

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-028-10-7 改0
提出年月日	2023年11月13日

再循環系ポンプの軸固着に対する評価について

2023年11月

東京電力ホールディングス株式会社

再循環系ポンプの軸固着に対する評価について

再循環系ポンプの軸固着に対する評価について

1. 概要

クラス1ポンプである原子炉冷却材再循環ポンプ（以下「RIP」という。）については、JEAG4601・補-1984（重要度分類編 4. 添付資料B. 7. 第1種ポンプについて）にて動的機能維持の要求はないが、地震により軸固着を生じないことを確認するよう求められている。このため、RIPの軸固着が生じないことを確認した。評価内容を以下に示す。

2. RIP軸固着の検討方針

RIP軸固着の検討としては、基準地震動 S_s による地震時に軸受に発生する荷重が許容値を満足することを評価する。

3. RIPの回転体支持構造

RIPの回転体支持構造である軸受部を図1に示す。

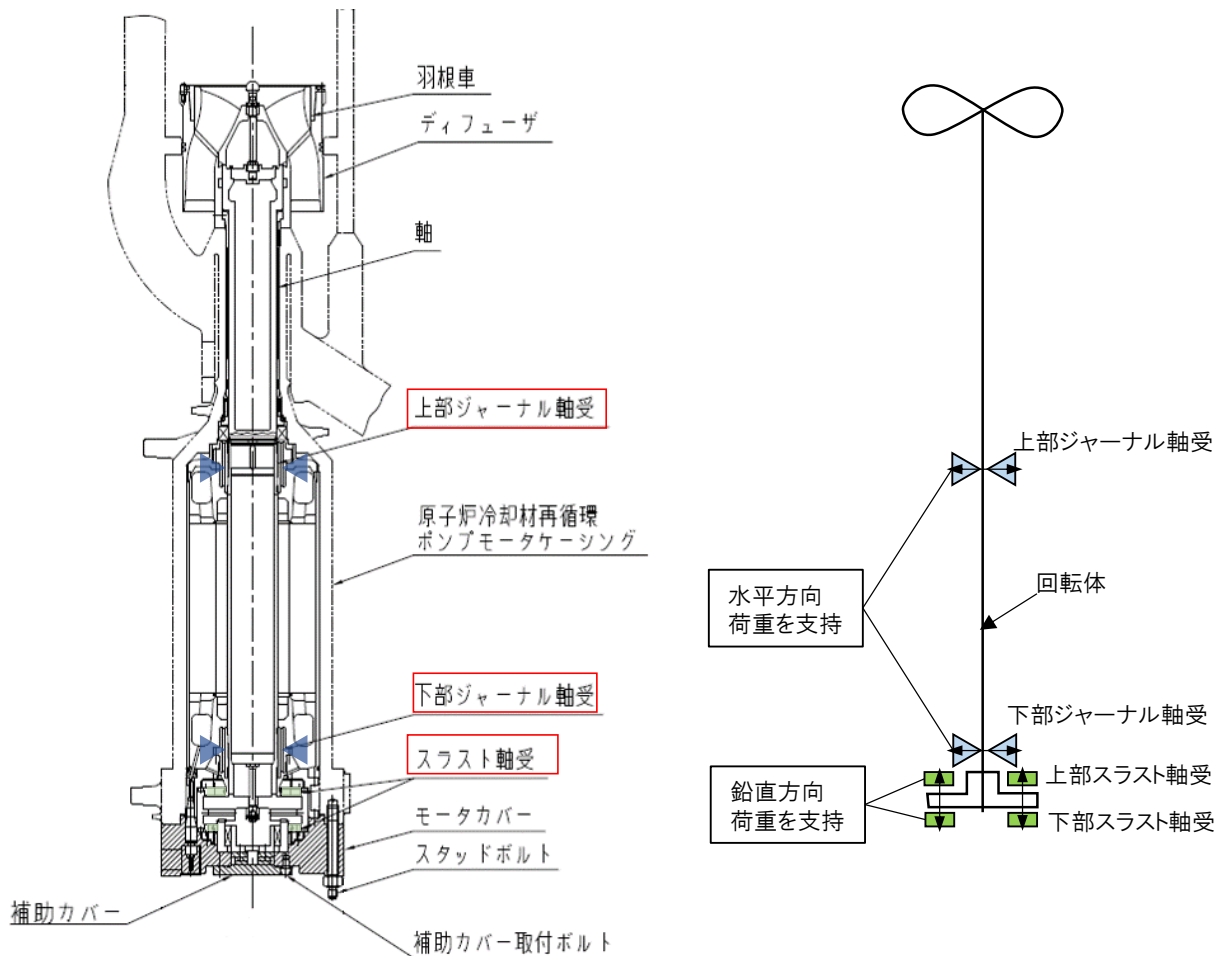


図1 RIPの回転体支持構造図

4. スラスト軸受評価

4.1 スラスト軸受の評価方針

スラスト軸受の評価は、スラスト軸受の許容荷重と、基準地震動 S_s による地震時に発生する鉛直方向荷重の比較にて実施し、「許容荷重 > 発生する鉛直方向荷重」であれば、スラスト軸受部において軸固着は生じない。

