

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

| | |
|----------------|---------------------|
| 柏崎刈羽原子力発電所第6号機 | 設計及び工事計画審査資料 |
| 資料番号 | KK6 補足-028-10-35 改0 |
| 提出年月日 | 2023年12月22日 |

重大事故等条件における下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ
及び鏡板の耐震評価について

2023年12月
東京電力ホールディングス株式会社

目 次

| | |
|---------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 水質量の取扱い | 1 |
| 2.1 スリーブ鏡板（エアロック付） | 1 |
| 2.1.1 固有値解析における水質量の取扱い..... | 3 |
| 2.1.2 応力解析における水質量の取扱い..... | 5 |
| 2.2 スリーブ鏡板（ハッチ付） | 7 |
| 2.2.1 固有値及び応力解析における水質量の取扱い..... | 8 |
| 3. 地震による応力の解析方法について | 10 |
| 3.1 固有値解析結果について | 10 |
| 3.2 応力算出について | 13 |
| 3.3 震度の選定について | 13 |
| 4. まとめ | 13 |

1. はじめに

本資料は、下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ及び鏡板（以下「スリーブ鏡板」という。）（所員用エアロック付（以下「エアロック付」という。）及び機器搬入用ハッチ付（以下「ハッチ付」という。））について、水質量の取扱い及び地震による応力の解析方法について述べ、これらの妥当性について説明する資料である。

本資料が関連する設工認図書は以下のとおり。

- ・ VI-2-9-2-4 「下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ及び鏡板（所員用エアロック付）の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-9-2-5 「下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ及び鏡板（機器搬入用ハッチ付）の耐震性についての計算書」
- ・ VI-3-3-6-1-1-6 「下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ及び鏡板（所員用エアロック付）の強度計算書」
- ・ VI-3-3-6-1-1-7 「下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ及び鏡板（機器搬入用ハッチ付）の強度計算書」

2. 水質量の取扱い

重大事故等時に下部ドライウェルアクセストンネル内は水没することから、スリーブ鏡板の評価におけるこの水質量の取扱いについて説明する。

2.1 スリーブ鏡板（エアロック付）

スリーブ鏡板及びアクセストンネル内が水没した場合の内包水質量及び鋼材質量について、表1にまとめ、図1に対応する領域を示す。

これらの水質量について、固有値解析及び応力解析時に分けて解析モデル上の取扱いについて述べる。

表1 スリーブ鏡板（エアロック付）及びアクセストンネル水没時の質量のまとめ

| 項目 | 鋼材質量 [$\times 10^3\text{kg}$] | 内包水質量 [$\times 10^3\text{kg}$] | 備考 |
|--------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| エアロック | | | 括弧内記号は図1中 対応する質量を表 す。 |
| スリーブ鏡板 | | | |
| トンネル | | | |

注記*1：エアロックがないものと仮定した空間体積に基づき計算した質量のため、一部の質量はエアロック内包水質量と重複する。

*2：軸直角方向の固有値解析において考慮する付加質量。エアロックとスリーブの隙間が狭くなるほど流体による付加質量効果が大きくなることを考慮し、エアロックとスリーブを内筒と外筒の間が水で満たされた偏心二重円筒と仮定して計算した値とする。

