

1.3 地震及び津波への対応

1.3.1 地震への対応

1.3.1.1 機器の対応

原子炉圧力容器・格納容器注水設備，原子炉格納容器内室素封入設備，使用済燃料プール設備，原子炉圧力容器・格納容器ホウ酸水注入設備，汚染水処理設備等及び電気系統設備は，地震により想定されるリスクを評価しており，機能喪失時の代替手段を定めている。

1.3.1.2 建屋の対応

対象設備は，燃料を内包する建屋（1～6号機原子炉建屋，運用補助共用施設共用プール棟）及び地下に滞留水を貯留する建屋（1～4号機原子炉建屋，1～4号機タービン建屋，1～4号機廃棄物処理建屋，1～4号機コントロール建屋，プロセス主建屋，高温焼却炉建屋）とする。

(1) 1～6号機原子炉建屋

1～6号機原子炉建屋の損傷状況や温度上昇等を考慮した，基準地震動 S_s による耐震安全性評価を実施し，耐震壁及び使用済燃料プール躯体が終局状態に至らないことを確認している。^{*1}

- ※ 1: 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及び補強等に関する検討に係る報告書(その1)
(東京電力株式会社，平成23年5月28日)
- 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及び補強等に関する検討に係る報告書(その1)
(追補版)(改訂2)(東京電力株式会社，平成24年12月25日)
- 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及び補強等に関する検討に係る報告書(その2)
(東京電力株式会社，平成23年7月13日)
- 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及び補強等に関する検討に係る報告書(その3)
(東京電力株式会社，平成23年8月26日)
- 福島第一原子力発電所1～4号機本館建物の基準地震動 S_s に対する耐震安全性評価について(東京電力株式会社，平成25年2月21日，特定原子力施設監視・評価検討会(第4回)資料5-1)

(2) 運用補助共用施設共用プール棟

運用補助共用施設共用プール棟の耐震壁および使用済燃料共用プール躯体について，基準地震動 S_s による耐震安全性評価を実施し，問題ないことを確認している(Ⅱ.2.12 参照)。

(3) プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋

プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋について，基準地震動 S_s に対する地下滞留水を考慮した地震応答解析を実施し，地下外壁のせん断ひずみが弾性範囲内であることを確認している。^{*2, 3}

※2：プロセス主建屋への移送に関する報告書（東京電力株式会社，平成23年4月18日）

※3：プロセス主建屋及び雑固体廃棄物減容処理建屋（以下，高温焼却炉建屋）への移送に関する報告書（東京電力株式会社，平成23年5月15日）

(4) 地下に滞留水を貯留する1～4号機原子炉建屋，1～4号機タービン建屋，1～4号機廃棄物処理建屋及び1～4号機コントロール建屋

1～4号機原子炉建屋について，基準地震動 S_s に対する地下滞留水を考慮した地震応答解析を実施し，地下外壁が終局状態に至らないことを確認している（1～3号機についてはⅡ.2.6，4号機については添付資料-3参照）。

また，1～4号機タービン建屋，1～4号機廃棄物処理建屋及び1～4号機コントロール建屋について，それぞれ代表号機を選定した上で，基準地震動 S_s に対する地下滞留水を考慮した地震応答解析を実施し，地下外壁が終局状態にいたらないことを確認している。また，代表号機以外については，代表号機の評価結果を踏まえ，建屋の類似性等を考慮して，耐震安全性を評価し，問題ないことを確認している。ここで，代表号機は滞留水の容量が最大の号機とする。（Ⅱ.2.6参照）

(5) 1～4号機原子炉建屋の点検について

1～4号機原子炉建屋について，作業安全性が確認された時点で，点検を実施する。

4号機原子炉建屋の点検は，使用済燃料プールと原子炉ウエルの水位測定，ひび割れ調査，建屋の垂直性の確認，コンクリートの強度確認を行う。このうち，使用済燃料プールと原子炉ウエルの水位測定とひび割れ調査は4回/年，建屋の垂直性の確認とコンクリートの強度確認は1回/年，プール燃料取り出し完了まで実施する。なお，プール燃料取り出し完了後は，建物耐久性維持の観点から必要な点検を実施する。

放射線量が高く，建屋内への進入が困難である1～3号機原子炉建屋については，遠隔操作装置等による点検手法を検討の上，点検を実施する。

1.3.1.3 その他の対応

(1) 1/2号機共用排気筒の解体について

1/2号機共用排気筒は，震災後の点検で一部の部材に損傷が確認されたことから，耐震上の裕度を向上させるため，排気筒の上部を解体する。

1.3.2 津波への対応

1.3.2.1 アウターライズ津波を想定した対応

過去に福島沖のアウターライズで大規模な地震・津波が発生したことは知られていないものの，東北地方太平洋沖地震の影響によってアウターライズにおける地震の発生が専門家によって指摘されていることから（L a y e t a l.（2011）等），福島沖のア

ウターライズにおける地震に伴う津波を想定する。

津波の評価にあたって想定する地震規模については、日本海溝でのアウターライズ地震の既往最大規模は1933年昭和三陸地震（ M_w 8.4）であるが、ここでは、より安全側の評価としてプレート境界で発生した地震ではあるものの、三陸沖で過去に発生した最大規模の地震として1611年慶長三陸地震の地震規模 M_w 8.6を採用する。

また、評価にあたっては、波源の断層パラメータの不確かさを考慮することとし、断層の位置、走向を変化させ、発電所の津波高さが最大となる場合を想定する。

上記解析の結果、発電所港湾内から敷地（1～4号機側T. P. 約+8.5 m, 5・6号機側T. P. +約11.5 m）への遡上は確認されないものの、敷地南東側から1～4号機側敷地（T. P. +約8.5 m）への遡上を確認された。このため、敷地の南東部に仮設防潮堤を設置することとし、これをモデル化した数値解析を実施した。その結果、仮設防潮堤により敷地への遡上を防ぐことができることを確認したことから、敷地の南東部に仮設防潮堤を設置した。（添付資料-1）

1.3.2.2 アウターライズ津波を超える津波を想定した対応

(1) 機器の対応

原子炉压力容器・格納容器注水設備、原子炉格納容器内窒素封入設備、使用済燃料プール設備、原子炉压力容器・格納容器ホウ酸水注入設備、汚染水処理設備等及び電気系統設備は、津波により想定されるリスクを評価しており、機能喪失時の代替手段を定めている。

また、5・6号機については、津波により想定されるリスクを評価しており、機能喪失時の代替手段を定めている。

(2) 建屋の対応

対象設備は、燃料を内包する建屋（1～4号機原子炉建屋、運用補助共用施設共用プール棟）及び地下に滞留水を貯留する建屋（1～4号機原子炉建屋、1～4号機タービン建屋、1～4号機廃棄物処理建屋、1～4号機コントロール建屋、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋）とする。

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波に対し、1～4号機原子炉建屋、1～4号機タービン建屋、1～4号機廃棄物処理建屋、1～4号機コントロール建屋、運用補助共用施設共用プール棟、プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋について、津波による外壁や柱等の構造躯体に有意な損傷は確認されていない。

なお、地下に汚染水が貯留する建屋について、現場の状況等を勘案し、津波襲来時の地下からの汚染水流出防止を目的に、建屋開口部の閉塞等、低減対策を実施していく。

また、5・6号機については、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波に対し、5・6号機原子炉建屋、5・6号機タービン建屋、5・6号機廃棄物処理建屋、5・6号機コントロール建屋について、津波による外壁や柱等の構造躯体に有

意な損傷は確認されていない。

1.3.2.3 今後の対応

原子力発電所で想定すべき津波については，東北地方太平洋沖地震を踏まえ，現在国によって検討が行われており，これら状況を注視しつつ必要に応じて今後の津波に対する安全性評価及び対策へ反映していく。

1.3.3 添付資料

- 添付資料－1 アウターライズ津波を想定した対策
- 添付資料－2 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及び補強等に関する検討に係る報告書（その1）（東京電力株式会社，平成23年5月28日）
- 添付資料－3 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及び補強等に関する検討に係る報告書（その1）（追補版）（改訂2）（東京電力株式会社，平成24年12月25日）
- 添付資料－4 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及び補強等に関する検討に係る報告書（その2）（東京電力株式会社，平成23年7月13日）
- 添付資料－5 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及び補強等に関する検討に係る報告書（その3）（東京電力株式会社，平成23年8月26日）
- 添付資料－6 福島第一原子力発電所1～4号機本館建物の基準地震動 S_s に対する耐震安全性評価について（東京電力株式会社，平成25年2月21日，特定原子力施設監視・評価検討会（第4回）資料5－1）
- 添付資料－7 福島第一原子力発電所4号機原子炉建屋健全性確認のための定期点検頻度の見直しについて（東京電力株式会社，平成26年5月2日，特定原子力施設監視・評価検討会（第21回）参考6）
- 添付資料－8 福島第一原子力発電所1/2号機共用排気筒の上部解体について

アウターライズ津波を想定した対策

1. 仮設防潮堤（フィルターユニット）の設置

アウターライズ津波への対策としての仮設防潮堤は、切迫性の高いとされる津波に対する緊急的な対策として、平成23年6月末に設置完了している。

仮設防潮堤については、今回の地震により地盤が沈下した量（約0.7m）も加味し、T. P. + 8.5m盤各所において想定されたアウターライズ津波の高さに対して求められた浸水深さに対して必要な防潮堤高さを設定し、総延長約400mの仮設防潮堤を構築した。

設計では、砕石を詰めた1段0.6mの高さの堤体（フィルターユニットエコグリーン）を津波浸水深と津波の衝撃波力に抵抗できる規模（高さとせん断抵抗が必要な堤体敷幅）まで積み上げた（最大T. P. + 12.7m）。

津波の衝撃波力*については、防潮堤がない場合の進行波の浸水深の3倍の静水深による水圧を仮設防潮堤の前面に作用させ、各断面（最大7段積：T. P. + 12.7mの高さまで）での津波波力に対する抵抗力を求め、全ての断面形状での堤体のすべりに対する安全性を確認している。また、仮設防潮堤の前面は、遮水材（CVスプレー）により覆われており遮水効果も有している。

以上のことから、アウターライズ津波を想定しても、仮設防潮堤によりT. P. + 8.5m盤への海水の浸入は防止でき、各設備・施設の機能は維持される。

※：津波波力の算定については、「朝倉ほか(2000)」、「津波避難ビル等に係るガイドライン(2005)内閣府」による。

堤体（フィルターユニット）の耐久性については、メーカーにて耐候性、耐薬品性等の促進試験を実施しており、国内本設工事（耐用年数30年）に適用実績があることを確認している。遮水材（CVスプレー）についても、メーカーにて実施した促進試験により、30年以上の耐候性を確認している。

以下に仮設防潮堤の安定性検討結果を示す。

本資料に記載の標高は、震災後の地盤沈下量（-709mm）とO.P.からT.P.への読替値（-727mm）を用いて、下式に基づき換算している。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

1.1 検討条件

仮設防潮堤は、砕石を詰めた1段0.6m高さのフィルターユニットを所定の高さ（後述 T. P. +10.9m～12.7m）まで積み上げた構造である。安定性検討に使用するフィルターユニット諸元は表-1の通りである。

表-1 フィルターユニット諸元

フィルターユニット形状	幅 2.4m×長さ 2.4m×高さ 0.6m
フィルターユニット材質	ポリエステル, 25mm 目
内容物	砕石 (50mm～250mm)
フィルターユニット気中重量	39.2kN/個
フィルターユニット間の摩擦係数*	0.8
フィルターユニットと地盤面の摩擦係数*	0.6

*摩擦係数について

フィルターユニットの摩擦係数は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(H19.7)に示される静止摩擦係数の特性値に基づいて設定する。

表-9.1 静止摩擦係数の特性値

コンクリートとコンクリート	0.5
コンクリートと岩盤	0.5
水中コンクリートと岩盤	0.7～0.8
コンクリートと捨石	0.6
捨石と捨石	0.8
木材と木材	0.2(湿)～0.5(乾)
摩擦増大マットと捨石	0.75

港湾の施設の技術上の基準・同解説 (H19.7) 上巻より抜粋・一部改変

仮設防潮堤の高さ、設計用津波高さを表-2にまとめる。

仮設防潮堤の高さは、津波対策ありの条件において算定される津波高さを上回るように設定している(図-1*)。例えば、最大津波高さ(T. P. +12.694m)となる箇所では、フィルターユニット7段積、高さT. P. +12.7mの仮設防潮堤を設定している。

仮設防潮堤に対する波力を決定するための設計用津波高さには、進行波の水深を使用している。具体的には、図-2*に示した津波対策なしの条件において算定される進行波の水深より、T. P. 8.5m盤の最大浸水深を設計用津波高さとして使用している。

* : 福島第一・福島第二原子力発電所におけるアウトサイズ津波対策(平成24年4月27日, 地震・津波に関する意見聴取会(津波関係), 地震・津波(津波)1-4)

本資料に記載の標高は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算している。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

表-2 仮設防潮堤の高さと設計用津波高さ

断面形状	高さ	設計用津波高さ (仮設防潮堤がない場合 の進行波の水深)
4段積	T.P. +10.9m	1.40 m
5段積	T.P. +11.5m	1.29 m
6段積	T.P. +12.1m	2.22 m
6段積 (コーナー)	T.P. +12.1m	2.36 m
7段積	T.P. +12.7m	2.20 m

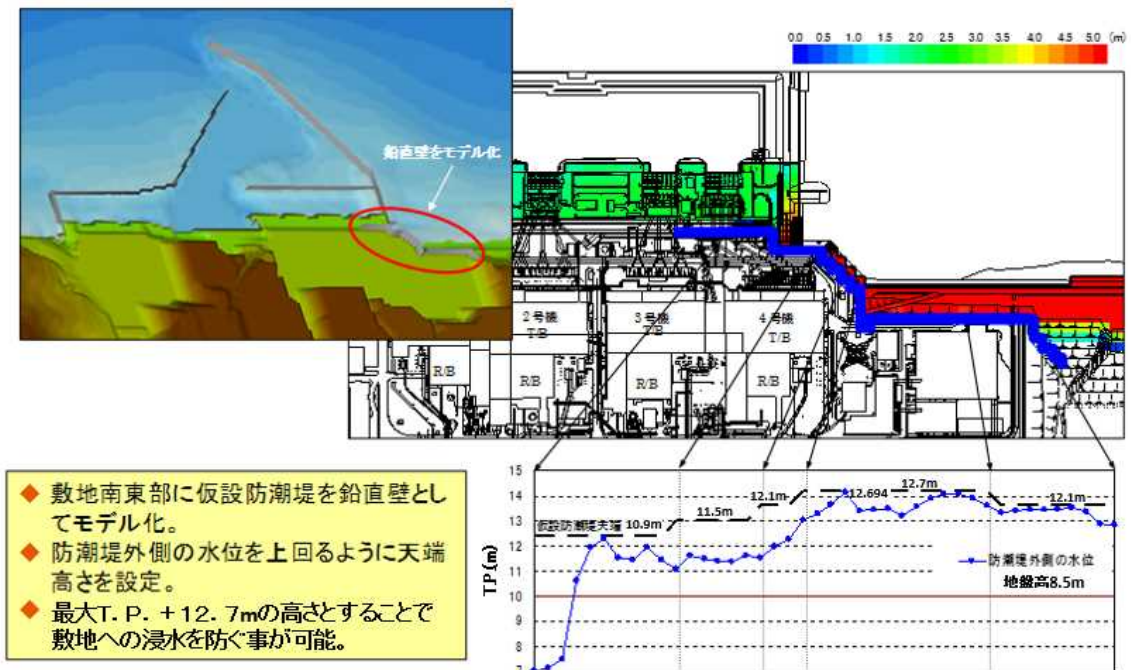
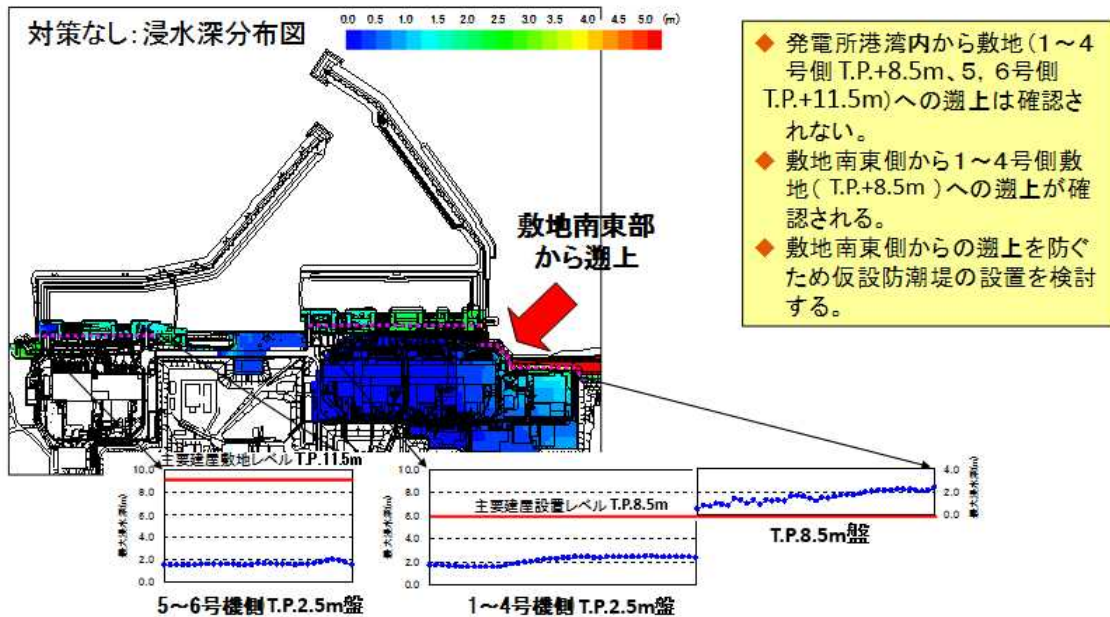


図-1 1 F 敷地南側における最大津波高さと仮設防潮堤高さの比較 (津波対策あり)

本資料に記載の標高は、震災後の地盤沈下量 (-709mm) とO.P.からT.P.への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm



初期潮位(朔望平均満潮位)H.W.L.= T.P.+0.763m, 東北地方太平洋沖地震による地盤沈下=0.662mを考慮

図-2 1F敷地南側T. P. 8. 5m盤沿いの最大浸水深(日本海溝寄りプレート内(正断層モデル)) 津波対策なし T. P. +8. 5mに対する浸水深を示す

津波波力に対する安定性検討(滑動, 転倒)では, 津波波圧として仮設防潮堤がないときの進行波の水深(最大浸水深)の3倍の静水圧*を設定する(図-3)。なお, 仮設防潮堤の海側には遮水材を施工し, 浸水を防止していることから, 浮力は発生しない。図-3は例として, 仮設防潮堤(7段積)の底部に対する滑動安定性評価を整理したものであり, 摩擦抵抗力(206kN)が波力(191kN)を上回ることから滑動しないことを示している。

*: 津波避難ビル等に係るガイドライン(2005 内閣府)

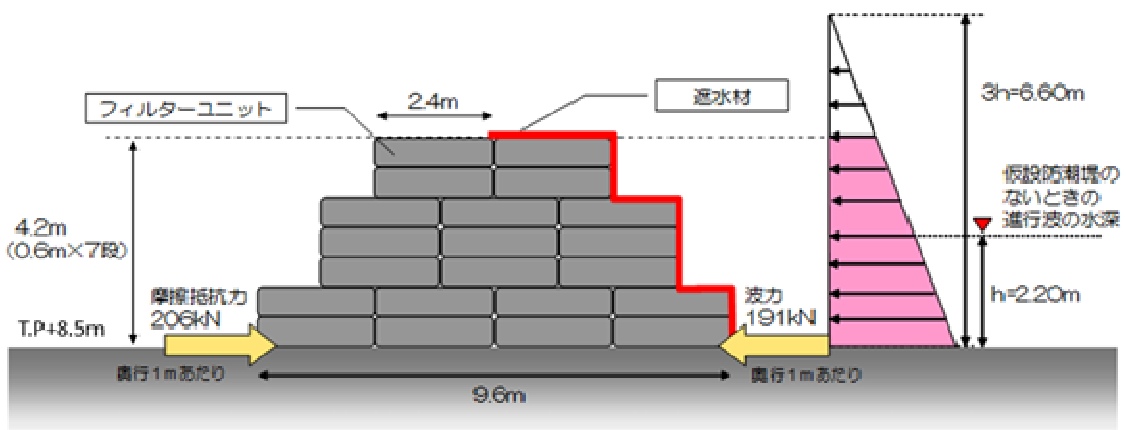


図-3 仮設防潮堤 津波波力の考え方(7段積の例)

本資料に記載の標高は, 震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて, 下式に基づき換算している。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

地震については、水平震度0.3に対する安定性検討（滑動，転倒）を行う。また，地震に対する裕度についても検討する。

仮設防潮堤の断面形状，配置を図-4に示し，表-3に仮設防潮堤寸法をまとめる。

表-3 仮設防潮堤 寸法一覧

断面形状	高さ	底盤幅	重心高さ
4段積	2.40m	4.80m	1.20m
5段積	3.00m	7.20m	1.41m
6段積	3.60m	9.60m	1.59m
6段積（コーナー）	3.60m	9.60m	1.67m
7段積	4.20m	9.60m	1.81m

1.2 安定性の検討方法

津波波力に対する滑動安定性検討は、図-5の通り、各断面（検討位置）に対して、津波による波力およびフィルターユニットの摩擦抵抗力（水平耐力）をそれぞれ算定し、摩擦抵抗力が津波波力を上回っていることを確認する。また、転倒に対する安定性については、荷重合力の偏心量が底面のミドルサード内にあることを確認する。

地震についても同様に、滑動は図-5の各断面について摩擦抵抗力が地震力を上回ることを確認し、転倒は、荷重合力の偏心量が底面のミドルサード内にあることを確認する。

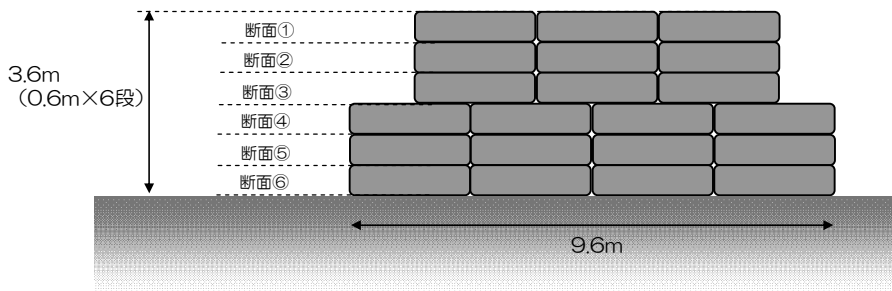


図-5 仮設防潮堤断面図（6段積（コーナー）の場合）

【津波波力に対する滑動安定性評価の計算例】

6段積（コーナー）断面③（図-6）について、計算例を示す。

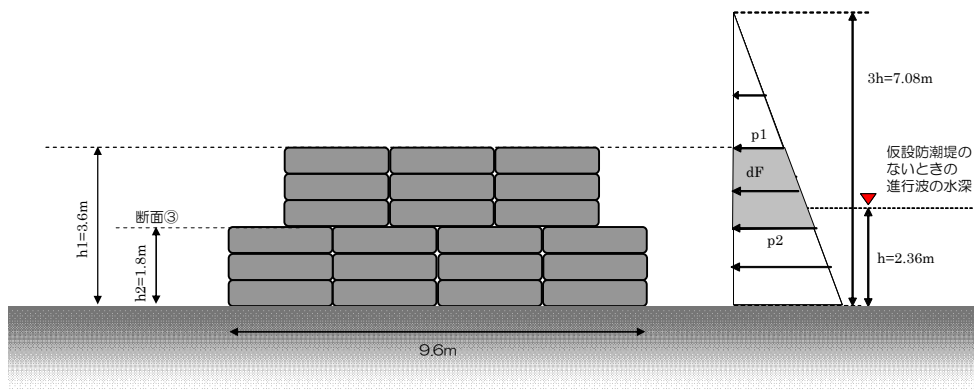


図-6 津波波力 滑動（仮設防潮堤6段積（コーナー）断面③の例）

○津波波力の算定

- ・ 仮設防潮堤 高さ 3.6m における波圧 (p1)

$$p1 = \rho g(3h - h1) = 1.03 \times 10^3 \times 9.8 \times (3 \times 2.36 - 3.6) = 35.1 \text{ kN/m}^2$$

ρ : 海水密度 ($1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), g : 重力加速度 (9.8 m/s^2),

h : 設計用津波高さ (2.36 m), $h1$: 仮設防潮堤高さ (3.6m)

- ・ 仮設防潮堤 高さ 1.8m (断面③) における波圧 (p2)

$$p_2 = \rho g(3h - h_2) = 1.03 \times 10^3 \times 9.8 \times (3 \times 2.36 - 1.8) = 53.3 \text{ kN/m}^2$$

ρ : 海水密度 ($1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), g : 重力加速度 (9.8 m/s^2),
 h : 設計用津波高さ (2.36 m), h_2 : 断面③高さ (1.8m)

- ・ 仮設防潮堤 高さ 1.8m (断面③) における単位奥行き (1m) あたりの波力 (dF)
- $$dF = 0.5 \times (p_1 + p_2) \times (h_1 - h_2) = 0.5 \times (35.1 + 53.3) \times (3.6 - 1.8) = 79.6 \text{ kN/m}$$

○ 摩擦抵抗力

検討位置の断面③に該当するフィルターユニットは 9 個
 フィルターユニット気中重量 : 39.2kN/個, フィルターユニット間の摩擦係数 : 0.8
 フィルターユニット寸法 : 2.4m (奥行 1 個当)

- ・ 摩擦抵抗力 (単位奥行き (1m) 当り) : $39.2 \times 9 \times 0.8 / 2.4 = 117.6 \text{ kN/m}$

○ 評価

摩擦抵抗力は津波波力を上回り滑動しない。

津波波力 (dF) 79.6 kN < 摩擦抵抗力 117.6 kN ○ K

【津波波力に対する転倒安定性評価の計算例】

6 段積 (コーナー) (図-7) について, 計算例を示す。

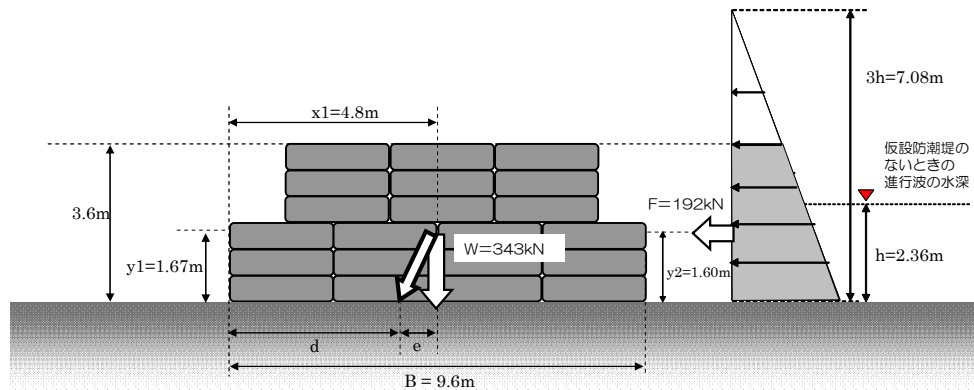


図-7 津波波力 転倒 (仮設防潮堤 6 段積 (コーナー) の例)

○ 荷重合力位置の算定

仮設防潮堤 6 段積 (コーナー) のフィルターユニット : 21 個
 フィルターユニット気中重量 : 39.2kN/個, フィルターユニット寸法 : 2.4m (奥行 1 個当)

$$\text{単位奥行きあたりの仮設防潮堤重量 : } W = 39.2 \text{ (kN/個)} \times 21 \text{ (個)} / 2.4 \text{ (m)} = 343 \text{ kN/m}$$

単位奥行きあたりの津波波力 : $F = 191.87 \text{ kN/m}$

仮設防潮堤重心高さ : $y_1 = 1.67\text{m}$, 仮設防潮堤重心距離 : $x_1 = 4.8\text{m}$

津波波力重心高さ : $y_2 = 1.5955\text{m}$

- ・ 抵抗モーメント : $M_r = W \times x_1 = 343 \times 4.8 = 1646.4 \text{ kNm}$
- ・ 転倒モーメント : $M_o = F \times y_2 = 191.87 \times 1.5955 = 306.1 \text{ kNm}$
- ・ 底面合力作用位置 : $d = (M_r - M_o) / W = (1646.4 - 306.1) / 343 = 3.91 \text{ m}$
- ・ 底面合力偏心量 : $e = B/2 - d = 4.80 - 3.91 = 0.89 \text{ m}$

○評価

荷重合力は底面のミドルサード内であり，転倒することはない。

底面合力偏心量： $e = 0.89 \text{ m} < B/6 = 9.60 / 6 = 1.60 \text{ m} \dots\dots\dots \text{OK}$

1.3 結果

表－4～7に検討結果を示す。

表－4 津波波力に対する滑動安定性検討結果

断面形状	津波波力	摩擦抵抗力	評価
4段積 (津波高さ h=1.40m)	断面①：13kN 断面②：29kN 断面③：49kN 断面④：73kN	断面①：26kN 断面②：52kN 断面③：78kN 断面④：78kN	○
5段積 (津波高さ h=1.29m)	断面①：7kN 断面②：18kN 断面③：32kN 断面④：50kN 断面⑤：72kN	断面①：26kN 断面②：65kN 断面③：105kN 断面④：144kN 断面⑤：137kN	○
6段積 (津波高さ h=2.22m)	断面①：20kN 断面②：44kN 断面③：72kN 断面④：103kN 断面⑤：138kN 断面⑥：177kN	断面①：26kN 断面②：65kN 断面③：105kN 断面④：144kN 断面⑤：196kN 断面⑥：186kN	○
6段積（コーナー） (津波高さ h=2.36m)	断面①：23kN 断面②：49kN 断面③：80kN 断面④：113kN 断面⑤：151kN 断面⑥：192kN	断面①：39kN 断面②：78kN 断面③：118kN 断面④：170kN 断面⑤：222kN 断面⑥：206kN	○
7段積 (津波高さ h=2.20m)	断面①：16kN 断面②：36kN 断面③：60kN 断面④：87kN 断面⑤：118kN 断面⑥：153kN 断面⑦：191kN	断面①：26kN 断面②：52kN 断面③：91kN 断面④：131kN 断面⑤：170kN 断面⑥：222kN 断面⑦：206kN	○

※ 単位奥行き（1m）あたりの津波波力、摩擦抵抗力として算出。

全ての断面において、津波波力に対する滑動安定性評価に問題はない。

底部（フィルターユニットと地盤面）の摩擦係数を0.6としていることから、滑動安定性は、全断面を通して底部が最も厳しい評価となる。

表-5 津波波力に対する転倒安定性検討結果

防潮堤断面	津波波力	偏心量	B/6	評価
4段積(8個) 底面幅 B : 4.80m 重量 : 130.7kN	津波高さ : 1.40m 津波波力 : 73kN 波力重心高さ : 1.04m	0.58m	0.80m	○
5段積(14個) 底面幅 B : 7.20m 重量 : 228.7kN	津波高さ : 1.29m 津波波力 : 72kN 波力重心高さ : 1.18m	0.37m	1.20m	○
6段積(19個) 底面幅 B : 9.60m 重量 : 310.3kN	津波高さ : 2.22m 津波波力 : 177kN 波力重心高さ : 1.58m	0.90m	1.60m	○
6段積(コーナー)(21個) 底面幅 B : 9.60m 重量 : 343.0kN	津波高さ : 2.36m 津波波力 : 192kN 波力重心高さ : 1.60m	0.89m	1.60m	○
7段積(21個) 底面幅 B : 9.60m 重量 : 343.0kN	津波高さ : 2.20m 津波波力 : 191kN 波力重心高さ : 1.77m	0.99m	1.60m	○

※ 単位奥行き(1m)あたりの重量, 波力として記載。

全ての断面において, 津波波力に対する転倒安定性評価に問題はない。

仮設防潮堤の断面形状から重心位置が相対的に高くなるため, 4段積ケースの偏心量と B/6 の比がやや大きい結果となる。

表-6 地震力に対する滑動安定性検討結果

断面形状	地震力	摩擦抵抗力	評価
4段積	断面①：10kN 断面②：20kN 断面③：29kN 断面④：39kN	断面①：26kN 断面②：52kN 断面③：78kN 断面④：78kN	○
5段積	断面①：10kN 断面②：25kN 断面③：39kN 断面④：54kN 断面⑤：69kN	断面①：26kN 断面②：65kN 断面③：105kN 断面④：144kN 断面⑤：137kN	○
6段積	断面①：10kN 断面②：25kN 断面③：39kN 断面④：54kN 断面⑤：74kN 断面⑥：93kN	断面①：26kN 断面②：65kN 断面③：105kN 断面④：144kN 断面⑤：196kN 断面⑥：186kN	○
6段積（コーナー）	断面①：15kN 断面②：29kN 断面③：44kN 断面④：64kN 断面⑤：83kN 断面⑥：103kN	断面①：39kN 断面②：78kN 断面③：118kN 断面④：170kN 断面⑤：222kN 断面⑥：206kN	○
7段積	断面①：10kN 断面②：20kN 断面③：34kN 断面④：49kN 断面⑤：64kN 断面⑥：83kN 断面⑦：103kN	断面①：26kN 断面②：52kN 断面③：91kN 断面④：131kN 断面⑤：170kN 断面⑥：222kN 断面⑦：206kN	○

※ 単位奥行き（1m）あたりの地震力、摩擦抵抗力として算出。

全ての断面において、地震力に対する滑動安定性評価に問題はない。

底部（フィルターユニットと地盤面）の摩擦係数を0.6としていることから、滑動安定性は、全断面を通して底部が最も厳しい評価となる。

仮設防潮堤を設計する上での支配的な荷重は津波波力となっていることから、水平震度0.3に対しては十分な余裕があり、摩擦係数から判断すれば、水平震度0.6までの安定性は確保することができる。

表-7 地震力に対する転倒安定性検討結果

防潮堤断面	地震力	偏心量	B/6	評価
4段積(8個) 底面幅B: 4.80m 重量: 130.7kN	地震力: 39kN 重心高さ: 1.20 m	0.36m	0.80m	○
5段積(14個) 底面幅B: 7.20m 重量: 228.7kN	地震力: 69kN 重心高さ: 1.41m	0.42m	1.20m	○
6段積(19個) 底面幅B: 9.60m 重量: 310.3kN	地震力: 93kN 重心高さ: 1.59m	0.48m	1.60m	○
6段積(コーナー)(21個) 底面幅B: 9.60m 重量: 343.0kN	地震力: 103kN 重心高さ: 1.67m	0.50m	1.60m	○
7段積(21個) 底面幅B: 9.60m 重量: 343.0kN	地震力: 103 kN 重心高さ: 1.81 m	0.54m	1.60m	○

※ 単位奥行き(1m)あたりの重量, 地震力として記載。

全ての断面において, 地震力に対する転倒安定性評価に問題はない。

仮設防潮堤の断面形状から重心位置が相対的に高くなるため, 4段積ケースの偏心量とB/6の比がやや大きい結果となる。

偏心量とB/6の関係を考えれば, 4段積ケースにおいて水平震度0.67とした場合に, 偏心量がミドルサード(B/6)を上回る結果となる。地震動に対する滑動安定性評価(表-6)と併せて考えれば, 仮設防潮堤フィルターユニットの安定性評価においては, 水平震度0.6まで問題は生じないものと考えることができる。

2. トレンチの閉塞

2号機及び3号機の海水配管トレンチ及び電源ケーブルトレンチについては、平成23年4月2日及び5月11日の海域への汚染水流出において、タービン建屋からの経路となったことから、海域への汚染水流出防止措置として、平成23年6月までにT. P. 2. 5m盤の開口部（ピット、トレンチ立坑入口）の閉塞を完了している。

平成24年1月から実施したトレンチ等内部点検において、溜まり水の放射性物質濃度（Cs）が $10^2 \sim 10^3 \text{ Bq/cm}^3$ レベルであった2号機及び3号機ポンプ室循環水ポンプ吐出弁ピットのうち2号機ポンプ室循環水ポンプ吐出弁ピットの水移送及び充填作業を平成24年4月29日に完了した。また、3号機ポンプ室循環水ポンプ吐出弁ピットの水移送及び充填作業を平成24年5月28日に完了した。

このことから、アウターライズ津波により、高レベル汚染水が滞留している海水配管トレンチや電源ケーブルトレンチ等に海水が流入し、汚染水が溢水することはないと考えている。

以 上

本資料に記載の標高は、震災後の地盤沈下量（-709mm）とO.P.からT.P.への読替値（-727mm）を用いて、下式に基づき換算している。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

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)

修正反映版

平成23年5月

東京電力株式会社

目次

1. はじめに
2. 耐震安全性評価に関する検討方針
3. 耐震安全性評価に関する検討結果
4. 耐震補強工事等の対策に関する検討結果
5. まとめ

添付資料－1：1号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細

添付資料－2：「福島第一原子力発電所第1号機における燃料域上部まで原子炉格納容器を
水で満たす措置の実施に係る報告書」（平成23年5月5日）からの一部抜
粋

添付資料－3：4号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細
（質点系モデルによる時刻歴応答解析による評価）

添付資料－4：4号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細
（3次元FEM解析による局部評価）

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）

1. はじめに

本報告書は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第67条第1項の規定に基づく報告の徴収について」（平成23年4月13日）に基づき、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に関する検討を実施した結果を報告するものである。

今回の（その1）では、評価結果がまとまった1号機及び4号機を先行して報告するものであり、その他の号機については評価結果がまとまった時点で改めて報告する予定である。

2. 耐震安全性評価に関する検討方針

(1) 1号機の原子炉建屋

1号機の原子炉建屋については、東北地方太平洋沖地震の翌日である3月12日に水素爆発とみられる事象により、5階のオペレーティングフロアより上部が破損した。一方で、3号機や4号機とは異なり5階以下の破損はみられない。このような破壊形式に至ったのは、1号機は5階以上が鉄骨構造に鋼板を取り付けた構造形式であり、内圧に対して壁の部分が非常に脆弱であったためと推定しており、この部分が先行破壊して内圧を開放したことにより、5階より下の構造はほぼ健全な状態を維持していると評価した。この情報を質点系モデルに反映し、基準地震動 S_s による時刻歴応答解析を実施し、耐震壁がせん断破壊する終局状態に至るかかどうかについて検討することとした。

(2) 4号機の原子炉建屋

4号機の原子炉建屋は、3月15日に破損していることが確認された。4号機については、破損が生じた時の映像が無いことなどから、どのようなプロセスで破損に至ったのか現段階では必ずしも特定されていない。1号機とは構造形式が異なり鉄筋コンクリート構造であり、内圧に対して壁の抵抗力が大きかったためと推定されるが、柱と梁のフレーム構造と屋根トラスを残して、屋根スラブと壁の大半が失われており、さらに4階の壁の大部分と、3階の一部の壁が破損している。このように、4号機については、1号機と異なり5階以下の壁も破損しているため、この情報を質点系モデルに反映し、基準地震動 S_s による時刻歴応答解析を実施し、耐震壁がせん断破壊する終局状態に至るかかどうかについて全体評価を行うこととした。

その後、使用済燃料プールを含めた3次元FEM解析により局部評価を行うこととし、時刻歴応答解析により得られた最大値を地震荷重として入力し、温度荷重などその他の荷重と組み合わせた評価を行うこととした。

3. 耐震安全性評価に関する検討結果

(1) 1号機の原子炉建屋

基準地震動 S_s を用いた時刻歴応答解析を実施した結果、残存している5階以下の耐震壁に発生するせん断ひずみは最大でも 0.12×10^{-3} であり、評価基準値である 4×10^{-3} を大きく下回っており、十分な安全性を有しているものと評価している（結果的にはおおむね弾性範囲と言える状態であった。）。したがって、耐震安全上重要な設備である「原子炉圧力容器」、「原子炉格納容器」、「使用済燃料プール」などに影響を及ぼすおそれはないものと評価している。

(添付資料-1)

さらに、5月5日に報告済みの「福島第一原子力発電所第1号機における燃料域上部まで原子炉格納容器を水で満たす措置の実施に係る報告書」からの一部を引用するが、格納容器を水で満たした場合の結果と今回の解析結果はそれほど大きく異なるものではない。このことは、原子炉建屋における重量分布が多少変化したとしても、その影響は小さいことを示しているものと考えられる。また、現段階で原子炉格納容器の水は目標水位レベルには達していないが、特に問題が生じることはないものと考えられる。

(添付資料-2)

(2) 4号機の原子炉建屋

基準地震動 S_s を用いた時刻歴応答解析を実施した結果、残存している5階以下の耐震壁に発生するせん断ひずみは最大でも 0.17×10^{-3} であり、評価基準値である 4×10^{-3} を大きく下回っており、十分な安全性を有しているものと評価している（結果的にはおおむね弾性範囲と言える状態であった。）。したがって、耐震安全上重要な設備である「原子炉圧力容器」、「原子炉格納容器」、「使用済燃料プール」などに影響を及ぼすおそれはないものと評価している。

(添付資料-3)

3次元FEM解析による局部評価結果としては、次のような評価を行った。

- ・ 基準地震動 S_s によって作用する地震荷重とその他の荷重を組み合わせた結果、使用済燃料プールにおいて鉄筋の最大ひずみは 1230×10^{-6} であり、評価基準値

である塑性限界ひずみの 5000×10^{-6} に対して十分余裕がある（結果として、解析上の弾性限界ひずみの 1683×10^{-6} よりも小さい。）。また、面外せん断力において最も余裕が少ない部位での発生応力は 800 (N/mm) であり、評価基準値である 1150 (N/mm) に対して十分余裕がある。

- ・ 爆発によって、残存する床や壁にひび割れが生じ、剛性低下があったと仮定したパラメータスタディの結果によると、使用済燃料プールの評価結果に大きな差異は生じなかった。
- ・ 4階で火災があった可能性が高く、その火災エリアにおいてはコンクリート表面から結晶水が失われ、部分的な剛性低下があったと仮定したパラメータスタディの結果によると、使用済燃料プールの評価結果に大きな差異は生じなかった。
- ・ 現在の使用済燃料プールの水温は 90°C 程度であり、外気温は低い場合でも 10°C と仮定した解析を標準としているが、冬までこの状態が継続した場合を考えて、水温が 100°C で外気温が 0°C としたパラメータスタディを実施した。この場合には標準ケースよりも余裕が少なくなるものの、評価基準値に対しては十分な余裕を確保していることを確認した。

(添付資料-4)

4. 耐震補強工事等の対策に関する検討結果

(1) 1号機の原子炉建屋

耐震安全性評価の結果として、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所は無かったことから、現段階では緊急的な耐震補強工事等の対策は考えていない。また、現段階では建物内部の線量レベルが高いことから立入が難しいという面もある。今後、環境改善が進み建物内部の線量レベルが作業を行うのに十分な程度に低減された場合には、余裕度向上の観点からの補強工事を行うことも考慮にいて、検討に取り組んでいくこととする。なお、5階以上に残存している鉄骨部分に関しては、今後環境改善が進み使用済燃料プールからの燃料取り出しを行う段階になった場合などには、使用済燃料への影響を踏まえた対策の検討を行うこととする。

(2) 4号機の原子炉建屋

耐震安全性評価の結果として、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所は無かったことから、現段階では緊急的な耐震補強工事等の対策は考えていない。ただし、4号機の原子炉建屋の1階と2階については、比較的線量レベルが低かったことから、使用済燃料プールの底部において裕度向上を目的とした補強工事を計画し、現段階では準備工事を実施中である。この補強工事の効果について、3次元 FEM 解析による

局部評価のモデルに取り込んで評価を行った結果、余裕度の向上に寄与していることを確認した。なお、5階以上に残存している鉄筋コンクリート構造の架構と鉄骨構造の屋根トラスに関しては、今後環境改善が進み使用済燃料プールからの燃料取り出しを行う段階になった場合などには、使用済燃料への影響を踏まえた対策の検討を行うこととする。

(添付資料-4)

5. まとめ

本報告書においては、1号機の原子炉建屋及び4号機の原子炉建屋について耐震安全性評価を実施し、安全性に問題がないことを確認した。なお、現在4号機において実施中の使用済燃料プールの底部における補強工事についての効果が確認された。今後は、5階以上が大きく損傷し、5階以下の壁もかなり損傷している3号機の評価がまとまった時点で、追加報告を行う予定である。

添付資料－ 1 : 1号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細

1. 解析評価方針

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性評価は、基準地震動 Ss を用いることを基本とし、建物・構築物や地盤の応答性状を適切に表現できるモデルを設定した上で行う。なお、基準地震動 Ss-3 については、基準地震動 Ss-1 及び Ss-2 の応答結果に比べて、過去の計算例（付録 1-1 参照）から明らかに小さいことが分かっているため、今回の検討では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。

1号機原子炉建屋については、地震後の津波によって原子炉の冷却機能が喪失し、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷している。ここでは、原子炉建屋の損傷状況は写真を基に推定し、損傷状況を地震応答解析モデルに反映することとする。

原子炉建屋の構造への影響及び耐震性の評価は、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 (4.0×10^{-3}) との比較により行う。

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。

1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。

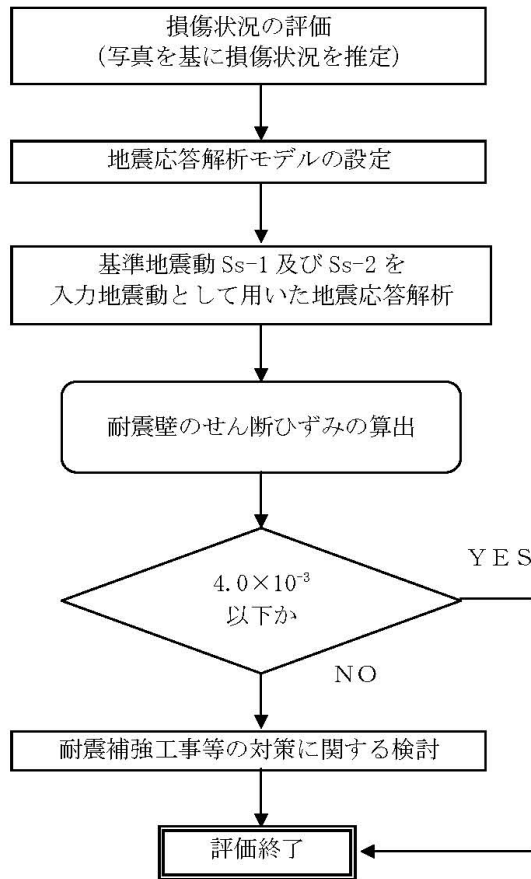


図-1.1 1号機原子炉建屋の地震応答解析の評価手順例

2. 損傷状況の評価

1号機原子炉建屋については、地震後の津波によって原子炉の冷却機能が喪失し、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷している。原子炉建屋の損傷状況は写真を基に推定し、損傷状況を地震応答解析モデルに反映することとする。また、外観写真から判断できない部位については、建屋内の調査結果等の現状で得られている情報に基づいて、損傷の有無を評価した。

各部位の損傷状況評価の考え方を下記に示す。

a. 外壁・屋根トラス

外観の写真から損傷を確認できるオペレーティングフロアより上の外壁・屋根トラスについては、損傷部位として評価した。なお、オペレーティングフロアより下部の外壁については、写真より損傷が確認できないため、損傷は無いものと評価した（図-2.1）。なお、写真は3月24日に撮影されたものを参考としているが、その後も外壁が崩落する等の変化は確認されていない。

b. その他部位

オペレーティングフロアより下部の外壁については損傷が確認されていないことから、オペレーティングフロアより下部の内壁等の部位についても損傷が無いものと評価した。



東面



西面



南面



北面

図-2.1 外壁の状況

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

3. 解析に用いる入力地震動

1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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

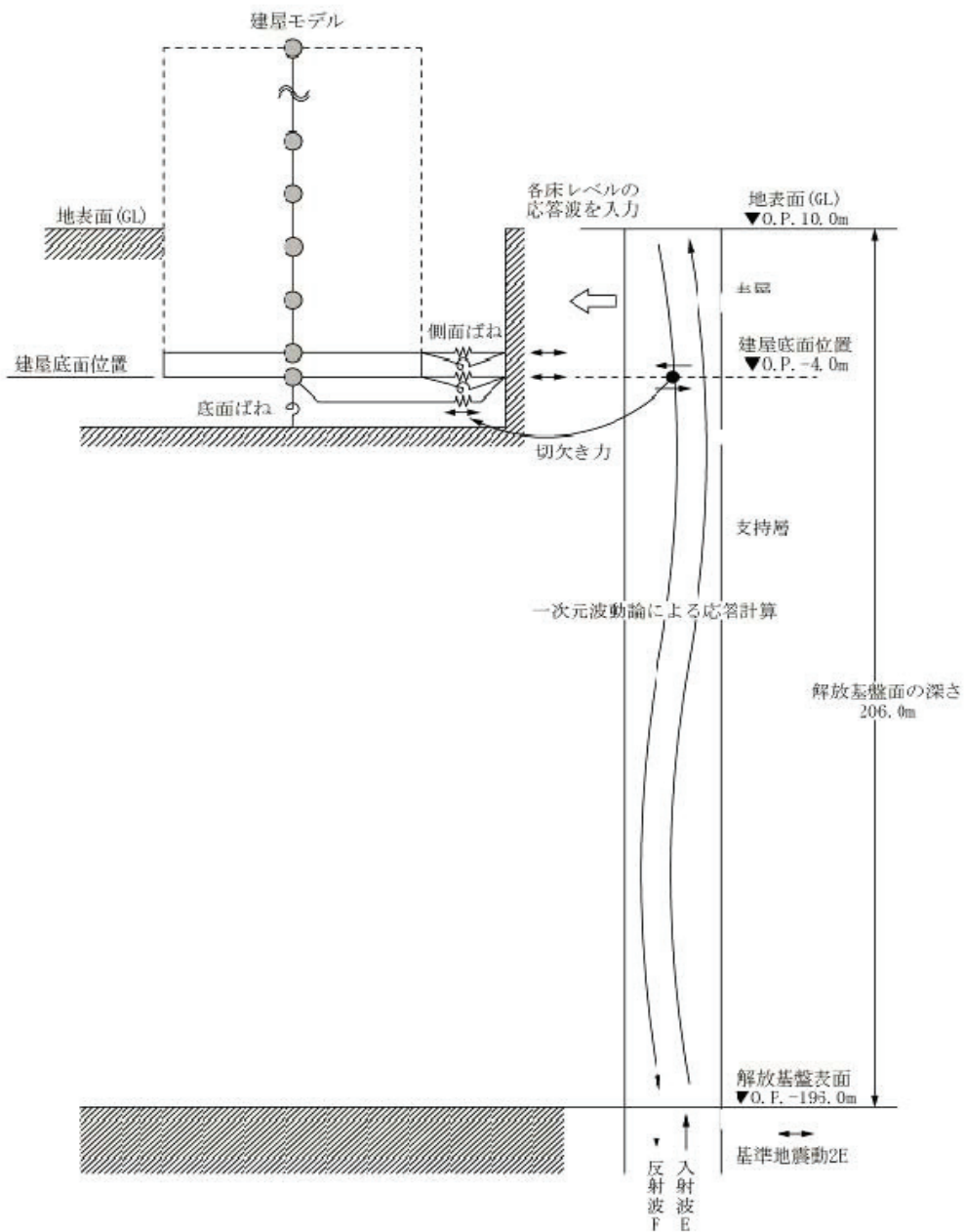


図-3.1 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図

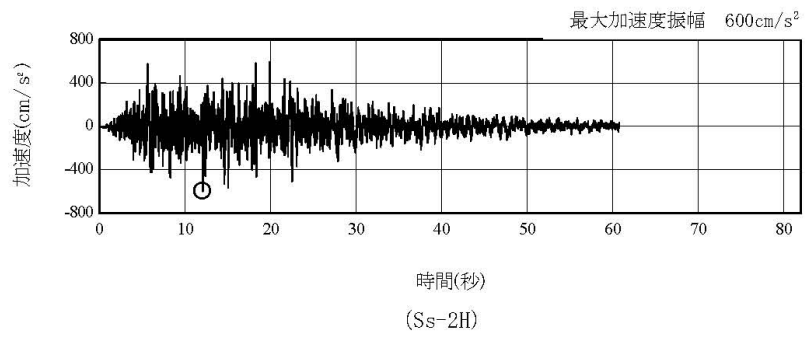
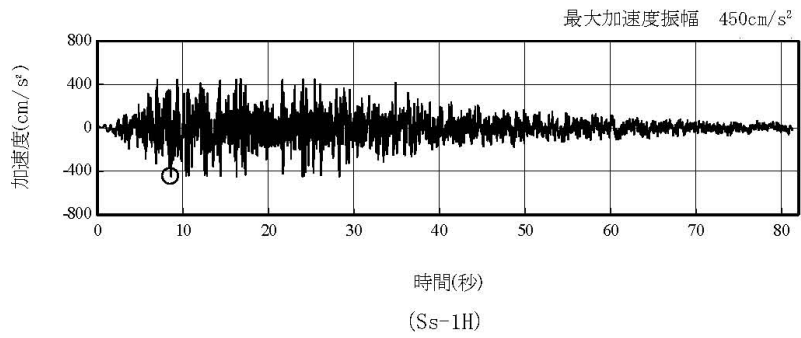


図-3.2 解放基盤表面位置における地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）

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、「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(改訂版)」(原管発官 21 第 110 号 平成 21 年 6 月 19 日付け)にて作成した地震応答解析モデルを基に、次の項目について修正を加え、新たな地震応答解析モデルを構築することとしている。

1号機原子炉建屋については、地震後の津波によって原子炉の冷却機能が喪失し、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷していることから、「2. 損傷状況の評価」で評価した損傷状況を基に解析モデルを作成する。なお、オペレーティングフロア上部の損傷した鉄骨フレーム及び屋根はモデル化しないこととし、崩れた部分の重量は下階の床で支持されていると仮定する。1号機原子炉建屋の損傷状況(立面図)を図-4.1に、損傷状況(平面図)を図-4.2に示す。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

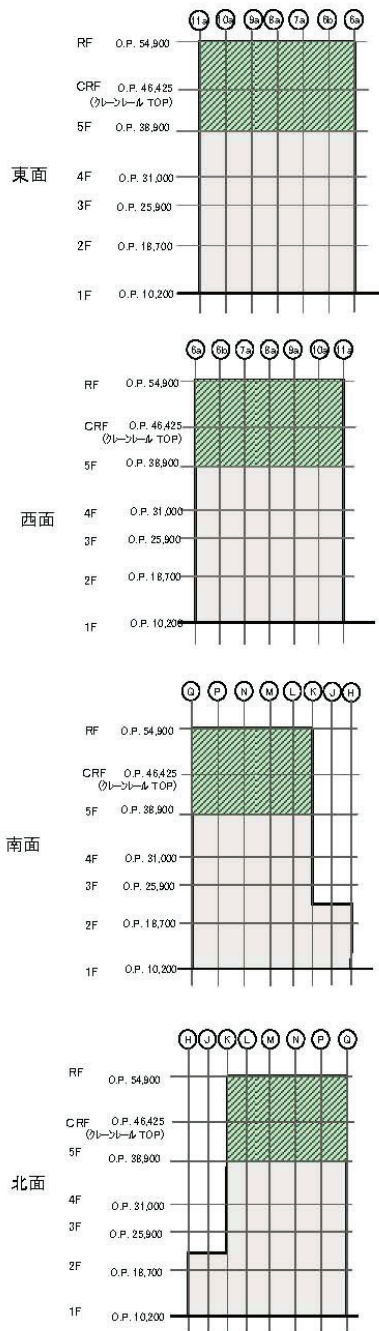


図-4.1 1号機原子炉建屋の損傷状況（立面図）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

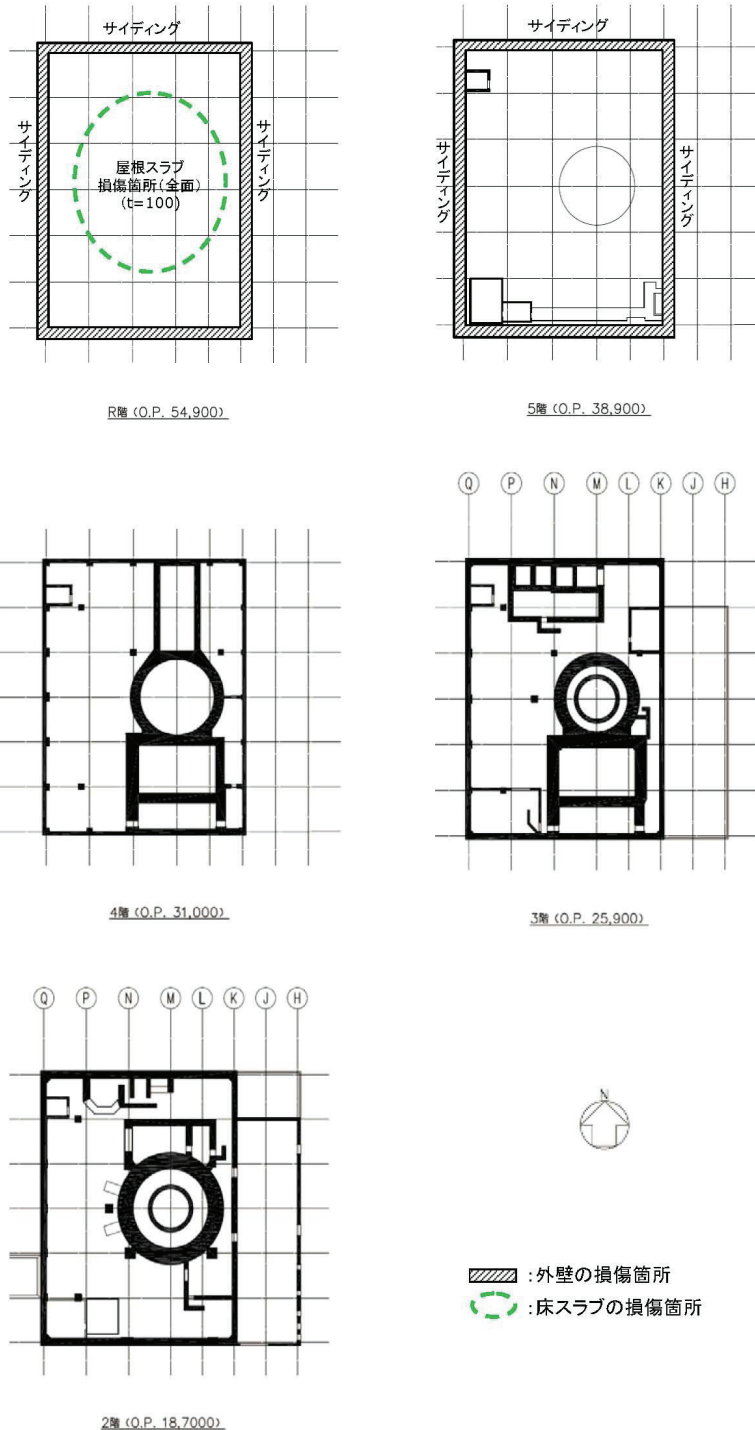


図-4.2 1号機原子炉建屋の損傷状況(平面図)

(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-4.3 および図-4.4 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-4.5 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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

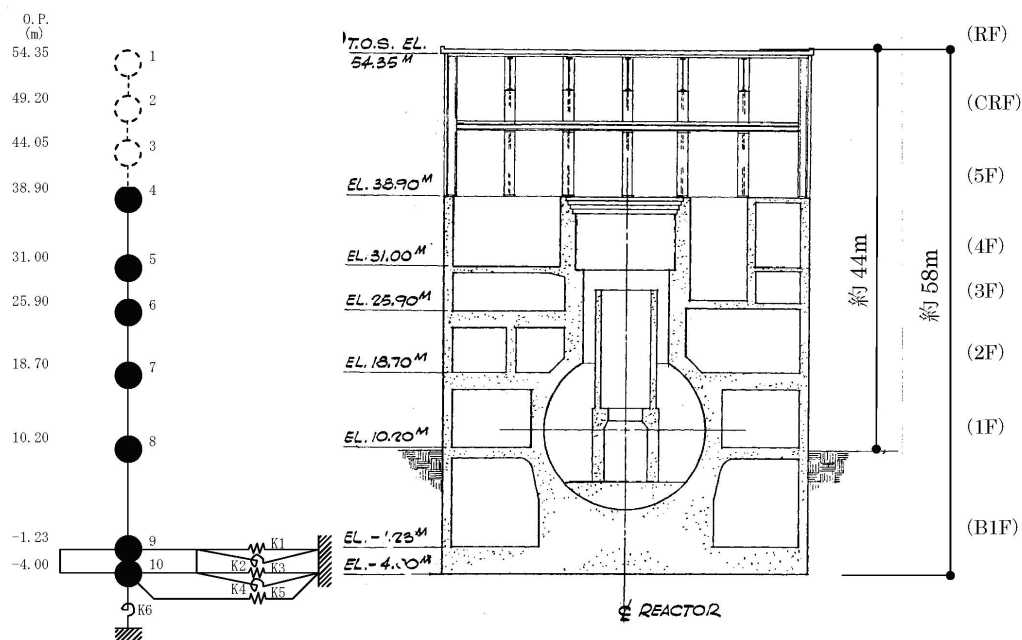


図-4.3 1号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS方向)

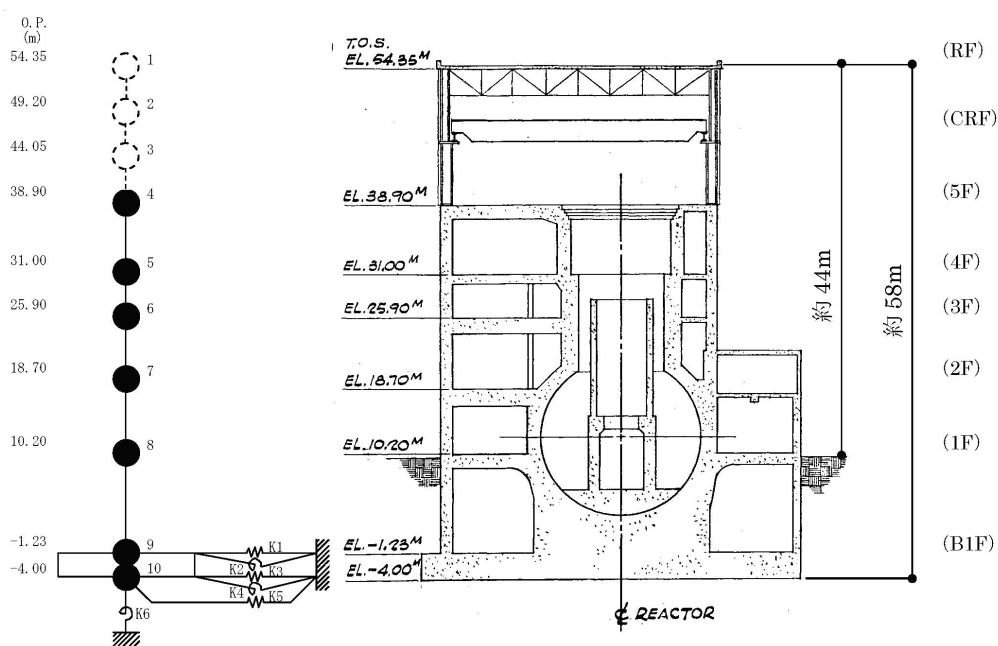


図-4.4 1号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (EW方向)

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 _c (N/mm ²)	ヤング係数*2 E (N/mm ²)	せん断弾性係数*2 G (N/mm ²)	ポアソン 比 ν	単位体積重量*3 γ (kN/m ³)
	35.0	2.57×10 ⁴	1.07×10 ⁴	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 $A_g(\text{m}^2)$	断面2次モーメント I(m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	—	—	—	—
4	58,690	84.43	—	—
5	67,910	97.77	135.0	16,012
6	77,220	111.11	160.8	21,727
7	87,200	125.53	132.8	24,274
8	146,020	210.16	155.6	36,481
9	147,070	211.73	294.0	52,858
10	62,400	89.83	1,914.3	275,530
合計	646,510		ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m ²) ポアソン比 ν 0.20 減衰 λ 5% (鉄骨部 2%) 基礎形状 41.56m(NS方向) × 43.56m(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 $A_g(\text{m}^2)$	断面2次モーメント I(m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	—	—	—	—
4	58,690	48.34	—	—
5	67,910	55.90	102.7	9,702
6	77,220	63.55	163.9	13,576
7	87,200	125.53	131.6	14,559
8	146,020	210.16	197.8	36,427
9	147,070	259.97	294.0	52,858
10	62,400	110.32	1,914.3	338,428
合計	646,510		ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m ²) ポアソン比 ν 0.20 減衰 λ 5% (鉄骨部 2%) 基礎形状 41.56m(NS方向) × 43.56m(EW方向)	

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

表-4.3 地盤定数

(S_S-1)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 V _s (m/s)	単位体積 重量 γ _t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

(S_S-2)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 V _s (m/s)	単位体積 重量 γ _t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

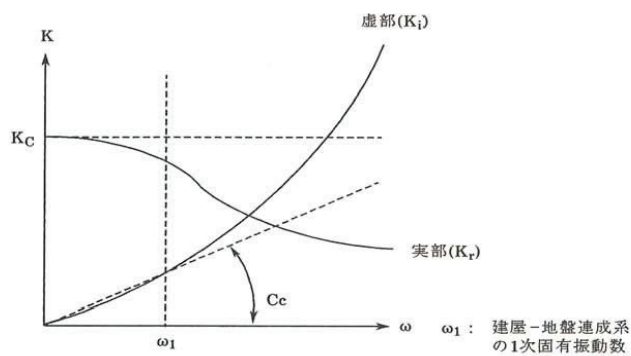


図-4.5 地盤ばねの近似

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

5. 地震応答解析結果

地震応答解析により求められた NS 方向, EW 方向の最大応答加速度を図-5.1 および図-5.2
 に示す。

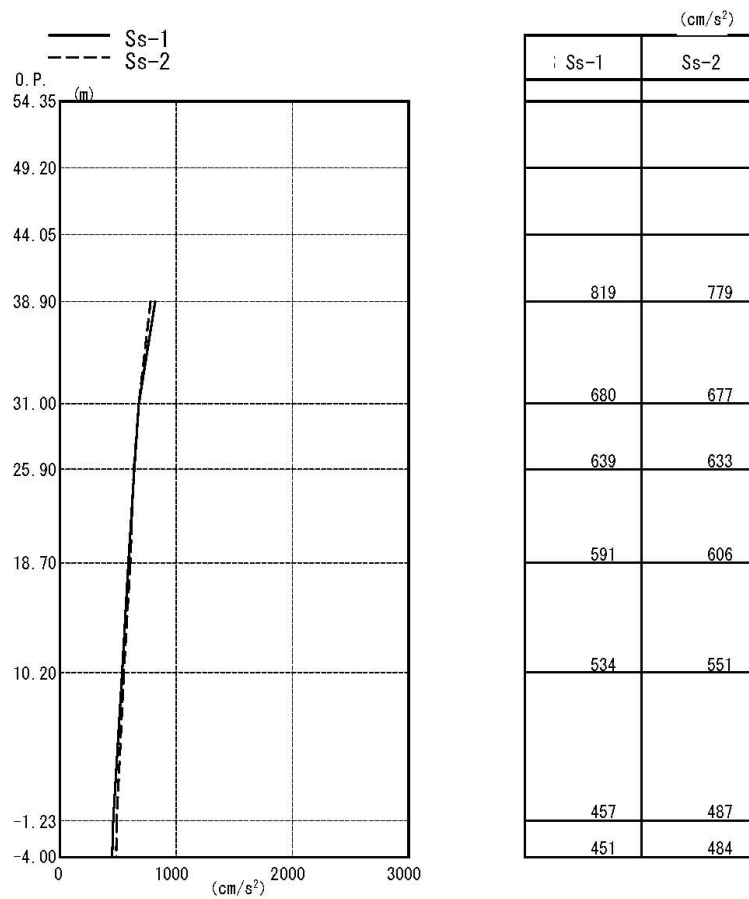


図-5.1 最大応答加速度 (NS 方向)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

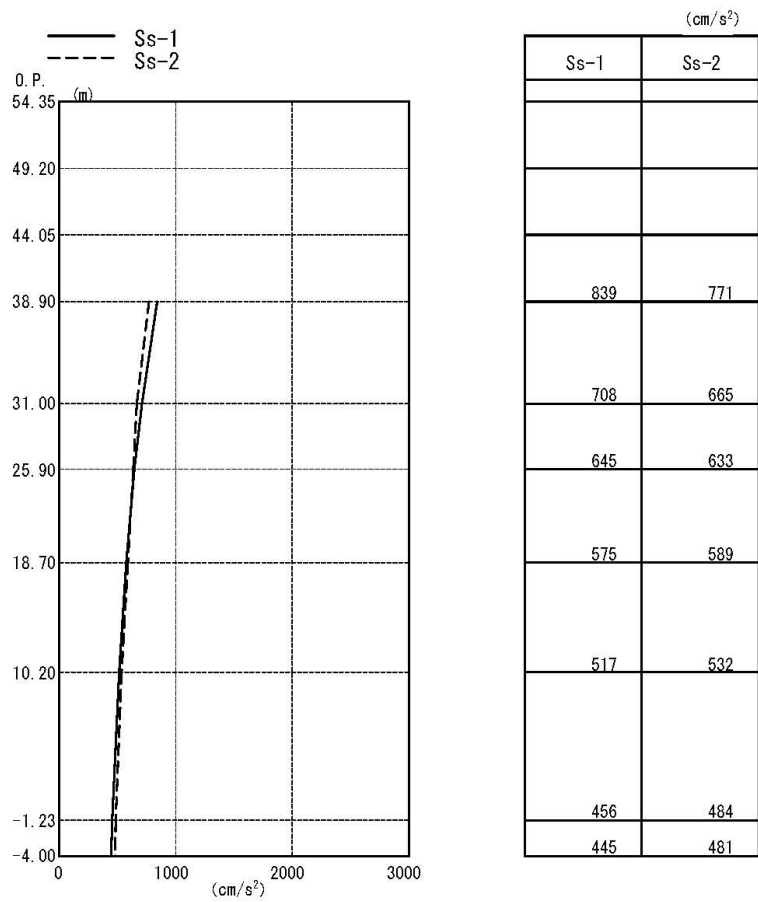


図-5.2 最大応答加速度 (EW 方向)

6. 耐震安全性評価結果

図-6.1, 図-6.2 及び図-6.3, 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 0.12×10^{-3} (Ss-1H 及び Ss-2H, NS 方向, 1F) であり, 評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

以上のことから, 原子炉建屋は耐震安全上重要な設備に波及的影響を与えないものと評価した。

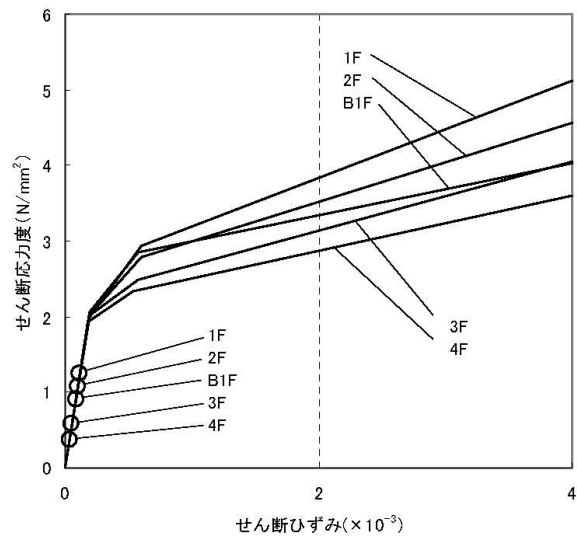


図-6.1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, NS 方向)

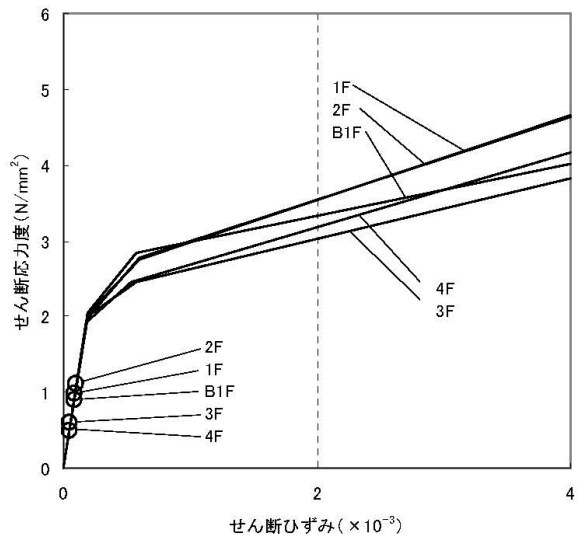


図-6.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, EW 方向)

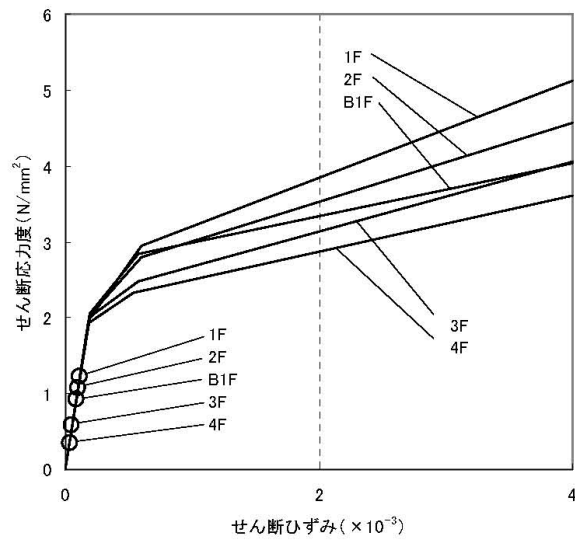


図-6.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, NS 方向)

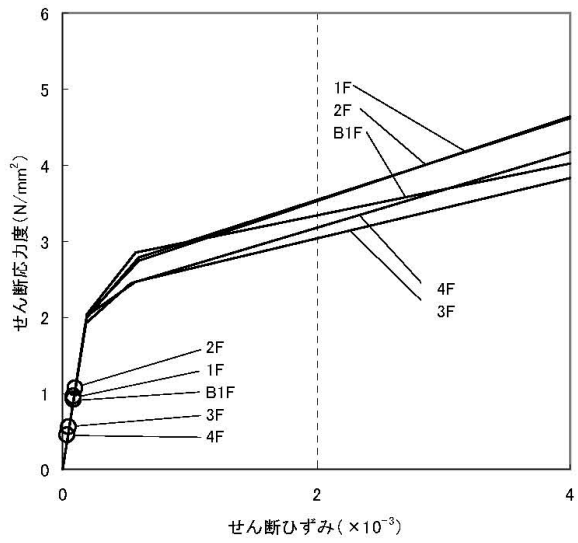


図-6.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, EW 方向)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

付録 1-1

『発電所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

「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(改訂版)」(原管発官 21 第 110 号 平成 21 年 6 月 19 日付け)に記載している 1 号機原子炉建屋の耐震安全性評価結果を抜粋して以下に示す。

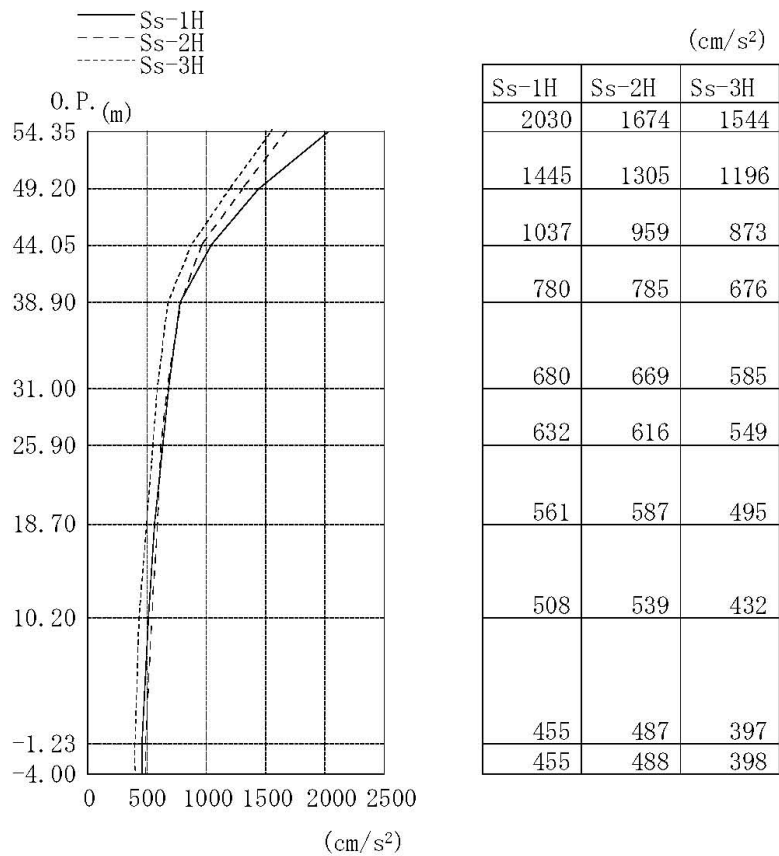


図-1 最大応答加速度 (NS 方向)

付 1-1.1

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

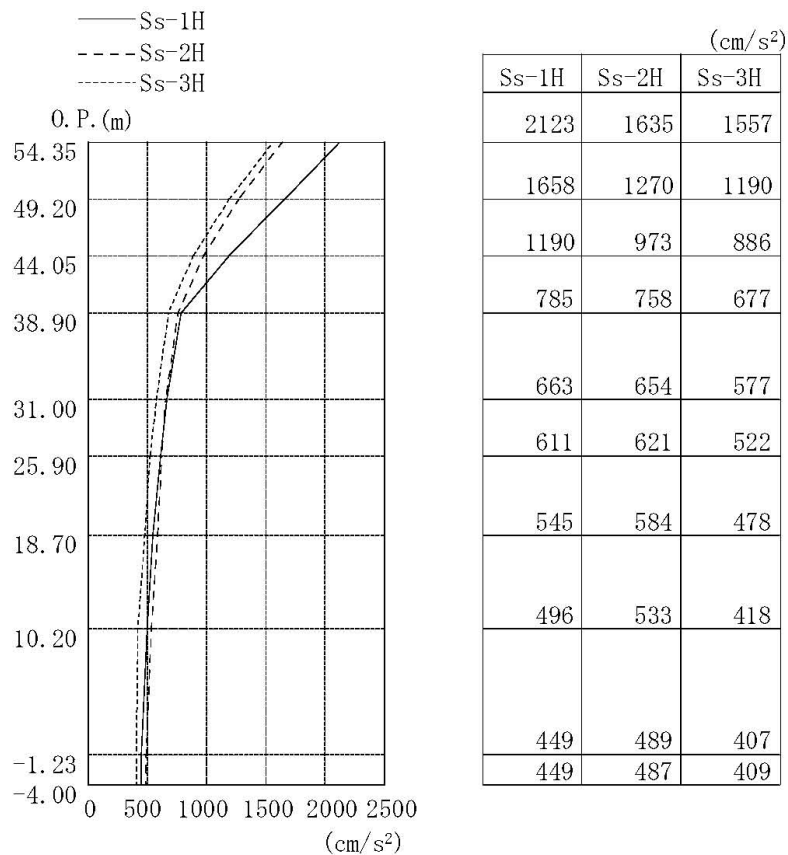


図-2 最大応答加速度 (EW 方向)

付 1-1.2

表-1 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS 方向)

階	S _s -1H	S _s -2H	S _s -3H	($\times 10^{-3}$)
				評価基準値
4F	0.04	0.04	0.03	2.0以下
3F	0.06	0.06	0.05	
2F	0.10	0.10	0.09	
1F	0.12	0.12	0.10	
B1F	0.08	0.09	0.07	

表-2 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW 方向)

階	S _s -1H	S _s -2H	S _s -3H	($\times 10^{-3}$)
				評価基準値
4F	0.05	0.05	0.04	2.0以下
3F	0.06	0.05	0.05	
2F	0.10	0.10	0.09	
1F	0.09	0.09	0.08	
B1F	0.08	0.09	0.07	

以上

付 1-1.3

添付資料－２：「福島第一原子力発電所第１号機における燃料域上部まで
原子炉格納容器を水で満たす措置の実施に係る報告書」
（平成 23 年 5 月 5 日）からの一部抜粋

原子炉格納容器内の水位上昇に伴う原子炉建屋の構造への影響及び耐震性評価結果

1. 解析評価方針

原子炉格納容器内の水位上昇に伴う原子炉建屋の構造への影響及び耐震性評価は、設計用地震力（基準地震動 Ss による地震力）を用いることを基本とし、建物・構築物や地盤の応答性を適切に表現できるモデルを設定した上で行う。なお、基準地震動 Ss-3 については、基準地震動 Ss-1 及び Ss-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、今回の検討では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。

1号機原子炉建屋については、地震後の津波によって原子炉の冷却機能が喪失し、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷している。ここでは、原子炉建屋の損傷状況は写真を基に推定し、損傷状況を地震応答解析モデルに反映することとする。

なお、原子炉格納容器内の水位上昇に伴う質量増分は原子炉建屋モデルの質点に質量を加算する。

原子炉建屋の構造への影響及び耐震性の評価は、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 (4.0×10^{-3}) との比較により行う。

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。

上記の検討により、耐震余裕度が比較的小さい場合には、さらに詳細な検討を行うこととする。

1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。

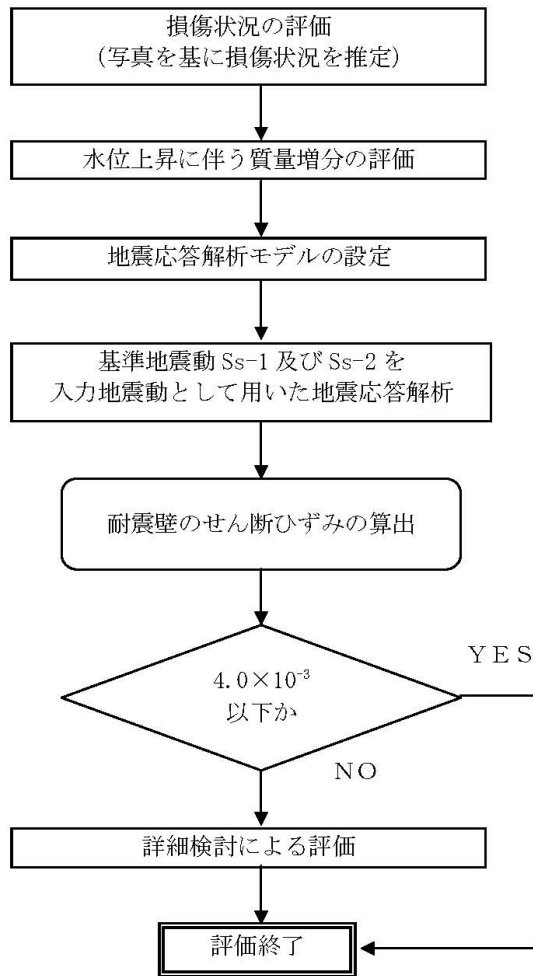


図-1.1 1号機原子炉建屋の地震応答解析の評価手順例

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

2. 解析に用いる入力地震動

1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 $Ss-1$ 及び $Ss-2$ 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-2.1 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 Ss 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 $Ss-1$ 及び $Ss-2$ の加速度波形について、図-2.2 に示す。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

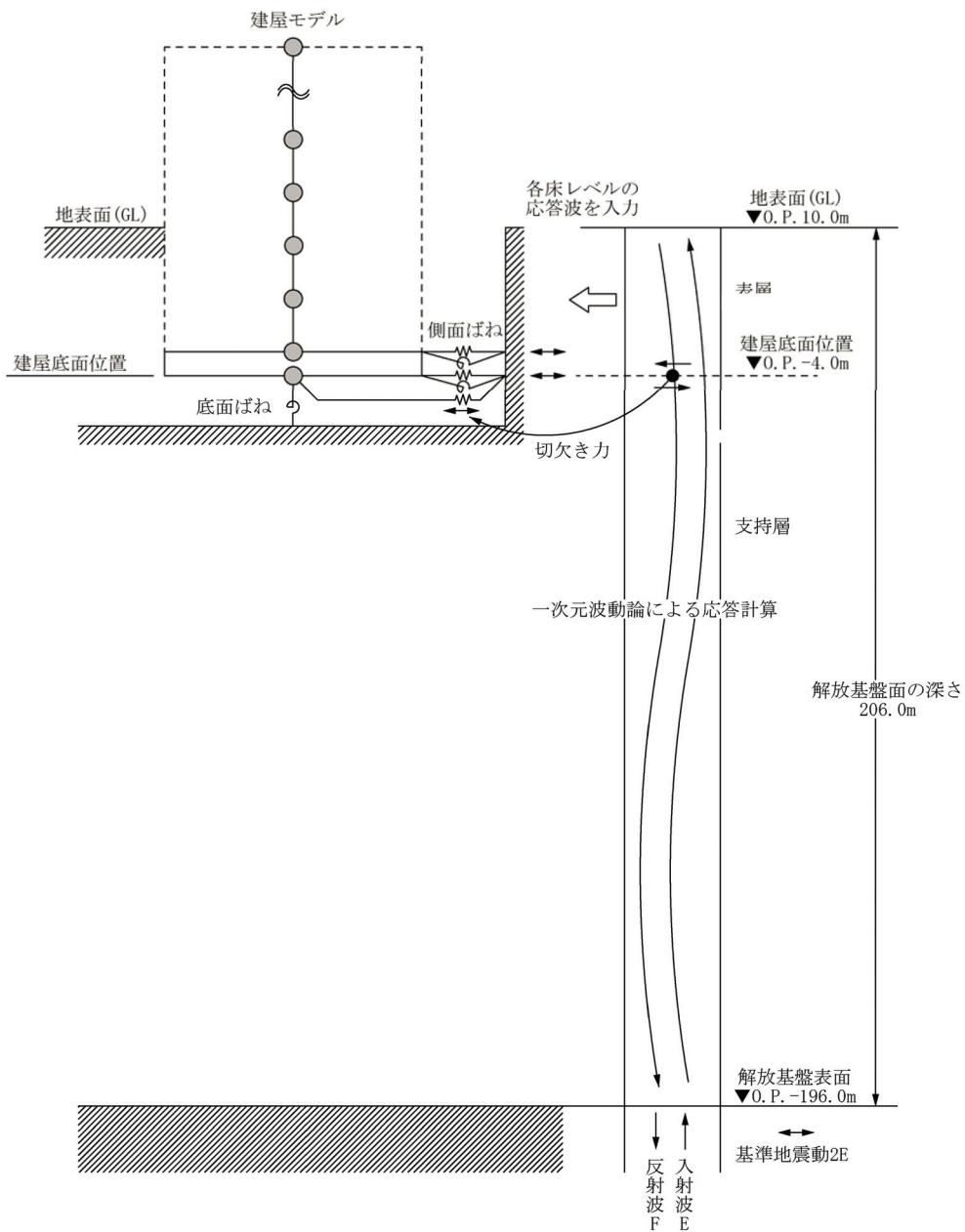


図-2.1 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図

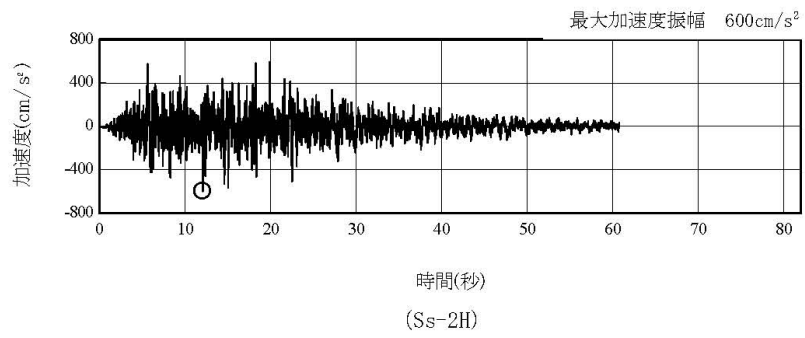
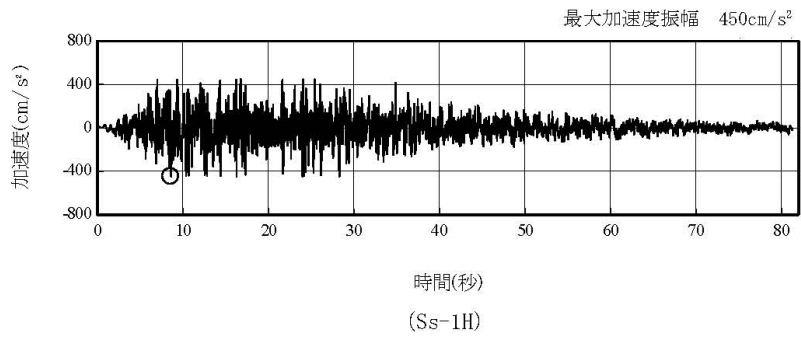


図-2.2 解放基盤表面位置における地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）

3. 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、「2. 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、「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(改訂版)」(原管発官 21 第 110 号 平成 21 年 6 月 19 日付け)にて作成した地震応答解析モデルを基に、次の 2 項目について修正を加え、新たな地震応答解析モデルを構築することとしている。

- ① 1号機原子炉建屋については、地震後の津波によって原子炉の冷却機能が喪失し、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷している。原子炉建屋の損傷状況は写真を基に推定し、オペレーティングフロア上部の損傷した鉄骨フレーム及び屋根はモデル化しないこととする。また、崩れた部分の重量は下階の床で支持されていると仮定する。1号機原子炉建屋の損傷状況(立面図)を図-3.1に、損傷状況(平面図)を図-3.2に示す。
- ② 原子炉格納容器内の水位上昇に伴う質量増分は、原子炉格納容器と原子炉建屋との接合部位における地震力の伝達を考慮した上で、原子炉建屋モデルの複数の質点に質量を分配して加算する。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

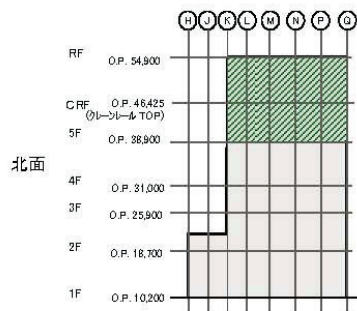
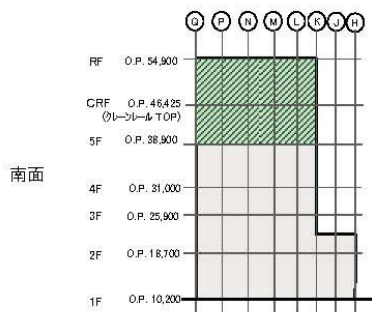
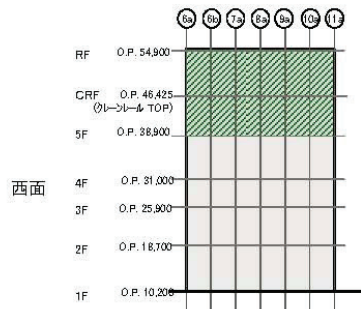
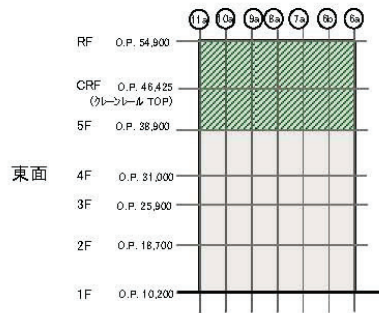


図-3.1 1号機原子炉建屋の損傷状況（立面図）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

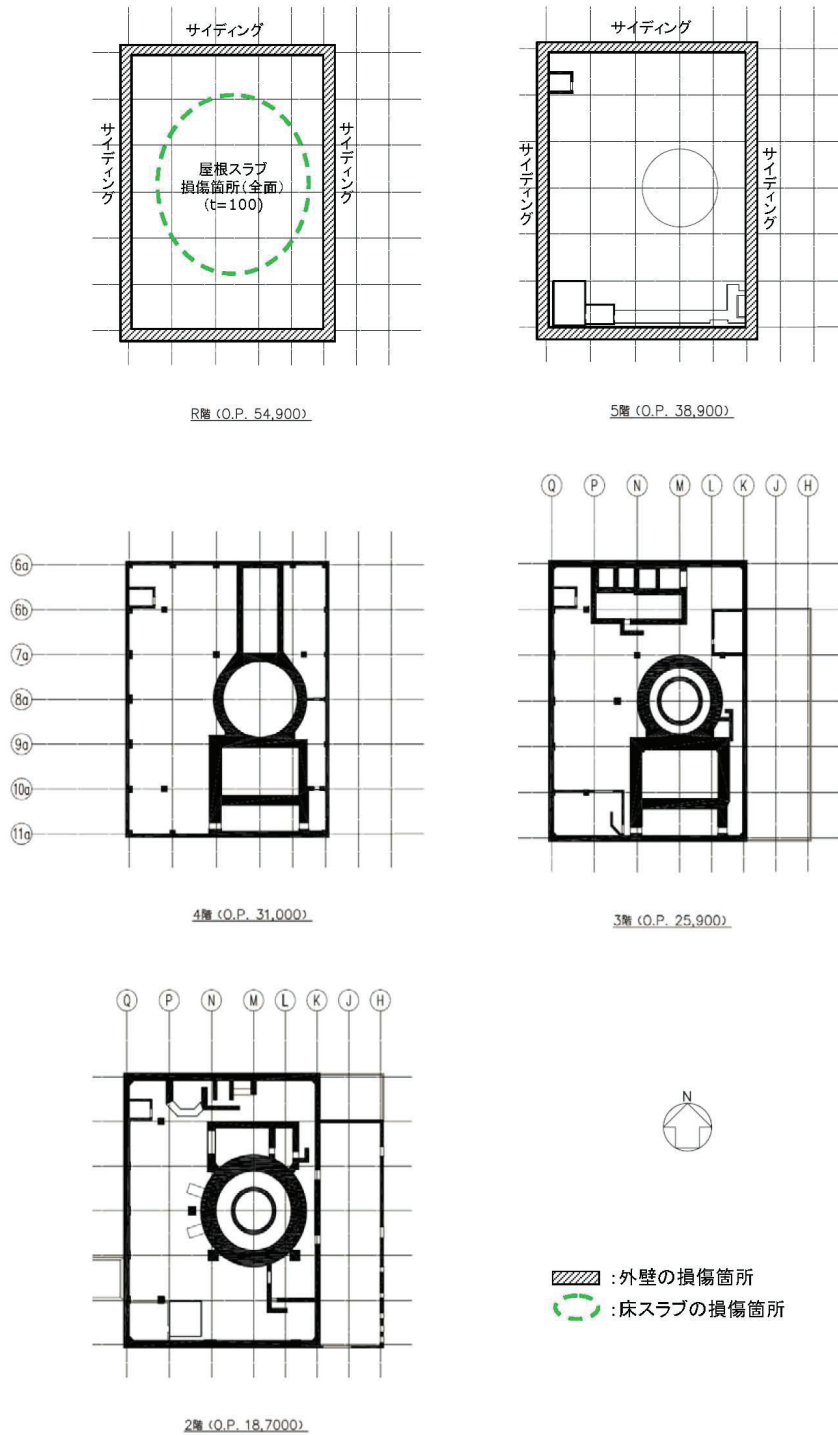


図-3.2 1号機原子炉建屋の損傷状況（平面図）

(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-3.3 および図-3.4 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-3.1 に、建屋解析モデルの諸元を表-3.2 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-3.3 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-3.5 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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

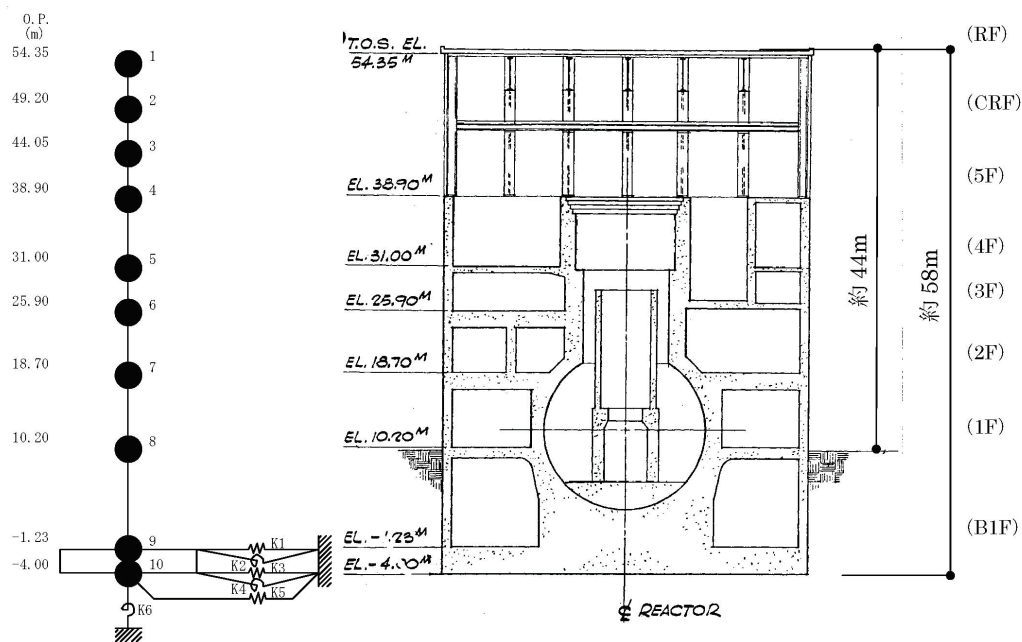


図-3.3 1号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS方向)

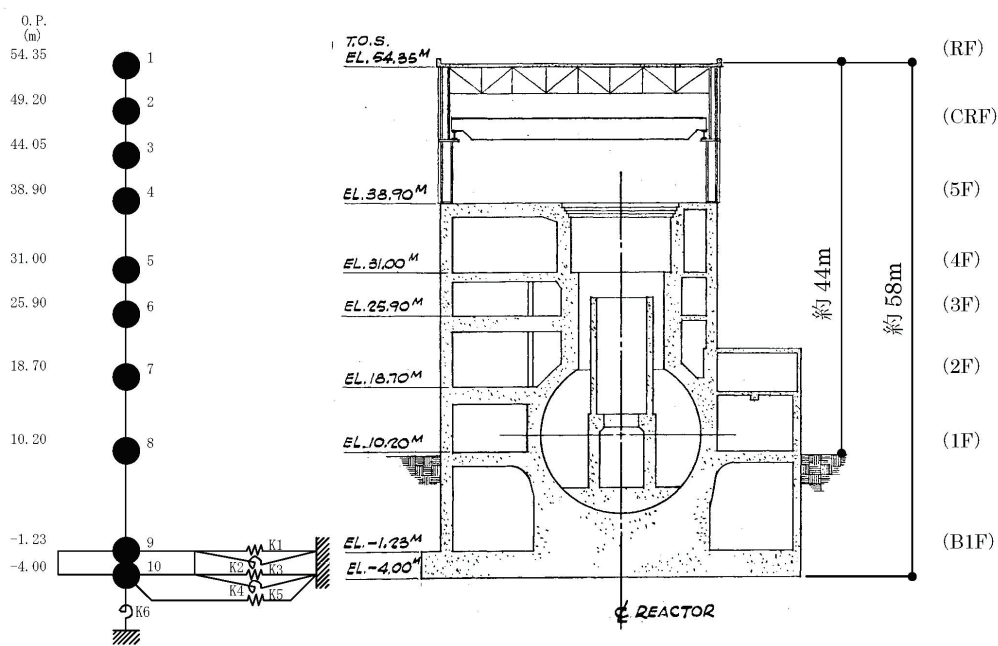


図-3.4 1号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (EW方向)

表-3.1 地震応答解析に用いる物性値

コンクリート	強度*1 F _c (N/mm ²)	ヤング係数*2 E (N/mm ²)	せん断弾性係数*2 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量*3 γ (kN/m ³)
	35.0	2.57×10 ⁴	1.07×10 ⁴	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-3.2 建屋解析モデルの諸元

(NS 方向)

質点番号	質点重量 *1 W (kN)	回転慣性重量 *1 $I_g(\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_g(\text{m}^2)$	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	—	—	—	—
4	58,690	84.43	—	—
5	67,910	97.77	135.0	16,012
6	80,900 (3,680)	116.41 (5.30)	160.8	21,727
7	87,200	125.53	132.8	24,274
8	166150 (20,130)	239.13 (28.97)	155.6	36,481
9	177,480 (30,410)	255.51 (43.78)	294.0	52,858
10	62,400	89.83	1,914.3	275,530
合計	700,730 (54,220)	ヤング係数 E_c せん断弾性係数 G ポアソン比 ν 減衰 γ 基礎形状	2.57×10^7 (kN/m ²) 1.07×10^7 (kN/m ²) 0.20 5% (鉄骨部 2%) 41.56m(NS方向) × 43.56m(EW方向)	

*1: () は原子炉格納容器内の水位上昇による増分を示す

(EW 方向)

質点番号	質点重量 *1 W (kN)	回転慣性重量 *1 $I_g(\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_g(\text{m}^2)$	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	—	—	—	—
4	58,690	48.34	—	—
5	67,910	55.90	102.7	9,702
6	80,900 (3,680)	66.58 (3.03)	163.9	13,576
7	87,200	125.53	131.6	14,559
8	166150 (20,130)	239.13 (28.97)	197.8	36,427
9	177,480 (30,410)	313.72 (53.75)	294.0	52,858
10	62,400	110.32	1,914.3	338,428
合計	700,730 (54,220)	ヤング係数 E_c せん断弾性係数 G ポアソン比 ν 減衰 γ 基礎形状	2.57×10^7 (kN/m ²) 1.07×10^7 (kN/m ²) 0.20 5% (鉄骨部 2%) 41.56m(NS方向) × 43.56m(EW方向)	

*1: () は原子炉格納容器内の水位上昇による増分を示す

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

表-3.3 地盤定数

(S_S-1)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 V _s (m/s)	単位体積 重量 γ _t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

(S_S-2)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 V _s (m/s)	単位体積 重量 γ _t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

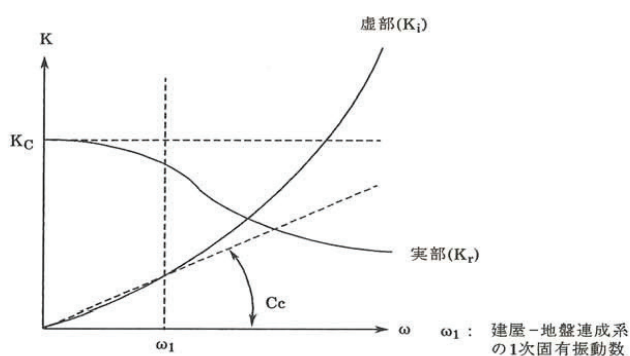


図-1.3.5 地盤ばねの近似

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

4. 地震応答解析結果

地震応答解析により求められた NS 方向, EW 方向の最大応答加速度を図-4.1 および図-4.2
 に示す。

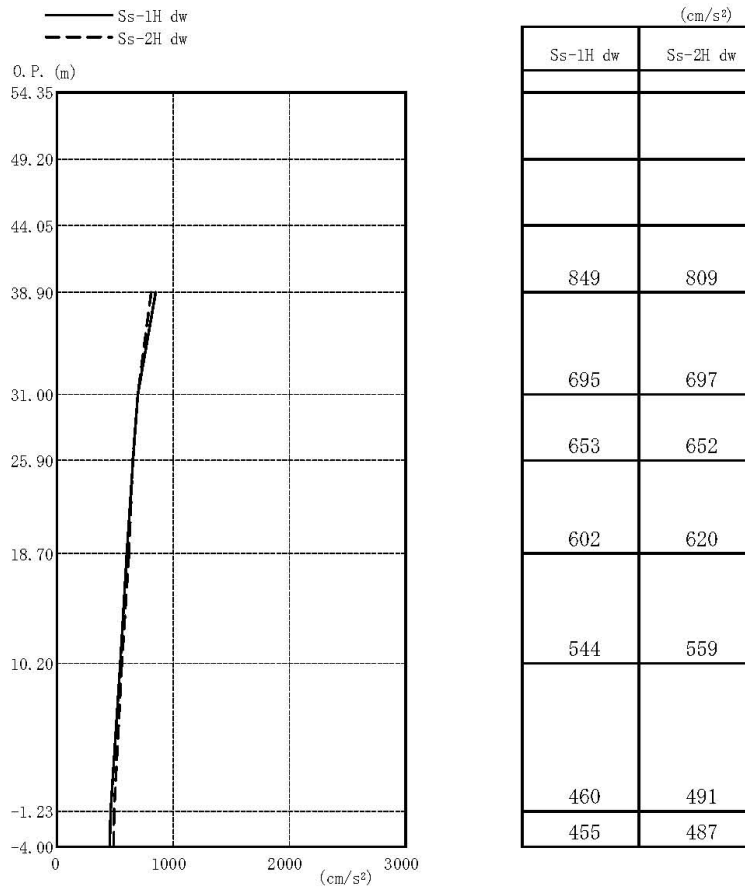


図-4.1 最大応答加速度 (NS 方向)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

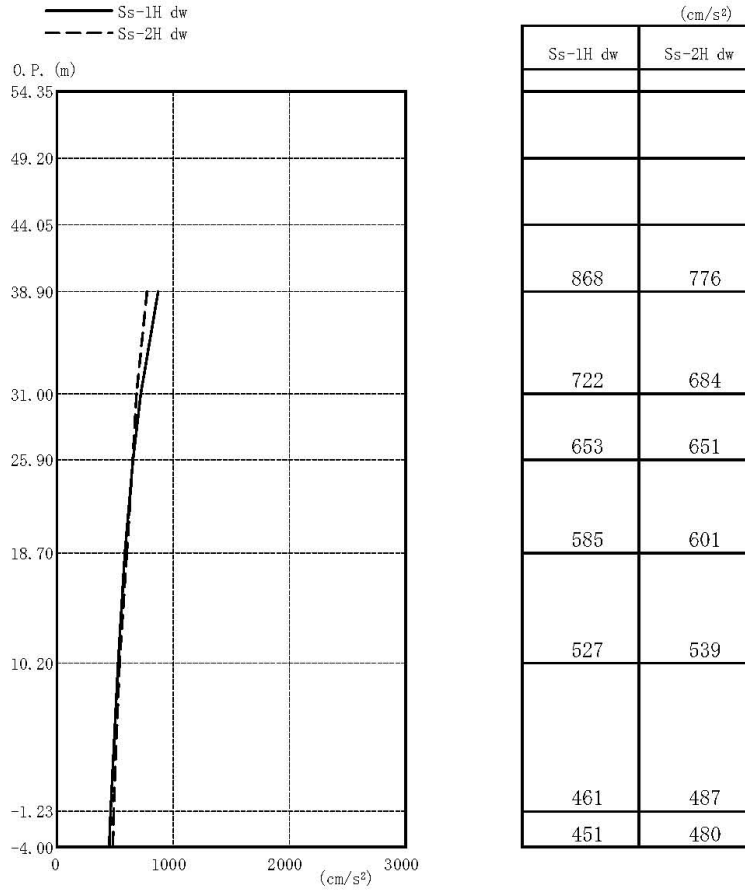


図-4.2 最大応答加速度 (EW 方向)

5. 耐震安全性評価結果

図-5.1, 図-5.2 及び図-5.3, 図-5.4 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 0.12×10^{-3} (Ss-1H, NS 方向, 1F) であり、評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

以上のことから、原子炉建屋は耐震安全上重要な設備に波及的影響を与えないものと評価した。

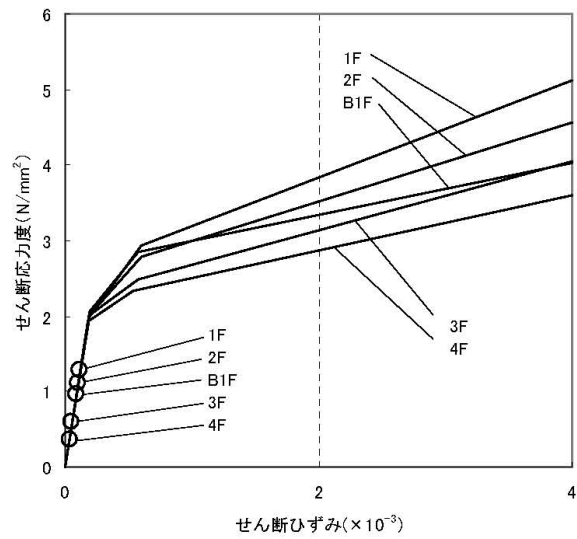


図-5.1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, NS 方向)

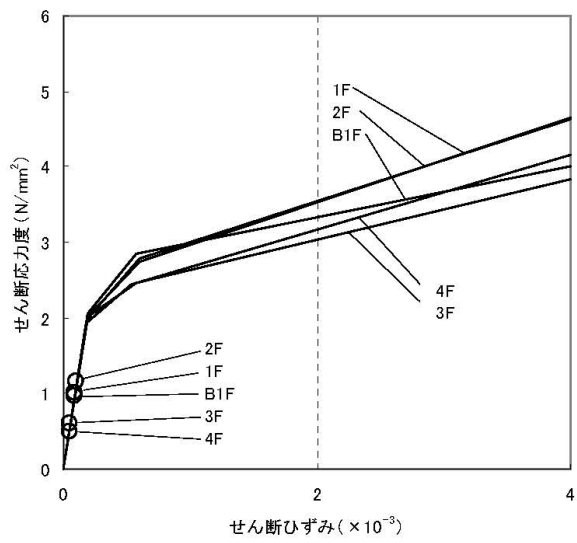


図-5.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, EW 方向)

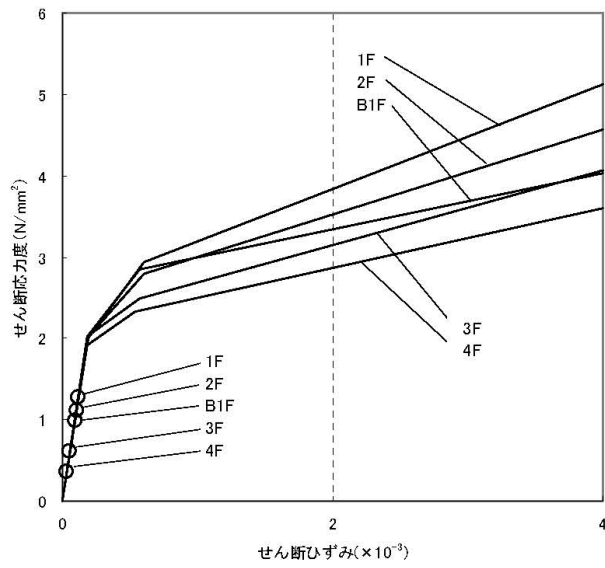


図-5.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, NS 方向)

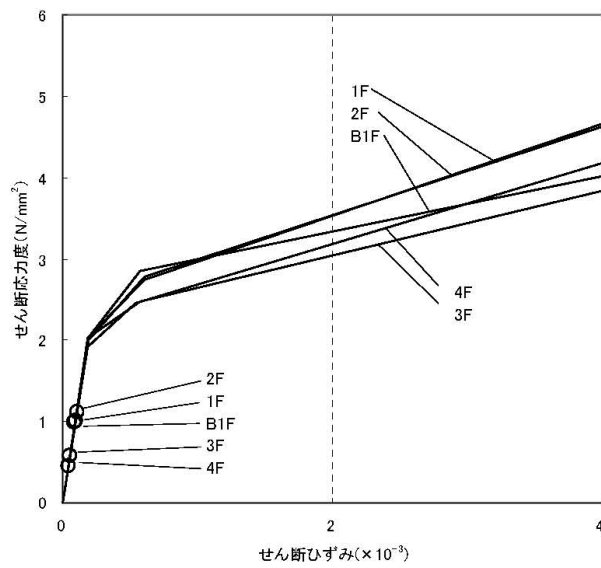


図-5.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, EW 方向)

添付資料－ 3 : 4号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細
(質点系モデルによる時刻歴応答解析による評価)

1. 解析評価方針

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性評価は、基準地震動 Ss を用いることを基本とし、建物・構築物や地盤の応答性状を適切に表現できるモデルを設定した上で行う。なお、基準地震動 Ss-3 については、基準地震動 Ss-1 及び Ss-2 の応答結果に比べて、過去の計算例（付録 3-1 参照）から明らかに小さいことが分かっているため、今回の検討では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。

4号機原子炉建屋については、原因の特定には至っていないものの、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷している。ここでは、原子炉建屋の損傷状況は写真を基に推定し、損傷状況を地震応答解析モデルに反映することとする。

原子炉建屋の構造への影響及び耐震性の評価は、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 (4.0×10^{-3}) との比較により行う。

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。

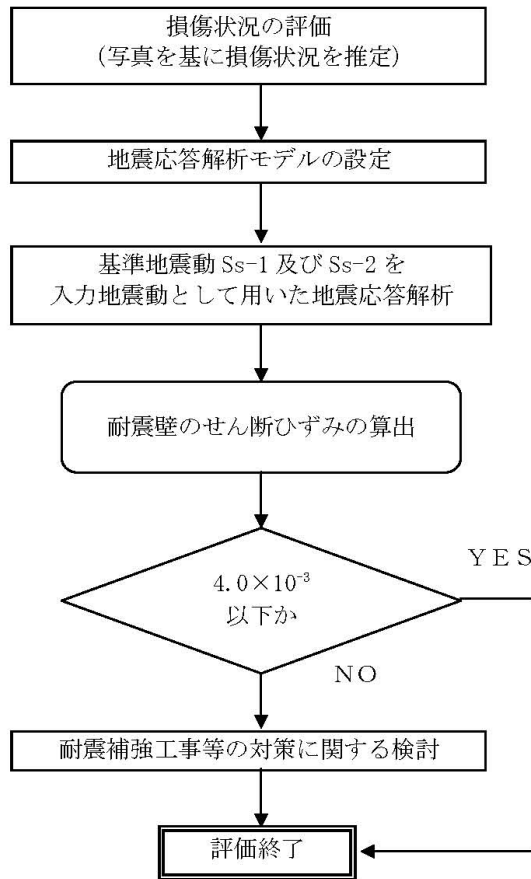


図-1.1 4号機原子炉建屋の地震応答解析の評価手順例

2. 損傷状況の評価

4号機原子炉建屋については、原因の特定には至っていないものの、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷している。原子炉建屋の損傷状況は写真を基に推定し、損傷状況を地震応答解析モデルに反映することとする。また、外観写真から判断できない部位については、建屋内の調査結果等の現状で得られている情報に基づいて、損傷の有無を評価した。なお、参考にした写真の撮影日等については付録 3-2 に取りまとめた。