スラスト軸受は上下にパッドを設けているが、通常運転時には上側のパッドで荷重を受けていることから、鉛直上向きについて評価を実施する。

4.2 スラスト軸受の構造概要

RIPのスラスト軸受の構造図を図2に示す。スラスト軸受は、回転体部のスラストディスクを上下で挟むように、上部スラスト軸受パッドと下部スラスト軸受パッドが設置されており、それぞれベアリングハウジング（下）及びモータカバーで支えられている。

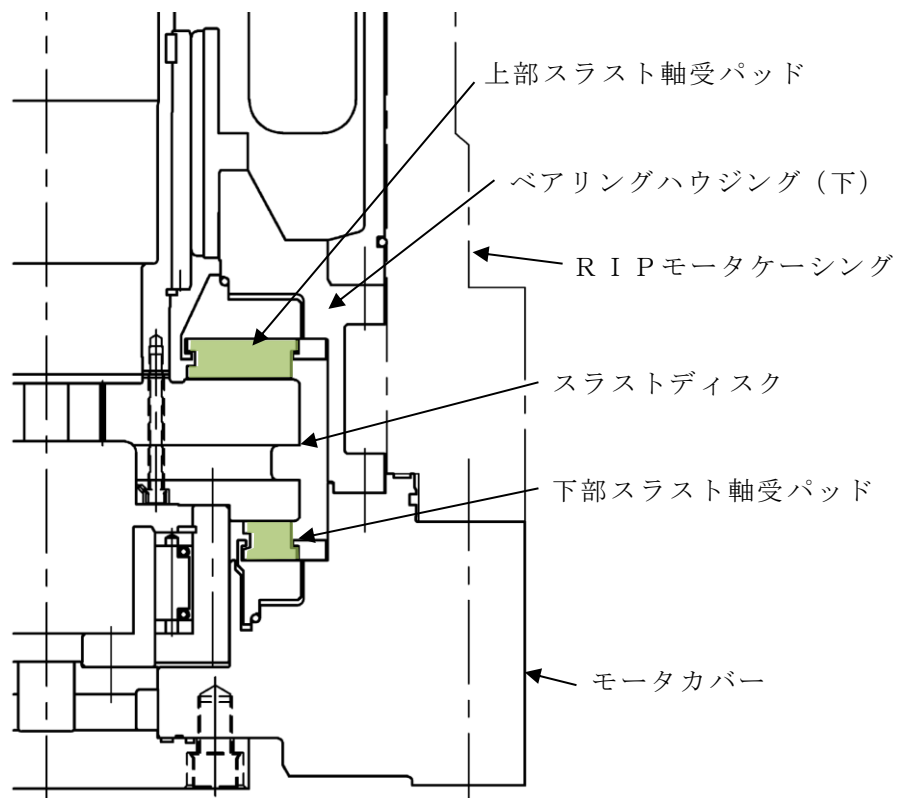


図2 スラスト軸受構造図

4.3 スラスト軸受の許容荷重

スラスト軸受の許容荷重は，軸受構造上の許容荷重と，軸固着を生じない軸受機能上の許容荷重の小さい方とする。

a. 軸受構造上の許容荷重

上部スラスト軸受を構成する部品の中で，最も低い許容荷重を有する部品は上部スラスト軸受パッド（図2参照）であることから，上部スラスト軸受パッドの許容荷重を軸受構造上の許容荷重とする。

b. 軸受機能上の許容荷重

R I Pのスラスト軸受は水中軸受であり，回転体のスラストディスクと軸受の間には水膜が形成されている。水膜形成上の許容荷重は，軸受水膜特性（水膜厚さと軸受荷重の関係）と最小水膜厚さより求めている（図3参照）。

軸受部での水膜形成の維持は，軸受が接触せず流体潤滑を維持できる厚さを最小水膜厚さとして評価することで，回転体の軸固着を生じない条件としては十分に保守的であるため，水膜形成上の許容荷重を軸受機能上の許容荷重とする。許容荷重の算出過程を別紙1に示す。