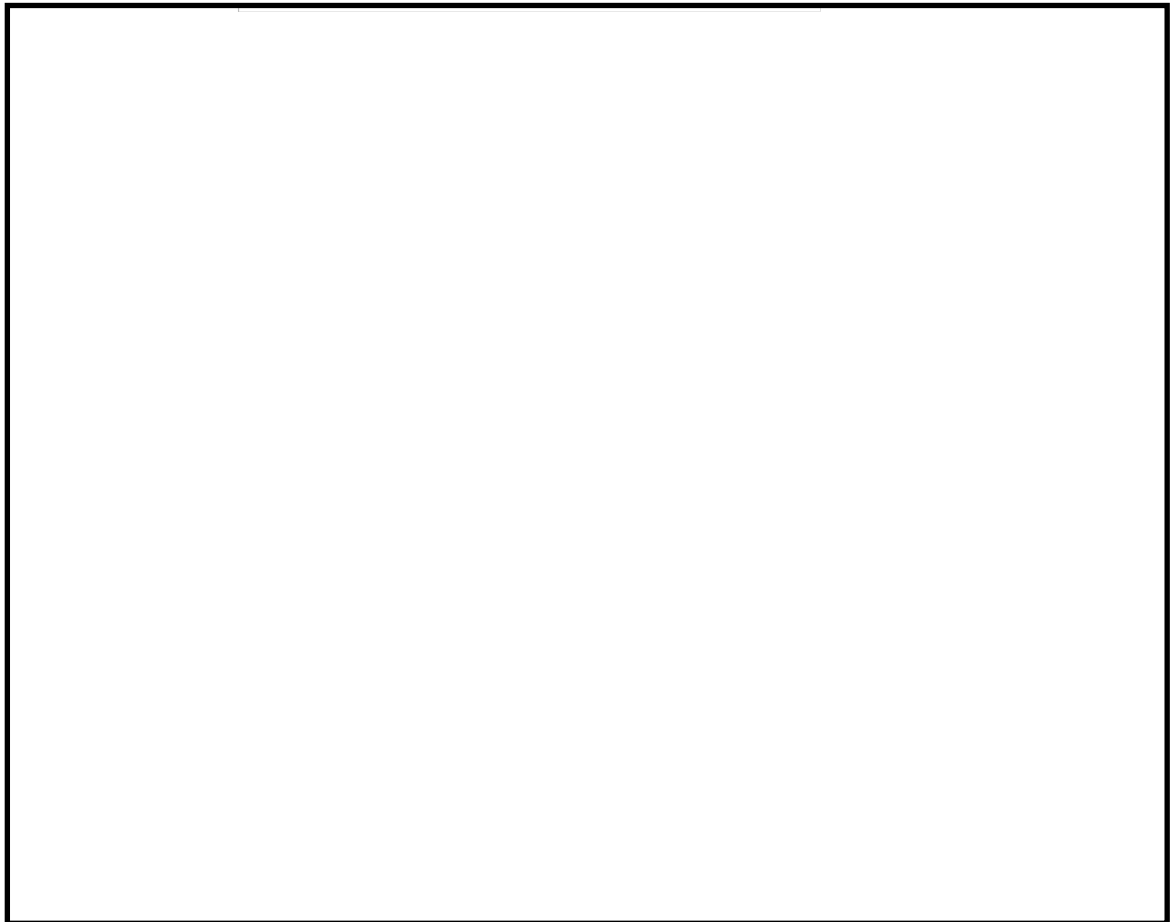


図1 スリーブ鏡板（エアロック付）及びアクセストンネル水没時の質量分布

2.1.1 固有値解析における水質量の取扱い

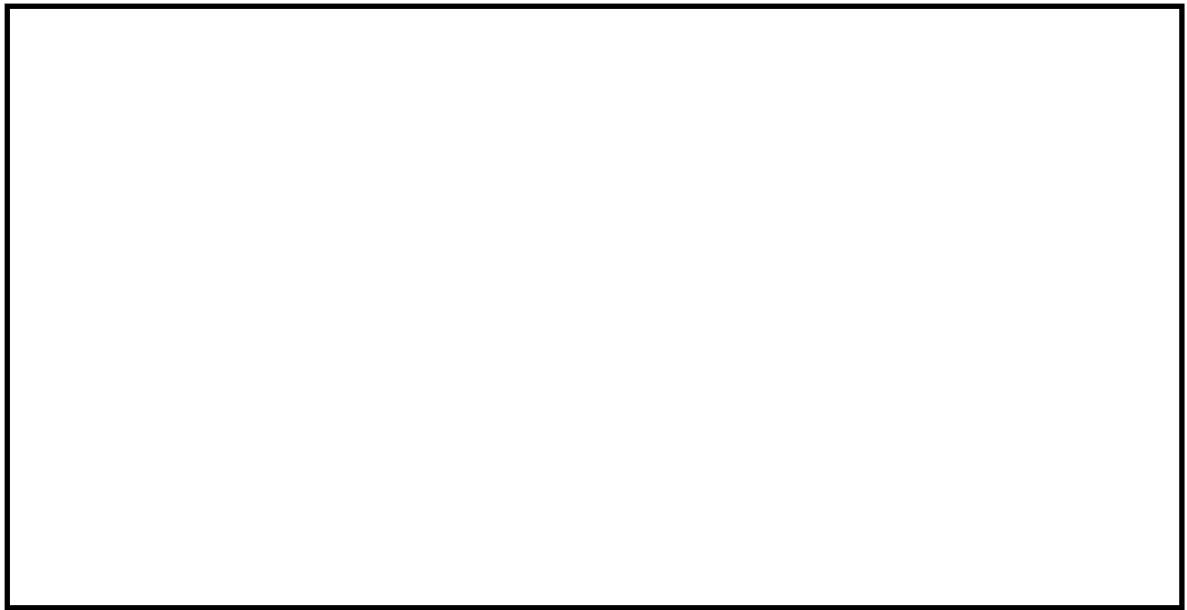
軸方向の解析においては、スリーブ鏡板（エアロック付）及び下部ドライウェルアクセストンネル内に存在する水の質量をエアロックに負担させて固有値解析を実施する。また、軸直角方向の解析においては、エアロックとスリーブの隙間が狭くなるほど流体による付加質量効果が大きくなることを考慮するため、エアロックとスリーブを内筒と外筒の間が水で満たされた偏心二重円筒と仮定し、エアロック（内筒）の振動に対して作用する理論付加質量を求め、下部ドライウェル所員用エアロック胴に付加するものとする。

固有値解析における鋼材及び水質量（付加質量）を表2に示す。また、表2における整理結果のうち軸方向を図2に、軸直角方向を図3に図示する。

表2 スリーブ鏡板（エアロック付）の固有値解析用質量の整理

| 項目 | 解析方向 | 鋼材質量 [$\times 10^3\text{kg}$] | 内包水質量 [$\times 10^3\text{kg}$] | 備考 |
|--------|------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| エアロック | 軸 | | | 括弧内記号は図2,3中の対応する質量を表す。 |
| | 軸直角 | | | |
| スリーブ鏡板 | 軸 | | | |
| | 軸直角 | | | |

注記*：軸直角方向の固有値解析において考慮する付加質量。エアロックとスリーブの隙間が狭くなるほど流体による付加質量効果が大きくなることを考慮し、エアロックとスリーブを内筒と外筒の間が水で満たされた偏心二重円筒と仮定して計算した値とする。



