

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-20-0700-11_改1
提出年月日	2021年5月27日

補足-700-11 クラス1容器の規定を準用した耐圧部ボルト評価の考え方
について

2021年5月

東北電力株式会社

1. はじめに

重大事故等クラス2機器のうち、設計・建設規格クラス2機器の規定を満足しない耐圧部ボルトはクラス1容器の規定を参考にして評価を実施している。

本資料では、クラス1容器の規定を参考にして実施した耐圧部ボルトの評価が保守的であることを説明する。

なお、本評価方法については、先行プラントにおいても実績のあるものである。

2. 対象機器

詳細な評価が必要な耐圧部ボルトを以下に示す。

機器区分	対象機器	評価対象ボルト
ポンプ	原子炉補機冷却水ポンプ	ケーシングボルト

3. 耐圧部ボルト評価方法

重大事故等クラス2機器のうち、2. 対象機器に示す耐圧部ボルトは、公式による評価である設計・建設規格 解説 PMC-3510 を満足しないため、より精緻な評価を実施する必要がある。

このため、設計・建設規格 解説 PMC-3510 及び設計・建設規格 PMB-3210 の規定より、クラス1容器のボルト等の応力評価の規定である設計・建設規格 PVB-3121 による評価を実施する。

ただし、設計・建設規格 PVB-3121 を満足しないものもあることから、今回の評価においては、当該規定を参考とした評価を実施する。

3.1 許容応力

設計・建設規格 PVB-3121 の規定は、設計条件及び各供用状態におけるボルトの許容応力について定めたものであり、設計条件の評価である設計・建設規格 PVB-3121(1)においては、初期締付力である最高使用圧力におけるボルト荷重及びガスケット締付時のボルト荷重により生じる平均引張応力を設計応力強さ $S_m (=1/3 S_y)$ 以下に抑えることが規定されている。また、供用状態 A、供用状態 B 及び供用状態 C の評価である設計・建設規格 PVB-3121(2)においては、初期締付力に付加される荷重により生じる最大応力（平均引張応力と曲げ応力との和）を許容値 $3 S_m (= S_y)$ に抑え、平均引張応力を許容値 $2 S_m (=2/3 S_y)$ に抑えることにより、ボルトによるシール機能が要求される状態において弾性域に抑えることを要求している。

重大事故等時のボルトの評価においては、設計・建設規格 PVB-3121 を参考とし、重大事故等時の評価であることから供用状態ごとに規定されている許容値のうち平均引張応力に対して $2 S_m$ 、最大応力に対して $3 S_m$ を用いて評価を行う。

3.2 ボルトに発生する応力

ボルトに発生する応力については、許容値に対応した評価を行うため、重大事故等時において確実に機能を発揮するよう、設計・建設規格のボルト評価において規定されている荷重に

加え、重大事故等時の使用環境等を踏まえ規格では想定していない短期的な荷重を考慮しても、弾性域に抑えられ、シール性能を確保できることを確認する。

クラス1 機器において、設計・建設規格に基づく強度評価を実施する場合に考慮する設計機械的荷重としては、自重、配管反力、安全弁等の吹出し反力があるが、今回対象となる対象機器については、配管反力及び安全弁等の吹出し反力がかからないものの、耐圧部ボルト評価において考慮する荷重として、設計・建設規格 PVB-3121 に規定される荷重に加えて、内圧及び熱により付加される荷重とケーシングが変形した際に作用するモーメントを考慮したうえで評価を実施する。荷重の抽出フローについては、補足「ボルト評価で考慮すべき荷重の抽出（ケーシングボルト）」を参照。

表 1 考慮する荷重等整理表

荷重等	説明	保守的な考慮	設計・建設規格 規定	保守的に 考慮	評価	備考
使用状態での荷重	設計・建設規格 解説 PVB-3121(1)a. に規定される最高使用圧力によるボルト荷重を考慮。	設計・建設規格の規定に基づき算出。	◎	—	○*2	
ガスケット締付による荷重	設計・建設規格 解説 PVB-3121(1)b. に規定されるガスケット締付による荷重を考慮。	設計・建設規格の規定に基づき算出。	◎	—		
内圧により付加される荷重	内圧により初期締付力に付加される荷重を考慮。	荷重を算出する際に使用する圧力は、保守的に設定された最高使用圧力、もしくはSA条件を用いている。	◎*1	×	×*3	詳細は添付 1 参照
熱により付加される荷重	熱膨張差による荷重を考慮。	被締結体(ケーシング等)間にはガスケットが挿まれており、熱膨張率差による熱伸び差は吸収され、実際には熱による荷重の影響は非常に軽微であるが、保守的に熱伸び差により荷重が作用するものとする。	◎*1	○	○	詳細は添付 2 参照
回転体振動による加速度	耐震評価において、基礎ボルト、ポンプ取付ボルトに回転体振動による加速度を考慮。	ケーシングボルトはポンプ上下のケーシングを締結するものであり、基礎・架台と締結する固定点ではなく、回転体振動による加速度はケーシングボルトに発生しない。	×	×	×	詳細は添付 4 参照
内圧により付加される荷重に短期的な内圧による荷重(仮想)を考慮	内圧により初期締付力に付加される荷重を考慮。	荷重を算出する際に使用する圧力は、保守的に設定された最高使用圧力、もしくはSA条件に保守的に短期的な荷重(仮想)を加えて設定した内圧を用いている。	×	○	○*3	

