

「もんじゅ」廃止措置計画の変更内容 (模擬燃料体の部分装荷)

炉心支持板の地震時時刻歴応答の算出について

2019年11月28日

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

○前回（第25回）監視チーム会合におけるコメントについて回答

| No | コメント | 頁 |
|----|---|----|
| 8 | 群振動の入力条件となる炉心支持板の地震時時刻歴応答について、その評価手法やモデルと合わせて、その時刻歴データについても具体的に示すこと。また、これに対する実験体系の入力条件に関する妥当性を説明すること。 | 2～ |

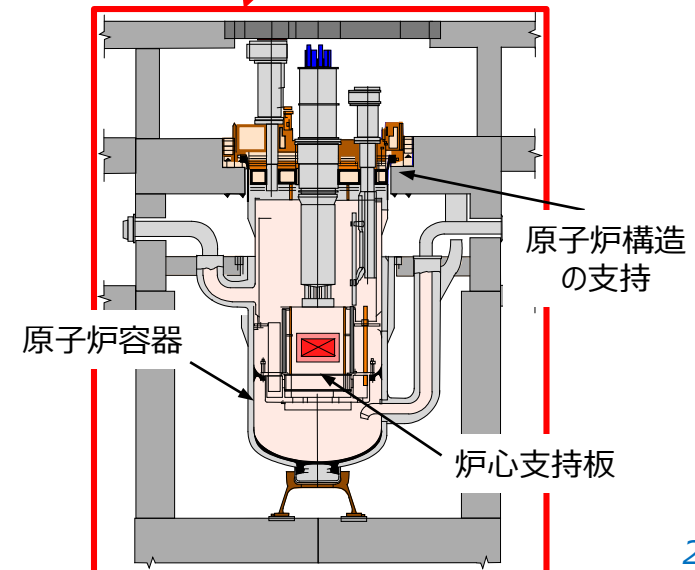
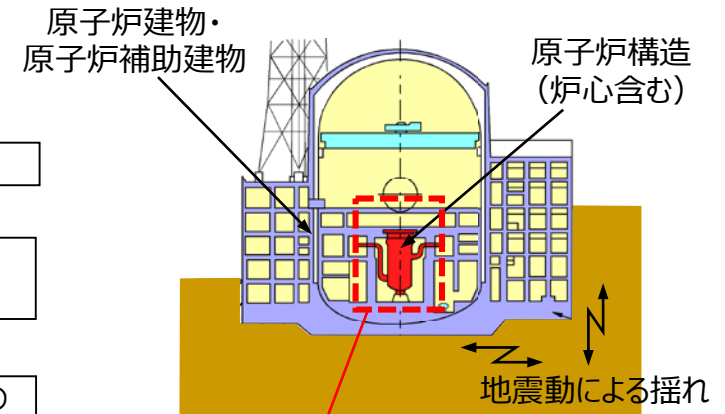
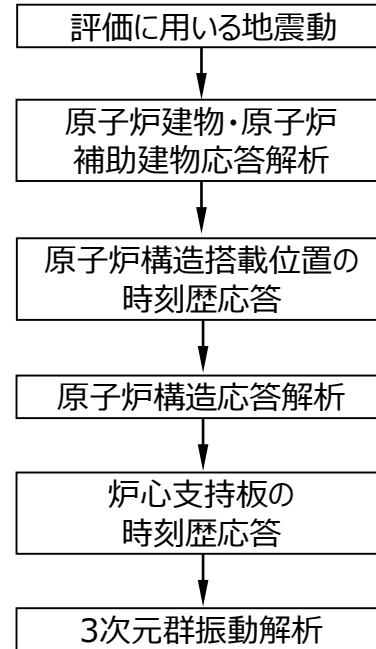
8

群振動の入力条件となる炉心支持板の地震時時刻歴応答について、その評価手法やモデルと合わせて、その時刻歴データについても具体的に示すこと。また、これに対する実験体系の入力条件に関する妥当性を説明すること。

評価方針

- ◆ 評価対象である炉心は、原子炉容器（炉内構造物）に装荷されている。
- ◆ またこれらは原子炉建物・原子炉補助建物に搭載されていることから、評価対象の炉心の地震時応答を評価するには、評価に用いる地震動が荷重伝達経路として建物や構造を経由して評価対象にもたらし揺れを適切に評価する必要がある。
- ◆ このため、本評価に際して、まず、評価に用いる地震動による原子炉建物・原子炉補助建物の加速度時刻歴応答を求めた。
- ◆ 次に、建物内の原子炉構造が搭載され荷重伝達経路となるフロアの加速度時刻歴応答を用いて、炉心支持板を含む原子炉構造の時刻歴応答を求めた。
- ◆ 以上より求まる炉心支持板の加速度時刻歴応答を、3次元炉心群振動解析の入力とする。

評価フロー

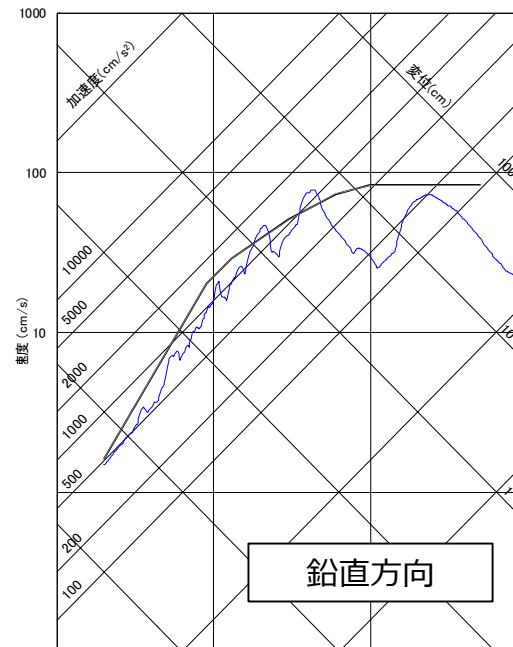
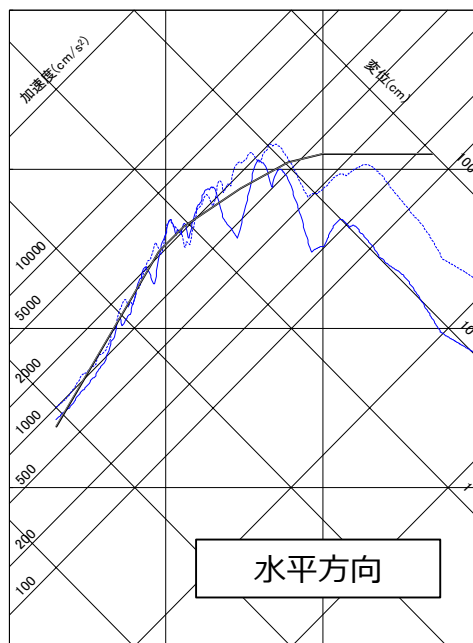


評価に用いる地震動

以下の2つの地震動をそれぞれ適用した。いずれも廃止措置計画申請書添付書類四別添1に記載されている。

- 耐震バックチェック※において策定した、「応答スペクトルに基づく地震動評価」より策定した基準地震動Ss-D
- 新規制基準への適合性が確認された近隣の軽水炉を参考に同じ評価条件で複数の地震動を策定。そのうち水平最大のケースを選定し、軽水炉の水平最大993Galと同等となるように振幅を係数倍（水平最大995Gal）し策定した地震動

※「高速増殖原型炉もんじゅ『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報告書 改訂(補正)」(平成22年3月)



