

7号機 原子炉冷却材再循環ポンプモーターケーシング 耐震安全性評価に関する補足説明

平成21年4月23日



委員ご質問(第18回設備小委でのご質問)

小岩委員ご質問

1. モーターケーシングの評価の筋道を説明するとともに、評価に用いた詳細なデータを示すこと。

< 回答 >

本資料にて、評価のプロセスを説明します。なお、評価に用いた詳細なデータにつきましては、製造メーカーのノウハウを含むため、本資料に記載しているデータでご確認いただきたいと思います。

委員ご質問(第18回設備小委でのご質問)

小岩委員ご質問

2. 「地震応答荷重等を用いて、FEMにより次頁に示す一次応力を、下式に示す材料力学の単純式により軸圧縮応力を算定し、許容基準値と比較する。(設備小委17-2-1 P3)」とはどのような意味か?

■ 評価の概要

(設備小委17-2-1 P3抜粋)

● 評価に用いる地震荷重条件

原子炉建屋との相互作用を考慮した原子炉本体の地震応答解析(大型機器連成地震応答解析)により算出される地震応答荷重(せん断力、モーメント、軸力)を用いる。

● 評価方法

上記の地震応答荷重等を用いて、FEMにより次頁に示す一次応力(一次一般膜応力および一次膜+曲げ応力)を、下式に示す材料力学の単純式により軸圧縮応力を算定し、許容基準値と比較する。

$$\sigma_c = \frac{V}{A} + \frac{M}{Z}$$

σ_c : 軸圧縮応力

V: 軸力

A: 断面積(くされ代は除いたもの)

M: モーメント

Z: 断面係数(くされ代は除いたもの)

< 回答 >

本資料で改めて軸圧縮応力の評価プロセスを説明しますが、上記下線部の文体を平易にすると次のとおりとなります。

- 一次応力(一次一般膜応力および一次膜+曲げ応力)については地震応答荷重等を用いて **FEM**により算出する。
- 軸圧縮応力については地震応答荷重等を用いて材料力学の**簡便な評価式**より算出する。

委員ご質問(第18回設備小委でのご質問)

