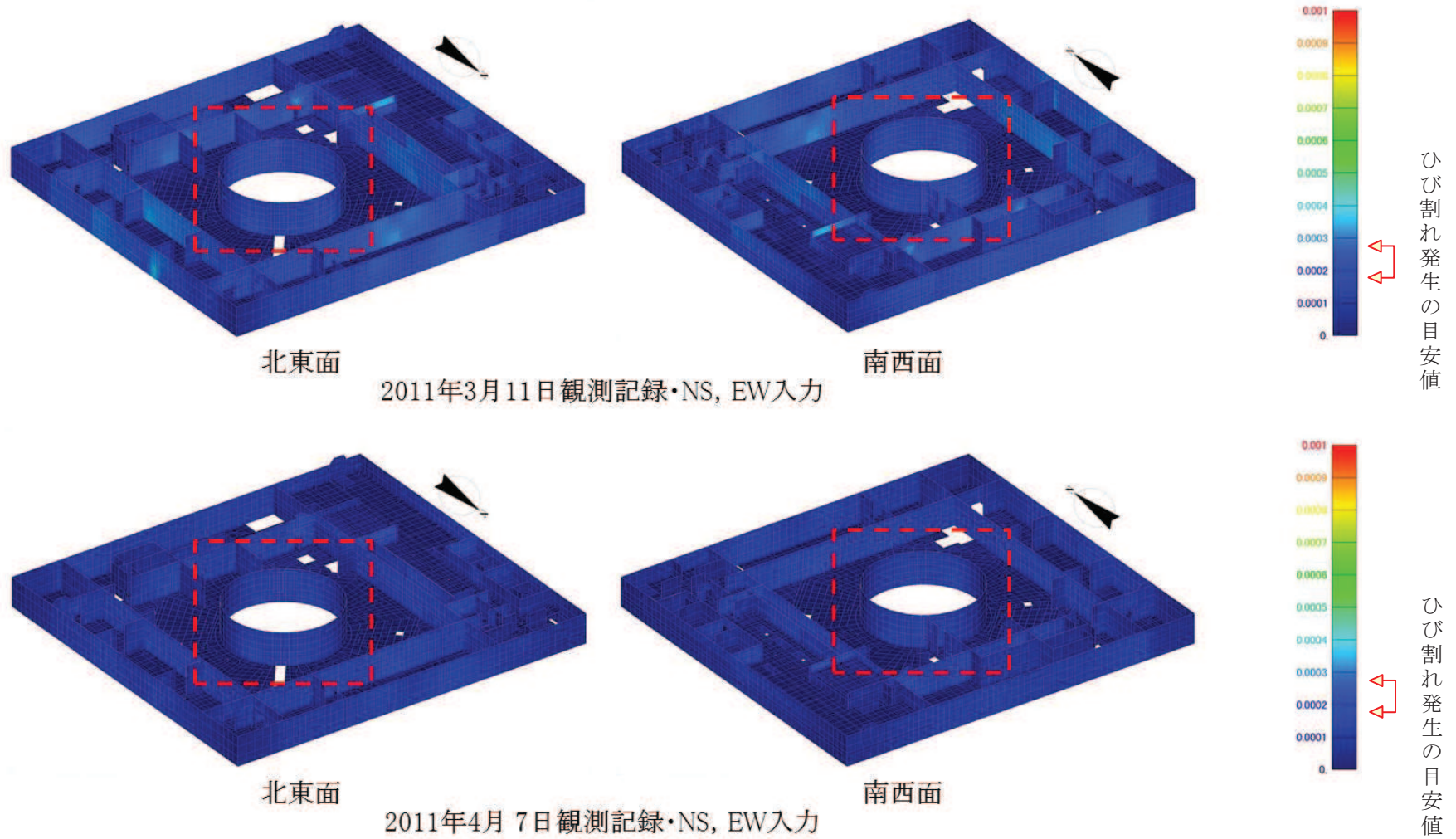
面内せん断ひずみコンター図

図 27 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 RK 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上~1.0mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		はくらく
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 28 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地下 1 階 シェル壁)



面内せん断ひずみコンター図

図 28 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地下1階 シェル壁)

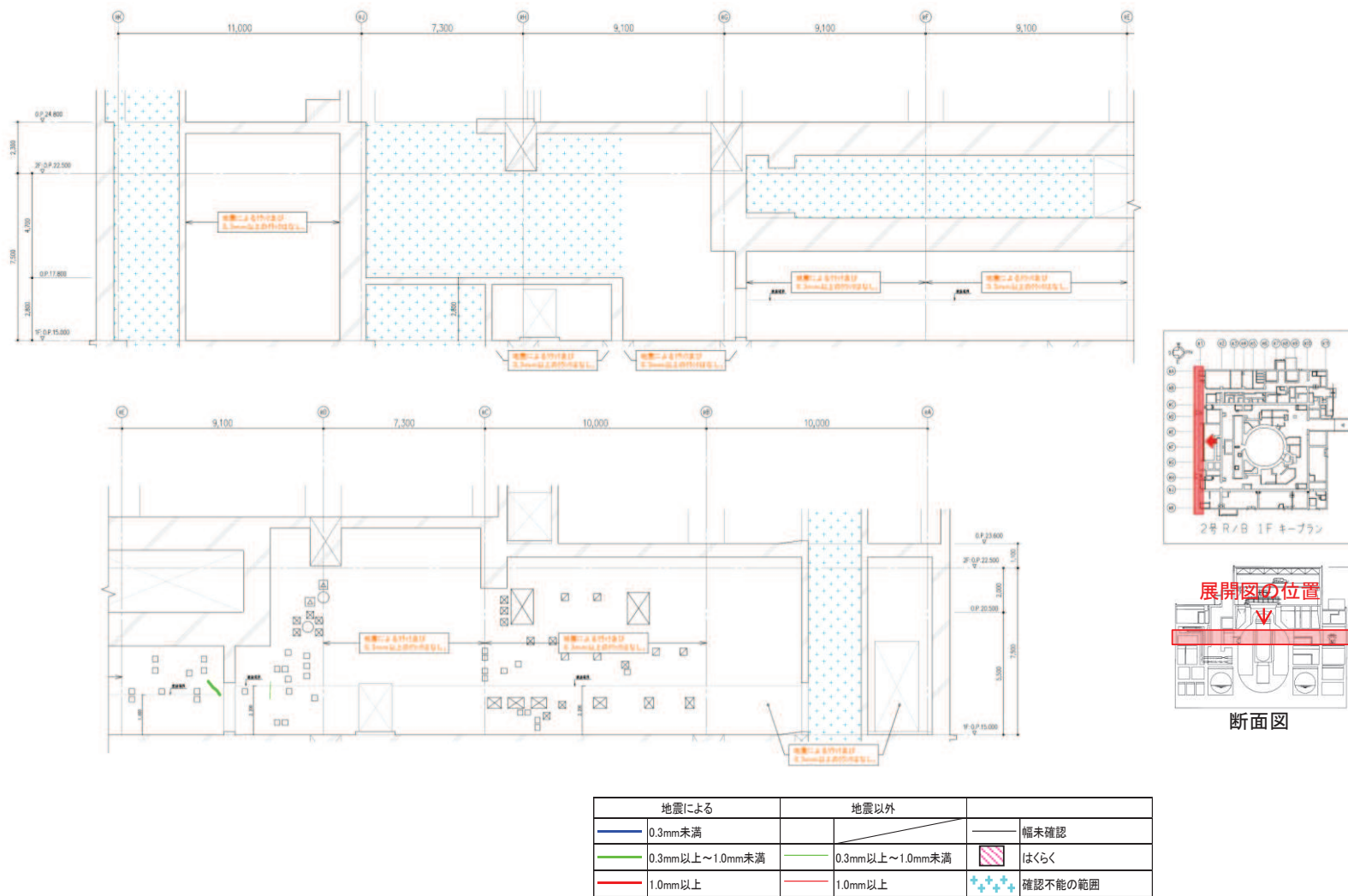
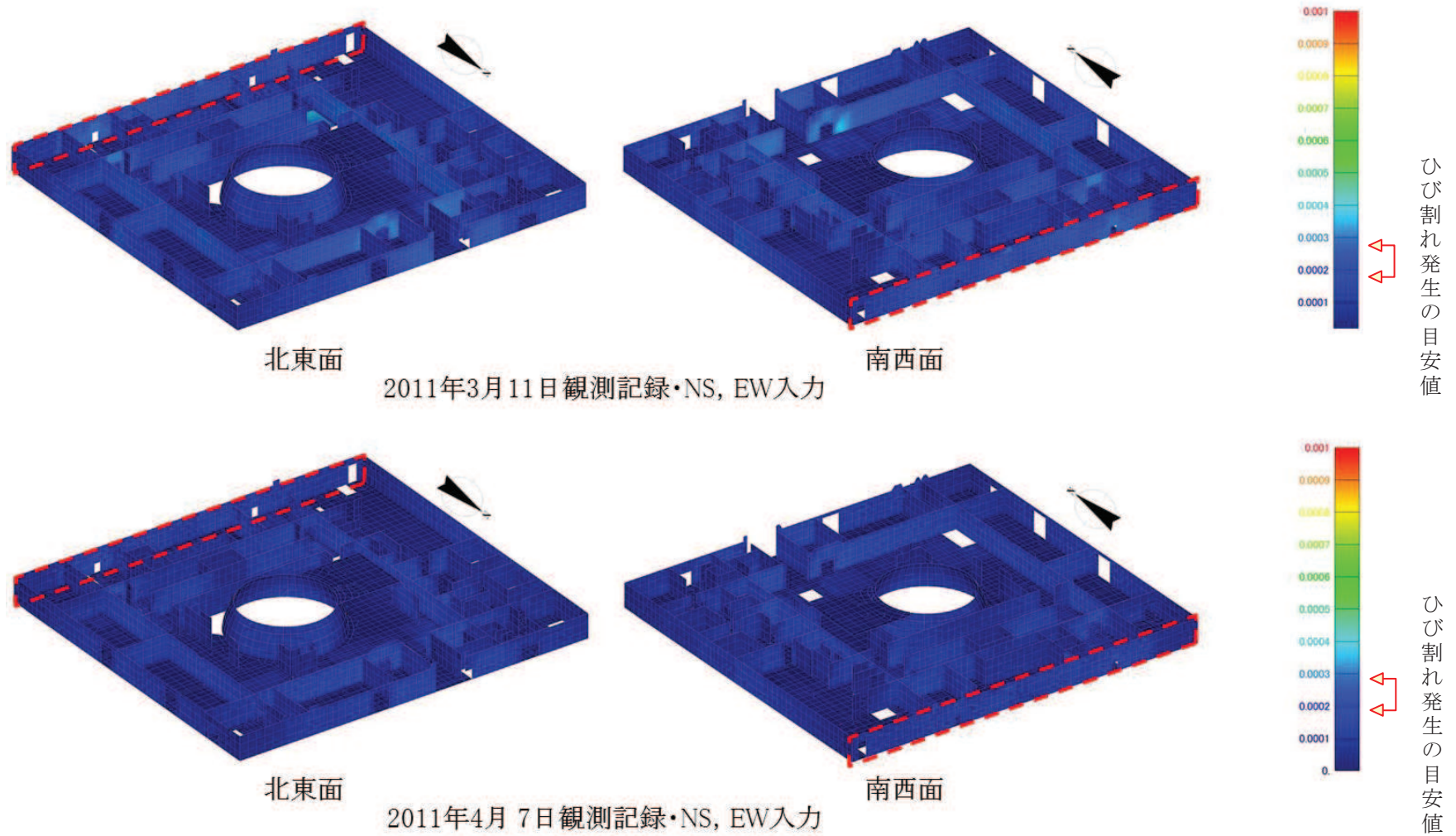


図 29 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 1 階 R1 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 29 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上 1 階 R1 通り)

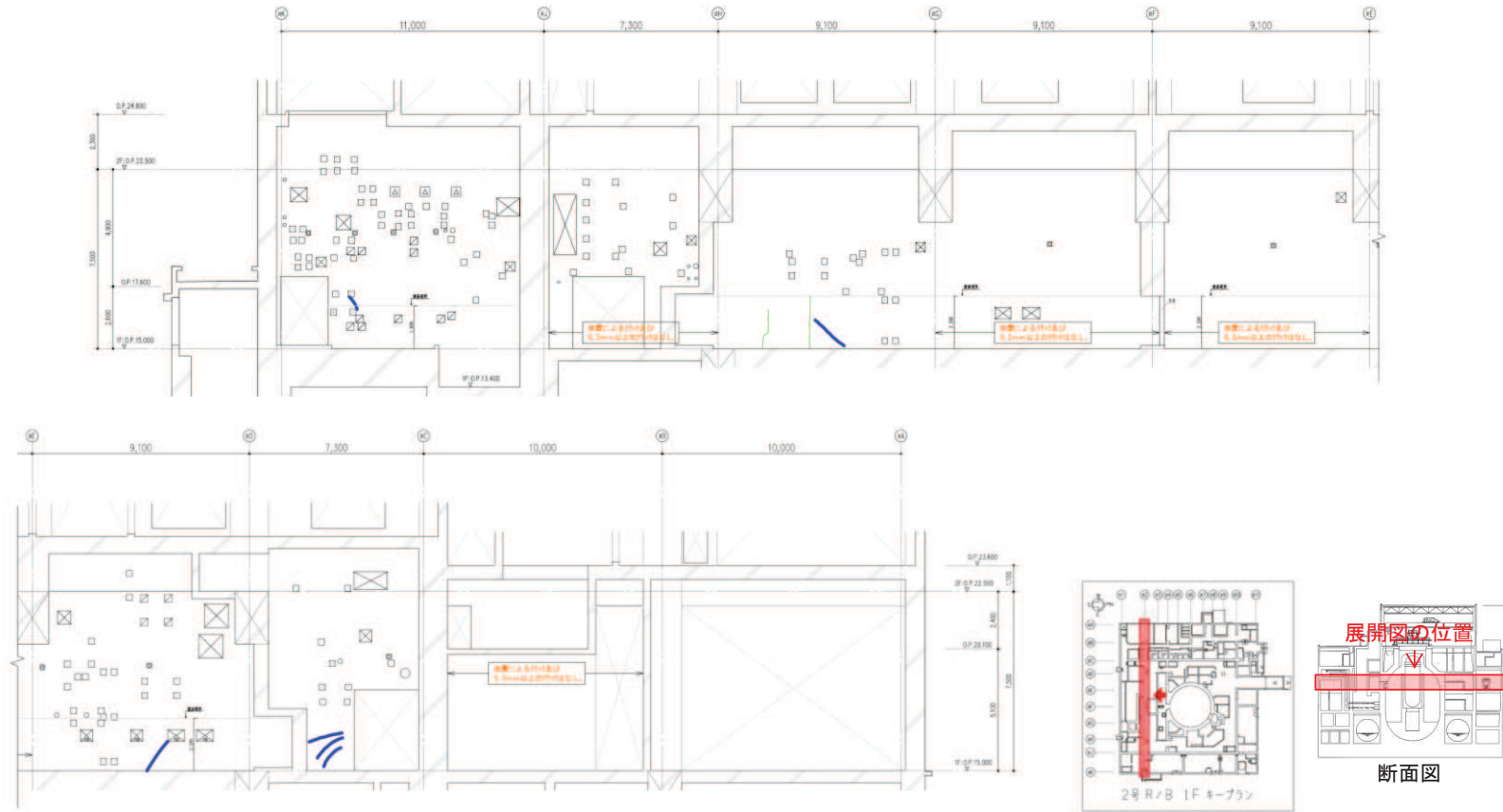
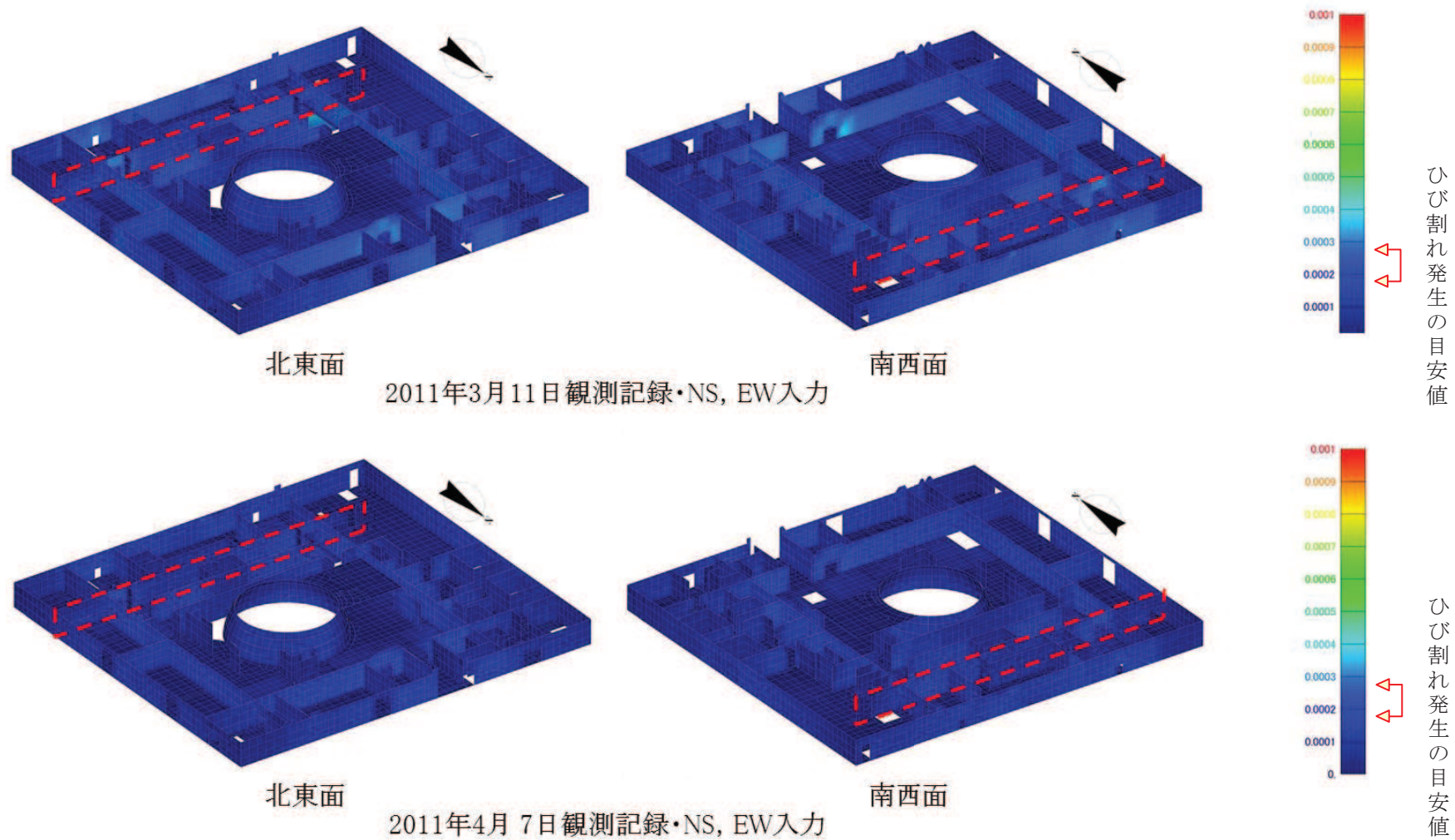
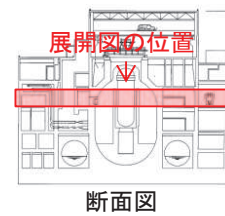
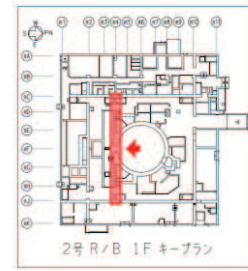
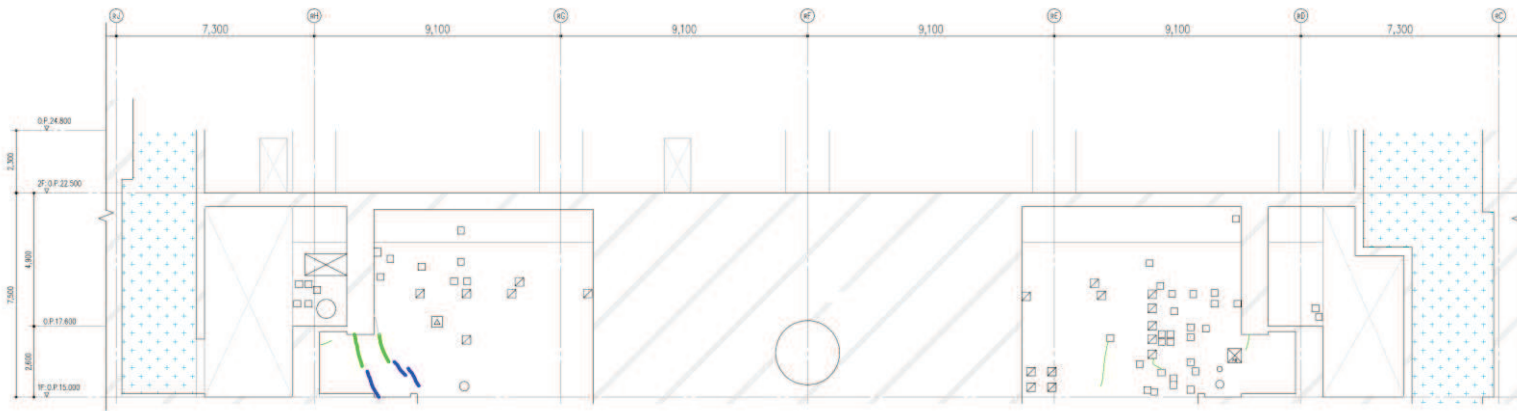


図 30 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上1階 R2 通り)



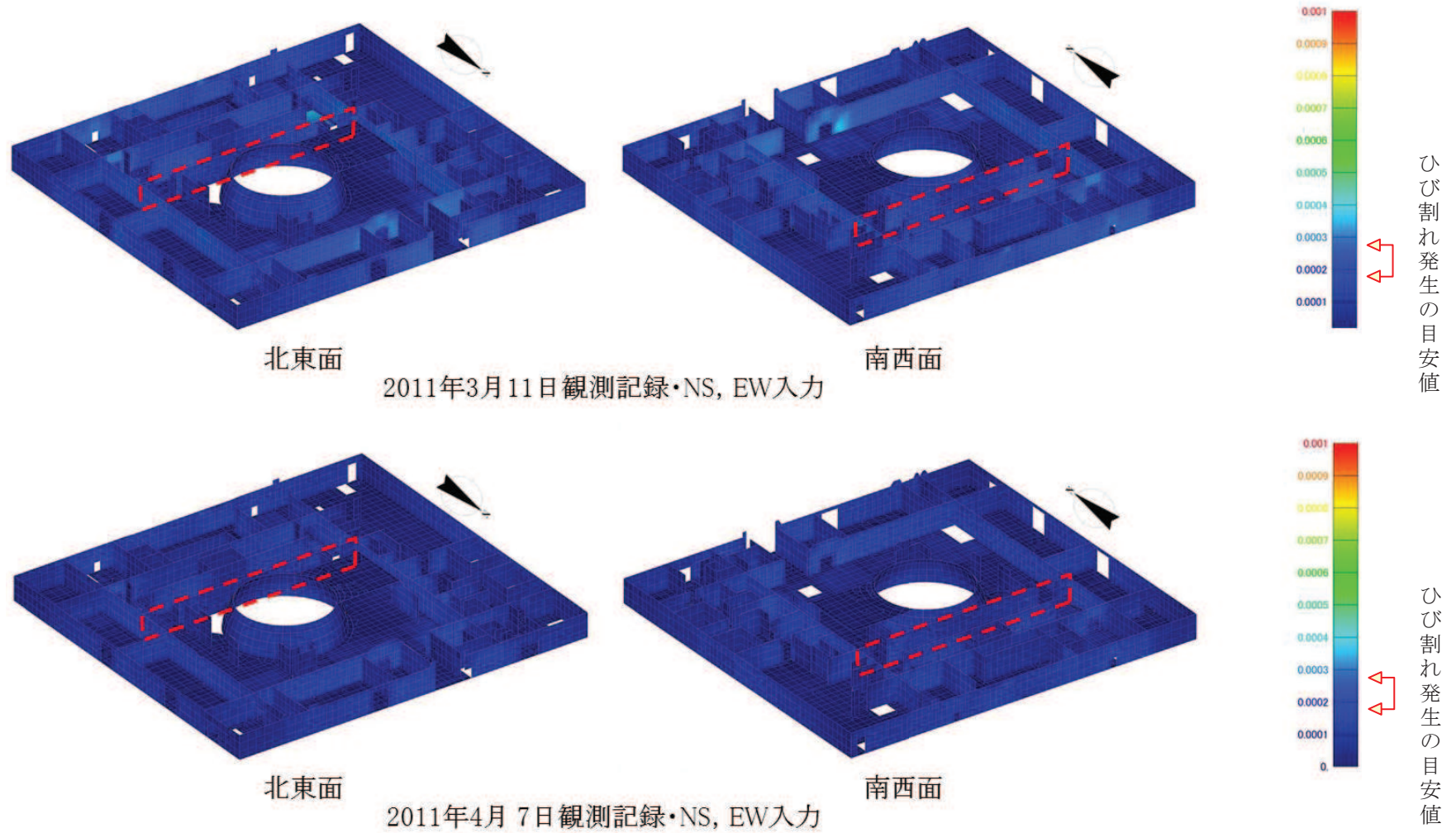
面内せん断ひずみコンター図

図 30 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 R2 通り)



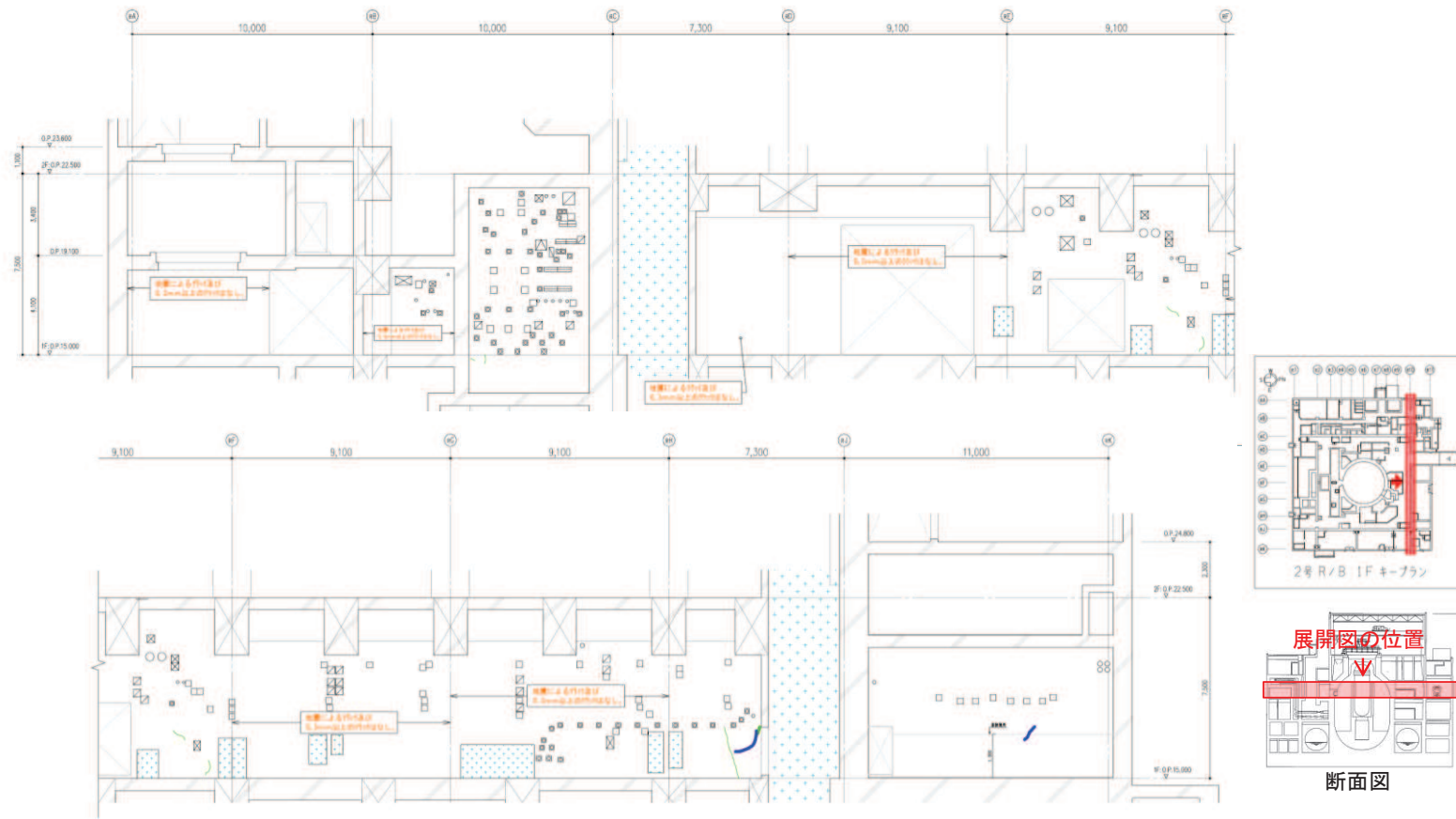
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 31 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上1階 R4 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 31 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 R4 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	はくらく	
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 32 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 1 階 R10 通り)

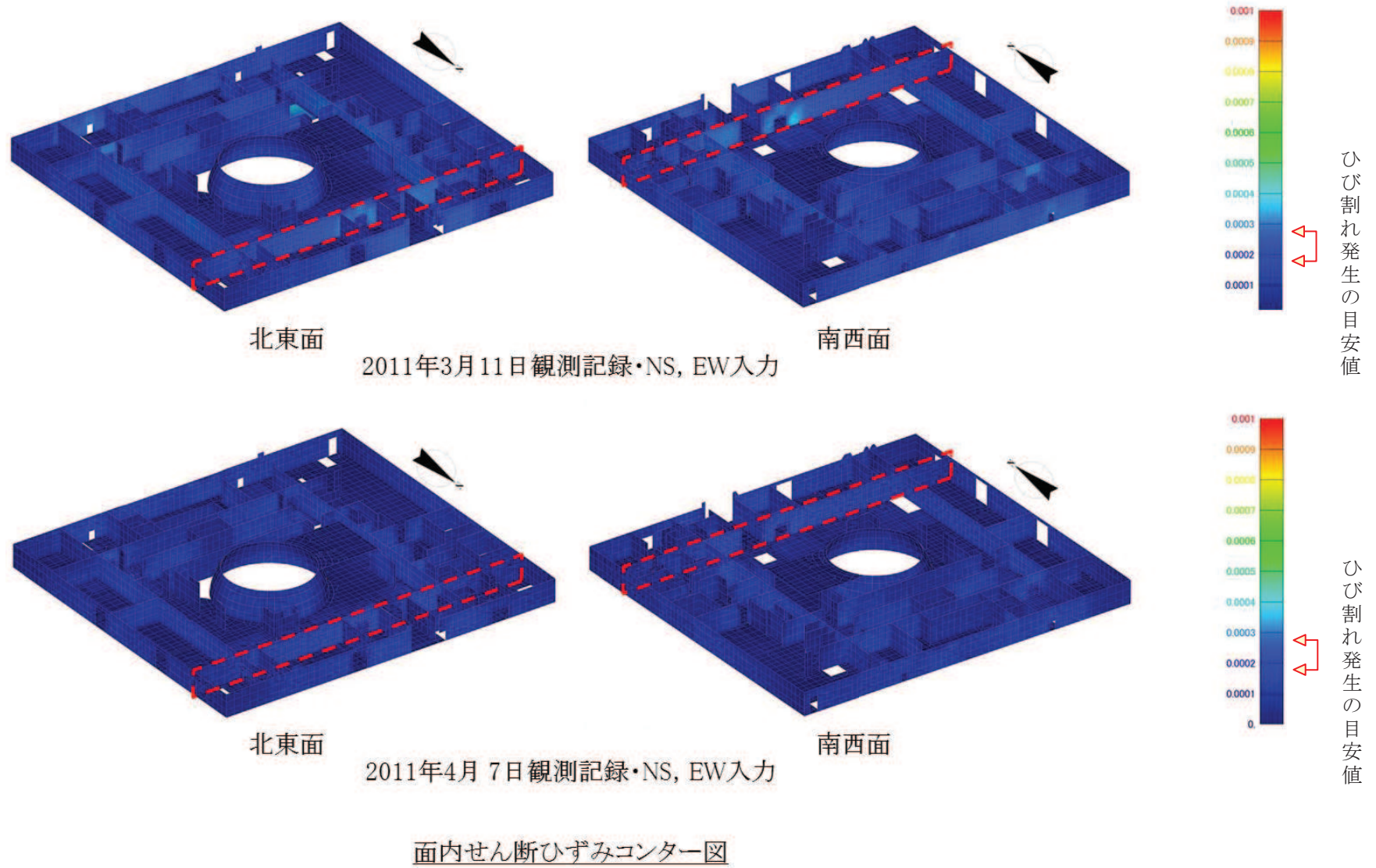


図 32 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 R10 通り)

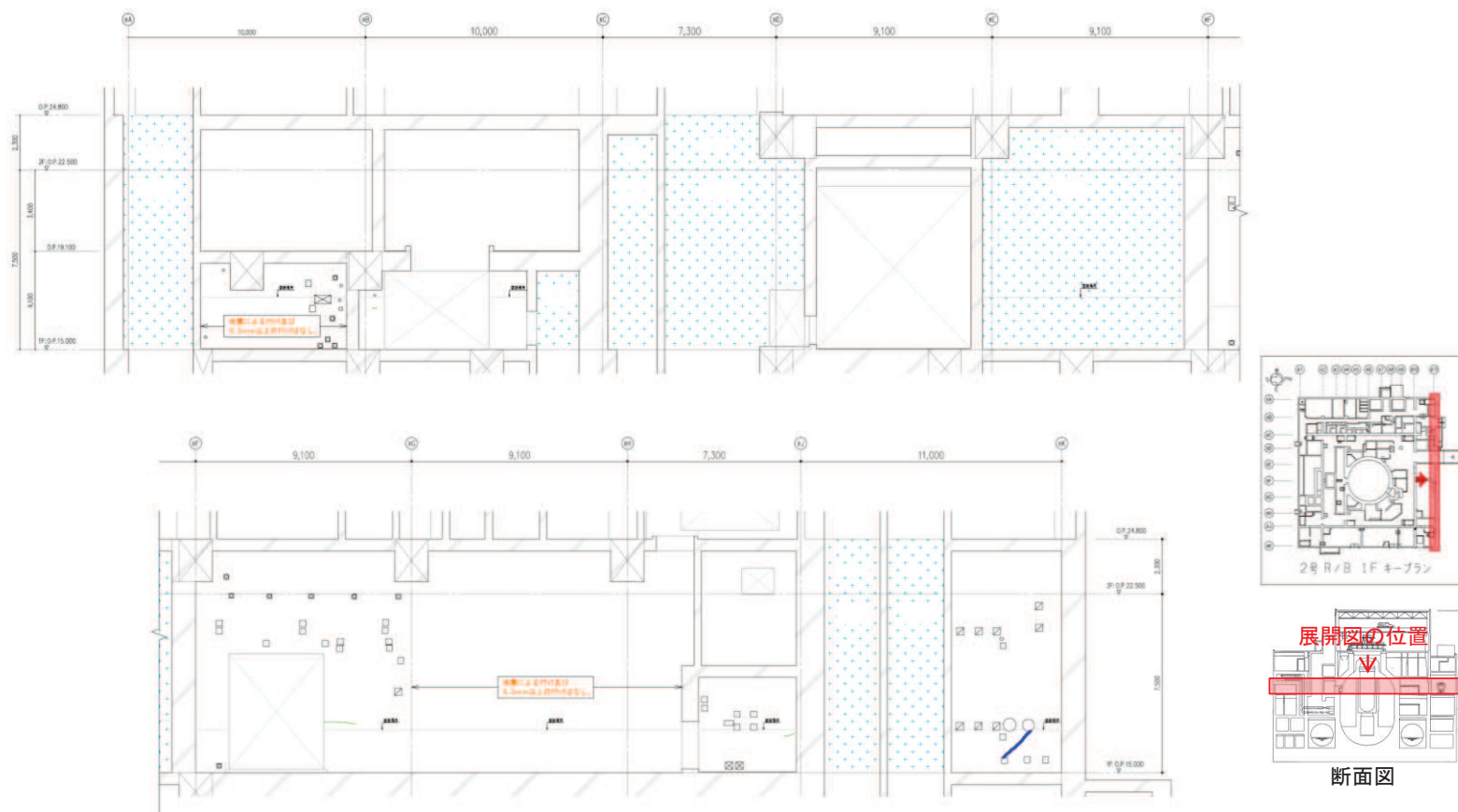


図 33 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 1 階 R11 通り)

