

2021年2月13日に発生した地震と、2022年3月16日に発生した地震の、特性の違いによる設備への影響検討

2023年12月18日



東京電力ホールディングス株式会社

3月16日地震に関する過去のコメント回答

■ 特定原子力施設監視・評価検討会（第99回）資料1-1で頂いたコメント全10件に対し、その後の対応状況を朱書きで更新した

コメントへの回答と対応状況（1 / 2）

| 分類 | コメント | 回答 | 回答可能時期 |
|----------|---|--|---|
| 1号機PCV水位 | ・地震により損傷が拡大しており、耐震性が低下しているとの認識のもと、水位をなるべく下げること。また、損傷個所の特定等のために、ROVをPCV内に入れ調査することを検討すること（規制庁） | 第102回および第104回で回答済 PCV水位低下についてはPCV内部調査後に取り組む計画 | 回答済 |
| 1号機PCV水位 | ・損傷の程度、漏えい量などについて注水量などを踏まえた定量的な評価を検討すること（高坂オブザーバー） | 第102回で回答済 コメントはスライド3 | 回答済 |
| 耐震評価 | ・3月16日地震は検討用地震動の半分（Sd相当）を超える可能性があることから、設備の健全性および建屋の劣化状況等の評価に加え、解放基盤表面の地震動や地盤応答の増幅特性などを分析・評価し、現在設計で用いている地震動・地盤モデル等の妥当性を検証すること（規制庁） | 建屋に関しては第99回および第100回で回答済 | 回答済 |
| | | タンクエリアの地盤モデルの妥当性について検討中 | これまでの検討結果と今後の検討計画を年度内に報告予定。 |
| 耐震評価 | ・自由地盤系の観測について、地表面のデータが中止している箇所も、今後の地震モデル検証にあたり、観測できるところは観測すべき（規制庁） | 第99回および第100回で回答済 | 回答済 |
| 耐震評価 | ・3号機について、建屋解析モデルに3月16日地震の波を入力して建屋応答解析結果と実際の建屋応答との比較・分析を行うこと（山本教授） | 第102回で回答済 | 回答済 |
| 耐震評価 | ・設備の健全性評価にあたっては、3月16日地震と2月13日地震の特性の違い（卓越する周期や方向の違いなど）を考慮して実施すること（高坂オブザーバー） | 設備の耐震評価は、3月16日地震の特性（周期や方向）を考慮して実施する | 第109回の検討会にて耐震評価結果を報告。今回、改めて特性の違いによる影響検討結果を報告。 |

3月16日地震に関する過去のコメント回答

コメントへの回答と対応状況（2 / 2）

| 分類 | コメント | 回答 | 回答可能時期 |
|-------------|---|-------------------|--------|
| タンクエリア地震計 | ・Dエリアタンクの地震計と同様な設置方法となっている地震計について、タンクの接地面の地震動が適切に把握できるよう、早急に設置場所を見直すこと（規制庁） | 第100回および第102回で回答済 | 回答済 |
| コンテナ | ・転倒しにくい配置・高さにするとか、蓋が簡単に開放しないようにする等の対策を検討すること（井口委員） | 第100回で回答済 | 回答済 |
| 今後の地震への対策 | ・3月16日地震と2月13日地震影響をよく整理し、毎回発生するコンテナの転倒やFタンクエリアの漏えい、タンク内水位計の機能喪失などに対して、できる限り対策を講ずること（高坂オブザーバー） | 第100回および第102回で回答済 | 回答済 |
| 4号機原子炉建屋カバー | ・主要部材の健全性について、確認結果を示すこと（規制庁） | 第101回で回答済 | 回答済 |

■ 特定原子力施設監視・評価検討会（第100回）資料2-1で頂いたコメントに対する対応

| 分類 | コメント | 回答 | 回答可能時期 |
|------|--------------------------------|-----------|--------|
| コンテナ | ・コンテナの転倒防止の評価内容を示すこと（高坂オブザーバー） | 第101回で回答済 | 回答済 |

■ 特定原子力施設監視・評価検討会（第100回）資料2-2で頂いたコメントに対する対応

| 分類 | コメント | 回答 | 回答可能時期 |
|------|---|-----------|--------|
| 耐震評価 | ・はざとり波が一部周期帯で1/2Ssを超えていることから、優先順位を考慮し、その健全性を早期に確認すること。また、現在審査中のB+設備について、本影響の評価を行うなど、耐震設計において考慮すること（規制庁） | 第107回で回答済 | 回答済 |

3月16日地震に関する過去のコメント回答

■ 特定原子力施設監視・評価検討会（第101回）資料3-2で頂いたコメントに対する対応

| 分類 | コメント | 回答 | 回答可能時期 |
|------|---|-------------------------------|--------|
| 耐震評価 | ・新設設備の評価について、波及的影響評価（Ss900）と機能維持評価の内容は異なることから、今後の審査において、個別にその内容と比較した上で除外できることを説明すること。また、「新設B+クラスの対応方針」における「評価」内容が「1/2Ss450機能維持」と異なる場合は、その差異を明確にすること（規制庁、山本教授） | 第102回で回答済 個別の評価は今後の審査の中で説明 | 回答済 |
| 耐震評価 | ・剛構造の設備に対して3月16日地震の影響がないとしているが、はぎとり波の50Hz周辺においても1/2Ssを超過しているため、その根拠を示すこと（規制庁） | 第102回で回答済 | 回答済 |