鈴木委員ご質問

ASME規格の座屈に対する許容圧縮応力の評価式がもつ安全係数「2」の意味について説明すること

< 回答 >

本資料にて、B値が持つ余裕について説明します。

岡崎委員ご質問

溶接部分の材料物性の違いを解析にどのように反映しているのか？

< 回答 >

溶接金属に該当するFEMメッシュには、溶接金属の物性を定義しており、材料の不連続を考慮した解析となっております。（本資料で、溶接部を図示しております。）

阿部委員ご質問

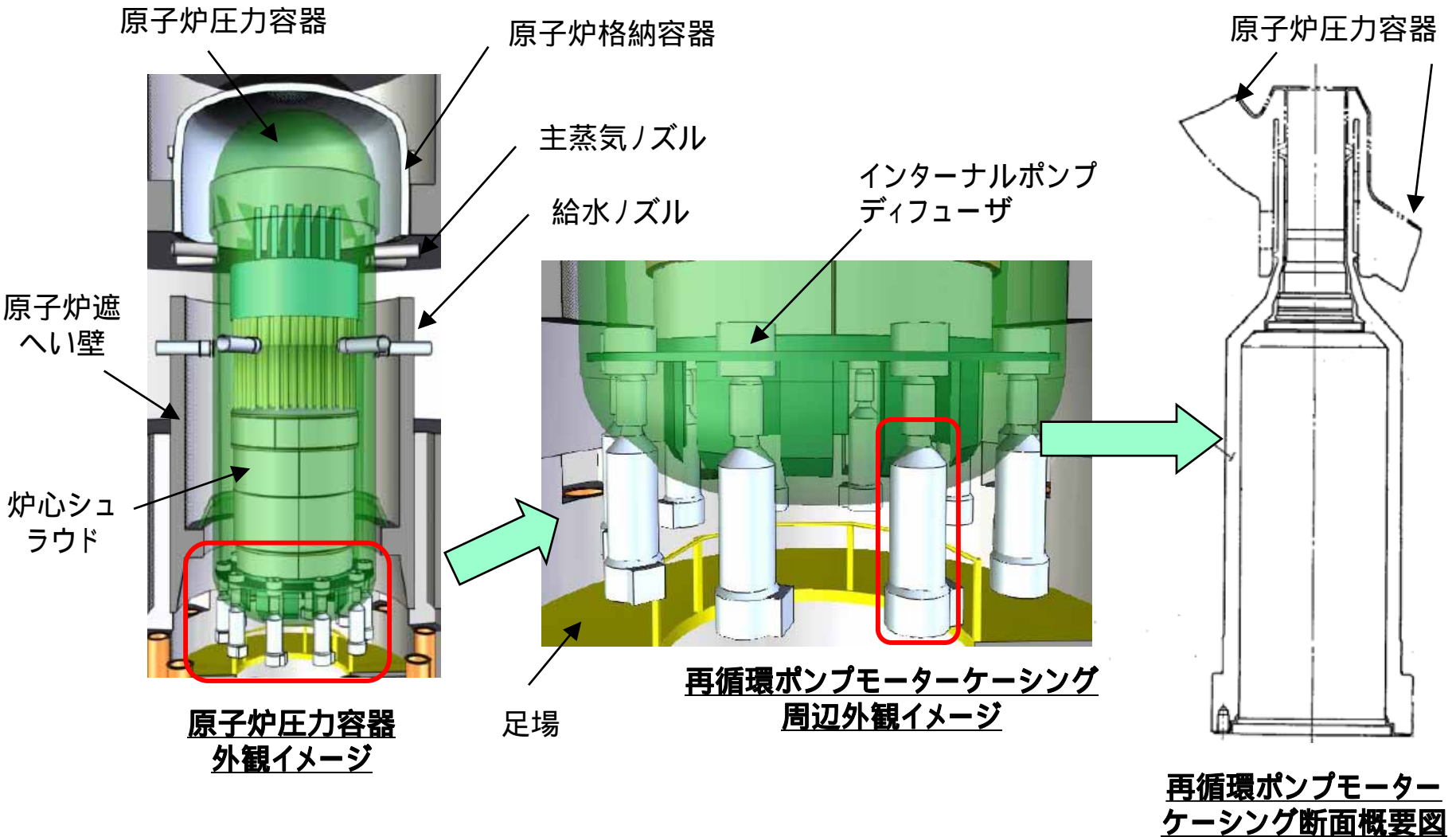
原子炉再循環ポンプの地震時に想定するモードについて説明すること。

< 回答 >

原子炉再循環ポンプの地震応答解析モデルのモード図を本資料に掲載しました。

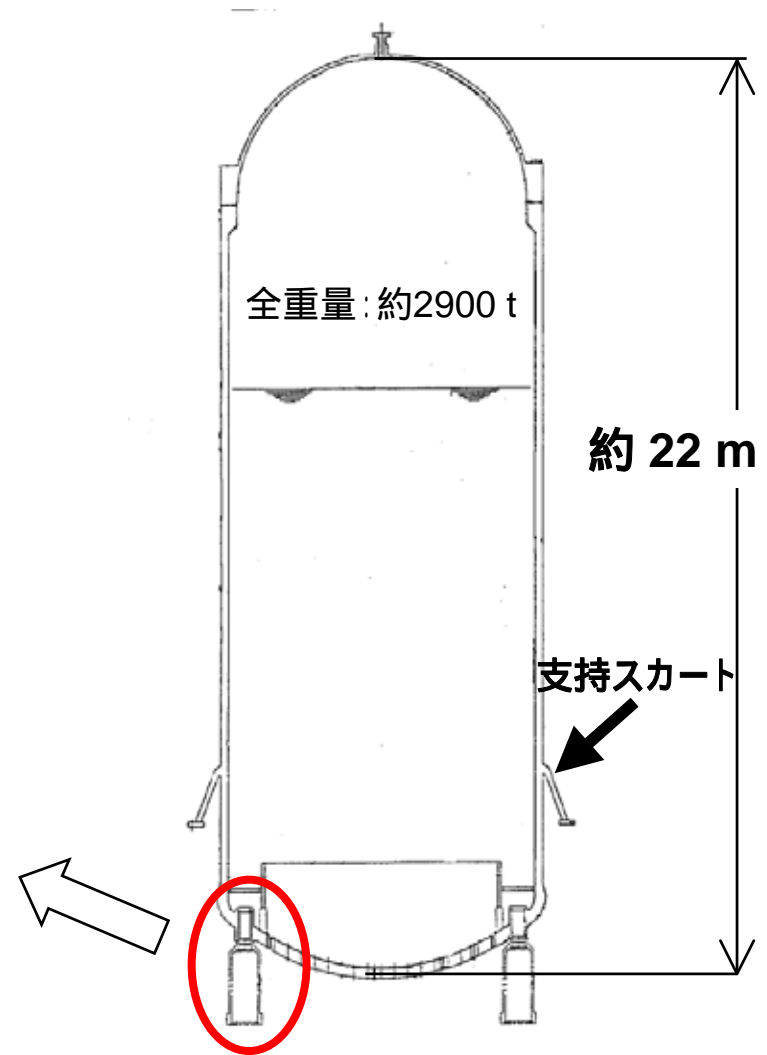
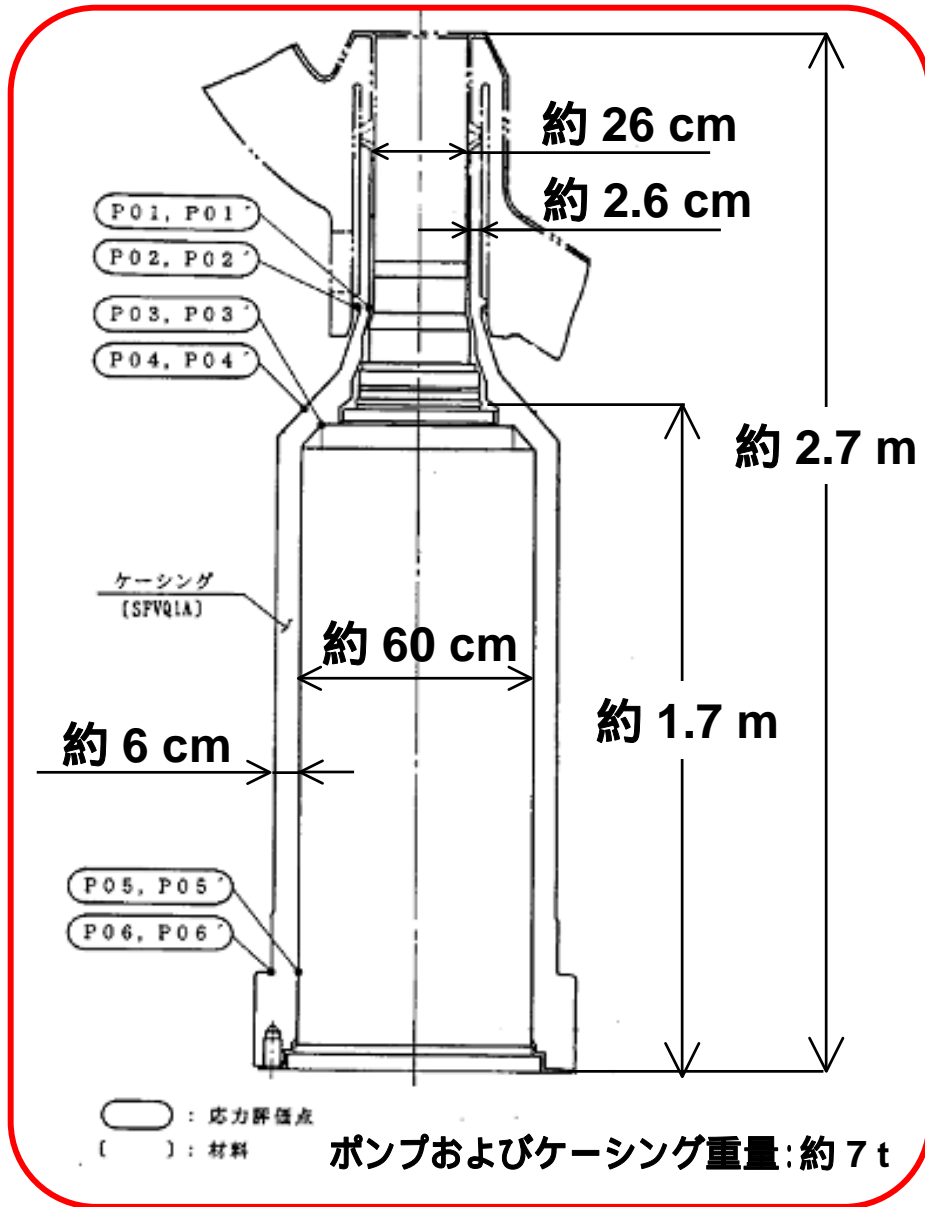
原子炉冷却材再循環ポンプの評価に関する補足説明

