

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-40_改4
提出年月日	2021年9月28日

補足-600-40-40 耐震評価における流体中の構造物に対する
付加質量及び応答低減効果の考慮

目 次

1. 概要.....	1
2. 既工認及び今回工認における流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の有無	1
3. 既工認及び今回工認での流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の違い...	10
4. 流体の付加質量及び応答低減効果の考慮方法.....	11
4.1 付加質量.....	11
4.2 二重円筒モデルの付加質量及び排除水体积質量.....	13
4.3 構造物に加わる力.....	14
4.4 付加質量及び排除水体积質量についての既工認と今回工認の比較.....	17
4.5 時刻歴応答解析とスペクトルモーダル解析における応答低減効果の現れ方.....	17
5. 炉心シュラウド支持ロッドに対する流体の付加質量及び排除水体积質量の設定の詳細.....	19
5.1 二重円筒モデルの炉心シュラウド支持ロッドへの適用.....	19
5.2 炉心シュラウド支持ロッドの付加質量及び排除水体积質量.....	19
6. 参考文献.....	24

1. 概要

流体中の構造物の耐震評価における付加質量及び応答低減効果について、既工認及び今回工認における考慮の有無及びその手法を整理した。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・「VI-2 耐震性に関する説明書」（対象となる計算書の詳細は表 1 参照）

2. 既工認及び今回工認における流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の有無

流体中の構造物の耐震評価における付加質量及び応答低減効果について、既工認及び今回工認における考慮の有無を表 1 に示す。なお、付加質量及び排除水体積質量の定義並びに考慮方法は、以下のとおりである。

[定義]

(付加質量)

構造物が流体中で振動する場合において、あたかも質量が増加したような挙動（付加質量効果）を示すことから、この流体による付加質量効果を耐震評価に考慮するために機器の形状により定める仮想質量のこと

(排除水体積質量)

構造物が流体中にある場合に、自身の体積によって排除する水の質量のこと

(応答（入力）低減効果)

構造物－流体の相互作用から地震による振動を低減する効果であり、耐震評価において排除水体積質量を考慮することによって得られる効果のこと

[考慮方法]

各設備の形状を踏まえ理論式で求めた付加質量及び排除水体積質量を考慮して解析モデルを作成し、解析コードにより固有値解析、地震応答解析等を行う

表1 既工認及び今回工認における流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の有無について (1/5)

図書番号	図書名	既工認		今回工認		既工認と今回工認の相違点 ^{*2}	備考
		付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}	付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}		
VI-2-3-2	炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書	○	○	○	○	×	建屋－大型機器連成解析モデルにおいて付加質量，排除水体积質量を考慮。付加質量と応答低減を考慮している範囲は原子炉圧力容器内の以下の設備（位置関係の確認のため図1に炉内構造物系連成モデル（NS方向）を示す）。 <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉圧力容器～スタンドパイプ ・原子炉圧力容器～炉心シュラウド～燃料集合体 ・原子炉圧力容器～炉心シュラウド ・原子炉圧力容器～炉心シュラウド～制御棒案内管 ・原子炉圧力容器～制御棒案内管
VI-2-3-3-2-4	炉心シュラウド支持ロッドの耐震性についての計算書	×	○	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため，今回工認において，付加質量と排除水体积質量を考慮。
VI-2-3-4-3-5	ジェットポンプの耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-3-4-3-6	給水スパージャの耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-3-4-3-7	高圧及び低圧炉心スプレイスパージャの耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-3-4-3-8	残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-3-4-3-9	高圧及び低圧炉心スプレイ系配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	

表1 既工認及び今回工認における流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の有無について (2/5)

図書番号	図書名	既工認		今回工認		既工認と今回工認の相違点 ^{*2}	備考
		付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}	付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}		
VI-2-3-4-3-10	差圧検出・ほう酸水注入系配管（原子炉压力容器内部）の耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-3-4-3-11	中性子束計測案内管の耐震性についての計算書	○	×	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため、今回工認において、排除水体積質量を考慮。
VI-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラック（第1, 2号機共用）の耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-4-2-3	制御棒・破損燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-4-2-4	使用済燃料プール水位／温度（ガイドパルス式）の耐震性についての計算書	—	—	○	×	○	今回工認での新規申請対象機器。
VI-2-4-2-5	使用済燃料プール水位／温度（ヒートサーモ式）の耐震性についての計算書	—	—	○	×	○	今回工認での新規申請対象機器。
VI-2-5-4-1-2	残留熱除去系ポンプの耐震性についての計算書	○	×	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため、今回工認において、排除水体積質量を考慮。バレルピット形ポンプのため、バレル内で水と接液している以下の範囲で付加質量と応答低減を考慮（位置関係の確認のため図2に解析モデルを示す）。 ・シャフト～コラムパイプ ・コラムパイプ～バレル
VI-2-5-4-1-3	残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-5-4-1-5	ストレーナ部ティーの耐震計算書（残留熱除去系）	○	×	○	×	×	

表1 既工認及び今回工認における流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の有無について (3/5)

図書番号	図書名	既工認		今回工認		既工認と今回工認の相違点 ^{*2}	備考
		付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}	付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}		
VI-2-5-5-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	○	×	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため、今回工認において、排除水体積質量を考慮。付加質量と応答低減の考慮範囲は残留熱除去系ポンプと同じ。
VI-2-5-5-1-2	高圧炉心スプレイ系ストレーナの耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-5-5-1-4	ストレーナ部ティーの耐震計算書(高圧炉心スプレイ系)	○	×	○	×	×	
VI-2-5-5-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	○	×	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため、今回工認において、排除水体積質量を考慮。付加質量と応答低減の考慮範囲は残留熱除去系ポンプと同じ。
VI-2-5-5-2-2	低圧炉心スプレイ系ストレーナの耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	
VI-2-5-5-2-4	ストレーナ部ティーの耐震計算書(低圧炉心スプレイ系)	○	×	○	×	×	
VI-2-5-7-1-3	原子炉補機冷却海水ポンプの耐震性についての計算書	○	×	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため、今回工認において、排除水体積質量を考慮。立形斜流ポンプのため、コラムパイプ内で海水と接液している範囲及びコラムパイプとピット間で接液している以下の範囲で付加質量と応答低減を考慮(位置関係の確認のため図3に解析モデルを示す)。 ・シャフト～コラムパイプ ・コラムパイプ～海水ピット

