

資料R3-199-1

内部火災影響評価

【JRR-3設工認その13 第7編】

令和2年6月19日

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所

概要

JRR-3原子炉施設の設置変更許可申請書に示した内部火災に対する防護対象設備について、発生が想定される内部火災から必要な安全機能が護られることを確認した。

設計条件

本申請に係る設計条件は、火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の低減の三方策を適切に組み合わせ、火災により原子炉の安全を損なわないことである。このことを確認するため、以下に示す内部火災に対する防護対象設備(以下「防護対象設備」という。)について、原子炉の安全を確保するのに必要な安全機能が火災により喪失しないことを確認する。

安全機能	構築物、系統及び機器	設置場所
過大な反応度の添加防止	制御棒駆動装置	原子炉建家(地階)
炉心の形成	炉心構造物	原子炉建家(原子炉プール内)
	燃料要素	
炉心の冷却	冠水維持設備(サイフォンブレイク弁を除く。)	原子炉建家(原子炉プール内)
	1次冷却系設備	原子炉建家(原子炉プール内)
炉心の保護	原子炉プールコンクリート躯体	原子炉建家(1階)
重水を内蔵する機能	重水タンク、重水冷却系設備	原子炉建家(地階、原子炉プール内)
放射性物質の貯蔵機能	使用済燃料プール(使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	原子炉建家(1階)
原子炉の緊急停止	制御棒、スクラム機構	原子炉建家(1階、地階)
未臨界維持	制御棒	原子炉建家(1階)
工学的安全施設及び原子炉停止系統への作動信号の発生	安全保護回路(停止系)	原子炉建家(地階、1階)
		原子炉制御棟(中央制御室)
原子炉停止後の除熱	1次冷却材補助ポンプ	原子炉建家(地階)
安全上特に重要な関連施設	非常用電源系	原子炉制御棟(地階)
計測・制御(安全保護機能を除く。)	中性子計装設備*、プロセス計装設備*	原子炉建家(地階、1階)
		原子炉制御棟(中央制御室)

* : 崩壊熱除去運転のために監視が必要な設備に限る。

設計仕様

本申請に係る防護対象設備の設計仕様は以下のとおり。防護対象設備の配置を図-7.1に示す。なお、本申請に係る防護対象設備は全て既設であるため、工事を伴うものではない。

名称	主要な構成設備	主要な構造等
制御棒駆動装置	制御棒駆動機構管内駆動部、制御棒駆動機構管外駆動部、制御棒駆動機構案内管	制御棒駆動機構管内駆動部は原子炉プール水中に設置されている。制御棒駆動機構案内管は原子炉建家地下に設置されており、不燃材により構成されている。
炉心構造物	燃料要素、照射筒、ベリリウム反射体、制御棒案内管、格子板、格子板支持胴、プレナム等	原子炉プール水中に設置されている。
燃料要素	標準型燃料要素、フォロー型燃料要素	原子炉プール水中に設置されている。
冠水維持設備(サイフォンブレイク弁を除く。)	原子炉プール躯体(ライニングを含む)、下部遮蔽体、前部水封用止板、1次冷却系配管(原子炉プール内)	原子炉建家1階に設置されており、いずれも不燃材により構成されている。
1次冷却系設備	1次冷却材主ポンプ、1次冷却材補助ポンプ、熱交換器、 ¹⁶ N減衰タンク、配管	原子炉建家地階に設置されており、各機器の主要材料には不燃材を用いている。
原子炉プールコンクリート躯体	原子炉プールコンクリート躯体	原子炉建家1階に設置されており、不燃材により構成されている。
重水タンク、重水冷却系設備	重水タンク、重水ポンプ、重水溢流タンク、熱交換器、配管	重水タンクは原子炉プール水中に設置されている。重水冷却系設備は原子炉建家地階に設置されており、各機器の主要材料には不燃材を用いている。
使用済燃料プール(使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	使用済燃料プール、使用済燃料貯蔵ラック	使用済燃料プールは原子炉建家1階に設置されており、不燃材により構成されている。使用済燃料貯蔵ラックは使用済燃料プール水中に設置されている。