荷重等	説明	保守的な考慮	設計・建設規格 規定	保守的に 考慮	評価	備考
竜巻	竜巻の影響(荷重)を考慮。	屋内機器への影響(荷重)が発生しない。	×	—	×	
火山(降下火砕物)	降下火砕物の影響(荷重)を考慮。	屋内機器への影響(荷重)が発生しない。	×	—	×	
津波	津波の影響(荷重)を考慮。	当該機器への影響(荷重)が発生しない。	×	—	×	
溢水	溢水の影響(荷重)を考慮。	当該機器への影響(荷重)が発生しない。	×	—	×	
地震	地震の影響(荷重)を考慮。	当該機器への影響(荷重)が発生するが、 評価を実施し問題ない。	×	—	×	
天候	天候の影響(荷重)を考慮。	当該機器への影響(荷重)が発生しない。	×	—	×	
人為的影響	故意によらない人為事象については、 影響(荷重)を考慮。	当該機器への影響(荷重)が発生しない。	×	—	×	
	誤操作による影響については、以下 が考えられる。 ・ 出口弁閉弁での締め切り運転に よる影響(荷重) ・ 入口弁閉弁によるポンプのキャ ビテーションによる影響(荷重) ・ 組立不良による影響(荷重)	<p>出口弁締め切りによる運転で、ポンプケーシング内部の圧力の上昇が考えられるが、ケーシング内圧力は最高使用圧力を超えないため、ケーシングボルトの荷重に影響を及ぼすものではない。</p> <p>キャビテーションの発生によりポンプケーシング内部の圧力変化が考えられるが、キャビテーションの発生は局所的な圧力変化であり、ポンプケーシング内全体の圧力に影響を与えるものではなく、ケーシングボルトの荷重に影響を及ぼすものではない。</p> <p>組立不良による影響(荷重)は、センターリング不良、重心のアンバランス等が考えられる。これらの影響(荷重)は、組立後の試運転時に確認する運用となっており、使用前に確認可能であることから、重大事故等時に使用する際に影響(荷重)を及ぼすものではない。</p>	×	—	×*3	

◎：設計・建設規格に規定されている荷重　○：考慮する荷重　×：考慮しない荷重

注記*1：内圧及び熱については荷重として考慮することが規定されている。

*2：「使用状態での荷重」及び「ガスケット締付による荷重」のうちいずれか大きい方の荷重を考慮

*3：起動時等の短期的な内圧による荷重は，従来設計において最高使用圧力により考慮しているが，保守的な評価とするため短期的な内圧により付加される荷重に付加して評価する。

表2 考慮するモーメント整理表

モーメント	説明	保守的な考慮	設計・建設規格規定	保守的に考慮	評価	備考
内圧によるケーシングの変形	内圧によりケーシングフランジが変形することにより付加されるボルトの曲げ応力を考慮	荷重を算出する際の使用する圧力は、保守的に設定された最高使用圧力、もしくは SA 条件に保守的に短期的な荷重(仮想)を加えて設定した内圧を用いている。	◎*	○	○	詳細は添付 3 参照
回転体回転によるモーメント	耐震評価において、軸直角方向のポンプ取付ボルトに回転体回転によるモーメントを考慮	ケーシングボルトはポンプ上下のケーシングを締結するものであり、基礎・架台と締結する固定点ではなく、回転体振動による加速度はケーシングボルトに発生しない。	×	×	×	