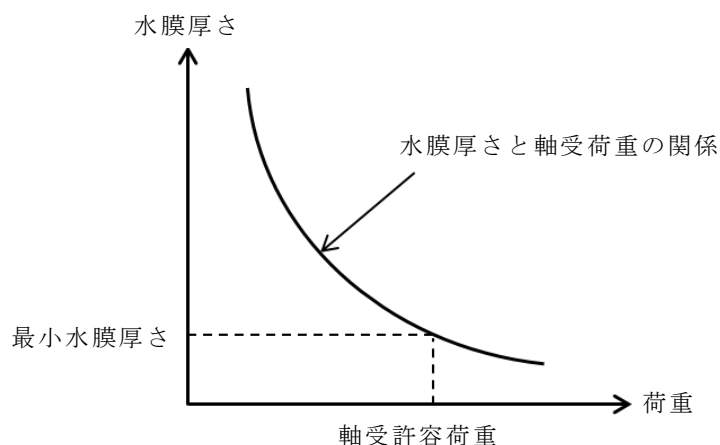


図3 軸受許容荷重算出概念図

c. スラスト軸受の許容荷重

上部スラスト軸受の構造上及び機能上の許容荷重を表1に示す。これより，許容荷重の低い値を上部スラスト軸受の許容荷重として設定した。

表1 スラスト軸受の許容荷重（単位：kN）

種別	軸受構造上の許容荷重	軸受機能上の許容荷重*	許容荷重
上部スラスト軸受			

注記*：一般文献（機械工学便覧）にて与えられる水膜厚さと軸受荷重の関係より算出

4.4 スラスト軸受の発生荷重

スラスト軸受に作用する荷重を表5に示す。

通常運転時のR I P回転体には、羽根車における流体力によって上向きのスラスト力が作用している。本評価においては、上記に加えてR I P回転体の質量と、基準地震動S sによる鉛直方向加速度を考慮し、スラスト軸受における鉛直上向き方向の発生荷重を算出する。

$$\text{「発生荷重」} = \text{「流体力による荷重」} - \text{「死荷重」} + \text{「地震荷重」}$$

<算出方法>

以下の式により算出する。

$$A = B - C + D \times E \times g$$

A：鉛直上向き方向発生荷重

B：スラスト流体力（上向き） kN

C：R I P回転体の質量による死荷重 kN*¹

D：R I P回転体の質量 ton

E：基準地震動S sによる鉛直方向設計震度 0.87*²

g：重力加速度 9.80665m/s²

注記*1：R I P回転体は水中にあるため、浮力の影響を考慮した値

$$C = \text{「R I P回転体の質量」} \times g - \text{「浮力」}$$

ここで、保守的に常温における水密度(1000kg/m³)を用いて、

$$\text{「浮力」} = \text{「R I P回転体の体積」} \times \text{「水密度」} \times g$$

$$= \text{} \times 1000 \times 9.80665 \times 10^{-3} = \text{} \text{ (kN)}$$

*2：VI-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」の設計用最大応答加速度I (1.0ZPA)

以上より

$$A = \text{} - \text{} + \text{} \times 0.87 \times 9.80665 = 30.52 \rightarrow 30.6$$

であるため、鉛直上向き方向の発生荷重はA=30.6kNとなる。

4.5 スラスト軸受の評価結果

R I Pスラスト軸受の評価結果を表2に示す。評価の結果、軸受部に発生する荷重は許容荷重以下であるため、R I P通常運転時に地震の影響でスラスト軸受部での軸固着が生じることはない。

表2 スラスト軸受の評価結果（基準地震動S s）（単位：kN）

種別	発生荷重	許容荷重
上部スラスト軸受	30.6	<input type="text"/>

5. ジャーナル軸受評価

5.1 ジャーナル軸受の評価方針

ジャーナル軸受の評価は、ジャーナル軸受の許容荷重と、基準地震動 S_s による地震時に発生する水平方向荷重の比較にて実施し、「許容荷重 > 発生する水平方向荷重」であれば、ジャーナル軸受部において軸固着は生じない。

5.2 ジャーナル軸受の構造概要

RIPのジャーナル軸受の構造図を図4に示す。ジャーナル軸受は、モータの上下に上部ジャーナル軸受と下部ジャーナル軸受が設置されており、それぞれの軸受はベアリングハウジング（上）とベアリングハウジング（下）で支えられている。

