

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-6 改 02
提出年月日	2023年4月7日

原子炉再循環ポンプの軸固着に対する評価について

2023年4月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. P L Rポンプ及びモータ軸受の軸固着の検討方針	1
3. P L Rポンプ及びモータ軸受構造	1
4. P L Rポンプモータのスラスト軸受評価	2
4.1 スラスト軸受の評価方針	2
4.2 モータ軸受の構造概要	2
4.3 スラスト軸受の許容荷重	3
4.4 スラスト軸受の発生荷重	5
4.4.1 鉛直上向き	5
4.4.2 鉛直下向き	6
4.5 スラスト軸受の評価結果	6
5. P L Rポンプ及びモータのラジアル軸受評価	7
5.1 ラジアル軸受の評価方針	7
5.2 ポンプ軸受の構造概要	7
5.3 ラジアル軸受の許容値	8
5.4 ラジアル軸受の発生荷重	9
5.5 ラジアル軸受の評価結果	10
6. コーストダウン運転時の評価	12
6.1 評価方針	12
6.2 評価条件	12
6.3 評価結果	13
6.3.1 事象進展	13
6.3.2 評価項目等	13
7. 結論	14

1. 概要

クラス1ポンプである原子炉再循環ポンプ（以下「PLRポンプ」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ことが求められている。このため、軸固着が生じず、PLRポンプの回転機能が維持可能であることを確認した。以下に評価内容を示す。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・「VI-2-5-2-1-1 管の耐震性についての計算書（原子炉再循環系）」

2. PLRポンプ及びモータ軸受の軸固着の検討方針

PLRポンプ及びモータ軸受の軸固着の検討としては、JEAG4601・補-1984及びJEAG4601-1991 追補版に記載の動的機能維持評価のうち、軸受部の損傷がなければ回転機能は維持されるため、軸受評価を実施する。