設計仕様

本申請に係る防護対象設備の設計仕様は以下のとおり。なお、本申請に係る防護対象設備は全て既設であるため、工事を伴うものではない。

名称	主要な構成設備	主要な構造等
制御棒、スクラム機構	中性子吸収体、フォロー型燃料要素 制御棒駆動機構管内駆動部、制御棒案内管、制御棒駆動機構案内管	中性子吸収体、フォロー型燃料要素、制御棒駆動機構管内駆動部、制御棒案内管は原子炉プール水中に設置されている。制御棒駆動機構案内管は原子炉建家地下に設置されており、不燃材により構成されている。
制御棒	中性子吸収体、フォロー型燃料要素 制御棒駆動機構管内駆動部	原子炉プール水中に設置されている。
安全保護回路(停止系)	安全系中性子束高(高設定、低設定)、対数出力炉周期短、1次冷却材流量低、1次冷却材炉心出口温度高、1次冷却材炉心出入口温度差大、原子炉プール水位低、サイフォンブレーク弁開等	構成する機器は不燃材又は難燃材を使用し、ケーブルは難燃性のものを使用しており、可能な限り※鋼材製のケーブルダクト、蓋付きケーブルトレイ又は電線管により外部と隔離している。
1次冷却材補助ポンプ	1次冷却材補助ポンプ	原子炉建家地下に設置されており、主要材料は不燃材を用いている。 2系統あるポンプ電動機間は十分な離隔距離を有している(機器ベース間:30cm)。
非常用電源系	非常用発電機、蓄電池、静止型インバータ装置	金属製の筐体を用いている。ケーブルには難燃性のものを使用しており、可能な限り※鋼材製のケーブルダクト、蓋付きケーブルトレイ又は電線管により外部と隔離している。
中性子計装設備、プロセス計装設備	対数出力炉周期系、安全系、1次冷却材流量、1次冷却材炉心出口温度	構成機器は不燃材又は難燃材を使用し、ケーブルは難燃性のものを使用しており、検出器から安全保護系制御盤までは、可能な限り※鋼材製のケーブルダクト、蓋付きケーブルトレイ又は電線管により外部と隔離している。