各部位の損傷状況評価の考え方を下記に示す。

a. 外壁・屋根トラス

外観の写真から損傷を確認できる外壁・屋根トラスについては、損傷部位として評価した。また、一部剥落が確認された外壁についても損傷として評価した。(図-2.1)

b. 使用済燃料プール

コンクリートポンプ車の先端に取り付けられたカメラにより撮影された写真から、使用済燃料プールには一定の水量が注水されていることが確認できていること、使用済燃料プール下部にあたる2階で漏水等が発生していないことが確認されていることから、使用済燃料プールに損傷は無いものと評価した。(図-2.2)

c. 機器仮置プール

外壁の写真を見る限り、機器仮置プール周辺の外壁で損傷が確認されていないことから、損傷が無いものと評価した。(図-2.3)

d. シェル壁

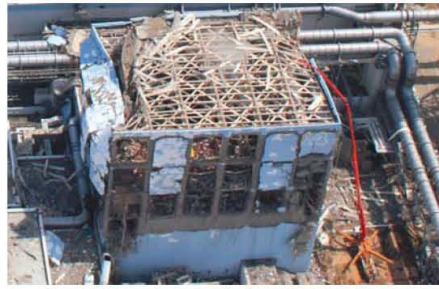
1階、2階のシェル壁については、建屋内の調査により損傷が無いことを確認できている。また、3階において、損傷している外壁の厚さは最大でも650mmであり、厚さ1000mmの外壁については損傷が無いことが確認できている。一方、3階のシェル壁は、厚さが1850mmであることから損傷が無いものと評価した。(図-2.4)

e. 床スラブ

1階、2階については、建屋内の調査により、床スラブに損傷が無いことを確認している。3階については、建屋内の調査時に2階から見上げた天井スラブ(3階の床スラブ)で損傷が確認できないことから、損傷は無いものと評価した(図-2.5)。4階以上については、建屋内の調査結果が得られていないことから、外壁の損傷状況から評価することとした。4、5階については、外壁が損傷していることから、外壁以下の厚さである床スラブは損傷している可能性があるものと評価した。



北面



西面

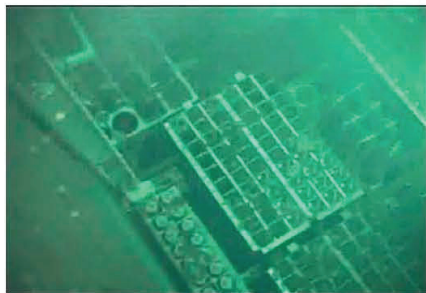


東面



南面

図-2.1 外壁の状況

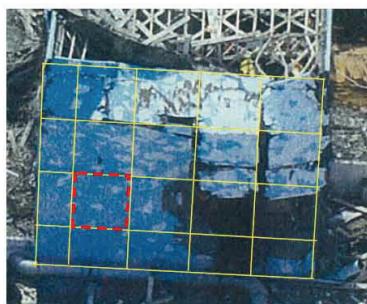


使用済燃料プール内



使用済燃料プール下部

図-2.2 使用済燃料プールの状況



機器仮置プール位置

図-2.3 機器仮置プールの状況

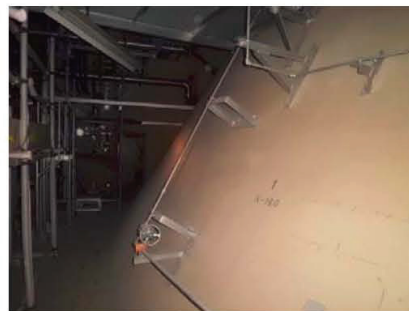


図-2.4 シェル壁の状況



1 階外壁



2 階外壁



2 階床



2 階天井

図-2.5 建屋内部の状況 (1, 2 階)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

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Ss-1及びSs-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Ss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Ss-1及びSs-2の加速度波形について、図-3.2に示す。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

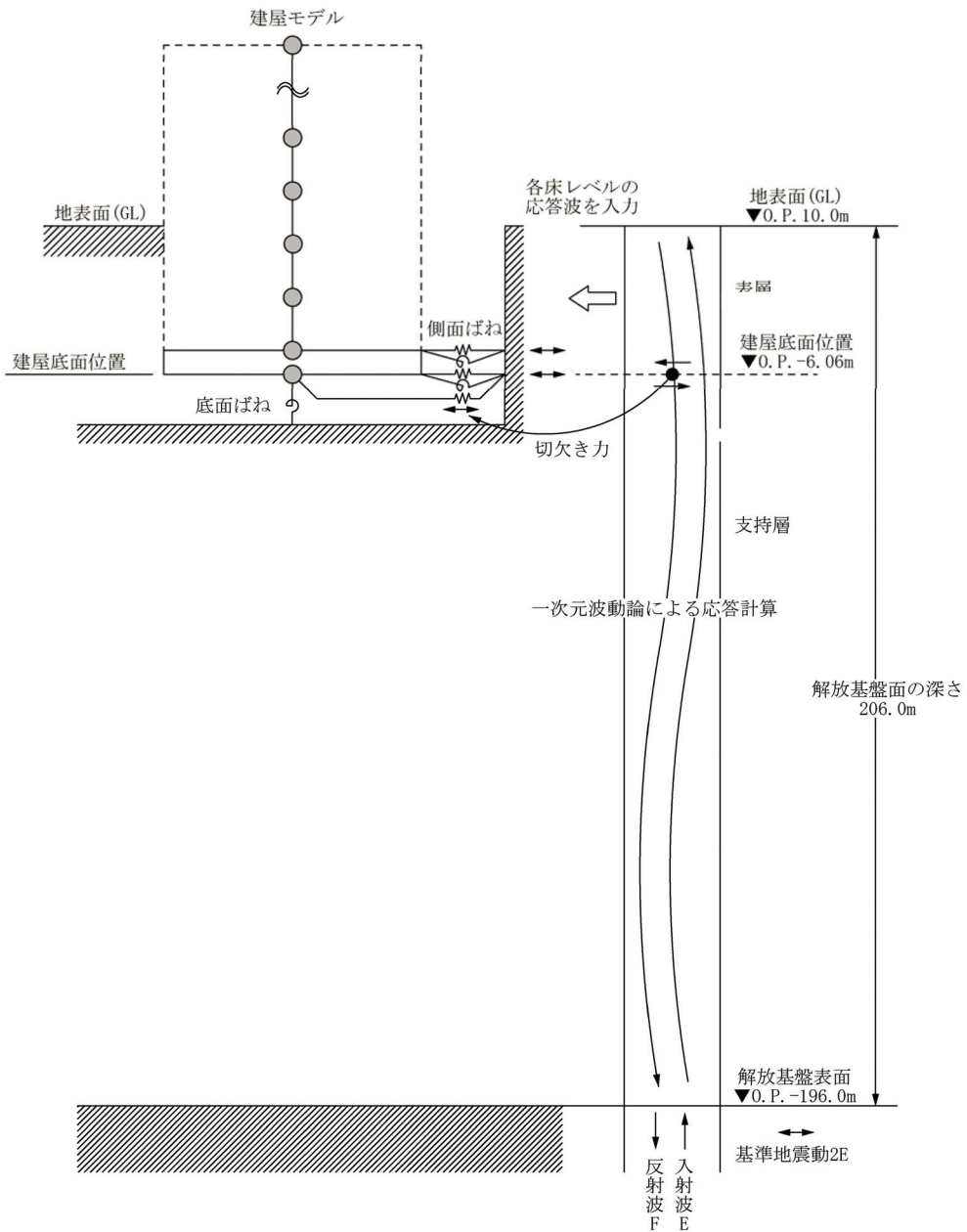


図-3.1 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図

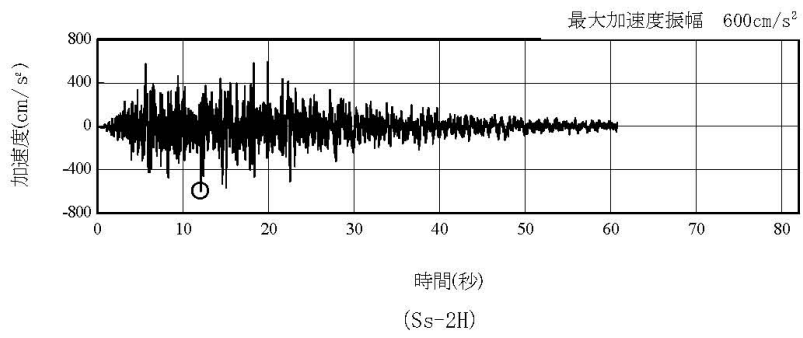
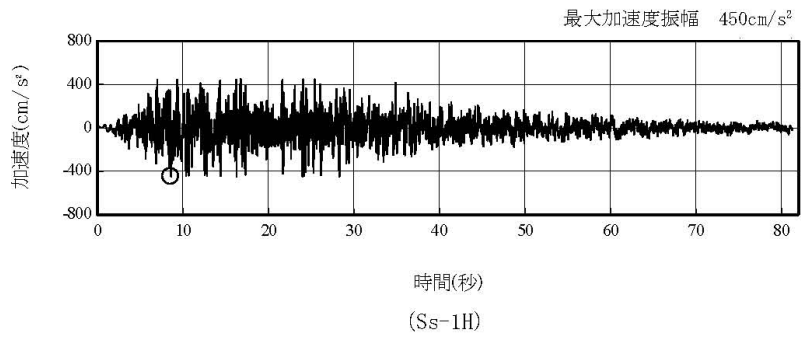


図-3.2 解放基盤表面位置における地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）

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、「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(改訂版)」(原管発官 21 第 110 号 平成 21 年 6 月 19 日付け)にて作成した地震応答解析モデルを基に、次の項目について修正を加え、新たな地震応答解析モデルを構築することとしている。

4号機原子炉建屋については、地震時に定期検査中であったことから、定期検査時の条件を反映している。また、原因の特定には至っていないものの、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷していることから、「2. 損傷状況の評価」で評価した損傷状況を基に解析モデルを作成する。なお、5階より上部の崩れた部分の重量は5階の床で支持されていると仮定するなど、崩れた部分の重量は下階の床で支持されていると仮定する。4号機原子炉建屋の損傷状況(立面図)を図-4.1に、損傷状況(平面図)を図-4.2に示す。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

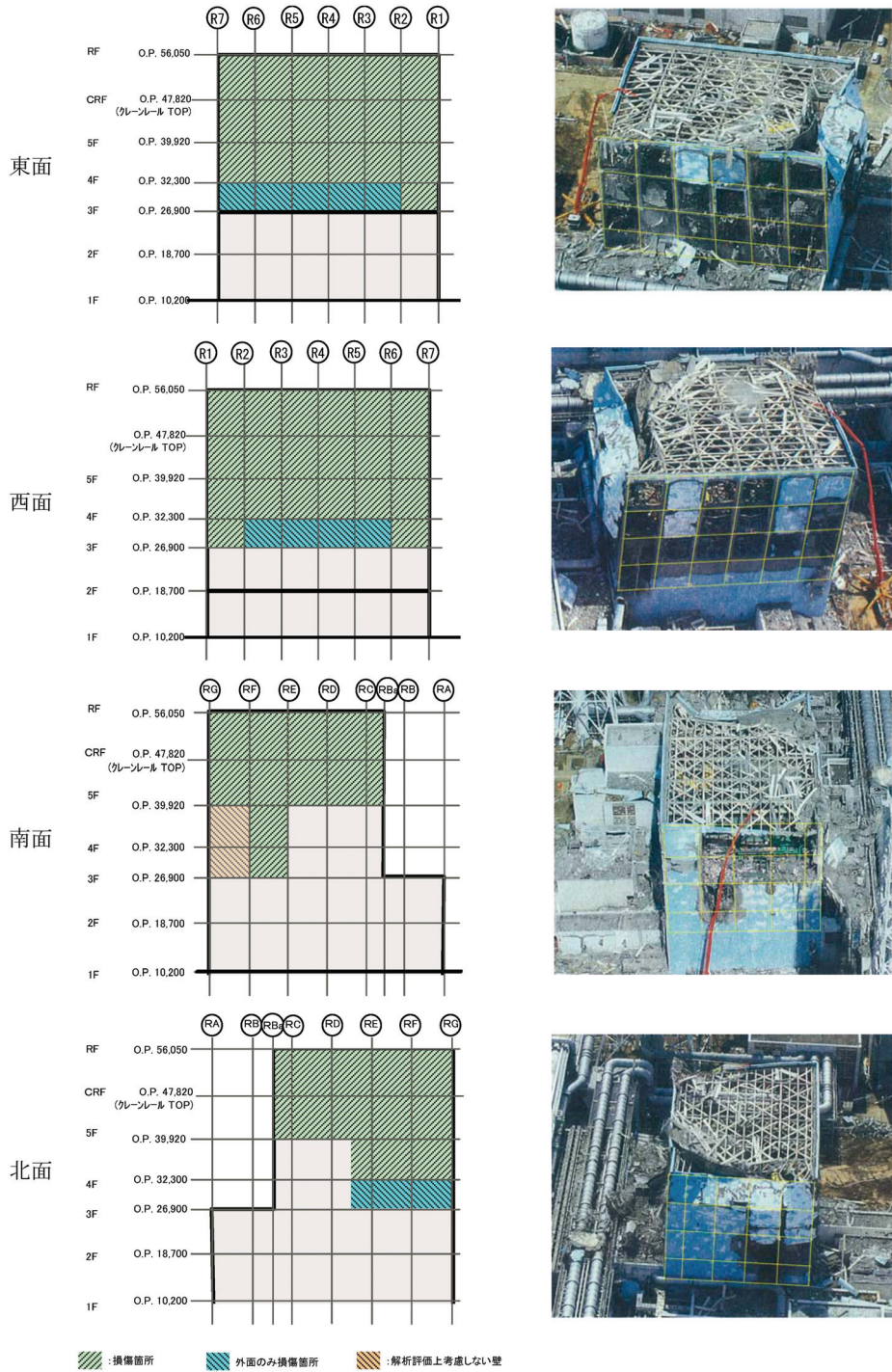


図-4.1 4号機原子炉建屋の損傷状況（立面図）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

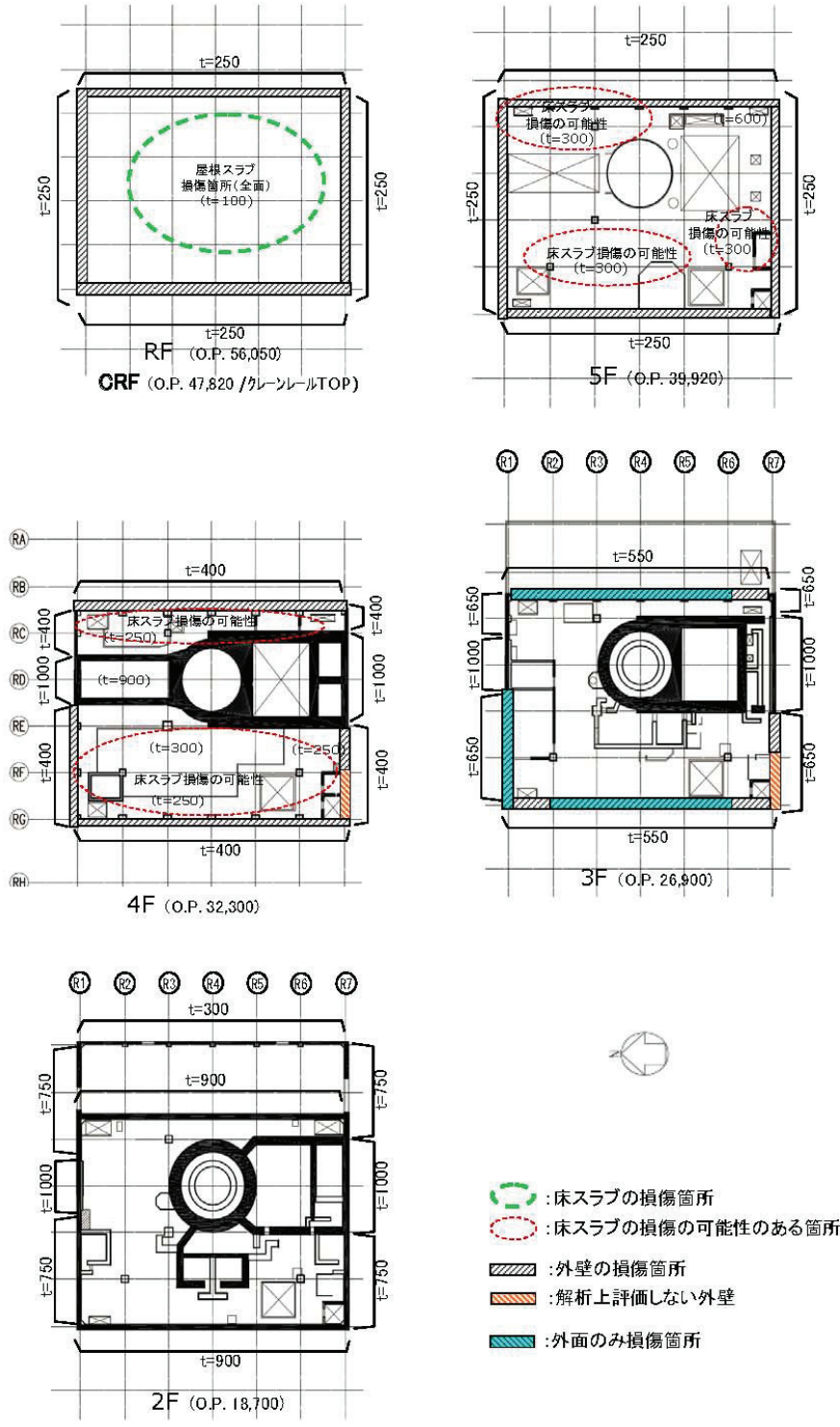


図-4.2 4号機原子炉建屋の損傷状況(平面図)

(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-4.3 および図-4.4 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-4.5 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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

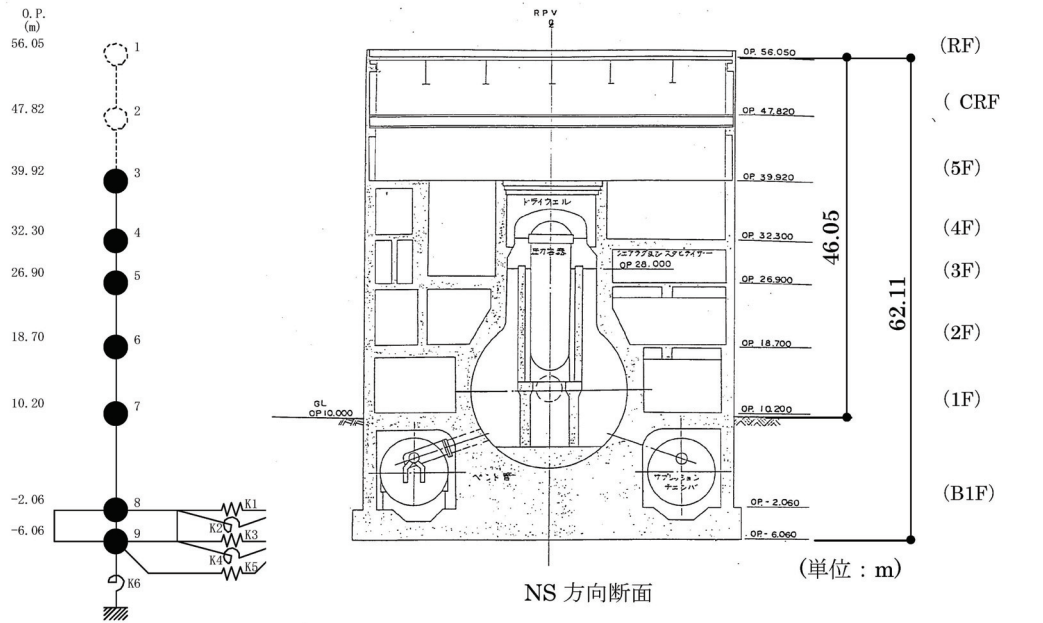


図-4.3 4号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS方向)

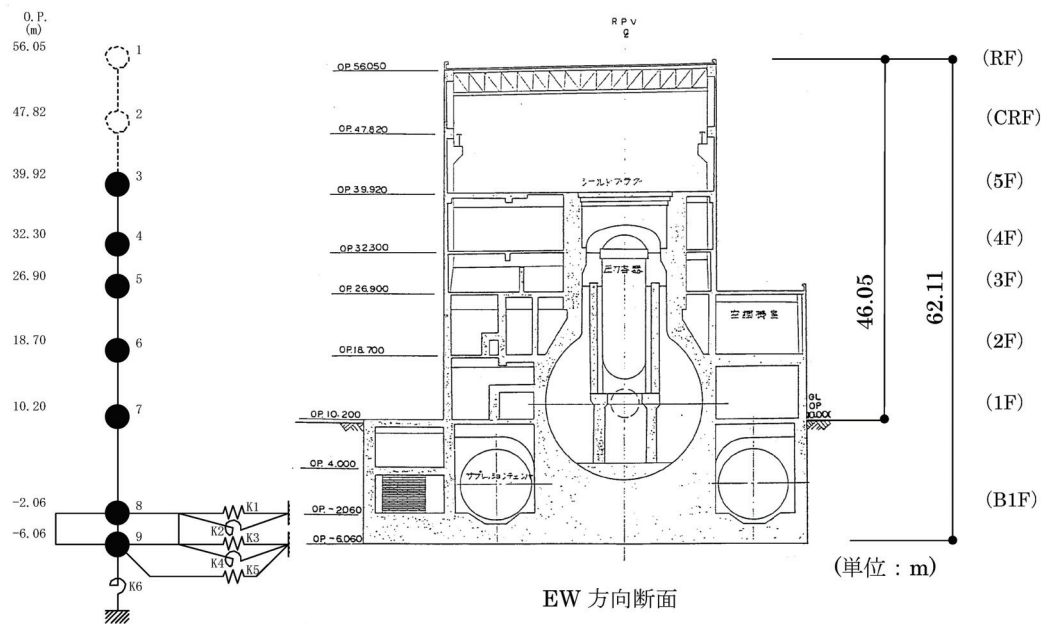


図-4.4 4号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (EW方向)

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 _c (N/mm ²)	ヤング係数*2 E (N/mm ²)	せん断弾性係数*2 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量*3 γ (kN/m ³)
	35.0	2.57×10 ⁴	1.07×10 ⁴	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 $I_g(\times 10^9 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_g(\text{m}^2)$	断面2次モーメント I(m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	114,850	211.39	150.8	13,068
4	88,770	163.44	103.4	15,942
5	117,030	215.39	223.4	45,026
6	121,930	224.49	175.4	46,774
7	207,300	381.60	460.4	114,194
8	287,050	574.38	2,812.6	562,754
9	132,390	264.88		
合計	1,069,320	ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m ²) ポアソン比 ν 0.20 減衰 β 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 $I_g(\times 10^9 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_g(\text{m}^2)$	断面2次モーメント I(m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	114,850	118.55	90.4	6,491
4	88,770	91.66	105.8	6,388
5	117,030	215.39	167.5	32,815
6	121,930	224.49	166.4	46,303
7	207,300	569.22	424.5	136,323
8	287,050	828.96	2,812.6	772,237
9	132,390	346.27		
合計	1,069,320	ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m ²) ポアソン比 ν 0.20 減衰 β 5% 基礎形状 49.0m(NS方向)×57.4m(EW方向)		

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

表-4.3 地盤定数

(S_S-1)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 V _s (m/s)	単位体積 重量 γ _t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

(S_S-2)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 V _s (m/s)	単位体積 重量 γ _t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

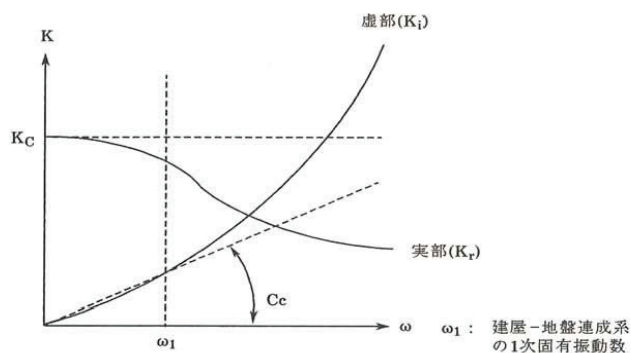


図-4.5 地盤ばねの近似

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

5. 地震応答解析結果

地震応答解析により求められた NS 方向, EW 方向の最大応答加速度を図-5.1 および図-5.2
に示す。

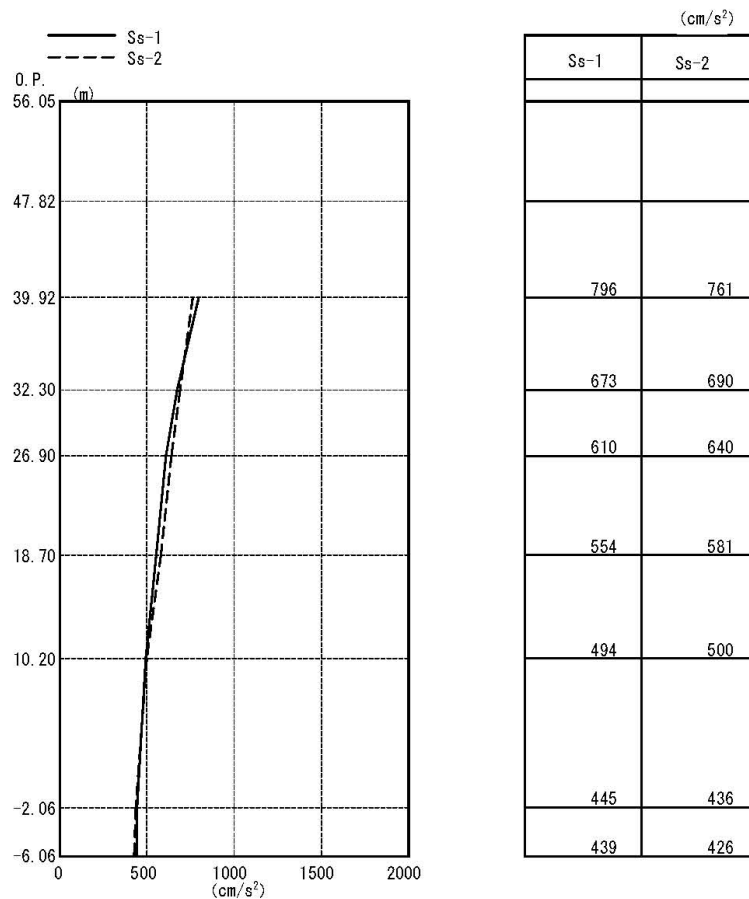


図-5.1 最大応答加速度 (NS 方向)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

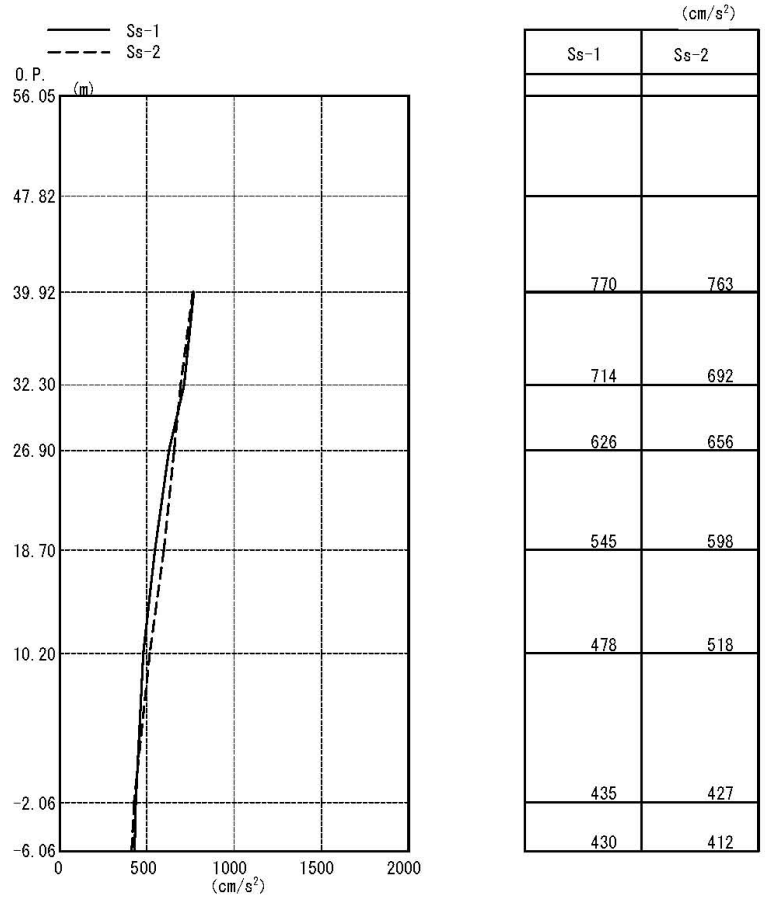


図-5.2 最大応答加速度 (EW 方向)

6. 耐震安全性評価結果

図-6.1, 図-6.2 及び図-6.3, 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 0.17×10^{-3} (Ss-1H 及び Ss-2H, EW 方向, 1F) であり, 評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

以上のことから, 原子炉建屋は耐震安全上重要な設備に波及的影響を与えないものと評価した。

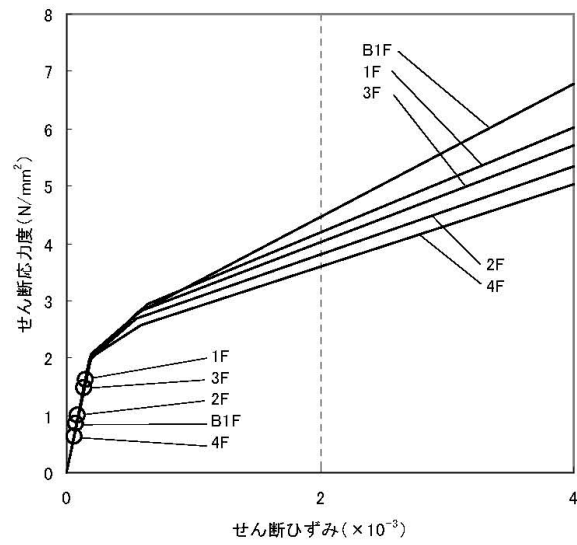


図-6.1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, NS 方向)

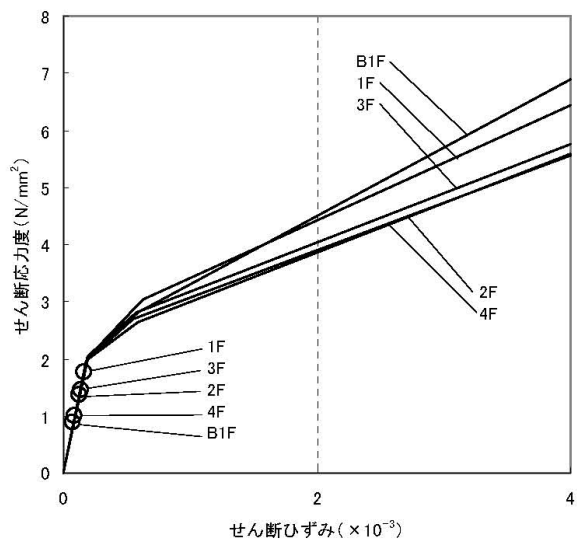


図-6.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, EW 方向)

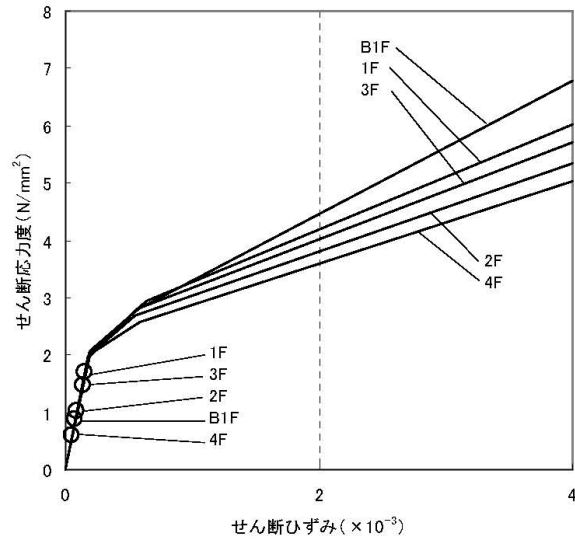


図-6.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, NS 方向)

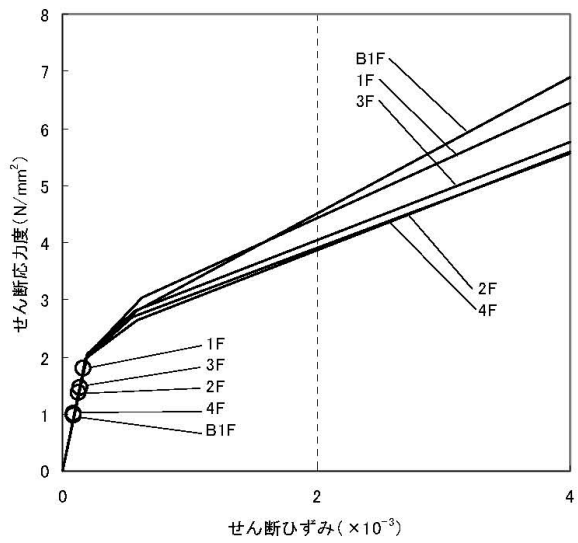


図-6.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, EW 方向)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

付録 3-1

『発電所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

「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(改訂版)」(原管発官 21 第 110 号 平成 21 年 6 月 19 日付け)に記載している 4 号機原子炉建屋の耐震安全性評価結果を抜粋して以下に示す。

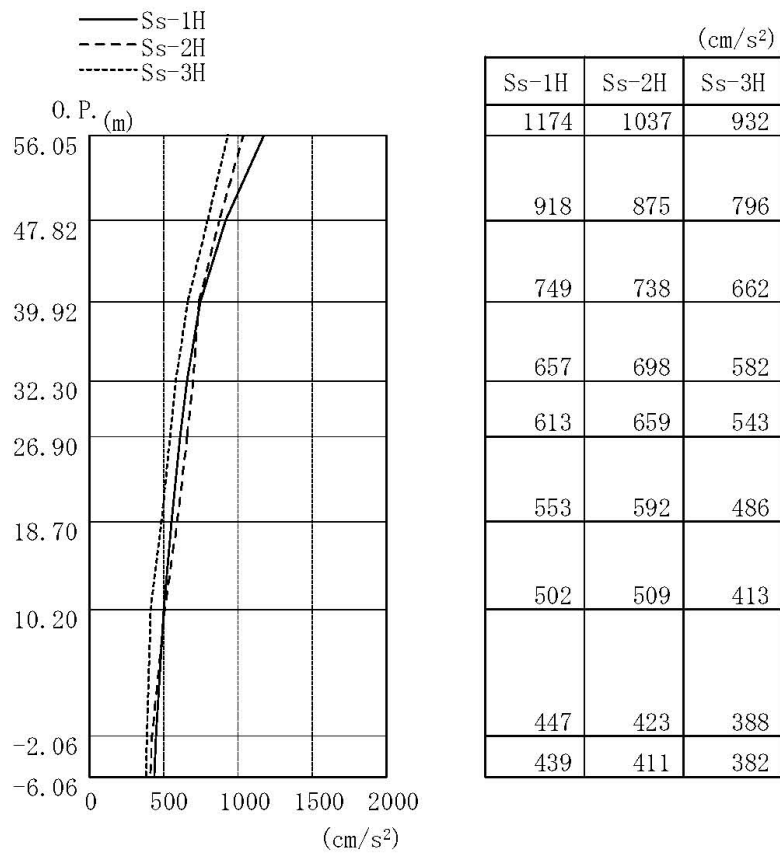


図-1 最大応答加速度 (NS 方向)

付 3-1.1

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

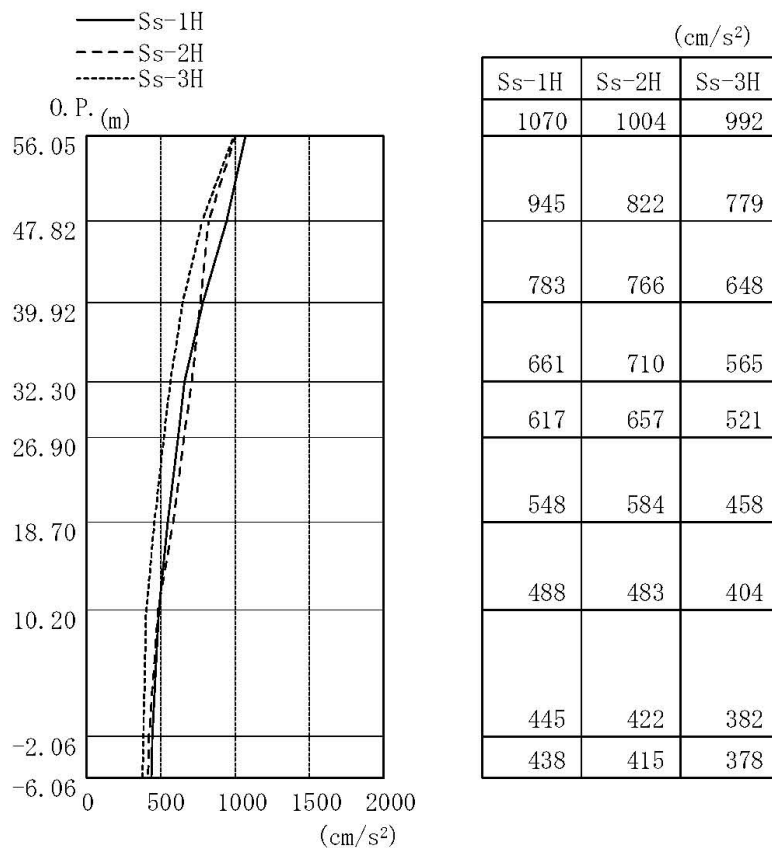


図-2 最大応答加速度 (EW 方向)

付 3-1.2

表-1 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS 方向)

($\times 10^{-3}$)

階	S _S -1H	S _S -2H	S _S -3H	評価基準値
CRF	0.10	0.09	0.08	2.0以下
5F	0.17	0.15	0.14	
4F	0.05	0.05	0.04	
3F	0.08	0.08	0.07	
2F	0.09	0.09	0.08	
1F	0.15	0.16	0.13	
B1F	0.08	0.08	0.07	

表-2 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW 方向)

($\times 10^{-3}$)

階	S _S -1H	S _S -2H	S _S -3H	評価基準値
CRF	0.12	0.12	0.11	2.0以下
5F	0.30	0.20	0.19	
4F	0.08	0.08	0.07	
3F	0.11	0.11	0.10	
2F	0.12	0.12	0.10	
1F	0.16	0.17	0.14	
B1F	0.08	0.09	0.07	

以上

付 3-1.3

損傷状況を評価するのに用いた写真について (4号機)

【外壁】

- 4月13日時点
 - ・ 3月24日に撮影した外観写真により、建屋の損傷状況を確認した上で建屋の解析モデルを作成している。(図1)



図1 損傷状況 (3月24日撮影)

- 5月10日時点
 - ・ 西面、南面については、5月10日に新たに現地で写真(図2)を撮影している。この写真から3月24日時点から損傷が進展していないことが確認できる。



図2 西面・南面の損傷状況 (5月10日撮影)

付 3-2.1

【内壁】

- 4月13日時点
 - ・ 建屋内の調査が実施できていなかったことから、外観写真と図面等から判断することとした。
- 4月28日時点
 - ・ コンクリートポンプ車の先端に取り付けられたカメラにより撮影された写真により、使用済燃料プールに一定の水量が注水されていることが確認できる。(図3)

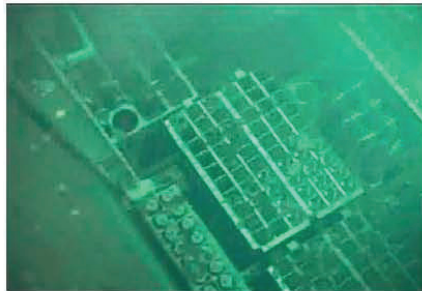


図3 使用済み燃料プール内部の状況(4月28日撮影)

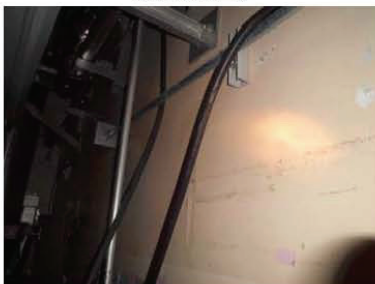
- 5月22日時点
 - ・ 建屋内(1階、2階)では調査が実施されている。現段階では1階、2階の内壁、1階、2階の床スラブ、天井スラブに損傷は確認されていない。建屋内の写真を図4、それぞれの写真の撮影位置を図5に示す。



①1階内壁



②1階外壁



③1階外壁



④1階天井

図4 (1) 建屋内部の状況 (5月19日～21日撮影)

付3-2.2



⑤2 階内壁



⑥2 階外壁



⑦2 階シェル壁



⑧2 階シェル壁



⑨使用済燃料プール下部



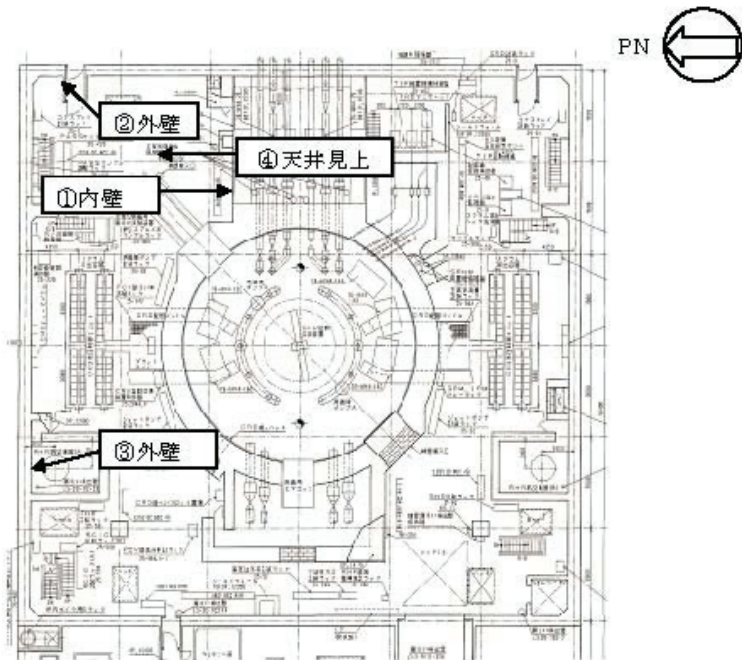
⑩2 階床



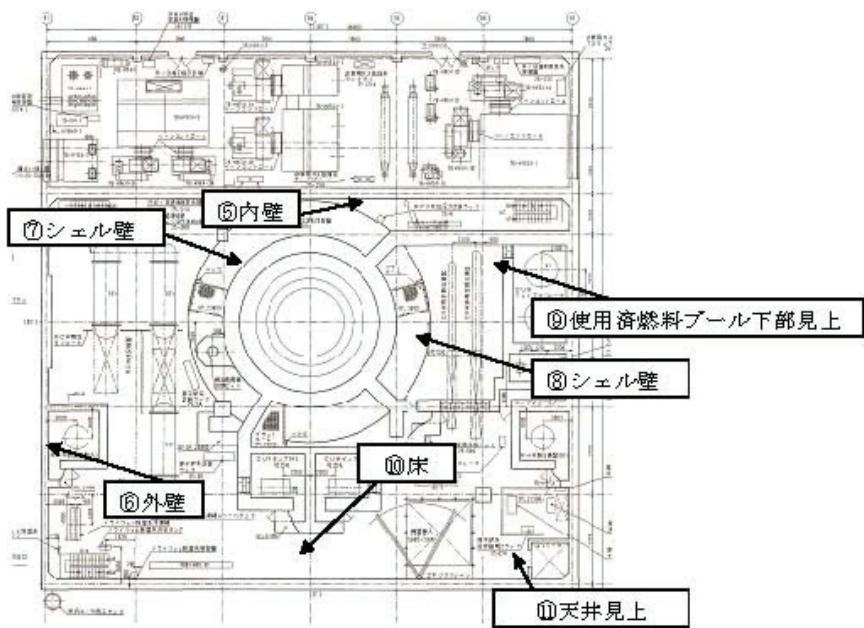
⑪2 階天井

図4(2) 建屋内部の状況 (5月19日～21日撮影)

付3-2.3



1 階



2 階

図 5 建屋内部の写真撮影位置

付 3-2.4

添付資料－４：４号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細
（３次元FEM解析による局部評価）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

1. 解析評価方針

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Ssに対する原子炉建屋の耐震安全性を評価する。なお、4号機原子炉建屋の外壁の損傷が確認されている4階や3階においては、主要な耐震要素が使用済燃料プールとなることから、ここでは使用済燃料プールを中心とした評価を実施する。

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）までの建屋部分を対象に、爆発等による損傷状況を模擬した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、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及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。

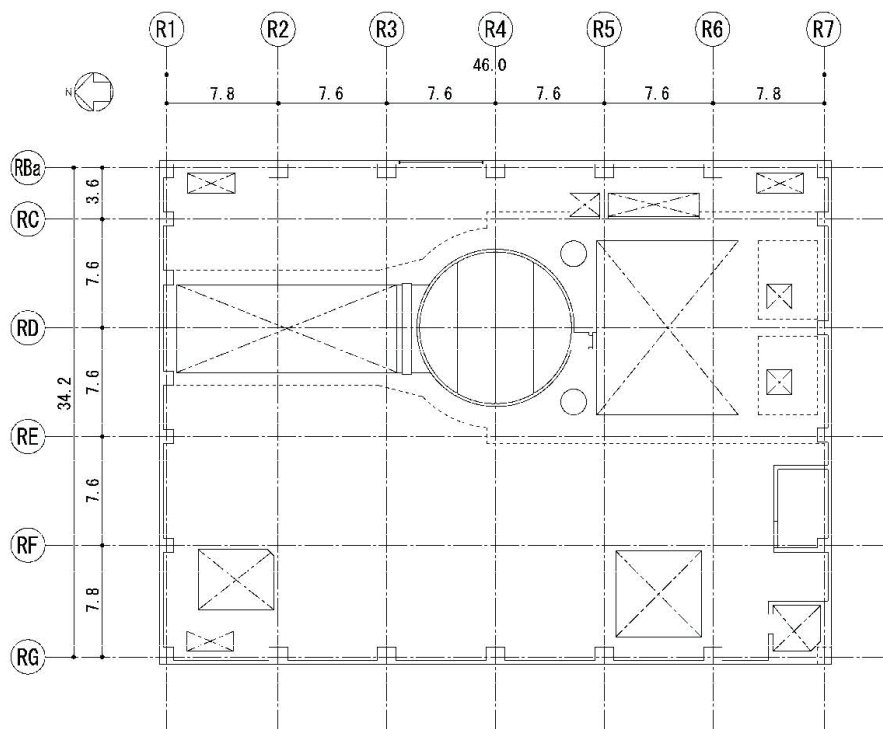


图-1.1 5階 平面图
(单位 : m)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

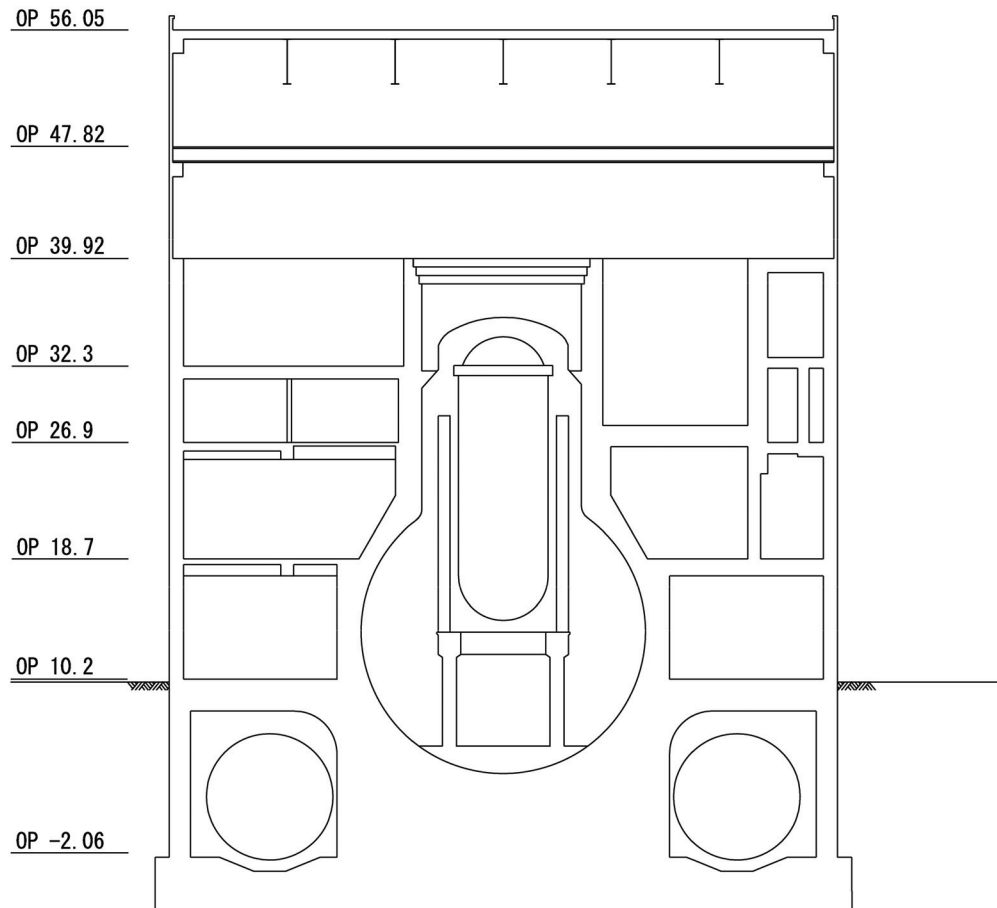


図-1.2 断面図
 (NS方向断面, 単位:m)

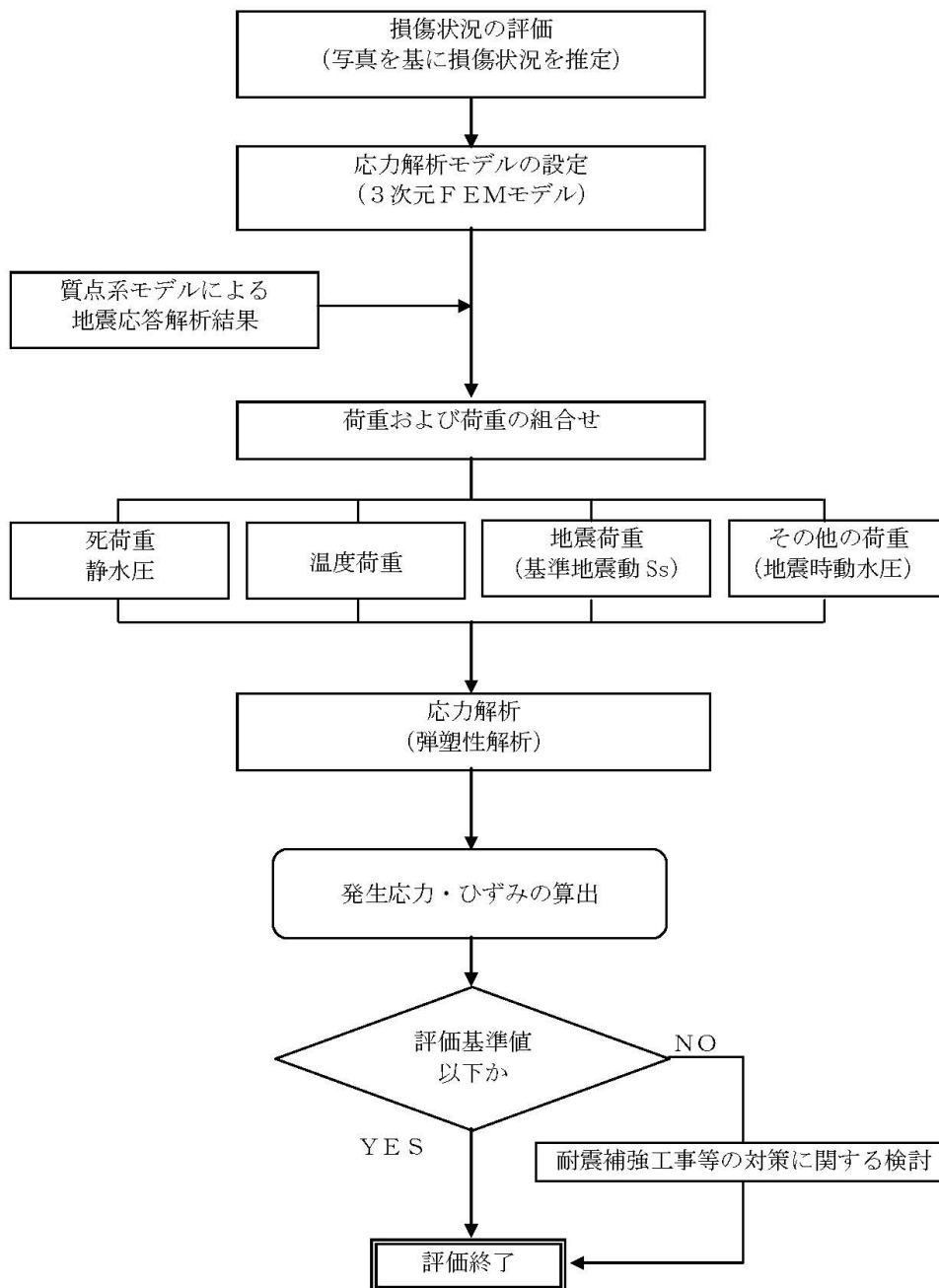


図-1.3 使用済燃料プールの耐震安全性評価フロー

2. 損傷状況の評価

損傷状況の評価にあたっては、「添付資料-3 2. 損傷状況の評価」を基本として3次元FEM解析モデルを作成している。

解析モデルに評価した外壁は、添付資料-3において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、シェル壁及び周辺床は損傷がないものとしてモデル化する。

損傷した部分の重量については、下階の床で支持されていると仮定し、全て一様に積載されているものとして評価する。

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及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。

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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

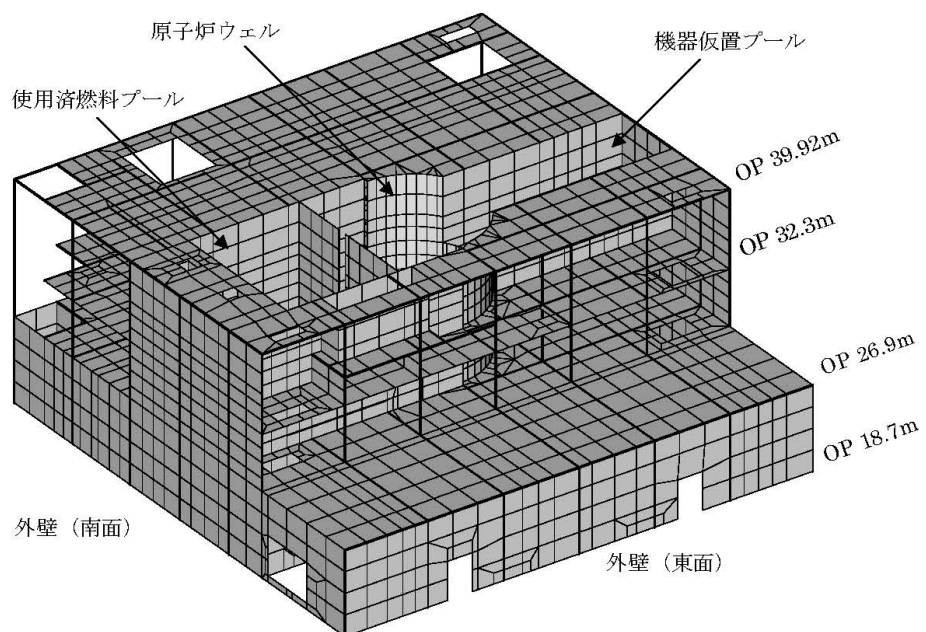
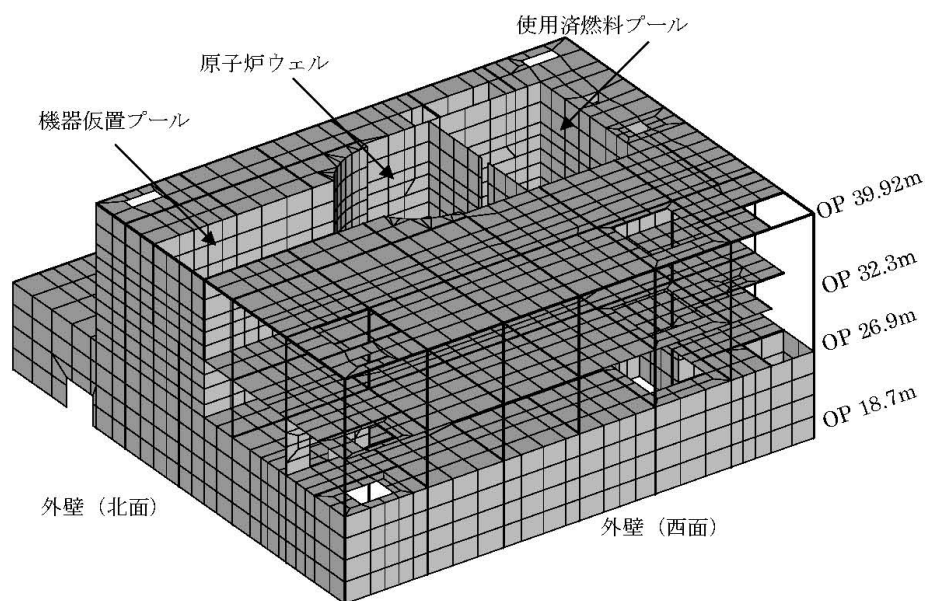
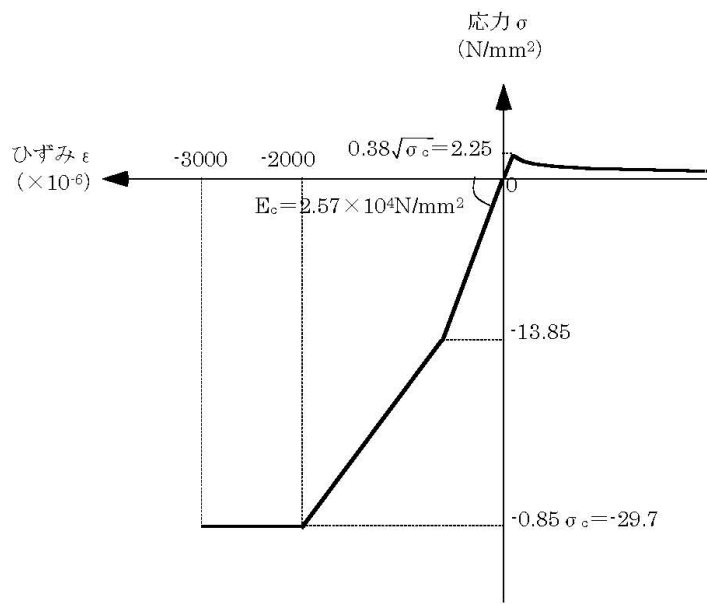
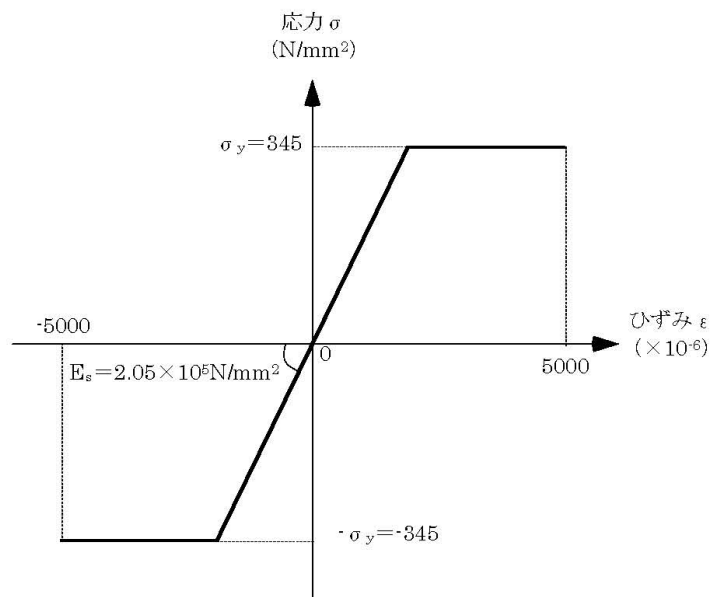


図-3.1 解析モデル概要図



(a) コンクリートの応力-ひずみ関係
(コンクリート強度 $\sigma_c = 35$ N/mm²)



(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係
(鉄筋降伏点 $\sigma_y = 345$ N/mm²)

図-3.2 コンクリートと鉄筋の構成則

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

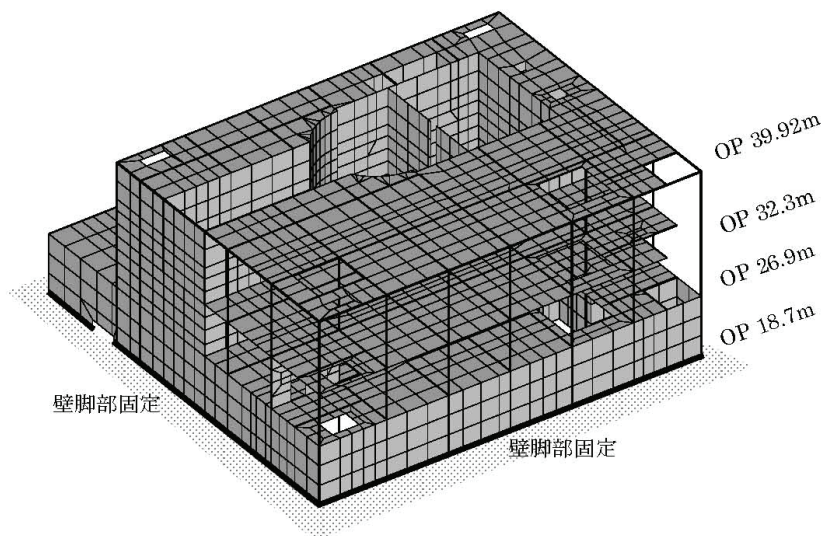


図-3.3 解析モデルの境界条件

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、原子炉ウエ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

前述の建屋の損傷を考慮した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。(付録 4-1 参照)

(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。

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」等においては、温度荷重と基準地震動 S_s による地震荷重との組合せを行わないこととしている。しかし、現状の使用済燃料プールが比較的長期間高温状態となっていることを踏まえ、温度荷重と基準地震動 S_s による地震荷重とを組み合わせることで評価することとした。さらに、温度荷重を考慮しない場合の評価結果については付録 4-2 に示している。

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より、現状の使用済燃料プールは基準地震動 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。

表-5.1～表-5.2に用いる記号の説明

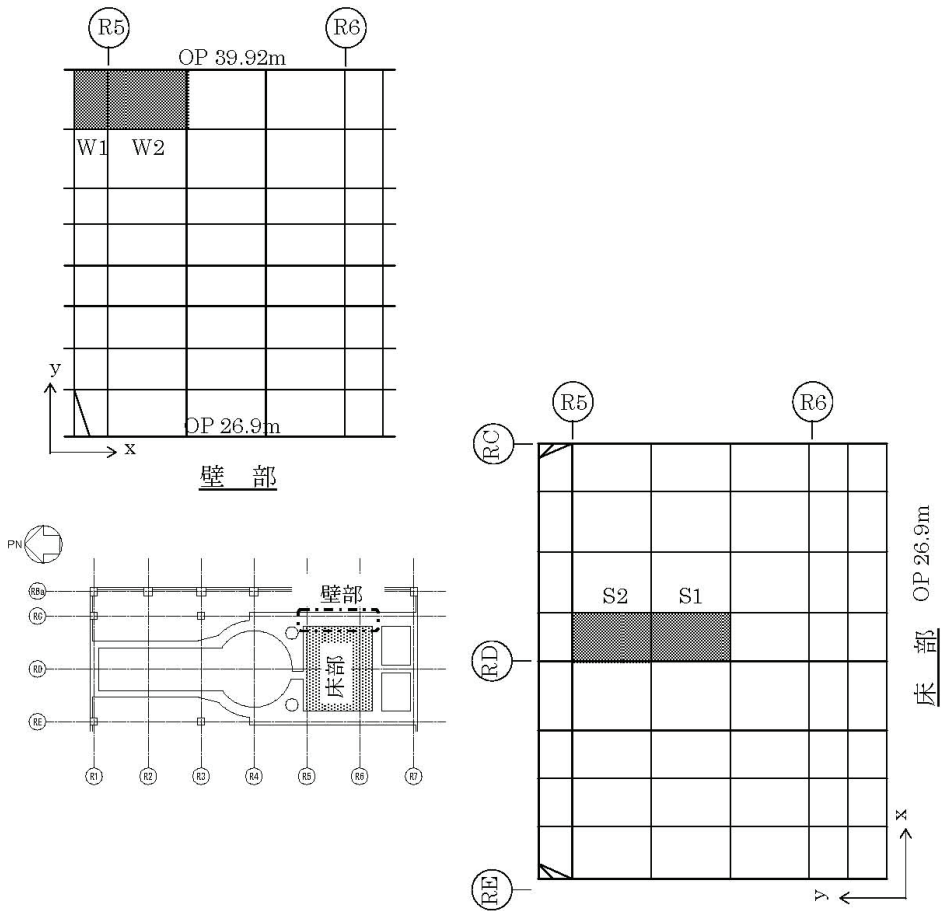
ϵ_c	: コンクリートの圧縮ひずみ
$s\epsilon_c, s\epsilon_t$: 鉄筋の圧縮ひずみおよび引張ひずみ (ひずみは全て引張側を正として表記)
Q	: 面外せん断力

なお、損傷状況の評価および荷重条件の設定において、以下に示すいくつかの変動要因が考えられる。これらの変動要因による影響については、別途検討を行い顕著な影響を及ぼさないことを確認している。(付録4-3参照)

- ・ 爆発による周辺床スラブなどへの影響
- ・ 火災による燃料プール壁および周辺床スラブへの影響
- ・ 使用済燃料プール水温の高温化による影響

また、使用済燃料プール底部に補強工事を実施している。この工事による裕度向上効果についての検討も行っている。(付録4-4参照)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm



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	ϵ_c	Ss 地震時	-480	-3000	可
	ϵ_c		-350	-5000	可
	ϵ_t		1230	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	ϵ_c	Ss 地震時	-580	-3000	可
	ϵ_c		-210	-5000	可
	ϵ_t		490	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	1150	可

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

付録 4-1

4号機原子炉建屋の鉛直方向の地震応答解析について

福島第一原子力発電所4号機原子炉建屋の3次元FEM解析による局部評価にあたっては、基準地震動 S_s による鉛直方向の動的解析結果を入力として用いている。ここでは、鉛直方向の地震応答解析結果を示す。

解析モデル作成にあたって、「添付資料-3: 4号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細（質点系モデルによる時刻歴応答解析による評価）」において評価した範囲と同様の範囲を損傷範囲として取り扱うこととし、崩れた部分の重量については、下階の床で支持されると仮定する。

鉛直方向の建屋解析モデルを図-1に、諸元を表-1に示す。

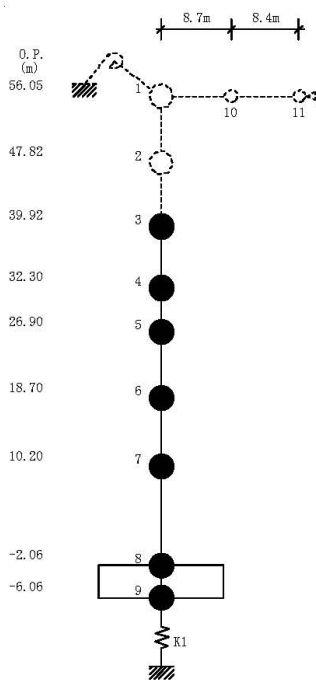


図-1 建屋解析モデル（鉛直方向）

付 4-1.1

表-1 建屋解析モデルの諸元 (鉛直方向)

建屋				屋根			
質点番号	質点重量 W (kN)	軸断面積 A_N (m ²)	軸ばね剛性 K_A ($\times 10^8$ kN/m)	質点番号	質点重量 W (kN)	せん断断面積 A_S ($\times 10^{-2}$ m ²)	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	-	-	-	1	-	-	-
2	-	-	-	10	-	-	-
3	114,850	222.6	7.41	11	-	-	-
4	88,770	218.1	10.58				
5	117,030	380.4	11.92				
6	121,930	340.6	10.30				
7	207,300	654.7	13.72				
8	287,050	2,812.6	180.71				
9	132,390						
合計	1,069,320						

- ①コンクリート部
 ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%
- ②鉄骨部
 ヤング係数 E_s 2.05×10^8 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 7.90×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.30
 減衰 h 2%

基礎形状

49.0m(NS方向)×57.4m(EW方向)

付 4-1.2

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

地震応答解析により求められた鉛直方向の最大応答加速度および最大応答軸力を図-2 およ
 び図-3 に示す。

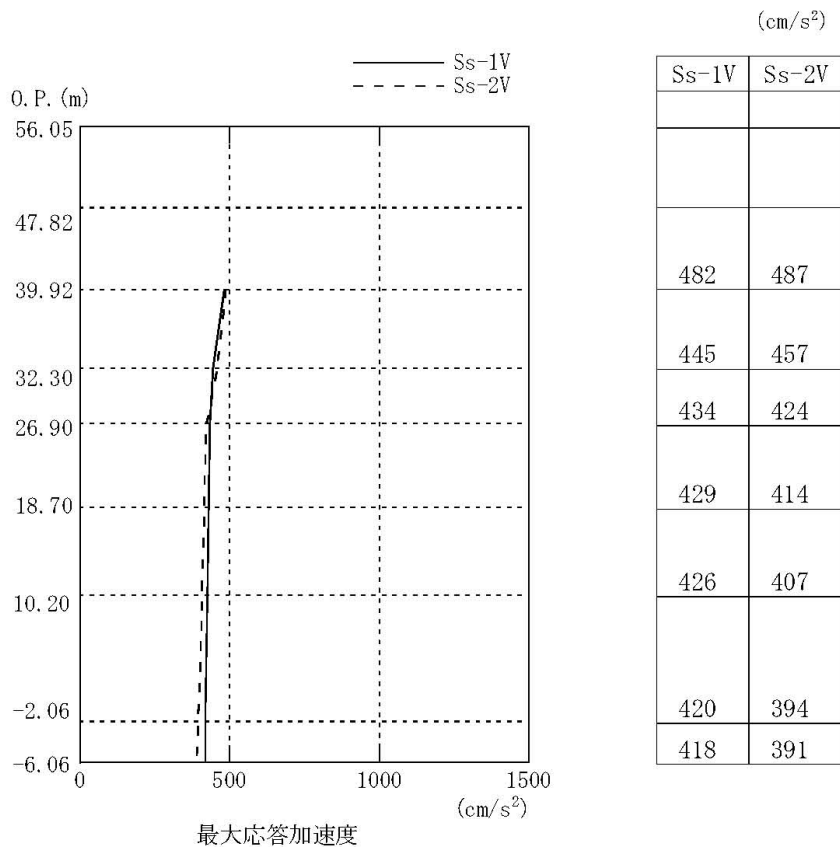


図-2 最大応答加速度 (鉛直方向)

付 4-1. 3

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

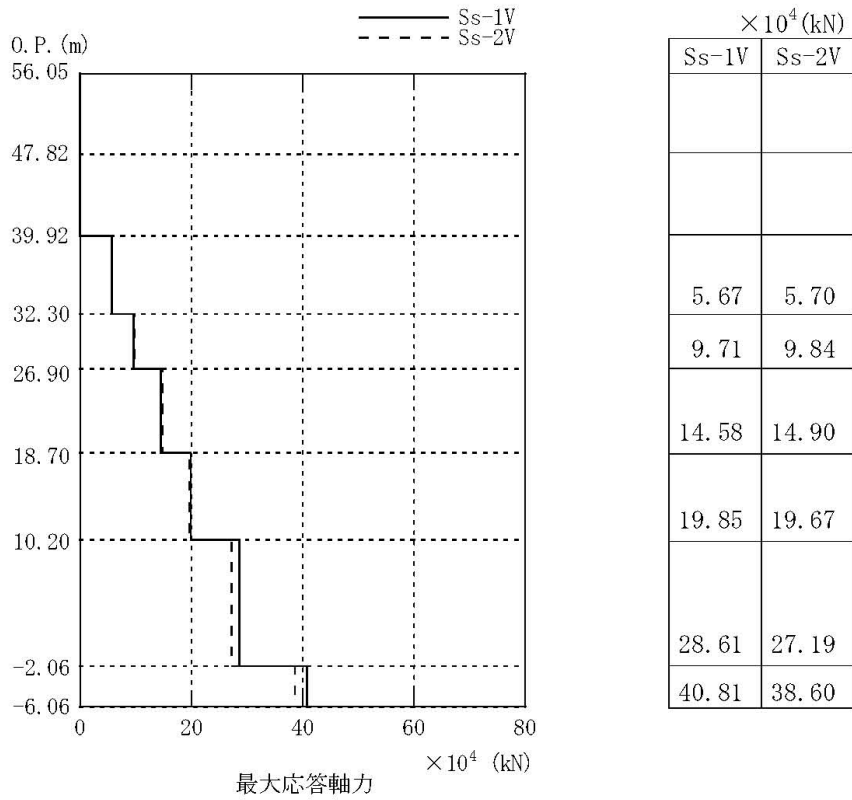


図-3 最大応答軸力（鉛直方向）

付 4-1. 4

温度荷重に関するパラメトリックスタディについて

1. 解析概要

添付資料－4 では、荷重組合せとして基準地震動 Ss と温度荷重（プール水の温度条件（90℃程度））を組み合わせ耐震安全性の評価を実施した。本検討では、温度荷重を考慮しない場合の基準地震動 Ss に対する検討を行い、温度荷重を考慮しない場合における耐震安全性の評価への影響を検討する。

2. 解析方法

添付資料－4 の荷重の組合せ（以下、基本ケースとする）をもとに、温度荷重を除外した表－1 の荷重の組合せを対象とする。なお、荷重の組合せ以外の条件は、解析モデルを含め基本ケースと同一である。

表 1 荷重の組合せ

荷重時名称	荷重の組合せ
Ss 地震時	DL+H+K+KH

ここに、 DL : 死荷重
 H : 静水圧
 K : Ss 地震荷重
 KH : Ss 地震時動水圧

3. 評価結果

使用済燃料プール壁部及びプール床部のコンクリートおよび鉄筋のひずみで基本ケースにて評価した同一箇所（要素）の結果を表 2 に、面外せん断応力で基本ケースにて評価した同一箇所（要素）の結果を表 3 に示す。なお、参考として、表 2 及び表 3 には、比較のためプール部の温度の条件を考慮した基本ケースの検討結果を併記する。

評価結果より、温度荷重を考慮しない場合においても、使用済燃料プールの発生応力およびひずみは評価基準値以内であり、耐震安全性は確保されていると推定される。

表 2(1) 軸力と曲げ応力による
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(×10 ⁻⁶)		評価基準値(×10 ⁻⁶)	判定
			本検討(温度なし)	参考基本ケース		
W1	c ε _c	Ss 地震時	-110	-480	-3000	可
	s ε _c		-110	-350	-5000	可
	s ε _t		420	1230	5000	可

表 2(2) 軸力と曲げ応力による
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(×10 ⁻⁶)		評価基準値(×10 ⁻⁶)	判定
			本検討(温度なし)	参考基本ケース		
S1	c ε _c	Ss 地震時	-130	-580	-3000	可
	s ε _c		-40	-210	-5000	可
	s ε _t		140	490	5000	可

表 3(1) 面外せん断応力の検討結果 (壁部)

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)		判定
		本検討(温度なし)	参考基本ケース	
W2	Ss 地震時	1020 (3430)	2040 (3770)	可

() 数値は評価基準値

表 3(2) 面外せん断応力の検討結果 (床部)

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)		判定
		本検討(温度なし)	参考基本ケース	
S2	Ss 地震時	870 (2180)	800 (1150)	可

() 数値は評価基準値

付 4-2.2

使用済燃料プールの耐震安全性評価に係るパラメトリックスタディー

1. 検討方針

基本ケースでは想定していない以下に示す損傷シナリオ（以下に示す3ケース）を考慮したパラメータ解析を実施し、使用済燃料プールの耐震安全性評価に与える影響程度を把握する。

【基本ケースで想定していない損傷シナリオ】

① 爆発による影響

爆発により屋根および3階以上の外壁の大半が崩壊し、厚壁で構成されたプールの周辺部の半壊壁や床の剛性が低下している可能性がある。

② 火災による影響

火災により西面のプール壁及び周辺部が損傷し、それらの剛性が低下している可能性がある。

③ プール水温の高温化による影響

使用済み燃料の発熱によりプール水温が上昇し、長時間高温環境下におかれることによりプール壁・床内側のコンクリートが損傷し、剛性が低下している可能性がある。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

2. 検討条件

2. 1 爆発による影響検討のための検討条件

爆発により屋根及び3階以上の外壁の大半が崩壊し、厚壁で構成されたプールの周辺部の半壊壁や床の剛性が低下している可能性がある。従って、図-1 に示すように、4～5階の一般床及び3～4階の半壊程度の外壁の損傷程度が使用済燃料プールの耐震安全性評価に及ぼす影響について検討する。

① 一般床剛性（4～5階）

4階及び5階の床剛性を50%に低下させる。

② 外壁剛性（3～4階）

半壊程度の外壁（なお、基本ケースでは全壊扱いとしている）をモデル化し、当該壁の剛性を50%に低下させる。

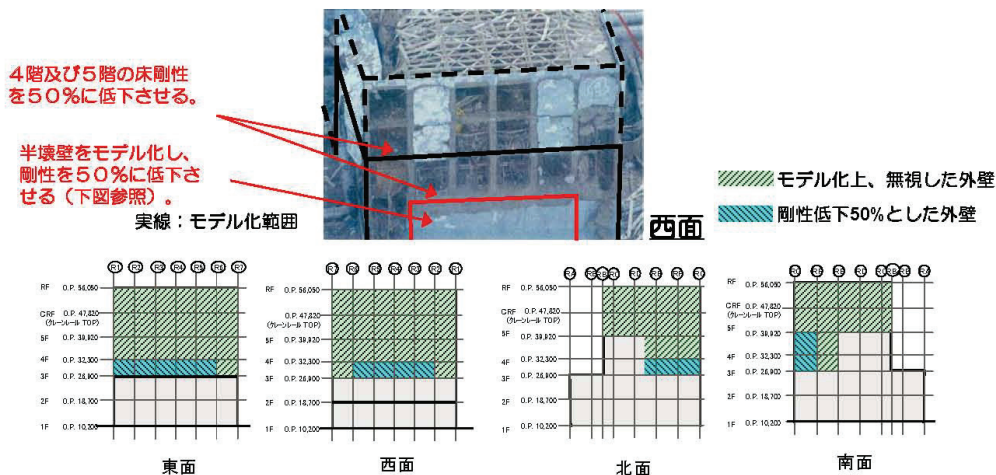


図-1 爆発による影響検討の対象とする床及び外壁

付 4-3.2

2. 2 火災による影響検討のための検討条件

火災により西面のプール壁及び周辺部が損傷し、それらの剛性が低下している可能性がある。従って、4階西側のMGセット室を火災発生箇所とし、図-2 に示す火災による影響範囲を西側エリアの4階床、5階床およびプール壁の全面が火災によって剛性低下すると仮定する。ここで、当該床及び壁のコンクリート表面が火災により損傷を受けたと仮定し、80%程度に剛性低下した場合を想定して、使用済燃料プールの耐震安全性評価に及ぼす影響の程度を検討する。

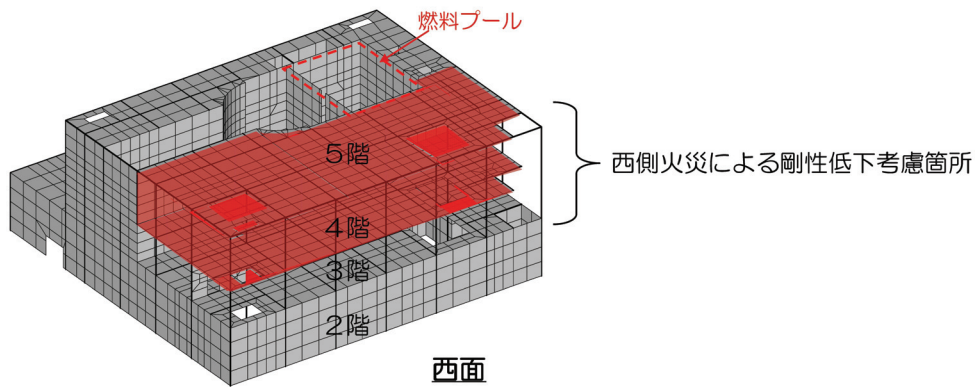


図-2 火災による影響検討の対象とする床及び外壁

2. 3 プール水温の高温化による影響検討のための検討条件

使用済み燃料の発熱によりプール水温が上昇し、長時間高温環境下におかれることによりプール壁・床内側のコンクリートが損傷し、剛性が低下している可能性がある。従って、温度条件として、プール水温が100℃まで上昇し、なおかつ外気温も冬場0℃と想定した場合について検討し、使用済み燃料プールの耐震安全性評価に及ぼす影響の程度を検討する。

付 4-3. 4

2. 4 検討ケース

2. 1から2. 4までの3ケースの検討条件を纏めた検討ケースの一覧を、基本ケースも併せて、表-1 に示す。検討ケースは、基本ケースと同じ荷重組み合わせ（16ケース）を考慮し、使用済燃料プールの耐震安全性評価に与える影響を検討する。

表-1 検討ケース一覧

ケース		影響検討のための項目			
		外壁の 剛性低下 (3～4階)	一般床の 剛性低下 (4～5階)	プール壁の 剛性低下	プール水 温度
-	基本	全壊及び半壊 ともに無視	無視	無視	10～90℃
1	爆発による影 響	半壊部分は 50%に剛性低下	50%に剛性低下	*	*
2	火災による影 響	*	西側部分は 80%に剛性低下	西側部分は 80%に剛性低下	*
3	プール水温に よる影響	*	*	*	0～100℃

注) *: 基本ケースと同じ条件とする。

3. 検討結果

基本ケース及び検討ケースに対して、評価基準値に対する発生ひずみもしくは発生応力の比率を比較した結果を表-2 に示す。従って、基本ケースでは想定していない爆発、火災及びプール水温の高温化による損傷シナリオを考慮しても、使用済燃料プールの耐震安全性評価には影響を与えないことが確認された。

なお、参考までに、検討ケース1～3に対する使用済燃料プールの耐震安全性評価結果の詳細を表-3～表-8 に示す。

表-2 評価基準値に対する発生ひずみもしくは発生応力の比率の比較

	評価項目	基本ケース	【ケース1】 爆発による影響	【ケース2】 火災による影響	【ケース3】 プール水温の高温化による影響
プール床	鉄筋ひずみ	0.10	0.10	0.10	0.14
	コンクリートひずみ	0.20	0.20	0.20	0.24
	面外せん断力	0.70	0.69	0.70	0.76
プール壁	鉄筋ひずみ	0.25	0.25	0.24	0.30
	コンクリートひずみ	0.16	0.16	0.17	0.19
	面外せん断力	0.55	0.55	0.52	0.61

注) 表中の値は、1未満であれば評価基準値を下回ることを示している。

【ケース1 爆発による影響】

表-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	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-470	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-340	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		1240	5000	可

表-3(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	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-580	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-210	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		480	5000	可

表-4(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	2050	3770	可

表-4(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	790	1150	可

注) 検討対象箇所は、基本ケースを参照のこと。

付 4-3.7

【ケース2 火災による影響】

表-5(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	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-510	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-380	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		1170	5000	可

表-5(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	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-580	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-210	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		480	5000	可

表-6(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	1940	3770	可

表-6(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	760	1090	可

注) 検討対象箇所は、基本ケースを参照のこと。

【ケース3 プール水温の高温化による影響】

表-7(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	ϵ_c	Ss 地震時	-570	-3000	可
	ϵ_s		-460	-5000	可
	ϵ_t		1480	5000	可

表-7(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	ϵ_c	Ss 地震時	-700	-3000	可
	ϵ_s		-230	-5000	可
	ϵ_t		660	5000	可

表-8(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	2280	3770	可

表-8(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	860	1140	可

注) 検討対象箇所は、基本ケースを参照のこと。

補強工事の効果について

1. 解析評価方針

使用済燃料プールの床の裕度向上を目的に、使用済燃料プールの床下に鋼製支柱等を取り付ける予定である。ここでは、図1に示す鋼製支柱等を模擬した要素を追加した応力解析モデルを用いて、同様の耐震安全性評価を行う。評価結果を取り付け前と比較することで裕度向上効果を把握する。

なお、鋼製支柱は東西方向に32本配置し上部からの荷重を支える。さらに、その機能を確実なものとするために、コンクリート壁を設置し、コンクリート壁と使用済燃料プール底部の間はグラウトを充填することとしている。

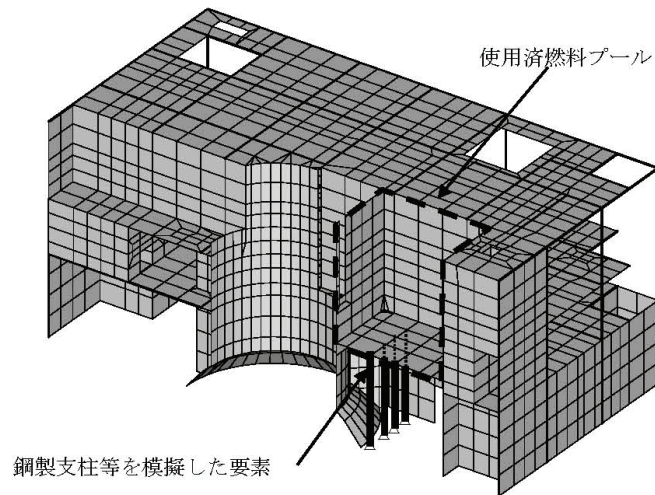


図1 応力解析モデル

付 4-4.1

2. 裕度向上効果

使用済燃料プール床について、発生応力およびひずみの評価基準値に対する比が最も大きい箇所を抽出し、鋼製支柱等を模擬した要素の取り付け前後で比較した結果を表1と表2に示す。いずれも鋼製支柱等の取り付け後に最大値が低減しており、鋼製支柱等による裕度向上効果が期待できることが確認できた。

表1 発生ひずみの評価基準値に対する比の最大値
(鋼製支柱等を模擬した要素の取り付け前後の比較)

箇所	検討ひずみ	荷重時名称	発生ひずみ 評価基準値	
			鋼製支柱 取り付け前 (最大値)	鋼製支柱 取り付け後 (最大値)
使用済 燃料 プール床 S1	コンクリート σ_c	Ss 地震時	0.20	0.10
	鉄筋 σ_t		0.10	0.07

表2 面外せん断力の評価基準値に対する比の最大値
(鋼製支柱等を模擬した要素の取り付け前後の比較)

箇所	検討応力	荷重時名称	発生せん断力 評価基準値	
			鋼製支柱 取り付け前 (最大値)	鋼製支柱 取り付け後 (最大値)
使用済 燃料 プール床 S2	面外せん断力 Q	Ss 地震時	0.70	0.56

付 4-4.2

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) (追補版) (改訂2)

平成24年12月

東京電力株式会社

目次

1. はじめに
2. 使用済燃料の取り出し時における原子炉建屋の状況
3. 原子炉建屋躯体の損傷状況
4. 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）
5. 使用済燃料プールの耐震安全性評価結果（3次元 FEM 解析）
6. まとめ

添付資料－1：使用済燃料の取り出し時における原子炉建屋の状況に関する詳細

添付資料－2：原子炉建屋躯体の損傷状況に関する詳細

添付資料－3：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－4：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）（追補版）（改訂2）

1. はじめに

福島第一原子力発電所第4号機原子炉建屋において、燃料取り出し用カバーの設計および瓦礫撤去の進捗に伴い、使用済燃料の取り出し時における建屋の状況および躯体の詳細な損傷状況が明らかになってきた。これを受け、本報告書では、平成23年5月28日に報告した「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）」（東京電力株式会社）（以下、平成23年報告書という）の追補版として、使用済燃料の取り出し時を想定した4号機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。

2. 使用済燃料の取り出し時における原子炉建屋の状況

今後の使用済燃料の取り出し時の原子炉建屋の状況を想定し、平成23年報告書で評価した状況からの変更点を整理した。使用済燃料の取り出し時においては、オペレーティングフロア上部の瓦礫および機器が撤去されるとともに、使用済燃料プール底部の支持構造物や燃料取扱機支持用架構の設置、ヤード整備等が実施されている。今回の評価では、これらの変更点を反映した耐震安全性評価を行う。

（添付資料－1）

3. 原子炉建屋躯体の損傷状況

「福島原子力事故調査報告書」（平成24年6月、東京電力株式会社）において示された原子炉建屋内における水素爆発原因の調査結果を踏まえ、耐震安全性に関わる壁および床を対象とした目視調査を実施し、原子炉建屋躯体の詳細な損傷状況を調査した。損傷の程度をスパンごとに3段階（損傷なし、一部損傷、全壊）に分類し、整理を行った。今回の評価では、このような損傷状況の調査結果を反映した耐震安全性評価を行う。

（添付資料－2）

4. 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）

平成23年報告書で用いた質点系モデルを基に、2. を踏まえて各階の質点重量を増減するとともに、3. において損傷が確認された箇所および「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) (以下、平成 24 年 6 月報告書という) において外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視したモデルを作成し、時刻歴応答解析を実施した。解析の結果、耐震壁に発生するせん断ひずみは平成 23 年報告書のモデルの場合とほぼ同様の結果となり、大きな差異は生じなかった。また、耐震壁に発生するせん断ひずみは最大でも 0.16×10^{-3} であり、評価基準値である 4.0×10^{-3} を大きく下回った。これらの結果から、使用済燃料の取り出し時を想定した状況においても、原子炉建屋は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. 使用済燃料プールの耐震安全性評価結果 (3次元 FEM 解析)

平成 23 年報告書で用いた 3次元 FEM モデルを基に、2. を踏まえて重量の変化および使用済燃料プール底部の支持構造物等を反映するとともに、3. において損傷が確認された箇所および平成 24 年 6 月報告書において外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視したモデルを作成し、応力解析を実施した。解析の結果、使用済燃料プールにおける鉄筋のひずみは最大でも 1180×10^{-6} 、面外せん断力は最も余裕の少ない部位でも 1120 (N/mm) であり、評価基準値である 5000×10^{-6} および 1860 (N/mm) に対して十分余裕があることから、使用済燃料の取り出し時を想定した状況においても、使用済燃料プールは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-4)

6. まとめ

本報告書では、使用済燃料の取り出し時を想定した 4号機原子炉建屋および使用済燃料プールの耐震安全性評価を目的として、平成 23 年報告書で評価した状況からの変更点の整理および建屋躯体の詳細な損傷状況の調査を行い、原子炉建屋の質点系モデルによる解析および使用済燃料プールの 3次元 FEM 解析を実施した。結果として、原子炉建屋および使用済燃料プールは十分な耐震安全性を有していることを確認した。

添付資料－ 1

使用済燃料の取り出し時における原子炉建屋の状況に関する詳細

1. はじめに

福島第一原子力発電所第4号機原子炉建屋においては、瓦礫の撤去や使用済燃料プール底部の支持構造物の設置などが実施され、平成23年5月28日に報告した「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）」（東京電力株式会社）（以下、平成23年報告書という）において耐震安全性を評価した状況から、各部分の荷重状況等が変化している。加えて、今後の使用済燃料の取り出し時においては、燃料取扱機支持用架構等が新たに原子炉建屋上に設置される予定である。ここでは、使用済燃料の取り出し時の原子炉建屋における平成23年報告書で評価した状況からの変更点を整理し、耐震安全性評価に反映するものとする。

添付 1-1

2. 使用済燃料の取り出し時における原子炉建屋の状況の変更点

表-1.2.1 に使用済燃料の取り出し時における平成 23 年報告書で評価した状況からの変更点を、図-1.2.1 に変更点の実施スケジュールを示す。また、次項以降に各変更点に関する詳細を示す。

表-1.2.1 使用済燃料の取り出し時における平成 23 年報告書で評価した状況からの変更点

No	変更点	実施内容
1	オペフロ*1 上部の瓦礫撤去	R 階および CR 階から崩落した瓦礫を撤去
2	オペフロ*1 からの機器撤去	オペフロ*1 上から機器を撤去
3	燃料取扱機支持用架構の設置	燃料取扱機支持用架構を設置
4	雨水浸入対策のための構造物の設置	燃料取り出し用カバーで覆われない範囲に雨水浸入対策のための構造物を設置
5	使用済燃料プール底部の支持構造物の設置	使用済燃料プール底部の支持構造物（鋼製支柱、コンクリート）を設置
6	ヤード整備の実施	ヤード整備のため、西側下屋上に 1m 程度の覆土を実施
7	地下滞留水の考慮	B1 階から MB1 階までに滞留した水の存在を考慮 (平成 23 年報告書の時点では、水位が把握されておらず、評価上考慮されていない)
8	使用済燃料プールの循環冷却の開始	使用済燃料プールの循環冷却の開始により水温が低下（管理温度 65℃）

*1：オペレーティングフロアを示す。以下、オペフロという。

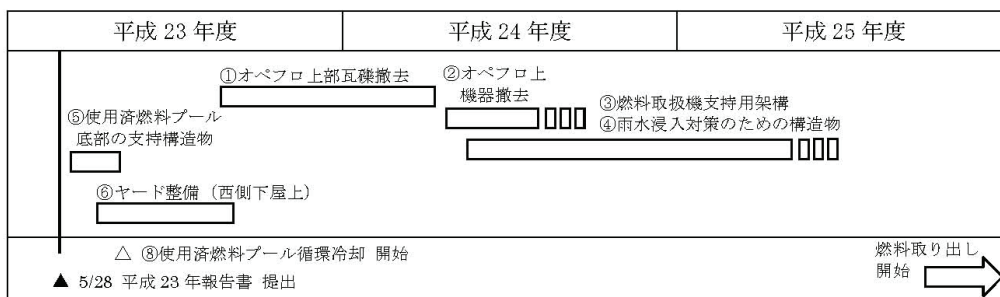


図-1.2.1 変更点の実施スケジュール

添付 1-2

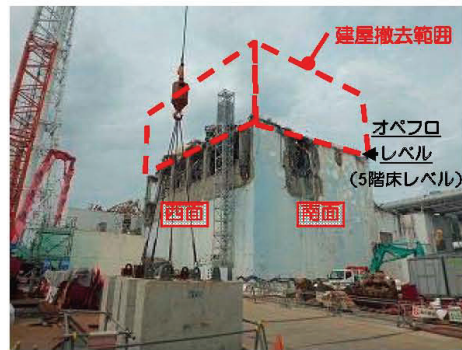
3. オペフロ上部瓦礫および機器撤去

図-1.3.1にオペフロ上部の瓦礫撤去の進捗状況を、図-1.3.2にオペフロ上からの機器撤去の進捗状況を示す。平成23年報告書の段階では、オペフロ上部の瓦礫および機器の重量を考慮していたが、瓦礫については、平成23年11月下旬に着手した撤去作業が平成24年7月上旬に完了しており、機器についても、大型機器（原子炉格納容器の蓋、原子炉圧力容器の蓋）等の撤去が平成24年7月下旬より開始され、平成24年10月に完了予定である。このため、使用済燃料の取り出し時を想定した評価では、これらの瓦礫および機器の撤去による重量減を考慮する。



(a) 瓦礫撤去工事 着手前

撮影日：平成23年9月22日



(b) 瓦礫撤去工事 完了後

撮影日：平成24年7月5日

図-1.3.1 オペフロ上部の瓦礫撤去の進捗状況（南西面）



(a) オペフロ上部の機器

撮影日：平成24年7月9日



(b) 機器の撤去作業

撮影日：平成24年8月10日

図-1.3.2 オペフロ上からの機器撤去の進捗状況（西面）

添付 1-3

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

4. 燃料取扱機支持用架構の設置

図-1.4.1に燃料取扱機支持用架構の南北断面図を、図-1.4.2に梁伏図を示す。使用済燃料の取り出し時には、原子炉建屋上に使用済燃料プールを覆う形で燃料取り出し用カバーが設置される。燃料取り出し用カバーはクレーン支持用架構と燃料取扱機支持用架構を有しており、このうち燃料取扱機支持用架構の荷重は、原子炉建屋シェル壁上端および1階から2階の南側外壁によって支持される構造となっているので、この重量増を考慮する。

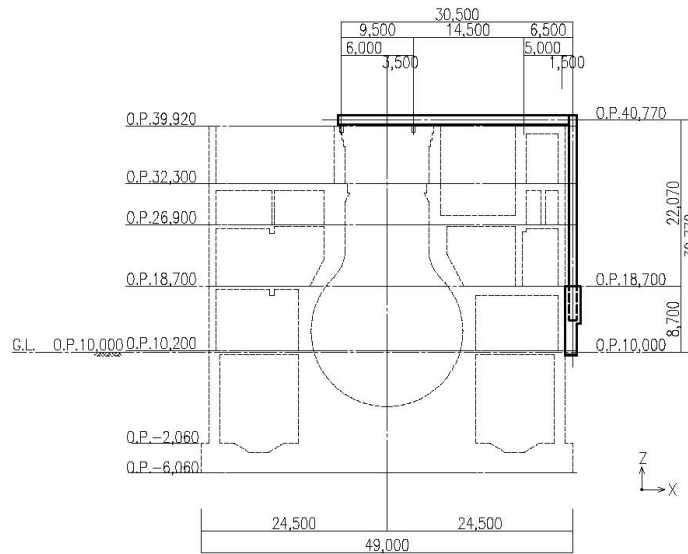


図-1.4.1 燃料取扱機支持用架構 南北断面図

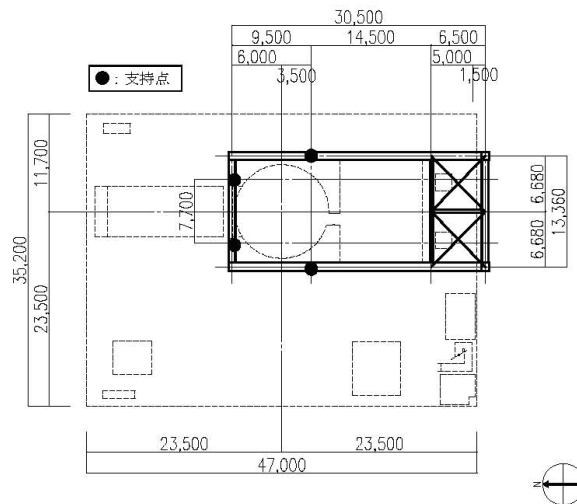


図-1.4.2 燃料取扱機支持用架構 梁伏図 (O.P. 41, 420)

添付 1-4

5. 雨水浸入対策のための構造物の設置

図-1.5.1 に雨水浸入対策のための構造物のイメージを示す。使用済燃料の取り出し時には、原子炉建屋上の燃料取り出し用カバーで覆われない範囲に、雨水浸入対策のための構造物が設置される予定であり、この重量増を考慮する。

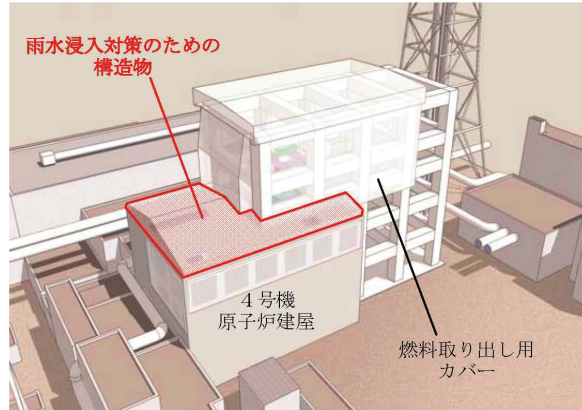


図-1.5.1 雨水浸入対策のための構造物のイメージ

6. 使用済燃料プール底部の支持構造物の設置

図-1.6.1 に使用済燃料プール底部の支持構造物のイメージを示す。使用済燃料プールの安全余裕度向上のため、平成 23 年 7 月 30 日にプール底部に支持構造物を設置した。支持構造物は、鋼製支柱の周囲をコンクリートで固めた構造となっており、使用済燃料プールの負担荷重を低減する効果がある。これに伴い、重量増および支持構造の効果を検討する。

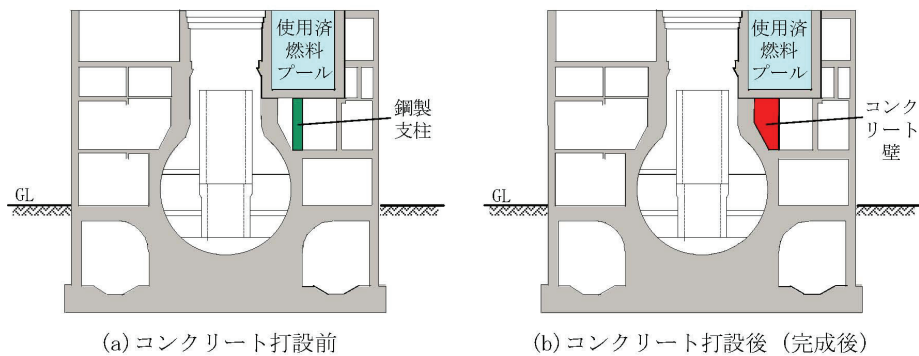


図-1.6.1 使用済燃料プール底部の支持構造物のイメージ（南北断面図）

添付 1-5

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

7. ヤード整備の実施

図-1.7.1にヤード整備のイメージを示す。使用済燃料の取り出し時には、ヤード整備のため、西側下屋上に1m程度の覆土を実施しているため、この重量増を考慮する。

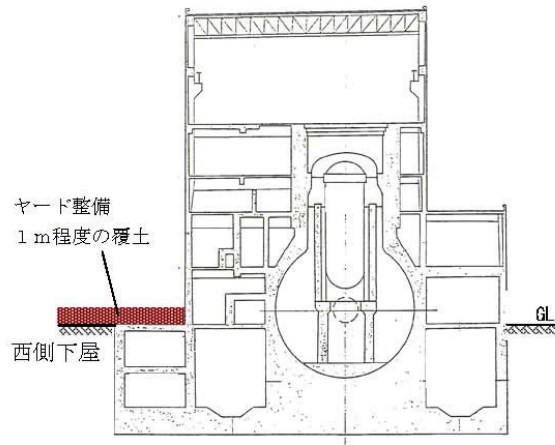


図-1.7.1 ヤード整備のイメージ（東西断面図）

8. 地下滞留水の考慮

図-1.8.1に地下滞留水のイメージを示す。原子炉建屋のB1階からMB1階には、地下滞留水が存在しており、O.P. 3.5mを制限値として水位が管理されている。平成23年報告書の時点では、滞留水の水位が把握できておらず、評価上考慮されていなかったため、今回新たに考慮する。

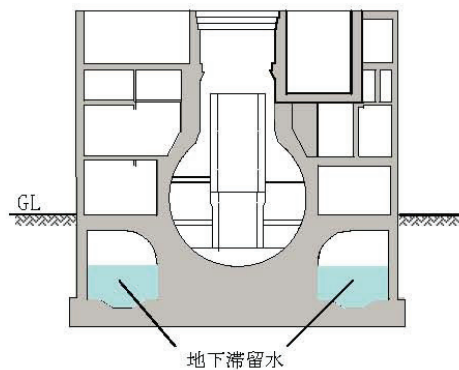


図-1.8.1 地下滞留水のイメージ（南北断面図）

添付1・6

添付資料-2

原子炉建屋躯体の損傷状況に関する詳細

1. はじめに

福島第一原子力発電所第4号機原子炉建屋で発生した水素爆発については、「福島原子力事故調査報告書」（平成24年6月、東京電力株式会社）（以下、事故調査報告書という）において、原因に関する調査および確認結果が示されており、その原因は、3号機の水素ガスを含むベント流が回り込み、4号機の原子炉建屋2階から非常用ガス処理系配管・ダクトを經由して建屋の各所に流れ込んだことによると推定されている。ここでは、これらの調査結果を踏まえ、耐震安全性に関わる壁および床を対象として実施した目視調査に基づき、原子炉建屋躯体の詳細な損傷状況の整理を行う。

2. 事故調査報告書の概要

事故調査報告書に示されている4号機原子炉建屋内の損傷状況に関する調査結果を図-2.2.1～図-2.2.3に示す。

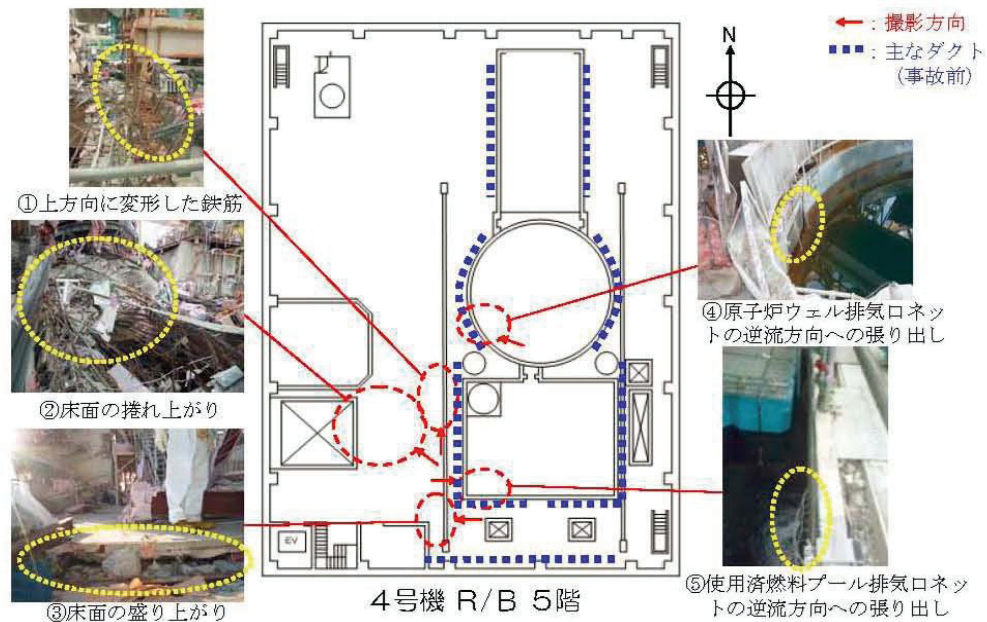


図-2.2.1 建屋内の損傷状況に関する調査結果（5階）

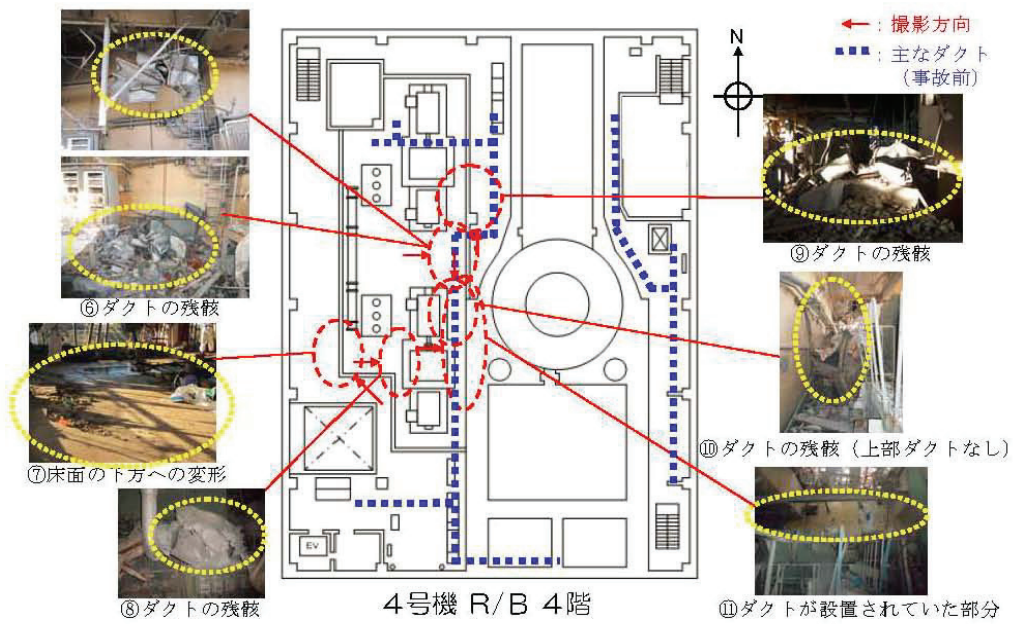


図-2.2.2 建屋内の損傷状況に関する調査結果 (4階)

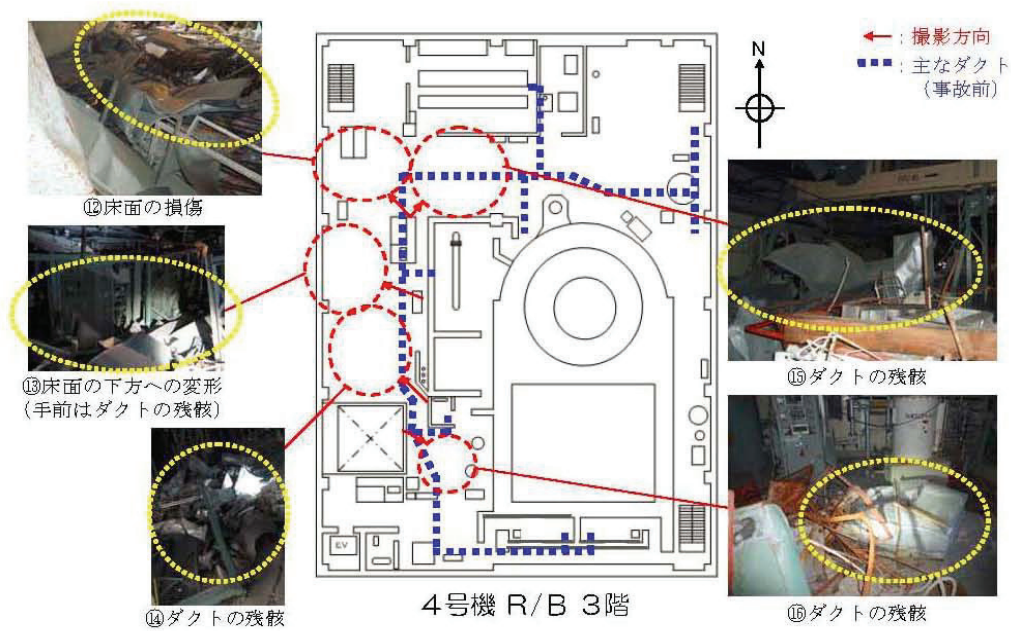


図-2.2.3 建屋内の損傷状況に関する調査結果 (3階)

添付 2・2

3. 原子炉建屋躯体の損傷状況の整理

事故調査報告書の調査結果を踏まえ、耐震安全性に関わる壁および床を対象として実施した目視調査に基づき、原子炉建屋躯体の詳細な損傷状況の整理を行った。スパンごとに損傷の程度を3段階（損傷なし、一部損傷、全壊）に分類した。図-2.3.1～図-2.3.8に原子炉建屋各階における損傷状況を示す。「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）（以下、平成24年6月報告書という）で外壁の一部膨らみが確認された箇所については、一部損傷に分類した。

なお、損傷箇所のうち、部材の耐久性あるいは人的安全性の観点から、補修が望まれる部位については、今後、可能な範囲で補修を実施する予定である。

添付 2-3

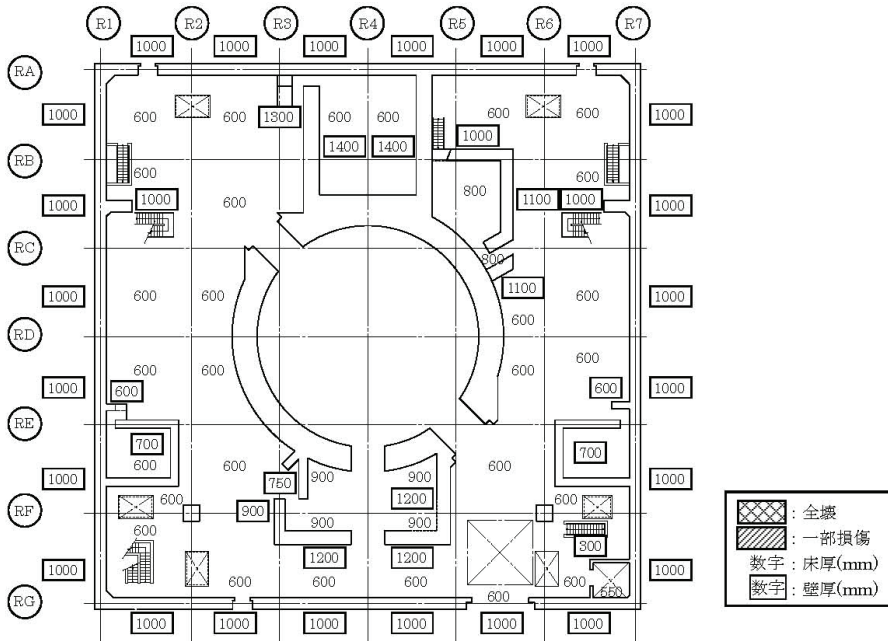


図-2.3.1 損傷状況（1階：損傷なし）

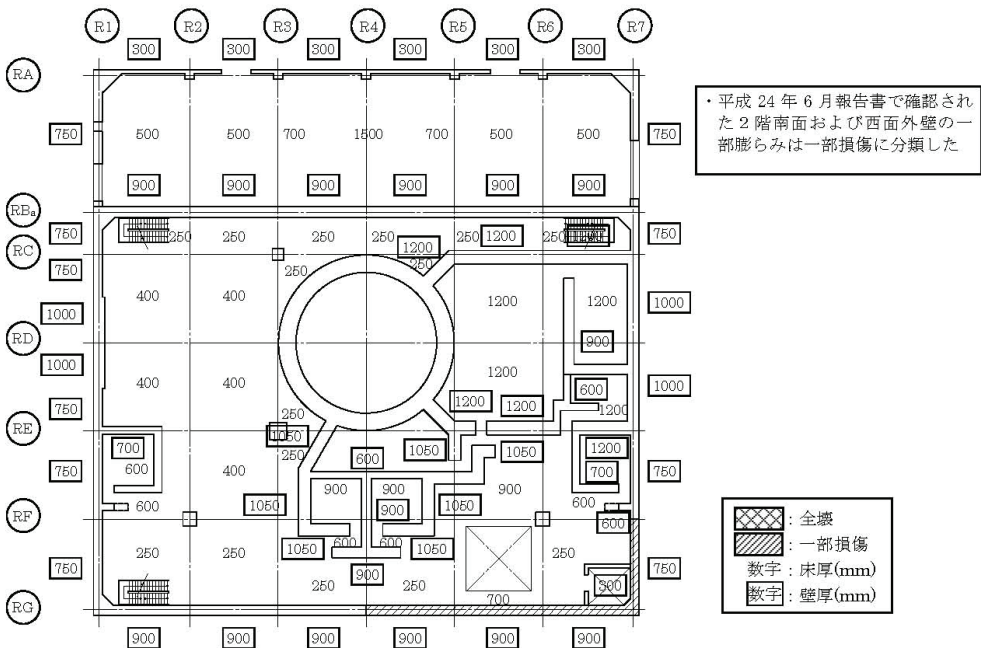


図-2.3.2 損傷状況（2階）

添付 2-4

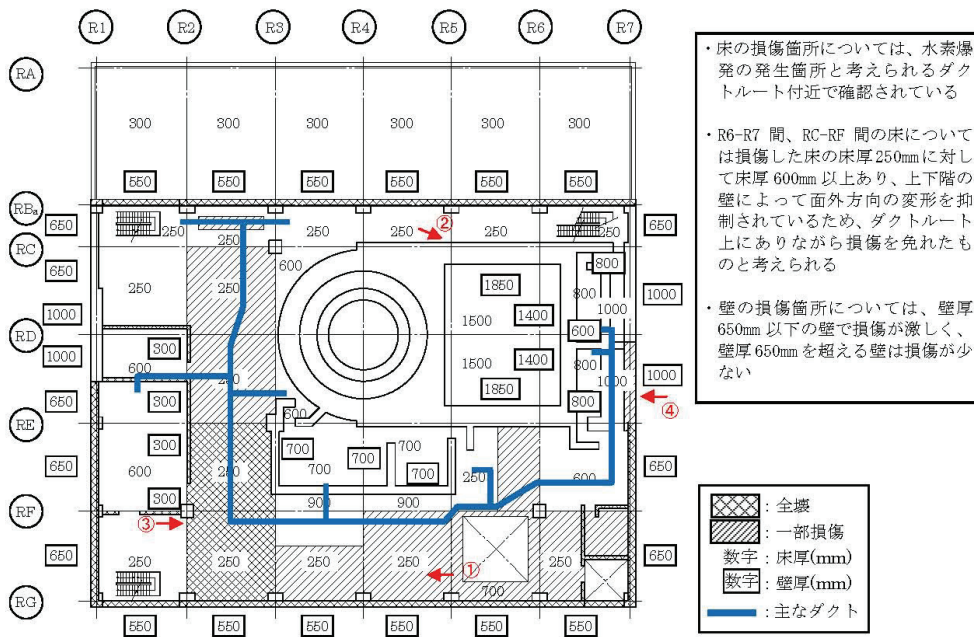
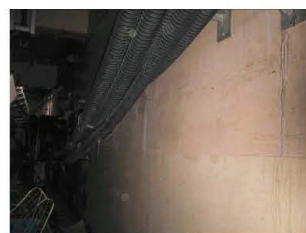


