

福島第一原子力発電所4号機原子炉建屋の  
外壁の局所的な膨らみを考慮した耐震安全性に  
関する検討に係る報告書

平成24年6月

東京電力株式会社

## 目 次

1. はじめに
2. 局所的な膨らみが確認された外壁面の詳細点検結果および健全性評価結果
3. 原子炉建屋の耐震安全性評価結果（質点系モデルによる解析）
4. 使用済燃料プールの耐震安全性評価結果（3次元 FEM 解析）
5. まとめ

添付資料－1：局所的な膨らみが確認された外壁面の詳細点検結果および健全性評価結果に関する詳細

添付資料－2：原子炉建屋の耐震安全性評価結果に関する詳細（質点系モデルによる解析）

添付資料－3：使用済燃料プールの耐震安全性評価結果に関する詳細（3次元 FEM 解析）

## 福島第一原子力発電所4号機原子炉建屋の外壁の局所的な膨らみを考慮した 耐震安全性に関する検討に係る報告書

### 1. はじめに

本報告書は、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所第4号機における耐震安全性評価の実施について（指示）」（平成24年5月25日）に基づき、福島第一原子力発電所第4号機原子炉建屋における局所的な膨らみが確認された外壁面の詳細点検結果、健全性評価結果、並びにこれらを踏まえた原子炉建屋および使用済燃料プールの耐震安全性評価結果を報告するものである。

### 2. 局所的な膨らみが確認された外壁面の詳細点検結果および健全性評価結果

平成24年6月6日から同月21日にかけて、局所的な膨らみが確認された外壁面の詳細点検を実施した。点検項目は、変形性状の確認、コンクリート強度の確認、および目視点検の3項目とした。変形性状の確認の結果、西側および南側外壁面に周辺外壁面と比較して局所的な膨らみが確認されたものの、コンクリート強度の確認および目視点検の結果、構造強度に影響を及ぼすような損傷は確認されなかった。また、膨らみによる当該外壁面の層間変形角は建築基準法で定められている1/200以内となっており、顕著なひび割れが確認されていないことから、当該外壁における剛性の低下は少ないと考えられる。

（添付資料－1）

### 3. 原子炉建屋の耐震安全性評価結果（質点系モデルによる解析）

原子炉建屋の耐震安全性については、「福島第一原子力発電所の原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討に係る報告書（その1）」（平成23年5月、東京電力株式会社）（以下、平成23年報告書という）において、想定される損傷状況を反映したモデルにより確認している。2.の点検において確認された西側および南側外壁面の局所的な膨らみについて、剛性の低下は少ないと考えられるものの、その影響を考慮したケースとして当該壁の剛性を無視した場合を仮定し、原子炉建屋の耐震安全性に及ぼす影響を検討した。平成23年報告書で用いた質点系モデルを基に、当該壁の剛性を無視したモデルを作成して、時刻歴応答解析を実施した。解析の結果、当該壁の剛性を無視したモデルでは、剛性を考慮した既存モデルと比べ、耐震壁に発生するせん断ひずみはほぼ同じであり、大きな差異は生じなかった。このことから、当該壁の剛性の有無による影響は小さいものと考えられる。また、耐震壁に発生するせん断ひずみは最大でも $0.17 \times 10^{-3}$ であり、評価基準値である $4.0 \times 10^{-3}$ を大きく下回っていることから、仮に当該壁の剛性を無視した場

合を仮定しても、十分な耐震安全性を有しているものと評価している。

(添付資料－2)

#### 4. 使用済燃料プールの耐震安全性評価結果（3次元 FEM 解析）

使用済燃料プールの耐震安全性については、平成 23 年報告書において、想定される損傷状況を反映したモデルにより確認している。2. の点検において確認された西側および南側外壁面の局所的な膨らみについて、剛性の低下は少ないと考えられるものの、その影響を考慮したケースとして当該壁の剛性を無視した場合を仮定し、使用済燃料プールの耐震安全性に及ぼす影響を検討した。平成 23 年報告書で用いた 3 次元 FEM モデルを基に、当該壁の剛性を無視したモデルを作成して、応力解析を実施した。解析の結果、当該壁の剛性を無視したモデルでは、剛性を考慮した既存モデルと比べ、使用済燃料プールにおける鉄筋ひずみ及び面外せん断力はほぼ同じ値となっており、大きな差異は生じなかった。このことから、当該壁の剛性の有無による影響は小さいものと考えられる。また、鉄筋のひずみは最大でも  $1220 \times 10^{-6}$ 、面外せん断力は最も余裕が少ない部位でも 800 (N/mm) であり、評価基準値である  $5000 \times 10^{-6}$  および 1160 (N/mm) に対して十分余裕があることから、仮に当該壁の剛性を無視した場合を仮定しても、十分な耐震安全性を有しているものと評価している。

(添付資料－3)

#### 5. まとめ

本報告書においては、局所的な膨らみが確認された外壁面の詳細点検、健全性評価を実施するとともに、これらの結果を踏まえ、原子炉建屋および使用済燃料プールの耐震安全性に及ぼす影響評価を実施した。結果として、耐震安全性に及ぼす影響は小さく、耐震安全性に問題がないことを確認した。

## 添付資料－ 1

### 局所的な膨らみが確認された外壁面の詳細点検結果および健全性評価結果に関する詳細

#### 1. はじめに

平成 24 年 5 月 17 日から同月 25 日までに実施した福島第一原子力発電所第 4 号機原子炉建屋の健全性確認についての点検（参考資料－ 1）（以下、前回点検という）の結果、西側外壁面に局所的な膨らみが確認された。本点検においては膨らみが確認された周囲の外壁について、詳細な点検を行い、健全性を評価する。

#### (1) 点検対象範囲

今回の点検対象範囲を図-1.1 に示す。また、併せて「福島第一原子力発電所原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討に係る報告書（その 1）」（平成 23 年 5 月、東京電力株式会社）（以下、平成 23 年報告書という）において、解析評価上考慮していない壁も示す。

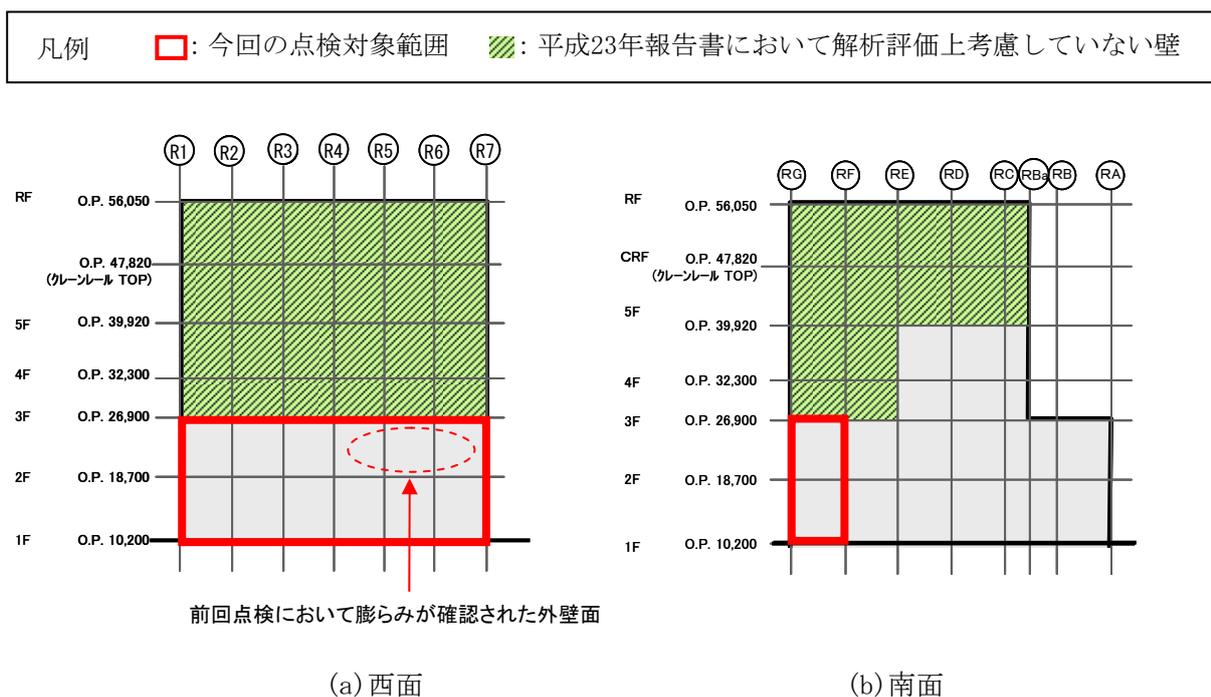


図-1.1 今回の点検対象範囲

## (2) 点検項目

外壁面の健全性を確認することを目的とし、点検項目は変形性状の確認、コンクリート強度の確認およびひび割れ等の目視点検とした。点検項目の概要を表-1.1に示す。

表-1.1 点検項目の概要

点検項目	点検箇所	概要
変形性状	建屋外部	光学機器を用いて、外壁表面の3次元座標を計測する
コンクリート強度	建屋内部	コンクリート表面を露出させ、JIS A 1155（コンクリートの反発度の測定方法）に準じて計測した反発度から、コンクリートの圧縮強度を推定する
目視点検	建屋外部	高所作業車にて近接し、目視点検や打音試験を実施し、ひび割れや剥離・剥落等の変状の有無を確認する
	建屋内部	目視点検や打音試験を実施し、コンクリートのひび割れや剥離・剥落等の変状の有無を確認する

## (3) 点検期間

平成 24 年 6 月 6 日～平成 24 年 6 月 21 日

## (4) 点検実施体制

点検は点検責任者および点検実施者により実施した。点検責任者は鉄筋コンクリート構造および鉄骨構造に関する十分な知識と経験を持つ者で、構造設計一級建築士と技術士の資格を有し、原子力施設の建築物の設計および施工に関する知識と経験を有している者が担当した。

## 2. 変形性状の確認結果

### (1) 点検箇所

前回点検において膨らみが確認された周囲の外壁面の計測を実施した。外壁面には図-2.1 に示す計測のターゲット（以下、レフシートという）を、塗装の浮きやひび割れ等がないことを確認した後、貼り付けた。外壁面の計測点を図-2.2 に示す。

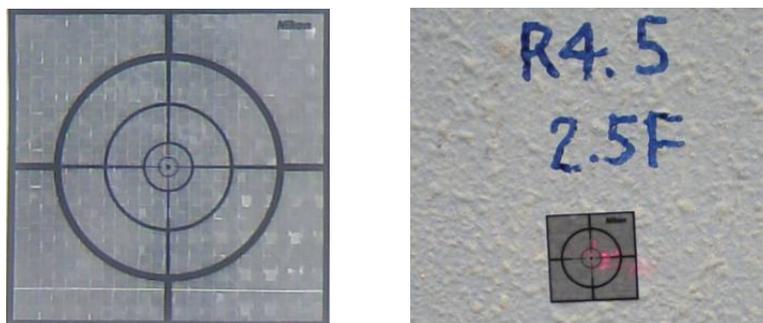


図-2.1 レフシートおよび貼り付け状況

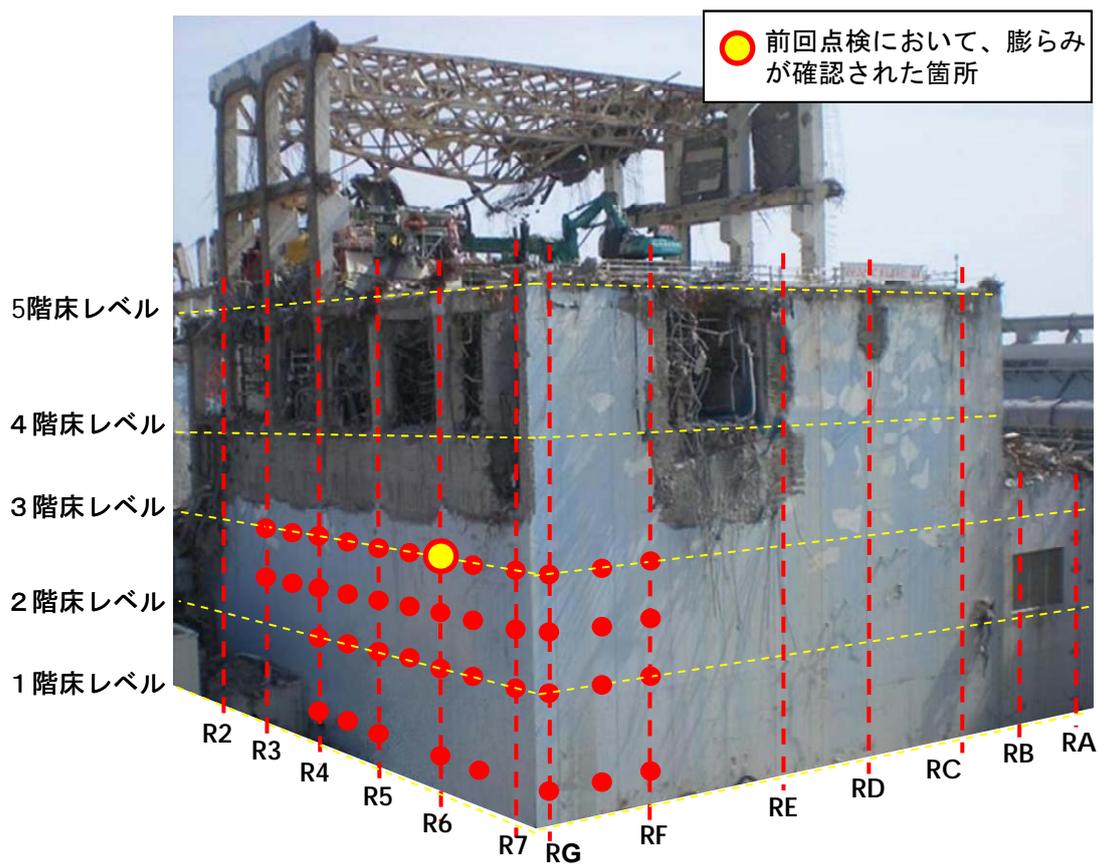


図-2.2 外壁面の計測点

## (2) 点検方法

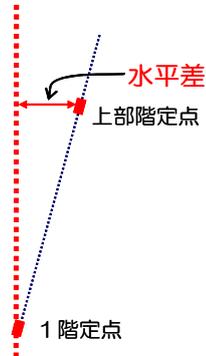
外壁面の変形性状の計測は、光学機器（トータルステーション）を用いて実施し、外壁面に設定した計測点の3次元座標を計測した。図-2.3 に計測状況を示す。



図-2.3 計測状況

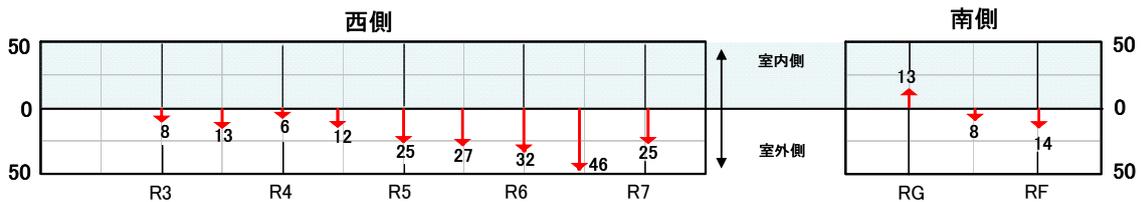
(3) 点検結果

計測結果を図-2.4 に示す。測定値から図-2.4 (a) に示す水平差を算出し、変形性状の確認を行った。一部に周辺外壁面と比較して局所的な膨らみが確認されたものの、膨らみが最大となった箇所の層間変形角は 1/256 であり、建築基準法で定められている 1/200 以内となった。