3. PLRポンプ及びモータ軸受構造

PLRポンプ及びモータ軸受の構造概要図を図1に、支持構造物及び地震応答解析モデルを図2に示す。

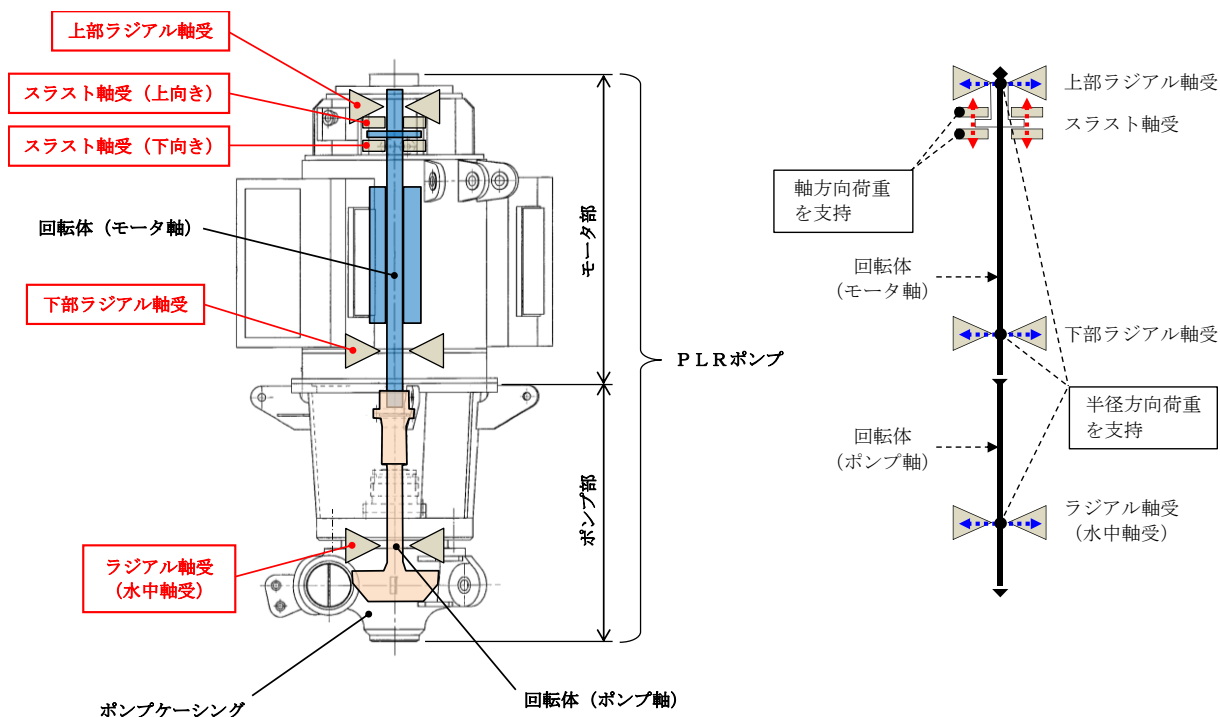


図1 PLRポンプ及びモータ軸受構造概要図

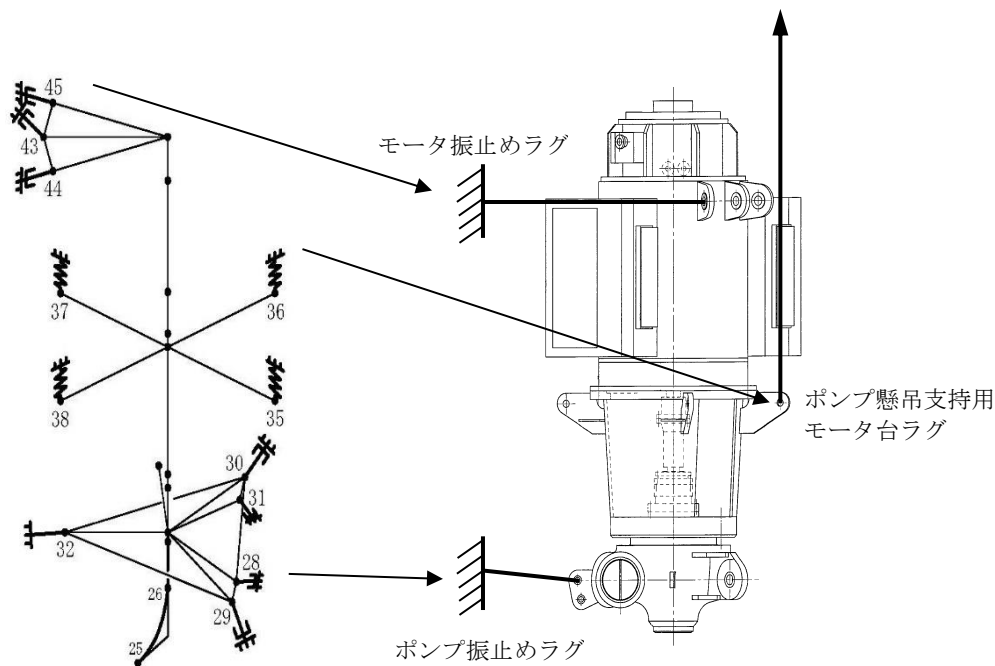


図2 PLRポンプ及びモータの支持構造物及び地震応答解析モデル

4. PLRポンプモータのスラスト軸受評価

4.1 スラスト軸受の評価方針

軸受評価は、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PLRポンプに発生する鉛直方向荷重の比較にて実施する。すなわち「許容荷重 > 発生する鉛直方向荷重」であればスラスト軸受の健全性は確保される。

4.2 モータ軸受の構造概要

PLRポンプモータ軸受の構造図を図3及び図4に示す。上部軸受は、スラスト軸受（上向き）、スラスト軸受（下向き）及び上部ラジアル軸受から構成されており、下部軸受は下部ラジアル軸受にて構成されている。上部軸受は回転体の上部シャフトカラーを上下で挟むようにスラスト軸受（上向き）とスラスト軸受（下向き）が設置されており、それぞれの軸受は上部軸受支持構造物で支えられている。また、スラスト軸受（上向き）とスラスト軸受（下向き）はレベリングプレート及びベースリングにて位置調整されている。上部ラジアル軸受は12本の取付ボルトにて上部軸受支持構造物で支えられている。