表1 既工認及び今回工認における流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の有無について (4/5)

図書番号	図書名	既工認		今回工認		既工認と今回工認の相違点 ^{*2}	備考
		付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}	付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}		
VI-2-5-7-2-3	高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプの耐震性についての計算書	○	×	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため、今回工認において、排除水体積質量を考慮。付加質量と応答低減の考慮範囲は原子炉補機冷却海水ポンプと同じ。
VI-2-6-5-1-1	起動領域モニタの耐震性についての計算書	○	×	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため、今回工認において、排除水体積質量を考慮。
VI-2-6-5-1-2	出力領域モニタの耐震性についての計算書	○	×	○	○	○	地震時の挙動を精緻に評価するため、今回工認において、排除水体積質量を考慮。
VI-2-9-4-1	ダウンカマの耐震性についての計算書	○	×	○	×	×	DB及びSAのそれぞれの状態で水位が異なるので、それぞれの水位条件を踏まえてダウンカマへ付加質量を考慮。 ○DB:ダウンカマに対して通常運転水位における没水範囲に付加質量を考慮 ○SA:ダウンカマ及びベント管に対して真空破壊装置下端水位における没水範囲に付加質量を考慮
VI-2-9-4-2	ベント管の耐震性についての計算書			○	×		
VI-2-10-2-13-2	取水ピット水位計の耐震性についての計算書	—	—	○	×	○	今回工認での新規申請対象機器。

表 1 既工認及び今回工認における流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の有無について (5/5)

図書番号	図書名	既工認		今回工認		既工認と今回工認の相違点 ^{*2}	備考
		付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}	付加質量 ^{*1}	応答低減 ^{*1}		
VI-2-11-2-13	制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算書	— ^{*3}	— ^{*3}	○	×	○	今回工認において、付加質量を考慮。
VI-2-11-2-14	燃料チャンネル着脱機の耐震性についての計算書	— ^{*3}	— ^{*3}	○	×	○	今回工認において、付加質量を考慮。
VI-2-13-6	地下水位低下設備揚水ポンプの耐震性についての計算書	—	—	×	×	○	今回工認での新規申請対象機器。

注記^{*}1：付加質量，応答低減を考慮している場合は○，考慮していない場合は×とする。

^{*}2：既工認と今回工認で相違がある場合は○，相違がない場合は×とする。

^{*}3：既工認では波及的影響対象としての耐震評価を実施していない。

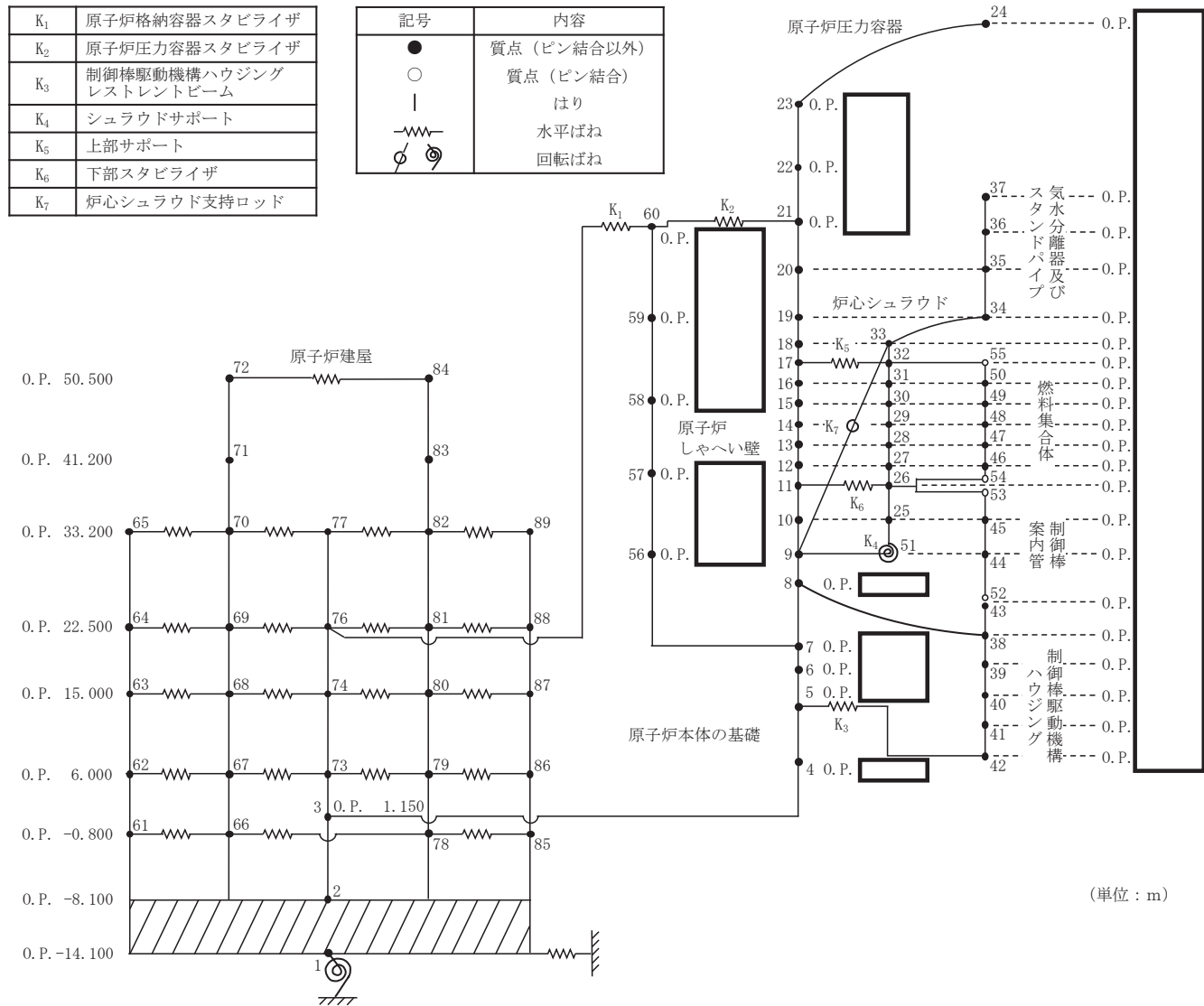
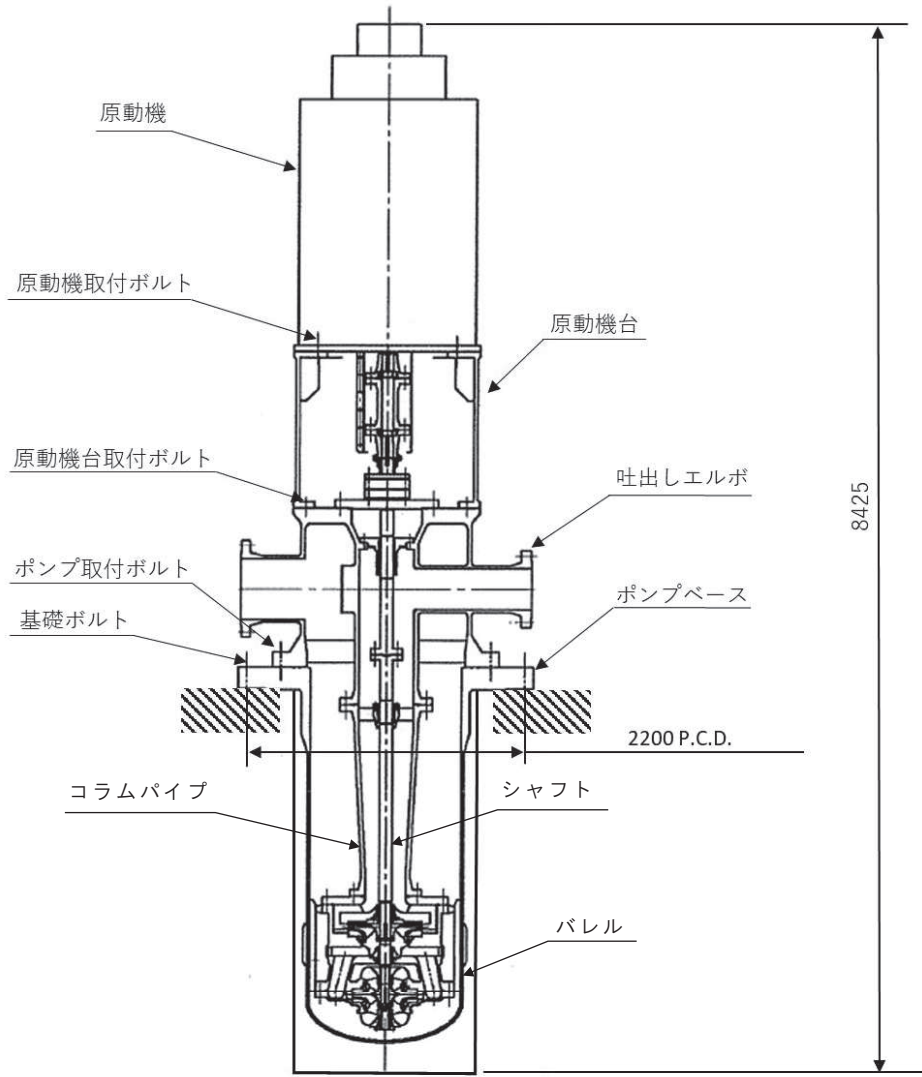