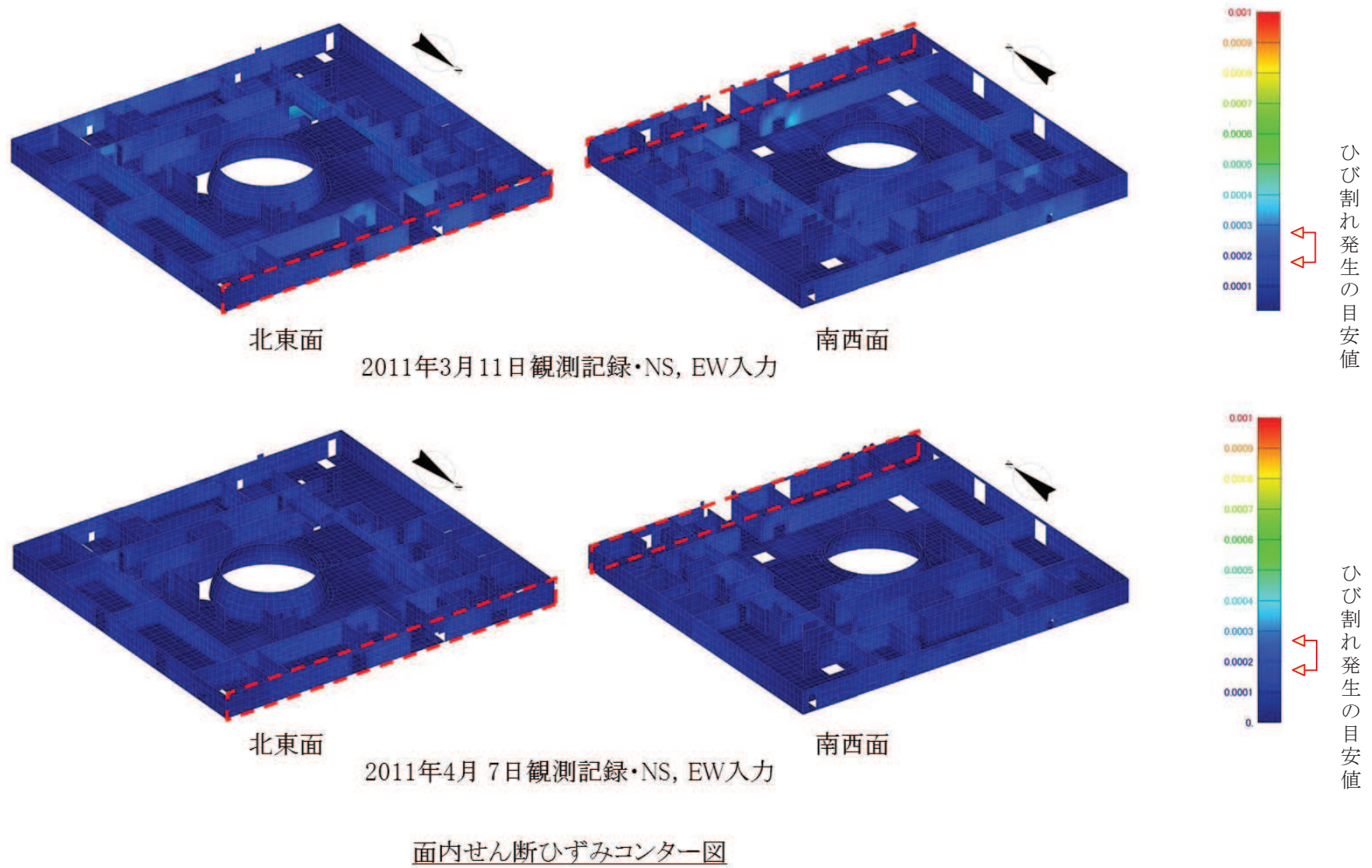


図 33 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 R11 通り)

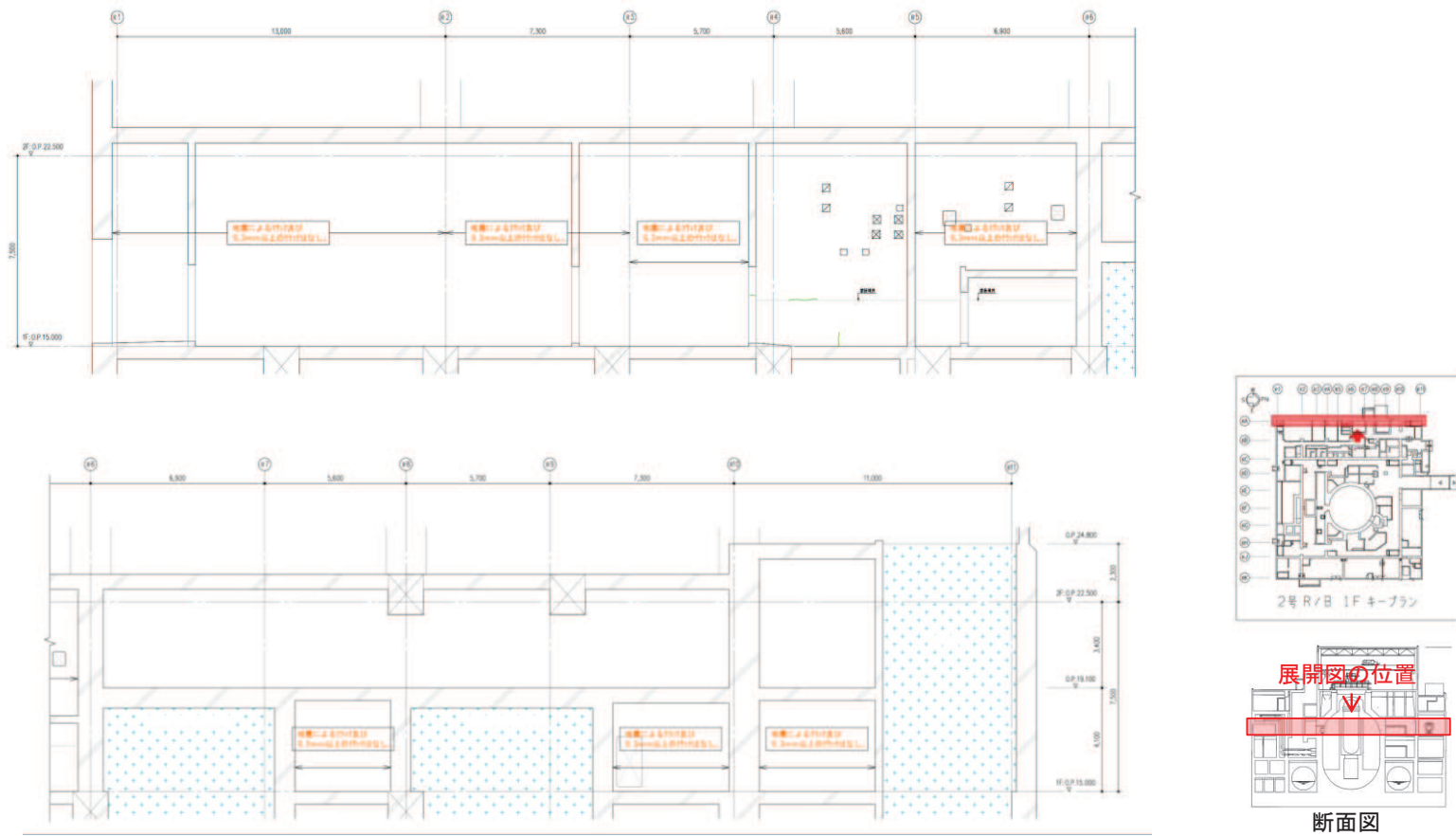
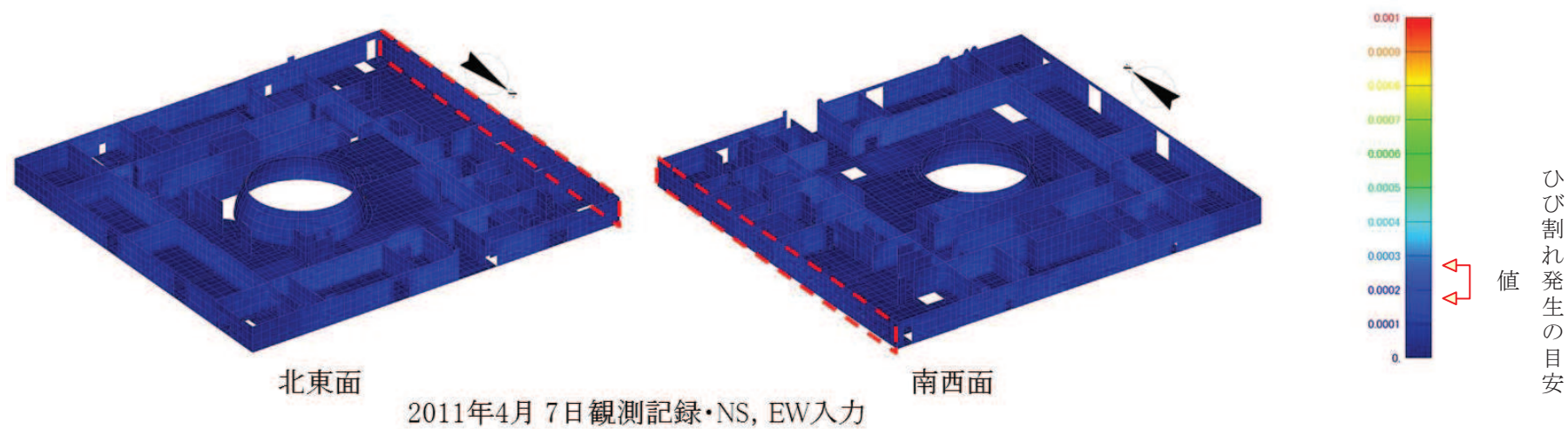
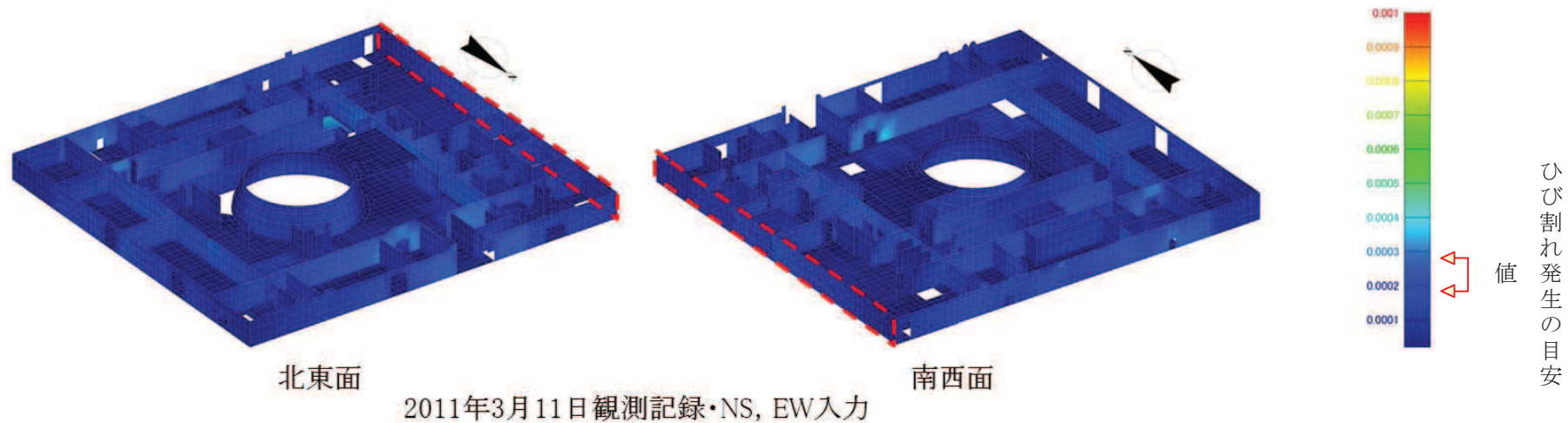
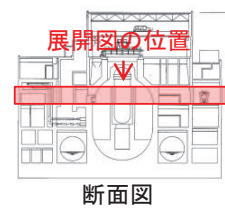
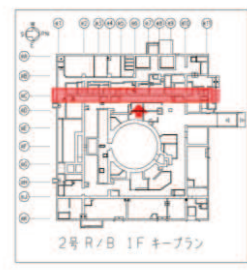
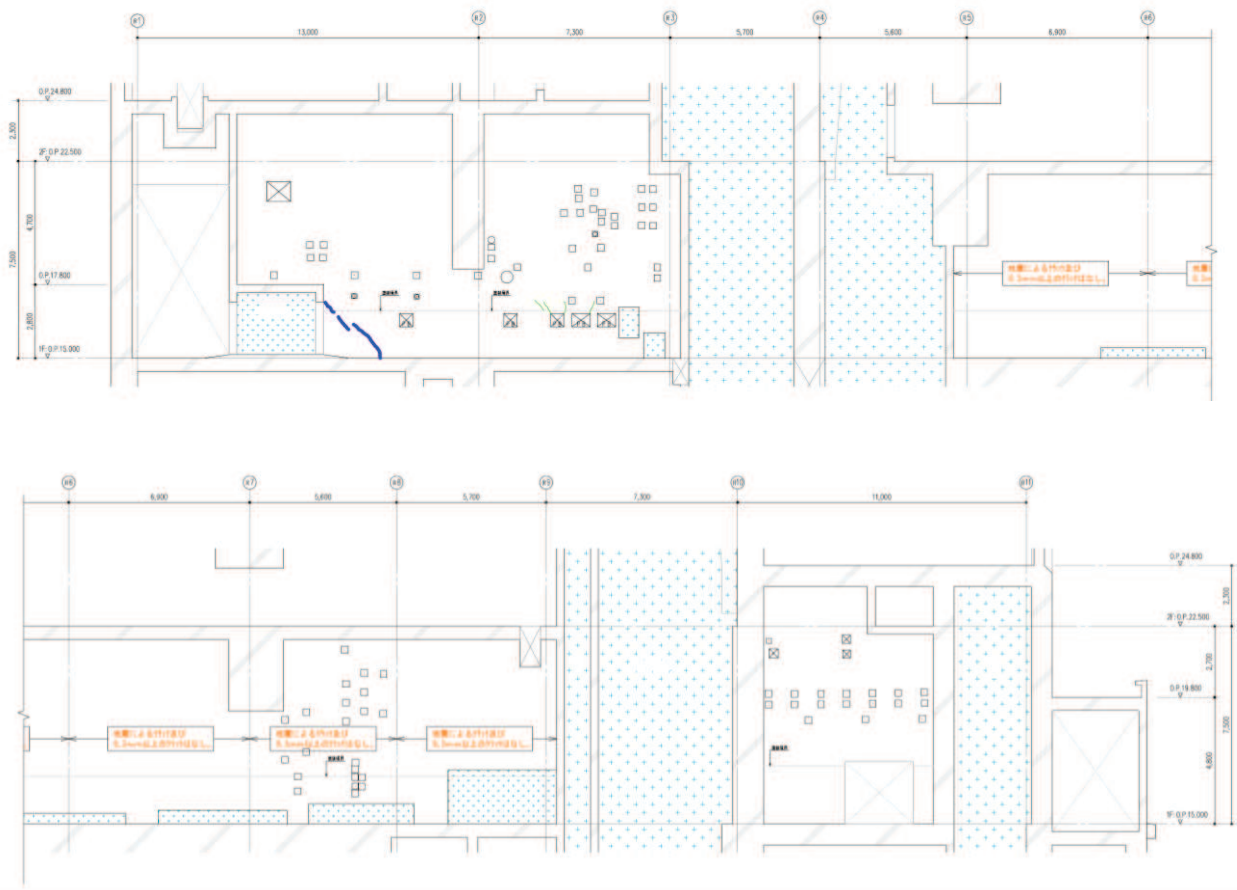


図 34 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上1階 RA 通り)



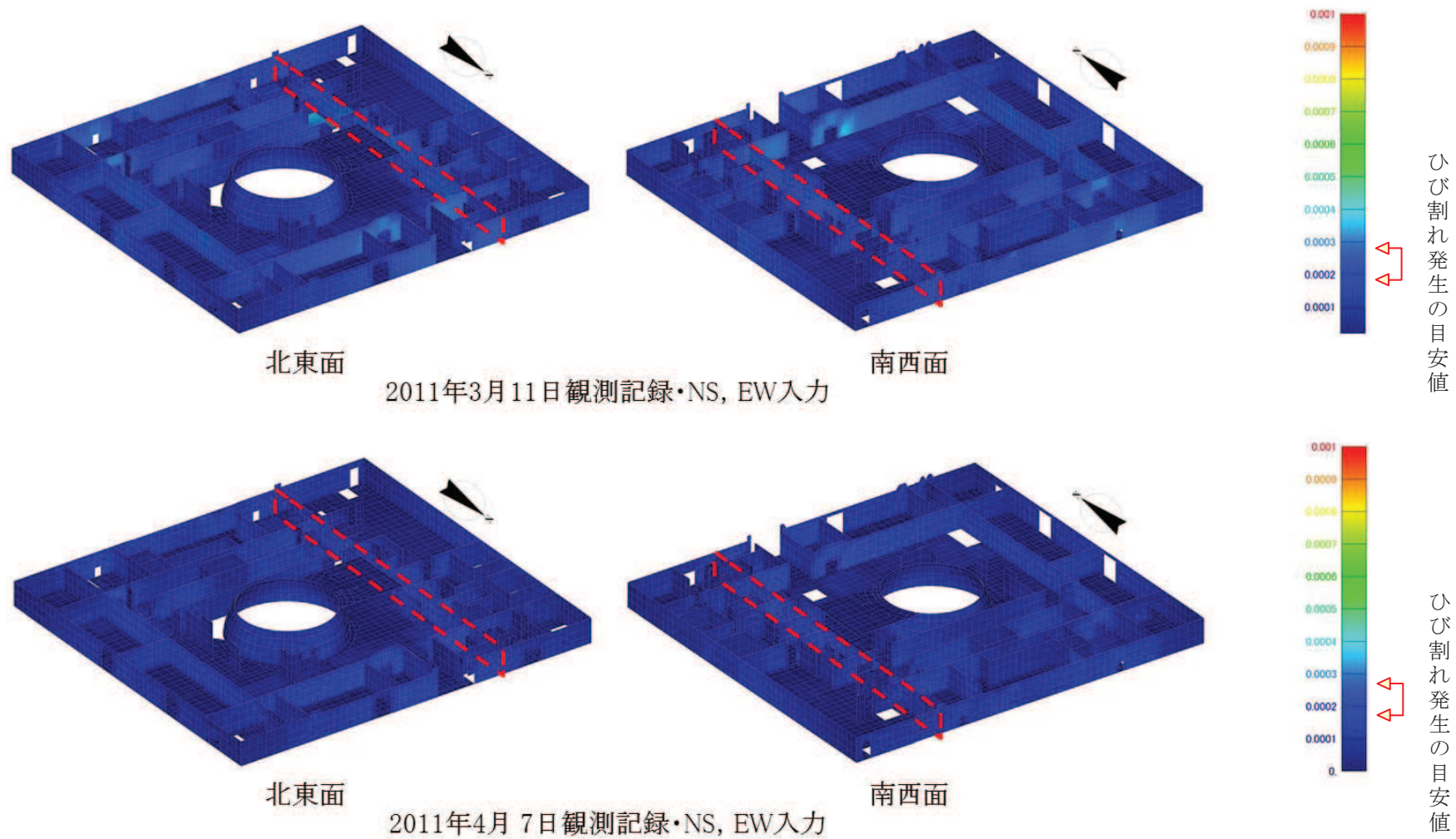
面内せん断ひずみコンター図

図 34 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 RA 通り)



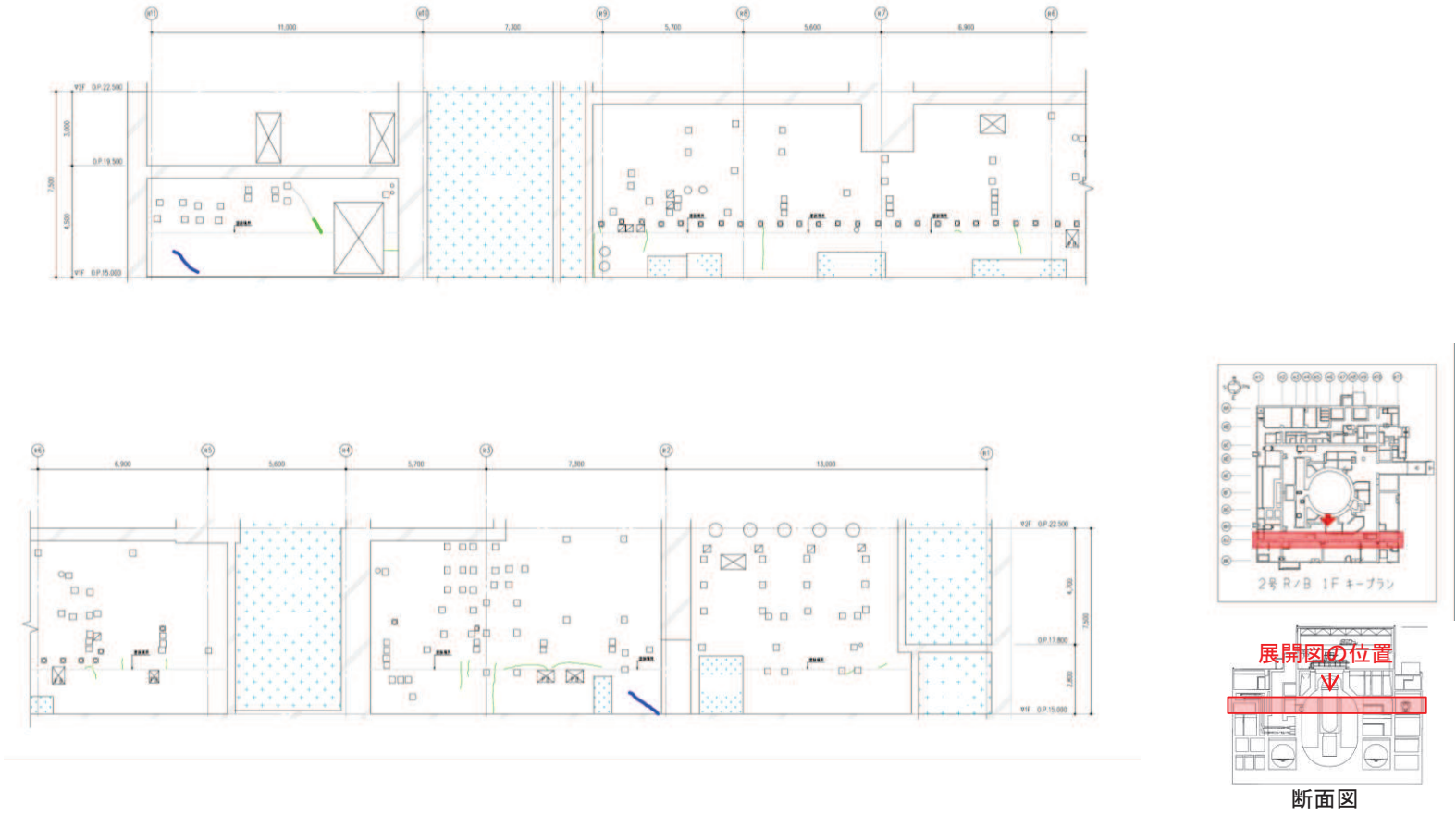
地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上~1.0mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満	はくらく	
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 35 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上1階 RC 通り)



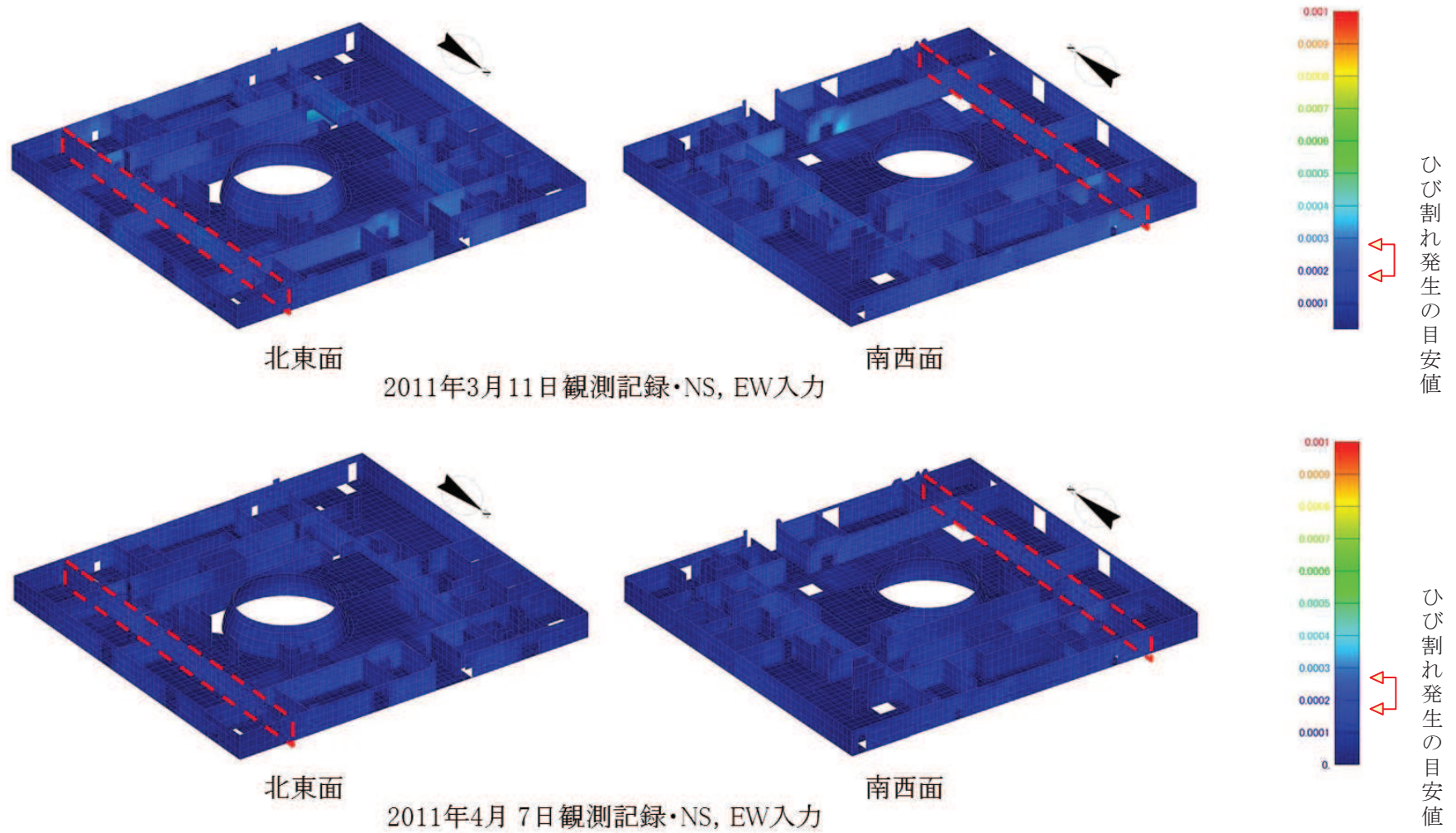
面内せん断ひずみコンター図

図 35 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 RC 通り)



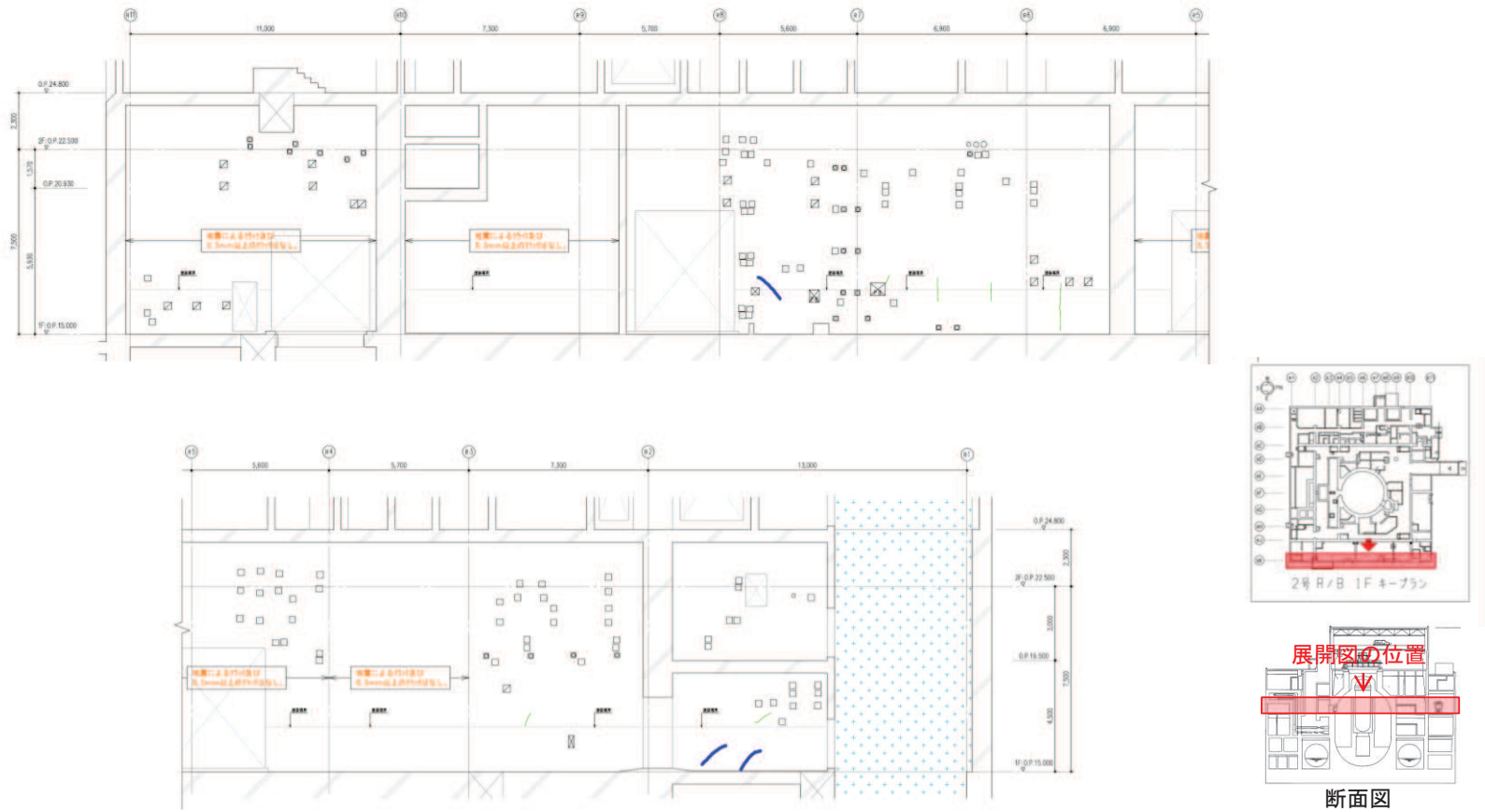
地震による		地震以外		
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満	幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上	はくらく
	1.0mm以上			確認不能の範囲

図 36 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上1階 RJ 通り)



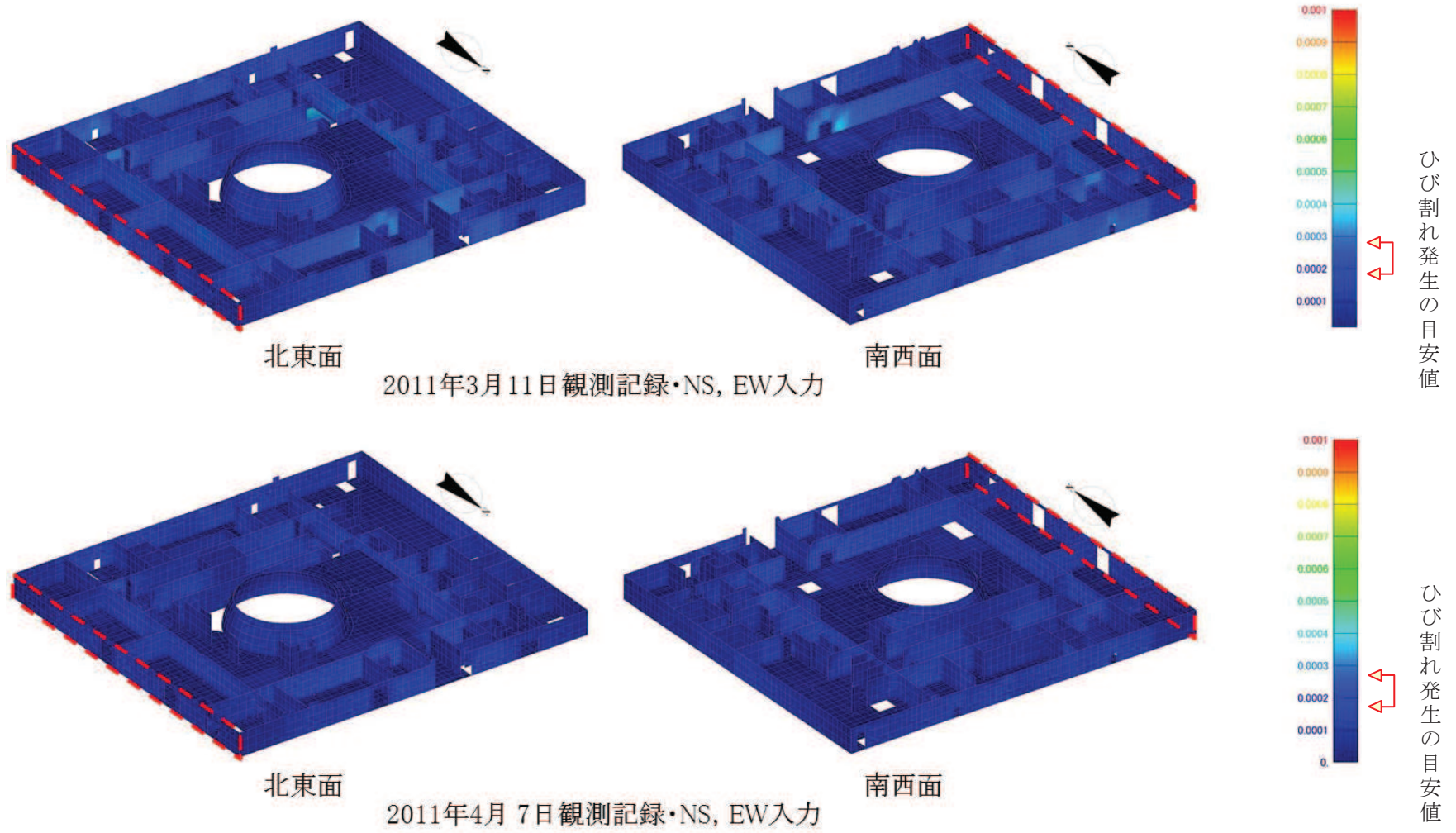
面内せん断ひずみコンター図

図 36 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 RJ 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 37 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上1階 RK 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 37 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 RK 通り)