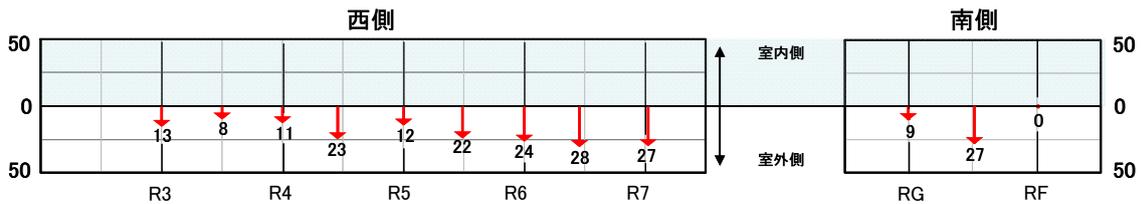


(a) 水平差の定義\*1

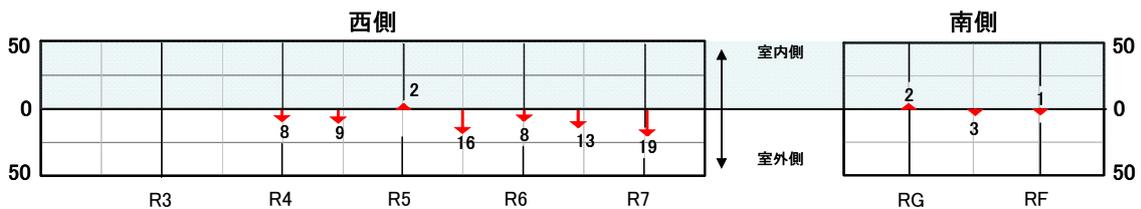
\* 1：障害物により計測のできなかつた1階西面R3通り、R3通りとR4通りの中間、R5通りとR6通りの中間、R7通りのデータについては、計測できたデータを基に算出した線形近似の式を用いて補間を行った。



(b) 3階における1階との水平差



(c) 3階と2階の間における1階との水平差



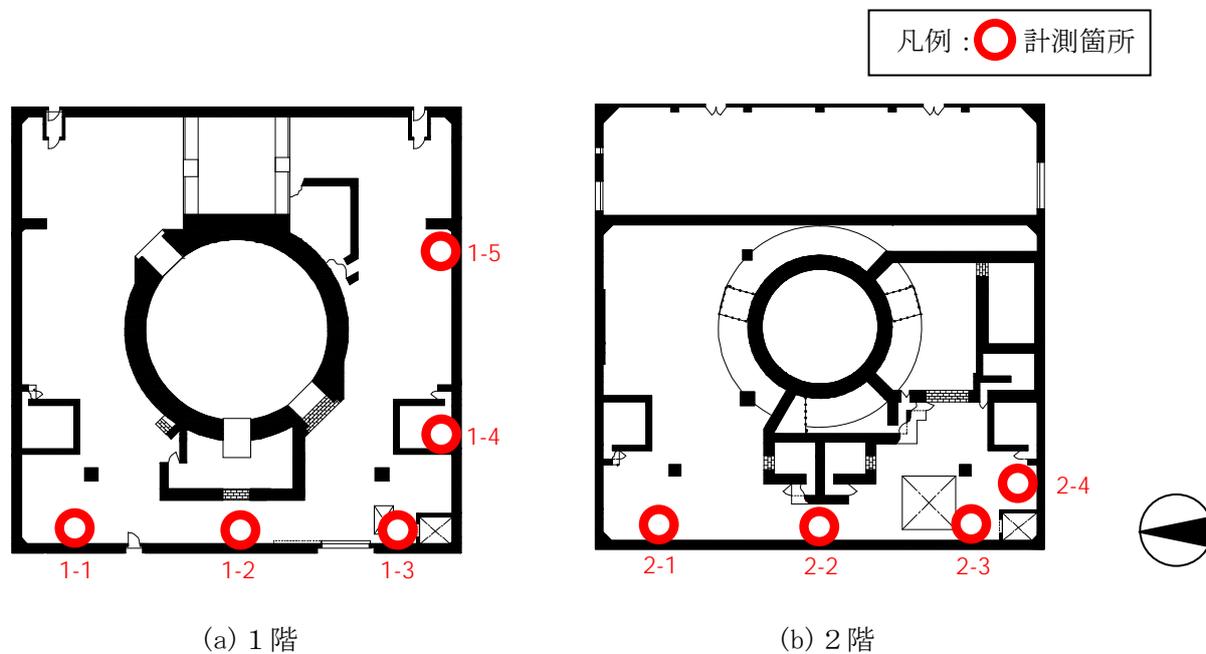
(d) 2階における1階との水平差

図-2.4 水平差に関する検討 (単位：mm、1目盛=25mm)

### 3. コンクリート強度の確認結果

#### (1) 点検箇所

局部的な膨らみの影響を確認することを目的に、図-3.1 に示す位置にてコンクリート強度の確認を実施した。



(c) 点検箇所 (No1-2)

図-3.1 コンクリート強度の確認箇所

## (2) 点検方法

コンクリート強度を確認するまでの作業内容を表-3.1に、測定状況を図-3.2に示す。

表-3.1 点検方法

測定前準備	点検箇所の選定	<ul style="list-style-type: none"><li>・ がれきや放射線量の状況を確認し点検箇所を選定する</li><li>・ 図面を確認し、埋設物が無いことを確認する</li><li>・ コンクリートに剥離がないことを確認</li></ul>
	塗膜の除去	<ul style="list-style-type: none"><li>・ グライNDERなどで測定面の塗膜を除去する</li><li>・ 砥石で測定面を平滑に仕上げる</li></ul>
	測定箇所の墨出し	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 測定は、縦横 3cm 間隔で 9 ポイントを 1 セットとし、測定箇所 1 箇所につき 3 セットとする</li><li>・ 形板を使用しポイントをチョークでマーキングする</li></ul>
測定	測定方法	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 使用機器はシュミットハンマー (NR 型) とする</li><li>・ JIS-A1155 「コンクリートの反発度の測定方法」 による</li></ul>
	現地作業	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 打撃方向は測定面に対して垂直に打撃する</li><li>・ 1 セット 9 ポイントの反発度が、平均値±20%の範囲内になることを確認する</li><li>・ 平均値±20%を逸脱する値があった場合は、その分を充足する</li></ul>
強度の確認	強度の算定	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 1 セット 9 ポイントの反発度の平均値を算定</li><li>・ 3 セットの反発度の平均値を、当該箇所の反発度とする</li><li>・ 反発度からコンクリート圧縮強度を推定する</li></ul>



図-3.2 測定状況

(3) 点検結果

コンクリート強度を確認した結果を表-3.2 に示す。設計基準強度は 22.1N/mm<sup>2</sup> であり、全ての測定箇所において設計基準強度を上回っていることを確認した。

表-3.2 コンクリート強度の確認結果

No	階	場所		コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1-1	1	西側	北側	39.1
1-2			中央	41.9
1-3			南側	39.8
1-4		南面	西側	37.7
1-5			東側	39.8
2-1	2	西側	北側	36.9
2-2			中央	35.5
2-3			南側	39.1
2-4		南側	西側	35.5

#### 4. 目視点検結果

##### (1) 点検箇所

局部的な膨らみの影響を確認することを目的に、図-4.1 に示す箇所について目視点検を実施した。

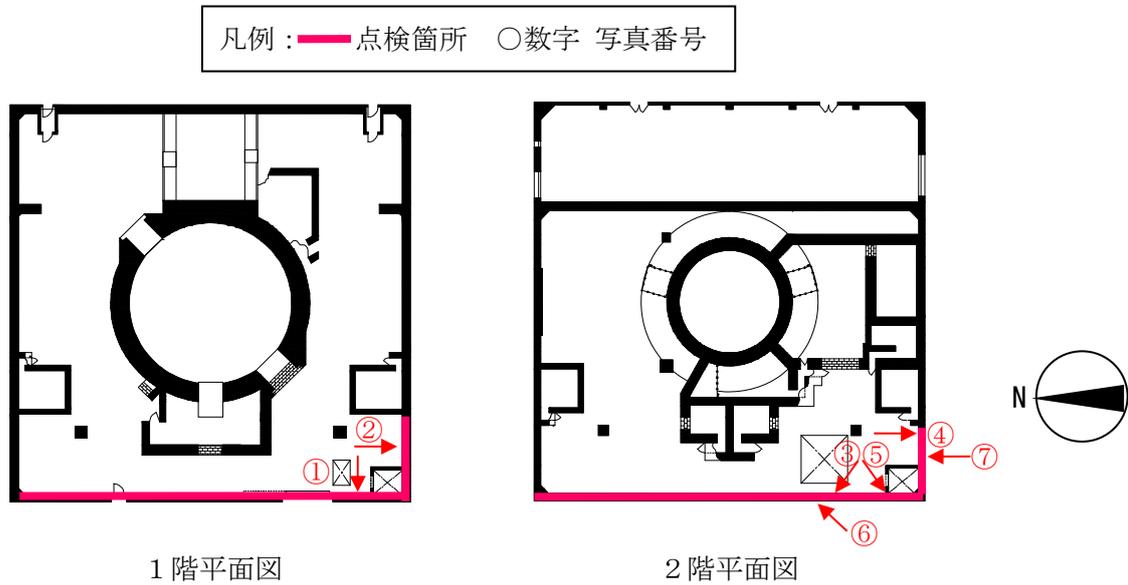


図-4.1 点検箇所

##### (2) 点検結果

図-4.2、図-4.3、図-4.4 に目視点検結果を示す。点検の結果、壁面には幅 1mm 以上のひび割れおよび剥離、剥落は確認されず、健全な状態であることを確認した。



図-4.2 外壁屋内側の目視点検結果（1階）



③ 2階 西面 1



④ 2階 南面



⑤ 2階 西面 2

図-4.3 外壁屋内側の目視点検結果 (2階)



⑥ 2階 西面



⑦ 2階 南面

図-4.4 外壁屋外側の目視点検結果

## 5. 健全性評価結果

平成 24 年 6 月 6 日から同月 21 日にかけて、局所的な膨らみが確認された外壁面の詳細点検を実施した。西側および南側外壁面に周辺外壁面と比較して局所的な膨らみが確認されたものの、コンクリート強度の確認および目視点検の結果、構造強度に影響を及ぼすような損傷は確認されなかった。膨らみによる当該外壁面の層間変形角は構造体が健全であるといわれる 1/200 を下回る結果となっており、また顕著なひび割れが確認されていないことから、当該外壁における剛性の低下は少ないと考えられる。

以 上

# 福島第一原子力発電所4号機原子炉建屋の 健全性確認のための点検結果について

2012年5月25日  
東京電力株式会社



## 点検概要

### ■点検期間

平成24年5月17日～平成24年5月23日

### ■点検内容

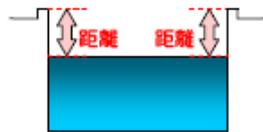
- 点検内容① 建物の傾きの確認（水位測定）
- 点検内容② 建物の傾きの確認（外壁面の測定）
- 点検内容③ 目視点検
- 点検内容④ コンクリートの強度確認



## ① 建物の傾きの確認（水位測定）

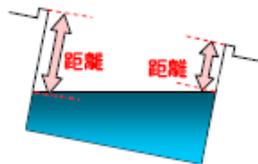
▶水面は常に水平であることを利用して、5階床面と原子炉ウェルおよび使用済燃料プールの水面の距離を計測し、建屋の傾きを確認した。  
 （既に、H24.2.7とH24.4.12の2回実施し、建屋が傾いていないことを確認済み）

### 1) 建屋が傾いていない場合

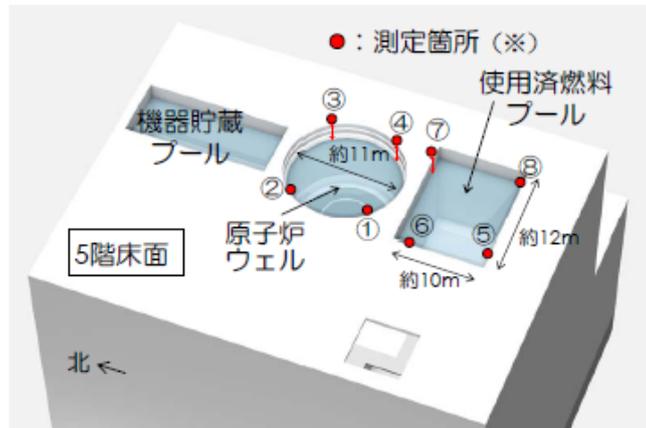


距離がほぼ同じ

### 2) 建屋が傾いている場合



距離が異なる

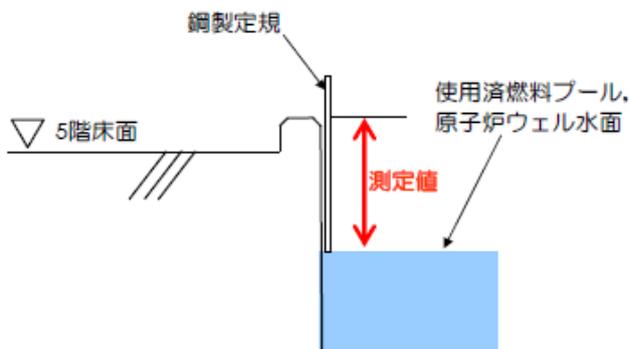


測定箇所（5階床面）

※ 測定箇所は、瓦礫撤去工事、燃料取り出し用カパー工事の進捗により適宜設定する。

## ① 建物の傾きの確認（水位測定）

▶今回の測定においても、四隅の測定値がほぼ同じであることから、5階床面と使用済燃料プール および原子炉ウェルの水面が平行であることを確認した。  
 （既に、H24.2.7とH24.4.12の2回実施し、建屋が傾いていないことを確認済み）



測定方法

※測定は、目視により行っているため、若干の誤差が考えられます。

測定結果

単位 [mm]

原子炉ウェル	測定日		
	H24.2.7	H24.4.12	H24.5.18
①	462	476	492
②	463	475	492
③	462	475	492
④	464	475	492

使用済燃料プール	測定日		
	H24.2.7	H24.4.12	H24.5.18
⑤	—	468	461
⑥	—	468	461
⑦	—	468	461
⑧	—	468	461

※H24.2.7は、原子炉ウェルのみを計測しました。  
 ※水位は冷却設備の運転状況により日によって変化します。

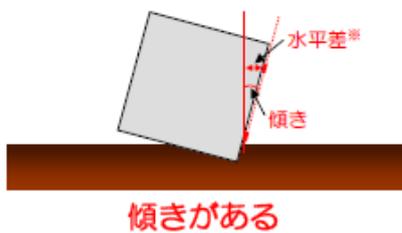
## ② 建物の傾きの確認（外壁面の測定）

▶外壁面の上下に定点を設置し、光学機器により計測することで、外壁面の垂直度を確認した。

### 1) 建屋が傾いていない場合



### 2) 建屋が傾いている場合



● 測定箇所



測定箇所

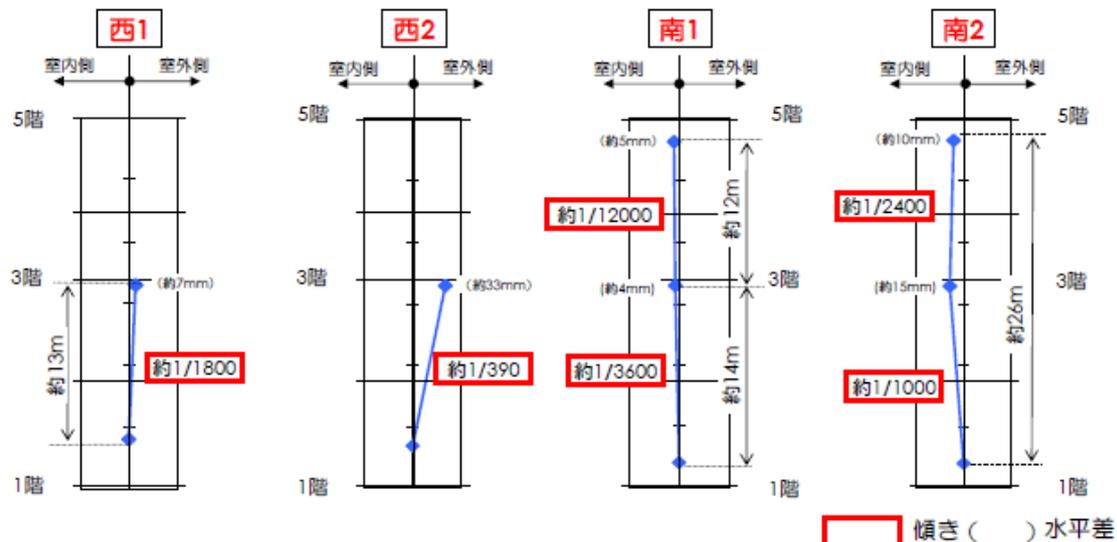
※測定点は、使用済燃料プールの近傍にある点（南1、南2）と、西面の中央（西1）および、近傍の床に吹き抜けがあり、爆発の影響が大きいと考えられる箇所（西2）とした。