原子炉冷却材再循環ポンプモーターケーシングのイメージ図



注) 内部構造物が分かるように原子炉圧力容器を半透明としている。

原子炉冷却材再循環ポンプモータケーシングの構造



原子炉圧力容器外形図

原子炉冷却材再循環ポンプモーターケーシングの評価手順

■ステップ1

地震応答荷重を算定する。

- 再循環ポンプは、原子炉本体等とともに多質点でモデル化(俗に、串だんごモデルという)し、原子炉建屋と連成させたモデルで[1次元地震応答解析](#)を行う。
- 地震応答解析により、当該ポンプ部を模擬した「串だんご」に発生する地震応答荷重(モーメント、せん断力、軸力)を抽出する。

■ステップ2

応力を算出する。

- ステップ1で求めた、当該ポンプ部の地震応答荷重から、ケーシングに発生する応力を算出する。(ここでは、軸圧縮応力について取り上げる)

■ステップ3

算出応力と評価基準値を比較する。

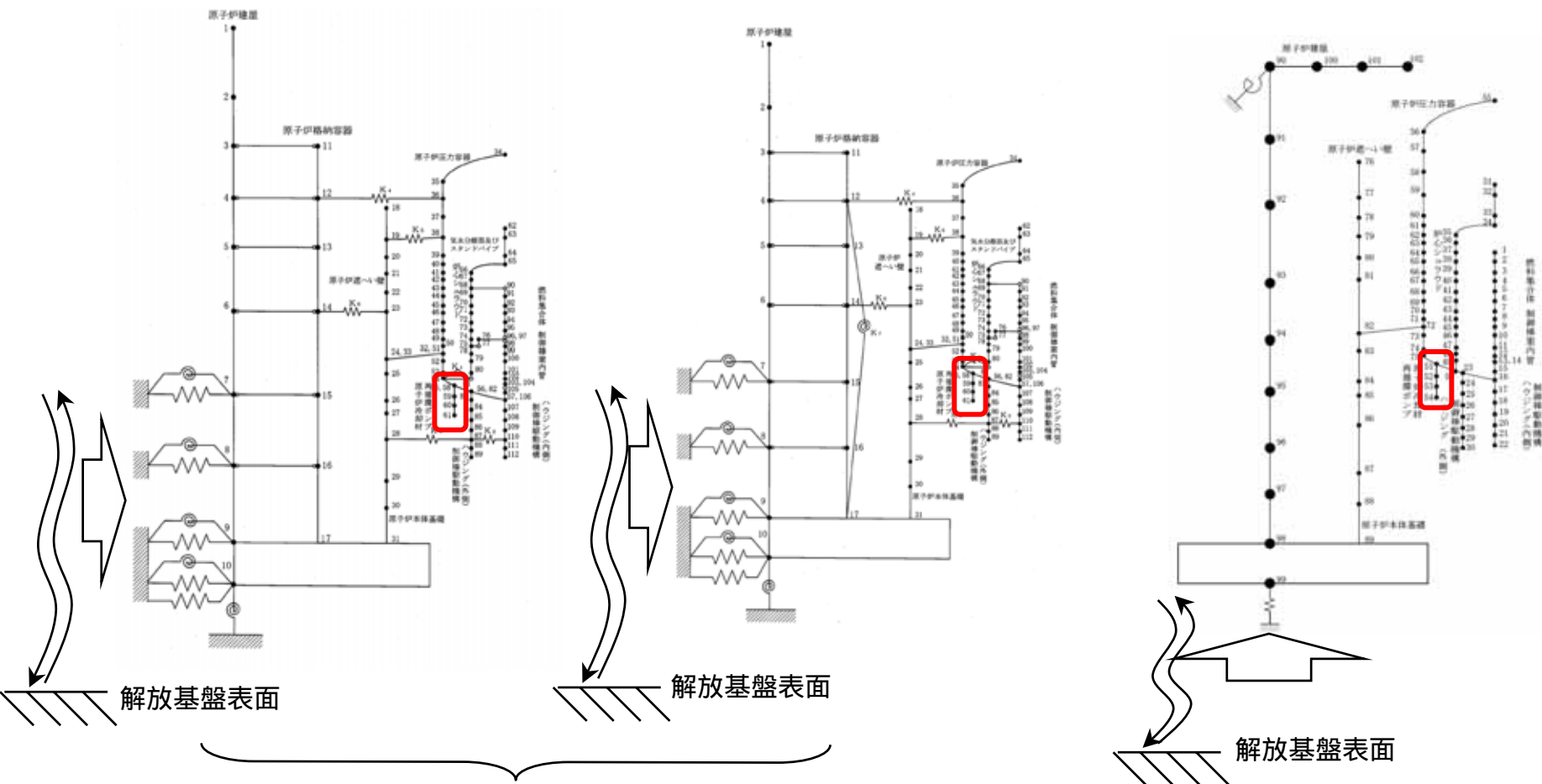
- 当該ケーシングは原子炉圧力容器附属構造物なので、原子炉圧力容器に適用される基準と同じ基準を適用して、評価基準値を算定する。