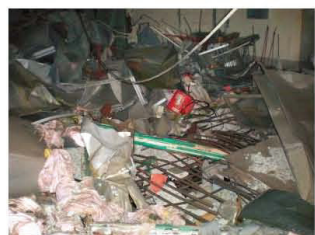
図-2.3.3 損傷状況（3階）



①床変形



②プール壁異常なし



③床崩壊



④外壁一部剥落

図-2.3.4 損傷状況写真（3階）

添付 2-5

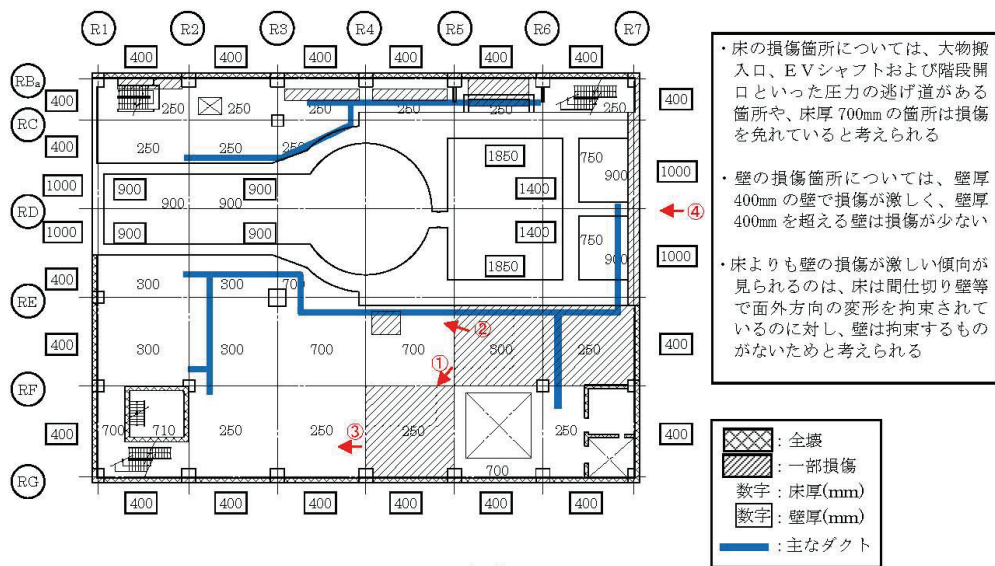


図-2.3.5 損傷状況 (4階)



①床変形



②プール壁異常なし



③床異常なし



④外壁一部剥落

図-2.3.6 損傷状況写真 (4階)

添付 2-6

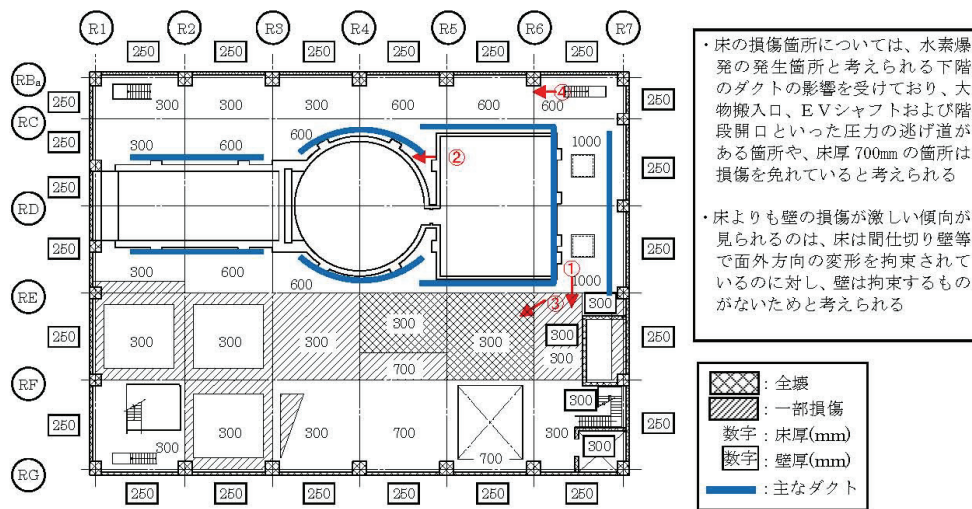
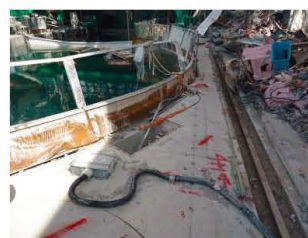


図-2.3.7 損傷状況 (5階)



①床変形



②シェル壁異常なし



③床崩壊



④床異常なし

図-2.3.8 損傷状況写真 (5階)

添付 2-7

添付資料-3

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

本検討では、添付資料-1で整理した使用済燃料の取り出し時における原子炉建屋の状況を踏まえて質点重量を設定するとともに、添付資料-2において損傷（一部損傷および全壊）が確認された箇所および「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）（以下、平成24年6月報告書という）で外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視した地震応答解析モデルを作成し、原子炉建屋の基準地震動における耐震安全性を時刻歴応答解析によって評価する。

なお、入力地震動は基準地震動 Ss-1 及び Ss-2 とし、基準地震動 Ss-3 については、過去の計算例より明らかに応答が小さいことから、「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）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（ 4.0×10^{-3} ）との比較により行う。

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を対象とした。図-3.1.1に耐震安全性評価フローを示す。

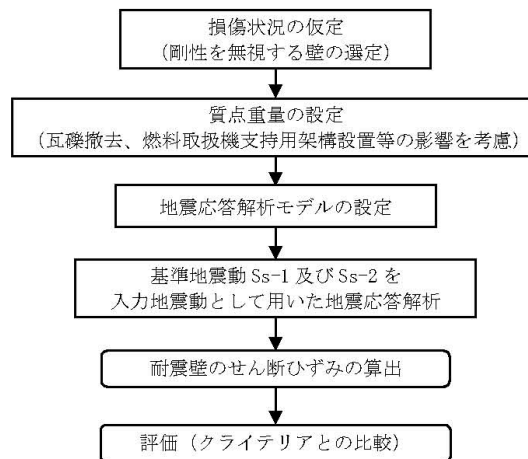


図-3.1.1 原子炉建屋の耐震安全性評価フロー

添付 3-1

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

2. 損傷状況の仮定

損傷状況の仮定にあたっては、平成23年報告書で作成した地震応答解析モデルを基に、添付資料-2において損傷（一部損傷および全壊）が確認された箇所および平成24年6月報告書の外壁の一部膨らみが確認された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-3.2.1に剛性を無視する外壁を示す。

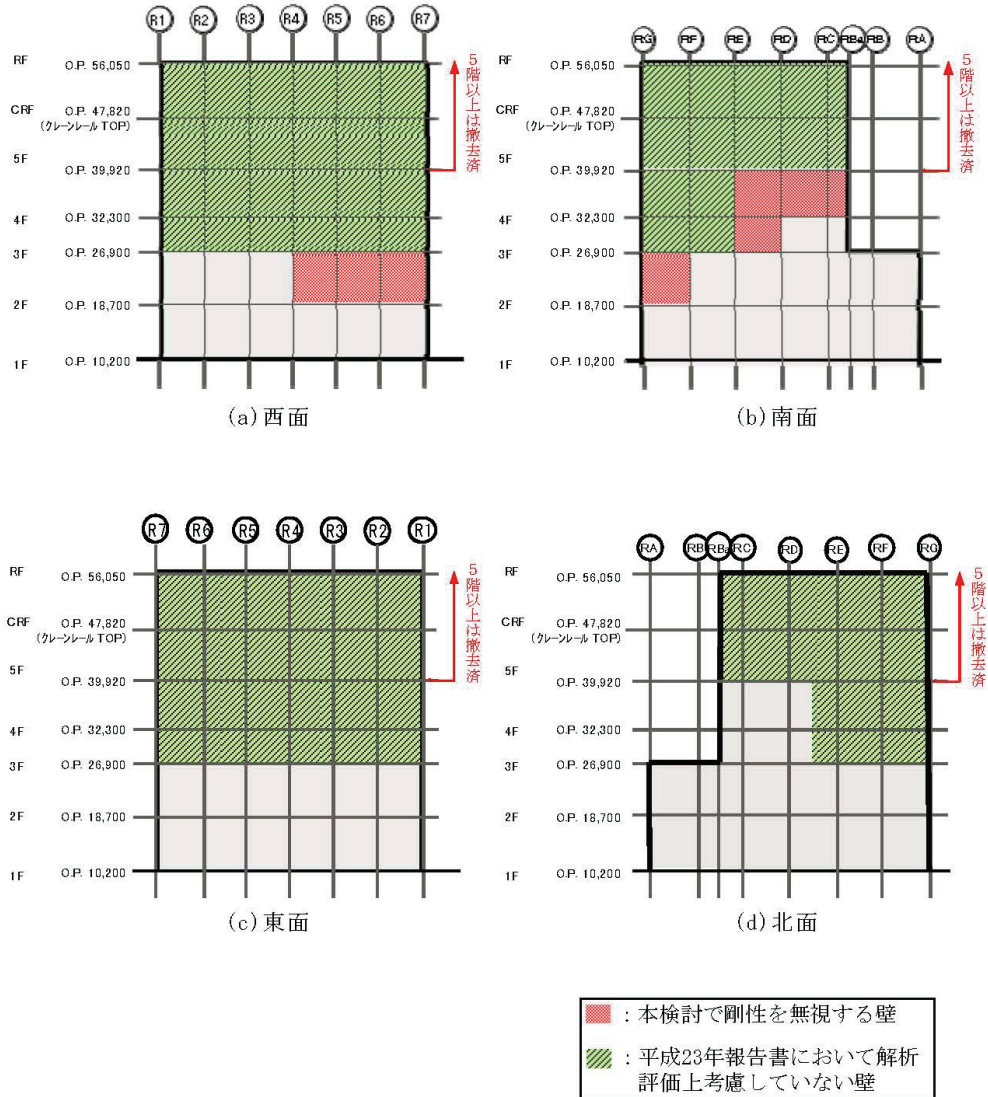


図-3.2.1 剛性を無視する外壁

添付 3-2

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

3. 質点重量の設定

質点重量の設定にあたっては、平成23年報告書のモデルにおける質点重量を基準として、添付資料-1で整理した使用済燃料の取り出し時における平成23年報告書で評価した状況からの変更点などを反映し、重量の増減を行った。表-3.3.1に質点重量の設定根拠を、表-3.3.2に平成23年報告書のモデルからの重量増減と本検討モデルの質点重量の算定結果を示す。

表-3.3.1 質点重量の設定根拠

No	評価項目	評価方法
1	オペフロ ^{*1} 上部の瓦礫撤去	R階およびCR階から崩落した瓦礫の撤去による重量減を評価
2	オペフロ ^{*1} からの機器撤去	オペフロ ^{*1} 上からの機器撤去による重量減を評価
3	燃料取扱機支持用架構の設置	燃料取扱機支持用架構および架構内への装置の設置による重量増を評価
4	雨水浸入対策のための構造物の設置	雨水浸入対策のための構造物の設置による重量増を評価
5	使用済燃料プール底部の支持構造物の設置	使用済燃料プール底部の支持構造物（鋼製支柱、コンクリート）による重量増を評価
6	ヤード整備の実施	ヤード整備のための西側下屋上における1m程度の覆土による重量増を評価
7	地下滞留水の考慮	B1階からMB1階までの滞留した水を重量増として評価 ^{*2} （平成23年報告書の時点では、水位が把握されておらず、評価上考慮されていない）
8	既存躯体（瓦礫）	オペフロ ^{*1} 上部で崩落した外壁重量 ・R階およびCR階から崩落した東面外壁は3階下屋上に存在するとして重量増を評価
		オペフロ ^{*1} 以下で崩落した外壁重量 ・ほぼ全域が崩落した外壁を重量減として評価 ・崩落した東面外壁は3階下屋上に存在するとして重量増を評価
		崩落した床重量 ・ほぼ全域が崩落した床を重量減として評価 ・崩落した床は下階に落下したまま撤去されないとして重量増を評価
		裏面剥離した床重量 ・かぶり部100mmが下階に落下したもとして重量減を評価 ・剥離したかぶり部は下階に落下したまま撤去されないとして重量増を評価
		機器仮置プール内の瓦礫重量 ・瓦礫がプール内に沈殿している状況を想定し、機器仮置プールの水平投影面積あたり厚さ200mmの瓦礫があるもとして重量増を評価

*1：オペレーティングフロアを示す。以下、オペフロという。

*2：滞留水の水位はO.P. 3.5mを制限値として管理されているが、O.P. 4.0mまで水が滞留しているものとして重量を計算し、保守的な扱いとした。

添付 3-3

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

表-3.3.2 平成23年報告書のモデルからの重量増減と本検討モデルの質点重量の算定結果

単位：kN

質点 番号	階	標高 O.P. (m)	平成23年 報告書 モデル	平成23年報告書モデルからの重量増減								本検討 モデル	
				(1) オペフロ 上部 瓦礫撤去	(2) オペフロ 機器撤去	(3) 燃料取扱機 支持用架構	(4) 雨水浸入 対策構造物	(5) 使用済燃料 プール底部 支持構造物	(6) ヤード整備	(7) 地下滞留水	(8) 既存躯体 (瓦礫)		
1	RF	56.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	CRF	47.82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5F	39.92	114,850	-35,820	-9,690	2,660	1,380	0	0	0	0	-3,440	69,940
4	4F	32.3	88,770	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,630	87,140
5	3F	26.9	117,030	0	0	0	0	5,180	0	0	0	5,550	127,760
6	2F	18.7	121,930	0	0	2,170	0	3,600	0	0	0	1,330	129,030
7	1F	10.2	207,300	0	0	1,660	0	0	9,520	0	0	0	218,480
8	B1F	-2.06	287,050	0	0	0	0	0	0	66,690	0	0	353,740
9	MAT	-6.06	132,390	0	0	0	0	0	0	0	0	0	132,390
合計			1,069,320	-35,820	-9,690	6,490	1,380	8,780	9,520	66,690	1,810	0	1,118,480

添付 3-4

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

4. 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)において作成した解放基盤表面レベルに想定する基準地震動 Ss-1 及び Ss-2 を用いることとする。

図-3.4.1 に地震応答解析に用いる入力地震動の概念図を示す。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 Ss 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 Ss-1 及び Ss-2 の加速度時刻歴波形について図-3.4.2 に示す。

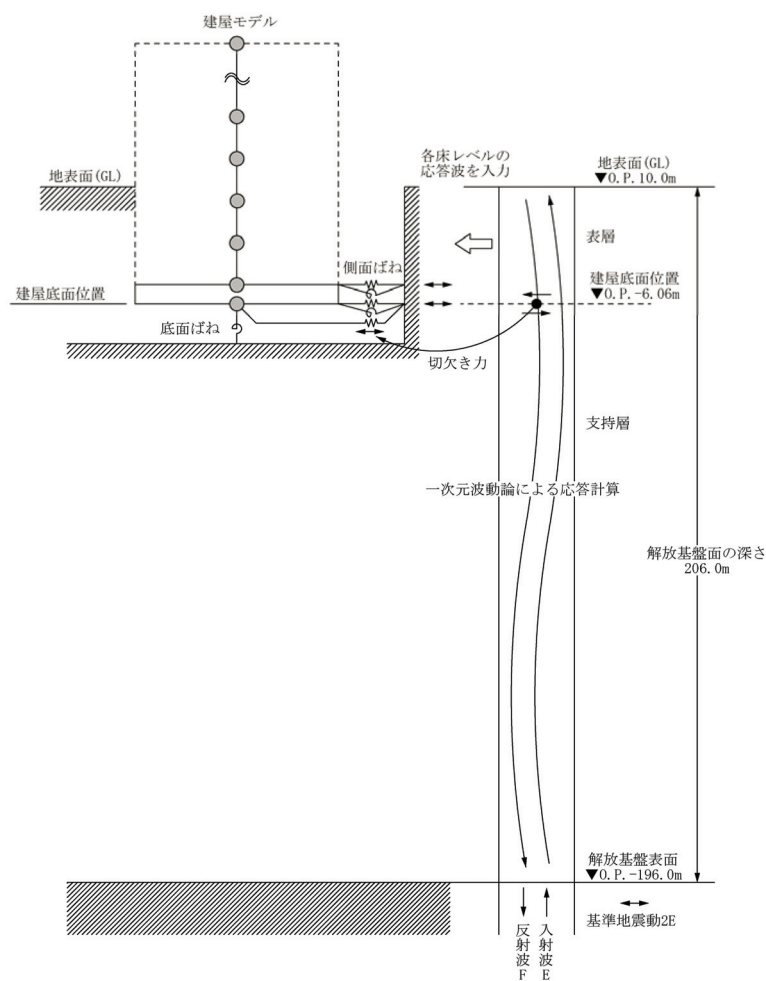
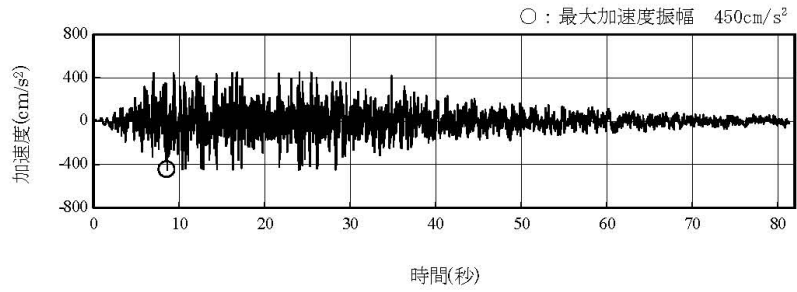
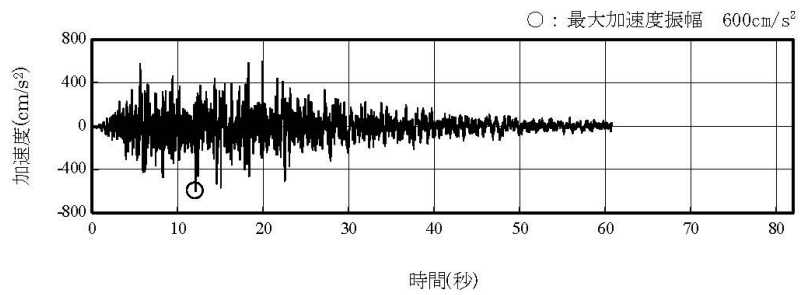


図-3.4.1 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図

添付 3-5



(Ss-1H)



(Ss-2H)

図-3.4.2 解放基盤表面位置における基準地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）

添付 3-6

5. 地震応答解析モデル

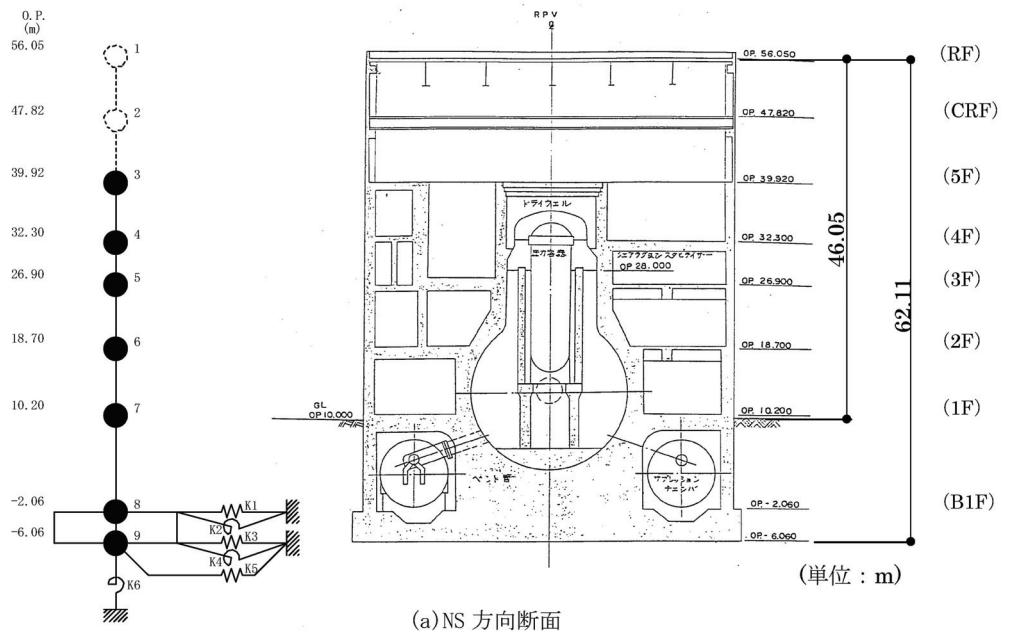
地震応答解析モデルは、図-3.5.1に示すように、建屋を曲げ変形とせん断変形をする質点系とし、地盤を等価なばねで評価した建屋-地盤連成系モデルとする。建屋-地盤連成系としての効果は地盤ばね及び入力地震動によって評価される。表-3.5.1に解析に用いる鉄筋コンクリートの物性値を、表-3.5.2に建屋解析モデルの諸元を示す。

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。表-3.5.3に解析に用いた地盤定数を示す。

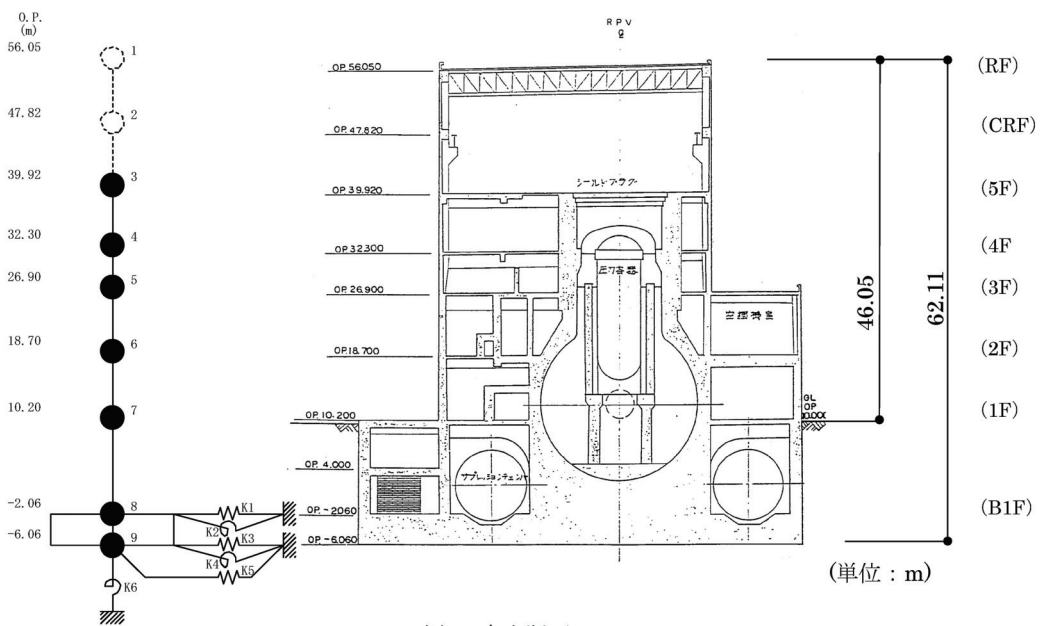
水平方向の解析モデルにおいて、基礎底面地盤ばねについては、「JEAG 4601-1991」に示された手法を参考にして、成層補正を行ったのち、振動アドミッタンス理論に基づいて、スウェイおよびロッキングばね定数を近似的に評価する。また、埋め込み部分の建屋側面地盤ばねについては、建屋側面位置の地盤定数を用いて、水平および回転ばねを「JEAG 4601-1991」に示された手法を参考にして、Novak ばねに基づく近似法により評価する。

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-3.5.2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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm



(a) NS 方向断面



(b) EW 方向断面

図-3.5.1 地震応答解析モデル

添付 3-8

表-3.5.1 地震応答解析に用いる鉄筋コンクリートの物性値

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

*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-3.5.2 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 _e (×10 ⁵ kN・m ²)	せん断断面積 A _s (m ²)	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	69,940	128.73	—	—
4	87,140	160.44	147.1	10,080
5	127,760	235.14	102.2	14,387
6	129,030	237.57	202.7	32,567
7	218,480	402.18	175.4	46,774
8	353,740	707.83	460.4	114,194
9	132,390	264.88	2,812.6	562,754
合計	1,118,480		ヤング係数 E _c 2.57×10 ⁷ (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10 ⁷ (kN/m ²) ポアソン比 ν 0.20 減衰率 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 _e (×10 ⁵ kN・m ²)	せん断断面積 A _s (m ²)	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	69,940	72.20	—	—
4	87,140	89.98	73.0	5,928
5	127,760	235.14	98.3	6,182
6	129,030	237.57	161.6	23,344
7	218,480	599.92	166.4	46,303
8	353,740	1021.56	424.5	136,323
9	132,390	346.27	2,812.6	772,237
合計	1,118,480		ヤング係数 E _c 2.57×10 ⁷ (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10 ⁷ (kN/m ²) ポアソン比 ν 0.20 減衰率 5% 基礎形状 49.0m(NS方向)×57.4m(EW方向)	

添付 3-9

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

表-3.5.3 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 γt (kN/m^3)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G_0 (kN/m^2)	剛性低下率 G/G_0	せん断弾性 係数 G (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	
	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 γt (kN/m^3)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G_0 (kN/m^2)	剛性低下率 G/G_0	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

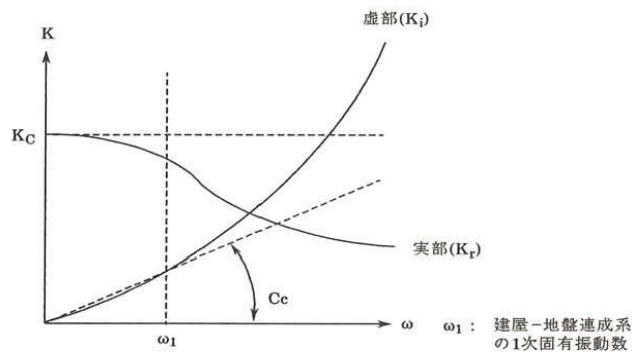


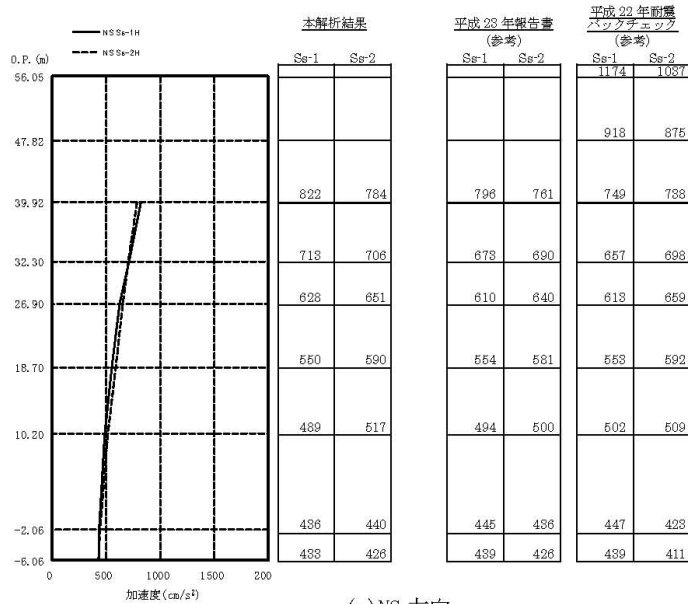
図-3.5.2 地盤ばねの近似

添付 3・10

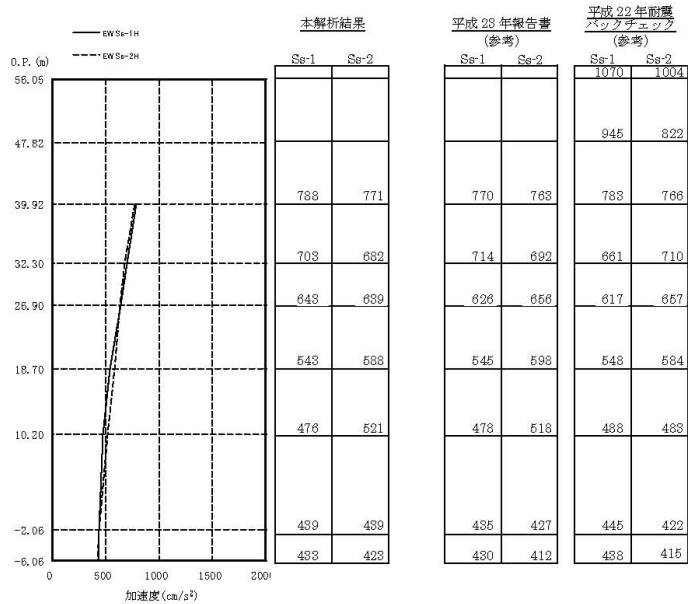
O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

6. 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-3.6.1 に示す。な
お、解析結果は、平成 23 年報告書と「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 (改訂 2)」(平成 22 年 4 月、東
京電力株式会社) (以下、平成 22 年耐震バックチェックという) と比較して示す。



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図-3.6.1 最大応答加速度

添付 3-11

7. 耐震安全性評価結果

図-3.7.1に基準地震動 Ss-1 及び 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 0.16×10^{-3} (Ss-1, 2H, EW 方向, 1F) であり、評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。このことから、使用済燃料取り出し時の状況を想定した原子炉建屋は、損傷の確認された壁、および外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視しても、十分な耐震安全性を有しているものと評価した。

よって、基準地震動 Ss を受けても建屋は崩壊しないと考えられる。

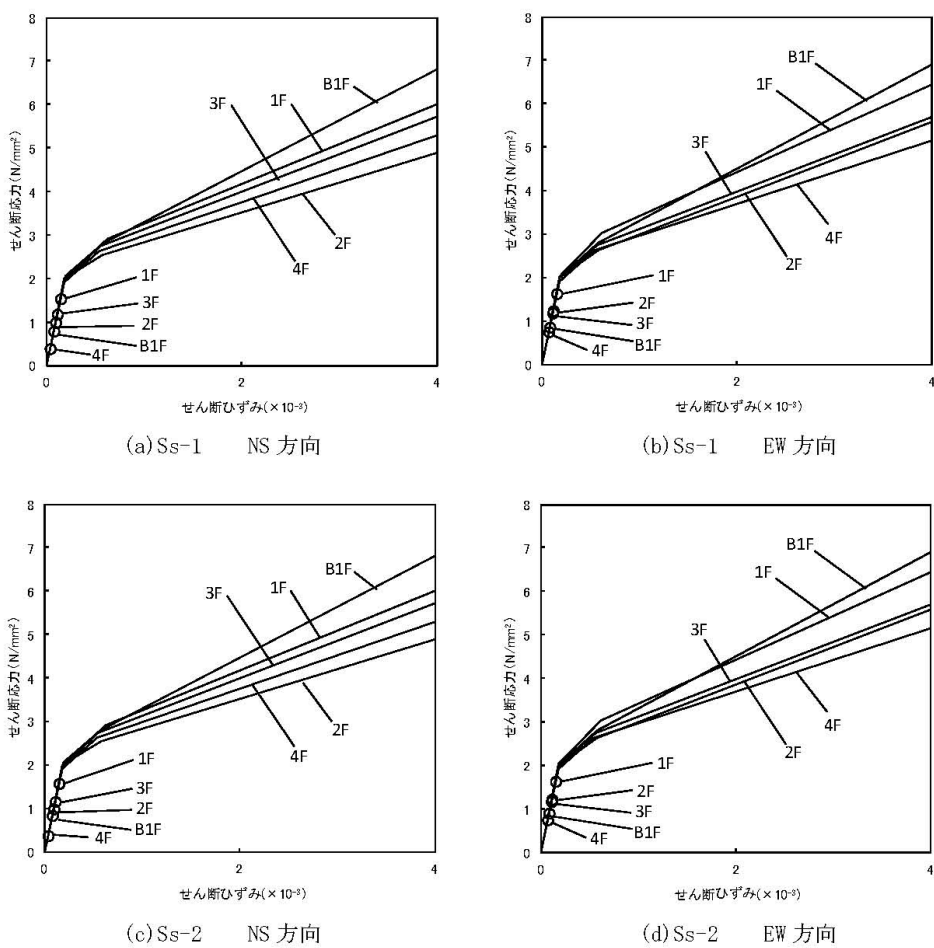


図-3.7.1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値

添付 3-12

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

【参考】

参考として、表-3.7.1、表-3.7.2に本検討結果と平成23年報告書および平成22年耐震バックチェックのせん断ひずみの最大値の比較を示す。

本検討結果と平成23年報告書を比較すると、全体的に本検討の方がせん断ひずみは小さい傾向となっている。これは、オペフロ上部の瓦礫撤去により、5階の重量が軽くなっていることが主な原因であると考えられる。

また、本検討と平成22年耐震バックチェックを比較すると、大きな差異は生じていない。これは、図-3.7.2に示すように、外壁については損傷しているものの、外壁より壁厚が厚いシェル壁や使用済燃料プール壁が健全であったこと、およびオペフロ上部の瓦礫撤去により5階の重量が軽くなっていることが主な原因であったと考えられる。

表-3.7.1 せん断ひずみの比較 (NS 方向) (×10⁻³)

階	O.P. (m)	評価 基準値	本検討		平成23年 報告書		平成22年耐震 バックチェック	
			Ss-1	Ss-2	Ss-1	Ss-2	Ss-1	Ss-2
CRF	47.82 ~ 56.05	4.0	-	-	-	-	0.10	0.09
5F	39.92 ~ 47.82		-	-	-	-	0.17	0.15
4F	32.30 ~ 39.92		0.04	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05
3F	26.90 ~ 32.30		0.11	0.11	0.14	0.14	0.08	0.08
2F	18.70 ~ 26.90		0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
1F	10.20 ~ 18.70		0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16
B1F	-2.06 ~ 10.20		0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

表-3.7.2 せん断ひずみの比較 (EW 方向) (×10⁻³)

階	O.P. (m)	評価 基準値	本検討		平成23年 報告書		平成22年耐震 バックチェック	
			Ss-1	Ss-2	Ss-1	Ss-2	Ss-1	Ss-2
CRF	47.82 ~ 56.05	4.0	-	-	-	-	0.12	0.12
5F	39.92 ~ 47.82		-	-	-	-	0.30	0.20
4F	32.30 ~ 39.92		0.08	0.07	0.09	0.09	0.08	0.08
3F	26.90 ~ 32.30		0.12	0.11	0.13	0.13	0.11	0.11
2F	18.70 ~ 26.90		0.12	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12
1F	10.20 ~ 18.70		0.16	0.16	0.16	0.17	0.16	0.17
B1F	-2.06 ~ 10.20		0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09

添付 3-13

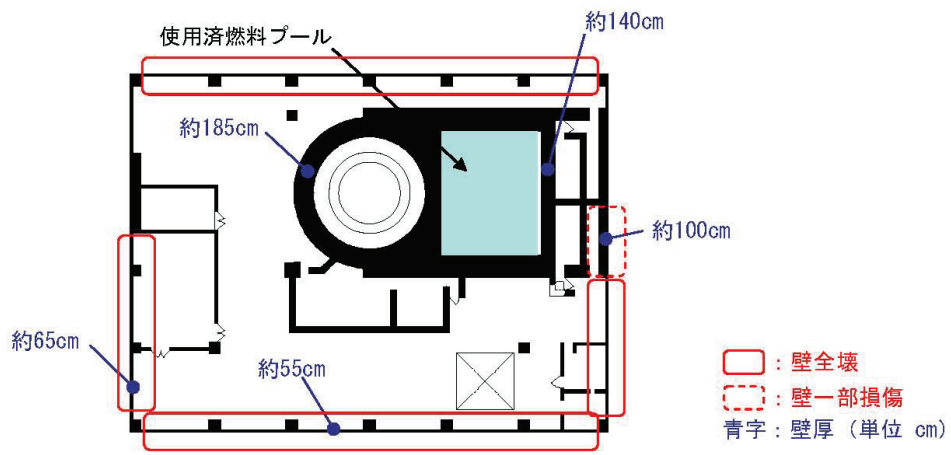


図-3.7.2 外壁の損傷状況と壁厚 (3階を例示)

添付 3-14

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

添付資料-4

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 に対する使用済燃料プールの耐震安全性を評価した。また今年、「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）（以下、平成24年6月報告書という）にて、平成23年報告書で用いた3次元FEMモデルを基に、外壁の一部膨らみが確認された壁の剛性を無視したモデルを作成して、基準地震動 S_s に対する使用済燃料プールの耐震安全性を評価した。

本検討では、添付資料-1で整理した使用済燃料の取り出し時における原子炉建屋の状況を反映するとともに、添付資料-2において損傷（一部損傷および全壊）が確認された箇所および平成24年6月報告書の外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視した解析モデルを作成し、使用済燃料プールの耐震安全性を3次元FEM解析によって評価する。図-4.1.1にプールの平面図を、図-4.1.2に断面図を示す。

耐震安全性評価は、図-4.1.3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）を基に、上記箇所の剛性を無視し、使用済燃料取出し時の状況を想定した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、地震応答解析結果に基づく地震荷重、地震時動水圧、燃料取扱機支持用架構反力などの荷重条件および荷重組合せの条件を設定する。温度荷重については、「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）（追補版）（改訂）」（平成24年9月）から、より詳細な入熱条件を設定し評価を行っている。
- ・ 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。

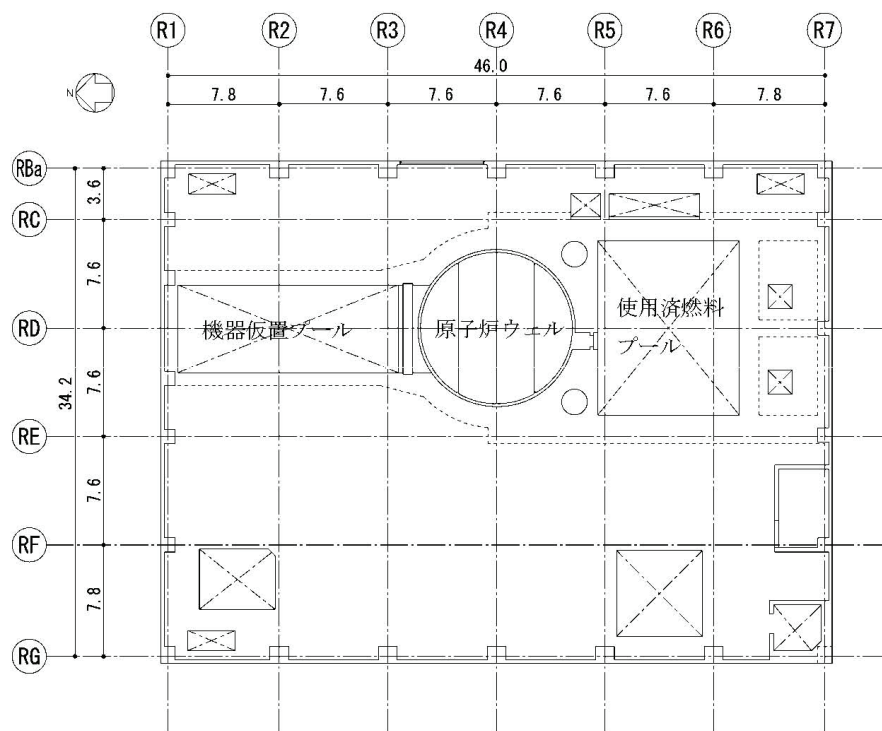


図-4.1.1 5階 平面図
(単位：m)

添付 4-2

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

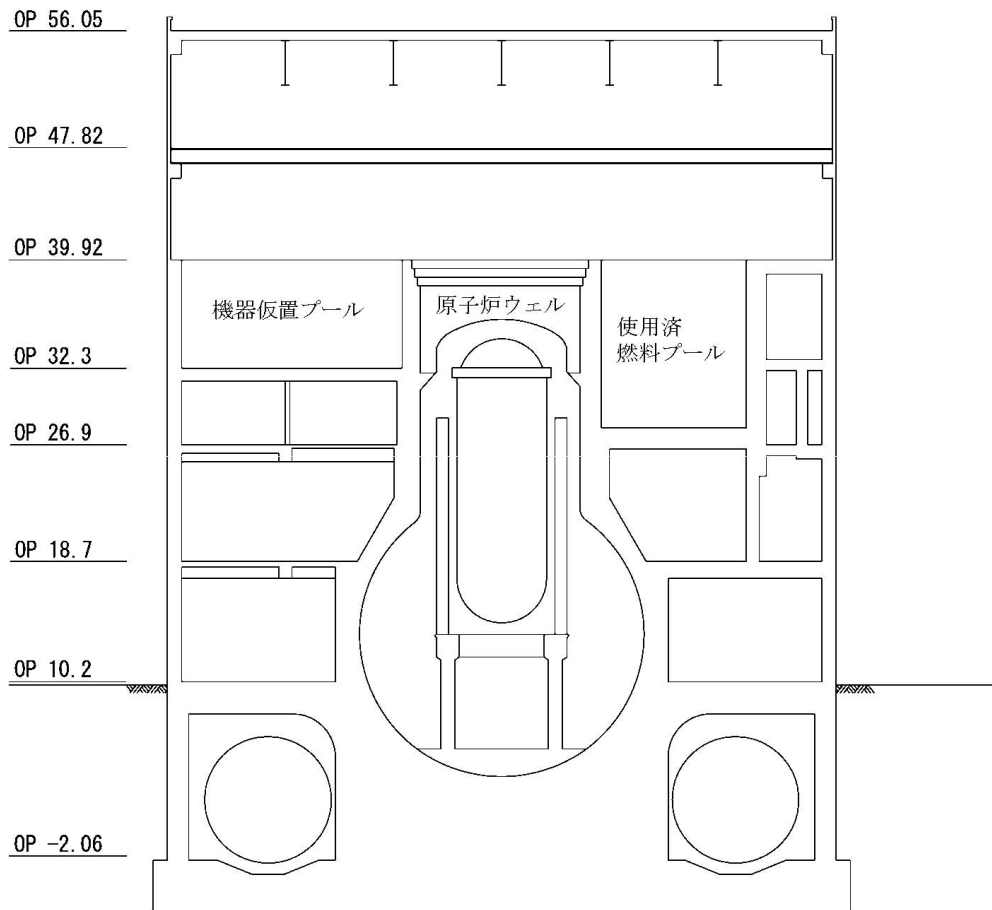


図-4.1.2 断面図
 (NS方向断面, 単位:m)

添付 4-3

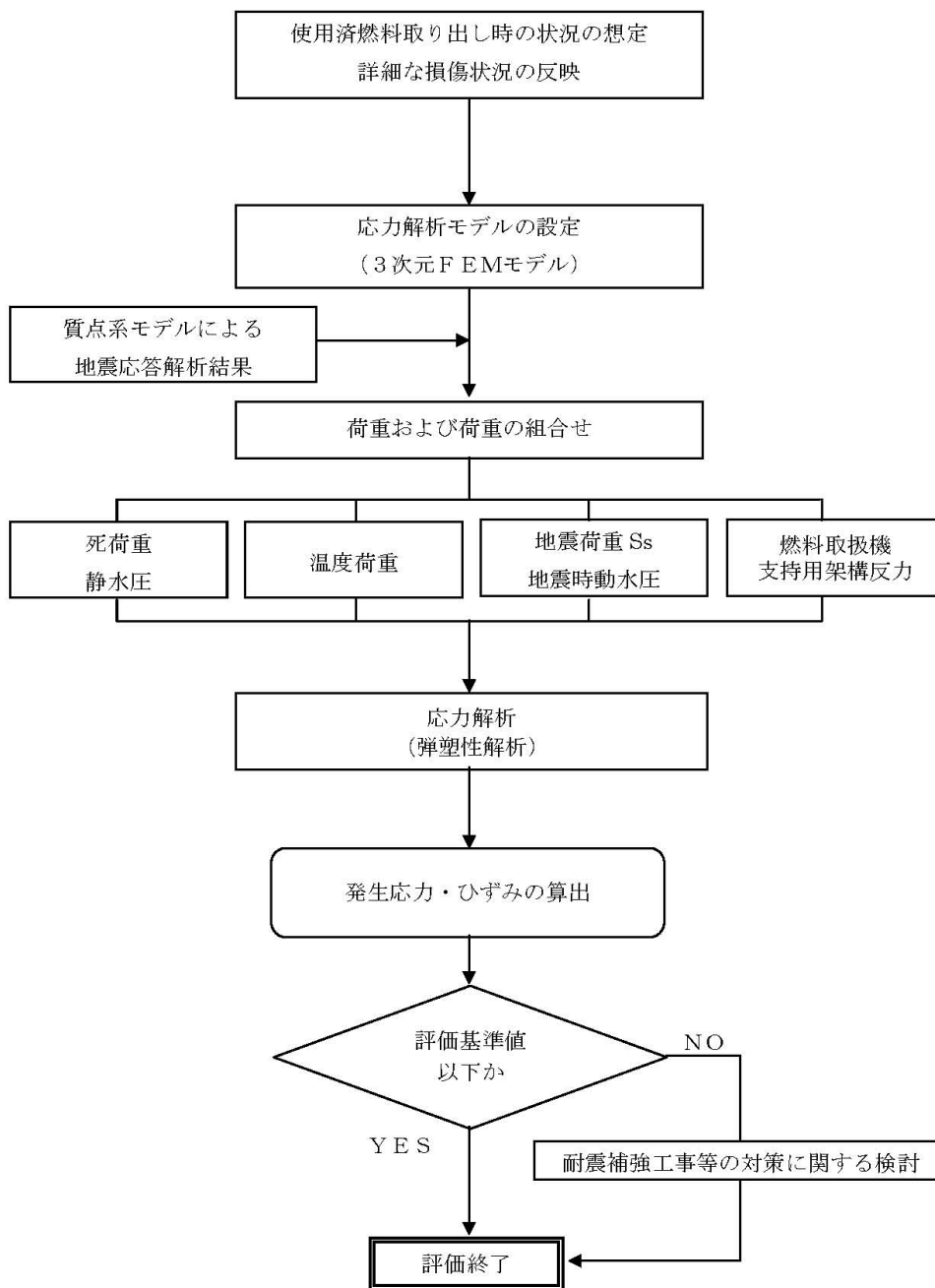


図-4.1.3 使用済燃料プールの耐震安全性評価フロー

添付 4-4

2. 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階のオペレーティングフロア（以下、オペフロという）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した。また、使用済燃料プールの床下には、添付資料-1で示したプール底部の支持構造物として、鋼製支柱等を模擬した要素も設けた。さらに、添付資料-2において損傷（一部損傷および全壊）が確認された箇所および平成24年6月報告書の外壁の一部膨らみが確認された箇所に基づき、外壁および床の一部で剛性を無視した新たな応力解析モデルを構築した。

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た。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した。使用計算機コードは「ABAQUS」である。

図-4.2.1に解析モデル概要図を、図-4.2.2にコンクリートと鉄筋の構成則を、図-4.2.3に解析モデルの境界条件を示す。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

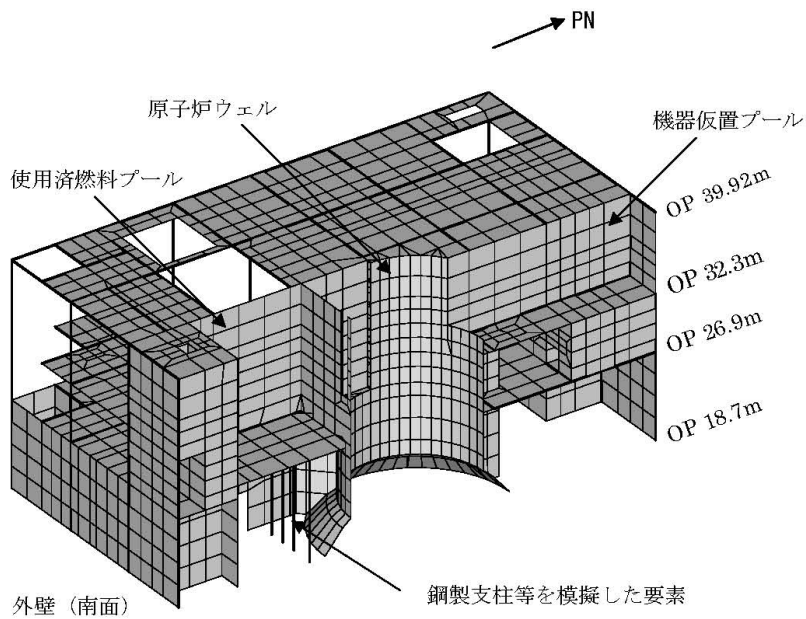
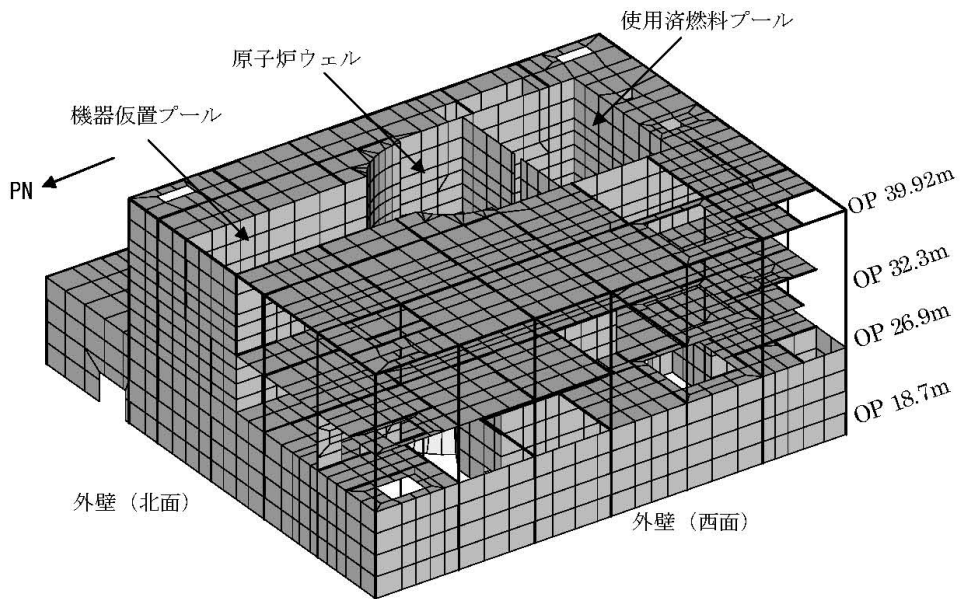
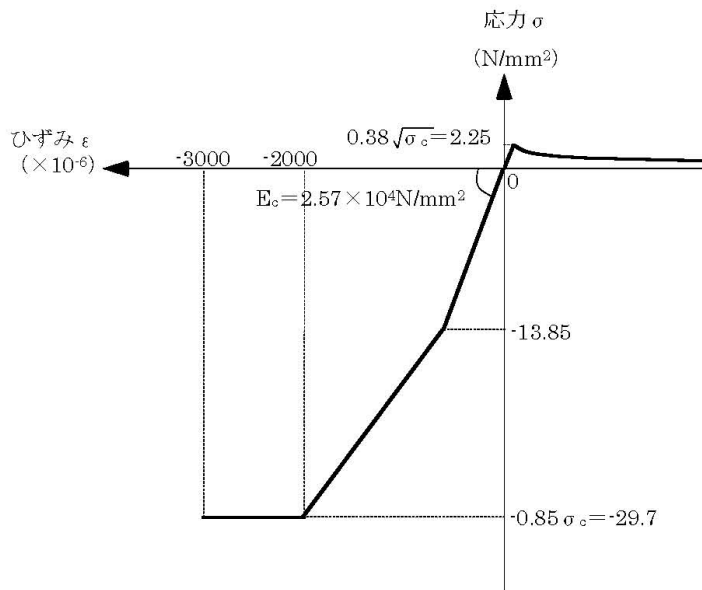
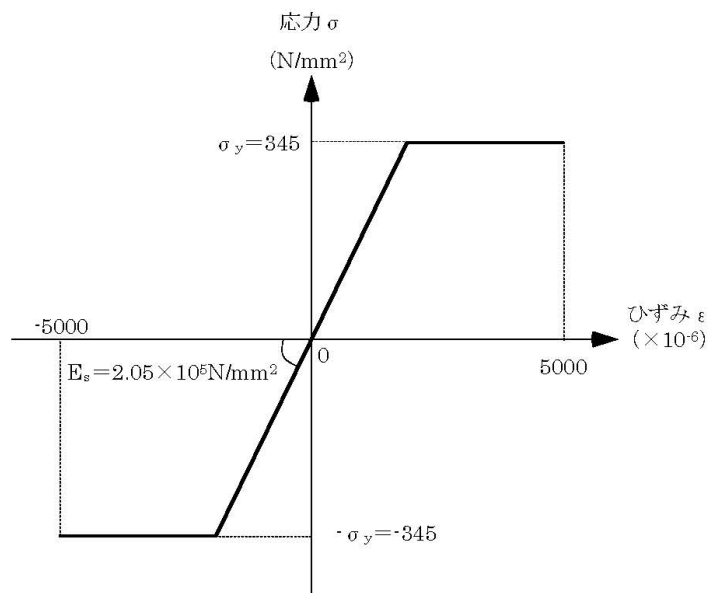


図-4.2.1 解析モデル概要図

添付 4-6



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



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

図-4.2.2 コンクリートと鉄筋の構成則

添付 4-7

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

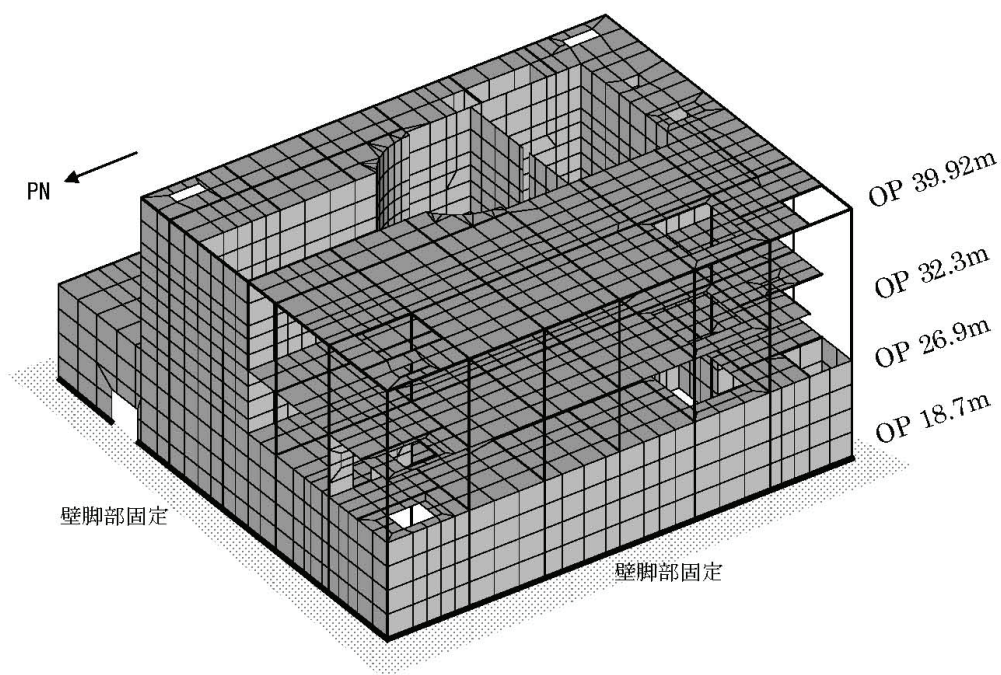


図-4.2.3 解析モデルの境界条件

添付 4-8

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

3. 損傷状況の仮定

損傷状況の仮定にあたっては、添付資料-2において損傷（一部損傷および全壊）が確認された箇所および平成24年6月報告書の外壁の一部膨らみが確認された箇所を基に、平成23年報告書時より新たに下記の損傷部の剛性を無視して、3次元FEM解析モデルを作成する。図-4.3.1～図-4.3.4に損傷モデルを示す。

(1) 外壁・内壁

外壁は、4階（O.P. 32.3m）と3階（O.P. 26.9m）の南側および平成24年6月報告書の外壁の膨らみのある2階（O.P. 18.7m）の西側および南側の一部の壁の剛性を無視する。

内壁は、3階（O.P. 26.9m）の北側の一部の壁の剛性を無視する。

(2) 床スラブ

床スラブは、5階（O.P. 39.92m）～3階（O.P. 26.9m）の一部で、床全壊箇所および床一部損傷箇所のいずれも剛性を無視する。

添付 4-9

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

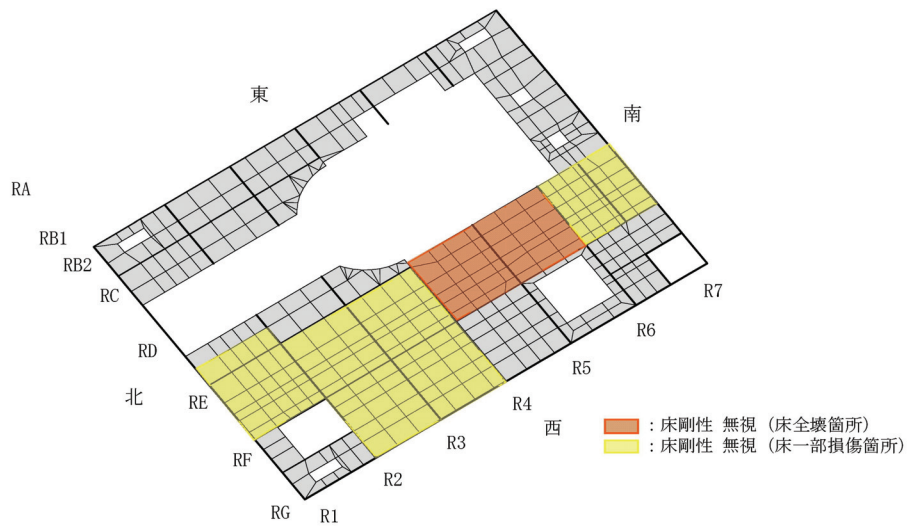


図-4.3.1 損傷モデル アイソメ図 5階 (O.P. 39.92m)

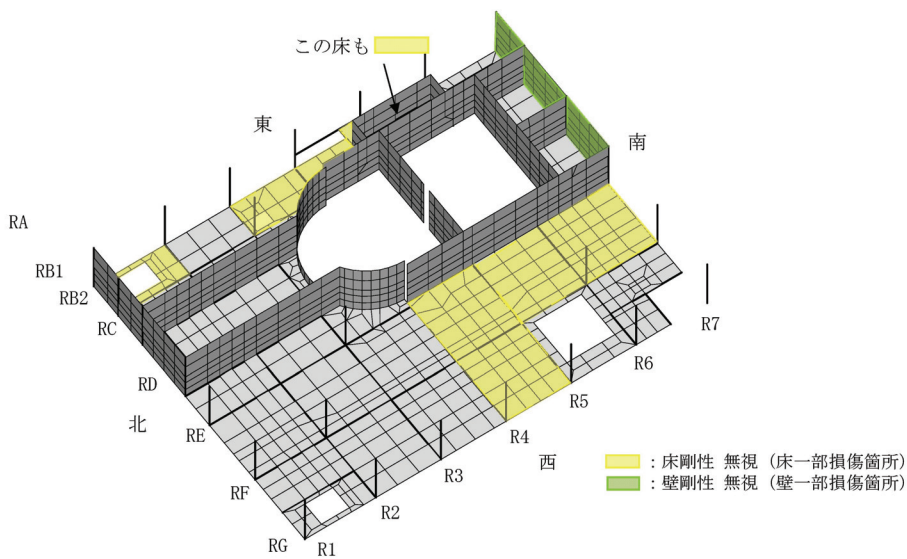


図-4.3.2 損傷モデル アイソメ図 4階 (O.P. 32.3m)

添付 4-10

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

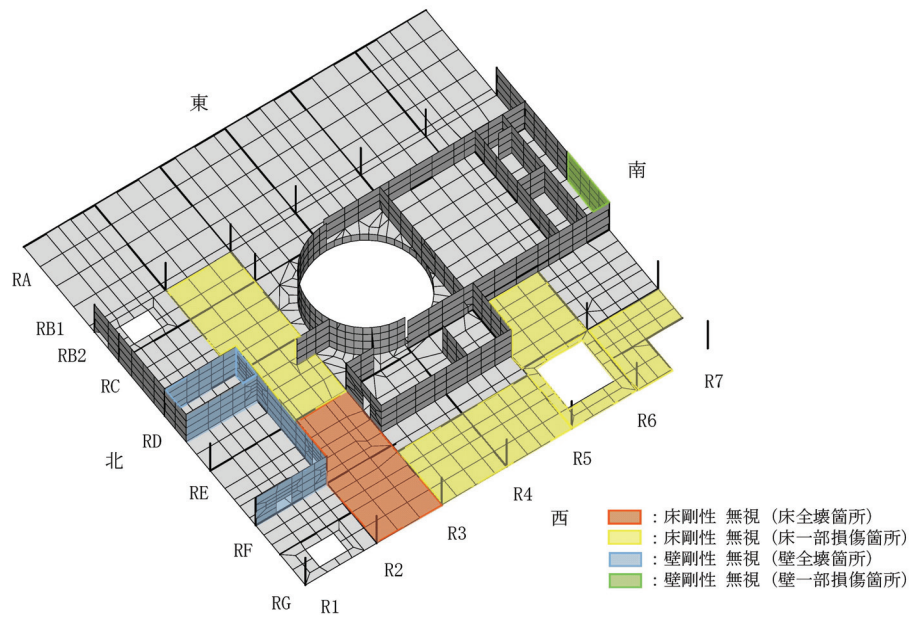


図-4.3.3 損傷モデル アイソメ図 3階 (O.P. 26.9m)

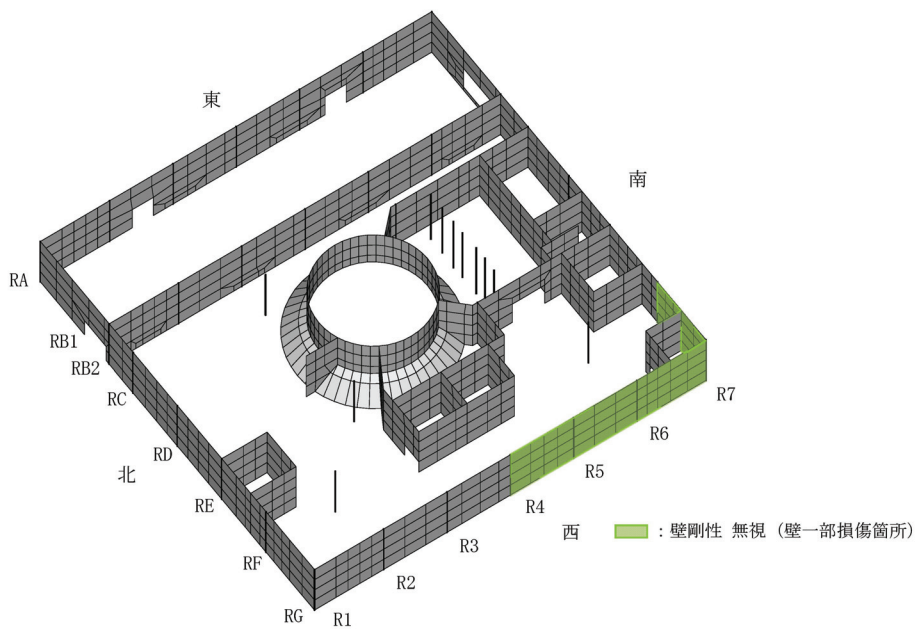


図-4.3.4 損傷モデル アイソメ図 2階 (O.P. 18.7m)

添付 4-11

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に加え、機器・配管・その他の重量は床に様に積載されているものとする。また、プール内に設置されるキャスク重量および燃料取扱機支持用架構重量を、当該設置位置に考慮する。

(2) 静水圧

使用済燃料プール、原子炉ウエ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

プール水の水温は、循環冷却が開始されたことから管理温度の65℃とする。外気温は冬場を想定し0℃とする。

(4) 地震荷重

添付資料-3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およびウエル頂部に作用する燃料取扱機支持用架構からの反力を考慮する。

(6) 荷重の組合せ

表-4.4.1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-4.4.1 荷重の組合せ

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

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、 KF：燃料取扱機支持用架構反力

添付 4-12

5. 解析条件

表-4.5.1 に本検討と平成 23 年報告書の解析条件の比較を示す。

表-4.5.1 本検討と平成 23 年報告書の解析条件の比較

項目		平成 23 年報告書 (基本ケース) *1	本検討 (基本ケース)
モデル	壁 (プール・ シェル含む)	損傷の確認された壁はモデルから削除	全壊・一部損傷の壁の剛性を 0%とする
	床 (プール含む)	3 階床から 5 階床まで全て健全として モデル化	全壊・一部損傷の床の剛性を 0%とする
	補強効果	考慮しない	使用済燃料プール底部の支持構造物の鋼製支柱 を模擬
荷重	死荷重	5 階～屋上階の重量を瓦礫重量として 5 階に集約	オペフロ上部瓦礫撤去、燃料取扱機支持用架構 荷重等を反映 (添付資料-3)
	静水圧	使用済燃料プール、原子炉ウェル、 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	同左
	温度荷重	夏冬は考慮せず、 一律内部 90℃、外部 10℃、炉内 40℃	一律内部 65℃、外部 0℃、炉内 40℃
	地震荷重	損傷を考慮した質点系モデルによる 基準地震動 Ss に対する地震応答解析結果 に基づき、水平および鉛直方向の 地震荷重を考慮	同左
	その他の 荷重	地震時 動水圧 燃料取扱機 支持用架構 反力	損傷を考慮した質点系モデルによる 基準地震動 Ss に対する地震応答解析結果 に基づき、地震時に作用するプール水の 動水圧を考慮 考慮しない 燃料取扱機支持用架構の反力を考慮する

*1：平成 23 年報告書では、基本ケースの他に 3 種類のパラメータケースの解析を実施している。①爆発による影響をみるケースでは、3～4 階の半壊程度の外壁の剛性を 50%に、4～5 階の床剛性を全面にわたって 50%に低下、②火災による影響をみるケースでは、西側プール壁の剛性を 80%程度に、西側の 4～5 階の床剛性を全面にわたって 80%程度に低下、③プール水温の高温化による影響をみるケースでは、プール水温の上昇と冬季を想定し、一律内部 100℃、外部 0℃、炉内 40℃として検討を行った。さらに付録 4-4 では、④プール底部の支持構造物の補強効果を確認するケースの解析も実施している。

6. 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、評価基準値以下となることを確認した。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」に基づき設定した。評価箇所の配筋諸元を図-4.6.1に示す。

評価結果を表-4.6.1～表-4.6.4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、評価基準値を十分に下回っている。このことから、使用済燃料取り出し時の状況において、使用済燃料プールは、損傷の確認された壁、床スラブおよび外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視しても、耐震安全性を有しているものと評価した。

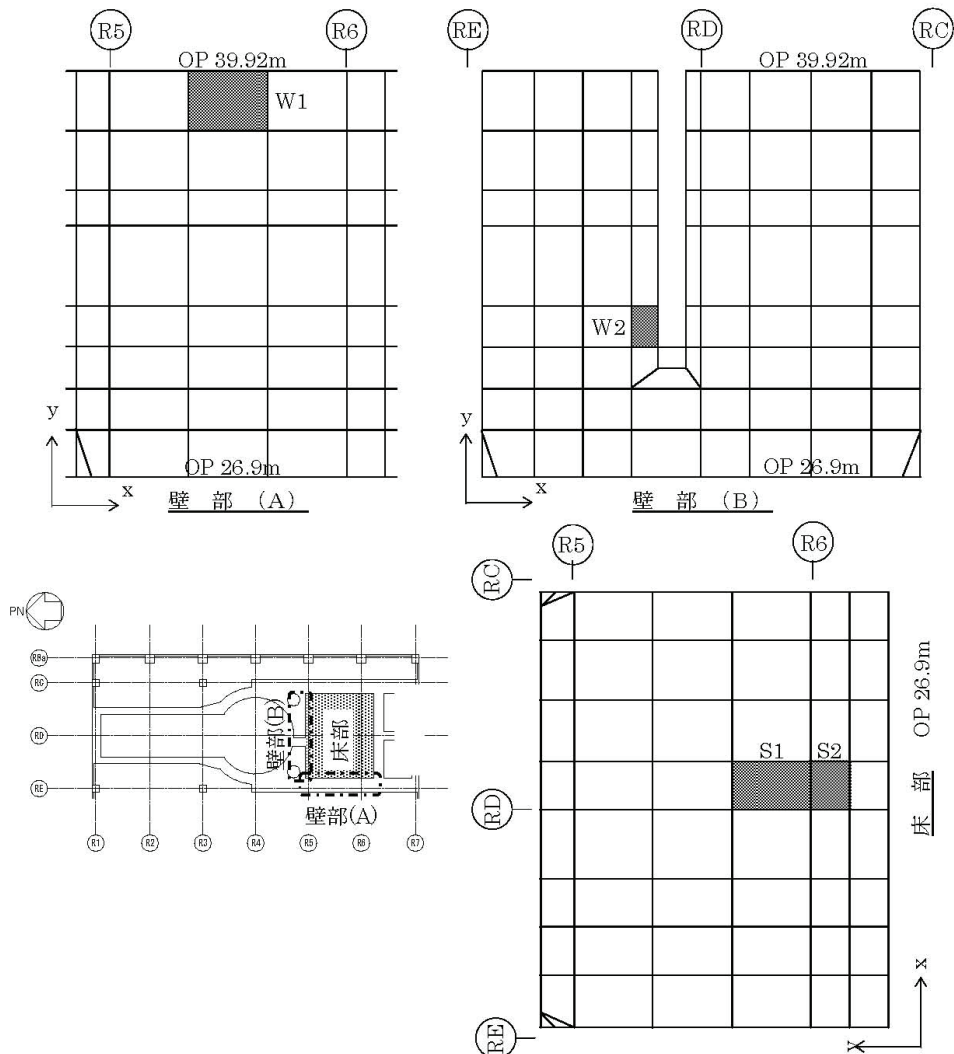
なお、ひずみが弾性範囲内であるため、コンクリートに内張りされたライナーが損傷し、使用済燃料プールの水が漏れ出る可能性はないと考えられる。

表-4.6.1～表-4.6.4に用いる記号の説明

ϵ_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

添付 4-14

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm



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	D38@130	D38@130	D38@150	D38@113	

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-4.6.1 評価箇所の配筋諸元

添付 4-15

表-4.6.1 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 ($\times 10^{-6}$) ϵ	評価基準値 ($\times 10^{-6}$) ϵ'	検定比 ϵ / ϵ'	判定
W1	$c \epsilon_c$	Ss 地震時	-150	-3000	$0.05 \leq 1$	可
	$s \epsilon_c$		-90	-5000	$0.02 \leq 1$	可
	$s \epsilon_t$		1180	5000	$0.24 \leq 1$	可

表-4.6.2 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 ($\times 10^{-6}$) ϵ	評価基準値 ($\times 10^{-6}$) ϵ'	検定比 ϵ / ϵ'	判定
S1	$c \epsilon_c$	Ss 地震時	-370	-3000	$0.13 \leq 1$	可
	$s \epsilon_c$		-140	-5000	$0.03 \leq 1$	可
	$s \epsilon_t$		250	5000	$0.05 \leq 1$	可

表-4.6.3 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 Q' (N/mm)	検定比 Q/Q'	判定
W2	Ss 地震時	1120	1860	$0.61 \leq 1$	可

表-4.6.4 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 Q' (N/mm)	検定比 Q/Q'	判定
S2	Ss 地震時	580	1270	$0.46 \leq 1$	可

添付 4-16

【参考】

参考として、平成 23 年報告書の基本ケースの評価基準値に対する発生ひずみおよび発生応力の比（検定比）が最も大きい箇所での比較を表-4.6.5、表-4.6.6 に示す。壁の面外せん断を除き、壁及び床のひずみおよび床の面外せん断力のそれぞれの検定比は、平成 23 年報告書よりも小さくなっている。これは、主に使用済燃料プールの水温の条件を 90℃から 65℃に変更したことによる温度荷重の低減効果が影響していると考えられる。また、床については使用済燃料プールの底部を鋼製支柱で補強した効果も考えられ、評価基準値に対する余裕が大きくなっている。

なお、本検討と平成 23 年報告書における検定比が最大となる箇所は異なる。図-4.6.2 に平成 23 年報告書におけるひずみおよび面外せん断力の検定比が最大となる箇所を示す。W1' は壁のひずみ、W2' は壁の面外せん断力、S1' は床のひずみ、S2' は床の面外せん断力の検定比が最大となる箇所を示している。

表-4.6.5 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発生ひずみの比較

箇所名	検討ひずみ	荷重時名称	発生ひずみ (×10 ⁻⁶)				評価基準値 (×10 ⁻⁶)
			本検討		平成 23 年報告書		
			検定比	検定比	検定比	検定比	
壁	cε _c	Ss 地震時	-150	0.05	-480	0.16	-3000
	sε _c		-90	0.02	-350	0.07	-5000
	sε _t		1180	0.24	1230	0.25	5000
床	cε _c		-370	0.13	-580	0.20	-3000
	sε _c		-140	0.03	-210	0.05	-5000
	sε _t		250	0.05	490	0.10	5000

表-4.6.6 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)			
		本検討		平成 23 年報告書	
		検定比	検定比	検定比	検定比
壁	Ss 地震時	1120 (1860)	0.61	2040 (3770)	0.55
床		580 (1270)	0.46	800 (1150)	0.70

() 内数値は評価基準値を示す。

添付 4-17

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

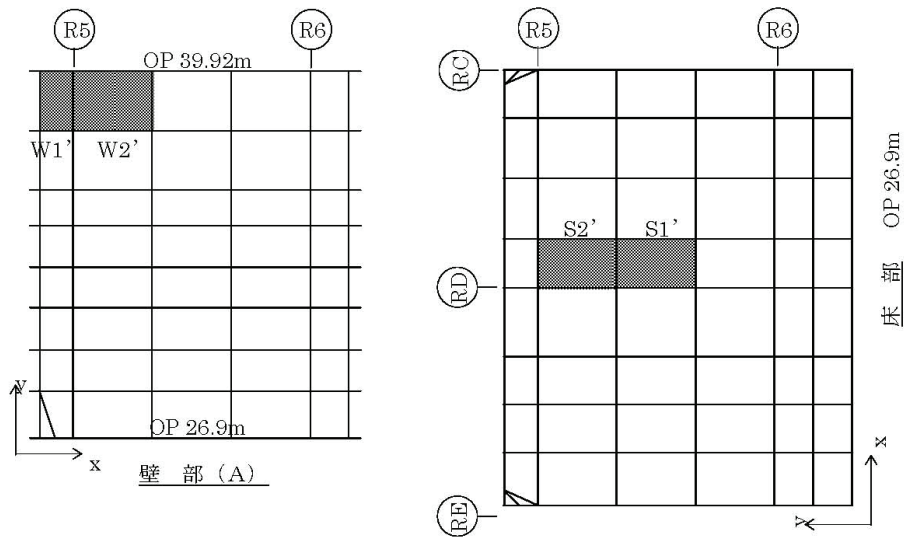


図-4.6.2 平成23年報告書におけるひずみおよび面外せん断力の検定比が最大となる箇所

添付 4-18

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

付録 4-1

使用済燃料プールの耐震安全性評価結果に係わるパラメトリックスタディについて

1. 概要

添付資料-4の本文では、添付資料-2における損傷（一部損傷および全壊）の確認された壁、床スラブおよび平成24年6月報告書の外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視した解析を行った。しかしながら、実際の壁・床スラブの多くは全壊しておらず残存剛性を有している状態にある。ここではこれらの残存剛性を考慮した場合について解析を行い、その影響を把握する。

2. 検討条件

基本ケースで剛性を無視した外壁および床スラブの一部の剛性を以下のように設定する。表-1に基本ケースとの剛性の設定の比較を示す。表-1以外の箇所の剛性は、平成23年報告書の基本ケースと同じ設定とする。損傷モデルを図-1～図-4に示す。

(1) 外壁

外壁は、添付資料-2より、4階（O.P. 32.3m）と3階（O.P. 26.9m）の南側および平成24年6月報告書の外壁の膨らみのある西側および南側の一部の壁の剛性の実状を考慮し50%とする。

(2) 床スラブ

床スラブは、添付資料-2より、5階（O.P. 39.92m）～3階（O.P. 26.9m）の一部において、床一部損傷と判定した箇所の剛性の実状を考慮し50%とする。

表-1 基本ケースとの剛性の設定の比較

ケース	壁の剛性の設定			床スラブの剛性の設定	
	全壊箇所*1	一部損傷箇所*1	膨らみ部*2	全壊箇所*1	一部損傷箇所*1
基本ケース	0%	0%	0%	0%	0%
パラメータケース	0%	50%	50%	0%	50%

*1：添付資料-2に示す損傷の確認された箇所

*2：平成24年6月報告書で外壁の一部膨らみが確認された箇所

付録 4-1-1

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

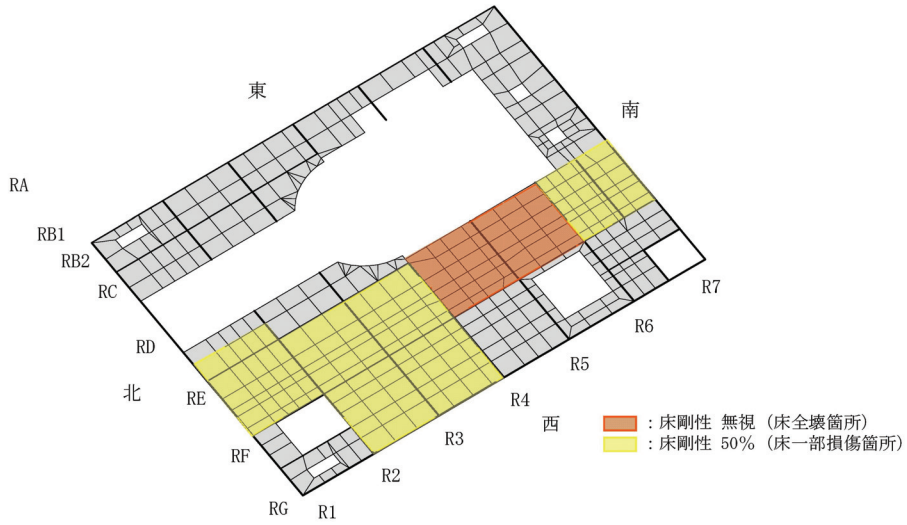


図-1 損傷モデル アイソメ図 5階 (O.P. 39.92m) (パラメータケース)

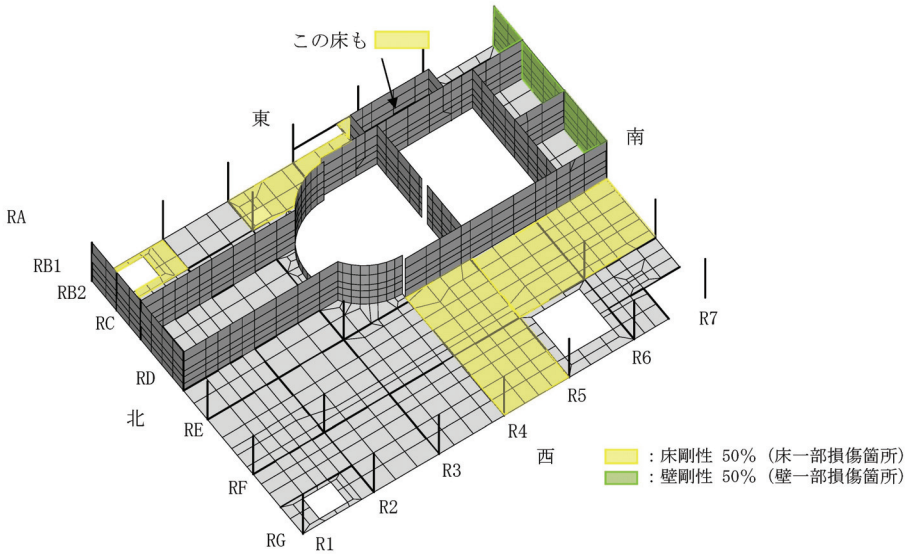


図-2 損傷モデル アイソメ図 4階 (O.P. 32.3m) (パラメータケース)

付録 4-1-2

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

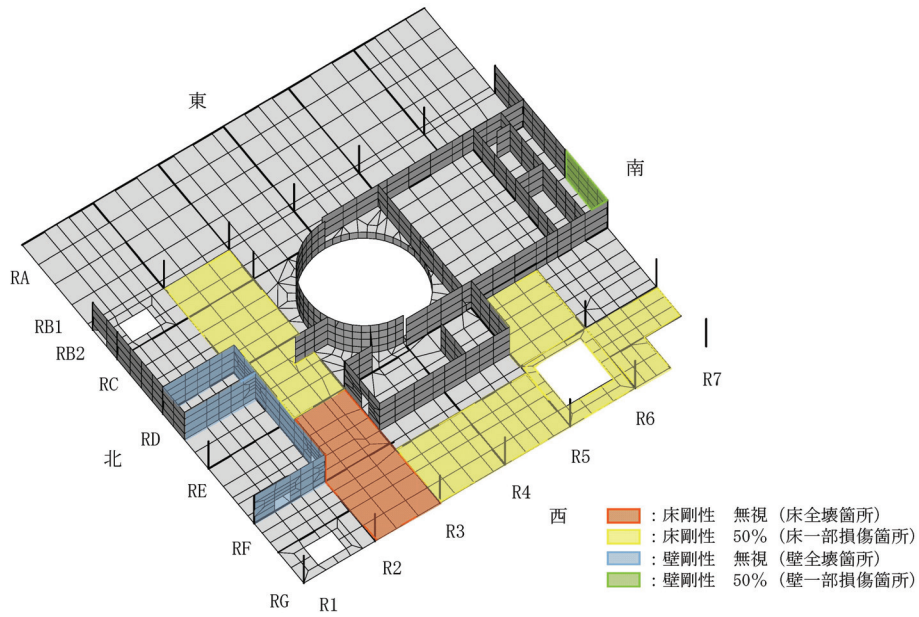


図-3 損傷モデル アイソメ図 3階 (O.P. 26.9m) (パラメータケース)

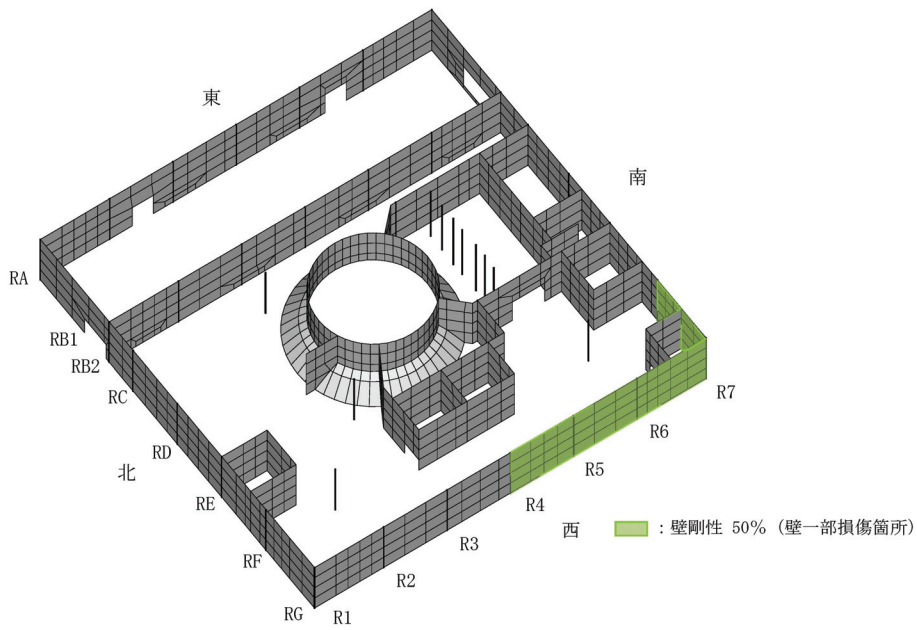


図-4 損傷モデル アイソメ図 2階 (O.P. 18.7m) (パラメータケース)

付録 4-1-3

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

3. 検討結果

基本ケースおよびパラメータケースの評価基準値に対する発生ひずみもしくは発生応力の比（検定比）を比較した結果を表-2に示す。残存剛性を考慮し、外壁および床スラブの残存剛性をモデル化することにより、局所的な応力集中（W2）が緩和される傾向が見られるほか、使用済燃料プールの耐震安全性には大きく影響を与えないことが確認された。

なお、参考として、パラメータケースにおける使用済燃料プールの耐震安全性評価結果の詳細を表-3～表-6に示す。

表-2 評価基準値に対する発生ひずみもしくは発生応力の比（検定比^{*1}）の比較

	箇所名	評価項目	基本ケース	パラメータケース
プール壁	W1	鉄筋ひずみ	0.24	0.22 ^{*2}
		コンクリートひずみ	0.05	0.06 ^{*2}
	W2	面外せん断力	0.61	0.43
プール床	S1	鉄筋ひずみ	0.05	0.05 ^{*2}
		コンクリートひずみ	0.13	0.13 ^{*2}
	S2	面外せん断力	0.46	0.48

*1：表中の値は、1以下であれば評価基準を満たしていることを示している。

*2：プール壁及びプール床のひずみは、評価基準値に対する発生ひずみおよび発生応力の比（検定比）が最大となる箇所が基本ケースとパラメータケースで異なっており、上記表上のパラメータケースにおけるひずみには、検定比が最大となる箇所の値ではなく、基本ケースと同じ箇所の値を記載している。なお、パラメータケースにおける検定比が最大となる箇所は図-5に示す壁部(A)のW1"および、床部のS1"であり、検定比はW1"の鉄筋ひずみで0.24、S1"のコンクリートひずみで0.13である。

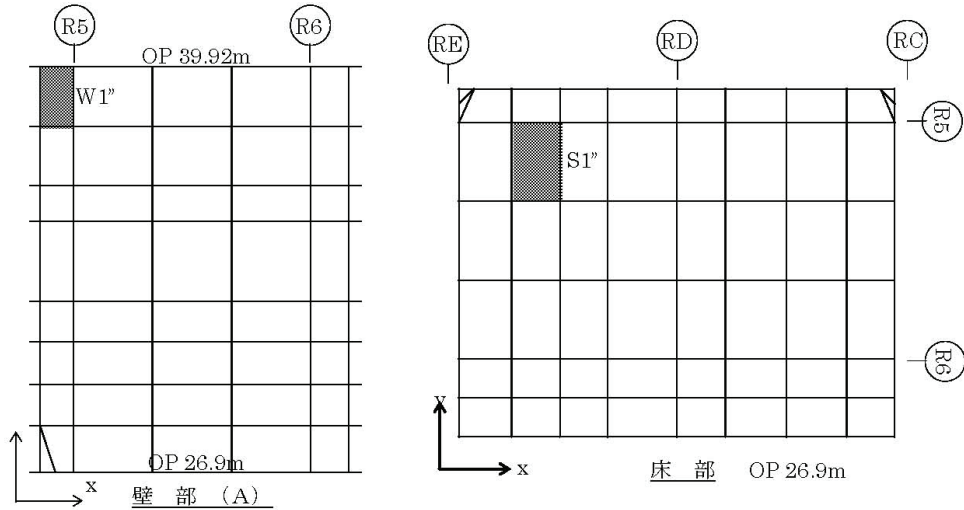


図-5 パラメータケースにおけるひずみの検定比が最大となる箇所（W1"及びS1"）

【パラメータケース】

表-3 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 ($\times 10^{-6}$) ϵ	評価基準値 ($\times 10^{-6}$) ϵ'	検定比 ϵ / ϵ'	判定
W1	$c \epsilon_c$	Ss 地震時	-180	-3000	$0.06 \leq 1$	可
	$s \epsilon_c$		-90	-5000	$0.02 \leq 1$	可
	$s \epsilon_t$		1080	5000	$0.22 \leq 1$	可
W1''	$c \epsilon_c$	Ss 地震時	-320	-3000	$0.11 \leq 1$	可
	$s \epsilon_c$		-240	-5000	$0.05 \leq 1$	可
	$s \epsilon_t$		1200	5000	$0.24 \leq 1$	可

表-4 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 ($\times 10^{-6}$) ϵ	評価基準値 ($\times 10^{-6}$) ϵ'	検定比 ϵ / ϵ'	判定
S1	$c \epsilon_c$	Ss 地震時	-370	-3000	$0.13 \leq 1$	可
	$s \epsilon_c$		-150	-5000	$0.03 \leq 1$	可
	$s \epsilon_t$		240	5000	$0.05 \leq 1$	可
S1''	$c \epsilon_c$	Ss 地震時	-370	-3000	$0.13 \leq 1$	可
	$s \epsilon_c$		-200	-5000	$0.04 \leq 1$	可
	$s \epsilon_t$		180	5000	$0.04 \leq 1$	可

表-5 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 Q' (N/mm)	検定比 Q/Q'	判定
W2	Ss 地震時	790	1860	$0.43 \leq 1$	可

表-6 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 Q' (N/mm)	検定比 Q/Q'	判定
S2	Ss 地震時	600	1270	$0.48 \leq 1$	可

付録 4-1-5

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

付録 4-2

原子炉建屋の鉛直方向の地震応答解析について

使用済燃料プールの3次元FEM解析にあたっては、基準地震動 S_s による鉛直方向の動的解析結果を入力として用いている。ここでは、鉛直方向の地震応答解析結果を示す。

解析モデル作成にあたって、添付資料-2において整理した範囲と同様の範囲を損傷範囲として取り扱うこととし、添付資料-3において求めた質点重量を用いる。

鉛直方向の建屋解析モデルを図-1に、諸元を表-1に示す。

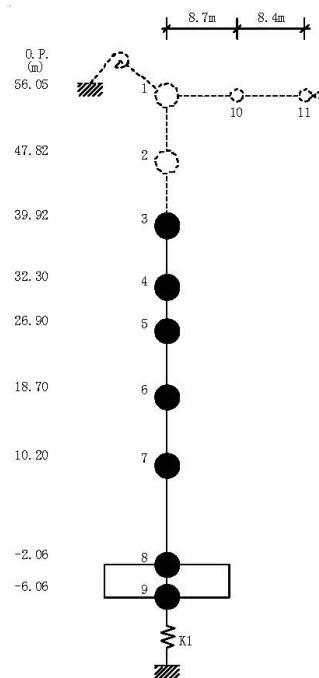


図-1 建屋解析モデル（鉛直方向）

付録 4-2-1

表-1 建屋解析モデルの諸元 (鉛直方向)

質点番号	質点重量 W (kN)	軸断面積 A _N (m ²)	軸ばね剛性 K _A (×10 ⁸ kN/m)
1	—	—	—
2	—	—	—
3	69,940	—	—
4	87,140	204.5	6.90
5	127,760	210.7	10.03
6	129,030	354.5	11.11
7	218,480	340.6	10.30
8	353,740	654.7	13.72
9	132,390	2,812.6	180.71
合計	1,118,480	ヤング係数 E_c せん断弾性係数 G ポアソン比 ν 減衰 h 基礎形状	2.57×10^7 (kN/m ²) 1.07×10^7 (kN/m ²) 0.20 5% 49.0m (NS方向) × 57.4m (EW方向)

付録 4-2-2

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

地震応答解析により求められた鉛直方向の最大応答加速度および最大応答軸力を図-2および図-3に示す。

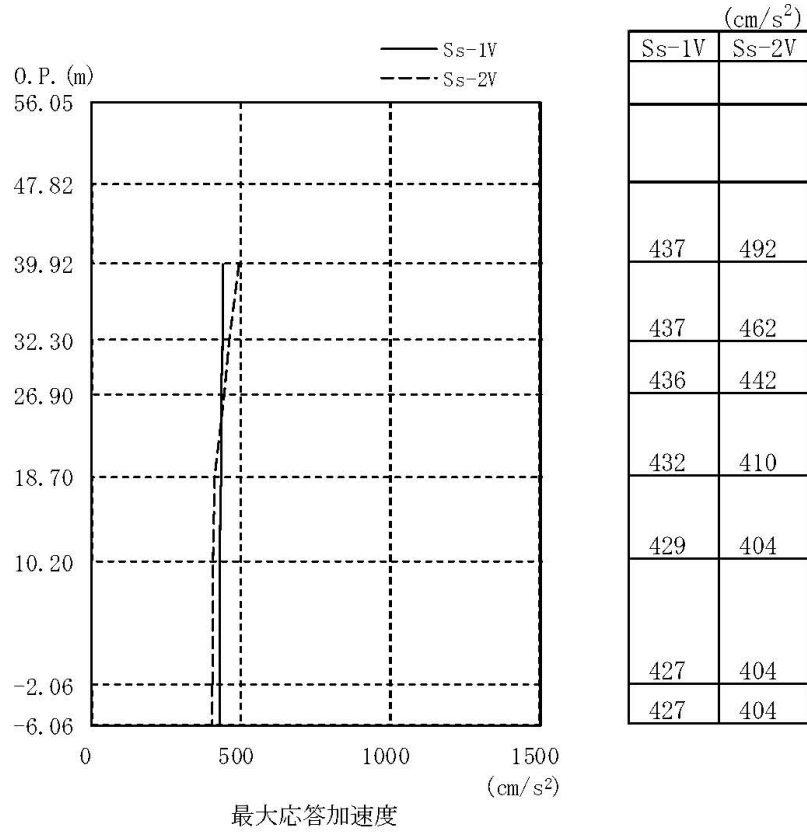


図-2 最大応答加速度 (鉛直方向)

付録 4-2-3

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

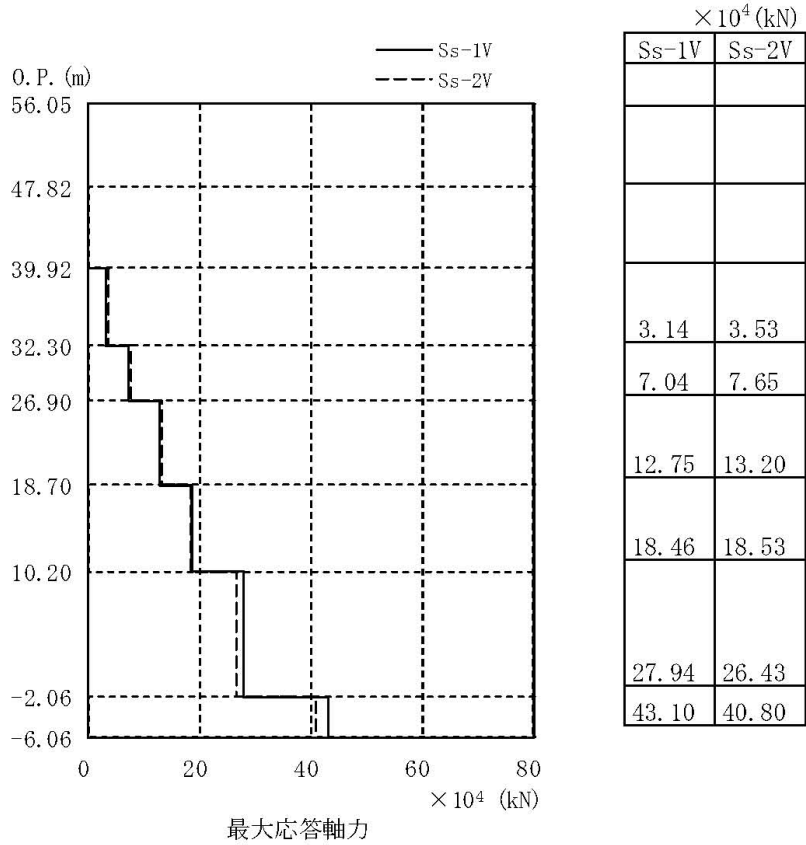


図-3 最大応答軸力（鉛直方向）

付録 4-2-4

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2)

平成23年7月

東京電力株式会社

目次

1. はじめに
2. 耐震安全性評価に関する検討方針
3. 耐震安全性評価に関する検討結果
4. 耐震補強工事等の対策に関する検討結果
5. まとめ

添付資料－1：3号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細
(質点系モデルによる時刻歴応答解析による評価)

添付資料－2：3号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細
(3次元 FEM 解析による局部評価)

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2）

1. はじめに

本報告書は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第67条第1項の規定に基づく報告の徴収について」（平成23年4月13日）に基づき、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に関する検討を実施した結果を報告するものである。

5月28日に提出した（その1）の報告書では、1号機及び4号機を対象としたものであり、今回の（その2）の報告書では、破損状況が著しい3号機を対象としたものである。

2. 耐震安全性評価に関する検討方針

（1）3号機の原子炉建屋

3号機の原子炉建屋については、3月14日に水素爆発とみられる事象により、5階のオペレーティングフロアより上部が破損した。爆発が生じた時の映像によると、かなり大きな爆発であったことが推測され、5階以上の建屋の大部分は爆発後の崩落した鉄骨やコンクリート部材が積み重なったような状況である。また、5階の北西部の床が損傷し、崩落した鉄骨やコンクリート部材の一部はその下の4階の床に積み重なっており、4階の壁のかなりの部分も損傷している。これらの情報を質点系モデルに反映し、基準地震動 S_s による時刻歴応答解析を実施し、耐震壁がせん断破壊する終局状態に至るかどうかについて全体評価を行うこととした。その後、使用済燃料プールなどを含めた3次元FEM解析により局部評価を行うこととし、時刻歴応答解析により得られた最大値を地震荷重として入力し、温度荷重などその他の荷重と組み合わせた評価を行うこととした。この評価手法は、基本的に4号機と同様である。

3. 耐震安全性評価に関する検討結果

（1）3号機の原子炉建屋

基準地震動 S_s を用いた時刻歴応答解析を実施した結果、残存している5階以下の耐震壁に発生するせん断ひずみは最大でも 0.14×10^{-3} であり、評価基準値である 4×10^{-3} を大きく下回っており、十分な安全性を有しているものと評価している（結果的にはおおむね弾性範囲と言える状態であった。）。したがって、耐震安全上重要

な設備である「原子炉圧力容器」、「原子炉格納容器」、「使用済燃料プール」などに影響を及ぼすおそれはないものと評価している。

(添付資料-1)

3次元FEM解析による局部評価結果としては、次のような評価を行った。

- ・ 基準地震動 S_s によって作用する地震荷重とその他の荷重を組み合わせた結果、使用済燃料プールにおいて鉄筋の最大ひずみは 1303×10^{-6} であり、評価基準値である塑性限界ひずみの 5000×10^{-6} に対して十分余裕がある（結果として、解析上の弾性限界ひずみの 1683×10^{-6} よりも小さい）。また、面外せん断力において最も余裕が少ない部位での発生応力は 1689 (N/mm) であり、評価基準値である 3130 (N/mm) に対して十分余裕がある。
- ・ 原子炉格納容器の外側にあるシェル壁についても同様の評価を行っており、鉄筋の最大ひずみは 469×10^{-6} であり、評価基準値である塑性限界ひずみの 5000×10^{-6} に対して十分余裕がある（結果として、解析上の弾性限界ひずみの 1683×10^{-6} よりも小さい）。また、面外せん断力において最も余裕が少ない部位での発生応力は 2475 (N/mm) であり、評価基準値である 3270 (N/mm) に対して十分余裕がある。
- ・ 原子炉格納容器内が高温になった影響でシェル壁の剛性が低下した可能性や爆発によって燃料プールなどの剛性がより低下している可能性を考慮したパラメータスタディや、不確定要素が大きいので逆に剛性の低下を緩和したパラメータスタディの結果によると、多少の数値変動はあるものの解析結果に大きな差異は生じておらず、仮定条件の変動が解析結果に与える影響はそれほど大きくないことを確認している。

(添付資料-2)

4. 耐震補強工事等の対策に関する検討結果

(1) 3号機の原子炉建屋

耐震安全性評価の結果として、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所は無かったことから、現段階では緊急的な耐震補強工事等の対策は考えていない。また、現段階では建物内部の線量レベルが高いことから立入が難しいという面もある。今後、環境改善が進み建物内部の線量レベルが作業を行うのに十分な程度に低減された場合には、建屋内の状況を確認するとともに、余裕度向上の観点からの補強工事を行うことも考慮にいれて、検討に取り組んでいくこととする。なお、残存している崩落した鉄骨やコンクリート部材に関しては、今後の環境改善の進展状況にもよるが、極力早期に撤去していく方針としている。

5. まとめ

本報告書においては、3号機の原子炉建屋について、耐震安全性評価を実施し、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所はないことを確認した。既に報告済みの1号機及び4号機の原子炉建屋も加えると、5階以上の階の損傷が大きい原子炉建屋については、いずれも耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所はないことが確認できたこととなる。

添付資料－１：３号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細
（質点系モデルによる時刻歴応答解析による評価）

1. 解析評価方針

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および耐震性評価は、基準地震動 S_s を用いることを基本とし、建物・構築物や地盤の応答性状を適切に表現できるモデルを設定した上で行う。なお、基準地震動 S_s-3 については、基準地震動 S_s-1 および S_s-2 の応答結果に比べて、過去の計算例（付録 1-1 参照）から明らかに小さいことが分かっているため、今回の検討では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。

3号機原子炉建屋については、地震後の津波によって原子炉の冷却機能が喪失し、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷している。ここでは、原子炉建屋の損傷状況は写真を基に推定し、損傷状況を地震応答解析モデルに反映することとする。

原子炉建屋の構造への影響および耐震性の評価は、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 (4.0×10^{-3}) との比較により行う。

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。

上記の検討により、耐震余裕度が比較的少ない場合には、さらに詳細な検討を行うこととする。

3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。

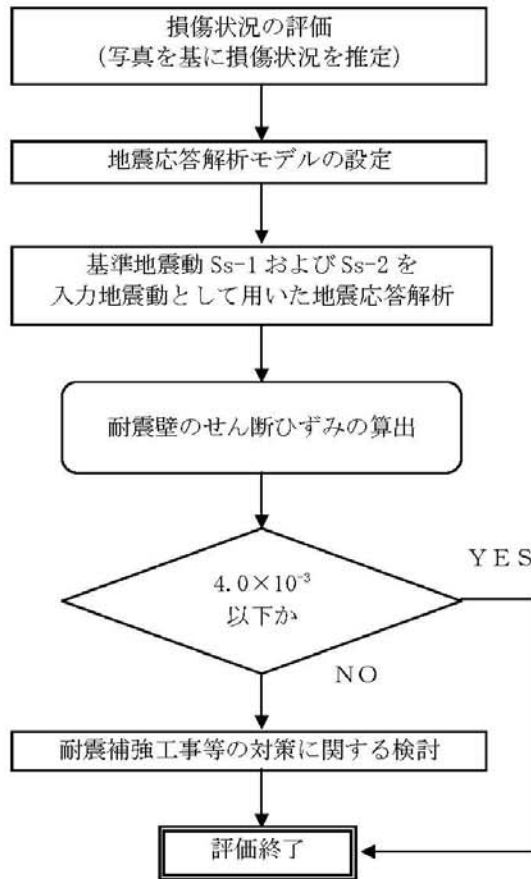


図-1.1 3号機原子炉建屋の地震応答解析の評価手順例

2. 損傷状況の評価

3号機原子炉建屋については、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷している。原子炉建屋の損傷状況は写真を基に推定し、損傷状況を地震応答解析モデルに反映することとする。

各部位の損傷状況評価の考え方を下記に示す。

a. 外壁・屋根トラス

外観の写真から損傷を確認できる外壁・屋根トラスについては、損傷部位として評価した。また、一部剥落が確認された外壁についても損傷として評価した。(図-2.1)

b. 使用済燃料プール

損傷が確認されている外壁の厚さは最大でも600mmであり、使用済燃料プールの壁・床の厚さが1400～1850mmであること及び使用済燃料プールについては循環冷却システムが完成しており満水状態が維持されていることから、損傷は無いものと評価した。

c. 機器仮置プール

外観の写真から一部剥落が確認された外壁部分を除き、機器仮置プール壁に損傷は確認されていない。なお、機器仮置プール西側の壁については、図-2.2に示す写真から部分的に状況を確認した限り、損傷は確認されない。また、損傷が確認されている外壁の厚さは最大でも600mmであり、機器仮置プール壁・床の厚さが900mmであることから、損傷は無いものと評価した。

d. シェル壁

損傷が確認されている外壁の厚さは最大でも600mmであり、3階のシェル壁は、厚さが1850mmであることから、損傷は無いものと評価した。

e. 床スラブ

建屋内については調査結果が得られていないことから、外観写真と外壁の損傷状況から判断することとした。1～3階は、外壁が一部剥落していることを除き外観に異常は見られないことより、損傷は無いものと評価した。4階、5階については、外壁が損傷しており、損傷した外壁以下の厚さである床スラブは損傷している可能性があるものと評価した。また、5階の北西側の床スラブについては、外観写真より床スラブを支持する4階部分の外壁と柱に大きな損傷が確認できることより、損傷部位として評価した。(図-2.3)



北面



西面



東面



南面

図-2.1 外壁の状況



○ 機器仮置プール西側壁の状況が確認できる部分
図-2.2 機器仮置プール西側の壁の状況



図-2.3 5階北西側の床スラブの状況

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

3. 解析に用いる入力地震動

3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 および 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 および S_s-2 の加速度波形について、図-3.2 に示す。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

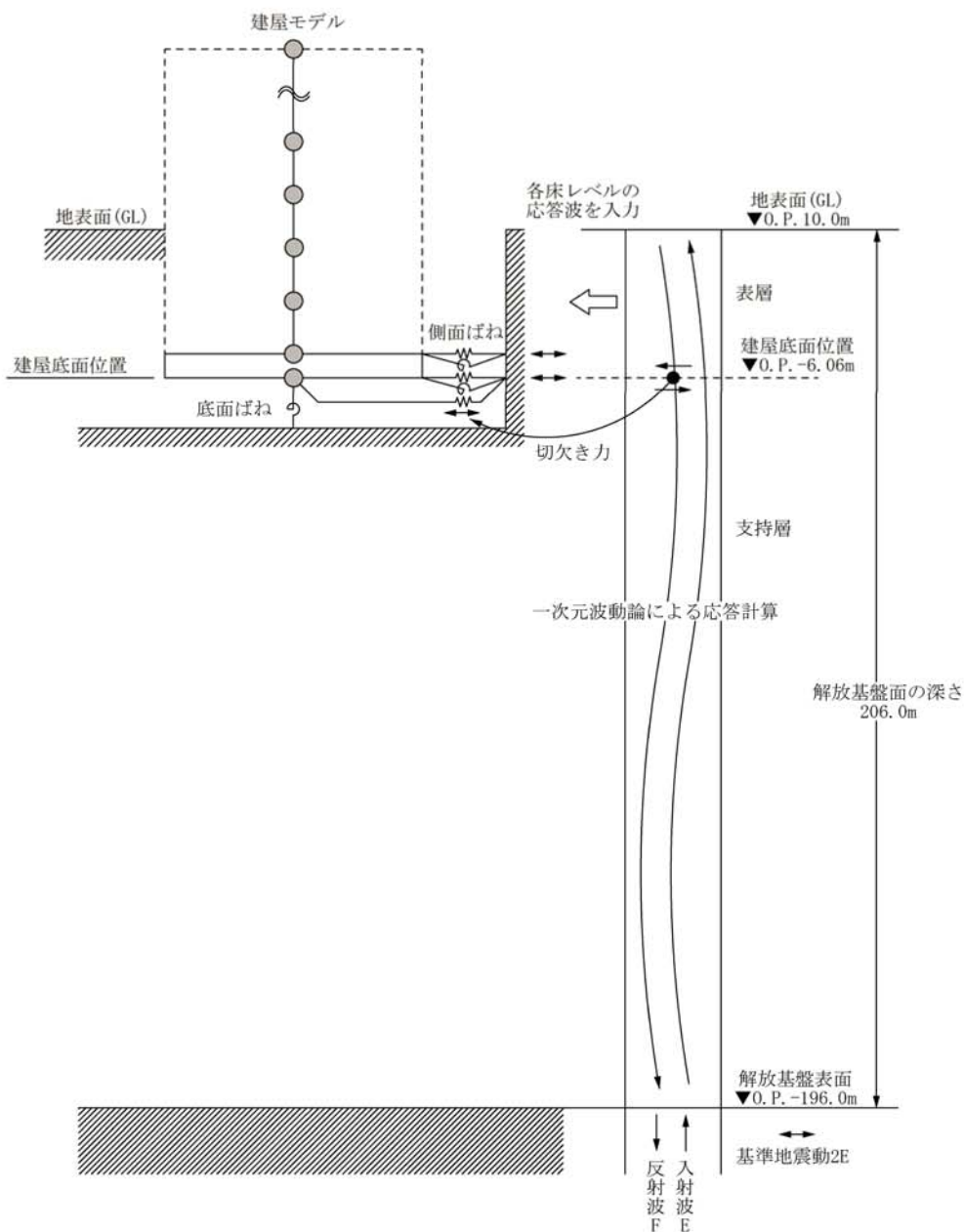


図-3.1 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図

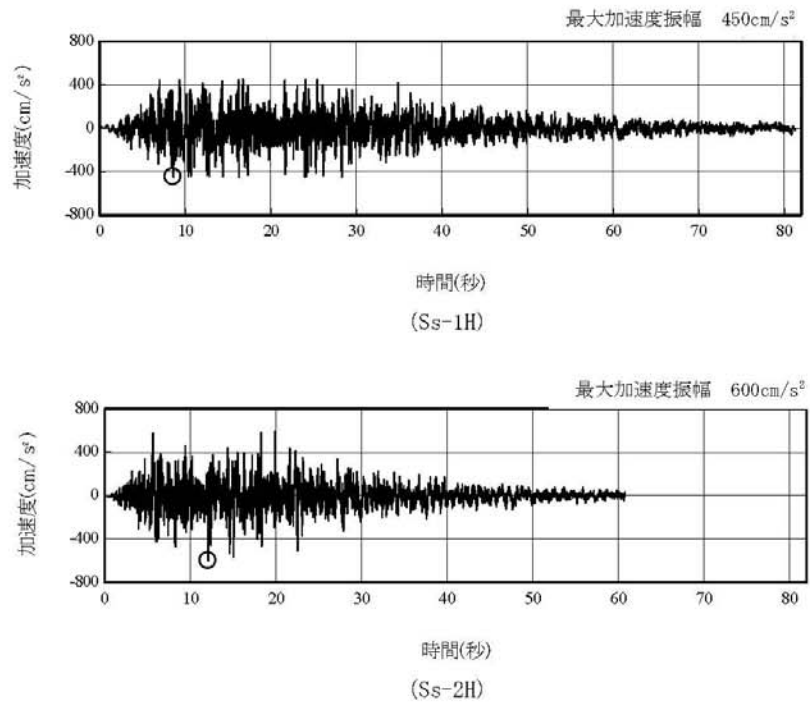


図-3.2 解放基盤表面位置における地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）

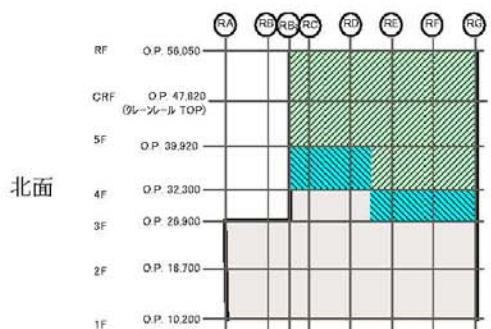
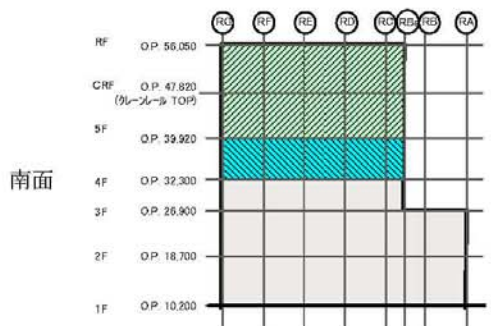
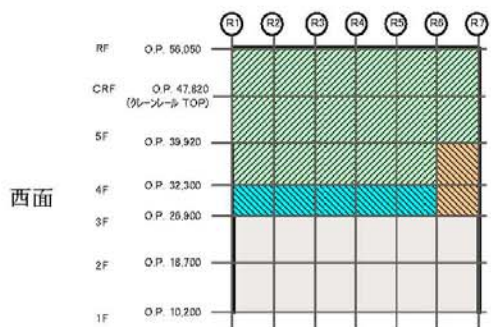
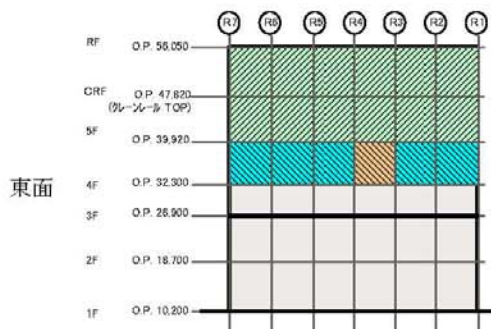
4. 地震応答解析モデル

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、「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(改訂2)」(平成22年4月19日)にて作成した地震応答解析モデルを基に、次の項目について修正を加え、新たな地震応答解析モデルを構築することとする。