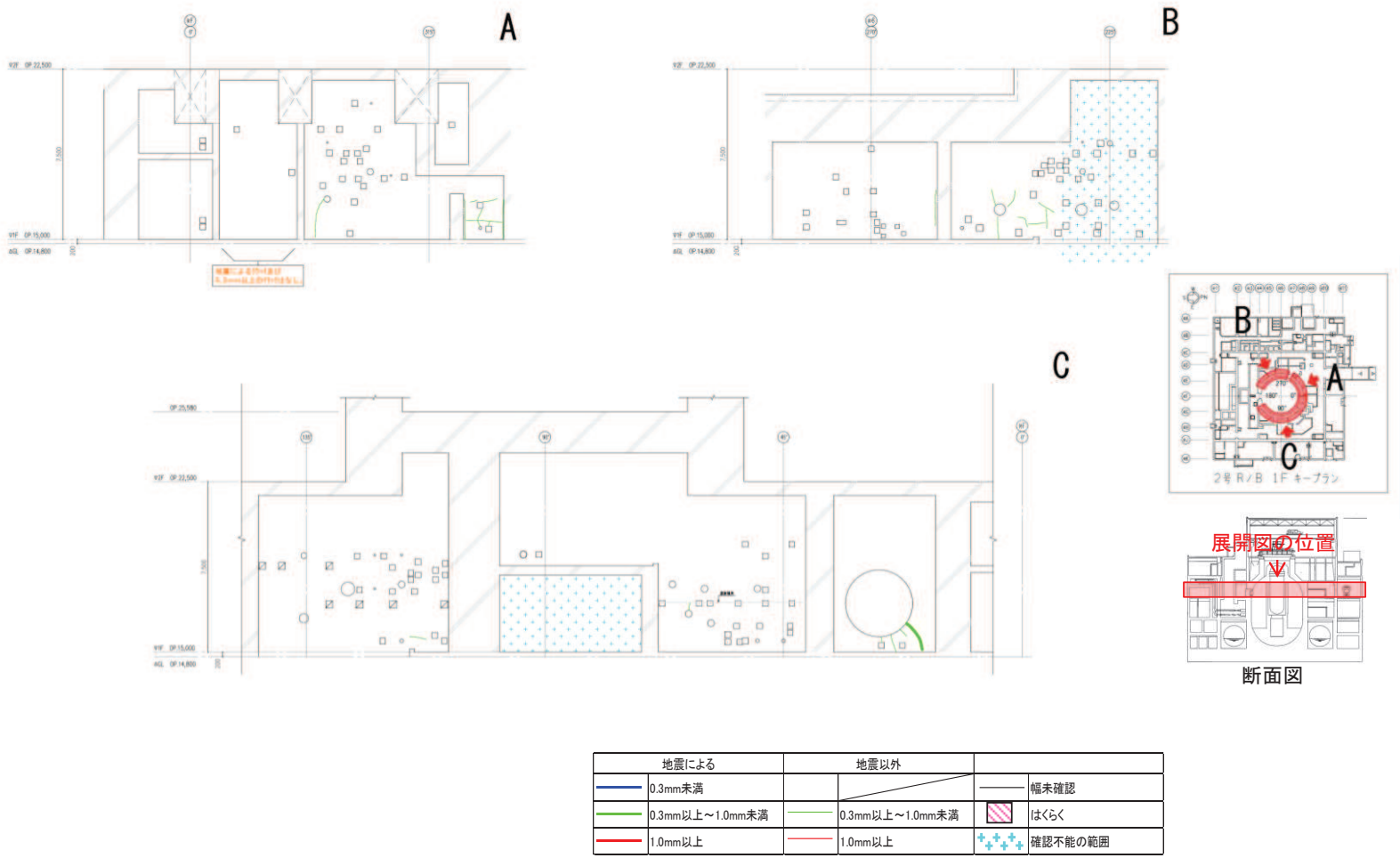
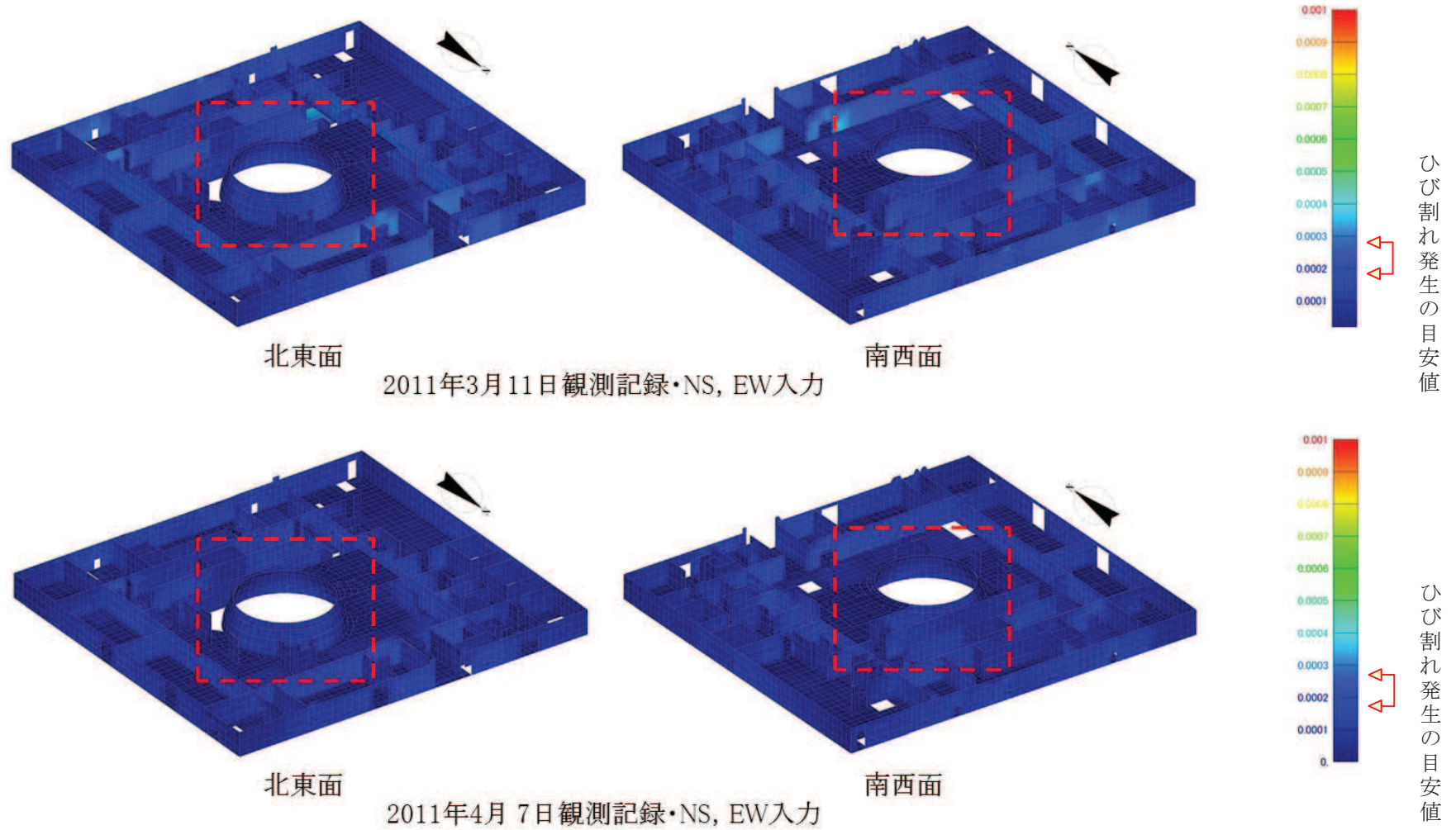
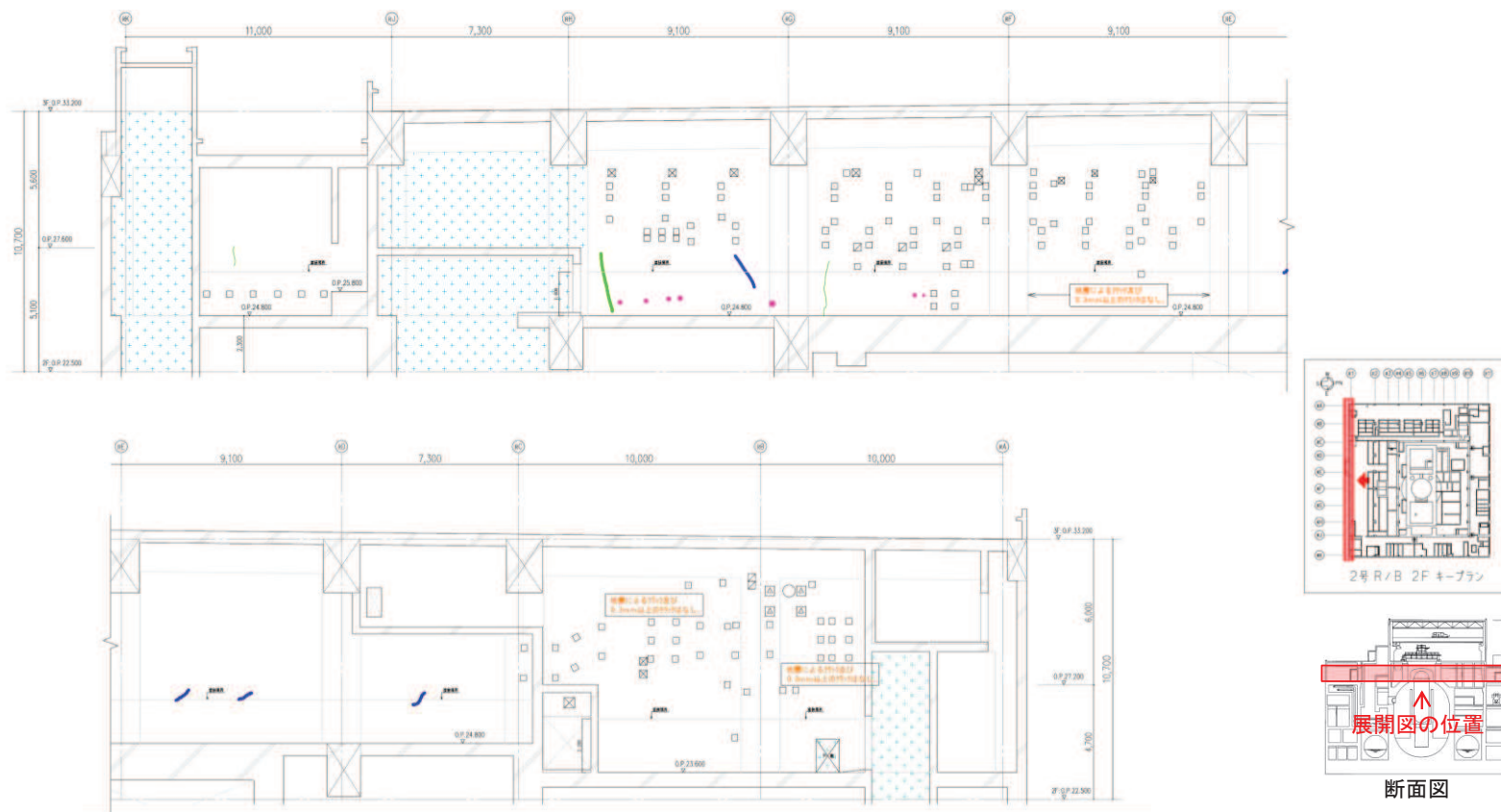


図 38 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上1階 シェル壁)



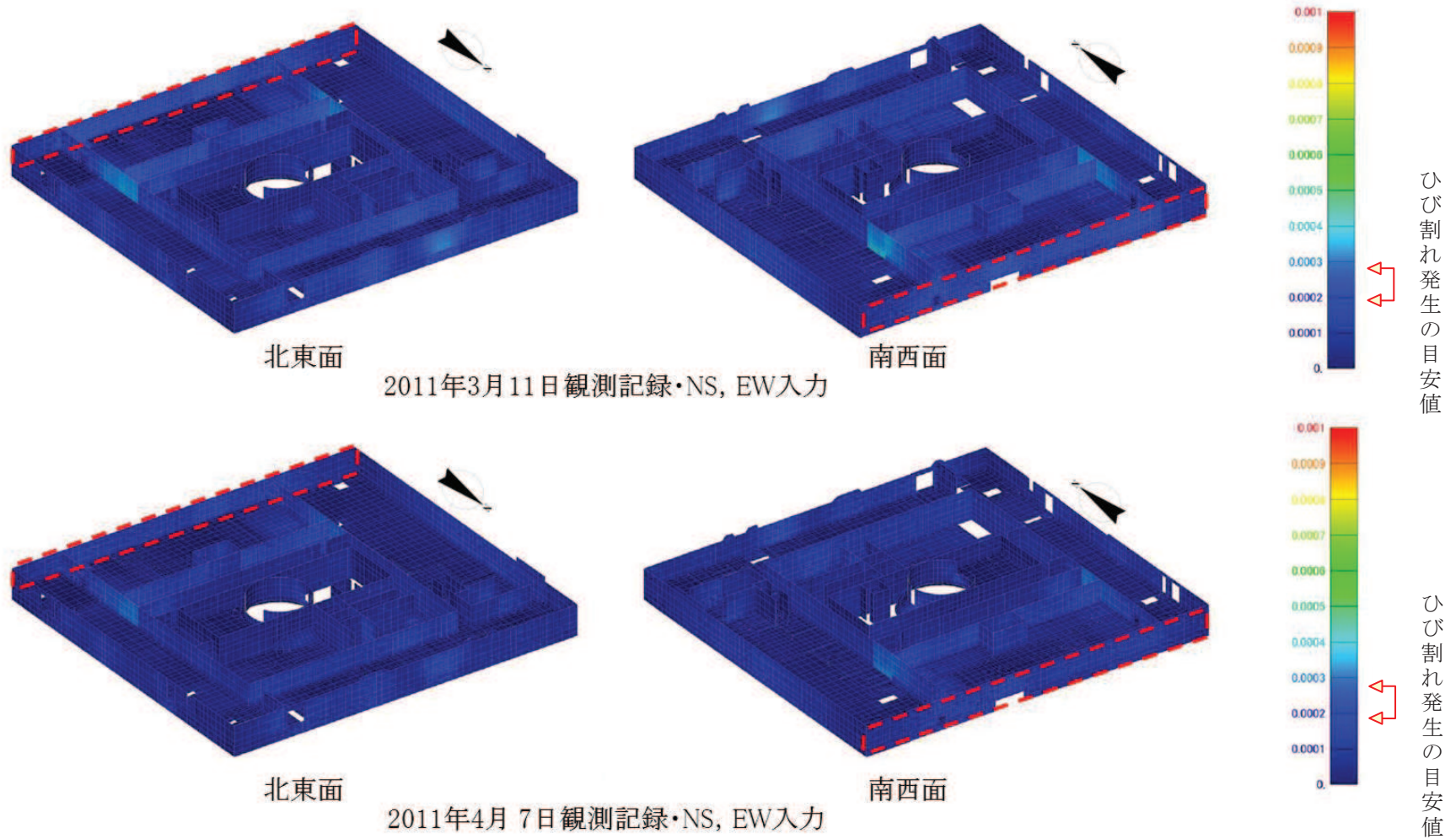
面内せん断ひずみコンター図

図 38 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上1階 シェル壁)



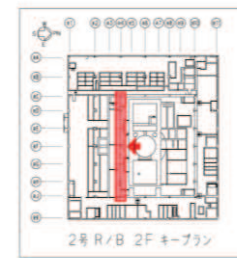
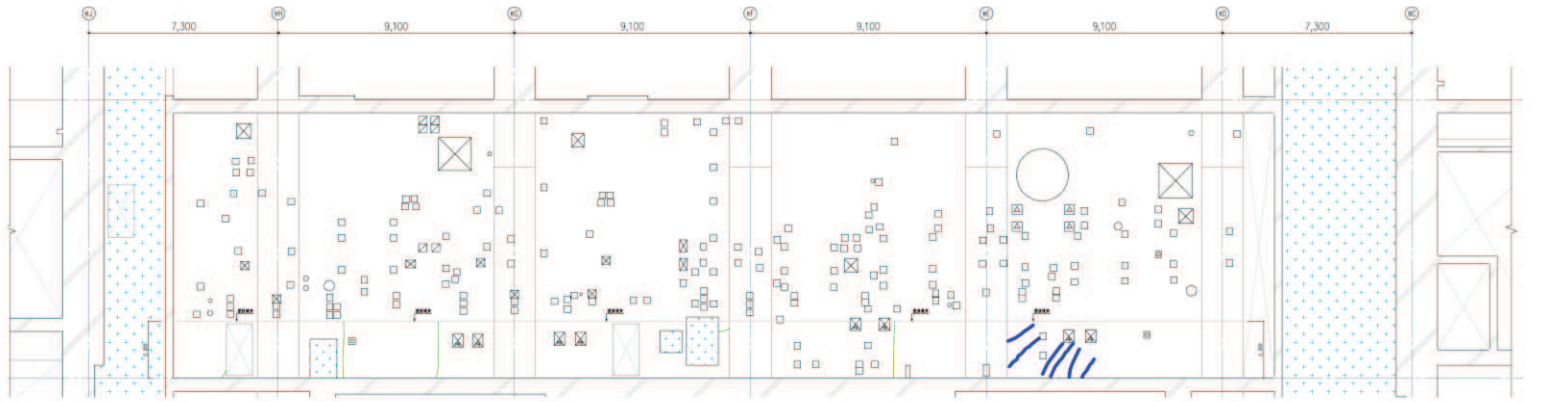
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 39 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 2 階 R1 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 39 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上2階 R1 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 40 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 2 階 R4 通り)

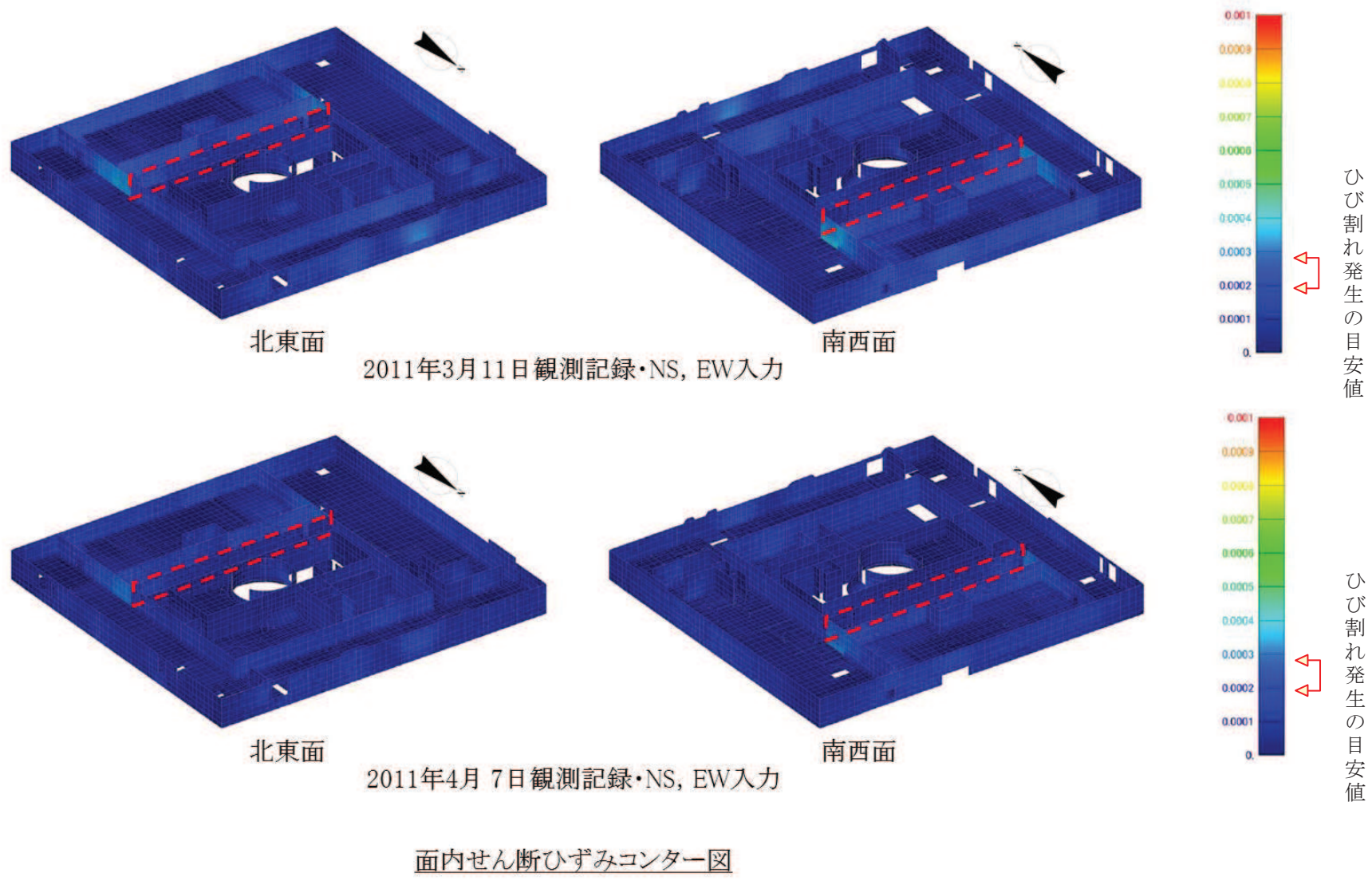
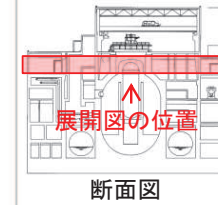
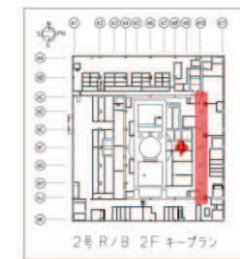
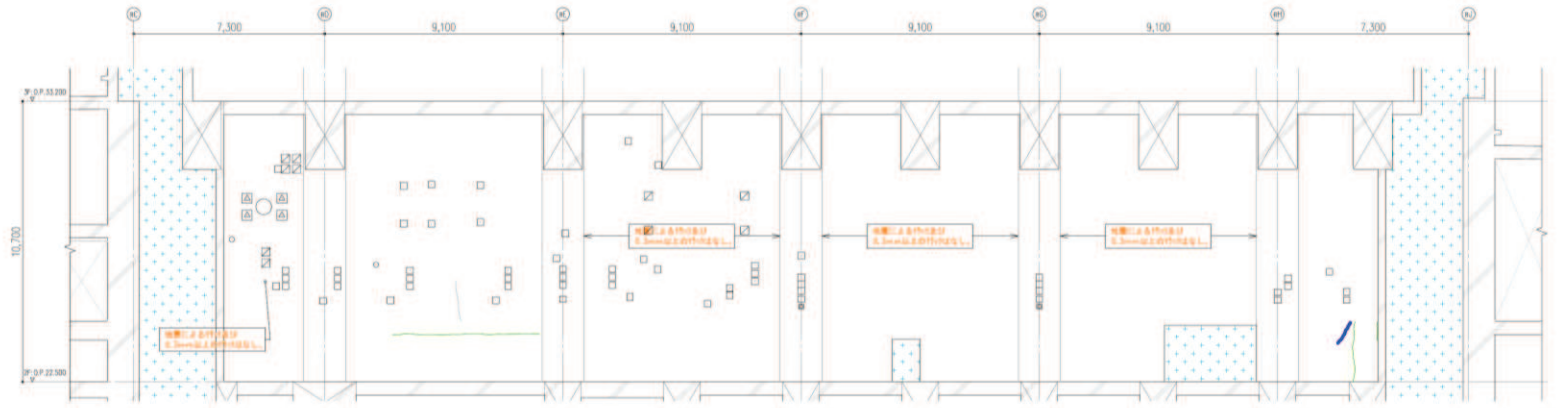
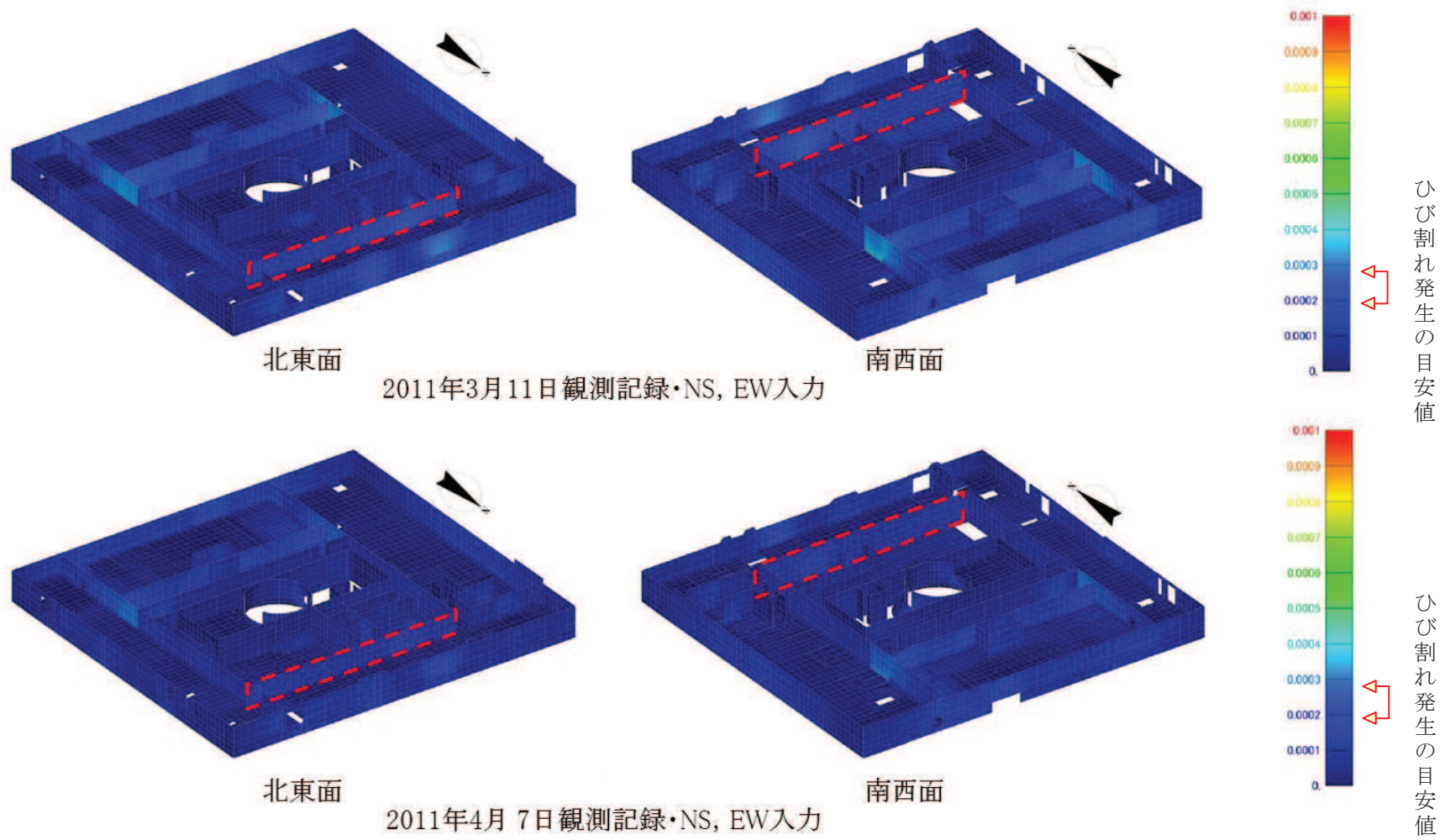


図 40 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上 2 階 R4 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 41 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 2 階 R10 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 41 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上2階 R10 通り)

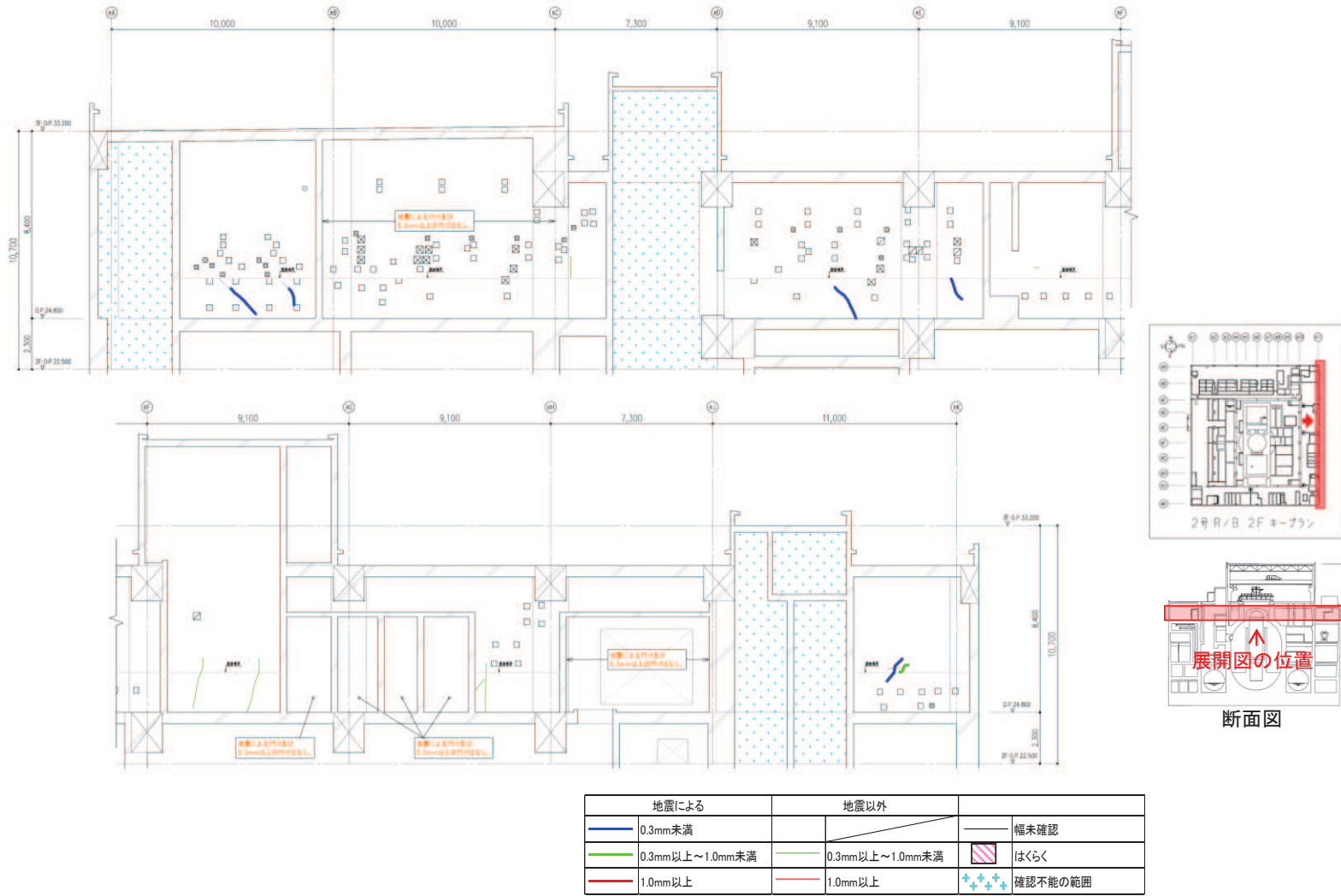


図 42 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 2 階 R11 通り)

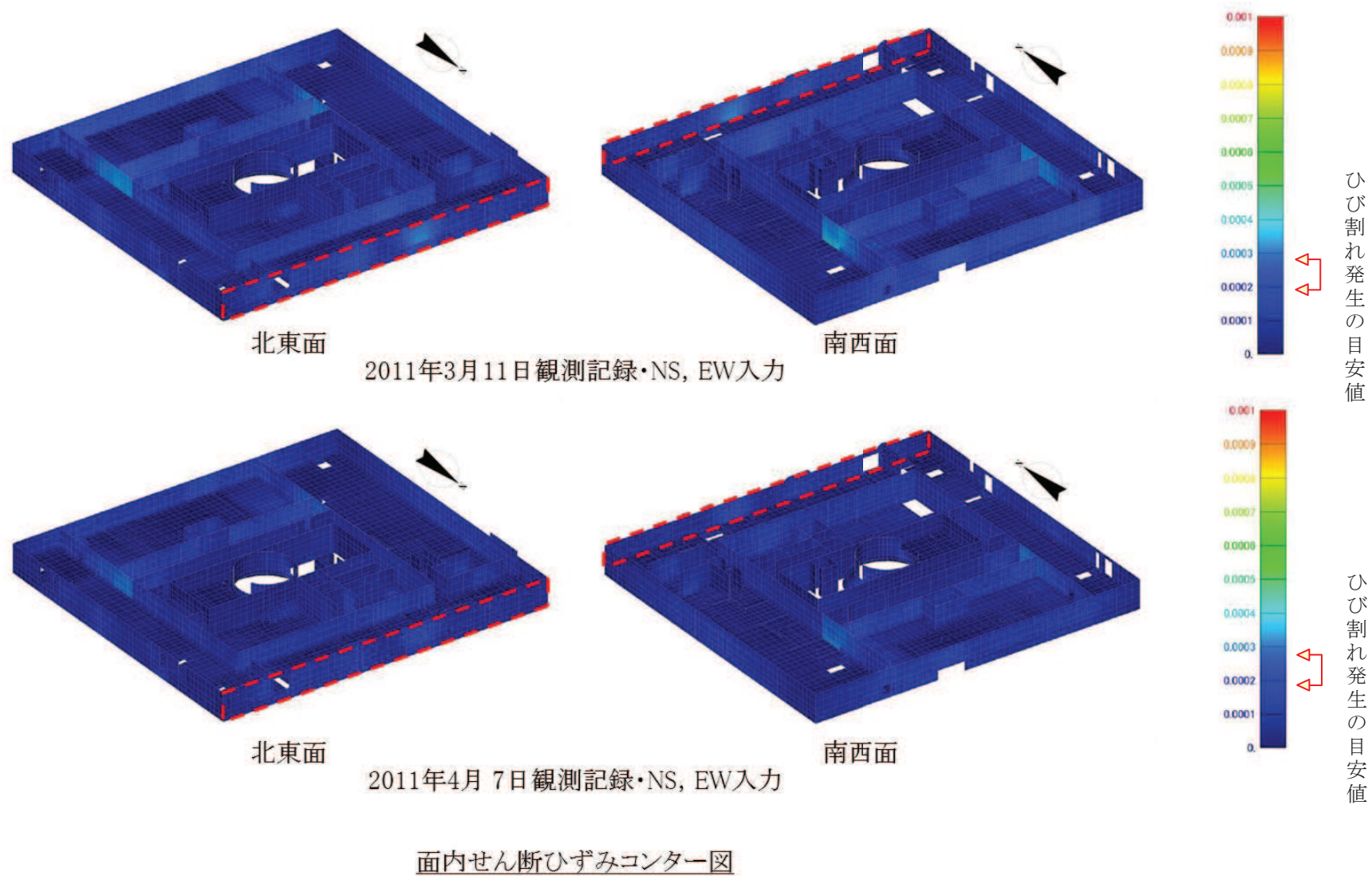
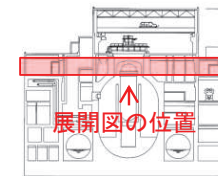
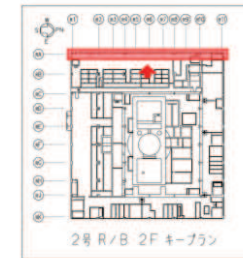
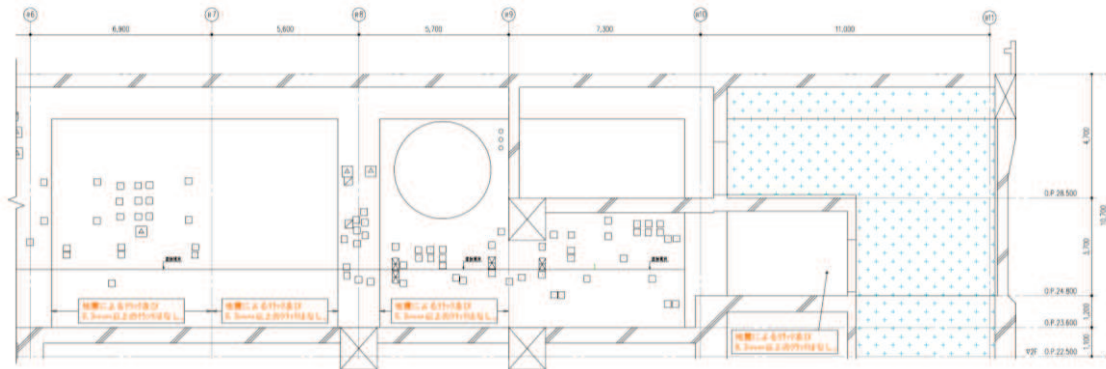
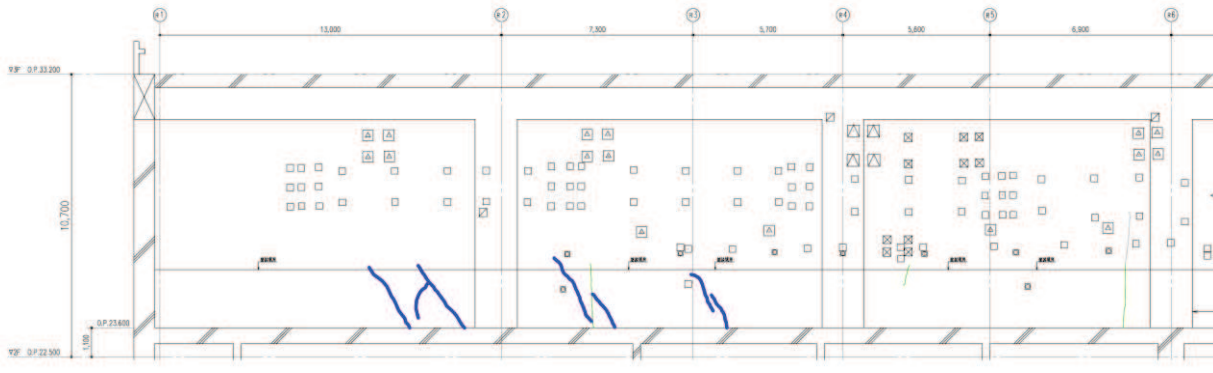


図 42 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上2階 R11 通り)



断面図

地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 43 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 2 階 RA 通り)