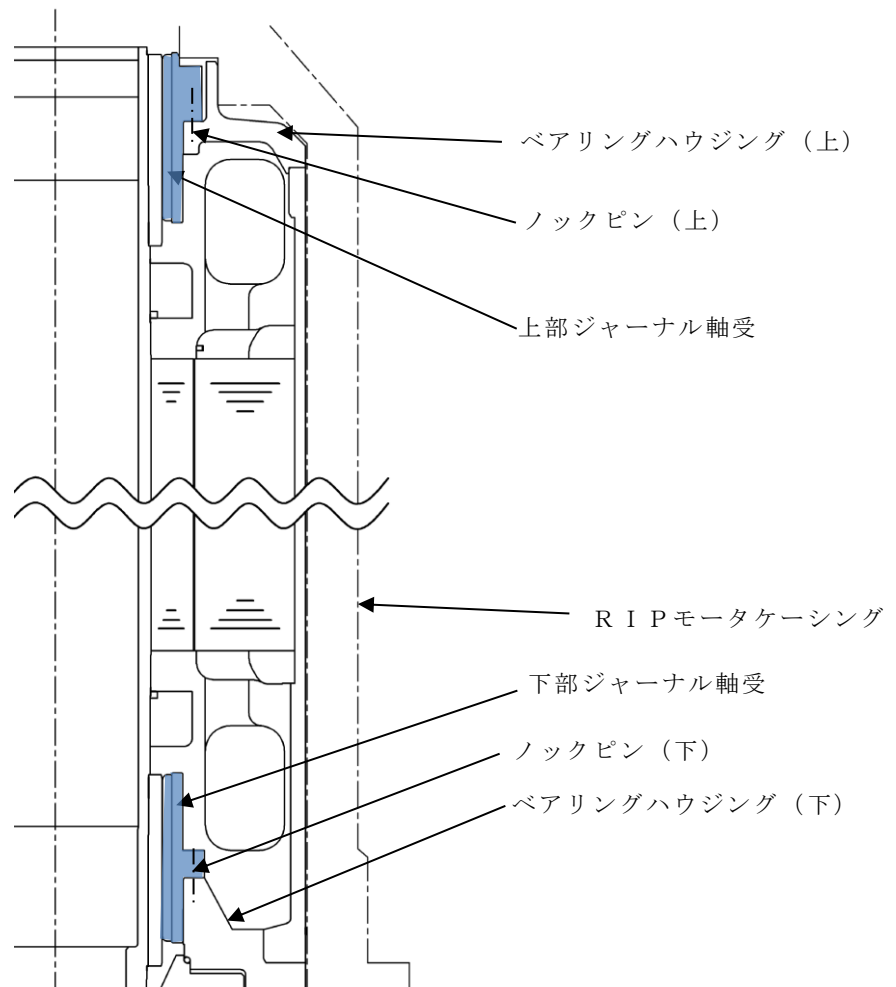


図4 ジャーナル軸受構造図

5.3 ジャーナル軸受の許容荷重

ジャーナル軸受の許容荷重は、軸受構造上の許容荷重と、軸固着を生じない軸受機能上の許容荷重の小さい方とする。

a. 軸受構造上の許容荷重

ジャーナル軸受を構成する部品の中で、最も低い許容荷重を有する部品は軸受の位置決めを行うロックピンであることから、ロックピンの許容荷重を軸受構造上の許容荷重とする。

b. 軸受機能上の許容荷重

ジャーナル軸受は水中軸受であり、回転体と軸受の間には水膜が形成されている。水膜形成上の許容荷重は、軸受水膜特性（水膜厚さと軸受荷重の関係）と最小水膜厚さより求めている（4.3項 図3参照）。

軸受部での水膜形成の維持は、軸受が接触せず流体潤滑を維持できる厚さを最小水膜厚さとして評価することで、回転体の軸固着を生じない条件としては十分に保守的であるため、水膜形成上の許容荷重を軸受機能上の許容荷重とする。許容荷重の算出過程を別紙2に示す。

c. ジャーナル軸受の許容荷重

ジャーナル軸受の構造上及び機能上の許容荷重を表3に示す。これより、許容荷重の低い値をジャーナル軸受の許容荷重として設定した。なお、上部ジャーナル軸受と下部ジャーナル軸受は、構造及び材質が同じため、許容荷重は同一となる。

表3 ジャーナル軸受の許容荷重（単位：kN）

種別	軸受構造上の許容荷重	軸受機能上の許容荷重*	許容荷重
ジャーナル軸受			

注記*：一般文献（機械工学便覧）にて与えられる水膜厚さと軸受荷重の関係より算出

5.4 ジャーナル軸受の発生荷重

ジャーナル軸受に作用する荷重を表5に示す。

通常運転時のRIP回転体には、羽根車における流体力によって水平方向の荷重が作用している。本評価においては、上記に加えて基準地震動Ssによる水平方向加速度を考慮し、ジャーナル軸受における水平方向の発生荷重を算出する。