上部ラジアル軸受と同様に下部ラジアル軸受は8本の取付ボルトにて下部軸受支持構造物で支えられている。

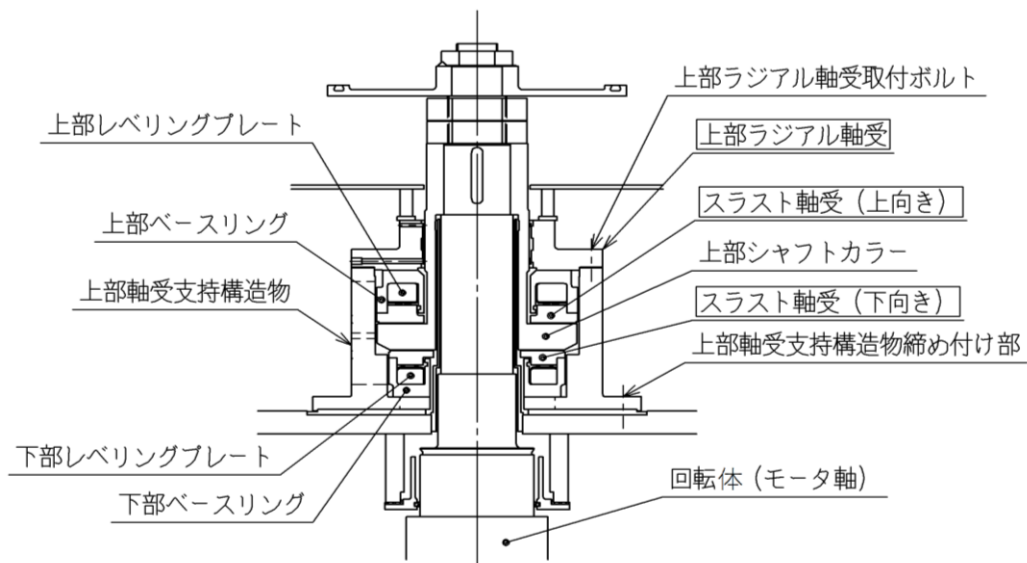


図3 PLRポンプモータ軸受構造図 (上部)

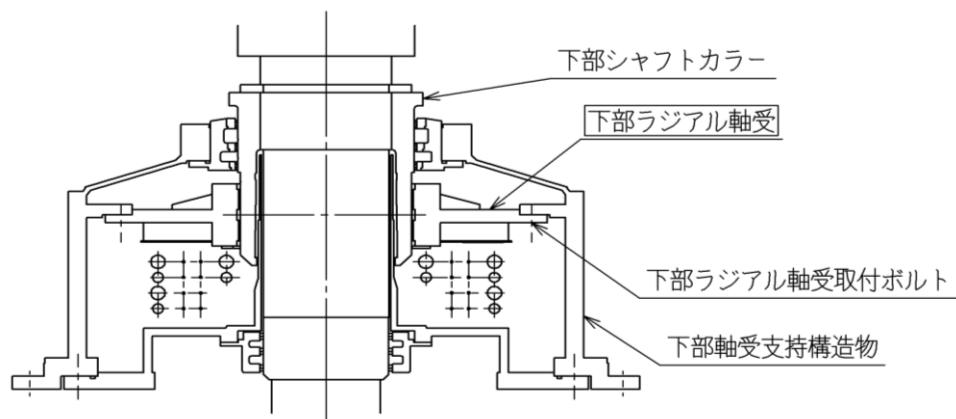


図4 PLRポンプモータ軸受構造図 (下部)