■ 特定原子力施設監視・評価検討会（第102回）資料3-3で頂いたコメントに対する対応

| 分類 | コメント | 回答 | 回答可能時期 |
|-------|--|-----------|--------|
| PCV水位 | ・3号機原子炉格納容器内の水位について、8月上旬以降緩やかな水位低下が続いており、注水量を増加させたとのことだが、今後推定原因等を説明すること（規制庁） | 第105回で回答済 | 回答済 |
| PCV水位 | ・格納容器の漏えい箇所の推定に関して、格納容器内（S/C含む）の水位だけではなく、原子炉建屋側への漏えい状況（トリチウム移行量や滞留水の状況等）も踏まえ推定すること（高坂オブザーバー） | | |

2.13地震と3.16地震の比較

【観測された地震】

2021年2月13日に発生した地震（以下、2.13地震）、及び2022年3月16日に発生した地震（以下、3.16地震）は以下のとおり。

2.13地震

- ・発生日時 : 2021年2月13日 午後11時8分頃
- ・6号機加速度 : (水平) 235ガル (鉛直) 117ガル

3.16地震

- ・発生日時 : 2022年3月16日 午後11時36分頃
- ・6号機加速度 : (水平) 221ガル (鉛直) 202ガル

【地震観測記録、はざとり波スペクトルの特徴】

2.13地震と3.16地震の地震観測記録（5ページ参照）を比較すると、水平方向加速度は大きな違いはないが、鉛直方向加速度は3.16地震において大きな加速度が観測されている。

スペクトル（7ページ参照）を比較すると、水平方向、鉛直方向ともに、広い周期帯で3.16地震は2.13地震を上回っており、3.16地震の方が設備への影響が大きい地震と考えられる。

【福島第一原子力発電所内の状況】

いずれの地震でも、地震直後の点検で廃炉作業に必要な安全機能に大きな異常がないことを確認しているが、3.16地震では詳細点検にて廃炉作業に必要な一部の設備への影響が確認されている。

また、いずれの地震でも、屋外タンクの滑動が確認されたが、3.16地震ではより多くのタンクで滑動が確認されている。

2.13地震後と3.16地震後の発電所内の状況は、観測記録やはざとり波のスペクトルから想定される地震影響と一致している。

5号機・6号機および自由地盤系の地震観測記録

本資料における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

- 6号機基礎版での観測記録（お知らせ済）と同様の数値が5号機でも観測されている
- 自由地盤系も含め、全体的に昨年2月13日に発生した地震をやや上回るものであった

下表の括弧内の数字は、昨年2月13日の地震時に測定された値

| 観測箇所 | 観測位置 | 観測点名 | 観測された最大加速度値 (単位:ガル) | | |
|--------------|------------|------|---------------------|-----------|------------|
| | | | NS(南北)方向 | EW(東西)方向 | UD(上下)方向 |
| 5号機 原子炉建屋 | 2階 | 5-R1 | 295 (277) | 306 (246) | 259 (187) |
| | 地下1階(基礎版) | 5-R2 | 213 (172) | 222 (213) | 190 (181) |
| 6号機 原子炉建屋 | 6階 | P10 | 426 (324) | 439 (323) | 242 (179) |
| | 2階 | P8 | 210 (203) | 243 (231) | 187 (133) |
| | 地下2階(基礎版) | 6-R2 | 218 (163) | 208 (230) | 152 (109) |
| | | P3 | ※221 (164) | 203 (235) | 161 (109) |
| | | P5 | 191 (157) | 196 (206) | ※202 (117) |
| 自由地盤系 南地点 | O.P.+32.9m | GS1 | | | 332 (262) |
| | O.P. -5.0m | GS2 | | | |
| | O.P. -100m | GS3 | 349 (156) | 283 (200) | 133 (105) |
| | O.P. -200m | GS4 | 248 (174) | 306 (198) | 118 (95) |
| | O.P. -300m | GS5 | 281 (164) | 241 (167) | 155 (106) |
| 自由地盤系 北地点 | O.P.+12.2m | GN1 | 446 (404) | 555 (436) | 256 (182) |
| | O.P. -5.0m | GN2 | | | |
| | O.P. -100m | GN3 | 216 (156) | 253 (173) | |
| | O.P. -200m | GN4 | 187 (158) | 188 (148) | 106 (86) |
| | O.P. -300m | GN5 | 185 (164) | 184 (182) | 110 (87) |