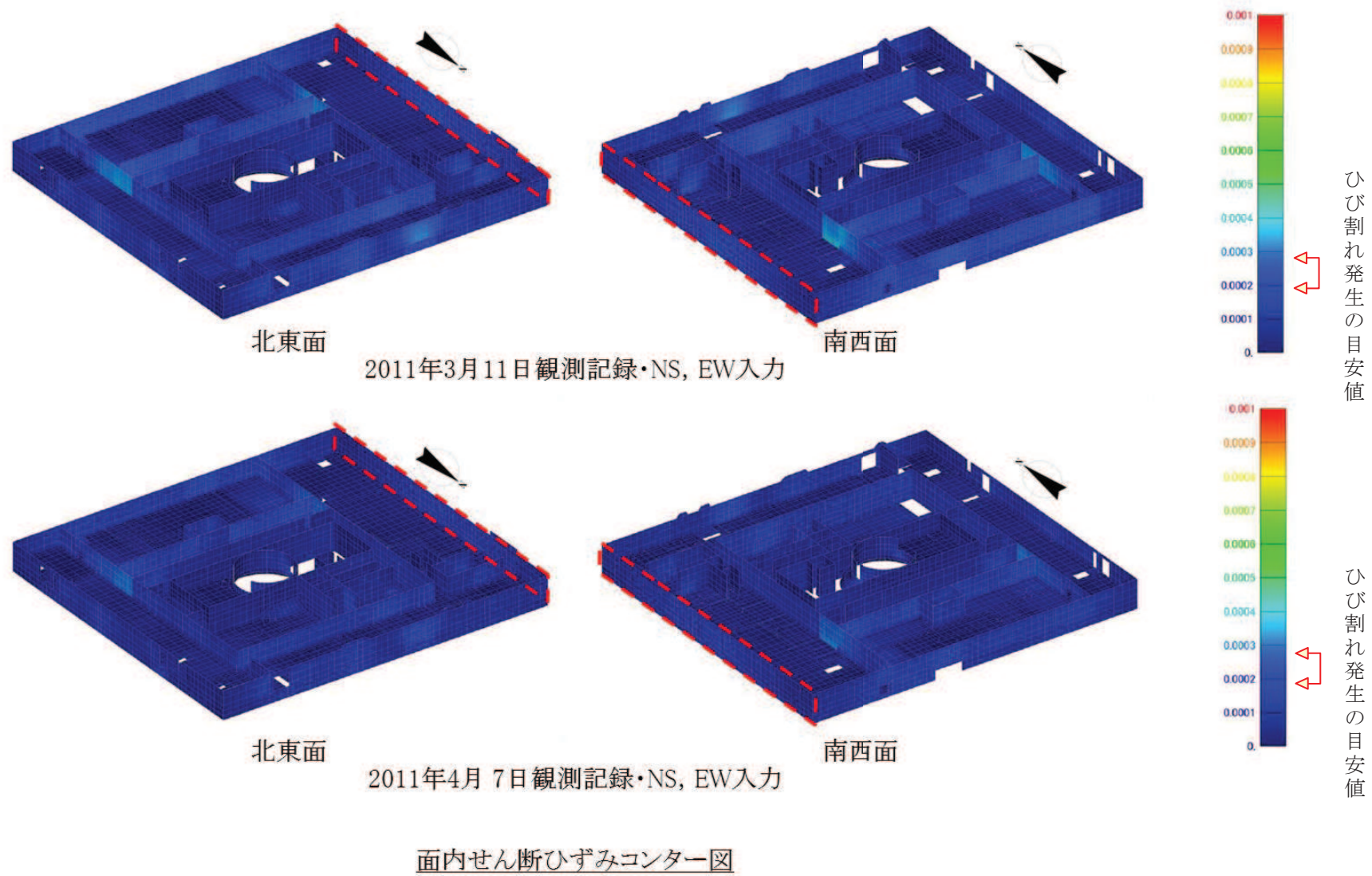
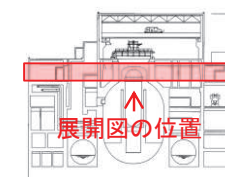
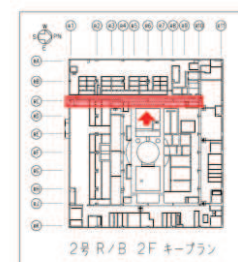
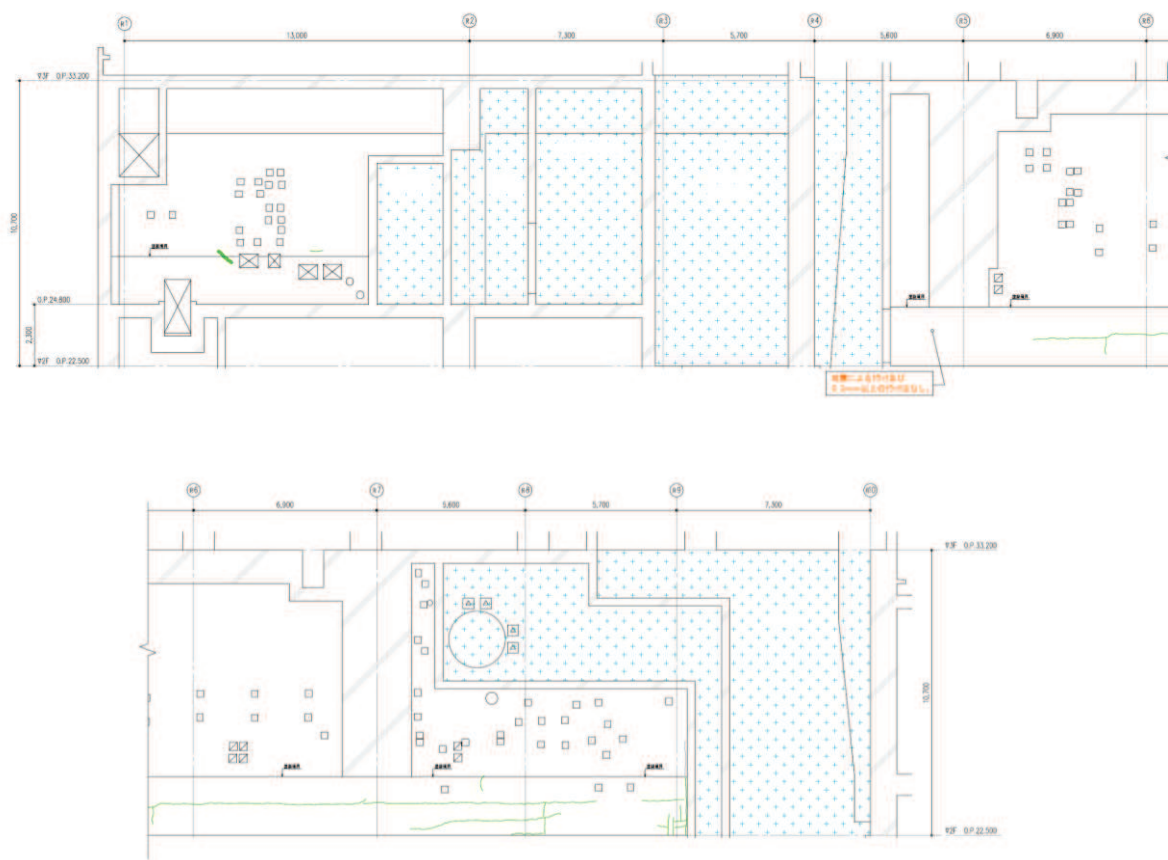


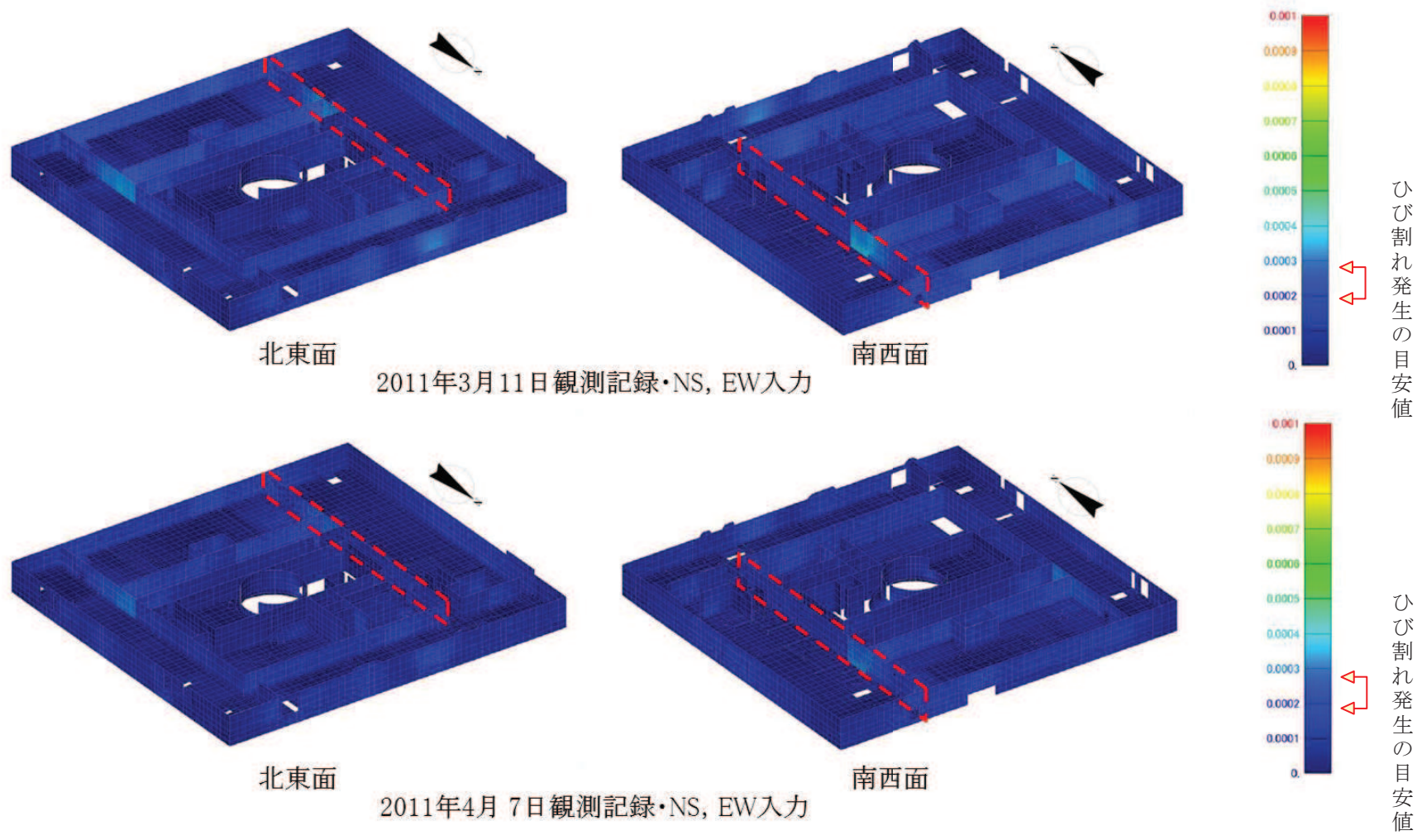
図 43 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上 2 階 RA 通り)



断面図

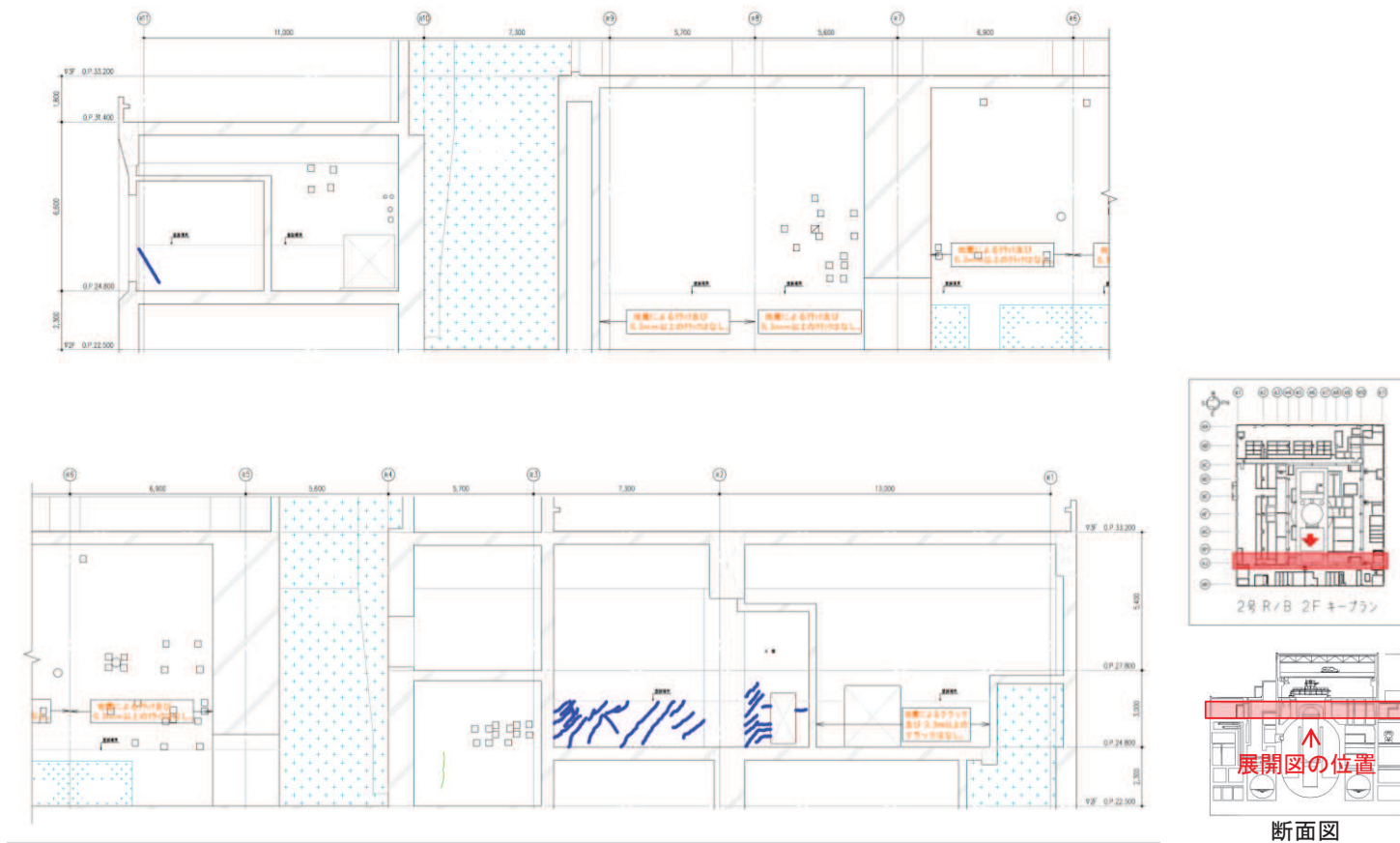
地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 44 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 2 階 RC 通り)



面内せん断ひずみコンター図

図 44 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上 2 階 RC 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		はくらく
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 45 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上2階 RJ 通り)

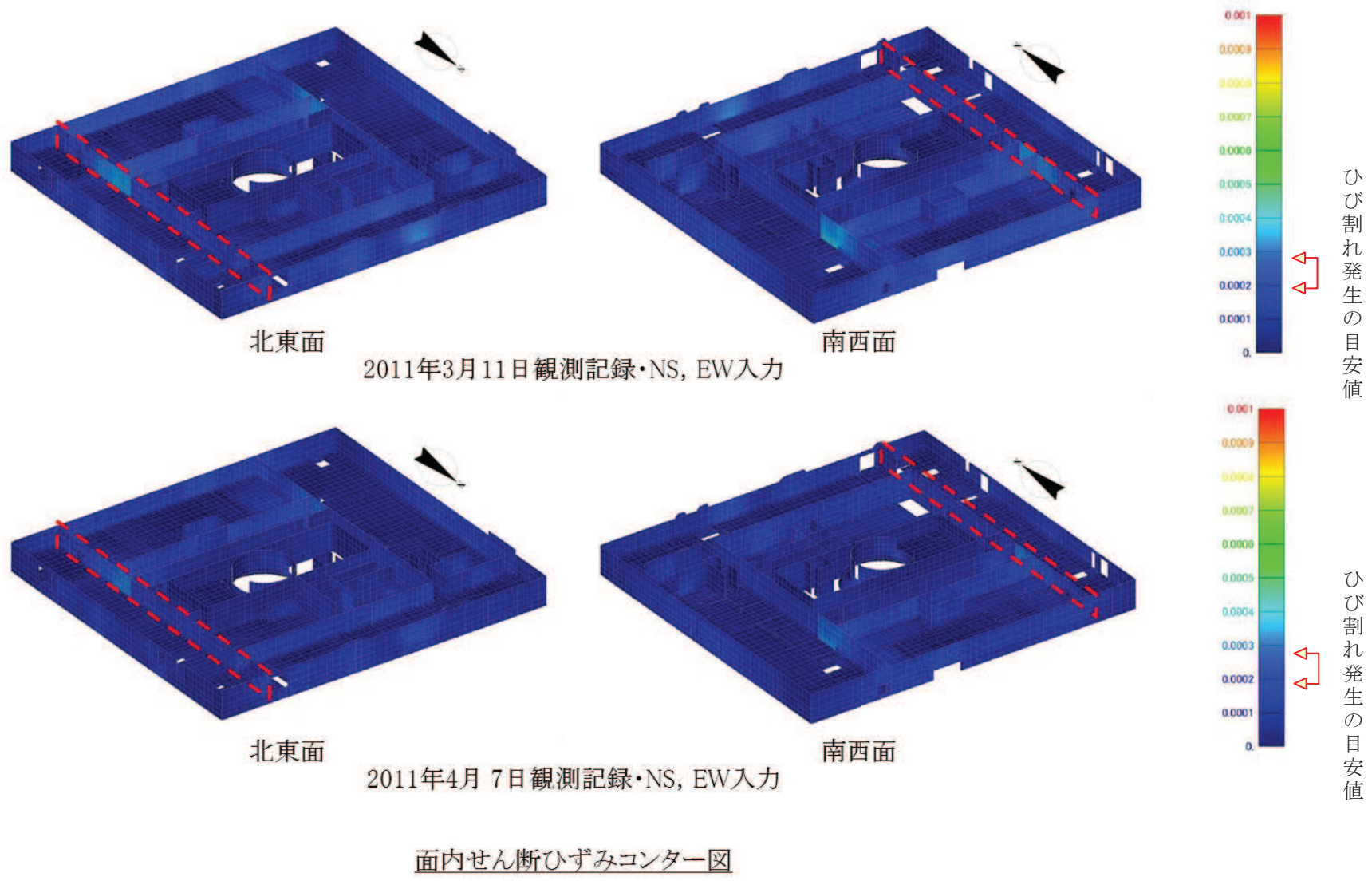


図 45 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上 2 階 RJ 通り)

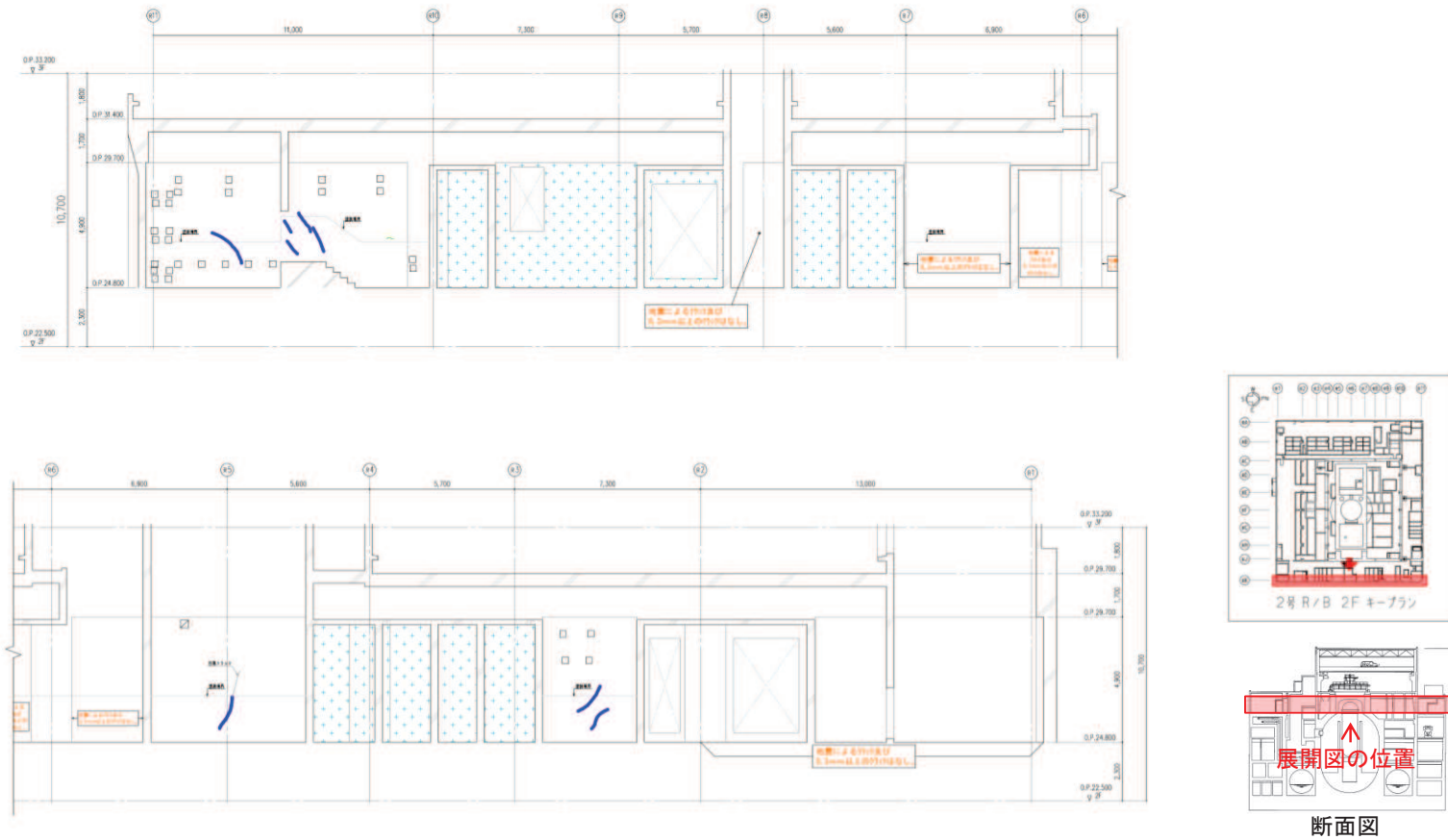


図 46 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 2 階 RK 通り)

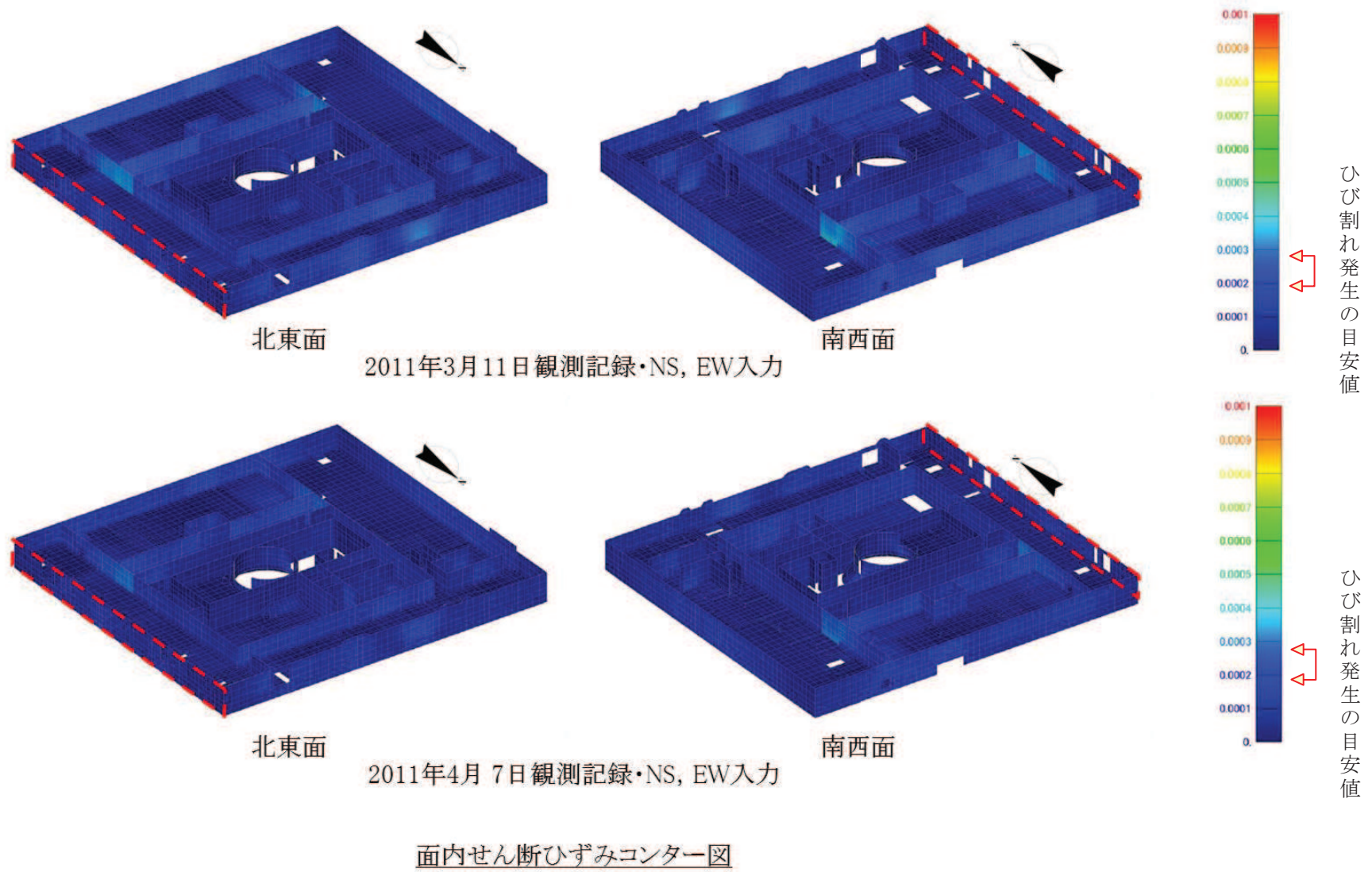
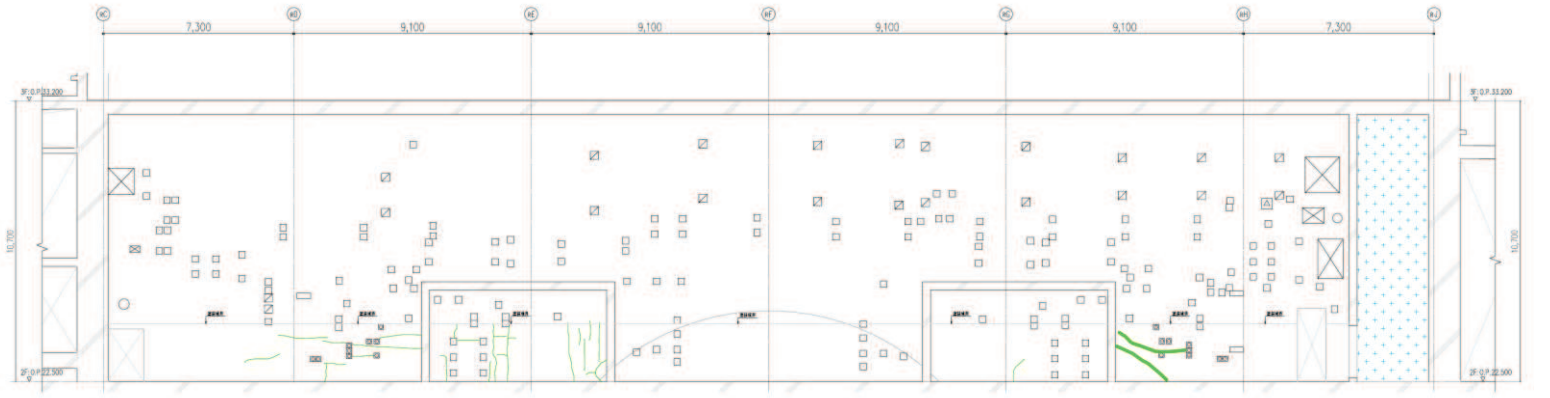
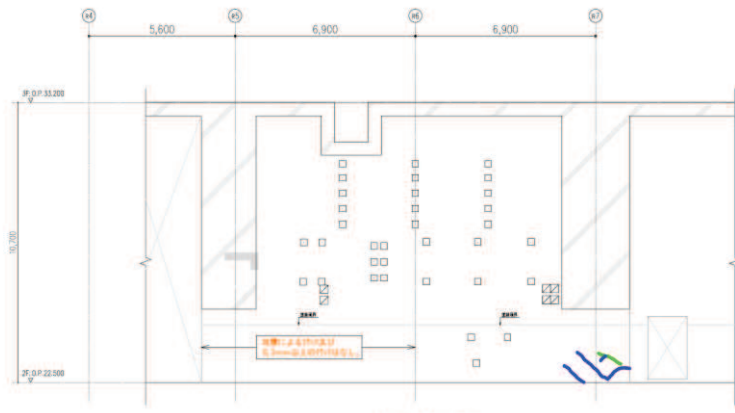


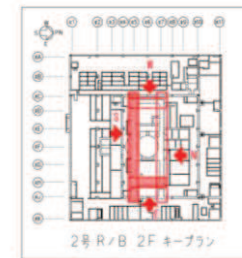
図 46 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上2階 RK 通り)



(南面 立面図)



(東面 立面図)



断面図

地震による		地震以外		
—	0.3mm未満	—	0.3mm以上~1.0mm未満	幅未確認
—	0.3mm以上~1.0mm未満	—	1.0mm以上	はくらく
—	1.0mm以上	+		確認不能の範囲

図 47 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上2階 一部シェル壁(1))

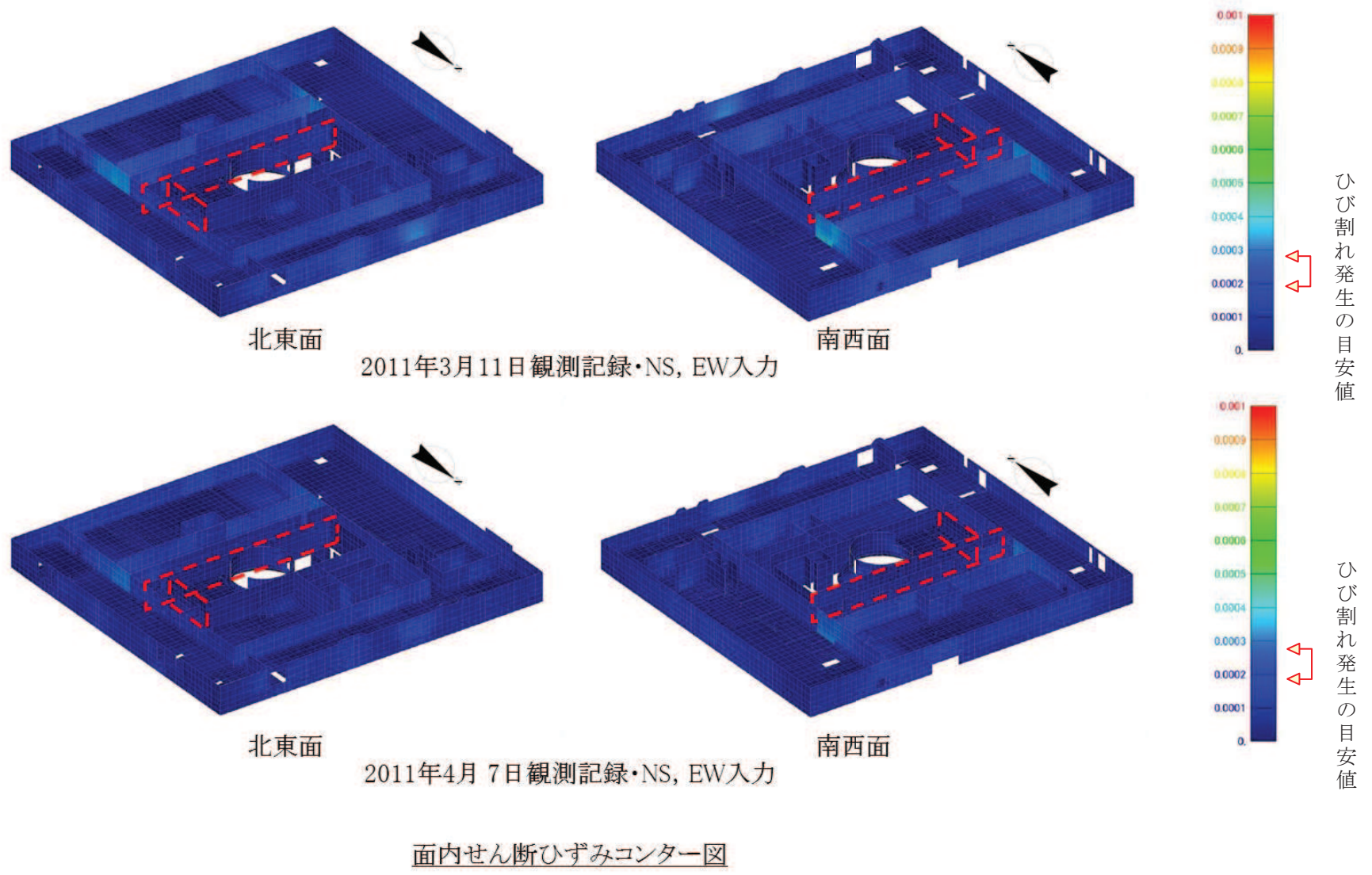
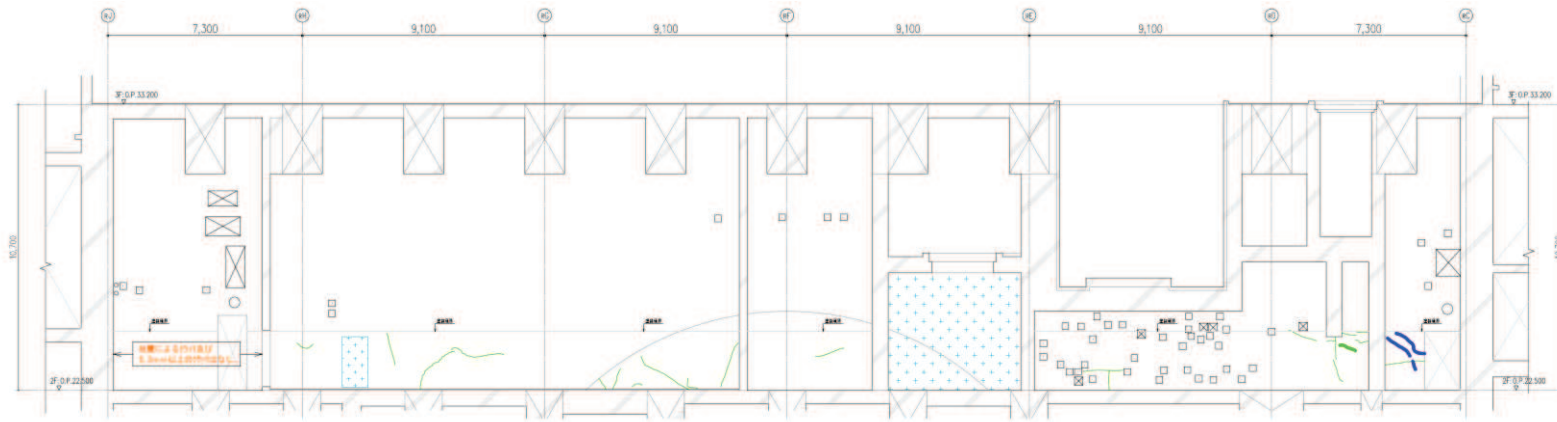
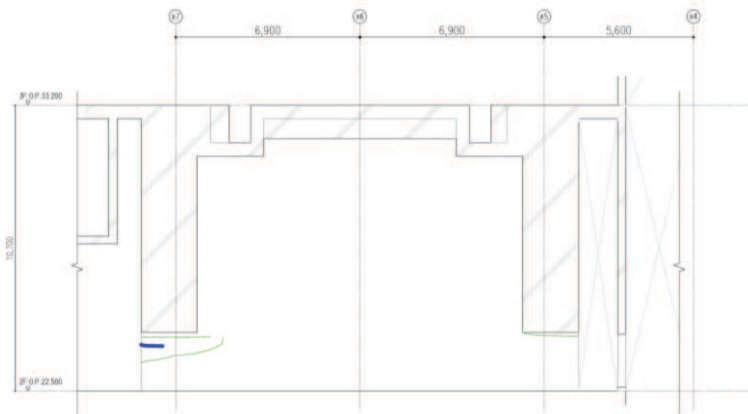


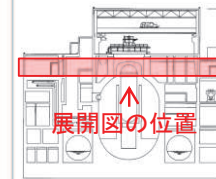
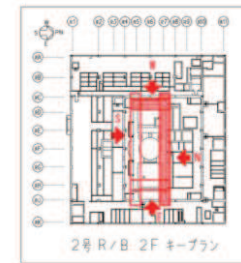
図 47 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上2階 一部シェル壁(1))



(北面 立面図)



(西面 立面図)



断面図

地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上～1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 48 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上2階 一部シェル壁(2))

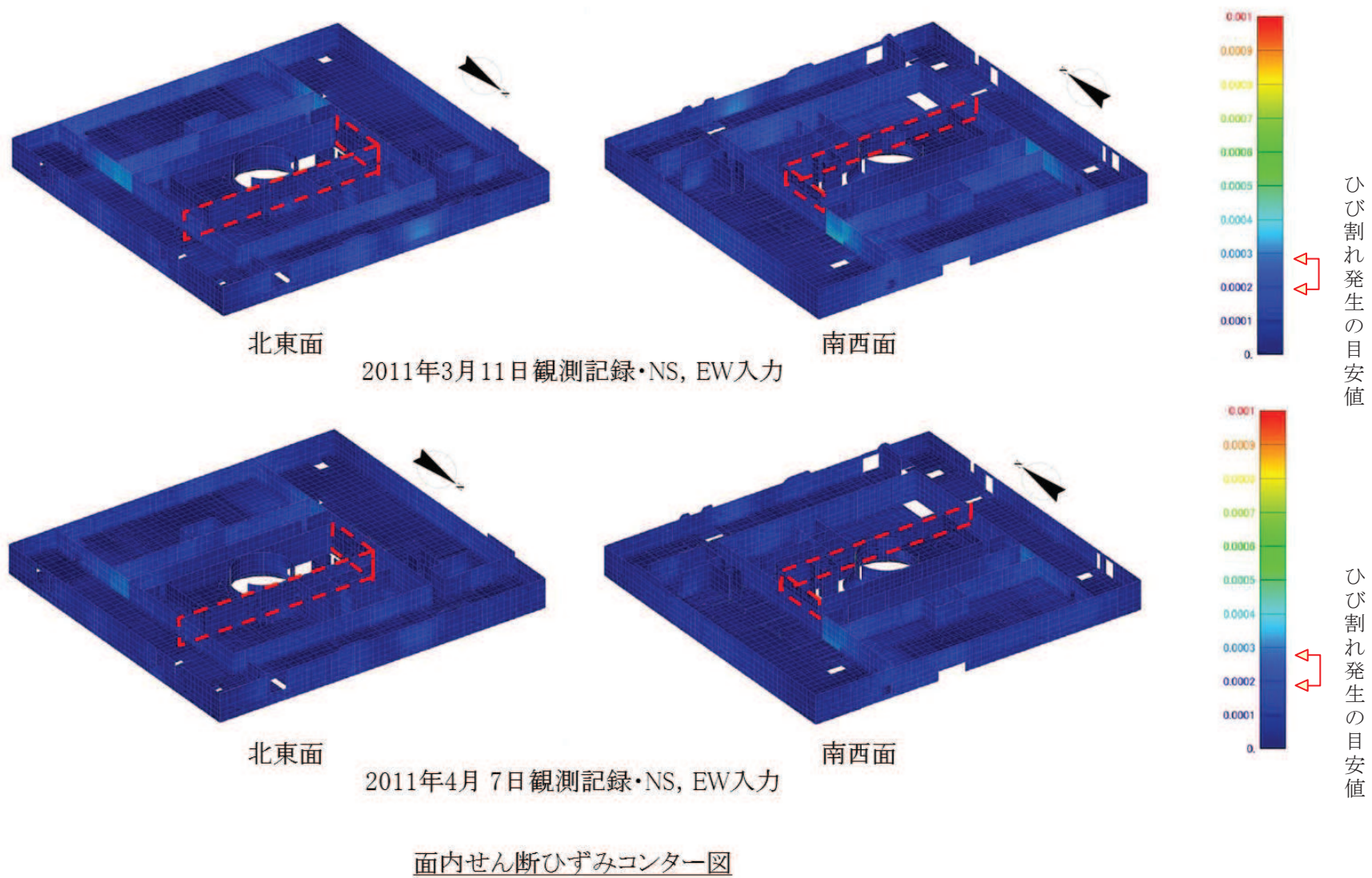


図 48 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上2階 一部シェル壁(2))