$$\text{「発生荷重」} = \text{「流体力による荷重」} + \text{「地震荷重」}$$

算出においては、図5に示すはりモデルを用いて、水平方向の流体力及び設計震度を考慮して、材料力学式によりジャーナル軸受部の発生荷重を算出する。

<算出方法>

以下の式により算出する。

$$\text{上部ジャーナル軸受：} A_1 = B + C_1$$

$$\text{下部ジャーナル軸受：} A_2 = B + C_2$$

A：水平方向発生荷重

ここで、上部ジャーナル軸受をA₁、下部ジャーナル軸受をA₂とする。

B：羽根車部に作用する流体力F_rによって、上部ジャーナル軸受、下部ジャーナル軸受各々に作用する荷重（上部：□ kN，下部：□ kN）

C₁：各質点に作用する地震荷重Fによって、上部ジャーナル軸受に作用する荷重（□ kN）

$$R_{B1} = \sum_{i=1}^{10} F_i \cdot L_i / L_g$$

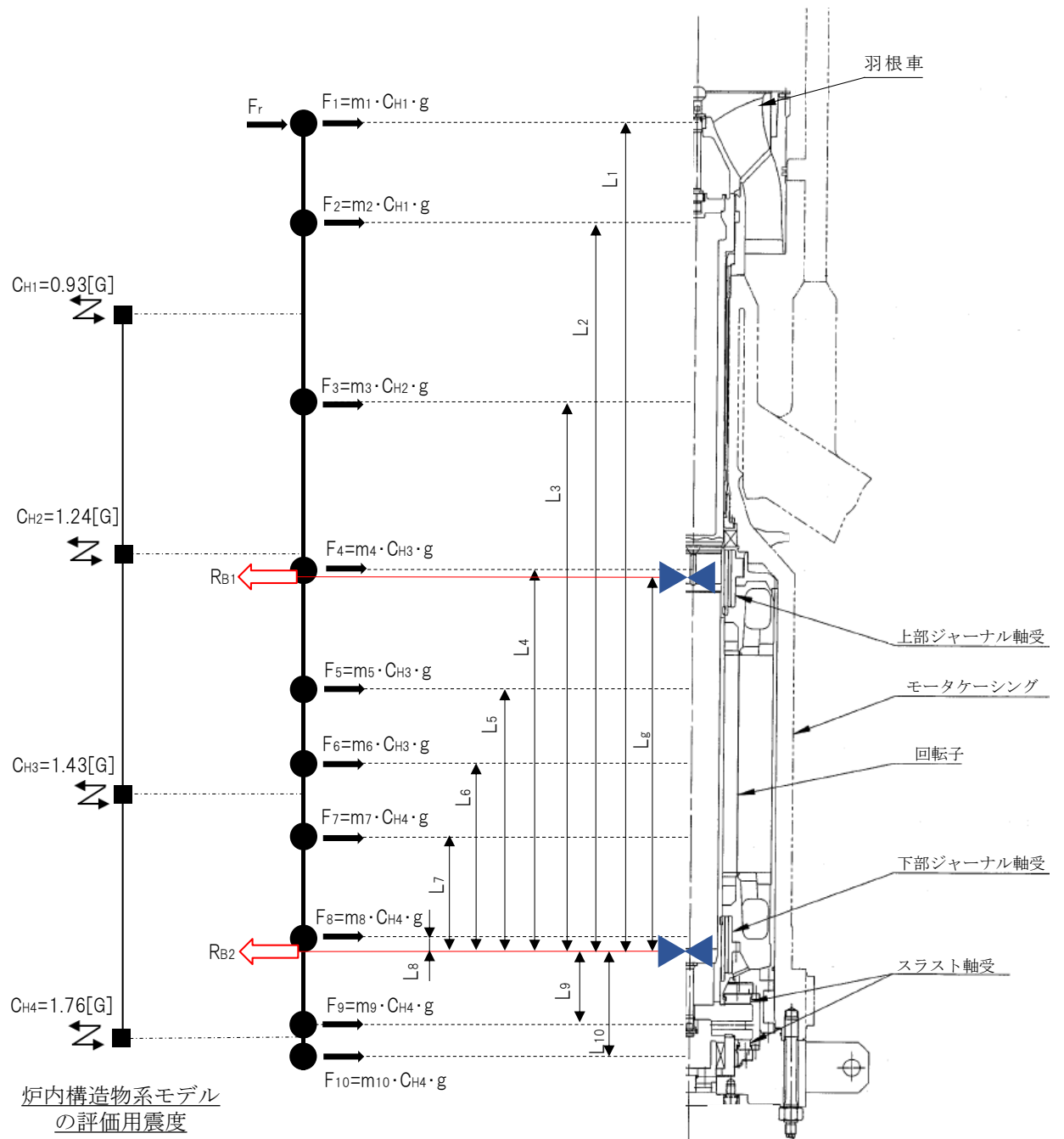
C₂：各質点に作用する地震荷重Fによって、下部ジャーナル軸受に作用する荷重（□ kN）

$$R_{B2} = \sum_{i=1}^{10} F_i - \sum_{i=1}^{10} F_i \cdot L_i / L_g$$

以上より、上部ジャーナル軸受の発生荷重及び下部ジャーナル軸受の発生荷重はそれぞれ以下となる。

$$A_1 = \square + \square = 15.41 \rightarrow 15.5 \text{ kN}$$

$$A_2 = \square + \square = 9.85 \rightarrow 9.9 \text{ kN}$$



記号	記号名称	記号	記号名称
$m_1 \sim m_{10}$	各質点質量	R_{B1}	地震荷重による上部ジャーナル軸受反力
$F_1 \sim F_{10}$	質点に作用する地震荷重	R_{B2}	地震荷重による下部ジャーナル軸受反力
F_r	流体力	$L_1 \sim L_{10}$	下部ジャーナル軸受中心（基準）からの距離（基準より下の距離はマイナスとする。）
g	重力加速度	L_g	ジャーナル軸受間距離
$C_{H1} \sim C_{H4}$	水平方向設計震度		