エアロック部分

スリーブ鏡板部分

図2 スリーブ鏡板（エアロック付）における固有値解析用質量（軸方向）



エアロック部分

スリーブ鏡板部分

図3 スリーブ鏡板（エアロック付）における固有値解析用質量（軸直角方向）

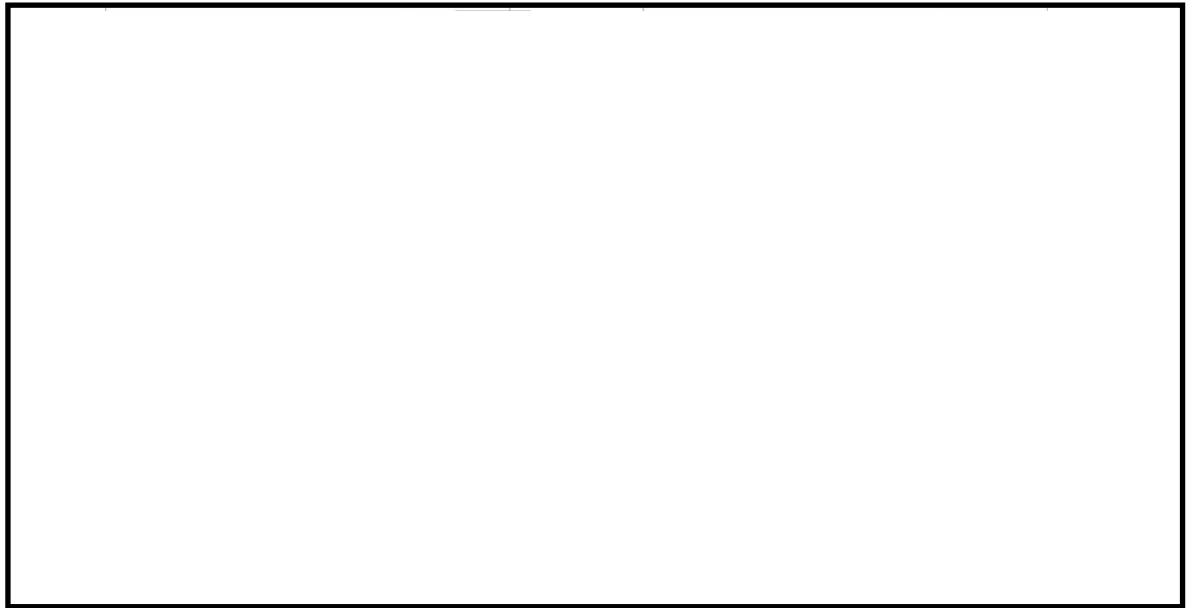
2.1.2 応力解析における水質量の取扱い

スリーブ鏡板（エアロック付）及び下部ドライウェルアクセストンネル内に存在する水の質量を振動方向に応じて適切にエアロックに負担させて応力解析を実施する。なお、軸直角方向の解析について、固有値解析においては、エアロック内包水を除くスリーブ鏡板内部の水は全量をエアロックに付加質量として考慮したが、付加質量は応力への寄与はないことから、応力解析においては考慮しない。

固有値解析における鋼材及び水質量を表3に示す。また、表3における整理結果のうち軸方向を図4に、軸直角方向を図5に図示する。

表3 スリーブ鏡板（エアロック付）の応力解析用質量の整理

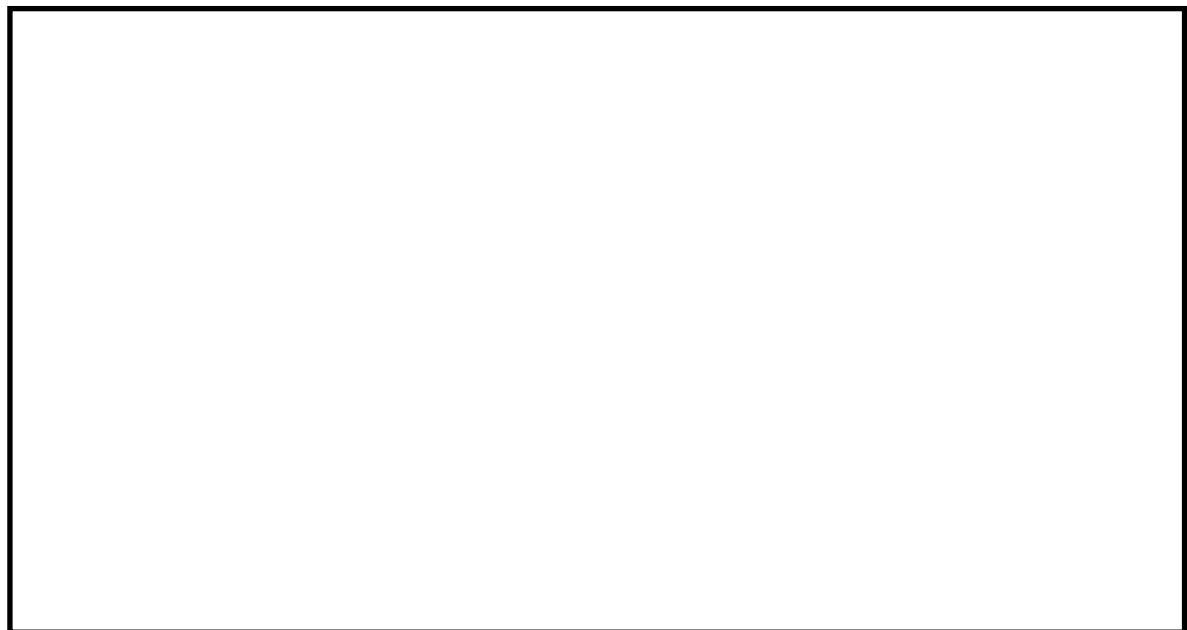
| 項目 | 解析方向 | 鋼材質量 [×10 ³ kg] | 内包水質量 [×10 ³ kg] | 備考 |
|--------|------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| エアロック | 軸 | | | 括弧内記号は図4, 5中の対応する質量を表す。 |
| | 軸直角 | | | |
| スリーブ鏡板 | 軸 | | | |
| | 軸直角 | | | |