3号機原子炉建屋については、水素爆発等により原子炉建屋の一部が損傷していることから、「2. 損傷状況の評価」で評価した損傷状況を基に解析モデルを作成する。なお、5階より上部の崩れた部分の重量は5階床(床スラブが損傷している北西部分については4階床)で支持されていると仮定するなど、崩れた部分の重量は下階の床で支持されていると仮定する。3号機原子炉建屋の損傷状況(立面図)を図-4.1に、損傷状況(平面図)を図-4.2に示す。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$



損傷箇所
 外壁のみ損傷箇所
 解析評価上考慮しない壁

図-4.1 3号機原子炉建屋の損傷状況（立面図）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

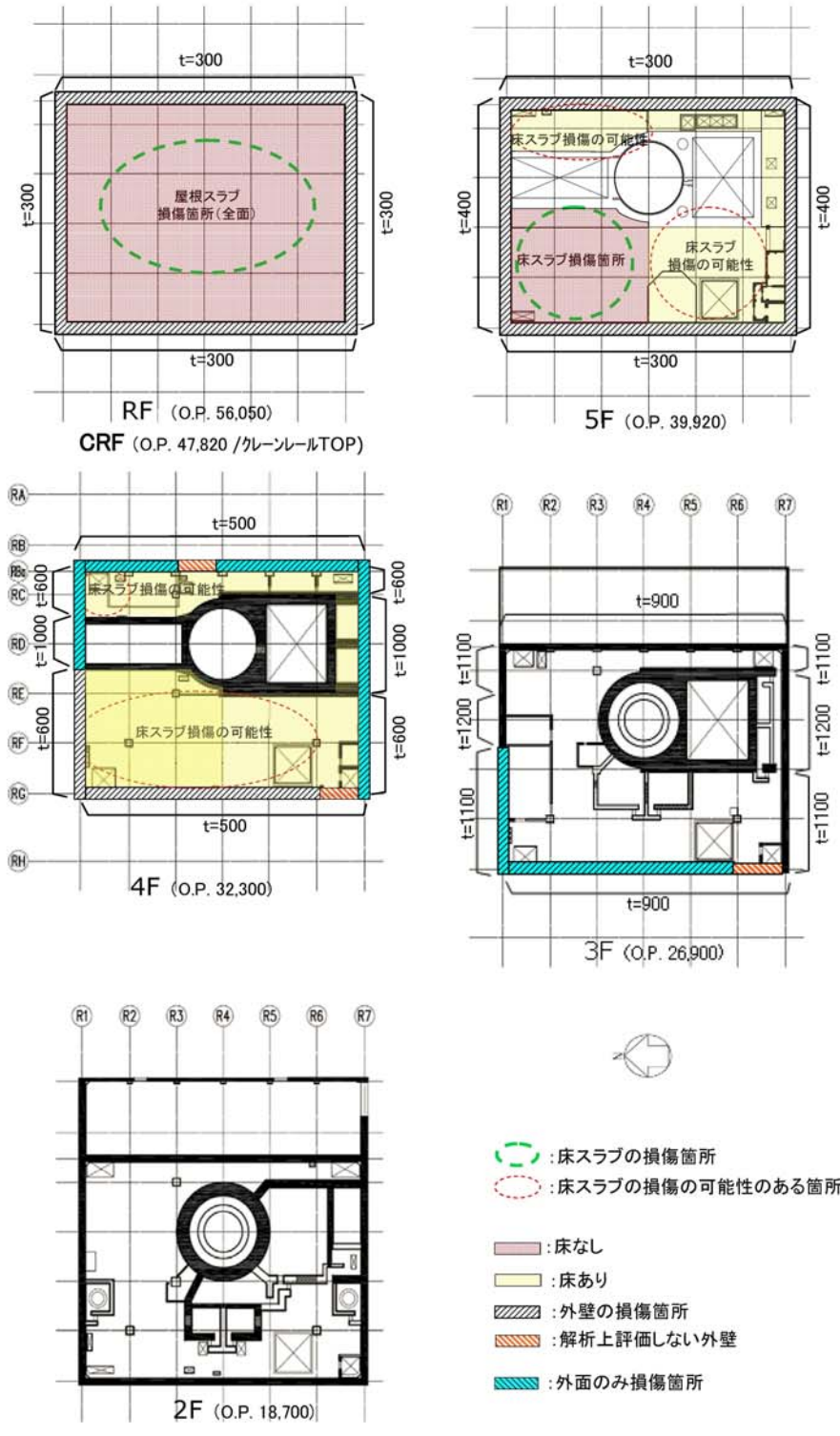


図-4.2 3号機原子炉建屋の損傷状況 (平面図)

(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-4.3 および図-4.4 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-4.5 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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

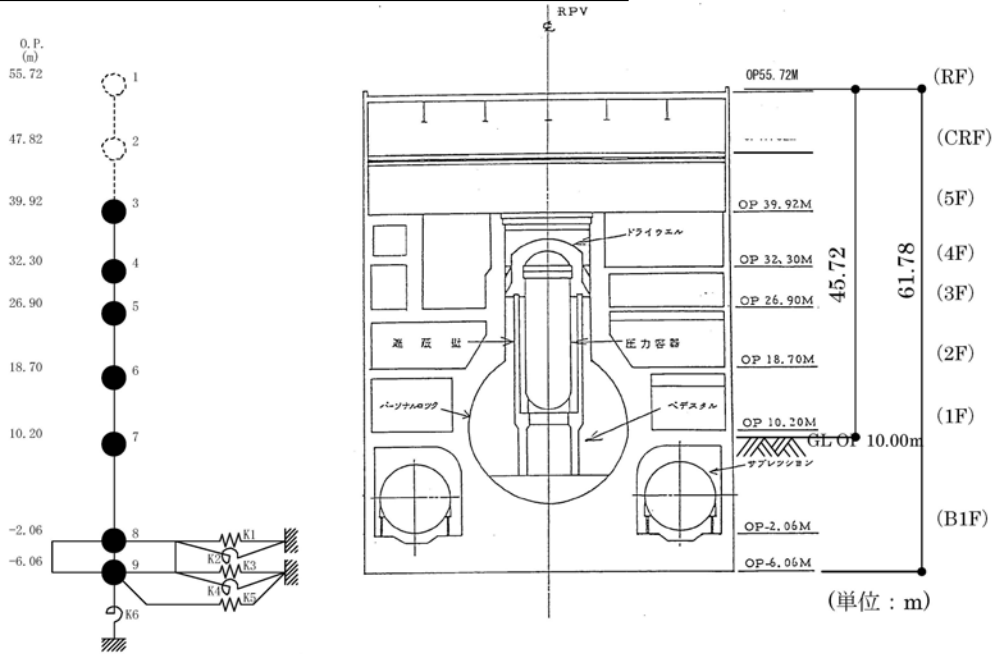


図-4.3 3号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS方向)

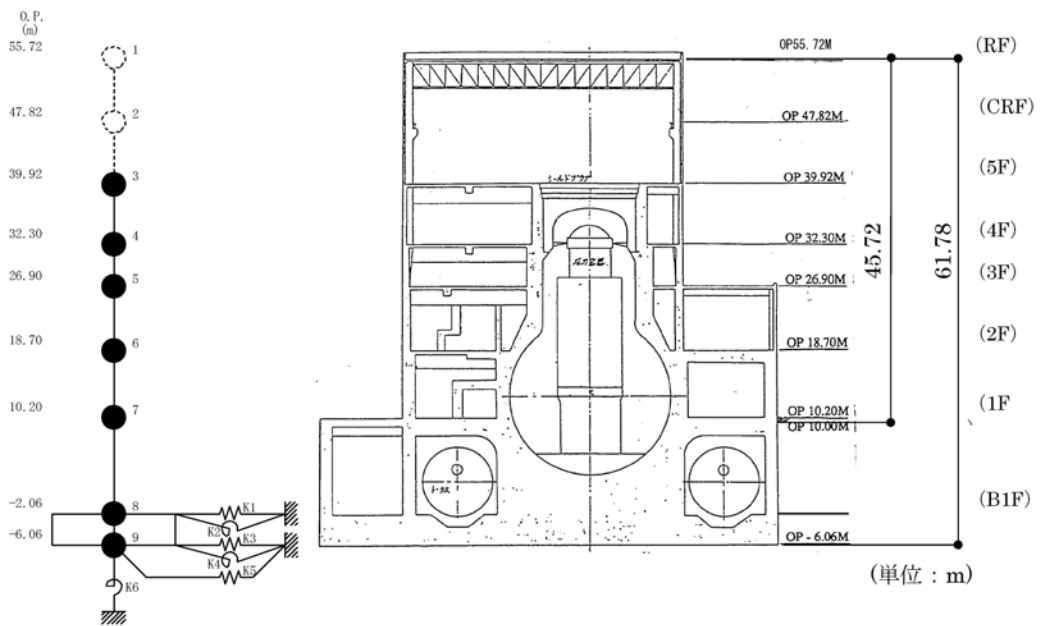


図-4.4 3号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (EW方向)

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 _c (N/mm ²)	ヤング係数*2 E (N/mm ²)	せん断弾性係数*2 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (kN/m ³)
	35.0	2.57×10 ⁴	1.07×10 ⁴	0.2	24
鉄筋	SD345相当 (SD35)				

*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るめた値とした。

*2：実強度に基づく値を示す。

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 $A_g(\text{m}^2)$	断面2次モーメント I(m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	78,130	82.37	145.3	9,598
4	119,490	238.33	146.1	29,271
5	109,640	201.82	237.3	56,230
6	130,160	239.58	208.6	60,144
7	226,760	417.47	458.7	112,978
8	301,020	554.17	2,697.8	496,620
9	127,000	233.79		
合計	1,092,200		ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m ²) ポアソン比 ν 0.20 減衰 β 5% 基礎形状 47.0m(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 $A_g(\text{m}^2)$	断面2次モーメント I(m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	78,130	60.05	61.9	5,665
4	119,490	124.49	123.4	12,460
5	109,640	201.82	204.1	41,352
6	130,160	239.58	226.6	61,084
7	226,760	622.62	431.3	135,128
8	301,020	826.50	2,697.8	740,717
9	127,000	348.72		
合計	1,092,200		ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m ²) せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m ²) ポアソン比 ν 0.20 減衰 β 5% 基礎形状 47.0m(NS方向)×57.4m(EW方向)	

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

表-4.3 地盤定数

(S_S-1)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 V _s (m/s)	単位体積 重量 γ _t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

(S_S-2)

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 V _s (m/s)	単位体積 重量 γ _t (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

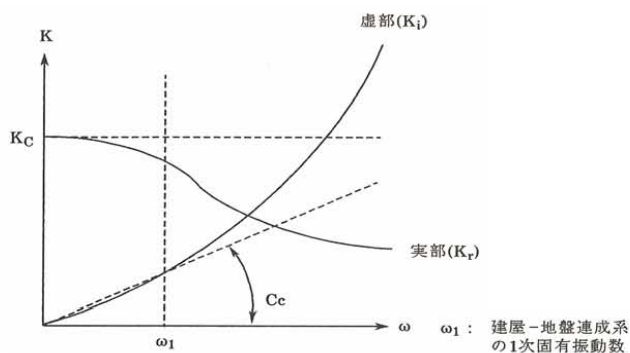


図-4.5 地盤ばねの近似

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

5. 地震応答解析結果

地震応答解析により求められた NS 方向, EW 方向の最大応答加速度を図-5.1 および図-5.2
 に示す。

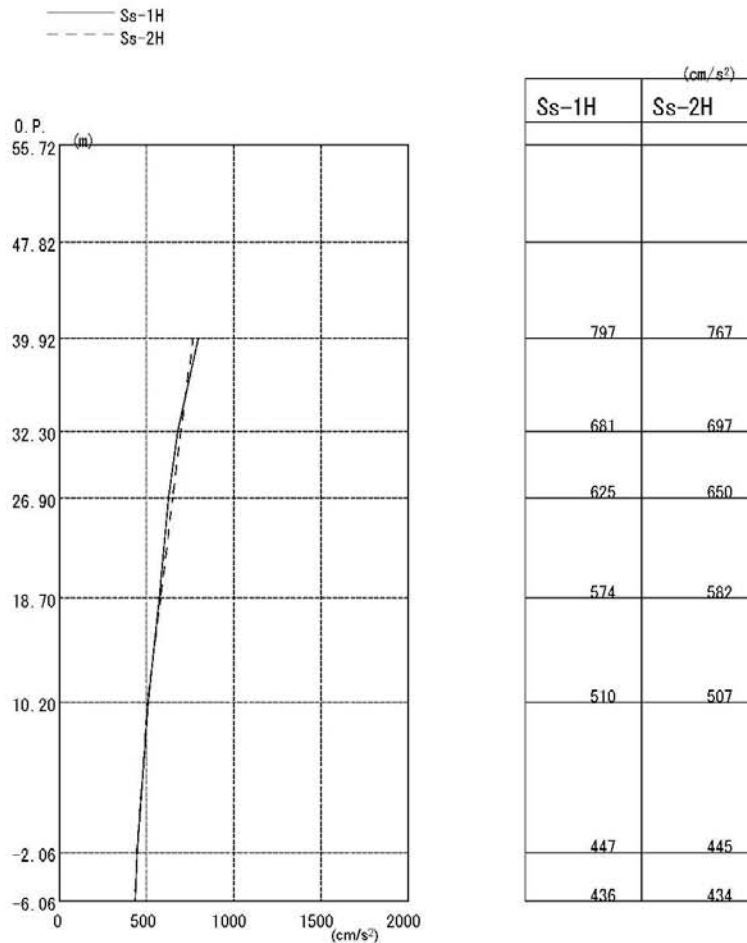


図-5.1 最大応答加速度 (NS 方向)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

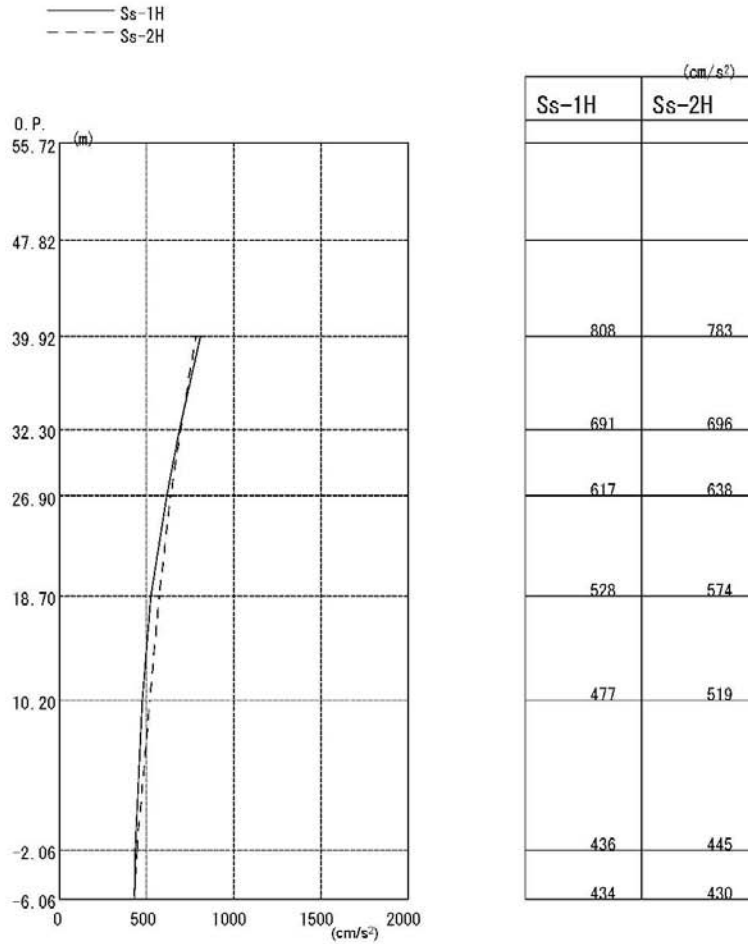


図-5.2 最大応答加速度 (EW 方向)

6. 耐震安全性評価結果

表 6-1 に、耐震壁の最大せん断ひずみを、図-6.1、図-6.2 および図-6.3、図-6.4 に基準地震動 Ss-1 および基準地震動 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に示す。せん断ひずみは、最大で 0.14×10^{-3} (Ss-2H, NS 方向, 1F) であり、評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

以上のことから、原子炉建屋は耐震安全上重要な設備に波及的影響を与えないものと評価した。

表 6-1 耐震壁の最大応答せん断ひずみ一覧

($\times 10^{-3}$)

	NS 方向		EW 方向	
	Ss-1H	Ss-2H	Ss-1H	Ss-2H
4F	0.05	0.04	0.10	0.10
3F	0.10	0.10	0.12	0.12
2F	0.09	0.09	0.10	0.10
1F	0.13	0.14	0.12	0.13
B1F	0.09	0.09	0.09	0.09

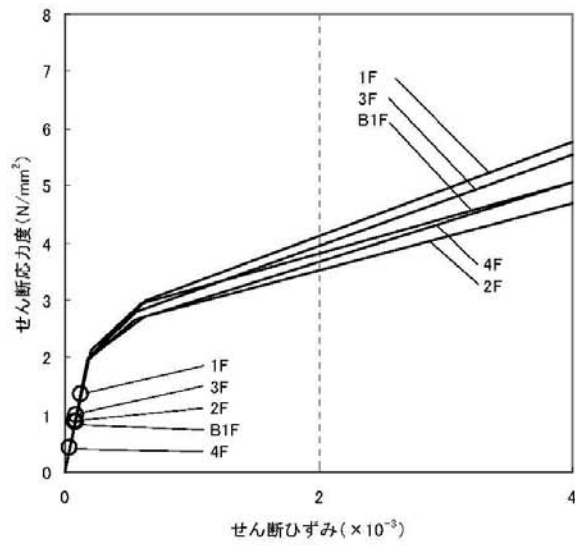


図-6.1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, NS 方向)

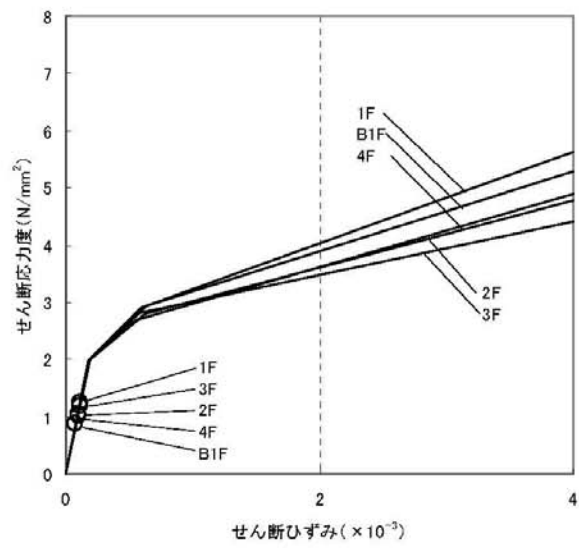


図-6.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, EW 方向)

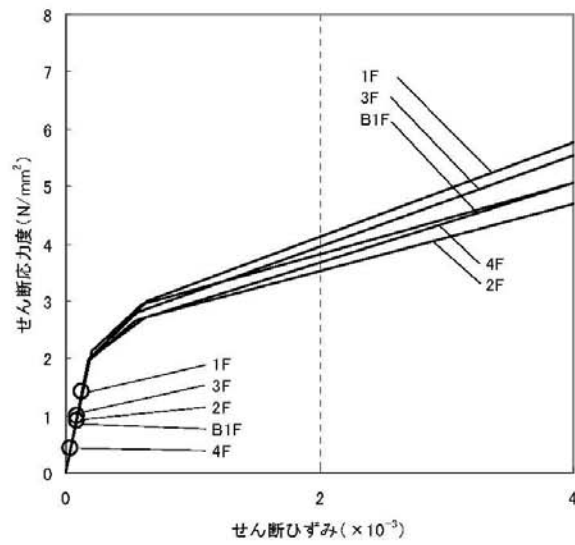


図-6.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, NS 方向)

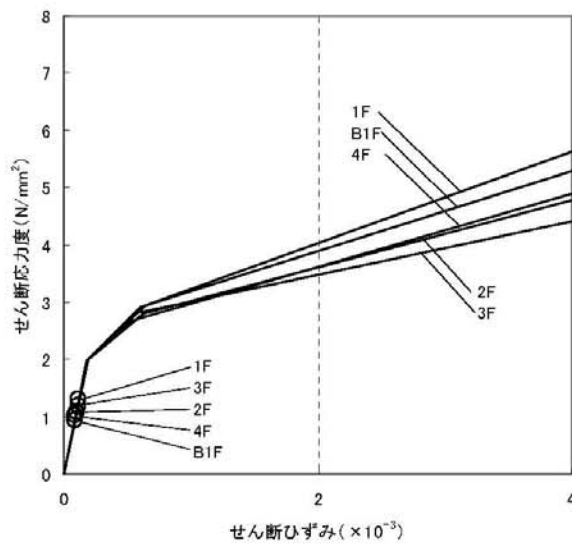


図-6.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, EW 方向)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

付録 1-1

『発電所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

『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(改訂2)』(平成22年4月19日)に記載している3号機原子炉建屋の耐震安全性評価結果を抜粋して以下に示す。

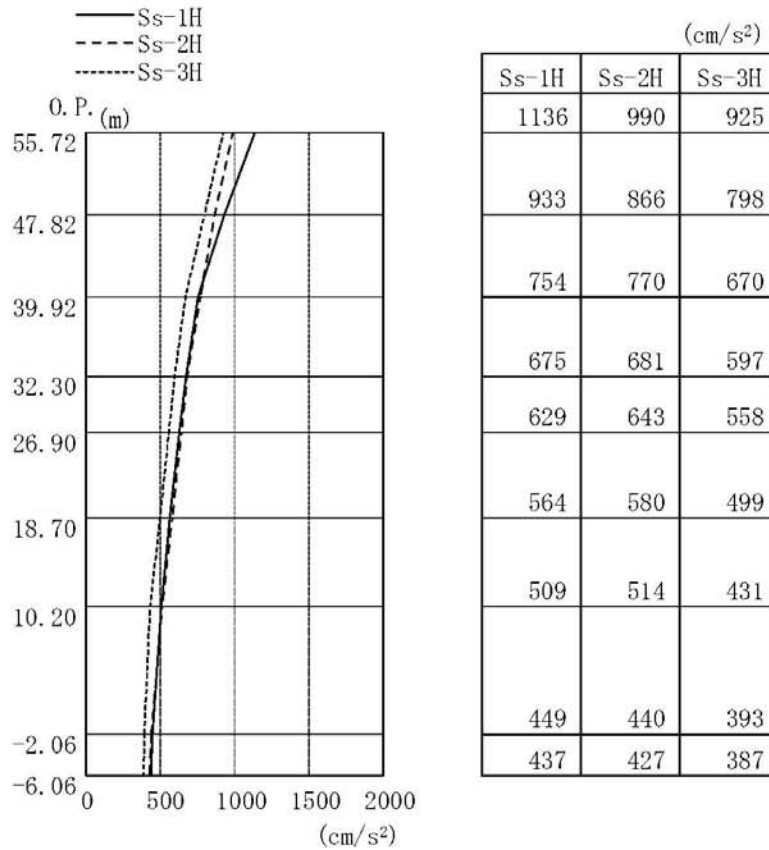


図-1 最大応答加速度 (NS 方向)

付 1-1.1

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

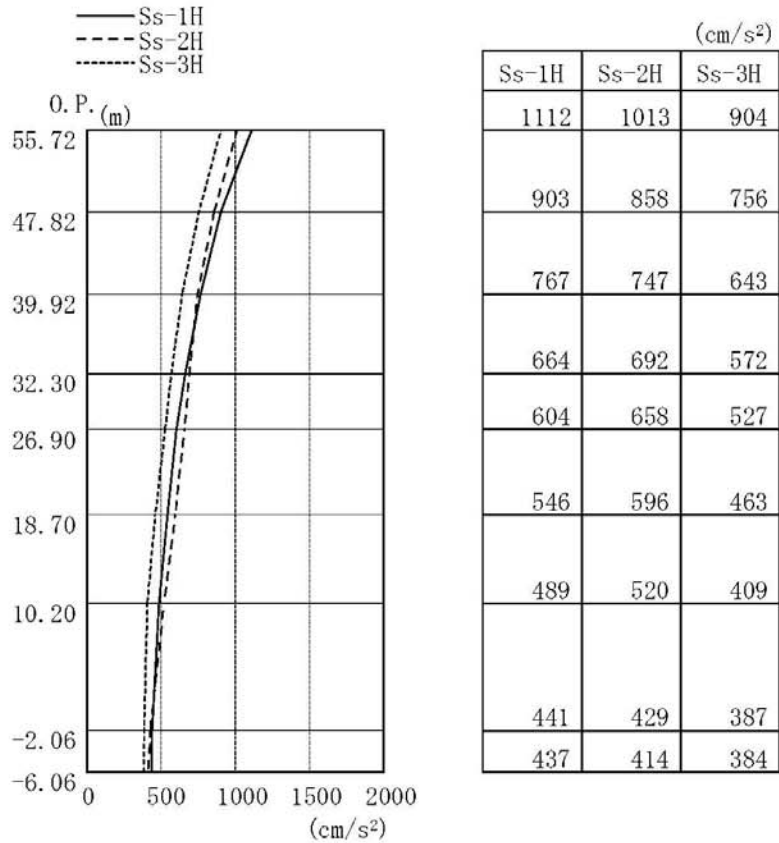


図-2 最大応答加速度 (EW 方向)

付1-1.2

表-1 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS 方向)

($\times 10^{-3}$)

階	Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H	評価基準値
CRF	0.07	0.06	0.06	2.0以下
5F	0.12	0.11	0.10	
4F	0.04	0.04	0.04	
3F	0.06	0.07	0.06	
2F	0.08	0.09	0.08	
1F	0.13	0.13	0.12	
B1F	0.08	0.08	0.07	

表-2 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW 方向)

($\times 10^{-3}$)

階	Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H	評価基準値
CRF	0.09	0.09	0.08	2.0以下
5F	0.12	0.11	0.09	
4F	0.08	0.08	0.07	
3F	0.09	0.09	0.08	
2F	0.10	0.10	0.09	
1F	0.12	0.12	0.10	
B1F	0.08	0.09	0.07	

以上

付1-1.3

添付資料－ 2 : 3号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細
(3次元 FEM 解析による局部評価)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

1. 解析評価方針

3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する。なお、3号機原子炉建屋の外壁の損傷が確認されている4階や3階においては、主要な耐震要素が使用済燃料プールとなることから、ここでは使用済燃料プールを中心とした評価を実施する。

原子炉建屋の5階平面図を図-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。

- ・ 使用済燃料プールを中心とした評価を実施するために2階 (O.P. 18.7m) から5階 (O.P. 39.92m) までの建屋部分を対象に、爆発等による損傷状況を模擬した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、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及びシェル壁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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

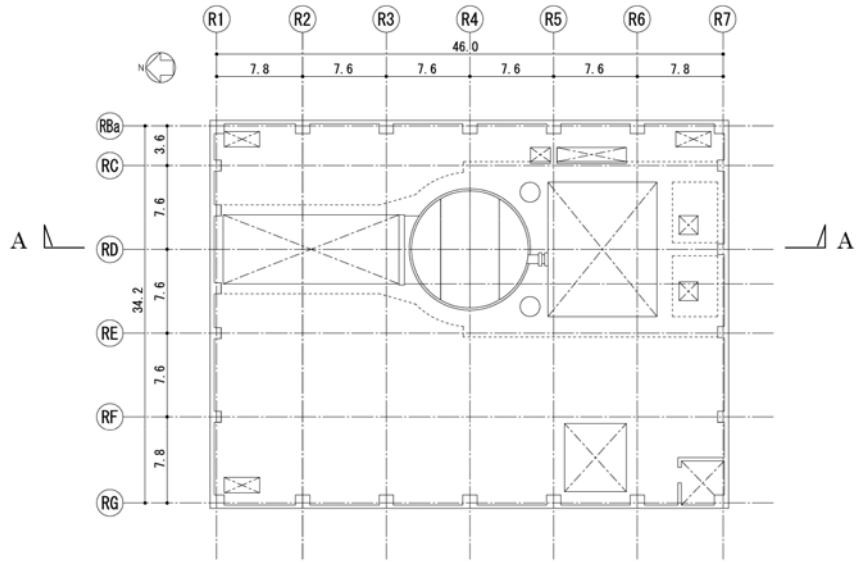


図-1.1 5階 (OP 39.92) 平面図 (単位 : m)

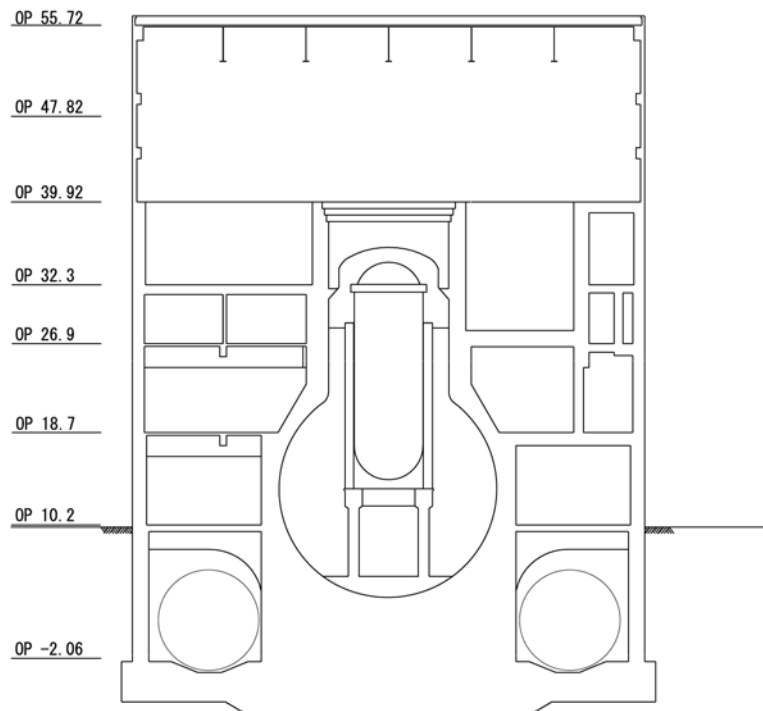


図-1.2 A-A断面図 (単位 : m)

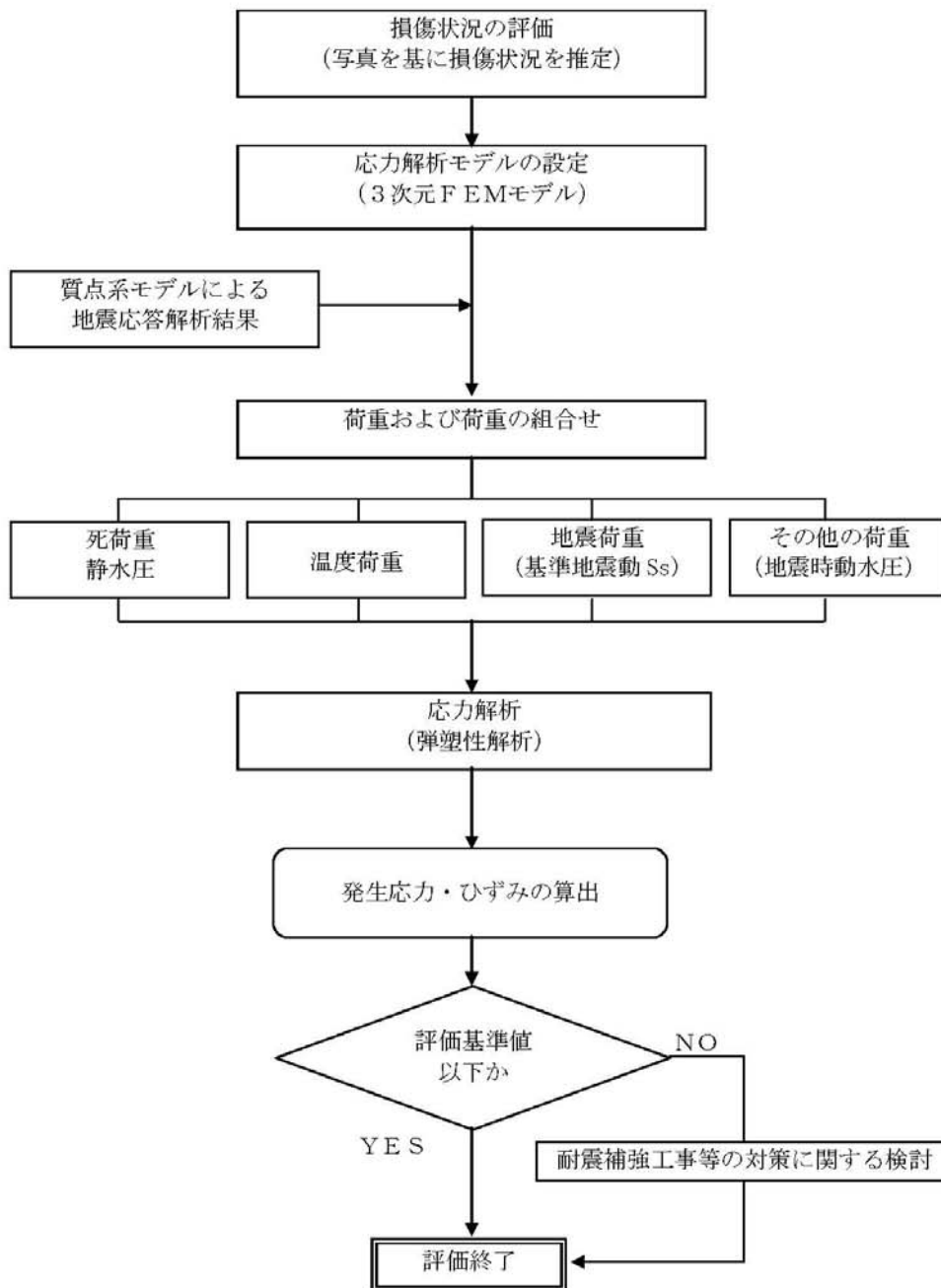


図-1.3 局部評価の耐震安全性評価フロー

2. 損傷状況の評価

損傷状況の評価にあたっては、「添付資料－2 2. 損傷状況の評価」を基本として3次元FEM解析モデルを作成している。

解析モデルで評価した外壁は、添付資料－2において考慮した部分と同一とする。

爆発による影響を考慮し、添付資料－2で損傷部位として考慮した5階及び4階の床の剛性を50%に低減し、使用済燃料プール、機器仮置プール及び原子炉ウエルの剛性を80%に低減する。

なお、シェル壁については、目視による確認は実施できていないものの、シェル壁は、損傷している外壁の厚さ（最大で600mm）と比較して厚いことから損傷は無いものとして評価する。

損傷した部分の重量については、下階の床で支持されていると仮定し、全て一様に積載されているものとして評価する。

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及びシェル壁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。

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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

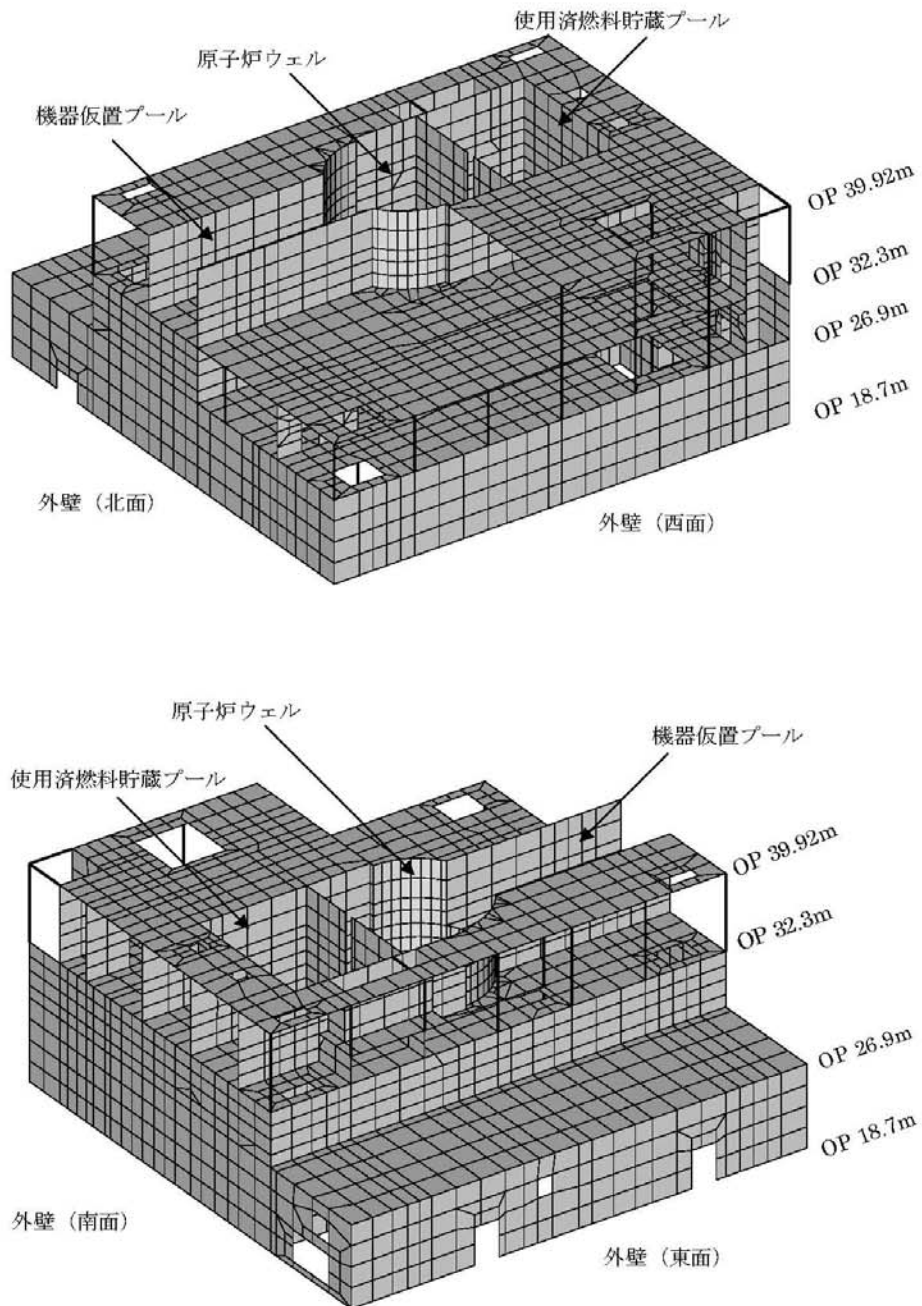
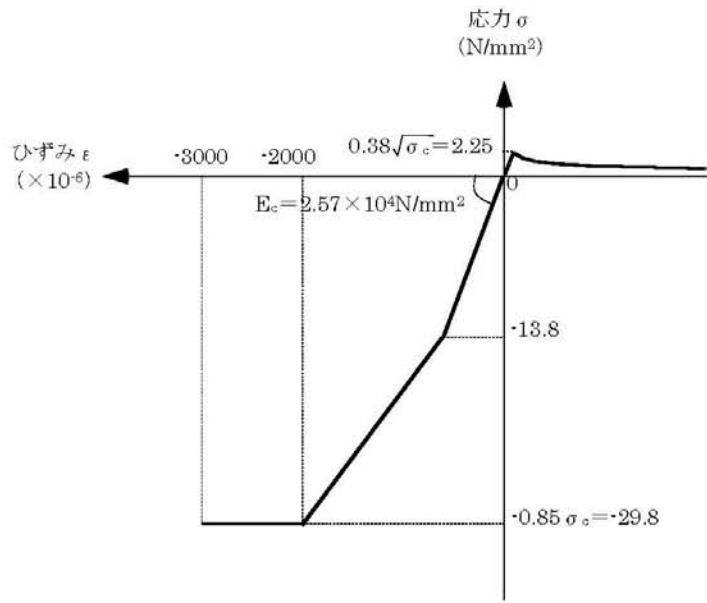
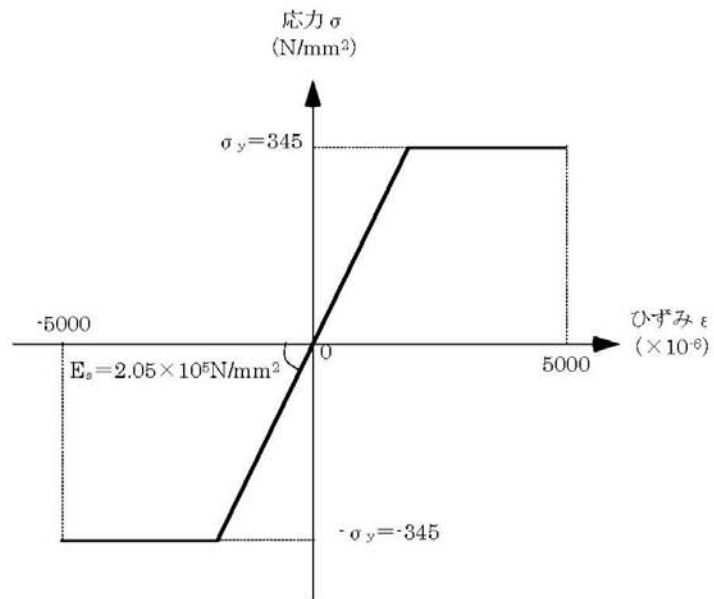


図-3.1 解析モデル概要図



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



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

図-3.2 コンクリートと鉄筋の構成則

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

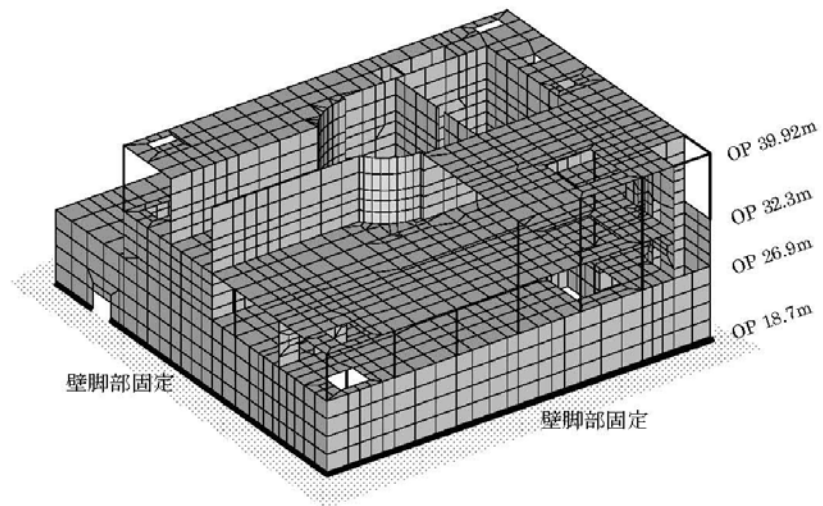


図-3.3 解析モデルの境界条件

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（62℃程度）を参考に、水温 65℃、外気温 10℃の状態を想定する。原子炉格納容器内の雰囲気温度についても、これまでの履歴温度より 110℃の状態を想定する。

(4) 地震荷重

前述の建屋の損傷を考慮した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。（付録 2-1 参照）

(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。

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」等においては、温度荷重と基準地震動 S_s による地震荷重との組合せを行わないこととしている。しかし、現状の使用済燃料プールが比較的長期間高温状態となっていることを踏まえ、温度荷重と基準地震動 S_s による地震荷重とを組み合わせで評価することとした。さらに、温度荷重を考慮しない場合の評価結果については付録 2-2 に示している。

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原子炉建屋の構造検討を行い、耐震安全性を評価する。評価箇所を図-5.1、図-5.2に示す。また評価に用いる配筋諸元を表-5.1に示す。

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」等に基づき設定する。

評価結果を表-5.2、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弾性範囲内であり評価基準値を下回ることで、現状の原子炉建屋は基準地震動 S_s に対する耐震安全性が確保されていると推定される。

表-5.2～表-5.3に用いる記号の説明

${}_c\varepsilon_c$: コンクリートの圧縮ひずみ
${}_s\varepsilon_c, {}_s\varepsilon_t$: 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

なお、損傷状況の評価において、剛性が変動する可能性が考えられることから、炉内が高温になった影響でシェル壁の剛性が低下した可能性や爆発によって使用済燃料プールなどの剛性がより低下している可能性を考慮したパラメータスタディや、不確定要素が大きいので逆に剛性の低下を緩和したパラメータスタディを実施し、多少の数値変動はあるものの解析結果に大きな差異は生じておらず、仮定条件の変動が解析結果に与える影響はそれほど大きくないことを確認している。(付録 2-3 参照)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

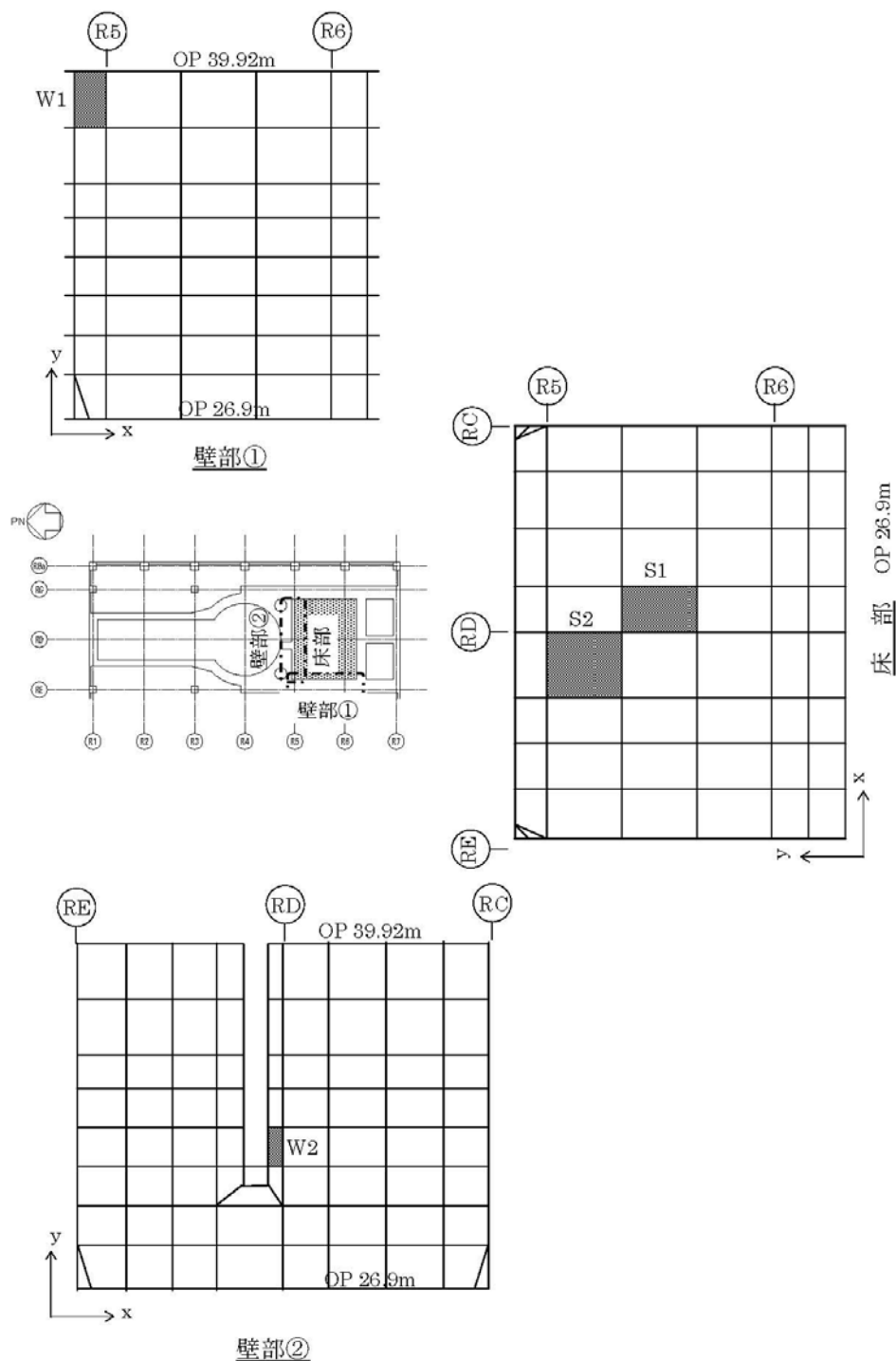


図-5.1 評価箇所(1)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

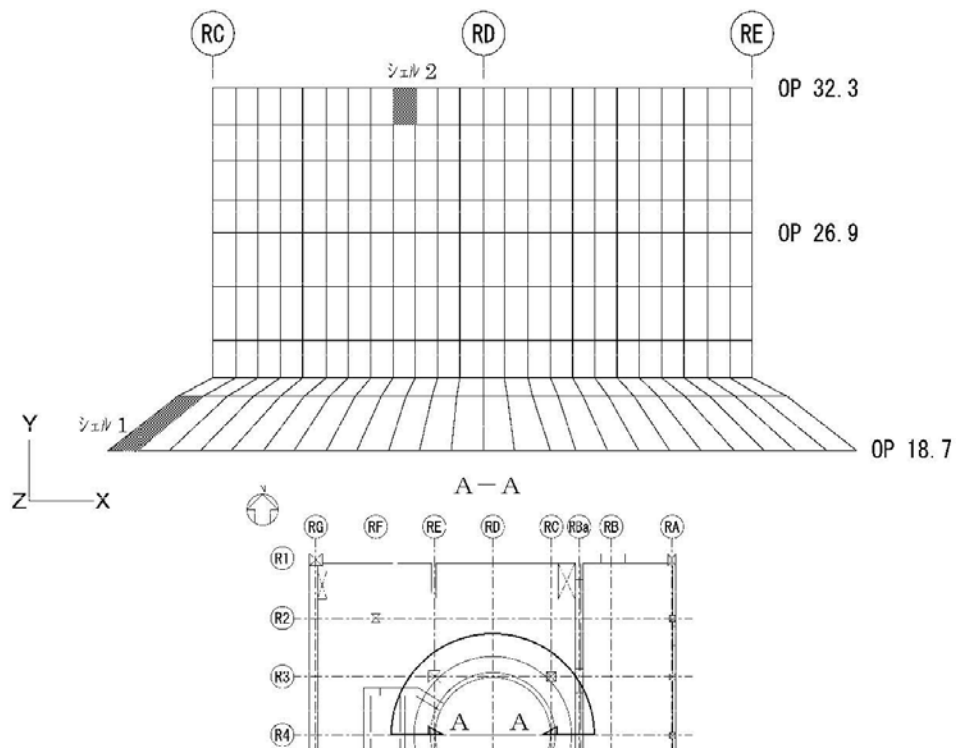


図-5.2 評価箇所(2)

表-5.1 評価箇所配筋諸元

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 +4-D32	D32@120	D32@250 +4-D32	D32@240	—
W2	D38@130	D38@130	D38@160	D38@130	—
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	D32@100 + D32@200		D32@200		
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	
シェル 1	D38@100 + D38@150	D38@100 + D38@200	D38@100 + D38@150	D38@120 + D38@240	—
シェル 2	D38@130	D38@130	D38@150	D38@130	—

表-5.2(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	ϵ_c	Ss 地震時	-667	-3000	可
	ϵ_s		-588	-5000	可
	ϵ_t		1303	5000	可

表-5.2(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	ϵ_c	Ss 地震時	-443	-3000	可
	ϵ_s		-165	-5000	可
	ϵ_t		335	5000	可

表-5.2(3) 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（シェル壁）

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
シェル 1	ϵ_c	Ss 地震時	-567	-3000	可
	ϵ_s		-469	-5000	可
	ϵ_t		408	5000	可

表-5.3(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	1689	3130	可

表-5.3(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	897	1900	可

表-5.3(3) 面外せん断力の検討結果（シェル壁）

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)	評価基準値 (N/mm)	判定
シェル 2	Ss 地震時	2475	3270	可

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

付録 2-1

3号機原子炉建屋の鉛直方向の地震応答解析について

福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の3次元FEM解析による局部評価にあたっては、基準地震動Ssによる鉛直方向の動的解析結果を入力として用いる。ここでは、鉛直方向の地震応答解析結果を示す。

解析モデル作成にあたって、「添付資料-1 3号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細（質点系モデルによる時刻歴応答解析による評価）」において評価した範囲と同様の範囲を損傷範囲として取り扱うこととし、崩れた部分の重量については、下階の床で支持されると仮定する。

鉛直方向の建屋解析モデルを図-1に、諸元を表-1に示す。

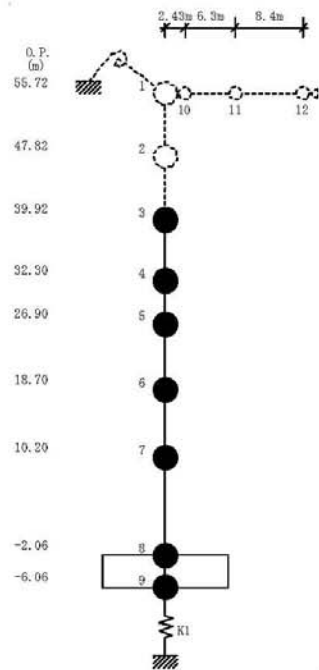


図-1 建屋解析モデル（鉛直方向）

付 2-1. 1

表-1 建屋解析モデルの諸元
(鉛直方向)

建屋				屋根			
質点番号	質点重量 W(kN)	軸断面積 $A_H(m^2)$	軸ばね剛性 $K_A(\times 10^8 kN/m)$	質点番号	質点重量 W(kN)	せん断断面積 $A_S(\times 10^{-2} m^2)$	断面2次モーメント I(m ⁴)
1	-	-	-	1	-	-	-
2	-	-	-	10	-	-	-
3	78,130	-	-	11	-	-	-
4	119,490	192.0	6.48	12	-	-	-
5	109,640	266.3	12.67				
6	130,160	431.7	13.53				
7	226,760	423.0	12.79				
8	301,020	691.2	14.49				
9	127,000	2,697.8	173.33				
合計	1,092,200						

①コンクリート部
ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
ポアソン比 ν 0.20
減衰 h 5%

②鉄骨部
ヤング係数 E_s 2.05×10^8 (kN/m²)
せん断弾性係数 G 7.90×10^7 (kN/m²)
ポアソン比 ν 0.30
減衰 h 2%

基礎形状

47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)

付 2-1.2

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

地震応答解析により求められた鉛直方向の最大応答加速度および最大応答軸力を図-2 およ
 び図-3 に示す。

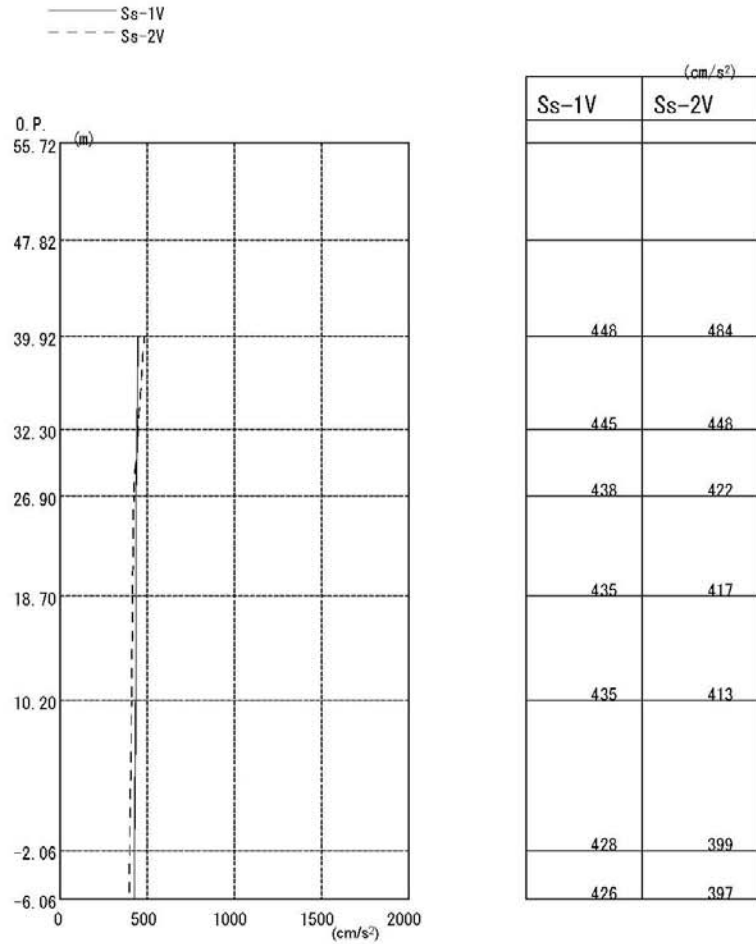


図-2 最大応答加速度 (鉛直方向)

付 2-1. 3

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

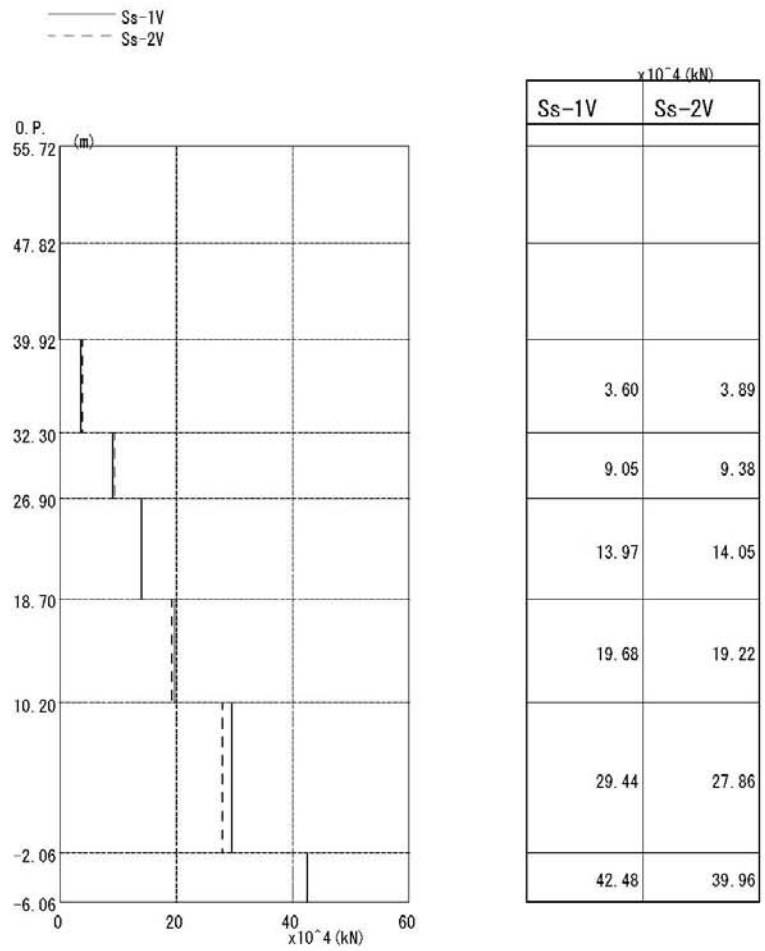


図-3 最大応答軸力（鉛直方向）

付 2-1.4

温度荷重に関するパラメトリックスタディについて

1. 解析概要

添付資料-2では、荷重組合せとして基準地震動 S_s と温度荷重（プール水の温度条件（65℃））を組み合わせ耐震安全性の評価を実施した。本検討では、温度荷重を考慮しない場合の基準地震動 S_s に対する検討を行い、温度荷重を考慮しない場合における耐震安全性の評価への影響を検討する。

2. 解析方法

添付資料-2の荷重の組合せ（以下、基本ケースとする）をもとに、温度荷重を除外した表-1の荷重の組合せを対象とする。なお、荷重の組合せ以外の条件は、解析モデルを含め基本ケースと同一である。

表-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+K+KH

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

3. 評価結果

使用済燃料プール等のコンクリートおよび鉄筋のひずみについて、基本ケースにて評価した同一箇所（要素）の結果を表-2に、面外せん断力の結果を表-3に示す。なお、参考として、表-2及び表-3には、比較のため温度条件を考慮した基本ケースの検討結果を併記する。

評価結果より、温度荷重を考慮しない場合においても、原子炉建屋の発生応力およびひずみは評価基準値以内であり、耐震安全性は確保されていると推定される。

表-2(1) 軸力と曲げ応力による
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(×10 ⁻⁶)		評価基準値(×10 ⁻⁶)	判定
			本検討(温度なし)	参考基本ケース		
W1	cε _c	Ss 地震時	-435	-667	-3000	可
	sε _c		-365	-588	-5000	可
	sε _t		444	1303	5000	可

表-2(2) 軸力と曲げ応力による
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(×10 ⁻⁶)		評価基準値(×10 ⁻⁶)	判定
			本検討(温度なし)	参考基本ケース		
S1	cε _c	Ss 地震時	-149	-443	-3000	可
	sε _c		-42	-165	-5000	可
	sε _t		160	335	5000	可

表-2(3) 軸力と曲げ応力による
コンクリートおよび鉄筋のひずみの検討結果（シェル壁）

箇所名	検討ひずみ	荷重時名称	発生ひずみ(×10 ⁻⁶)		評価基準値(×10 ⁻⁶)	判定
			本検討(温度なし)	参考基本ケース		
シェル 1	cε _c	Ss 地震時	-110	-567	-3000	可
	sε _c		-107	-469	-5000	可
	sε _t		53	408	5000	可

付 2-2. 2

表-3(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)		判定
		本検討 (温度なし)	参考 基本ケース	
W2	Ss 地震時	530 (3130)	1689 (3130)	可

() 数値は評価基準値

表-3(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)		判定
		本検討 (温度なし)	参考 基本ケース	
S2	Ss 地震時	841 (2200)	897 (1900)	可

() 数値は評価基準値

表-3(3) 面外せん断力の検討結果 (シェル壁)

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)		判定
		本検討 (温度なし)	参考 基本ケース	
シェル 2	Ss 地震時	842 (3400)	2475 (3270)	可

() 数値は評価基準値

付 2-2.3

原子炉建屋の耐震安全性評価に係るパラメトリックスタディ

1. 検討方針

基本ケースでは想定していない以下に示す変動要因を考慮したパラメータ解析を実施し、原子炉建屋の耐震安全性評価に与える影響程度を把握する。

【基本ケースで想定していない損傷シナリオ】

爆発により屋根及び3階以上の外壁の大半が崩壊し、3階～5階におけるプール、壁床、その他の部材の剛性への影響が考えられるが、その影響程度は遠方からの写真による確認に拠るところが多く剛性の設定にばらつきの大きい可能性がある。

また、地震後に原子炉格納容器内部の温度が一時的に上昇し、剛性が低下する可能性がある。

2. 検討条件

2. 1 爆発による影響検討のための検討条件

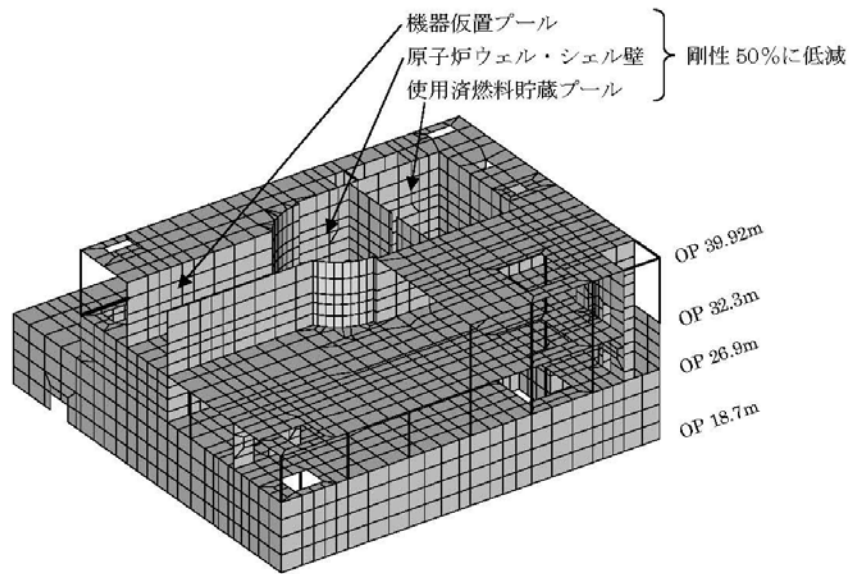
爆発によって、残存する床や壁にひび割れが生じ、剛性が低下している可能性も考えられるが、遠方からの写真で確認できない箇所もあり、剛性の設定はばらつきの大きい可能性がある。また、地震後に原子炉格納容器内の温度が一時的に上昇したことにより、その剛性へ影響を与える可能性がある。図-1 に示すように、半壊程度の外壁及びプール壁床などの損傷程度及び原子炉格納容器内の一時的な温度上昇が原子炉建屋の耐震安全性評価に及ぼす影響について2ケース（以下、ケース1・ケース2とする）検討する。

ケース1は、使用済燃料プール、機器仮置プール、原子炉ウェル、シェル壁の剛性を50%低下させることとする。

ケース2は、基本ケースでモデル化上無視した外面のみ損傷した半壊程度の外壁を50%の剛性低下した状態としてモデル化するとともに、使用済燃料プール及び原子炉ウェル、機器仮置プールは健全と想定し剛性を低下させないこととする。

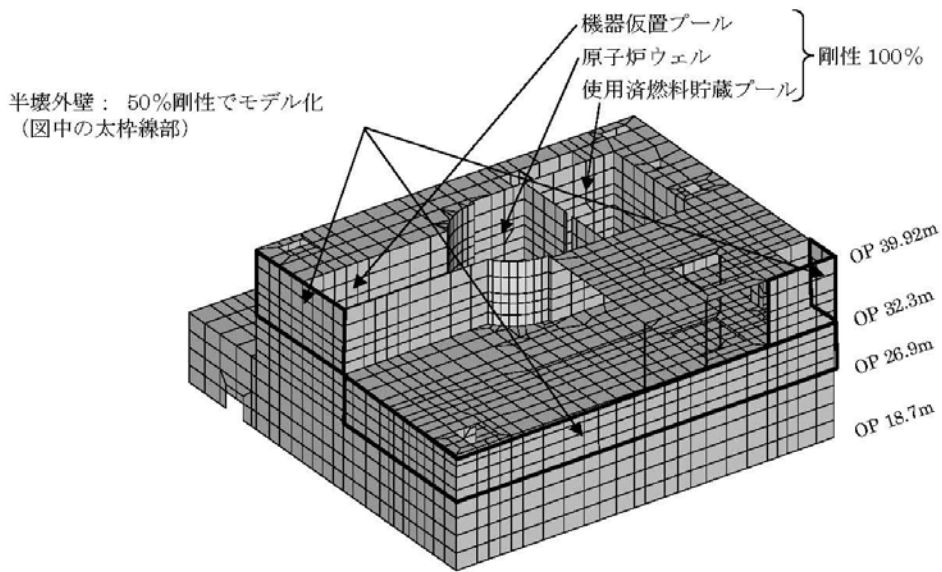
付 2-3.2

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$



*基本ケースと異なる設定箇所のみ記す。

図-1(1) 爆発による影響検討条件 (ケース1)



*基本ケースと異なる設定箇所のみ記す。

図-1(2) 爆発による影響検討条件 (ケース2)

付 2-3.3

2. 2 検討ケース

検討条件をまとめた検討ケースの一覧を、基本ケースも併せて、表-1 に示す。検討ケースは、基本ケースと同じ荷重組み合わせを考慮し、原子炉建屋の耐震安全性評価に与える影響を検討する。

表-1 検討ケース一覧

ケース		影響検討のための項目			
		外壁 (3～4階)	床 (4～5階)	使用済燃料 プール等	プール水温
-	基本	半壊程度の壁も 全壊扱い	5階北西床を全壊 扱いとし、他の床 は50%に剛性低下	80%に剛性低下	65℃ (外気温 10℃)
1	爆発による 影響 (1)	*	*	50%に剛性低下	*
2	爆発による 影響 (2)	半壊程度の壁を 50%の剛性で モデル化	*	剛性低下させず	*

注) *: 基本ケースと同じ条件とする。

3. 検討結果

基本ケース及び検討ケースに対して、評価基準値に対する発生ひずみもしくは発生応力の比率を比較した結果を表-2 に示す。基本ケースでは想定していない原子炉格納容器内の温度が一時的に上昇したことの影響や爆発による剛性低下の不確定性を考慮しても、原子炉建屋の耐震安全性評価には影響を与えないことが確認された。

なお、参考までに、検討ケース1～2に対する耐震安全性評価結果の詳細を表-3～表-6 に示す。

表-2 評価基準値に対する発生ひずみもしくは発生応力の比率の比較

	評価項目	基本ケース	【ケース1】 爆発影響(1)	【ケース2】 爆発影響(2)
プール床	鉄筋 ひずみ	0.07	0.07	0.07
	コンクリート ひずみ	0.15	0.18	0.14
	面外 せん断力	0.48	0.42	0.52
プール壁	鉄筋 ひずみ	0.27	0.19	0.25
	コンクリート ひずみ	0.23	0.21	0.23
	面外 せん断力	0.54	0.47	0.58
シェル壁	鉄筋 ひずみ	0.10	0.10	0.10
	コンクリート ひずみ	0.19	0.19	0.20
	面外 せん断力	0.76	0.53	0.78

注) 表中の値は、1未満であれば評価基準値を下回ることを示している。

【ケース1】

表-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	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-626	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-547	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		914	5000	可

表-3(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	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-518	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-198	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		338	5000	可

表-3(3) 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（シェル壁）

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
シェル 1	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-568	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-482	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		405	5000	可

注) 検討対象箇所は、基本ケースを参照のこと。

【ケース1】

表-4(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	1462	3130	可

表-4(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	915	2200	可

表-4(3) 面外せん断力の検討結果（シェル壁）

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)	評価基準値 (N/mm)	判定
シェル 2	Ss 地震時	1759	3330	可

注) 検討対象箇所は、基本ケースを参照のこと。

付 2-3.7

【ケース2】

表-5(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	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-673	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-595	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		1234	5000	可

表-5(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	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-413	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-141	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		350	5000	可

表-5(3) 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（シェル壁）

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
シェル 1	$c \varepsilon_c$	Ss 地震時	-576	-3000	可
	$s \varepsilon_c$		-477	-5000	可
	$s \varepsilon_t$		410	5000	可

注) 検討対象箇所は、基本ケースを参照のこと。

【ケース2】

表-6(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	1804	3130	可

表-6(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	913	1790	可

表-6(3) 面外せん断力の検討結果（シェル壁）

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)	評価基準値 (N/mm)	判定
シェル 2	Ss 地震時	2611	3360	可

注) 検討対象箇所は、基本ケースを参照のこと。

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3)

平成23年8月

東京電力株式会社

目次

1. はじめに
2. 耐震安全性評価に関する検討方針
3. 耐震安全性評価に関する検討結果
4. 耐震補強工事等の対策に関する検討結果
5. まとめ

添付資料－1：2号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細

添付資料－2：5号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細

添付資料－3：6号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細

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3）

1. はじめに

本報告書は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第67条第1項の規定に基づく報告の徴収について」（平成23年4月13日）に基づき、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に関する検討を実施した結果を報告するものである。

5月28日に提出した（その1）の報告書では、1号機及び4号機を対象としたものであり、7月13日に提出した（その2）の報告書では、3号機を対象としたものであったが、今回の（その3）は、2号機、5号機及び6号機を対象としたものである。

2. 耐震安全性評価に関する検討方針

（1）2号機の原子炉建屋

2号機の原子炉建屋は、東側外壁のブローアウトパネルが開放しているものの、外見上損傷は見られない。建屋内部については線量が高く立ち入りが制限されているため、確認は出来ていないものの、現時点では損傷が無いものと考えられる。このような状況を踏まえると、建屋の耐震性という観点からは、耐震バックチェックの解析結果（『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（改訂2）』平成22年4月19日）をそのまま適用できるものと考えられる。

（2）5号機及び6号機の原子炉建屋

5号機と6号機は、既に冷温停止状態を維持しており、外見上の損傷は見られず、内部についても詳細な点検は行っていないが、構造的な損傷があったとの情報は得られていない。したがって、このような状況を踏まえると、建屋の耐震性という観点からは、耐震バックチェックの解析結果をそのまま適用できるものと考えられる。

3. 耐震安全性評価に関する検討結果

（1）2号機の原子炉建屋

耐震バックチェックにおいて、基準地震動 S_s を用いた時刻歴応答解析を実施した結果、耐震壁に発生するせん断ひずみは最大でも 0.17×10^{-3} であり、評価基準値で

ある 4×10^{-3} を大きく下回っており、十分な安全性を有しているものと評価している（結果的にはおおむね弾性範囲と言える状態であった。）。

また、格納容器内が一時的に高温化した影響でシェル壁の剛性が低下した可能性や3月15日に地下階の圧力抑制室付近で異音が発生したことを踏まえたパラメータスタディを実施し、多少の数値変動はあるものの解析結果に大きな差異は生じないことを確認した。

したがって、耐震安全上重要な設備である「原子炉圧力容器」、「原子炉格納容器」、「使用済燃料プール」などに影響を及ぼすおそれはないものと評価している。

（添付資料－1）

（2）5号機及び6号機の原子炉建屋

耐震バックチェックにおいて、基準地震動 S_s を用いた時刻歴応答解析を実施した結果、5号機の耐震壁に発生するせん断ひずみは最大でも 0.19×10^{-3} であり、6号機の耐震壁に発生するせん断ひずみは最大でも 0.33×10^{-3} であり、評価基準値である 4×10^{-3} を大きく下回っており、十分な安全性を有しているものと評価している。したがって、耐震安全上重要な設備である「原子炉圧力容器」、「原子炉格納容器」、「使用済燃料プール」などに影響を及ぼすおそれはないものと評価している。

（添付資料－2，3）

4. 耐震補強工事等の対策に関する検討結果

（1）2号機の原子炉建屋

耐震安全性評価の結果として、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所は無かったことから、現段階では緊急的な耐震補強工事等の対策は考えていない。また、現段階では建物内部の線量レベルが高いことから立入が難しいという面もある。今後、環境改善が進み建物内部の線量レベルが作業を行うのに十分な程度に低減された場合には、建屋内部の状況を確認するとともに、損傷が確認された場合には耐震性を維持するための補修を行うこととする。

（2）5号機及び6号機の原子炉建屋

耐震安全性評価の結果として、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所は無かったことから、現段階では緊急的な耐震補強工事等の対策は考えていない。また、今後、建屋内部の状況を確認するとともに、建屋の損傷が確認された場合には耐震性を維持するための補修を行うこととする。

5. まとめ

本報告書においては、2号機、5号機及び6号機の原子炉建屋について、耐震安全性評価を実施し、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所はないことを確認した。既に報告済みの1号機、3号機及び4号機の原子炉建屋についても、耐震安全性評価を実施し、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所はないことを確認しているため、福島第一原子力発電所の全ての原子炉建屋の現状において、耐震安全性の確保ができないおそれがある箇所はないものと考えられる。

添付資料－1：2号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細

1. 評価方針

2号機の原子炉建屋については、図-1.1に示す外観写真（平成23年3月24日撮影）の通り、外観写真からは外見上の損傷は確認できない。東面の外観写真よりブローアウトパネルが開放していることが確認できるが、非構造部材であり、建屋の構造上は問題ないものと考えられる。建屋内部については線量が高く立入が制限されているため、確認は出来ていないものの、現時点で原子炉建屋には構造的な損傷は無いものと評価した。

以上のような状況を踏まえると、建屋の耐震性という観点からは、耐震バックチェックの解析結果（『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（改訂2）』平成22年4月19日）をそのまま適用できるものと考えられ、本評価では、耐震バックチェックで実施した地震応答解析結果を用いて耐震安全性評価を実施することとした。

なお、原子炉建屋の構造への影響および耐震性の評価は、耐震安全上重要な設備への波及的影響防止の観点から、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（ 4.0×10^{-3} ）との比較により行うこととする。



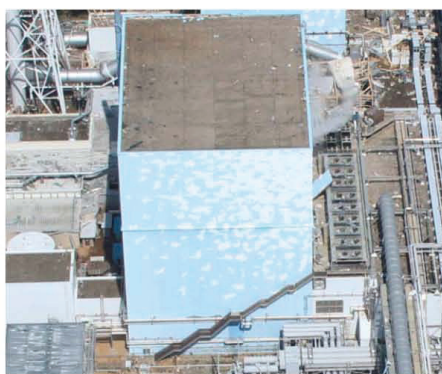
北面



西面



東面



南面

図-1.1 2号機原子炉建屋の外観写真

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

2. 耐震安全性評価

(1) 地震応答解析モデルの概要

耐震バックチェックにおける地震応答解析は、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析（時刻歴応答解析法）によることとし、建物・構築物や地盤の特性を適切に表現できるモデル（図-2.1）を設定した上で実施した。

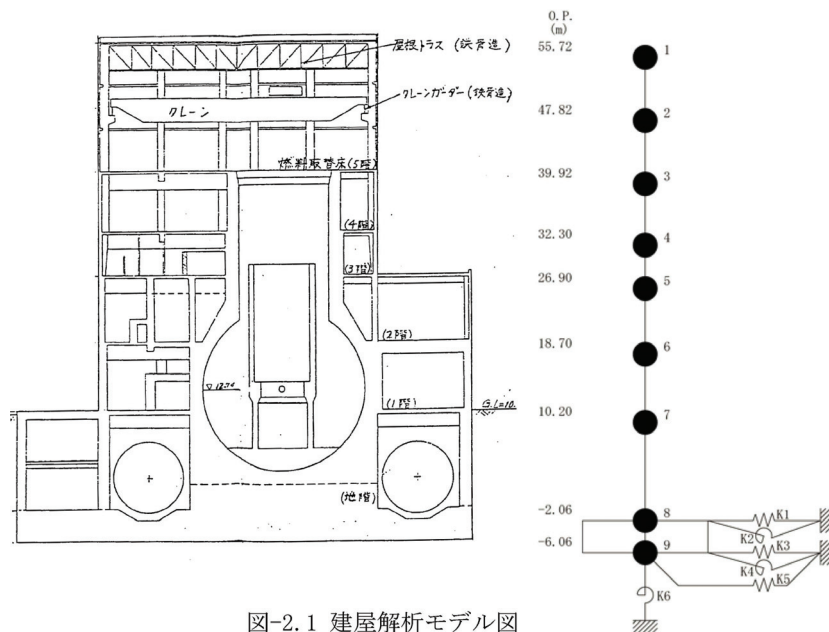


図-2.1 建屋解析モデル図

(2) 耐震安全性評価結果

表-2.1 および表-2.2 に耐震壁のせん断ひずみ一覧を示す。また図-2.2～図-2.15 に基準地震動 S_s 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 0.17×10^{-3} (S_s -1H, EW 方向, 5F) であり、評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

なお、地震後に原子炉格納容器内の温度が一時的に上昇したことの影響や3月15日に地下階の圧力抑制室付近で異音が発生したことの影響を考慮したパラメータスタディを実施し、多少の数値変動はあるものの解析結果に大きな差異は生じないことを確認した(付録1-1)。

以上のことから、原子炉建屋は耐震安全上重要な設備に波及的影響を与えないものと評価した。

表-2.1 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS方向)

階	$(\times 10^{-3})$			評価基準値
	S_s -1H	S_s -2H	S_s -3H	
CRF	0.09	0.08	0.06	4.0 以下
5F	0.14	0.12	0.11	
4F	0.04	0.03	0.03	
3F	0.06	0.06	0.06	
2F	0.07	0.07	0.06	
1F	0.14	0.15	0.13	
B1F	0.07	0.07	0.06	

表-2.2 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW方向)

階	$(\times 10^{-3})$			評価基準値
	S_s -1H	S_s -2H	S_s -3H	
CRF	0.10	0.10	0.09	4.0 以下
5F	0.17	0.16	0.15	
4F	0.06	0.05	0.05	
3F	0.09	0.09	0.08	
2F	0.09	0.09	0.08	
1F	0.13	0.13	0.11	
B1F	0.07	0.08	0.06	

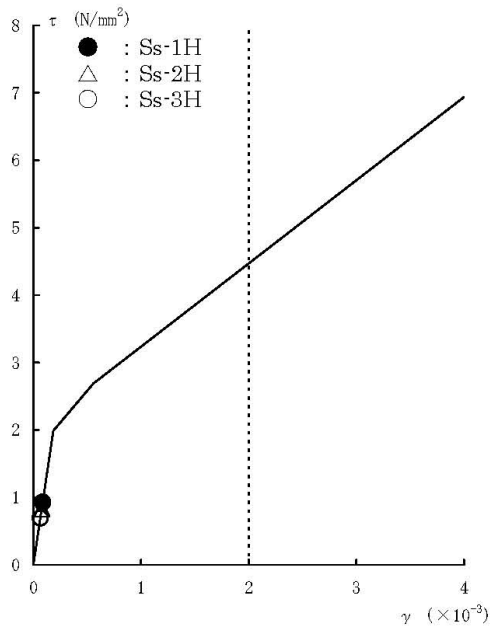


図-2.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, CRF)

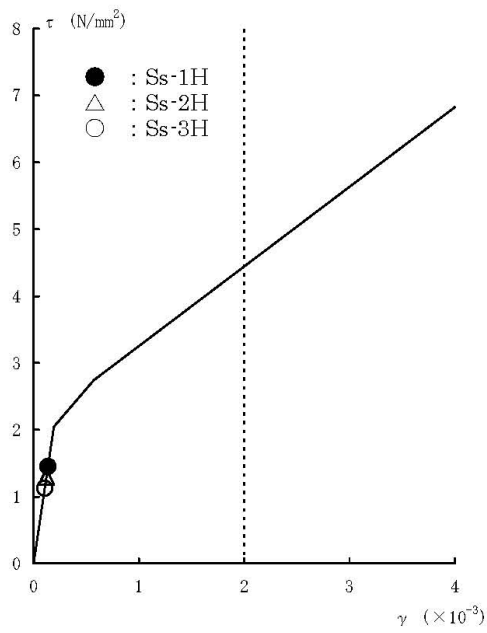


図-2.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 5F)

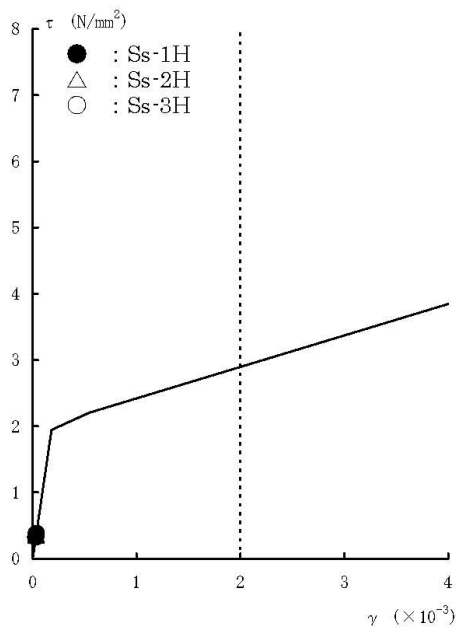


図-2.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 4F)

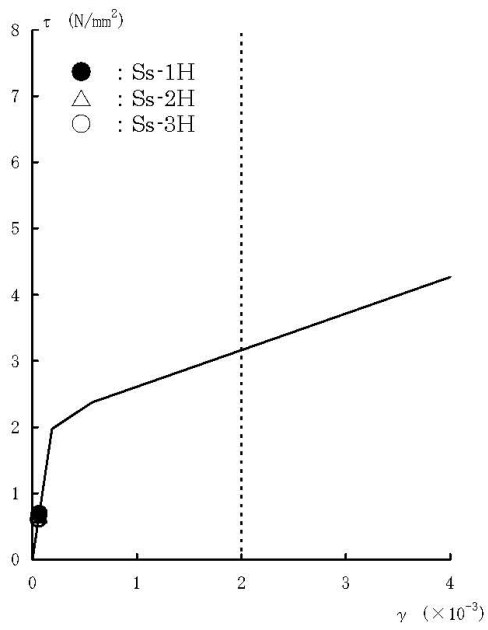


図-2.5 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 3F)

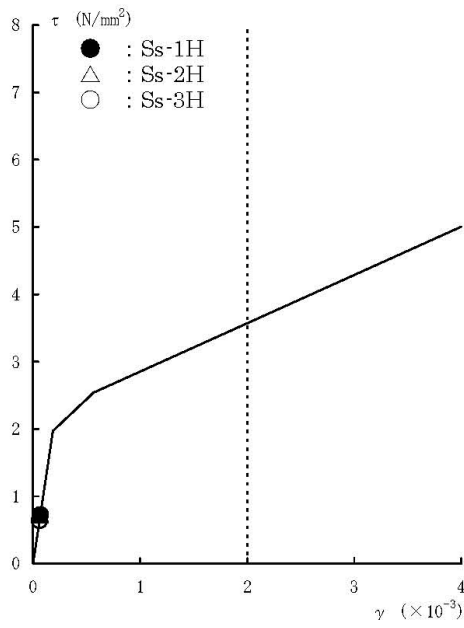


図-2.6 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 2F)

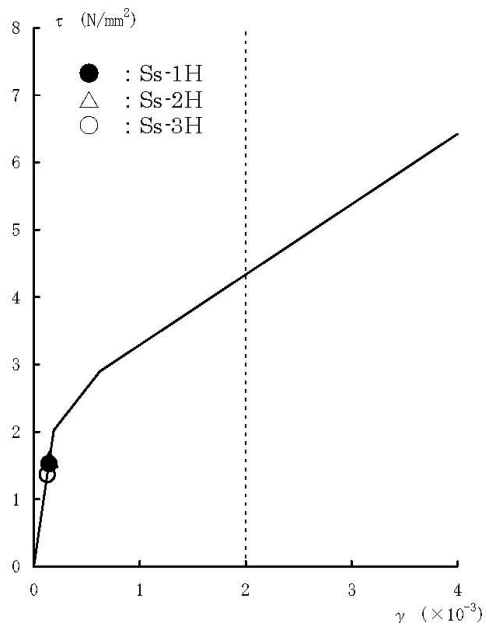


図-2.7 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 1F)

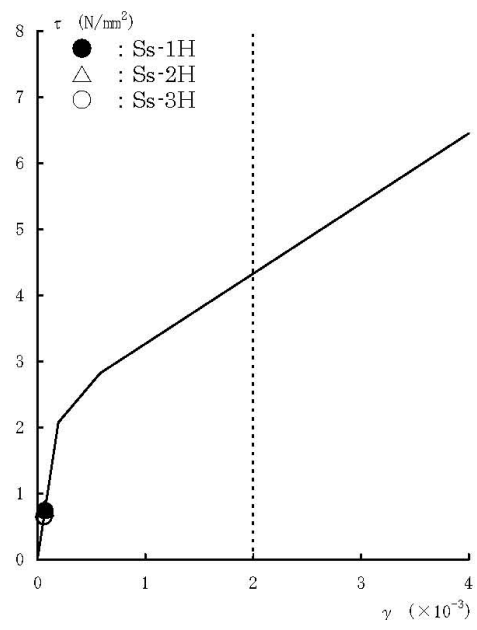


図-2.8 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, B1F)

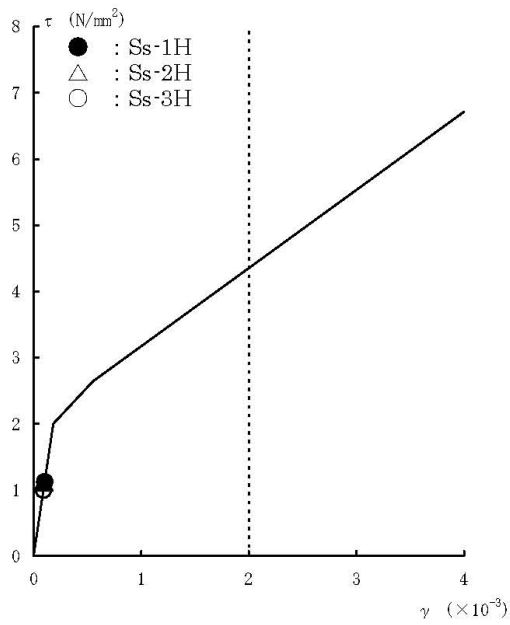


図-2.9 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, CRF)

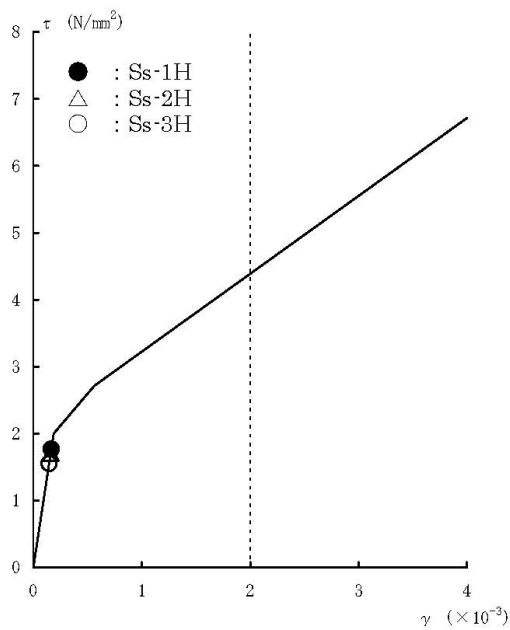


図-2.10 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 5F)

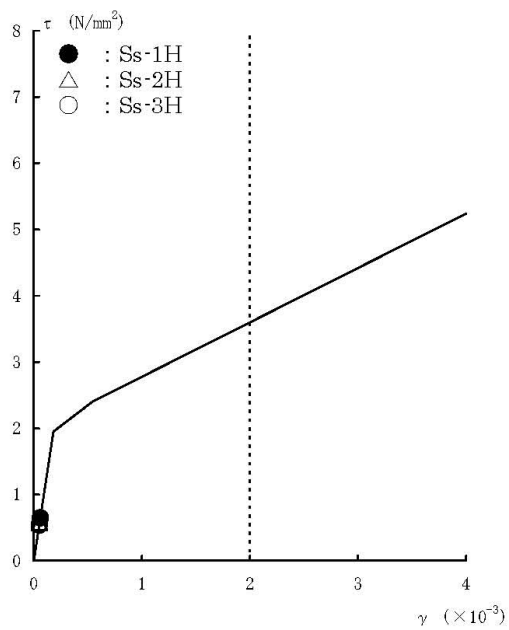


図-2.11 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 4F)

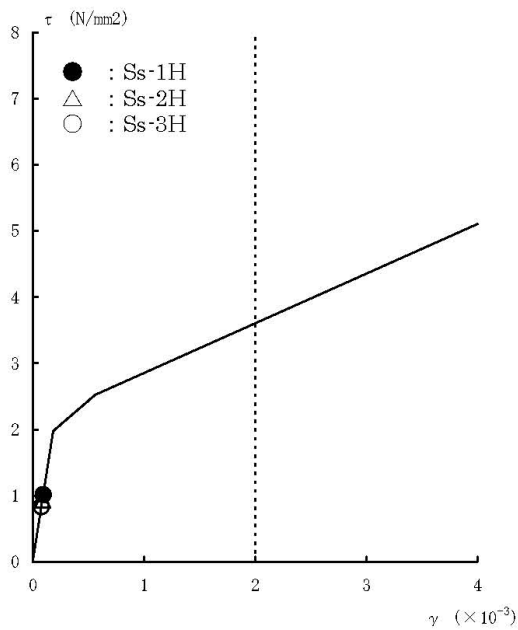


図-2.12 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 3F)

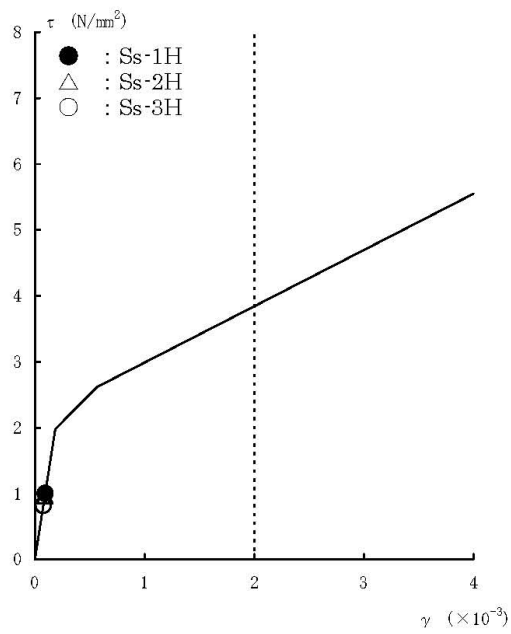


図-2.13 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 2F)

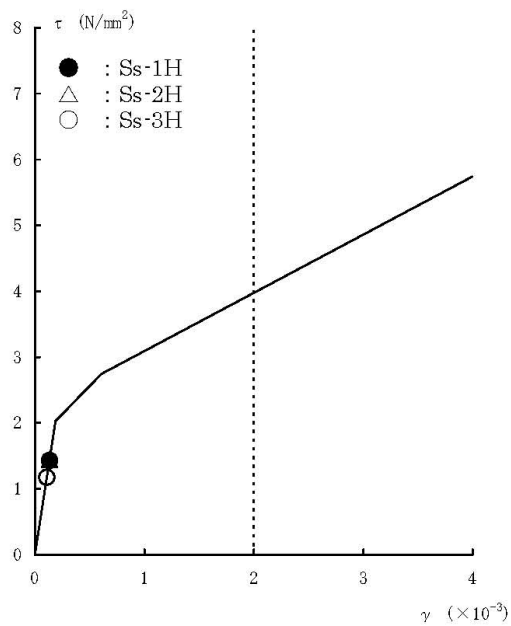


図-2.14 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 1F)

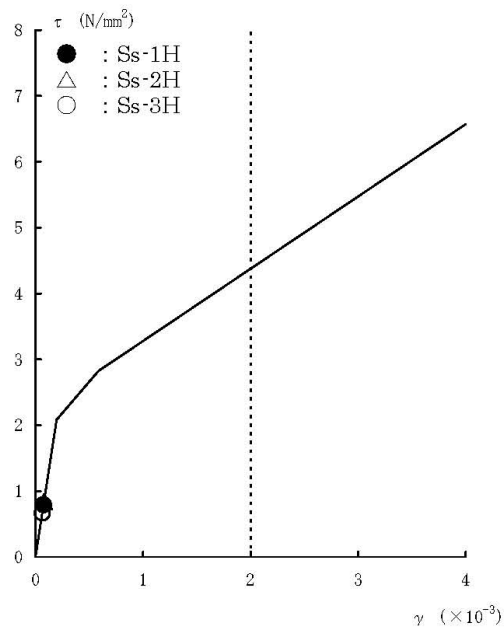


図-2.15 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, B1F)

原子炉建屋の耐震安全性評価に係るパラメータスタディ

1. 解析評価方針

福島第一原子力発電所 2 号機原子炉建屋に関しては、以下に示す変動要因を考慮したパラメータ解析を実施し、原子炉建屋の耐震安全性に与える影響程度を把握する。

原子炉建屋の構造への影響および耐震性評価は、基準地震動 S_s を用いることを基本とし、建物・構築物や地盤の応答性状を適切に表現できるモデルを設定した上で行う。なお、基準地震動 S_s-3 については、基準地震動 S_s-1 および 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、今回の検討では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。

2 号機原子炉建屋については、地震後に原子炉格納容器内の温度が一時的に上昇したことにより、シェル壁の剛性が低下した可能性を考慮する。加えて、3 月 15 日に圧力抑制室付近で異音が発生したことが確認されていることから圧力抑制室付近で爆発が発生したと仮定し、爆発により周囲の耐震壁の剛性が低下した可能性を考慮する。

原子炉建屋の構造への影響および耐震性の評価は、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 (4.0×10^{-3}) との比較により行う。

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。

2 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。

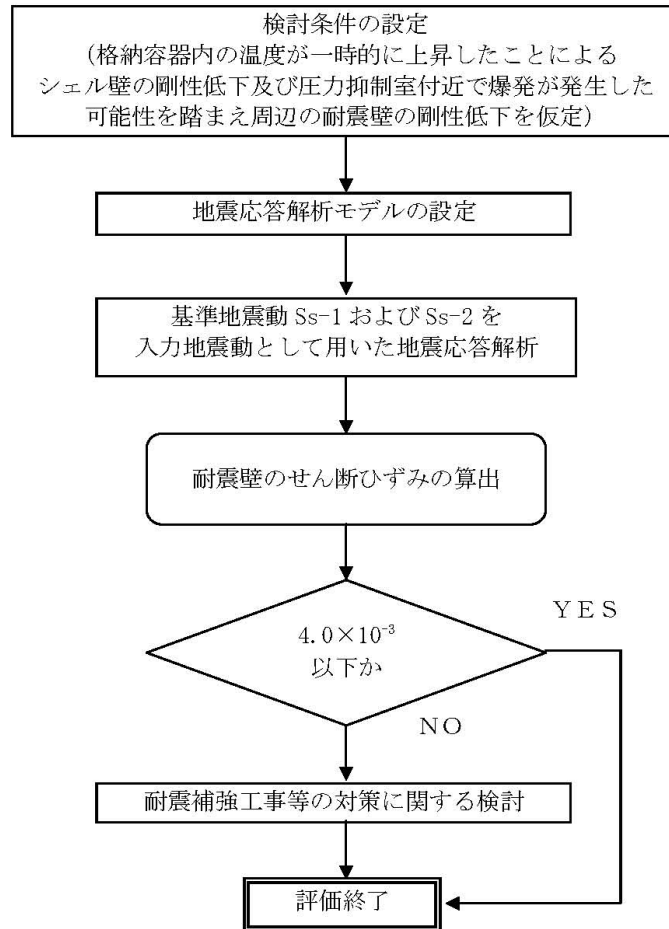


図-1.1 2号機原子炉建屋の地震応答解析の評価手順例

付 1-1.2

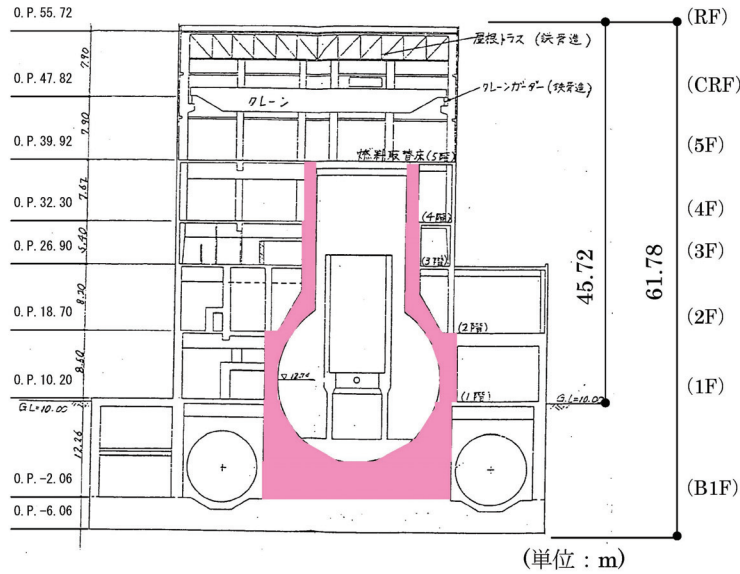
2. 検討条件の設定

2号機原子炉建屋については、地震等による建屋の損傷は無いものの、本パラメータスタディでは下記の条件を考慮することとした。

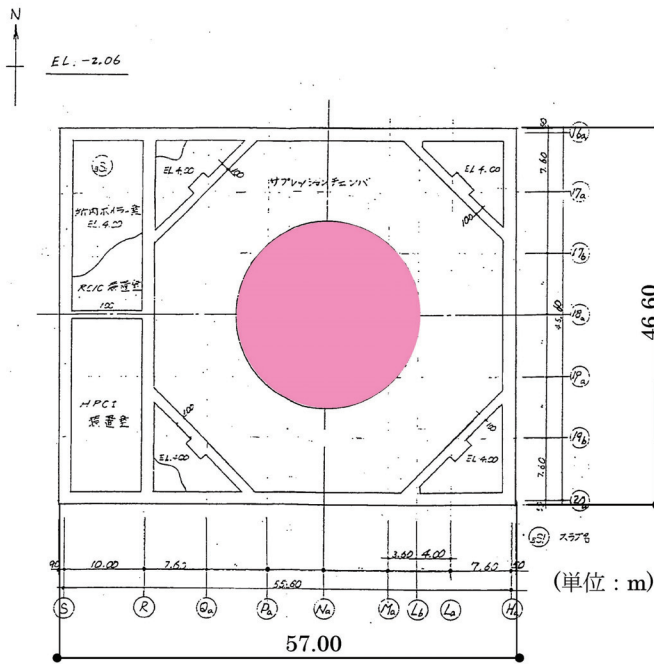
地震後に原子炉格納容器内の温度が一時的に上昇したことにより、その剛性へ影響を与える可能性がある。その影響を検討するためにシェル壁部分のコンクリートの剛性を初期剛性の60%とする（図-2.1）。

また、3月15日に建屋地下一階部分にある圧力抑制室付近で異音が発生したことが確認されている。これを踏まえ、圧力抑制室付近で爆発が発生したと仮定し、周囲の耐震壁の剛性が低下した可能性を考慮して、圧力抑制室付近の耐震壁のコンクリートの剛性を初期剛性の90%とする（図-2.2）。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm



断面図 (EW 方向)



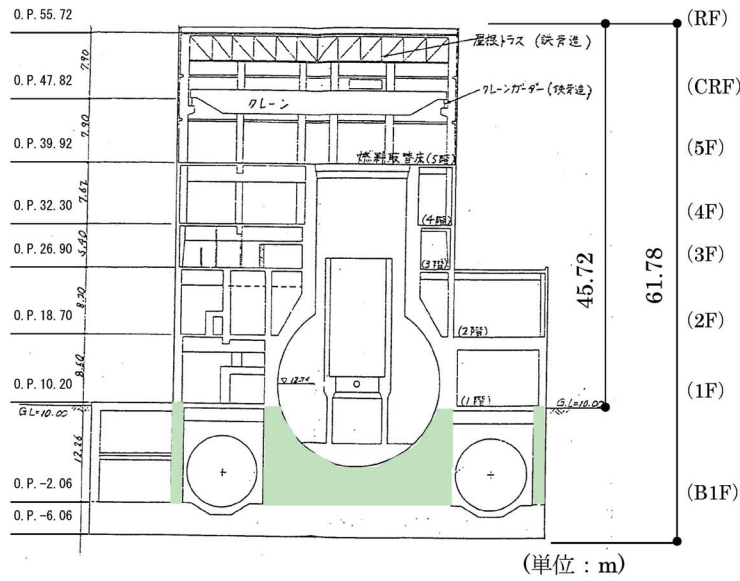
平面図 (基礎版上レベル)

剛性を60%に低下させる部位:

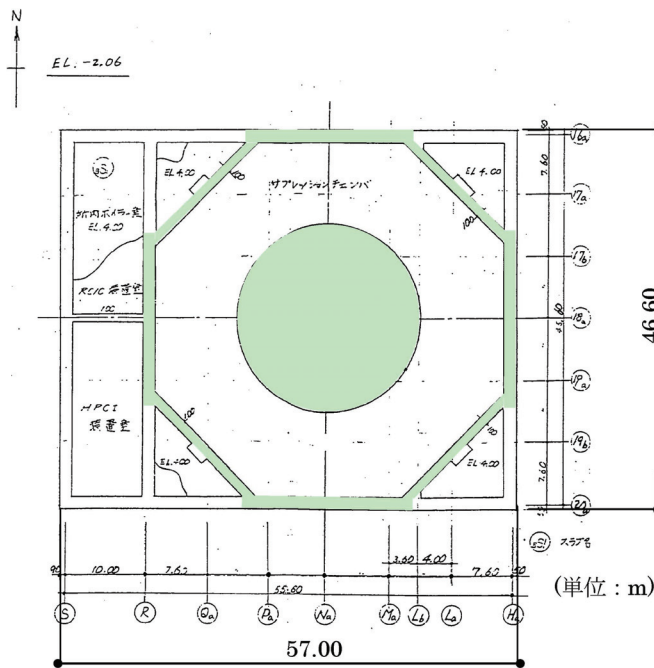
図-2.1 格納容器内の温度上昇の影響を考慮し初期剛性を60%に低下させる部位

付 1-1.4

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm



断面図 (EW 方向)



平面図 (基礎版上レベル)

剛性を 90%に低下させる部位:

図-2.2 圧力抑制室付近で爆発が発生したと仮定し初期剛性を 90%に低下させる部位

付 1-1.5

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P.=旧O.P.-1,436mm$

3. 解析に用いる入力地震動

2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 および 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 および S_s-2 の加速度波形について、図-3.2に示す。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

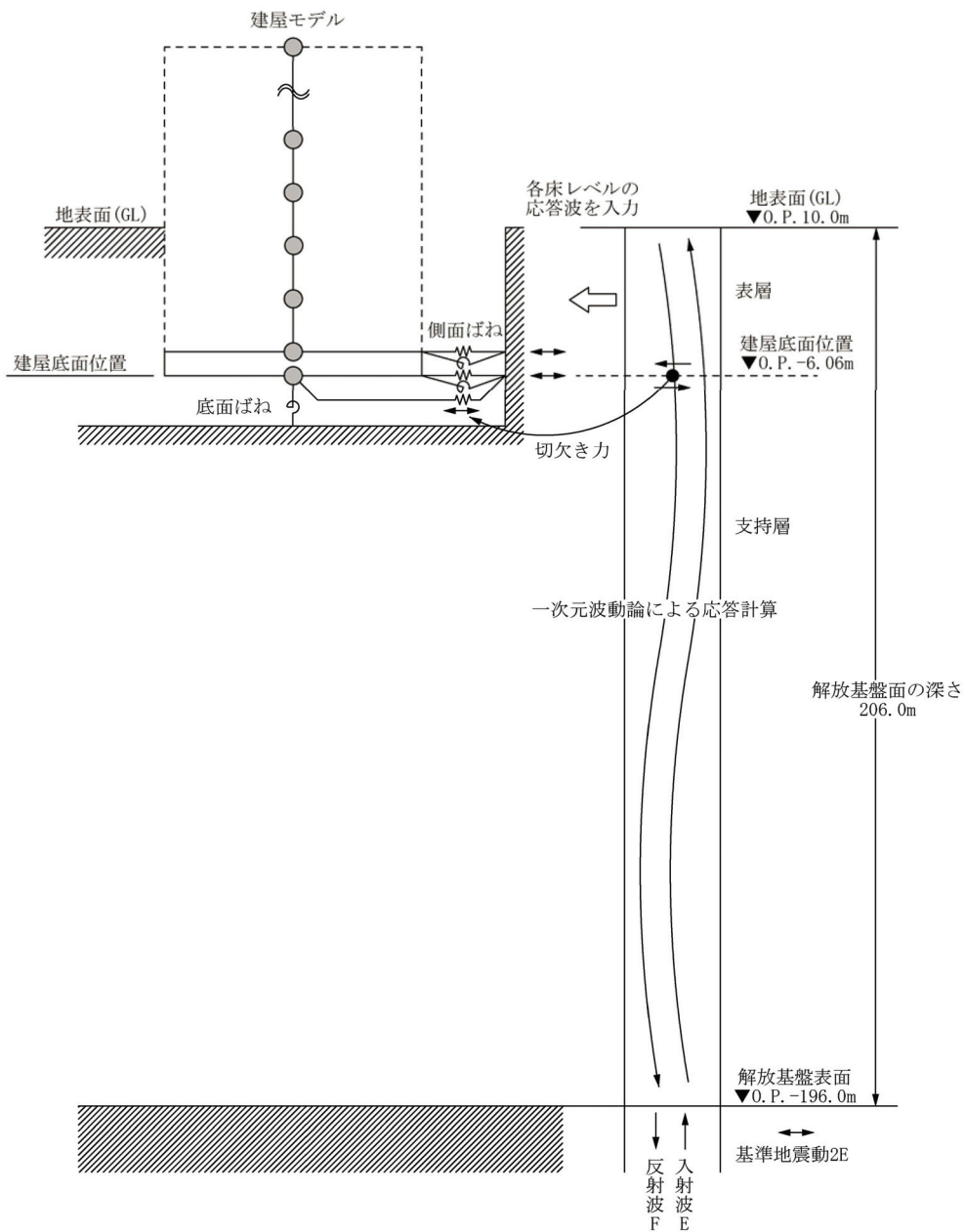


図-3.1 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図

付 1-1.7

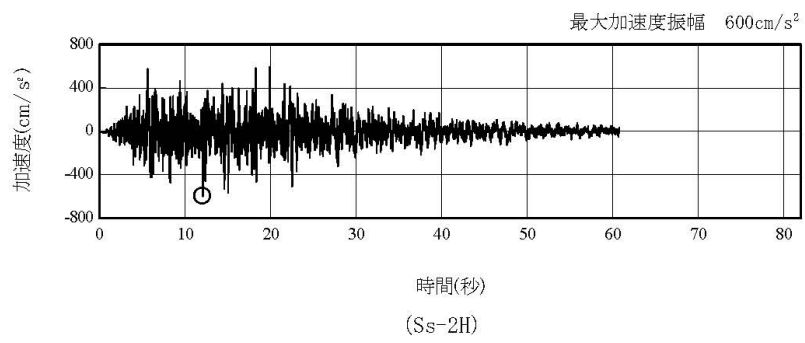
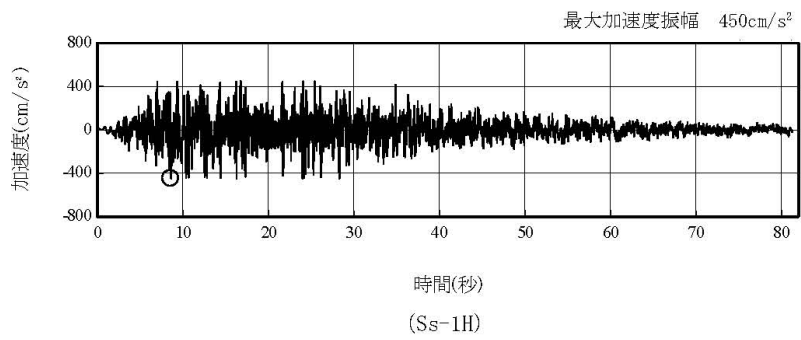


図-3.2 解放基盤表面位置における地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）

付 1-1.8

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、『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（改訂2）』（平成22年4月19日）にて作成した地震応答解析モデルを基に、次の項目について修正を加え、新たな地震応答解析モデルを構築することとする。

- ①地震後に原子炉格納容器内の温度が一時的に上昇したことにより、シェル壁の剛性が影響を受ける可能性がある。その影響を検討するためにシェル壁部分のコンクリートの剛性を初期剛性の60%とする。
- ②3月15日に建屋地下一階部分にある圧力抑制室付近で異音が発生したことが確認されていることを踏まえ、圧力抑制室付近で爆発が発生したと仮定し、周囲の耐震壁の剛性が低下した可能性を考慮して、圧力抑制室付近の耐震壁のコンクリートの剛性を初期剛性の90%とする。

(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。

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

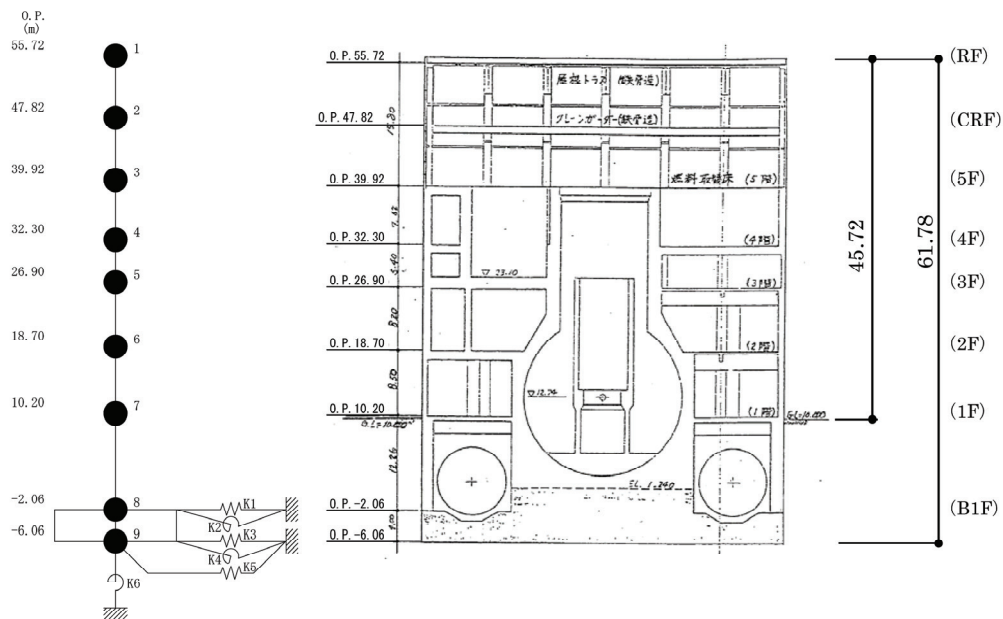


図-4.1 2号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS方向)

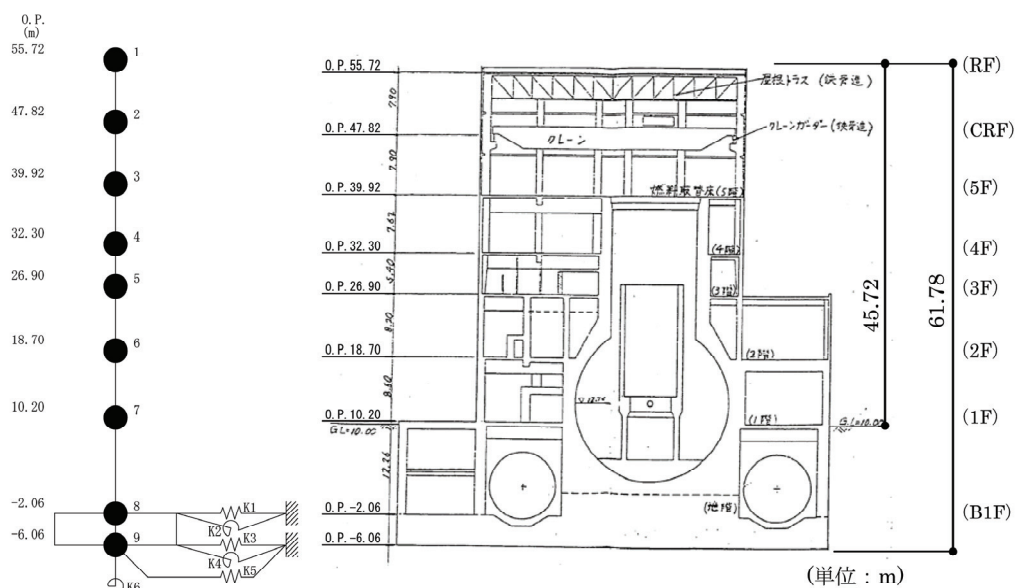


図-4.2 2号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (EW方向)

付 1-1.11

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 _c (N/mm ²)	ヤング係数*2 E (N/mm ²)	せん断弾性係数*2 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (kN/m ³)
	35.0	2.57×10 ⁴	1.07×10 ⁴	0.2	24
鉄筋	SD345相当 (SD35)				