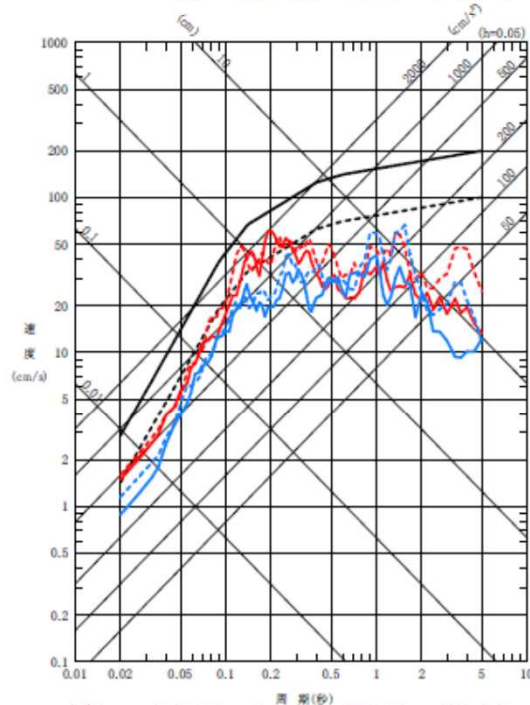
※ 6号機基礎版上の地震計の最大加速度値（水平、垂直）についてはお知らせ済み

※ 観測を中止した成分については斜線で示す

自由地盤系南地点 はぎとり波の推定 (擬似速度応答スペクトル) **TEPCO**

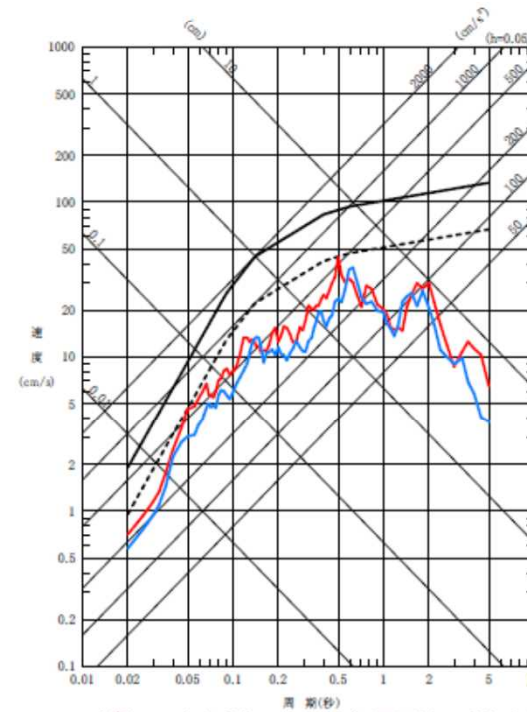
・ Ss900 (検討用地震動①) で完全包絡する結果となった。

- Ss900(検討用地震動①H)
- - - 1/2検討用地震動①H
- 3月16日地震 はぎとり波 (NS方向)
- - - 3月16日地震 はぎとり波 (EW方向)
- 2月13日地震 はぎとり波 (NS方向)
- - - 2月13日地震 はぎとり波 (EW方向)



はぎとり波と検討用地震動の比較
(水平方向)

- Ss900(検討用地震動①V)
- - - 1/2検討用地震動①V
- 3月16日地震 はぎとり波 (UD方向)
- 2月13日地震 はぎとり波 (UD方向)



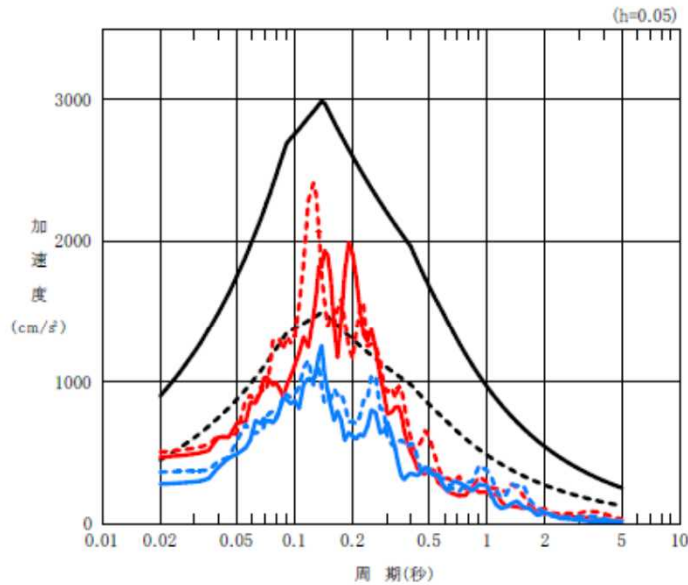
はぎとり波と検討用地震動の比較
(鉛直方向)

自由地盤系南地点 はぎとり波の推定 (加速度応答スペクトル) **TEPCO**

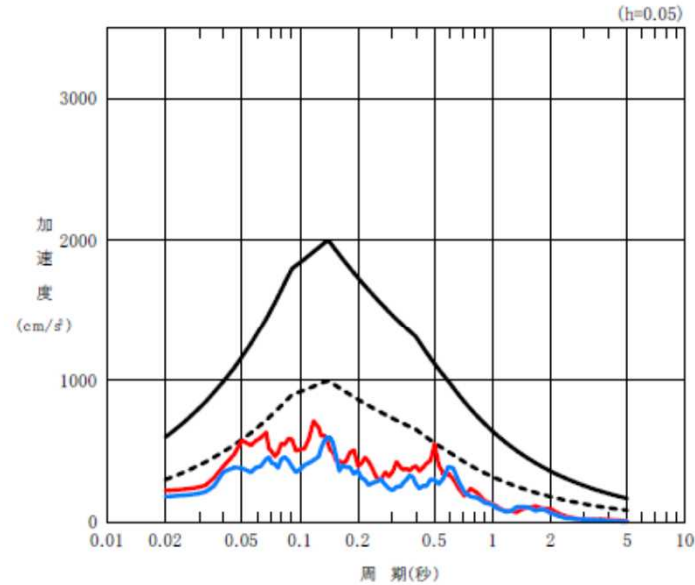
・ Ss900 (検討用地震動①) で完全包絡する結果となった。

- Ss900(検討用地震動①H)
- - - 1/2検討用地震動①H
- 3月16日地震 はぎとり波 (NS方向)
- - - 3月16日地震 はぎとり波 (EW方向)
- 2月13日地震 はぎとり波 (NS方向)
- - - 2月13日地震 はぎとり波 (EW方向)

- Ss900(検討用地震動①V)
- - - 1/2検討用地震動①V
- 3月16日地震 はぎとり波 (UD方向)
- 2月13日地震 はぎとり波 (UD方向)



はぎとり波と検討用地震動の比較
(水平方向)



はぎとり波と検討用地震動の比較
(鉛直方向)

2.13地震と3.16地震の、特性の違いによる影響検討方針

➤ 検討方針

はぎとり波のスペクトルから判断すると、設備の耐震評価結果は3.16地震による影響の方が大きくなると考えられるが、一部の設備では2.13地震による影響の方が大きくなっている。