※水平差：1階定点と上部階定点との水平距離

## ② 建物の傾きの確認（外壁面の測定）

▶外壁面の傾きは、全ての定点において、建築基準法の制限値以内（※）であることから、建物全体としては傾いておらず、構造安全性は確保できている。

※建築基準法における許容応力度計算において、傾きは1/200以内であることが定められている。



### 外壁面の測定結果

・上記グラフは縦横の縮尺が異なり、横方向が約80倍強調されている。

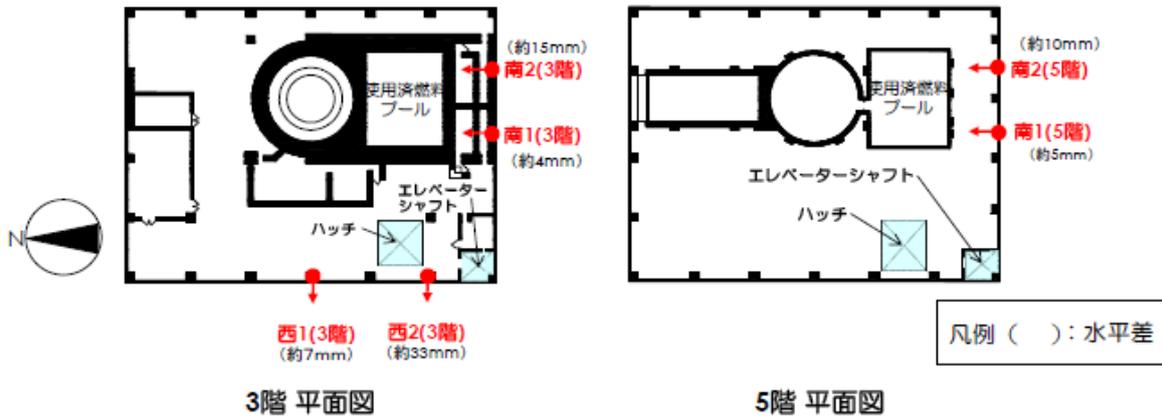
・一般に鉄筋コンクリート構造物には施工誤差が生じ、JASS5N（日本建築学会）では、その許容値は±20mmとしている。

## ② 建物の傾きの確認（外壁面の測定）

➤西2定点は近傍にハッチやエレベーターシャフトの吹き抜けがあり、他の定点と比べて拘束力が弱いため、局所的に膨らんだと思われる。

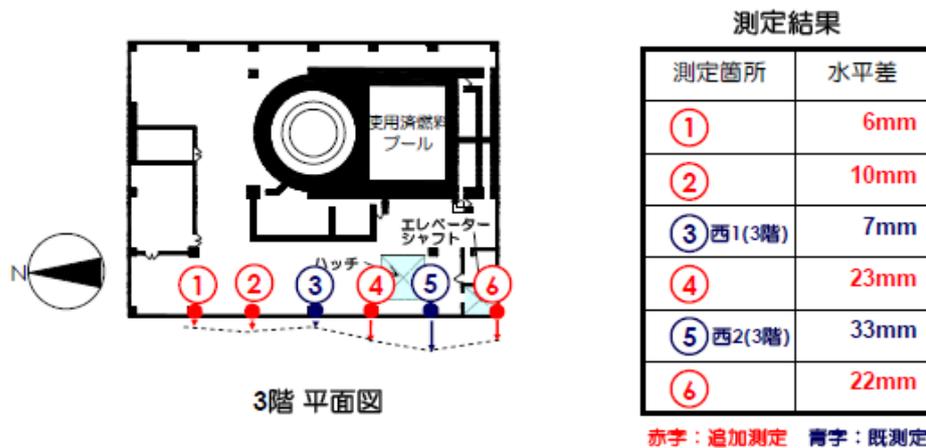
⇒仮に当該部分の壁の存在を無視したとしても、地震力の負担割合が全体の10%と小さく、かつ、使用済燃料プール躯体から離れているため、建屋全体及び使用済燃料プール躯体の健全性に与える影響は少ないと考えられる。

なお、今回の局所的な変形の影響度合いを定量的に評価するため、今後解析を行う。



## ② 建物の傾きの確認（外壁面の測定）

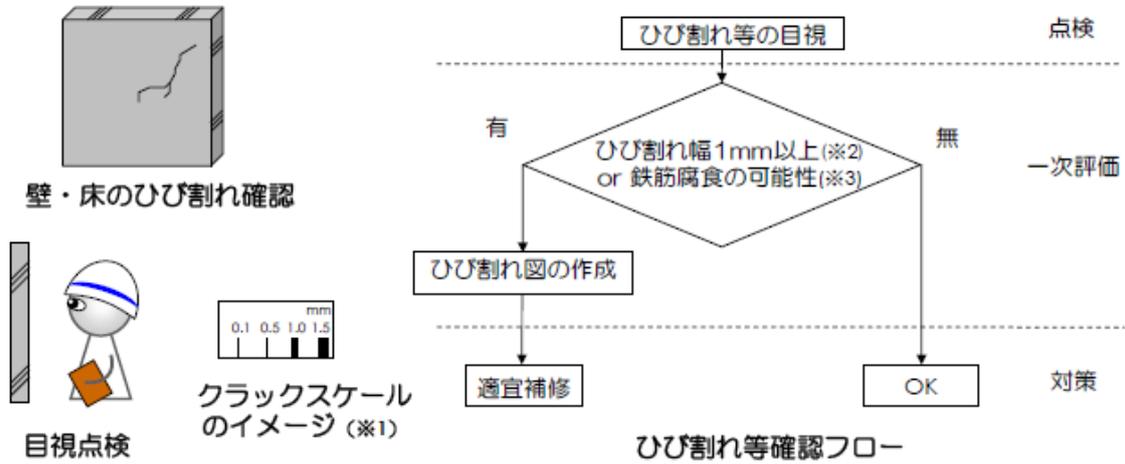
➤外壁面の測定において、局所的な変形が確認された西面について、変形の傾向を確認するため、近傍の測定を実施した。【5月25日実施】



⇒西面外壁の膨らみは局所的であることを確認した。

### ③ 目視点検

▶使用済燃料プール躯体のコンクリート床・壁のひび割れ等を目視により確認した。

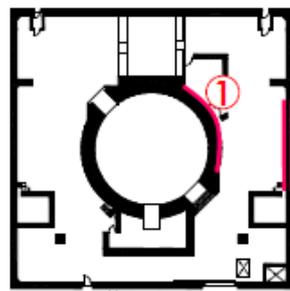


※1 クラックスケール：ひび割れの幅を計測するもの。スケールを対象箇所に当て、スケール上の線の幅を読み取る。

※2 ひび割れ幅1mm：耐久性の観点で検討が必要になるひび割れ幅  
日本建築学会「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説」  
※3 点検対象部位において、耐久性に影響のある鉄筋の腐食が確認された場合。

### ③ 目視点検

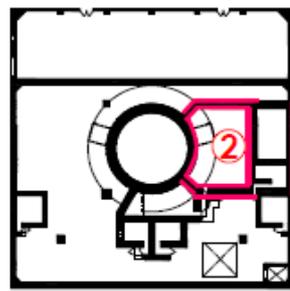
▶目視点検の結果、1mm以上のひび割れや鉄筋腐食の可能性のあるひび割れは確認されなかった。



①  
1階



使用済燃料プールを支持する壁



②  
2階



使用済燃料プールを支持する壁

凡例  
— 目視点検対象箇所

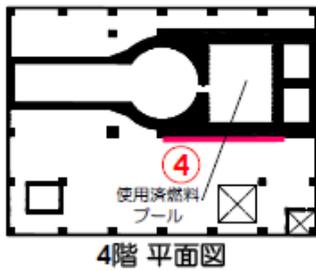
### ③ 目視点検



③  
3階



使用済燃料プール壁



凡例  
— 目視点検対象箇所

④  
4階



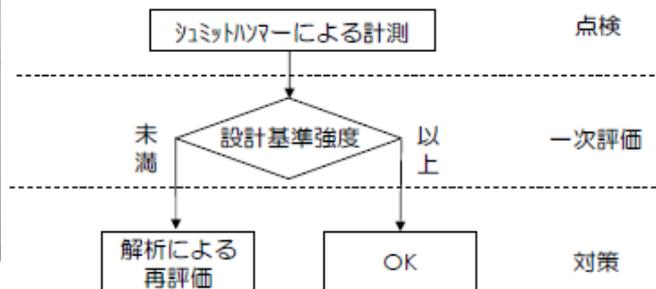
使用済燃料プール壁

### ④ コンクリートの強度確認

▶非破壊検査（シュミットハンマー※）により、使用済燃料プール躯体のコンクリートの強度を測定し、設計基準強度以上であることを確認する。



非破壊検査  
(シュミットハンマー)

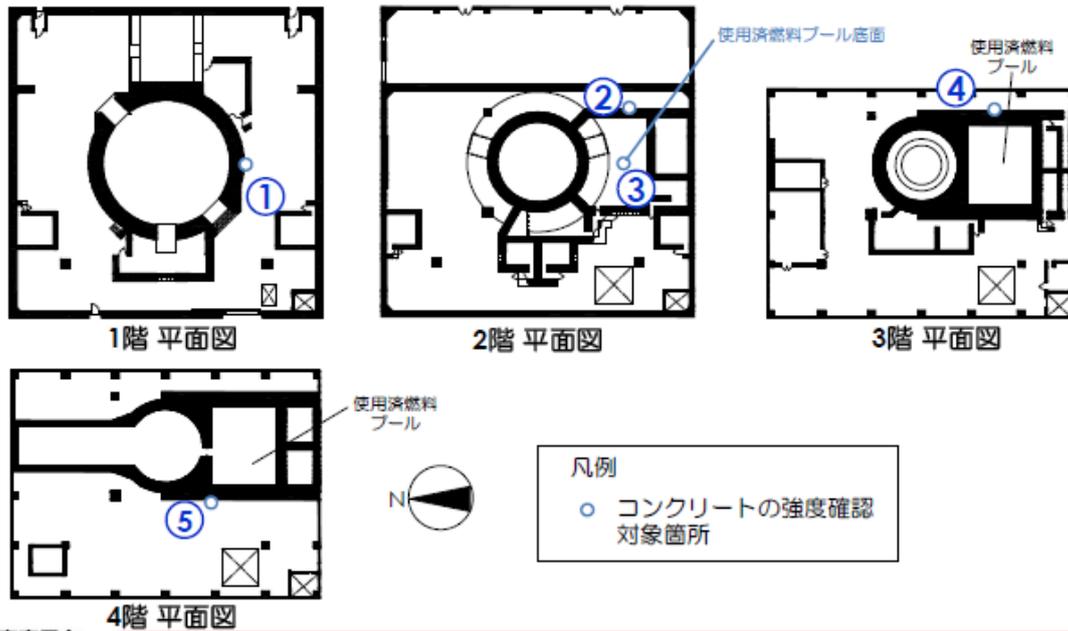


非破壊検査のフロー

※ シュミットハンマー（法）：コンクリートに打撃を与え、返ってきた衝撃により強度を推定する手法。構造物に損傷を与えずに検査が可能な非破壊検査手法である。

#### ④ コンクリートの強度確認 対象箇所

▶コンクリートの強度確認対象箇所を下図に示す。



#### ④ コンクリートの強度確認

▶全ての箇所で設計基準強度（22.1N/mm<sup>2</sup>）を上回っており、十分な構造強度があることが確認できた。

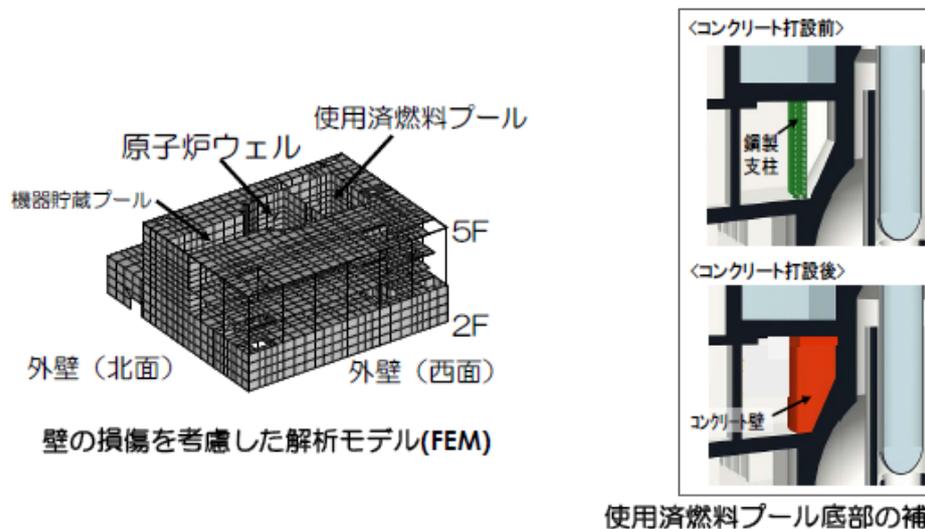
コンクリートの強度確認結果

No.	計測箇所	コンクリート強度※ (N/mm <sup>2</sup> )
①	1階 原子炉シェル壁 (使用済燃料プールを支持する壁)	38.4
②	2階 壁 (使用済燃料プールを支持する壁)	36.3
③	2階 使用済燃料プール床(底面)	33.1
④	3階 使用済燃料プール壁	39.1
⑤	4階 使用済燃料プール壁	35.6

※シュミットハンマーにより、コンクリート強度を推定。

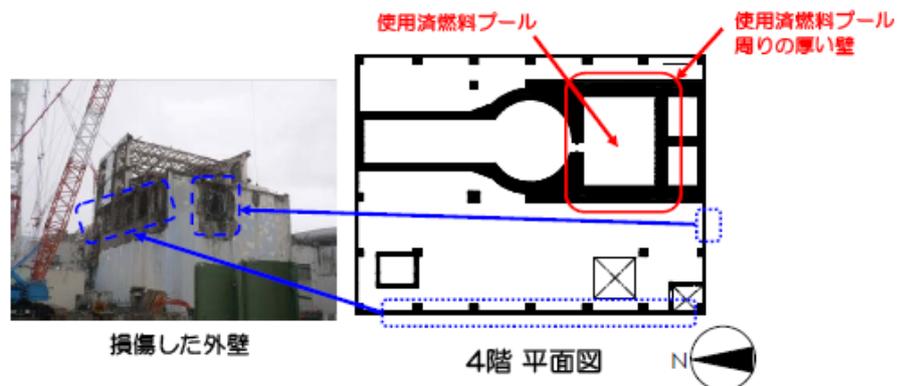
## まとめ1

- ▶これまでに4号機使用済燃料プールの健全性について、爆発等による損傷を考慮した状態で解析を実施し、東北地方太平洋沖地震と同程度の地震（震度6強）が発生しても使用済み燃料プールが安全であることを確認している。
- ▶さらに、使用済燃料プール底部を補強し、耐震余裕度を20%以上向上させている。