エアロック部分

スリーブ鏡板部分

図4 スリーブ鏡板（エアロック付）における応力解析用質量（軸方向）



エアロック部分

スリーブ鏡板部分

図5 スリーブ鏡板（エアロック付）における応力解析用質量（軸直角方向）

2.2 スリーブ鏡板（ハッチ付）

スリーブ鏡板（ハッチ付）及びアクセストンネル内が水没した場合の内包水質量及び鋼材質量について、表4にまとめ、図6に対応する領域を示す。

これらの水質量について、解析モデル上の取扱いについて述べる。

表4 スリーブ鏡板（ハッチ付）及びアクセストンネル水没時の質量のまとめ

| 項目 | 鋼材質量 [$\times 10^3\text{kg}$] | 内包水質量 [$\times 10^3\text{kg}$] | 備考 |
|--------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| ハッチ | | | 括弧内記号は図6中 対応する質量を表 す。 |
| スリーブ鏡板 | | | |
| トンネル | | | |

注記*：M4, M5, M6及びM7の計算式を以下に示す。

$$M4 = (\text{ハッチ内包水質量} + \text{スリーブ内包水質量}) \times A_H / A_S$$

$$M5 = (\text{ハッチ内包水質量} + \text{スリーブ内包水質量}) \times (A_S - A_H) / A_S$$

$$M6 = (\text{ハッチ内包水質量} + \text{スリーブ内包水質量} + \text{トンネル内包水質量}) \times A_H / A_S$$

$$M7 = (\text{ハッチ内包水質量} + \text{スリーブ内包水質量} + \text{トンネル内包水質量}) \times (A_S - A_H) / A_S$$