ステップ1 地震応答荷重の算定(1)

< 南北方向 >

< 東西方向 >

< 鉛直方向 >

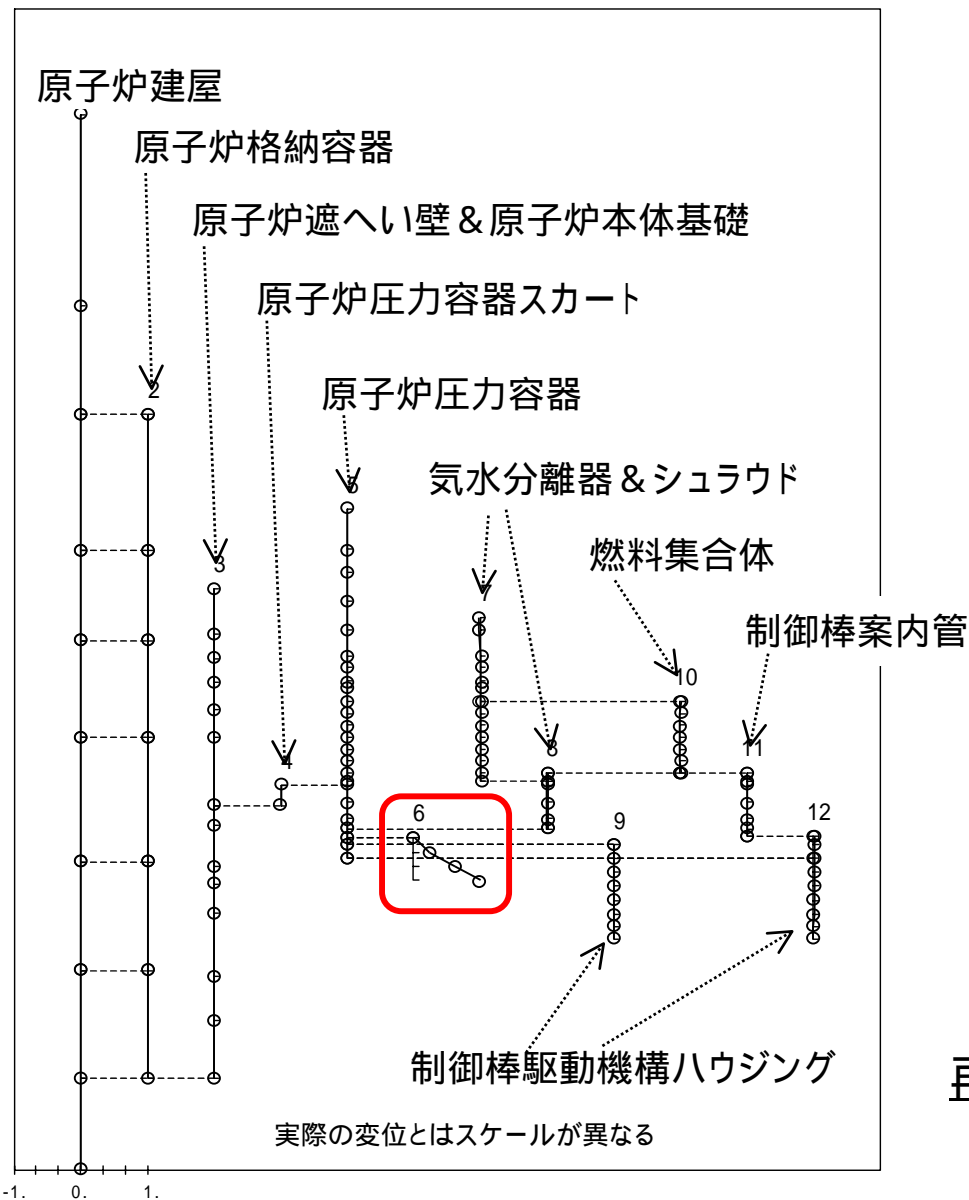


時刻歴応答解析によりモーメント(M)・せん断力を算出

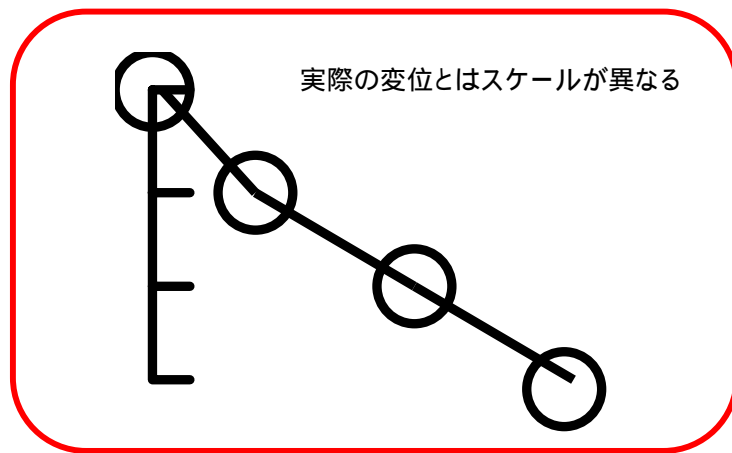
時刻歴応答解析により軸力(V)を算出

 : 原子炉冷却材再循環ポンプ部を示す

(参考) 原子炉冷却材再循環ポンプの振動モード

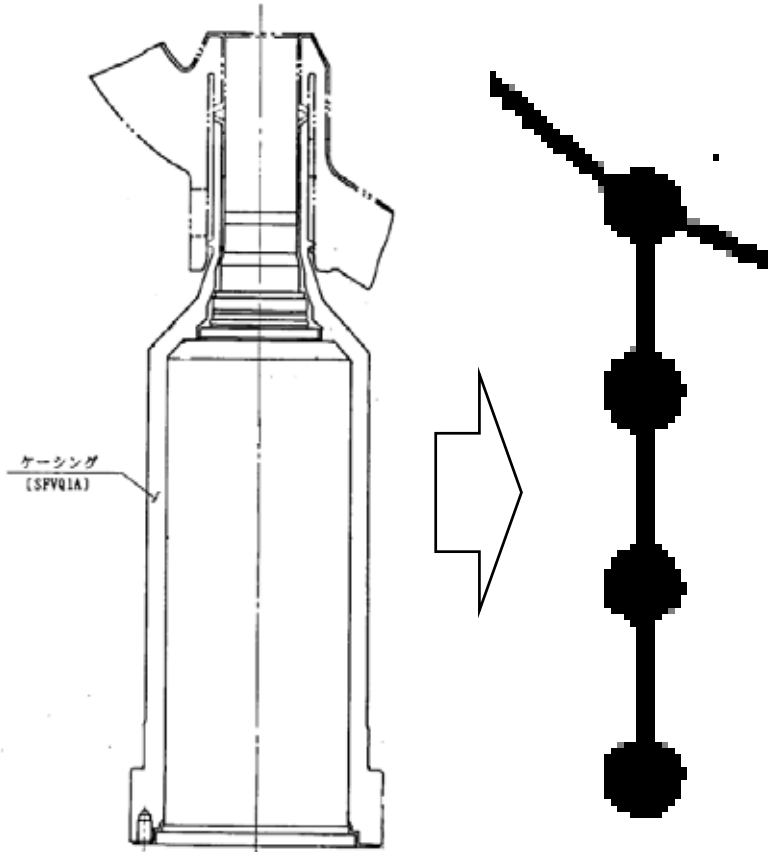


- 左図は、原子炉内部構造物地震応答解析モデルのうち、Ss-2のEW方向に対するモデルを示している。
- 左図は、モデル全体の5次モード(再循環ポンプの1次モード)を示している。
- 左図の振動モードの固有周期は、0.103秒である。



再循環ポンプ部の拡大図(左図の赤枠)

ステップ1 地震応答荷重の算定(2)



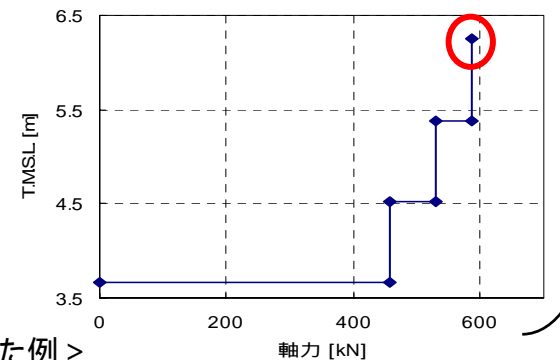
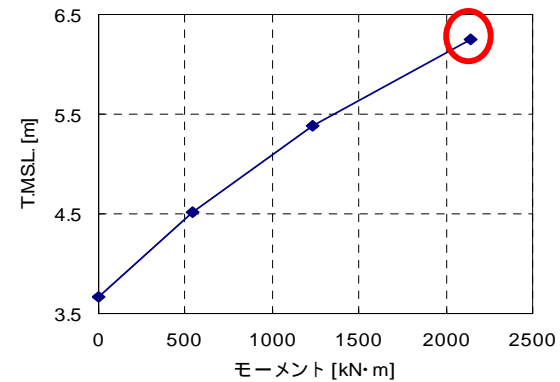
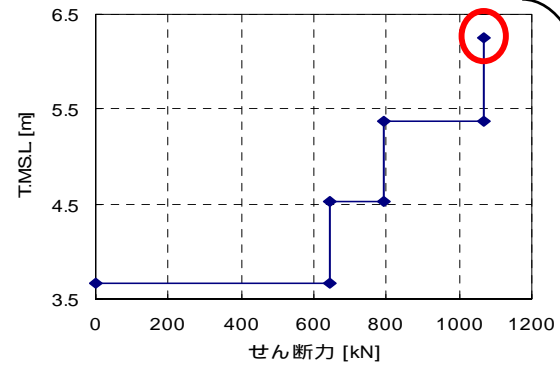
原子炉冷却材再循環ポンプの地震応答解析モデル拡大図

- 当該ポンプは4質点でモデル化されている。
- この「串だんご」に減衰定数を設定する。

せん断力

モーメント

軸力



地震応答解析から得られるポンプの地震応答荷重

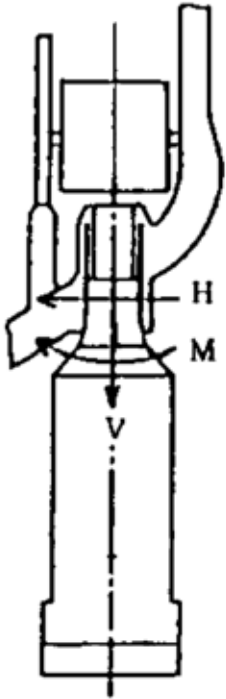
解析で得られる時刻歴応答荷重のうち最大値をプロット

赤丸部の値を参照する

< 右図の解析結果のプロットはSsを入力とし水平方向の減衰定数を3%とした例 >

ステップ1 地震応答荷重の算定(3)