## まとめ2

- ▶今回点検の結果、外壁の上層部の一部は損傷しているものの、重要な使用済燃料プールの躯体は壁厚が140cm～185cmと厚くもあり、ひび割れや傾きも無く、また十分なコンクリート強度も確保されており、安全に使用済燃料を貯蔵できる状態にある。
- ▶また、建物全体の傾きに関しては、写真の角度等により傾いている様に見えるものがあるが、今回の計測から建物は傾いていないことを確認した。

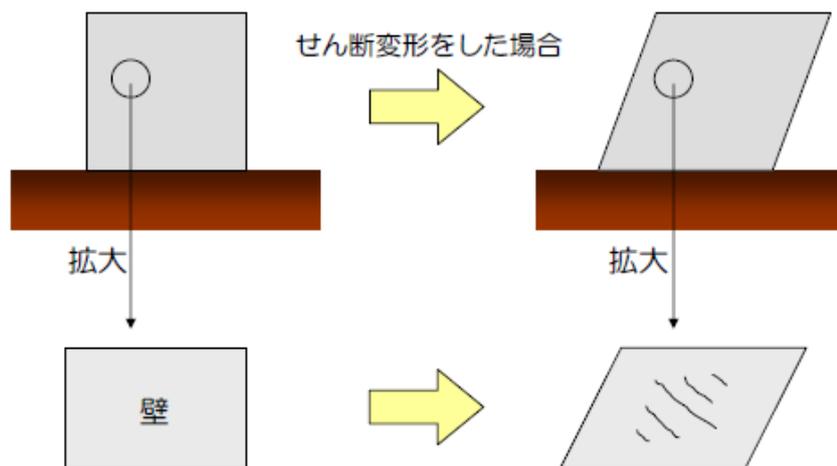


⇒今後の点検においては、経時的な変化を確認していく。

## 添付資料 せん断変形について

▶水位測定の結果において、使用済燃料プール水面と5階床面が平行であっても、下図に示すように、建物がせん断変形（平行四辺形の形に変形）している場合も考えられるが、以下の理由により、せん断変形が生じているとは考えられない。

- ・外壁面の測定により、外壁は傾いていないと考えられる。
- ・目視点検により、使用済燃料プールの壁等に顕著なせん断ひび割れは確認されなかった。



## 添付資料－２

### 原子炉建屋の耐震安全性評価結果に関する詳細 (質点系モデルによる解析)

#### 1. 解析評価方針

昨年、「福島第一原子力発電所の原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討に係る報告書（その１）（平成 23 年 5 月、東京電力株式会社）」（以下、平成 23 年報告書という）にて、水素爆発等による損傷に伴う原子炉建屋の構造への影響及び耐震安全性評価を行った。

本検討では、添付資料－１の点検結果に基づき、一部膨らみが確認された外壁の剛性を無視した場合を想定し、当該壁の剛性の有無が原子炉建屋の耐震安全性に及ぼす影響を時刻歴応答解析によって評価する。具体的には、平成 23 年報告書の質点系モデルをもとに、外壁の一部膨らみのある箇所の剛性の有無による原子炉建屋全体の基準地震動  $S_s$  における耐震安全性の評価を行う。なお、基準地震動  $S_s-3$  については、基準地震動  $S_s-1$  及び  $S_s-2$  の応答結果に比べて、過去の計算例から明らかに小さいことが分かっているため、平成 23 年報告書と同様に省略することとする。

地震応答解析モデルは、地盤との相互作用を考慮し、曲げおよびせん断剛性を考慮した質点系モデルとする。

原子炉建屋の構造への影響及び耐震安全性評価は、耐震安全上重要な設備への波及的影響防止の観点から、地震応答解析により得られた耐震壁のせん断ひずみと、鉄筋コンクリート造の耐震壁の終局限界に対応した評価基準値 ( $4.0 \times 10^{-3}$ ) との比較により行う。また、平成 23 年報告書の結果との比較を行う。

なお、鉄筋コンクリート造の耐震壁の終局限界に対しては、水平方向の地震力が支配的であり、鉛直方向の地震力の影響は少ないことから、地震応答解析は水平方向のみ実施する。

4号機原子炉建屋の地震応答解析の評価手順例を、図-1.1 に示す。

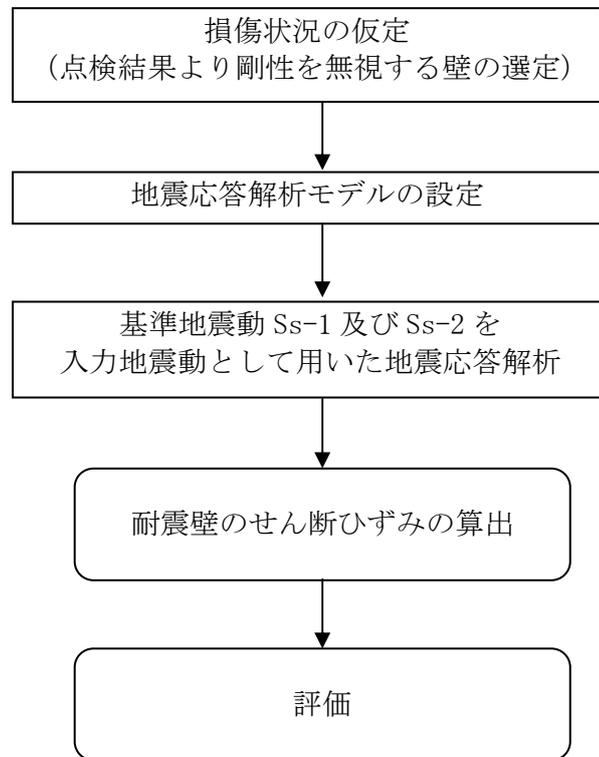


図-1.1 4号機原子炉建屋の地震応答解析の評価手順例

## 2. 損傷状況の仮定

平成 23 年報告書で作成した地震応答解析モデルをもとに、添付資料- 1 の点検結果による 2 階 (O. P. 18. 7m~O. P. 26. 9m) の外壁の一部膨らみのある箇所の剛性を無視し、新たな地震応答解析モデルを構築する。図-2. 1 に剛性を無視する外壁 (西側・南側立面図) を示す。

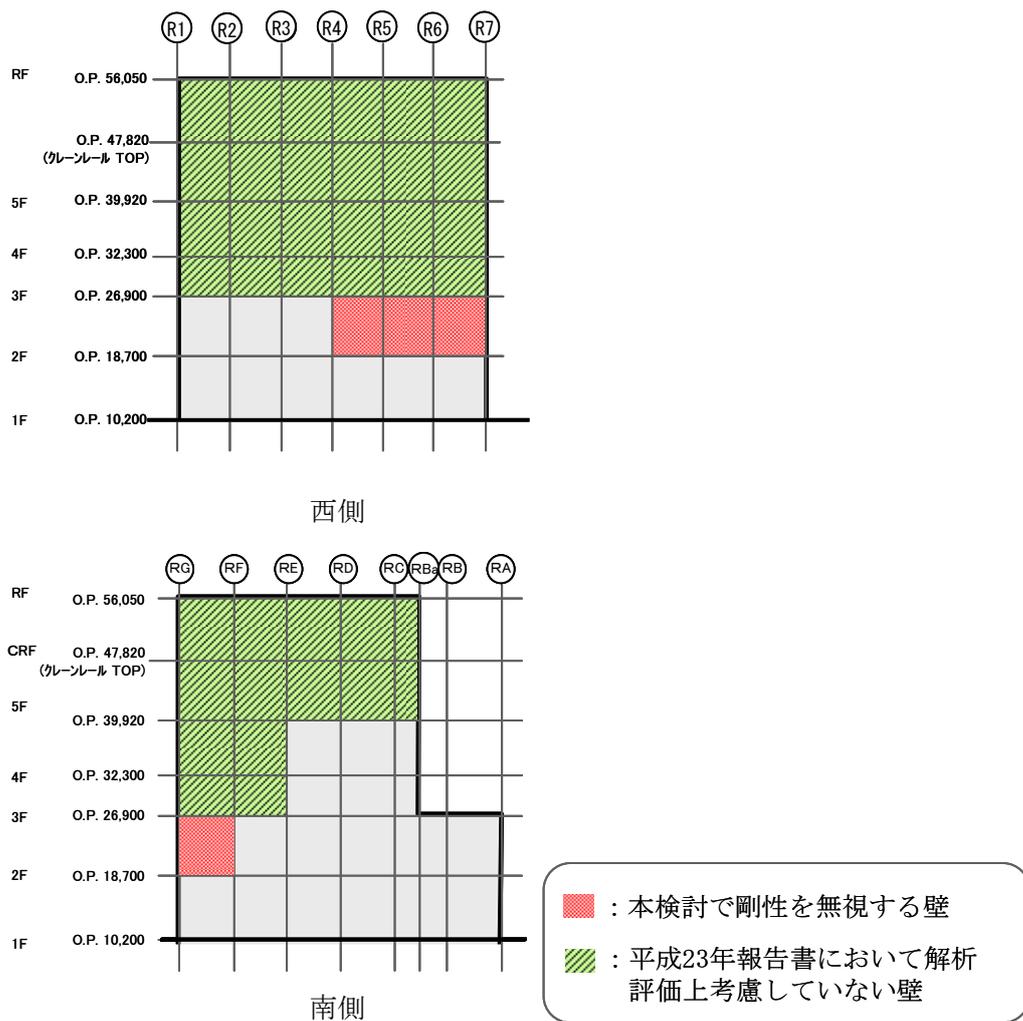


図-2. 1 本検討で剛性を無視する外壁 (西側・南側立面図)

### 3. 解析に用いる入力地震動

4号機原子炉建屋への入力地震動は、「福島第一原子力発電所 『発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針』の改訂に伴う耐震安全性評価結果 中間報告書」(原管発官19第603号 平成20年3月31日付け)にて作成した解放基盤表面レベルに想定する基準地震動  $S_s-1$  及び  $S_s-2$  を用いることとする。

地震応答解析に用いる入力地震動の概念図を図-3.1 に示す。モデルに入力する地震動は、一次元波動論に基づき、解放基盤表面レベルに想定する基準地震動  $S_s$  に対する地盤の応答として評価する。また、建屋基礎底面レベルにおけるせん断力を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮する。

このうち、解放基盤表面位置 (O.P. -196.0m) における基準地震動  $S_s-1$  及び  $S_s-2$  の加速度波形について、図-3.2 に示す。

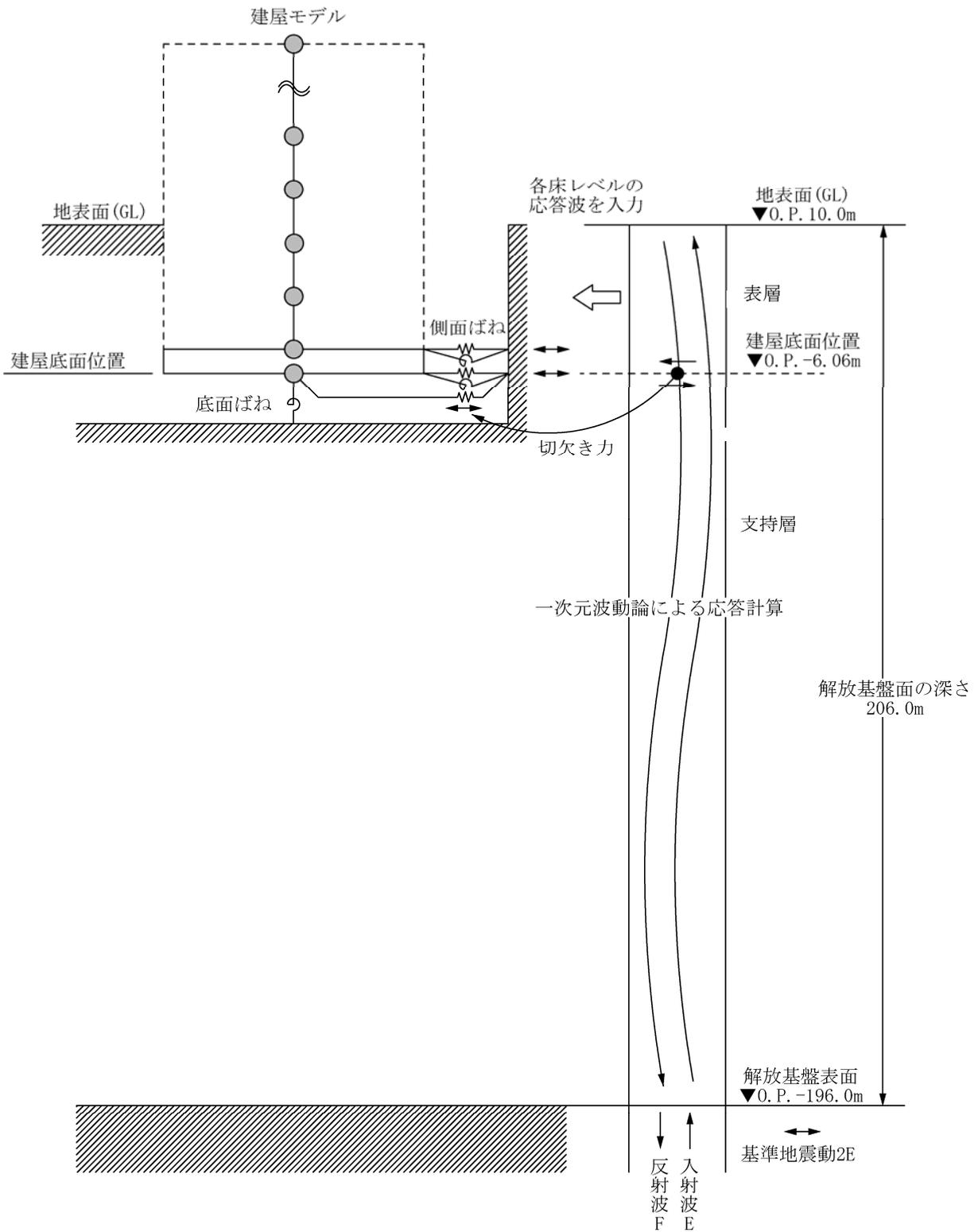


図-3.1 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図

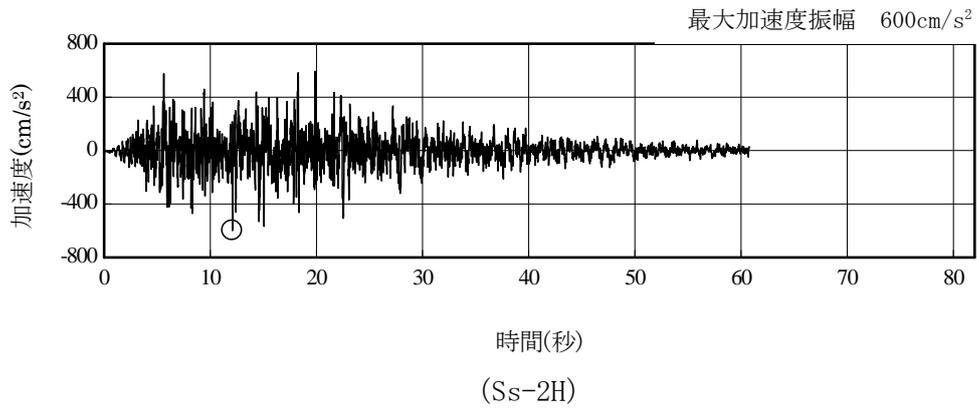
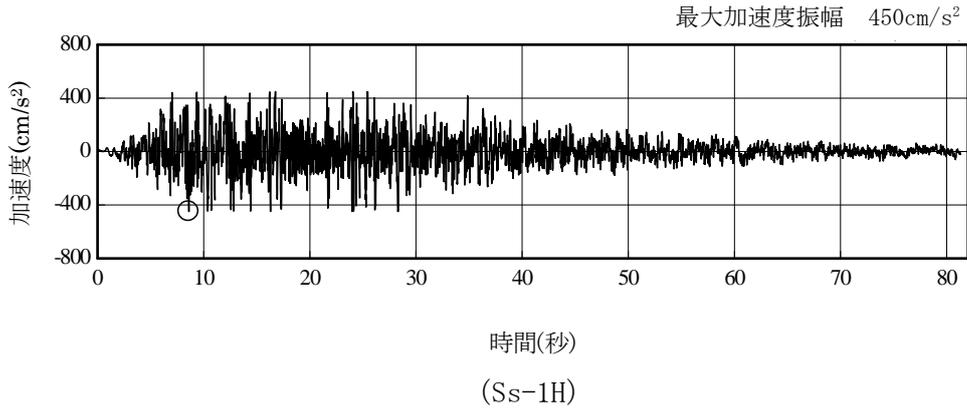