このため、地震動の特性（設備設置床の床応答スペクトル（以下、FRS））と、設備の振動特性（固有値解析結果）から、2.13地震、3.16地震が設備へ与えた影響の違いについて検討する。

➤ 検討対象とする設備の抽出

対象設備は、以下の条件で抽出した。

- ①2.13地震と3.16地震の両方に対して、耐震評価を実施している設備
- ②固有値解析を実施しており、設備の振動特性が分かっている設備
- ③上記①②のうち、2.13地震と3.16地震で、耐震評価結果の傾向が異なる設備

上記①②に該当する設備から、2.13地震と3.16地震の耐震評価結果の傾向が異なる設備として、以下の2設備を抽出し、比較検討する。

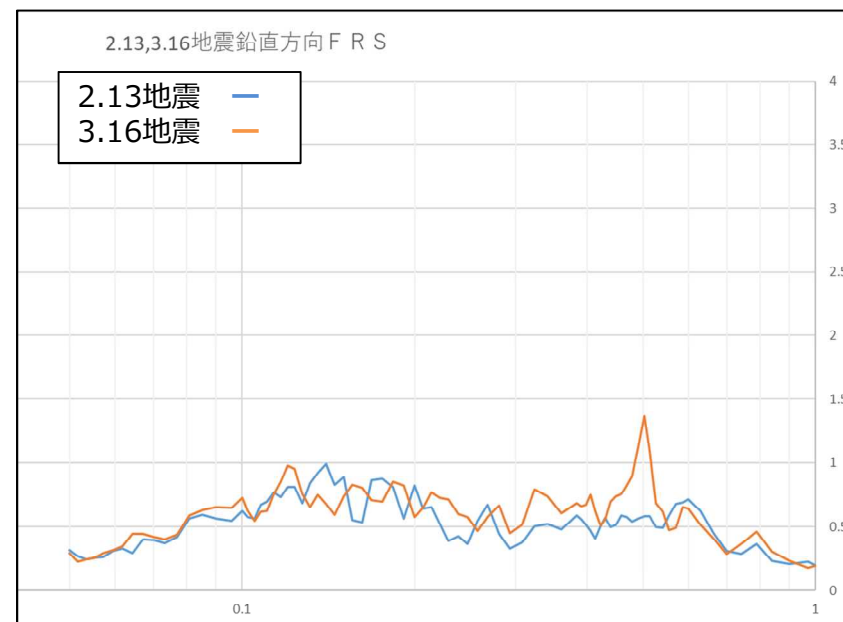
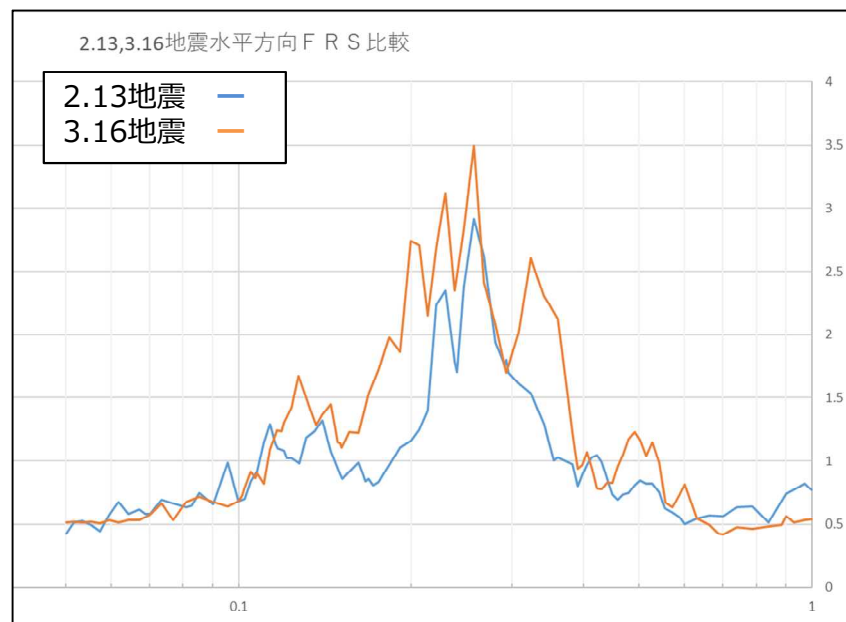
- ・ 雑固体廃棄物焼却設備 排ガス冷却器（3.16地震の方が評価応力が高い）
- ・ 滞留水移送装置 T/Bポンプ出口弁スキッド（2.13地震の方が評価応力が高い）

■ 設置床のFRSによる設備への影響

排ガス冷却器が設置されている、雑固体廃棄物焼却建屋1階のFRSを以下に示す。

水平方向のスペクトルは、2.13地震と3.16地震でピークが出ている周期帯は同じだが、3.16地震によるスペクトルの方がピークも高く幅も広がっている。このため、3.16地震の方がより多くの設備に影響を与える地震であることが分かる。