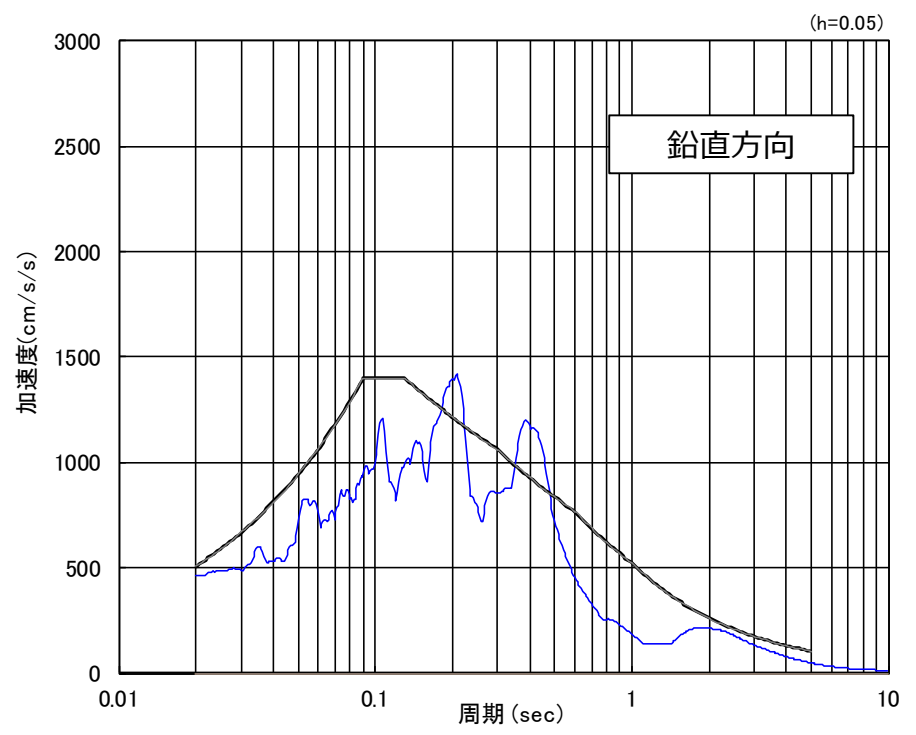
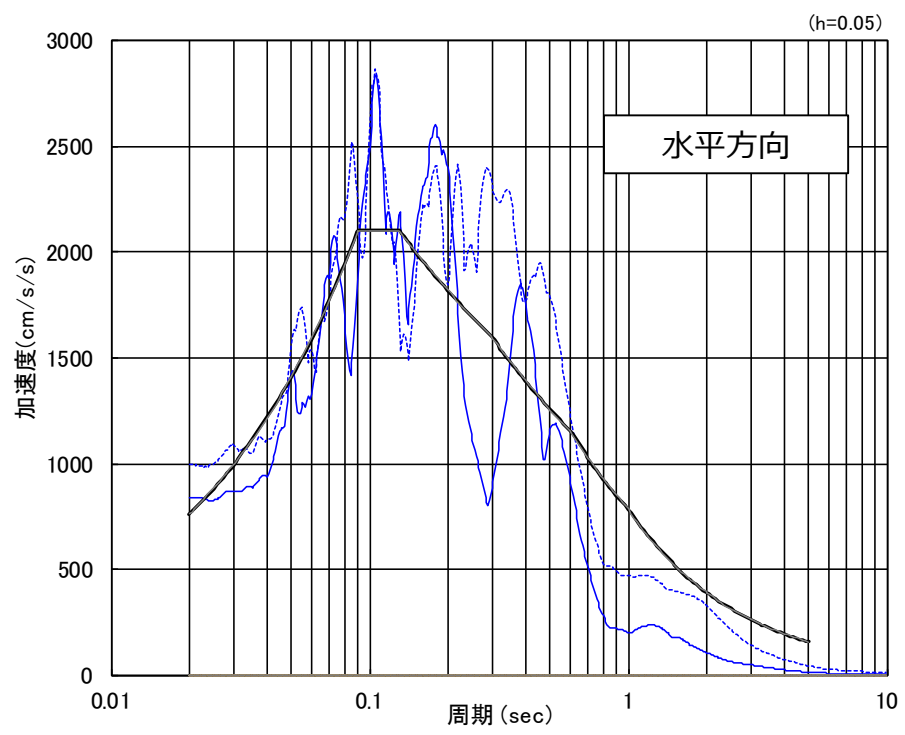
凡例 (Gal)

- : もんじゅ基準地震動Ss-D (水平760、鉛直507)
- : 軽水炉の基準地震動レベルを参考に策定した地震動 (NS837、EW995、UD464)

※水平方向の図において、実線がNS方向、点線がEW方向のスペクトルを示す

評価に用いる地震動

それぞれの加速度応答スペクトルを以下に示す。

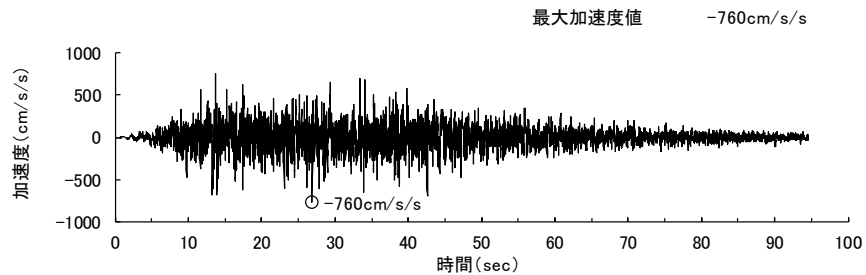


- 凡例 (Gal)
- : もんじゅ基準地震動Ss-D (水平760、鉛直507)
 - : 軽水炉の基準地震動レベルを参考に策定した地震動 (NS837、EW995、UD464)
 - ※水平方向の図において、実線がNS方向、点線がEW方向のスペクトルを示す