※:原子炉建家貫通部については、別途、ケーブルの分離設備の設計及び工事の計画の認可申請を行う。

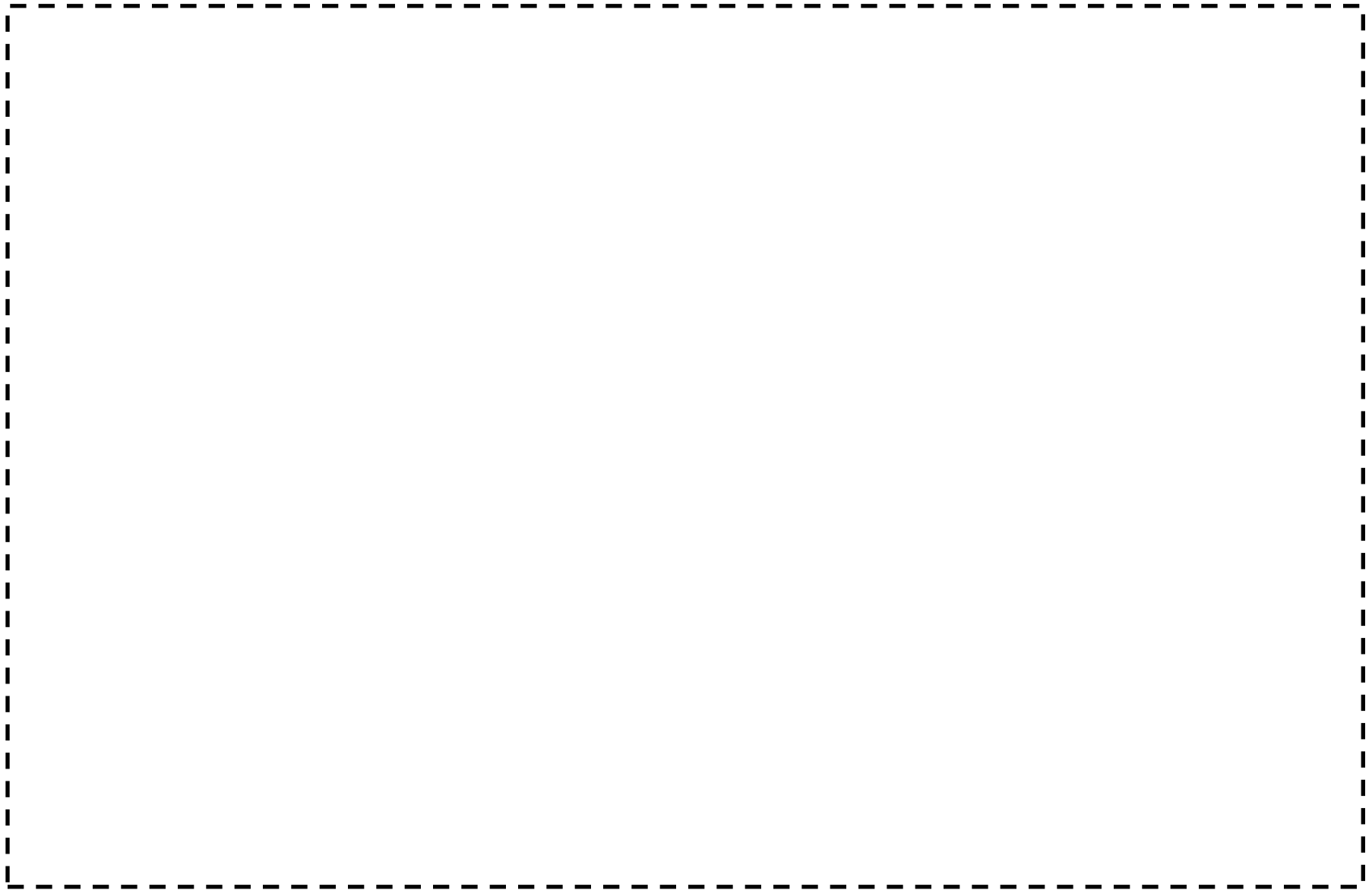


図-7.1 防護対象設備の配置図

評価条件

- (1) 防護対象設備が設置される区画において火災が発生するおそれがある場合には、火災による防護対象設備への影響を評価する。
- (2) 内部火災により防護対象設備が損傷を受けるおそれのある場合には、護るべき安全機能への影響を評価する。

評価結果

内部火災による防護対象設備への影響評価結果を次ページ以降に示す。評価の結果、原子炉の安全を確保するのに必要な安全機能を、内部火災により喪失することはない。

名称	想定発火源	防護対象設備への影響	護るべき安全機能への影響
制御棒 駆動装置	電源ケーブル、駆動モータ、可動コイル	防護対象設備自身が発火源となり得る。	制御棒駆動装置が火災により機能を喪失した場合、制御棒は即座に自重落下により炉心に挿入され、原子炉は自動停止するため停止機能への影響はない。火災により焼損した場合、自動で機能が復帰することはない、制御棒が引き抜かれることはないため、炉心に正の反応度が添加されることはない。
炉心構造物	炉心構造物、燃料要素は全て不燃材により構成されているうえ、動的設備を有していない。	なし	なし
燃料要素	加えて原子炉プール内に設置されているため、想定される発火源はない。		
冠水維持設備 (サイフォンブレイク弁を除く。)	原子炉建家1階実験設備、原子炉プール躯体周りの電源ケーブル	冠水維持設備は、いずれも不燃材により構成されているため、火災により影響を受けることはない。	なし
1次冷却系 設備	ポンプ電動機、電源ケーブル	防護対象設備自身が発火源となり得る。	1次冷却系設備のポンプ電動機又は電源ケーブルが焼損した場合、「1次冷却材主ポンプ停止」、「1次冷却材補助ポンプ停止」または「1次冷却材流量低」により原子炉は自動停止するため停止機能への影響はない。(原子炉停止後の崩壊熱除去への影響については1次冷却材補助ポンプに記載する) また、各機器の主要材料には不燃材を用いているため、原子炉が停止し、30秒の崩壊熱除去が終了した以降は1次冷却材を保持する機能は喪失することはない。
原子炉プール コンクリート躯体	原子炉建家1階実験設備、原子炉プール躯体周りの電源ケーブル	不燃材により構成されているため、火災により影響を受けることはない。	なし
重水タンク、 重水冷却系設備	ポンプ電動機、電源ケーブル 重水タンクは原子炉プール内に設置されているため、重水タンクに対し想定される発火源はない。	防護対象設備自身が発火源となり得る。	重水冷却系設備のポンプ電動機又は電源ケーブルが焼損した場合、「重水流量低」により原子炉は自動停止するため停止機能への影響はない。 また、各機器の主要材料には不燃材を用いているため、重水を保持する機能は喪失することはない。
使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵 ラックを含む。)	原子炉建家1階実験設備、使用済燃料プール(原子炉プール躯体)周りの電源ケーブル ※使用済燃料貯蔵ラックは使用済燃料プール水中に設置されているため、これに対する想定される発火源はない。	使用済燃料プールは不燃材により構成されているため、火災により影響を受けることはない。	なし