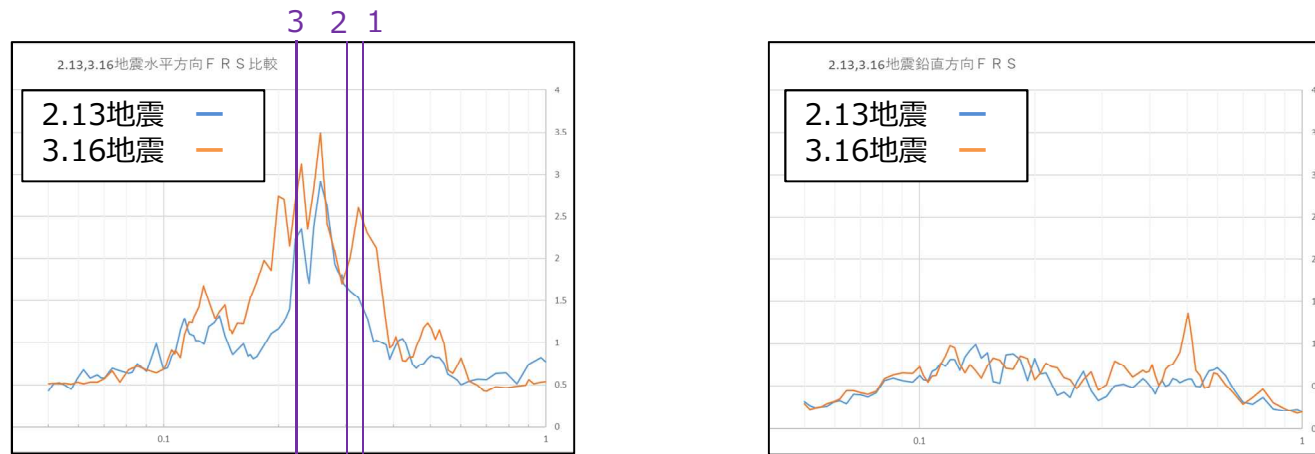
鉛直方向のスペクトルは、1カ所にピークがある山のような形状ではなく、幅の広い丘のような形状となっている。3.16地震によるスペクトルは0.5秒付近にピークがあるため、設備の鉛直方向の固有周期が一致する場合は、3.16地震による評価応力が大きくなる可能性がある。



■ 設備の振動特性を考慮した地震影響

排ガス冷却器の固有値解析結果を以下に示す。この設備には6つの振動モード※1があるが、各振動モードの影響の大きさを判断する目安とするため、刺激係数※2×加速度を計算し、それぞれの地震による影響が大きい振動モードを確認したところ、排ガス冷却器は2.13地震、3.16地震ともに1～3次モードによる影響が大きいことが分かった。

下図を見ると、影響の大きい3つのモード全てで3.16地震による加速度が2.13地震を上回っている。特に1次と3次モードの周期帯において、3.16地震による加速度が2.13地震と比較してかなり大きくなっており、3.16地震による評価応力が高くなった原因と考えられる。



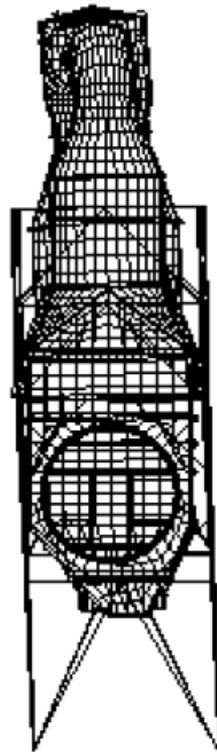
| 次数 | 固有周期 (sec) | 方角 | 刺激係数 | 2.13加速度(mm/sec ²) | 3.16加速度(mm/sec ²) | 2.13加速度×刺激係数 | 3.16加速度×刺激係数 |
|----|------------|-----|--------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| 1 | 0.3345 | N S | 2.081 | 13,593 | 23,714 | 28287 | 49349 |
| 2 | 0.3007 | E W | 2.235 | 16,340 | 18,200 | 36520 | 40677 |
| 3 | 0.2252 | E W | -1.283 | 22,451 | 28,468 | -28805 | -36524 |
| 4 | 0.1986 | N S | 0.685 | 11,333 | 25,497 | 7763 | 17465 |
| 5 | 0.0842 | U D | -2.910 | 5,797 | 6,093 | -16869 | -17731 |
| 6 | 0.0639 | U D | 1.244 | 2,919 | 4,221 | 3631 | 5251 |

※1：設備毎に振動の型（振動モード）が複数あり、地震時に設備が揺れる際は、それら複数の振動モードが混ざった揺れ方をします。揺れ方に応じて設備各部に応力が発生する。固有値解析を行うことで、振動モードとその周期、刺激係数（影響度合い）が分かる。