図-3.2 解放基盤表面位置における地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）

#### 4. 地震応答解析モデル

基準地震動  $S_s$  に対する原子炉建屋の地震応答解析は、「3. 解析に用いる入力地震動」で算定した入力地震動を用いた動的解析による。

本検討では、「2. 損傷状況の仮定」で記したように、平成 23 年報告書で作成した地震応答解析モデルをもとに、2 階（O. P. 18. 7m～O. P. 26. 9m）の外壁の一部膨らみのある箇所  
の剛性を無視した新たな地震応答解析モデルを構築する。

#### (1) 水平方向の地震応答解析モデル

水平方向の地震応答解析モデルは、図-4.1 および図-4.2 に示すように、建屋を曲げ変形とせん断変形をする質点系とし、地盤を等価なばねで評価した建屋—地盤連成系モデルとする。建屋—地盤連成系としての効果は地盤ばねおよび入力地震動によって評価される。解析に用いるコンクリートの物性値を表-4.1 に、建屋解析モデルの諸元を表-4.2 に示す。

地盤定数は、水平成層地盤と仮定し、地震時のせん断ひずみレベルを考慮して定めた。解析に用いた地盤定数を表-4.3 に示す。

水平方向の解析モデルにおいて、基礎底面地盤ばねについては、「JEAG 4601-1991」に示された手法を参考にして、成層補正を行ったのち、振動アドミッタンス理論に基づいて、スウェイおよびロッキングばね定数を近似的に評価する。また、埋め込み部分の建屋側面地盤ばねについては、建屋側面位置の地盤定数を用いて、水平および回転ばねを「JEAG 4601-1991」に示された手法を参考にして、Novak ばねに基づく近似法により評価する。

地盤ばねは振動数に依存した複素剛性として得られるが、図-4.3 に示すようにばね定数 ( $K_c$ ) として実部の静的な値を、また、減衰係数 ( $C_c$ ) として建屋—地盤連成系の1次固有振動数に対応する虚部の値と原点を結ぶ直線の傾きを採用することにより近似する。

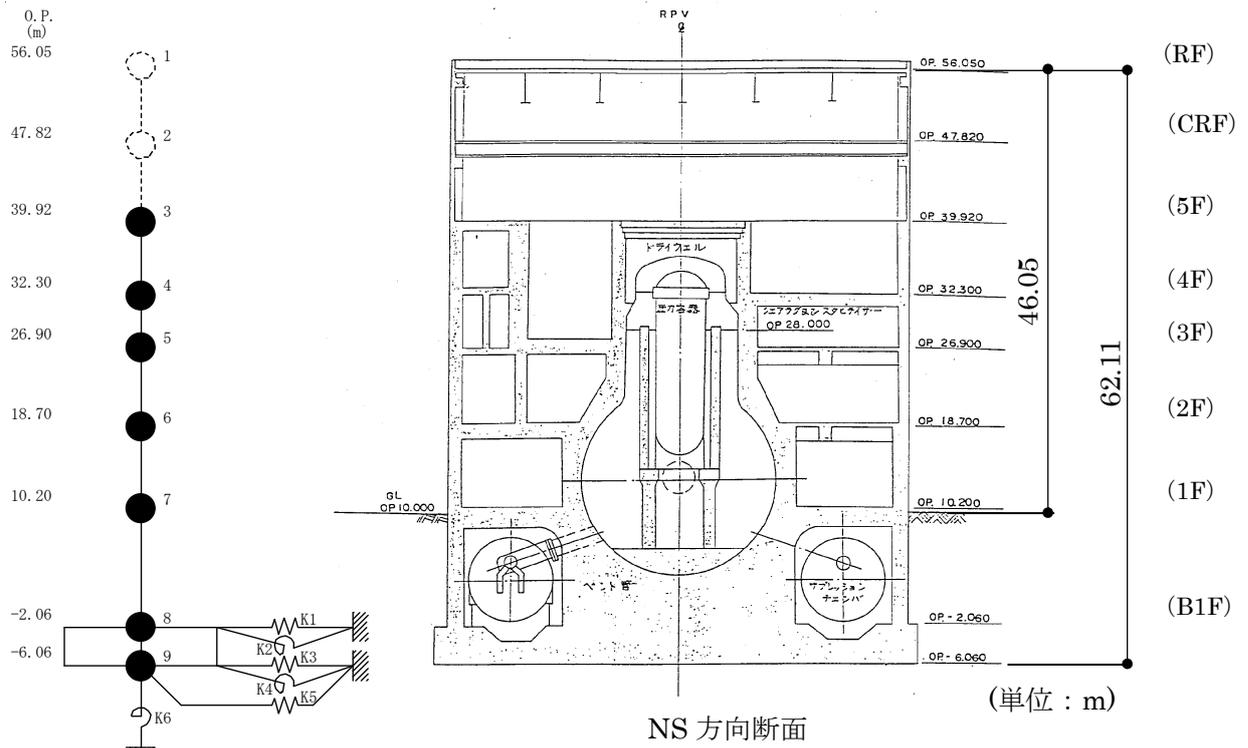


図-4.1 4号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS方向)

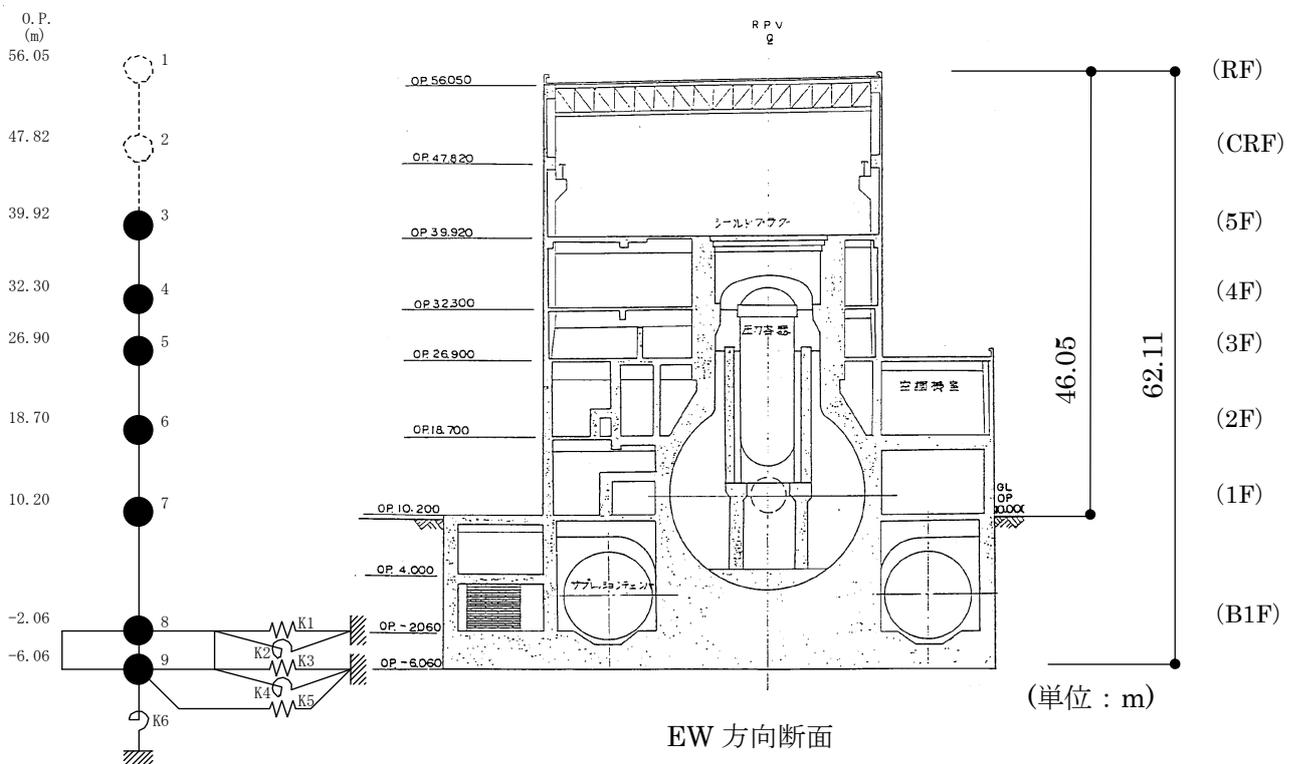


図-4.2 4号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (EW方向)

表-4.1 地震応答解析に用いる物性値

コンクリート	強度*1 F <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数*2 E (N/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数*2 G (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν	単位体積重量*3 γ (kN/m <sup>3</sup> )
	35.0	2.57×10 <sup>4</sup>	1.07×10 <sup>4</sup>	0.2	24
鉄筋	SD345相当 (SD35)				
鋼材	SS400相当 (SS41)				

\*1：強度は実状に近い強度（以下「実強度」という。）を採用した。実強度の設定は、過去の圧縮強度試験データを収集し試験データのばらつきを考慮し圧縮強度平均値を小さめにまとめた値とした。

\*2：実強度に基づく値を示す。

\*3：鉄筋コンクリートの値を示す。

表-4.2 建屋解析モデルの諸元

(NS 方向)

質点番号	質点重量 W (kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント I ( $\text{m}^4$ )
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	114,850	211.39	—	—
4	88,770	163.44	150.8	13,068
5	117,030	215.39	103.4	15,942
6	121,930	224.49	<b>202.7</b>	<b>32,567</b>
7	207,300	381.60	175.4	46,774
8	287,050	574.38	460.4	114,194
9	132,390	264.88	2,812.6	562,754
合計	1,069,320			

ヤング係数  $E_c$   $2.57 \times 10^7$  (kN/m<sup>2</sup>)  
 せん断弾性係数  $G$   $1.07 \times 10^7$  (kN/m<sup>2</sup>)  
 ポアソン比  $\nu$  0.20  
 減衰  $h$  5%  
 基礎形状 49.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)

(EW 方向)

質点番号	質点重量 W (kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント I ( $\text{m}^4$ )
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	114,850	118.55	—	—
4	88,770	91.66	90.4	6,491
5	117,030	215.39	105.8	6,388
6	121,930	224.49	<b>161.6</b>	<b>23,344</b>
7	207,300	569.22	166.4	46,303
8	287,050	828.96	424.5	136,323
9	132,390	346.27	2,812.6	772,237
合計	1,069,320			

ヤング係数  $E_c$   $2.57 \times 10^7$  (kN/m<sup>2</sup>)  
 せん断弾性係数  $G$   $1.07 \times 10^7$  (kN/m<sup>2</sup>)  
 ポアソン比  $\nu$  0.20  
 減衰  $h$  5%  
 基礎形状 49.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)

赤字部：平成23年報告書の諸元からの変更部

表-4.3 地盤定数

(Ss-1)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 $V_s$ (m/s)	単位体積 重量 $\gamma t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	ポアソン比 $\nu$	初期せん断 弾性係数 $G_0$ ( $\text{kN/m}^2$ )	剛性低下率 $G/G_0$	せん断弾性 係数 $G$ ( $\text{kN/m}^2$ )	剛性低下後 S波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数 $h$ (%)
10.0									
1.9	砂岩	380	17.8	0.473	262,000	0.85	223,000	351	3
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	341,000	0.78	266,000	398	3
-80.0		500	17.1	0.455	436,000		340,000	442	
-108.0		560	17.6	0.446	563,000		439,000	495	
-196.0		600	17.8	0.442	653,000		509,000	530	
-196.0	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

(Ss-2)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 $V_s$ (m/s)	単位体積 重量 $\gamma t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	ポアソン比 $\nu$	初期せん断 弾性係数 $G_0$ ( $\text{kN/m}^2$ )	剛性低下率 $G/G_0$	せん断弾性 係数 $G$ ( $\text{kN/m}^2$ )	剛性低下後 S波速度 $V_s$ (m/s)	減衰定数 $h$ (%)
10.0									
1.9	砂岩	380	17.8	0.473	262,000	0.85	223,000	351	3
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	341,000	0.81	276,000	405	3
-80.0		500	17.1	0.455	436,000		353,000	450	
-108.0		560	17.6	0.446	563,000		456,000	504	
-196.0		600	17.8	0.442	653,000		529,000	540	
-196.0	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

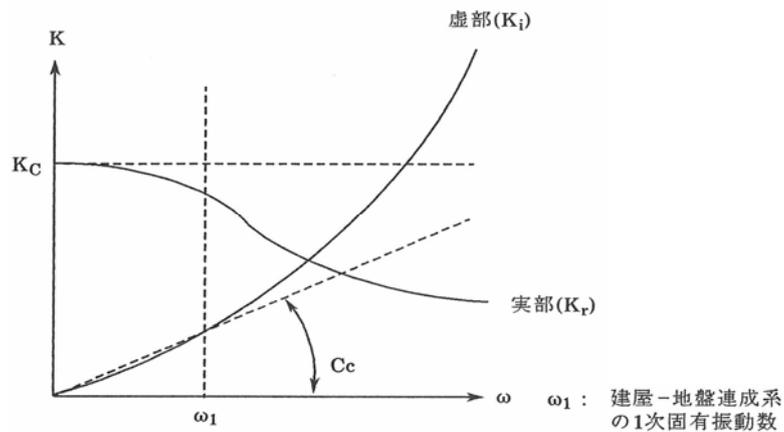


図-4.3 地盤ばねの近似

## 5. 地震応答解析結果

地震応答解析結果より求められた NS 方向、EW 方向の最大応答加速度を図-5.1 及び図-5.2 に示す。

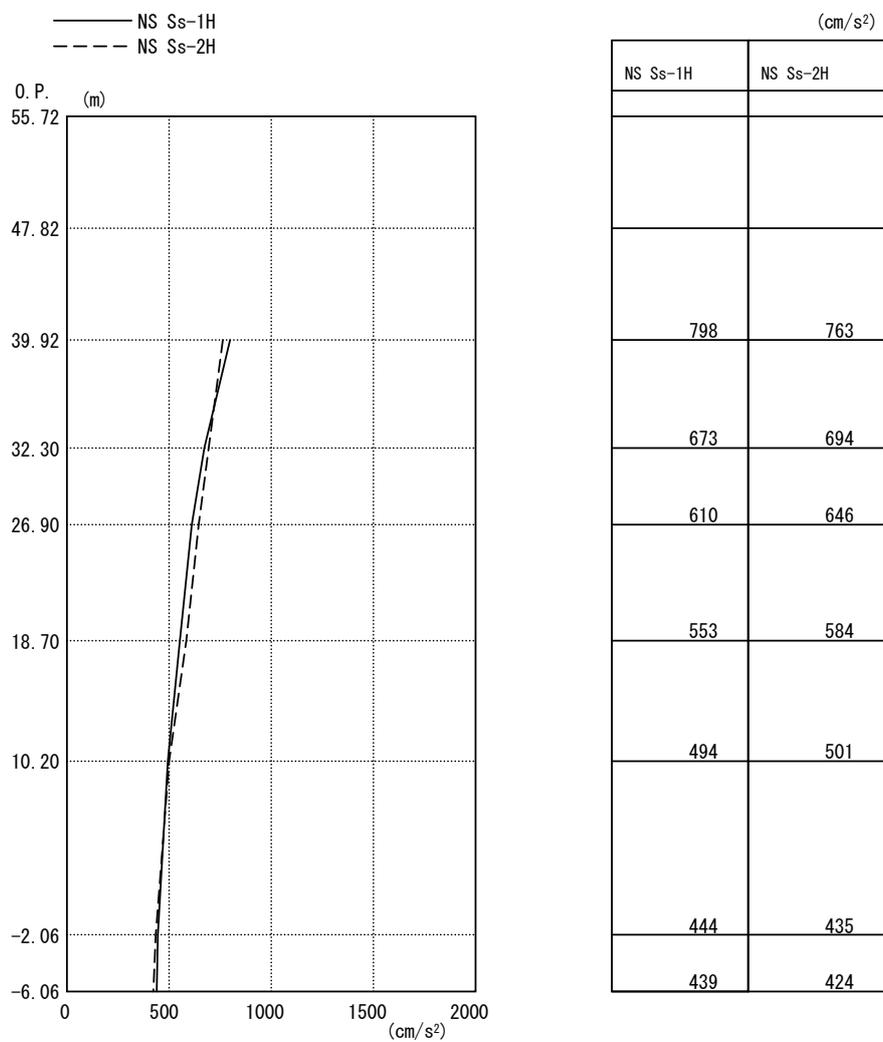


図-5.1 最大応答加速度 (NS 方向)