■耐震評価用地震荷重条件のまとめ



	軸力 V_{ss} (kN)	水平力 H_{ss} (kN)	モーメント M_{ss} (kN・m)
設計時 地震荷重	± 22.6	± 82.4	± 180
基準地震動 S_s	± 88.6 ¹	± 107 ²	± 214 ²

備考:基準地震動 S_s の評価用地震応答荷重の値は、当該ポンプの水平方向減衰定数を3%に設定した時の値

1 軸力 V は次の値としている。

$$V_{ss} = \text{MAX}(V, m)$$

ここで、 V :地震応答解析から得られた軸力を1台あたりに換算したもの

m :再循環ポンプの自重

:地震応答解析から得られた加速度

2 地震応答解析から得られた値を1台あたりに換算したもの

ステップ2 応力の算出

■ 軸圧縮応力 σ_c の算出式

$$\sigma_c = \frac{V}{A} + \frac{M}{Z}$$

σ_c : 軸圧縮応力
V: 軸力
A: 断面積(くされ代は除いたもの)
M: モーメント
Z: 断面係数(くされ代は除いたもの)

ここで、VおよびMは、先に示した地震による荷重(V_{ss} , M_{ss})に加えて、地震以外の荷重を含んでいる。

$$= 22 + 161$$

$$= 183 \text{ [MPa]}$$

これは当該ポンプの水平方向減衰定数を3%としたときの、基準地震動 S_s に対する発生値

地震以外の荷重, AおよびZは製造メーカーのノウハウを含むため開示できない。

ステップ3 許容基準値との比較

■軸圧縮応力の評価に用いる設計基準

発電用原子力設備規格 設計・建設規格のクラス1容器準用

< 評価基準 >

- 軸圧縮応力 σ_c が、下記の条件を満たしていること。

$$\sigma_c = 1.5 \times \text{MIN}(S_m, B) = 1.5 \times \text{MIN}(184, 138) = 207 \text{ [MPa]}$$

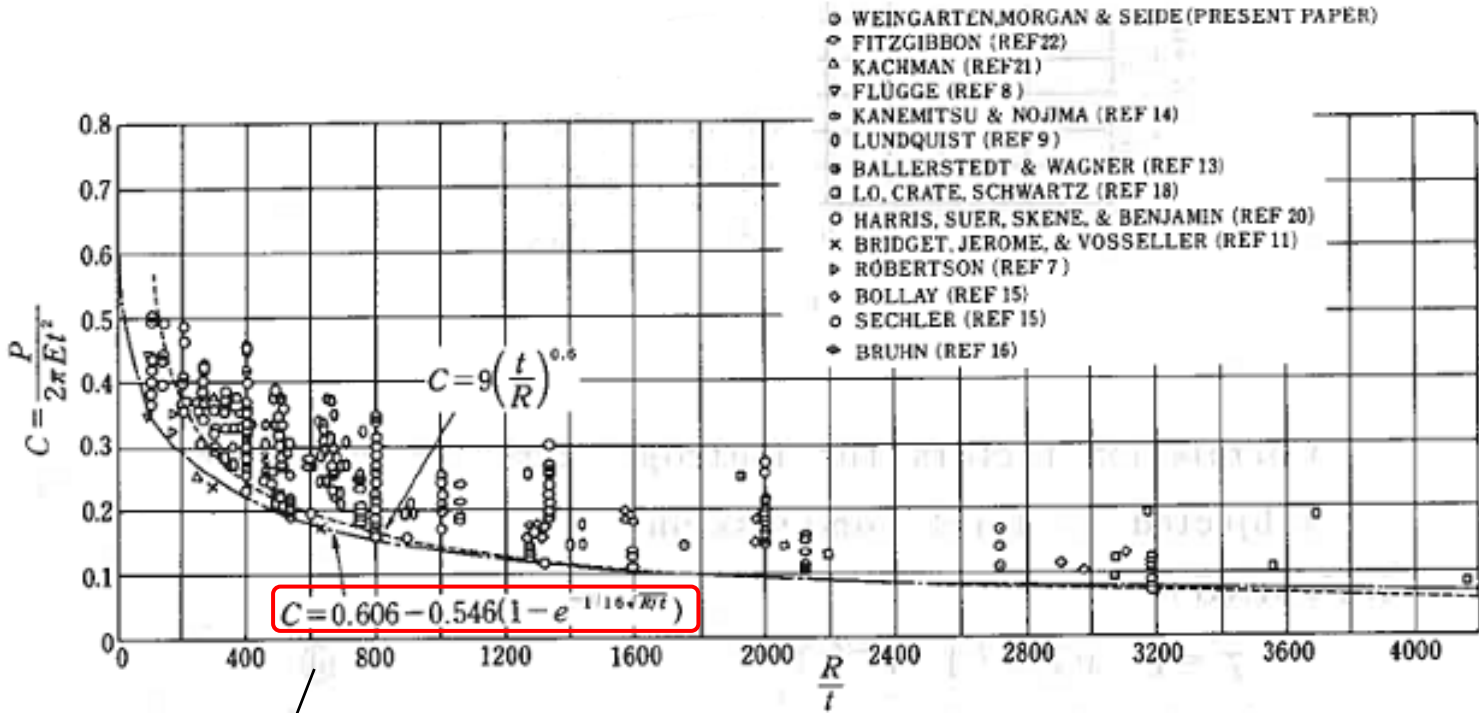
$$\sigma_c = 183 \text{ [MPa]} < 207 \text{ [MPa]}$$

S_m : 設計応力強さ

B: 外圧チャートによる値

上記は当該ポンプの水平方向減衰定数を3%としたときの、基準地震動 S_s に対する発生値

(参考) B値に関する補足



円筒の軸圧縮の実験データと理論式の比較 (JEAG4601・補-1984 174頁の抜粋)

$$\sigma_{cr} = \left\{ 0.606 - 0.546 \left(1 - e^{-\frac{1}{16}\sqrt{\frac{R}{t}}} \right) \right\} \times \frac{Et}{R}$$