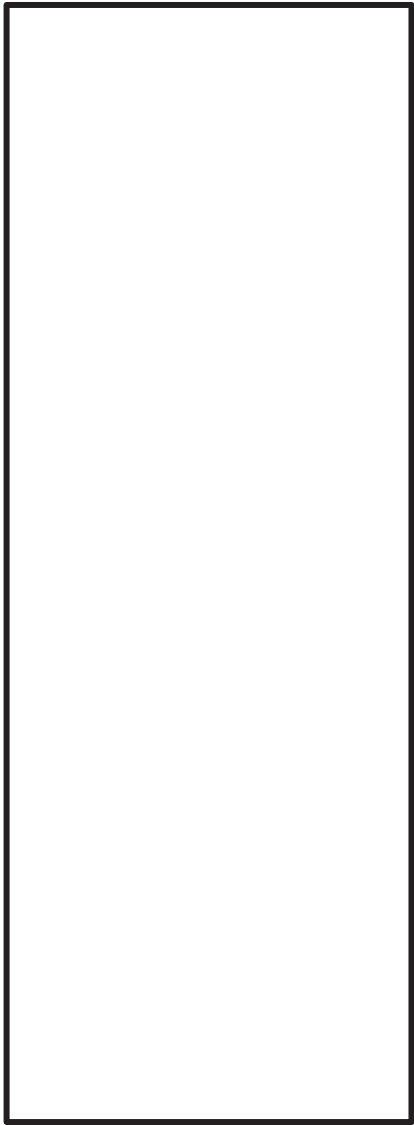
図1 炉内構造物系地震応答解析モデル図 (NS方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