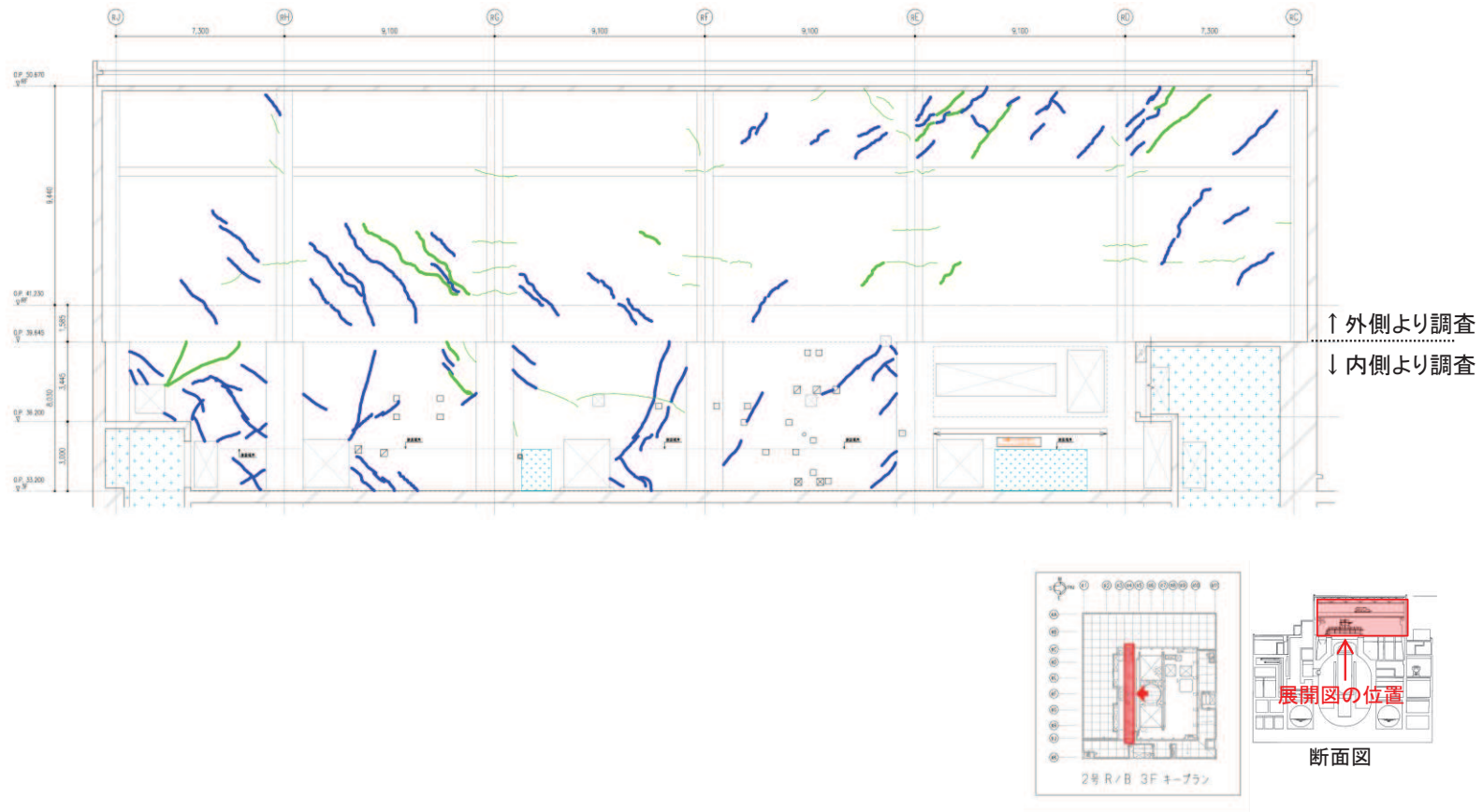


図 49 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上3階 R4 通り)

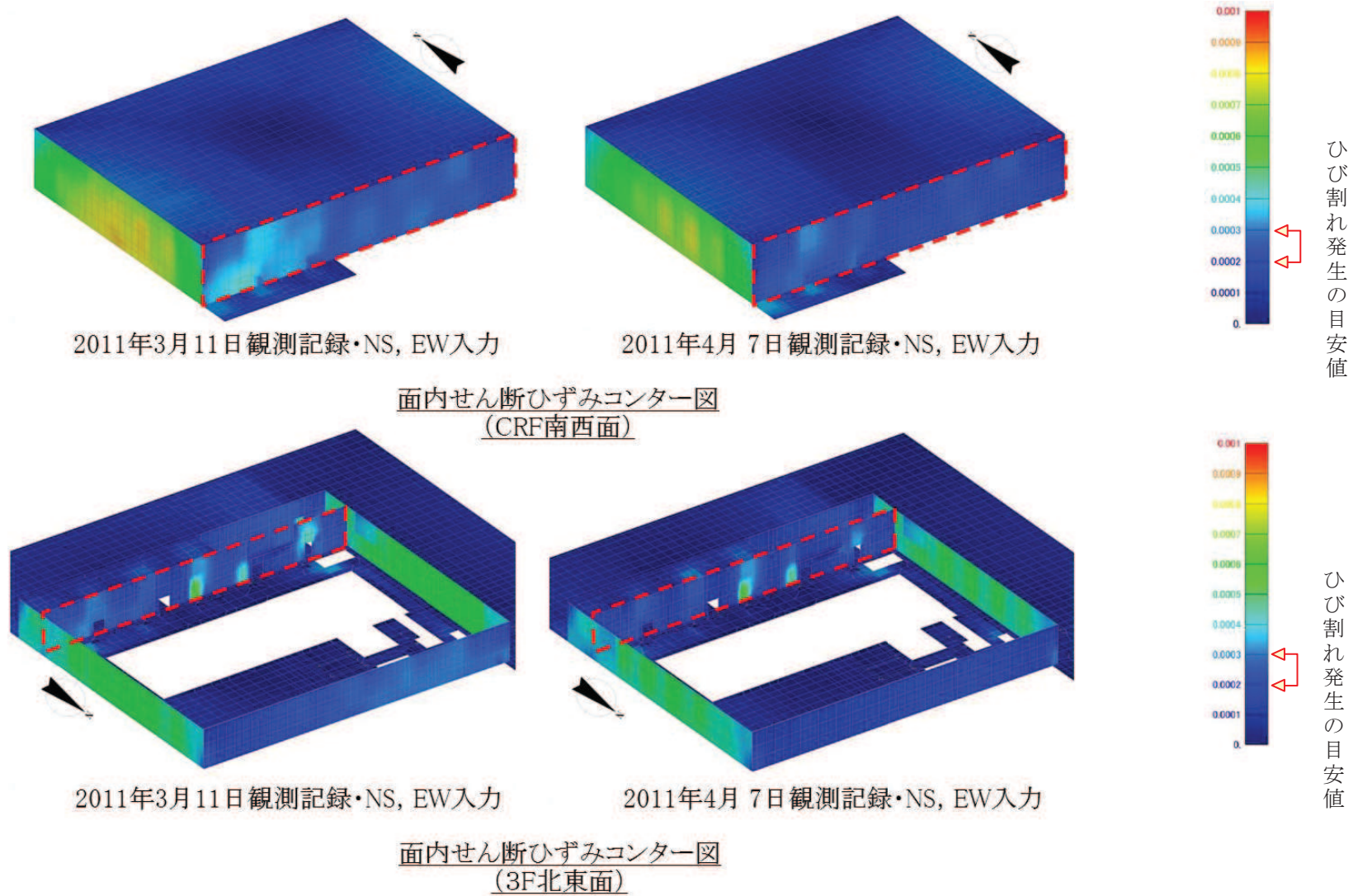
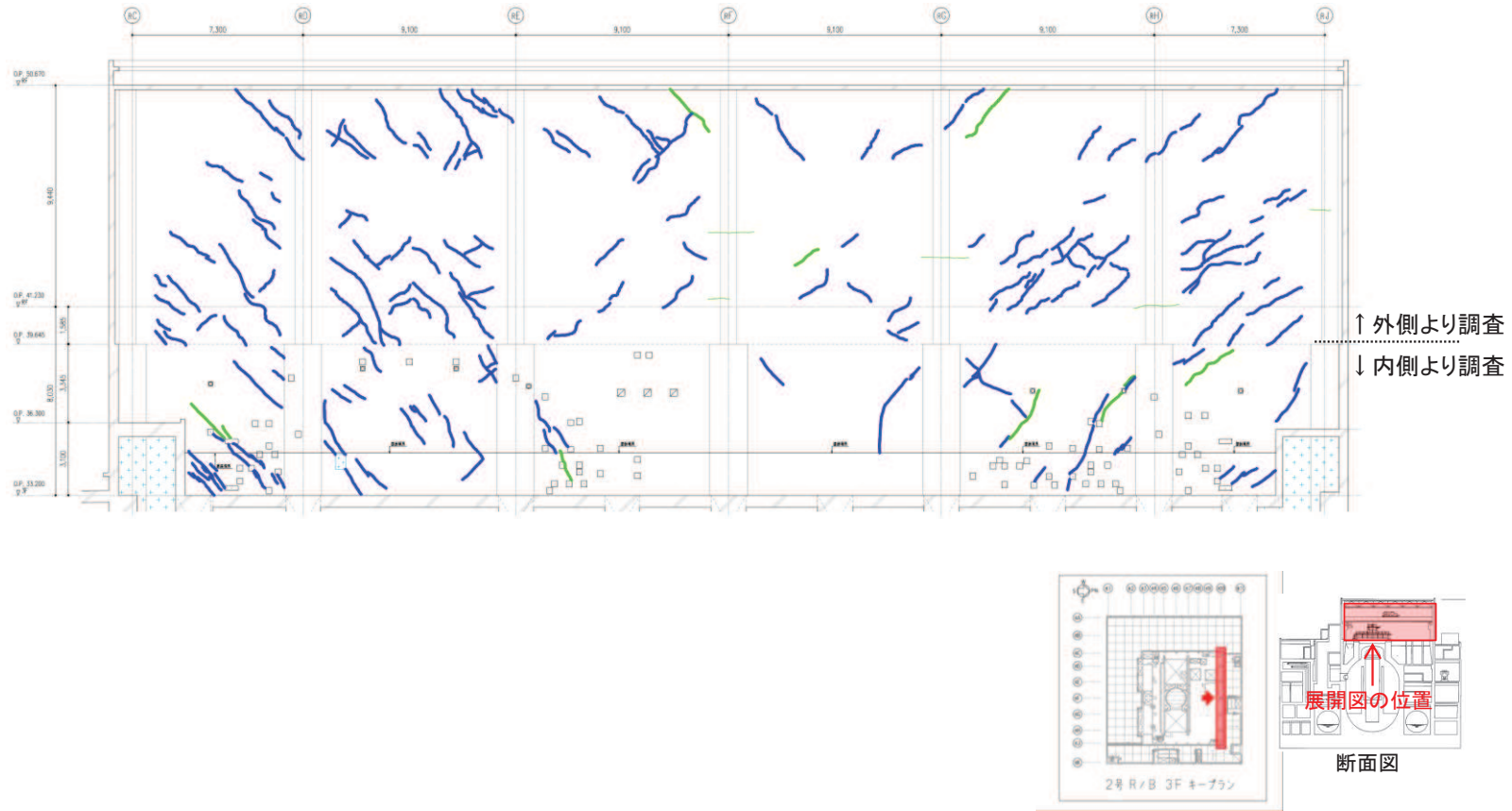


図 49 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上3階 R4 通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満			幅未確認	
	0.3mm以上～1.0mm未満		0.3mm以上～1.0mm未満		はくらく
	1.0mm以上		1.0mm以上		確認不能の範囲

図 50 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上 3 階 R10 通り)

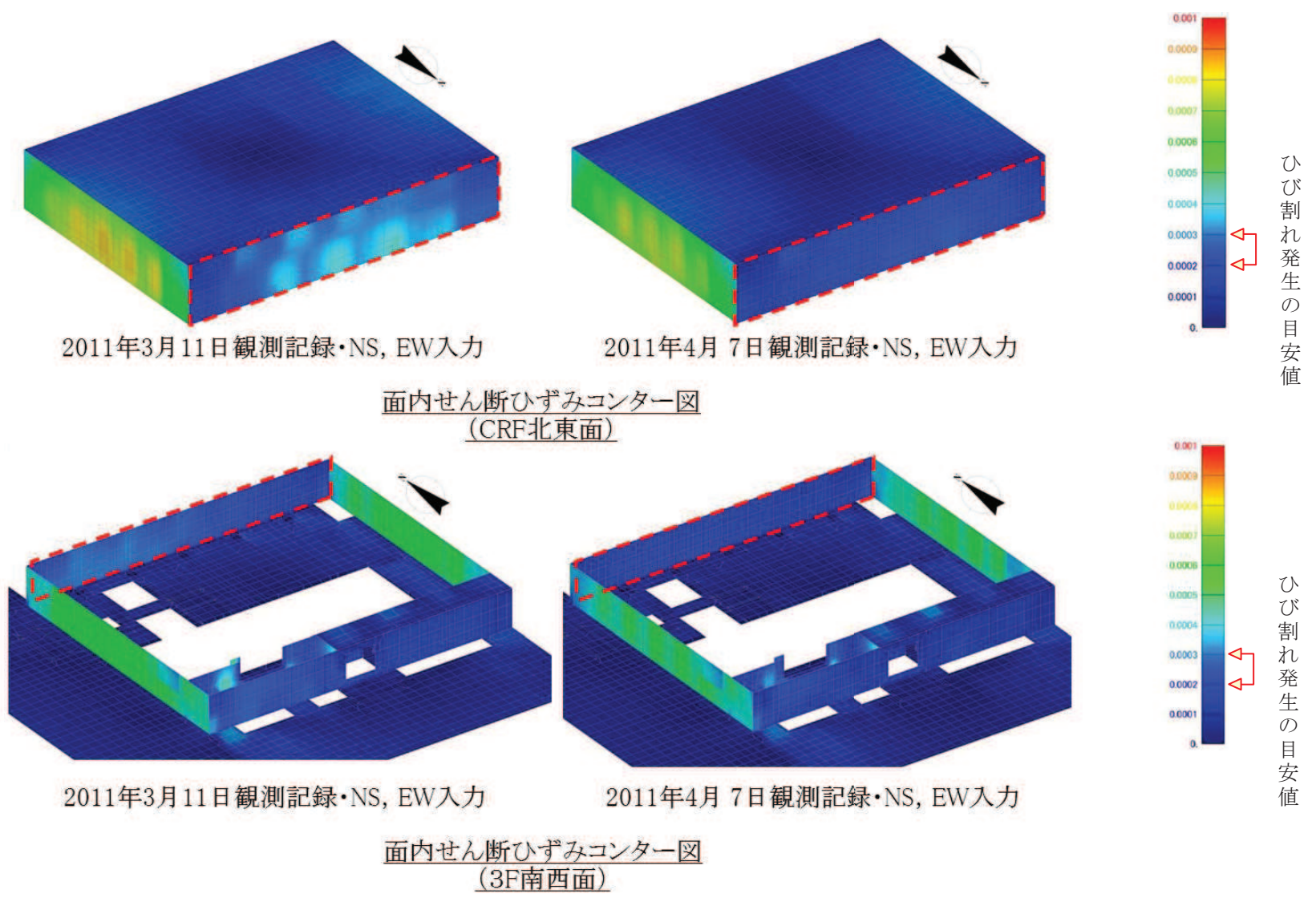


図 50 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上3階 R10 通り)

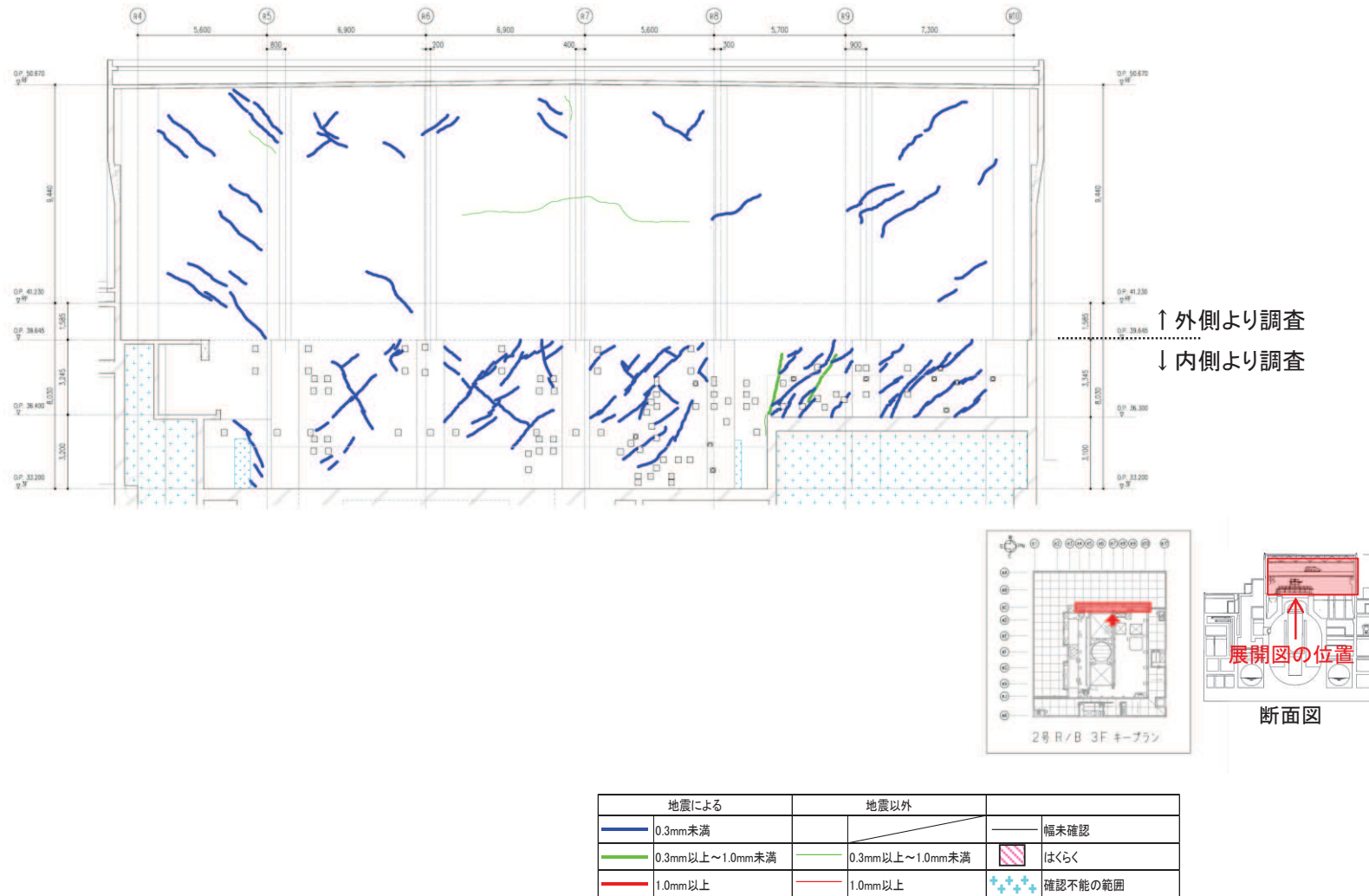


図 51 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上3階 RC 通り)

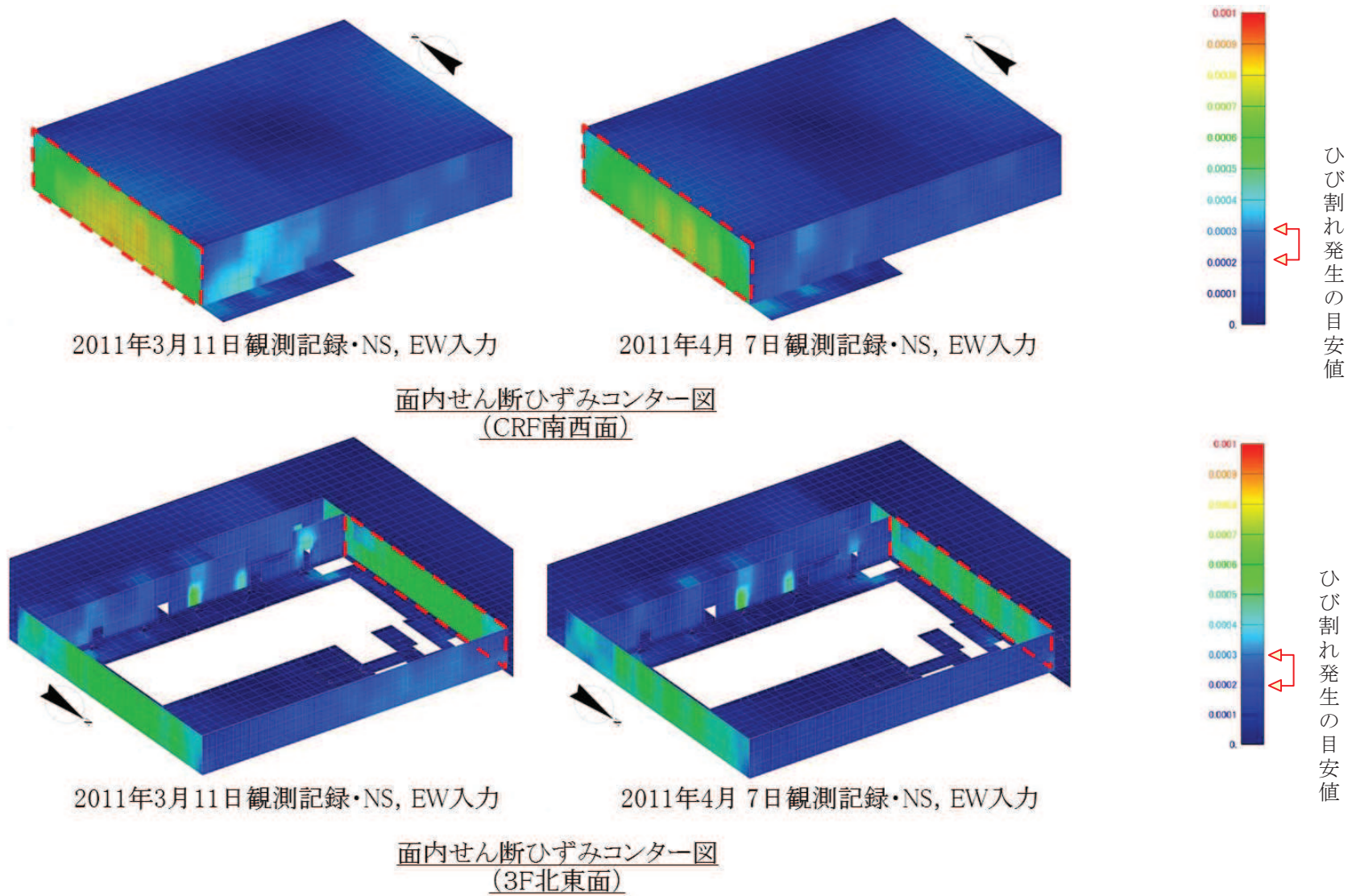
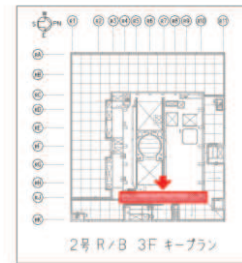
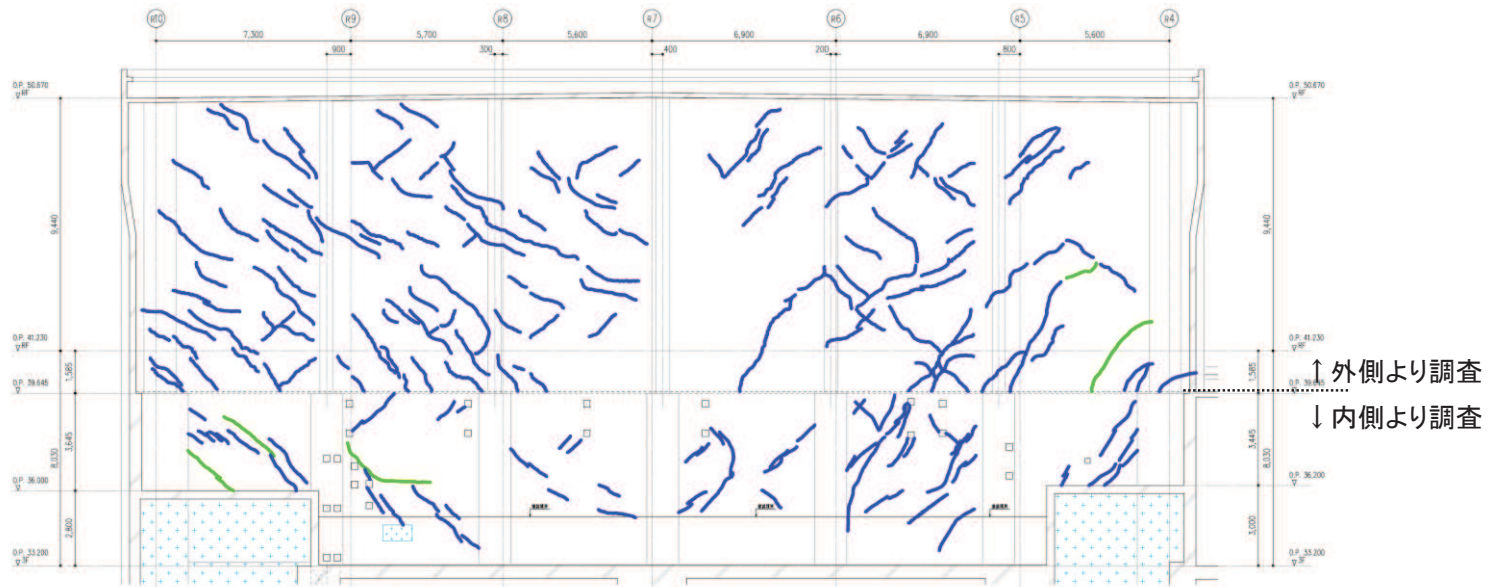


図 51 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上3階 RC通り)



地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

図 52 (1) 原子炉建屋のひび割れ分布 (耐震壁 地上3階 RJ 通り)

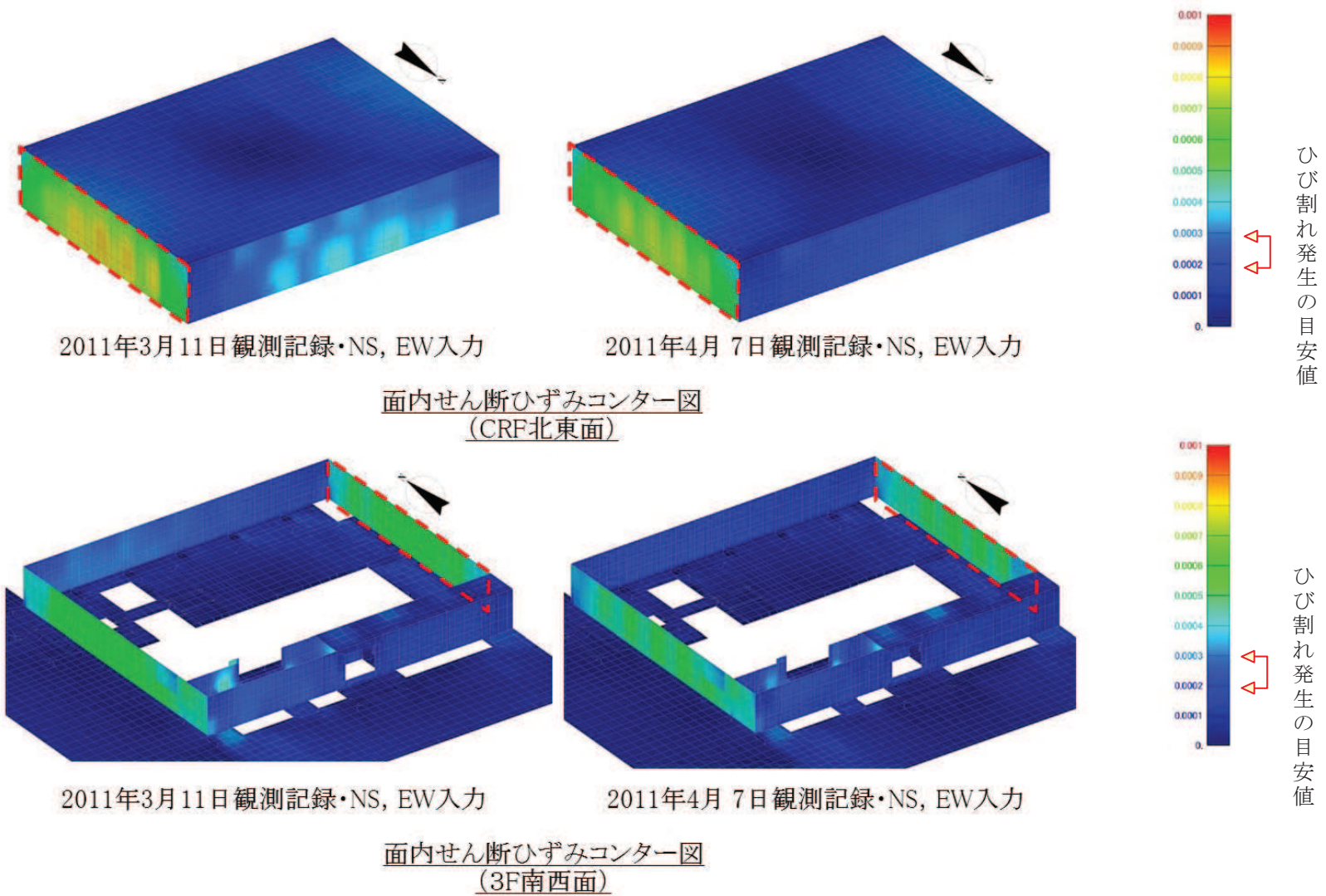


図 52 (2) 原子炉建屋のひずみ分布 (耐震壁 地上3階 RJ 通り)

別紙6 3次元 FEM 非線形モデルによるシミュレーション解析
(原子炉建屋オペフロ上部)

目 次

1. はじめに	別紙 6- 1
2. 解析条件	別紙 6- 2
2.1 解析モデル	別紙 6- 2
2.2 材料物性および材料構成則	別紙 6- 4
2.3 入力地震動	別紙 6- 6
3. 解析結果	別紙 6- 8
3.1 モデルの妥当性確認	別紙 6- 8
3.1.1 加速度応答スペクトル	別紙 6- 8
3.1.2 最大加速度応答値	別紙 6-10
3.1.3 最大層間変位	別紙 6-11
3.2 耐震壁および屋根スラブの構造的影響評価	別紙 6-12
4. 評価結果のまとめ	別紙 6-16

別紙 6-1 分散ひび割れモデル (前川モデル)

1. はじめに

3.11 地震および 4.7 地震の 2 つの地震に対し、**別紙 1**において、シミュレーション解析結果より地震による建屋の構造的な影響評価を実施し、地震時の応力に対し鉄筋が弾性範囲内にあることを確認した。本資料は、その際比較的裕度が小さかった原子炉建屋のオペフロ上部構造のうち耐震壁および屋根スラブへの構造的な影響を確認することを目的として、3次元 FEM 非線形モデルを用いたシミュレーション解析結果についてまとめたものである。耐震壁および屋根スラブへの構造的な影響の確認は、3.11 地震および 4.7 地震時に鉄筋のひずみが弾性範囲内であることを確認することにより行った。

シミュレーション解析は、オペフロ上部構造をモデル化した 3次元 FEM モデルに建屋内に設置された地震計の観測記録を入力して実施し、耐震壁および屋根スラブには非線形性を考慮した。

また、オペフロ上部耐震壁に設置した変位計測システムにより計測された層間変位についても参照した。

使用解析コードは、有限要素法による汎用構造解析プログラム「FINAS/STAR」である。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

原子炉建屋のオペフロ上部の構造は、鉄筋コンクリート造の外壁、屋根スラブおよび鉄骨造の屋根トラスで主に構成されている。躯体外形は地上3階レベルで約45.5m（南北方向）×約53m（東西方向）、クレーン階で約40m（南北方向）×約53m（東西方向）の長方形をなしている。なお、本資料では、クレーン階までの耐震壁を「下部」、それ以上の領域の耐震壁を「上部」と記載する。

解析モデルは、オペフロ上部の耐震壁および屋根スラブへの構造的な影響を確認することを目的としているため、オペフロ上部をモデル化対象範囲とし、鉄筋コンクリート板に材料非線形を考慮するため、耐震壁および屋根スラブは板厚方向に分割した積層シェル要素を用いてモデル化した。また、屋根トラス等の鉄骨部材や鉄骨鉄筋コンクリート造の柱は線形の梁要素でモデル化した。解析モデルの脚部は、オペフロレベルにある全節点を水平面上の重心位置に設けた節点と剛体要素で接続し、地震動は重心位置に設けた節点より入力する。各部の重量は、質点系モデルの質点重量を基に設定するものとし、モデル化部材に材料に応じた単位体積重量を与えるとともに、質点系モデルの質点重量との差分を、クレーン階については節点の付加質量として、屋根スラブについては屋根スラブの単位体積重量に加算することにより考慮した。

図2-1にモデル化対象範囲を、図2-2に解析モデルを示す。なお、図2-1にはシミュレーション解析結果の比較に用いた変位計測システムによる計測位置も併せて示す。

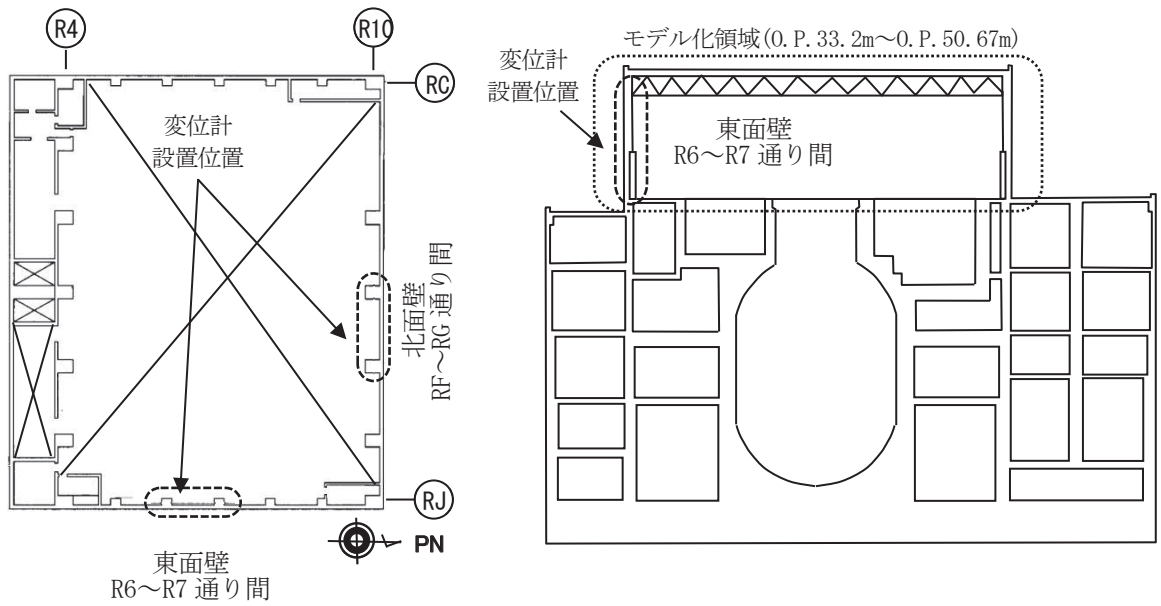


図2-1 モデル化対象範囲および変位計測システムによる計測位置

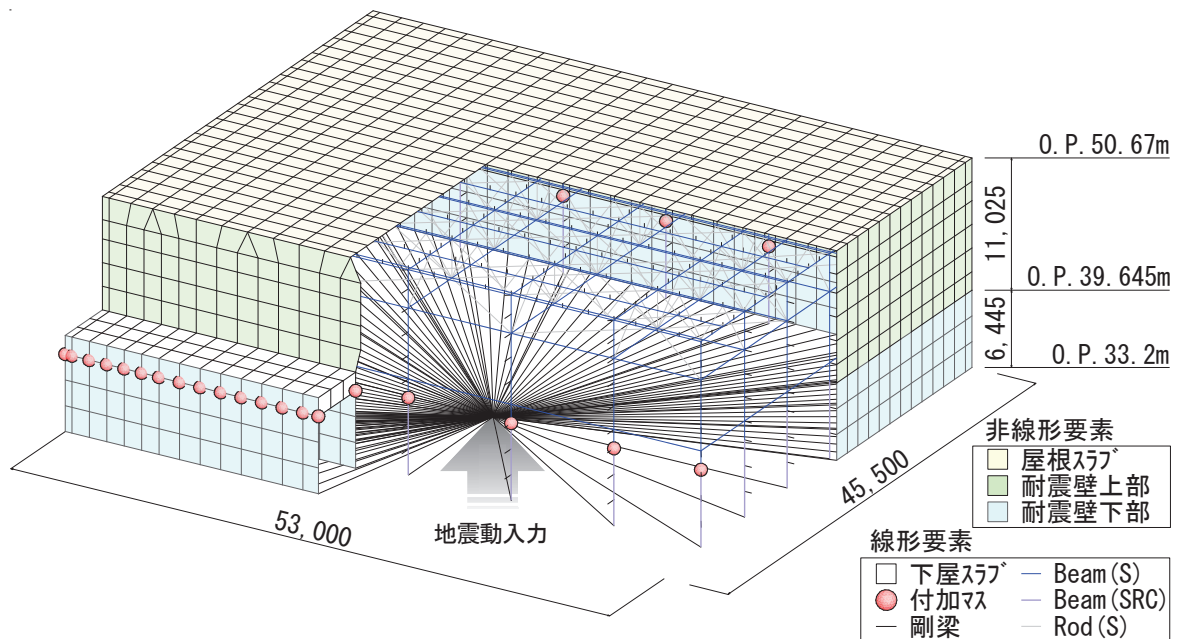


図2-2 解析モデル

2.2 材料物性および材料構成則

シミュレーション解析に用いた鉄筋コンクリート部材の材料物性値を表 2-1 に示す。コンクリートの圧縮強度 (f_c) は、地上 3 階のコア調査結果を基に設定し、引張強度 (f_t) は「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2010)」の曲げ引張強度の式により設定した。

$$f_t = 0.38\sqrt{f_c} = 2.86N/mm^2 \quad (2.2-1)$$

なお、初期剛性および引張強度は、3.11 地震前の剛性低下および 3.11 地震、4.7 地震時の非線形化に伴う振動特性変化に基づき、剛性については東西面壁上部を 0.6 倍、南北面壁上部を 0.8 倍に低減し、引張強度については東西面壁を 0.4 倍、南北面壁を 0.2 倍に設定した。