理論値

RIPモータケーシングの場合、赤枠部の値は約0.54

安全率2は合理的かつ保守的なものといえる

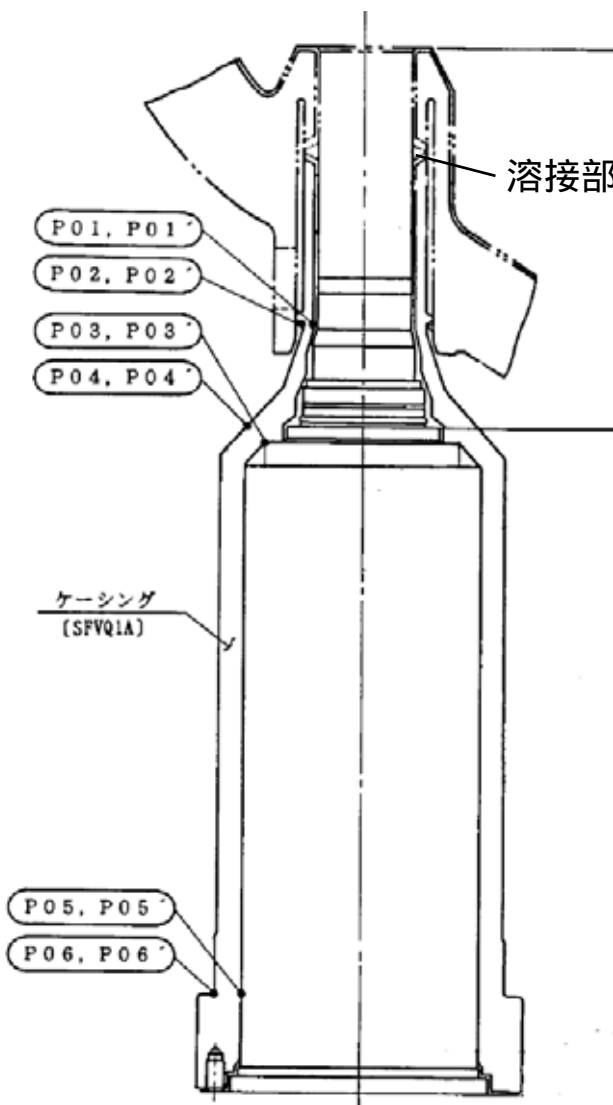
$$\sigma_{cr-allow} = 0.125 \times \frac{Et}{R}$$

理論値から余裕を
持たせた限界座
屈応力

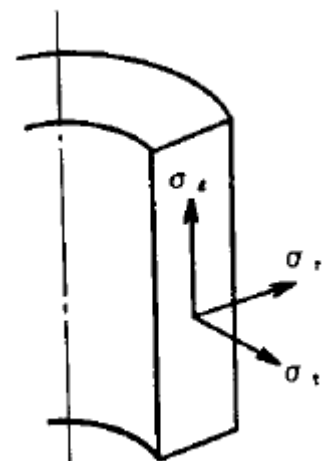
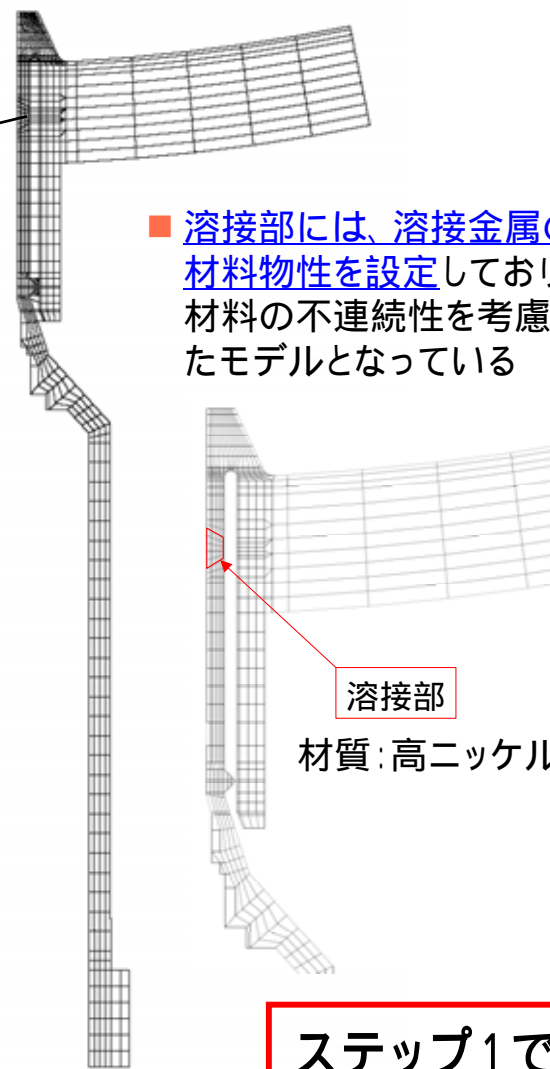
$$B = 0.125 \times \frac{Et}{R} \div 2$$

安全率2を考慮

(参考) 一次応力の算出 (1)