8425

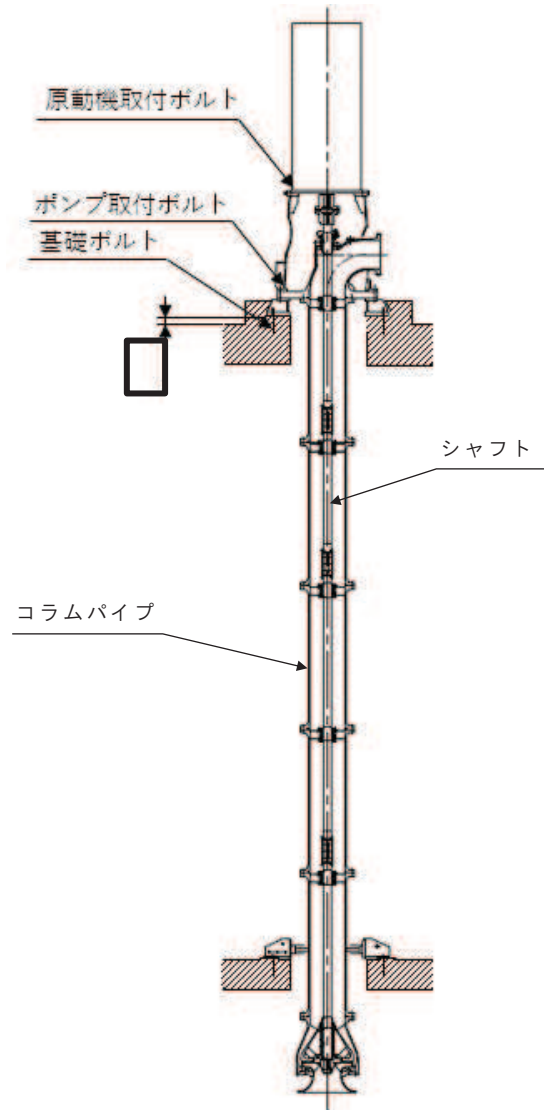
構造概要図



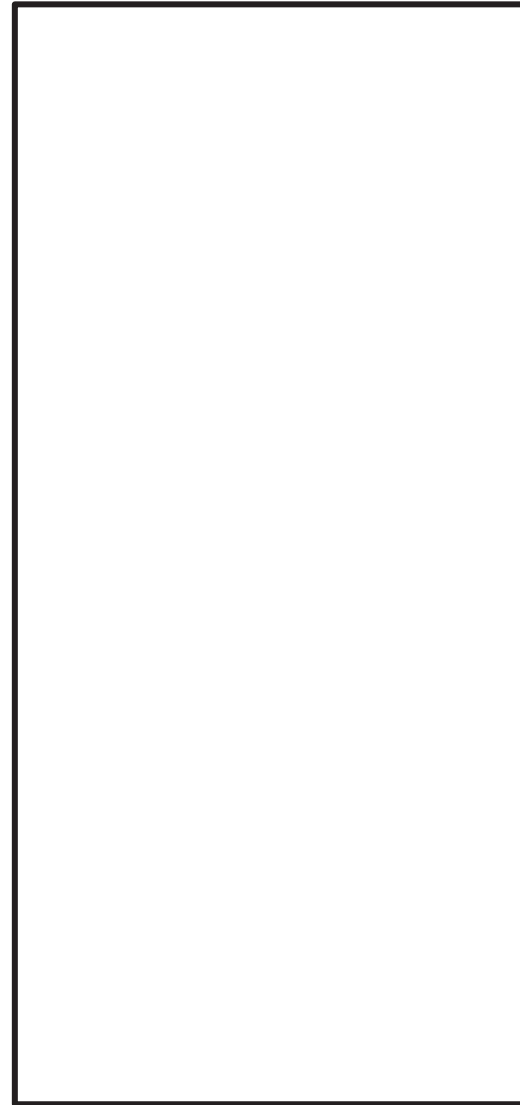
今回工認の解析モデル

図 2 残留熱除去系ポンプの解析モデル図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



構造概要図



今回工認の解析モデル

図3 原子炉補機冷却海水ポンプのモデル図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3. 既工認及び今回工認での流体の付加質量及び応答低減効果の考慮の違い

表 1 に整理した結果から、既工認と今回工認で考慮方法に相違がある設備について、今回工認における考え方を以下に示す。

○ 炉心シュラウド支持ロッド

炉心シュラウド支持ロッドについては、既工認において付加質量及び応答低減効果いずれも考慮せず気中を想定した評価を実施していた。

今回工認では、炉内設備であることを踏まえ、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1987）に示されている燃料集合体と同じ考え方（表 1 の VI-2-3-2 に示すとおり既工認より考慮済）を適用し、炉心シュラウド支持ロッドを無限水中の円柱構造物とみなして算出した付加質量及び応答低減効果を考慮して評価を実施している。

なお、既工認においては耐震評価に十分な余裕を有していたことから、付加質量を考慮せず簡便に気中を想定した耐震評価を実施していたものである。

○ 中性子束計測案内管，炉内計測装置（起動領域モニタ，出力領域モニタ）

中性子束計測案内管および炉内計測装置（起動領域モニタ，出力領域モニタ）については、既工認において付加質量は考慮していたが、応答低減効果は考慮していなかった。今回工認では、炉内設備であることを踏まえ、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1987）に示されている燃料集合体と同じ考え方（表 1 の VI-2-3-2 に示すとおり既工認より考慮済）を適用し、中性子束計測案内管等を無限水中の円柱構造物とみなして算出した付加質量及び応答低減効果を考慮して評価を実施している。

○ たて軸ポンプ（残留熱除去系ポンプ，高圧炉心スプレイ系ポンプ，低圧炉心スプレイ系ポンプ，原子炉補機冷却海水ポンプ，高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ）

たて軸ポンプ（残留熱除去系ポンプ，高圧炉心スプレイ系ポンプ，低圧炉心スプレイ系ポンプ，原子炉補機冷却海水ポンプ，高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ）については、既工認において付加質量は考慮していたが、応答低減効果は考慮していなかった。今回工認では、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版）に示されている二重円筒構造の考え方を適用し、応答低減効果を考慮した評価を実施している。

○ 新規評価設備

表 1 に示す今回工認で新たに耐震評価を実施する設備は、地下水水位低下設備揚水ポンプを除いて付加質量のみを考慮している。

地下水水位低下設備揚水ポンプについては、十分な余裕を考慮して耐震設計を実施し

ていることから簡便に気中を想定した耐震評価を実施しているものである。なお、付加質量を考慮した場合の影響については「補足-600-25-2 地下水位低下設備の耐震性に係る補足説明資料」に詳細を示しているが、付加質量を考慮した場合でも固有周期に及ぼす影響は小さく剛構造であることを確認している。

4. 流体の付加質量及び応答低減効果の考慮方法

4.1 付加質量

構造物が流体中で振動する場合、流体－構造物間の相互作用により流体中の構造物は、複雑な振動特性を示し、気中で振動する場合に比べて固有振動数及び応答が低下することが知られている。一般に、このような現象を評価するためには、付加質量の概念が用いられており、流体中にある物体が加速度を受けて運動する場合、構造物は流体を押し退けて進むことになり、流体を排除するのに必要な力 F_w が作用する。