図5 水平方向評価はりモデル

5.5 ジャーナル軸受の評価結果

R I P ジャーナル軸受の評価結果を表 4 に示す。評価の結果、軸受部に発生する荷重は許容荷重以下であるため、R I P 通常運転時に地震の影響でジャーナル軸受部での軸固着が生じることはない。

表 4 ジャーナル軸受の評価結果（基準地震動 S s）（単位：kN）

種別	発生荷重	許容荷重
上部ジャーナル軸受	15.5	
下部ジャーナル軸受	9.9	

6. コーストダウン運転時の評価

6.1 コーストダウン運転時の評価方針

前項までの評価により、R I P 通常運転時には地震の影響で軸固着が生じることはないことを確認した。本項では、R I P の電源（電源は耐震 C クラス）が遮断された後のコーストダウンによる降速状態について、地震の影響の評価を行う。

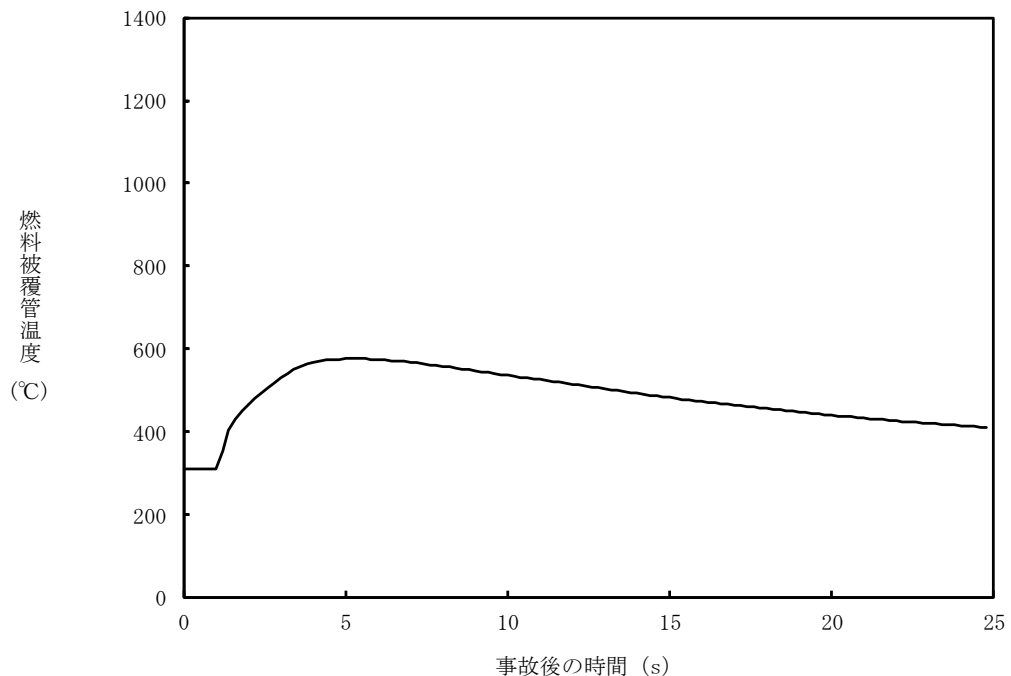
R I P 通常運転時に対して、コーストダウンで回転速度が低下している状況では、水膜形成上の許容荷重は低下していく。そのため、コーストダウンによって R I P が降速する状態においては、地震の影響によって回転体と軸受の接触が生じ、摩擦抵抗が増加して降速の挙動に影響を及ぼし得ると考えられる。実際の地震応答は交番荷重であり、ある一定方向のみ連続して荷重が作用することではなく、10 台の R I P で同時に軸固着が生じることは考えにくい。以下においては保守的に、コーストダウン前の R I P 通常運転時に同時に全台が軸固着するものと仮定して、原子炉へ及ぼす影響を解析により評価する。

解析条件は、設置変更許可申請書記載の「原子炉冷却材流量の喪失」と起因事象以外は同じとする*。起因事象は「原子炉冷却材再循環ポンプの軸固着」であり、R I P 全台が時刻 0 秒で軸固着することを仮定する。解析結果の判断基準も、「原子炉冷却材流量の喪失」と同様に、燃料被覆管最高温度 1200℃ 以下及び原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力 10.34MPa[gage]（最高使用圧力の 1.2 倍）以下とする。