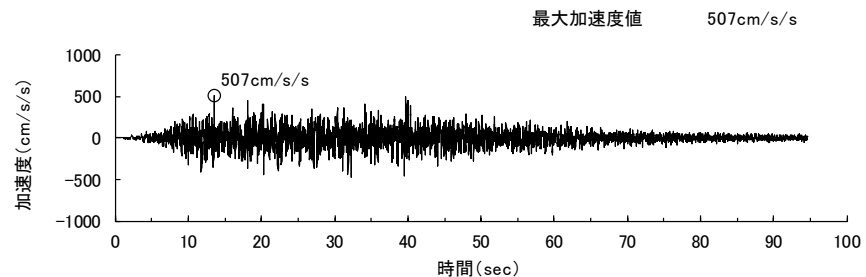
評価に適用した地震動の加速度応答スペクトル図

評価に用いる地震動 それぞれの加速度時刻歴波形を以下に示す。

「応答スペクトルに基づく地震動評価」により策定した地震動

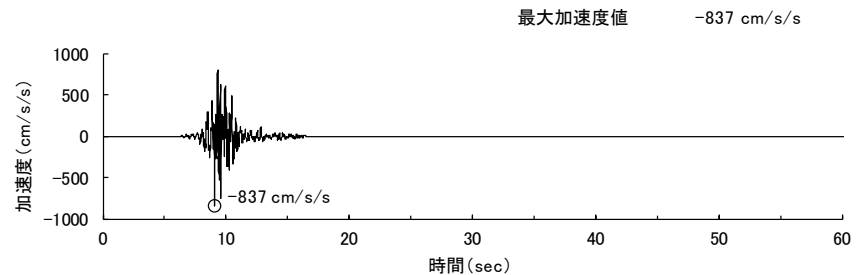


水平方向

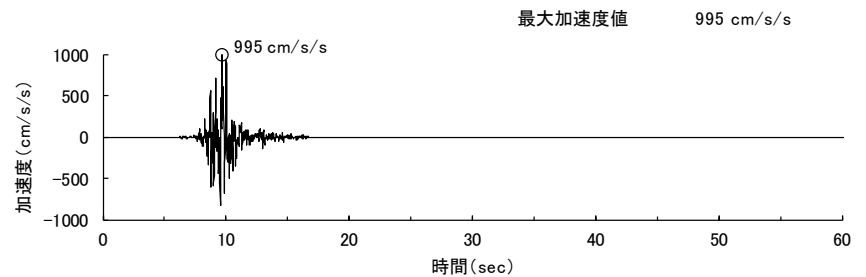


鉛直方向

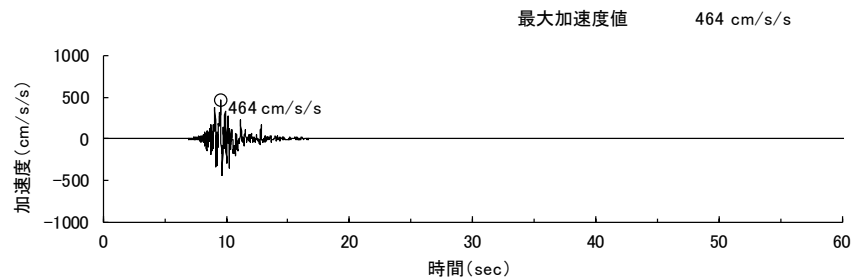
軽水炉の基準地震動レベルを参考に策定した地震動



NS方向



EW方向



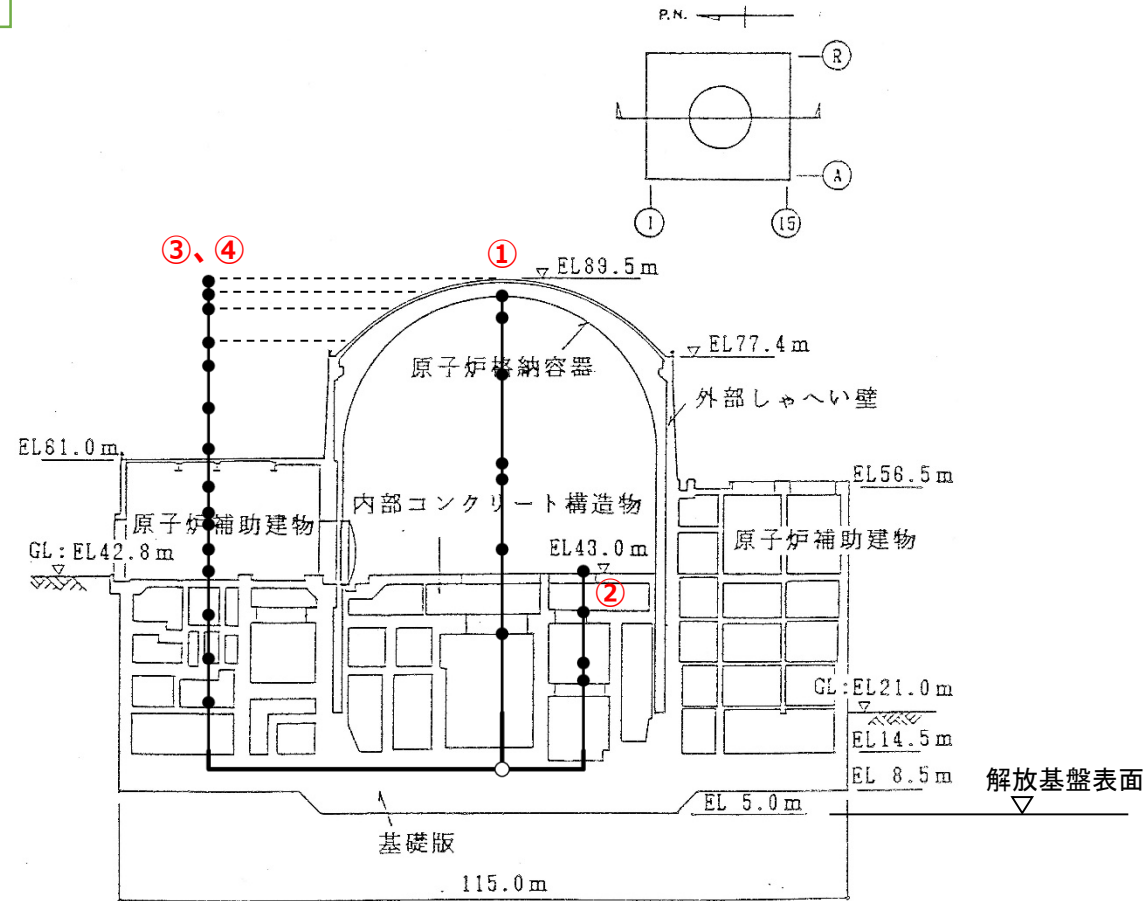
UD方向

加速度時刻歴波形

原子炉建物・原子炉補助建物応答解析

原子炉建物・原子炉補助建物の概要

- ◆ 原子炉建物は、原子炉格納容器、外部しゃへい壁、内部コンクリート構造物及び基礎版より構成されている。
- ◆ 外部しゃへい壁(O/S)はドーム状の屋根を持つ円筒型の鉄筋コンクリート造の構造物である。
- ◆ 内部コンクリート構造物(I/C)は、原子炉格納容器(C/V)内に設置された独立の構造物で、中央部は原子炉容器を支持する六角形の鋼板コンクリート造、周辺部は鉄筋コンクリート造となっている。
- ◆ 原子炉補助建物(A/B)は原子炉建物の周囲に設けられた鉄筋コンクリート造の構造物(一部鉄骨鉄筋コンクリート造)であり、原子炉建物と共通の基礎版に支持されており、6層の主要床面を有している。主要な耐震要素は格子状に配置された耐震壁である。



- ① 原子炉格納容器 (C/V)
- ② 内部コンクリート構造物 (I/C)
- ③ 外部しゃへい壁 (O/S)
- ④ 原子炉補助建屋 (A/B)

原子炉建物・原子炉補助建物と応答解析モデルの質点との関係

原子炉建物・原子炉補助建物応答解析

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、地盤との相互作用を基礎底面の水平及び回転地盤ばねにより考慮した、剛基礎を共有する並列多質点系の曲げせん断型モデルとする。

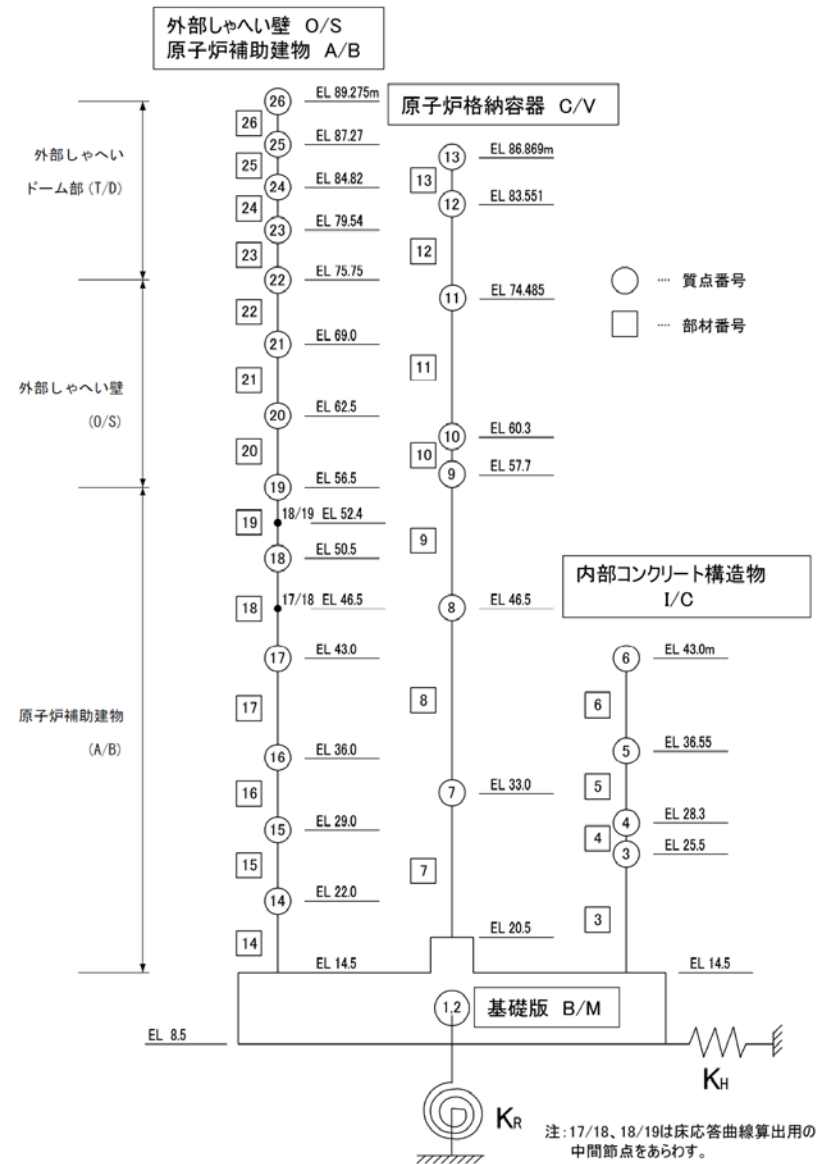
◆ 地震応答解析モデルは2方向(NS、EW)とし、それぞれに基準地震動 S_s (水平方向)を建物基礎底面に入力して解析する。地震応答解析は、建物の復元力特性及び基礎の浮き上がりを考慮した非線形時刻歴応答解析とする。

◆ 非線形特性については、JEAG 4601-1991に基づき、以下の項目を考慮する。

- ・耐震壁の非線形復元力特性(O/S(ドーム部は除く)、A/B、I/Cで考慮する)

(Tri-Linear 型スケルトン曲線、最大点指向型履歴ループ)