4.3 スラスト軸受の許容荷重

スラスト軸受の許容荷重については、軸受構造上の許容荷重と油膜形成上の許容荷重を比較することで求める。

a. 軸受構造上の許容荷重

軸受構造物については軸受を構成する各部品について、上向き及び下向きスラスト荷重に対する許容荷重を算出する。当該モータにおいては、構成部品のうちで最も低い許容荷重を有する箇所はベースリングであり、軸受が動作を継続できる最大の荷重を軸受構造物の許容荷重としている。

b. 油膜形成上の許容荷重

油膜形成上の許容荷重は軸受油膜特性（油膜厚さと軸受荷重の関係）と最小油膜厚さより求めている（図5参照）。

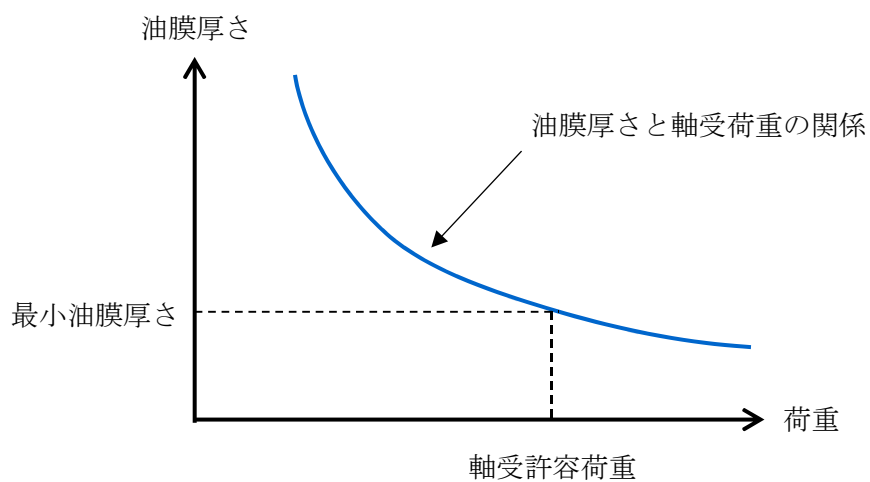


図5 軸受許容荷重算出概念図

c. 軸受の許容荷重

スラスト軸受の許容荷重を表1に示す。

表1 PLRポンプモータ軸受の許容荷重

種別	軸受構造上の許容荷重	油膜形成上の許容荷重	許容荷重
スラスト軸受 (上向き)			
スラスト軸受 (下向き)			

4.4 スラスト軸受の発生荷重

4.4.1 鉛直上向き

PLRポンプ軸には、再循環系の圧力等によるスラスト力が上向きに作用している。鉛直上向きの発生荷重については上向きに作用するスラスト力と基準地震動 S_s による鉛直方向加速度により発生する荷重を下式により算出する。また、上向きに作用するスラスト力には下向きに発生するスラスト流体力は考慮しない。

なお、評価で用いる加速度は、添付書類「VI-2-5-2-1-1 管の耐震性についての計算書（原子炉再循環系）」の解析を行った結果で得られた、A系及びB系の2系統あるPLRポンプ及びモータの質点に生じる鉛直方向加速度のうち最大の値を用いる。

$$\begin{aligned} \text{「発生荷重」} &= \text{「内圧等によるスラスト力」} + \text{「浮力」} \\ &+ \text{「回転体の質量」} \times \text{「鉛直方向地震加速度－重力加速度」} \end{aligned}$$

<算出方法>

以下の式により算出する。

$$A_1 = B_1 + C + D \times (E - g)$$

A_1 : 鉛直上向き方向発生荷重

B_1 : 内圧等によるスラスト力（上向き）（スラスト流体力除く）（= (kN)）*1

C : 浮力（= (kN)）*2

D : 回転体の質量（= (ton)）

E : 鉛直方向地震加速度（=24(m/s²））

g : 重力加速度（=9.80665(m/s²））

注記 *1 : PLRポンプ通常運転中は内圧等によるスラスト力が上向きに作用しているため、モータスラスト軸受（上向き）にてスラスト力を保持している。

*2 : PLRポンプ回転体の一部は水中にあるため浮力が作用する。

$$\begin{aligned} \text{「浮力」} &= \text{「PLRポンプ回転体接液部の体積(m}^3\text{)」} \\ &\times \text{「水密度(kg/m}^3\text{)」} \times g \times 10^{-3} \\ &= \text{} \times 755 \times 9.80665 \times 10^{-3} = \text{} \div \text{} \text{(kN)} \\ &\text{(水密度はプラント通常運転時における値)} \end{aligned}$$