*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。

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 (×10 ⁵ kN・m ²)	せん断断面積 A _S (m ²)	断面2次モーメント I(m ⁴)	ヤング係数 E _C (×10 ⁷ kN/m ²)	せん断弾性係数 G(×10 ⁷ kN/m ²)
1	14,380	25.99				
2	10,220	18.53	18.6	10,154	2.57	1.070
3	58,470	105.81	18.6	10,675	2.57	1.070
4	70,440	127.49	184.3	22,551	2.51	1.001
5	107,720	194.96	166.8	24,629	2.50	0.973
6	116,670	211.14	249.3	44,401	2.47	0.936
7	199,190	360.49	157.1	40,661	2.40	0.921
8	277,540	502.20	456.8	110,444	2.42	0.819
9	125,030	226.24	2,656.2	480,675	2.57	1.070
合計	979,660					

ポアソン比 ν 0.20
 減衰 λ 5%
 基礎形状 46.6m(NS方向)×57.0m(EW方向)

(EW 方向)

質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 I _G (×10 ⁵ kN・m ²)	せん断断面積 A _S (m ²)	断面2次モーメント I(m ⁴)	ヤング係数 E _C (×10 ⁷ kN/m ²)	せん断弾性係数 G(×10 ⁷ kN/m ²)
1	14,380	14.71				
2	10,220	10.40	14.0	5,941	2.57	1.070
3	58,470	59.72	14.0	6,307	2.57	1.070
4	70,440	71.88	108.2	11,927	2.46	0.952
5	107,720	194.96	117.3	14,199	2.45	0.931
6	116,670	211.14	185.7	33,796	2.44	0.890
7	199,190	539.37	173.1	41,960	2.41	0.935
8	277,540	751.39	418.1	132,121	2.44	0.795
9	125,030	338.53	2,656.2	719,166	2.57	1.070
合計	979,660					

ポアソン比 ν 0.20
 減衰 λ 5%
 基礎形状 46.6m(NS方向)×57.0m(EW方向)

付 1-1.13

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

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 γ_t (kN/m^3)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G_0 (kN/m^2)	剛性低下率 G/G_0	せん断弾性 係数 G (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	
	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 γ_t (kN/m^3)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G_0 (kN/m^2)	剛性低下率 G/G_0	せん断弾性 係数 G (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	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

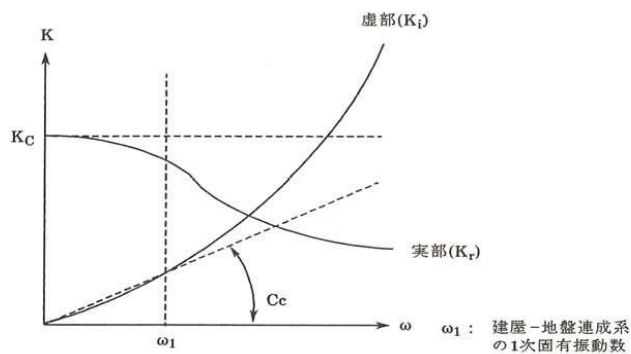


図-4.3 地盤ばねの近似

付1-1.14

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

5. 地震応答解析結果

地震応答解析により求められた NS 方向、EW 方向の最大応答加速度を図-5.1 および図
 -5.2 に示す。

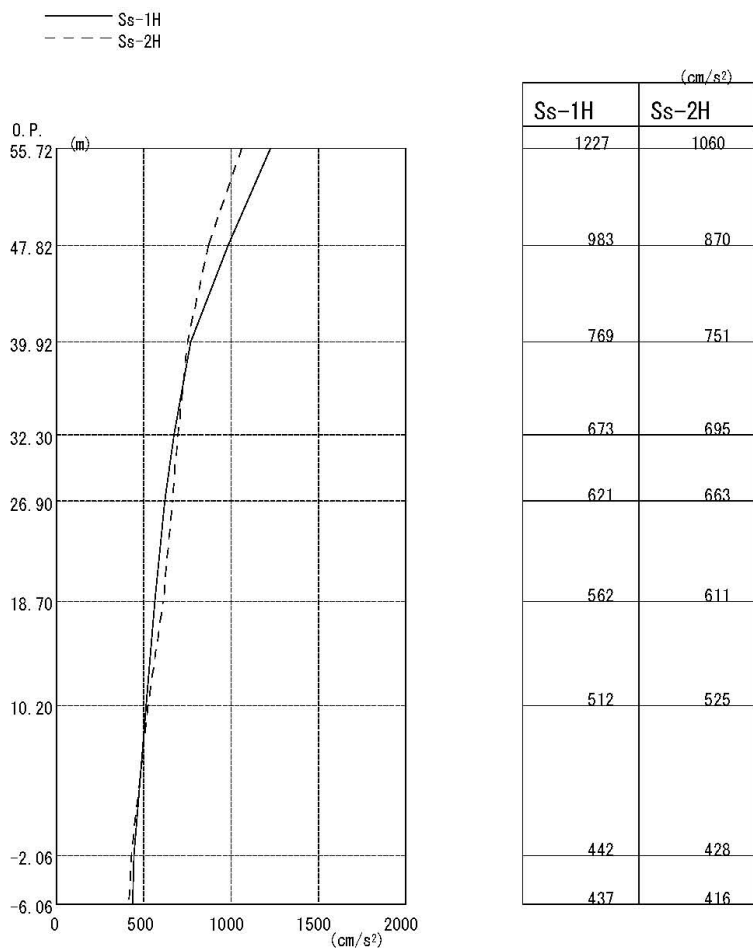
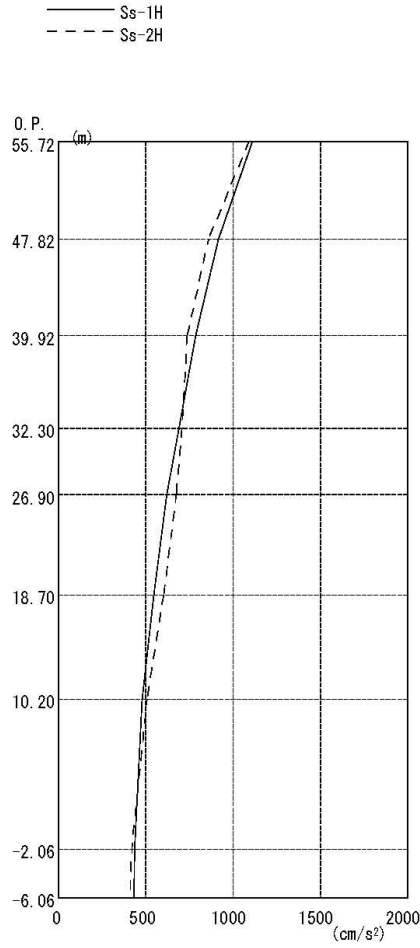


図-5.1 最大応答加速度 (NS 方向)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm



(cm/s ²)	
Ss-1H	Ss-2H
1109	1090
917	859
787	737
690	708
619	674
546	602
481	508
436	419
433	410

図-5.2 最大応答加速度 (EW 方向)

付 1-1. 16

6. 耐震安全性評価結果

表-6.1 及び表-6.2 に耐震壁のせん断ひずみ一覧を示す。図-6.1、図-6.2 および図-6.3、図-6.4 に基準地震動 Ss-1 および基準地震動 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 0.18×10^{-3} (Ss-2H, NS 方向, 1F) であり、評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

以上のことから、原子炉建屋は耐震安全上重要な設備に波及的影響を与えないものと評価した。

また、本パラメータスタディにおける解析結果と添付資料-1 で示した耐震バックチェックの解析結果には大きな差異が無いことから、変動要因が原子炉建屋の耐震安全性に与える影響は少ないものと考えられる。

表-6.1 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS 方向)
($\times 10^{-3}$)

階	Ss-1H	Ss-2H	評価基準値
CRF	0.09	0.08	4.0 以下
5F	0.14	0.13	
4F	0.04	0.04	
3F	0.08	0.07	
2F	0.08	0.08	
1F	0.17	0.18	
B1F	0.10	0.10	

表-6.2 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW 方向)
($\times 10^{-3}$)

階	Ss-1H	Ss-2H	評価基準値
CRF	0.11	0.11	4.0 以下
5F	0.17	0.17	
4F	0.07	0.07	
3F	0.11	0.11	
2F	0.12	0.12	
1F	0.16	0.16	
B1F	0.10	0.11	

付 1-1.17

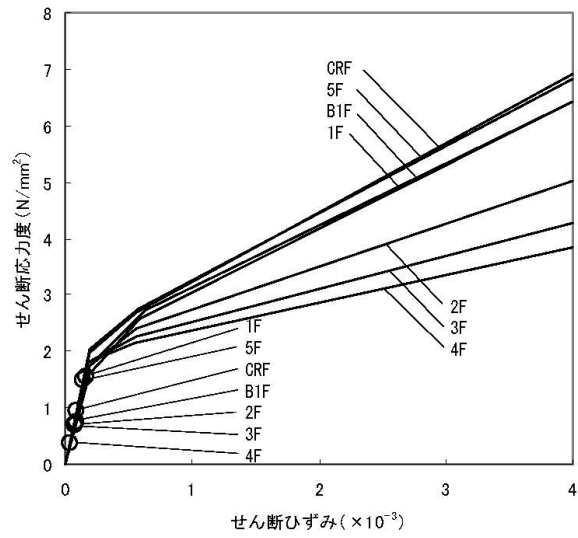


図-6.1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, NS 方向)

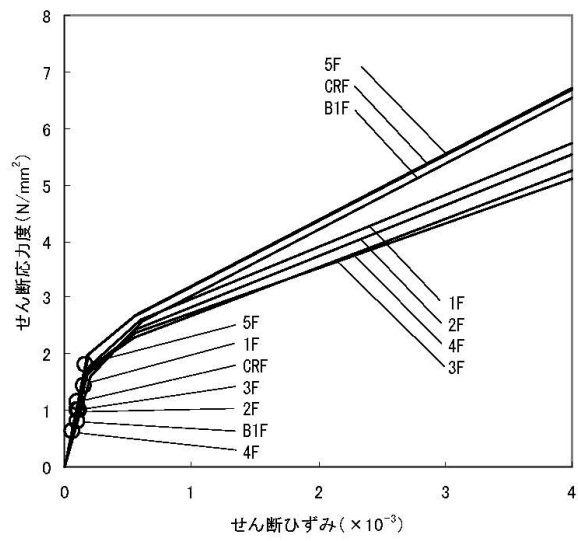


図-6.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-1, EW 方向)

付 1-1. 18

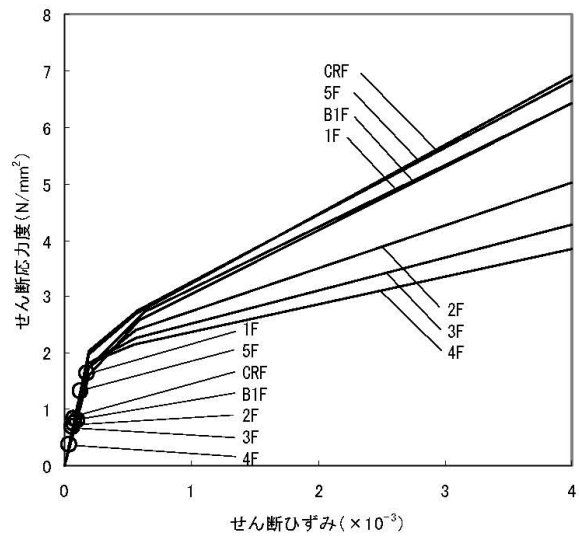


図-6.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, NS 方向)

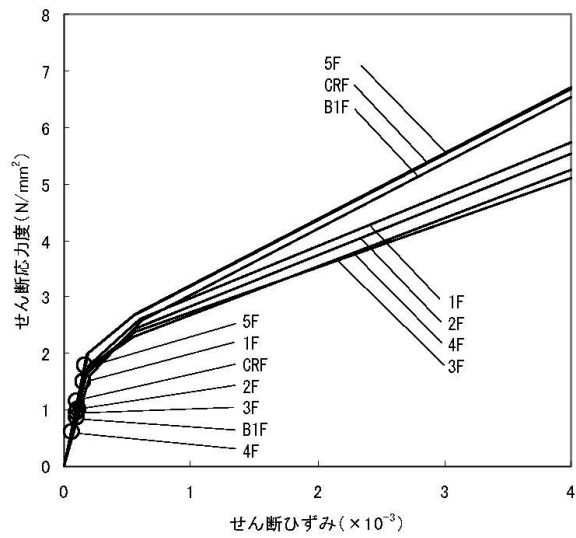


図-6.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-2, EW 方向)

添付資料－２：５号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細

1. 評価方針

5号機の原子炉建屋は、既に冷温停止状態を維持しており、外見上の損傷は見られない(図-1.1)。また、建屋内部についても、現状で得られている写真からは構造的な損傷は確認されていない(付録-2.1)。したがって、このような状況を踏まえると、建屋の耐震性という観点からは、耐震バックチェックの解析結果(『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(改訂2)』平成22年4月19日)をそのまま適用できるものと考えられ、本評価では、耐震バックチェックで実施した地震応答解析結果を用いて耐震安全性評価を実施することとした。

なお、原子炉建屋の構造への影響および耐震性の評価は、耐震安全上重要な設備への波及的影響防止の観点から、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(4.0×10^{-3})との比較により行うこととする。



図-1.1 外観写真(北面、3月24日撮影)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

2. 耐震安全性評価

(1) 地震応答解析モデルの概要

耐震バックチェックにおける地震応答解析は、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析（時刻歴応答解析法）によることとし、建物・構築物や地盤の特性を適切に表現できるモデル（図-2.1）を設定した上で実施した。

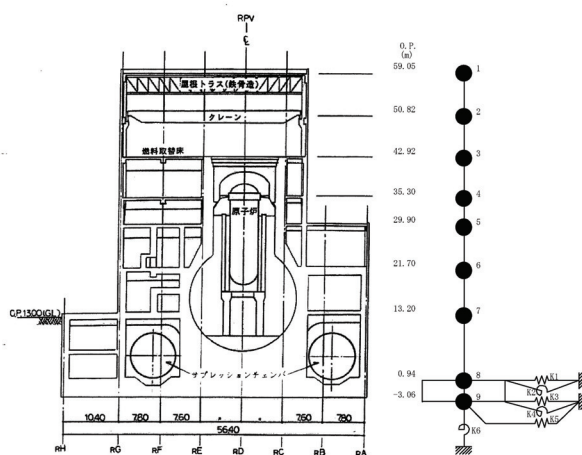


図-2.1 建屋解析モデル図

(2) 耐震安全性評価結果

表-2.1および表-2.2に耐震壁のせん断ひずみ一覧を示す。また図-2.2～図-2.15に基準地震動 S_s 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 0.19×10^{-3} (Ss-1H, EW方向, 5F) であり、評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

以上のことから、原子炉建屋は耐震安全上重要な設備に波及的影響を与えないものと評価した。

表-2.1 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS方向)

($\times 10^{-3}$)

階	Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H	評価基準値
CRF	0.12	0.12	0.10	4.0以下
5F	0.14	0.14	0.12	
4F	0.05	0.05	0.04	
3F	0.09	0.09	0.08	
2F	0.10	0.10	0.09	
1F	0.15	0.16	0.13	
B1F	0.11	0.11	0.09	

表-2.2 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW方向)

($\times 10^{-3}$)

階	Ss-1H	Ss-2H	Ss-3H	評価基準値
CRF	0.16	0.16	0.14	4.0以下
5F	0.19	0.18	0.16	
4F	0.09	0.08	0.07	
3F	0.11	0.11	0.09	
2F	0.11	0.12	0.10	
1F	0.11	0.12	0.10	
B1F	0.11	0.11	0.09	

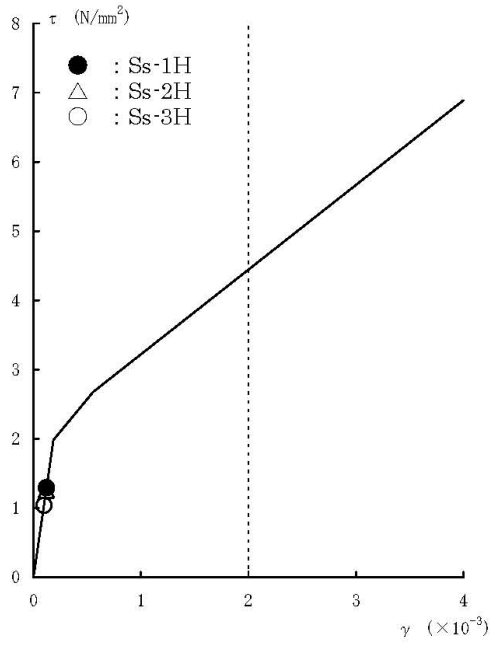


図-2.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, CRF)

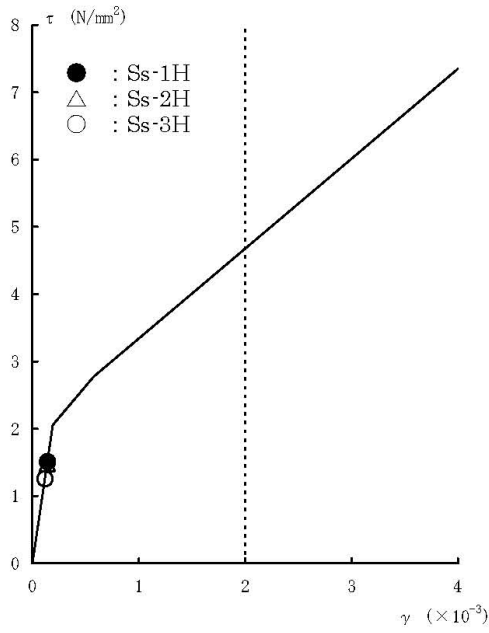


図-2.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 5F)

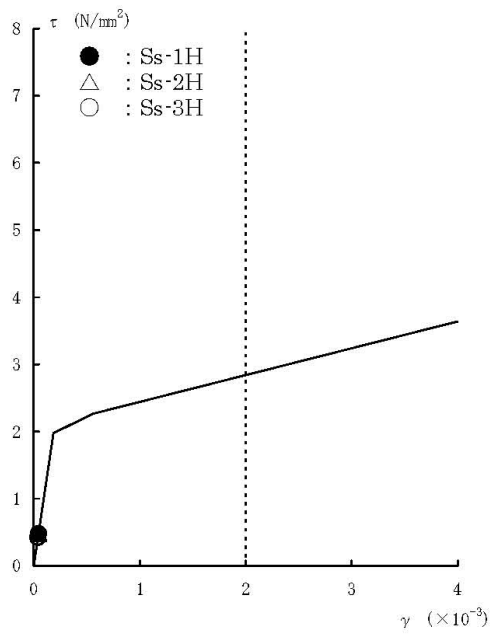


図-2.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 4F)

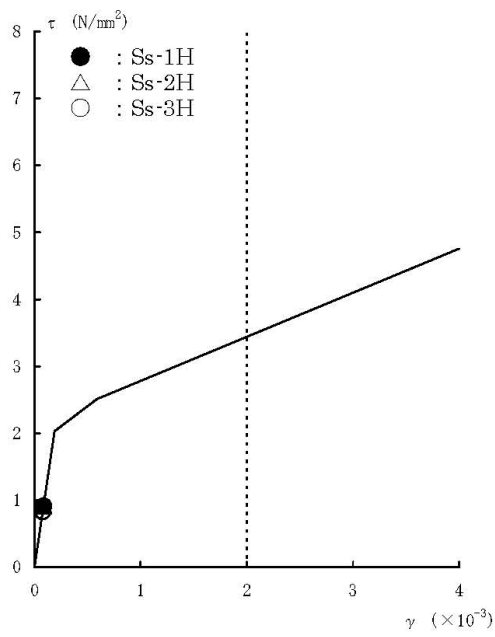


図-2.5 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 3F)

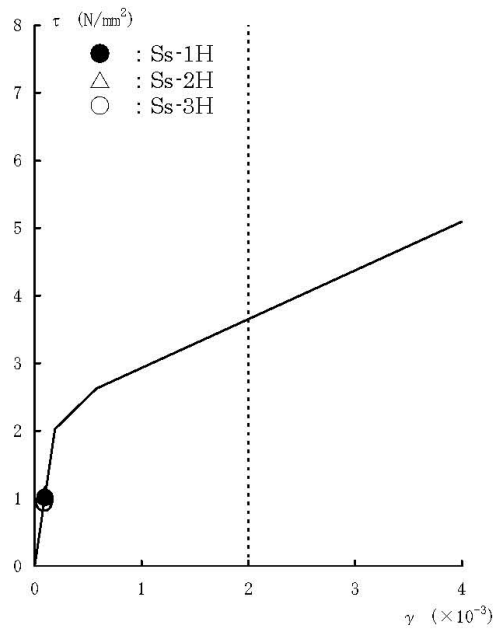


図-2.6 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 2F)

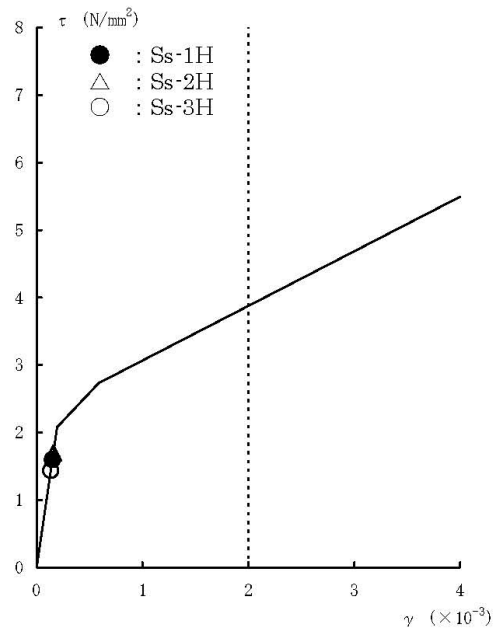


図-2.7 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 1F)

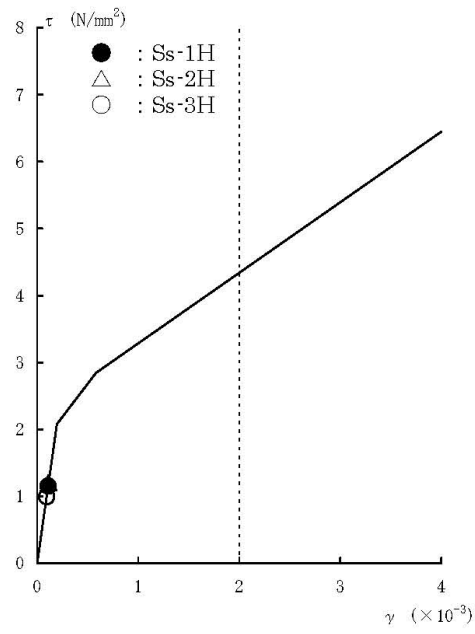


図-2.8 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, B1F)

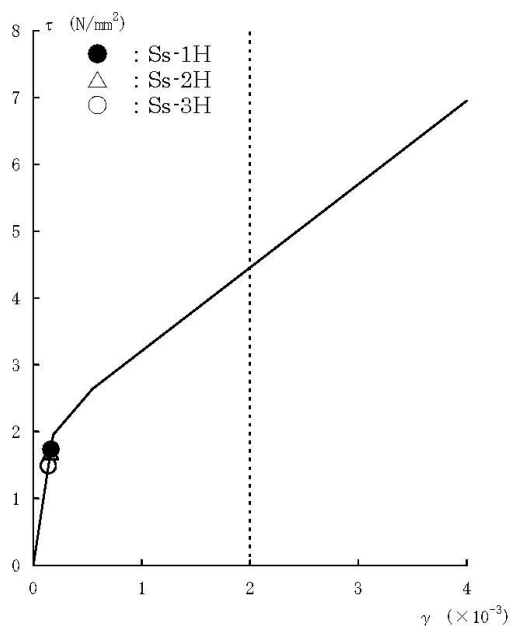


図-2.9 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, CRF)

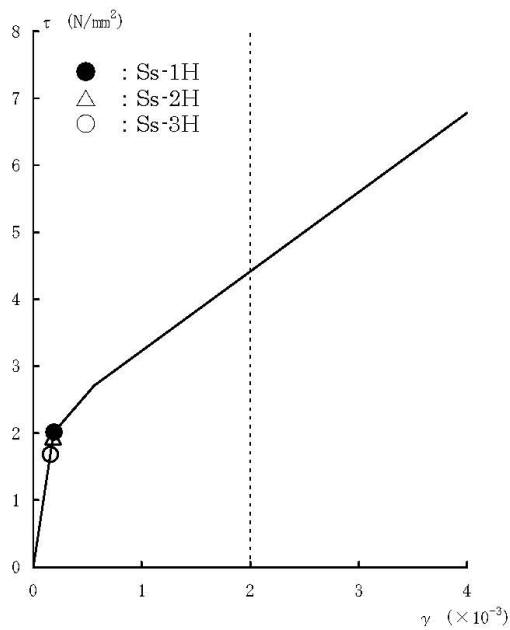


図-2.10 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 5F)

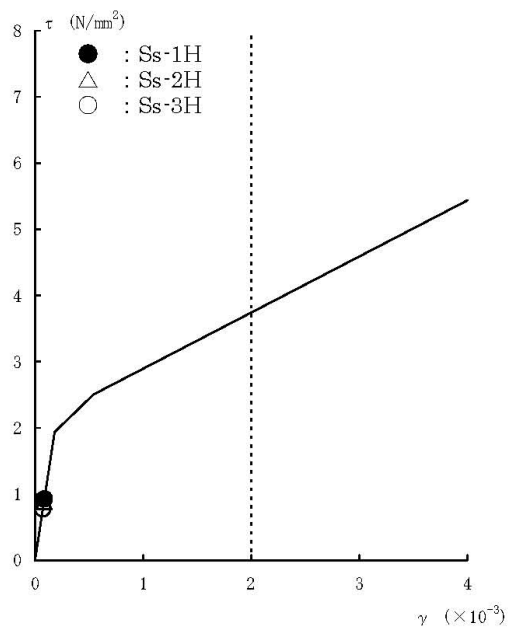


図-2.11 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 4F)

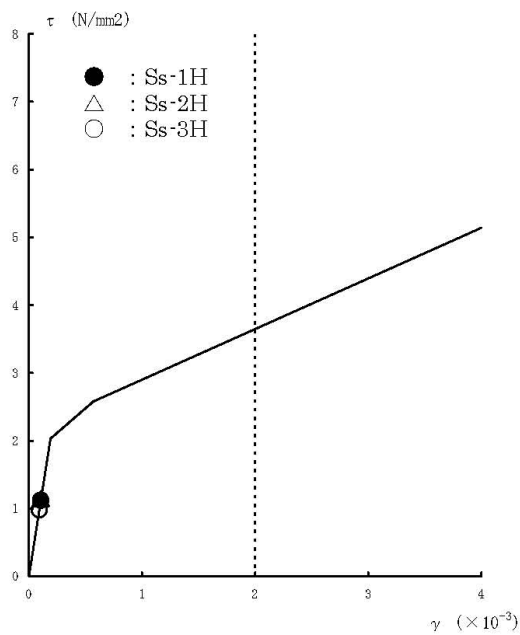


図-2.12 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 3F)

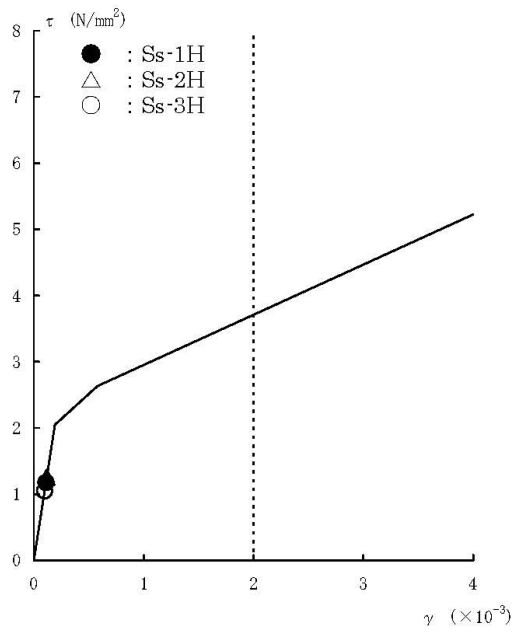


図-2.13 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 2F)

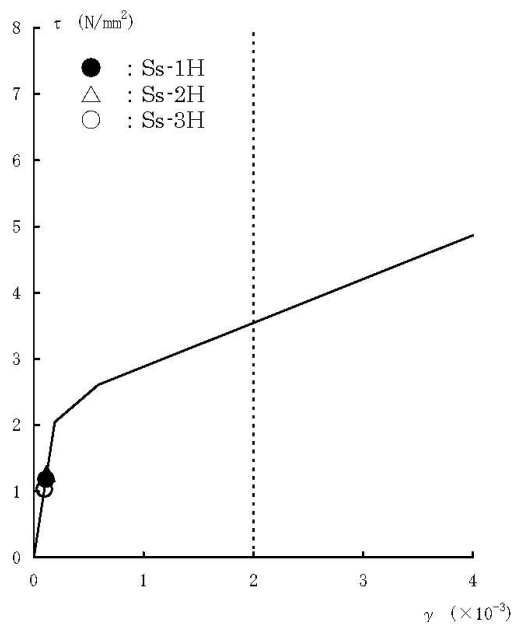


図-2.14 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 1F)

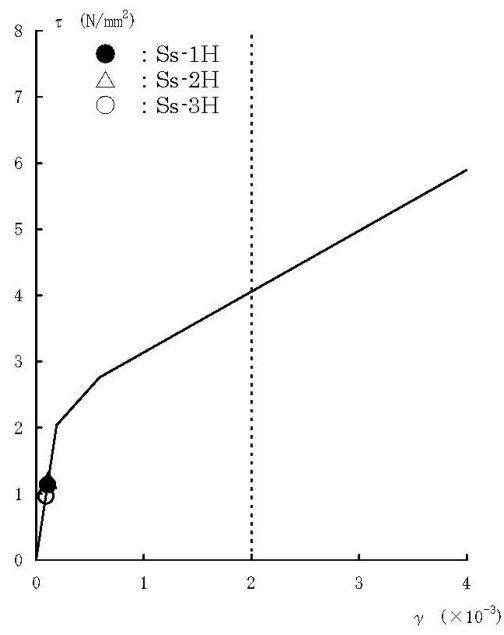


図-2.15 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, B1F)

5号機建屋内部の状況について

福島第一原子力発電所5号機原子炉建屋については、7月26日に東京電力が建屋内部の写真を撮影している。その時に撮影した写真を図-1に示す。



1階 西側外壁



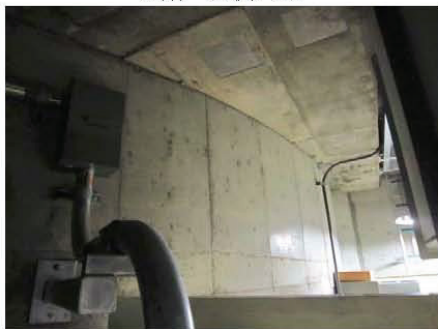
1階 南側シェル壁



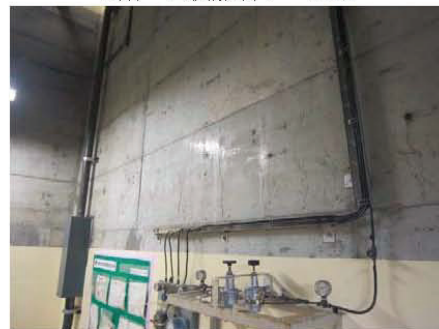
2階 西側外壁



3階 西側燃料プール壁



3階 北側シェル壁



4階 東側燃料プール壁

図-1 (1) 5号機建屋内部の状況 (7月26日撮影)

付 2-1.1



4階 東側シェル壁



5階 北側外壁

図-1 (2) 5号機建屋内部の状況 (7月26日撮影)

付 2-1.2

添付資料－3：6号機の原子炉建屋の耐震安全性評価に関する詳細

1. 評価方針

6号機の原子炉建屋は、既に冷温停止状態を維持しており、外見上の損傷は見らない(図-1.1)。内部についても詳細な点検は行っていないものの、構造的な損傷があったとの情報は得られていない。したがって、このような状況を踏まえると、建屋の耐震性という観点からは、耐震バックチェックの解析結果(『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(改訂2)』平成22年4月19日)をそのまま適用できるものと考えられ、本評価では、耐震バックチェックで実施した地震応答解析結果を用いて耐震安全性評価を実施することとした。

なお、原子炉建屋の構造への影響および耐震性の評価は、耐震安全上重要な設備への波及的影響防止の観点から、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(4.0×10^{-3})との比較により行うこととする。



図-1.1 外観写真(北面、3月24日撮影)

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

2. 耐震安全性評価

(1) 地震応答解析モデルの概要

耐震バックチェックにおける地震応答解析は、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析（時刻歴応答解析法）によることとし、建物・構築物や地盤の特性を適切に表現できるモデル（図-2.1）を設定した上で実施した。

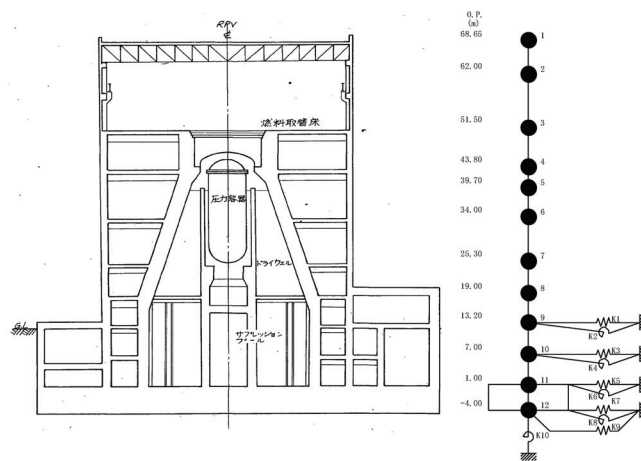


図-2.1 建屋解析モデル図

(2) 耐震安全性評価結果

表-2.1および表-2.2に耐震壁のせん断ひずみ一覧を示す。また図-2.2～図-2.21に基準地震動 S_s 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 0.33×10^{-3} (S_s -1H, NS方向, 2F) であり、評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して十分余裕がある。

以上のことから、原子炉建屋は耐震安全上重要な設備に波及的影響を与えないものと評価した。

表-2.1 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (NS方向)

階	$(\times 10^{-3})$			評価基準値
	S_s -1H	S_s -2H	S_s -3H	
CRF	0.07	0.07	0.06	4.0 以下
6F	0.14	0.13	0.12	
5F	0.09	0.08	0.07	
M5F	0.15	0.13	0.13	
4F	0.19	0.17	0.17	
3F	0.19	0.18	0.17	
2F	0.33	0.28	0.20	
1F	0.15	0.15	0.13	
B1F	0.11	0.11	0.09	
B2F	0.12	0.12	0.10	

表-2.2 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW方向)

階	$(\times 10^{-3})$			評価基準値
	S_s -1H	S_s -2H	S_s -3H	
CRF	0.06	0.06	0.05	4.0 以下
6F	0.12	0.12	0.11	
5F	0.08	0.07	0.07	
M5F	0.17	0.15	0.15	
4F	0.23	0.19	0.19	
3F	0.20	0.19	0.17	
2F	0.23	0.21	0.18	
1F	0.14	0.14	0.12	
B1F	0.10	0.11	0.08	
B2F	0.12	0.12	0.09	

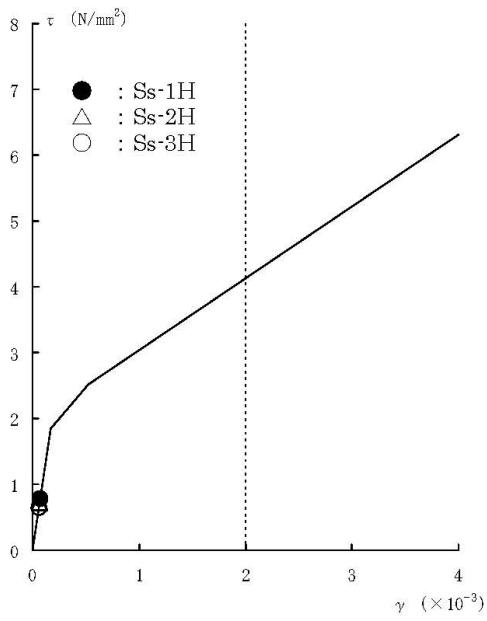


図-2.2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, CRF)

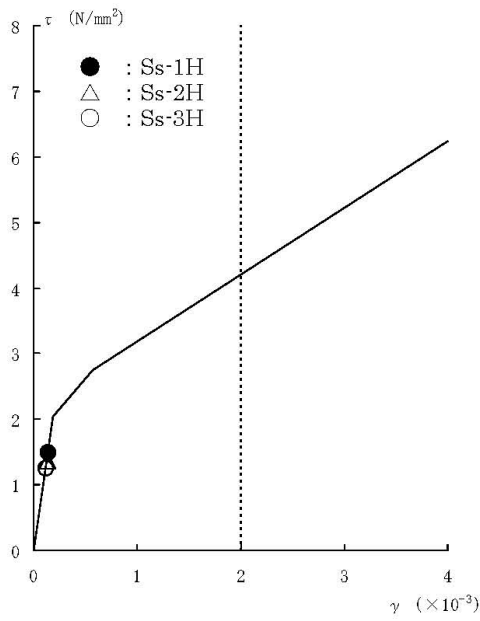


図-2.3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 6F)

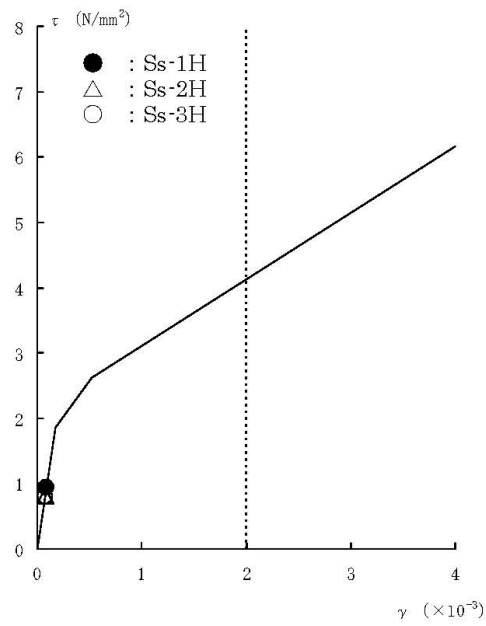


図-2.4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 5F)

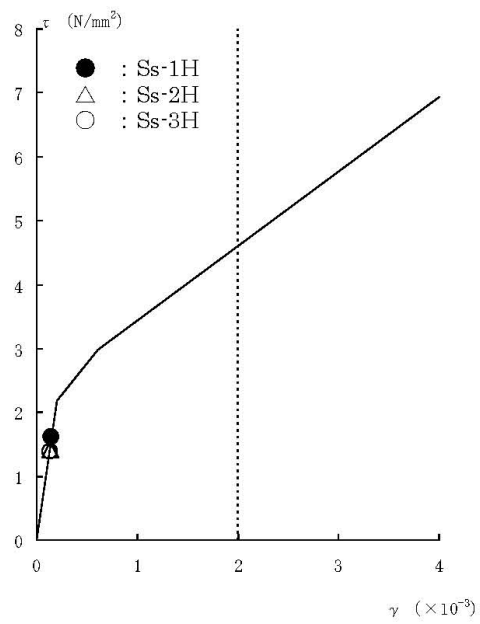


図-2.5 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, M5F)

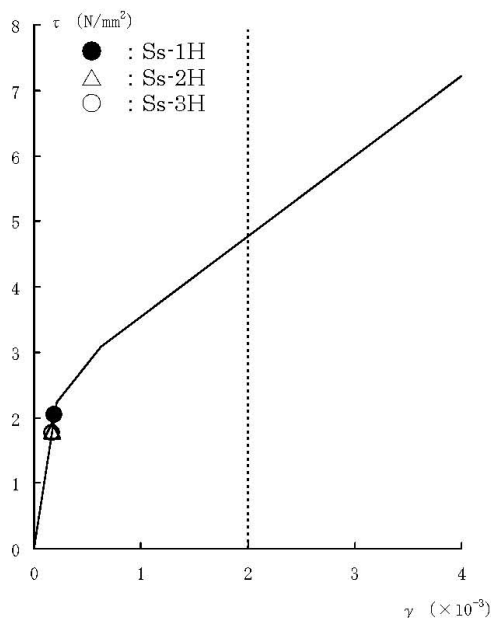


図-2.6 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 4F)

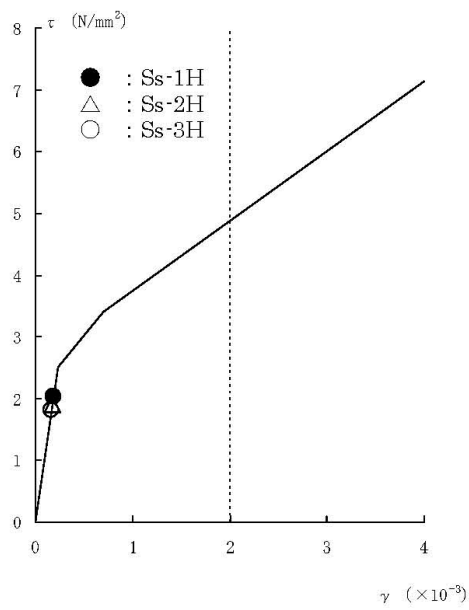


図-2.7 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 3F)

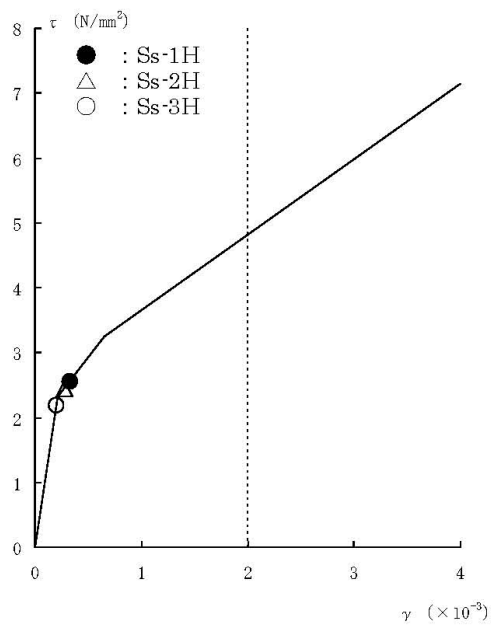


図-2.8 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 2F)

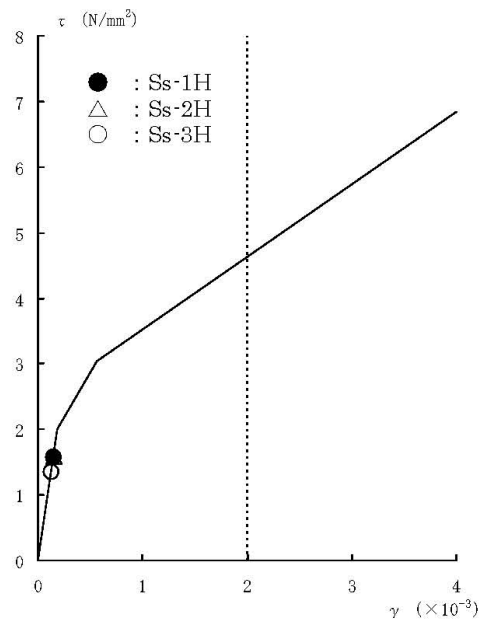


図-2.9 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, 1F)

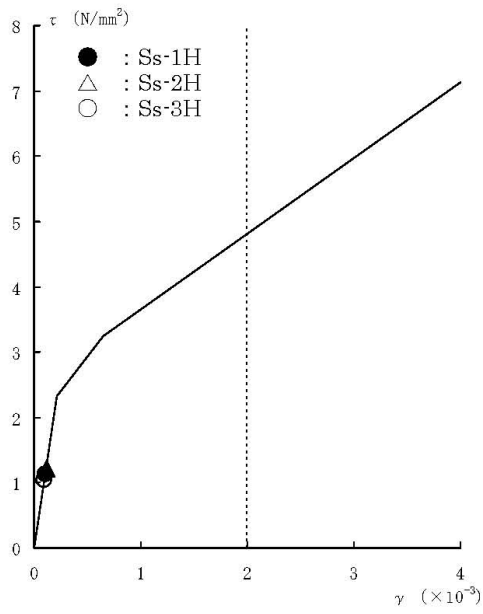


図-2.10 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, B1F)

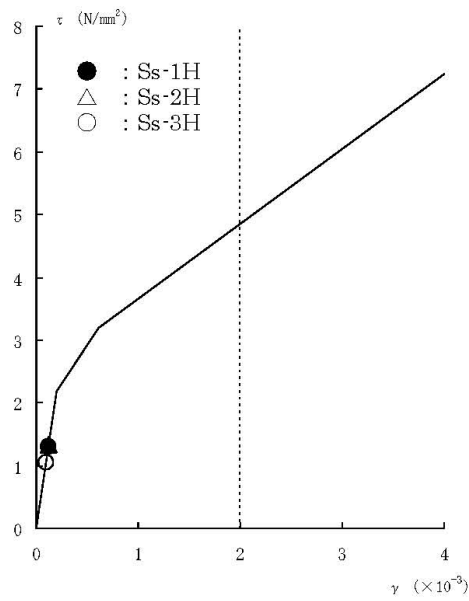


図-2.11 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向, B2F)

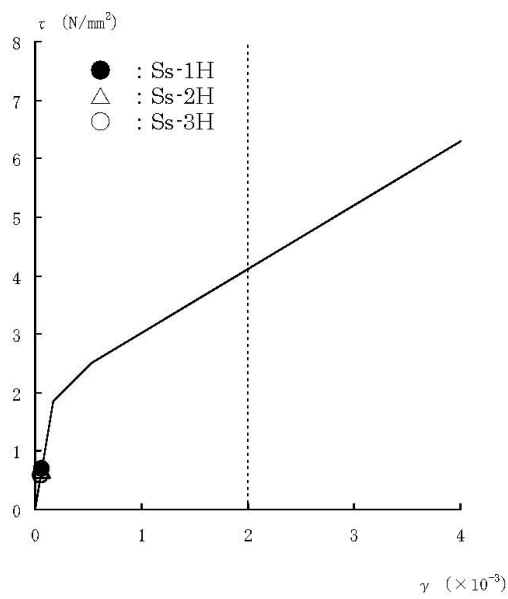


図-2.12 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, CRF)

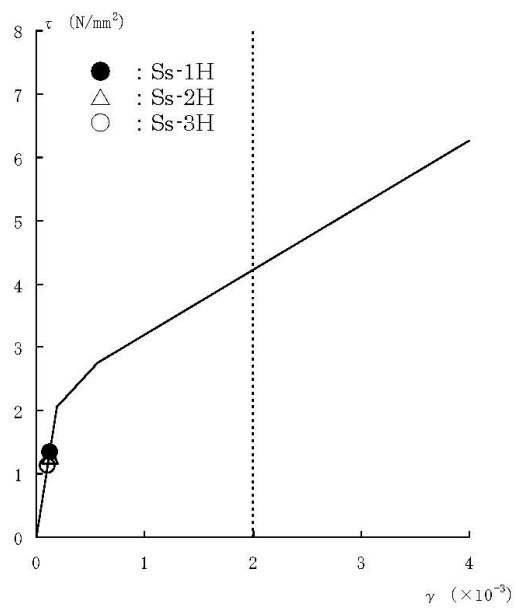


図-2.13 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 6F)

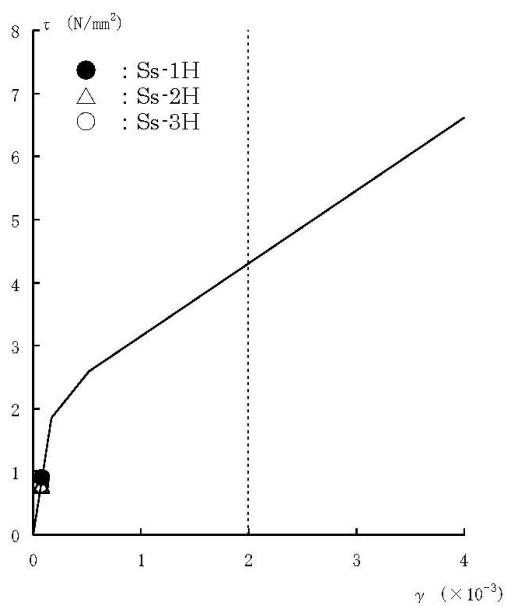


図-2.14 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 5F)

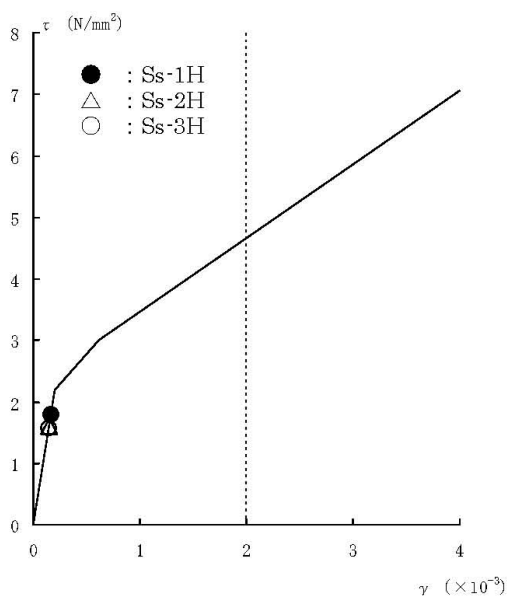


図-2.15 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, M5F)

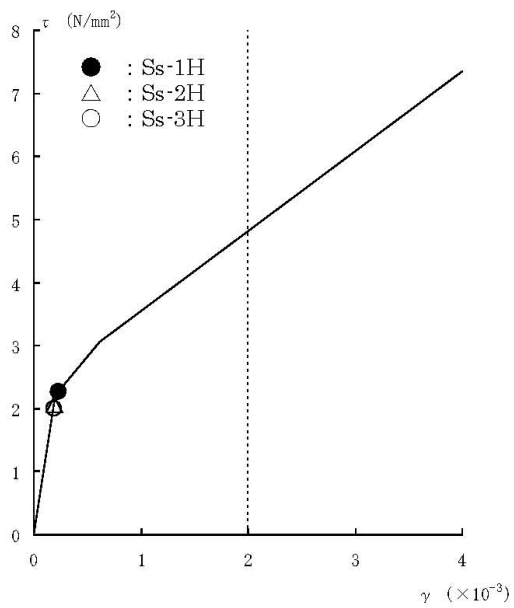


図-2.16 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 4F)

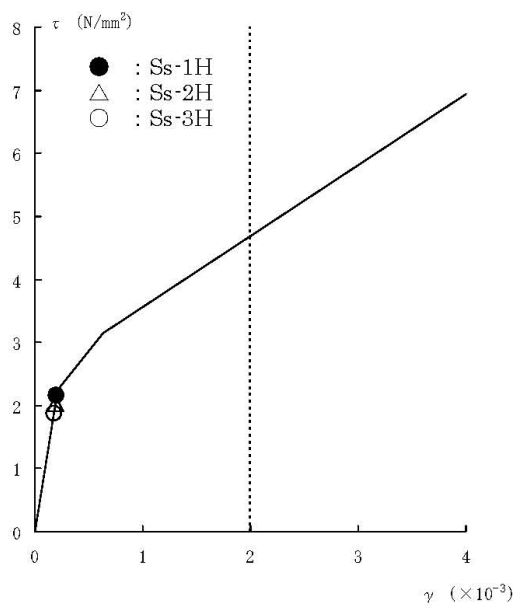


図-2.17 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 3F)

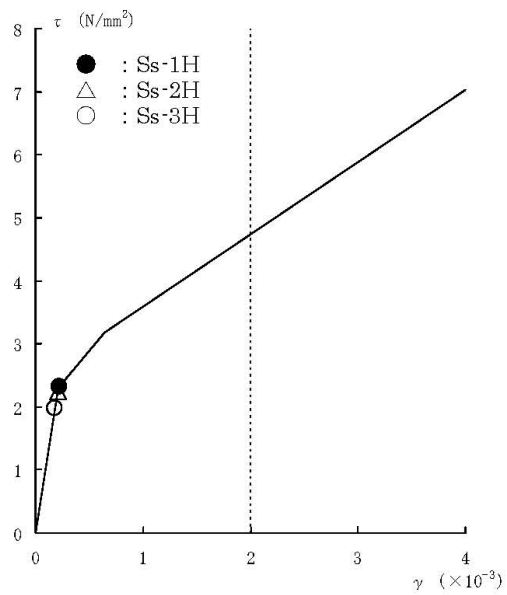


図-2.18 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 2F)

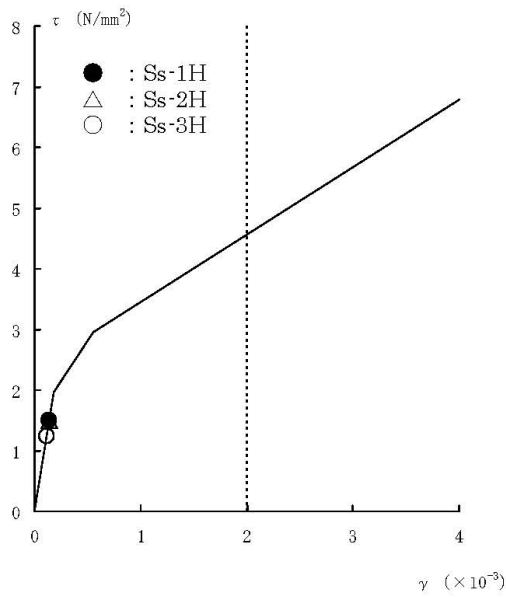


図-2.19 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, 1F)

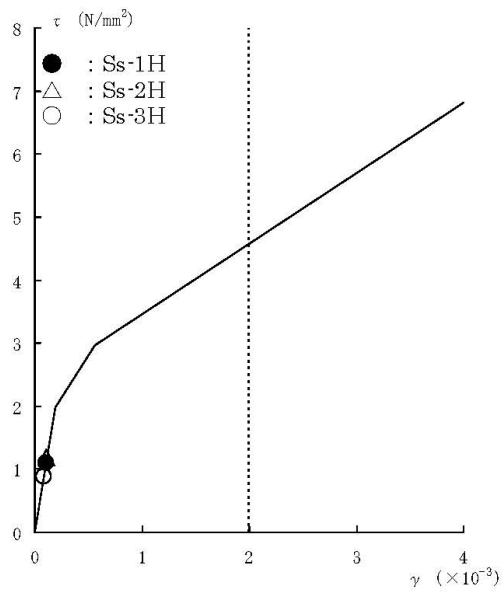


図-2.20 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, B1F)

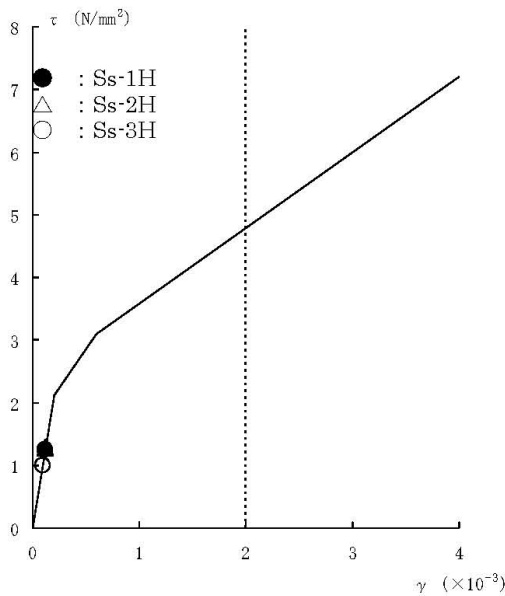


図-2.21 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向, B2F)

特定原子力施設監視・
評価検討会(第4回)
資料5-1
(第3回資料5-1を一部改定)

福島第一原子力発電所 1～4号機本館建物の基準地震動Ssに対する 耐震安全性評価について

平成25年2月21日
東京電力株式会社



無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

1. 1～4号機原子炉建屋の耐震安全性評価状況一覧
 2. 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価
 3. 1～4号機タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋の耐震安全性評価状況一覧
 4. コメント回答
- ・ 参考資料



無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

1. 1～4号機原子炉建屋の耐震安全性評価状況一覧

1. 1～4号機原子炉建屋の耐震安全性評価状況一覧

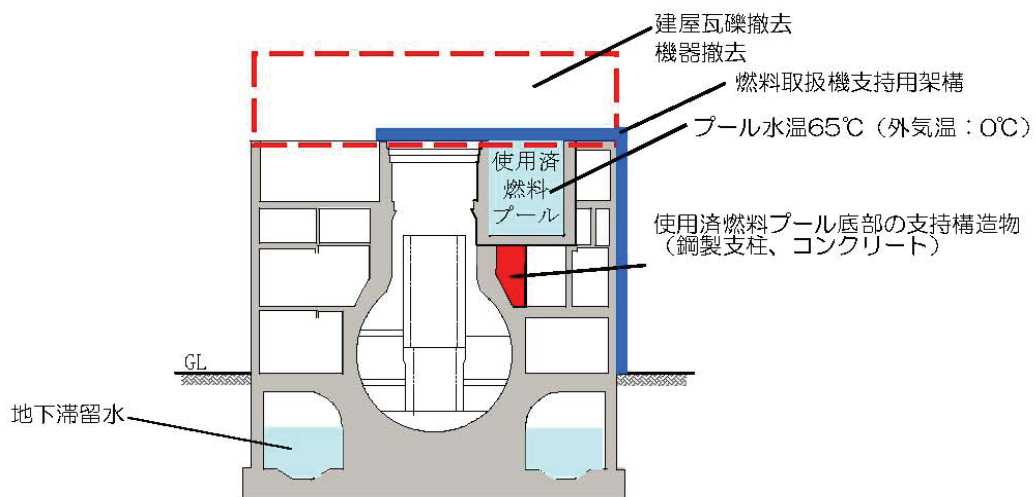
	1号機	2号機	3号機	4号機
(1) 評価対象	耐震壁	耐震壁	耐震壁	耐震壁
(2) 入力地震動	解放基盤表面で定義した基準地震動Ssを一次元波動論により評価			
(3) 建屋のモデル化				
①解析モデル	質点系・埋込みSRモデル			
②材料特性	コンクリート実強度 (35.0N/mm ²)を採用			
③剛性評価	耐震壁のせん断剛性、曲げ剛性を考慮			
④損傷状況	5階から上部の損傷	損傷無し	3階から上部の損傷	2階から上部の損傷
⑤地下滞留水	考慮	考慮	—*1	考慮
⑥瓦礫	存在状態	—	存在状態	撤去状態
⑦その他	建屋ガ-を考慮	—	燃料取出用ガ-を考慮	燃料取出用ガ-を考慮
(4) 地盤のモデル化				
①地盤ばね	底面ばね：水平および回転を考慮 側面ばね：水平および回転を考慮			
(5) 接地率*2 (最小ケース)	64.8%	76.8%	74.6%	84.3%
(6) 評価結果 (せん断ひずみ：最大ケース)	0.12×10 ⁻³ →OK 評価基準値：4.0×10 ⁻³	0.17×10 ⁻³ →OK 評価基準値：4.0×10 ⁻³	0.14×10 ⁻³ →OK 評価基準値：4.0×10 ⁻³	0.16×10 ⁻³ →OK 評価基準値：4.0×10 ⁻³
(7) 備考	—	—	3D-FEM解析による使用済燃料プール壁・床の詳細評価を実施	3D-FEM解析による使用済燃料プール壁・床の詳細評価を実施

*1 地下滞留水を考慮した条件で、今後評価を実施予定。

*2 2～4号機については、基礎浮上り非線形を考慮した地震応答解析の適用条件とされている「接地率65%以上」を満足している。1号機については、誘発上下動を考慮した地震応答解析を実施し考慮の有無が応答結果に与える影響は小さく問題ないことを確認している。

2. 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価

2. 1 使用済燃料プールの取り出し時における原子炉建屋の状況

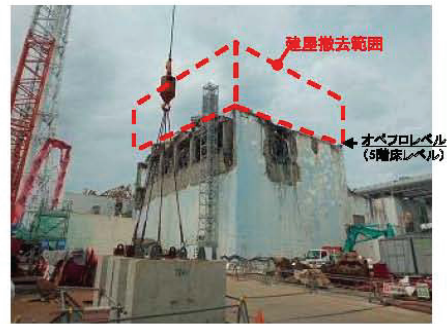


使用済燃料の取り出し時における原子炉建屋の状況

2. 1 使用済燃料プールの取り出し時における原子炉建屋の状況



建屋瓦礫 撤去工事 着手前 [南西面]
撮影日：平成 23年 9月22日



建屋瓦礫 撤去工事 完了後 [南西面]
撮影日：平成 24年 7月 5日

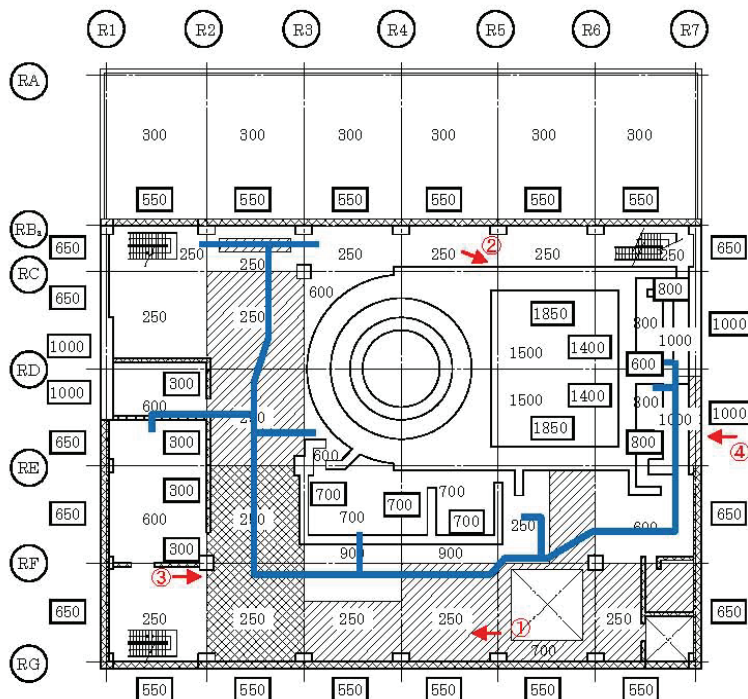


オペフロ上部の機器 [西面]
撮影日：平成 24年 7月 9日



機器の撤去作業 [西面]
撮影日：平成 24年 8月10日

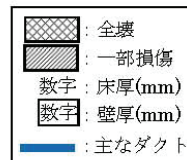
2. 2 原子炉建屋躯体の損傷状況（3階）



・床の損傷箇所については、水素爆発の発生箇所と考えられるダクトルート付近で確認されている

・R6-R7間、RC-RF間の床については損傷した床の床厚250mmに対して床厚600mm以上あり、上下階の壁によって面外方向の変形を抑制されているため、ダクトルート上にありながら損傷を免れたものと考えられる

・壁の損傷箇所については、壁厚650mm以下の壁で損傷が激しく、壁厚650mmを超える壁は損傷が少ない



2. 3 原子炉建屋躯体の損傷状況（3階写真）



①床変形



②プール壁異常なし

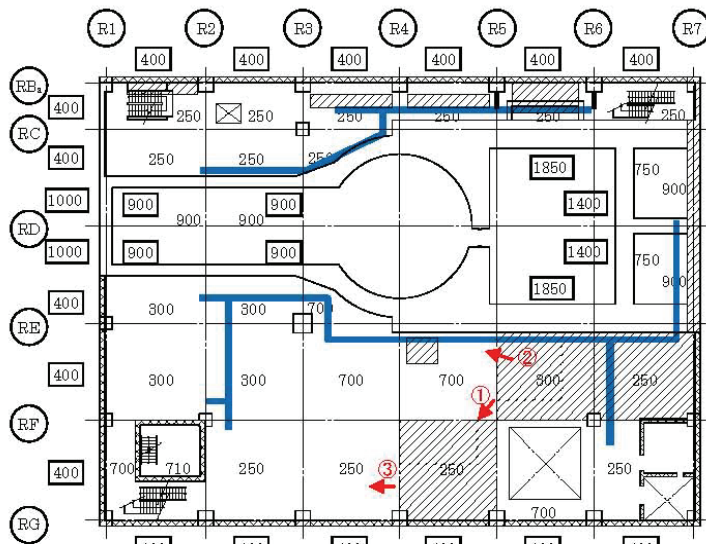


③床崩壊



④外壁一部剥落

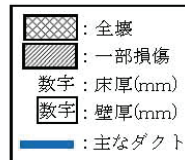
2. 3 原子炉建屋躯体の損傷状況（4階）



・床の損傷箇所については、大物搬入口、EVシャフトおよび階段開口といった圧力の逃げ道がある箇所や、床厚700mmの箇所は損傷を免れていると考えられる

・壁の損傷箇所については、壁厚400mmの壁で損傷が激しく、壁厚400mmを超える壁は損傷が少ない

・床よりも壁の損傷が激しい傾向が見られるのは、床は間仕切り壁等で面外方向の変形を拘束されているのに対し、壁は拘束するものがないためと考えられる



2. 3 原子炉建屋躯体の損傷状況（4階写真）



①床変形



②プール壁異常なし

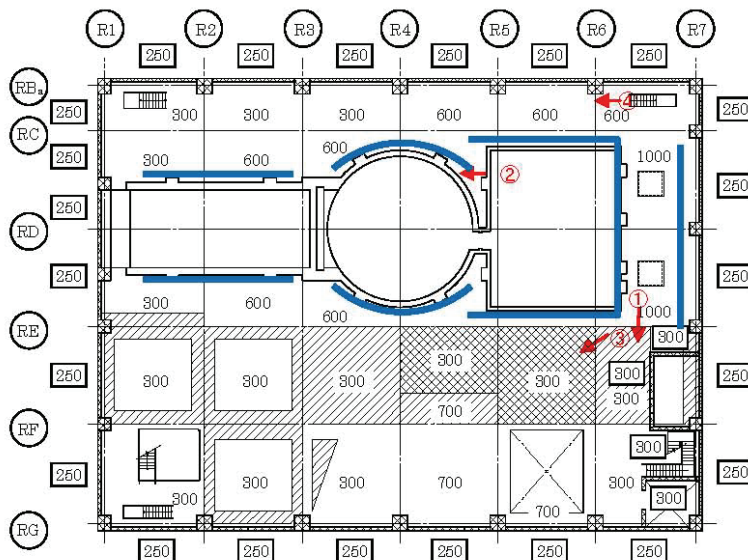


③床異常なし



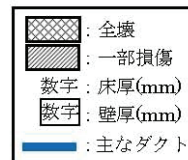
④外壁一部剥落

2. 3 原子炉建屋躯体の損傷状況（5階）



・床の損傷箇所については、水素爆発の発生箇所と考えられる下階のダクトの影響を受けており、大物搬入口、EVシャフトおよび階段開口といった圧力の逃げ道がある箇所や、床厚700mmの箇所は損傷を免れていると考えられる

・床よりも壁の損傷が激しい傾向が見られるのは、床は間仕切り壁等で面外方向の変形を拘束されているのに対し、壁は拘束するものがないためと考えられる

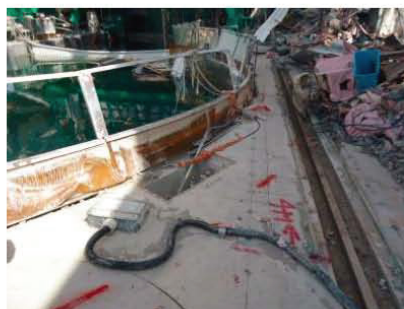


O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

2. 3 原子炉建屋躯体の損傷状況（5階写真）



①床変形



②シェル壁異常なし

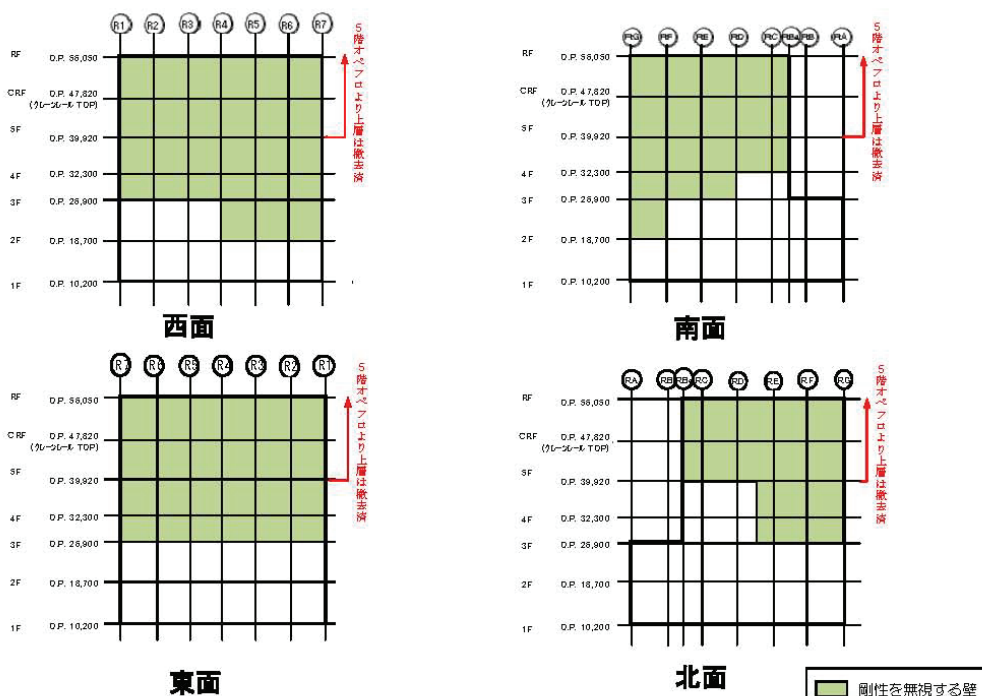


③床崩壊



④床異常なし

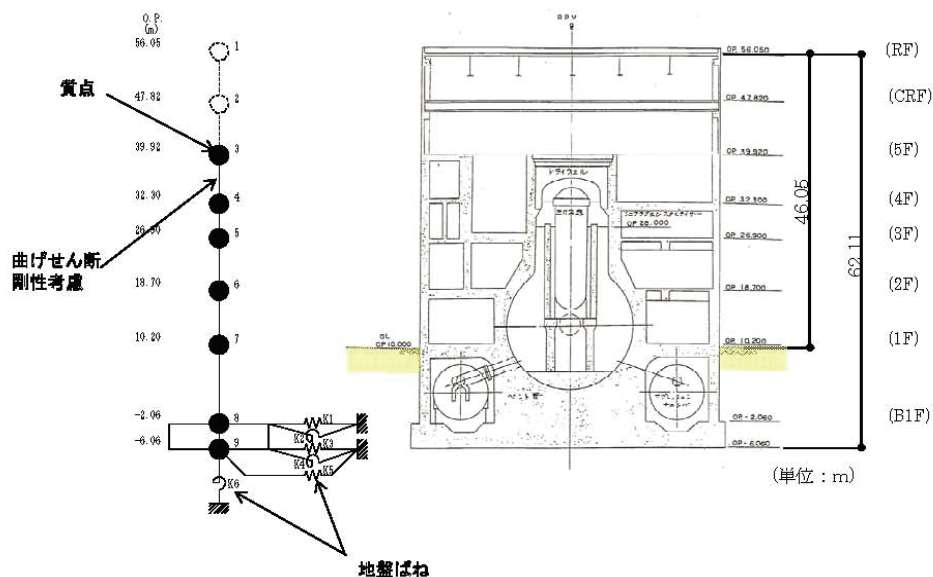
2. 4 原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



損傷状況の反映

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

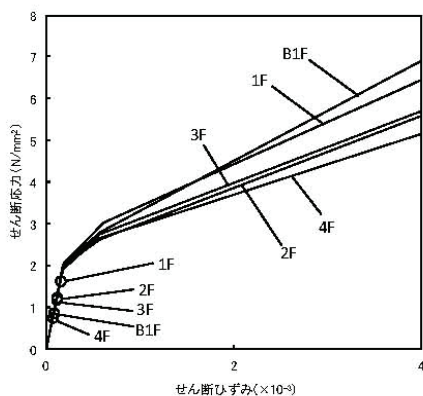
2. 4 原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



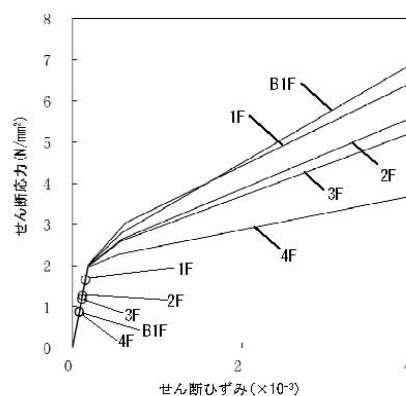
解析モデル

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

2. 4 原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



せん断スケルトン曲線上の最大応答値
 (Ss-1、EW方向)



【参考】平成22年耐震バックチェック*時における
 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
 (Ss-1、EW方向)

* 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 中間報告書（改訂2）」（平成22年4月、東京電力株式会社）

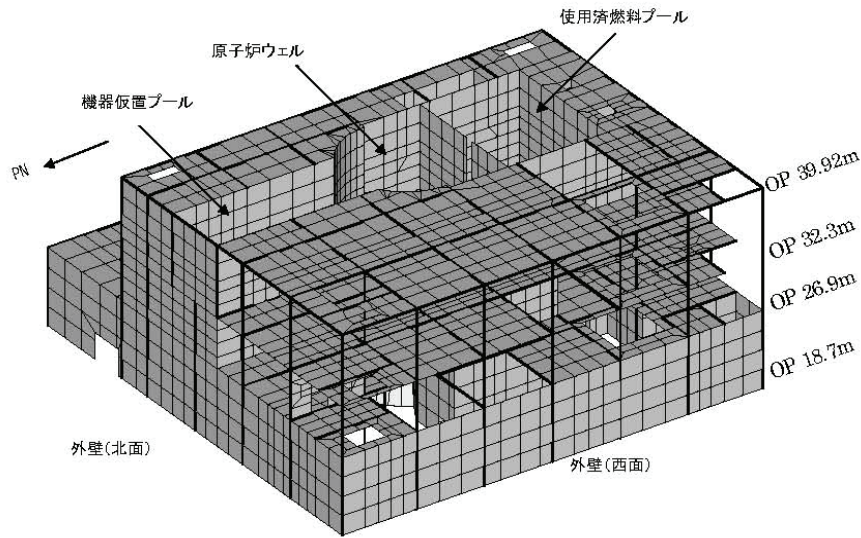
耐震壁の最大応答せん断ひずみは、最大で 0.16×10^{-3} であり、評価基準値（ 4.0×10^{-3} ）を満たすことを確認した。



無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

2. 5 使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）



解析モデル図

2. 5 使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

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	発生ひずみ ($\times 10^{-6}$) ε	評価基準値 ($\times 10^{-6}$) ε'	検定比 ε/ε'	判定
W1	ε_c	-150	-3000	$0.05 \leq 1$	可
	ε_s	-90	-5000	$0.02 \leq 1$	可
	ε_t	1180	5000	$0.24 \leq 1$	可

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	発生ひずみ ($\times 10^{-6}$) ε	評価基準値 ($\times 10^{-6}$) ε'	検定比 ε/ε'	判定
S1	ε_c	-370	-3000	$0.13 \leq 1$	可
	ε_s	-140	-5000	$0.03 \leq 1$	可
	ε_t	250	5000	$0.05 \leq 1$	可

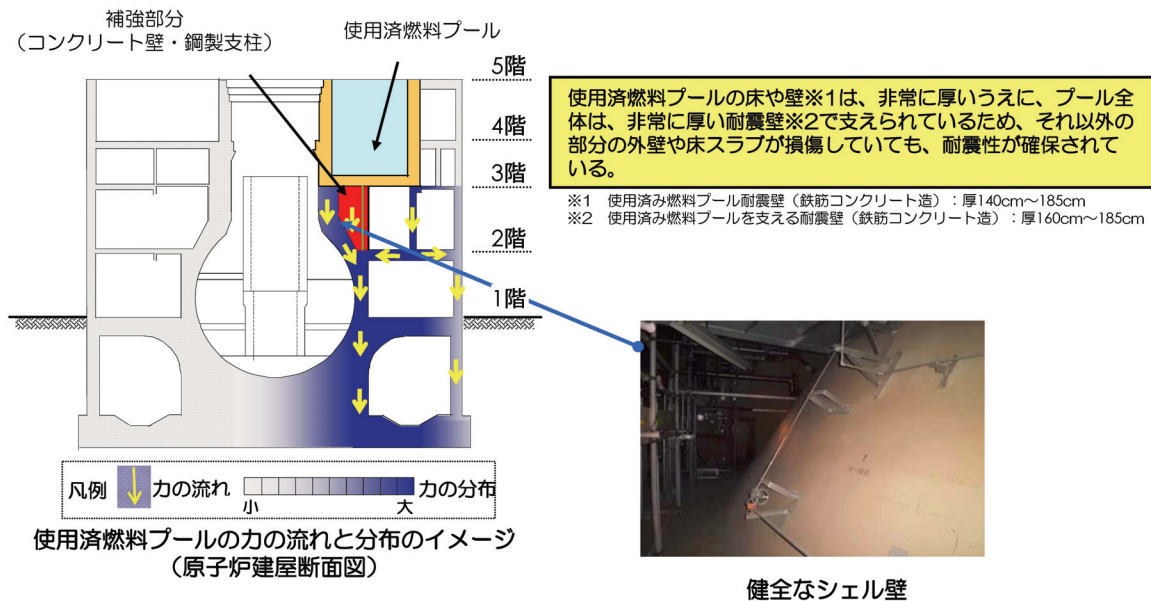
面外せん断力の検討結果（壁部）

箇所名	発生応力 Q (N/mm)	評価基準値 Q' (N/mm)	検定比 Q/Q'	判定
W2	1120	1860	$0.61 \leq 1$	可

面外せん断力の検討結果（床部）

箇所名	発生応力 Q (N/mm)	評価基準値 Q' (N/mm)	検定比 Q/Q'	判定
S2	580	1270	$0.46 \leq 1$	可

2. 5 使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）



3. 1～4号機タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋の耐震安全性評価状況一覧

3. 1～4号機タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋の耐震安全性評価状況一覧

1～4号機タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋について、地下階に滞留水（汚染水）があることを考慮し、基準地震動Ssに対し、地下外壁が崩壊しないことを確認する。

なお、主に原子炉建屋の水素爆発により飛来した瓦礫による屋根部や鋼製部材の一部に開口、RC部にひび割れが有るものの、上層階であり、耐震要素であるRCの耐震壁に大きな損傷は確認されていないことから、解析上は考慮しない。

	3号機タービン建屋 (代表号機※1)	3号機コントロール建屋 (代表号機※1)	4号機廃棄物処理建屋 (代表号機※1)
(1) 評価対象	地下外壁 (RC)	地下外壁 (RC)	地下外壁 (RC)
(2) 入力地震動	解放基盤表面で定義した基準地震動Ssを一次元波動論により評価		
(3) 建屋のモデル化			
①解析モデル	質点系、SRモデル		
②材料特性	コンクリート実強度 (35.0N/mm ²) を採用		
③剛性評価	耐震壁を評価		
④地下滞留水	考慮	考慮	考慮
(4) 地盤のモデル化			
①底面ばね	水平および回転を考慮		
(5) 接地率 ^{※2} (最小ケース)	100%	72.3%	92.3%
(6) 評価結果 (せん断ひずみ：最大ケース)	0.15×10 ⁻³ →OK 評価基準値：4.0×10 ⁻³	0.07×10 ⁻³ →OK 評価基準値：4.0×10 ⁻³	0.06×10 ⁻³ →OK 評価基準値：4.0×10 ⁻³

※1：代表号機以外については、今後、代表号機の評価結果を踏まえ、建屋の類似性等を考慮して、評価を実施する。

※2：いずれも、基礎浮上り非線形を考慮した地震応答解析の適用条件とされている「接地率65%以上」を満足している。

⇒ 基準地震動Ssに対し、地下外壁の耐震安全性は確保されており、滞留水の貯留に問題ない。

4. コメント回答

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

コメント回答①

①コンクリートの実強度の適用性について。

鉄筋コンクリートの物性値

コンクリート	強度*1 Fc (N/mm ²)	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*2 γ (kN/m ³)
	35.0	2.57×10 ⁴	1.07×10 ⁴	0.2	24
鉄筋	SD345相当 (SD35)				

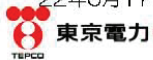
圧縮強度試験データ分析結果

設計基準強度	22.1	N/mm ²
試験体数	373	本
平均圧縮強度	37.4	N/mm ²
解析採用値	35.0	N/mm ²

*1：RC造部の剛性を評価する際に用いるコンクリート強度は、過去に原子力発電所内で実施された高経年化技術評価、コンクリート健全性評価及び建築設備点検等における圧縮強度試験結果から推定した実強度として、圧縮強度のばらつきを考慮し、平均値をやや下回る値を採用した。

*2：鉄筋コンクリートの値を示す。

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部耐震・構造設計小委員会構造WG（第25回）Aサブグループ会合（平成22年6月17日）資料『福島第一原子力発電所3号機安全上重要な建物・構築物及び機器・配管系の耐震安全性評価』より



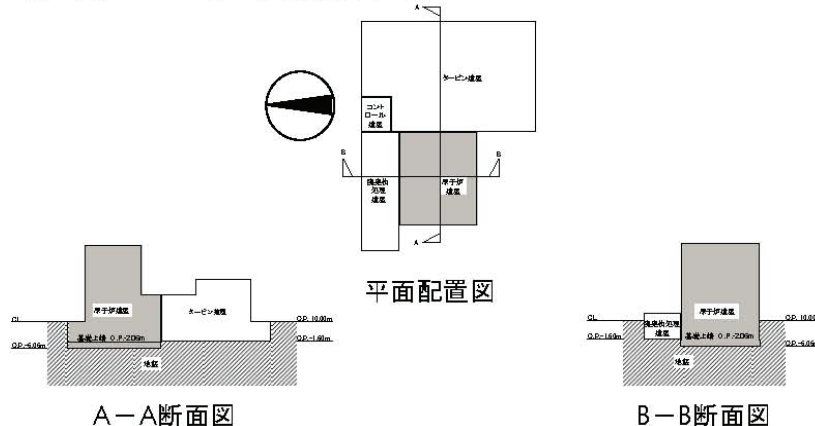
コメント回答②

②地盤による埋め込み効果の適用性について。

JEAC4601-2008では、地下部分の大部分（3面または面積で75%以上）が周辺地盤と接している場合には全面埋め込みと同様な埋め込み効果が期待できるものとしている。

1～4号機原子炉建屋周辺には隣接建屋があるが、基礎板側面については3面以上が周辺地盤と接しており、埋め込み効果が期待できるものとして、NOVAKの方法による側面ばねを考慮している。なお、タービン建屋・コントロール建屋・廃棄物処理建屋については、埋め込み効果は考慮していない。

原子炉建屋の周辺状況について、4号機を例示する。



4号機原子炉建屋（1F4-R/B）周辺状況



コメント回答③

③地下部に滞留水を貯留する建屋において、滞留水に含まれる塩化物による建屋の構造強度及び耐震性の低下のリスクについて

●現状評価

津波による浸水を受けた建屋（キャスク保管建屋）の鉄筋が、腐食による断面欠損を生じていないことを確認した。

また、淡水化装置により、地下滞留水の塩素イオン濃度が低下しており、平成25年度上半期には、全域で水道水の基準値200ppm以下になると推定した。

●今後の対策

今後、地下滞留水の塩素イオン濃度を継続的に確認すると共に、作業安全性が確保された時点で目視点検を実施する。

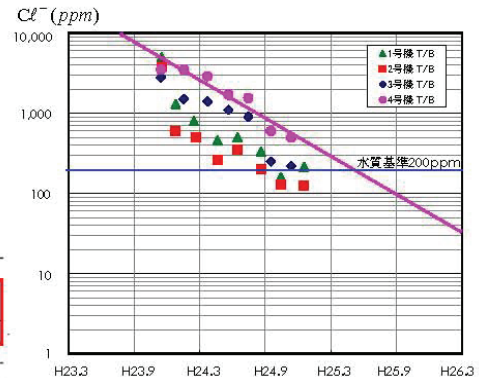
キャスク保管建屋鉄筋劣化評価結果(H24.8)

試験体	採取箇所	かぶり厚さ	鉄筋径	腐食グレード
N0.1	1階南東エリア	60mm	D13	II
N0.2	1階南西エリア(1)	60mm	D13	I
N0.3	1階南西エリア(2)	50mm	D13	I

解説 表10.3.3 腐食のグレードと鋼材の状態

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損が生じている。

出展：2007年 コンクリート標準示方書 維持管理編（土木学会）



タービン建屋地下滞留水塩素イオン濃度経時変化

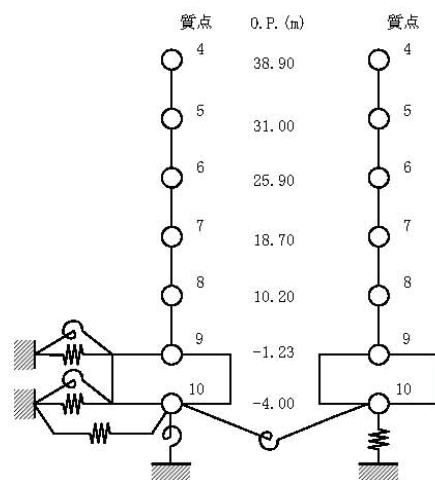
【参考資料】

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考1 1号機原子炉建屋 誘発上下動を考慮した影響検討

1号機原子炉建屋の地下滞留水を考慮した耐震安全性評価において、基準地震動Ssを用いた地震応答解析による検討を行った結果、NS方向のSs-2を用いた場合に、接地率は64.8%であり、「JEAC-4601-2008」に記載される基礎浮上がり非線形の評価式の適用範囲65%を下回った。

図に示す誘発上下動を考慮した解析モデルを用いて地震応答解析を行い、誘発上下動を無視した場合の応答値との比較を行う。



誘発上下動を考慮した解析モデル

参考1 1号機原子炉建屋 誘発上下動を考慮した影響検討

誘発上下動の有無による接地率及び耐震壁に生じるB1Fの最大応答せん断ひずみの比較を下表に示す。

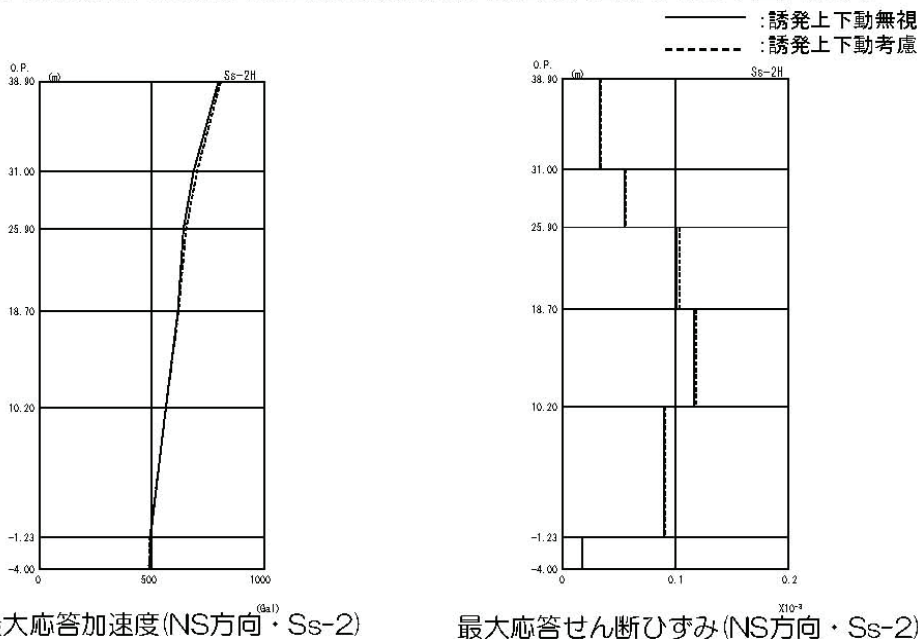
接地率及びB1Fの最大応答せん断ひずみ

地震波	方向	誘発上下動の有無	接地率	B1F 最大応答 せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)
Ss-2H	NS	無視	64.8%	0.09
		考慮	65.6%	0.09

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考1 1号機原子炉建屋 誘発上下動を考慮した影響検討

誘発上下動の有無による最大応答加速度及び最大応答せん断ひずみを下図に示す。



⇒ 結果より誘発上下動の有無が、最大応答値に与える影響は小さい。

参考2 4号機原子炉建屋耐震安全性評価結果の概要

○原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

- ・4号機原子炉建屋について、使用済燃料取り出し時の状況を質点重量に反映するとともに、損傷状況の調査において損傷が確認された箇所および平成24年6月報告書*1において外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視したモデルを作成し、基準地震動 S_s に対する地震応答解析を実施。
- ・解析の結果、耐震壁に発生するせん断ひずみは評価基準値を大きく下回っていることから、原子炉建屋は十分な耐震安全性を有しているものと評価した。

○使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

- ・使用済燃料プールについて、使用済燃料取り出し時の状況における重量変化および使用済燃料プール底部の支持構造物等を反映するとともに、損傷状況の調査において損傷が確認された箇所および平成24年6月報告書*1において外壁の一部膨らみが確認された箇所の剛性を無視したモデルを作成し、基準地震動 S_s に対する応力解析を実施。
- ・解析の結果、使用済燃料プールにおける鉄筋のひずみ、面外せん断力は評価基準値に対して十分余裕があることから、使用済燃料プールは十分な耐震安全性を有しているものと評価した。

*1「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)

参考2 4号機原子炉建屋耐震安全性評価結果の概要

福島第一原子力発電所第4号機原子炉建屋において、燃料取り出し用カバーの設計および瓦礫撤去の進捗に伴い、使用済燃料の取り出し時における建屋の状況および躯体の損傷状況が明らかになってきた。



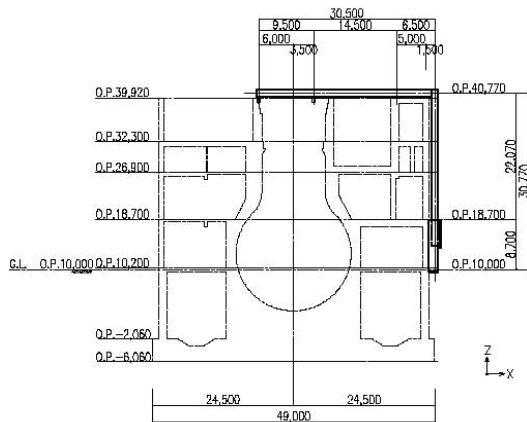
平成23年5月28日に報告した「福島第一原子力発電所の原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討に係る報告書（その1）」（東京電力株式会社）（以下、平成23年報告書という）から、状況の変化を反映し、使用済燃料の取り出し時を想定した4号機原子炉建屋および使用済燃料プールの耐震安全性に関する検討を実施した。

参考3 4号機使用済燃料プールの取り出し時における原子炉建屋の状況

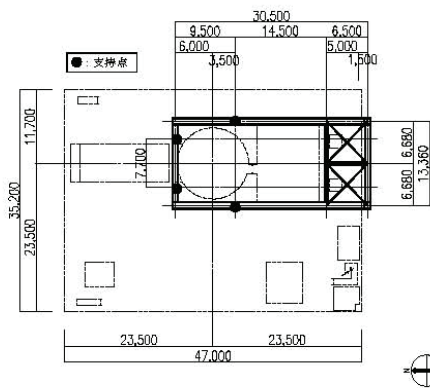
No	考慮した項目	内容
①	オペフロ上部の瓦礫撤去	R階およびCR階から崩落した瓦礫を撤去
②	オペフロからの機器撤去	オペフロ上から機器を撤去
③	燃料取扱機支持用架構の設置	燃料取扱機支持用架構を設置
④	雨水浸入対策のための構造物の設置	燃料取り出し用カバーで覆われない範囲に雨水浸入対策のための構造物を設置
⑤	使用済燃料プール底部の支持構造物	使用済燃料プール底部の支持構造物（鋼製支柱、コンクリート）を設置
⑥	ヤード整備の実施	ヤード整備のため、西側下屋上に1m程度の覆土を実施
⑦	地下滞留水の考慮	B1階からMB1階までに滞留した水の存在を考慮
⑧	使用済燃料プールの循環冷却の開始	使用済燃料プールの循環冷却の開始により水温が低下（管理温度65℃）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考3 4号機使用済燃料プールの取り出し時における原子炉建屋の状況



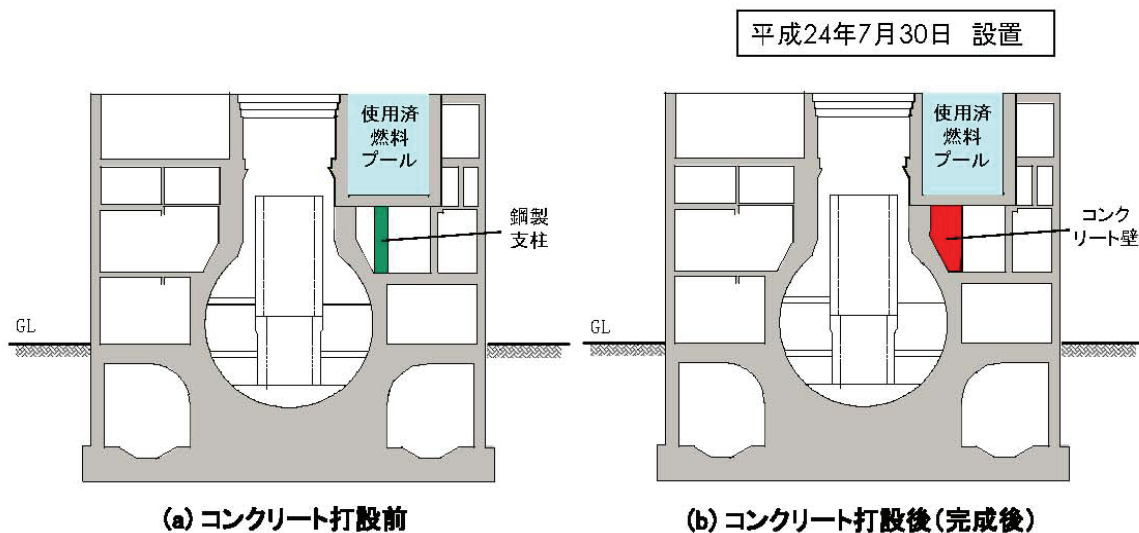
燃料取扱機支持用架構
南北断面図



(単位:mm)

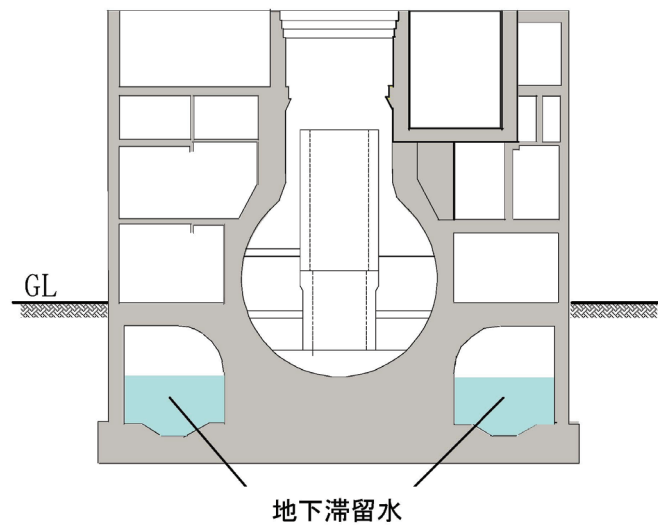
燃料取扱機支持用架構
梁伏図(O.P.41,420)

参考3 4号機使用済燃料プールの取り出し時における原子炉建屋の状況



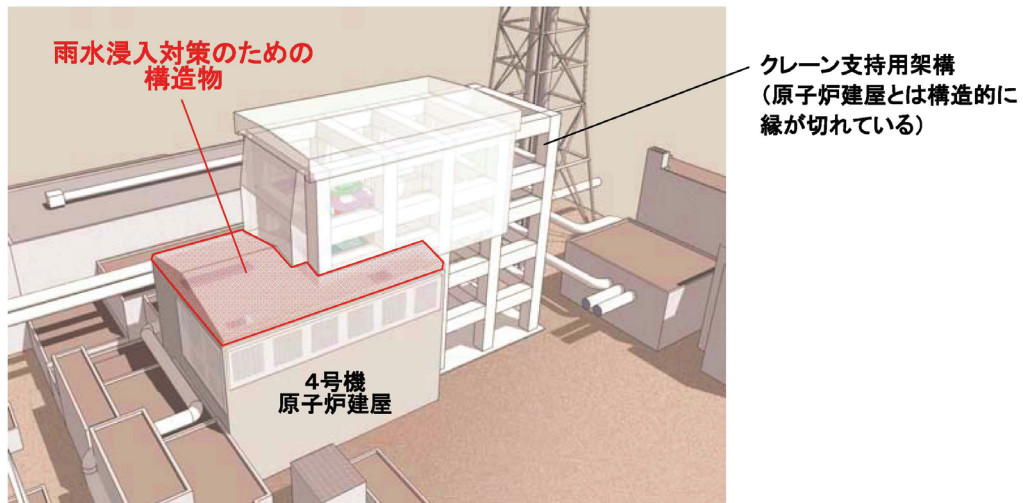
使用済燃料プール底部の支持構造物のイメージ(南北断面図)

参考3 4号機使用済燃料プールの取り出し時における原子炉建屋の状況



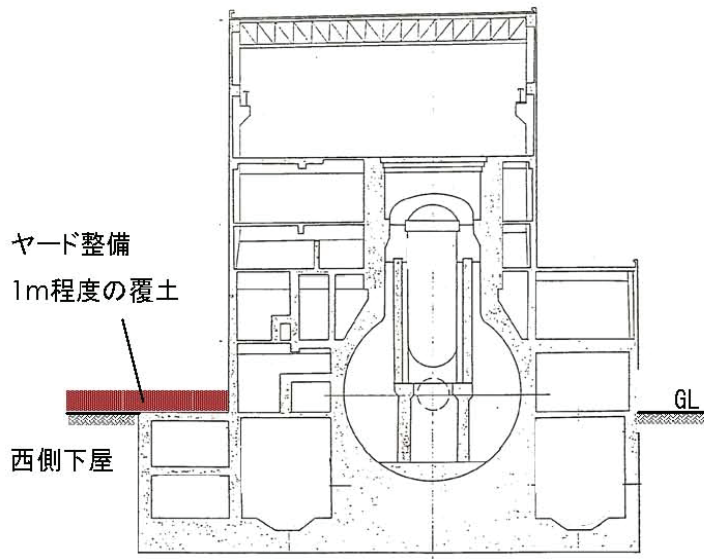
地下滞留水のイメージ(南北断面図)

参考3 4号機使用済燃料プールの取り出し時における原子炉建屋の状況



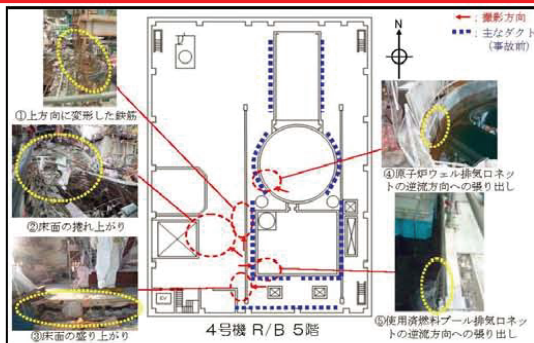
雨水浸入対策のための構造物のイメージ

参考3 4号機使用済燃料プールの取り出し時における原子炉建屋の状況

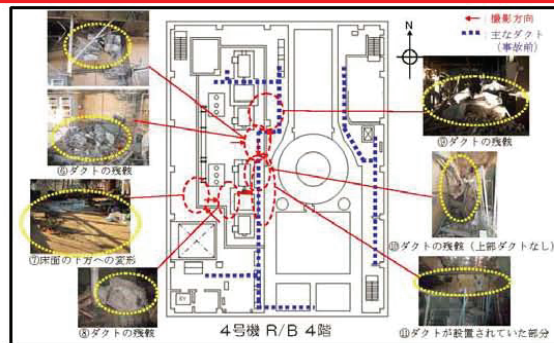


ヤード整備のイメージ(東西断面図)

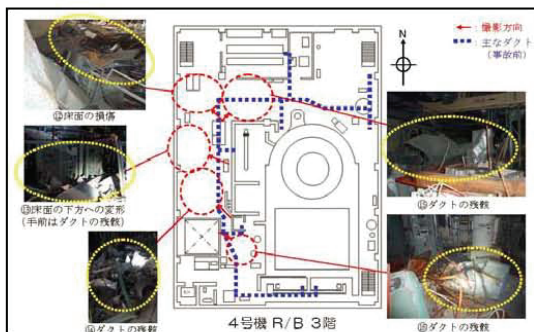
参考4 4号機原子炉建屋躯体の損傷状況



5階



4階

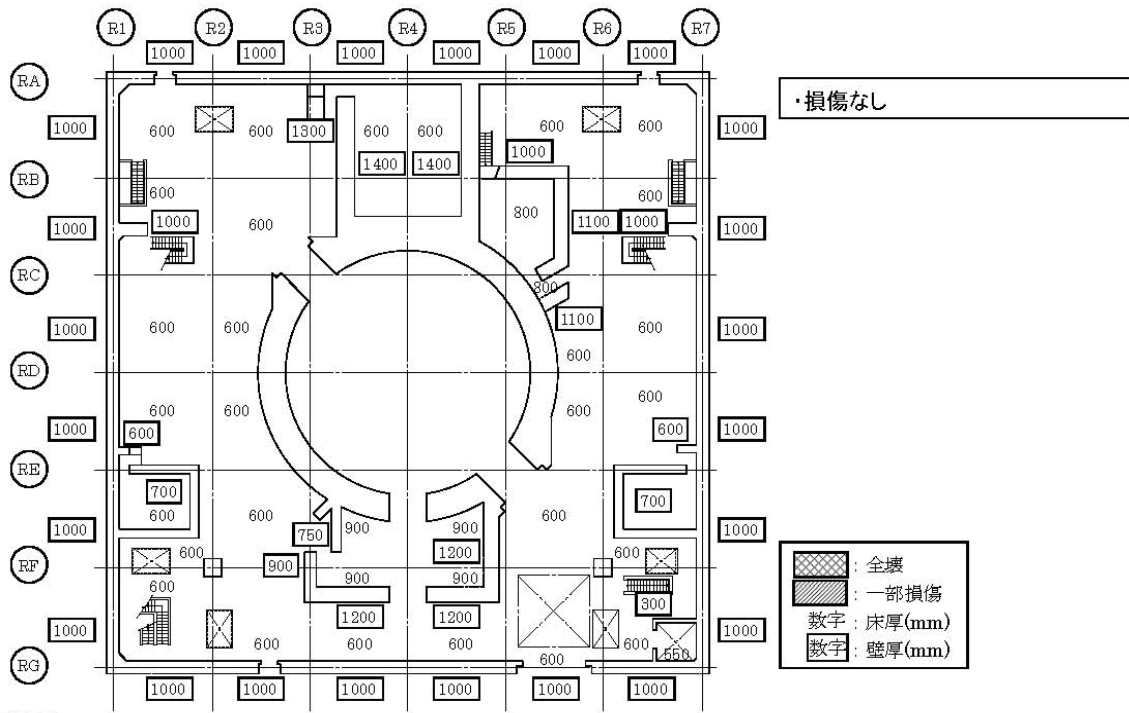


3階

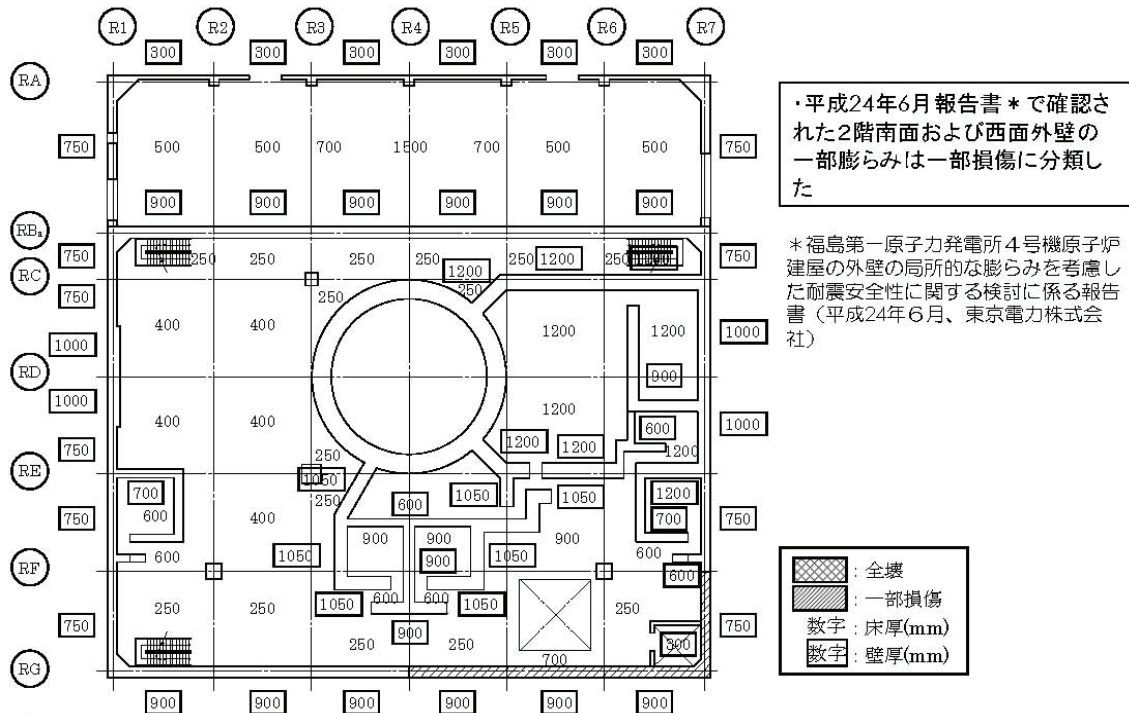
建屋内の損傷状況に関する調査結果
(3~5階)

事故調査報告書(平成24年6月、東京電力株式会社)より

参考4 4号機原子炉建屋躯体の損傷状況（1階）



参考4 4号機原子炉建屋躯体の損傷状況（2階）

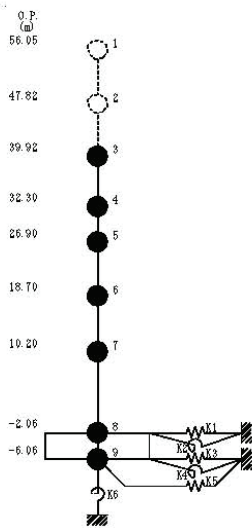


・平成24年6月報告書*で確認された2階南面および西面外壁の一部膨らみは一部損傷に分類した

*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）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

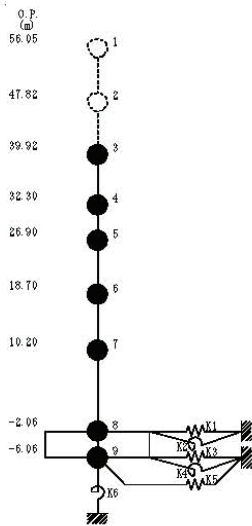
参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



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 (m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	69,940	128.73	—	—
4	87,140	160.44	147.1	10,080
5	127,760	235.14	102.2	14,387
6	129,030	237.57	202.7	32,567
7	218,480	402.18	175.4	46,774
8	353,740	707.83	460.4	114,194
9	132,390	264.88	2,812.6	562,754
合計	1,118,480	ヤング係数 E_c せん断弾性係数 G ポアソン比 ν 減衰 h 基礎形状	2.57×10^7 (kN/m ²) 1.07×10^7 (kN/m ²) 0.20 5% 49.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)	

建屋モデル（NS方向）

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

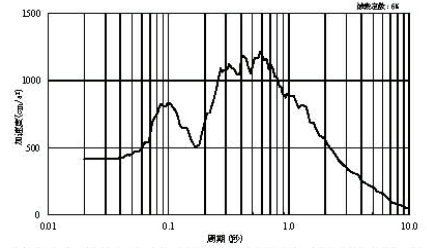
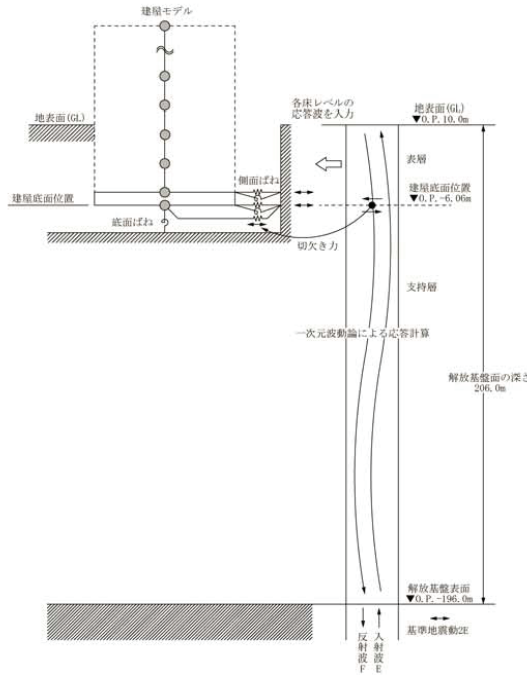


質点番号	質点重量 W (kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_s (\text{m}^2)$	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	69,940	72.20	—	—
4	87,140	89.98	73.0	5,928
5	127,760	235.14	98.3	6,182
6	129,030	237.57	161.6	23,344
7	218,480	599.92	166.4	46,303
8	353,740	1021.56	424.5	136,323
9	132,390	346.27	2,812.6	772,237
合計	1,118,480	ヤング係数 E_c せん断弾性係数 G ポアソン比 ν 減衰 h 基礎形状	2.57×10^7 (kN/m ²) 1.07×10^7 (kN/m ²) 0.20 5% 49.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)	

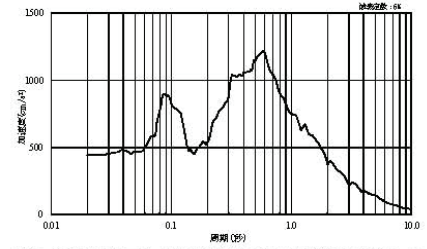
建屋モデル（EW方向）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



建屋基礎底面への入力地震動の応答スペクトル
 (Ss-1、基礎底面E+F)



建屋基礎底面への入力地震動の応答スペクトル
 (Ss-2、基礎底面E+F)

地震応答解析の概要

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

固有値解析結果（Ss-1、NS方向）

モード 次数	1	2	3
固有振動数 (Hz)	2.67	5.71	13.90
固有周期 (s)	0.374	0.175	0.072
固有モード	<p>FREQ = 2.67 (Hz) PERIOD = 0.374 (sec) DMPFRQ = 0.402 (1/s) BETA = 1.470</p>	<p>FREQ = 5.71 (Hz) PERIOD = 0.173 (sec) DMPFRQ = 0.303 (1/s) BETA = 0.541</p>	<p>FREQ = 13.90 (Hz) PERIOD = 0.072 (sec) DMPFRQ = 4.372 (1/s) BETA = 0.067</p>

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

固有値解析結果（Ss-1、EW方向）

モード 次数	1	2	3
固有振動数 (Hz)	2.75	5.76	11.97
固有周期 (s)	0.363	0.174	0.084
固有モード			

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

固有値解析結果（Ss-2、NS方向）

モード 次数	1	2	3
固有振動数 (Hz)	2.72	5.80	13.94
固有周期 (s)	0.368	0.172	0.072
固有モード			

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

固有値解析結果（Ss-2、EW方向）

モード 次数	1	2	3
固有振動数 (Hz)	2.80	5.85	12.03
固有周期 (s)	0.358	0.171	0.083
固有モード			

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

地盤定数（Ss-1）

標高 O.P. (m)	地質	S波速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γt (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (kN/m ²)	剛性低下後 S波速度 Vs (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	—

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

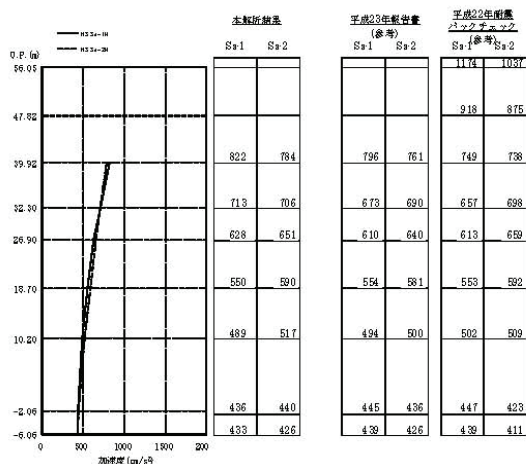
参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

地盤定数（S s-2）

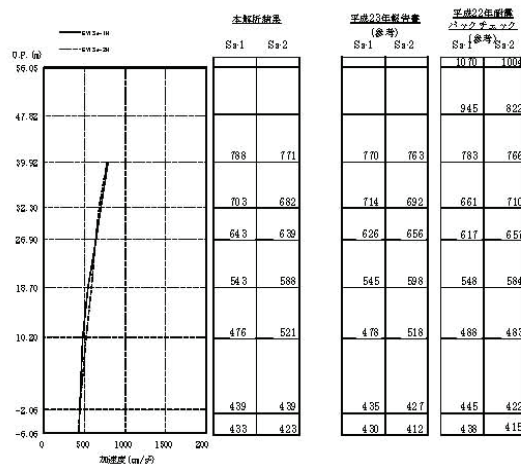
標高 O.P. (m)	地質	S波速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γt (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期せん断 弾性係数 G ₀ (kN/m ²)	剛性低下率 G/G ₀	せん断弾性 係数 G (kN/m ²)	剛性低下後 S波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h (%)
10.0	砂岩								
1.9		380	17.8	0.473	262,000	0.85	223,000	351	3
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	341,000	0.81	276,000	405	3
-80.0		500	17.1	0.455	436,000		353,000	450	
-108.0		560	17.6	0.446	563,000		456,000	504	
-196.0		600	17.8	0.442	653,000		529,000	540	
	解放基盤	700	18.5	0.421	924,000	1.00	924,000	700	—

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

NS方向



EW方向



最大応答加速度（水平方向）

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）

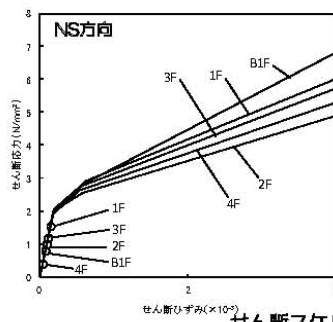
耐震壁の最大応答せん断ひずみ一覧（最大応答せん断ひずみ、NS方向）
($\times 10^{-3}$)