減衰は、地盤-建屋連成系の 1 次固有周期と、オペフロ上部構造の 1 次固有周期近傍でコンクリート 3%、鉄骨 1% となるレーリー減衰とした。図 2-3 に設定した減衰定数と振動数の関係を示す。

耐震壁および屋根スラブの鉄筋コンクリート部材は非線形性を考慮した。鉄筋コンクリートの非線形特性は、分散ひび割れモデル(前川モデル, 別紙 6-1 参照)を用いた。

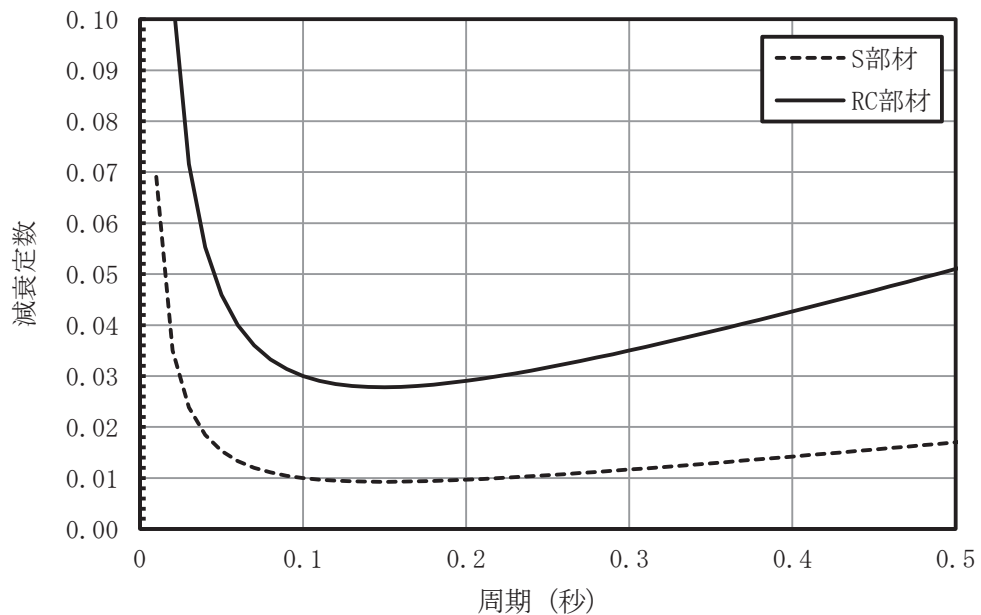


図 2-3 各振動数における減衰定数

表 2-1 解析に用いた鉄筋コンクリート部材の材料物性値

(1) コンクリート物性

項目		物性値	
圧縮強度 (N/mm ²) ※1		56.6	
初期剛性 (N/mm ²) ※1	東西面壁	上部	2.00×10^4
		下部	3.34×10^4
	南北面壁	上部	2.65×10^4
		下部	3.34×10^4
	屋根スラブ		3.34×10^4
引張強度 (N/mm ²) ※1	東西面壁	上部	1.144
		下部	1.144
	南北面壁	上部	0.572
		下部	0.572
	屋根スラブ		1.144
ポアソン比(-)		0.2	

※1 有効桁 3 桁に四捨五入。

(2) 鉄筋物性

項目		物性値
ヤング係数 (N/mm ²) ※1		2.05×10^5
(参考)	使用材料	SD345
	降伏点 (N/mm ²)	345
	降伏ひずみ (μ) ※1,2	1680

※1 有効桁 3 桁に四捨五入。

※2 降伏ひずみは、 $\sigma = E \varepsilon$ 関係より算出。

$$(345 \div (2.05 \times 10^5)) \div 10^{-6} = 1680 \times 10^{-6}$$

2.3 入力地震動

入力地震動は、3.11 地震および 4.7 地震時に地上 3 階レベル (O. P. +33.2m) で観測された加速度記録とし、各地震の主要動を接続した入力動を作成し、3.11 地震と 4.7 地震の連続解析としてシミュレーション解析を実施した。入力地震動の算定に用いた地震計およびその位置を表 2-2 および図 2-4 に、入力地震動の算定例を図 2-5 に示す。

解析モデルへの入力は、オペフロレベル(O. P. +33.2m)の重心位置に設けた節点に対し水平 2 成分、鉛直成分、回転 2 成分の 3 方向 5 成分の同時入力とした。

なお、並進成分は観測記録に 0.5Hz~1.0Hz, 25Hz~50Hz のコサインテーパ型バンドパスフィルターを施し、回転成分は鉛直方向の観測記録より平面保持を仮定して求めた回転動を用いるものとする。

表 2-2 入力地震動の算定に用いた地震計

入力成分	地震計設置位置	観測成分	備考
NS 方向(並進)	2RB-9	NS	
EW 方向(並進)	2RB-8	EW	
UD 方向(並進)	2RB-9	UD	ロッキング成分除去
NS 方向(回転)	2RB-8	UD	3つの地震計位置より 重心位置の回転動を 算出
EW 方向(回転)	2RB-10		
	2RB-11		

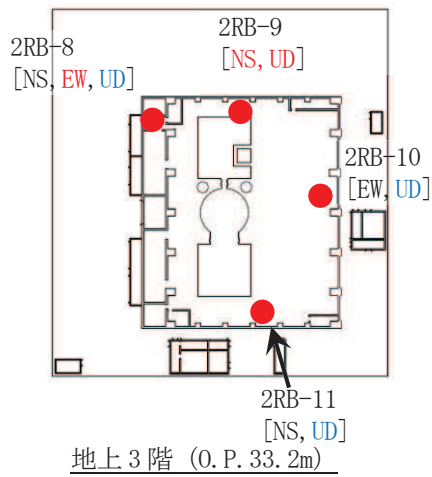


図 2-4 原子炉建屋 地震計設置位置 (地上3階)

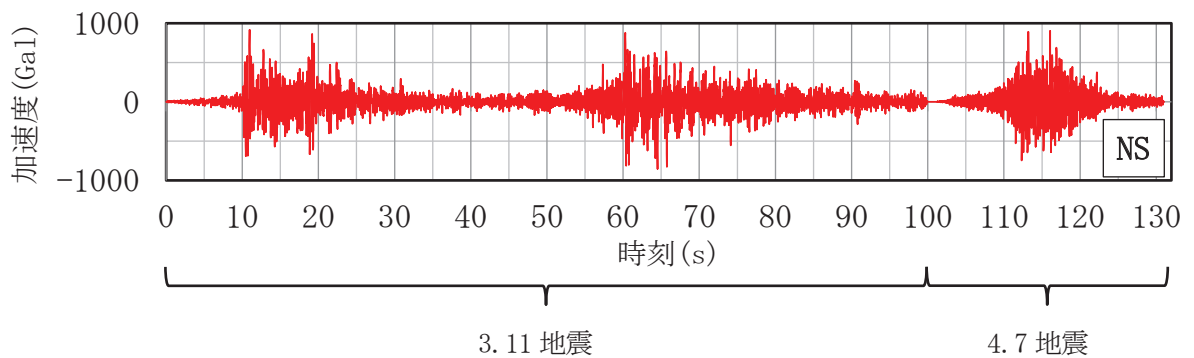


図 2-5 入力地震動の例(NS 方向並進成分)

3. 解析結果

3.1 モデルの妥当性確認

3.1.1 加速度応答スペクトル

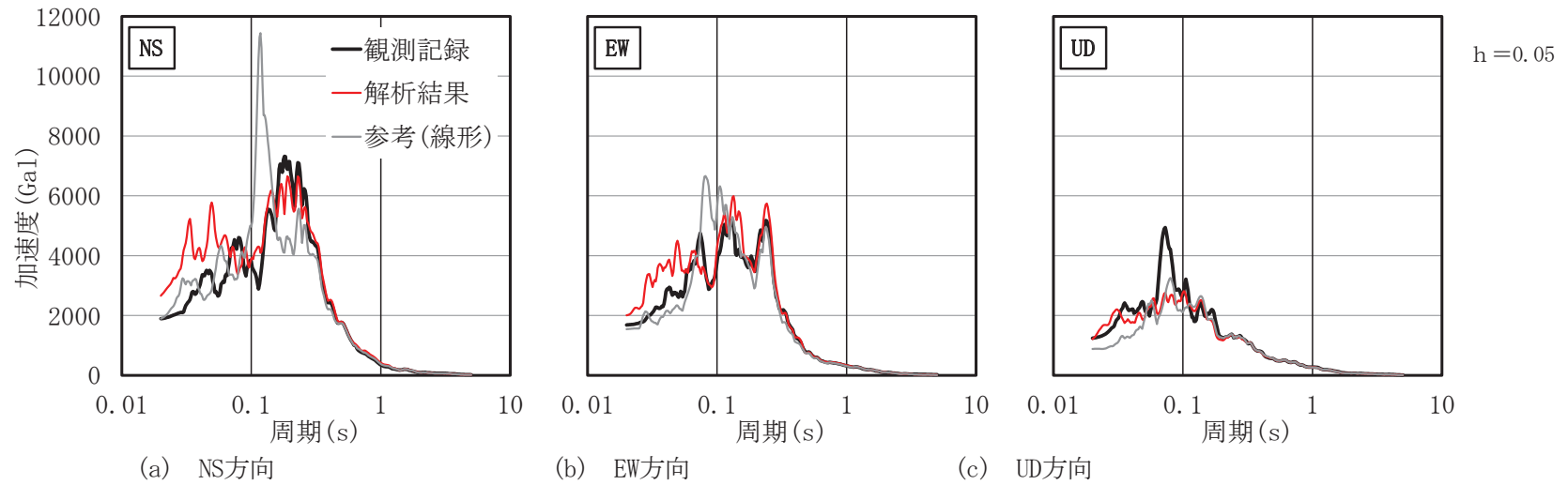
観測記録とシミュレーション解析による加速度応答スペクトルを図3-1に示す。

なお、図3-1には、非線形特性の有無による影響を比較するため、耐震壁および屋根スラブを線形部材とした解析結果も併記した。3.11地震のNS方向では、線形解析結果は観測記録に比べ0.12秒付近のピークが卓越するとともに観測記録のピークの0.2秒付近では線形解析結果が観測記録を下回る結果となっている。また、EW方向でも0.08秒付近では線形解析結果が観測記録を上回る結果となっている。

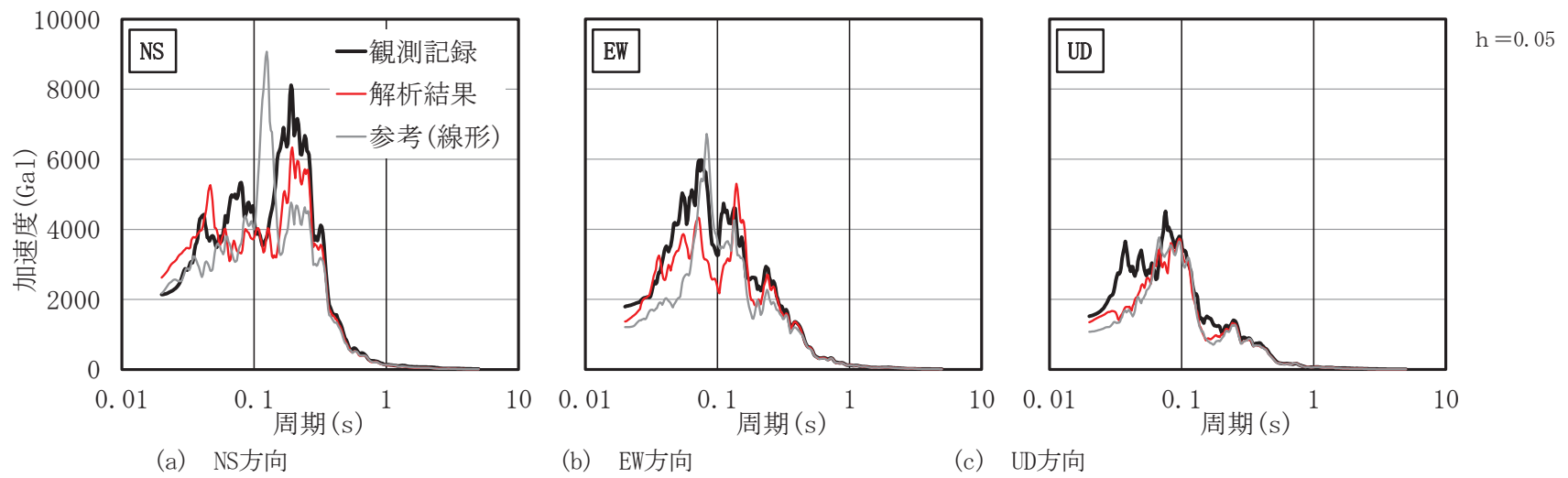
一方、非線形解析結果はNS方向およびEW方向ともに観測記録を概ね再現できている。

4.7地震でも3.11地震と同様に、NS方向では、線形解析結果は観測記録に比べ0.12秒付近のピークが卓越するとともに観測記録のピークの0.2秒付近では線形解析結果が観測記録を下回る。また、EW方向では0.07秒付近のピークは概ね再現できているが、0.07秒より短周期側の応答は著しく小さくなっている。

一方、非線形解析結果はNS方向およびEW方向ともに観測記録を概ね再現できている。



(1) 3.11地震



(2) 4.7地震

図3-1 加速度応答スペクトル

3.1.2 最大加速度応答値

屋根面に設置した加速度計と加速度計近傍の節点の最大加速度を表3-1に示す。なお、表3-1には、非線形特性の有無による影響を比較するため、耐震壁および屋根スラブを線形部材とした解析結果も併記した。

線形解析結果の最大加速度は全て観測記録を下回るものの、非線形解析結果は線形解析結果と比べて、最大加速度は大きくなりNS方向では観測記録を上回る結果となっている。

表 3-1 屋根面における最大加速度応答値

地震	方向	観測記録 (cm/s ²)	解析結果 (cm/s ²)	参考(線形) (cm/s ²)
3.11 地震	NS	1777.1	2265.3	1769.0
	EW	1616.2	1789.8	1471.0
	UD	1105.2	943.2	841.9
4.7 地震	NS	1928.5	2155.0	1818.5
	EW	1669.2	1197.7	1178.6
	UD	1342.7	1177.7	989.0

3.1.3 最大層間変位

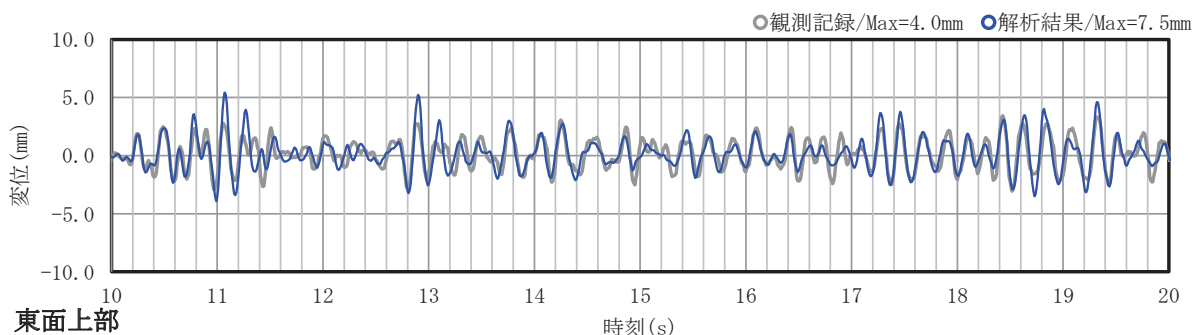
3.11地震では、層間変位の観測記録が得られている。3.11地震における最大層間変位を表3-2に示す。なお、表3-2には、非線形特性の有無による影響を比較するため、耐震壁および屋根スラブを線形部材とした解析結果も併記した。

非線形解析結果の最大層間変位は線形解析結果より大きくなり、観測記録に比べ、壁下部では下回るものの、上部では上回る結果となった。

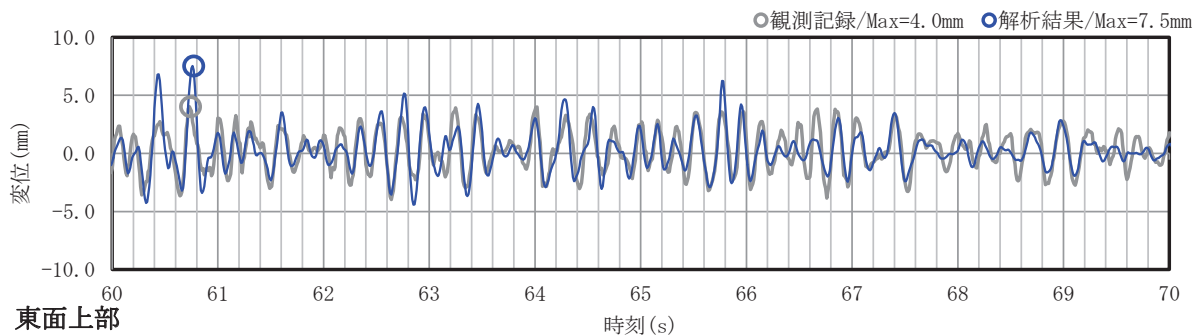
観測記録と非線形解析による最大層間変位の差が最も大きい東面壁上部の層間変位時刻歴波形を図3-2に示す。

表 3-2 最大層間変位

方向	観測記録 (mm)	解析結果 (mm)	参考(線形) (mm)
東面壁上部	4.0	7.5	4.9
東面壁下部	1.9	0.9	0.9
北面壁上部	3.1	3.9	2.1
北面壁下部	1.2	0.9	0.7



(1) 第1主要動



(2) 第2主要動

図 3-2 変位時刻歴波形の例 (東面上部)

3.2 耐震壁および屋根スラブの構造的影響評価

表3-3に、3.11地震および4.7地震中における鉄筋の最大引張ひずみを、図3-3～図3-5に、部位ごとの鉄筋の最大引張ひずみ分布を示す。

いずれの鉄筋のひずみも降伏ひずみ(1680 μ)を下回り、シミュレーション解析の層間変位が観測記録に対して小さいことを考慮しても、3.11地震および4.7地震時に鉄筋は降伏していないと判断できる。

以上より、耐震壁および屋根スラブの鉄筋が降伏していないことを確認した。

表 3-3 3.11 地震および 4.7 地震中における鉄筋の最大引張ひずみ

部位			解析結果	鉄筋の降伏ひずみ に対する 解析結果の割合※(%)	健全性 評価結果
			鉄筋の ひずみ (μ)		
東面壁	上部	タテ筋	561	33.0	○
		ヨコ筋	462	28.0	○
	下部	タテ筋	151	9.0	○
		ヨコ筋	161	9.6	○
西面壁	上部	タテ筋	299	18.0	○
		ヨコ筋	371	22.0	○
	下部	タテ筋	156	9.3	○
		ヨコ筋	155	9.2	○
北面壁	上部	タテ筋	483	29.0	○
		ヨコ筋	627	37.0	○
	下部	タテ筋	211	13.0	○
		ヨコ筋	496	30.0	○
南面壁 (R4 通り)	上部	タテ筋	614	37.0	○
		ヨコ筋	676	40.0	○
	下部	タテ筋	291	17.0	○
		ヨコ筋	221	13.0	○
南面壁 (R3 通り)	RC~REF	タテ筋	371	22.0	○
		ヨコ筋	120	7.1	○
	REF~RJ	タテ筋	346	21.0	○
		ヨコ筋	102	6.1	○
屋根スラブ		EW 筋	544	32.0	○
		NS 筋	520	31.0	○

※有効数字 2 桁で四捨五入。

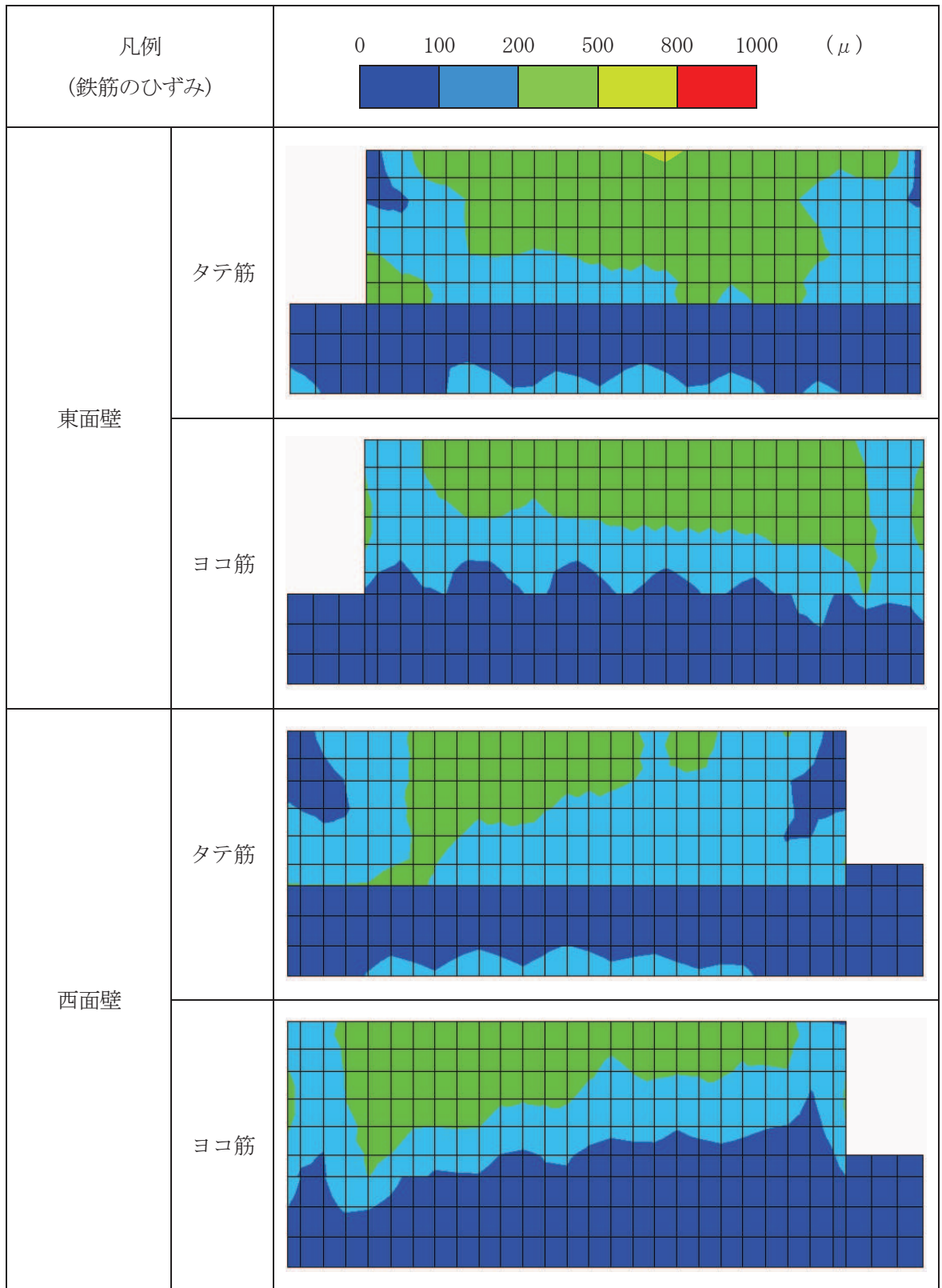


図 3-3 鉄筋の最大引張ひずみ分布(東面壁および西面壁/外側矢視)

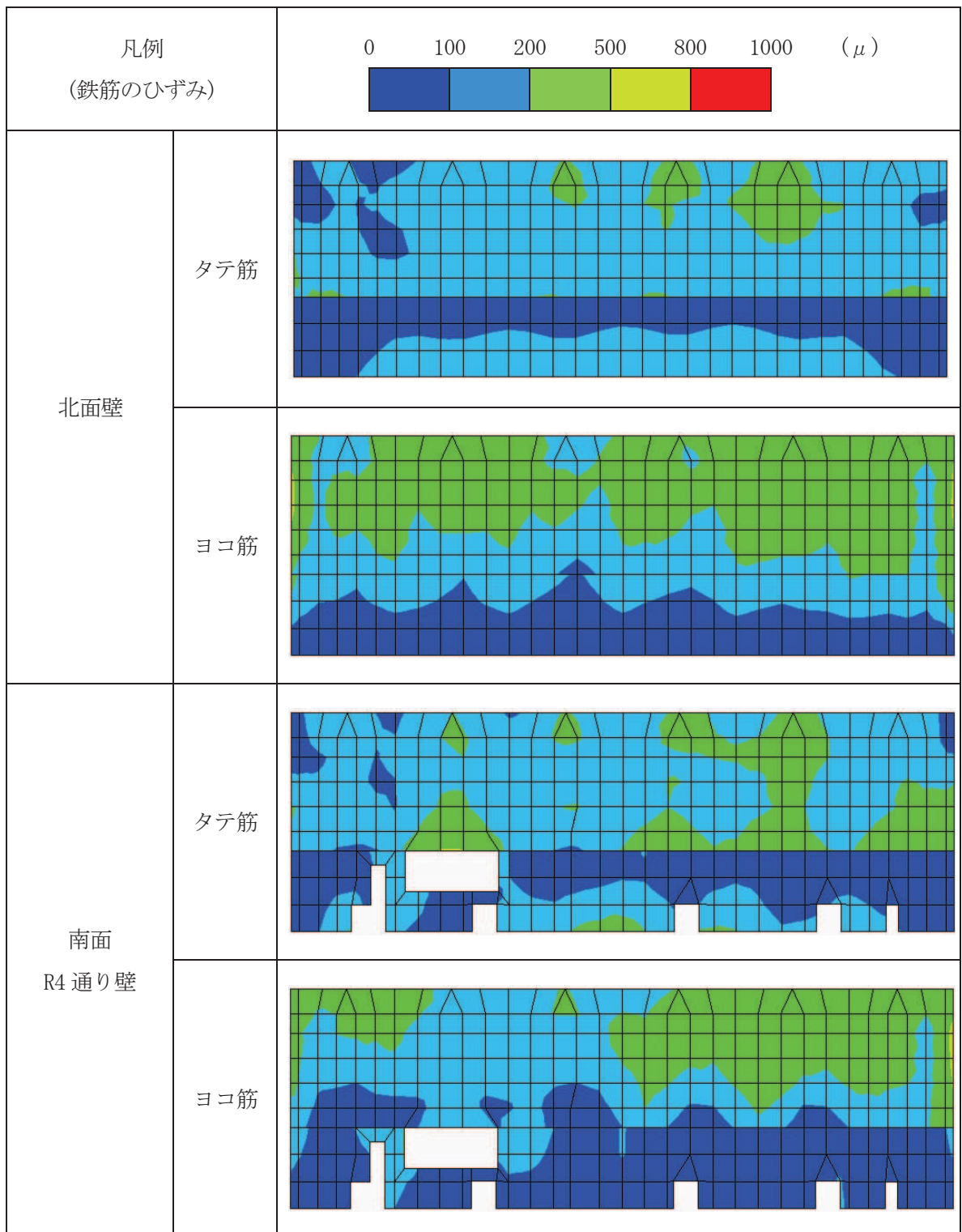


図 3-4 鉄筋の最大引張ひずみ分布(北面壁および南面 R4 通り壁/外側矢視)

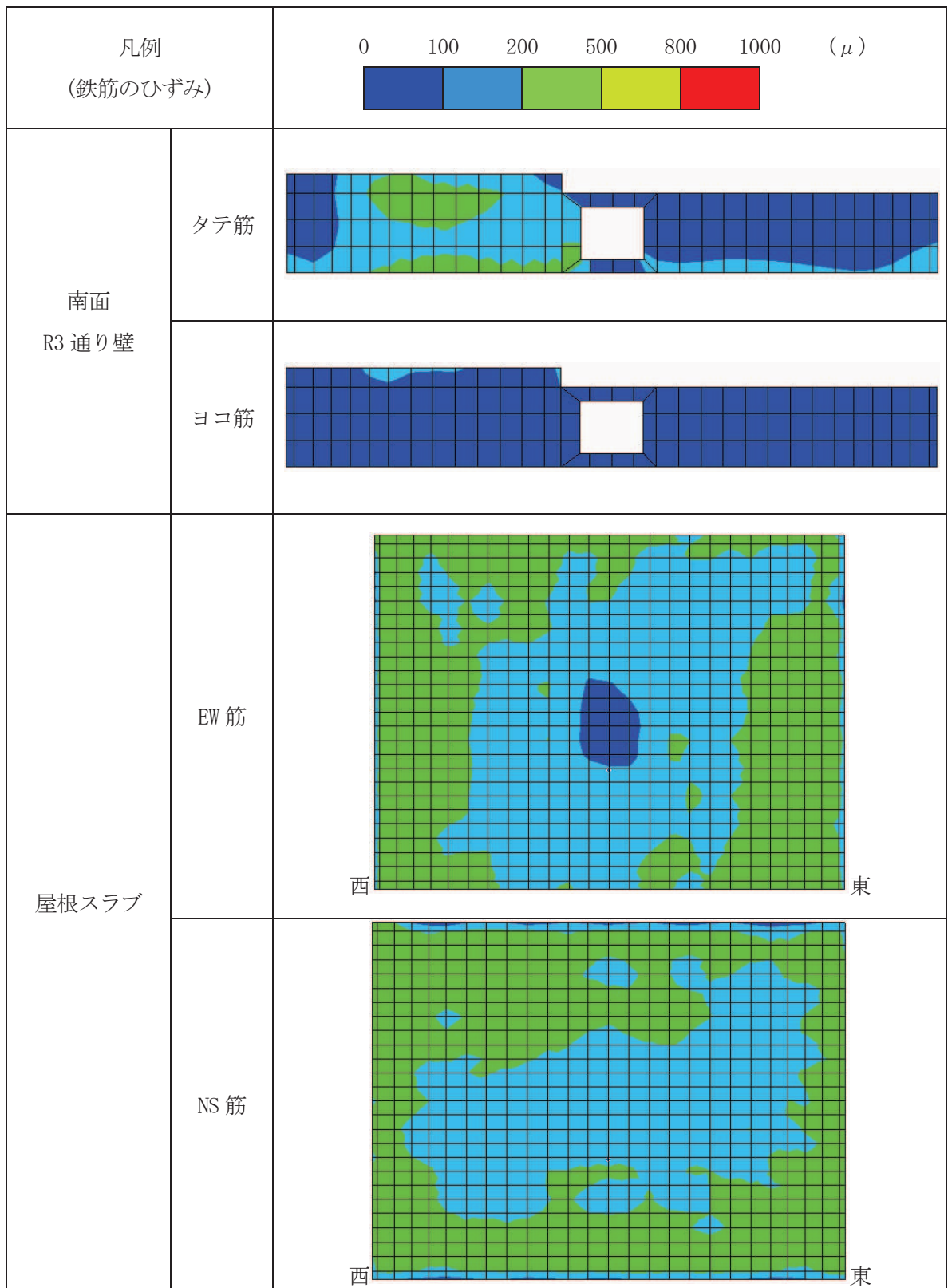


図 3-5 鉄筋の最大引張ひずみ分布

(南面 R3 通り壁および屋根スラブ/外側矢視)

4. 評価結果のまとめ

オペフロ上部構造をモデル化した3次元非線形FEMモデルによる地震応答シミュレーション解析を行い、3.11地震および4.7地震時の建屋の構造的影響評価を実施した。

その結果、耐震壁および屋根スラブの鉄筋が弾性範囲であることを確認した。

[参考文献]

- (1) 前川宏一，福浦尚之（1999）：擬似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集 No. 634/V-45，157-176，1999. 11

別紙 6-1 分散ひび割れモデル（前川モデル）

耐震壁および屋根スラブの鉄筋コンクリート部材には分散ひび割れモデル(前川モデル)による非線形性を考慮している。以下に材料構成則の概要を示す。

(1) コンクリートの応力-ひずみ関係

圧縮側の応力(σ_{cc})-ひずみ(ε)関係は下式による。

$$\sigma_{cc} = \omega K_0 E_{c0} (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (1-1)$$

塑性ひずみ(ε_p)、破壊パラメータ(K_0)、初期剛性(E_{c0})は、それぞれ以下の式で定義される。

$$\varepsilon_p = \left\{ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - \frac{20}{7} \left[1 - e^{\left(-0.35 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)} \right] \right\} \cdot \varepsilon \quad (1-2)$$

$$K_0 = e^{\left\{ -0.73 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left[1 - e^{\left(-1.25 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)} \right] \right\}} \quad (1-3)$$

$$E_{c0} = 2.0 \frac{f_c}{\varepsilon_c} \quad (1-4)$$

なお、 f_c はコンクリートの一軸圧縮強度、 ε_c は一軸圧縮強度時のひずみで、解析プログラムへの入力値である。

ω は、ひび割れ直交方向の引張ひずみによる破壊パラメータ K_0 の低減係数であり、図1による。

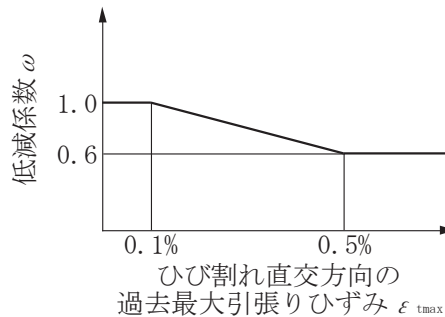


図1 破壊パラメータの低減係数

引張側の応力(σ_{cb})-ひずみ(ε)関係は下式による。

$$\sigma_{cb} = \omega f_t \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon} \right)^c, \quad \varepsilon \geq \varepsilon_{tmax} \quad (1-5)$$

ε_{tu} はひび割れ発生限界ひずみであり、下式による。

$$\varepsilon_{tu} = 2.0 \frac{f_t}{E_{c0}} \quad (1-6)$$

f_t はコンクリートの一軸引張強度、 C は付着性状を表す係数であり、いずれも解析プログラムの入力値である。

二軸応力下での降伏条件は、以下となる。

$$\text{圧縮-圧縮領域} : \frac{\left\{0.6 \times \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{f_c}\right)\right\}^2 + \left\{1.3 \times \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{f_c}\right)\right\}^2}{2} = 1$$

$$\text{圧縮-引張領域} : \frac{\sigma_1}{K_0^3 f_t} = 1 \quad (1-7)$$

$$\text{引張-引張領域} : \frac{\sigma_1}{K_0^3 f_t} + 0.26 \times \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$$

σ_1 および σ_2 は、主応力で引張側を正とし、 $\sigma_1 \geq \sigma_2$ である。

図2に、降伏曲線を示す。

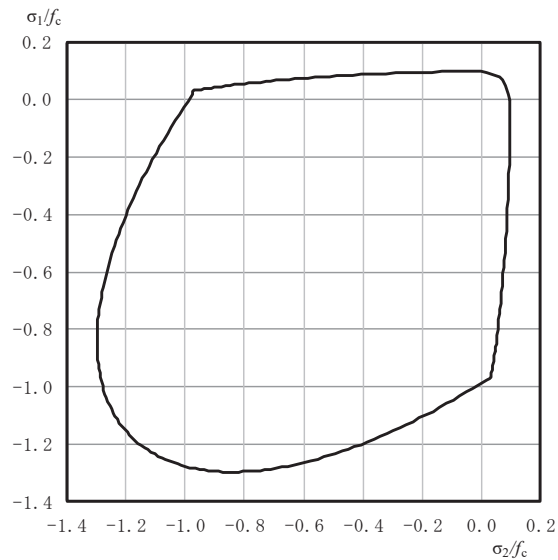
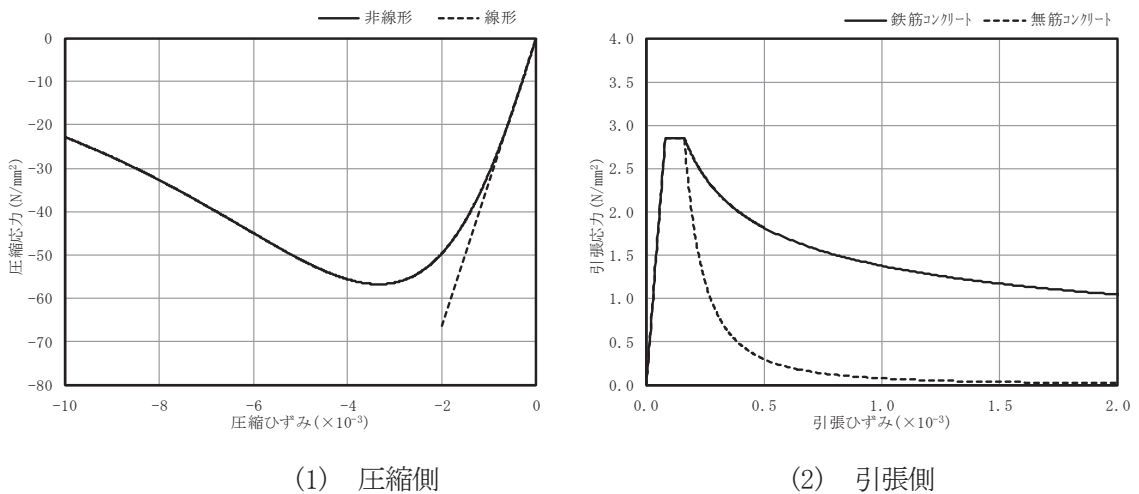