■ 溶接部には、溶接金属の材料物性を設定しており、材料の不連続性を考慮したモデルとなっている



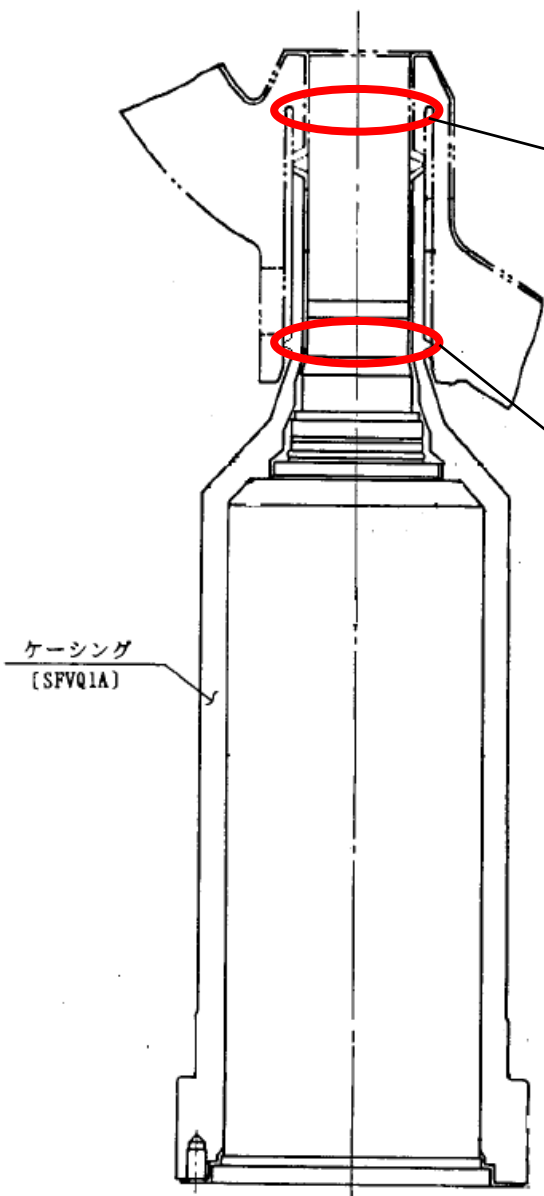
σ_t : 周方向応力
 σ_z : 軸方向応力
 σ_r : 半径方向応力
 τ_{rz} : せん断応力
 τ_{zr} : せん断応力

ステップ1で求めた地震荷重等を用いてFEMにより一次応力強さを評価

○ : 応力評価点
 () : 材料 < 応力評価点 >

< FEMモデルメッシュ図 >

(参考) 一次応力の算出 (2)



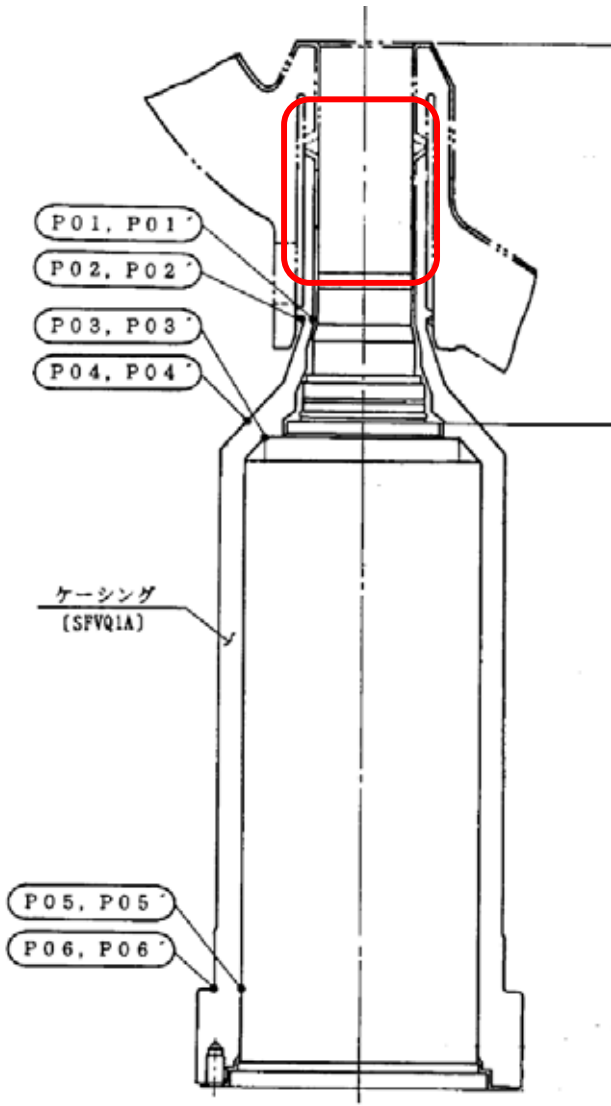
評価項目	発生値	許容基準値
膜 + 曲げ	296MPa	442MPa

(原子炉圧力容器 再循環ポンプ貫通孔の評価として報告書に記載)

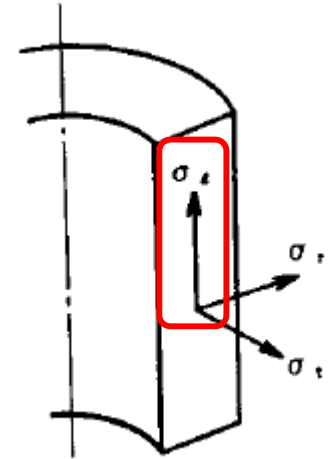
評価項目	発生値	許容基準値
膜 + 曲げ	204MPa	442MPa

原子炉冷却材再循環ポンプモータケーシングは軸圧縮応力だけでなく、一次応力も許容基準値以内であることを確認している。

(参考) FEMを適用した軸圧縮応力の算出方法



- 一次応力を算出したときのFEM解析結果から、赤枠部の σ_z を抽出した値を、FEMによる軸圧縮応力とした。
- 設計と耐震安全性評価では、簡便な評価式により軸圧縮応力を計算している。
- FEMを適用した軸圧縮応力の計算結果は、簡便な手法の保守性を示すための参考値である。



- σ_θ : 周方向応力
- σ_z : 軸方向応力
- σ_r : 半径方向応力
- τ_{rz} : せん断応力
- τ_{zr} : せん断応力

○ : 応力評価点
 () : 材料 < 応力評価点 >

< FEMモデルメッシュ図 >