※2：振動モード毎の影響の大きさを表す数値。この値が大きいほど、その振動モードによる影響が大きく、耐震評価に与える影響も大きい。

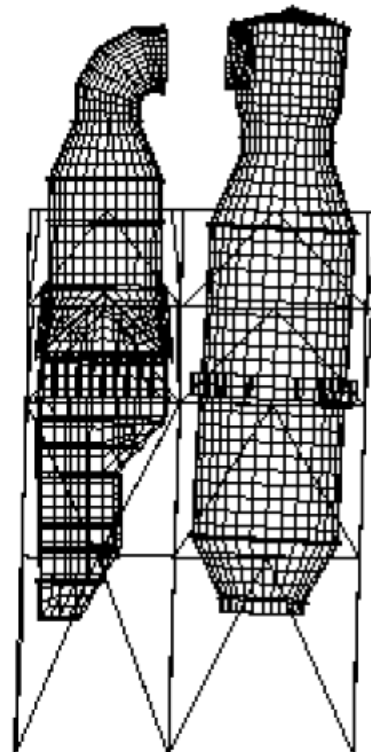
【参考】 排ガス冷却器 振動モード図

NS方向



1次モード
固有周期：0.3345sec

EW方向



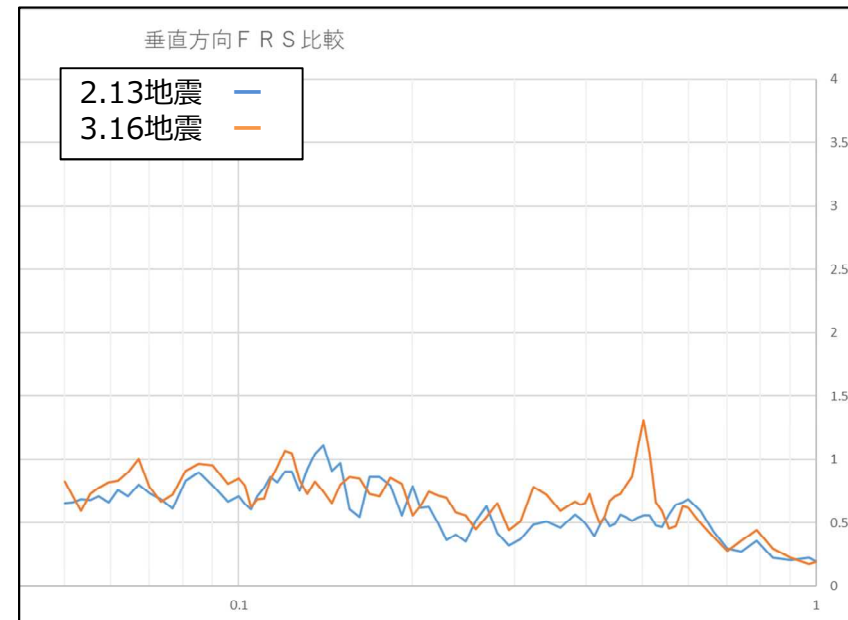
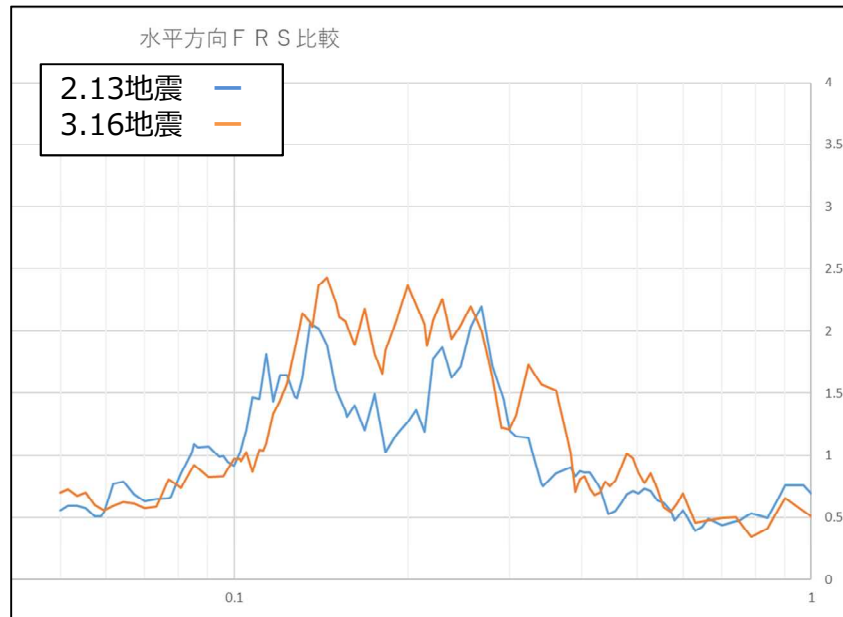
2次モード
固有周期：0.307sec

■ 設置床のFRSによる設備への影響

T/Bポンプが設置されている、3号タービン建屋1階のFRSを以下に示す。

雑固体廃棄物焼却建屋1階のFRSと比較すると、水平方向のピークが抑えられていることと、水平方向／鉛直方向共に短周期側の加速度が大きくなっていることが分かる。タービン建屋は雑固体廃棄物焼却建屋と比較して、建屋の固有周期が短い（固く頑丈な建屋）ため、長周期側の応答増幅が抑えられた反面、短周期側の応答増幅が大きくなっていることによる影響と考えられる。

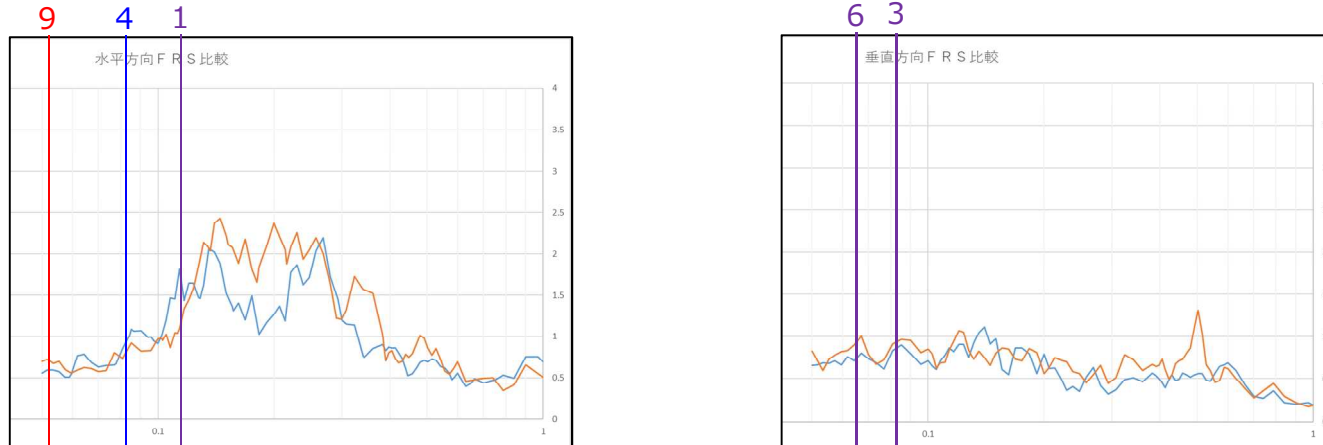
2.13地震と3.16地震によるFRSを比較すると、水平方向のスペクトルは、0.15秒～0.4秒付近で3.16地震によるスペクトルの方が大きくなっている。3.16地震による鉛直方向のスペクトルは、0.5秒付近にピークがあるため、設備の鉛直方向の固有周期が一致する場合は、3.16地震による評価応力が大きくなる可能性がある。