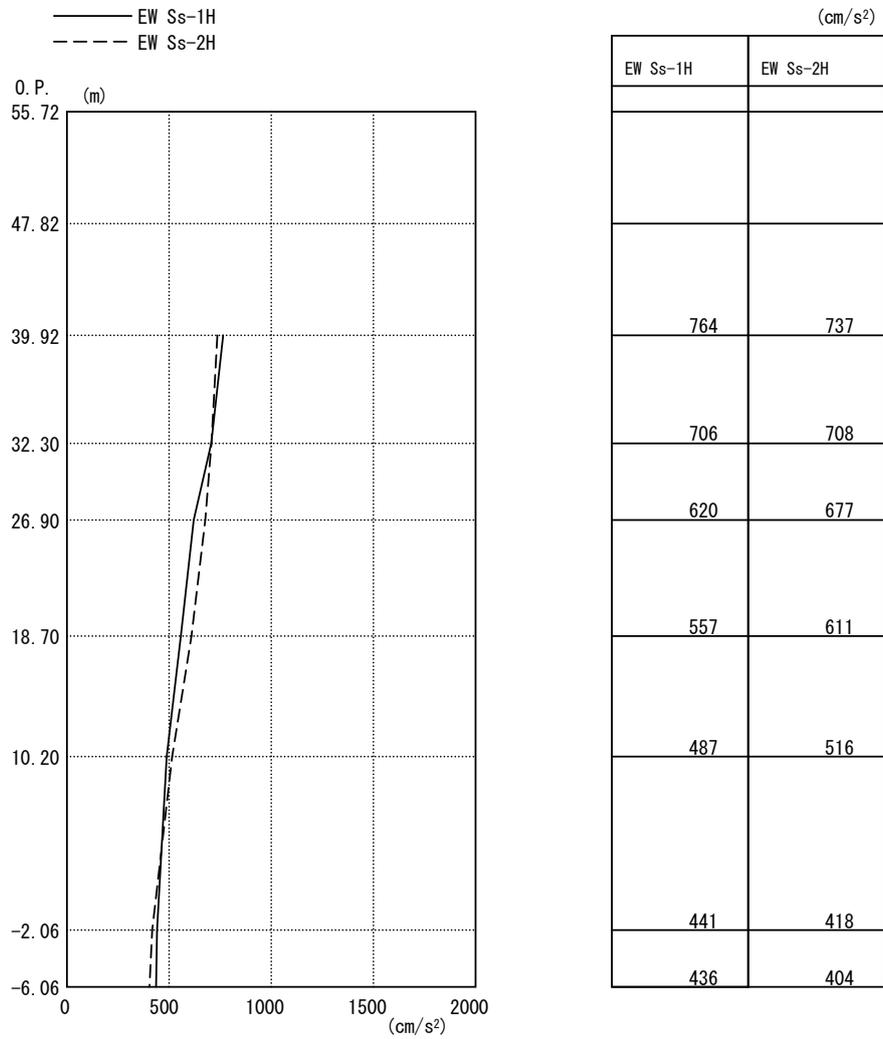


图-5.2 最大応答加速度 (EW 方向)

## 6. 耐震安全性評価結果

図-6.1～図-6.4に基準地震動 Ss-1 及び基準地震動 Ss-2 に対する最大応答値を耐震壁のせん断スケルトン曲線上に示す。せん断ひずみは、最大で  $0.17 \times 10^{-3}$  (Ss-2H, EW 方向, 1F) であり、評価基準値 ( $4.0 \times 10^{-3}$ ) に対して十分余裕がある。

本検討と平成 23 年報告書でのせん断ひずみの比較を表-6.1 及び表-6.2 に示す。いずれの箇所においても、平成 23 年報告書中のせん断ひずみはほぼ同じであり、大きな差異は生じなかった。

以上のことから、外壁の一部膨らみのある箇所の剛性を無視しても、原子炉建屋は耐震安全性を有しているものと評価した。

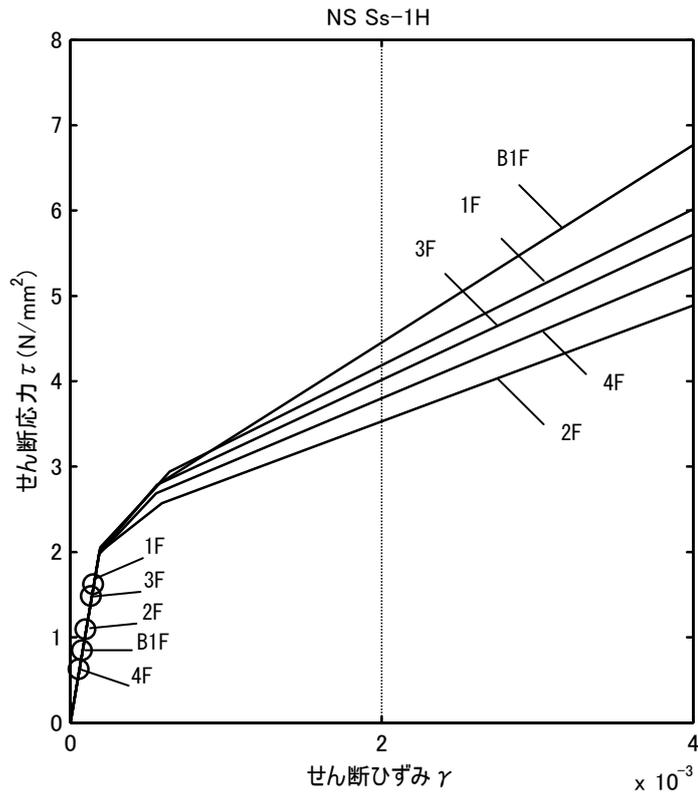


図-6.1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, NS 方向)

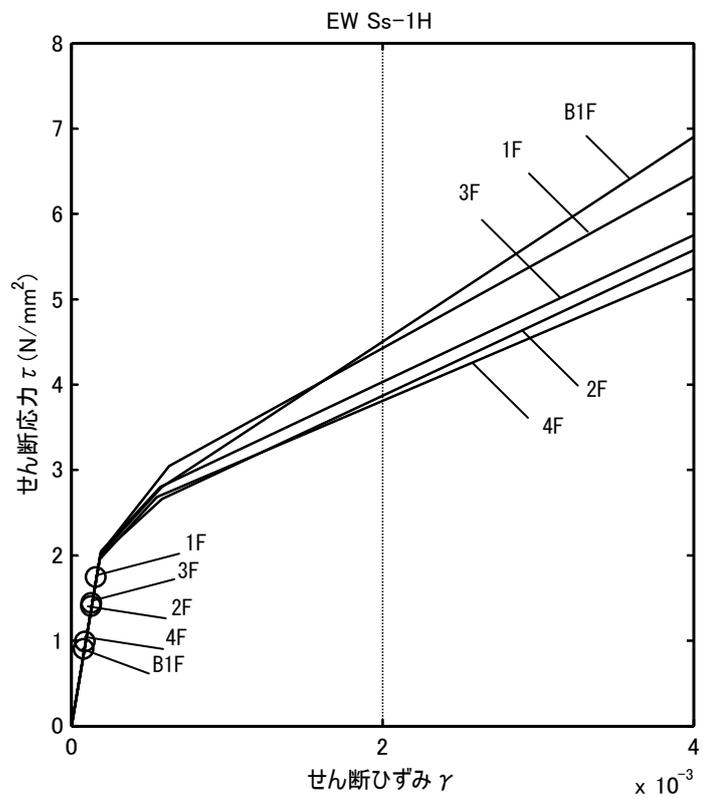


図-6.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, EW 方向)

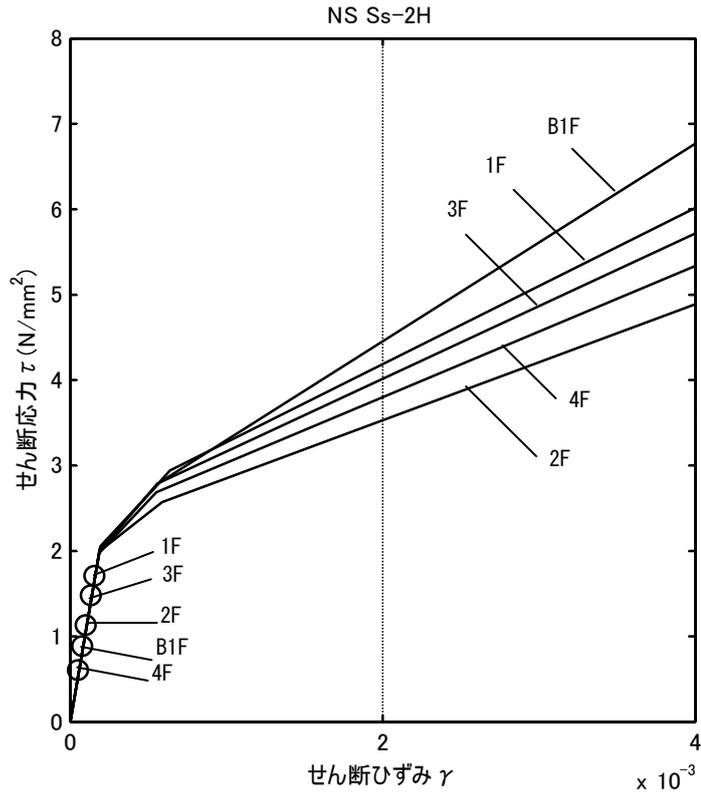


図-6.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, NS 方向)

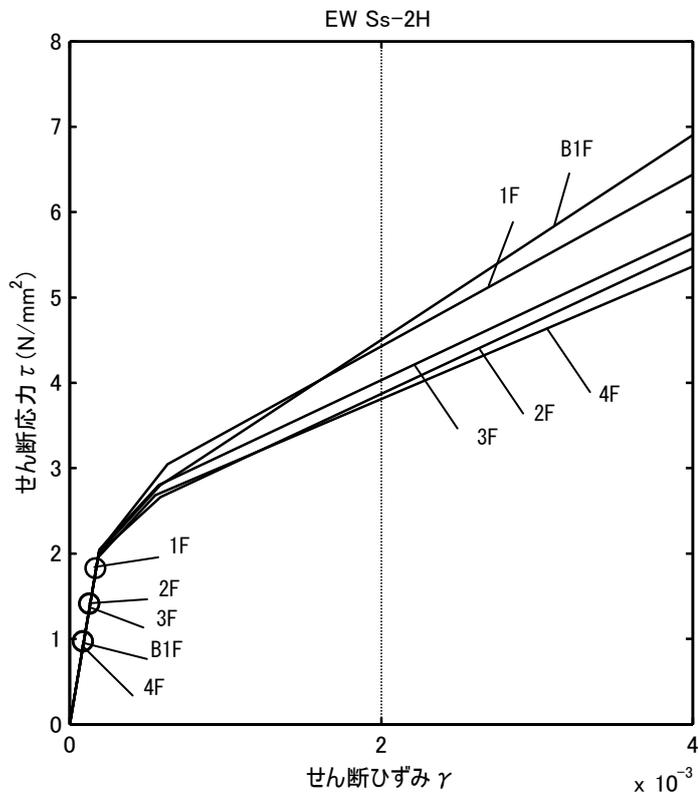


図-6.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, EW 方向)

表-6.1 せん断ひずみの比較 (Ss-1・Ss-2, NS 方向)

	O. P. (m)	せん断ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )			
		本検討		平成23年報告書	
		Ss-1	Ss-2	Ss-1	Ss-2
4F	39.92 ～ 32.30	0.06	0.06	0.06	0.06
3F	32.30 ～ 26.90	0.14	0.14	0.14	0.14
2F	26.90 ～ 18.70	0.10	0.10	0.09	0.09
1F	18.70 ～ 10.20	0.15	0.16	0.15	0.16
B1F	10.20 ～ -2.06	0.08	0.08	0.08	0.08

表-6.2 せん断ひずみの比較 (Ss-1・Ss-2, EW 方向)

	O. P. (m)	せん断ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )			
		本検討		平成23年報告書	
		Ss-1	Ss-2	Ss-1	Ss-2
4F	39.92 ～ 32.30	0.09	0.09	0.09	0.09
3F	32.30 ～ 26.90	0.13	0.13	0.13	0.13
2F	26.90 ～ 18.70	0.13	0.13	0.13	0.13
1F	18.70 ～ 10.20	0.16	0.17	0.16	0.17
B1F	10.20 ～ -2.06	0.08	0.09	0.08	0.09

### 添付資料－3 使用済燃料プールの耐震安全性評価結果に関する詳細 (3次元FEM解析)

#### 1. 解析評価方針

昨年、「福島第一原子力発電所の原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討に係る報告書（その1）（平成23年5月、東京電力株式会社）」（以下、平成23年報告書という）にて、4号機原子炉建屋については、5階より下部の4階や3階の外壁が複雑に損傷していることを踏まえ、2階より上部を詳細な3次元FEM解析モデルでモデル化し、応力解析により基準地震動  $S_s$  に対する原子炉建屋の耐震安全性を評価した。

本検討では、添付資料－1の点検結果に基づき、一部膨らみが確認された外壁の剛性を無視した場合を想定し、当該壁の剛性の有無が使用済み燃料プールの耐震安全性に及ぼす影響を3次元FEM解析によって評価する。具体的には、平成23年報告書の3次元FEM解析モデルをもとに、外壁の一部膨らみのある箇所の剛性の有無による使用済み燃料プールの耐震安全性評価を行う。

プールの平面図を図-1.1に、断面図を図-1.2に示す。

耐震安全性評価は、図-1.3のフローに示すように以下の手順で行う。

- ・ 使用済燃料プール周辺の2階の床（O.P. 18.7m）から5階の床（O.P. 39.92m）までの建屋部分（平成23年報告書のモデル）をもとに、添付資料－1の点検結果から外壁の一部膨らみのある箇所の剛性を無視した3次元FEM解析モデルを作成する。
- ・ 死荷重、プール水による静水圧、温度荷重、平成23年報告書で行った地震応答解析結果に基づく地震荷重、地震時動水圧などの荷重条件および荷重組合せの条件を設定する。
- ・ 応力解析として鉄筋コンクリート部材の塑性化を考慮した弾塑性解析を行い、使用済燃料プール部に発生する応力およびひずみを算出する。
- ・ 評価基準値と比較し、耐震安全性を評価する。また、平成23年報告書の結果との比較を行う。