F_w は、加速度 α に比例し、

$$F_w = m_v \cdot \alpha \quad (4.1)$$

m_v : 構造物の形状等によって決定される質量（付加質量）で表される。

また、周囲に流体が存在しないとした場合に、質量 M の物体に加速度 α を与えるために必要な力 F_s は、

$$F_s = M \cdot \alpha \quad (4.2)$$



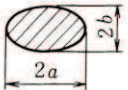

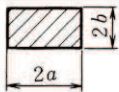

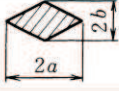



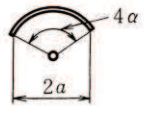


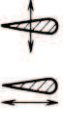
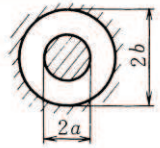

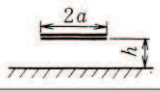

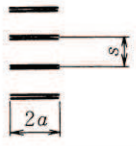

で表される。

したがって流体中の場合、同一の加速度を与えるために必要な力 F は、上述の力の和として下記にて表せる。

$$F = F_s + F_w = (M + m_v) \cdot \alpha \quad (4.3)$$

(4.3) 式は、同一の加速度を与えるために流体中においては、あたかも質量が m_v だけ増加したような傾向を示すことを意味しており、 m_v を付加質量と呼び機械工学便覧⁽¹⁾で構造物の形状ごとにこの付加質量を算出する方法がまとめられている（各断面の場合の抜粋を以下に示す。）。

表 13・2 柱状物体の単位長さ当たりの付加質量
(ρ は流体の密度)

断面形状	付加質量
円 	$\pi\rho a^2$ 
だ円 	$\pi\rho a^2$ $\pi\rho b^2$ 
長方形 	$\pi K_1 \rho a^2$ 
ひし形 	$\pi K_2 \rho a^2$ 
平板 	$\pi\rho a^2$ 
円弧翼 	$\frac{\pi\rho a^2}{2} \left(1 + \frac{1}{\cos^2 \alpha}\right)$ $\frac{\pi\rho a^2}{2} \tan^2 \alpha$ 
ジェーコフスキー対称翼 	$\frac{\pi\rho a^2}{4} \left(4 + \frac{k-2}{k+1}\right)$ $\frac{\pi\rho a^2}{4} (k-2)(k+1)$ 
同心固定同筒内の円 	$\pi\rho a^2 \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2}\right)$ 
固定壁近くの平板 	$\pi\rho a^2 K_3$ 
平板列 	$\frac{2\rho s^2}{\pi} \log \left\{ \cosh \left(\frac{\pi a}{s} \right) \right\}$ 

備考

b/a	0	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
K_1	1.00	1.14	1.21	1.36	1.51	1.70	1.98	2.23

b/a	0.5	1	2	5
K_2	0.85	0.76	0.67	0.61

$h/2a$	∞	2.5	0.5
K_3	1.00	1.03	1.165

※機械工学便覧 柱状物体の単位長さ当たりの付加質量 (抜粋)

4.2 二重円筒モデルの付加質量及び排除水体積質量

耐震設計においては、前述のように付加質量を求めて計算しているが、その考え方は機械工学便覧⁽¹⁾においては、二重円筒の流体連成振動のモデルとして説明されている。二重円筒モデルを図4に示す。ここで、二重円筒の間に流体が存在する系の振動は、(4.4)式にて表すことができ、付加質量の定義式から内筒の排除水体積質量については、(4.10)式にて表すことができる。

なお、 M_{11} 、 M_{12} 、 M_{22} はFritzの論文⁽²⁾に基づき算出される。

$$\left(\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.4)$$

ここに

M_1 、 M_2 : 内筒及び外筒の質量

$$M_{11} = \pi a^2 L \rho \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \right) : \text{内筒の自己付加質量} \quad (4.5)$$

$$M_{12} = M_{21} = -2\pi a^2 L \rho \left(\frac{b^2}{b^2 - a^2} \right) : \text{相互影響による付加質量} \quad (4.6)$$

$$M_{22} = \pi b^2 L \rho \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \right) : \text{外筒の自己付加質量} \quad (4.7)$$

a : 内筒の外半径

b : 外筒の内半径

M_{ij} : 流体による見かけの質量 (i, j は 1 が内筒, 2 が外筒を表す)

\ddot{u}_1, \ddot{u}_2 : 内筒, 外筒の絶対加速度

x_1, x_2 : 内筒, 外筒の相対変位

k_1, k_2 : 内筒, 外筒の剛性

L : 内筒および外筒の長さ

ρ : 流体の密度

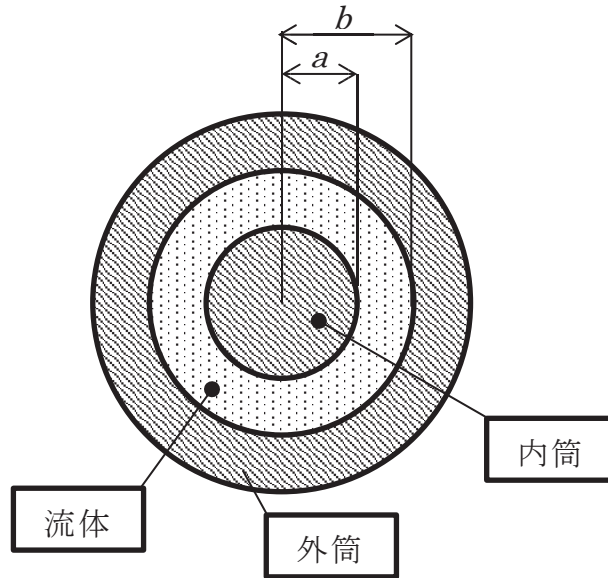


図4 二重円筒モデル

ここで、上記の式の定義により、二重円筒の外筒が内筒に対して十分に大きいとすると、(4.5)式及び(4.6)式は下式になることから、 $M_{11} + M_{12}$ は(4.10)式となる。

$$M_{11} = \pi a^2 L \rho \quad (4.8)$$

$$M_{12} = -2\pi a^2 L \rho \quad (4.9)$$

$$M_{11} + M_{12} = -\pi a^2 L \rho (= -M_d) \quad (4.10)$$

(4.10)式は、内筒の排除水体積質量に相当する。これを $-M_d$ と表現する。

4.3 構造物に加わる力

付加質量及び排除水体積質量を用いて、構造物に加わる力を求める。

\ddot{u}_g を地震による入力加速度とすると

$$\ddot{u}_1 = \ddot{u}_g + \ddot{x}_1$$

$$\ddot{u}_2 = \ddot{u}_g + \ddot{x}_2$$

これを用いて、(4.4)式は以下に書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} M_1 + M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_2 + M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = -\ddot{u}_g \begin{bmatrix} M_1 + M_{11} + M_{12} \\ M_2 + M_{21} + M_{22} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