名称	想定発火源	防護対象設備への影響	護るべき安全機能への影響
制御棒、スクラム機構	制御棒駆動機構管外駆動部(電源ケーブル、駆動モータ、可動コイル) ※中性子吸収体、フォロー型燃料要素、制御棒駆動機構管内駆動部、制御棒案内管は原子炉プール水中に設置されているため、これらに対する想定される発火源はない。	制御棒駆動機構案内管は不燃材により構成されているため、火災により影響を受けることはない。	なし
制御棒	中性子吸収体、フォロー型燃料要素、制御棒駆動機構管内駆動部は原子炉プール水中に設置されているため、想定される発火源はない。	なし	なし
安全保護回路(停止系)	ケーブル、盤	防護対象設備自身が発火源となり得る。	安全保護回路は2系統に多重化し、それぞれ分離独立して設置されているため、一方の系統が火災により機能を喪失した場合においても、もう一方の系統により必要な安全機能は維持されることを確認した。
1次冷却材補助ポンプ	ポンプ電動機、電源ケーブル	防護対象設備自身が発火源となり得る。	1次冷却材補助ポンプ電動機又は電源ケーブルが焼損した場合、「1次冷却材補助ポンプ停止」により原子炉は自動停止するため停止機能への影響はない。原子炉停止後の30秒間の崩壊熱除去のため、2系統あるうちの少なくとも1系統は火災から護られることを確認した。
非常用電源系	非常用発電機、燃料槽、蓄電池、静止型インバータ装置、電源ケーブル	防護対象設備自身が発火源となり得る。	非常用電源系は2系統に多重化し、それぞれ分離独立して設置されているため、一方の系統が火災により機能を喪失した場合においても、もう一方の系統により必要な安全機能は維持されることを確認した。
中性子計装設備、プロセス計装設備	ケーブル、盤	防護対象設備自身が発火源となり得る。	護るべき安全機能(対数出力炉周期系、安全系、1次冷却材流量、1次冷却材炉心出口温度)は2系統に多重化し、それぞれ分離独立して設置されているため、一方の系統が火災により機能を喪失した場合においても、もう一方の系統により必要な安全機能は維持されることを確認した。

検査項目及び方法

(1) 寸法検査

方法: 1次冷却材補助ポンプの機器ベース間の寸法を測定により確認する。

判定: 1次冷却材補助ポンプの機器ベース間が30cm以上離れていること。

技術基準への適合性

技術基準の条項		評価の必要性の有無		適合性
		有・無	項・号	
第一条～第二十条		無	—	—
第二十一条	安全設備	有	第1項 第2号	次ページに示す。
第二十二条～第七十一条		無	—	—

該当条文

第二十一条(安全設備)