図2 二軸応力下の降伏曲線

コンクリートの圧縮側と引張側の応力-ひずみ関係を図3に示す。



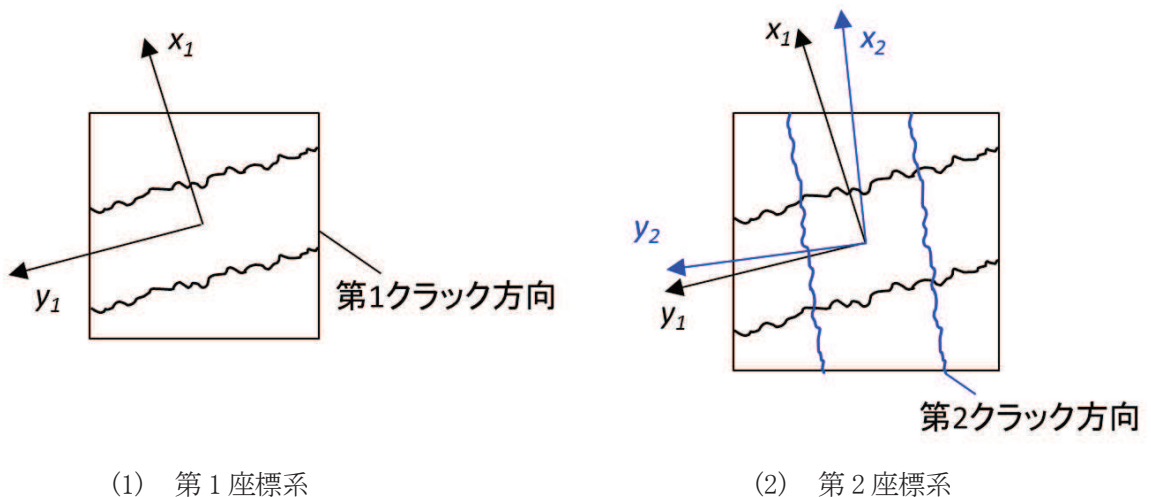
(1) 圧縮側

(2) 引張側

図3 コンクリートの一軸応力-ひずみ関係

ひび割れは分散ひび割れ（ひび割れが要素内で一様に発生すると仮定したモデル）として扱い、第1ひび割れ、第2ひび割れに関する直交座標系をそれぞれ定義し、アクティブクラック（開口の大きいひび割れ）に関する座標系で応力、ひずみの更新を進める疑似直交座標系を用いる。この疑似直交2方向ひび割れは、2つのひび割れ間の角度が直角より小さくなると厳密性がなくなるが、地震動等による交番繰返しでは直角から大きく離れることはないため、実用上の精度は確保されるものと考えられる。図4に、疑似直交ひび割れモデルの概念を示す。

なお、本検討では疑似直交2方向ひび割れモデルを複合させた4方向ひび割れモデルを用いる。



(1) 第1座標系

(2) 第2座標系

図4 疑似直交ひび割れモデル

別紙7 3次元立体架構モデルによる屋根トラスの
シミュレーション解析（原子炉建屋）

目 次

1. はじめに	別紙 7- 1
2. 屋根トラスのシミュレーション解析	別紙 7- 2
2.1 屋根トラスの概要	別紙 7- 2
2.2 地震応答解析モデル	別紙 7- 4
2.3 評価基準	別紙 7-14
2.4 評価結果	別紙 7-15
3. 評価結果のまとめ	別紙 7-16

別紙 7-1 サブトラス及び水平ブレース（仮設部材）の評価

別紙 7-2 加速度応答スペクトルの比較

1. はじめに

3.11 地震及び 4.7 地震の 2 つの地震に対して，原子炉建屋の屋根トラスが健全性を保っていたか確認を行うことを目的として屋根トラス部の地震応答シミュレーション解析を実施する。

屋根トラスの健全性評価は，原子炉建屋の建屋内に設置された地震計の観測記録を用いたシミュレーション解析結果により，主トラスが弾性範囲であることを確認することにより行った。

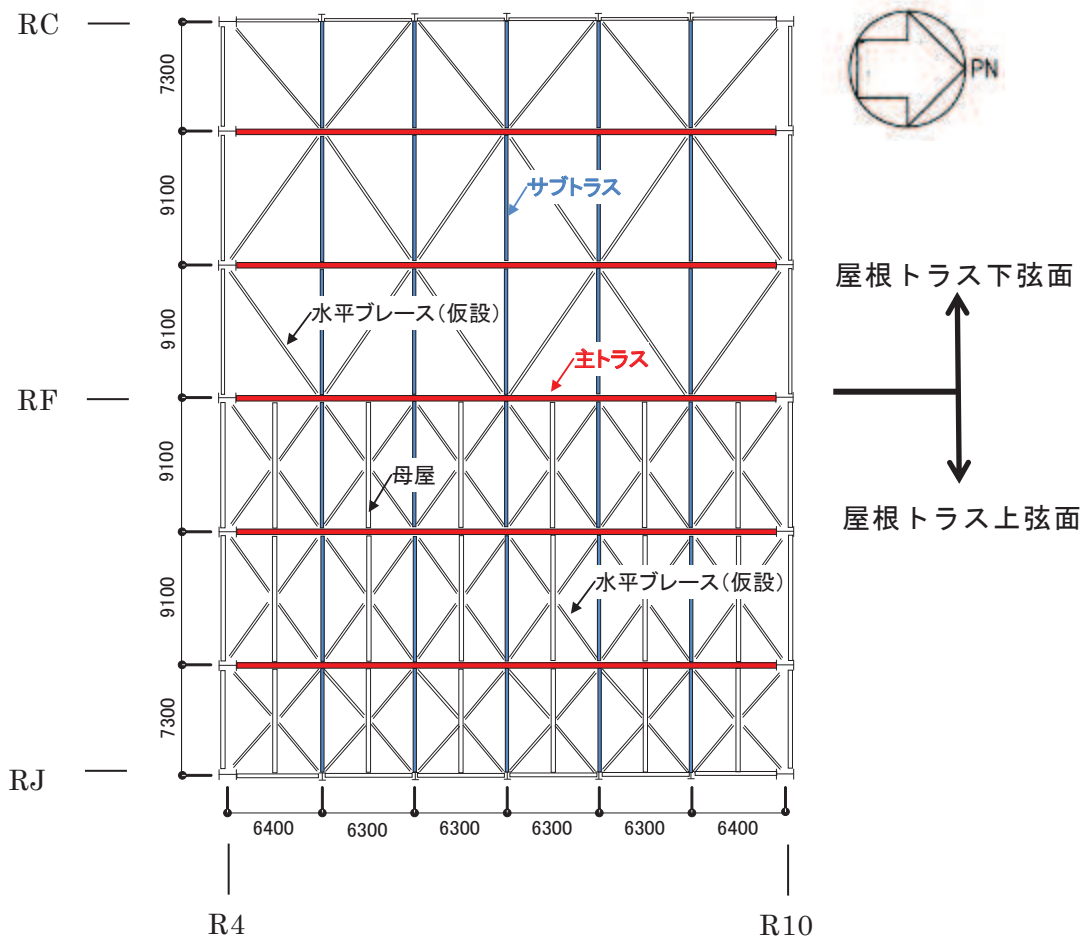
使用解析コードは，立体骨組の弾塑性解析システム「fappase」である。

2. 屋根トラスのシミュレーション解析

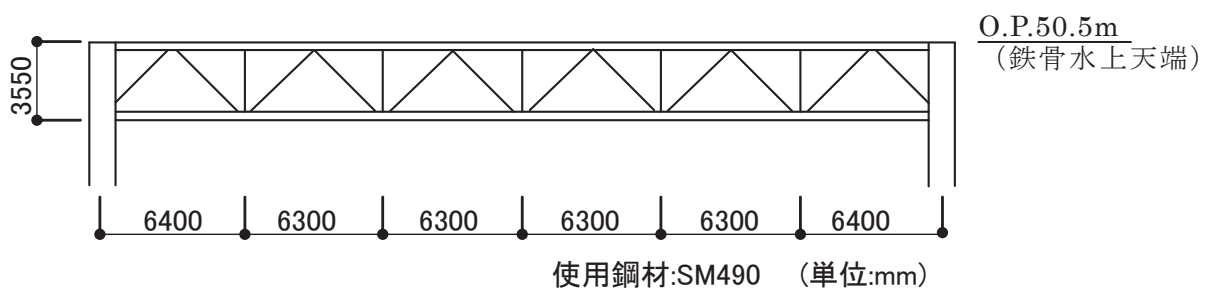
2.1 屋根トラスの概要

原子炉建屋の上部構造は、鉄筋コンクリート造の外壁、屋根スラブ及び鉄骨造の屋根トラスで主に構成されている。屋根トラスの平面は、約 38m（南北方向）×約 51m（東西方向）の長方形をなしており、地上 3 階（O.P. +33.2m）からの高さは 17.3m である。

屋根トラスの概要を図 2-1 に示す。



(a) 屋根トラス平面図



(b) 主トラス軸組図

図 2-1 屋根トラスの概要

2.2 地震応答解析モデル

屋根トラスの地震応答解析モデルは、オペフロ上部の柱、壁、屋根スラブ、屋根トラス等を線材又は面材により立体的にモデル化した3次元の立体架構モデルとした。

屋根トラス部は、主要な構造部材である主トラス、水平力を負担しないサブトラス、母屋、建設時の建て方用部材である屋根トラス上下弦面水平ブレースをモデル化する。各鉄骨部材は軸変形、曲げ変形を考慮した梁要素（主トラスの上下弦材等）と軸変形のみを考慮したトラス要素（屋根面水平ブレース、主トラスの斜材・束材等）としてモデル化する。また、耐震壁及び外周梁は各々シェル要素及び軸変形、曲げ変形を考慮した梁要素としてモデル化し、耐震壁の開口部についても考慮する。柱脚の条件は固定とした。

屋根トラス部材と耐震壁の接合部の条件は、端部接合条件に応じ、端部ピン接合の部材は軸力のみが作用するためトラス要素、端部剛接合の部材は軸力と曲げモーメントが作用するためビーム要素としてモデル化する。

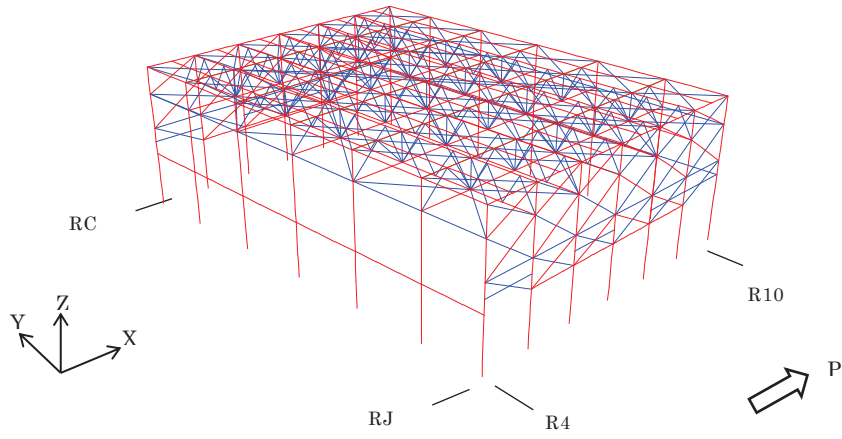
シミュレーション解析では、地震発生時の状況を考慮し、屋上スラブの積載荷重は考慮しないこととした。

解析モデルの概要を図2-2に示す。また、解析に用いる材料の物性値を表2-1に示す。トラス要素は修正若林モデルによる非線形特性を考慮した。固有モードを図2-3～図2-5に示す。

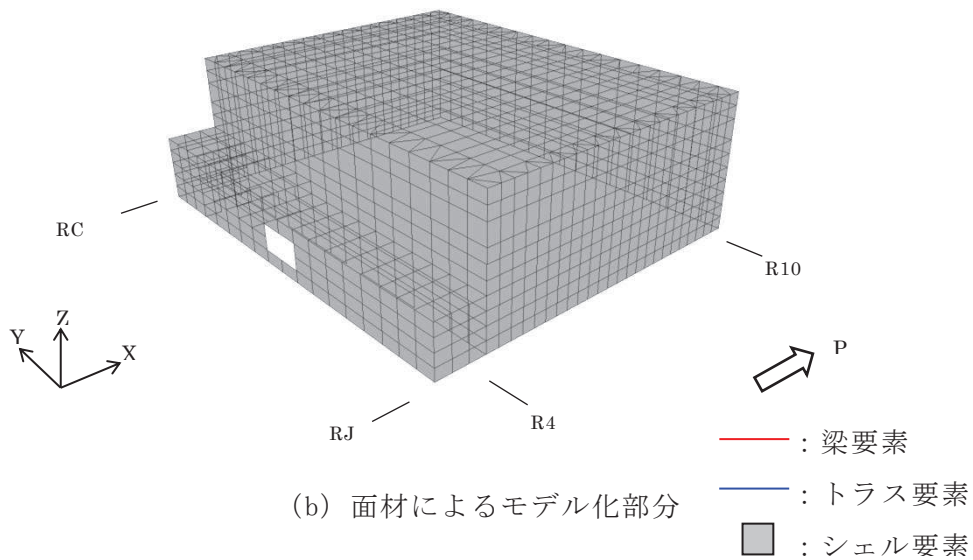
解析モデルへの入力は、地上3階（O.P. 33.2m）の観測記録を用いることとし、オペフロ位置を固定として水平方向と鉛直方向の同時入力した（水平2成分、鉛直成分、回転2成分）。入力地震動の算定に用いた地震計及びその位置を表2-2及び図2-6に示す。解析モデルへの入力地震動である水平2成分、回転2成分及び鉛直成分の加速度波形及び加速度応答スペクトルを、図2-7～図2-11に示す。

また、地震応答解析における減衰評価は各部別内部粘性減衰を用い、鉄骨造部の減衰定数として2%、鉄筋コンクリート造部の減衰定数として5%を採用している。

なお、3.11地震と4.7地震における屋上及び地上3階の観測記録の加速度応答スペクトルは、立体架構モデルの鉛直方向1次固有振動数付近において同程度の振幅であるため、3.11地震を代表として解析を行う。



(a) 線材によるモデル化部分



(b) 面材によるモデル化部分

図 2-2 屋根トラス（オペフロ上部架構）の解析モデル

表 2-1 屋根トラスの解析に用いた材料の物性値

材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位 体積重量 γ (kN/m ³)
鉄骨	2.05×10^5	7.90×10^4	0.3	84.7* ²
鉄筋コンクリート* ¹ (鉄骨鉄筋コンクリート)	2.51×10^4	1.05×10^4	0.2	24.0 (25.0)

注記： * 1 耐震壁はヤング係数及びせん断弾性係数を 0.4 倍とする。

* 2 接合部等の割増分 10% を考慮した値とする。

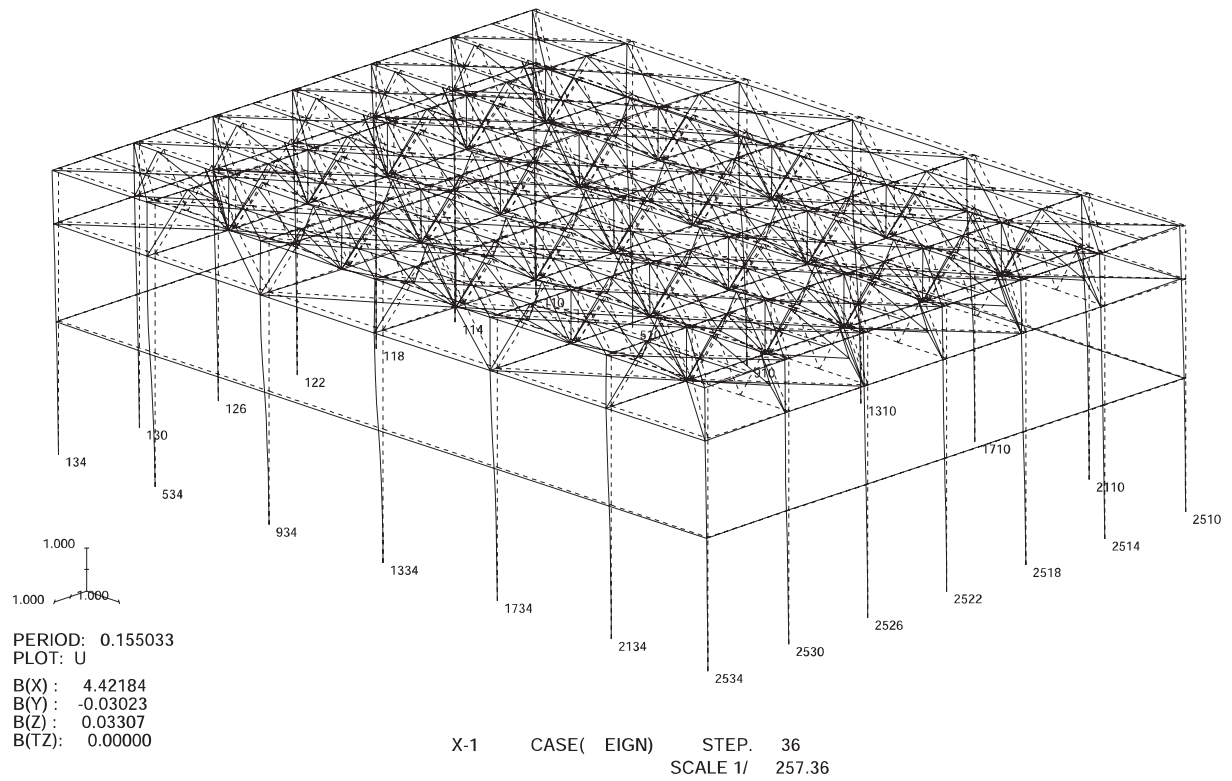


図 2-3 NS 方向 1 次 (全体 36 次) モード図

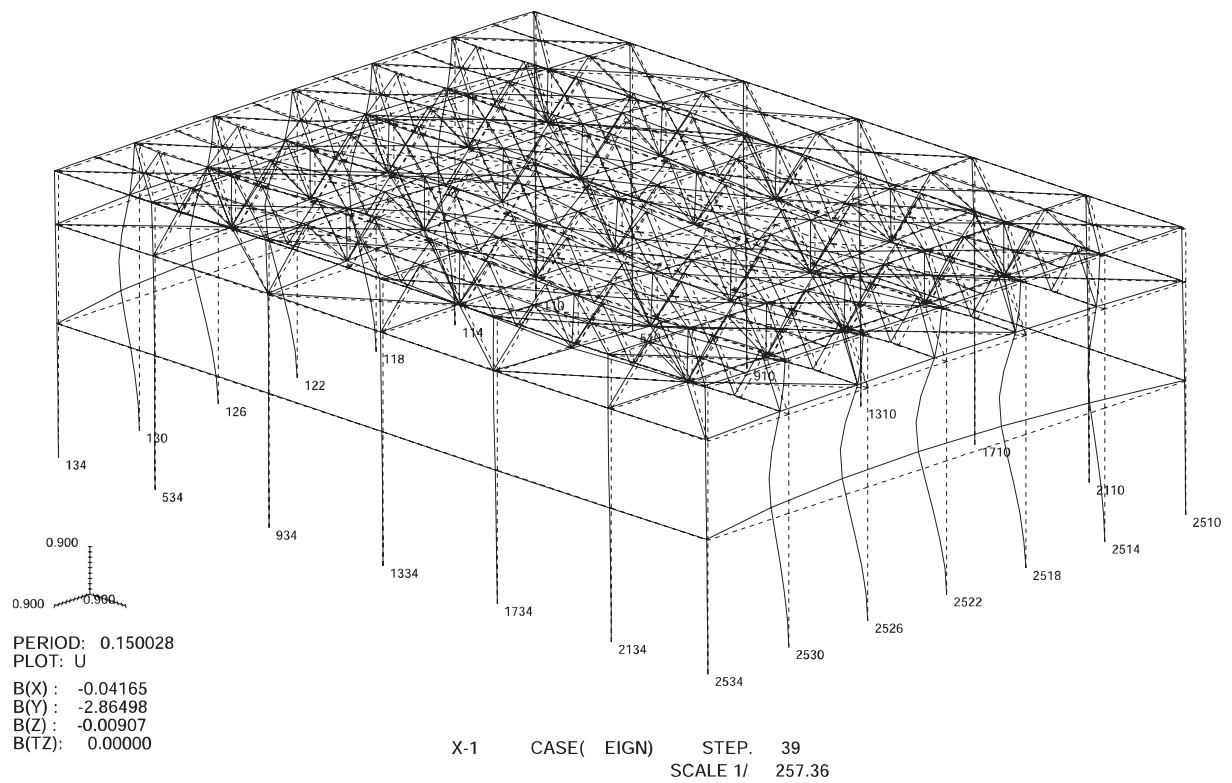


図 2-4 EW 方向 1 次 (全体 39 次) モード図

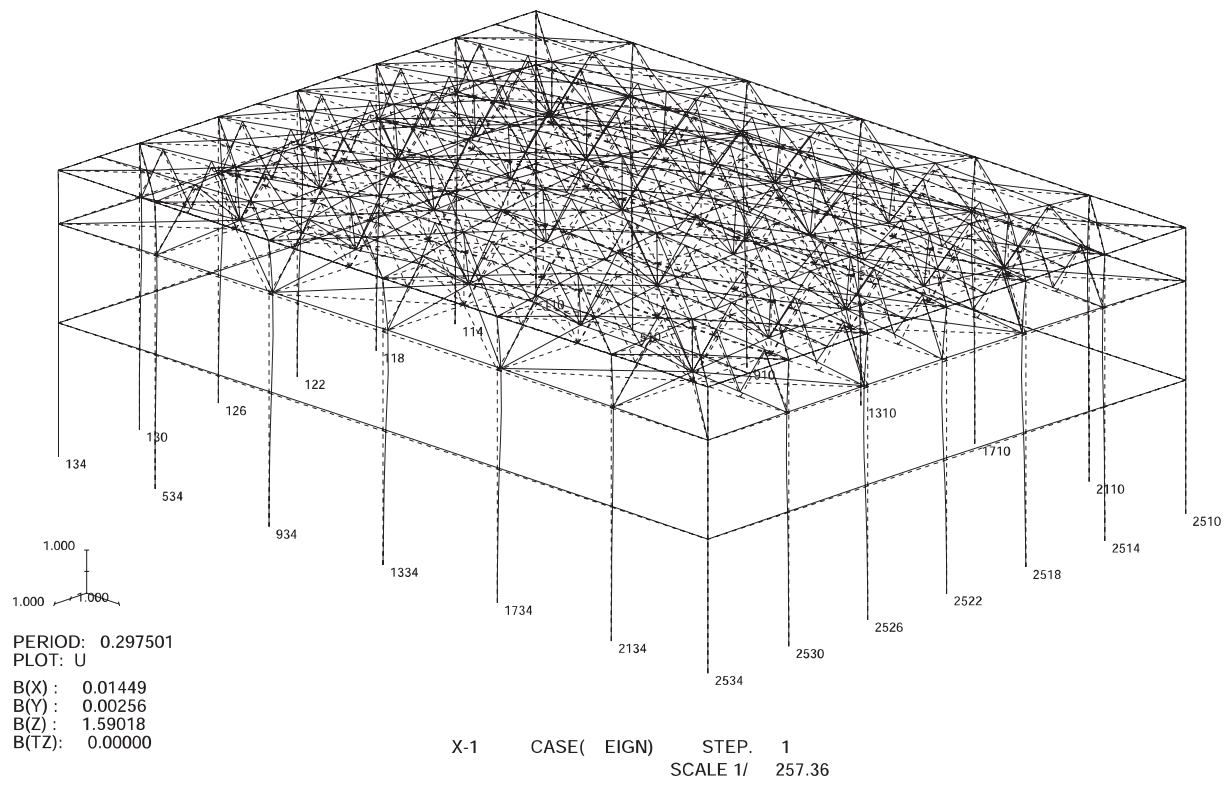


図 2-5 鉛直方向 1 次（全体 1 次）モード図

表 2-2 入力地震動の算定に用いた地震計

入力成分	地震計設置位置	観測成分	備考
NS 方向 (並進)	2RB-8, 9, 11	NS	平均値を採用
EW 方向 (並進)	2RB-8, 10	EW	平均値を採用
UD 方向 (並進)	2RB-8, 9, 10, 11	UD	平均値を採用
NS 方向 (回転)	2RB-9, 11	UD	2つの地震計位置より重心位置の回転を算出
EW 方向 (回転)	2RB-8, 10	UD	2つの地震計位置より重心位置の回転を算出

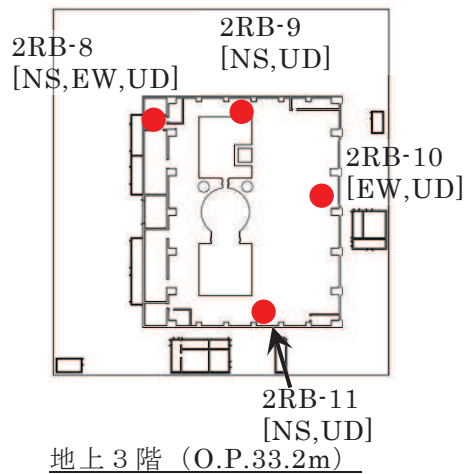
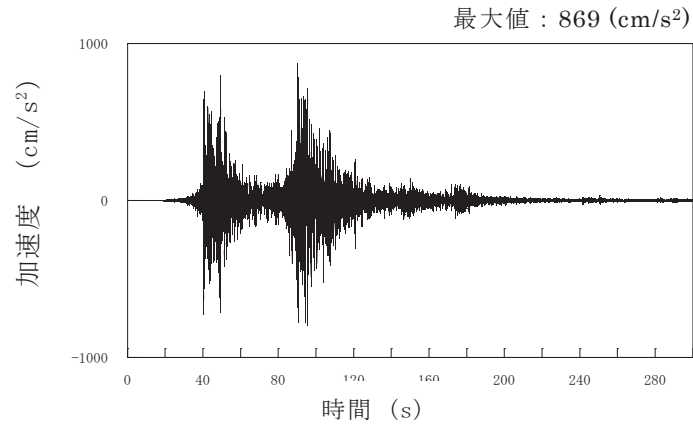
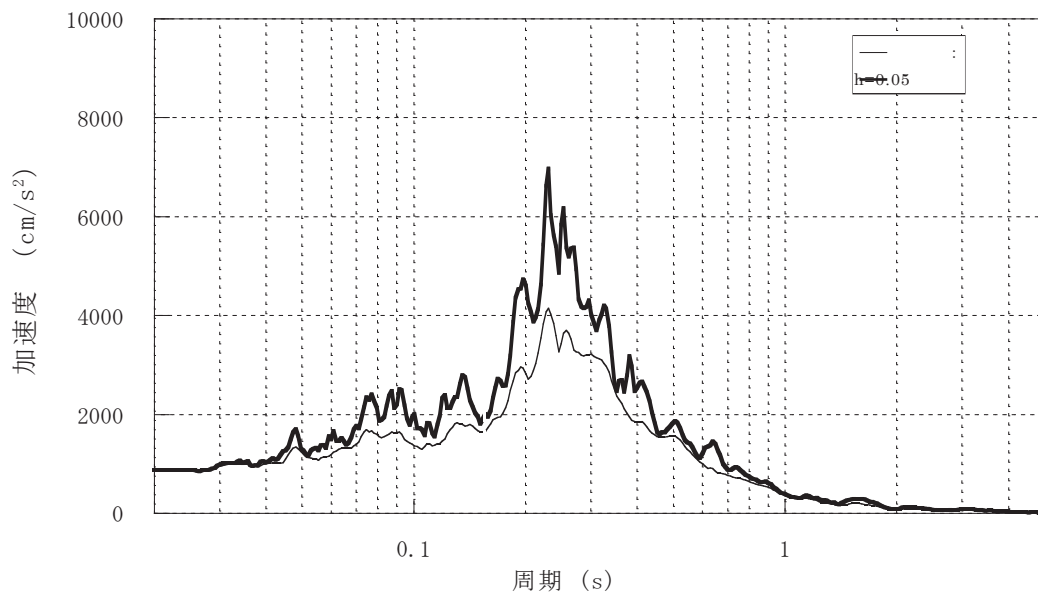


図 2-6 原子炉建屋 地震計設置位置 (地上 3 階)

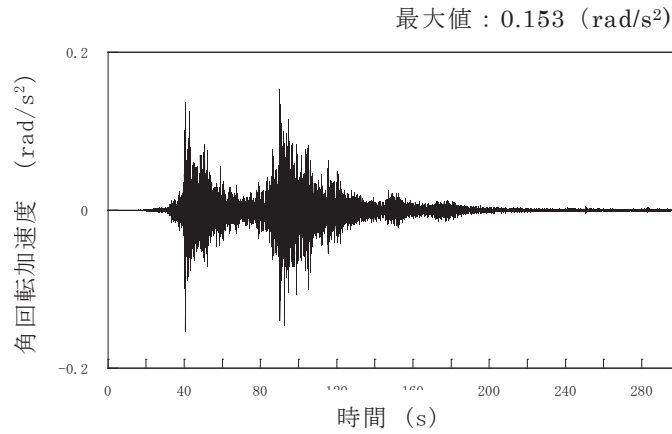


(a) 加速度時刻歴波形 (O. P. 33. 2m, 2RB-8, 9, 11 の観測記録平均)

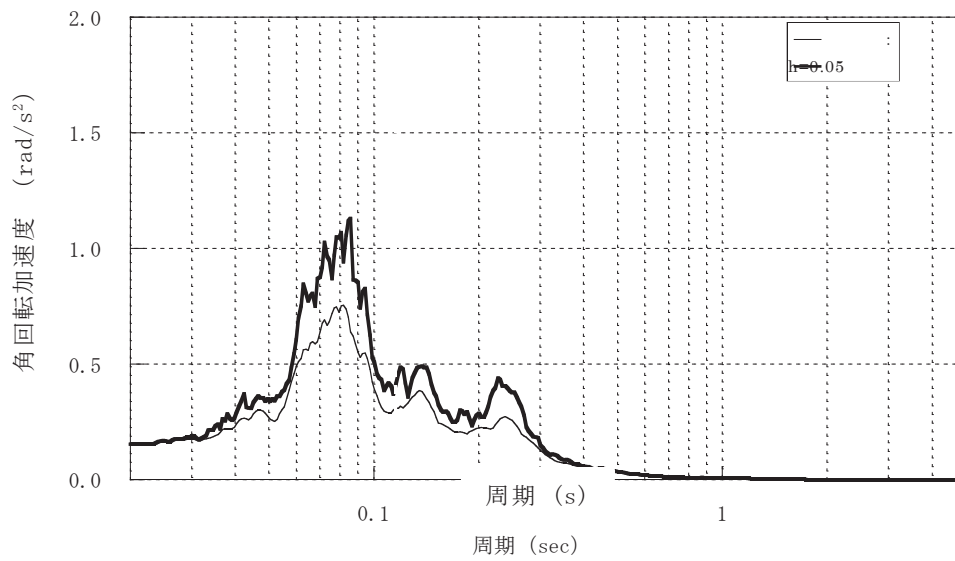


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-7 解析モデルへの入力地震動
(3.11 地震 NS 方向 水平成分)

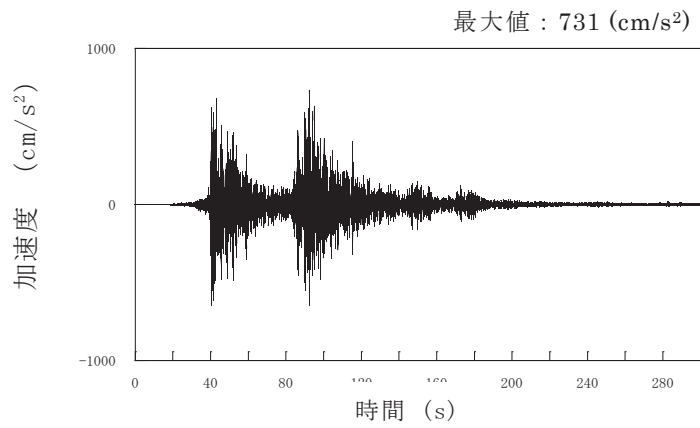


(a) 加速度時刻歴波形 (O.P. 33. 2m, 2RB-9, 11 の観測記録より計算)

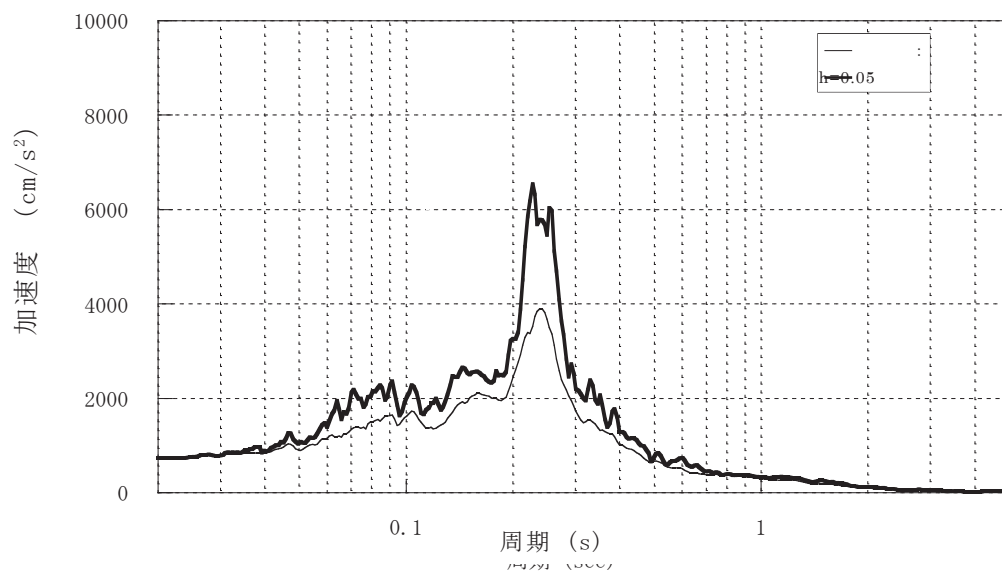


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-8 解析モデルへの入力地震動
(3.11 地震 NS 方向軸周り回転成分)

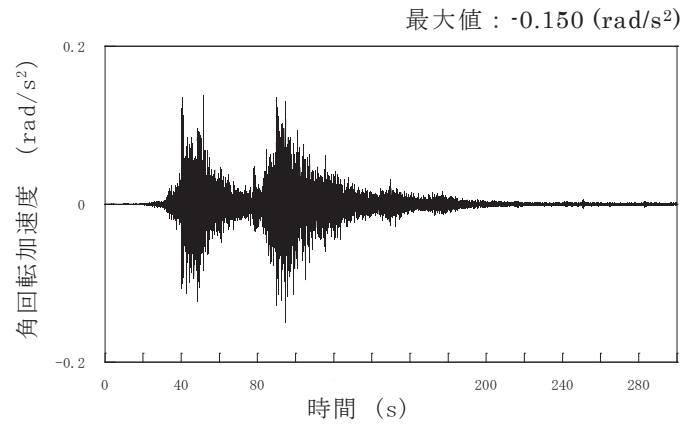


(a) 加速度時刻歴波形 (O. P. 33. 2m, 2RB-8, 10 の観測記録平均)

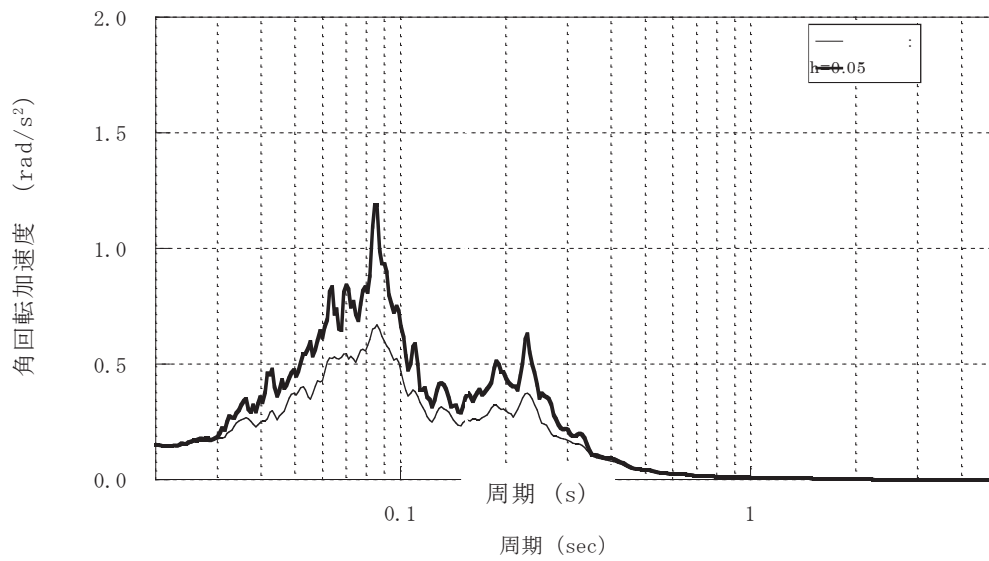


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-9 解析モデルへの入力地震動
(3.11 地震 EW 方向 水平成分)