- ・基礎の浮き上がりによる地盤の回転ばねの幾何学的非線形

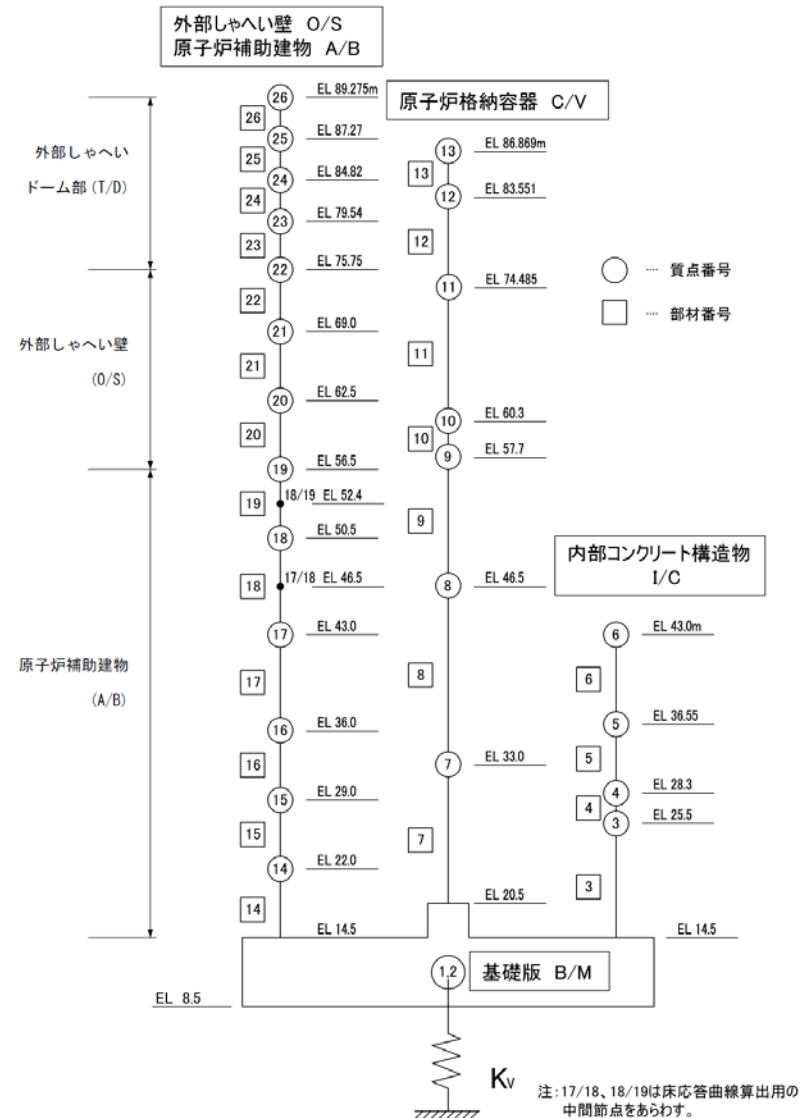


水平方向の地震応答解析モデル

原子炉建物・原子炉補助建物応答解析

鉛直方向の地震応答解析モデル

- ◆ 鉛直方向の地震応答解析モデルは、地盤を鉛直ばねで表し、耐震壁の軸剛性を評価した軸ばねにより各質点を連結した並列多質点系のモデルとする。
- ◆ 地震応答解析は、建物の復元力特性を考慮した非線形時刻歴応答解析とし、基準地震動Ss(鉛直方向)を建物基礎底面に入力して行う。
- ◆ 非線形特性については、以下の項目を考慮する。
 - ・外部しゃへいドーム部の非線形復元力特性
 (Tri-Linear 型スケルトン曲線、原点指向型履歴ループ)



鉛直方向の地震応答解析モデル

原子炉建物・原子炉補助建物応答解析

地震応答解析法

- ◆ 建物の地震応答は、多質点系の振動方程式をNewmark- β 法 ($\beta=1/4$) を用いた直接積分法により求める。

入力地震動

- ◆ 入力地震動は、基礎底面直下を解放基盤表面として基準地震動を直接入力

固有値解析

- ◆ 地震応答解析モデルの固有値解析結果は右表の通り。

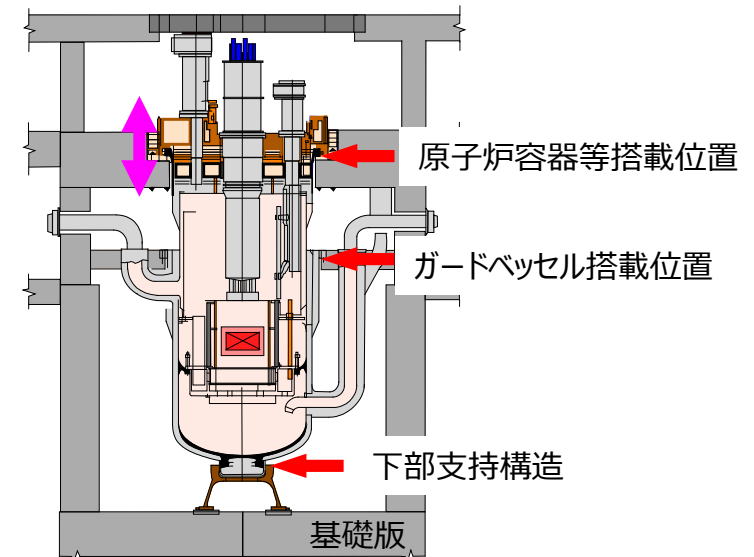
固有値解析結果

| 方向 | 次数 | 固有周期 (s) | 振動数 (Hz) | 刺激係数 |
|----|----|----------|----------|---------|
| NS | 1 | 0.182 | 5.50 | 2.301 |
| | 2 | 0.161 | 6.22 | -0.484 |
| | 3 | 0.131 | 7.62 | 0.901 |
| | 4 | 0.091 | 11.01 | -2.909 |
| | 5 | 0.075 | 13.26 | 0.870 |
| EW | 1 | 0.187 | 5.36 | 2.315 |
| | 2 | 0.161 | 6.22 | -0.120 |
| | 3 | 0.134 | 7.47 | 0.912 |
| | 4 | 0.092 | 10.87 | -2.957 |
| | 5 | 0.073 | 13.64 | 1.529 |
| UD | 1 | 0.109 | 9.16 | 11.193 |
| | 2 | 0.098 | 10.19 | -11.063 |
| | 3 | 0.061 | 16.29 | 1.022 |
| | 4 | 0.058 | 17.38 | -0.756 |
| | 5 | 0.048 | 21.00 | 1.814 |

原子炉構造搭載位置の時刻歴応答

原子炉構造応答解析に用いる建物のフロア（質点）

- ◆ 原子炉構造への荷重伝達経路は、水平方向については、原子炉容器（炉内構造物及び原子炉構造上部搭載物含む）がI/Cの⑤質点に、ガードベッセルはI/Cの④質点に据え付けられている。また、原子炉構造の水平振れ止めのために下部支持構造が基礎版に据え付けられている。このため、水平方向については、原子炉構造応答解析において、内部コンクリート構造との連成モデルを用いることから、基礎版の応答を用いる。
- ◆ 鉛直方向の荷重伝達経路は、原子炉容器等搭載位置であるI/Cの⑤質点のみであることから、I/Cの⑤質点の応答を用いる。
(原子炉構造に対してガードベッセル及び下部支持構造は鉛直方向には干渉しない)