以上より

$$A_1 = \text{} + \text{} + \text{} \times (24 - 9.80665) = \text{} \div \text{} \text{(kN)}$$

であるため鉛直上向き方向発生荷重は $A_1 = \text{}$ (kN)となる。

4.4.2 鉛直下向き

「4.4.1 鉛直上向き」と同様に、鉛直下向きに対して評価を行う。鉛直下向きの評価にあたっては、下向きに発生するスラスト流体力を考慮する。浮力については考慮しない。

$$\begin{aligned} \text{「発生荷重」} &= \text{「回転体の質量」} \times \text{「鉛直方向地震加速度} + \text{重力加速度」} \\ &\quad - \text{「内圧等によるスラスト力」} \end{aligned}$$

<算出方法>

以下の式により算出する。

$$A_2 = D \times (E + g) - B_2$$

A_2 : 鉛直下向き方向発生荷重

B_2 : 内圧等によるスラスト力 (上向き) (スラスト流体力含む)
(= (kN))

D : 回転体の質量 (= (ton))

E : 鉛直方向地震加速度 (= $24 \text{ (m/s}^2\text{)}$)

g : 重力加速度 (= $9.80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$)

以上より

$$A_2 = \text{} \times (24 + 9.80665) - \text{} = \text{} \div \text{} \text{ (kN)}$$

であるため鉛直下向き方向発生荷重は $A_2 = \text{} \text{ (kN)}$ となる。

4.5 スラスト軸受の評価結果

評価結果を表2に示す。評価の結果、PLRポンプモータのスラスト軸受部に発生する荷重は許容荷重以下であるため、PLRポンプモータのスラスト軸受の健全性は確保される。

表2 PLRポンプモータ軸受の評価結果

種別	発生荷重	許容荷重
スラスト軸受 (上向き)		
スラスト軸受 (下向き)		

5. P L Rポンプ及びモータのラジアル軸受評価

5.1 ラジアル軸受の評価方針

P L Rポンプ及びモータのラジアル軸受の評価方法は4項のスラスト軸受と同様，ラジアル方向の許容値と発生する水平方向荷重を比較することで行う。

なお，ラジアル軸受としては，P L Rポンプに1つ，P L Rポンプモータに2つある。

5.2 ポンプ軸受の構造概要

P L Rポンプ軸受の構造図を図6に示す。P L Rポンプのラジアル軸受は水中軸受であり，ポンプ軸と軸受の間に水膜を形成することで，ポンプの回転機能を維持している。P L Rポンプ軸受は，静止構造物であるケーシングカバーに8本の軸受取付ボルトにて取付けられている。