ここで、無限水中を想定した評価の場合、外筒の剛性を非常に大きい設定とするため、 $x_2=0$ となり、(4.11) 式は下式のように書き換えられる。

$$(M_1 + M_{11}) \cdot \ddot{x}_1 + k_1 x_1 = -\ddot{u}_g (M_1 + M_{11} + M_{12}) \quad (4.12)$$

上記 (4.12) 式は、水中において質量 $(M_1 + M_{11})$ の振動は、外筒からの相互影響による付加質量 M_{12} の影響を受けて、加振されていることを表している。ここで、(4.12) 式の右辺質量を左辺と同様に $(M_1 + M_{11})$ で代表して、これを補正するために、右辺について比率 β を用いて書き換えると (4.13) 式得る。

(4.12) 式は、気中において質量 $(M_1 + M_{11})$ が地震加速度の β 倍に低減された入力で、振動することと同様であると考えることができる。

$$(M_1 + M_{11}) \cdot \ddot{x}_1 + k_1 x_1 = -\beta \cdot (M_1 + M_{11}) \cdot \ddot{u}_g \quad (4.13)$$

この係数 β は各質量を用いて下式で与えられ、これを低減係数と呼ぶこととする。

$$\beta = \frac{M_1 + M_{11} + M_{12}}{M_1 + M_{11}} \quad (4.14)$$

ここで、(4.10) 式より、

$$\beta = \frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}} \quad (4.15)$$

と表されることから、構造物に加わる力 F として下記 (4.16) 式が得られる。

$$F = (M_1 + M_{11}) \left\{ \frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}} \alpha \right\} = (M_1 - M_d) \cdot \alpha \quad (4.16)$$

一方，固有振動数については，(4.13) 式から水中の場合が求められ，気中の場合については自己付加質量 M_{11} が無いとして下記のとおり求められる。

$$\text{水中： } \omega_w^2 = \frac{k_1}{M_1 + M_{11}} \quad (4.17)$$

$$\text{気中： } \omega_a^2 = \frac{k_1}{M_1} \quad (4.18)$$

両者の比を取って整理すると固有振動数の比として下記を得る。

$$\frac{\omega_w}{\omega_a} = \sqrt{\frac{M_1}{M_1 + M_{11}}} \quad (4.19)$$

4.4 付加質量及び排除水体積質量についての既工認と今回工認の比較

炉心シュラウド支持ロッドを例に，水中で振動する場合の固有振動数及び発生荷重と，気中で振動する場合の固有振動数及び発生荷重とを比較した結果を表 2 に示す。

既工認では付加質量及び排除水体積質量は考慮していなかったが，今回工認では炉心シュラウド支持ロッドの耐震評価を行うにあたり，付加質量による固有周期の低減と，炉心シュラウド支持ロッドが占める体積に相当する排除水体積質量 (M_d) 分を地震応答解析における応答低減として考慮した。

表 2 気中で振動する場合と比較した固有振動数と発生荷重

	既工認	今回工認
固有振動数	—	$\sqrt{\frac{M_1}{M_1 + M_{11}}}$ 倍
低減係数	—	$\frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}}$ 倍
発生荷重	$F = M_1 \cdot \alpha$	$F = (M_1 - M_d) \cdot \alpha$

M_1 : 内筒の質量 (炉心シュラウド支持ロッドの質量)

M_{11} : 付加質量

M_d : 排除水体積質量

α : 加速度

4.5 時刻歴応答解析とスペクトルモーダル解析における応答低減効果の現れ方

(1) 時刻歴応答解析の場合

時刻歴応答解析を適用している設備として炉心シュラウド支持ロッドを例に説明する (炉心シュラウド支持ロッドの付加質量及び排除水体積質量の設定の詳細は 5 項参照)。

炉心シュラウド支持ロッドの解析モデルにおいては無限水中の円柱構造物と考え，(4.8)，(4.9) 式を用いて M_{11} ， M_{12} を算出している。

無限水中での地震応答を評価するため，解析モデル上はタイロッドの他に，十分剛な外筒を設け，内筒と外筒間に非対角質量 (M_{12} ， M_{21}) を設定しているが，外筒は十分剛であり変位が生じないため，外筒の応答によるタイロッド応答への影響は生じない。この時，(4.11) 式での第 2 式は無限水中を考慮するために設定した外筒の運動方程式であるため設備の評価に適用するものではない。

なお、立形ポンプや大型機器連成解析の炉内構造物系（原子炉压力容器とスタン
ドパイプ間）等では二重円筒の外筒の応答による相互作用を考慮するため、外筒は
対象構造物の剛性でモデル化し、(4.11) 式の第 2 式は外筒の運動方程式として評価
に適用する。

(2) スペクトルモーダル解析の場合

スペクトルモーダル解析を適用している設備として中性子束計測案内管を例に説
明する。

炉心シュラウド支持ロッドの解析モデル同様、中性子束計測案内管の解析モデル
は無限水中の円柱構造物と考え、外筒は十分剛であると考え、付加質量 (M11) 及び
非対角質量 (M12) を算出し、解析モデルに設定する。

設定した質量及び剛性の関係から固有値解析を実施し、固有値、固有ベクトル及
び刺激係数を計算する。

固有ベクトル及び刺激係数並びに固有値における入力加速度 (FRS) より各振動モ
ードの変位を計算し、モードの組合せにより応答を算出するが、この時、非対角質
量 (M12) が固有値解析の刺激係数に含まれ、時刻歴解析と同様の応答低減効果が考
慮される。