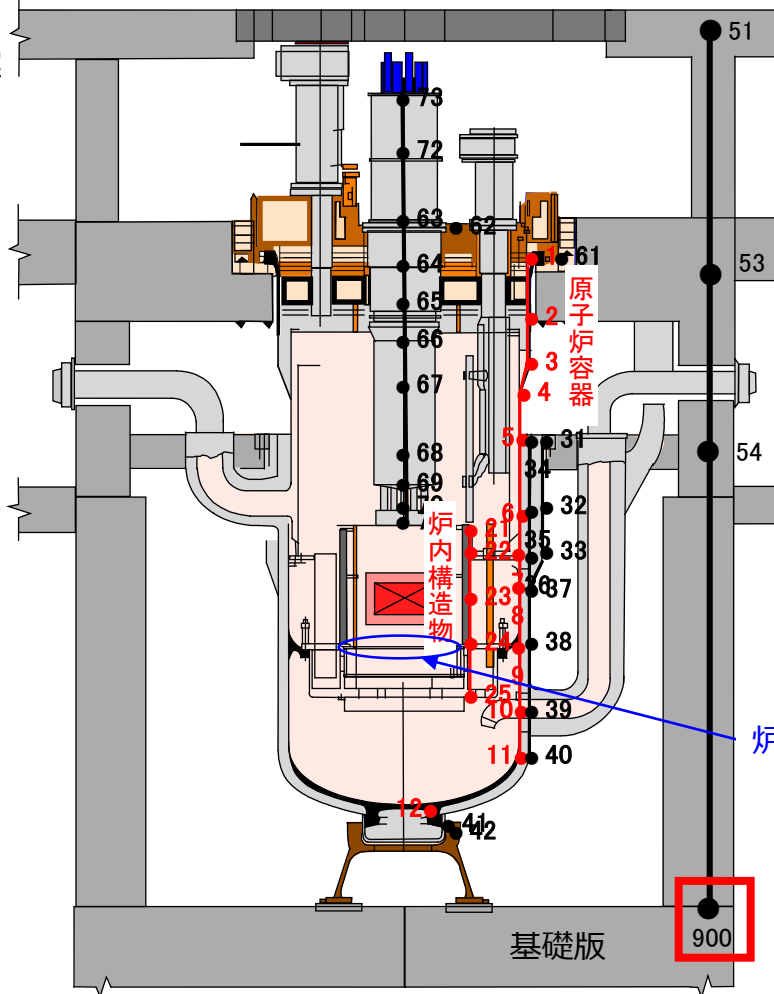


原子炉構造への荷重伝達経路

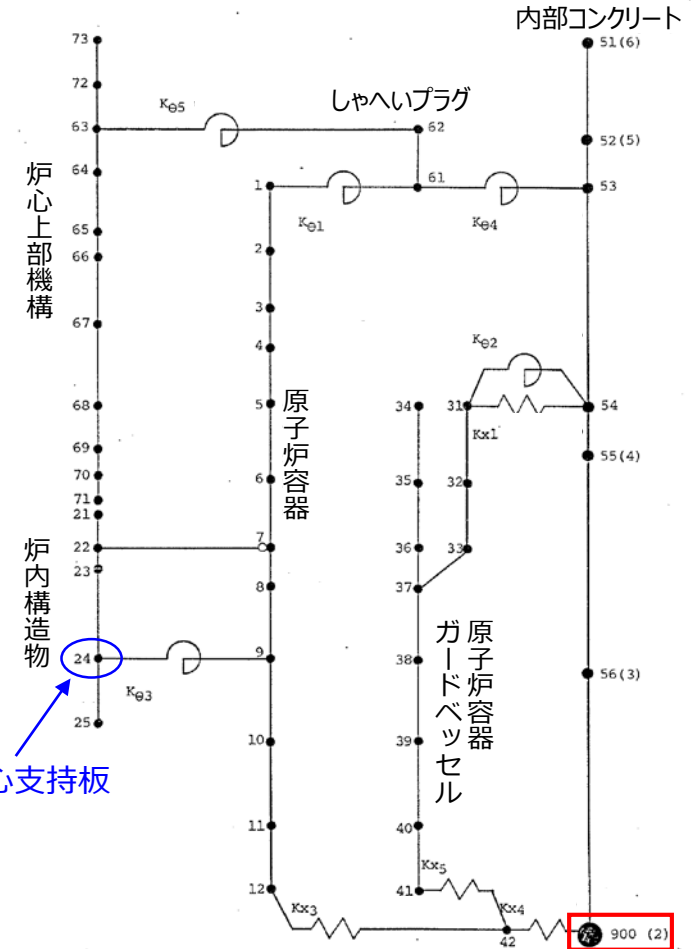
原子炉構造応答解析

水平方向の応答解析モデル

- ◆ 建設時の設工認及び耐震バックチェックで用いた通常運転時の解析モデルに準ずる。
- ◆ 本評価において廃止措置段階及び部分装荷状態を考慮した結果、既往評価と異なる条件は以下の通り。
- ◆ 構造材の温度：
 - R/V及びG/V本体：200℃
 - R/V及びG/Vフランジ：40℃
 - 下部支持構造：110℃
 これに伴い物性値も上記温度に対応
- ◆ Na温度：200℃
 - これに伴い物性値も上記温度に対応
- ◆ 負荷質量：部分装荷時の重量を炉内構造物各質点に分配
- ◆ 入力：□部に入力
- ◆ 解析コード：NASTRAN（時刻歴応答解析）



原子炉構造と解析モデル質点の対応

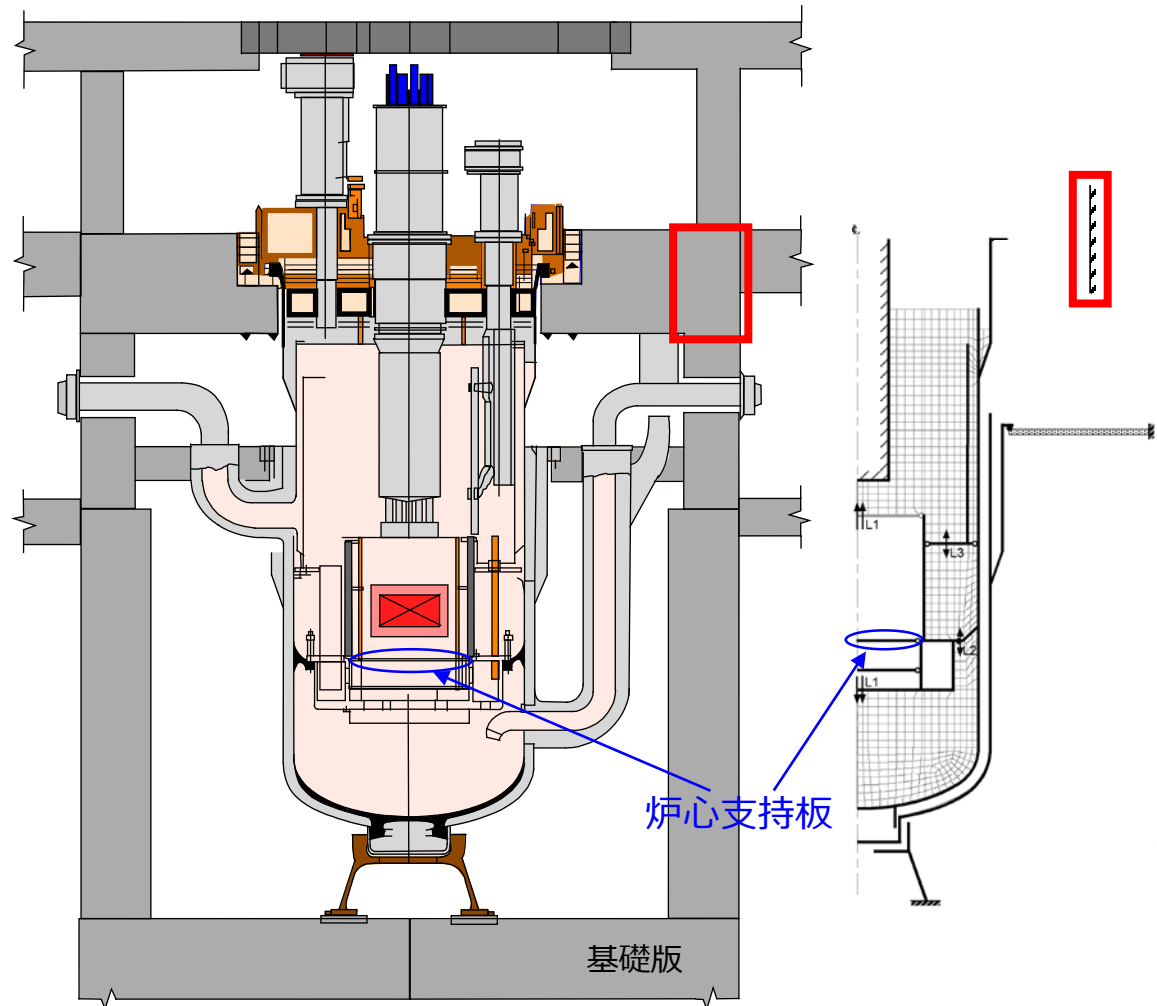


原子炉構造地震応答解析モデル
(水平方向)

原子炉構造応答解析

鉛直方向の応答解析モデル

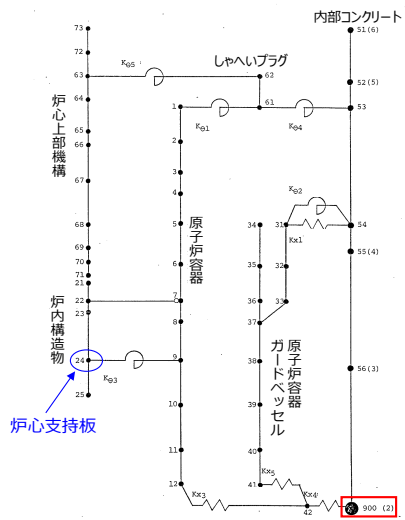
- ◆ 耐震バックチェックで用いた通常運転時の解析モデルに準ずる。流体も含めたモデル化により構造－流体間の連成振動を考慮。軸対称モデルとし、構造はシェル要素、ナトリウムは流体要素でモデル化。
- ◆ 本評価において廃止措置段階及び部分装荷状態を考慮した結果、既往評価と異なる条件は以下の通り。
- ◆ 構造材の温度：
 - R/V及びG/V本体：200℃
 - R/V及びG/Vフランジ：40℃
 - 下部支持構造：110℃
 これに伴い物性値も上記温度に対応
- ◆ Na温度：200℃
 - これに伴い物性値も上記温度に対応
- ◆ 負荷質量：Na重量に関しては温度変化分を考慮
- ◆ 入力：□部に入力
- ◆ 解析コード：FINAS（時刻歴応答解析）