なお，P L Rポンプモータのラジアル軸受については図3及び図4に示すとおりである。

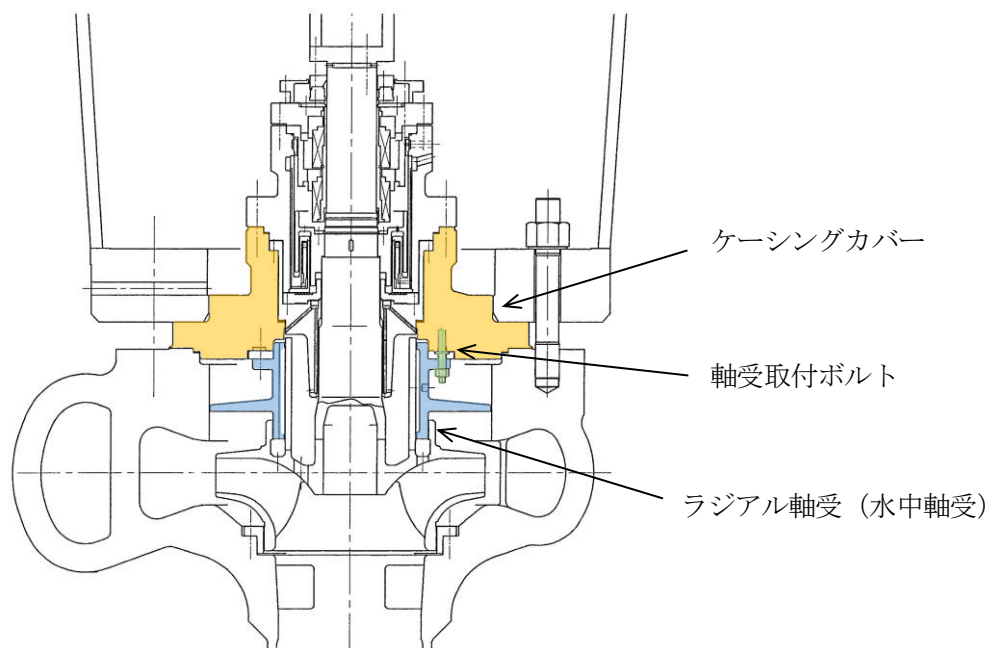


図6 P L Rポンプ軸受構造図

5.3 ラジアル軸受の許容値

4.3項のスラスト軸受と同様の考え方により P L R ポンプ及びモータのラジアル軸受の許容値としては、以下の2つの考え方に基づいて設定している。

【 P L R ポンプ】

a. 軸受構造上の許容応力

P L R ポンプ軸受の構造上の許容応力として、軸受を締結している軸受取付ボルトの許容応力として設定するもの。

b. 水膜形成上の許容荷重

P L R ポンプ軸と軸受間の水膜が維持される（ポンプ軸と軸受が接触しない）許容荷重として設定するもの。

【 P L R ポンプモータ】

a. 軸受構造上の許容荷重

P L R ポンプモータ軸受の構造上の許容荷重として、上部ラジアル軸受取付ボルトと下部ラジアル軸受取付ボルトの許容荷重として設定するもの。

b. 油膜形成上の許容荷重

P L R ポンプモータ軸と軸受間の油膜が維持される（モータ軸と軸受が接触しない）許容荷重として設定するもの。

P L R ポンプ軸受の許容値を表3に、 P L R ポンプモータ軸受の許容荷重を表4に示す。

表3 P L R ポンプ軸受の許容値

種別	軸受構造上の 許容応力	水膜形成上の 許容荷重
ラジアル軸受		

表4 P L R ポンプモータ軸受の許容荷重

種別	軸受構造上の 許容荷重	油膜形成上の 許容荷重	許容荷重
上部ラジアル軸受			
下部ラジアル軸受			

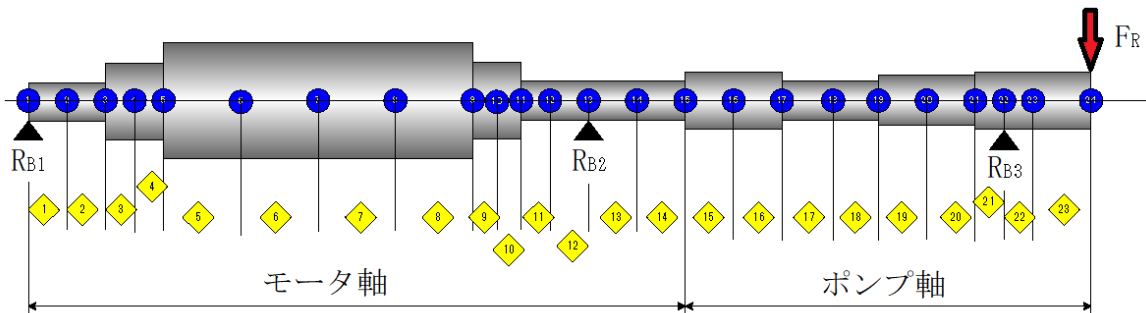
5.4 ラジアル軸受の発生荷重

ラジアル軸受の発生荷重については、ポンプ回転による半径方向荷重(ラジアル流体力)と基準地震動 S_s による地震荷重を考慮し、図7に示すPLRポンプ及びモータの回転体系の荷重のつり合い解析にて求める。

$$\text{「発生荷重」} = \text{「ラジアル流体力」} + \text{「地震荷重」}$$

地震時の発生加速度は、添付書類「VI-2-5-2-1-1 管の耐震性についての計算書(原子炉再循環系)」の解析を行った結果で得られた、A系及びB系の2系統あるPLRポンプ及びモータの質点に生じる水平方向加速度のうち最大の値を用いる(下表参照)。