A_S ：スリーブの軸方向断面積（内径基準）， A_H ：ハッチの軸方向断面積（外径基準）

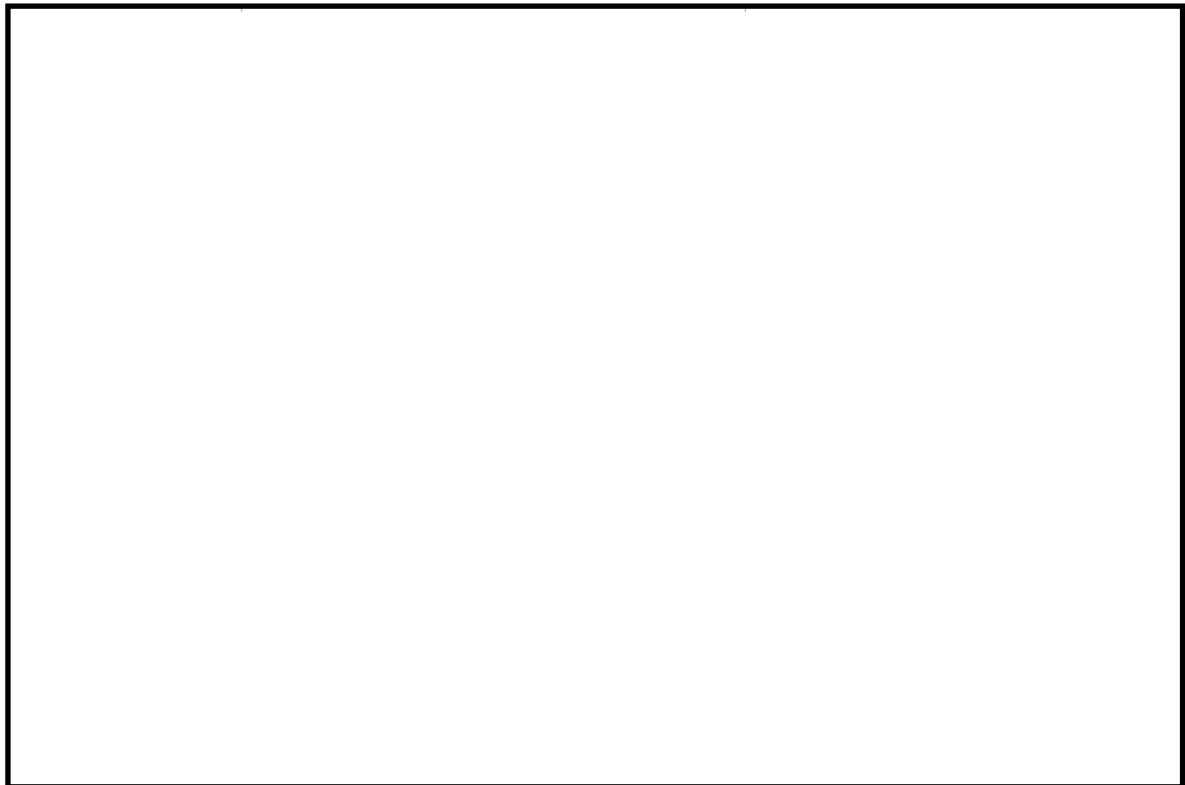


図6 スリーブ鏡板（ハッチ付）及びアクセストンネル水没時の質量分布

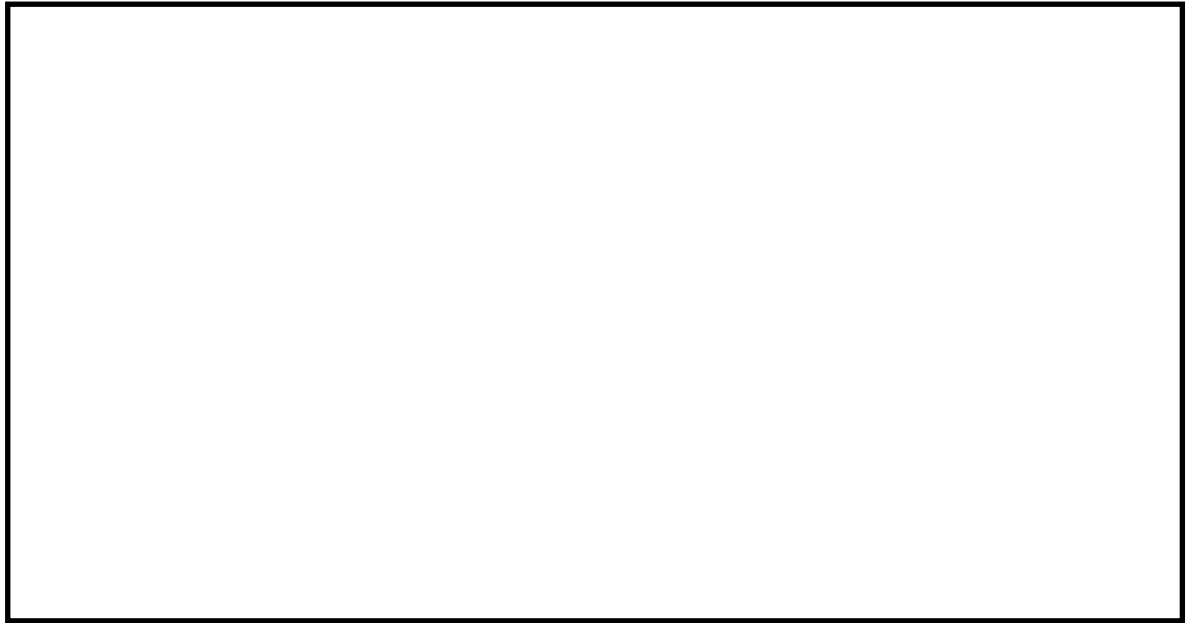
2.2.1 固有値及び応力解析における水質量の取扱い

スリーブ鏡板（ハッチ付）及び下部ドライウェルアクセストンネル内に存在する水の質量を振動方向に応じて適切にハッチ及びスリーブ鏡板に振り分けて固有値及び応力解析を実施する。なお、スリーブ鏡板（エアロック付）と異なり、スリーブ鏡板（ハッチ付）においてはハッチ部の大部分が気中に存在するため、付加質量を考慮する必要がないことから、水質量の取扱いは固有値解析及び応力解析において共通となる。ただし、応力解析では既工認と同様に全ての水質量をハッチ外側端（フランジ面）に負荷することとする。