安全設備は、次に掲げるところにより設置されたものでなければならない。

- 一 第二条第二項第二十八号ロに掲げる安全設備は、二以上の原子力施設において共有し、又は相互に接続するものであってはならない。ただし、試験研究用等原子炉の安全を確保する上で支障がない場合にあつては、この限りでない。
- 二 第二条第二項第二十八号ロに掲げる安全設備は、当該安全設備を構成する機械又は器具の単一故障(試験炉許可基準規則第十二条第二項に規定する単一故障をいう。第三十二条第三号において同じ。)が発生した場合であつて、外部電源が利用できない場合においても機能できるよう、当該系統を構成する機械又は器具の機能、構造及び動作原理を考慮して、多重性又は多様性を確保し、及び独立性を確保するものであること。ただし、原子炉格納容器その他多重性、多様性及び独立性を有することなく試験研究用等原子炉の安全を確保する機能を維持し得る設備にあつては、この限りでない。
- 三 安全設備は、設計基準事故時及び設計基準事故に至るまでの間に想定される全ての環境条件において、その機能を発揮することができるものであること。
- 四 火災により損傷を受けるおそれがある場合においては、次に掲げるところによること。
- イ 火災の発生を防止するために可能な限り不燃性又は難燃性の材料を使用すること。
- ロ 必要に応じて火災の発生を感知する設備及び消火を行う設備を設けられていること。
- ハ 火災の影響を軽減するため、必要に応じて、防火壁の設置その他の適切な防火措置を講ずること。
- 五 前号ロの消火を行う設備は、破損、誤作動又は誤操作が起きた場合においても試験研究用等原子炉を安全に停止させるための機能を損なわないものであること。
- 六 蒸気タービン、ポンプその他の機器又は配管の損壊に伴う飛散物により損傷を受け、試験研究用等原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合には、防護施設の設置その他の適切な損傷防止措置が講じられていること。

適合性について

- 一 本申請の申請範囲外である。
- 二 内部火災に対する防護対象設備に該当し、火災による影響を受けるおそれのある設備のうち、火災発生時においても原子炉の安全性を確保するのに必要な安全機能を有する設備については、火災発生時においても必要な安全機能が達成できるよう多重性または多様性を確保し、及び独立性を確保した設計となっている。
- 三 本申請の申請範囲外である。
- 四 本申請の申請範囲外である。
- 五 本申請の申請範囲外である。
- 六 本申請の申請範囲外である。

参 考

概要

原子炉運転中に発生した、一方の1次冷却材補助ポンプ(以下「補助ポンプ」という。)からの潤滑油漏洩火災による他方の補助ポンプへの影響を評価し、離隔距離の妥当性及びそのような状況でも崩壊熱除去運転を継続できることを示す。

図-7.2に示すように、1次冷却材ポンプはそれぞれ分離独立し設置しており、4基あるポンプのうちいずれかが焼損した場合は即座に「1次冷却材主ポンプ停止」または「1次冷却材補助ポンプ停止」により原子炉は自動停止する。原子炉の自動停止後は4基あるポンプのうちいずれか1基が30秒間運転継続できていれば十分に炉心の崩壊熱は除去される。ポンプ1基の機能喪失により原子炉が自動停止した場合でも、残りの3基は独立し設置しているため運転が継続されるが、安全側の評価を行うため2基が近接し設置されている補助ポンプのうち1基を発火源とし、冷却能力の高い1次冷却材主ポンプ2基の機能喪失を仮定する。