評価部位	水平方向加速度
ポンプ部	32 (m/s ²)
モータ部	41 (m/s ²)



記号の説明

記号	記号名称
R _{B1}	モータ上部ラジアル軸受部反力
R _{B2}	モータ下部ラジアル軸受部反力
R _{B3}	ポンプラジアル軸受部反力
F _R	ラジアル流体力

図7 回転体の荷重のつり合い解析モデル

図7のモデルによる荷重のつり合い解析を行い、各ラジアル軸受の反力R_{B1}(モータ上部ラジアル軸受)、R_{B2}(モータ下部ラジアル軸受)、R_{B3}(ポンプラジアル軸受)を求め、これをラジアル軸受の発生荷重としている。解析結果を表5に示す。

表5 ラジアル軸受の発生荷重

種別	発生荷重
モータ上部ラジアル軸受	85 (kN)
モータ下部ラジアル軸受	136 (kN)
ポンプラジアル軸受	34 (kN)

5.5 ラジアル軸受の評価結果

PLRポンプ軸受の評価結果を表6に、PLRポンプモータ軸受の評価結果を表7に示す。評価の結果、PLRポンプ及びモータのラジアル軸受部に発生する荷重は許容値以下であるため、PLRポンプ及びモータのラジアル軸受の健全性は確保される。

表6 PLRポンプ軸受の評価結果

種別	発生値	許容値
ラジアル軸受 (水膜形成上)		
ラジアル軸受 (軸受構造上)		

表7 PLRポンプモータ軸受の評価結果

種別	発生荷重	許容荷重
上部ラジアル軸受		
下部ラジアル軸受		

4項及び5項の評価で考慮した各発生荷重について、表8「PLRポンプ及びモータ軸受到作用する荷重」にまとめる。

表8 P L R ポンプ及びモータ軸受に作用する荷重

No.	P L R ポンプ及びモータ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	内圧による荷重	P L R 系統内圧により発生するスラスト力（上向き）	スラスト軸受（上向き，下向き）	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。
2	浮力	回転体接液部にかかる浮力（上向き）	スラスト軸受（上向き）	鉛直上向き	運転中，軸受に定常的に作用する鉛直上向きの荷重である。 保守的な評価として，スラスト軸受（下向き）に対しては考慮せず，スラスト軸受（上向き）に対しては考慮する。
			スラスト軸受（下向き）	考慮しない	
3	死荷重	回転体自重（下向き）	スラスト軸受（上向き，下向き）	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。
4	機械的荷重	機械の振動による荷重	ラジアル軸受	考慮しない	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。
5		ラジアル流体力	ラジアル軸受	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。
6		スラスト流体力	スラスト軸受（上向き）	考慮しない	スラスト流体力は，以下の2つの荷重が発生する。 ①ポンプヘッドによる荷重（鉛直下向き） ②羽根車の吸込口から出口に向かって水流が方向変化することによる荷重（鉛直上向き） それぞれを足し合わせたスラスト流体力は鉛直下向きの荷重となるため，保守的な評価として，スラスト軸受（上向き）に対しては考慮せず，スラスト軸受（下向き）に対しては考慮する。
7			スラスト軸受（下向き）	鉛直下向き	
8	地震荷重		スラスト軸受（上向き，下向き）	鉛直方向	地震時に鉛直方向加速度の影響を受けることから考慮している。
9			ラジアル軸受	水平方向	地震時に水平方向加速度の影響を受けることから考慮している。

6. コーストダウン運転時の評価

6.1 評価方針

前項までの評価により、PLRポンプ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、PLRポンプの電源（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。