◎：設計・建設規格に規定されているモーメント ○：考慮するモーメント ×：考慮しないモーメント

注記*：内圧及び熱については荷重として考慮することが規定されている。

4. まとめ

重大事故等クラス2機器のうち耐圧部ボルト評価については、以下の通り評価を実施する。

4.1 軸方向に垂直な断面の平均引張応力

(1) 発生応力

ボルトに発生する平均引張応力の算出方法を以下に示す。

項目	記号	単位	計算式
ボルトに発生する平均引張応力	σ_m	MPa	$\sigma_m = \sigma_{m1} + \sigma_{m2} + \sigma_{m3}$
ボルト締付時に発生する平均引張応力	σ_{m1}	MPa	$\sigma_{m1} = \frac{W}{n \cdot A_b}$ (注1)
内圧により発生する平均引張応力	σ_{m2}	MPa	$\sigma_{m2} = \frac{W_{m3}}{n \cdot A_b}$ (注2)
熱膨張差により発生する平均引張応力	σ_{m3}	MPa	$\sigma_{m3} = E \cdot \varepsilon$ (注3)

(注1) W は W_{m1} 又は W_{m2} のいずれか大きい値。

(注2) $W_{m3} (= \phi \times W_{m1})$ は、内圧によりボルトに付加される荷重。ただし、内力係数。

$$\phi = \frac{K_t}{K_t + K_c} \quad \text{である。}$$

(注3) $\varepsilon \left(= \frac{\delta_2 - \delta_1}{\ell} \right)$ はフランジとボルトの材質の違いによる熱膨張差からボルトに生じるひずみ。

(2) 許容応力

ボルトの発生応力が、許容応力以下であることを確認する。

軸方向に垂直な断面の平均引張応力 σ_m

$$\sigma_m \leq 2S_m$$

4.2 軸方向に垂直な断面の平均引張応力+曲げ応力

(1) 発生応力

ボルトに発生する曲げ応力の算出方法を以下に示す。

項目	記号	単位	計算式
ボルトに発生する曲げ応力	σ_b	MPa	$\sigma_b = \frac{M}{Z}$ (注4)

(注4) Mは、フランジが変形した際にボルトに作用する曲げモーメント。

(2) 許容応力

ボルトの発生応力が、許容応力以下であることを確認する。

軸方向に垂直な断面の平均引張応力+曲げ応力： $\sigma_m + \sigma_b$

$$\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$$

5. 添付資料

添付1 内圧により発生する平均引張応力の算出方法

添付2 熱膨張差により発生する平均引張応力の算出方法

添付3 ボルトに発生する曲げ応力の算出方法

添付4 回転体の回転によるモーメント及び回転体振動による加速度が作用したとした場合の影響検討

内圧により発生する平均引張応力の算出方法

1. 概要

本資料は、女川 2 号機原子炉補機冷却水ポンプのケーシングボルトに対し、内圧により初期締付力に付加される荷重の算出結果をまとめたものである。

2. 評価部位

評価部位に関連する物性値を表 1 に示す。

表 1 使用物性値 (ヤング率)

部位	材料	ヤング率(注)
ケーシング		
ケーシングボルト		

注：SA 時の最高使用温度(70℃)における値。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3. 荷重条件