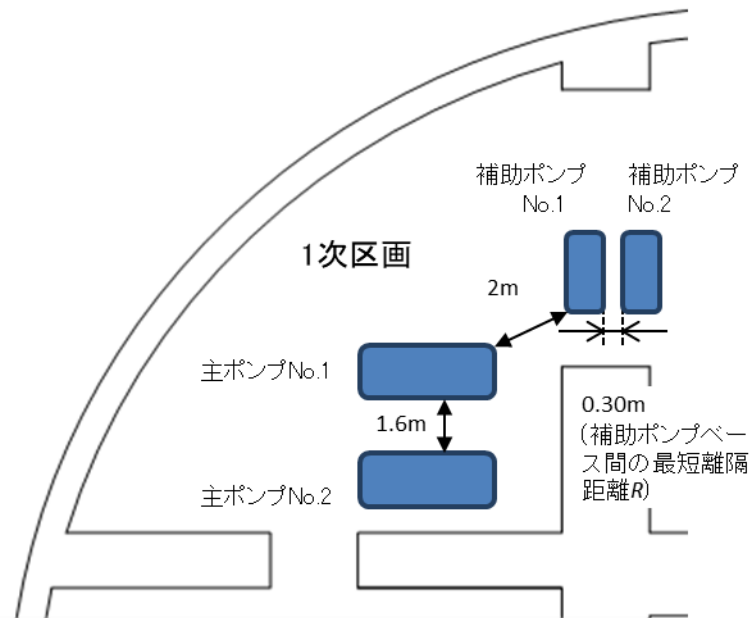


図-7.2 1次冷却材ポンプの配置図

評価手法

「原子力規制委員会 原子力発電所の内部火災影響評価ガイド(平成25年10月)」(以下「ガイド」という。)を参考に、FDT^s(Fire Dynamics Tools)のモデルを用いて評価する。

ここでポンプが正常に作動していることの評価方法として、周囲温度40℃以下のポンプ連続運転中における軸受許容温度上昇値 $\Delta t_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ 及び軸受許容最高温度 $t_{max} \leq 80^\circ\text{C}$ という2つの基準がある。なお、原子炉運転中の軸受温度は約50℃である。図-7.3に示すように軸受はベアリングケース内に存在するため、火災によるベアリングケースの表面温度上昇値 $\Delta T[^\circ\text{C}]$ が、通常運転中の軸受温度50℃と比較し、十分小さいことを示せば、当該事象が発生した場合でも他方の補助ポンプは正常に作動していると評価できる。

補助ポンプのベアリングケースの材質はFC20(ねずみ鉄)である。

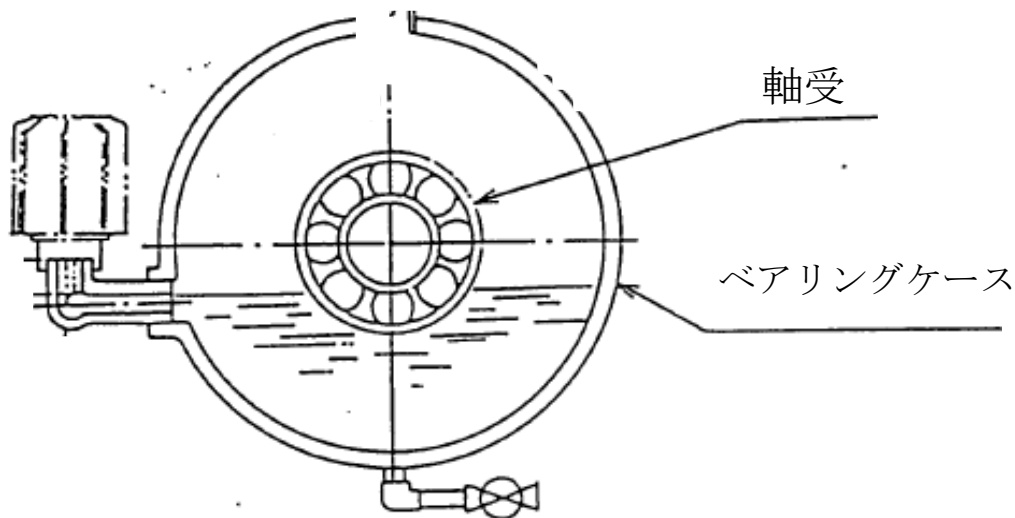


図-7.3 補助ポンプの軸受とベアリングケース

評価

補助ポンプは潤滑油としてタービン油を約1.3L内包している。ガイドでは潤滑油漏洩量を内包油量の10%と仮定しているため、ガイドを参考に潤滑油漏洩量を保守的に0.15Lとする。