階	本検討		平成22年耐震 バックチェック		評価 基準値
	Ss-1	Ss-2	Ss-1	Ss-2	
CRF	-	-	0.10	0.09	4.0
5F	-	-	0.17	0.15	
4F	0.04	0.04	0.05	0.05	
3F	0.11	0.11	0.08	0.08	
2F	0.10	0.10	0.09	0.09	
1F	0.15	0.15	0.15	0.16	
B1F	0.08	0.08	0.08	0.08	

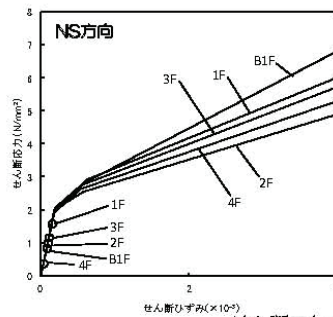
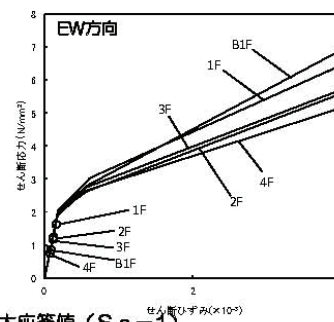
耐震壁の最大応答せん断ひずみ一覧（最大応答せん断ひずみ、EW方向）
($\times 10^{-3}$)

階	本検討		平成22年耐震 バックチェック		評価 基準値
	Ss-1	Ss-2	Ss-1	Ss-2	
CRF	-	-	0.12	0.12	4.0
5F	-	-	0.30	0.20	
4F	0.08	0.07	0.08	0.08	
3F	0.12	0.11	0.11	0.11	
2F	0.12	0.12	0.12	0.12	
1F	0.16	0.16	0.16	0.17	
B1F	0.09	0.09	0.08	0.09	

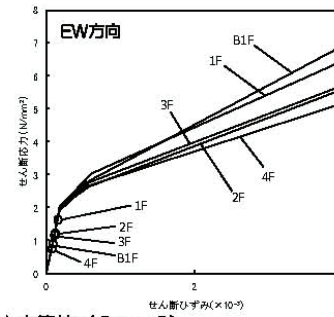
参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



せん断スケルトン曲線の最大応答値 (Ss-1)

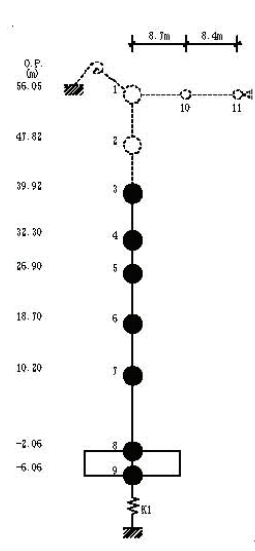


せん断スケルトン曲線の最大応答値 (Ss-2)



O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

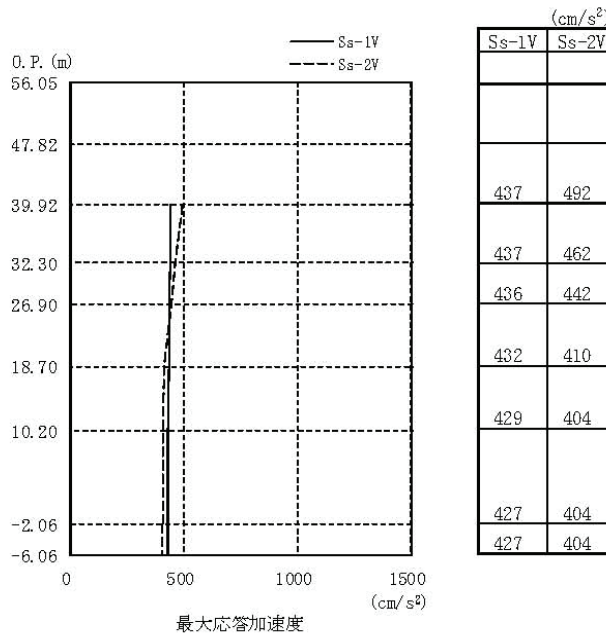
参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



質点番号	質点重量 W (kN)	軸断面積 A_N (m ²)	軸ばね剛性 K_A ($\times 10^8$ kN/m)
1	—	—	—
2	—	—	—
3	69,940	204.5	6.90
4	87,140	210.7	10.03
5	127,760	354.5	11.11
6	129,030	340.6	10.30
7	218,480	654.7	13.72
8	353,740	2,812.6	180.71
9	132,390	—	—
合計	1,118,480	ヤング係数 E_c せん断弾性係数 G ポアソン比 ν 減衰 δ 基礎形状	2.57×10^7 (kN/m ²) 1.07×10^7 (kN/m ²) 0.20 5% 49.0m (NS方向) \times 57.4m (EW方向)

建屋モデル（鉛直方向）

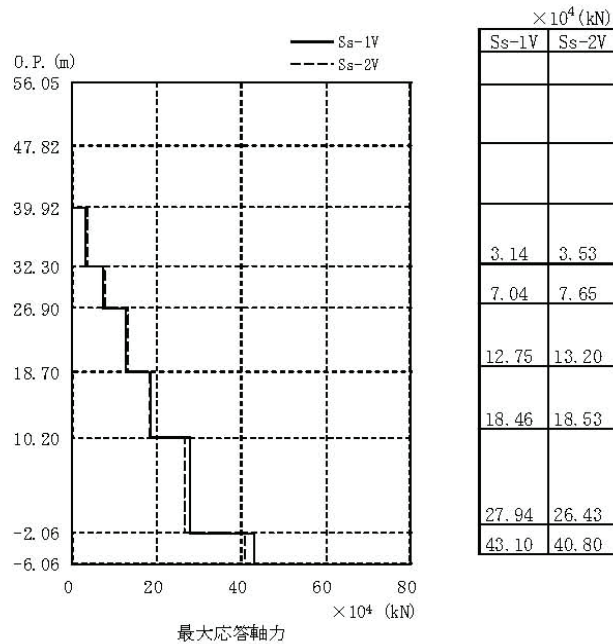
参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



最大応答加速度（鉛直方向）

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考5 4号機原子炉建屋の耐震安全性評価（質点系モデルによる解析）



最大応答加速度（鉛直方向）

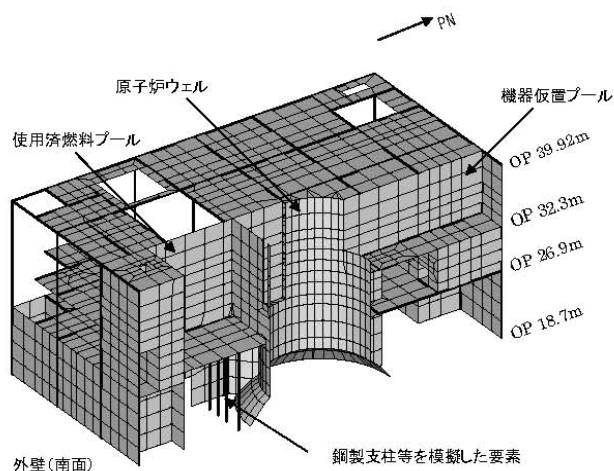
参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

解析条件

項目		内容
モデル	壁 (プール・シェル含む)	全壊・一部損傷の壁の剛性を0%とする
	床 (プール含む)	全壊・一部損傷の床の剛性を0%とする
	補強効果	使用済燃料プール底部の支持構造物の鋼製支柱を模擬
荷重	死荷重	オペフロ上部瓦礫撤去、燃料取扱機支持用架構荷重等を反映
	静水圧	使用済燃料プール、原子炉ウェル、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
	温度荷重	一律内部65℃、外部0℃、炉内40℃
	地震荷重	損傷を考慮した質点系モデルによる基準地震動Ssに対する地震応答解析結果に基づき、水平および鉛直方向の地震荷重を考慮
	その他の荷重	地震時動水圧
燃料取扱機支持用架構反力		燃料取扱機支持用架構の反力を考慮する

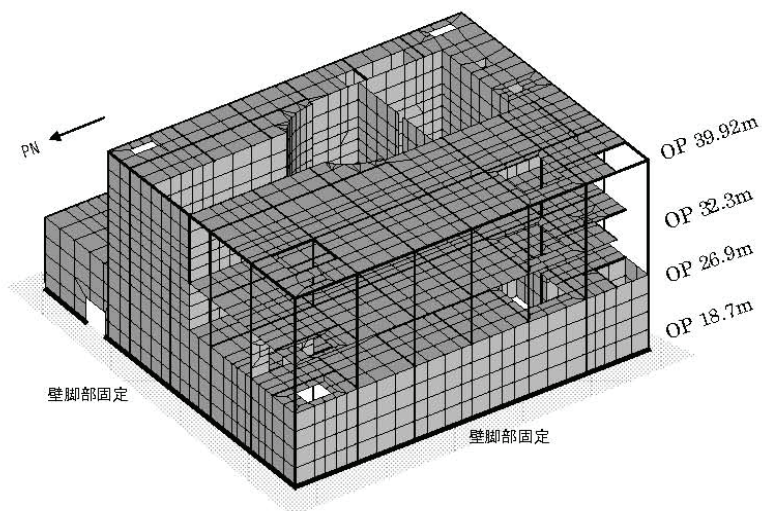
O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）



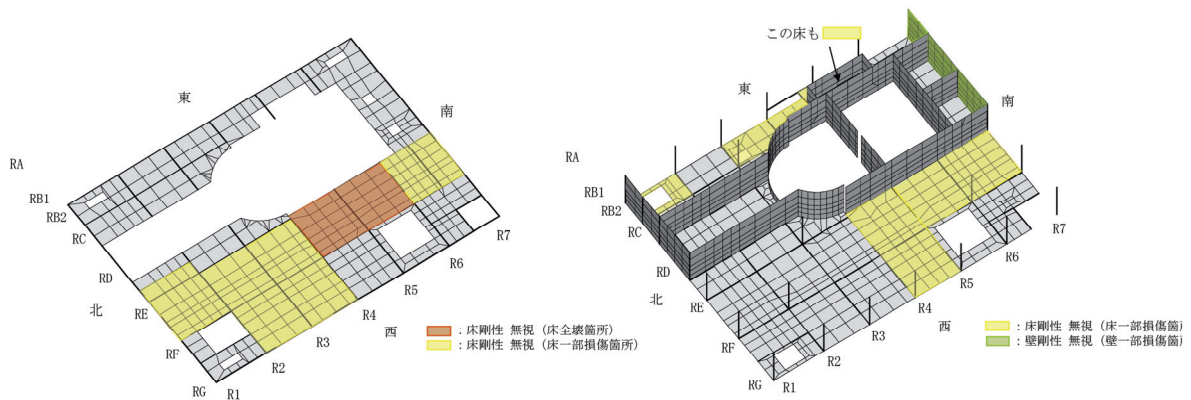
断面

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）



境界条件

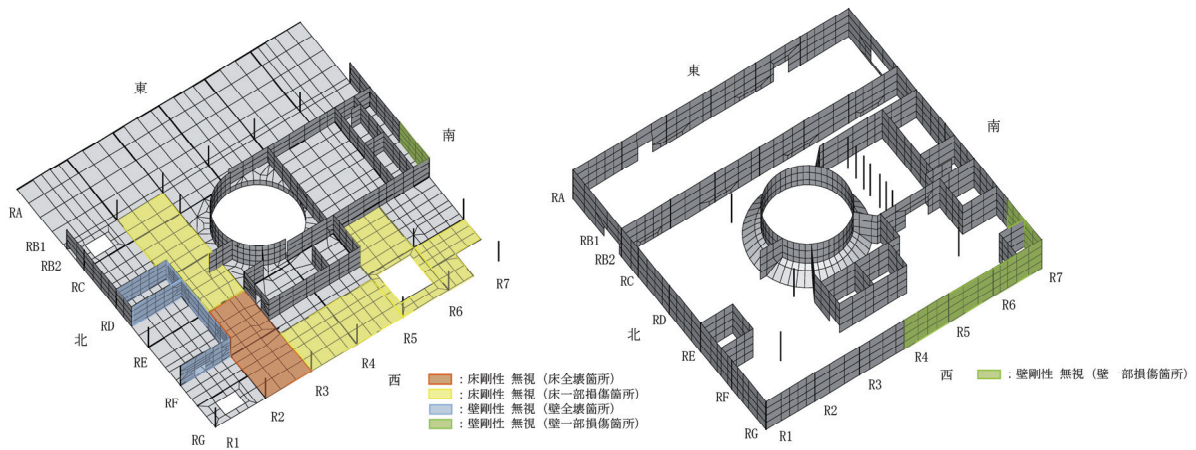
参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）



損傷状況 アイソメ図 5階

損傷状況 アイソメ図 4階

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

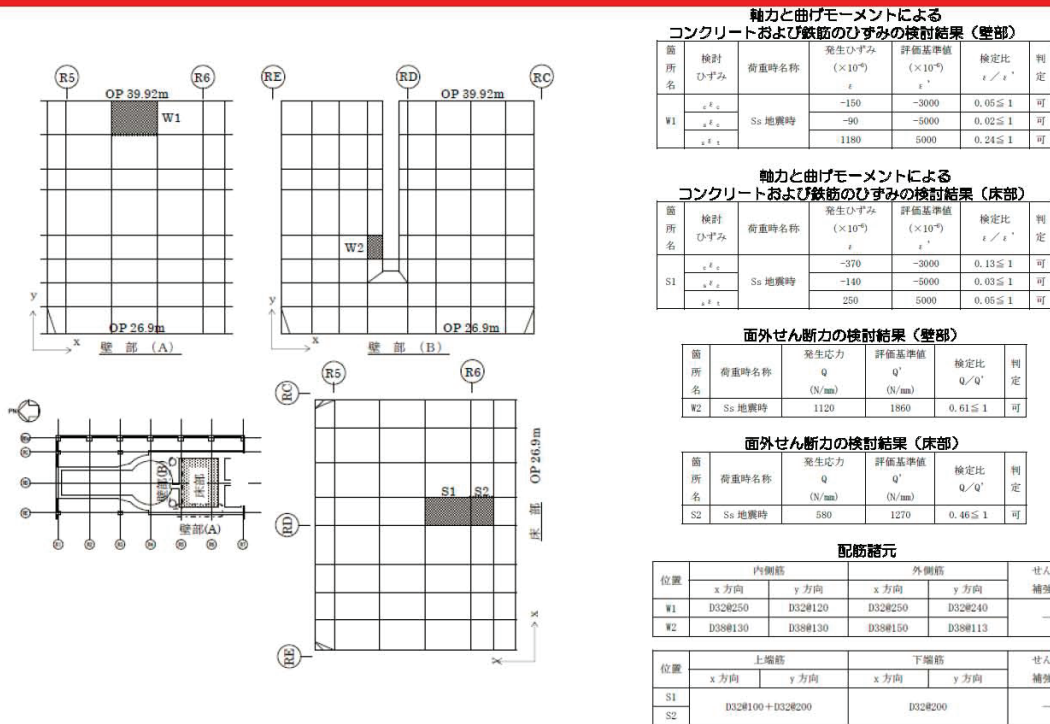


損傷状況 アイソメ図 3階

損傷状況 アイソメ図 2階

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）



評価結果と配筋諸元

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

【パラメトリックスタディ】

基本ケースとの剛性の設定の比較

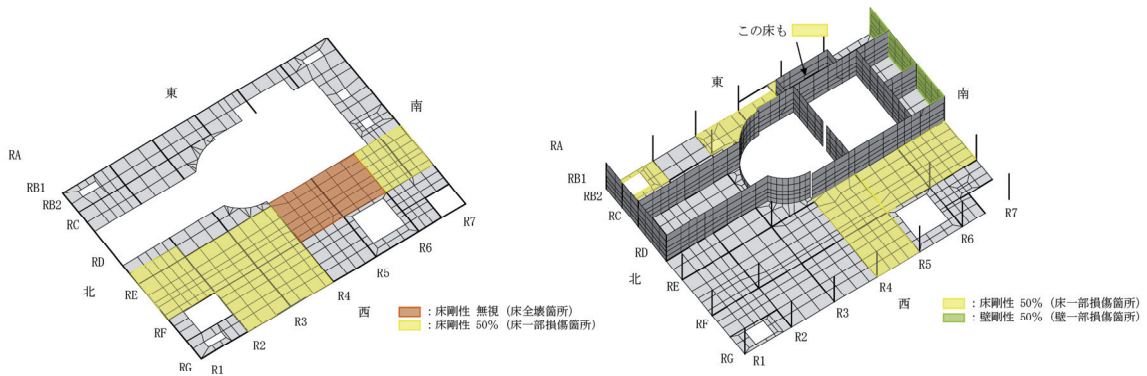
ケース	壁の剛性の設定			床スラブの剛性の設定	
	全壊箇所*1	一部損傷箇所*1	膨らみ部*2	全壊箇所*1	一部損傷箇所*1
基本ケース	0%	0%	0%	0%	0%
パラメータケース	0%	50%	50%	0%	50%



無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

【パラメトリックスタディ】

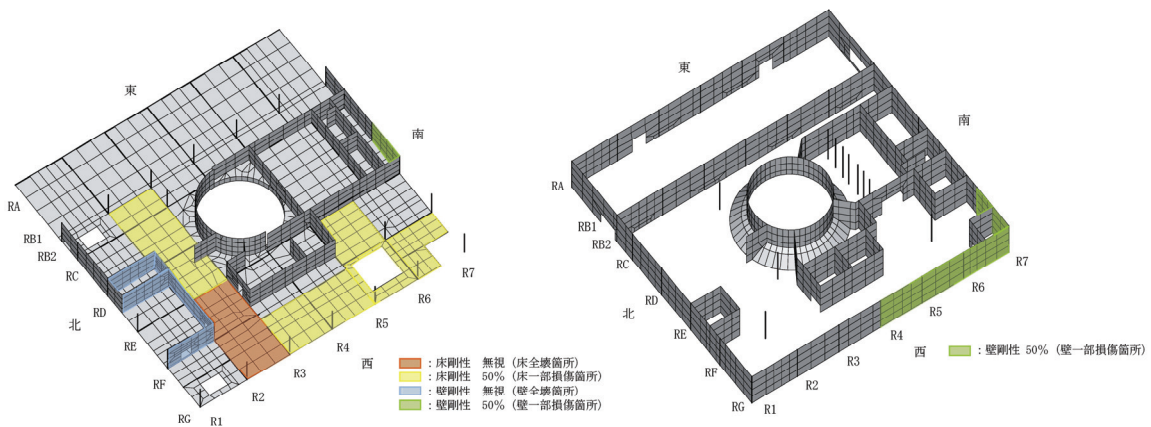


損傷モデル アイソメ図 5階

損傷モデル アイソメ図 4階

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

【パラメトリックスタディ】



損傷モデル アイソメ図 3階

損傷モデル アイソメ図 2階

O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
 T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
 T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

【パラメトリックスタディ】

評価基準値に対する発生ひずみもしくは発生応力の比（検定比*1）の比較

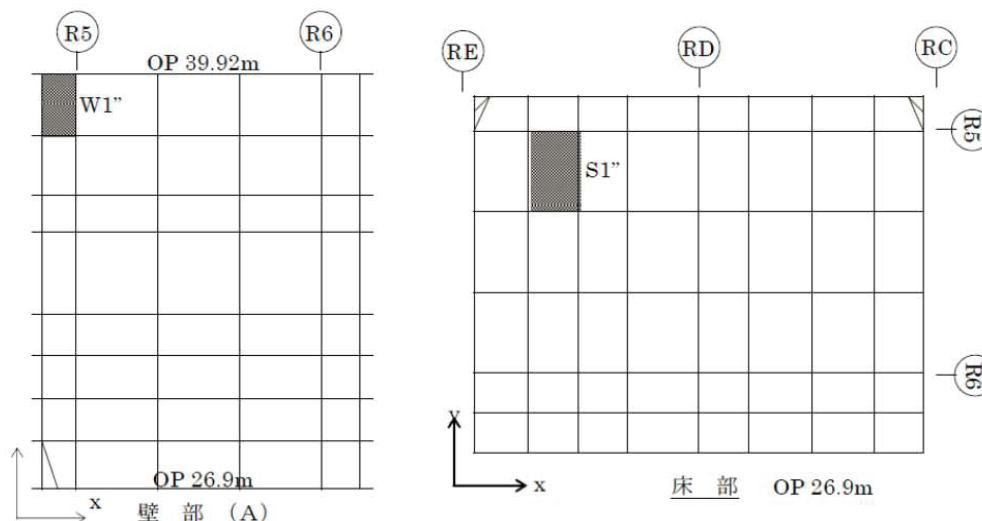
	箇所名	評価項目	基本 ケース	パラメータ ケース
プール壁	W1	鉄筋ひずみ	0.24	0.22*2
		コンクリートひずみ	0.05	0.06*2
プール床	S1	鉄筋ひずみ	0.05	0.05*2
		コンクリートひずみ	0.13	0.13*2
	S2	面外せん断力	0.46	0.48

*1：表中の値は、1以下であれば評価基準を満たしていることを示している。

*2：プール壁及びプール床のひずみは、評価基準値に対する発生ひずみおよび発生応力の比（検定比）が最大となる箇所が基本ケースとパラメータケースで異なっており、上記表上のパラメータケースにおけるひずみには、検定比が最大となる箇所の値ではなく、基本ケースと同じ箇所の値を記載している。なお、パラメータケースにおける検定比が最大となる箇所は図-5に示す壁部(A)のW1”および、床部のS1”であり、検定比はW1”の鉄筋ひずみで0.24、S1”のコンクリートひずみで0.13である。

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

【パラメトリックスタディ】



パラメータケースにおけるプール壁の面外せん断力の裕度が最大となる箇所

参考6 4号機使用済燃料プールの耐震安全性評価（3次元FEM解析）

【パラメトリックスタディ】

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 ($\times 10^{-4}$) ϵ	評価基準値 ($\times 10^{-4}$) ϵ'	検定比 ϵ/ϵ'	判定
W1	ϵ_{fc}	Ss 地震時	-180	-3000	$0.06 \leq 1$	可
	ϵ_{sc}		-90	-5000	$0.02 \leq 1$	可
	ϵ_{st}		1080	5000	$0.22 \leq 1$	可
W1''	ϵ_{fc}	Ss 地震時	-320	-3000	$0.11 \leq 1$	可
	ϵ_{sc}		-240	-5000	$0.05 \leq 1$	可
	ϵ_{st}		1200	5000	$0.24 \leq 1$	可

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 Q' (N/mm)	検定比 Q/Q'	判定
W2	Ss 地震時	790	1860	$0.43 \leq 1$	可

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 ($\times 10^{-4}$) ϵ	評価基準値 ($\times 10^{-4}$) ϵ'	検定比 ϵ/ϵ'	判定
S1	ϵ_{fc}	Ss 地震時	-370	-3000	$0.13 \leq 1$	可
	ϵ_{sc}		-150	-5000	$0.03 \leq 1$	可
	ϵ_{st}		240	5000	$0.05 \leq 1$	可
S1''	ϵ_{fc}	Ss 地震時	-370	-3000	$0.13 \leq 1$	可
	ϵ_{sc}		-200	-5000	$0.04 \leq 1$	可
	ϵ_{st}		180	5000	$0.04 \leq 1$	可

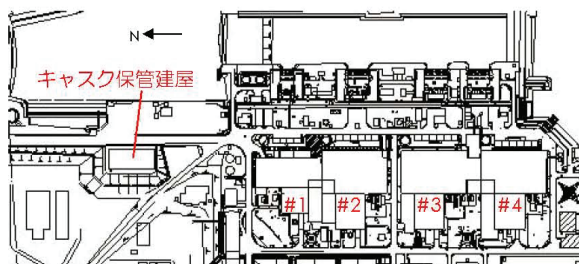
面外せん断力の検討結果（床部）

箇所名	荷重時名称	発生応力 Q (N/mm)	評価基準値 Q' (N/mm)	検定比 Q/Q'	判定
S2	Ss 地震時	600	1270	$0.48 \leq 1$	可

参考7 滞留水に含まれる塩化物による建屋劣化リスク

H23.12まで津波による浸水を受けたキャスク保管建屋の鉄筋コンクリート壁に対して、H24.8に劣化調査を実施したところ、鉄筋の腐食による断面欠損は生じていないことを確認した。

これより、地下滞留水を貯留する建物についても、現時点において構造に影響を与えるような塩分浸透による劣化はないものと評価した。



キャスク保管建屋配置図



鉄筋採取位置(No.1)

キャスク保管建屋鉄筋劣化評価結果

試験体	採取箇所	かぶり厚さ	鉄筋径	腐食グレード
NO. 1	1階南東エリア	60mm	D13	II
NO. 2	1階南西エリア(1)	60mm	D13	I
NO. 3	1階南西エリア(2)	50mm	D13	I



No.1（腐食グレードII）



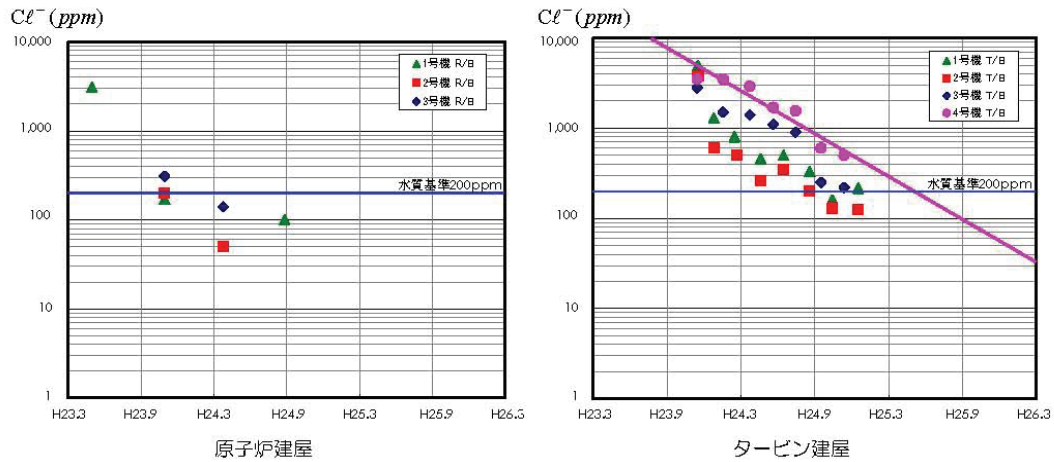
No.2（腐食グレードI）



No.3（腐食グレードI）

参考7 滞留水に含まれる塩化物による建屋劣化リスク

- 塩分除去した水を注水することにより、地下滞留水の塩素イオン濃度は、経時的に減少している。
- ・原子炉建屋では、すでに水道水の塩素イオン基準値200ppmを下回っている。
 - ・タービン建屋では、平成25年上半期には、概ね200ppm以下になると推定した。
- これから、地下滞留水を貯留する建物については、平成25年度下半期以降は構造に影響を与えるような塩分浸透による劣化はないものと評価した。



地下滞留水塩素イオン濃度経時変化

特定原子力施設監視・評価検討会
(第21回)
参考6

福島第一原子力発電所4号機原子炉建屋
健全性確認のための定期点検頻度の見直しについて

平成26年5月2日
東京電力株式会社



1.概要

- 4号機原子炉建屋は水素爆発により建屋の上部が損傷したが、FEM等の詳細な解析にて「原子炉建屋」および「使用済燃料プール」が十分な耐震性を有していることを確認している。
- さらに使用済燃料プール底部を鋼製支柱とコンクリート壁にて強化している。(平成23年7月30日 工事完了)
- 国内外からの4号機への不安払拭の観点も含めて建物の健全性を確認することを目的に2012年5月から年4回の頻度で、定期点検を実施してきた。(2年間(計8回))
- 第1回～8回の定期点検を通し、**建屋に経時的に有意な変化はなく、「原子炉建屋」および「使用済燃料プール」が十分な耐震性を有している状態**であることを学識経験者の立会いのもと確認している。
- 「これまでの点検結果から経時的に有意な変化がないこと」「作業員の被ばく抑制」の観点から、定期点検の頻度見直しを行う。
- なお、上記について、「特定原子力施設に係る実施計画の変更認可」を申請中(2014年4月16日)

(撮影：平成 23年 9月)

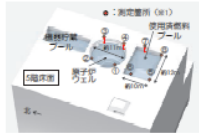


(撮影：平成 25年 11月)



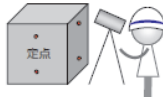
2.点検項目について

- 定期点検では、以下の4項目の点検を年4回実施。



①水位測定

原子炉ウェルと使用済燃料プールそれぞれの四隅の上端から水面までの距離を測定することで、建屋の傾きを確認するために実施。



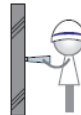
②外壁面の測定

外壁面の上下に定点を設置し光学機器により上下点の水平差から建屋の傾きを確認するために実施。



③目視点検

使用済燃料プールの躯体およびプールを支持する躯体等にひび割れや鉄筋腐食の兆候を確認するために実施。



④コンクリートの強度確認

- ・水素爆発によるコンクリート強度に影響がないことを確認するために実施。
- ・局所的にふくらみが確認された箇所のコンクリート強度低下がないことを確認するために実施。

3.水位測定結果(第1回～第8回)+2回

- 原子炉ウェルおよび使用済燃料プールの四隅の測定値は、ほぼ同じである。
- 5階床面とそれぞれの水面とが平行であり、建屋が傾いていないことを確認。
- また測定差は、ほぼ一定であり、建屋が傾いていく兆候がないことを確認。

【原子炉ウェル】 水位※1の測定結果

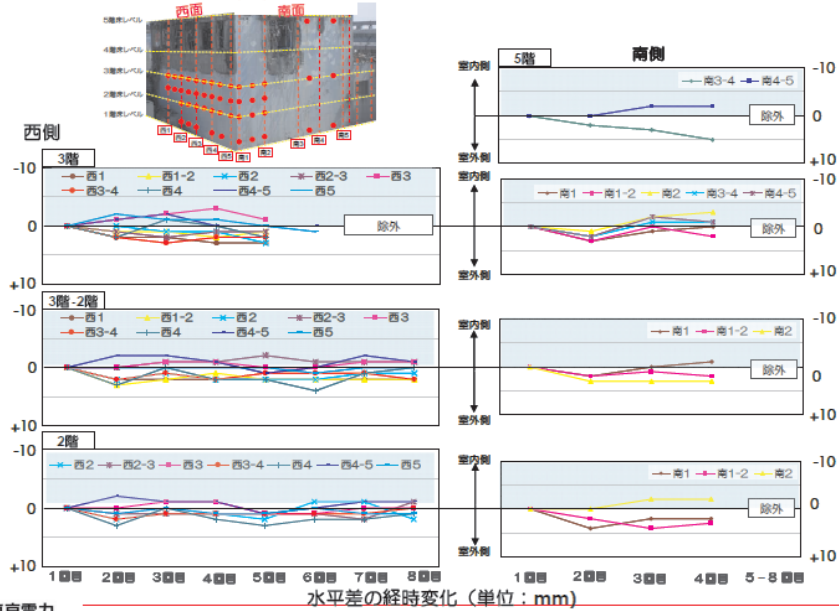
測定点	測定日									
	H24.2.7 (-)	H24.4.12 (-)	H24.5.18 (第1回)	H24.8.21 (第2回)	H24.11.20 (第3回)	H25.2.6 (第4回)	H25.5.21 (第5回)	H25.8.6 (第6回)	H25.11.28 (第7回)	H26.3.11 (第8回)
①	462	476	492	462	463	465	467	465	481	465
②	463	475	492	462	464	464	465	465	481	463
③	462	475	492	461	463	463	464	465	482	463
④	464	475	492	461	463	463	465	466	482	463
測定差	2mm	1mm	0mm	1mm	1mm	2mm	3mm	1mm	1mm	2mm

【使用済燃料プール】

測定点	測定日									
	H24.2.7 (-)	H24.4.12 (-)	H24.5.18 (第1回)	H24.8.21 (第2回)	H24.11.20 (第3回)	H25.2.6 (第4回)	H25.5.21 (第5回)	H25.8.6 (第6回)	H25.11.28 (第7回)	H26.3.11 (第8回)
⑤	※2)	468	461	453	443	444	439	448	490	453
⑥		468	461	453	444	443	439	446	490	452
⑦		468	461	452	442	443	439	446	490	453
⑧		468	461	452	443	443	438	446	489	453
測定差	-	0mm	0mm	1mm	2mm	1mm	1mm	2mm	1mm	1mm

3.外壁面の測定結果(第1回～第8回)

■ 建屋が傾いていくような兆候がないことを確認 ※燃料取り出し用カバー工事等と干渉した測定点は、計測から除外した。



※光学機器の計測誤差が±2mm程度であり、またコンクリートの熱膨張により5mm程度の差が生じる可能性があり、計測誤差の範囲内の変動であると考える。 4

3.目視調査結果(第1回～第8回)

■ 幅1mm以上^(※1)のひび割れや鉄筋腐食の兆候である錆汁などがないことを確認。

【使用済燃料プール側壁(4階)のひび割れ状況】



【使用済燃料プール側壁(3階)のひび割れ状況】

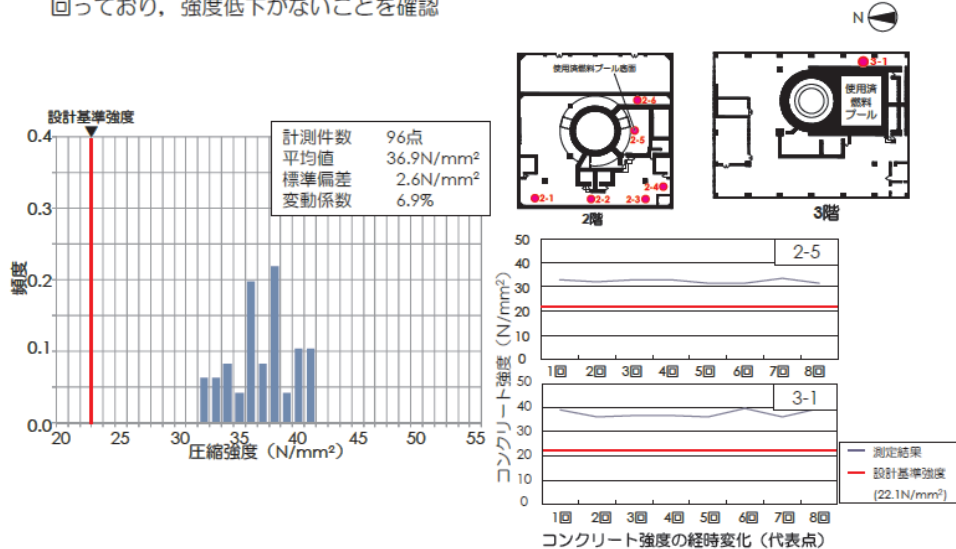


※1:ひび割れ幅1mm:耐久性の観点で検討が必要となるひび割れ幅。日本建築学会「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説」

3. コンクリート強度結果(第1回～第8回)

※全測定データはP12,13参照

- 使用済み燃料プール躯体等のコンクリート強度※1は、設計基準強度(22.1N/mm²)を大きく上回っており、強度低下がないことを確認



※1 コンクリート強度は、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)による。

4. 定期点検頻度見直しの考え方

- 一般的に建屋定期点検の考え方は以下の通り。
 - ①短期的な点検：目視により建屋の劣化状況(ひび割れ、鉄筋腐食)の有無を比較的短い周期(1～5年程度)で確認
 - ②中長期的な点検：コンクリートの劣化状況(強度)を比較的長い周期(5～10年程度)で確認
 - ③臨時的な点検：大地震後などに目視により建屋の損傷状況(ひび割れ等)を臨時的に確認
- これまでの定期点検では、「目視点検」「コンクリート強度確認」「水位測定」「外壁面の測定」を年4回の頻度で実施。
 - ⇒これまでの点検結果に経時的に有意な変化がないこと、学識経験者からのコメント(P9参照)を踏まえ、一般的な建屋定期点検の考え方に照らし、全ての点検を同頻度で実施する必要性はないと判断。
- また、作業員の被ばく量低減の観点からも点検頻度の見直しが必要と判断。
 - ⇒定期点検による平均被ばく線量(第1回～第8回の平均)は、約2.3mSv・人/回である。
 - ⇒「外壁面の測定」による被ばく線量は、「水位測定」の約3倍である。
(外壁面の測定による平均被ばく線量:約0.3mSv/人・回、水位測定による平均被ばく線量:約0.1mSv/人・回)

5.今後の定期点検計画について

- 今後の定期点検における点検頻度は、以下の通りとする。
 - 「水位測定」と「目視点検」は、これまで通り**年4回実施**。
 - 「外壁面の測定」は、これまでの点検結果に**経時的に有意な変化がないこと**、「水位測定」の結果で判断可能なこと、外壁面に劣化の兆候があれば「目視点検」にて把握可能であること、**作業員の被ばく量が多い**ことから**年1回**に見直し。
 - 「コンクリート強度」は、中長期的な点検と位置づけられており、コンクリート物性に急な変化は生じないこと、これまでの点検結果が全て設計基準強度を大きく上回っていることから**年1回**に見直し。

点検項目	点検頻度		備考
	これまで	燃料取り出し完了まで	
水位測定	4回/年	4回/年 (変更なし)	
外壁面の測定		1回/年	長期計測用の測定点(15点)を新たに設置。(P14参照)
目視点検		4回/年 (変更なし)	
コンクリートの強度確認		1回/年	今後の測定点はP15参照。

- また、震度5弱以上の地震が発生した場合には、準備が整い次第、目視点検を実施し、建屋の損傷状況を確認する。(目視点検にて異常が確認された場合には、詳細な点検を実施)

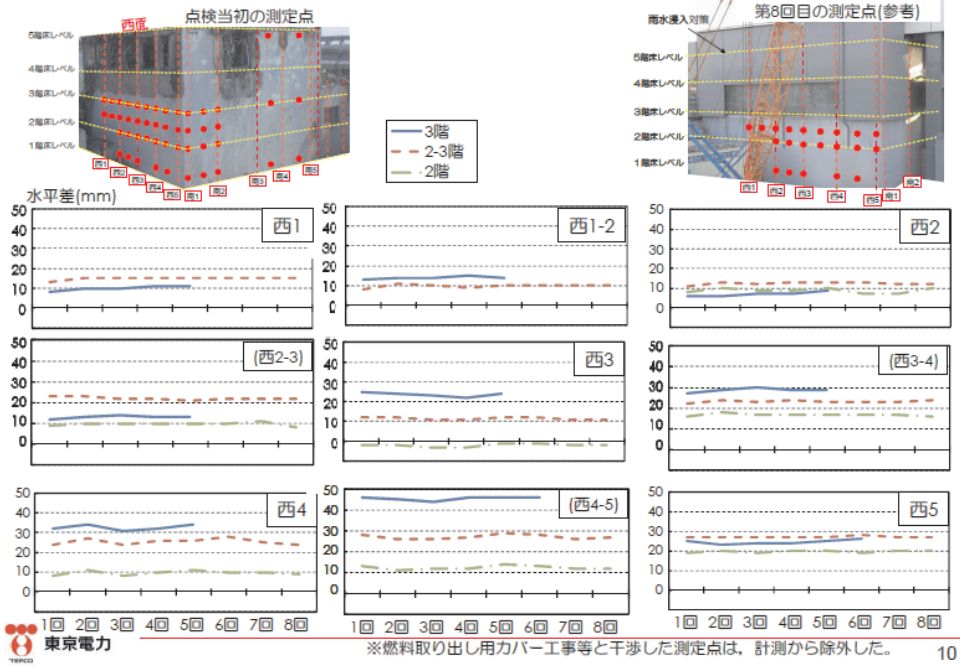
【参考①】学識経験者からの主なコメント

- 学識経験者※からの主なコメント

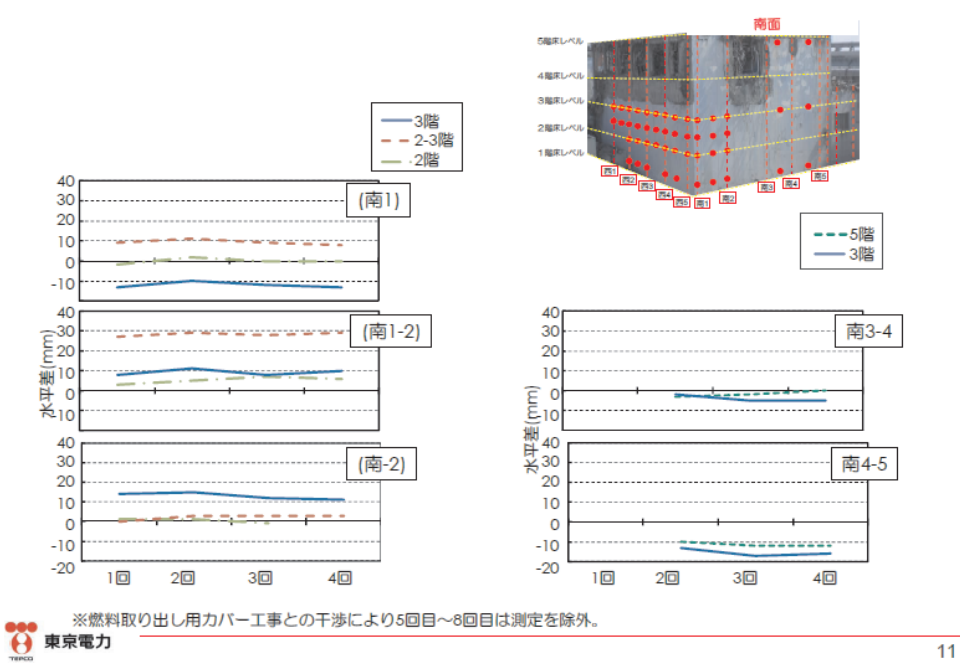
点検項目	学識経験者からのコメント
水位測定	プール水位の計測により建屋全体の挙動を捉えることが出来るので、 これからも定期的な計測が必要 と思う。
外壁面の測定	今は安定しているが、長期的な変化を観測するために長期計測用の ポイントを準備 の方が良い。 測定間隔は年一回程度でも十分 だと思う。 建屋の傾きを確認するため「水位測定」と「外壁面の測定」を実施しているが、これまでの点検結果を踏まえると、 両点検を同頻度で実施する必要はない と思う。 被ばく量が少ない方の点検を中心に 実施すれば良いのではないかと。
目視点検	現在は、構造躯体に対する有害な塩害は見受けられないが、徐々に兆候が出てくることもあるので、 継続的な点検が必要 と思われる。

※東京工業大学:瀧口 克己名誉教授 ， 千葉工業大学:田村 和夫教授

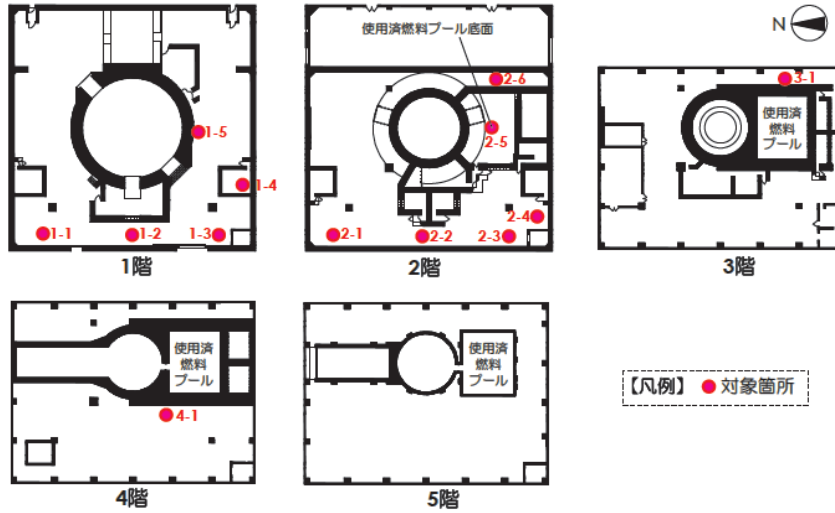
【参考②】外壁面の測定結果(西面)



【参考②】南外壁面の測定結果

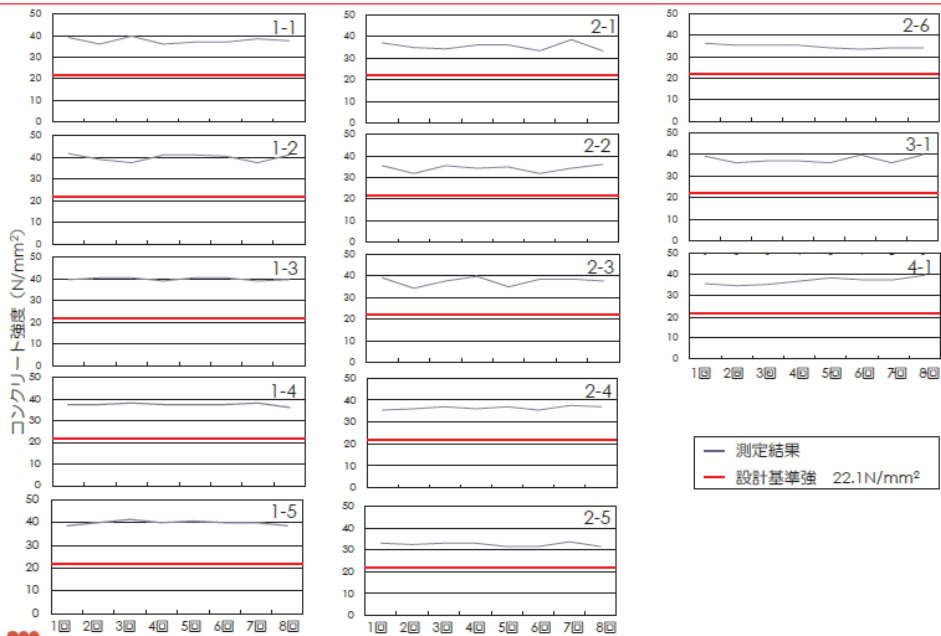


【参考③】 コンクリート強度測定結果

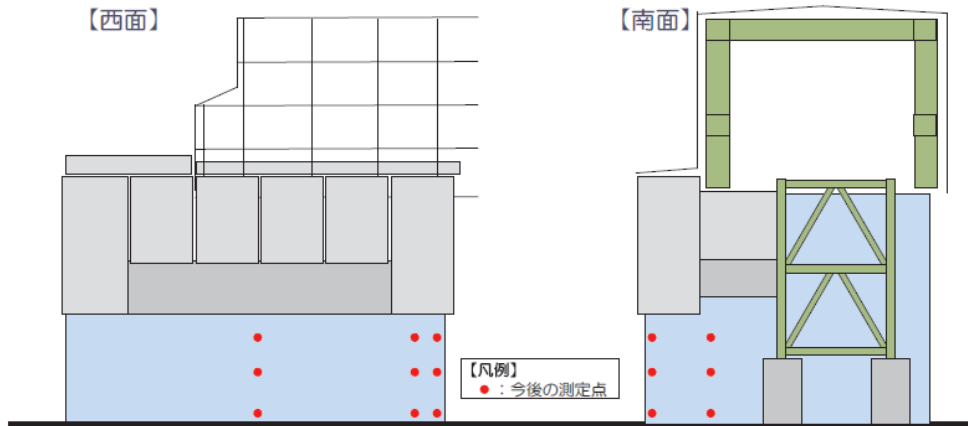


コンクリート強度の測定箇所

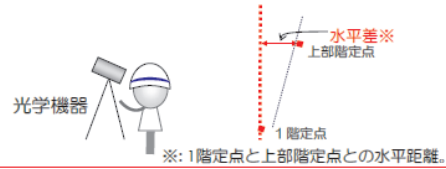
【参考③】 コンクリート強度測定結果



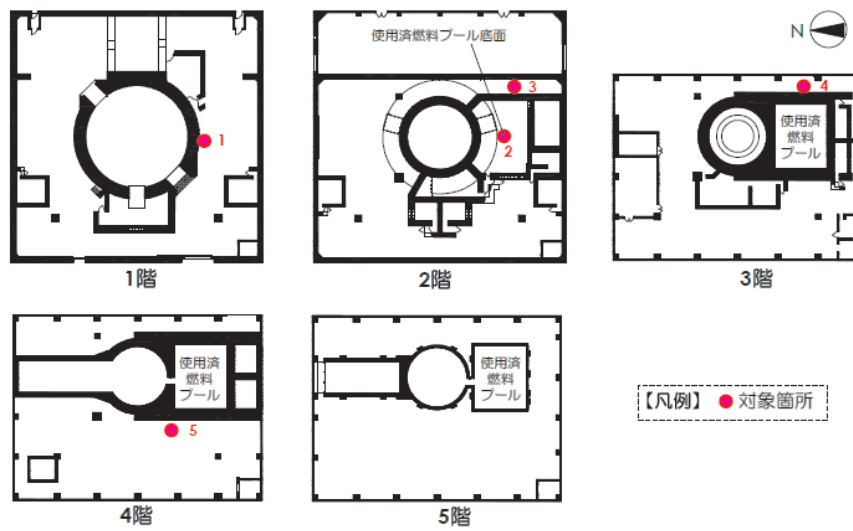
【参考④】 今後の外壁面測定箇所



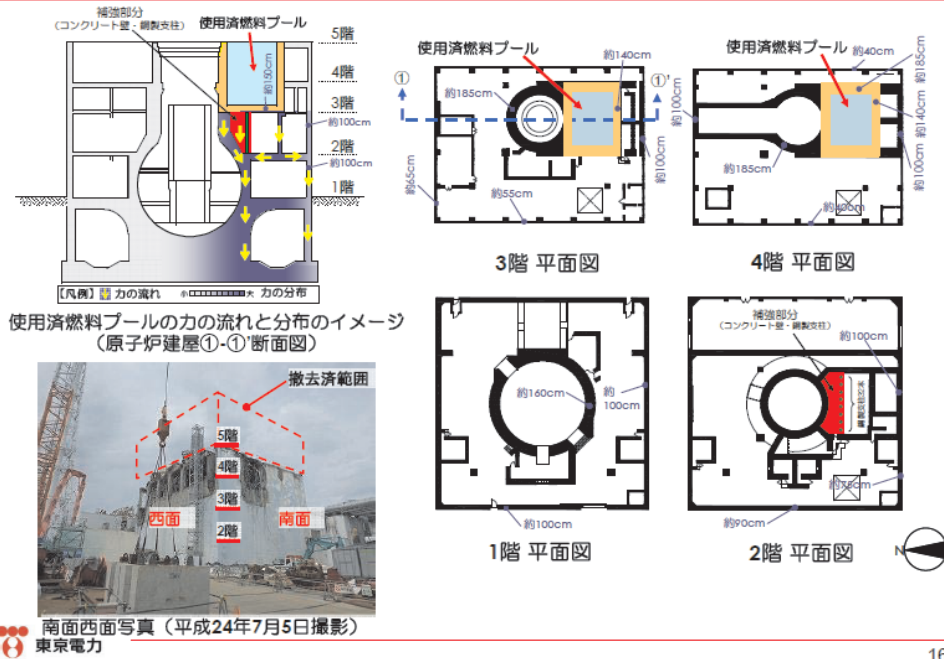
測定点：長期的な観測を行えるように恒久的な測定点を既存測定点の近傍に設置



【参考⑤】 今後のコンクリートの強度確認箇所

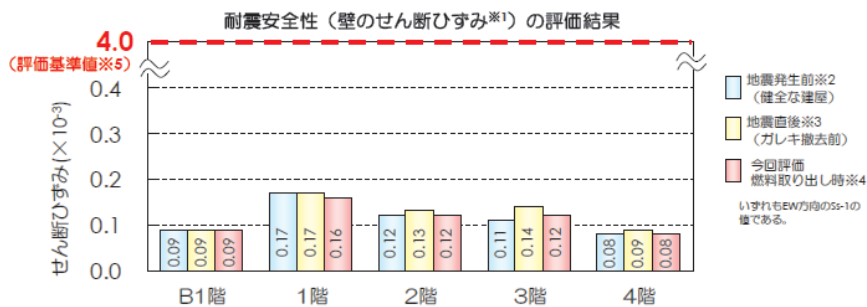


【参考⑥】使用済燃料プール躯体と支持躯体の位置関係



【参考⑦】原子炉建屋の耐震安全性評価

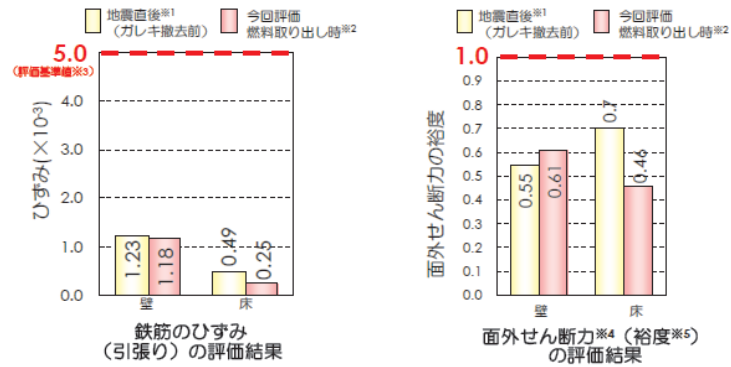
- 地震発生前の健全な建屋と比較した場合でも耐震安全性はほぼ同等。
- この理由としては、以下が考えられる。
 - ①損傷した建屋ガレキの撤去により建屋上部の重量が大幅に軽くなり、地震力が低減した。
 - ②使用済み燃料プール壁や原子炉格納容器周辺の厚い壁は、地震発生前と同様に健全である。



※1: せん断ひずみ-物体内部の面に平行方向に作用した力に対する変形
 ※2: 「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 (改訂2) (平成22年4月)
 ※3: 「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28日)
 ※4: 「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) (追補版) (改訂2)」 (平成24年12月25日)
 ※5: 評価基準値: 原子力発電所耐震設計技術指針 JEA-G-4601-1991(日本電気協会)による

【参考⑧】使用済燃料プール躯体の耐震安全性評価

- 使用済燃料プール躯体のひずみや発生応力は、評価基準値を下回っており十分な耐震安全性を確保している。



※1 「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28日）
 ※2 「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）」（追加版）（改訂2）」（平成24年12月25日）
 ※3 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（日本機械学会）による
 ※4 面外せん断力：壁・床が押し抜かれる方向にすれを発生させる力
 ※5 裕度：発生せん断力/せん断耐力

福島第一原子力発電所 1/2 号機共用排気筒の上部解体について

1. 排気筒上部解体の目的

1/2 号機共用排気筒(以下、排気筒)は、震災後の点検で一部の部材の損傷を確認していること、及び排気筒としての機能を有していないことから、耐震上の裕度を向上させるため、排気筒の上部を解体する。

2. 排気筒上部解体の計画概要

排気筒は、地上からの高さ 120m、内径 3.2m の筒身を鋼管四角形鉄塔で支えた鉄塔支持型共用排気筒である。本計画では、地上からの高さ約 60m～120m を解体範囲とする。

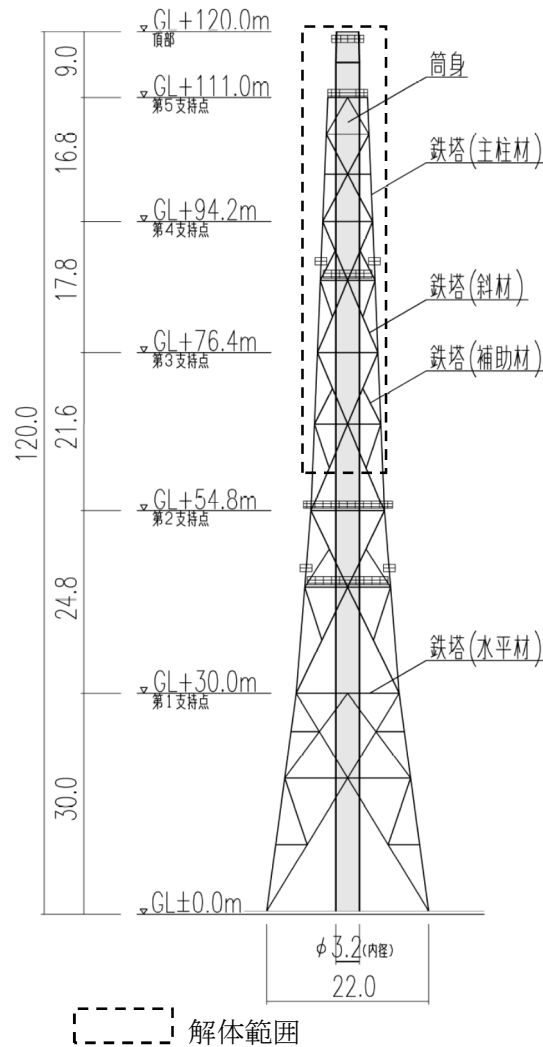


図 1 1/2 号機共用排気筒概要図 (単位 : m)

3. 計画工程

計画工程は以下の通り。

工程は現場状況や他工事との調整により変動する可能性が有る。

計画工程：平成 30 年 12 月 ～ 平成 31 年 12 月

4. 排気筒の解体方法

大型クレーンに吊り下げた遠隔解体装置により、頂部から順番に筒身や鉄塔をブロック単位で解体する。なお、排気筒周辺の線量が高いことから上部作業は無人化し、下部での準備作業・小割解体作業は有人作業とする。

解体作業における留意事項を下記に示す。

- ・ 解体作業周辺の稼働中の設備を解体作業に伴い損傷させないために、図面及び現場調査にて確認し、現場状況に応じて設備の防護を施す。
- ・ 解体作業においては、火災リスクを低減するため、原則、火気を使用する装置は使用しない。また、切断時の火花については、可能な限りで養生する。

5. 解体作業に伴う放射性物質の飛散抑制策

排気筒は震災の際にベント作業で使用していることから、筒身内面に遊離性のダストが付着している可能性がある。よって、筒身切断時は下記の対策を実施する。

a. 作業開始前

解体作業前に、筒身内面に飛散防止剤を散布することで、筒身内面の遊離性ダストを固着する。

b. 作業中

筒身切断時には、切断装置(チップソー)をカバーで覆い、カバー内ダストを可能な限り吸引することで飛散量の低減を図る。

遠隔解体装置には、ダストモニタを設置し、作業中の空气中放射性物質濃度を監視する。作業中に、万が一、遠隔解体装置に設置したダストモニタ及び構内に設置しているダストモニタ、モニタリングポストにより、空气中放射性物質濃度もしくは空間放射線量率の異常を検知した場合は、解体対象物が安全な状態にあることを確認した後に作業を中断する。

6. 解体作業に伴う放射性物質の環境影響

排気筒周辺の雰囲気線量率の調査結果から保守的に筒身の表面線量率を推定し、表面積から気中へ放出される放射性物質放出量の評価を行った。評価結果より、本作業に伴う放射性物質の放出による敷地境界での線量影響が、「特定原子力施設への指定に際し東京電力株式会社福島第一原子力発電所に対して求める措置を講ずべき事項について」で求められている敷地境界線量 1 mSv/年未満と比較して、十分小さな値であること

を確認した。

また、本作業に伴う放射性物質の放出量と解体作業時間から想定した放射性物質の放出率は、敷地境界の近傍に設置されたダストモニタの警報設定値を超えない範囲であることを確認した。

7. 解体作業中の解体部材の落下防止対策

解体作業中の部材落下防止を図るため、遠隔解体装置には多重の把持機構を設け、把持状態はカメラにより監視する。

8. 廃棄物の保管

排気筒解体作業に伴い、表面線量率1～30mSv/hの金属瓦礫類が約450 m³発生すると想定している。なお、解体後、地上にて解体対象物の線量測定を行い、線量区分に応じて、下記の通りに保管・管理する。

「Ⅲ章第3編 2.1.1 放射性固体廃棄物等の管理」に従い、1～30mSv/hの金属瓦礫類は固体廃棄物貯蔵庫に保管・管理する。1mSv/h以下の金属瓦礫類のうち、0.1～1mSv/h以下の金属瓦礫類は一時保管エリア(E1, P2, W, X)及び固体廃棄物貯蔵庫第9棟に、0.1mSv/h未満の金属瓦礫類は一時保管エリア(P1)に保管・管理する。

9. 作業員の被ばく線量の管理

放射線業務従事者が立ち入る場所では、外部放射線に係わる線量率を把握し、放射線業務従事者の立入頻度や滞在時間等を管理することで、作業時の被ばく線量が法令に定められた線量限度を超えないようにする。

なお、本工事における放射線業務従事者の被ばく線量低減策として、以下の対策を実施する。

- ・ 遠隔操作設備の利用による被ばく低減
- ・ 待機場所（低線量エリア）の活用による被ばく低減
- ・ 排気筒周辺作業時の遮へいスーツ着用
- ・ 作業時間管理・作業員ローテーションによる被ばく低減
- ・ 解体装置操作室を低線量エリアに設置
- ・ クレーン操作室への遮へい設置による被ばく低減

高線量エリアに近接した施工であるため、現場状況を踏まえ、今後継続的に被ばく線量低減に向けた線源の把握と除去、線源からの遮へい、作業区域管理等を行い、更なる被ばく線量低減に努める。

1.4 豪雨，台風，竜巻への対応

1.4.1 台風・豪雨について

高レベルの放射性汚染水を滞留・貯留している原子炉建屋，タービン建屋，廃棄物処理建屋，コントロール建屋，プロセス主建屋（除染装置を同建屋内に設置），サイトバンカ（第三セシウム吸着装置を同建屋内に設置），高温焼却炉建屋（第二セシウム吸着装置を同建屋内に設置），焼却工作建屋（セシウム吸着装置を同建屋内に設置），運用補助共用施設共用プール棟（非常用ディーゼル発電機を同建屋内に設置）等の既設の諸建屋は，過去の観測記録を保守的に設定している建築基準法の暴風時の荷重を考慮している。

以上より，台風・豪雨により建屋，機器の機能が喪失することはないが，地下階に滞留している高レベルの放射性汚染水（滞留水）については，滞留水の水位の上昇が懸念される。

気象庁 HP，気象庁観測データ（図 1.4-1 参照）より，降水量 3000mm/年（平年値）を超える地域は，東海地方，紀伊半島，四国，九州及び北陸地方等となっており，国内の最大降水量は，852mm/日（高知県魚梁瀬，2011.7.19），2452mm/月（三重県宮川，2011.9）である。一方，福島第一原子力発電所の周辺の観測データとしては，降水量の平年値は 2000mm 以下であり，最大降水量も 285mm/日（福島県浪江，1996.9.22），634mm/月（福島県浪江，2006.10）となっている。

そこで，保守的に 1 日に 1000mm の降雨を想定した 1～4 号機建屋水位の評価を行ったところ（降雨による影響を評価するため，降雨による建屋水位上昇の寄与率を過去の実績から算定），保安規定に定める水位レベル（T.P.2, 064mm）を超えるものの，系外流出リスクの水位レベル（T.P.2, 564mm）以下の T.P.2, 311mm に留まると予測される（図 1.4-2 参照）。

以上より，保守的な豪雨を想定しても，滞留水を系外に流出することはないと考える。

1.4.2 竜巻について

原子炉建屋，タービン建屋，運用補助共用施設共用プール棟，プロセス主建屋，高温焼却炉建屋，焼却工作建屋等の諸建屋は，鉄筋コンクリート造であるため，竜巻に対する直接的な被害はないと考えられる。

原子炉圧力容器・格納容器注水設備については，高台，タービン建屋内，3号復水貯蔵タンク等にポンプを分散配置しており，単独の竜巻で同時に機能喪失するリスクは小さいと考えるが，万一，竜巻により全てのシステムの運転再開が時間を要する場合には，消防車を用いた注水で対応する。また，消防車，仮設注水用機材等については分散配置し，全数が一度に機能喪失することがないように配備する。

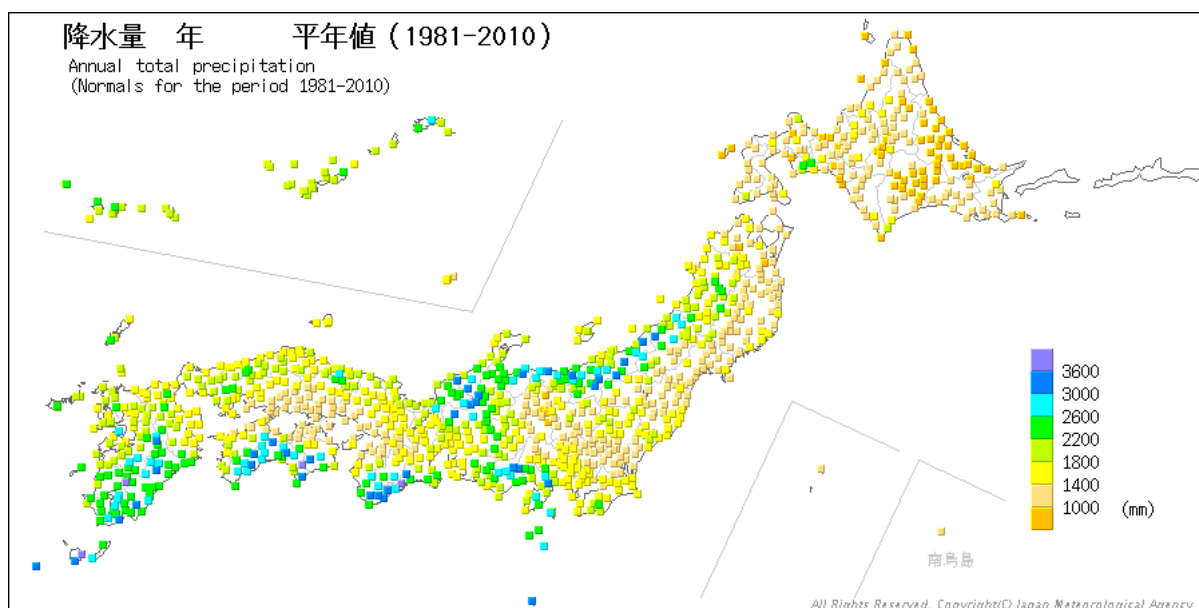
使用済燃料プールについては，プール上部を養生する等，実行可能な防護対策を行う。また，使用済燃料プール水の漏えいが発生した際は，非常用電動ポンプ，消防車もしくはコンクリートポンプ車等による注水により漏えいの抑制を行う。さらに，コンクリートポンプ車等について分散配置し，全数が一度に機能喪失することがないように配備する。

汚染水処理設備のうち処理装置については鉄筋コンクリート造の建屋内に設置しており，竜巻に対する直接的な被害はないと考えられる。淡水化装置は，蛇腹ハウス内に設置しており，竜巻に対する直接的な被害を受ける可能性を否定できないが，十分な量の淡水を貯水しており，装置停止による炉注水源への影響は小さいと考える。なお，滞留水中の塩素濃度は減少傾向にあり，数年先には，淡水化装置をバイパスしての炉注水も可能と想定している。また，汚染水処理設備

の制御室は、コンテナ内に設置しているため、竜巻に対する直接的な被害を受ける可能性を否定できないが、第二セシウム吸着装置は現場制御盤での起動が可能であり、滞留水処理の早期再開が可能である。処理水を移送しているホースについては、予備品を準備しておくこととしている。さらに、竜巻の発生の可能性が予見される場合には、汚染水処理設備の停止・隔離弁の閉止操作等を行い、汚染水の拡大防止を図る。また、車両などの飛来物によって塩水タンク等を破壊させることがないように、車両をタンクから遠ざける措置をとる。

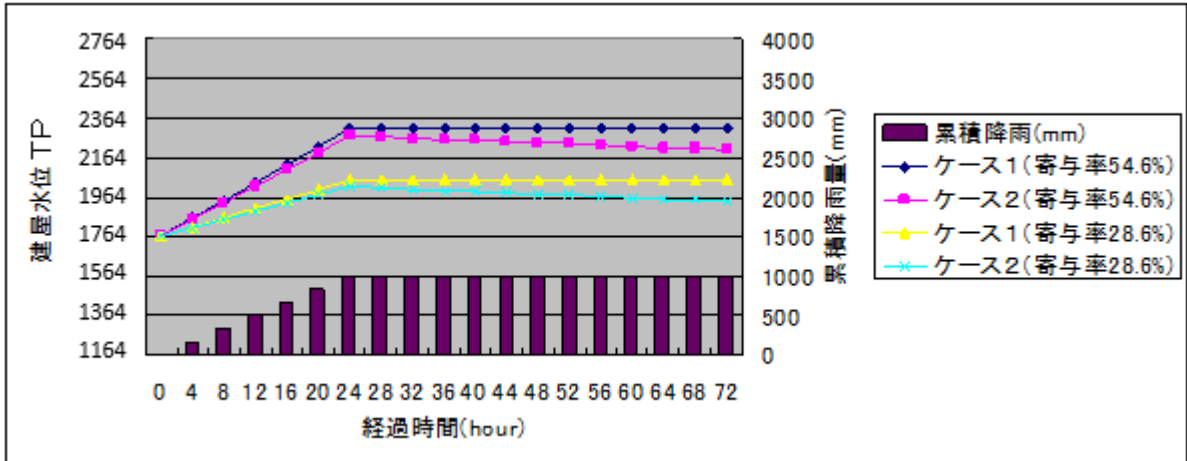
電源設備のうち所内共通D/Gについては、鉄筋コンクリート造の建屋内に設置しているため竜巻に対する直接的な被害を受けることはない。所内共通M/Cについては、鉄筋コンクリート造建屋又は鉄骨造建屋内に分散配置しており、全数が一度に機能喪失することがないこととしている。また、ケーブル電路については、屋外に布設しているため竜巻に対する直接的な被害を受ける可能性があるが、所内共通M/Cについては、離れた複数の受変電設備から違う経路を使用して受電できるようにしているため、一部のケーブルが竜巻により損傷しても、他のケーブルを使用して所内共通M/Cへの供給が可能である。また、仮に受電経路が全て使用不能となった場合もしくは所内共通M/Cが使用不能となり重要な負荷への電源供給ができなくなった場合には、各設備に設置した専用の発電機で電源を確保する。さらに、電源車を使用可能な電源盤に接続し、安全上重要な設備への電源を確保する。

監視体制については、日常的に、作業員等は、避難ルートや避難場所を確認している。竜巻発生が予想される場合は、気象庁から段階的に発表される「気象情報」及び「雷注意報」を把握し、強風に対するクレーンの姿勢固定等、必要な対応を行う。竜巻発生前の0～1時間前に発表される「竜巻注意情報」が発令された場合、気象状況を適宜確認し、竜巻発生もしくは発生の恐れがあると判断した場合には、作業員等へ避難指示及び所内一斉放送を実施し、作業員等は、予め確認している避難ルートや避難場所に従って、避難を行う体制としている。



気象庁 HP より抜粋

図 1.4-1 日本国内の降水量（平年値）



ケース 1：通常時の移送（ポンプ 2 台運転）

ケース 2：移送ポンプ増強（ポンプ 4 台運転）

図 1. 4 - 2 大量降雨時の影響評価

本資料に記載の標高は、震災後の地盤沈下量（-709mm）とO.P.からT.P.への読替値（-727mm）を用いて、下式に基づき換算している。
 <換算式> T.P.=旧O.P.-1,436mm

1.8 地下水ドレンの運転管理について

海側遮水壁山側エリアにおいて、海側遮水壁により堰き止められた地下水の水位は、海側遮水壁閉合前に比べて上昇している。地下水上昇に伴う地盤の湿潤化により、作業環境の悪化等の発生を防止するため、地下水ドレンポンドの運転管理を次の通り実施する。

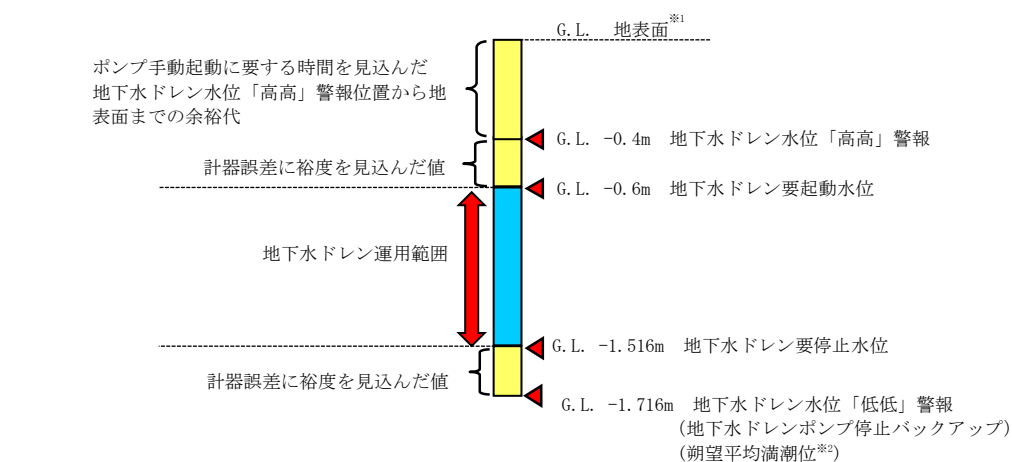
1.8.1 地下水ドレンの水位設定について

各ポンド内に設置した地下水ドレンポンド揚水ポンプを起動・停止することで地下水の水位調整を行っている。

地下水ドレン水位「高高」警報水位は、豪雨時においても警報鳴動確認後、免震棟から現地へ出向してポンプを手動起動する間に、地表面に地下水が溢水することのないよう上昇する地下水水位を考慮して地表面^{※1}に対し 400mm の余裕を持たせた水位とし、地下水ドレンポンプ要起動水位は、地表面^{※1}に対し 600mm の余裕を持たせた水位以下とする。

また、地下水ドレンの要停止水位は、潮の干満により海側遮水壁の山側エリアの地下水が変動したとしても、海側のサブドレン水位が建屋滞留水水位を下回ることがないように、福島第一原子力発電所港湾における朔望平均満潮位^{※2}（地下水ドレン停止バックアップ位置）に 200mm を加えた水位以上とする。

なお、地下水ドレン稼働に伴う地下水の水位変動は、より建屋近傍の建屋海側に位置するサブドレンの水位で管理する。



※1 2016.6.8 現在
※2 朔望平均満潮位

T. P. +2.479m
T. P. +0.763m

(朔(新月)と望(満月)それぞれの日から前2日～後4日以内に観測された最高潮位の平均を朔望平均満潮位という。(大熊における2002年～2007年の観測潮位に基づく調和解析結果に沈下補正したもの))

図-1 地下水ドレンの水位設定

表-1 水位設定

設定の考え方	設定値
ポンプ起動位置でポンプが起動しない場合に備え、ポンプ手動起動に要する時間を見込んだポンプ警報鳴動位置から地表面までの余裕代	400mm
水位計の計器誤差に余裕を見込んだ値	200mm

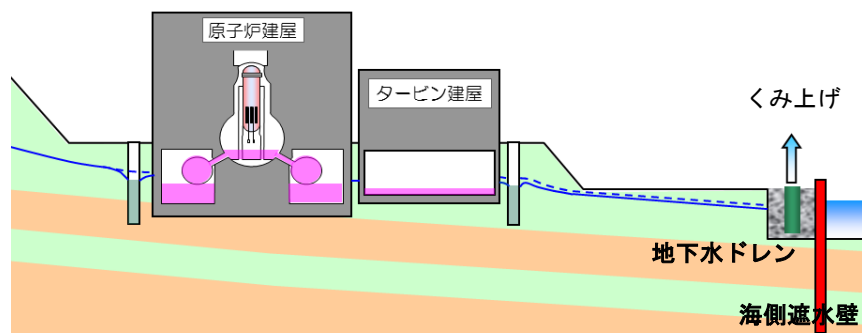


図-2 地下水ドレン位置図

別冊 9

放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設に係る補足説明

I 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設の構造強度及び耐震性について

放射性液体廃棄物処理設備等を構成する設備の構造強度及び耐震性等の評価結果のうち、設備の代表性を考慮し許容値に対する裕度が小さい設備に対して、計算手順を示し、評価の妥当性を示す。

1. 多核種除去設備，高性能容器及びクレーン類

強度評価は必要肉厚に対する裕度が小さい処理カラム及び吊り耳の強度評価を行ったHIC，耐震性評価は安定モーメントに対する裕度が小さい処理済水移送ポンプ，バッチ処理タンクスキッド，HIC，処理カラム交換用クレーン及び一次一般膜応力に対する裕度が小さい処理カラムを代表設備とし、評価手順を以下に示す。

1.1 基本方針

1.1.1 構造強度評価の基本方針

多核種除去設備等を構成する機器は、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」において、廃棄物処理設備に相当するクラス3機器と位置付けられる。この適用規格は、「JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」（以下、「設計・建設規格」という。）で規定される。ただし、福島第一原子力発電所構内の作業環境，機器等の設置環境等が通常時と大幅に異なっているため，設計・建設規格の要求を全て満足して設計・製作・検査を行うことは困難である。

従って，可能な限り設計・建設規格のクラス3機器相当の設計・製作・検査を行うものの，JIS等の規格に適合した一般産業品の機器等や，設計・建設規格に定める材料と同等の信頼性を有する材料・施工方法等を採用する。

1.1.2 耐震性評価の基本方針

多核種除去設備等を構成する機器のうち放射性物質を内包するものは、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」のBクラス相当の設備と位置づけられ，耐震性を評価するにあたっては，「JEAC4601 原子力発電所耐震設計技術規程」（以下，「耐震設計技術規程」という。）等に準用する。

また，参考評価として，基準地震動S_s相当の水平震度に対して健全性が維持されることを確認する。

1.2 評価結果

1.2.1 ポンプ類

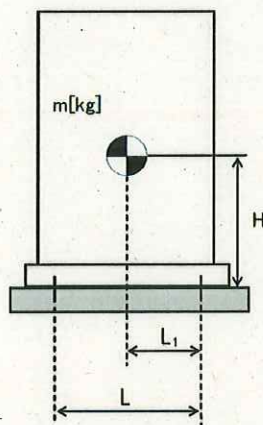
(1) 構造強度評価

ポンプは一般産業品とするため、設計・建設規格の要求には必ずしも適合しない。しかしながら、以下により高い信頼性を確保した。

- ・ 公的規格に適合したポンプを選定する。
- ・ 耐腐食性（塩分対策）を有したポンプを選定する。
- ・ 試運転により、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認する。

(2) 耐震性評価（代表設備：処理済水移送ポンプ）

a. 基礎ボルトの強度評価耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した（表1）。



- L : 基礎ボルト間の水平方向距離(mm)
- m : 機器重量(kg)
- g : 重力加速度(9.80665m/s²)
- H : 据付面からの重心までの距離(mm)
- L_1 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離(mm)
- n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数(本)
- n : 基礎ボルトの本数(本)
- A_b : 基礎ボルトの軸断面積(mm²)
- C_H : 水平方向設計震度
耐震Bクラス相当 : 0.36
耐震Sクラス相当 : 0.80
- C_V : 鉛直方向設計震度
耐震Bクラス相当 : 0
耐震Sクラス相当 : 0

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{1}{L} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

$C_H = 0.36$ の場合 $F_b = -625\text{N} < 0$ よって、引張力は発生しない。

$C_H = 0.80$ の場合 $F_b = 1218\text{N}$

$$\text{基礎ボルトの引張応力} : \sigma_b = \frac{F_b}{n_f \times A_b}$$

$C_H = 0.36$ の場合 $\sigma_b = -1\text{MPa} < 0$ よって、引張応力は発生しない。

$C_H = 0.80$ の場合 $\sigma_b = 3\text{MPa}$

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } \quad \tau_b = 2 \text{ MPa}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } \quad \tau_b = 5 \text{ MPa}$$

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : f = \min(f_{to}, f_{ts})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F / \sqrt{3}$$

ここで、Fは日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設備運転温度（常温）における Sy 値、Su 値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

$$Sy : \text{表 8 より } -30^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C} : 245 \text{ MPa}$$

$$Su : \text{表 9 より } -30^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C} : 400 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(245, 0.7 \times 400) = 245 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容引張応力：

$$f = \min(f_{to}, f_{ts}) = (183, 253) = 183 \text{ MPa } (C_H=0.36 \text{ の場合})$$

$$f = \min(f_{to}, f_{ts}) = (183, 249) = 183 \text{ MPa } (C_H=0.80 \text{ の場合})$$

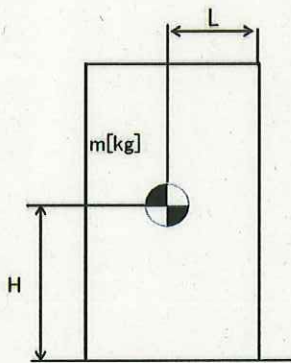
$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 183$$

$$\begin{aligned} f_{ts} &= 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau_b \\ &= 253 \text{ (} C_H=0.36 \text{ の場合)} \\ &= 249 \text{ (} C_H=0.80 \text{ の場合)} \end{aligned}$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F / \sqrt{3} = 141 \text{ MPa}$$

b. 転倒評価

地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらと比較することにより転倒評価を実施した。評価の結果、地震による転倒モーメントは自重による安定モーメントより小さくなることから、転倒しないことを確認した。また、地震による転倒モーメント>自重による安定モーメントとなるものについては、a. での計算により基礎ボルトの強度が確保されることから転倒しないことを確認した(表1)。



C_H : 水平方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0.36

耐震Sクラス相当 : 0.80

m : 機器重量(■ kg)

g : 重力加速度(9.80665m/s²)

H : 据付面からの重心までの距離(■ mm)

L : 転倒支点から機器重心までの距離(■ mm)

地震による転倒モーメント : $M_1 = m \times g \times C_H \times H$

$C_H = 0.36$ の場合 $M_1 = 8.30 \times 10^5 \text{N}\cdot\text{mm}$

$C_H = 0.80$ の場合 $M_1 = 1.90 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{mm}$

自重による安定モーメント : $M_2 = m \times g \times L = 1.10 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{mm}$

表1 : 処理済水移送ポンプ耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
処理済水移送ポンプ	本体	転倒	0.36	8.30×10^5	1.10×10^6	N・mm
	基礎ボルト	引張	0.36	-	-	MPa
		せん断	0.36	2	141	MPa
	本体	転倒	0.80	1.90×10^6	1.10×10^6	N・mm
	基礎ボルト	引張	0.80	3	183	MPa
		せん断	0.80	5	141	MPa

※引張評価の算出値「-」については、引張応力が作用していない。

1.2.2 タンク類, 吸着塔及び処理カラム

(1) 構造強度評価 (代表設備: 吸着塔 15, 16)

タンク類は, SUS316L もしくは炭素鋼 (ライニング付) とするが材料の調達において一般産業品とするため, 材料証明がなく, 設計・建設規格の要求には必ずしも適合しない。しかしながら, 以下により高い信頼性を確保した。

- ・工場にて溶接を行い高い品質を確保する。
- ・水張りによる溶接部の漏えい確認等を行う。

また, 吸着塔及び処理カラムは, SUS316L とするが材料の調達において一般産業品とするため, 材料証明がなく, 設計・建設規格の要求には必ずしも適合しない。しかしながら, 以下を考慮することで, 高い信頼性を確保した。

- ・公的規格に適合した一般産業品の SUS316L を用いて吸着塔, 処理カラムを製作する。
- ・溶接継手は, PT 検査, 運転圧による漏えい確認等を行う。
- ・工場にて溶接を行い高い品質を確保する。

なお, 吸着塔 15, 16 については, 設計・建設規格のクラス 3 容器に準じた設計とする。

a. スカート支持たて置円筒形容器

スカート支持たて置円筒形容器については, 設計・建設規格に準拠し, 板厚評価を実施した。評価の結果, 水頭圧 (開放型タンク), 最高使用圧力 (密閉型タンク) に耐えられることを確認した (表 2)。

(密閉型の場合)

① 胴板の必要肉厚

$$t = \frac{PD_i}{2S\eta - 1.2P}$$

- t : 胴の計算上必要な厚さ
Di : 胴の内径 (■■■■ mm)
P : 最高使用圧力 (■■ MPa)
S : 最高使用温度における材料の許容引張応力 (■■ MPa)
η : 長手継手の効率 (■■)

ただし, t の値は炭素鋼, 低合金鋼の場合は $t = 3.00$ [mm] 以上, その他の金属の場合は $t = 1.50$ [mm] 以上とする。

② 平板の厚さ

$$t = d \sqrt{\frac{2KP}{S}}$$

- t : 平板の計算上必要な厚さ
d : ボルト中心円の直径, 平板の径 (■■■■ mm)
P : 最高使用圧力 (■■ MPa)
S : 平板の許容引張応力 (■■ MPa)
K : 平板の取付け方法による係数 (■■■■)

③ 胴フランジの厚さ

$$t = \sqrt{\frac{6M_0}{\sigma_f(\pi C - nd_h)}}$$

M_0 : フランジに作用するモーメント (■■■■ N・mm)

σ_f : 最高使用温度におけるフランジの許容引張応力(■■■■ MPa)

C : ボルト穴中心円の直径 (■■■■ mm)

n : ボルト本数 (■■■■ 本)

d_h : ボルト穴直径 (■■■■ mm)

表 2 : 吸着塔 15, 16 板厚評価結果

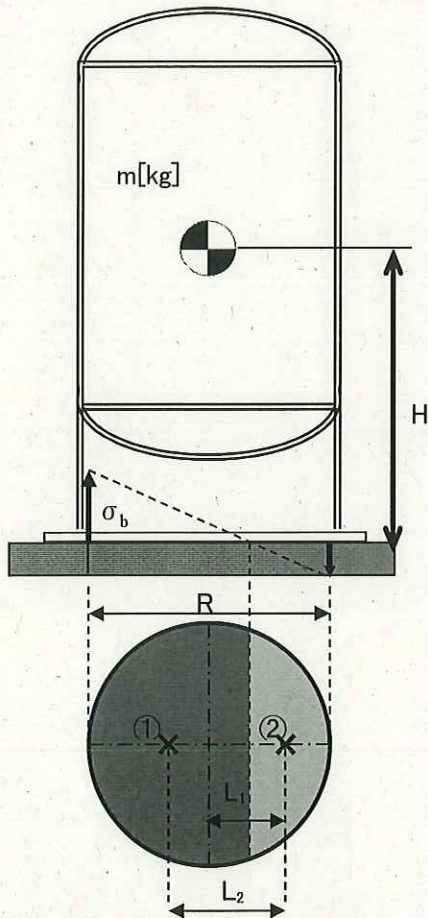
機器名称	評価部位	必要肉厚[mm]	実厚[mm]
吸着塔 15, 16	胴板	3.64	10.73
	平板 (蓋)	47.07	54.00
	平板 (底)	54.57	58.05
	胴フランジ	28.12	56.00

(2)耐震性評価 (代表設備：吸着塔 15, 16)

a. スカート支持たて置円筒形容器

(a) 基礎ボルトの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した (表3)。



- m : 機器重量 (■■■■ kg)
- g : 重力加速度 (9.80665m/s²)
- H : 据付面からの重心までの距離 (■■■■ mm)
- n : 基礎ボルトの本数 (■本)
- A_b : 基礎ボルトの軸断面積 (■■■■ mm²)
- C_H : 水平方向設計震度
耐震Bクラス相当 : 0.36
耐震Sクラス相当 : 0.80
- C_V : 鉛直方向設計震度
耐震Bクラス相当 : 0
耐震Sクラス相当 : 0
- C_t : 中立軸の位置より求める係数
 $C_H = 0.36$ において : ■■■■
 $C_H = 0.80$ において : ■■■■
- σ_b : 基礎ボルトに作用する引張応力
- F_t : 基礎ボルトに作用する引張力
- ① : 基礎ボルトに作用する引張力の作用点
- ② : 基礎部に作用する圧縮力の作用点
- R : 基礎ボルトのピッチ円直径 (■■■■ mm)
- L_1 : 基礎ボルトのピッチ円中心から②までの距離
 $C_H = 0.36$ において : ■■■■ mm
 $C_H = 0.80$ において : ■■■■ mm
- L_2 : ①から②までの距離
 $C_H = 0.36$ において : ■■■■ mm
 $C_H = 0.80$ において : ■■■■ mm

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_t = \frac{1}{L_2} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

$C_H = 0.36$ の場合 $F_t = 10012 \text{ N}$

$C_H = 0.80$ の場合 $F_t = 53335 \text{ N}$

$$\text{基礎ボルトに作用する引張応力} : \sigma_b = \frac{2\pi \times F_t}{n \times A_b \times C_t}$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } \sigma_b = 9\text{MPa}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } \sigma_b = 44\text{MPa}$$

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$

$$C_H = 0.36 \text{ の場合 } \tau_b = 6\text{MPa}$$

$$C_H = 0.80 \text{ の場合 } \tau_b = 13\text{MPa}$$

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : f = \min(f_{to}, f_{ts})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F / \sqrt{3}$$

ここで、Fは日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設計温度 \blacksquare °Cにおける Sy 値、Su 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

$$Sy : \text{表 8 より } 40^\circ\text{C} : 215\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 203 \text{ MPa}$$

$$Sy = 215 - (215 - 203) \times (\blacksquare - 40) / (75 - 40) = 211 \text{ MPa}$$

$$Su : \text{表 9 より } 40^\circ\text{C} : 400\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 381\text{MPa}$$

$$Su = 400 - (400 - 381) \times (\blacksquare - 40) / (75 - 40) = 276 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(211, 276) = 211 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容引張応力 :

$$f = \min(f_{to}, f_{ts}) = \min(158, 212) = 158 \text{ MPa } (C_H=0.36 \text{ の場合})$$

$$f = \min(f_{to}, f_{ts}) = \min(158, 201) = 158 \text{ MPa } (C_H=0.80 \text{ の場合})$$

$$f_{to} = F/2 * 1.5 = 158$$

$$\begin{aligned} f_{ts} &= 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau_b \\ &= 212 \text{ (} C_H=0.36 \text{ の場合)} \\ &= 201 \text{ (} C_H=0.80 \text{ の場合)} \end{aligned}$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F / \sqrt{3} = 121 \text{ MPa}$$

(b) 胴板の強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して、胴板の強度評価を実施した。

一次一般膜応力 σ_0 を下記の通り評価し、許容値を下回ることを確認した(表3)。

$$\sigma_0 = \text{Max}\{\sigma_{0t}, \sigma_{0c}\}$$

$C_H=0.36$ の場合 27 MPa

$C_H=0.80$ の場合 27 MPa

$$\sigma_{0t} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_\phi + \sigma_{xt} + \sqrt{(\sigma_\phi - \sigma_{xt})^2 + 4 \cdot \tau^2} \right\}$$

$C_H=0.36$ の場合 27 MPa

$C_H=0.80$ の場合 27 MPa

$$\sigma_{0c} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_\phi + \sigma_{xc} + \sqrt{(\sigma_\phi - \sigma_{xc})^2 + 4 \cdot \tau^2} \right\}$$

$\sigma_{xc} < 0$ となるため評価不要

σ_{0t} : 一次一般膜応力 (引張側)

σ_{0c} : 一次一般膜応力 (圧縮側)

σ_ϕ : 胴の周方向応力の和

$C_H=0.36$ の場合 ■ MPa

$C_H=0.80$ の場合 ■ MPa

σ_{xt} : 胴の軸方向応力の和 (引張側)

$C_H=0.36$ の場合 ■ MPa

$C_H=0.80$ の場合 ■ MPa

σ_{xc} : 胴の軸方向応力の和 (圧縮側)

$C_H=0.36$ の場合 ■ MPa

$C_H=0.80$ の場合 ■ MPa

τ : 地震により胴に生じるせん断応力

$C_H=0.36$ の場合 ■ MPa

$C_H=0.80$ の場合 ■ MPa

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{胴板一次一般膜応力の許容応力} : \sigma = \text{Min}(S_y, 0.6 \cdot S_u)$$

ここで、 σ は日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設計温度 ■°C における S_y 値及び S_u 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

S_y : 表 9 より 40°C : 490MPa、75°C : 457 MPa

$$S_y = 457 + (490 - 457) \times (75 - \text{■}) / (75 - 40) = 471 \text{ MPa}$$

S_u : 表 8 より 40°C : 325MPa、75°C : 305MPa

$$S_u = 305 + (325 - 305) \times (75 - \text{■}) / (75 - 40) = 313 \text{ MPa}$$

$$\text{胴板一次一般膜応力の許容応力} : \sigma = \text{Min}(S_y, 0.6 \cdot S_u)$$

$$= \text{Min}(471, 282) = 282 \text{ MPa}$$

(c) スカートの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して、スカートの強度評価を実施した。

組合せ応力 σ_s を下記の通り評価し、許容値を下回ることを確認した(表 3)。

$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

$C_H=0.36$ の場合 7 MPa

$C_H=0.80$ の場合 14 MPa

σ_1 : スカートの質量による軸方向応力

$C_H=0.36$ の場合 \blacksquare MPa

$C_H=0.80$ の場合 \blacksquare MPa

σ_2 : スカートの鉛直方向地震による軸方向応力

$C_H=0.36$ の場合 \blacksquare MPa

$C_H=0.80$ の場合 \blacksquare MPa

σ_3 : スカートの曲げモーメントによる軸方向応力

$C_H=0.36$ の場合 \blacksquare MPa

$C_H=0.80$ の場合 \blacksquare MPa

τ : 地震によるスカートに生じるせん断応力

$C_H=0.36$ の場合 \blacksquare MPa

$C_H=0.80$ の場合 \blacksquare MPa

また、許容応力は、以下の式で設定した。

スカート組合せ応力の許容応力 : $\sigma = F$

ここで、 σ は日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設計温度 \blacksquare °C における S_y 値及び S_u 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min(S_y, 0.7 \cdot S_u)$$

S_y : 表 8 より 40°C : 315MPa、75°C : 296 MPa

$$S_y = 315 - (315 - 296) \times (\blacksquare - 40) / (75 - 40) = 309 \text{ MPa}$$

S_u : 表 9 より 40°C : 490MPa、75°C : 457MPa

$$S_u = 490 + (490 - 457) \times (\blacksquare - 40) / (75 - 40) = 480 \text{ MPa}$$

従って、 $F = \min(S_y, 0.7 \cdot S_u) = \min(309, 336) = 309 \text{ MPa}$

スカート組合せ応力の許容応力 : $\sigma_s = F = 309 \text{ MPa}$

また、座屈評価を下記の式により行い、スカートに座屈が発生しないことを確認した(表 3)。

$$\frac{\eta \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{f_c} + \frac{\eta \cdot \sigma_3}{f_b} \leq 1$$

$C_H=0.36$ の場合 0.03
 $C_H=0.80$ の場合 0.05

σ_1 : スカートの質量による軸方向応力

$C_H=0.36$ の場合 ■ MPa

$C_H=0.80$ の場合 ■ MPa

σ_2 : スカートの鉛直方向地震による軸方向応力

$C_H=0.36$ の場合 ■ MPa

$C_H=0.80$ の場合 ■ MPa

σ_3 : スカートの曲げモーメントによる軸方向応力

$C_H=0.36$ の場合 ■ MPa

$C_H=0.80$ の場合 ■ MPa

f_c : 軸圧縮荷重に対する許容座屈応力 ■ MPa

f_b : 曲げモーメントに対する許容座屈応力 ■ MPa

η : 座屈応力に対する安全率 ■

表 3 : 吸着塔 15, 16 耐震評価結果

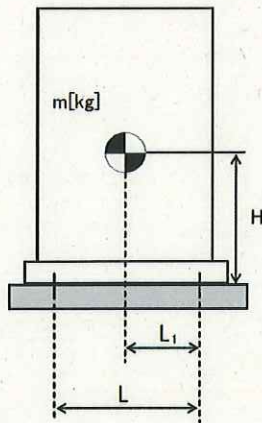
機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
吸着塔 15, 16	胴板	一次一般膜	0.36	27	282	MPa
	スカート	組合せ	0.36	7	309	MPa
		座屈	0.36	0.03	1	-
	基礎 ボルト	引張	0.36	9	158	MPa
		せん断	0.36	6	121	MPa
	胴板	一次一般膜	0.80	27	282	MPa
	スカート	組合せ	0.80	14	309	MPa
		座屈	0.80	0.05	1	-
	基礎 ボルト	引張	0.80	44	158	MPa
		せん断	0.80	13	121	MPa

1.2.3 スキッド

(1)耐震性評価 (代表設備：吸着塔 15, 16 スキッド)

a. 基礎ボルトの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した (表4)。



- L : 基礎ボルト間の水平方向距離(■■■■ mm)
- m : 機器重量(■■■■ kg)
- g : 重力加速度(9.80665m/s²)
- H : 据付面からの重心までの距離(■■■■ mm)
- L₁ : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離(■■■■ mm)
- n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数(■■本)
- n : 基礎ボルトの本数(■■本)
- A_b : 基礎ボルトの軸断面積(■■■■ mm²)
- C_H : 水平方向設計震度
耐震Bクラス相当 : 0.36
耐震Sクラス相当 : 0.80
- C_V : 鉛直方向設計震度
耐震Bクラス相当 : 0
耐震Sクラス相当 : 0

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{1}{L} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

C_H= 0.36 の場合 F_b= -61 N

C_H= 0.80 の場合 F_b= 3519 N

$$\text{基礎ボルトの引張応力} : \sigma_b = \frac{F_b}{n_f \times A_b}$$

C_H= 0.36 の場合 σ_b = -0.3 MPa < 0 よって、引張応力は発生しない。

C_H= 0.80 の場合 σ_b = 18MPa

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$

C_H= 0.36 の場合 τ_b = 5MPa

C_H= 0.80 の場合 τ_b = 11MPa

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{基礎ボルトの許容引張応力} : f = \min(f_{to}, f_{ts})$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F/\sqrt{3}$$

ここで、Fは日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より、設計温度 \blacksquare °Cにおける Sy 値、Su 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min(Sy, 0.7Su)$$

$$Sy : \text{表 8 より } 40^\circ\text{C} : 215\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 203 \text{ MPa}$$

$$Sy = 215 - (215 - 203) \times (\blacksquare - 40)/(75 - 40) = 211 \text{ MPa}$$

$$Su : \text{表 9 より } 40^\circ\text{C} : 400\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 381\text{MPa}$$

$$Su = 400 - (400 - 381) \times (\blacksquare - 40)/(75 - 40) = 394 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min(Sy, 0.7Su) = \min(211, 0.7 \times 394) = 211 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容引張応力：

$$f = \min(f_{to}, f_{ts}) = (158, 213) = 158 \text{ MPa } (C_H=0.36 \text{ の場合})$$

$$f = \min(f_{to}, f_{ts}) = (158, 204) = 158 \text{ MPa } (C_H=0.80 \text{ の場合})$$

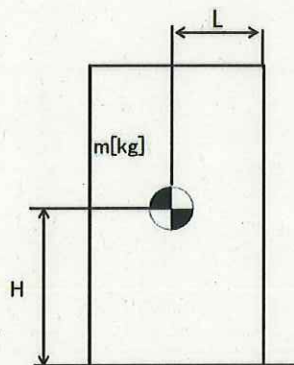
$$f_{to} = F/2 * 1.5 = 158$$

$$\begin{aligned} f_{ts} &= 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau_b \\ &= 213 \text{ (} C_H=0.36 \text{ の場合)} \\ &= 204 \text{ (} C_H=0.80 \text{ の場合)} \end{aligned}$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F/\sqrt{3} = 121 \text{ MPa}$$

b. 転倒評価

地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらと比較することにより転倒評価を実施した。評価の結果、地震による転倒モーメントは自重による安定モーメントより小さく、転倒しないことを確認した。また、地震による転倒モーメント > 自重による安定モーメントとなるものについては、a. での計算により基礎ボルトの強度が確保されることから転倒しないことを確認した（表4）。



C_H : 水平方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0.36

耐震Sクラス相当 : 0.80

m : 機器重量 (■■■■ kg)

g : 重力加速度 (9.80665m/s²)

H : 据付面からの重心までの距離 (■■■■ mm)

L : 転倒支点から機器重心までの距離 (■■■■ mm)

地震による転倒モーメント : $M_1 = m \times g \times C_H \times H$

$C_H = 0.36$ の場合 $M_1 = 9.139 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

$C_H = 0.80$ の場合 $M_1 = 2.031 \times 10^8 \text{N} \cdot \text{mm}$

自重による安定モーメント : $M_2 = m \times g \times L = 9.330 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

表4 : 吸着塔 15, 16 スキッド耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
吸着塔 15, 16 スキッド	本体	転倒	0.36	9.14×10^7	9.33×10^7	N・mm
	基礎 ボルト	引張	0.36	-	-	MPa
		せん断	0.36	5	121	MPa
	本体	転倒	0.80	2.03×10^8	9.33×10^7	N・mm
	基礎 ボルト	引張	0.80	18	158	MPa
		せん断	0.80	11	121	MPa

※引張評価の算出値「-」については、引張応力が作用していない。

1.2.4 高性能容器

(1) 構造強度評価

高性能容器本体は、ポリエチレン製の容器であり設計・建設規格の要求に適合するものではない。しかしながら、高性能容器（タイプ1）は、米国において低レベル放射性廃棄物の最終処分に使用されている容器であり、米国 NRC（Nuclear Regulatory Commission, 原子力規制委員会）から権限を委譲されたサウスカロライナ州健康環境局（S.C. Department of Health and Environmental Control）の認可を得ており、多数の使用実績がある。また、高性能容器（タイプ1）から更に落下に対する強度を向上させた高性能容器（タイプ2）を併せて使用する。

a. 重量に対する評価

・高性能容器（タイプ1）は設計収容重量約 4.5t で米国認可を受けており、多核種除去設備で使用する場合の収容物重量は最大 3.5t であることから設計収容重量に対して十分な裕度がある。高性能容器（タイプ2）は多核種除去設備で使用する場合の収容物重量を最大 3.2t としている。

・多核種除去設備で使用する場合の高性能容器の補強体等を含んだ総重量はタイプ1で約 5.2t、タイプ2で約 4.7t である。これに対し、設計総重量は裕度を考慮しタイプ1において 6.0t、タイプ2において 5.5t として、高性能容器の転倒評価及び吊り上げ時の吊り耳の構造強度確認を行っている。

高性能容器は、交換時にクレーンによる吊り上げ作業が発生するため、その際の吊り耳の強度評価を実施した。評価の結果、吊り耳の強度が確保されることを確認した（表5）。

(a) 高性能容器（タイプ1）

吊り耳に作用する引張応力：

$$\sigma_1 = \frac{m \times g}{A1 \times n} = 11 \text{ MPa}$$

但し、 $A1 = w1 \times t$

吊り耳に作用するせん断応力：

$$\tau_1 = \frac{m \times g}{A2 \times n} = 12 \text{ MPa}$$

但し、 $A2 = w2 \times t$

m : 機器重量 (■■■■ kg)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

n : 吊り耳考慮本数 (■■ 本)

w1 : 吊り耳幅 (■■■■ mm)

w2 : 吊り耳幅 (■■■■ mm)

t : 吊り耳厚さ (■■■■ mm)

A1 : 引張荷重が作用する吊り耳断面積 / 本

A2 : せん断荷重が作用する吊り耳断面積 / 本

σ_1 : 吊り耳に作用する引張応力 (MPa)

τ_1 : 吊り耳に作用するせん断応力 (MPa)

w3 : 吊り耳幅 (下端) (■■■■ mm)

a : 各すみ肉溶接のど厚 (■■■■ mm)

l : 各すみ肉溶接の長さ

吊り耳（溶接部）に作用するせん断応力：

$$\tau_2 = \frac{m \times g}{A_3 \times n} = 6 \text{ MPa}$$

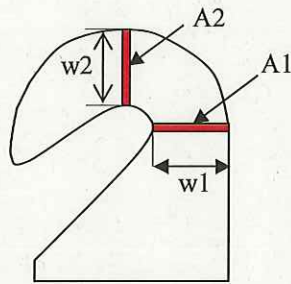
但し、 $A_3 = \sum (a_l)$

$$= (w_3 + t) \times a \times 2$$

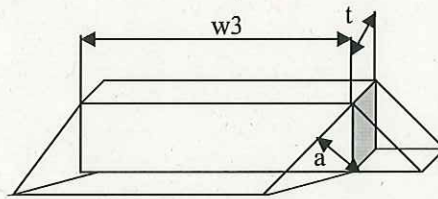
A_3 ：吊り耳溶接部の面積

τ_2 ：吊り耳溶接部に作用するせん断応力

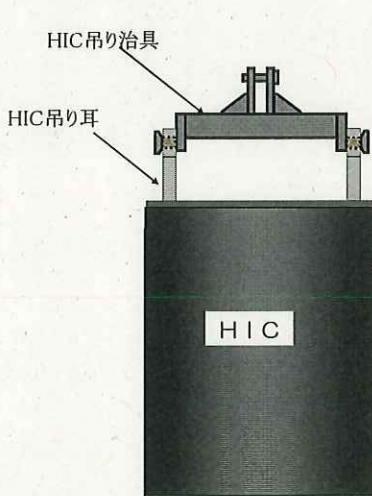
β ：溶接部係数 (■)



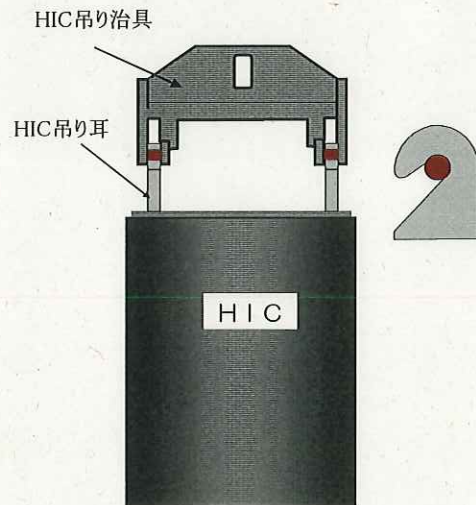
吊り耳



吊り耳（溶接部）



HIC 吊り上げ条件
(多核種除去設備設置エリア)



HIC 吊り上げ条件
(一時保管施設)

F 値は、日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part5 表 8 及び表 9 より、設計温度 (76.6°C) における Sy 値, Su 値 (SUS316L 相当) を線形補間した値を用い、下記式に設定した。

$$F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT))$$

$$S_y : \text{表 8 より } 75^\circ\text{C} : 154 \text{ MPa}, 100^\circ\text{C} : 143 \text{ MPa}$$

$$S_y = 143 + (154 - 143) \times (100 - 76.6) / (100 - 75) = 153 \text{ MPa}$$

$$S_y(RT) : \text{表 8 より 室温} : 175 \text{ MPa}$$

$$S_y(RT) = 175 \text{ MPa}$$

$$S_u : \text{表 9 より } 75^\circ\text{C} : 452 \text{ MPa}, 100^\circ\text{C} : 439 \text{ MPa}$$

$$S_u = 439 + (452 - 439) \times (100 - 76.6) / (100 - 75) = 451 \text{ MPa}$$

$$\text{従って、} F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)) = \min (206, 315, 175) = 175 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳の許容引張応力 } f_t = \frac{F}{1.5} = 116 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳の許容せん断応力 } f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 67 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳 (溶接部) の許容せん断応力 } f_{wt} = \frac{\beta \cdot F}{1.5\sqrt{3}} = 30 \text{ MPa}$$

(b) 高性能容器 (タイプ 2)

吊り耳に作用する引張応力:

$$\sigma_1 = \frac{m \times g}{A1 \times n} = 7 \text{ MPa}$$

但し、 $A1 = w1 \times t$

吊り耳に作用するせん断応力:

$$\tau_1 = \frac{m \times g}{A2 \times n} = 7 \text{ MPa}$$

但し、 $A2 = w2 \times t$

吊り耳 (溶接部) に作用するせん断応力:

$$\tau_2 = \frac{m \times g}{A3 \times n} = 5 \text{ MPa}$$

但し、 $A3 = \sum(al)$

$$= (w3+t) \times a \times 2$$

m : 機器重量 (■■■■ kg)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

n : 吊り耳考慮本数 (■■ 本)

w1 : 吊り耳幅 (■■■■ mm)

w2 : 吊り耳幅 (■■■■ mm)

t : 吊り耳厚さ (■■■■ mm)

A1 : 引張荷重が作用する吊り耳断面積 / 本

A2 : せん断荷重が作用する吊り耳断面積 / 本

σ_1 : 吊り耳に作用する引張応力 (MPa)

τ_1 : 吊り耳に作用するせん断応力 (MPa)

w3 : 吊り耳幅 (下端) (■■■■ mm)

a : 各すみ肉溶接のど厚 (■■■■ mm)

l : 各すみ肉溶接の長さ

A3 : 吊り耳溶接部の面積

τ_2 : 吊り耳溶接部に作用するせん断応力

β : 溶接部係数 (■■■■)

F 値は、日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part5 表 8 及び表 9 より、設計温度 (76.6°C) における Sy 値, Su 値 (SUS304 相当) を線形補間した値を用い、下記式に設定した。

$$F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT))$$

Sy : 表 8 より 75°C : 183MPa、100°C : 171 MPa

$$S_y = 171 + (183 - 171) \times (100 - 76.6) / (100 - 75) = 182 \text{ MPa}$$

Sy(RT) : 表 8 より 室温 : 205MPa

$$S_y(RT) = 205 \text{ MPa}$$

Su : 表 9 より 75°C : 466MPa、100°C : 441MPa

$$S_u = 441 + (466 - 441) \times (100 - 76.6) / (100 - 75) = 464 \text{ MPa}$$

従って、 $F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)) = \min (246, 325, 205) = 205 \text{ MPa}$

$$\text{吊り耳の許容引張応力} \quad f_t = \frac{F}{1.5} = 136 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳の許容せん断応力} \quad f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = 78 \text{ MPa}$$

$$\text{吊り耳（溶接部）の許容せん断応力} \quad f_{wt} = \frac{\beta \cdot F}{1.5\sqrt{3}} = 35$$

表5 高性能容器（タイプ1, 2）強度評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	算出値	許容値	単位
高性能容器 (タイプ1)	吊り耳	引張	11	116	MPa
		せん断	12	67	
	吊り耳 (溶接部)	せん断	6	30	
高性能容器 (タイプ2)	吊り耳	引張	7	136	MPa
		せん断	7	78	
	吊り耳 (溶接部)	せん断	5	35	

b. 圧力に対する評価

高性能容器（タイプ1）の外圧に対する設計圧力は25 kPaである。多核種除去設備で用いる高性能容器の外圧は屋外設置のため大気圧程度であることから、設計圧力を満足している。なお、高性能容器（タイプ2）については外圧に対する設計要求はないが、高性能容器（タイプ1）と同一の材質及び厚さであることから、同程度の強度を有していると考えられる。

一方、内圧に対しては、高性能容器（タイプ1）は、米国認可に当たり50kPaで試験を行い、容器に歪みがないことを確認している。

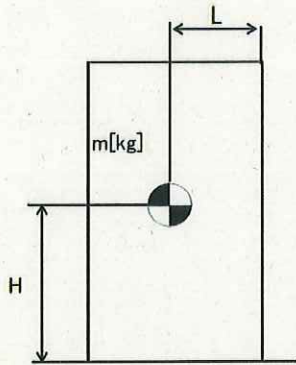
また、高性能容器の工場製作段階において、タイプ1, 2とも最大50kPaで試験を行い、容器に漏えいがないことを確認している。なお、これらの容器には、ベント機能を設けていることから、多核種除去設備で使用の際の内圧は、静水頭程度となるため、試験圧力を満足している。

(2)耐震性評価

a. 転倒評価

地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらと比較することにより転倒評価を行った。評価の結果、地震による転倒モーメントは自重による安定モーメントより小さく、転倒しないことを確認した(表6)。

なお、耐震Sクラス相当の転倒評価については、高性能容器内部水を満水(HIC全高)とし重心までの距離を算出した場合、高性能容器(タイプ2)の転倒モーメントが自重による安定モーメントより大きくなる。そのため、高性能容器内部水を運用上の最高液位とし重心までの距離を算出し転倒評価を行った。



C_H : 水平方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0.36

耐震Sクラス相当 : 0.80

m : 機器重量

タイプ1 : ■■■ kg

タイプ2 : ■■■ kg

g : 重力加速度(9.80665m/s²)

H : 据付面からの重心までの距離

タイプ1 : ■■■ mm^{*1} ($C_H=0.36$)

: ■■■ mm^{*2} ($C_H=0.80$)

タイプ2 : ■■■ mm^{*1} ($C_H=0.36$)

: ■■■ mm^{*2} ($C_H=0.80$)

※1 HIC 内部水を満水(HIC全高)とし重心までの距離を算出。

※2 HIC 内部水を運用上の最高液位とし重心までの距離を算出。

運用上の最高液位 : ■■■ mm (タイプ1)

■■■ mm (タイプ2)

L : 転倒支点から機器重心までの距離

タイプ1 : ■■■ mm

タイプ2 : ■■■ mm

地震による転倒モーメント： $M_1 = m \times g \times C_H \times H$

(タイプ1)

$C_H = 0.36$ の場合 $M_1 = 2.04 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

$C_H = 0.80$ の場合 $M_1 = 4.19 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

(タイプ2)

$C_H = 0.36$ の場合 $M_1 = 1.91 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

$C_H = 0.80$ の場合 $M_1 = 3.84 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

自重による安定モーメント： $M_2 = m \times g \times L$

(タイプ1)

$M_2 = 4.56 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

(タイプ2)

$M_2 = 4.03 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{mm}$

表6 高性能容器評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
高性能容器 (タイプ1) (補強体付き)	本体	転倒	0.36	2.04×10^7	4.56×10^7	N・mm
			0.80	4.19×10^7		
高性能容器 (タイプ2) (補強体付き)	本体	転倒	0.36	1.91×10^7	4.03×10^7	N・mm
			0.80	3.84×10^7		

b. 滑動評価

一時保管施設（第二施設）貯蔵時の高性能容器について、地震時の水平荷重によるすべり力と接地面の摩擦力を比較することにより、滑動評価を実施した。評価の結果、地震時の水平荷重によるすべり力は、接地面の摩擦力より小さいことから、滑動しないことを確認した（表7）。なお、本評価は鋼製の補強体付き高性能容器をコンクリート製のボックスカルバート上に設置した際の評価であり、実際の高性能容器貯蔵時はボックスカルバート底面にゴム製の緩衝材を設置するため、滑動はさらに生じ難くなると考える。

地震時の水平荷重によるすべり力 : $F_L = C_H \times m \times g \rightarrow F_L / (m \times g) = C_H$

接地面の摩擦力 : $F_\mu = \mu \times m \times g \rightarrow F_\mu / (m \times g) = \mu$

m : 機器質量（タイプ1 : ■■■ kg, タイプ2 : ■■■ kg）

g : 重力加速度 (9.80665m/s²)

C_H : 水平方向設計震度 (0.36)

μ : 摩擦係数 (コンクリート/鉄 : ■■■)

表7 滑動評価結果

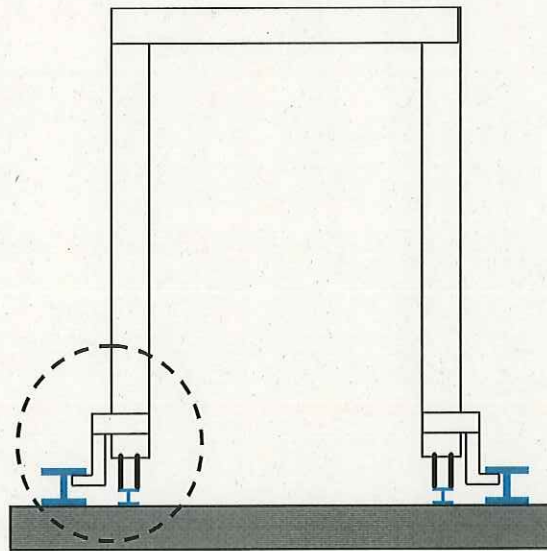
機器名称	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
高性能容器 (タイプ1及びタイプ2) (補強体付き)	滑動	0.36	0.36	0.40	—