1. 18MPa の内圧が作用する時，図 1 に示すような外力 W_a が作用する。この外力は，使用状態のボルト荷重 に相当すると考えられる。

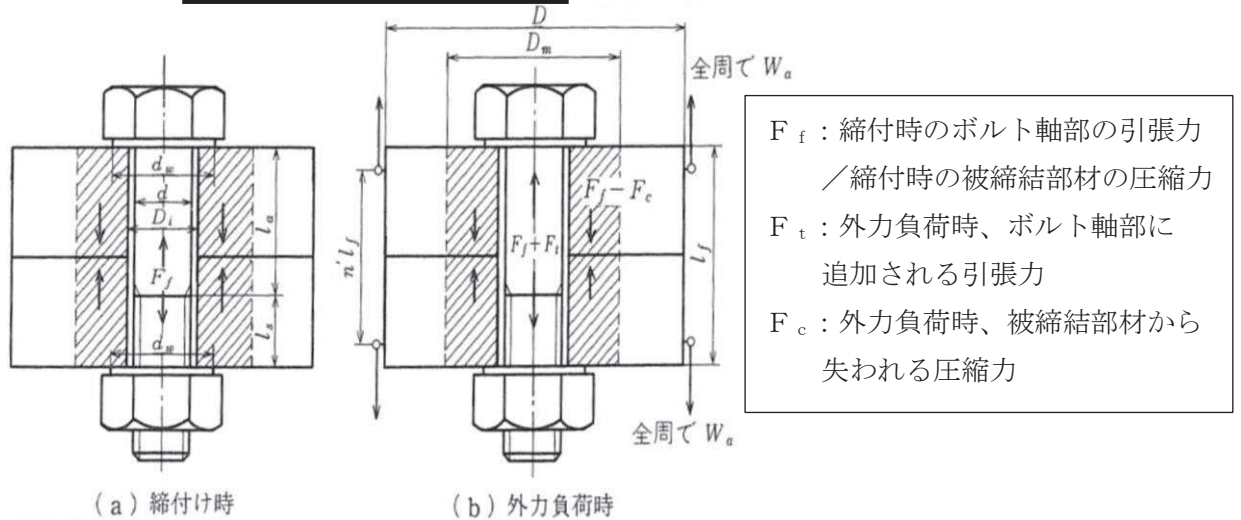


図 1 ねじ締結体モデル

4. ケーシングボルト及びケーシングフランジのばね定数評価式を以下式(1)～(7)に示す。

$$F_f = K_t \quad (1)$$

$$F_f = K_c \quad (2)$$

$$F_f + F_t = K_t \quad (+) \quad (3)$$

$$F_f - F_c = K_c \quad (-) \quad (4)$$

$$W_a = F_t + F_c \quad (5)$$

$$F_t = \phi W_a \quad (6)$$

$$F_c = (1 - \phi) W_a \quad (7)$$

ただし， K_t : ボルトの引張ばね定数， K_c : 被締結部材の圧縮ばね定数， $\phi = K_t \div (K_t + K_c)$ である。

(1) ケーシングボルトのばね定数



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) ケーシングフランジのばね定数

(3) 内力定数

(4) ボルトに付加される荷重