固有値及び応力解析における鋼材及び水質量を表 5 に示す。また、表 5 における整理結果のうち軸方向を図 7 に、軸直角方向を図 8 に図示する。

表5 スリーブ鏡板（ハッチ付）の固有値及び応力解析用質量の整理

| 項目 | 解析方向 | 鋼材質量 [$\times 10^3$ kg] | 内包水質量 [$\times 10^3$ kg] | 備考 |
|--------|------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|
| ハッチ | 軸 | | | 括弧内記号は図7,8中の対応する質量を表す。 |
| | 軸直角 | | | |
| スリーブ鏡板 | 軸 | | | |
| | 軸直角 | | | |



ハッチ部分

スリーブ鏡板部分

図7 スリーブ鏡板（ハッチ付）における固有値及び応力解析用質量（軸方向）



ハッチ部分

スリーブ鏡板部分

図8 スリーブ鏡板（ハッチ付）における固有値及び応力解析用質量（軸直角方向）

3. 地震による応力の解析方法について

スリーブ鏡板における地震による応力の解析にあたっては、スリーブ鏡板の固有値が柔領域において各方向の主要なモードが1つのみであることを確認した上で、各方向の固有周期に対応する震度を応力評価に用いている。本項ではその詳細について説明する。

なお、本項ではスリーブ鏡板（エアロック付）を代表として説明するが、スリーブ鏡板（ハッチ付）についても同様である。

3.1 固有値解析結果について

VI-2-9-2-4「下部ドライウェルアクセストンネルスリーブ鏡板（所員用エアロック付）の耐震性についての計算書」における固有値解析結果について、軸方向の結果を表6に、軸直角方向の結果を表7に示す。また、振動モード図を図9に示す。

固有値解析モデルは、「2. 水質量について」に示したように、軸方向及び軸直角方向で固有周期に対して寄与する水質量が変わるため、軸方向と軸直角方向用の解析モデルをそれぞれ設定し解析を実施している。

固有値解析結果から分かるように、柔領域において抽出されたモードは、軸方向、軸直角方向（水平）、軸直角方向（鉛直）の各1モードずつであり、いずれのモードにおいても、鏡板のシェルバネの影響でエアロックが各方向に変形するモードであることが確認できる。なお、表6の軸方向固有値算定モデルによる結果は、軸方向用に設定したモデルであるが、数値計算上、軸直角方向の結果が算出されてしまう。ここで、表6では、2次モードの軸方向の刺激係数がわずかながら出力されているが、これは、軸直角方向（鉛直）のモードに引きずられ軸方向の応答が出てしまうことで、軸方向の刺激係数が出たものと考えられる。そのため、2次モードは軸方向モードとして考える必要はなく、また、1次モードは刺激係数が0であるため、3次モードの周期0.053[s]を軸方向の主要モードの固有値とみなすことができる。

表 6 固有値解析結果
(軸方向固有値算定用モデルによる)