1.2.5 クレーン類

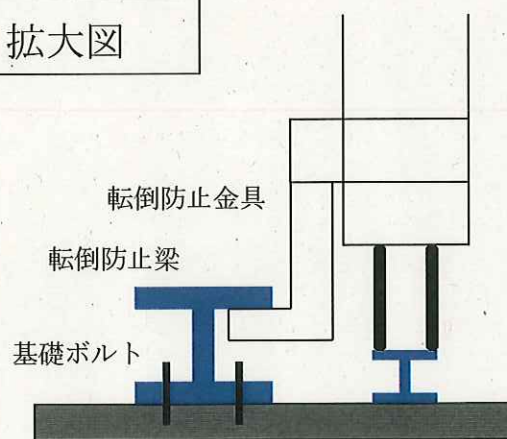
(1)耐震性評価（代表設備：処理カラム交換用クレーン）

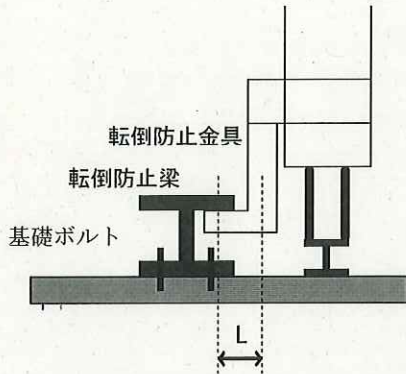
a. 基礎ボルト等の強度評価

耐震設計技術規程並びに「クレーン構造規格」（平成7年労働省告示第134号）の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルト・転倒防止金具・転倒防止梁の強度が確保されることを確認した（表8）。



拡大図





- L : 転倒防止金具の中心軸と転倒防止梁
接触点までの距離([] mm)
- g : 重力加速度(9.80665m/s²)
- Z₁ : 転倒防止金具の形状係数([] mm³)
- Z₂ : 転倒防止梁の形状係数 ([] mm³)
- d : ボルトの断面積([] mm²)
- l : 転倒防止梁のアンカー固定ピッチ ([] mm)
- C_H : 水平方向設計震度
耐震Bクラス相当 : 0.36
耐震Sクラス相当 : 0.80
- C_V : 鉛直方向設計震度
耐震Bクラス相当 : 0
耐震Sクラス相当 : 0

「b. 転倒評価」にて、地震による転倒モーメント > 自重による安定モーメントとなる場合について、評価を行う。

転倒防止金具に作用する浮き上がり荷重をFとして、

$$F = (\text{地震による転倒モーメント} - \text{自重による安定モーメント}) / (\text{クレーン両脚の距離})$$

$$= (22400 - 22500) / 4.9 = -20 \text{ kg (Bクラス評価の場合)} \quad \leftarrow \text{浮き上がり荷重は発生しない}$$

$$= (49600 - 22500) / 4.9 = 5600 \text{ kg (Sクラス評価の場合)}$$

転倒防止金具は片側に4個設置しているが、うち3個が転倒時に有効に作用するものとする。また、転倒防止梁の基礎ボルトは1箇所あたり4本で固定されている。

$$\text{転倒防止金具にかかる応力} : \sigma_1 = \frac{F \times g \times L}{3 \times Z_1}$$

C_H = 0.36 の場合 応力が発生しない

C_H = 0.80 の場合 $\sigma_1 = 32.5 \text{ N/mm}^2$

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{F}{3 \times 4}$$

C_H = 0.36 の場合 引張力が発生しない

C_H = 0.80 の場合 $F_b = 467 \text{ kg}$

$$\text{転倒防止用梁にかかる応力} : \sigma_2 = \frac{F \times g \times l}{3 \times 4 \times Z_2}$$

C_H = 0.36 の場合 応力が発生しない

$$C_{II} = 0.80 \text{ の場合 } \sigma_2 = 10.7 \text{ N/mm}^2$$

また、許容応力はクレーン構造規格に基づき以下の式で設定した。

$$\begin{aligned} \text{許容引張応力: } \sigma_{ta} &= \min (\text{降伏点応力}/1.5 , \text{引張強さ}/1.8) \\ &= \min (2400/1.5 , 4100/1.8) \\ &= \min (1600 , 2278) = 1600 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

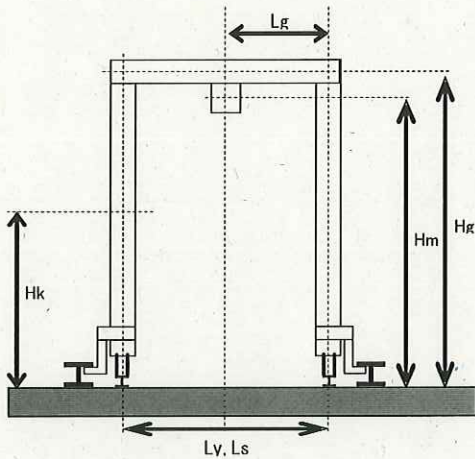
$$\begin{aligned} \text{基礎ボルトの許容引張力: } F_{Ba} &= \sigma_{ta} \times d \times 0.6 \\ &= 1435 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{許容圧縮応力: } \sigma_{ca} = \sigma_{ta}/1.15 = 1391 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{転倒防止金具, 転倒防止梁の許容曲げ応力: } \sigma_{bac} = 1.30 \times \sigma_{ca} = 1800 \text{ kg/cm}^2 = 175 \text{ N/mm}^2$$

b. 転倒評価

地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらを比較することにより転倒評価を実施した。評価の結果、地震による転倒モーメントが自重による安定モーメントより小さくなるものについては、転倒しないことを確認した。また、地震による転倒モーメントが自重による安定モーメントより大きくなるものについては、a. での計算により基礎ボルト・転倒防止金具・転倒防止梁の強度が確保されることから転倒しないことを確認した（表8）。



C_H : 水平方向設計震度

耐震Bクラス相当 : 0.36

耐震Sクラス相当 : 0.80

m : 機器重量

m_g : ガータ重量 (■■■■ kg)

m_k : 脚重量 (■■■■ kg)

m_m : 巻上機重量 (■■■■ kg)

m_y : 揺脚重量 (■■■■ kg)

m_s : サドル重量 (■■■■ kg)

g : 重力加速度 (9.80665m/s²)

H : 据付面からの重心までの距離

H_g : ガータ重心高さ (■■■■ mm)

H_k : 脚重心高さ (■■■■ mm)

H_m : 巻上機重心高さ (■■■■ mm)

L : 転倒支点から機器重心までの距離

L_g : ガータ重心距離 (■■■■ m)

L_y : 揺脚重心距離 (■■■■ mm)

L_s : サドル重心距離 (■■■■ mm)

地震による転倒モーメント : $M_1 = m \times C_H \times H$

$$M_{1g} = m_g \times H_g \times C_H$$

$$M_{1k} = m_k \times H_k \times C_H$$

$$M_{1m} = m_m \times H_m \times C_H$$

$$M_1 = M_{1g} + M_{1k} + M_{1m}$$

$C_H = 0.36$ の場合 $M_1 = 2.24 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}$

$C_H = 0.80$ の場合 $M_1 = 4.96 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}$

自重による安定モーメント： $M_2 = m \times L$

$$M_{2g} = m_g \times L_g$$

$$M_{2y} = m_y \times L_y$$

$$M_{2s} = m_s \times L_s$$

$$M_2 = M_{2g} + M_{2y} + M_{2s} = 2.25 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{m}$$

表8：クレーン類耐震評価結果

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
処理カラム 交換用クレーン	本体	転倒	0.36	2.24×10^4	2.25×10^4	kg・m
	基礎ボルト	引張	0.36	-	1435	kg
	転倒防止金具	変形	0.36	-	175	N/mm ²
	転倒防止梁	変形	0.36	-	175	N/mm ²
	本体	転倒	0.80	4.96×10^4	2.25×10^4	kg・m
	基礎ボルト	引張	0.80	467	1435	kg
	転倒防止金具	変形	0.80	32.5	175	N/mm ²
	転倒防止梁	変形	0.80	10.7	175	N/mm ²

※ 算出値「-」については、引張荷重・応力が作用していない。

1.2.6 配管

(1) 構造強度評価

a. 配管（鋼管）

配管（鋼管）はステンレスまたは炭素鋼の一般産業品とするため、設計・建設規格の要求には必ずしも適合しない。しかしながら、以下により高い信頼性を確保する。

- ・ 公的規格に適合した配管（鋼管）を選定する。
- ・ 溶接継手は、運転圧による漏えい確認もしくは代替検査を行う。
- ・ 可能な限り工場にて溶接を行い、現地での溶接作業を少なくする。

また、配管（鋼管）には保温材を取り付け凍結防止対策を施す。

b. 配管（ポリエチレン管）

配管（ポリエチレン管）は鋼材ではなく、一般産業品であるため、設計・建設規格の要求に適合するものではない。しかしながら、配管（ポリエチレン管）は、一般に耐食性、電気特性（耐電気腐食）、耐薬品性を有しており、鋼管と同等の信頼性を有している。また、以下により高い信頼性を確保する。

- ・日本水道協会規格に適合したポリエチレン管を採用する。
- ・継手は、可能な限り融着構造とする。

また、配管（ポリエチレン管）には保温材を取り付け凍結防止対策を施す。なお、本対策は、配管（ポリエチレン管）の紫外線劣化対策を兼ねる。

c. 配管（耐圧ホース）

配管（耐圧ホース）は鋼材ではなく、一般産業品であるため、設計・建設規格の要求に適合するものではない。しかしながら、以下により高い信頼性を確保する。

- ・耐圧ホースで発生した過去の不適合のうち、チガヤによる耐圧ホースの貫通に関してはチガヤが生息する箇所においては鉄板敷き等の対策を施す。
- ・継手金属と樹脂の結合部（カシメ部）の外れ防止対策として、結合部に外れ防止金具を装着する。
- ・通水等による漏えい確認を行う。

また、配管（耐圧ホース）には保温材を取り付け凍結防止対策を施す。

(2)耐震性評価

a. 配管（鋼管）

配管（鋼管）は、原子力発電所の耐震設計に用いられている定ピッチスパン法等によりサポートスパンを確保する。

b. 配管（ポリエチレン管）

配管（ポリエチレン管）は、可撓性を有しており地震により有意な応力は発生しない。

c. 配管（耐圧ホース）

配管（耐圧ホース）は、可撓性を有しており地震により有意な応力は発生しない。

2. 増設多核種除去設備

強度評価は必要肉厚に対する裕度が小さい共沈タンクの強度評価を行った。

耐震性評価は許容応力に対する裕度が小さいブースターポンプ1，出口フィルタ及び増設多核種除去設備入口弁スキッドを代表設備とし、評価手順を以下に示す。

2.1 基本方針

2.1.1 構造強度評価の基本方針

増設多核種除去設備等を構成する主要な機器は、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」において、廃棄物処理設備に相当すると位置づけられる。これに対する適用規格は、設計・建設規格で規定され、機器区分クラス3の規定を適用することを基本とする。また、一部の機器が海外製等の理由により設計・建設規格の適用が困難な機器については、設計・建設規格適用品と同等の構造強度を有することを基本とする。

なお、クラス3機器に該当しないその他の機器については、JIS等規格適合品を用いる。

2.1.2 耐震性評価の基本方針

増設多核種除去設備等を構成する機器のうち放射性物質を内包するものは、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」のBクラス相当の設備と位置づけられ、耐震性を評価するにあたっては、耐震設計技術規程等に準拠する。

2.2 評価結果

2.2.1 構造強度評価（代表設備：共沈タンク）

設計・建設規格に準拠し、板厚評価を実施した。評価の結果、必要厚さを満足していることを確認した（表9）。

(1) 胴板の厚さ

開放タンクの胴に必要な厚さは、次に掲げる値のうちいずれか大きい値とする。

a. 規格上必要な最小厚さ： t_1

炭素鋼板又は低合金鋼板で作られた場合は3mm，その他の材料で作られた場合は1.50mmとする。

b. 胴の計算上必要な厚さ： t_2

$$t_2 = \frac{D_i \cdot H \cdot \rho}{0.204 \cdot S \cdot \eta}$$
$$= 0.39 \text{ (mm)}$$

t_2 : 必要厚さ

D_i : 胴の内径 (■ m)

H : 水頭 (■ m)

ρ : 液体の比重 (■)

S : 許容引張り応力 (■ MPa)

η : 継手効率 (■)

(2) 下部鏡板の厚さ

さら形鏡板の場合で、中低面に圧力を受ける物については、下記式により計算した値以上の厚さとする。

$$t = \frac{P \cdot R \cdot W}{2S \cdot \eta - 0.2P}$$
$$= 0.54 \text{ mm}$$

t : 必要厚さ
P : 最高使用圧力 (■■■■ MPa)
R : 鏡板の中央部における内面の半径 (■■■■ mm)
W : さら型鏡板の形状による係数 (■■■■)
 η : 継手効率 (■■)
S : 許容引張り応力 (■■■■ MPa)

(3) 管台の厚さ

管台に必要な厚さは、次の(a)又は(b)に掲げる値のうちいずれか大きい値とする。

a. 管台 (液出口)

(a) 管台の計算上必要な厚さ : t_1

$$t_1 = \frac{D_i \cdot H \cdot \rho}{0.204 \cdot S \cdot \eta}$$
$$= 0.02 \text{ mm}$$

t_1 : 必要厚さ
 D_i : 管台の内径 (■■■■ m)
H : 水頭 (■■■■ m)
 ρ : 液体の比重 (■■■■)
S : 許容引張り応力 (■■■■ MPa)
 η : 継手効率 (■■)

(b) 規格上必要な厚さ : t_2

管台の外径に応じ、設計・建設規格 表 PVC-3980-1 より求めた管台の厚さとする。($t_2=3.5 \text{ mm}$)

b. 管台 (タイライン)

(a) 管台の計算上必要な厚さ : t_1

$$t_1 = \frac{D_i \cdot H \cdot \rho}{0.204 \cdot S \cdot \eta}$$
$$= 0.03 \text{ mm}$$

t_1 : 必要厚さ
 D_i : 管台の内径 (■■■■ m)
H : 水頭 (■■■■ m)
 ρ : 液体の比重 (■■■■)
S : 許容引張り応力 (■■■■ Pa)
 η : 継手効率 (■■)

(b) 規格上必要な厚さ : t_2

管台の外径に応じ、設計・建設規格 表 PVC-3980-1 より求めた管台の厚さとする。($t_2=3.5 \text{ mm}$)

c. 管台 (液入口)

(a) 管台の計算上必要な厚さ: t_1

$$t_1 = \frac{D_i \cdot H \cdot \rho}{0.204 \cdot S \cdot \eta}$$
$$= 0.01 \text{ mm}$$

t_1 : 必要厚さ

D_i : 管台の内径 ([] m)

H : 水頭 ([] m)

ρ : 液体の比重 ([])

S : 許容引張り応力 ([] MPa)

η : 継手効率 ([])

(b) 規格上必要な厚さ: t_2

管台の外径に応じ、設計・建設規格 表 PVC-3980-1 より求めた管台の厚さとする。 $(t_2=2.4 \text{ mm})$

d. 管台 (苛性ソーダ入口, 炭酸ソーダ入口, pH計スキッド行き)

(a) 管台の計算上必要な厚さ: t_1

$$t_1 = \frac{D_i \cdot H \cdot \rho}{0.204 \cdot S \cdot \eta}$$
$$= 0.01 \text{ mm}$$

t_1 : 必要厚さ

D_i : 管台の内径 ([] m)

H : 水頭 ([] m)

ρ : 液体の比重 ([])

S : 許容引張り応力 ([] MPa)

η : 継手効率 ([])

(b) 規格上必要な厚さ: t_2

管台の外径に応じ、設計・建設規格 表 PVC-3980-1 より求めた管台の厚さとする。 $(t_2=2.2 \text{ mm})$

e. 管台 (pH計スキッド戻り)

(a) 管台の計算上必要な厚さ: t_1

$$t_1 = \frac{D_i \cdot H \cdot \rho}{0.204 \cdot S \cdot \eta}$$
$$= 0.01 \text{ mm}$$

t_1 : 必要厚さ

D_i : 管台の内径 ([] m)

H : 水頭 ([] m)

ρ : 液体の比重 ([])

S : 許容引張り応力 ([] MPa)

η : 継手効率 ([])

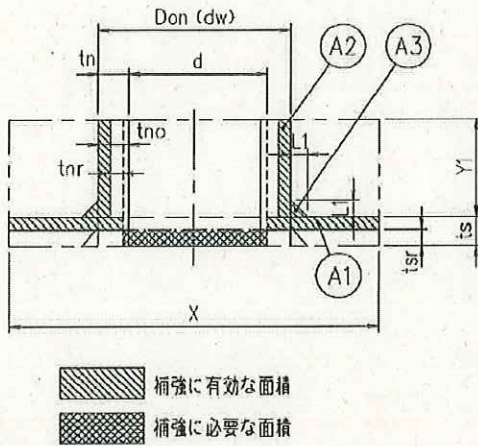
(b) 規格上必要な厚さ: t_2

管台の外径に応じ、設計・建設規格 表 PVC-3980-1 より求めた管台の厚さとする。 $(t_2=1.7 \text{ mm})$

(4) 胴の穴の補強計算

- a. 穴の補強の検討が必要となる管台（タイライン）について、補強に有効な範囲内にある補強に有効な面積が、補強に必要な面積より大きいことを確認する。

補強に有効な面積は、図の A1～A3 に掲げる断面積の和となる。



- Dw : 管台が取付く穴の径 (mm)
 d : 管台の内径 (mm)
 ts : 胴板の厚さ (mm)
 tn : 管台の最小厚さ (mm)
 tsr : 継ぎ目のない胴の計算上必要な厚さ (mm)
 tnr : 管台の計算上必要な厚さ (mm)
 X : 補強の有効範囲 (mm)
 Y1 : 補強の有効範囲 (mm)
 P : 最高使用圧力 (MPa)
 H : 水頭 (m)
 ρ : 液体の比重 ()
 S : 許容引張り応力 (MPa)
 Sn : 管台材の許容引張り応力 (MPa)
 F : 図 PVC-3161. 2-1 により求めた値 ()
 L1 : すみ肉溶接脚長 (mm)
 η : 継手効率 ()

$$A_1 = (\eta \times t_s - F \times t_{sr}) \times (X - d) - (1 - S_n / S) \times (\eta \times t_s - F \times t_{sr}) \times 2t_n$$

$$= 518.67 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 2(t_n - t_{nr}) \times Y_1 \times S_n / S = 80.96 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = L_1 \times L_1 = 64 \text{ mm}^2$$

補強に有効な総面積

$$A_0 = A_1 + A_2 + A_3 = 663.63 \text{ mm}^2$$

補強に必要な面積

$$A_r = d \times t_{sr} \times F + 2(1 - S_n / S) \times t_{sr} \times F \times t_n$$

$$= 40.95 \text{ mm}^2$$

b. 大きな穴の補強を要しない穴の最大径

大きな穴の補強を要しない最大径 d_j

$$d_j = D_i / 3 = 583.33 \text{ mm}$$

D_i : 胴の内径 (mm)
 D_w : 穴の径 (mm)

穴の径が、補強を要しない最大径を下回ったため、穴補強の検討は不要。

c. 溶接部の強度

次に掲げる荷重のうちいずれか小さい方が溶接部の負うべき荷重

$$W_1 = (A_2 + A_3 + A_4) \times S = 14496 \text{ N}$$

A_2 : 管台の部分の補強に有効な面積 (mm²)
 A_3 : すみ肉溶接の部分の補強に有効な面積 (mm²)
 A_4 : 強め板の部分の補強に有効な面積 (mm²)
 S : 胴板材の許容引張り応力 (MPa)

$$W_2 = (d_w \times t_{sr} - A_1) \times S = -47353 \text{ N}$$

d_w : 穴の径 (mm)
 t_{sr} : 継ぎ目のない胴の計算上必要な厚さ (mm)
 A_1 : 胴の部分の補強に有効な断面積 (mm²)
 S : 胴板材の許容引張り応力 (MPa)

$W < 0$ のため、溶接部の強度計算は不要。

表 9-1 共沈タンクの評価結果 (板厚)

機器名称	評価項目	必要厚さ (mm)	最小厚さ (mm)
共沈タンク A, B, C	胴板の厚さ	3.00	3.72
	下部鏡板の厚さ	0.54	2.16
	管台の厚さ (液出口)	3.50	3.75
	管台の厚さ (タイライン)	3.50	4.72
	管台の厚さ (液入口)	2.40	2.40
	管台の厚さ (苛性ソーダ入口)	2.20	2.20
	管台の厚さ (炭酸ソーダ入口)	2.20	2.20
	管台の厚さ (pH 計スキッド行き)	2.20	2.20
	管台の厚さ (pH 計スキッド戻り)	1.70	1.90

表9-2 共沈タンクの評価結果（胴の穴の補強計算）

機器名称	評価項目	評価結果	
共沈タンク A, B, C	胴（タイライン）	補強に必要な面積 (mm ²)	補強に有効な総面積 (mm ²)
		40.95	663.63
		大きな穴の補強を要し ない最大径 (mm)	穴の径 (mm)
		583.33	167.20
		溶接部の負うべき荷重 (N)	予想される破断箇所の 強さ (N)
		-47353	— ※1

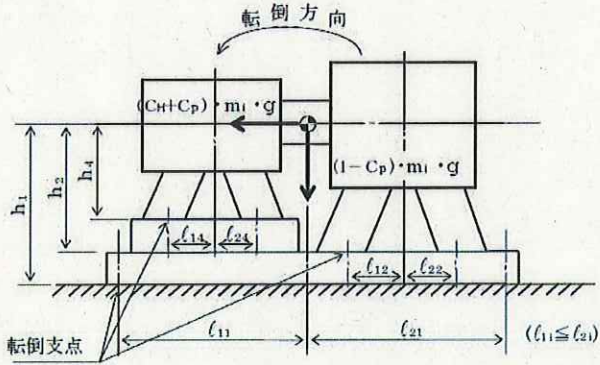
※1：溶接部の負うべき荷重が負であり、溶接部の強度計算は不要

2.2.2 耐震性評価

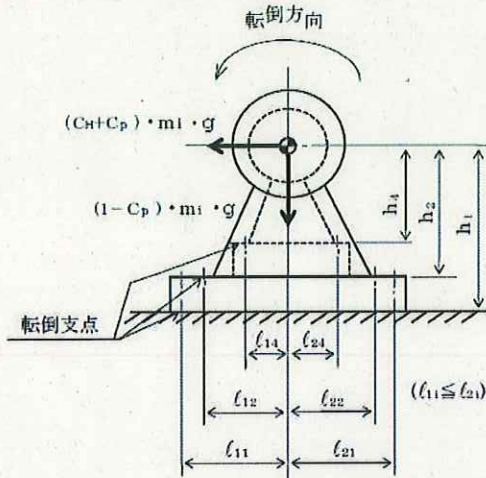
(1) ポンプ (代表設備: ブースターポンプ 1)

a. 基礎ボルトの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した (表 10)。



(軸直角方向転倒)



(軸方向転倒)

m_i : 運転時質量 (m_1 : ■、 m_2 : ■、 m_4 : ■ kg)

g : 重力加速度 (9.80665m/s²)

h_i : 据付面又は取付面から重心までの距離

(h_1 : ■、 h_2 : ■、 h_4 : ■ mm)

n_i : ボルト本数 (軸直角方向 ■本、軸方向 ■本)

N_p : ポンプ回転速度 (■ min⁻¹)

P : 原動機出力 (■ kW)

H_p : ポンプ予想最大両振幅 (■ μm)

M_{pi} : ポンプ回転により作用するモーメント

(軸直角方向 M_{p1} : ■, M_{p2} : ■, M_{p4} : ■ N・mm)

(軸方向 M_{p1} : ■, M_{p2} : ■, M_{p4} : ■ N・mm)

l_{1i} : 重心とボルト間の水平方向距離

(軸直角方向 l_{11} : ■、 l_{12} : ■、 l_{14} : ■ mm)

(軸方向 l_{11} : ■、 l_{12} : ■、 l_{14} : ■ mm)

l_{2i} : 重心とボルト間の水平方向距離

(軸直角方向 l_{21} : ■、 l_{22} : ■、 l_{24} : ■ mm)

(軸方向 l_{21} : ■、 l_{22} : ■、 l_{24} : ■ mm)

n_{fi} : 評価上引張力を受けるとして期待するボルトの本数 (軸直角方向 ■本、軸方向 ■本)

C_p : ポンプ振動による震度 (■)

d_i : ボルトの呼び径 (d_1 : ■、 d_2 : ■、 d_4 : ■ mm)

A_{bi} : ボルトの軸断面積 (A_{b1} : ■、 A_{b2} : ■、 A_{b4} : ■ mm²)

C_H : 水平方向設計震度 (0.36)

ボルトに作用する引張力 (1本あたり):

$$F_{bi} = \frac{(C_H + C_p) \times m_i \times g \times h_i + M_p - (1 - C_p) \times m_i \times g \times l_{1i}}{n_{fi} \times (l_{1i} + l_{2i})}$$

F_{b1} = 48.6 N (軸直角方向), F_{b1} = -218.1 N (軸方向)

F_{b2} = 146.5 N (軸直角方向), F_{b2} = 1181.9 N (軸方向)

F_{b3} = 112.8 N (軸直角方向), F_{b3} = 6.1 N (軸方向)

基礎ボルトに作用する引張応力： $\sigma_{bi} = \frac{F_{bi}}{A_{bi}}$

$\sigma_{b1} = 0.24\text{MPa}$ (軸直角方向), $\sigma_{b1} = -1.08\text{MPa}$ (軸方向)

$\sigma_{b2} = 1.29\text{MPa}$ (軸直角方向), $\sigma_{b2} = 10.45\text{MPa}$ (軸方向)

$\sigma_{b4} = 0.99\text{MPa}$ (軸直角方向), $\sigma_{b4} = 0.05\text{MPa}$ (軸方向)

基礎ボルトのせん断応力： $\tau_{bi} = \frac{(C_H + C_p) \times m_i \times g}{n_i \times A_{bi}}$

$\tau_{b1} = 2.58\text{MPa}$, $\tau_{b2} = 1.50\text{MPa}$, $\tau_{b4} = 1.22\text{MPa}$

また、許容応力は、以下の式で設定した。

ボルトの許容引張応力： $f_i = \min(f_{toi}, f_{tsi})$

ボルトの許容せん断応力： $f_{sbi} = F_i / \sqrt{3}$

ここで、Fは日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より Sy 値、Su 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$F = \min(1.35S_{yi}, 0.7S_{ui}, S_{yi}(40^\circ\text{C}))$

Sy1 : 表 8 より 40°C : 205MPa

Sy2 : 表 8 より 40°C : 205MPa、75°C : 183 MPa

$Sy2 = 205 - (205 - 183) \times (60-40)/(75-40) = 192 \text{ MPa}$

Sy4 : 表 8 より 40°C : 205MPa

Su1 : 表 9 より 40°C : 520MPa

Su2 : 表 9 より 40°C : 520MPa、75°C : 466MPa

$Su2 = 520 - (520 - 466) \times (60-40)/(75-40) = 489 \text{ MPa}$

Su4 : 表 9 より 40°C : 520MPa

従って、

$F1 = \min(1.35Sy1, 0.7Su1, Sy1(40^\circ\text{C})) = \min(276, 364, 205) = 205 \text{ MPa}$

$F2 = \min(1.35Sy2, 0.7Su2, Sy1(40^\circ\text{C})) = \min(259, 342, 205) = 205 \text{ MPa}$

$F4 = \min(1.35Sy4, 0.7Su4, Sy4(40^\circ\text{C})) = \min(276, 364, 205) = 205 \text{ MPa}$

$f_{toi} = F_i / 2 * 1.5$

$f_{t01} = 153 \text{ MPa}$, $f_{t02} = 153 \text{ MPa}$, $f_{t04} = 153 \text{ MPa}$

$$f_{tsi} = 1.4 \times f_{toi} - 1.6 \times \tau_{bi}$$

$$f_{ts1} = 210 \text{ MPa}, \quad f_{ts2} = 211 \text{ MPa}, \quad f_{ts4} = 212 \text{ MPa}$$

ボルトの許容引張応力：

$$f_1 = \min(f_{t01}, f_{ts1}) = \min(153, 210) = 153 \text{ MPa}$$

$$f_2 = \min(f_{t02}, f_{ts2}) = \min(153, 211) = 153 \text{ MPa}$$

$$f_4 = \min(f_{t04}, f_{ts4}) = \min(153, 212) = 153 \text{ MPa}$$

ボルトの許容せん断応力： $f_{sbi} = F_i / \sqrt{3}$

$$f_{sb1} : 118 \text{ MPa}, \quad f_{sb2} : 118 \text{ MPa}, \quad f_{sb4} : 118 \text{ MPa}$$

表 10 ブースターポンプ 1 耐震評価結果

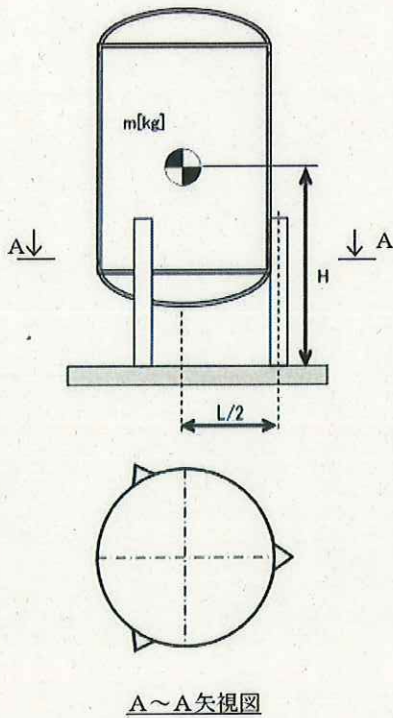
(単位：MPa)

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
基礎ボルト (i=1)	SUS304	引張り	$\sigma_{b1} = 1$	$\sigma_{b1} = 153$
		せん断	$\tau_{b1} = 3$	$\tau_{b1} = 118$
ポンプ取付ボルト (i=2)	SUS304	引張り	$\sigma_{b2} = 11$	$\sigma_{b2} = 153$
		せん断	$\tau_{b2} = 2$	$\tau_{b2} = 118$
原動機取付ボルト (i=4)	SUS304	引張り	$\sigma_{b4} = 1$	$\sigma_{b4} = 153$
		せん断	$\tau_{b4} = 2$	$\tau_{b4} = 118$

(2) フィルタ (代表設備：出口フィルタ)

a. 基礎ボルトの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した (表 1 1)。



C_H : 水平方向設計震度 (0.36)

C_V : 鉛直方向設計震度 (0)

m : 機器重量 (■ kg)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

L : 脚断面の図心の描く円の直径 (■ mm)

H : 据付面から重心までの距離 (■ mm)

A_b : 基礎ボルトの軸断面積 (■ mm²)

基礎ボルトに作用する引張応力 :

$$\sigma_b = \frac{1}{3 \times A_b} \left(\frac{4 \times m \times g \times C_H \times H}{L} - m \times g \times (1 - C_V) \right)$$

= 37 MPa

基礎ボルトに作用するせん断応力 :

$$\tau_b = \frac{1}{3 \times A_b} (m \times g \times C_H - 0.1 \times m \times g \times (1 - C_V))$$

= 3 MPa

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{ボルトの許容引張応力} : f = \min(f_{to}, f_{ts})$$

$$\text{ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F/\sqrt{3}$$

ここで、Fは日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より Sy 値、Su 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min(1.35S_y, 0.7S_u, S_y(40^\circ\text{C}))$$

$$S_y : \text{表 8 より } 40^\circ\text{C} : 205\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 183 \text{ MPa}$$

$$S_y = 205 - (205 - 183) \times (50-40)/(75-40) = 198 \text{ MPa}$$

$$S_u : \text{表 9 より } 40^\circ\text{C} : 520\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 466\text{MPa}$$

$$S_u = 520 - (520 - 466) \times (50-40)/(75-40) = 504 \text{ MPa}$$

従って、

$$F = \min(1.35S_y, 0.7S_u, S_y(40^\circ\text{C})) = \min(268, 353, 205) = 205 \text{ MPa}$$

$$f_{to} = F/2 \times 1.5 = 153 \text{ MPa}$$

$$f_{ts} = 1.4 \times f_{to} - 1.6 \times \tau$$

$$f_{ts} = 210 \text{ MPa}$$

基礎ボルトの許容引張応力：

$$f = \min(f_{to}, f_{ts}) = \min(153, 210) = 153 \text{ Mpa}$$

$$\text{基礎ボルトの許容せん断応力} : f_{sb} = F/\sqrt{3} = 118 \text{ MPa}$$

表 1 1 基礎ボルトの強度評価結果

(単位：MPa)

部 材	材 料	応 力	算 出 応 力	許 容 応 力
基 礎 ボ ル ト	SUS304	引 張 り	$\sigma_b=37$	153
		せん断	$\tau_b=3$	118

b. 脚の強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。組合せ応力 σ_s を下記の通り評価し、許容値を下回ることを確認した (表 1 2)。

$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

= 57 MPa

σ_s : 組合せ応力
 σ_1 : 脚の質量による軸方向応力 (■■■ MPa)
 σ_2 : 脚の鉛直方向地震による軸方向応力 (■ MPa)
 σ_3 : 脚の曲げモーメントによる軸方向応力 (■■■ MPa)
 τ : 地震による脚に生じるせん断応力 (■■■ MPa)

また、座屈評価を下記の式により行い、脚に座屈が発生しないことを確認した。

$$\frac{\eta \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{f_c} + \frac{\eta \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{f_b} \leq 1$$

$$\frac{\eta \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{f_c} + \frac{\eta \cdot \sigma_3}{f_b} = 0.29$$

σ_s : 組合せ応力
 σ_1 : 脚の質量による軸方向応力 (■■■ MPa)
 σ_2 : 脚の鉛直方向地震による軸方向応力 (■ MPa)
 σ_3 : 脚の曲げモーメントによる軸方向応力 (■■■ MPa)
 f_c : 軸圧縮加重に対する許容座屈応力 (■■■ MPa)
 f_b : 曲げモーメントに対する許容座屈応力 (■■■ MPa)
 η : 座屈応力に対する安全率 (■)

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{脚の許容応力} : f_t = 1.5 \times F / 1.5$$

ここで、F は日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 8 及び表 9 より Sy 値, Su 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \min (1.35S_y, 0.7S_u, S_y(40^\circ\text{C}))$$

$$S_y : \text{表 8 より } 40^\circ\text{C} : 205\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 183\text{MPa}$$

$$S_y = 205 - (205 - 183) \times (50-40)/(75-40) = 198\text{MPa}$$

$$S_u : \text{表 9 より } 40^\circ\text{C} : 520\text{MPa}, 75^\circ\text{C} : 466\text{MPa}$$

$$S_u = 520 - (520 - 466) \times (50-40)/(75-40) = 504\text{MPa}$$

従って、

$$F = \min(1.35S_{y1}, 0.7S_{u1}, S_{y1}(40^{\circ}\text{C})) = \min(268, 353, 205) = 205 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1.5 \times F / 1.5 = 205 \text{ Mpa}$$

表 1 2 脚の強度評価結果

(単位 : MPa)

部 材	材 料	応 力	算 出 応 力	許 容 応 力
脚	SUS304	組合せ	$\sigma_s = 57$	205
		座屈	0.29 (無次元)	1 (無次元)

c. 胴板の強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。一次一般膜応力 σ_0 を下記の通り評価し、許容値を下回ることを確認した (表 1 3)。

$$\sigma_0 = \text{Max}\{\sigma_{0\phi} + \sigma_{0x}\}$$

$$= 37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{0\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 7}$$

$$= 37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{0x} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x5} + \sigma_{x7}$$

$$= 21 \text{ MPa}$$

σ_0 : 一次一般膜応力

$\sigma_{0\phi}$: 一次一般膜応力 (周方向) (■ MPa)

σ_{0x} : 一次一般膜応力 (軸方向) (■ MPa)

σ_{x1} : 内圧による軸方向応力 (■ MPa)

$\sigma_{\phi 1}$: 内圧による周方向応力 (■ MPa)

σ_{x2} : 運転時質量による軸方向応力 (■ MPa)

σ_{x5} : 地震力により生じる転倒モーメントによる軸方向応力 (■ MPa)

σ_{x7} : 胴板の鉛直方向地震による軸方向応力 (■ MPa)

$\sigma_{\phi 7}$: 胴板の鉛直方向地震による周方向応力 (■ MPa)

また、許容応力は、以下の式で設定した。

$$\text{胴板一次一般膜応力の許容応力} : \sigma = \text{MAX}(\text{Min}(S_y, 0.6 \cdot S_u), 1.2 \cdot S)$$

ここで、 σ は日本機械学会 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 付属図表 Part 5 表 5, 表 8 及び表 9 より S_y 値, S_u 値を線形補間した値を用い、下記式にて設定した。

$$F = \max(\min(S_y, 0.6 \cdot S_u), 1.2 \cdot S)$$

$$S : \text{表 5 より } 40^{\circ}\text{C} : 111 \text{ MPa}, 75^{\circ}\text{C} : 108 \text{ MPa}$$

$$S = 111 - (111 - 108) \times (60 - 40) / (75 - 40) = 109 \text{ MPa}$$

Sy : 表 8 より 40°C : 175MPa, 75°C : 154 MPa
 $Sy = 175 - (175 - 154) \times (60-40)/(75-40) = 163 \text{ MPa}$

Su : 表 9 より 40°C : 480MPa, 75°C : 452MPa
 $Su = 480 - (480 - 452) \times (60-40)/(75-40) = 464 \text{ MPa}$

従って、

$$F = \max(\min(Sy, 0.6 \cdot Su), 1.2 \cdot S) = \max(\min(163, 278), 131) = 163 \text{ MPa}$$

表 1 3 胴板の強度評価結果

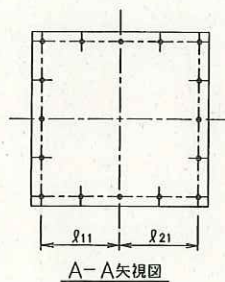
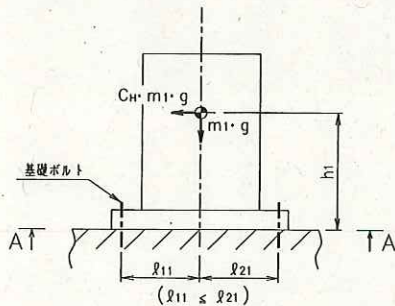
(単位 : MPa)

部 材	材 料	応 力	算 出 応 力	許 容 応 力
胴 板	SUS316L	一次一般膜	$\sigma_0=37$	163

(3) スキッド (代表設備 : 増設多核種除去設備入口弁スキッド)

a. 基礎ボルトの強度評価

耐震設計技術規程の強度評価方法に準拠して評価を実施した。評価の結果、基礎ボルトの強度が確保されることを確認した (表 1 4)。



m_1 : 機器重量 (■■■■ kg)

g : 重力加速度 (9.80665m/s²)

H : 据付面からの重心までの距離 (■■■■ mm)

l_{11} : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離 (■■■■ mm)

l_{21} : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離 (■■■■ mm)

$$(l_{11} \leq l_{21})$$

n_f : 引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 (■■本)

n : せん断力の作用する基礎ボルトの評価本数 (■■本)

A_b : 基礎ボルトの軸断面積 (■■■■ mm²)

C_H : 水平方向設計震度 (0.36)

C_v : 鉛直方向設計震度 (0)

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力 : } F_b = \frac{m_1 \times g \times C_H \times h_1 - m_1 \times g \times (1 - C_v) \times l_{11}}{l_{11} + l_{21}}$$

$$\text{基礎ボルトの引張応力 : } \sigma_{bi} = \frac{F_b}{n_f \times A_b}$$

$\sigma_{bi} = -48 \text{ MPa} < 0$ よって、引張応力は発生しない。

基礎ボルトのせん断応力：
$$\tau_{bi} = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$

$\tau_{bi} = 21 \text{ MPa}$ よって、許容応力以下である。なお、許容応力は後打ちアンカー耐力による値。

表 1 4 増設多核種除去設備入口弁スキッドの耐震評価結果

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
基礎ボルト ($i = 1$)	SS400	引張り	$\sigma_{bi} = -$	39 *
		せん断	$\tau_{bi} = 21$	49 *

注記 * : 後打ちアンカー耐力による。

3. 高性能多核種除去設備

強度評価は、必要肉厚に対する裕度が小さい供給タンク、多核種吸着塔1～20、前処理フィルタ1を代表設備とし、評価手順を以下に示す。

また、耐震性評価は、許容応力に対する裕度が小さい供給タンク、前処理フィルタ1、多核種吸着塔1～20、供給ポンプ、昇圧ポンプ1～4及び吸着塔ユニット1～4を代表設備とし、評価手順を以下に示す。

3. 高性能多核種除去設備では、高性能多核種除去設備建屋GL±0m=T.P. 36.4m^(※)とする。

(※) 震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への換算値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算している。

<換算式>T.P.=O.P.-1,436mm

3.1 基本方針

3.1.1 構造強度評価の基本方針

高性能多核種除去設備を構成する主要な機器は、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」において、廃棄物処理設備に相当すると位置付けられる。これに対する適用規格は、「JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」(以下、「設計・建設規格」という。)で規定され、機器区分クラス3の規定を適用することを基本とする。また、主要な機器のうち前処理フィルタ及び吸着塔(二相ステンレス製)は、「ASME Boiler and Pressure Vessel Code(Sec VIII)」に準拠し前処理フィルタ及び吸着塔廻りの鋼管(二相ステンレス製)は、「ASME B31.1 Power Piping」に準拠する。吸着塔(ステンレス製)、吸着塔廻りの鋼管(ステンレス製)は、設計・建設規格に準拠する。

なお、クラス3機器に該当しないその他の機器は、JIS等規格適合品等を用いることとし、ポリエチレン管は、JWWAまたはISO規格に準拠する。

また、構造強度に関連して経年劣化の影響を評価する観点から、原子力発電所での使用実績がない材料を使用する場合は、他産業での使用実績等を活用しつつ、必要に応じて試験等を行うことで、経年劣化等の影響についての評価を行う。

3.1.2 耐震性評価の基本方針

高性能多核種除去設備等を構成する機器のうち放射性物質を内包するものは、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」のBクラス相当の設備と位置づけられ、耐震性を評価するにあたっては、「JEAC4601 原子力発電所耐震設計技術規程」等に準拠する。

3.2 評価結果

3.2.1 構造強度評価

設計・建設規格に準拠し、板厚評価を実施した。評価の結果、必要厚さを満足していることを確認した。

3.2.1.1 タンク（代表設備：供給タンク）

3.2.1.1.1 評価箇所

強度評価箇所を図-1に示す。

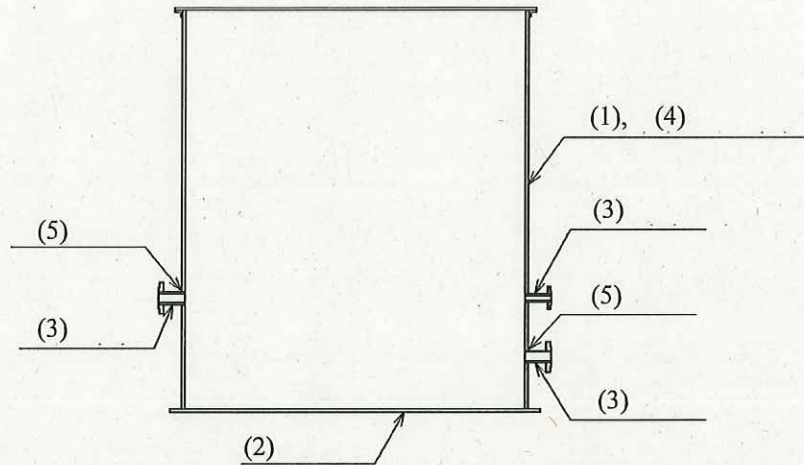


図-1 供給タンク，処理水タンク 概要図

図中の番号は，2.1.2及び2.1.3の番号に対応する。

3.2.1.1.2 評価結果

(1) 胴の厚さの評価

胴板名称			(1) 胴板
材料			SM400C
水頭	H	(m)	
最高使用温度			40
胴の内径	D_i	(m)	3.00
液体の比重	ρ		1.00
許容引張応力	S	(MPa)	100
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
必要厚さ	t_1	(mm)	
必要厚さ	t_2	(mm)	
必要厚さ	t_3	(mm)	
t_1, t_2, t_3 の大きい値	t	(mm)	3.00
呼び厚さ	t_{s0}	(mm)	9.00
最小厚さ	t_s	(mm)	6.57
評価： $t_s \geq t$ ，よって十分である。			

(2) 底板の厚さの評価

底板名称	(1) 底板		
材料	SM400C		
必要厚さ	t	(mm)	3.00
呼び厚さ	t _{bo}	(mm)	12.00
最小厚さ	t _b	(mm)	9.50
評価：t _b ≥ t, よって十分である。			

(3) 管台の厚さの評価

a. 管台 (RO 濃縮水出口)

管台名称	(1) RO濃縮水出口		
材料	STPT410-S		
水頭	H	(m)	
最高使用温度		(°C)	40
管台の内径	D _i	(m)	0.1023
液体の比重	ρ		1.00
許容引張応力	S	(MPa)	103
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
必要厚さ	t ₁	(mm)	
必要厚さ	t ₂	(mm)	
t ₁ , t ₂ の大きい値	t	(mm)	3.50
呼び厚さ	t _{no}	(mm)	6.00
最小厚さ	t _n	(mm)	4.25
評価：t _n ≥ t, よって十分である。			

b. 管台 (RO 濃縮水出口 (予備))

管台名称	(2) RO濃縮水出口 (予備)		
材料	STPT410-S		
水頭	H	(m)	
最高使用温度		(°C)	40
管台の内径	D _i	(m)	0.1023
液体の比重	ρ		1.00
許容引張応力	S	(MPa)	103
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
必要厚さ	t ₁	(mm)	
必要厚さ	t ₂	(mm)	
t ₁ , t ₂ の大きい値	t	(mm)	3.50
呼び厚さ	t _{no}	(mm)	6.00
最小厚さ	t _n	(mm)	4.25
評価：t _n ≥ t, よって十分である。			

c. 管台（液位計）

管台名称			(3) 液位計
材料			STPT410-S
水頭	H	(m)	
最高使用温度			40
管台の内径	D_i	(m)	0.0272
液体の比重	ρ		1.00
許容引張応力	S	(MPa)	103
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
必要厚さ	t_1	(mm)	
必要厚さ	t_2	(mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t	(mm)	1.70
呼び厚さ	t_{no}	(mm)	3.40
最小厚さ	t_n	(mm)	1.90
評価： $t_n \geq t$ ，よって十分である。			

(4) 胴の補強を要しない穴の最大径の評価

胴板名称	(1)胴板
評価：補強の計算を要する 85mm を超える穴の名称	RO 濃縮水出口(5) RO 濃縮水出口(予備)(5)

(5) 胴の穴の補強計算

a. 胴板 (RO 濃縮水出口)

部材名称		(1) RO濃縮水出口
胴板材料		SM400C
管台材料		STPT410-S
最高使用圧力	P (MPa)	0.05
最高使用温度	(°C)	40
胴板の許容引張応力	S _s (MPa)	100
管台の許容引張応力	S _n (MPa)	103
穴の径	d (mm)	105.80
管台が取り付く穴の径	d _w (mm)	
胴板の最小厚さ	t _s (mm)	6.57
管台の最小厚さ	t _n (mm)	4.25
胴板の継手効率	η	
係数	F	
胴の内径	D _i (mm)	3000.00
胴板の計算上必要な厚さ	t _{s r} (mm)	0.74
管台の計算上必要な厚さ	t _{n r} (mm)	0.03
穴の補強に必要な面積	A _r (mm ²)	77.56
補強の有効範囲	X ₁ (mm)	
補強の有効範囲	X ₂ (mm)	
補強の有効範囲	X (mm)	
補強の有効範囲	Y ₁ (mm)	
管台の外径	D _{o n} (mm)	
溶接寸法	L ₁ (mm)	
溶接寸法	L ₄ (mm)	
胴板の有効補強面積	A ₁ (mm ²)	
管台の有効補強面積	A ₂ (mm ²)	
すみ肉溶接部の有効補強面積	A ₃ (mm ²)	
補強に有効な総面積	A ₀ (mm ²)	743.7
評価: A ₀ > A _r , よって十分である。		

部材名称		(1) RO濃縮水出口
大きい穴の補強		
補強を要する穴の限界径	d _j (mm)	1000.00
評価: d ≤ d _j , よって大きい穴の補強計算は必要ない。		
溶接部にかかる荷重	W ₁ (N)	
溶接部にかかる荷重	W ₂ (N)	
溶接部の負うべき荷重	W (N)	-5.341 × 10 ⁴
評価: W < 0, よって溶接部の強度計算は必要ない。 以上より十分である。		

b. 胴板 (RO 濃縮水出口 (予備))

部材名称		(2) RO濃縮水出口 (予備)
胴板材料		SM400C
管台材料		STPT410-S
最高使用圧力	P (MPa)	0.05
最高使用温度	(°C)	40
胴板の許容引張応力	S _s (MPa)	100
管台の許容引張応力	S _n (MPa)	103
穴の径	d (mm)	105.80
管台が取り付く穴の径	d _w (mm)	
胴板の最小厚さ	t _s (mm)	6.57
管台の最小厚さ	t _n (mm)	4.25
胴板の継手効率	η	
係数	F	
胴の内径	D _i (mm)	3000.00
胴板の計算上必要な厚さ	t _{s r} (mm)	0.74
管台の計算上必要な厚さ	t _{n r} (mm)	0.03
穴の補強に必要な面積	A _r (mm ²)	77.56
補強の有効範囲	X ₁ (mm)	
補強の有効範囲	X ₂ (mm)	
補強の有効範囲	X (mm)	
補強の有効範囲	Y ₁ (mm)	
管台の外径	D _{o n} (mm)	
溶接寸法	L ₁ (mm)	
溶接寸法	L ₄ (mm)	
胴板の有効補強面積	A ₁ (mm ²)	
管台の有効補強面積	A ₂ (mm ²)	
すみ肉溶接部の有効補強面積	A ₃ (mm ²)	
補強に有効な総面積	A ₀ (mm ²)	743.7
評価: A ₀ > A _r , よって十分である。		

部材名称		(2) RO濃縮水出口 (予備)
大きい穴の補強		
補強を要する穴の限界径	d _j (mm)	1000.00
評価: d ≤ d _j , よって大きい穴の補強計算は必要ない。		
溶接部にかかる荷重	W ₁ (N)	
溶接部にかかる荷重	W ₂ (N)	
溶接部の負うべき荷重	W (N)	-5.341 × 10 ⁴
評価: W < 0, よって溶接部の強度計算は必要ない。 以上より十分である。		

3.2.1.1.3 評価結果まとめ

評価結果を表15に示す。必要厚さ等を満足しており、十分な構造強度を有すると評価している。

表15-1 供給タンクの評価結果（板厚）

機器名称	評価項目	必要厚さ (mm)	最小厚さ (mm)
供給タンク	(1) 胴板の厚さ	3.00	6.57
	(2) 底板の厚さ	3.00	9.50
	(3) 管台の厚さ (RO 濃縮水出口)	3.50	4.25
	(3) 管台の厚さ (RO 濃縮水出口 (予備))	3.50	4.25
	(3) 管台の厚さ (液位計)	1.70	1.90

表15-2 供給タンクの評価結果（胴板の補強要否確認）

機器名称	評価項目	補強を要し ない穴の最 大径 (mm)	穴の径 (mm)
供給タンク	(4) RO 濃縮水出口	85.00	85 以上
	(4) RO 濃縮水出口 (予備)	85.00	85 以上

表 1 5 - 3 供給タンクの評価結果 (胴の穴の補強計算)

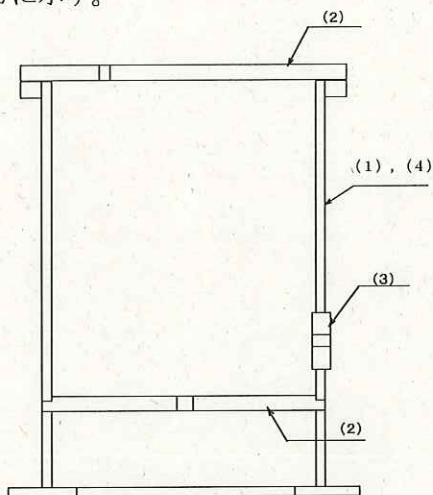
機器名称	評価項目	評価結果	
供給タンク	(5) 胴 (RO 濃縮水出口)	補強に必要な面積 (mm ²)	補強に有効な総面積 (mm ²)
		77.56	743.7
		大きな穴の補強計算を 要しない最大径 (mm)	穴の径 (mm)
		1000.00	105.80
		溶接部の負うべき荷重 (N)	予想される破断箇所の 強さ (N)
	-5.341×10 ⁴	— ※1	
	(5) 胴 (RO 濃縮水出口 (予備))	補強に必要な面積 (mm ²)	補強に有効な総面積 (mm ²)
		77.56	743.7
		大きな穴の補強計算を 要しない最大径 (mm)	穴の径 (mm)
		1000.00	105.80
溶接部の負うべき荷重 (N)		予想される破断箇所の 強さ (N)	
-5.341×10 ⁴	— ※1		

※1 溶接部の負うべき荷重が負であり、溶接部の強度計算は不要

3.2.1.2 前処理フィルタ（代表設備：前処理フィルタ 1）

3.2.1.2.1 評価箇所

強度評価箇所を図-2に示す。



前処理フィルタ 1

図-2 前処理フィルタ 概要図

図中の番号は、3.2.1.2.2, 3.2.1.2.3 の番号に対応する。

3.2.1.2.2 評価結果

(1) 胴の厚さの評価

胴板名称			(1) 胴板
材料			ASME SA516 Gr.70
最高使用圧力	P	(MPa)	1.03
最高使用温度		(°C)	40
胴の内径	D _i	(mm)	901.70
許容引張応力	S	(MPa)	138
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
必要厚さ	t ₁	(mm)	
必要厚さ	t ₂	(mm)	
t ₁ , t ₂ の大きい値	t	(mm)	4.84
呼び厚さ	t _{s o}	(mm)	6.35
最小厚さ	t _s	(mm)	5.84
評価：t _s ≥ t, よって十分である。			

(2) 平板の厚さの評価

a. 上部平板

平板名称	(1) 上部平板	
平板の取付け方法		
平板の穴の有無	有り	
平板の径	d	(mm)
穴の径	d _h	(mm)
評価: $d_h \leq d/2$, よってPVD-3322(1)b.により計算を行う。		

平板名称	(1) 上部平板	
材料	ASME SA516 Gr. 70	
最高使用圧力	P	(MPa)
最高使用温度		(°C)
許容引張応力	S	(MPa)
取付け方法による係数	K	
平板の径	d	(mm)
必要厚さ	t	(mm)
呼び厚さ	t _{po}	(mm)
最小厚さ	t _p	(mm)
評価: $t_p \geq t$, よって十分である。		

b. 下部平板

平板名称	(2) 下部平板	
平板の取付け方法		
平板の穴の有無	有り	
溶接部の寸法	t _{w1}	(mm)
溶接部の寸法	t _{w2}	(mm)
胴又は管の計算上必要な厚さ	t _{sr}	(mm)
胴又は管の最小厚さ	t _s	(mm)
	t _{w1} + t _{w2}	(mm)
	2 · t _s	(mm)
	1.25 · t _{sr}	(mm)
平板の径	d	(mm)
穴の径	d _h	(mm)
評価: $t_{w1} + t_{w2} \geq 2 \cdot t_s$, $t_{w1} \geq t_s$, $t_s \geq 1.25 \cdot t_{sr}$, よって十分である。 $d_h \leq d/2$, よってPVD-3322(1)a.により計算を行う。		

平板名称	(2) 下部平板	
材料	ASME SA516 Gr. 70	
最高使用圧力	P	(MPa)
最高使用温度		(°C)
許容引張応力	S	(MPa)
取付け方法による係数	K	
平板の径	d	(mm)
必要厚さ	t	(mm)
呼び厚さ	t _{po}	(mm)
最小厚さ	t _p	(mm)
評価: $t_p \geq t$, よって十分である。		

(3) 管台の厚さの評価

管台名称	(1) 出口		
材料	ASME SA516 Gr. 70		
最高使用圧力	P	(MPa)	1.03
最高使用温度		(°C)	40
管台の外径	D _o	(mm)	
許容引張応力	S	(MPa)	138
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
必要厚さ	t ₁	(mm)	
必要厚さ	t _s	(mm)	
t ₁ , t _s の大きい値	t	(mm)	3.80
呼び厚さ	t _{no}	(mm)	57.15
最小厚さ	t _n	(mm)	55.15
評価: t _n ≥ t, よって十分である。			

(4) 容器の補強を要しない穴の最大径の計算

胴板名称	(1) 胴板		
材料	ASME SA516 Gr. 70		
最高使用圧力	P	(MPa)	1.03
最高使用温度		(°C)	40
胴の外径	D	(mm)	
許容引張応力	S	(MPa)	138
胴板の最小厚さ	t _s	(mm)	5.84
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
$d_{r1} = (D - 2 \cdot t_s) / 4$		(mm)	
61, d _{r1} の小さい値		(mm)	61.00
K			
D · t _s		(mm ²)	
200, d _{r2} の小さい値		(mm)	99.90
補強を要しない穴の最大径		(mm)	99.90
評価: 補強の計算を要する穴の名称			無し

3.2.1.2.3 評価結果まとめ

評価結果を表16に示す。必要厚さ等を満足しており、十分な構造強度を有すると評価している。

表16-1 前処理フィルタ評価結果（板厚）

機器名称	評価項目	必要厚さ (mm)	最小厚さ (mm)
前処理フィルタ 1	(1)胴板の厚さ	4.84	5.84
	(2)上部平板の厚さ	54.71	62.50
	(2)下部平板の厚さ	44.75	62.50
	(3)管台の厚さ	3.80	55.15

表16-2 前処理フィルタ評価結果（胴の補強要否）

機器名称	評価項目	補強を要しない穴の最大径 (mm)	穴の径 (mm)
前処理フィルタ 1	(4)胴	99.90	99 以下

3.2.1.3 吸着塔（代表設備：多核種吸着塔 1～20（UNS S31803））

3.2.1.3.1 評価箇所

強度評価箇所を図-3に示す。

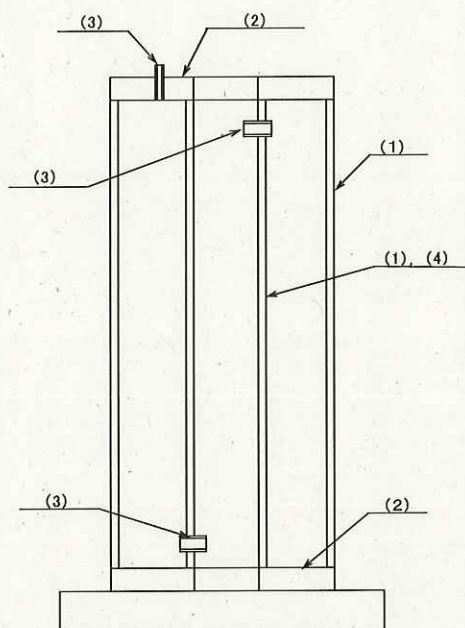


図-3 吸着塔入口バッファタンク，移送タンク 概要図

図中の番号は，3.2.1.3.2，3.2.1.3.3の番号に対応する。

3.2.1.3.2 評価結果

(1) 胴の厚さの評価

a. 外筒胴

胴板名称			(1) 外筒胴
材料			ASME SA240 UNS S31803
最高使用圧力	P	(MPa)	1.55
最高使用温度		(°C)	40
胴の内径	D_i	(mm)	939.80
許容引張応力	S	(MPa)	177
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
必要厚さ	t_1	(mm)	
必要厚さ	t_2	(mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t	(mm)	5.93
呼び厚さ	t_{so}	(mm)	12.70
最小厚さ	t_s	(mm)	11.70
評価： $t_s \geq t$ ，よって十分である。			

b.内筒胴

胴板名称		(2) 内筒胴
材料		ASME SA790 UNS S31803
最高使用圧力	P (MPa)	—
外面に受ける最高の圧力	P _e (MPa)	1.55
最高使用温度	内圧時 (°C)	—
	外圧時 (°C)	40
胴の内径	D _i (mm)	
胴の外径	D _o (mm)	
強め輪間の有効長さ	ℓ (mm)	
許容引張応力	S _i (MPa)	—
降伏点	S _y (MPa)	—
継手効率	η	
継手の種類		
放射線検査の有無		
必要厚さ	t ₁ (mm)	
必要厚さ	t ₂ (mm)	
ℓ/D _o		
B (ASME BPVC SECTION, II Part D Subpart 3 fig. G, fig. HA-5より)		
必要厚さ	t _s (mm)	
t ₁ , t ₂ , t _a の大きい値	t (mm)	7.42
呼び厚さ	t _{so} (mm)	12.70
最小厚さ	t _s (mm)	11.10
評価: t _s ≥ t, よって十分である。		

(2) 平板の厚さの評価

a. 上部平板

平板名称		(1) 上部平板
平板の取付け方法		
平板の穴の有無		
溶接部の寸法	t _{w1} (mm)	
溶接部の寸法	t _{w2} (mm)	
胴又は管の計算上必要な厚さ	t _{sr} (mm)	4.14
胴又は管の最小厚さ	t _s (mm)	11.70
t _{w1} + t _{w2}	(mm)	25.40
2 · t _s	(mm)	23.40
1.25 · t _{sr}	(mm)	5.17
平板の径	d (mm)	
穴の径	d _h (mm)	
評価: t _{w1} + t _{w2} ≥ 2 · t _s , t _{w1} ≥ t _s , t _s ≥ 1.25 · t _{sr} , よって十分である。 d _h ≤ d/2, よってPVD-3322(1)b.により計算を行う。		

平板名称	(1) 上部平板		
材料	ASME SA240 UNS S31803		
最高使用圧力	P	(MPa)	1.55
最高使用温度		(°C)	40
許容引張応力	S	(MPa)	177
取付け方法による係数	K		
平板の径	d	(mm)	
必要厚さ	t	(mm)	71.45
呼び厚さ	t _{po}	(mm)	76.20
最小厚さ	t _p	(mm)	75.20
評価: $t_p \geq t$, よって十分である。			

b. 下部平板

平板名称	(2) 下部平板		
平板の取付け方法			
平板の穴の有無			
溶接部の寸法	t _{w1}	(mm)	
溶接部の寸法	t _{w2}	(mm)	
胴又は管の計算上必要な厚さ	t _{sr}	(mm)	4.14
胴又は管の最小厚さ	t _s	(mm)	11.70
	t _{w1} + t _{w2}	(mm)	25.40
	2 · t _s	(mm)	23.40
	1.25 · t _{sr}	(mm)	5.17
平板の径	d	(mm)	
穴の径	d _h	(mm)	
評価: $t_{w1} + t_{w2} \geq 2 \cdot t_s$, $t_{w1} \geq t_s$, $t_s \geq 1.25 \cdot t_{sr}$, よって十分である。 $d_h \leq d/2$, よってPVD-3322(1)b.により計算を行う。			

平板名称	(2) 下部平板		
材料	ASME SA240 UNS S31803		
最高使用圧力	P	(MPa)	1.55
最高使用温度		(°C)	40
許容引張応力	S	(MPa)	177
取付け方法による係数	K		
平板の径	d	(mm)	
必要厚さ	t	(mm)	71.45
呼び厚さ	t _{po}	(mm)	76.20
最小厚さ	t _p	(mm)	75.20
評価: $t_p \geq t$, よって十分である。			

(3) 管台の厚さの評価

a. 液入口

管台名称	(1) 液入口	
材料	ASME SA790 UNS S31803	
最高使用圧力	P (MPa)	1.55
最高使用温度	(°C)	40
管台の外径	D _o (mm)	
許容引張応力	S (MPa)	177
継手効率	η	
継手の種類		
放射線検査の有無		
必要厚さ	t _i (mm)	
必要厚さ	t _s (mm)	
t _i , t _s の大きい値	t (mm)	0.27
呼び厚さ	t _{no} (mm)	3.91
最小厚さ	t _n (mm)	3.43
評価: t _n ≥ t, よって十分である。		

b. 液出口

管台名称	(2) 液出口	
材料	ASME SA790 UNS S31803	
最高使用圧力	P (MPa)	1.55
最高使用温度	(°C)	40
管台の外径	D _o (mm)	
許容引張応力	S (MPa)	177
継手効率	η	
継手の種類		
放射線検査の有無		
必要厚さ	t _i (mm)	
必要厚さ	t _s (mm)	
t _i , t _s の大きい値	t (mm)	0.27
呼び厚さ	t _{no} (mm)	3.91
最小厚さ	t _n (mm)	3.43
評価: t _n ≥ t, よって十分である。		

c. ベント

管台名称			(3) ベント
材料			ASME SA790 UNS S31803
最高使用圧力	P	(MPa)	1.55
最高使用温度		(°C)	40
管台の外径	D_o	(mm)	
許容引張応力	S	(MPa)	177
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
必要厚さ	t_i	(mm)	
必要厚さ	t_s	(mm)	
t_i, t_s の大きい値	t	(mm)	0.15
呼び厚さ	t_{no}	(mm)	3.38
最小厚さ	t_n	(mm)	2.96
評価: $t_n \geq t$, よって十分である。			

(4) 胴の補強を要しない穴の最大径の評価

胴板名称		(1) 内筒胴	
計算圧力		内圧	外圧
材料		ASME SA790 UNS S31803	
最高使用圧力又は 外面に受ける最高の圧力	P	(MPa)	—
最高使用温度		(°C)	40
胴の外径	D	(mm)	
許容引張応力	S	(MPa)	151
胴板の最小厚さ	t_s	(mm)	11.10
継手効率	η		
継手の種類			
放射線検査の有無			
$d_{r1} = (D - 2 \cdot t_s) / 4$		(mm)	
61, d_{r1} の小さい値		(mm)	61.00
K			
$D \cdot t_s$		(mm ²)	
200, d_{r2} の小さい値		(mm)	119.04
補強を要しない穴の最大径		(mm)	119.04
評価: 補強の計算を要する穴の名称		無し	

3.2.1.3.3 評価結果まとめ

評価結果を表17に示す。必要厚さ等を満足しており、十分な構造強度を有すると評価している。

表17-1 吸着塔評価結果（板厚）

機器名称	評価項目	必要厚さ (mm)	最小厚さ (mm)
吸着塔1～20 (UNS S31803)	(1)胴板の厚さ（外筒胴）	5.93	11.70
	(1)胴板の厚さ（内筒胴）	7.42	11.10
	(2)上部平板	71.45	75.20
	(2)下部平板	71.45	75.20
	(3)管台の厚さ（入口・出口）	0.27	3.43
	(3)管台の厚さ（ベント）	0.15	2.96

表17-2 吸着塔評価結果（胴の補強要否）

機器名称	評価項目	補強を要しない穴の最大径 (mm)	穴の径 (mm)
吸着塔1～20 (UNS S31803)	(4)胴（内筒胴）	119.04	119以下

3.2.2 耐震性評価

(1) タンク (代表機器：供給タンク)

1. 設計条件

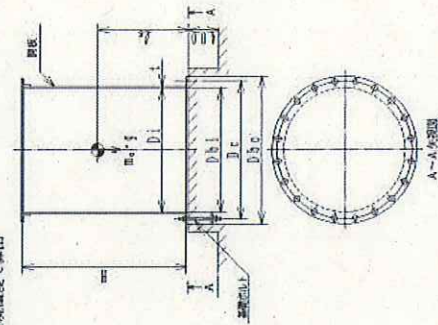
機器名称	設置設計上の重要区分	設置場所及び床面高さ 設計GL (m)	固有周期 (s)		水平方向設計許容率	鉛直方向設計許容率	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)	比 重
			水平方向	鉛直方向						
供給タンク	B	高性耐多地震除去設備層 GL+0.2	0.027	-	$C_H = 0.35$	-	静水頭	40	40	1.00

2. 機器要目

m_0 (kg)	m_c (kg)	D_{50} (mm)	D_{51} (mm)	t (mm)	F (MPa)	G (MPa)	U_s (mm)	H (mm)	s	α
41100	6000	3000	3000	3.0	202000 *1	77700 *1				

D_c (mm)	D_{50} (mm)	D_{51} (mm)	A_b (mm ²)	S_v (鋼板) (MPa)	S_u (鋼板) (MPa)	S (鋼板) (MPa)	F (鋼板) (MPa)	S_v (連続ボルト) (MPa)	S_u (連続ボルト) (MPa)	F (連続ボルト) (MPa)
				245 *1 (厚さ ≤ 16 mm)	400 *1	-	245	235 *2 (16mm $<$ 厚 ≤ 40 mm)	400 *2	235

注記*1: 最悪使用温度で算出
*2: 周囲環境温度で算出



3. 計算数値

3.1 鋼に生じる応力

(1) 一次一般応力

応力の種類	周方向応力	軸方向応力	せん断応力
静水頭による応力	$\sigma_{\theta 1} = 9$	-	-
鉛直方向地震による引張応力	-	-	-
空管量による圧縮応力	-	$\sigma_{xz} = 1$	-
鉛直方向地震による軸方向応力	-	-	-
水平方向地震による応力	-	$\sigma_{xz} = 6$	$\tau = 4$
応力の和	引張側 $\sigma_{\theta 1} = 9$	$\sigma_{xz} = 5$	-
	圧縮側 $\sigma_{\theta 2} = -9$	$\sigma_{xz} = 7$	-
	引張り $\sigma_{\theta 1} = 11$	$\sigma_{\theta 2} = 8$	-
組合せ応力			

3.2 基礎ボルトに生じる応力

(単位: MPa)	
引張応力	$\sigma_b = 1$
せん断応力	$\tau_b = 16$

4. 結論
4.1 固有周期

(単位: s)	
方向	固有周期
水平方向	$T_H =$
鉛直方向	$T_V =$

4.2 応力

		(単位: MPa)		
部材	材料	応力	算出応力	許容応力
鋼板	SM400C	一次-繰返 圧縮と曲げ の組合せ (座屈の許値)	$\sigma_c = 11$	$S_s = 240$
			$\frac{\eta \cdot \sigma_{x2}}{f_c} + \frac{\eta \cdot \sigma_{x4}}{f_b} \leq 1$ 0.04	
基礎ボルト	SS400	引張り	$\sigma_t = 1$	$f_{t,s} = 176$ *
		せん断	$\tau_b = 16$	$f_{t,s} = 135$

注記*: (3.2.2) 式より算出

*すべて許容応力以下である。

(2) 前処理フィルタ (代表機器：前処理フィルタ1)

1. 設計条件

機器名称	許容設計上の 重要度分類	挿付挿入及び床面高さ		固有周期(g)		水平方向設計強度	鉛直方向設計強度	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)	比重
		設計GL (m)	高性能多核種設備建屋 CL +0.2	水平方向	鉛直方向						
前処理フィルタ1	B					$C_{H1}=0.36$	-	1.03	40	40	-

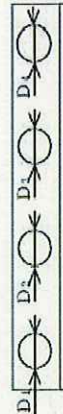
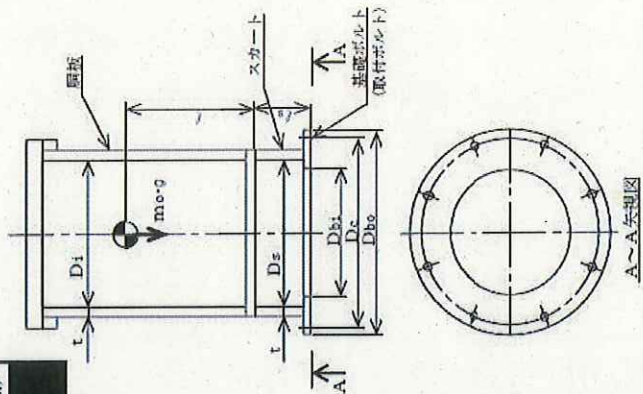
2. 機器要目

m_0 (kg)	m_e (kg)	D_1 (mm)	t (mm)	D_s (mm)	t_s (mm)	E (MPa)	E_s (MPa)	G (MPa)	G_s (MPa)	f (mm)	f_s (mm)
		901.7	6.35			201000 ¹⁾	201000 ²⁾	77300 ¹⁾	77300 ²⁾		

D_1 (mm)	D_s (mm)	D_4 (mm)	H (mm)	s	h	D_c (mm)	D_{b0} (mm)	D_{b1} (mm)	A_b (mm ²)	Y (mm)	M_s (N·mm)
		279.4	279.4								

S_y (鋼板) (MPa)	S_u (鋼板) (MPa)	S (鋼板) (MPa)	S_y (スカーツ) (MPa)	S_u (スカーツ) (MPa)	F (スカーツ) (MPa)	S_y (取付ボルト) (MPa)	S_u (取付ボルト) (MPa)	F (取付ボルト) (MPa)
262 ¹⁾	483 ¹⁾	-	262 ²⁾	483 ²⁾	262	724 ²⁾ (径≦64mm)	862 ²⁾ (径≦64mm)	603

注記*1：最高使用温度で算出
*2：周囲環境温度で算出



スカーツ開口部の形状を示す。

A-A断面図

3. 計算数値

3.1 鋼に生じる応力 (単位: MPa)

生じる応力	周方向応力	軸方向応力	せん断応力
静水頭又は内圧による応力	$\sigma_{x1} = 74$	$\sigma_{x2} = 37$	-
静水頭又は内圧による応力 (鉛直方向地震時)	-	-	-
運転時質量による引張応力	-	$\sigma_{x3} = 1$	-
鉛直方向地震による引張応力	-	-	-
空質量による圧縮応力	-	$\sigma_{x4} = 3$	-
鉛直方向地震による圧縮応力	-	-	-
水平方向地震による応力	-	$\sigma_{x5} = 4$	$\tau = 2$
応力の和	引張側 $\sigma_o = \sigma_{x1} = 74$	$\sigma_m = 41$	-
	圧縮側 $\sigma_u = -\sigma_{x1} = -74$	$\sigma_w = -31$	-
組合せ応力	引張り $\sigma_o = 74$	$\sigma_o = 74$	-
	圧縮 $\sigma_u = -74$	-	-

3.2 スカートに生じる応力 (単位: MPa)

生じる応力	応力	組合せ応力
運転時質量による応力	$\sigma_{s1} = 5$	$\sigma_s = 32$
鉛直方向地震による応力	-	
水平方向地震による応力	$\sigma_{s2} = 27$	
せん断	$\tau = 4$	

3.3 取付ボルトに生じる応力 (単位: MPa)

引張応力	$\sigma_b = 1$
せん断応力	$\tau_b = 8$

4. 結論

4.1 固有周期 (単位: s)

方向	固有周期
水平方向	$T_H =$ []
鉛直方向	$T_V =$ []

4.2 応力 (単位: MPa)

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
胴	ASME SA516 Gr.70	組合せ	$\sigma_o = 74$	$S_s = 262$
スカート	ASME SA516 Gr.70	組合せ	$\sigma_s = 32$	$f_s = 262$
		任縮と曲げの組合せ (座屈の評価)	$\frac{\eta \cdot (\sigma_{s1} + \sigma_{s2})}{f_c} + \frac{\eta \cdot \sigma_{s2}}{f_b} \leq 1$	0.14 (無次元)
取付ボルト	ASTM A193 Gr.B7	引張り	$\sigma_b = 1$	$f_b = 452$
		せん断	$\tau_b = 8$	$f_s = 346$

注記 *: 以下より算出
 $f_{t1} = 1.4 \cdot f_{t0} - 1.0 \cdot \tau_b$ から, $f_{t1} \leq f_{t0}$

すべて許容応力以下である。

(3) 吸着塔 (代表機器: 多核種吸着塔 1~20 (UNS S31803))

1. 設計条件

機器名称 (多核種吸着塔 (胴部材料: UNS S31803))	耐震設計上の 重要度分類 B	掘付場所及び床面高さ 設計GL (m) 高性能多核種設備建屋 GL +0.2	固有周期(g)		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)	比重
			水平方向	鉛直方向				
					1.55	40	40	-

2. 機器要目

mφ (kg)	mφ (kg)	D _i (mm)	t (mm)	E (MPa)	G (MPa)	γ _g (mm)	H (mm)	s	nr	ns	D _c (mm)	D _{bo} (mm)	Ab (mm ²)
	939.8 (外筒) 内筒)		12.7	199000 ¹	76000 ¹								

S _y (胴板) (MPa)	S _u (胴板) (MPa)	S (胴板) (MPa)	F (胴板) (MPa)	S _y (取付ボルト) (MPa)	S _u (取付ボルト) (MPa)	F (取付ボルト) (MPa)
445 ¹	621 ¹	177	434	724 ² (径≦φ4mm)	862 ² (径≦φ4mm)	603

注記*1: 最高使用温度で算出

*2: 周囲環境温度で算出

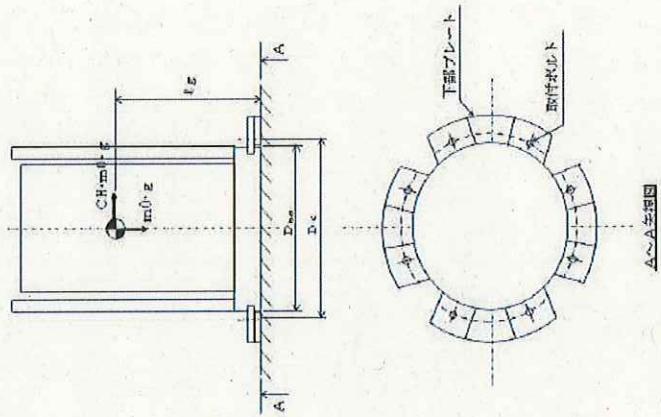
*3: 固有周期及び胴の応力算出に用いる値

*4: 基礎ボルトの応力算出に用いる値

3. 計算数値

(単位: MPa)

3.1 胴に生じる応力	周方向応力	軸方向応力	せん断応力
静水頭による応力	$\sigma_{\theta 1} = 59$	$\sigma_{z 1} = 30$	-
鉛直方向地震 による引張応力	-	-	-
空質量による 圧縮応力	-	$\sigma_{z 2} = 2$	-
鉛直方向地震 による軸方向応力	-	-	-
水平方向地震 による応力	-	$\sigma_{\theta 3} = 6$	$\tau = 2$
応力の和	$\sigma_{\theta} = 59$	$\sigma_{z} = 34$	-
引張側	$\sigma_{\theta} = 59$	$\sigma_{z} = 33$	-
圧縮側	-	-	-
引張り 圧縮	$\sigma_{\theta} = 59$	-	-



3.2 取付ボルトに生じる応力

(単位: MPa)

引張応力	-
せん断応力	$\tau_b = 50$

4. 結論

4.1 固有周期

(単位: s)

方向	固有周期
水平方向	$T_E = \blacksquare$

4.2 応力

(単位: MPa)

部材	材	材	料	材	力	応	力	算	出	力	許	容	力
剛板	UNS	S31803	一次一般線	$\sigma_0 = 59$	$S_b = 372$								
取付ボルト	ASTM	A193	G2B7	引張り	$f_u = 452$ *								
				せん断	$\tau_b = 50$								$f_b = 345$

注記 * : 以下より算出

$$f_{us} = 1.4 \cdot f_{t0} - 1.6 \cdot \tau_b \leq f_{t0}$$

すべて許容応力以下である。

(4) ポンプ (代表機器：供給ポンプ、昇圧ポンプ1～4ポンプ)

1. 設計条件

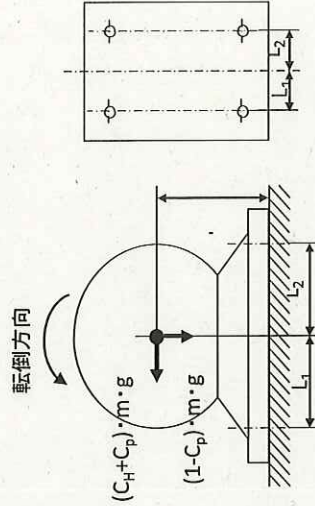
機器名称	耐震設計上の 重要区分	据付場所及び床面高さ 設計 GL (m)	水平方向設計震度	ポンプ振動 による震度	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
供給ポンプ、昇圧ポンプ	B	高性能多核種設備建屋 GL +0.2	$C_H=0.36$		40	40

2. 機器要目

m (kg)	n (本)	Ab (mm ²)	h (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Sy (MPa)	Su (MPa)	F (MPa)	転倒方向
						724	862	603	軸直角

ポンプ予想最大両振幅
(μm)

ポンプ回転速度 (min^{-1})



3. 結論

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
基礎ボルト	ASTM A193 Gr.B7 (SNB7相当)	せん断	$\tau_b = 3$	$f_{sb} = 348$
		引張	$\sigma_b = -$	$f_{ts} = 452$

単位: MPa

すべて許容応力以下である。

(5) ユニット (代表機器：吸着塔ユニット1～4)

1. 設計条件

機器名称	耐震設計上の 重要度区分	据付場所及び床面高さ 設計 GL (m)	水平方向設計震度	最高使用温度 (°C)	使用環境温度 (°C)
吸着塔ユニット1～4	B	高性能多核種設備建屋 GL +0.2	Ch=0.36	40	40

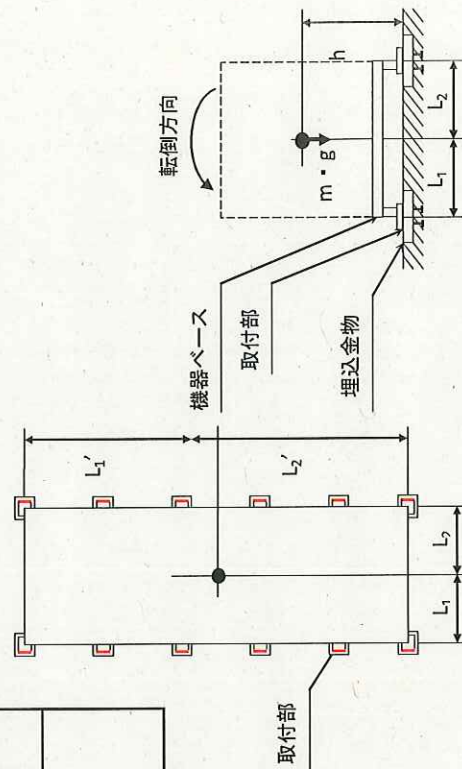
2. 機器要目

m (kg)	n (箇所)	Aw (mm ²)	h (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)

3. 結論

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
取付部 すみ肉溶接	YS309Mo	引 張	$\sigma_w = 19$	$f_t = 69$

許容応力以下である。



4. 高性能多核種除去設備検証試験装置

4.1 検証試験装置

4.1.1 耐震性評価

4.1.1.1 計算条件

(1) 検証試験装置を搭載している車両について、地震による転倒モーメントと自重による安定モーメントを算出し、それらを比較することで転倒評価する。

4.1.1.2 記号の説明

(1) 転倒評価

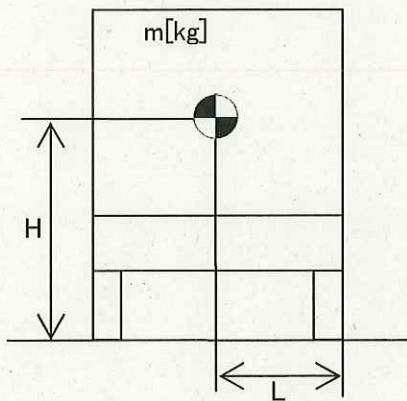
記号	記号の説明	単位
M	機器質量	Kg
G	重力加速度	m/s ²
H	据付面から重心までの距離	m
L	転倒支点から機器重心までの距離	m
C _H	水平方向設計震度	-

4.1.1.3 計算方法

(1) 転倒評価

地震による転倒モーメント： $M_1 = m \times g \times C_H \times H$

自重による安定モーメント： $M_2 = m \times g \times L$



4.1.1.4 設計条件

(1) 転倒評価

機器名称	重力加速度 g (m/s ²)	水平方向設計震度 C _H
検証試験装置 (車両1)	9.80	0.36
検証試験装置 (車両2)	9.80	0.36
検証試験装置 (車両3)	9.80	0.36
検証試験装置 (車両4)	9.80	0.36
検証試験装置 (車両5)	9.80	0.36

4.1.1.5 機器要目

(1) 転倒評価

機器名称	機器重量 m(Kg)	据付面から重心ま での距離 H(m)	転倒支点から機器 重心までの距離 L(m)
検証試験装置 (車両1)	■	■	■
検証試験装置 (車両2)	■	■	■
検証試験装置 (車両3)	■	■	■
検証試験装置 (車両4)	■	■	■
検証試験装置 (車両5)	■	■	■

4.1.1.6 評価結果

(1) 転倒評価

地震による転倒モーメントは自重による安定モーメントより小さいことから、転倒しないことを確認した。

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
検証試験装置 (車両1)	本体	転倒	0.36	1.60×10^8	3.01×10^8	N・mm
検証試験装置 (車両2)	本体	転倒	0.36	1.83×10^8	3.31×10^8	N・mm
検証試験装置 (車両3)	本体	転倒	0.36	1.78×10^8	3.25×10^8	N・mm
検証試験装置 (車両4)	本体	転倒	0.36	1.81×10^8	3.33×10^8	N・mm
検証試験装置 (車両5)	本体	転倒	0.36	1.29×10^8	2.16×10^8	N・mm

4.2 前処理フィルタ及び吸着塔

4.2.1 構造強度評価

- (1) 漏えい試験等を行い、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認する
- (2) 設計・建設規格に準拠し、板厚評価を実施した。

4.2.1.1 計算条件

- (1) 設計・建設規格に準拠し、板厚評価を実施する。

4.2.1.2 記号の説明

(1) 板圧評価

記号	記号の説明	単位
t	胴の計算上必要な厚さ	mm
Di	胴の内径	mm
P	最高使用圧力	MPa
S	最高使用温度における材料の許容引張応力	MPa
η	長手継手の効率	-
R	鏡板の外形中央部における内面の半径	mm
W	さら形鏡板の形状による係数	-

4.2.1.3 計算方法

(1) 板圧評価

a. 胴の厚さの評価

胴に必要な厚さは、次に掲げる値のうちいずれか大きい値とする。

(a) 規格上必要な最小厚さ： t_1

t_1 の値は炭素鋼、低合金鋼の場合は $t_1 = 3.00[\text{mm}]$ 以上、その他の金属の場合は $t_1 = 1.50[\text{mm}]$ 以上とする。

(b) 内面に圧力を受ける胴の必要厚さ： t_2

$$t_2 = \frac{PD_i}{2S\eta - 1.2P}$$

b. 鏡板の厚さの評価

さら形鏡板に必要な厚さは、以下で計算した値のうちいずれか大きい方の値とする。

(a) 胴の必要厚さ： t_1

$$t_1 = \frac{PD_i}{2S\eta - 1.2P}$$

(b) 鏡板の必要厚さ： t_2

$$t_2 = \frac{PRW}{2S\eta - 0.2P}$$

4.2.1.4 設計条件

(1) 板圧評価

機器名称	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用温度における 材料の許容引張応力 S (MPa)	長手継手 の効率 (胴板) η	長手継手 の効率 (鏡板) η
前処理フィルタ 1	0.98	228	■	■
前処理フィルタ 2～4	0.98	228	■	■
多核種吸着塔 1～15	0.98	228	■	■

4.2.1.5 機器要目

(1) 板圧評価

機器名称	胴の内径 Di (mm)	鏡板の外形中央部における内面の半径 R (mm)	さら形鏡板の形状による係数 W
前処理フィルタ 1	■	■	■
前処理フィルタ 2～4	■	■	■
多核種吸着塔 1～15	■	■	■

4.2.1.6 評価結果

(1) 板圧評価

評価の結果、内圧に耐えられることを確認した。

機器名称	評価部位	必要肉厚 [mm]	実厚 [mm]
前処理フィルタ 1	胴板	1.50	6.00
	鏡板	1.49	8.00
前処理フィルタ 2～4	胴板	1.50	6.00
	鏡板	1.33	8.00
多核種吸着塔 1～15	胴板	1.54	6.00
	鏡板	1.66	8.00

4.2.2 耐震性評価

4.2.2.1 計算条件

(1) 前処理フィルタ及び吸着塔を基礎ボルトで固定する。

4.2.2.2 記号の説明

(1) 基礎ボルトの強度評価

記号	記号の説明	単位
m	機器質量	Kg
g	重力加速度	m/s ²
H	据付面から重心までの距離	mm
L	転倒支点から機器重心までの距離	mm
L ₁	重心と基礎ボルト間の水平方向距離	mm
n _f	引張力の作用する基礎ボルトの評価本数	本
n	基礎ボルトの本数	本
A _b	基礎ボルトの軸断面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	-
C _V	鉛直方向設計震度	-

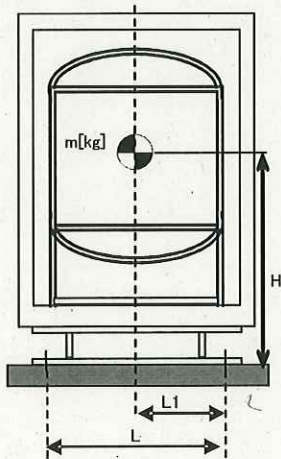
4.2.2.3 計算方法

(1) 基礎ボルトの強度評価

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{1}{L} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

$$\text{基礎ボルトの引張応力} : \sigma_b = \frac{F_b}{n_f \times A_b}$$

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$



4.2.2.4 設計条件

(1) 基礎ボルトの強度評価

機器名称	重力加速度 g (m/s ²)	水平方向設計震度 C _H	垂直方向設計震度 C _V
前処理フィルタ 1	9.80	0.36	0
前処理フィルタ 2～4	9.80	0.36	0
多核種吸着塔 1～10	9.80	0.36	0
多核種吸着塔 11～15	9.80	0.36	0

4.2.2.5 機器要目

(1) 基礎ボルトの強度評価

機器名称	機器重量 m (Kg)	据付面から 重心までの 距離 H (mm)	転倒支点 から機器 重心まで の距離 L (mm)	重心と基礎 ボルト間の 水平方向距 離 L ₁ (mm)	引張力の作 用する基礎 ボルトの評 価本数 n _f (本)	基礎ボル トの本数 n (本)	基礎ボル トの軸断 面積 A _b (mm ²)
前処理フ ィルタ 1	■	■	■	■	■	■	■
前処理フ ィルタ 2 ～4	■	■	■	■	■	■	■
多核種吸 着塔 1～ 10	■	■	■	■	■	■	■
多核種吸 着塔 11 ～15	■	■	■	■	■	■	■

4.2.2.6 評価結果

(1) 基礎ボルトの強度評価

基礎ボルトの強度が確保されることを確認した。

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
前処理フィルタ 1	基礎ボルト	引張	0.36	2	174	MPa
		せん断	0.36	7	134	MPa
前処理フィルタ 2～4	基礎ボルト	引張	0.36	5	174	MPa
		せん断	0.36	7	134	MPa
吸着塔 1～10	基礎ボルト	引張	0.36	4	174	MPa
		せん断	0.36	10	134	MPa
吸着塔 11～15	基礎ボルト	引張	0.36	4	174	MPa
		せん断	0.36	8	134	MPa

4.3 タンク

4.3.1 構造強度評価

供給タンク、処理水タンク、pH調整槽については、漏えい試験等を行い、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認する。また、これらのタンクは全て大気開放のため、水頭圧以上の内圧が作用することはない。

4.3.2 耐震性評価

4.3.2.1 計算条件

(1) タンクを基礎ボルトで固定する。

4.3.2.2 記号の説明

(1) 基礎ボルトの強度評価

記号	記号の説明	単位
m	機器質量	Kg
g	重力加速度	m/s ²
H	据付面から重心までの距離	mm
L	転倒支点から機器重心までの距離	mm
L ₁	重心と基礎ボルト間の水平方向距離	mm
n _f	引張力の作用する基礎ボルトの評価本数	本
n	基礎ボルトの本数	本
A _b	基礎ボルトの軸断面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	-
C _V	鉛直方向設計震度	-

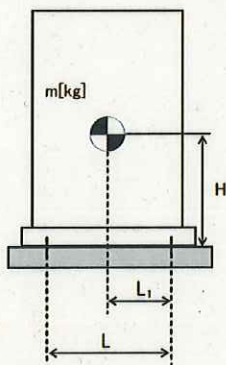
4.3.2.3 計算方法

(1) 基礎ボルトの強度評価

$$\text{基礎ボルトに作用する引張力} : F_b = \frac{1}{L} (m \times g \times C_H \times H - m \times g \times (1 - C_V) \times L_1)$$

$$\text{基礎ボルトの引張応力} : \sigma_b = \frac{F_b}{n_f \times A_b}$$

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$



4.3.2.4 設計条件

(1) 基礎ボルトの強度評価

機器名称	重力加速度 g (m/s ²)	水平方向設計震度 C _H	垂直方向設計震度 C _V
供給タンク	9.80	0.36	0
処理水タンク	9.80	0.36	0
No. 1, 2 pH調整槽	9.80	0.36	0

4.3.2.5 機器要目

(1) 基礎ボルトの強度評価

機器名称	機器重量 m (Kg)	据付面から重心までの距離 H (mm)	転倒支点から機器重心までの距離 L (mm)	重心と基礎ボルト間の水平方向距離 L ₁ (mm)	引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 n _f (本)	基礎ボルトの本数 n (本)	基礎ボルトの軸断面積 A _b (mm ²)
供給タンク	■	■	■	■	■	■	■
処理水タンク	■	■	■	■	■	■	■
No. 1, 2 pH調整槽	■	■	■	■	■	■	■

4.3.2.6 評価結果

(1) 基礎ボルトの強度評価

基礎ボルトの強度が確保されることを確認した。

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
供給タンク	基礎ボルト	引張	0.36	-	174	MPa
		せん断	0.36	11	134	MPa
処理水タンク	基礎ボルト	引張	0.36	-	174	MPa
		せん断	0.36	11	134	MPa
No. 1, 2 pH調整槽	基礎ボルト	引張	0.36	-	174	MPa
		せん断	0.36	9	134	MPa

4.4 ポンプ

4.4.1 耐震性評価

4.4.1.1 計算条件

(1) ポンプを基礎ボルトで固定する。

4.4.1.2 記号の説明

(1) 基礎ボルトの強度評価

記号	記号の説明	単位
m	機器質量	Kg
g	重力加速度	m/s ²
h	重心高さ	mm
D	基礎ボルト間隔	mm
n _f	引張力の作用する基礎ボルトの評価本数	本
n	基礎ボルトの本数	本
A _b	基礎ボルトの軸断面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	-

4.4.1.3 計算方法

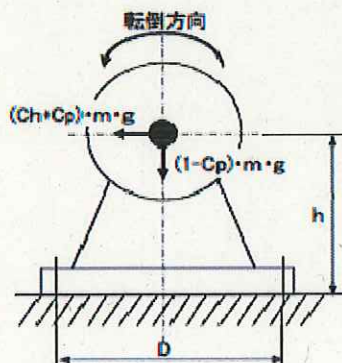
(1) 基礎ボルトの強度評価

基礎ボルトに作用する引張力

$$F_b = \frac{(C_H + C_p) \times m \times g \times h - (1 - C_p) \times m \times g \times D/2}{n_f \times D}$$

$$\text{基礎ボルトの引張応力} : \sigma_b = \frac{F_b}{A_b}$$

$$\text{基礎ボルトのせん断応力} : \tau_b = \frac{m \times g \times C_H}{n \times A_b}$$



4.4.1.4 設計条件

(1) 基礎ボルトの強度評価

機器名称	重力加速度 g (m/s ²)	水平方向設計震度 C _H	ポンプ振動による震度 C _p
原水ポンプ	9.80	0.36	■
中継ポンプ1～3	9.80	0.36	■
処理水移送ポンプ	9.80	0.36	■

4.4.1.5 機器要目

(1) 基礎ボルトの強度評価

機器名称	機器重量 m(Kg)	重心高さ h(mm)	基礎ボルト間隔 D(mm)	引張力の作用する基礎ボルトの評価本数 n _r (本)	基礎ボルトの本数 n (本)	基礎ボルトの軸断面積 A _b (mm ²)
原水ポンプ	■	■	■	■	■	■
中継ポンプ1	■	■	■	■	■	■
中継ポンプ2, 3	■	■	■	■	■	■
処理水移送ポンプ	■	■	■	■	■	■

4.4.1.6 評価結果

(1) 基礎ボルトの強度評価

基礎ボルトの強度が確保されることを確認した。

機器名称	評価部位	評価項目	水平震度	算出値	許容値	単位
原水ポンプ	基礎ボルト	引張	0.36	2	174	MPa
		せん断	0.36	2	134	MPa
中継ポンプ1	基礎ボルト	引張	0.36	2	174	MPa
		せん断	0.36	2	134	MPa
中継ポンプ2	基礎ボルト	引張	0.36	2	174	MPa
		せん断	0.36	2	134	MPa
中継ポンプ3	基礎ボルト	引張	0.36	2	174	MPa
		せん断	0.36	2	134	MPa
処理水移送ポンプ	基礎ボルト	引張	0.36	2	174	MPa
		せん断	0.36	2	134	MPa

4.5 配管（鋼管）

3.5.1 構造強度評価

配管の主要仕様から JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格に基づき管厚評価を実施した。

4.5.1.1 計算条件

JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格に基づき管厚評価する。

3.5.1.2 記号の説明

記号	記号の説明	単位
t	管の計算上必要な厚さ	mm
D _o	管の外径	mm
P	最高使用圧力	MPa
S	最高使用温度における材料の許容引張応力	MPa
η	長手継手の効率	-

4.5.1.3 計算方法

(1) 管厚評価

$$t = \frac{PD_o}{2S\eta + 0.8P}$$

4.5.1.4 設計条件

(1) 管厚評価

機器名称	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用温度における 材料の許容引張応力 S (MPa)	長手継手 の効率 η
配管①	0.98	93	■
配管②	0.98	93	■
配管③	0.98	93	■
配管④	0.6	93	■
配管⑤	0.6	93	■
配管⑥	0.6	93	■
配管⑦	0.98	228	■

4.5.1.5 機器要目

(1) 管厚評価

機器名称	管の外径 D ₀ (mm)
配管①	42.70
配管②	48.60
配管③	60.50
配管④	42.70
配管⑤	48.60
配管⑥	60.50
配管⑦	48.26

4.5.1.6 評価結果

(1) 管厚評価

評価の結果、最高使用圧力に耐えられることを確認した。

評価機器	口径	Sch.	材質	最高使用 圧力 (MPa)	最高使用 温度 (°C)	必要肉厚 [mm]	肉厚 [mm]
配管①	32A	40	STPG370	0.98	45	1.90	3.60
配管②	40A	40	STPG370	0.98	45	2.20	3.70
配管③	50A	40	STPG370	0.98	45	2.40	3.90
配管④	32A	40	STPG370	0.6	45	1.90	3.60
配管⑤	40A	40	STPG370	0.6	45	2.20	3.70
配管⑥	50A	40	STPG370	0.6	45	2.40	3.90
配管⑦	40A	40	S32750 Type2507	0.98	45	0.11	3.68

別冊 13

放射性固体廃棄物等の管理施設及び関連施設（雑固体廃棄物焼却設備）に係る補足説明

I. 雑固体廃棄物焼却設備の耐震性に係る補足説明

1. 耐震性評価

1.1 焼却炉

1.1.1 計算条件

- (1) 焼却炉は、基礎ボルトで基礎に固定する。
- (2) 固有振動解析した結果、1次固有振動数が20Hz未満の場合、共振のおそれのあるものとして、弾性設計用地震動 S_a の1/2倍を用いた地震力を考慮する。

1.1.2 記号の説明

記号	記号の説明	単位
m	焼却炉の質量	kg
L	焼却炉の長さ	mm
W	焼却炉の幅	mm
H	焼却炉の高さ	mm
A	基礎ボルトの断面積	mm ²
n	基礎ボルトの本数	本
n_t	水平方向の引張力を受ける基礎ボルトの本数	本
S_y	設計降伏点 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に規定される値	MPa
S_u	設計引張強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に規定される値	MPa
F	許容応力算定用基準値	MPa
C_{Hx}	水平 x 方向設計震度	—
C_{Hy}	水平 y 方向設計震度	—
σ_b	ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_b	ボルトに生じるせん断応力	MPa
F_b	ボルトに生じる引張力	N
Q_b	ボルトに生じるせん断力	N

1.1.3 計算方法

固有周期及び地震力による応力計算には、汎用構造解析プログラム ABAQUS を用いる。主な構造部材の応力評価箇所を図-1に示す。

別冊-13では、G.L. ±0m = T.P. 22.2m^(※)とする。
 (※) 2012年6月に実施した測量結果による。

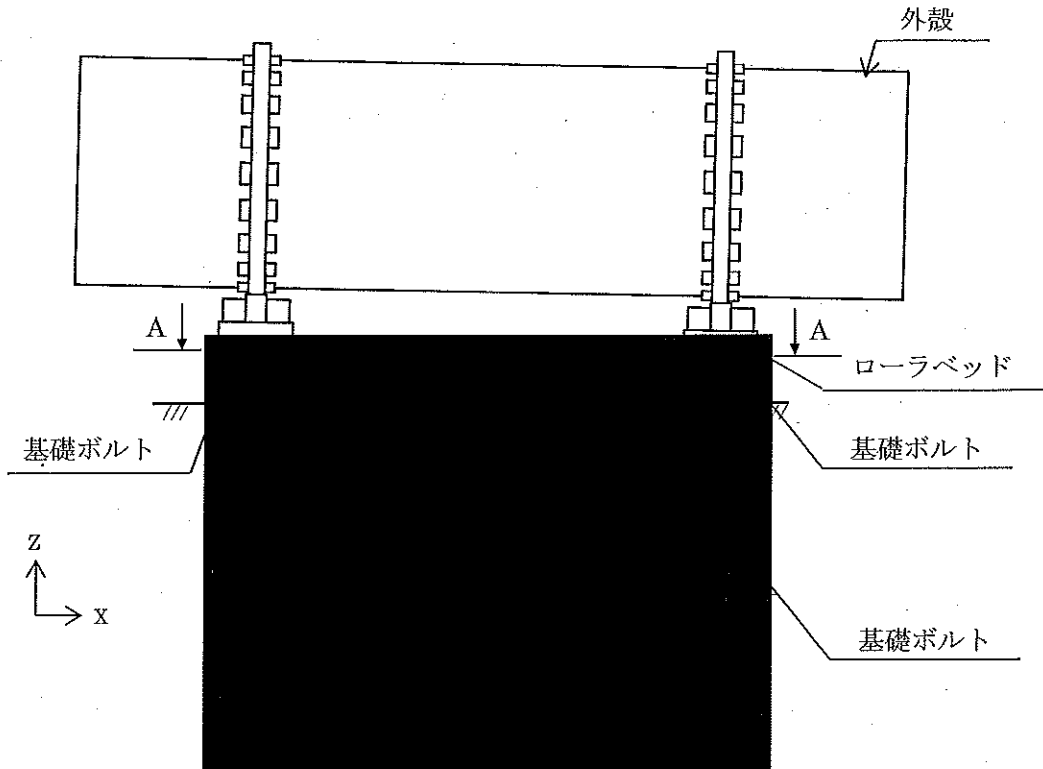


図-1 焼却炉の応力評価箇所

1.1.4 設計条件

据付場所 (m)	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)
焼却設備室 (G. L. +0.25)	$C_{Hx}=0.48^{*1}$ $C_{Hy}=0.48^{*1}$	— ^{*2}	-0.01	外壳: ■ ローラベッド: ■ 基礎ボルト: ■

*1 水平方向の一次固有振動数はx方向 ■ Hz, y方向 ■ Hzであり, 動的地震力の設計震度はx方向0.48, y方向0.48である。

*2 鉛直方向の一次固有振動数は ■ Hzであり, 20Hzを超えるため, 動的地震力を考慮しない。

1.1.5 機器要目

m (kg)	L (mm)	W (mm)	H (mm)	A (mm ²)	n (本)	n _t (本)
■	10000	2738	2738	■	■	■

外壳		ローラベッド			基礎ボルト		
S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)
■	■	■	■	■	■	■	■

1.1.6 評価結果

解析で求めた各部材に生じる応力が許容応力以下であることを確認した。(表-1)

表-1 焼却炉の応力評価結果

部材	材料	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
外殻	SB410	一次一般膜	64	159
		一次	79	159
ローラベッド	SS400	一次 (組合せ)	152	185
基礎ボルト	SS400	引張	181	246
		せん断	147	265

なお、ボルトに生じる応力については、解析により求められた引張力 F_b 、せん断力 Q_b より、以下の算出式によって求められる。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_t \cdot A}, \quad \tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A}$$

1.2 二次燃焼器及び排ガス冷却器

1.2.1 計算条件

- (1) 二次燃焼器及び排ガス冷却器は、据付ボルトで架台に固定する。
- (2) 架台は、基礎ボルトで基礎に固定する。
- (3) 固有振動解析した結果、1次固有振動数が20Hz未満の場合、共振のおそれのあるものとして、弾性設計用地震動 S_d の1/2倍を用いた地震力を考慮する。

1.2.2 記号の説明

記号	記号の説明	単位
m_1	二次燃焼器の質量	kg
m_2	排ガス冷却器の質量	kg
m_3	架台の質量	kg
L_1	二次燃焼器の長さ	mm
L_2	排ガス冷却器の長さ	mm
L_3	架台の長さ	mm
W_1	二次燃焼器の幅	mm
W_2	排ガス冷却器の幅	mm
W_3	架台の幅	mm

記号	記号の説明	単位
H_1	二次燃焼器の高さ	mm
H_2	排ガス冷却器の高さ	mm
H_3	架台の高さ	mm
A_4	据付ボルト（二次燃焼器）の断面積	mm ²
A_5	据付ボルト（排ガス冷却器）の断面積	mm ²
A_6	基礎ボルトの断面積	mm ²
n_4	据付ボルト（二次燃焼器）の本数	本
n_5	据付ボルト（排ガス冷却器）の本数	本
n_6	基礎ボルトの本数	本
n_{t4}	水平方向の引張力を受ける据付ボルト（二次燃焼器）の本数	本
n_{t5}	水平方向の引張力を受ける据付ボルト（排ガス冷却器）の本数	本
n_{t6}	水平方向の引張力を受ける基礎ボルトの本数	本
S_y	設計降伏点 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に規定される値	MPa
S_u	設計引張強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に規定される値	MPa
F	許容応力算定用基準値	MPa
C_{Hx}	水平 x 方向設計震度	—
C_{Hy}	水平 y 方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
σ_a, σ_b	主応力	MPa
σ_x, σ_y	互いに直交する垂直応力	MPa
τ_{xy}	σ_x, σ_y の作用する面内のせん断応力	MPa
σ_0	二次燃焼器及び排ガス冷却器に生じる一次一般膜応力	MPa
σ_1	二次燃焼器及び排ガス冷却器に生じる一次応力（内面）	MPa
σ_2	二次燃焼器及び排ガス冷却器に生じる一次応力（外面）	MPa
σ_{b2}	ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_b	ボルトに生じるせん断応力	MPa
F_b	ボルトに生じる引張力	N
Q_b	ボルトに生じるせん断力	N
σ_c	平均圧縮応力	MPa
$c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
$t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
f_c	圧縮力のみを受ける架台の許容圧縮応力	MPa
f_b	曲げ力のみを受ける架台の許容曲げ応力	MPa
f_t	引張力のみを受ける架台の許容引張応力	MPa

1.2.3 計算方法

固有周期及び地震力による応力計算には、汎用構造解析プログラム ABAQUS を用いる。主な構造部材の応力評価箇所を図-2に示す。

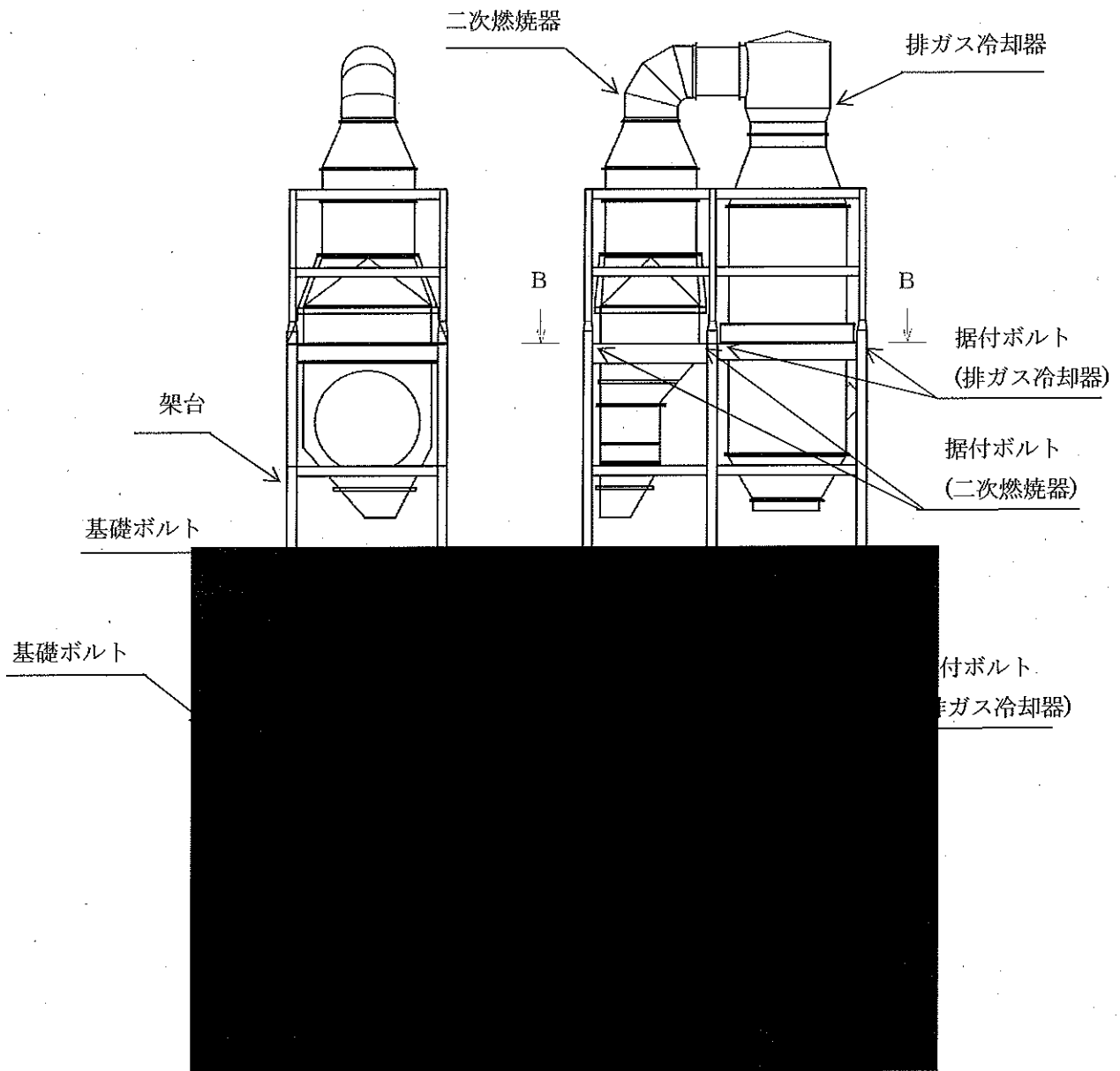


図-2 二次燃焼器／排ガス冷却器の応力評価箇所

1.2.4 設計条件

据付場所 (m)	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)
焼却設備室 (G. L. +0.25)	$C_{Hx}=0.56^{*1}$ $C_{Hy}=0.59^{*1}$	$C_v=0.19^{*2}$	-0.01	二次燃焼器：■ 排ガス冷却器：■ 架台：■ 据付ボルト：■ 基礎ボルト：■

*1 水平方向の一次固有振動数はx方向 ■ Hz, y方向 ■ Hzであり, 動的地震力の設計震度はx方向0.56, y方向0.59である。

*2 鉛直方向の一次固有振動数は ■ Hzであり, 動的地震力の設計震度は0.19である。

1.2.5 機器要目

m_1 (kg)	m_2 (kg)	m_3 (kg)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	W_1 (mm)	W_2 (mm)	W_3 (mm)	H_1 (mm)	H_2 (mm)
■	■	■	2812	3618	■	2812	3618	■	14759	14984

H_3 (mm)	A_4 (mm ²)	A_5 (mm ²)	A_6 (mm ²)	n_4 (本)	n_5 (本)	n_6 (本)	n_{t4} (本)	n_{t5} (本)	n_{t6} (本)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

二次燃焼器, 排ガス冷却器				架台		
厚さ ≤ 16mm		16mm ≤ 厚さ ≤ 40mm		S_y	S_u	F
S_y (MPa)	S_u (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
■	■	■	■	■	■	■

据付ボルト (二次燃焼器)						据付ボルト (排ガス冷却器)			基礎ボルト		
SNB7 ■			S45C ■			S45C			S_y	S_u	F
S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

1.2.6 評価結果

解析で求めた各部材に生じる応力が許容応力以下であることを確認した。(表-2)

表-2 二次燃焼器及び排ガス冷却器の応力評価結果

部材	材料	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
二次燃焼器	SS400	一次一般膜	85	218
		一次	115	209
排ガス冷却器	SS400	一次一般膜	58	218
		一次	196	209
架台	SS400	一次(組合せ)	203	218
		圧縮と曲げの組合せ	$\frac{ \sigma_c }{1.5f_c} + \frac{ \sigma_b }{1.5f_b} \leq 1, \frac{ \sigma_b - \sigma_c }{1.5f_t} \leq 1$ 0.93 (無次元)	
据付ボルト (二次燃焼器)	SNB7	引張	—	398
	■	せん断	216	306
	S45C	引張	22	331
	■	せん断	115	255
据付ボルト (排ガス冷却器)	S45C	引張	311	331
		せん断	128	255
基礎ボルト	SS400	引張	97	156
		せん断	27	120

二次燃焼器及び排ガス冷却器の一次一般膜応力及び一次応力は、解析によって得られた応力成分から、以下の算出式によって求められる。

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2\right)}, \quad \sigma_b = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} - \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2\right)}$$

$$\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \max(|\sigma_a - \sigma_b|, |\sigma_a|, |\sigma_b|)$$

また、ボルトに生じる応力については、解析により求められた引張力 F_b 、せん断力 Q_b より、以下の算出式によって求められる。

$$\sigma_{b2} = \frac{F_b}{n_t \cdot A}, \quad \tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A}$$

1.3 バグフィルタ

1.3.1 計算条件

- (1) バグフィルタは、据付ボルトで架台に固定する。
- (2) 架台は、基礎ボルトで基礎に固定する。
- (3) 固有振動解析した結果、1次固有振動数が20Hz未満の場合、共振のおそれのあるものとして、弾性設計用地震動 S_d の1/2倍を用いた地震力を考慮する。