5. 炉心シュラウド支持ロッドに対する流体の付加質量及び排除水体積質量の設定の詳細
4 項で示した付加質量及び応答低減効果の考慮方法に基づき、今回工認の耐震評価で考慮している炉心シュラウド支持ロッドを例に詳細を以下に示す。

5.1 二重円筒モデルの炉心シュラウド支持ロッドへの適用

今回工認では、炉内設備であることを踏まえ、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 - 1987）に示されている燃料集合体と同じ考え方（表 1 の VI-2-3-2 に示すとおり既工認より考慮済）を適用し、炉心シュラウド支持ロッドを無限水中の円柱構造物とみなして算出した付加質量及び応答低減効果を考慮して評価を実施している。

炉心シュラウド支持ロッドの評価では、円筒形の原子炉圧力容器内の炉心シュラウド支持ロッドを対象としており、機械工学便覧⁽¹⁾に示されるように、単位長さあたりの流体力学的質量（付加質量）は、 $\pi \rho a^2$ で整理される。

また、炉心シュラウド支持ロッドを無限水中の円柱構造物と考え、(4.8)式及び(4.9)式を適用する。

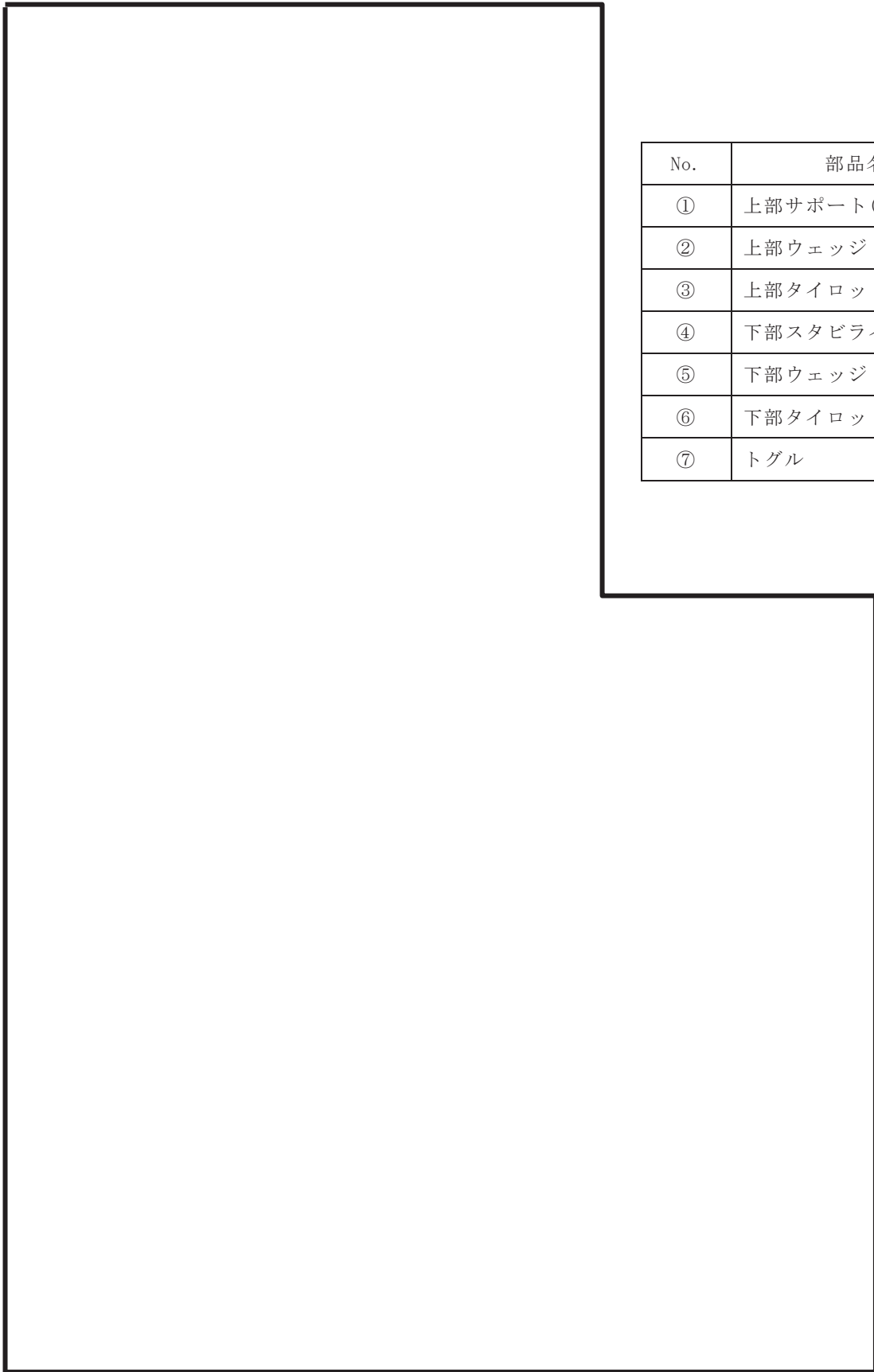
5.2 炉心シュラウド支持ロッドの付加質量及び排除水体積質量

炉心シュラウド支持ロッドはタイプ 1 及びタイプ 2 があり、今回工認ではそれぞれのタイプで解析モデルを作成している（既工認との差異については補足-600-2 に示す。）。ここでは、解析モデルで考慮した付加質量及び排除水体積質量について示す。

炉心シュラウド支持ロッド（タイプ 1 及びタイプ 2）の構造概要図及び解析モデル図を図 5、図 6 に示す。炉心シュラウド支持ロッド（タイプ 1 及びタイプ 2）の各質点間の付加質量及び排除水体積質量を表 2 及び表 3 に示す。炉心シュラウド支持ロッドの断面構造は円柱を基本としている。表中に示すように、一部六角柱を有する領域があるが、この範囲は六角柱と等価面積を持つ円柱とみなして付加質量を考慮する。また、水の密度 ρ_w は炉水で考慮している kg/m³ とする。

炉心シュラウド支持ロッドに対して付加質量と排除水体積質量を考慮した耐震評価とするため、表 2 及び表 3 に示す付加質量等の諸元を用いて地震応答解析を行い、算出された結果によって構造強度評価を実施している。