■ 設備の振動特性を考慮した地震影響

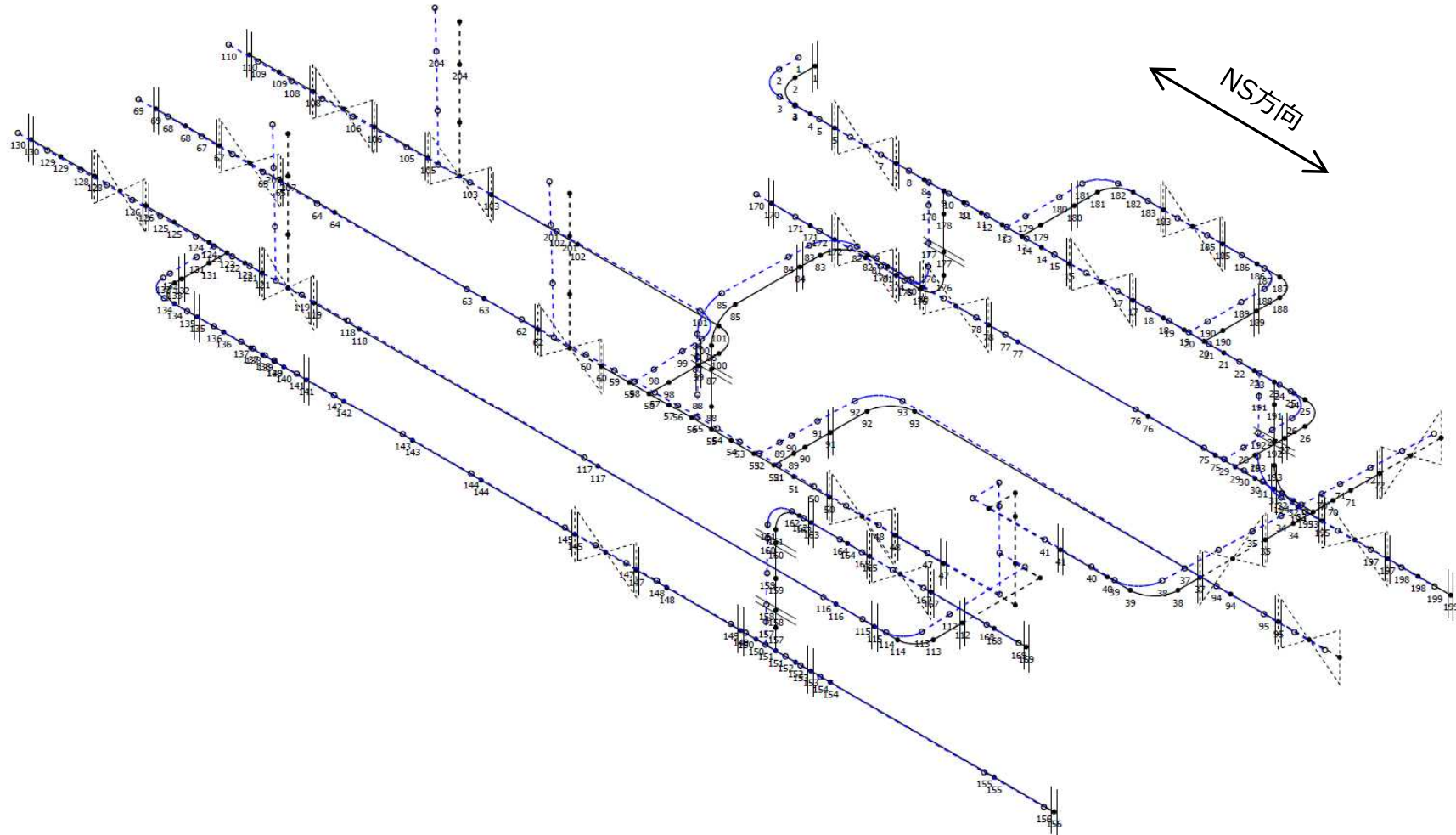
T/Bポンプ出口弁スキッドの固有値解析結果を以下に示す。この設備には9つの振動モードがあるが、それぞれの地震による影響が大きい振動モードを確認したところ、2.13地震、3.16地震ともに1次モードの影響が支配的であり、2.13地震では1,3,4,6次モードによる影響が比較的大きく、3.16地震では1,3,6,9次モードによる影響が比較的大きいことが分かった。

下図を見ると、最も支配的な1次モードで2.13地震による加速度が3.16地震を上回っている。当該設備は、はぎとり波のスペクトルに基づく想定に反して2.13地震による評価応力の方が大きくなっているが、最も支配的な1次モードで2.13地震の加速度が大きかったことが原因と考えられる。