1.3.2 記号の説明

記号	記号の説明	単位
m_1	バグフィルタの質量	kg
m_2	架台の質量	kg
L_1	バグフィルタの長さ	mm
L_2	架台の長さ	mm
W_1	バグフィルタの幅	mm
W_2	架台の幅	mm
H_1	バグフィルタの高さ	mm
H_2	架台の高さ	mm
A_3	据付ボルトの断面積	mm ²
A_4	基礎ボルトの断面積	mm ²
n_3	据付ボルトの本数	本
n_4	基礎ボルトの本数	本
n_{t3}	水平方向の引張力を受ける据付ボルトの本数	本
n_{t4}	水平方向の引張力を受ける基礎ボルトの本数	本
S_y	設計降伏点 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に規定される値	MPa
S_u	設計引張強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に規定される値	MPa
F	許容応力算定用基準値	MPa
C_{Hx}	水平 x 方向設計震度	—
C_{Hy}	水平 y 方向設計震度	—
C_v	鉛直方向設計震度	—
σ_b	ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_b	ボルトに生じるせん断応力	MPa
F_b	ボルトに生じる引張力	N
Q_b	ボルトに生じるせん断力	N
σ_c	平均圧縮応力	MPa
$c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
$t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa

記号	記号の説明	単位
f_c	圧縮力のみを受ける架台の許容圧縮応力	MPa
f_b	曲げ力のみを受ける架台の許容曲げ応力	MPa
f_t	引張力のみを受ける架台の許容引張応力	MPa

1.3.3 計算方法

固有周期及び地震力による応力計算には、汎用構造解析プログラム ABAQUS を用いる。主な構造部材の応力評価箇所を図-3 に示す。

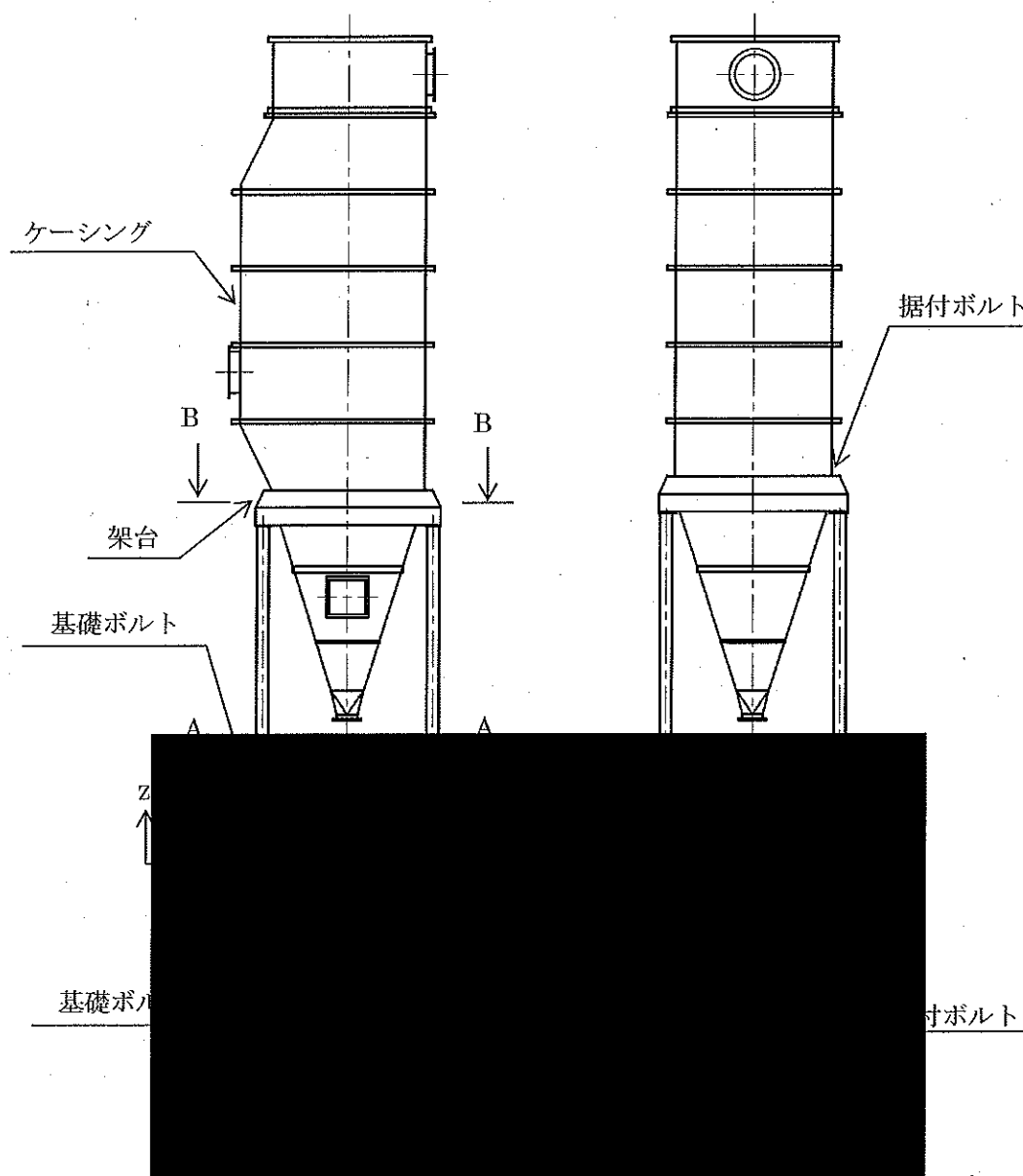


図-3 バグフィルタの応力評価箇所

1.3.4 設計条件

据付場所 (m)	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)
焼却設備室 (G.L. +0.25)	$C_{Hx}=0.73^{*1}$ $C_{Hy}=0.73^{*1}$	$C_v=0.20^{*2}$	-0.01	ケーシング：■ 架台：■ 据付ボルト：■ 基礎ボルト：■

*1 水平方向の一次固有振動数は x 方向 ■ Hz, y 方向 ■ Hz であり, 動的地震力の設計震度は x 方向 0.73, y 方向 0.73 である。

*2 鉛直方向の一次固有振動数は ■ Hz であり, 動的地震力の設計震度は 0.20 である。

1.3.5 機器要目

m_1 (kg)	m_2 (kg)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	W_1 (mm)	W_2 (mm)	H_1 (mm)	H_2 (mm)
■	■	2680	■	2610	■	11600	■

A_3 (mm ²)	A_4 (mm ²)	n_3 (本)	n_4 (本)	n_{t3} (本)	n_{t4} (本)
■	■	■	■	■	■

ケーシング		架台			据付ボルト			基礎ボルト		
S_y (MPa)	S_u (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

1.3.6 評価結果

解析で求めた各部材に生じる応力が許容応力以下であることを確認した。(表-3)

表-3 バグフィルタの応力評価結果

部材	材料	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
ケーシング	SS400	一次一般膜	137	193
		一次	149	193
架台	SS400	一次+二次 (組合せ)	97	193
		圧縮と曲げの 組合せ	$\frac{ \sigma_c }{1.5f_c} + \frac{ \sigma_b }{1.5f_b} \leq 1, \quad \frac{ \sigma_b - \sigma_c }{1.5f_t} \leq 1$	
			0.48 (無次元)	
据付ボルト	SS400	引張	81	138
		せん断	63	106
基礎ボルト	SS400	引張	115	170
		せん断	24	131

なお、ボルトに生じる応力については、解析により求められた引張力 F_b 、せん断力 Q_b より、以下の算出式によって求められる。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_t \cdot A}, \quad \tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A}$$

1.4 排ガスフィルタ

1.4.1 計算条件

- (1) 排ガスフィルタは、基礎ボルトで基礎に固定する。
- (2) 固有振動解析した結果、1次固有振動数が20Hz未満の場合、共振のおそれのあるものとして、弾性設計用地震動 S_d の1/2倍を用いた地震力を考慮する。

1.4.2 記号の説明

記号	記号の説明	単位
m	排ガスフィルタの質量	kg
L	排ガスフィルタの長さ	mm
W	排ガスフィルタの幅	mm
H	排ガスフィルタの高さ	mm
A	基礎ボルトの断面積	mm ²
n	基礎ボルトの本数	本
n _t	水平方向の引張力を受ける基礎ボルトの本数	本
S _y	設計降伏点 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に規定される値	MPa
S _u	設計引張強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に規定される値	MPa
F	許容応力算定用基準値	MPa
C _H	水平方向設計震度	—
σ _b	ボルトに生じる引張応力	MPa
τ _b	ボルトに生じるせん断応力	MPa
F _b	ボルトに生じる引張力	N
Q _b	ボルトに生じるせん断力	N

1.4.3 計算方法

固有周期及び地震力による応力計算には、汎用構造解析プログラム ABAQUS を用いる。主な構造部材の応力評価箇所を図-4に示す。

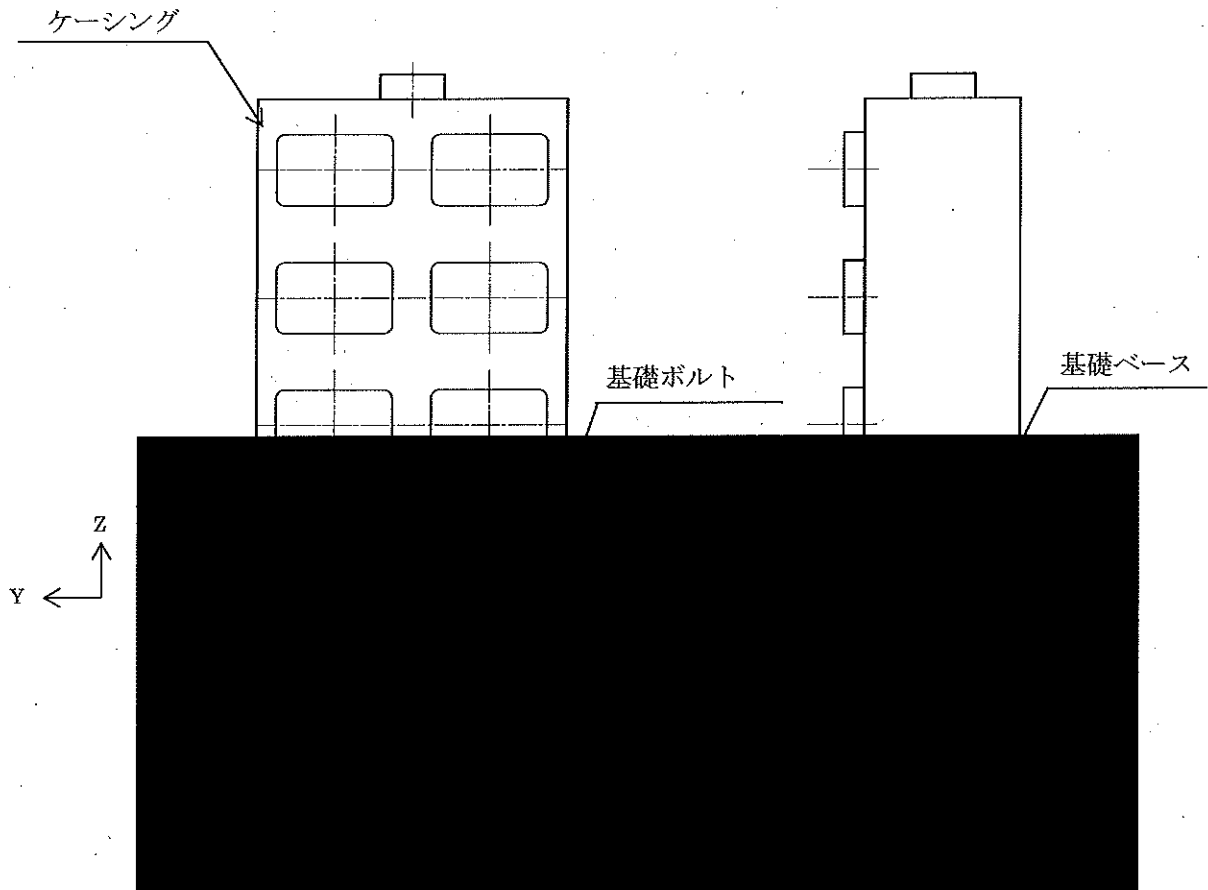


図-4 排ガスフィルタの応力評価箇所

1.4.4 設計条件

据付場所 (m)	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)
焼却設備排気機械室 (G. L. +7.80)	$C_H=0.46^{*1}$	— ^{*2}	-0.01	ケーシング：■ 基礎ベース：■ 基礎ボルト：■

*1 水平方向の一次固有振動数は ■ Hz であり、動的地震力の設計震度は 0.33 であるが、静的地震力の設計震度が 0.46 であるため、静的地震力で評価を行う。

*2 鉛直方向の一次固有振動数は ■ Hz であり、20Hz を超えるため、動的地震力を考慮しない。

1.4.5 機器要目

m (kg)	L (mm)	W (mm)	H (mm)	A (mm ²)	n (本)	n _t (本)
■	2000	900	3150	■	■	■

ケーシング及び 基礎ベース		基礎ボルト		
S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)
■	■	■	■	■

1.4.6 評価結果

解析で求めた各部材に生じる応力が許容応力以下であることを確認した。(表-4)

表-4 排ガスフィルタの応力評価結果

部材	材料	応力の種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
ケーシング及び 基礎ベース	SS400	一次一般膜	80	193
		一次	109	193
基礎ボルト	SS400	引張	11	170
		せん断	19	131



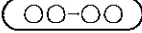

なお、ボルトに生じる応力については、解析により求められた引張力F_b、せん断力Q_bより、以下の算出式によって求められる。

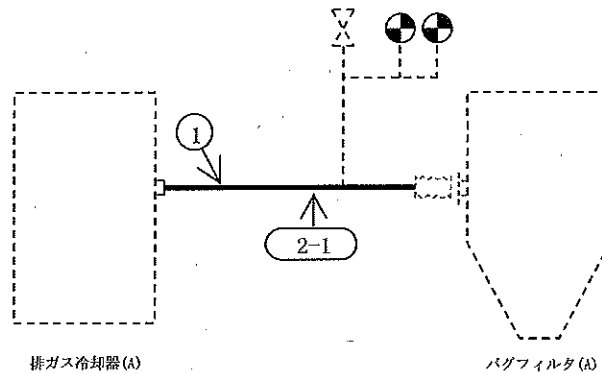
$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_t \cdot A}, \quad \tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A}$$

1.5 煙道

煙道における解析範囲は、排ガス冷却器出口から排ガスフィルタ入口までの煙道である。
解析範囲の概略系統図を図-5、6に示す。

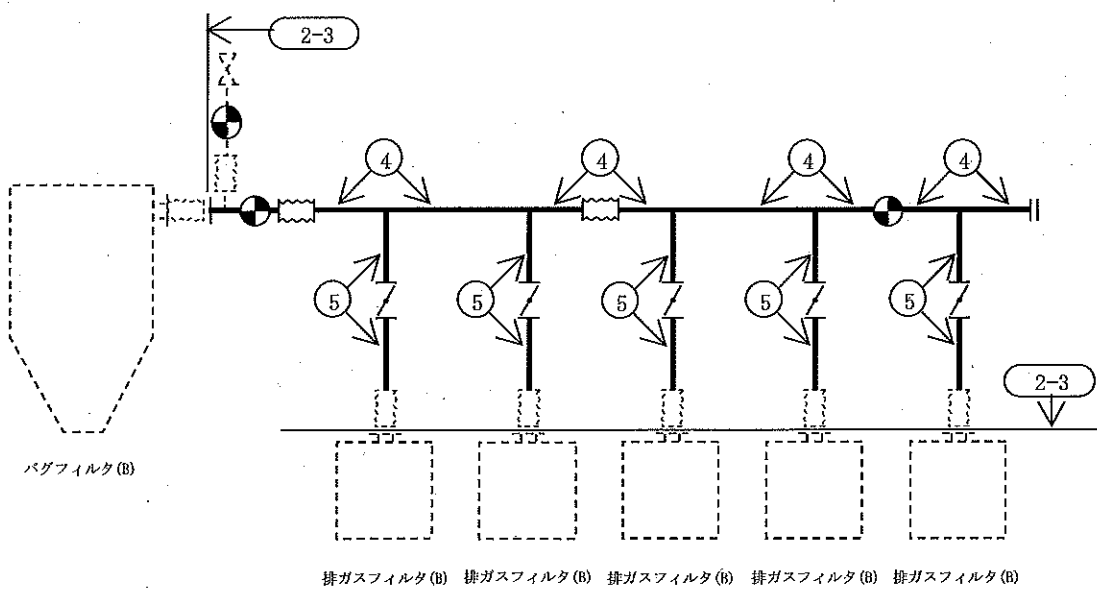
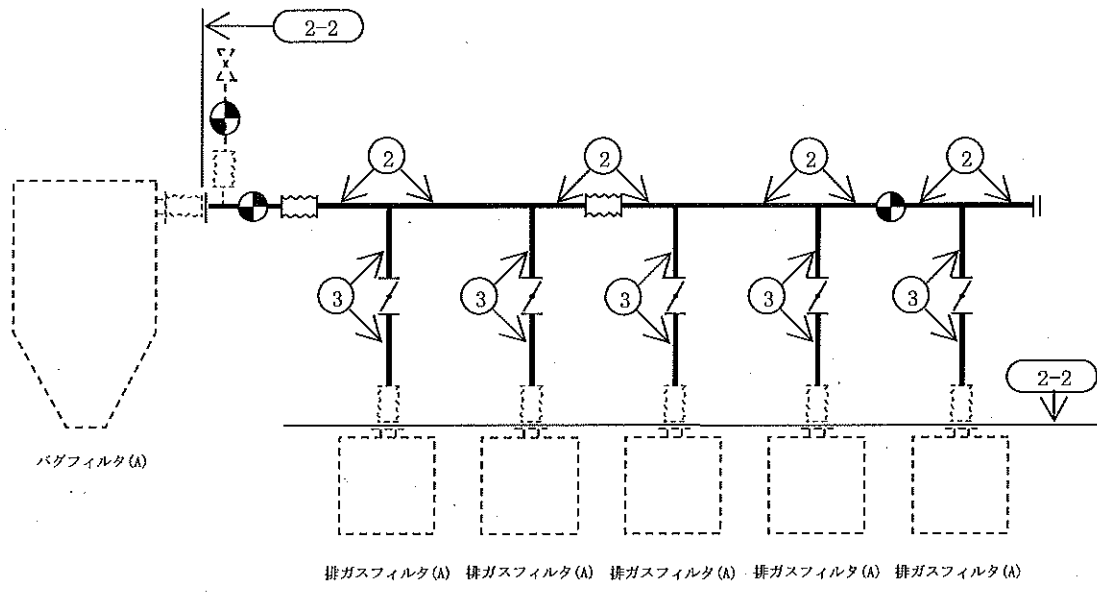
概略系統図記号凡例

記号	内容
 (太線)	評価対象範囲
 (点線)	評価対象範囲外
	鳥瞰図記号
	アンカ



注記 A系とB系は同一である

図-5 概略系統図 (排ガス冷却器出口からバグフィルタ入口までの煙道)



図一六 概略系統図 (バグフィルタ出口から排ガスフィルタ入口までの煙道)

1.5.1 計算条件

- (1) 煙道は、アンカ及びレストレイントにより支持される。
- (2) 固有振動解析した結果、1次固有振動数が20Hz未満の場合、共振のおそれのあるものとして、弾性設計用地震動 S_d の1/2倍を用いた地震力を考慮する。

1.5.2 記号の説明

記号	記号の説明	単位
$S_{p,rm}$	一次応力	MPa
i	応力係数	—
M_a	管の機械的荷重（自重その他の長期的荷重に限る）により生じるモーメント	N・mm
M_b	管の機械的荷重（地震を含めた短期的荷重）により生じるモーメント	N・mm
Z	断面係数	mm ³

1.5.3 計算方法

固有周期及び地震力による応力計算には、計算機コードAutoPIPEを用いる。鳥瞰図番号ごとに設定条件に対応した範囲で区分する。（表-5）

区分した範囲と対応する評価点番号を示し、評価点の位置は鳥瞰図に示す。（表-6，図-7，8，9）

表-5 設計条件

解析範囲		排ガス冷却器出口から 排ガスフィルタ入口までの煙道			
鳥瞰図	No.	最高使用温度 (°C)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料
2-1	①	■	718.0	9.0	SS400
2-2	②	■	711.2	6.4	STPY400
	③	■	457.2	7.9	SGP
2-3	④	■	711.2	6.4	STPY400
	⑤	■	457.2	7.9	SGP

表-6 評価点番号

鳥瞰図	No.	対応する評価点
2-1	①	
	②	
2-2		
	③	
	④	
2-3		
	⑤	

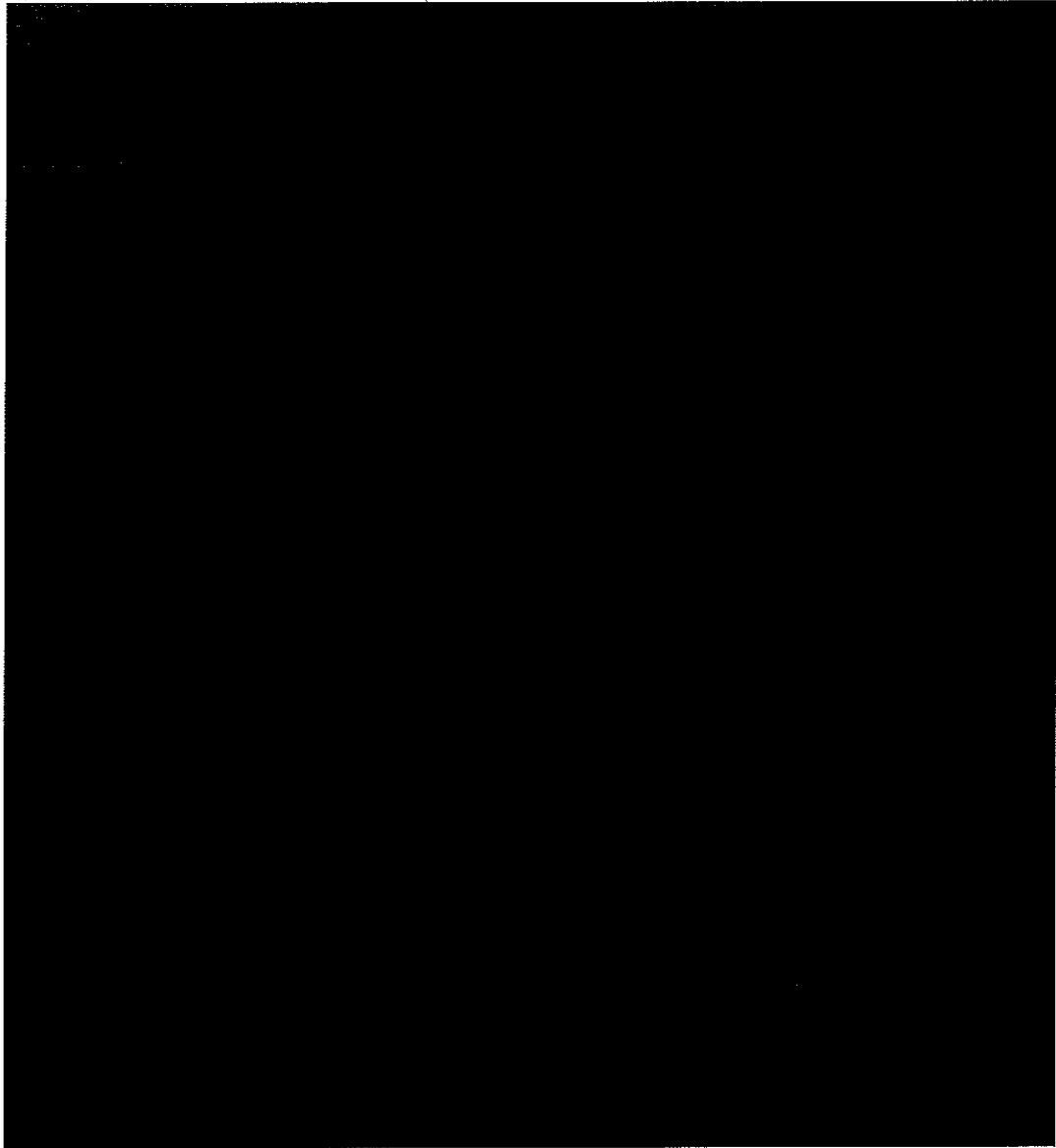


図-7 鳥瞰図 2-1

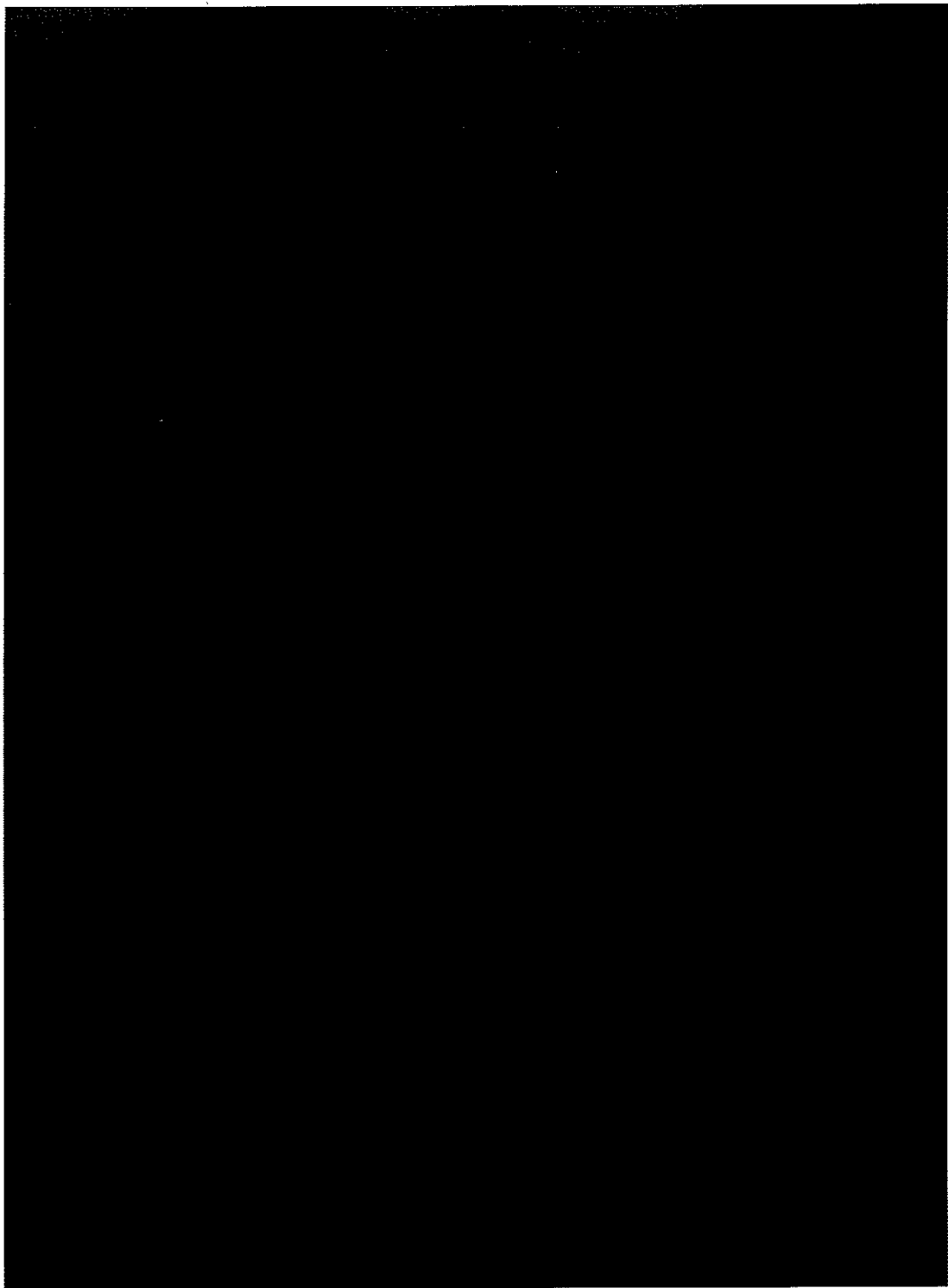


図-8 鳥瞰図 2-2

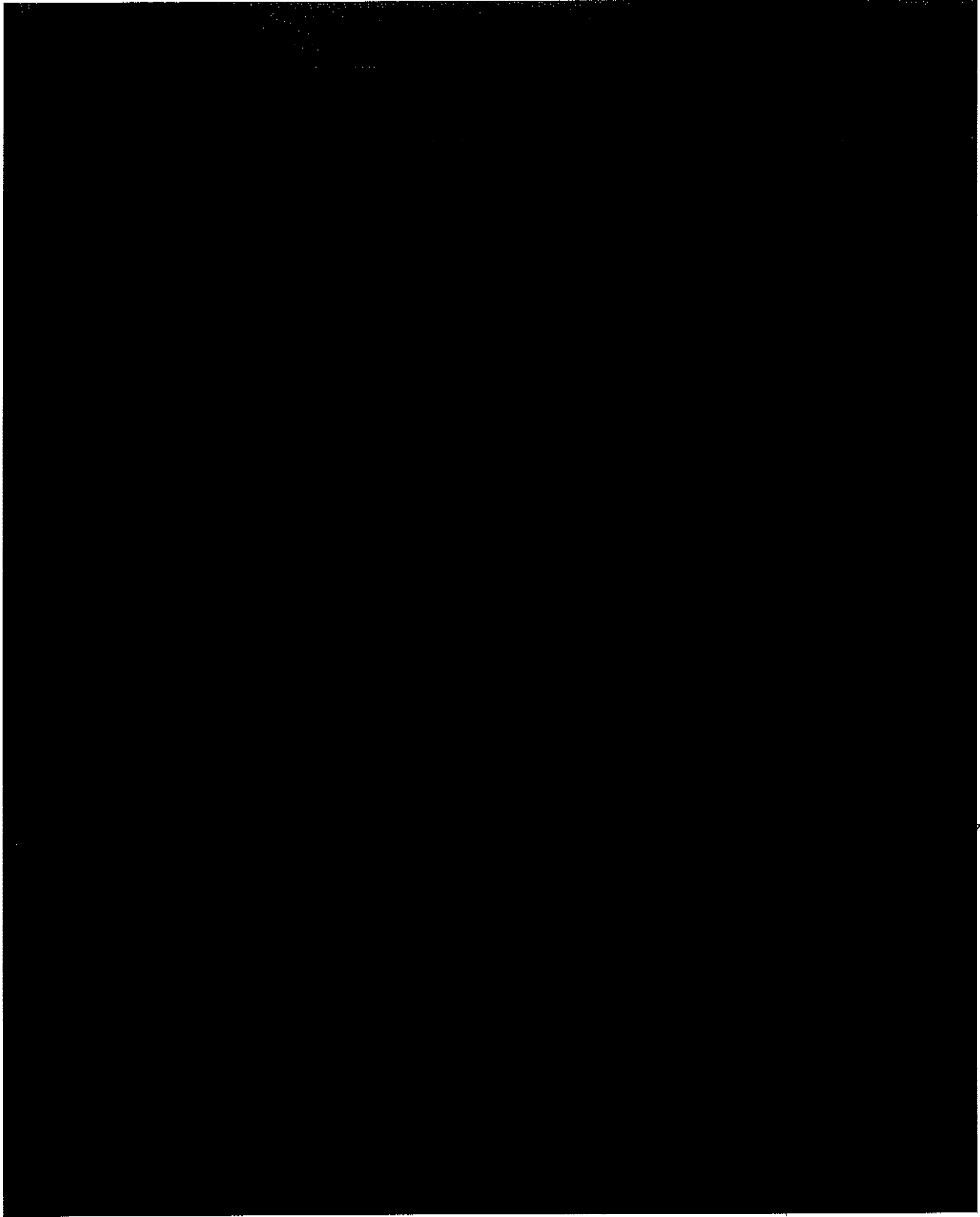


図-9 鳥瞰図 2-3

1.5.4 設計震度

鳥瞰図 \ 方向	水 平		鉛 直
	X	Z	Y
2-1	0.85 ^{*1}	0.85 ^{*1}	— ^{*1}
2-2	0.87 ^{*2}	0.87 ^{*2}	0.72 ^{*2}
2-3	0.85 ^{*3}	0.85 ^{*3}	0.72 ^{*4}

*1 一次固有振動数は [] Hz であり、20Hz を超えるため、動的地震力を考慮しない。

*2 一次固有振動数は [] Hz であり、動的地震力の設計震度は水平方向 0.87、鉛直方向 0.72 である。

*3 一次固有振動数は [] Hz であり、水平方向の動的地震力の設計震度は 0.62 であるが、静的地震力の設計震度が 0.85 であるため、静的地震力で評価を行う。

*4 一次固有振動数は [] Hz であり、鉛直方向の動的地震力の設計震度は 0.72 である。

1.5.5 評価結果

(1) 応力評価

解析によりモーメントを算出し、次式より求めた応力が許容応力以下であることを確認した。(表-7)

$$S_{prim} = \frac{0.75 \cdot i (M_a + M_b)}{Z}$$

表-7 煙道の応力評価結果

鳥瞰図	最大応力 評価点	一次応力 (MPa)	
		算出応力	許容応力
2-1	2	10	193
2-2	A11	27	126
2-3	A04	56	126

II. 雑固体廃棄物焼却設備の強度に係る補足説明

1. 基本方針

1.1 強度評価の基本方針

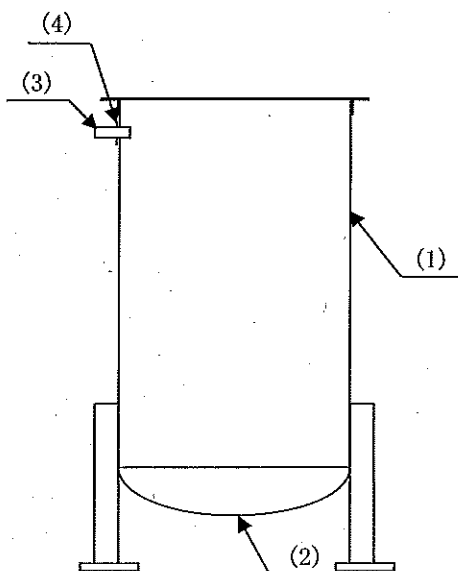
雑固体廃棄物焼却設備を構成する機器のうち、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」において、クラス3に位置付けられる機器は、「設計・建設規格」に準拠した設計・検査を行う。

2. 強度評価

2.1 高電導度廃液サンプル

2.1.1 評価箇所

強度評価箇所を図-1に示す。



図中の番号は、2.1.2の番号に対応する。

図-1 高電導度廃液サンプル概要図

2.1.2 評価結果

(1) 胴の厚さの評価

胴板名称		胴板
材料		SUS304
水頭	H (m)	■
最高使用温度	(°C)	60
胴の内径	D_i (m)	1.50
液体の比重	ρ	1.0
許容引張応力	S (MPa)	127
継手効率	η	0.70
継手の種類		突合せ両側溶接
放射線検査の有無		無し
胴の規格上必要な最小厚さ	t_1 (mm)	1.50
胴の計算上必要な厚さ	t_2 (mm)	■
t_1 t_2 の大きい値	t (mm)	1.50
胴の呼び厚さ	t_{s0} (mm)	8.00
胴の最小厚さ	t_s (mm)	■
評価： $t_s \geq t$, よって十分である。		

(2) 底板の厚さの評価

底板名称		鏡板
鏡板の外径	D_{oc} (mm)	■
鏡板の中央部における内面の半径	R (mm)	■
鏡板のすみの丸みの内半径	r (mm)	■
$3 \cdot t_{c0}$	(mm)	24.00
$0.06 \cdot D_{oc}$	t_s (mm)	■
評価： $D_{oc} \geq R$, $r \geq 3 \cdot t_{c0}$, $r \geq 0.06 \cdot D_{oc}$, $r \geq 50\text{mm}$, よってさら形鏡板である。		

底板名称		鏡板
材料		SUS304
最高使用圧力	P (MPa)	0.03
最高使用温度	(°C)	60
胴の内径	D_i (mm)	1500.00
さら形鏡板の形状による係数	W	■
許容引張応力	S (MPa)	127
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
鏡板のフランジ部の計算上必要な厚さ	t_1 (mm)	0.18
鏡板の計算上必要な厚さ	t_2 (mm)	0.28
t_1 t_2 の大きい値	t (mm)	0.28
鏡板の呼び厚さ	t_{c0} (mm)	8.00
鏡板の最小厚さ	t_c (mm)	■
評価： $t_c \geq t$, よって十分である。		

(3) 管台の厚さの評価

管台名称		液入口
材料		SUS304TP-S
水頭	H (m)	■
最高使用温度	(°C)	60
管台の内径	D_i (m)	■
液体の比重	ρ	1.0
許容引張応力	S (MPa)	127
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
管台の計算上必要な厚さ	t_1 (mm)	0.01
管台の規格上必要な最小厚さ	t_2 (mm)	3.50
t_1 t_2 の大きい値	t (mm)	3.50
管台の呼び厚さ	t_{no} (mm)	■
管台の最小厚さ	t_n (mm)	■
評価： $t_n \geq t$, よって十分である。		

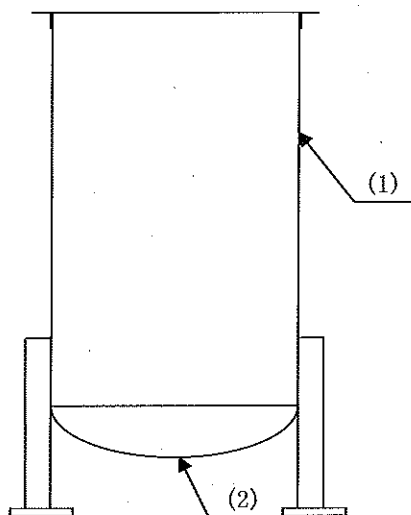
(4) 開放タンクの穴の補強計算

部材名称		液入口
胴板材料		SUS304
管台材料		SUS304TP-S
強め板材料		SUS304
最高使用圧力	P (MPa)	0.03
最高使用温度	(°C)	60
胴板の許容引張応力	S_s (MPa)	127
管台の許容引張応力	S_n (MPa)	127
強め板の許容引張応力	S_e (MPa)	127
胴の断面に現れる穴の径	d (mm)	
管台が取り付く穴の径	d_w (mm)	
胴の最小厚さ	t_s (mm)	
管台の最小厚さ	t_n (mm)	
胴板の継手効率	η	1.00
係数	F	1.00
胴の内径	D_i (mm)	1500.00
胴の計算上必要な最小厚さ	t_{sr} (mm)	0.18
管台の計算上必要な厚さ	t_{nr} (mm)	
穴の補強に必要な面積	A_r (mm ²)	
補強の有効範囲	X_1 (mm)	
補強の有効範囲	X_2 (mm)	
補強の有効範囲	X (mm)	
補強の有効範囲	Y_1 (mm)	
補強の有効範囲	Y_2 (mm)	
強め板の最小厚さ	t_e (mm)	
強め板の外径	B_e (mm)	
管台の外径	D_{on} (mm)	
溶接の脚長	L_1 (mm)	
溶接の脚長	L_2 (mm)	
溶接の脚長	L_3 (mm)	
胴板の補強に有効な面積	A_1 (mm ²)	502.3
管台の補強に有効な面積	A_2 (mm ²)	271.7
すみ肉溶接部の補強に有効な面積	A_3 (mm ²)	136.0
強め板の補強に有効な面積	A_4 (mm ²)	454.0
補強に有効な総面積	A_0 (mm ²)	1364.0
評価： $A_0 > A_r$ 、よって十分である。		
大きい穴の補強		
補強を要する穴の限界径	d_j (mm)	500.00
評価： $d \leq d_j$ 、よって大きい穴の補強計算は必要ない。		
溶接部にかかる荷重	W_1 (N)	1.094×10^5
溶接部にかかる荷重	W_2 (N)	-6.162×10^4
溶接部の負うべき荷重	W (N)	-6.162×10^4
評価： $W < 0$ 、よって溶接部の強度計算は必要ない。 以上より十分である。		

2.2 シャワードレンサンプ

2.2.1 評価箇所

強度評価箇所を図-2に示す。



図中の番号は、2.2.2の番号に対応する。

図-2 シャワードレンサンプ概要図

2.2.2 評価結果

(1) 胴の厚さの評価

胴板名称		胴板
材料		SUS304
水頭	H (m)	■
最高使用温度	(°C)	60
胴の内径	D_i (m)	1.50
液体の比重	ρ	1.0
許容引張応力	S (MPa)	127
継手効率	η	0.70
継手の種類		突合せ両側溶接
放射線検査の有無		無し
胴の規格上必要な最小厚さ	t_1 (mm)	1.50
胴の計算上必要な厚さ	t_2 (mm)	■
t_1 t_2 の大きい値	t (mm)	1.50
胴の呼び厚さ	$t_{s.o}$ (mm)	8.00
胴の最小厚さ	t_s (mm)	■
評価： $t_s \geq t$ ，よって十分である。		

(2) 底板の厚さの評価

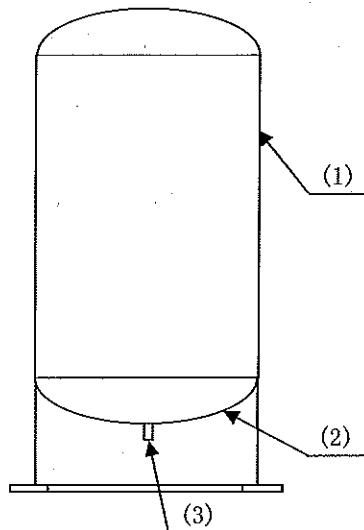
底板名称		鏡板
鏡板の外径	D_{oc} (mm)	■
鏡板の中央部における内面の半径	R (mm)	■
鏡板のすみの丸みの内半径	r (mm)	■
$3 \cdot t_{co}$	(mm)	24.00
$0.06 \cdot D_{oc}$	t_s (mm)	■
評価： $D_{oc} \geq R$, $r \geq 3 \cdot t_{co}$, $r \geq 0.06 \cdot D_{oc}$, $r \geq 50\text{mm}$, よってさら形鏡板である。		

底板名称		鏡板
材料		SUS304
最高使用圧力	P (MPa)	0.03
最高使用温度	(°C)	60
胴の内径	D_i (mm)	1500.00
さら形鏡板の形状による係数	W	■
許容引張応力	S (MPa)	127
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
鏡板のフランジ部の計算上必要な厚さ	t_1 (mm)	0.18
鏡板の計算上必要な厚さ	t_2 (mm)	0.28
$t_1 t_2$ の大きい値	t (mm)	0.28
鏡板の呼び厚さ	t_{co} (mm)	8.00
鏡板の最小厚さ	t_c (mm)	■
評価： $t_c \geq t$, よって十分である。		

2.3 高電導度廃液サンプルタンク及びシャワードレンサンプルタンク

2.3.1 評価箇所

強度評価箇所を図-3に示す。



図中の番号は、2.3.2の番号に対応する。

図-3 高電導度廃液サンプルタンク/シャワードレンサンプルタンク概要図

2.3.2 評価結果

(1) 胴の厚さの評価

胴板名称			胴板
材料			SUS304
水頭	H	(m)	■
最高使用温度		(°C)	60
胴の内径	D_i	(m)	1.50
液体の比重	ρ		1.0
許容引張応力	S	(MPa)	127
継手効率	η		0.70
継手の種類			突合せ両側溶接
放射線検査の有無			無し
胴の規格上必要な最小厚さ	t_1	(mm)	1.50
胴の計算上必要な厚さ	t_2	(mm)	■
t_1 t_2 の大きい値	t	(mm)	1.50
胴の呼び厚さ	$t_{s.o}$	(mm)	8.00
胴の最小厚さ	t_s	(mm)	■
評価： $t_s \geq t$ ，よって十分である。			

(2) 底板の厚さの評価

底板名称			鏡板
鏡板の外径	D_{oc}	(mm)	
鏡板の中央部における内面の半径	R	(mm)	
鏡板のすみの丸みの内半径	r	(mm)	
$3 \cdot t_{co}$		(mm)	24.00
$0.06 \cdot D_{oc}$	t_s	(mm)	
評価: $D_{oc} \geq R$, $r \geq 3 \cdot t_{co}$, $r \geq 0.06 \cdot D_{oc}$, $r \geq 50\text{mm}$, よってさら形鏡板である。			

底板名称			鏡板
材料			SUS304
最高使用圧力	P	(MPa)	0.03
最高使用温度		(°C)	60
胴の内径	D_i	(mm)	1500.00
さら形鏡板の形状による係数	W		
許容引張応力	S	(MPa)	127
継手効率	η		1.00
継手の種類			継手無し
放射線検査の有無			—
鏡板のフランジ部の計算上必要な厚さ	t_1	(mm)	0.18
鏡板の計算上必要な厚さ	t_2	(mm)	0.28
$t_1 t_2$ の大きい値	t	(mm)	0.28
鏡板の呼び厚さ	t_{co}	(mm)	8.00
鏡板の最小厚さ	t_c	(mm)	
評価: $t_c \geq t$, よって十分である。			

(3) 管台の厚さの評価

管台名称			液出口
材料			SUS304TP-S
水頭	H	(m)	
最高使用温度		(°C)	60
管台の内径	D_i	(mm)	
液体の比重	ρ		1.0
許容引張応力	S	(MPa)	127
継手効率	η		1.00
継手の種類			継手無し
放射線検査の有無			—
管台の計算上必要な厚さ	t_1	(mm)	0.01
管台の規格上必要な最小厚さ	t_2	(mm)	2.40
$t_1 t_2$ の大きい値	t	(mm)	2.40
管台の呼び厚さ	t_{no}	(mm)	
管台の最小厚さ	t_n	(mm)	
評価: $t_n \geq t$, よって十分である。			

2.4 主配管

2.4.1 評価箇所

強度評価箇所を図-4に示す。

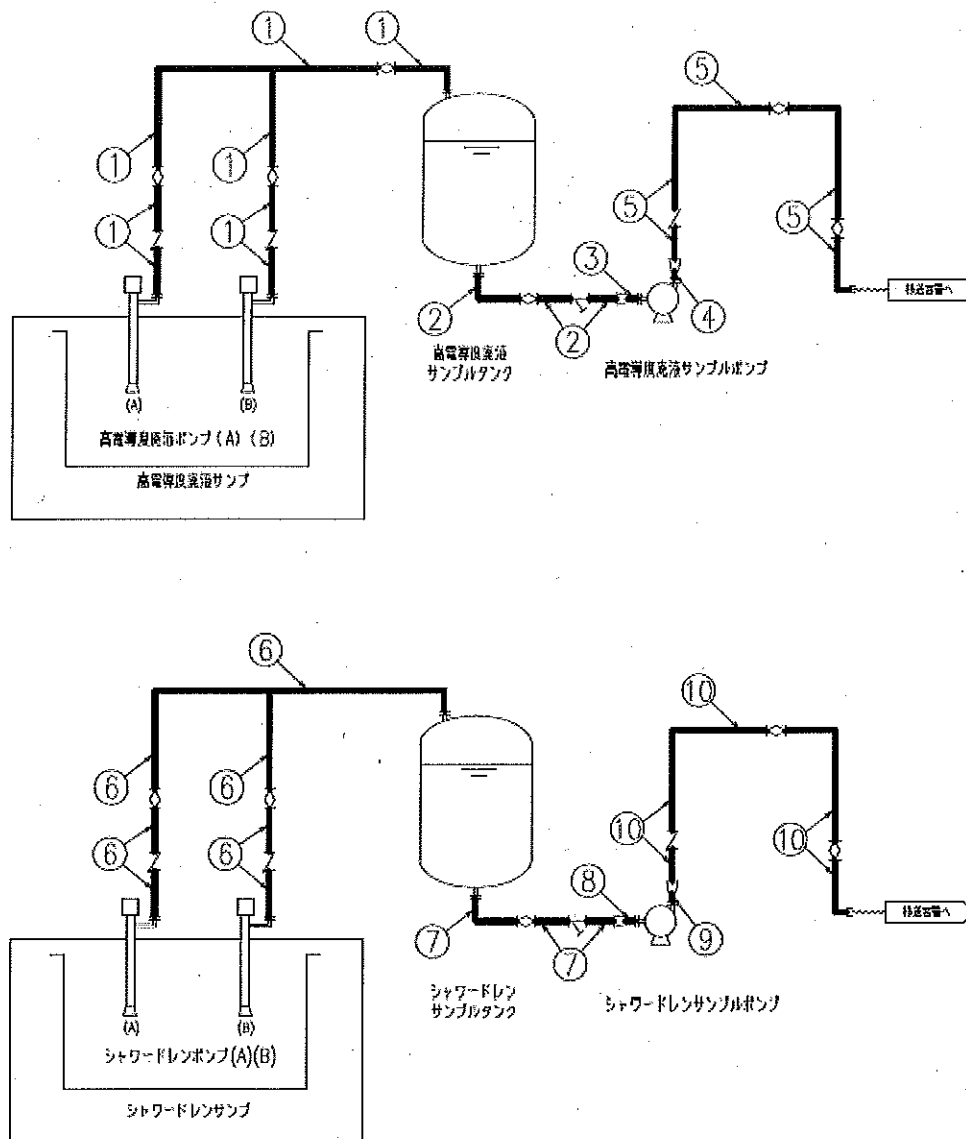


図-4 廃液処理設備 系統図

2.4.2 評価結果

(1) 管の厚さの評価

No.	最高使用 圧力 P (MPa)	最高使用 温度 (°C)	外径 D。 (mm)	公称 厚さ (mm)	材料	S (MPa)	η	負の公差 (mm)	最小厚さ (mm)	必要厚さ (mm)
①	0.40	60	48.6	3.00	SUS304	127	1.00	■	■	0.08
②	静水頭	60	60.5	3.50	SUS304	—	—	■	■	—
③	静水頭	60	48.6	3.00	SUS304	—	—	■	■	—
④	0.40	60	34.0	3.00	SUS304	127	1.00	■	■	0.06
⑤	0.40	60	48.6	3.00	SUS304	127	1.00	■	■	0.08
⑥	0.30	60	48.6	3.00	SUS304	127	1.00	■	■	0.06
⑦	静水頭	60	60.5	3.50	SUS304	—	—	■	■	—
⑧	静水頭	60	48.6	3.00	SUS304	—	—	■	■	—
⑨	0.40	60	34.0	3.00	SUS304	127	1.00	■	■	0.06
⑩	0.40	60	48.6	3.00	SUS304	127	1.00	■	■	0.08

Ⅲ. 雑固体廃棄物焼却設備の公称値の許容範囲について

[焼却炉]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
長さ	10000	■	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
胴外径	2738	■	JIS による製造公差
外殻厚さ	19	■	【プラス側公差】 JIS による材料公差 【マイナス側公差】 JIS による材料公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[二次燃焼器]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
高さ	14759	■	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
胴外径	2812	■	JIS による製造公差
外殻厚さ	6	■	【プラス側公差】 JIS による材料公差 【マイナス側公差】 JIS による材料公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[排ガス冷却器]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
高さ	14600	■	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
胴外径	3618	■	JIS による製造公差
外殻厚さ	9	■	【プラス側公差】 JIS による材料公差 【マイナス側公差】 JIS による材料公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[バグフィルタ]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
たて	2680	■	JISによる製造公差
横	2610	■	同上
高さ	11600	■	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[排ガスフィルタ]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
たて	900	■	JISによる製造公差
横	2000	■	同上
高さ	3150	■	同上

[排気筒]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
内径	1800	■	JISによる製造公差
高さ	18900	■	JISによる製造公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[煙道]

No. ①*

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
外径	718.0	■	JISによる製造公差
厚さ	9.0	■	【プラス側公差】 JISによる材料公差 【マイナス側公差】 JISによる材料公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

注記*: 図-1における排ガス処理系系統図のNo.を示す。

〔煙道〕

No. ②*, ④*, ⑦*, ⑨*, ⑫*, ⑭*

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
外径	711.2	■	JISによる製造公差
厚さ	6.4	■	同上

注記*：図-1における排ガス処理系系統図のNo.を示す。

〔煙道〕

No. ③*, ⑤*, ⑥*, ⑪*

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
外径	457.2	■	JISによる製造公差
厚さ	7.9	■	【プラス側公差】 製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準 【マイナス側公差】 JISによる製造公差

注記*：図-1における排ガス処理系系統図のNo.を示す。

〔煙道〕

No. ⑧*, ⑩*, ⑬*, ⑮*

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
外径	355.6	■	JISによる製造公差
厚さ	7.9	■	【プラス側公差】 製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準 【マイナス側公差】 JISによる製造公差

注記*：図-1における排ガス処理系系統図のNo.を示す。

[高電導度廃液サンプ]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
胴内径	1500	■	設計・建設規格より同一断面における最大内径と最小内径との差は1%以下 製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
胴板厚さ	8	■ — ■	【プラス側公差】 JISによる板厚公差 【マイナス側公差】 JISによる板厚公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
鏡板厚さ	8	■ — ■	同上
平板厚さ	12	■ — ■	同上
高さ	2511	■	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[シャワードレンサンプ]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
胴内径	1500	■	設計・建設規格より同一断面における最大内径と最小内径との差は1%以下 製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
胴板厚さ	8	■ — ■	【プラス側公差】 JISによる板厚公差 【マイナス側公差】 JISによる板厚公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
鏡板厚さ	8	■ — ■	同上
平板厚さ	12	■ — ■	同上
高さ	2511	■	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[高電導度廃液サンプルタンク]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
胴内径	1500	■	設計・建設規格より同一断面における最大内径と最小内径との差は1%以下 製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
胴板厚さ	8	■ ■	【プラス側公差】 JISによる板厚公差 【マイナス側公差】 JISによる板厚公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
上部鏡板厚さ	8	■ ■	同上
下部鏡板厚さ	8	■ ■	同上
高さ	2598	■	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[シャワードレンサンプルタンク]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
胴内径	1500	■	設計・建設規格より同一断面における最大内径と最小内径との差は1%以下 製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
胴板厚さ	8	■ ■	【プラス側公差】 JISによる板厚公差 【マイナス側公差】 JISによる板厚公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
上部鏡板厚さ	8	■ ■	同上
下部鏡板厚さ	8	■ ■	同上
高さ	2598	■	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準

[主配管]

No. ①*, ③*, ⑤*, ⑥*, ⑧*, ⑩*

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
外径	48.6	■	JISによる製造公差
厚さ	3.0	■	同上

注記*: 添付資料 18 における強度評価の No. を示す。

[主配管]

No. ②*, ⑦*

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
外径	60.5	■	JISによる製造公差
厚さ	3.5	■	同上

注記*: 添付資料 18 における強度評価の No. を示す。

[主配管]

No. ④*, ⑨*

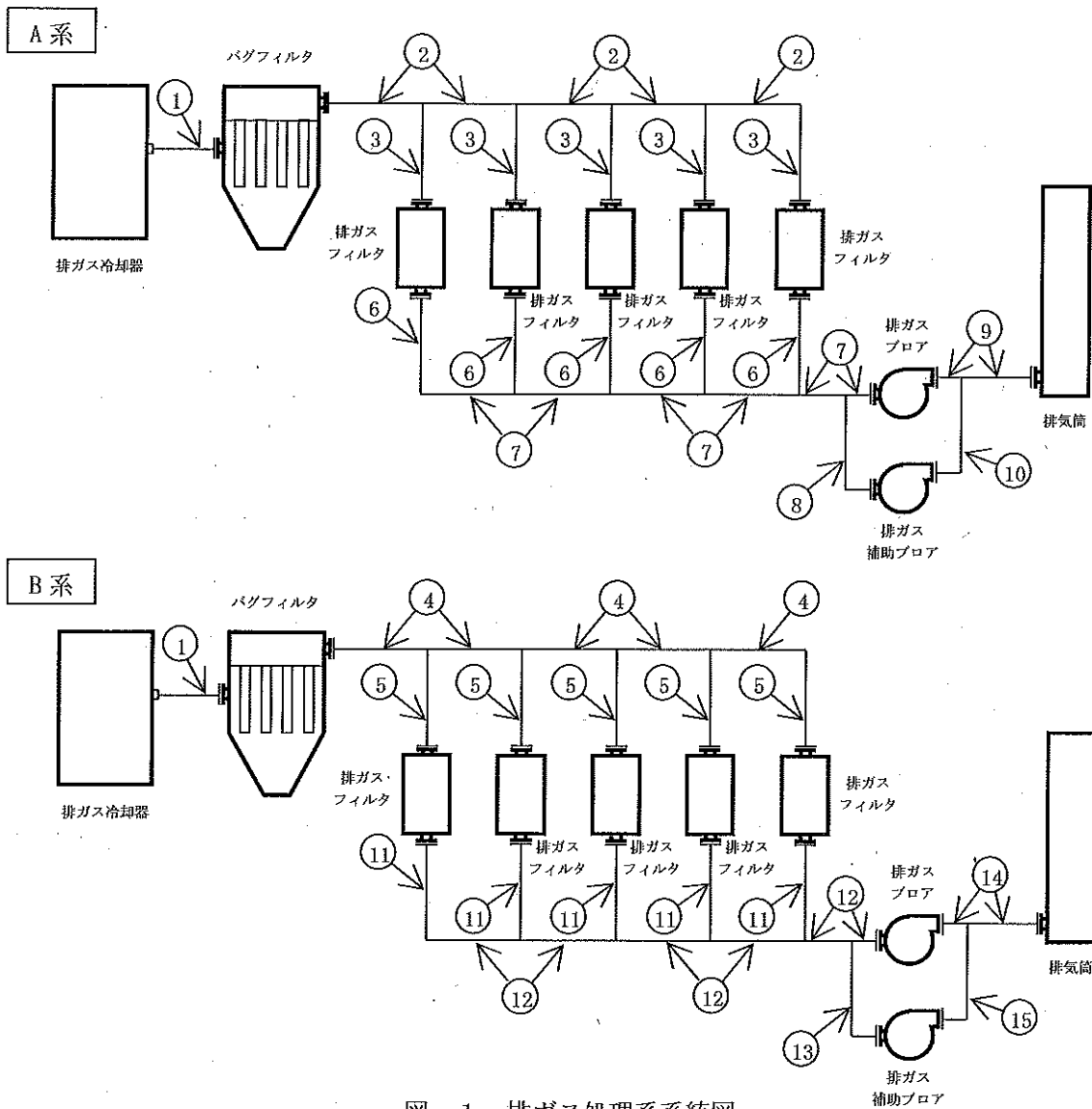
主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
外径	34.0	■	JISによる製造公差
厚さ	3.0	■	同上

注記*: 添付資料 18 における強度評価の No. を示す。

[排気処理装置]

主要寸法 (mm)		許容範囲	根 拠
たて	700	■	JISによる製造公差
横	4250	■	同上
高さ	2240	■	同上

No.	外 径 (mm)	厚 さ (mm)	材 料
①	718.0	9.0	SS400
②	711.2	6.4	STPY400
③	457.2	7.9	SGP
④	711.2	6.4	STPY400
⑤	457.2	7.9	SGP
⑥	457.2	7.9	SGP
⑦	711.2	6.4	STPY400
⑧	355.6	7.9	SGP
⑨	711.2	6.4	STPY400
⑩	355.6	7.9	SGP
⑪	457.2	7.9	SGP
⑫	711.2	6.4	STPY400
⑬	355.6	7.9	SGP
⑭	711.2	6.4	STPY400
⑮	355.6	7.9	SGP



図一 1 排ガス処理系系統図

別冊 16

建屋内 RO 循環設備に係る補足説明

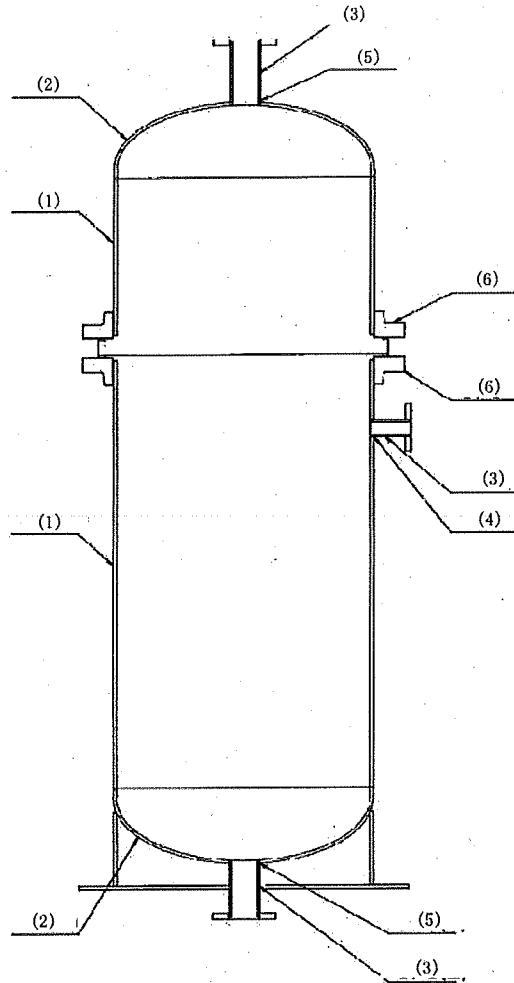
I. 建屋内 RO 循環設備の構造強度評価に係る補足説明

1. 強度評価

1.1 ろ過器

1.1.1 評価箇所

強度評価箇所を図-1に示す。





図中の番号は、1.1.2の番号に対応する。

図-1 ろ過器概要図

1.1.2 評価結果 (ろ過器)

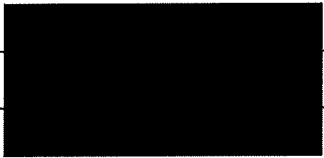

(1) 胴板の厚さ

胴板名称		胴板
材料		SM400A
最高使用圧力	P (MPa)	0.98
最高使用温度	(°C)	40
胴の内径	D _i (mm)	750.00
許容引張応力	S (MPa)	100
継手効率	η	0.7
継手の種類		突合せ両側溶接
放射線検査の有無		無し
必要厚さ	t ₁ (mm)	
必要厚さ	t ₂ (mm)	
t ₁ , t ₂ の大きい値	t (mm)	
呼び厚さ	t _{s0} (mm)	9.00
最小厚さ	t _s (mm)	
評価 : t _s ≥ t, よって胴板の厚さに問題ない。		

(2) 鏡板の形状

鏡板名称		鏡板
鏡板の内面における長径	D_{iL} (mm)	750.00
鏡板の内面における短径の1/2	h (mm)	187.50
長径と短径の比	$D_{iL}/(2 \cdot h)$	2.00
評価 : $D_{iL}/(2 \cdot h) \leq 2$, よって半だ円形鏡板である。		

(2) 鏡板の厚さ

鏡板名称		鏡板
材料		SM400A
最高使用圧力	P (MPa)	0.98
最高使用温度	(°C)	40
胴の内径	D_i (mm)	750.00
半だ円形鏡板の形状による係数	K	1.00
許容引張応力	S (MPa)	100
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
必要厚さ	t_1 (mm)	
必要厚さ	t_2 (mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t (mm)	
呼び厚さ	t_{co} (mm)	9.00
最小厚さ	t_c (mm)	
評価 : $t_c \geq t$, よって鏡板の厚さに問題ない。		

(3) 管台の厚さ (原水入口)

管台名称		原水入口
材料		STPT410-S
最高使用圧力	P (MPa)	0.98
最高使用温度	(°C)	40
管台の外径	D_0 (mm)	89.10
許容引張応力	S (MPa)	103
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
必要厚さ	t_1 (mm)	
必要厚さ	t_2 (mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t (mm)	
呼び厚さ	t_{no} (mm)	5.50
最小厚さ	t_n (mm)	
評価 : $t_n \geq t$, よって管台の厚さに問題ない。		

(3) 管台の厚さ (ろ過処理水出口)

管台名称		ろ過処理水出口
材料		STPT410-S
最高使用圧力	P (MPa)	0.98
最高使用温度	(°C)	40
管台の外径	D_0 (mm)	89.10
許容引張応力	S (MPa)	103
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
必要厚さ	t_1 (mm)	[Redacted]
必要厚さ	t_2 (mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t (mm)	
呼び厚さ	t_{n0} (mm)	5.50
最小厚さ	t_n (mm)	[Redacted]
評価 : $t_n \geq t$, よって管台の厚さに問題ない。		

(3) 管台の厚さ (逆洗ベント, 空気入口)

管台名称	逆洗ベント, 空気入口	
材料	STPT410-S	
最高使用圧力	P (MPa)	0.98
最高使用温度	(°C)	40
管台の外径	D_0 (mm)	48.60
許容引張応力	S (MPa)	103
継手効率	η	1.00
継手の種類	継手無し	
放射線検査の有無	-	
必要厚さ	t_1 (mm)	
必要厚さ	t_2 (mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t (mm)	
呼び厚さ	t_{no} (mm)	5.10
最小厚さ	t_n (mm)	
評価 : $t_n \geq t$, よって管台の厚さに問題ない。		

(4) 胴板の補強を要しない穴の最大径

胴板名称		胴板
材料		SM400A
最高使用圧力	P (MPa)	0.98
最高使用温度	(°C)	40
胴の外径	D (mm)	768.00
許容引張応力	S (MPa)	100
胴板の最小厚さ	t_s (mm)	6.59
継手効率	η	
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
$d_{r1} = (D - 2 \cdot t_s) / 4$	(mm)	
6l, d_{r1} の小さい値	(mm)	
K		
$D \cdot t_s$	(mm ²)	
200, d_{r2} の小さい値	d_{r2} (mm)	
補強を要しない穴の最大径	(mm)	
評価 : 補強を要する穴		無し

(5) 鏡板の補強を要しない穴の最大径

鏡板名称		鏡板
材料		SM400A
最高使用圧力	P (MPa)	0.98
最高使用温度	(°C)	40
鏡板のフランジ部の外径	D (mm)	768.00
許容引張応力	S (MPa)	100
鏡板の最小厚さ	t_c (mm)	5.62
継手効率	η	
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
$d_{r1} = (D - 2 \cdot t_c) / 4$	(mm)	
61, d_{r1} の小さい値	(mm)	
K		
$D \cdot t_c$	(mm ²)	
200, d_{r2} の小さい値	d_{r2} (mm)	
補強を要しない穴の最大径	(mm)	
評価 : 補強を要する穴		

(6) ろ過器胴フランジ応力 (1/2)

フランジ名称		胴フランジ	
フランジ材料		SF490A	
胴又は管台材料		SM400A	
ボルト材料		SNB7	
ガスケット材料		EPDM	
ガスケット厚さ (mm)		8.00	
ガスケット座面の形状		—	
最高使用圧力 P (MPa)		0.98	
許容引張応力	温度条件 (°C)	最高使用温度 (使用状態) 40	常温 (ガスケット締付時) 40
	ボルト (MPa)	$\sigma_b = 173$	$\sigma_a = 173$
	フランジ (MPa)	$\sigma_f = 123$	$\sigma_{f_a} = 123$
	胴又は管台 (MPa)	$\sigma_n = 100$	$\sigma_{n_a} = 100$
フランジの外径 A (mm)			
フランジの内径 B (mm)			
ボルト中心円の直径 C (mm)			
ガスケット有効径 G (mm)			
ハブ先端の厚さ g_0 (mm)			
フランジ背面のハブの厚さ g_1 (mm)			
ハブの長さ h (mm)			
ボルト呼び			M24
ボルト本数 n			24
ボルト谷径 d_b (mm)			20.752
ガスケット接触面の外径 G_s (mm)			
ガスケット接触面の幅 N (mm)			
ガスケット係数 m			
最小設計締付圧力 y (MPa)			
ガスケット座の基本幅 b_0 (mm)			
ガスケット座の有効幅 b (mm)			
内圧による全荷重 H (N)			
ガスケットに加える圧縮力 H_b (N)			
使用状態での最小ボルト荷重 W_{m1} (N)			
ガスケット締付最小ボルト荷重 W_{m2} (N)			
ボルトの所要 総有効断面積	使用状態 A_{m1} (mm ²)	2.992 × 10 ³	
	ガスケット締付時 A_{m2} (mm ²)	0.000	
	いずれか大きい値 A_m (mm ²)	2.992 × 10 ³	
実際のボルト総有効断面積 A_b (mm ²)		8.117 × 10 ³	
評価 : $A_b > A_m$, よって十分である。			

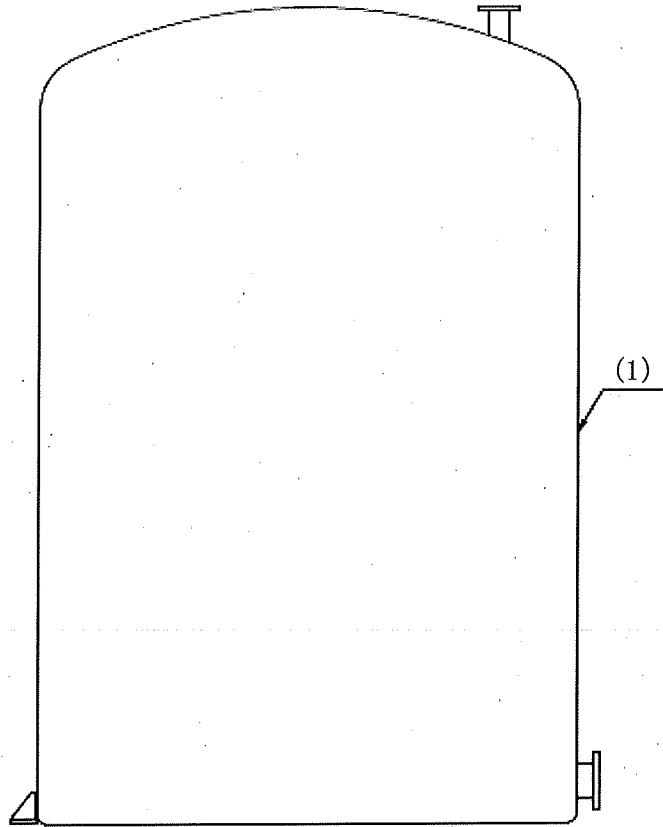
(6) ろ過器胴フランジ応力 (2/2)

フランジ名称		胴フランジ		
ボルト荷重	使用状態	W_0	(N)	5.175×10^5
	ガスケット締付時	W_g	(N)	9.609×10^5
距離		R	(mm)	— ※Rは不要
荷重			(N)	
モーメントアーム			(mm)	
モーメント			(N・m)	
フランジに作用するモーメント	使用状態		(N・m)	
	ガスケット締付時		(N・m)	
形状係数		h_0	(mm)	
係数		h/h_0		
係数		g_1/g_0		
ハブ応力修正係数		f		
係数		F_1		
係数		V_1		
フランジの内外径の比		K		
係数		T		
係数		U		
係数		Y		
係数		Z		
係数		d	(mm ³)	
係数		e	(mm ⁻¹)	
フランジの厚さ		t	(mm)	
係数		L		
使用状態におけるフランジの強さ				
応力	(MPa)	計算値	許容引張応力	
フランジハブの軸方向応力	σ_H		$1.5 \cdot \sigma_f = 184.5$	
フランジの半径方向応力	σ_R		$1.5 \cdot \sigma_n = 150$	
フランジの周方向応力	σ_T		$\sigma_f = 123$	
組合せ応力	$(\sigma_H + \sigma_R) / 2$		$\sigma_f = 123$	
	$(\sigma_H + \sigma_T) / 2$		$\sigma_f = 123$	
ガスケット締付時のフランジの強さ				
応力	(MPa)	計算値	許容引張応力	
フランジハブの軸方向応力	σ_H		$1.5 \cdot \sigma_{fa} = 184.5$	
フランジの半径方向応力	σ_R		$1.5 \cdot \sigma_{na} = 150$	
フランジの周方向応力	σ_T		$\sigma_{fa} = 123$	
組合せ応力	$(\sigma_H + \sigma_R) / 2$		$\sigma_{fa} = 123$	
	$(\sigma_H + \sigma_T) / 2$		$\sigma_{fa} = 123$	
評価	使用状態: $\sigma_H \leq \text{Min}(1.5 \cdot \sigma_f, 1.5 \cdot \sigma_n)$ ガスケット締付時: $\sigma_H \leq \text{Min}(1.5 \cdot \sigma_{fa}, 1.5 \cdot \sigma_{na})$ 使用状態: $\sigma_R \leq \sigma_f$ ガスケット締付時: $\sigma_R \leq \sigma_{fa}$ $\sigma_T \leq \sigma_f$ ガスケット締付時: $\sigma_T \leq \sigma_{fa}$ 使用状態: $(\sigma_H + \sigma_R) / 2 \leq \sigma_f$ ガスケット締付時: $(\sigma_H + \sigma_R) / 2 \leq \sigma_{fa}$ $(\sigma_H + \sigma_T) / 2 \leq \sigma_f$ ガスケット締付時: $(\sigma_H + \sigma_T) / 2 \leq \sigma_{fa}$ 以上より十分である。			

1.2 ろ過処理水受タンク

1.2.1 評価箇所

強度評価箇所を図-2に示す。



図中の番号は、1.2.2の番号に対応する。

図-2 ろ過処理水受タンク概要図

1.2.2 評価結果（ろ過処理水受タンク）

(1) 胴板の厚さ

胴板名称		胴板
材料		FRP
水頭	H (m)	4.0000
最高使用温度	(°C)	40
胴の内径	D_i (m)	2.40
液体の比重	ρ	1.03
許容引張応力	S (MPa)	21
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		無し
必要厚さ	t (mm)	
呼び厚さ	t_{so} (mm)	9.00
最小厚さ	t_s (mm)	
評価 : $t_s \geq t$, よって胴板の厚さに問題ない。		

1.3 建屋内 R0

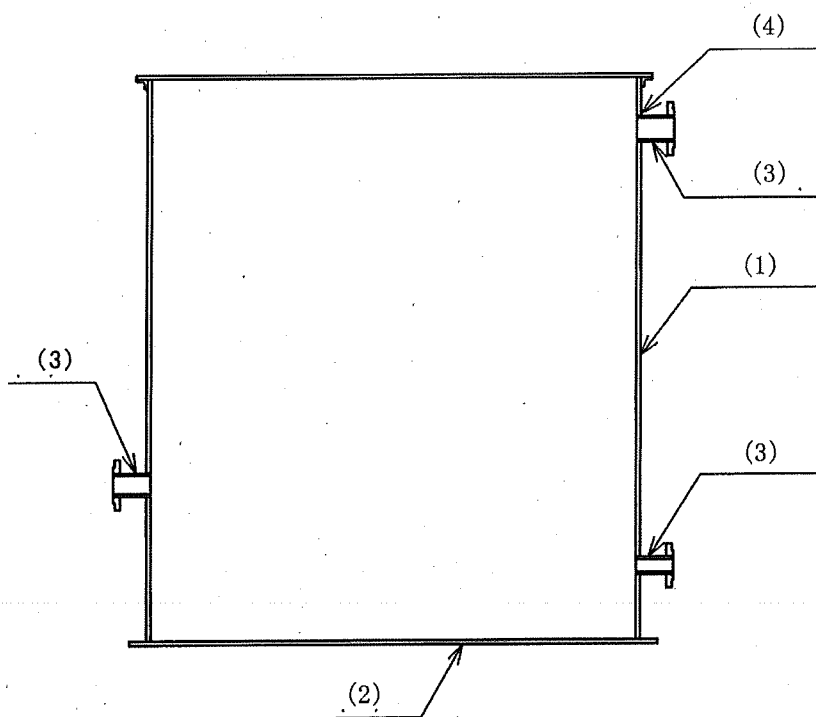
1.3.1 評価結果 (建屋内 R0)

機器名称	製造者仕様 最高使用圧力 (MPa)	製造者仕様 最高使用温度 (°C)	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)
建屋内 R0	6.9	49	4.5	40

1.4 淡水化処理水受タンク

1.4.1 評価箇所

強度評価箇所を図-3に示す。



図中の番号は、1.4.2の番号に対応する。

図-3 淡水化処理水受タンク概要図

1.4.2 評価結果（淡水化処理水受タンク）

(1) 胴板の厚さ

胴板名称			胴板
材料			SM400C
水頭	H	(m)	3.7760
最高使用温度		(°C)	40
胴の内径	D_i	(m)	2.50
液体の比重	ρ		1.00
許容引張応力	S	(MPa)	100
継手効率	η		0.70
継手の種類			突合せ両側溶接
放射線検査の有無			無し
必要厚さ	t_1	(mm)	
必要厚さ	t_2	(mm)	
必要厚さ	t_3	(mm)	
t_1, t_2, t_3 の大きい値	t	(mm)	
呼び厚さ	$t_{s.o}$	(mm)	9.00
最小厚さ	t_s	(mm)	
評価 : $t_s \geq t$, よって胴板の厚さに問題ない。			

(2) 底板

a. 底板の形

平板

b. 底板の厚さ

底板名称			底板
材料			SM400C
必要厚さ	t	(mm)	3.00
呼び厚さ	$t_{b.o}$	(mm)	12.00
最小厚さ	t_b	(mm)	
評価 : $t_b \geq t$, よって底板の厚さに問題ない。			

(3) 管台の厚さ (オーバーフロー)

管台名称		オーバーフロー
材料		STPT410-S
水頭	H (m)	3.7760
最高使用温度	(°C)	40
管台の内径	D_i (m)	0.1023
液体の比重	ρ	1.00
許容引張応力	S (MPa)	103
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		-
必要厚さ	t_1 (mm)	
必要厚さ	t_2 (mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t (mm)	
呼び厚さ	t_{no} (mm)	6.00
最小厚さ	t_n (mm)	
評価 : $t_n \geq t$, よって管台の厚さに問題ない。		

(3) 管台の厚さ (RO 処理水出口)

管台名称			RO 処理水出口
材料			STPT410-S
水頭	H	(m)	3.7760
最高使用温度			(°C) 40
管台の内径	D_i	(m)	0.0781
液体の比重	ρ		1.00
許容引張応力	S	(MPa)	103
継手効率	η		1.00
継手の種類			継手無し
放射線検査の有無			-
必要厚さ	t_1	(mm)	
必要厚さ	t_2	(mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t	(mm)	
呼び厚さ	t_{no}	(mm)	5.50
最小厚さ	t_n	(mm)	
評価 : $t_n \geq t$, よって管台の厚さに問題ない。			

(3) 管台の厚さ (ドレン)

管台名称		ドレン
材料		SIPT410-S
水頭	H (m)	3.7760
最高使用温度	(°C)	40
管台の内径	D_i (m)	0.0527
液体の比重	ρ	1.00
許容引張応力	S (MPa)	103
継手効率	η	1.00
継手の種類		継手無し
放射線検査の有無		—
必要厚さ	t_1 (mm)	
必要厚さ	t_2 (mm)	
t_1, t_2 の大きい値	t (mm)	
呼び厚さ	t_{no} (mm)	3.90
最小厚さ	t_n (mm)	
評価 : $t_n \geq t$, よって管台の厚さに問題ない。		

(4) 胴板の穴の補強 (オーバーフロー) (1/2)

部材名称		オーバーフロー	
胴板材料		SM400C	
管台材料		STPT410-S	
最高使用圧力	P (MPa)	0.04	
最高使用温度	(°C)	40	
胴板の許容引張応力	S_s (MPa)	100	
管板の許容引張応力	S_n (MPa)	103	
穴の径	d (mm)		
管台が取り付く穴の径	d_w (mm)		
胴板の最小厚さ	t_s (mm)		
管台の最小厚さ	t_n (mm)		
胴板の継手効率	η		1.00
係数	F		1.00
胴の内径	D_i (mm)		2500.00
胴板の計算上必要な厚さ	t_{sr} (mm)		
管台の計算上必要な厚さ	t_{nr} (mm)		
穴の補強に必要な面積	A_r (mm ²)		
補強の有効範囲	X_1 (mm)		
補強の有効範囲	X_2 (mm)		
補強の有効範囲	X (mm)		
補強の有効範囲	Y_1 (mm)		
管台の外径	D_{on} (mm)		
溶接寸法	L_1 (mm)		
溶接寸法	L_4 (mm)		
胴板の有効補強面積	A_1 (mm ²)		
管台の有効補強面積	A_2 (mm ²)		
すみ肉溶接部の有効補強面積	A_3 (mm ²)		
補強に有効な総面積	A_n (mm ²)		
評価 : $A_n > A_r$, よって十分である。			

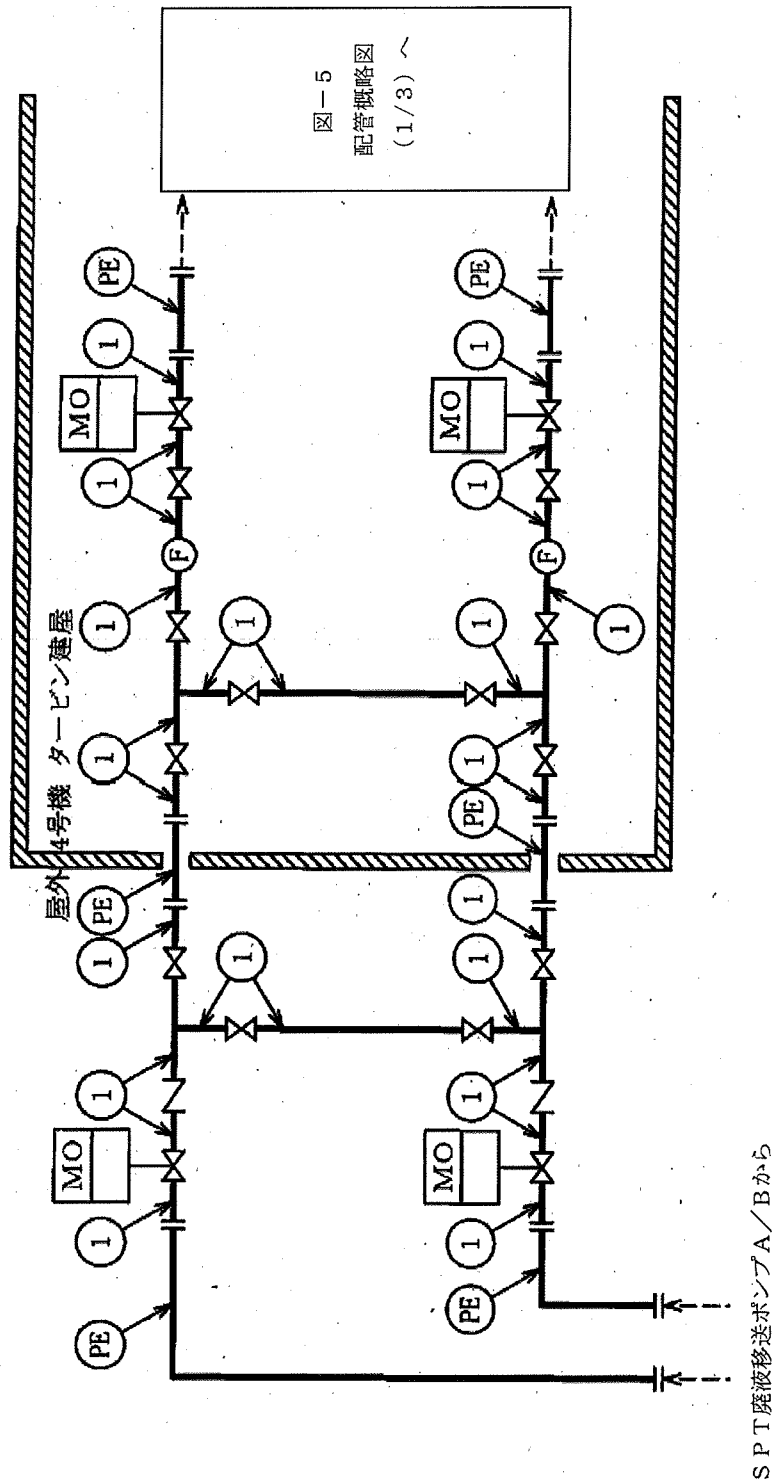
(4) 胴板の穴の補強 (オーバーフロー) (2/2)

部材名称		オーバーフロー
大きい穴の補強		
補強を要する穴の限界径	d_j (mm)	
評価 : $d \leq d_j$, よって大きい穴の補強計算は必要ない。		
溶接部にかかる荷重	W_1 (N)	
溶接部にかかる荷重	W_2 (N)	
溶接部が負うべき荷重	W (N)	
評価 : $W < 0$, よって溶接部の強度計算は必要ない。 以上より十分である。		

2.5 主配管

2.5.1 評価箇所

強度評価箇所を図-4, 5に示す。



記号凡例

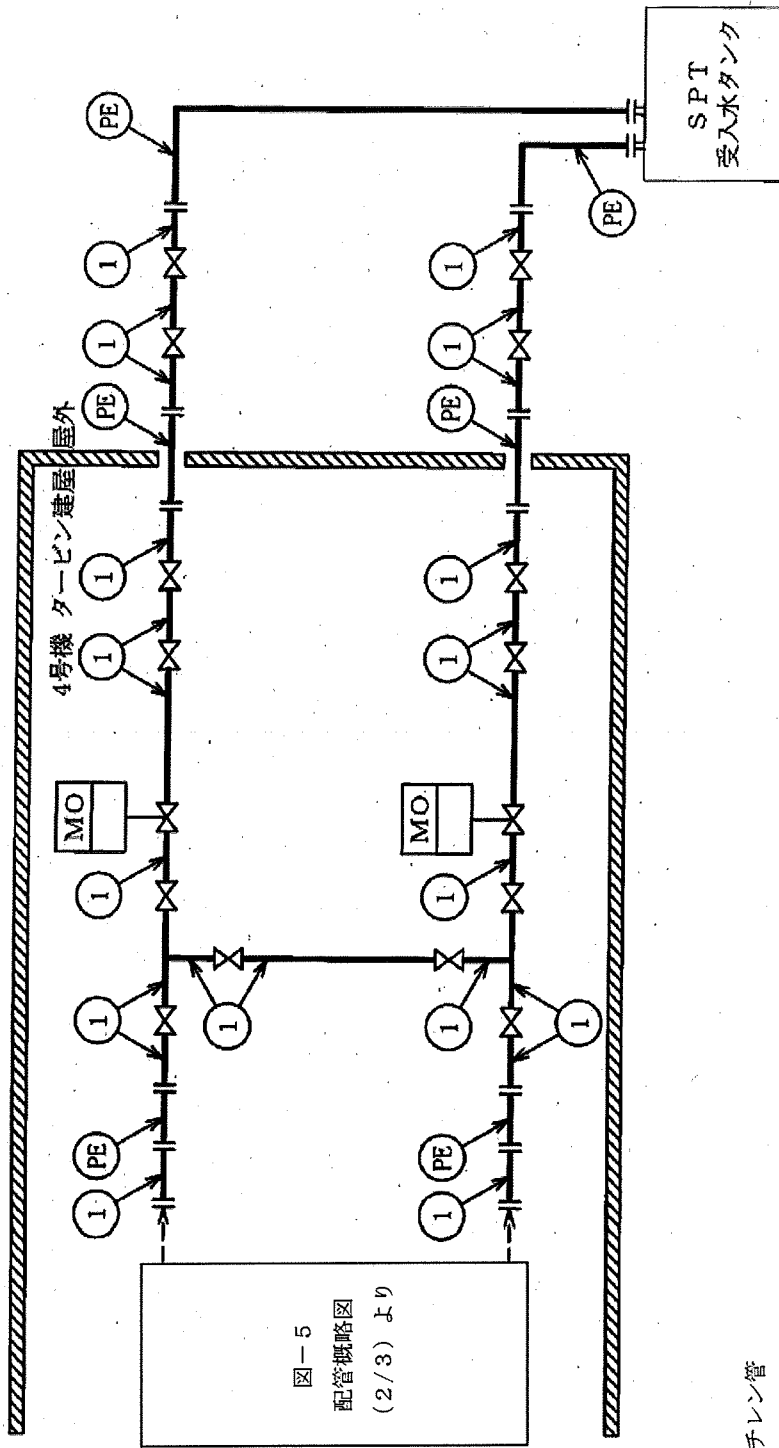
PE: ポリエチレン管

F: 流量計

MO: MO弁

図中の番号は, 2.5.2の番号に対応する。

図-4 配管概略図 (建屋内R0附属配管を除く主配管) (1/4)



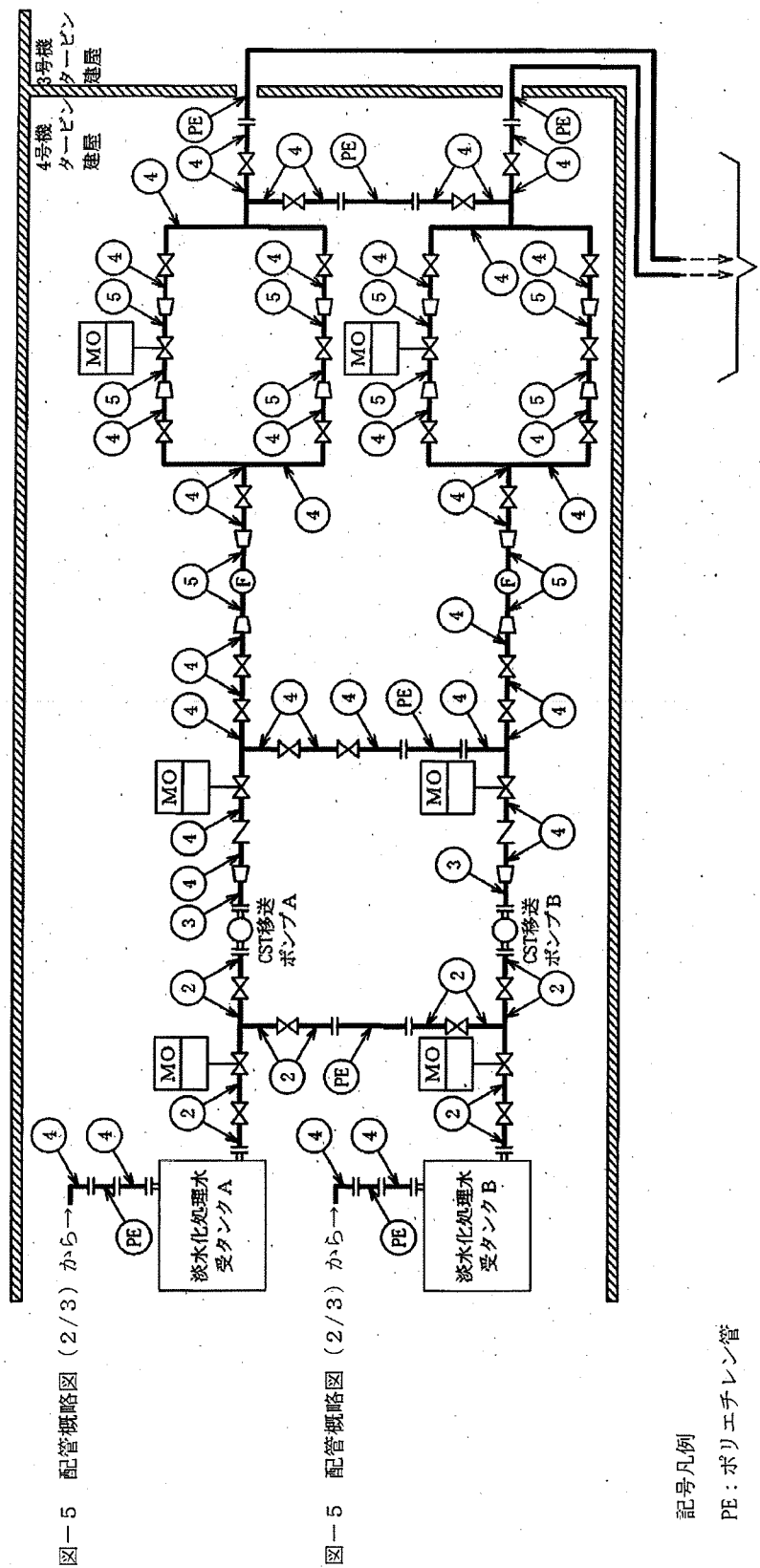
記号凡例

PE : ポリエチレン管

MO : MO弁

図中の番号は、2.5.3の番号に対応する。

図-4 配管概略図 (建屋内 R0 附属配管を除く主配管) (2/4)



図一5 配管概略図 (2/3) から

図一5 配管概略図 (2/3) から

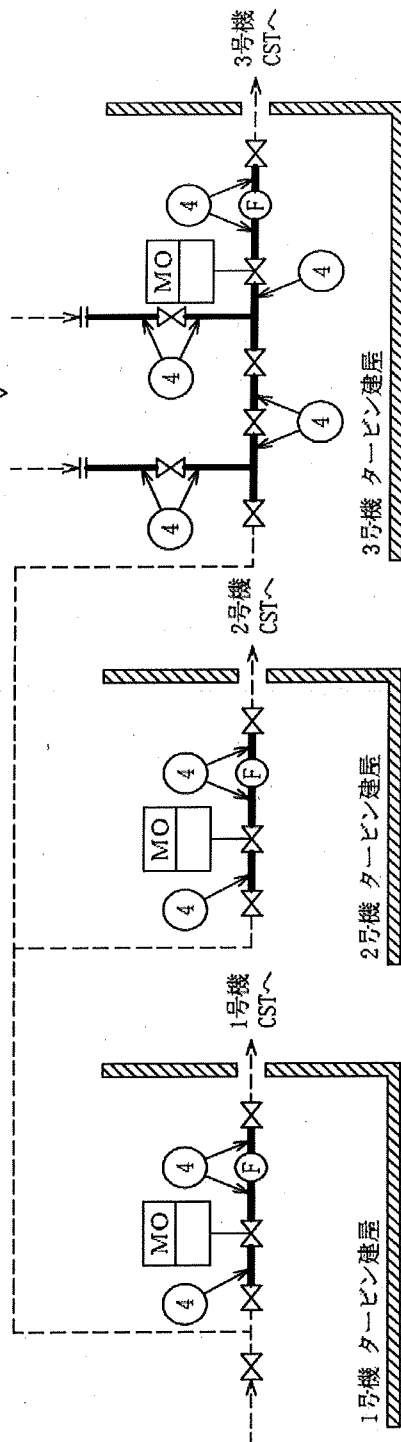
図一4 配管概略図 (4/4) ~

図一4 配管概略図 (建屋内 RO 附属配管を除く主配管) (3/4)

- 記号凡例
 PE : ポリエチレン管
 F : 流量計
 MO : MO 弁

図中の番号は、2.5.2の番号に対応する。

図-4 配管概略図 (3/4) より



記号凡例

F : 流量計

MO : MO 弁

図中の番号は、2.5.2の番号に対応する。

図-4 配管概略図 (建屋内 R0 附属配管を除く主配管) (4/4)

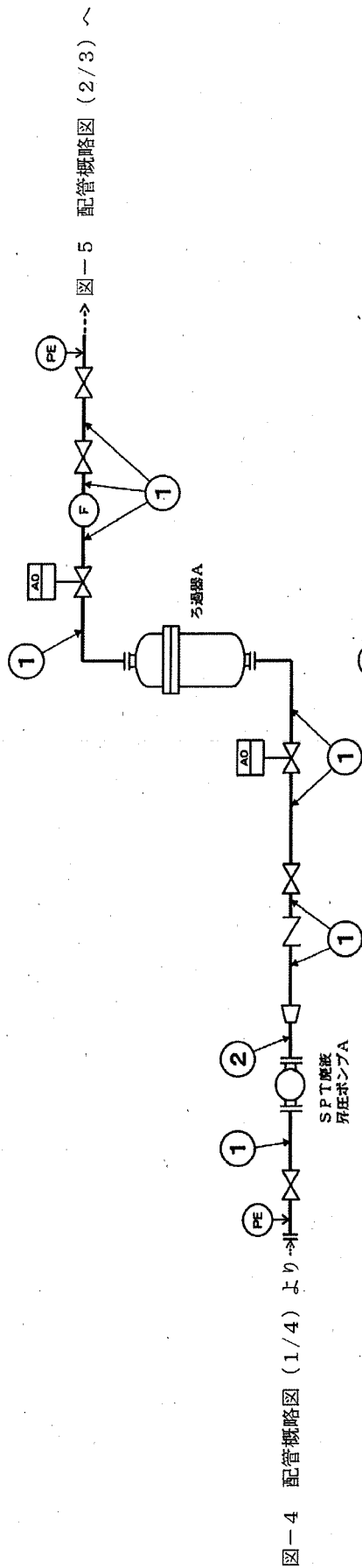


図-4 配管概略図 (1/4) より

配管概略図 (2/3) ~

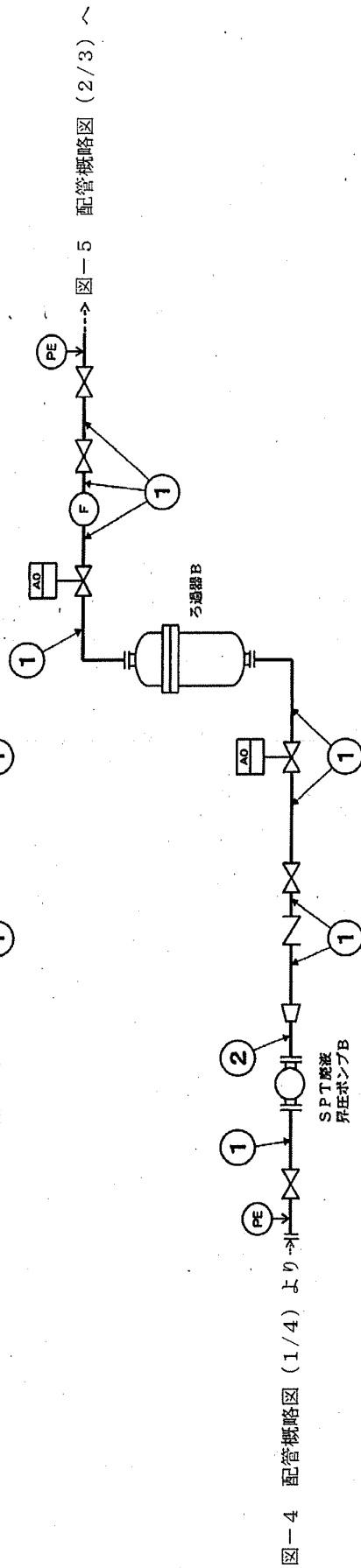


図-4 配管概略図 (1/4) より

配管概略図 (2/3) ~

記号凡例

PE : ポリエチレン管

F : 流量計

AO : AO弁

図中の番号は、2.5.2の番号に対応する。

図-5 配管概略図 (建屋内 R0 附属主配管) (1/3)

図-5 配管概略図 (1/3) より

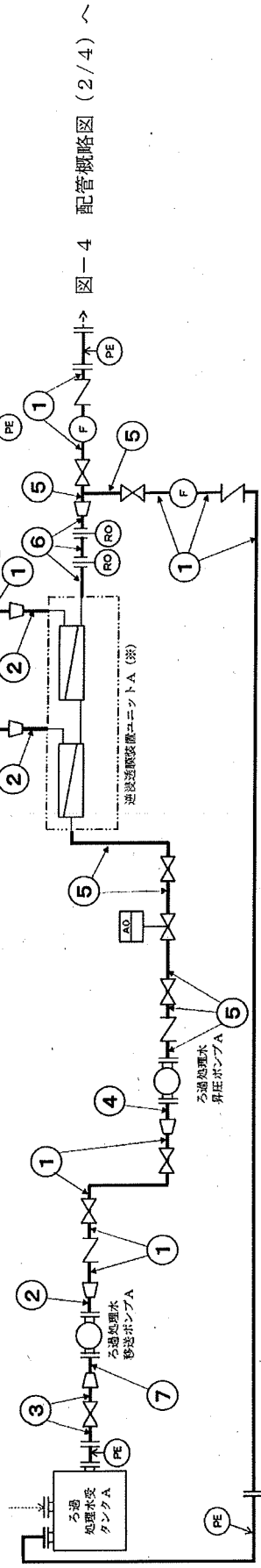


図-4 配管概略図 (3/4) ~

図-4 配管概略図 (2/4) ~

図-5 配管概略図 (1/3) より

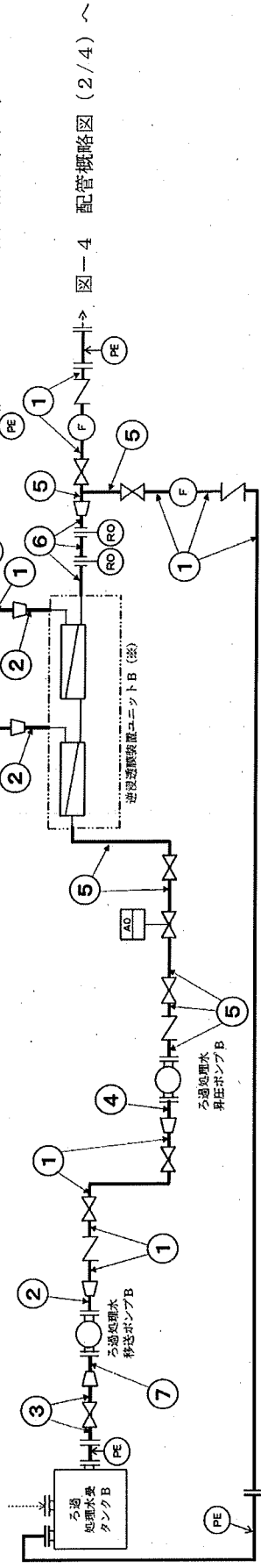


図-4 配管概略図 (3/4) ~

図-4 配管概略図 (2/4) ~

記号凡例

PE : ポリエチレン管

F : 流量計

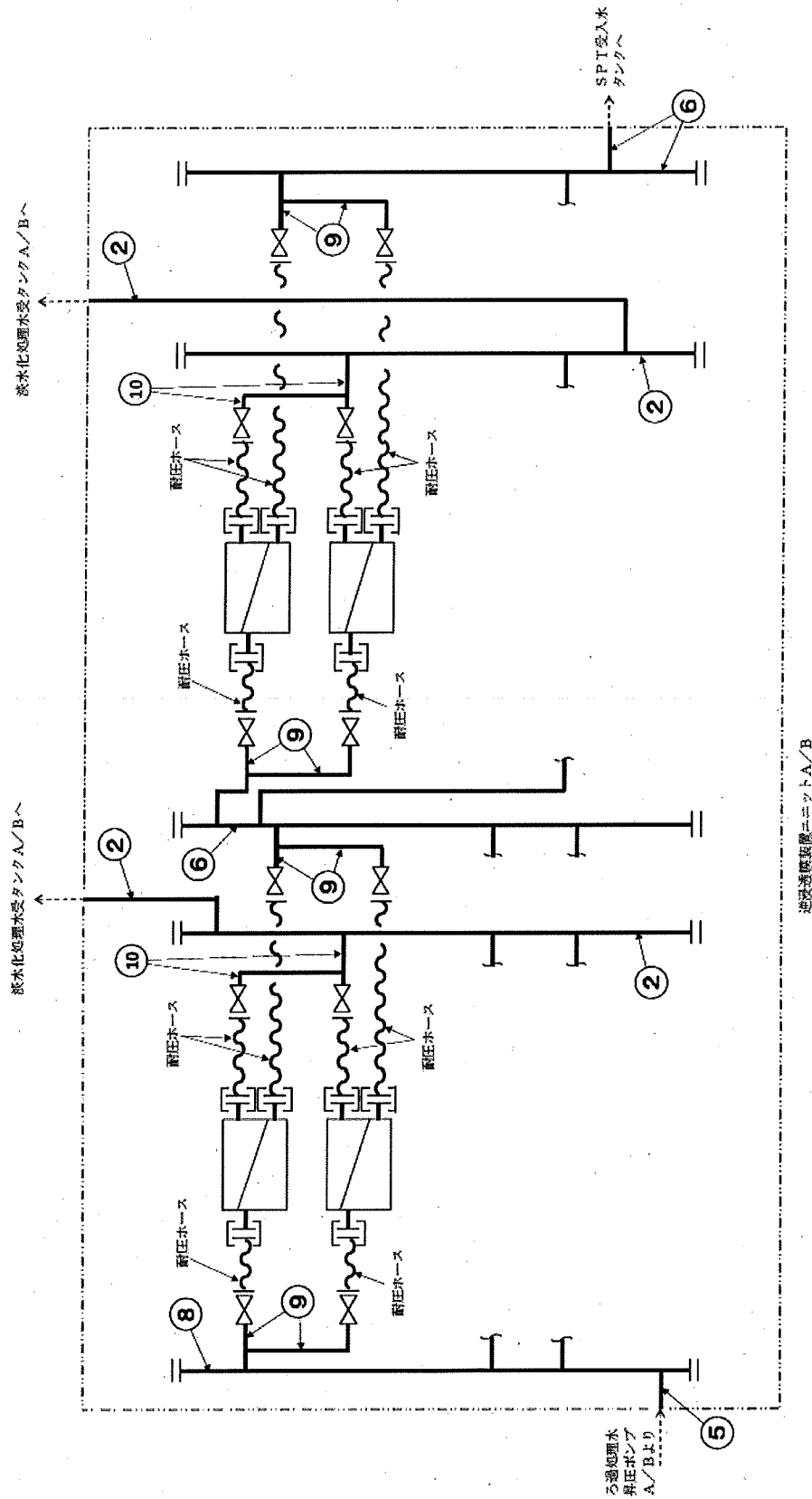
A0 : A0弁

RO : オリファイス

図中の番号は、2.5.2の番号に対応する。

※ 図-5 配管概略図 (3/3) 参照

図-5 配管概略図 (建屋内R0附属主配管) (2/3)



記号凡例

▨: 逆浸透膜装置

⊞: 継手部

図中の番号は、2.5.2の番号に対応する。

図-5 配管概略図 (建屋内R0附属主配管) (3/3)

2.5.2 評価結果 (主配管) (1 / 2)
 管の厚さ (建屋内 R0 附属配管を除く主配管)

No.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用温度 (°C)	外径 D _o (mm)	公称厚さ (mm)	材質	許容引張応力 S (MPa)	継手効率 η	公差 Q	計算上必要な 最小必要厚さ (t ₁)	規格上必要な 最小必要厚さ (t ₂)	最小厚さ (t _s)
①	0.98	40	89.10	5.50	STPT410	103	1.00	12.5%			
②	静水頭	40	89.10	5.50	SUS316LTP	—	—	12.5%			
③	0.98	40	48.60	5.10	SUS316LTP	111	1.00	12.5%			
④	0.98	40	89.10	5.50	SUS316LTP	111	1.00	12.5%			
⑤	0.98	40	60.50	5.50	SUS316LTP	111	1.00	12.5%			

※配管仕様毎に最も高い圧力にて評価

最小厚さが必要最小厚さ以上であり、十分である。

2.5.2 評価結果 (主配管) (2/2)
 管の厚さ (建屋内 R0 附属主配管)

No.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用温度 (°C)	外径 D _o (mm)	公称厚さ (mm)	材質	許容引張応力 S (MPa)	継手効率 η	公差 Q	計算上必要な 最小必要厚さ (t ₁)	規格上必要な 最小必要厚さ (t ₂)	最小厚さ (t _s)
①	0.98	40	89.10	5.50	STPT410	103	1.00	12.5%			
②	0.98	40	60.50	5.50	STPT410	103	1.00	12.5%			
③	静水頭	40	165.20	7.10	STPT410	103	1.00	12.5%			
④	0.98	40	114.30	6.00	STPT410	103	1.00	12.5%			
⑤	4.50	40	89.10	5.50	STPT410	103	1.00	12.5%			
⑥	4.50	40	76.30	5.20	STPT410	103	1.00	12.5%			
⑦	静水頭	40	89.10	5.50	STPT410	103	1.00	12.5%			
⑧	4.50	40	114.30	6.00	STPT410	103	1.00	12.5%			
⑨	4.50	40	48.60	5.10	STPT410	103	1.00	12.5%			
⑩	0.98	40	34.00	4.50	STPT410	103	1.00	12.5%			

※配管仕様毎に最も高い圧力にて評価

最小厚さが必要最小厚さ以上であり、十分である。

Ⅱ. 建屋内 RO 循環設備の耐震性評価に係る補足説明

1. 基礎ボルト（取付ボルト）の強度評価

表-1 基礎ボルト（取付ボルト）の強度評価に関わる数値根拠（タンク）

機器名称	m [kg]	H [mm]	L [mm]	L ₁ [mm]	n _r [-]	n [-]	A _b [mm ²]
ろ過器スキッド							
ろ過処理水受 タンク（本体）							
ろ過処理水受 タンクスキッド							
建屋内 RO スキッド							

表-2 基礎ボルト（取付ボルト）の強度評価に関わる数値根拠（ポンプ）

機器名称	m [kg]	h [mm]	L [mm]	n _r [-]	n [-]	A _b [mm ²]	C _p [-]
SPT 廃液昇圧 ポンプ							
ろ過処理水移送 ポンプ							
ろ過処理水昇圧 ポンプ							
CST 移送ポンプ							

2. ろ過器の耐震性評価

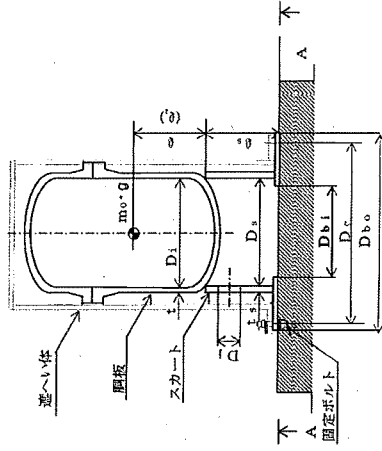
1. 設計条件

機器名称	耐震設計上の 重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		水平方向設計強度	鉛直方向設計強度	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)	比重
			水平方向	鉛直方向						
建屋内R.O.精製設備ろ過器	B	4号タービン建屋 GL+7.1m*	0.015	—	CH=0.36	—	0.98	40	-8~10	—

注記*：基準床レベルを示す。

2. 機器要目

m ₀ (kg)	m _c (kg)	D ₁ (mm)	t ₁ (mm)	D ₂ (mm)	t ₂ (mm)	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₃ (MPa)	G ₁ (MPa)	G ₂ (MPa)	G ₃ (MPa)	φ ₁ (mm)	φ ₂ (mm)
mo ₂		750	9.0	750	9.0	201000 ^{*1}	201000 ^{*1}	201000 ^{*2}	77300 ^{*1}	77300 ^{*1}	77300 ^{*2}		
*3													



D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D ₃ (mm)	H (mm)	s	n	D _c (mm)	D _{b₀} (mm)	D _{b₁} (mm)	A _b (mm ²)	Y (mm)	M _{s₂} (N·mm)

S _y (胴板) (MPa)	S _u (胴板) (MPa)	S (胴板) (MPa)	S _y (スカート) (MPa)	S _u (スカート) (MPa)	F (スカート) (MPa)	S _y (固定ボルト) (MPa)	S _u (固定ボルト) (MPa)	F (固定ボルト) (MPa)
0 ^{*1}	400 ^{*1}	—	0 ^{*2}	400 ^{*2}	245	235 ^{*2}	400 ^{*2}	235

注記 *1：最高使用速度で算出

*2：周囲環境温度で算出

*3：固定ボルトにて遊へい体とろ過器を共締めするため、ろ過器+遊へい体の質量を使用する。

*4：固定ボルトにて遊へい体とろ過器を共締めするため、ろ過器+遊へい体の重心を使用する。

*5：固定ボルトにて遊へい体とろ過器を共締めするため、ろ過器+遊へい体の転倒モーメントを使用する。

3. 計算数値

3.1 胴に生じる応力

	周方向応力	軸方向応力	せん断応力
静水頭又は内圧による応力			
静水頭又は内圧による応力 (鉛直方向地震時)			
運転時質量による引張応力			
鉛直方向地震による引張応力			
空質量による圧縮応力			
鉛直方向地震による圧縮応力			
水平方向地震による応力			
応力の和			
引張側			
圧縮側			
組合せ応力		$\sigma_{ot} = 43$	
引張り			
圧縮			

3.2 スカートに生じる応力

	応力	力	組合せ応力
運転時に発生する質量応力			
鉛直方向地震による応力			
水平方向地震による応力			
曲げ			
せん断			
			$\sigma_{ss} = 5$

3.3 固定ボルトに生じる応力

	引張応力	せん断応力
	$\sigma_b = 11$	
		$\tau_b = 13$

4. 結論

4.1 固有周期

方向	固有周期
水平方向	$T_H = 0.015$
鉛直方向	$T_V = 0.005$

4.2 応力

部材	材料	応力	力	算出応力	許容応力
胴板	SM400A	組合せ		$\sigma_0 = 43$	$S_m = 240$
スカート	SM400A	組合せ		$\sigma_s = 5$	$f_{ts} = 245$
		圧縮と曲げの組合せ (変形の評価)		$\frac{\pi \cdot \sigma_{ss1} + \pi \cdot \sigma_{ss2}}{f_c} + \frac{\tau_b}{f_b} \leq 1$	
固定ボルト	SS400	引張		$\sigma_b = 11$	$f_{tb} = 176$
		せん断		$\tau_b = 13$	$f_{tb} = 135$

すべて許容応力以下である。

3. 淡水化処理水受タンクの耐震性評価

1. 設計条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	掘付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		水平方向設計震度	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)	比重
			水平方向	鉛直方向					
淡水化処理水受タンク	B	タービン建屋 GL+7.1m *	0.024	-	C _H = 0.36	静水頭	40	40	1.00

注記*: 基準レベルを示す。

2. 機器要目

m ₀ (kg)	D ₁ (mm)	t (mm)	E (MPa)	C (MPa)	ρ _e (mm)	H ₁ (mm)	s	n
	2500	9.0	202000 *1	77700 *1				

D _c (mm)	D _{b0} (mm)	A _b (mm ²)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S (MPa)	F (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)
			245 *1 (厚さ ≤ 16mm)	400 *1	-	245	235 *2 (15mm < 厚さ ≤ 40mm)	400 *2	235

注記*1: 最高使用温度で算出

*2: 周囲環境温度で算出

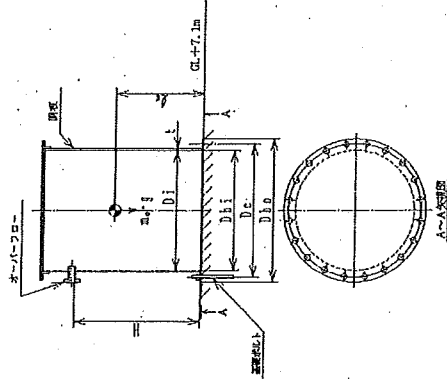
3. 計算数値

3.1 胴に生じる応力

(1) 一次応力

応力の種類	周方向応力	軸方向応力	せん断応力
静水頭による応力			
鉛直方向地震による引張応力			
空気重による圧縮応力			
鉛直方向地震による軸方向応力			
水平方向地震による応力			
応力の和			
引張側			
圧縮側			
引張り	σ ₀₁ = 6		
圧縮	σ ₀₂ = 4		

(単位: MPa)



3.2 基礎ボルトに生じる応力

(単位: MPa)

引張応力	—
せん断応力	$\tau_b = 9$

4. 結論

4.1 固有周期

(単位: s)

方向	固有周期
水平方向	$T_H = 0.024$
鉛直方向	$T_V = 0.005$

4.2 応力

(単位: MPa)

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
胴板	SM400	一次応力	$\sigma_b = 6$	$S_a = 240$
		圧縮と曲げの組合せ (座屈の評価)	$\frac{\sigma \cdot \sigma_{x2}}{f_c} + \frac{\sigma \cdot \sigma_{x1}}{f_b} \leq 1$	0.02
基礎ボルト	SS400	引張り	—	$f_{t,a} = 176$ *
		せん断	$\tau_a = 9$	$f_{s,b} = 135$

すべて許容応力以下である。

注記*: (3.1.2.2) 式より算出