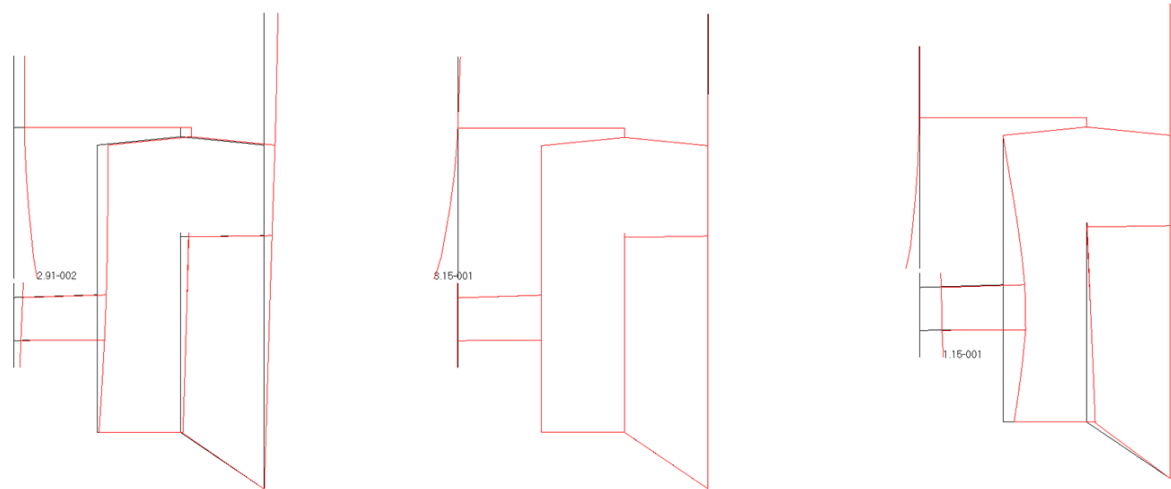
原子炉構造地震応答解析モデル
(鉛直方向)

原子炉構造応答解析

水平方向の固有値解析結果（低温停止時、部分装荷状態）



応答解析モデル

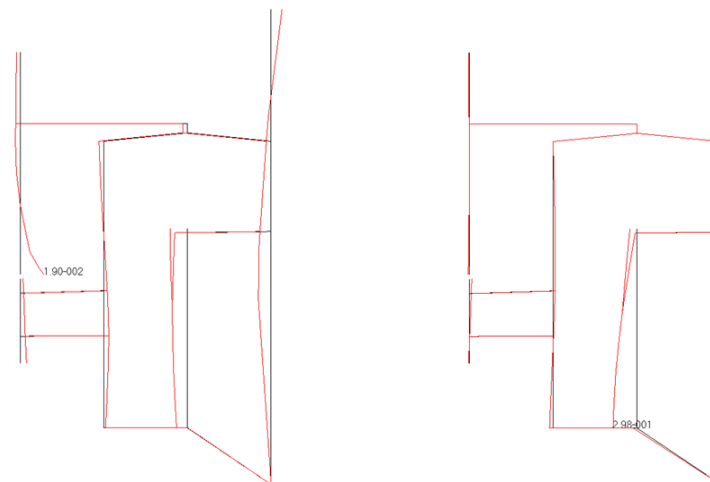


1次モード

2次モード

3次モード

| モード | 固有振動数 [Hz] | 固有周期 [sec] | 刺激係数 |
|-----|------------|------------|---------|
| 1次 | 7.893 | 0.1267 | 74.985 |
| 2次 | 11.308 | 0.0884 | 1.158 |
| 3次 | 12.771 | 0.0783 | 0.410 |
| 4次 | 19.638 | 0.0509 | -25.294 |
| 5次 | 24.090 | 0.0415 | -2.643 |

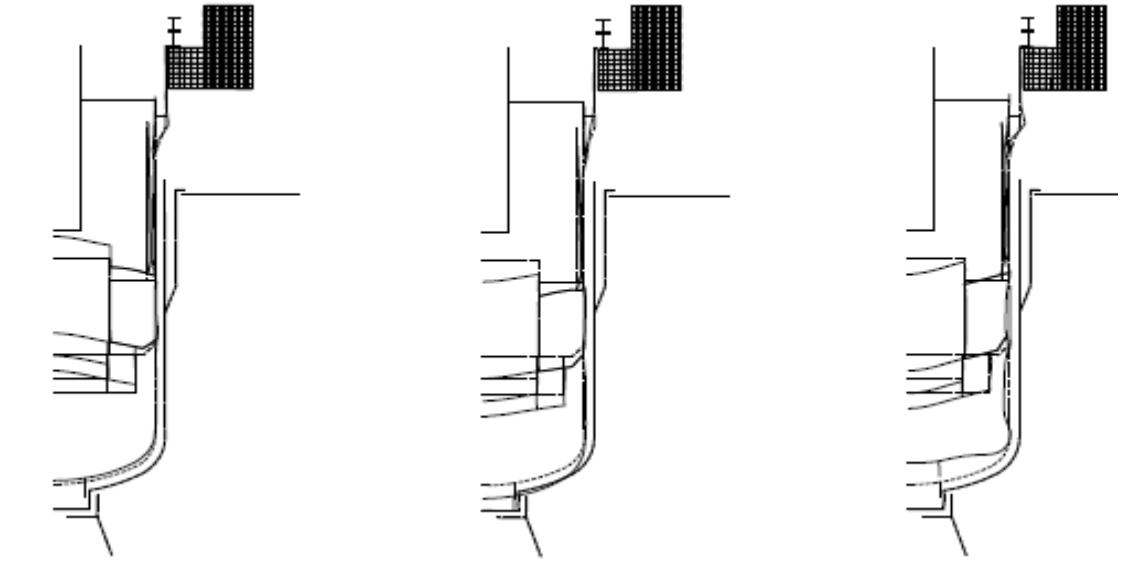
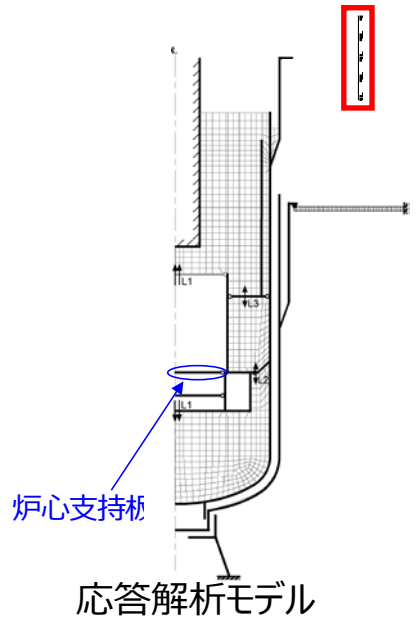