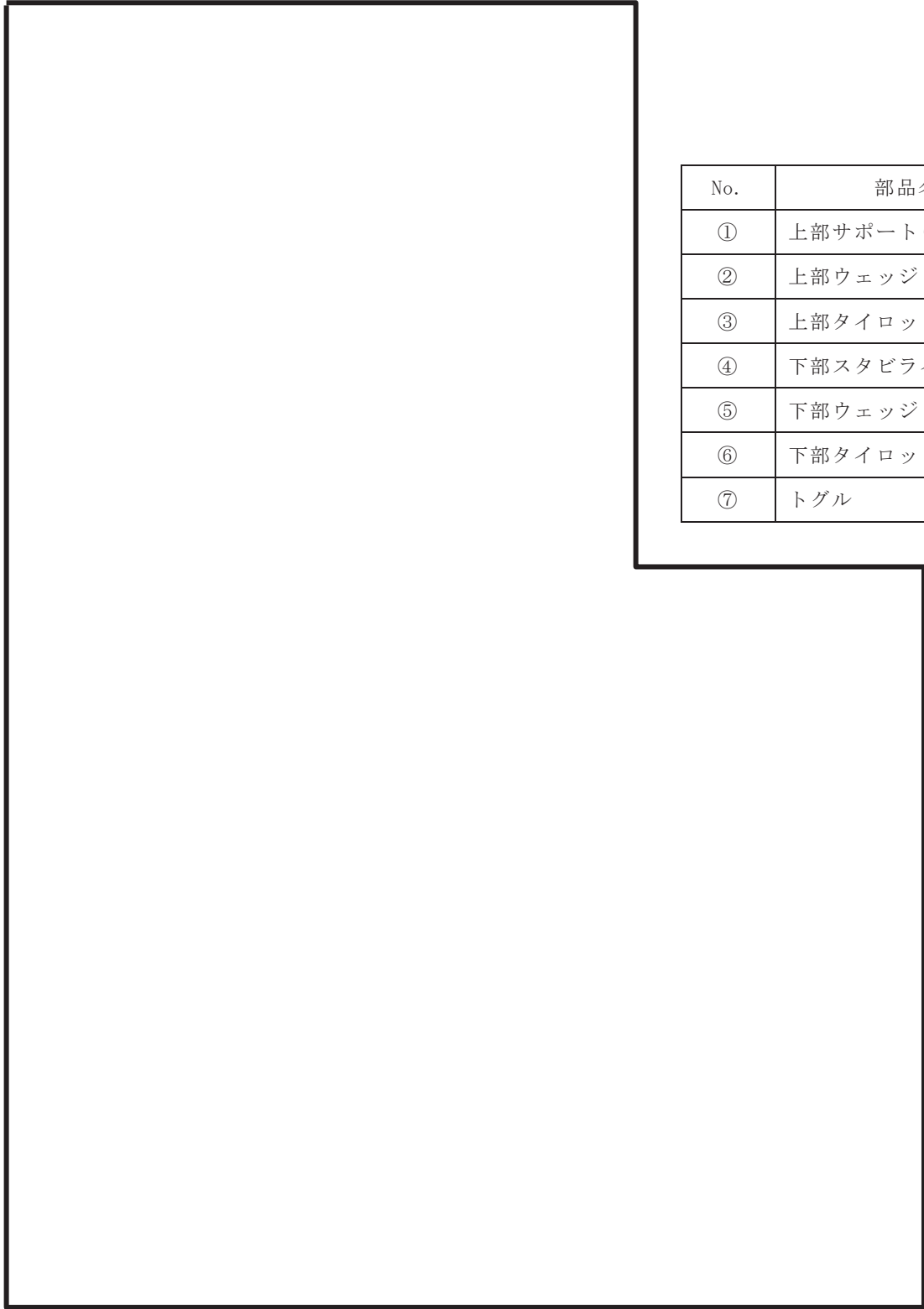
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



No.	部品名称
①	上部サポート(タイプ1)
②	上部ウェッジ
③	上部タイロッド(タイプ1)
④	下部スタビライザ
⑤	下部ウェッジ
⑥	下部タイロッド
⑦	トグル

図5 炉心シュラウド支持ロッド(タイプ1)の構造概要図及び解析モデル図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



No.	部品名称
①	上部サポート(タイプ2)
②	上部ウェッジ
③	上部タイロッド(タイプ2)
④	下部スタビライザ
⑤	下部ウェッジ
⑥	下部タイロッド
⑦	トグル

注：タイプ1とタイプ2の相違点は以下のとおり。

- ・①上部サポートの形状（タイプ1はサポートの爪が2つでタイプ2はサポートの爪が1つ）
- ・③上部タイロッドの径

図6 炉心シュラウド支持ロッド（タイプ2）の構造概要図及び解析モデル図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表2 炉心シュラウド支持ロッド（タイプ1） 付加質量及び排除水体積質量

質点番号	断面形状	直径	部材長	部材質量	付加質量	排除水体積質量
		2a [$\times 10^{-3}$ m]	L [m]	M ₁ [kg]	M _v [kg]	M _d [kg]
T1						
T2						
T3						
T4						
T5						
T6						
T7						
T8						
T9						
T10						
T11						
T12						
T13						
T14						
T15						
T16						
T17						
T18						
T19						
T20						
T21						
T22						

注記*：六角柱と等価面積を持つ円柱とみなして付加質量を考慮。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表3 炉心シュラウド支持ロッド（タイプ2） 付加質量及び排除水体積質量

質点番号	断面形状	直径	部材長	部材質量	付加質量	排除水体積質量
		2a [$\times 10^{-3}$ m]	L [m]	M ₁ [kg]	M _v [kg]	M _d [kg]
T1						
T2						
T3						
T4						
T5						
T6						
T7						
T8						
T9						
T10						
T11						
T12						
T13						
T14						
T15						
T16						
T17						
T18						
T19						
T20						
T21						
T22						

注記*：六角柱と等価面積を持つ円柱とみなして付加質量を考慮。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 参考文献

- (1) 機械工学便覧 基礎編 $\alpha 2$ 機械力学
- (2) R. J. FRITZ, 1972, 「The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solid」, Journal of Engineering for Industry.