注記*：9×9 燃料採用時の設置変更許可申請書（平成 10 年 12 月 21 日 平成 10・03・31 資第 99 号 許可）

6.2 コーストダウン運転時の評価結果

燃料被覆管温度の解析結果を図6に示す。解析の結果、R I P 全台軸固着による炉心流量の急減により燃料被覆管の最高温度は約576℃となり、判断基準である1200℃に対して十分な余裕があることを確認した。また、原子炉圧力の最大値は約8.29MPa[gage]まで上昇するにとどまるので、原子炉圧力と圧力容器底部圧力との差(0.3MPa程度)を考慮しても、判断基準である10.34MPa[gage]を十分下回る。従って、保守的に通常運転時のR I P が全台同時に軸固着する事象を想定したとしても、安全上有意な影響が生じることはない。



SA3KK7APT99AJ10K000

図6 原子炉冷却材再循環ポンプ全台軸固着 燃料被覆管温度変化

7. 結論

クラス1ポンプであるR I Pについて、通常運転時に基準地震動S_sにより軸受に発生する荷重が許容値を満足し、軸固着が生じないことを確認した。また、コーストダウン運転時の評価として、R I P 全台が同時に軸固着するものと仮定しても、原子炉の安全上の要求が満たされることを確認した。

表5 R I P軸受に作用する荷重

No.	R I P軸受に発生する荷重		荷重を受ける軸受	考慮する荷重の方向	補足説明
	分類	発生する荷重			
1	死荷重	R I P回転体の自重	スラスト軸受	鉛直下向き	運転中，軸受に定常的に作用する荷重であることから考慮している。R I P通常運転時には上部スラスト軸受で荷重を受けていることから，鉛直下向きの自重は，上向きの浮力の影響を考慮した値とする。
2	機械的荷重	機械の振動による荷重	ジャーナル軸受	考慮しない	R I P回転体の危険速度は定格回転速度よりも十分に高く，静止部材に対する相対振動は十分小さいことから考慮しない。
3		流体力による荷重	スラスト軸受	鉛直上向き	運転中，軸受に定常的に作用する荷重であることから考慮している。
4			ジャーナル軸受	水平方向	運転中，軸受に定常的に作用する荷重であることから考慮している。
5	地震荷重		スラスト軸受	鉛直上向き	地震時にR I P回転体は鉛直方向加速度の影響を受けることから考慮している。(他の荷重との組合せにおいて厳しい評価となるような向きにて考慮)
6			ジャーナル軸受	水平方向	地震時にR I P回転体は水平方向加速度の影響を受けることから考慮している。(他の荷重との組合せにおいて厳しい評価となるような向きにて考慮)

別紙1 スラスト軸受の軸受機能上の許容荷重について

1. 概要

本資料は、スラスト軸受の軸受機能上の許容荷重の算出過程を示すものである。

2. スラスト軸受の軸受機能上の許容荷重の算出過程

水膜形成上の許容荷重は、下記の理論式（式 2.1）に基づく水膜厚さ h_0 と軸受荷重 W の関係から算出する。

$$W = \frac{\eta \times 10^{-6} \times U \times B^2 \times L \times Z \times K_w}{h_0^2} \quad (\text{式 2.1})^{*1}$$

- η : 流体の粘性係数 $\mu \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^{*2}
 U : 周速 m/s ^{*3}
 B : 上部スラスト軸受パッド長さ m
 L : 上部スラスト軸受パッド幅 m
 Z : 上部スラスト軸受パッド数
 K_w : 負荷容量係数 ^{*1, *4}