4次モード

5次モード

原子炉構造応答解析

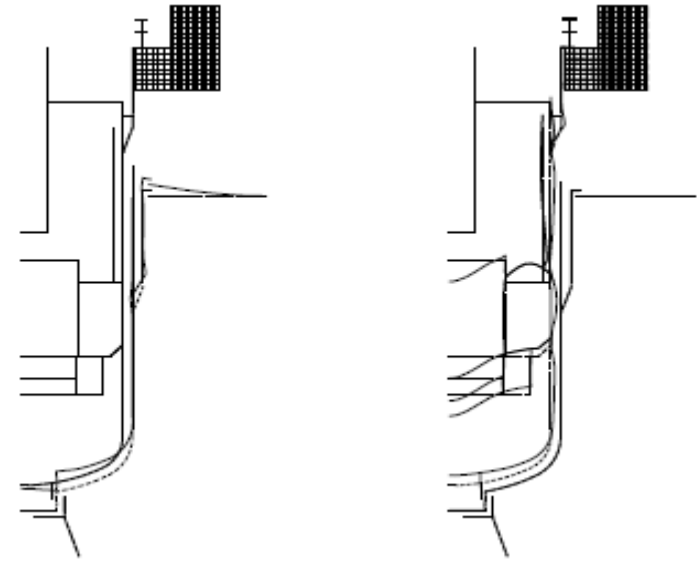
鉛直方向の固有値解析結果



1次モード

2次モード

3次モード



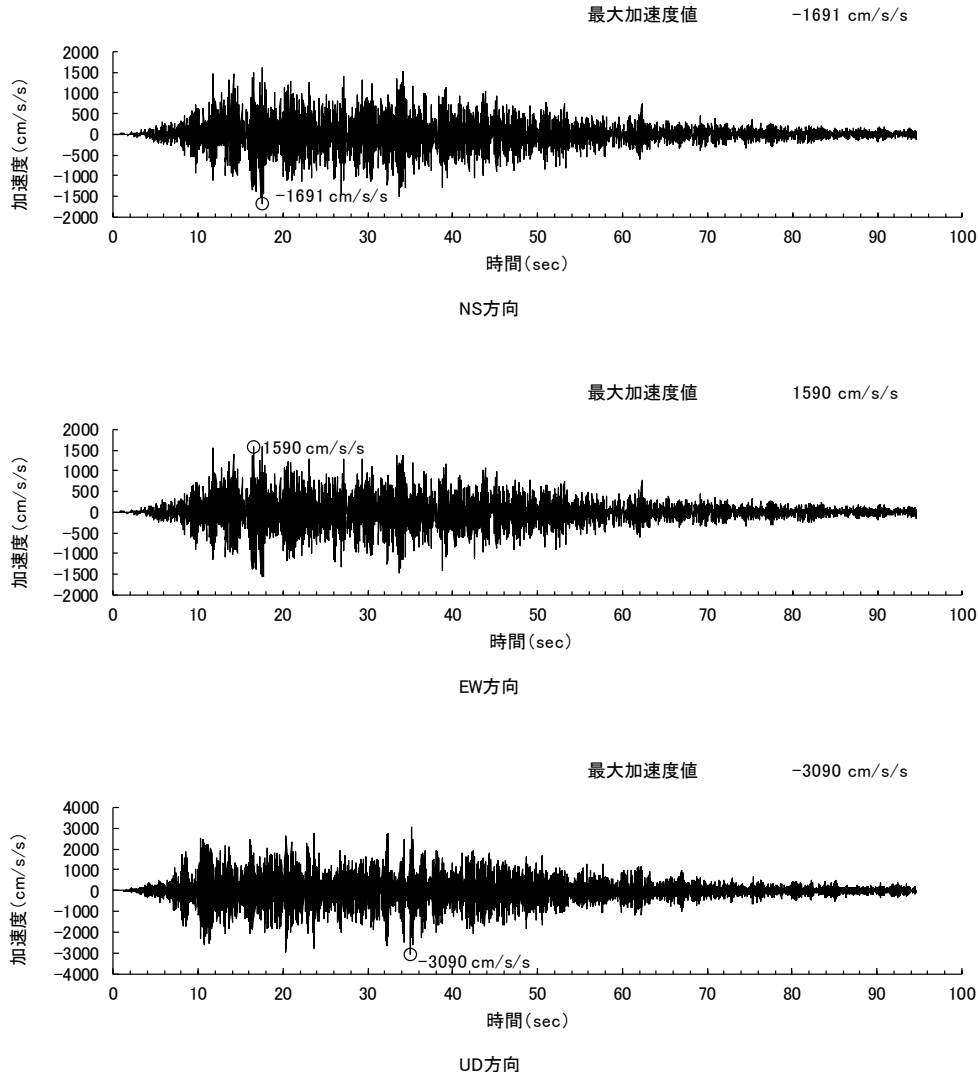
4次モード

5次モード

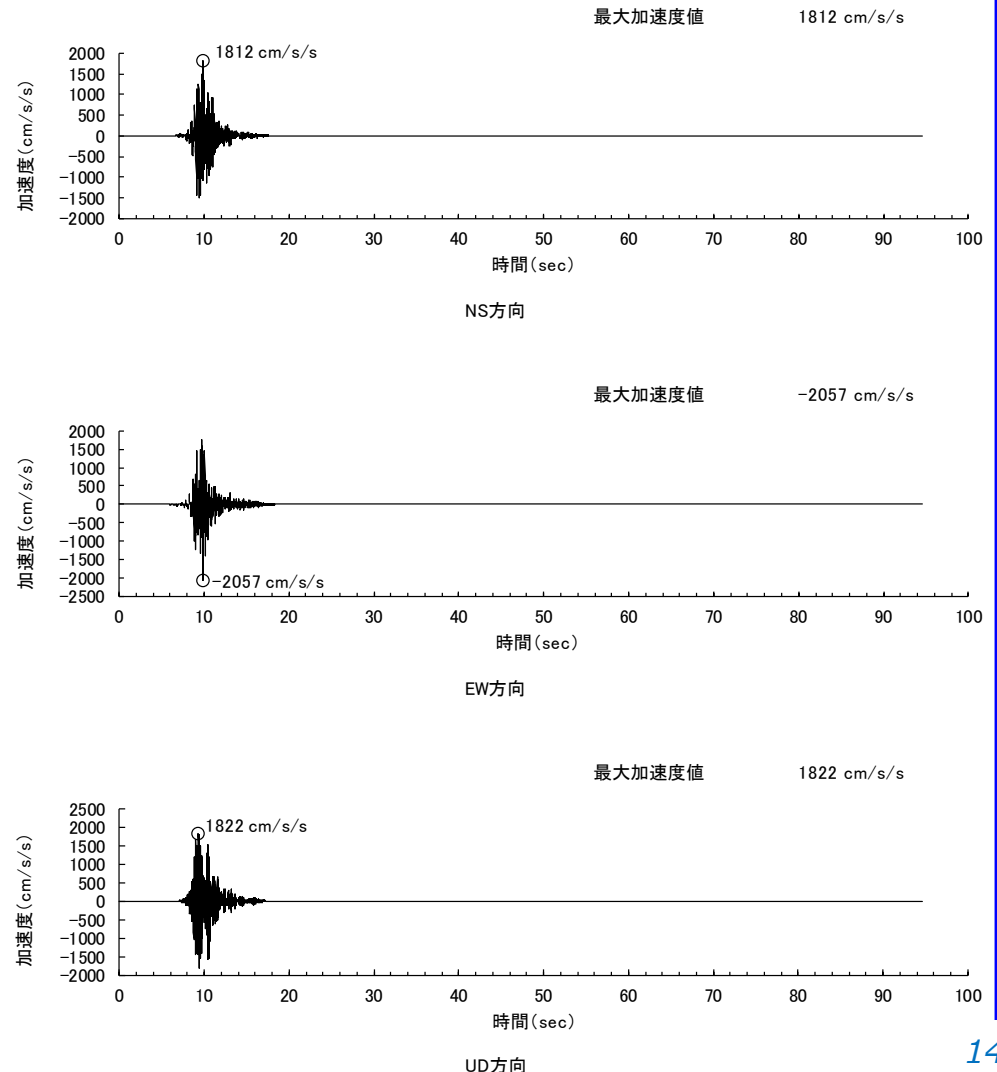
| モード | 固有振動数 [Hz] | 固有周期 [sec] | 刺激係数 |
|-----|------------|------------|-------|
| 1次 | 13.4 | 0.0746 | 0.91 |
| 2次 | 13.6 | 0.0735 | 0.86 |
| 3次 | 15.2 | 0.0658 | 0.43 |
| 4次 | 24.7 | 0.0405 | 1.44 |
| 5次 | 34.9 | 0.0287 | -0.71 |