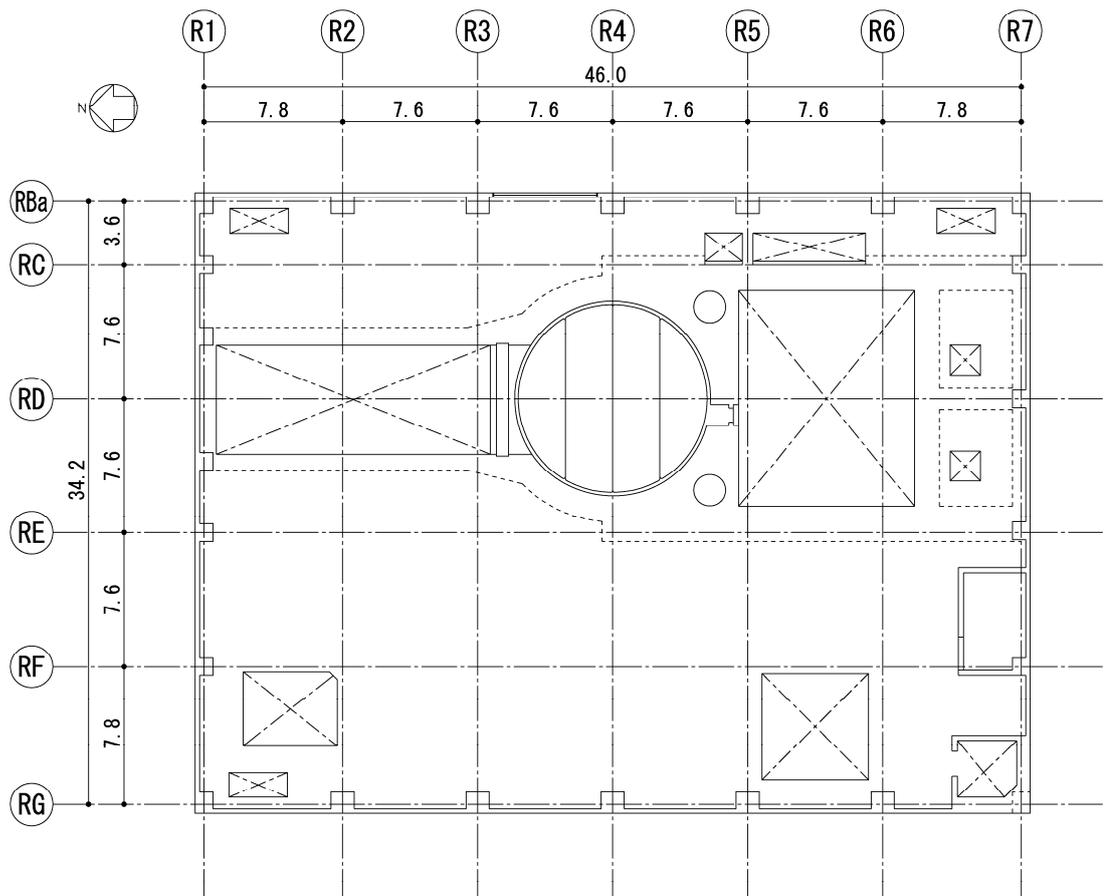


图-1.1 5階 平面図

(单位：m)

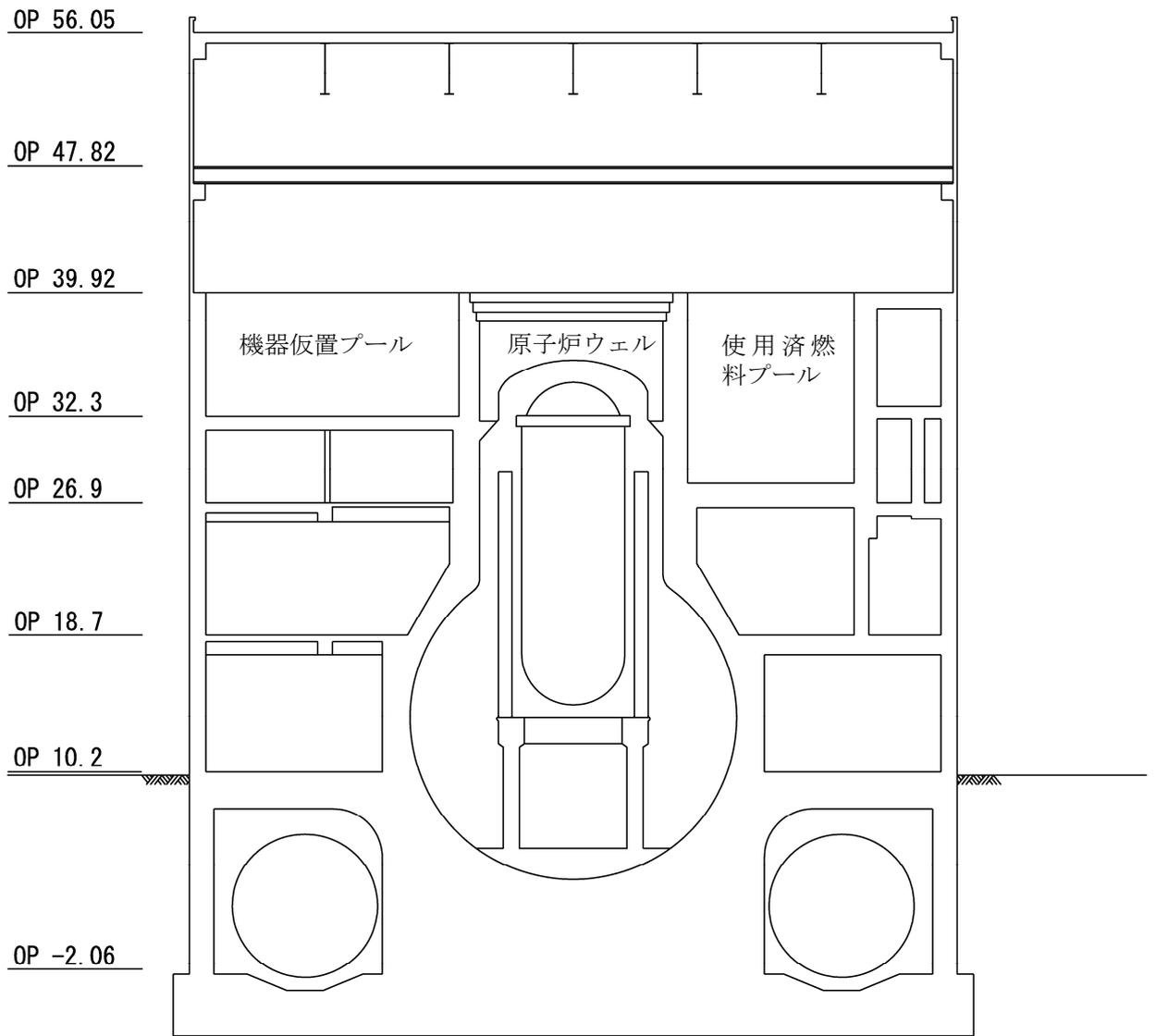


図-1.2 断面図  
 (NS方向断面, 単位:m)

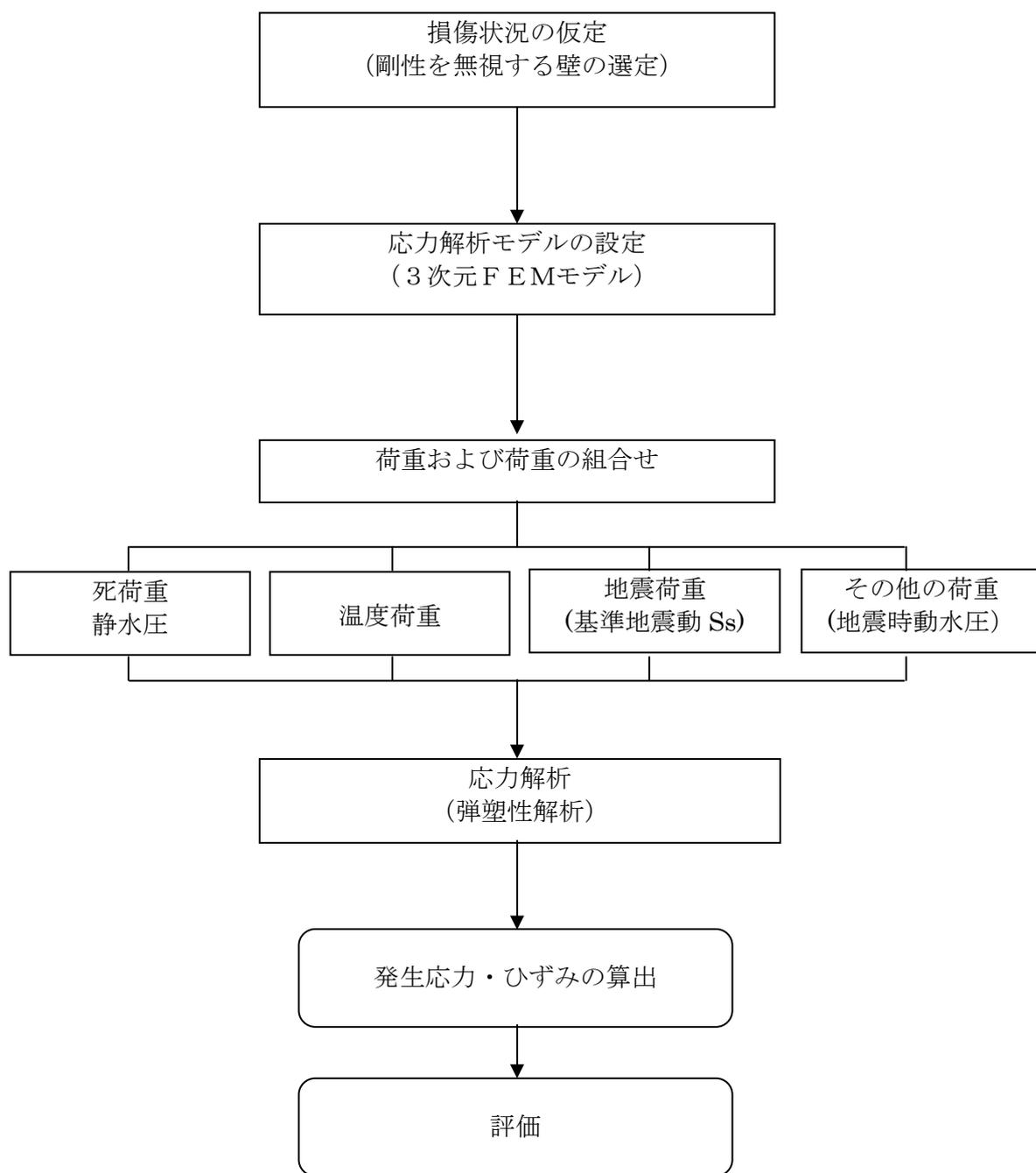


図-1.3 使用済燃料プールの耐震安全性評価フロー

## 2. 損傷状況の仮定

損傷状況の仮定にあたっては、添付資料－1の点検結果をもとに添付資料－2と同様に外壁の一部膨らみのある箇所の剛性を無視して、3次元FEM解析モデルを作成する。

解析モデルに評価したその他の外壁は、平成23年報告書で考慮した部分と同一とし、5階より下部の柱・梁は残った状態とする。使用済燃料プールや機器仮置プール、シェル壁および周辺床は損傷がないものとしてモデル化する。

### 3. 応力解析モデルの設定

鉄筋コンクリート部材の塑性化を考慮した弾塑性解析を実施し、使用済燃料プール部に発生する応力およびひずみを算定する。2階壁から5階の燃料取替え床までの鉄筋コンクリート部材を有限要素の集合体としてモデル化する。また、本検討で、外壁の一部膨らみがある箇所の剛性を無視した新たな応力解析モデルを構築する。

解析モデルに使用する板要素は、鉄筋層をモデル化した異方性材料による積層シェル要素を用いる。各要素には、板の軸力と曲げ応力を同時に考えるが、板の曲げには面外せん断変形の影響も考慮する。使用計算機コードは「ABAQUS」である。

解析モデル概要図を図-3.1に、コンクリートと鉄筋の構成則を図-3.2に、解析モデルの境界条件を図-3.3に示す。

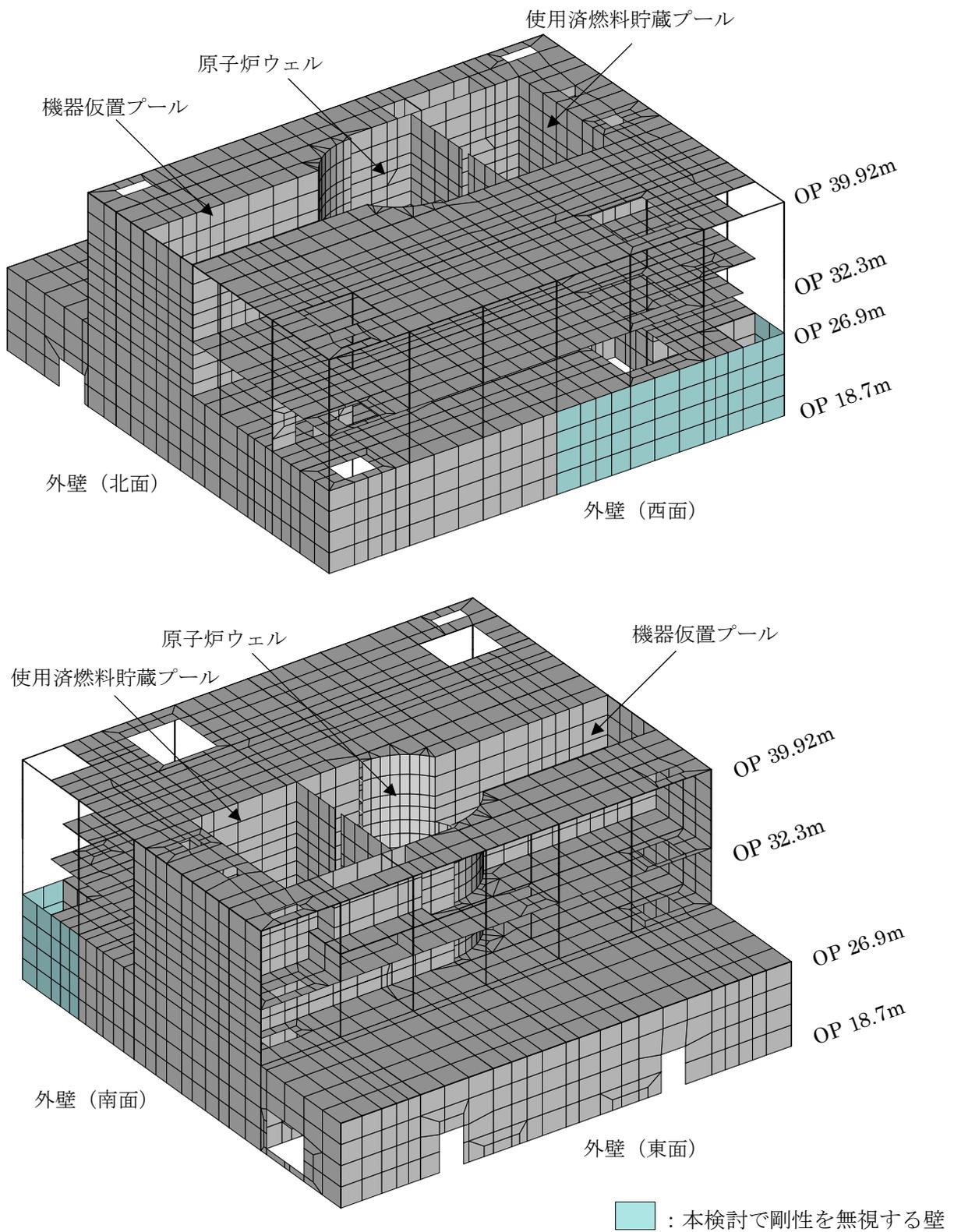
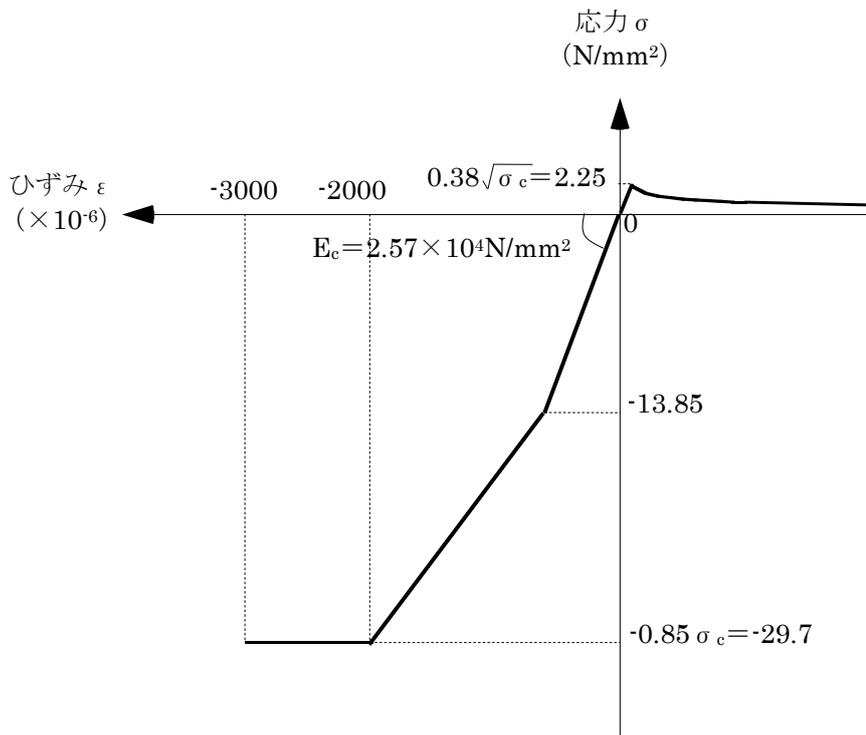
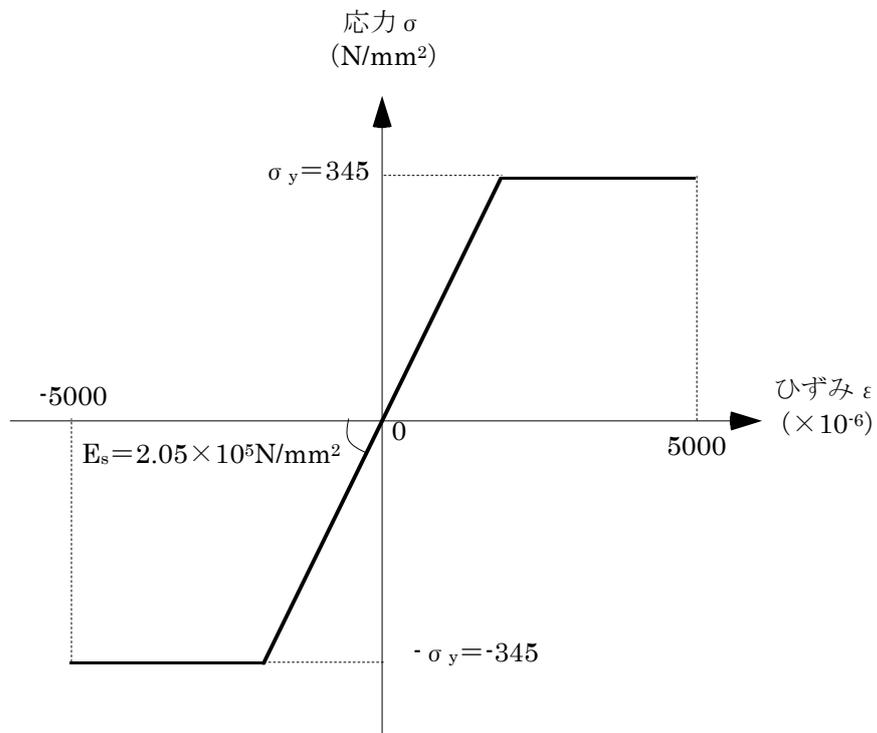