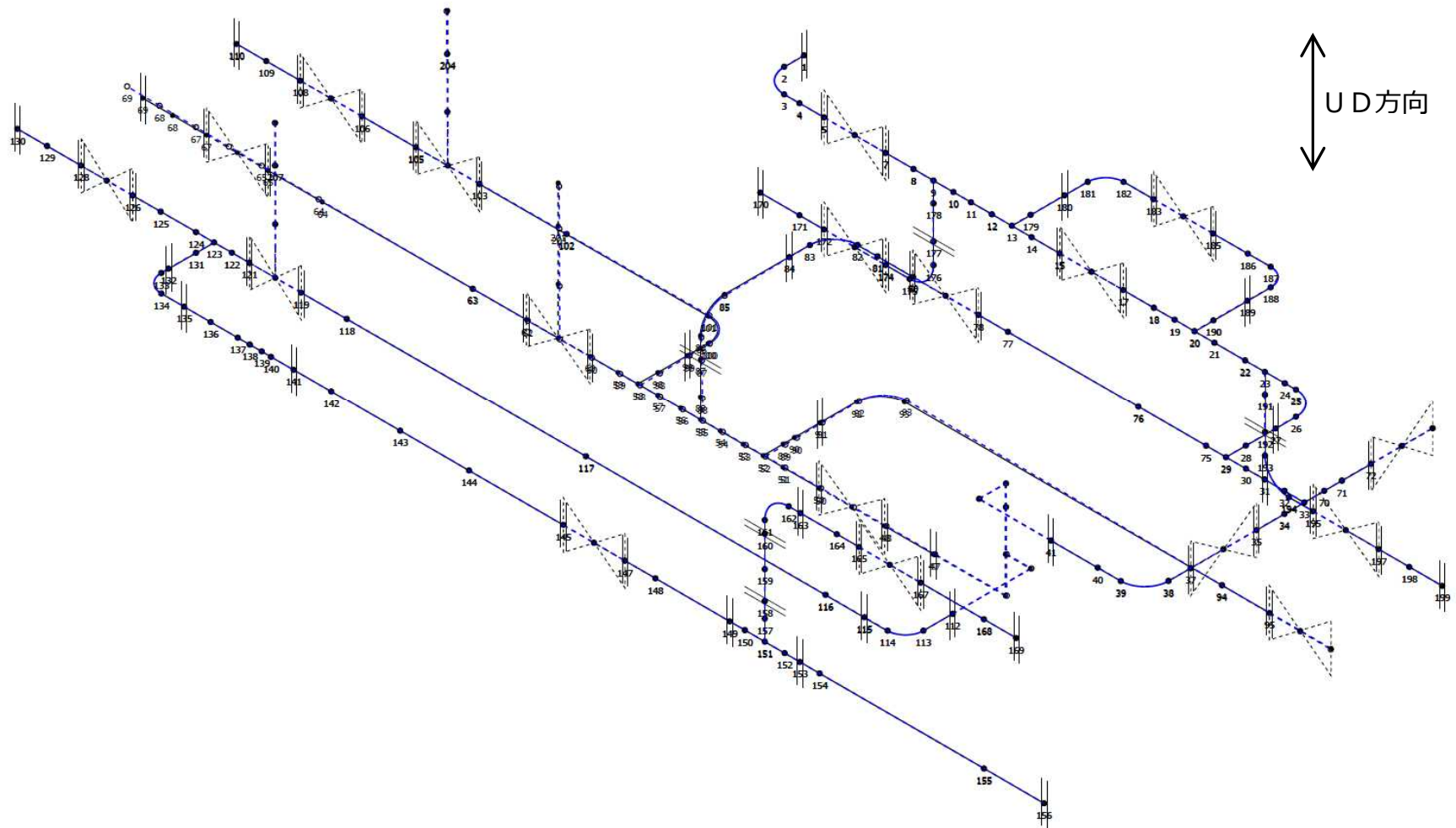
| 次数 | 固有周期 (sec) | 方角 | 刺激係数 | 2.13加速度(mm/sec ²) | 3.16加速度(mm/sec ²) | 2.13加速度×刺激係数 | 3.16加速度×刺激係数 |
|----|------------|-----|-------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| 1 | 0.122 | N S | 1.241 | 16,124 | 14,830 | 20010 | 18404 |
| 2 | 0.094 | N S | 0.049 | 9,788 | 8,104 | 480 | 397 |
| 3 | 0.081 | U D | 0.360 | 8,145 | 8,917 | 2932 | 3210 |
| 4 | 0.081 | E W | 0.375 | 8,434 | 7,242 | 3163 | 2716 |
| 5 | 0.072 | N S | 0.182 | 6,279 | 5,720 | 1143 | 1041 |
| 6 | 0.063 | U D | 0.338 | 7,228 | 8,475 | 2443 | 2865 |
| 7 | 0.060 | U D | 0.322 | 6,713 | 8,054 | 2162 | 2593 |
| 8 | 0.058 | U D | 0.276 | 6,820 | 7,752 | 1882 | 2140 |
| 9 | 0.051 | E W | 0.421 | 5,697 | 7,010 | 2398 | 2951 |

【参考】 T / Bポンプ出口弁スキッドへの影響 振動モード図 **TEPCO**



1次モード
固有周期：0.122sec

【参考】 T / Bポンプ出口弁スキッドへの影響 振動モード図 **TEPCO**



3次モード
固有周期 : 0.081sec

今回、2.13地震と3.16地震で評価結果の傾向が異なる2つの設備に対する地震影響を検討した。その結果、以下を確認することができた。

- ✓ 設備への影響度合いが大きい振動モードの周期帯で地震による加速度が大きい場合、設備の評価応力が大きくなること
- ✓ T/Bポンプ出口弁スキッドは、はざとり波のスペクトルに基づく想定に反して2.13地震による評価応力の方が大きくなっているが、これは最も支配的な1次モードで2.13地震の加速度が大きかったことが原因であること

このことから、地震が設備に与える影響の大きさは、地震動のスペクトルと、設備それぞれの振動特性が深く関係していることを改めて確認することができた。