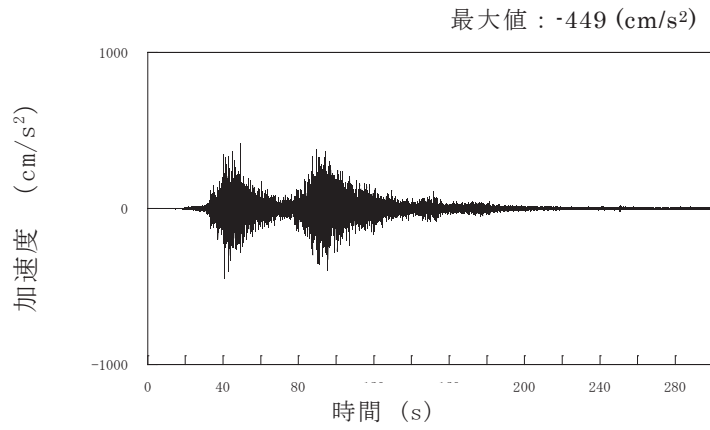


(a) 加速度時刻歴波形 (O. P. 33. 2m, 2RB-8, 10 の観測記録より計算)

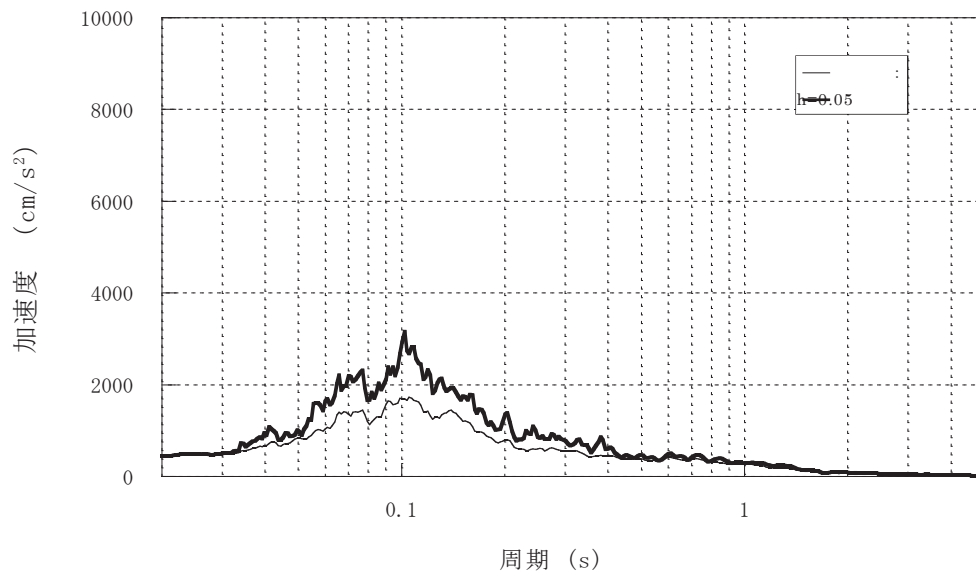


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-10 解析モデルへの入力地震動
(3.11 地震 EW 方向軸周り回転成分)



(a) 加速度時刻歴波形 (O. P. 33. 2m, 2RB-8, 9, 10, 11 の観測記録平均)



(b) 加速度応答スペクトル

図 2-11 解析モデルへの入力地震動
(3.11 地震 鉛直方向成分)

2.3 評価基準

立体架構モデルの時刻歴地震応答解析により得られた主要な構造部材である主トラスの各部材応力が評価基準値以下であることを確認する（日本建築学会「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」（2005）に準拠）。

主トラスの上下弦材を対象として地震時に生じる軸力及び曲げモーメントより評価基準値に対する断面検定について、下式を用いて行う。なお、鋼材の材料強度は、基準強度の1.1倍の数値を用いて算定する。

(圧縮)

$$\frac{s\sigma_N}{sf_c} + \frac{s\sigma_b}{sf_b} \leq 1.0$$

ここに、 $s\sigma_N$: 地震時における部材の軸応力度

$s\sigma_b$: 地震時における部材の曲げ応力度

sf_c : 短期許容圧縮応力度

(座屈の影響を考慮して細長比等により求めた数値)

sf_b : 短期許容曲げ応力度

(引張)

$$\frac{s\sigma_N}{sf_t} + \frac{s\sigma_b}{sf_b} \leq 1.0$$

ここに、 $s\sigma_N$: 地震時における部材の軸応力度

$s\sigma_b$: 地震時における部材の曲げ応力度

sf_t : 短期許容引張応力度

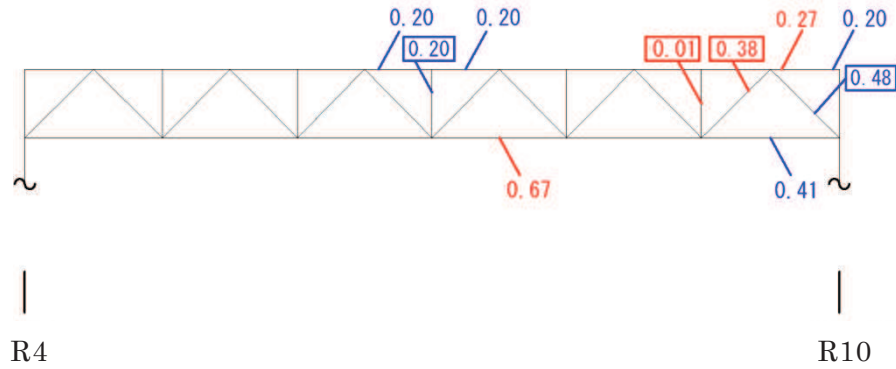
sf_b : 短期許容曲げ応力度

斜材・束材については、地震時における部材の塑性率が1未満であることを確認する。

2.4 評価結果

主トラスの各部材の検定比及び塑性率が最も大きい部材を含む RF 通りの検定比及び塑性率について図 2-12 に示す。

解析結果によると主トラスは弾性範囲であることを確認した。



[凡例]

青文字：部材の部位毎の検定比最大値（曲げ＋圧縮）

赤文字：部材の部位毎の検定比最大値（曲げ＋引張）

青文字：部材の部位毎の塑性率最大値（圧縮）

赤文字：部材の部位毎の塑性率最大値（引張）

図 2-12 屋根トラスの主トラスの検定比・塑性率（RF 通り）

3. 評価結果のまとめ

屋根トラスについて、地震応答解析により応答を求めて、評価基準値と比較を行った結果、屋根トラスの主トラスは弾性範囲にあることを確認した。

以上から、原子炉建屋の屋根トラスの主トラスの耐震健全性は確保されていると評価した。

別紙 7-1 サブトラス及び水平ブレース（仮設部材）の評価

サブトラスは原設計時に耐震設計の対象外となっている部材であり、水平ブレースは建設時の仮設部材であるが、3次元立体フレームモデルでは、モデル化されているため、シミュレーション解析と点検結果の比較を行った。

シミュレーション解析によるサブトラスの評価結果を検定比及び塑性率が最も大きい部材を含む R7-400 通りの構面の検定比及び塑性率について図 1 に、点検結果を図 2 に示す。また、水平ブレースの解析結果を図 3 に、点検結果を図 4 に示す。

サブトラスでは端部に近い斜材 2 箇所と下弦材の塑性率が健全性評価の目安値である 4.0 を上回る結果となった。このうち、点検で座屈が確認された斜材位置と解析上塑性率が最大となる部材位置が整合する結果となっている。

水平ブレースについては、点検結果と比較すると解析結果が過大となっているが、応力の集中する部位については概ね整合する結果となっている。

また、損傷が確認されたサブトラス部材を交換補修することで屋根トラスの耐震健全性は確保されると評価した。

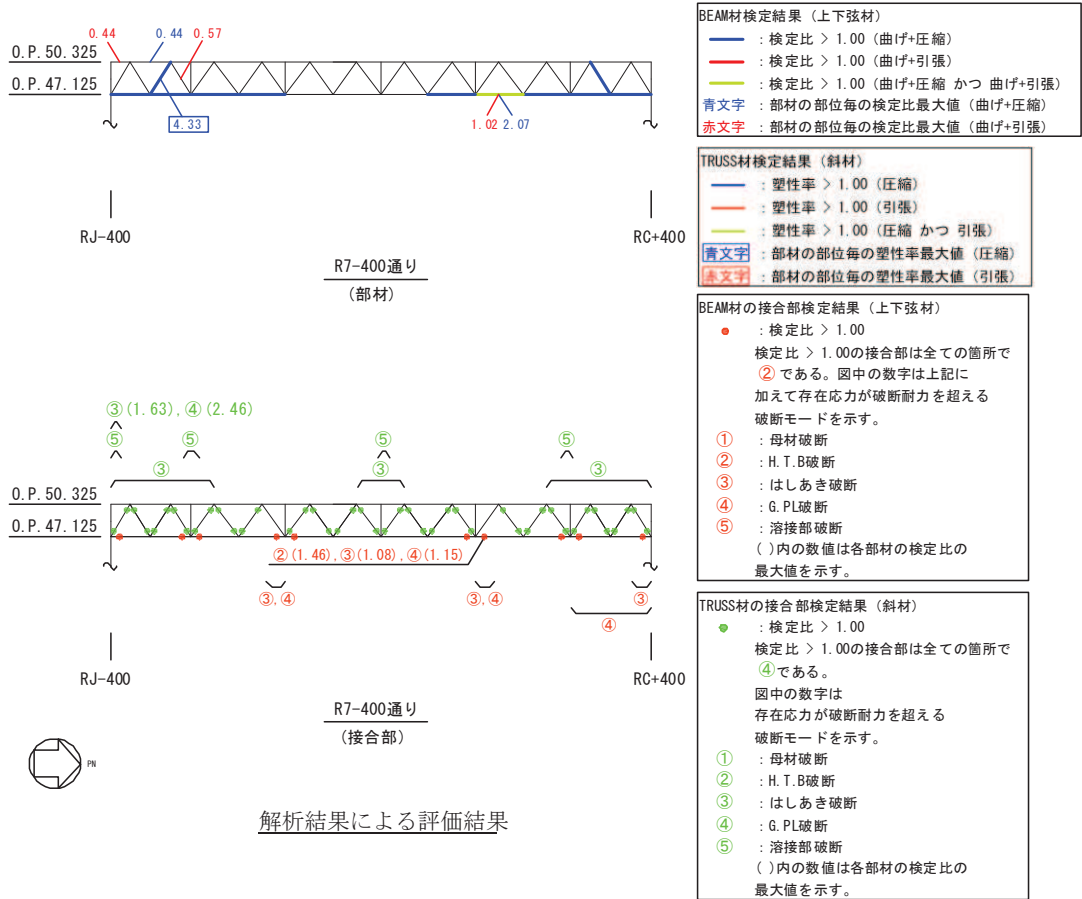


図1 サブトラス及び接合部の検定比・塑性率 (R7-400通り)

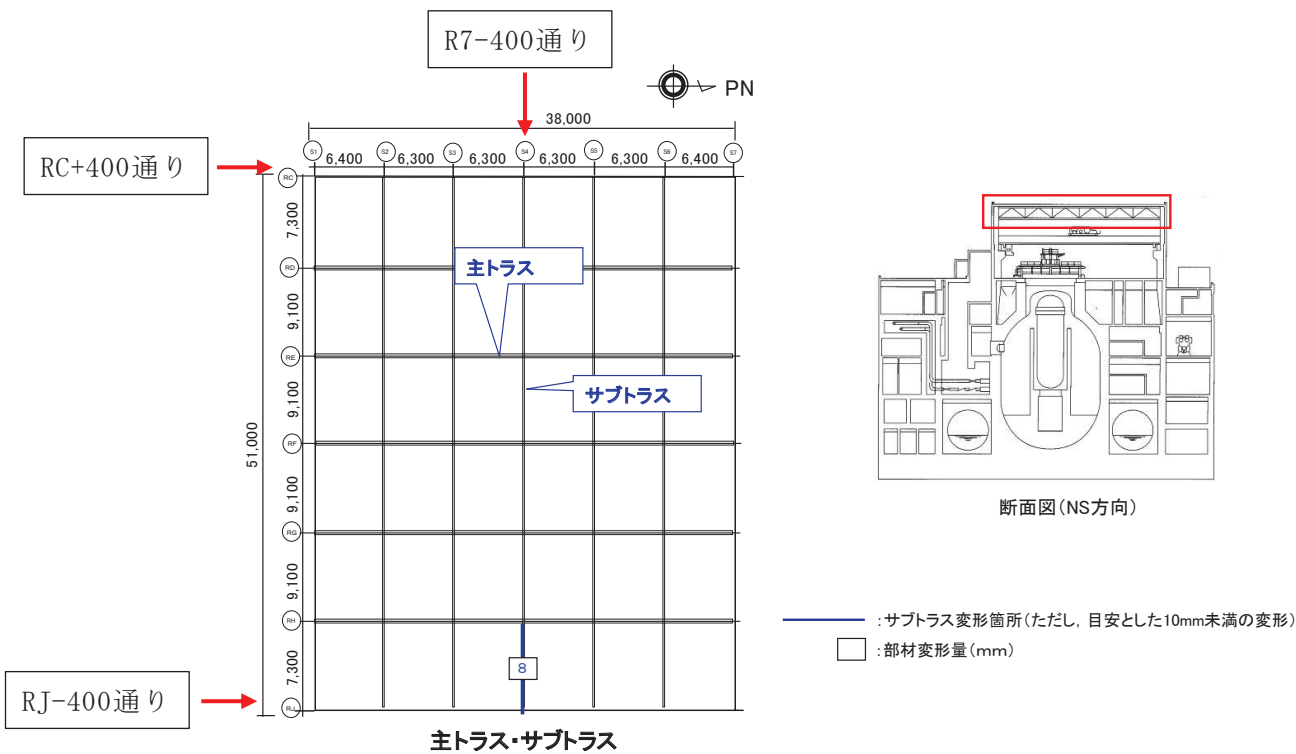
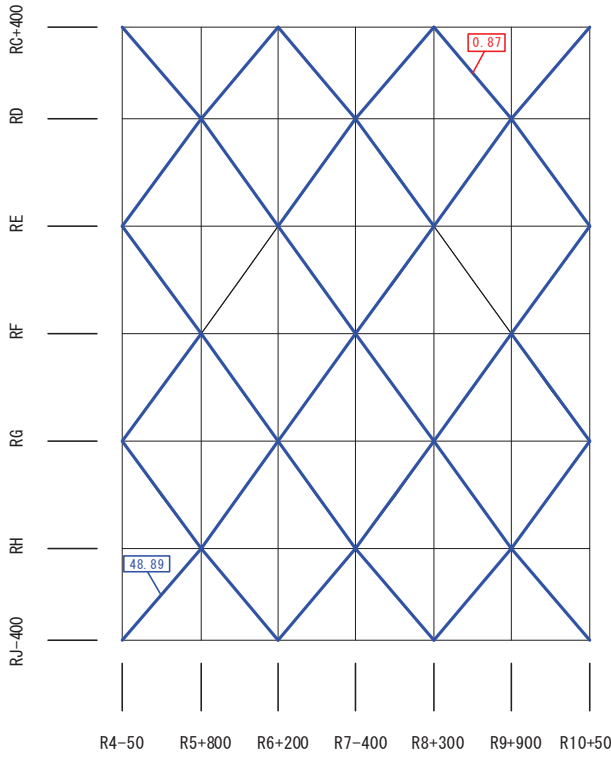


図2 主トラス・サブトラスの点検結果



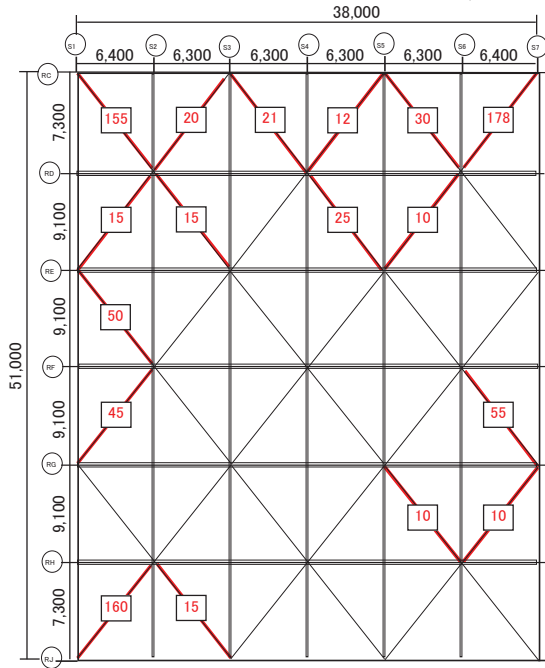
TRUSS材検定結果 (下弦面水平ブレース)

- : 塑性率 > 1.00 (圧縮)
- : 塑性率 > 1.00 (引張)
- : 塑性率 > 1.00 (圧縮 かつ 引張)
- 青文字 : 部材の部位毎の塑性率最大値 (圧縮)
- 赤文字 : 部材の部位毎の塑性率最大値 (引張)

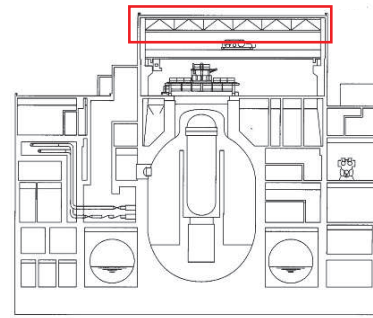
屋根トラス下弦面 (0. P. 47.125)

(部材)

図3 水平ブレース (下弦面) の検定比・塑性率



下弦水平ブレース



断面図(NS方向)

— : 下弦水平ブレース変形箇所
 □ : 部材変形量(mm)

図4 水平ブレース (下弦面) の点検結果

別紙 7-2 加速度応答スペクトルの比較

シミュレーション解析モデルの妥当性確認として、屋上の地震観測記録の再現性の確認を行った。図1に屋上の地震観測記録と屋根トラス解析モデルの地震計位置の応答波形の加速度応答スペクトルを比較して示す。

観測記録と解析モデルの応答波形の加速度応答スペクトルは、周期 0.1 秒より長周期側では概ね整合している。

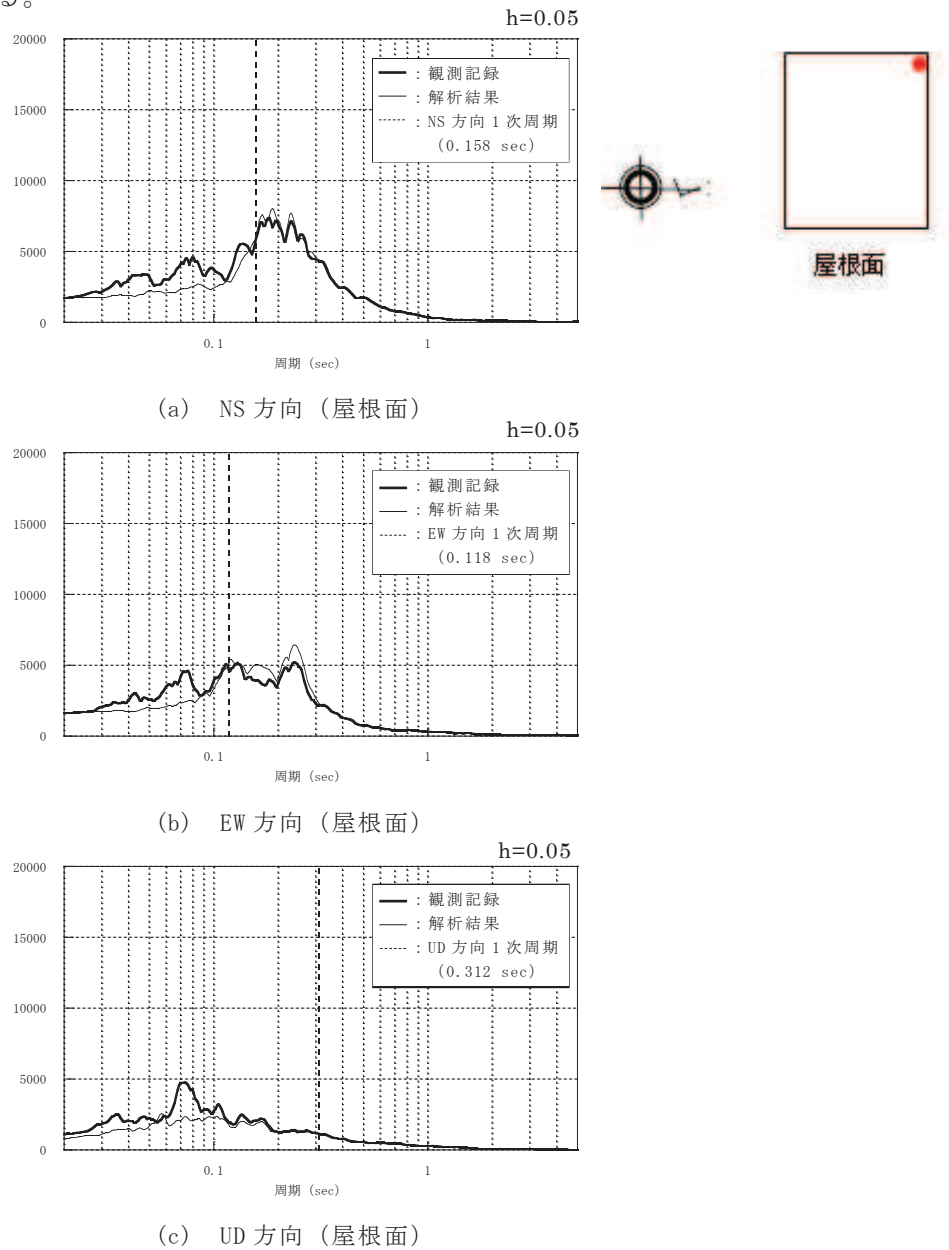


図1 屋上の地震観測記録と屋根トラス解析モデルの応答波形の加速度応答スペクトルの比較

[参考文献]

- (1) 女川原子力発電所における平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析及び津波の調査結果に係わる報告書

平成 23 年 4 月 7 日 東北電力株式会社

- (2) 女川原子力発電所における 2011 年 4 月 7 日宮城県沖の地震時に取得された地震観測記録の分析結果に係わる報告書

平成 23 年 4 月 25 日 東北電力株式会社

別紙 8 建屋の 3 次元的なねじれの影響について

目 次

1. 検討目的.....	別紙 8-1
2. 検討方法.....	別紙 8-1
3. 検討結果.....	別紙 8-3
3.1 伝達関数による検討.....	別紙 8-3
3.2 応答スペクトルの比較によるねじれ応答の検討.....	別紙 8-12
3.3 伝達関数の比較によるねじれ応答の検討.....	別紙 8-17
4. まとめ.....	別紙 8-30

1. 検討目的

原子炉建屋は、耐震壁をほぼ対称に配置する構造計画としており、ねじれの影響は小さいと考えられるが、ここでは、3.11地震等の影響による顕著な初期剛性の低下の要因として建屋のねじれ応答が影響しているかどうか、念のためその影響について検討する。原子炉建屋は、オペフロ上部の応答が大きく、オペフロ上部の2つの耐震壁の剛性に差があるため、地震時にねじれ応答の影響が含まれていると考えられる。

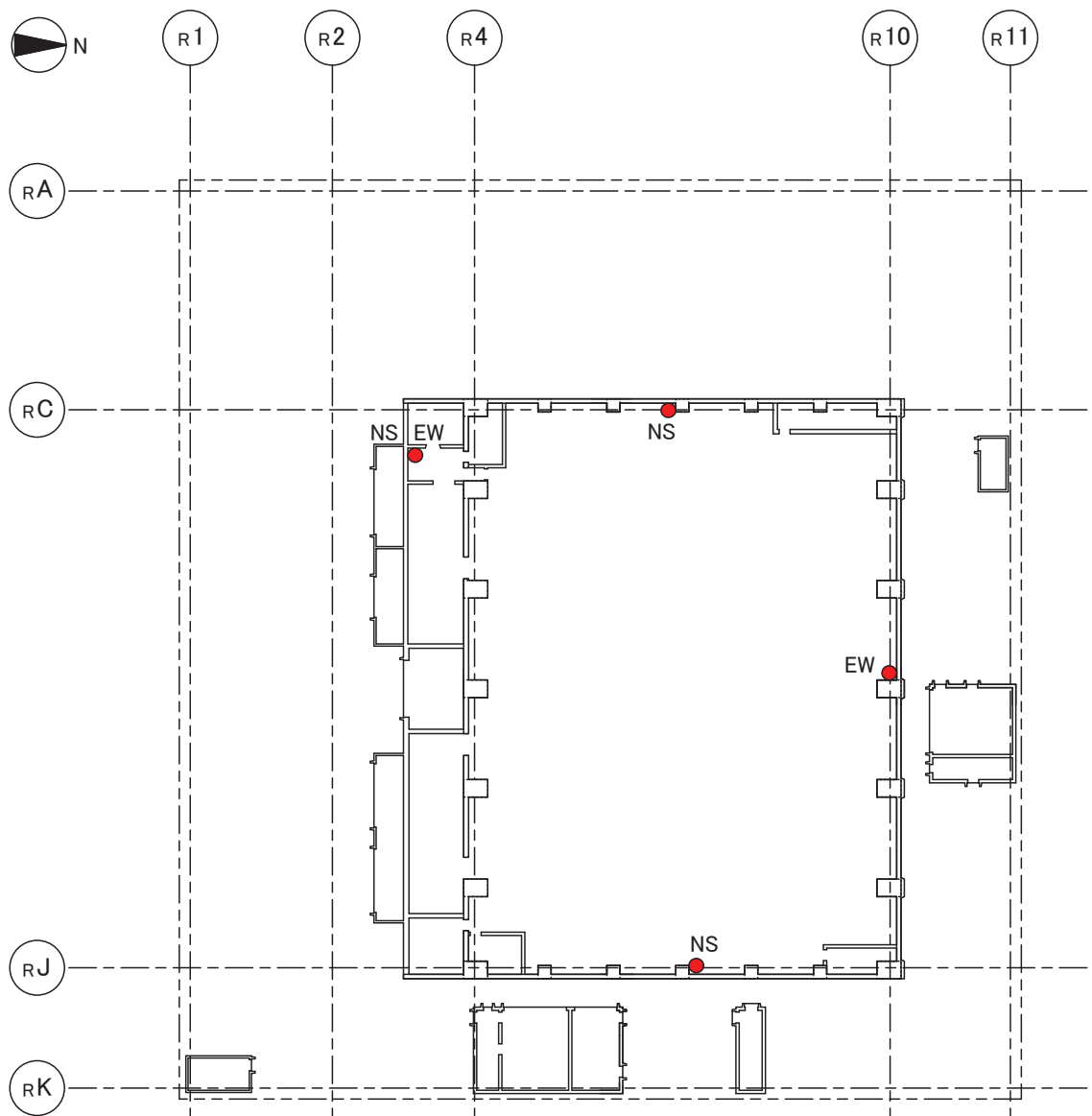
本検討では、3.11地震本震時のねじれ応答の影響評価を目的として、地上3階の応答について検討した。

2. 検討方法

原子炉建屋の地震観測装置は、地上3階床でNS方向は3箇所、EW方向は2箇所に地震計が配置されている。これらの地震計の伝達関数の分析等から、ねじれ応答が生じる振動数の分析を行う。地震計の配置を図2-1に示す。

ねじれ応答の影響は、建屋両端の観測記録について、その伝達関数を比較することにより、ねじれの1次振動数について評価する。

また、建屋両端の観測記録の時刻歴上の平均波形をねじれ応答を含まない応答波形と仮定し、平均波形と建屋両端の観測波形の応答スペクトルを比較することで、応答スペクトルに含まれるねじれ応答成分の影響を評価する。さらに、平均波を分母として、端部の観測記録を分子とする伝達関数についても検討する。



3F(OP 33.200)

図 2-1 原子炉建屋地上 3 階の地震計配置

3. 検討結果

3.1 伝達関数による検討

原子炉建屋の 2008 年 12 月 26 日以降の代表的な 244 地震の観測記録について、以下の 4 つの期間に分割して、観測記録の伝達関数を比較する。2014 年にオペフロ上部の耐震補強工事が行われているため、2014 年と 2015 年以降の観測記録を別々のグループとした。

- ① 2011/3/9 以前の観測記録
- ② 2011/3/11～2013/12 の観測記録
- ③ 2014/1～2014/12 の観測記録（補強工事中）
- ④ 2015/1～2016/12 の観測記録（補強工事後）

伝達関数の評価結果を図 3-1～図 3-8 に示す。NS 方向は西側観測記録に対する東側観測記録の伝達関数を、EW 方向は北側観測記録に対する南側観測記録の伝達関数を評価した。

3.11 地震以前の地震観測記録では、伝達関数の位相が 180° になるねじれの 1 次振動数が NS は 8Hz、EW は 12Hz 付近に見られる。3.11 地震以降は、ねじれの 1 次振動数が NS は 7.5Hz 程度、EW は 9Hz 程度まで低下しているが、耐震補強工事後の 2015 年以降の地震では NS は 9Hz 程度、EW は 10Hz 程度まで回復している。

コヒーレンスの値を見ると、3.11 地震以前は NS、EW 方向ともに 6Hz 程度から低下し始めるが、3.11 地震後は 4.5Hz 程度から低下が始まっている。ただし、非線形応答の影響が含まれている。補強工事後は、コヒーレンスが低下し始める振動数は 5Hz より若干高い振動数まで回復しており、建屋の高振動数化が確認できる。

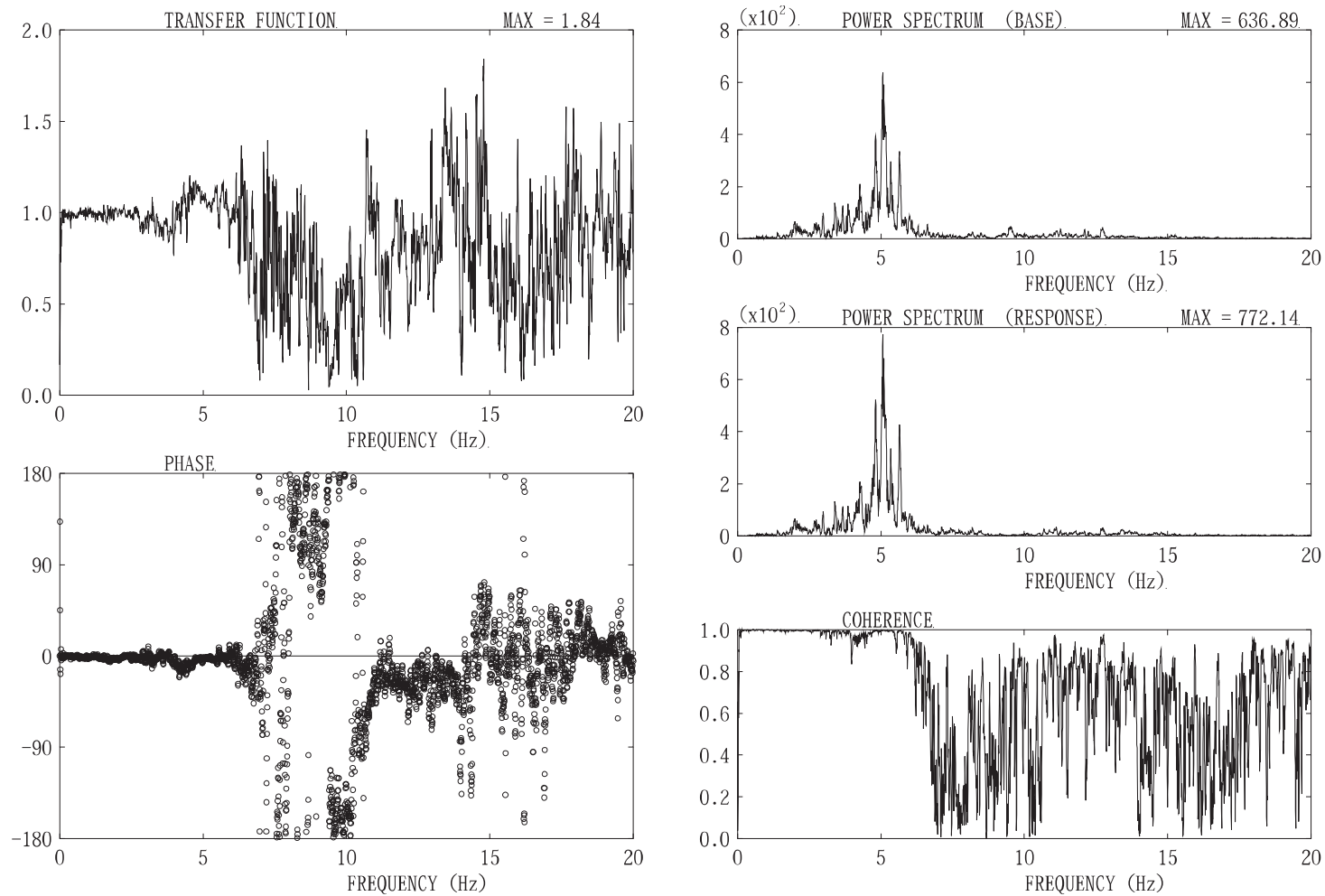


図 3-1 原子炉建屋 地上 3 階 NS 方向観測記録の伝達関数 (3.11 地震以前)

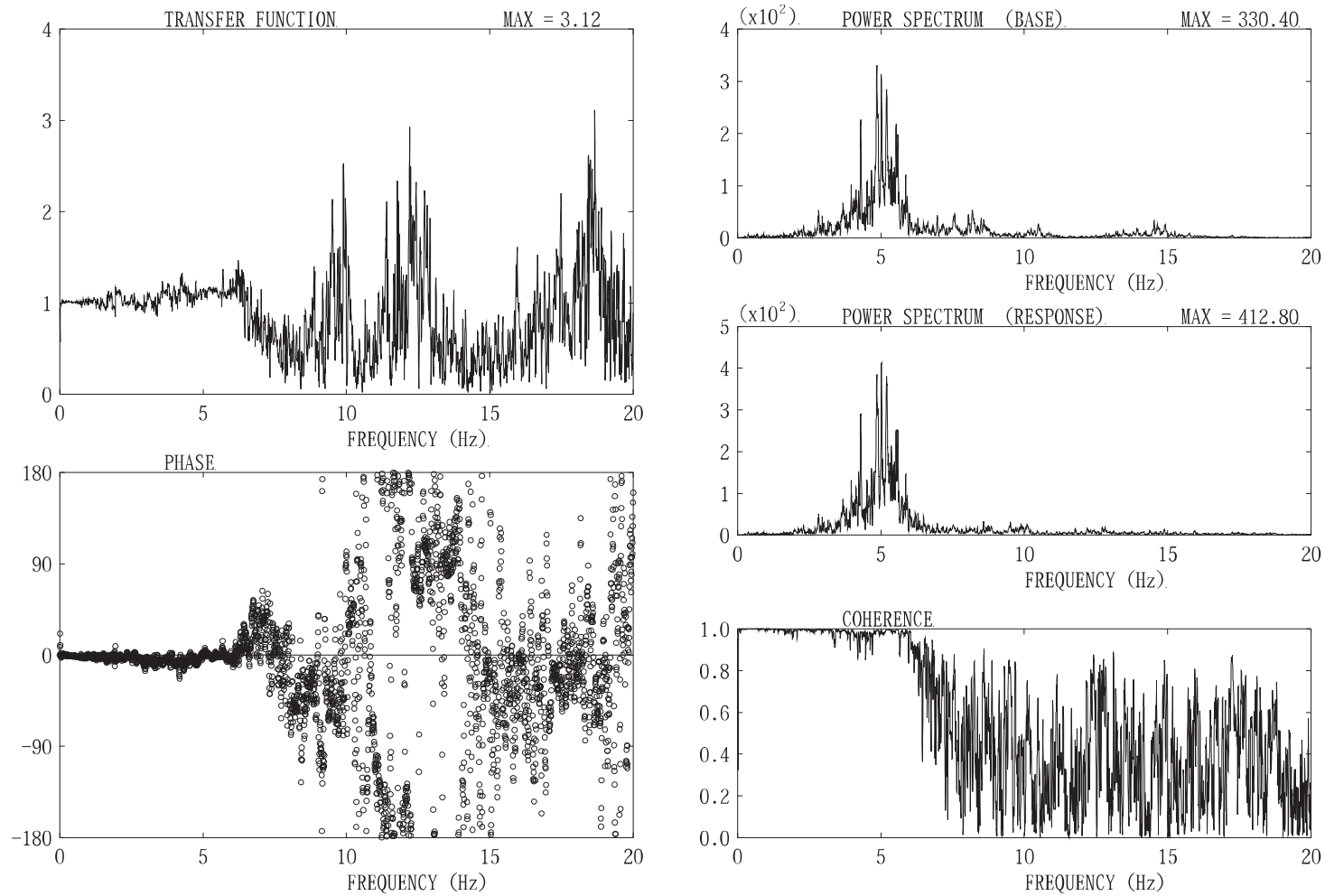


図 3-2 原子炉建屋 地上 3 階 EW 方向観測記録の伝達関数 (3.11 地震以前)