PLRポンプ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、水膜及び油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PLRポンプ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、2台のPLRポンプ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PLRポンプ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。

解析コードは、「REDY」及び「SCAT」を使用し、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

6.2 評価条件

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「原子炉冷却材ポンプの軸固着」であり、PLRポンプ全台が時刻0秒で軸固着することを仮定する。解析結果の判断基準は、設置変更許可申請書記載の事故に対する判断基準である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 10.34(MPa [gage]) (最高使用圧力の 1.2 倍) 以下とする。

注記* : MOX燃料採用時の設置変更許可申請書（平成 20 年 10 月 28 日 平成 18・10・23 原第 12 号 許可）

6.3 評価結果

燃料被覆管温度の解析結果を図8に示す。

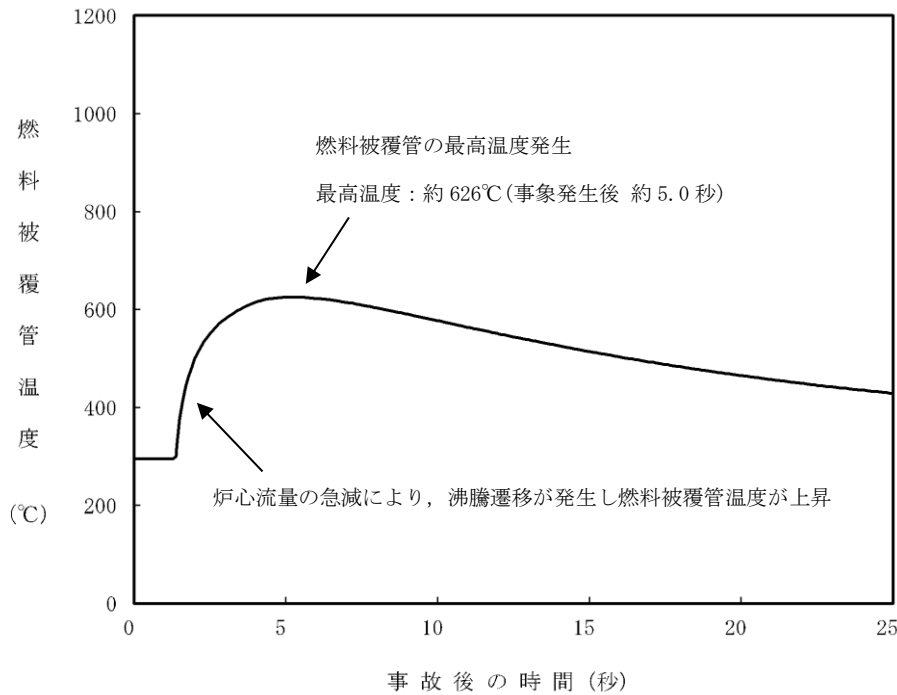


図8 P L R ポンプ全台軸固着 燃料被覆管温度変化

6.3.1 事象進展

P L R ポンプの全台軸固着により、炉心流量が急減するため、炉心のボイド率が上昇する。ボイド率の上昇により原子炉水位は上昇するため、約 1.5 秒でタービントリップに至り、原子炉はスクラムする。また、炉心流量急減により沸騰遷移が発生し、燃料被覆管温度が約 626°C まで上昇する。

なお、本解析は保守的にリウエットを考慮しないものとしていることから、ゆるやかに温度が低下しているが、実際にはリウエットすることにより急激に温度が低下すると考えられる。

6.3.2 評価項目等

燃料被覆管の温度は、P L R ポンプ全台軸固着による炉心流量の急減により、沸騰遷移が生じる期間が最も厳しく、事象発生から約 5.0 秒で最高の約 626°C に到達するが、判断基準である 1200°C に対して十分な余裕がある。

また、原子炉圧力の最大値は、逃がし安全弁の作動により、約 8.40 (MPa [gage]) までの上昇にとどまるため、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 10.34 (MPa [gage]) を十分下回る。従って、保守的に通常運転時の P L R ポンプ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。

7. 結論

クラス1ポンプであるPLRポンプについて、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、PLRポンプ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。