図-3.1 解析モデル概要図



(a) コンクリートの応力-ひずみ関係  
 (コンクリート強度  $\sigma_c = 35 \text{N}/\text{mm}^2$ )



(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係  
 (鉄筋降伏点  $\sigma_y = 345 \text{N}/\text{mm}^2$ )

図-3.2 コンクリートと鉄筋の構成則

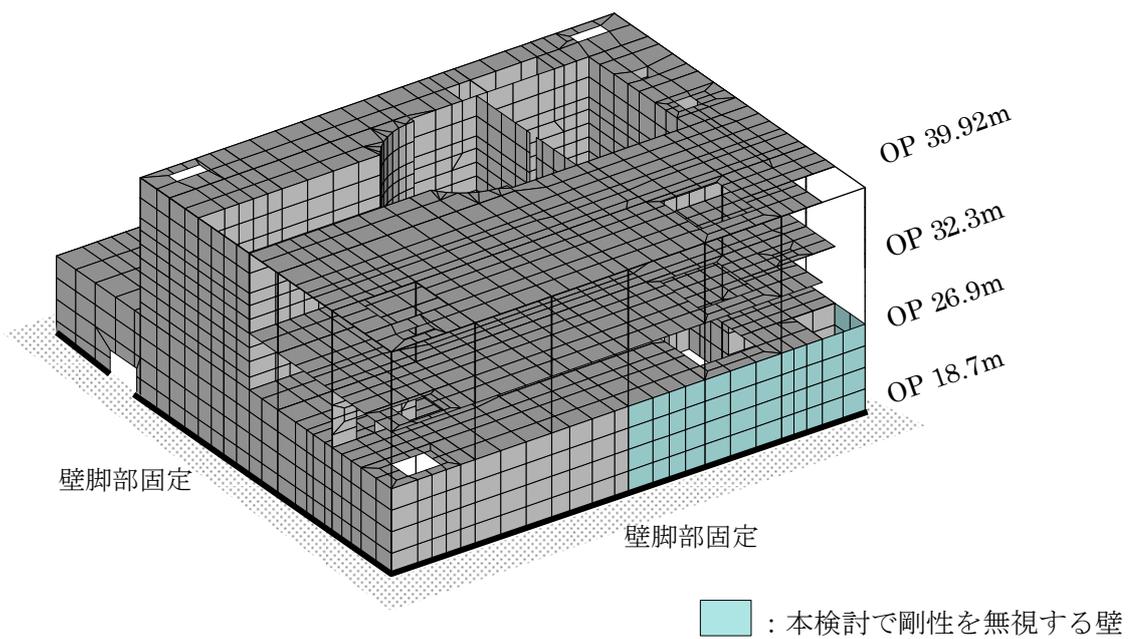


図-3.3 解析モデルの境界条件

#### 4. 荷重および荷重の組合せ

##### (1) 死荷重

解析モデルに付与する死荷重は、モデル化範囲の建屋躯体の自重、機器重量に加え、崩れた屋根や外壁重量が全て燃料取替え床やプール床に積載していると仮定した場合の付加重量を考慮する。

##### (2) 静水圧

使用済燃料プール、原子炉ウェルおよび機器仮置プールが満水状態にあると仮定した場合の静水圧を考慮する。

##### (3) 温度荷重

実測されたプール水の温度条件（90℃程度）を参考に、水温 90℃、外気温 10℃の状態を想定する。

##### (4) 地震荷重

平成 23 年報告書の質点系モデルによる基準地震動  $S_s$  に対する地震応答解析結果に基づき、水平方向および鉛直方向の地震荷重を設定する。

##### (5) その他の荷重

プール水の地震時動水圧を考慮する。

##### (6) 荷重の組合せ

表-4.1 に荷重の組合せを示す。なお、水平方向および鉛直方向の地震動の組合せは、組合せ係数法（組合せ係数 0.4）により評価する。

表-4.1 荷重の組合せ

荷重時名称	荷重の組合せ
$S_s$ 地震時	DL + H + T + K + KH

ここに、 DL : 死荷重 、 H : 静水圧 、 T : 温度 、  
K : 地震荷重（基準地震動  $S_s$ ） 、 KH : 地震時動水圧

## 5. 評価結果

配筋諸元等に基づき使用済燃料プールの構造検討を行い、耐震安全性を評価する。評価においては、応力解析より求まる発生応力およびひずみが、評価基準値を超えないことを確認する。評価基準値は、日本機械学会「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」などに基づき設定する。評価に用いる配筋諸元を図-5.1に示す。

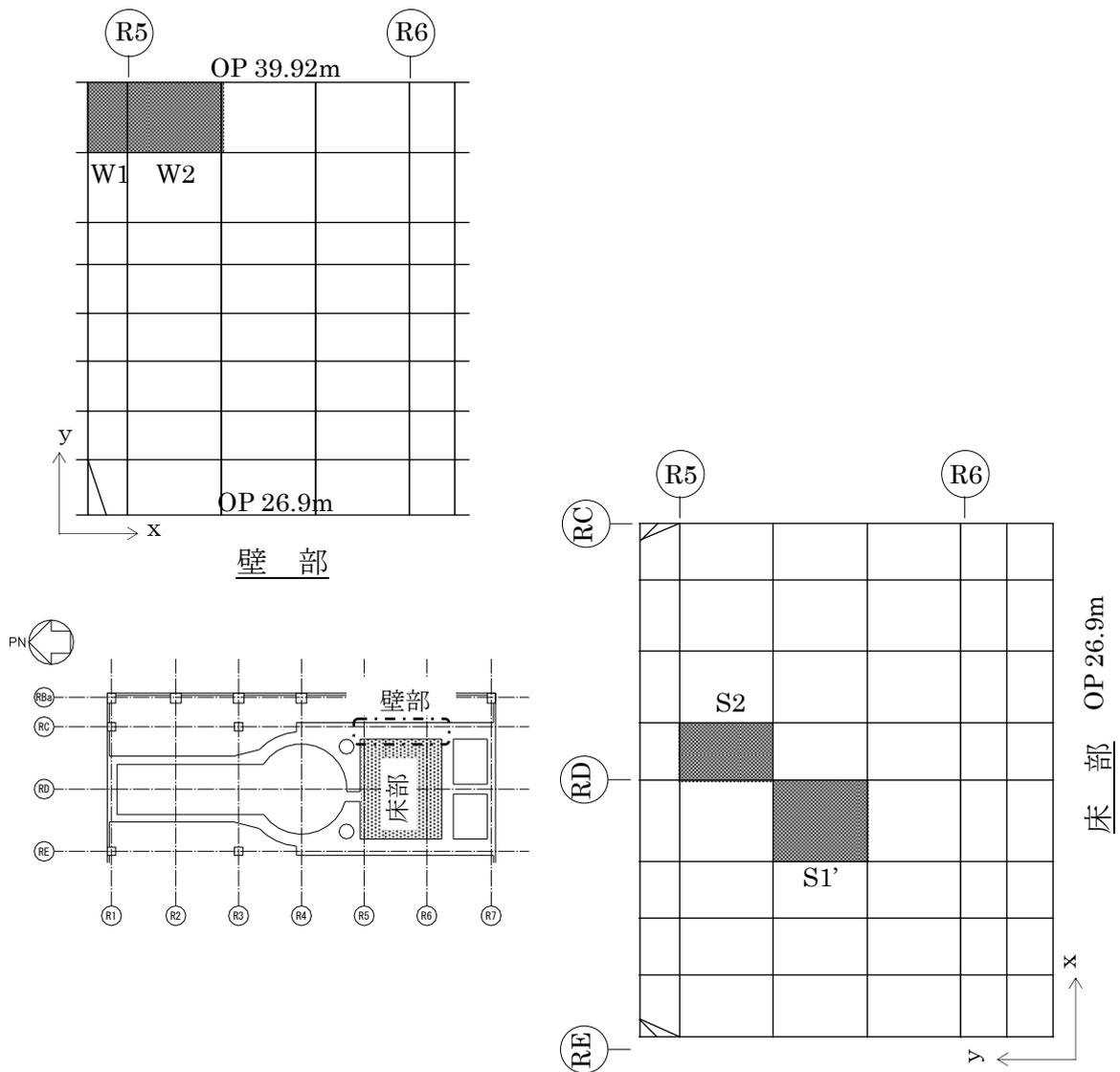
評価結果を表-5.1、表-5.2に示す。いずれの箇所においても発生応力およびひずみは弾性範囲内であり評価基準値を下回ることであり、使用済燃料プールは、外壁の一部膨らみのある箇所の剛性を無視しても、基準地震動  $S_s$  に対する耐震安全性は確保されていると推定される。

平成23年報告書の当該箇所との比較を表-5.3に示す。いずれの箇所においても、発生応力およびひずみは、ほぼ同じであり、大きな差異は生じなかった。

以上のことから、仮に外壁の一部膨らみのある箇所の剛性を無視しても、使用済み燃料プールは耐震安全性を有しているものと評価した。

表-5.1～表-5.2に用いる記号の説明

$\epsilon_c$	: コンクリートの圧縮ひずみ
$s\epsilon_c, s\epsilon_t$	: 鉄筋の圧縮ひずみおよび引張ひずみ (ひずみは全て引張側を正として表記)
Q	: 面外せん断力



位置	内側筋		外側筋		せん断補強筋
	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	
W1	D32@250	D32@120	D32@250	D32@240	—
W2	+4-D32		+4-D32		

位置	上端筋		下端筋		せん断補強筋
	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	
S1'	D32@100+D32@200		D32@200		—
S2					

図-5.1 評価箇所配筋諸元

表-5.1(1) 軸力と曲げモーメントによる  
コンクリートおよび鉄筋のひずみの検討結果（壁部）

箇所名	検討ひずみ	荷重時名称	発生ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	評価基準値 ( $\times 10^{-6}$ )	判定
W1	$\epsilon_c$	Ss 地震時	-490	-3000	可
	$\epsilon_s$		-350	-5000	可
	$\epsilon_t$		1220	5000	可

表-5.1(2) 軸力と曲げモーメントによる  
コンクリートおよび鉄筋のひずみの検討結果（床部）

箇所名	検討ひずみ	荷重時名称	発生ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	評価基準値 ( $\times 10^{-6}$ )	判定
S1'	$\epsilon_c$	Ss 地震時	-580	-3000	可
	$\epsilon_s$		-210	-5000	可
	$\epsilon_t$		470	5000	可

表-5.2(1) 面外せん断力の検討結果（壁部）

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)	評価基準値 (N/mm)	判定
W2	Ss 地震時	2040	3770	可

表-5.2(2) 面外せん断力の検討結果（床部）

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)	評価基準値 (N/mm)	判定
S2	Ss 地震時	800	1160	可

表-5.3(1) 軸力と曲げモーメントによる  
コンクリートおよび鉄筋の最大発生ひずみの比較

箇所名	検討ひずみ	荷重時名称	最大発生ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )		評価基準値 ( $\times 10^{-6}$ )	判定
			本検討	平成 23 年 報告書		
W1	$\epsilon_c$	Ss 地震時	-490	-480	-3000	可
	$\epsilon_s$		-350	-350	-5000	可
	$\epsilon_t$		1220	1230	5000	可
S1'	$\epsilon_c$		-580	-580	-3000	可
	$\epsilon_s$		-210	-210	-5000	可
	$\epsilon_t$		470	470	5000	可

表-5.3(2) 面外せん断力の検討結果の比較

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)		判定
		本検討	平成 23 年 報告書	
W2	Ss 地震時	2040 (3770)	2040 (3770)	可
S2		800 (1160)	800 (1150)	可

( ) 内数値は評価基準値を示す。

【参考】

床の最大発生ひずみの要素は、平成 23 年報告書と異なるため、参考として平成 23 年の最大発生ひずみの要素 S1 の位置での比較を以下に示す。

参考表 軸力と曲げモーメントによる  
コンクリートおよび鉄筋の最大発生ひずみの比較 (要素 S1)

箇所名	検討ひずみ	荷重時名称	最大発生ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )		評価基準値 ( $\times 10^{-6}$ )	判定
			本検討	平成 23 年報告書		
S1	$\epsilon_c$	Ss 地震時	-580	-580	-3000	可
	$\epsilon_s$		-210	-210	-5000	可
	$\epsilon_t$		490	490	5000	可