注記*1：機械工学便覧 $\beta 4$ 編 1・4・3 動圧スラスト軸受の流体潤滑理論による。

*2：モータ冷却水出口温度 $^{\circ}\text{C}$ における値

*3：定格回転速度 1450rpm における値

*4：軸受縦横比とピボット位置係数から特性図を読取った値

(式 2.1) より水膜厚さ h_0 と軸受荷重 W の関係を図 1 に示す。

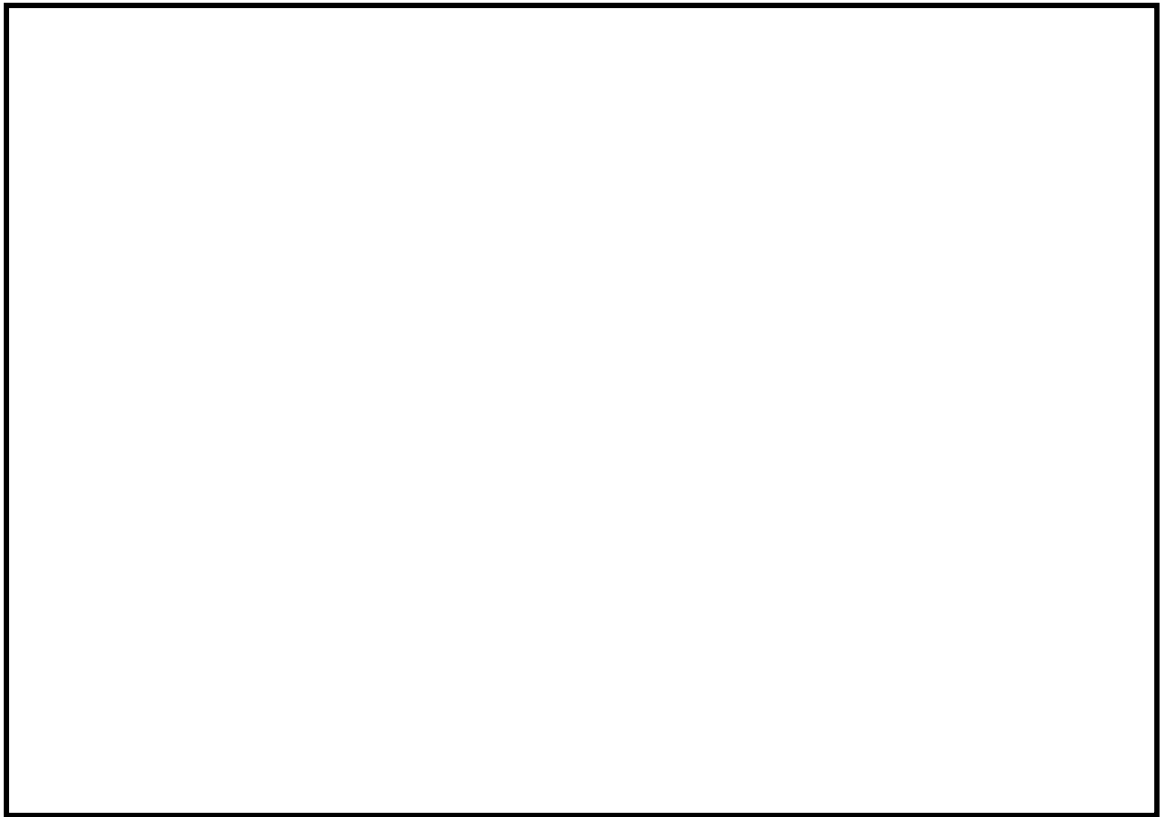


図1 上部スラスト軸受 水膜厚さと軸受荷重の関係

上部スラスト軸受の軸受機能上の許容荷重は，軸受摺動面の粗さに基づいて，流体潤滑を維持できる最小水膜厚さ m を設定した上で，それに対する軸受荷重として算出した。

$$W = \text{} = \text{} \text{ N} \div \text{} \text{ kN}$$

以上より，スラスト軸受の軸受機能上の許容荷重は kN となる。

別紙2 ジャーナル軸受の軸受機能上の許容荷重について

1. 概要

本資料は、ジャーナル軸受の軸受機能上の許容荷重の算出過程を示すものである。

2. ジャーナル軸受の軸受機能上の許容荷重の算出過程

水膜形成上の許容荷重は、下記の理論式（式 2.1）に基づく水膜厚さと局所圧力から導かれるゾンマーフェルト数 S と軸受荷重 W の関係から算出する。

$$W = \frac{\eta \times 10^{-6} \times L \times D}{60 \times S} \times \left(\frac{R}{C_P} \right)^2 \times N \quad (\text{式 2.1})^{*1}$$

- η : 流体の粘性係数 μ Pa・s ^{*2}
- L : メタル幅 m
- D : メタル直径 m
- S : ゾンマーフェルト数 ^{*3}
- R : メタル半径 m
- C_p : 半径すきま m ^{*4}
- N : 回転数 1450 rpm

注記*1：機械工学便覧 β4 編 1・4・2 動圧ジャーナル軸受の流体潤滑理論による。

*2：モータ冷却水出口温度 °C における値

*3：ゾンマーフェルト数は潤滑 第16巻(1971)「乱流域におけるジャーナル軸受の流体潤滑理論」と軸受摺動面の粗さに基づき、流体潤滑を維持できる最小水膜厚さ m を用いてレイノルズ方程式より導出した。

*4：設計値による。

ジャーナル軸受の軸受機能上の許容荷重は、軸受摺動面の粗さに基づいて、流体潤滑を維持できる最小水膜厚さ m を設定した上で、それに対する軸受荷重として算出した。

$$W = \frac{\text{}}{60 \times \text{}} \times \text{>} \text{ N} \div \text{

以上より、ジャーナル軸受の軸受機能上の許容荷重は kN となる。$$