ターゲット位置における輻射熱流束 \dot{q}'' [kW/m²]及び燃焼期間 t_b [s]を用いて、離隔距離0.30[m]に位置する他方の補助ポンプのベアリングケース表面温度上昇値 ΔT [°C]を算出する。

①ターゲット位置における輻射熱流束 \dot{q}'' [kW/m²]

\dot{q}'' は以下の式で算出する。

$$\dot{q}'' = HRR \cdot \chi_r / 4\pi R^2$$

ただし、 $HRR = \dot{m}'' \Delta H_{c,eff} \times (1 - e^{-k\beta D}) \cdot A_{dike}$ である。

パラメータ		値	備考
\dot{m}''	燃焼速度[kg/m ² ・s]	0.039	ガイド表B.4より引用
$\Delta H_{c,eff}$	燃焼熱[kJ/kg]	46000	ガイド表B.4より引用
$k\beta$	経験的乗数[m ⁻¹]	0.7	ガイド表B.4より引用
D	プール火災の直径[m]	0.304	$D = \sqrt{4A_{dike}/\pi}$
A_{dike}	燃焼面積[m ²]	0.0725	堰の面積(0.25m × 0.29m)
χ_r	放射率[-]	0.30	FDT ^s より引用
R	プール火災の中心からターゲットまでの距離[m]	0.30	図-7.2参照

以上より、 $\dot{q}'' = 6.61 \text{ kW/m}^2$ を得る。

評価

②燃焼期間 t_b [s]

t_b は以下の式で算出する。

$$t_b = 4V/\pi D^2 v$$

ただし、 $v = \dot{m}''/\rho$ である。

パラメータ		値	備考
V	潤滑油の体積[m ³]	1.5×10^{-4}	
D	プール火災の直径[m]	0.304	
\dot{m}''	燃焼速度[kg/m ² ・s]	0.039	ガイド表B.4より引用
ρ	潤滑油の密度[kg/m ³]	760	ガイド表B.4より引用

以上より、 $t_b = 40.32s$ を得る。

評価

③表面温度上昇値 ΔT [°C]

ΔT は以下の式で算出する。

$$\Delta T = \frac{2\dot{q}''\sqrt{a \cdot t_b}}{\lambda} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a \cdot t_b}\right) - \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t_b}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot t_b}}\right) \right]$$

ただし、 $a = \frac{\lambda}{\rho \times c_p}$ である。

また、相補誤差関数 $\operatorname{erfc}(x)$ は誤差関数 $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$ を用いて、

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2} du$$

$$\operatorname{erfc}(0) = 1$$

で定義される。

パラメータ		値	備考
\dot{q}''	ターゲット位置における輻射熱流束[kW/m ²]	6.61	
t_b	燃焼期間[s]	40.32	
λ	FC20(ねずみ鋳鉄)の熱伝導率[W/m・K]	40	参考文献[1]より引用
ρ	FC20(ねずみ鋳鉄)の密度[kg/m ³]	7106	参考文献[2]より引用
C_p	FC20(ねずみ鋳鉄)の比熱[kJ/kg・K]	0.45	参考文献[1]より引用
x	表面からの深さ[m]	0	

以上より、 $\Delta T = 4.2^\circ\text{C}$ を得る。

まとめ

潤滑油漏洩量	離隔距離	離隔位置における 輻射熱流束	燃焼期間	ベアリングケース 表面温度上昇値
0.15 L	0.30 m	6.61 kW/m ²	40.32 s	4.2 °C

一方の補助ポンプからの潤滑油漏洩火災が起きた場合、他方の補助ポンプのベアリングケース表面温度上昇値 ΔT は4.2°C程度と通常運転中の軸受温度50°Cより十分小さいことから、他方の補助ポンプの運転継続に影響を与えず離隔距離は十分である。よって、当該事象が発生した場合でも崩壊熱除去を継続することができる。

参考文献

- [1] 「金型鑄造した鑄鉄の熱的性質及び耐摩耗性」日本鑄造工学会, 1993年
- [2] 「鑄鉄の密度と音速に及ぼす空げきの影響」日本鑄造工学会, 1986年