炉心支持板の時刻歴応答 炉心支持板の加速度応答時刻歴波形

「応答スペクトルに基づく地震動評価」により策定した地震動による
炉心支持板の加速度応答時刻歴波形

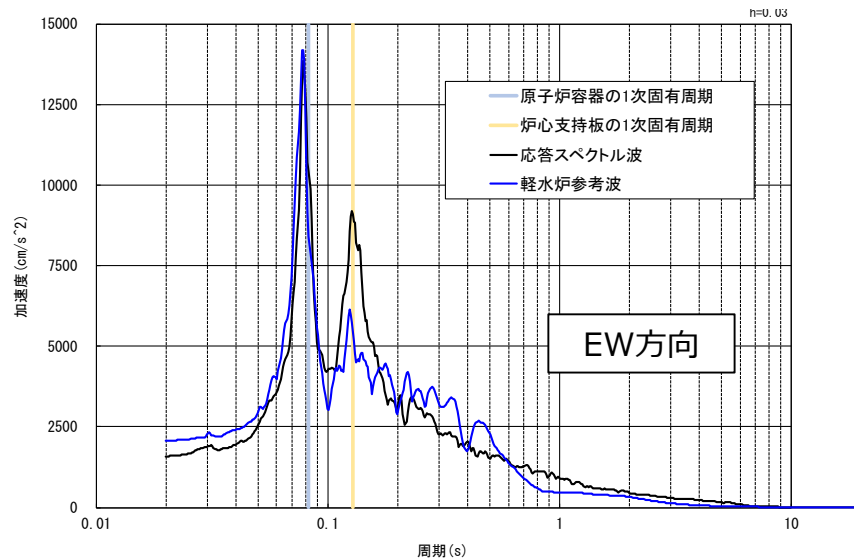
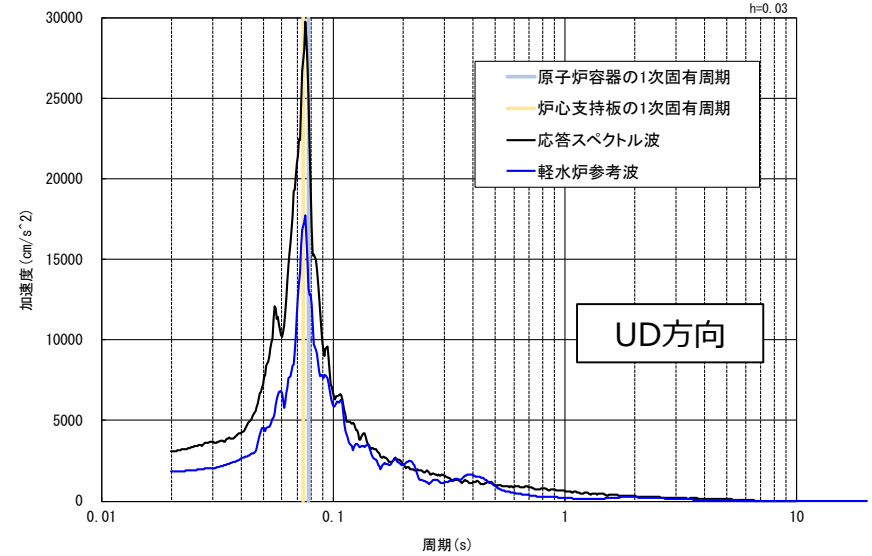
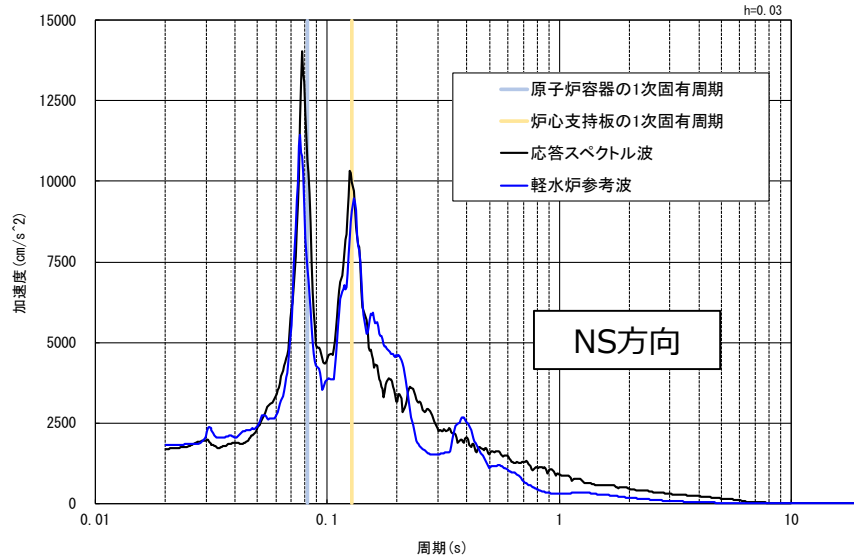


軽水炉の基準地震動レベルを参考に策定した地震動による
炉心支持板の加速度応答時刻歴波形



炉心支持板の時刻歴応答 炉心支持板の加速度応答スペクトル

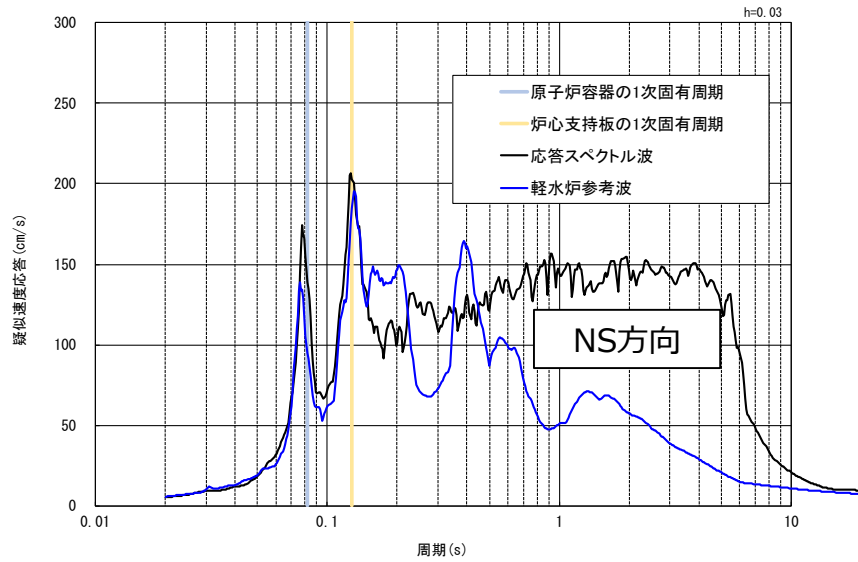
※h=3%の応答スペクトル



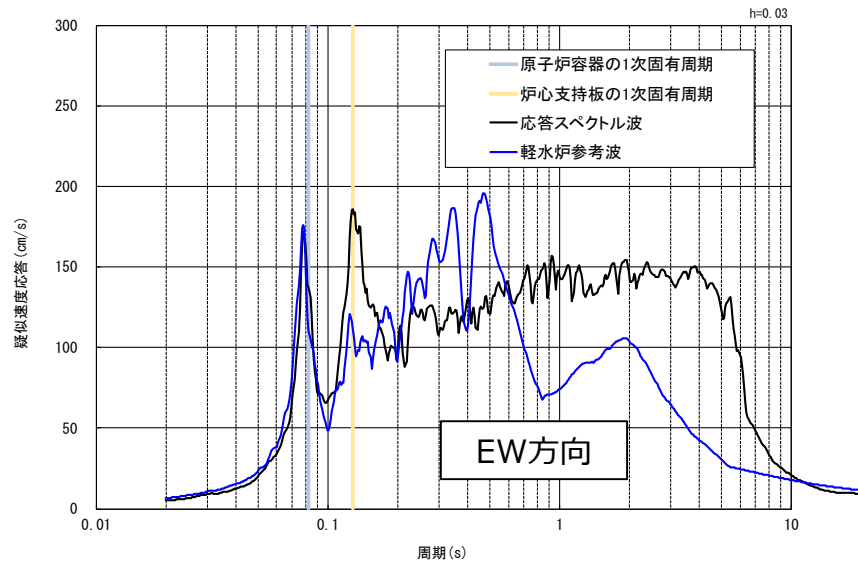
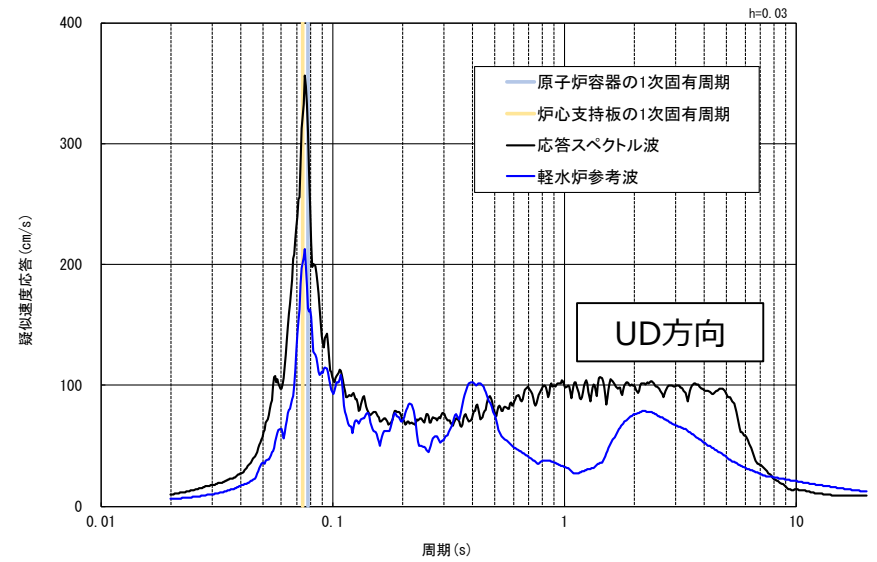
炉心支持板の時刻歴応答

炉心支持板の疑似速度応答スペクトル

※h=3%の応答スペクトル



【UD方向】



3次元群振動解析

求めた炉心支持板の加速度時刻歴応答を、3次元炉心群振動解析の入力とする。