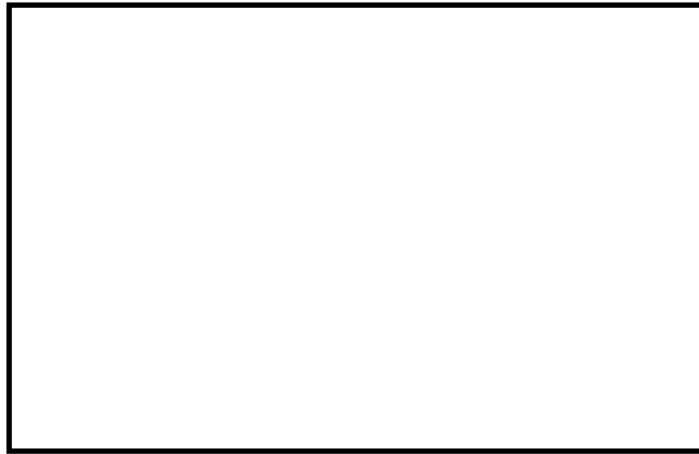
| Mode No. | 周期 [s] | 刺激係数* | | |
|----------|--------------|----------------|----------------|---------|
| | | 軸直角方向 (鉛直) : X | 軸直角方向 (水平) : Y | 軸方向 : Z |
| 1 | 0.126 | | | |
| 2 | 0.115 | | | |
| 3 | 0.053 | | | |
| 4 | 0.048 | — | — | — |

注記* : 軸方向の固有値算定を目的としたモデルによる解析結果であるため、軸方向モードのみを抽出して記載している。

表 7 固有値解析結果
(軸直角方向固有値算定用モデルによる)

| Mode No. | 周期 [s] | 刺激係数* | | |
|----------|--------------|----------------|----------------|---------|
| | | 軸直角方向 (鉛直) : X | 軸直角方向 (水平) : Y | 軸方向 : Z |
| 1 | 0.092 | | | |
| 2 | 0.084 | | | |
| 3 | 0.039 | — | — | — |

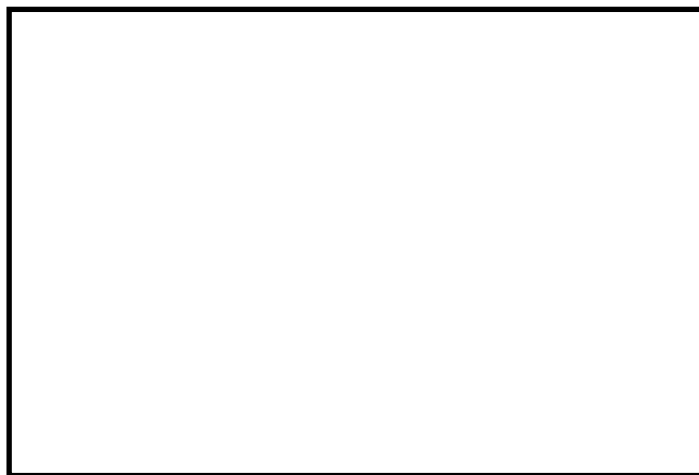
注記* : 軸直角方向の固有値算定を目的としたモデルによる解析結果であるため、軸直角方向モードのみを抽出して記載している。



(a) 軸方向 : 0.053sec



(b) 軸直角方向 (水平) : 0.092sec



(c) 軸直角方向 (鉛直) : 0.084sec

図9 モード変形図 (赤 : 変形前)

3.2 応力算出について

3.1 項に記載のとおり，固有値解析の結果，スリーブ鏡板の固有値は柔領域において各方向のモードが1つのみである。従って，エアロックを質点，スリーブ鏡板をバネとした，一質点系モデルと同様の挙動とみなすことができることから，各方向の固有周期に対応する震度を応力評価に用いるものとする。つまり，各方向の固有周期に対応する震度を，三次元シェルモデルによる有限要素法解析により求めた単位加速度に対する応力解析結果に乗じて，地震による発生応力を求める。

なお，この考え方は鋼製格納容器のハッチ類の耐震評価に従前より用いられている手法である。

3.3 震度の選定について

3.2 項に記載のとおり，地震による応力は単位加速度に対する応力解析結果に各方向の固有値に対応する震度を乗じることにより求める。このとき，適用する震度は固有周期よりも剛側における領域の最大震度とする。2.にて述べたとおり，固有値解析においては固有周期が柔側となるよう水質量を取り扱っていることから，本項記載の手法により適用される震度は保守的な震度となる。

4. まとめ

以上のように，スリーブ鏡板の耐震評価については，地震による発生応力が保守的となるよう，固有値解析及び応力解析を実施していることから，これらの評価方法は妥当である。