(5) ボルトに付加される引張応力

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

熱膨張差により発生する平均引張応力の算出方法

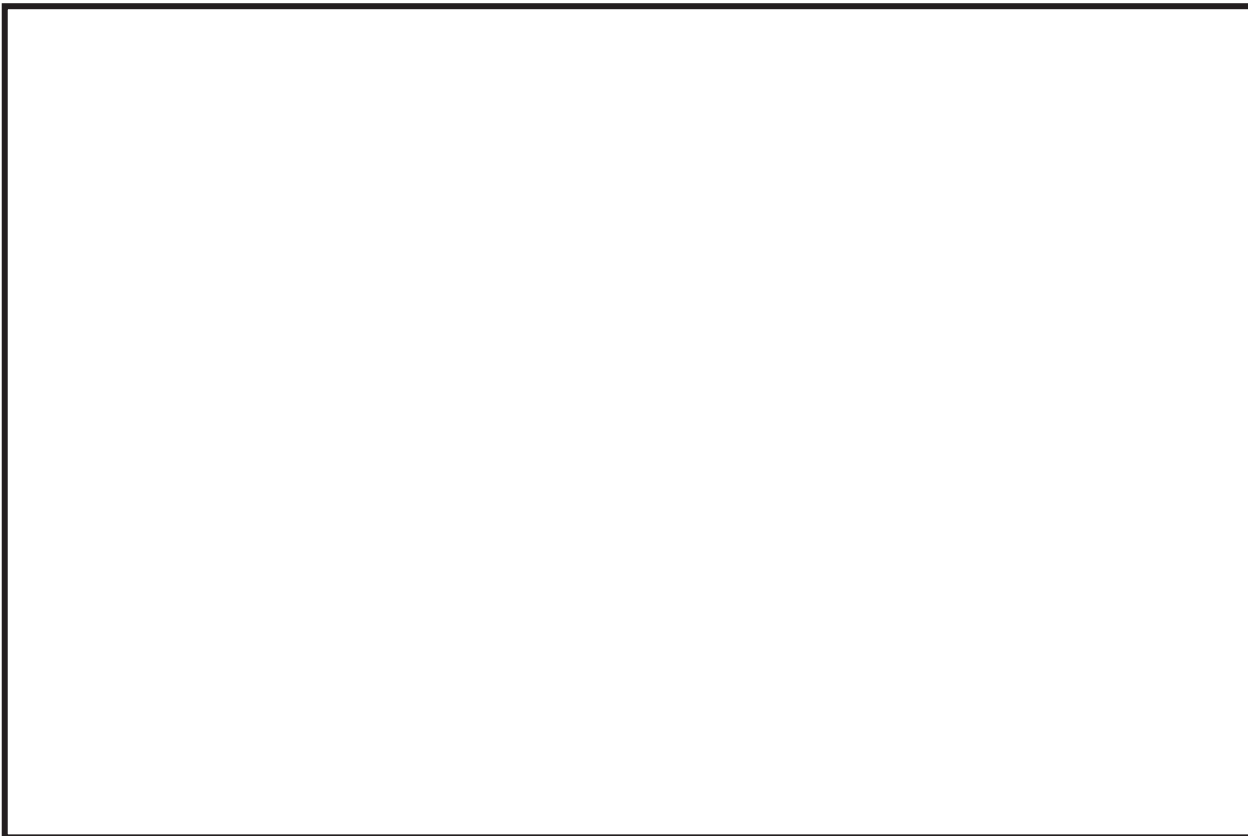
1. 概要

本資料は、女川 2 号機原子炉補機冷却水ポンプのケーシングボルトに対し、熱伸びにより発生する応力の算出結果をまとめたものである。

2. 評価方法



3. 評価式、形状寸法及び使用物性値



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 評価結果（参考）



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

ボルトに発生する曲げ応力の算出方法

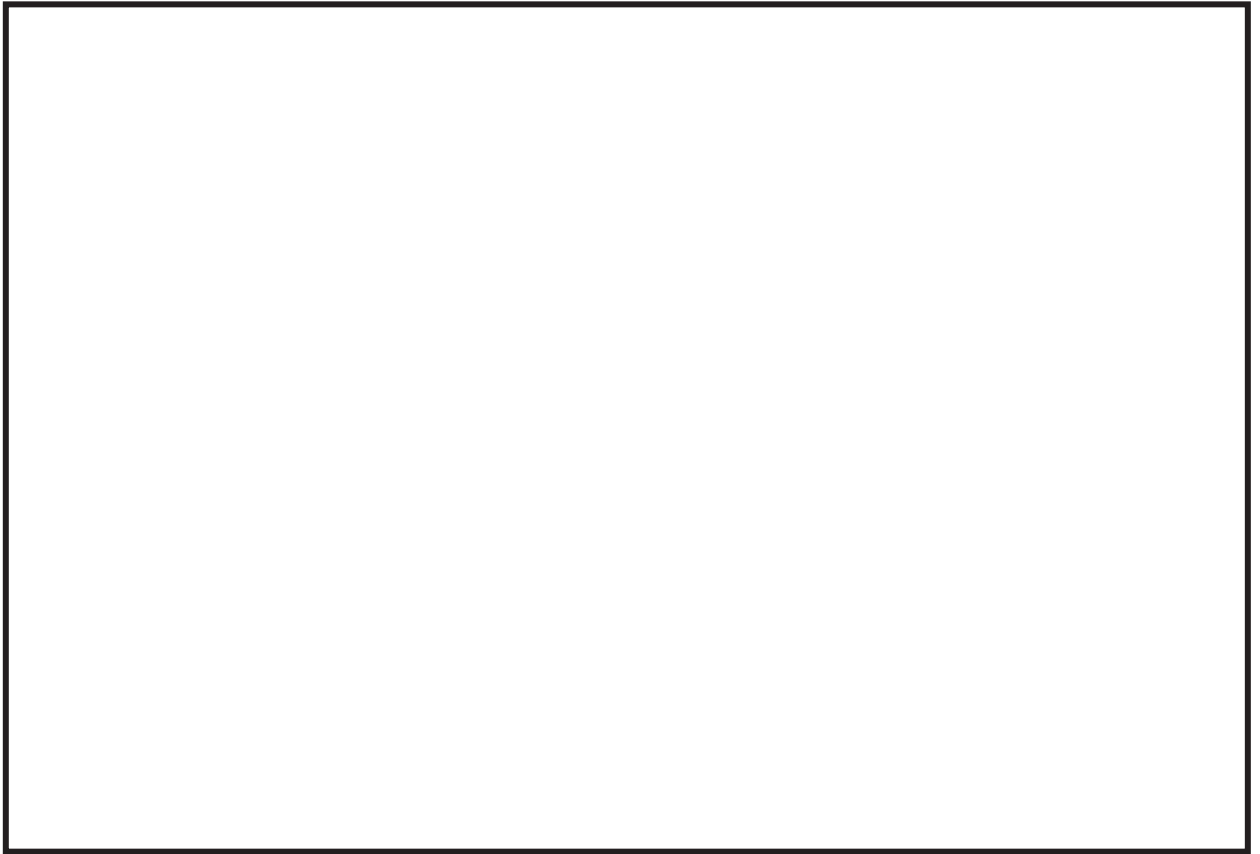
女川 2 号機原子炉補機冷却水ポンプのケーシングボルトを図-1 の様に仮定し、ボルトに作用する曲げ応力を検討する。

また、曲げ応力算出に使用する荷重は、安全側に全ての荷重が作用した場合の平均引張応力を考慮する。

これより



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



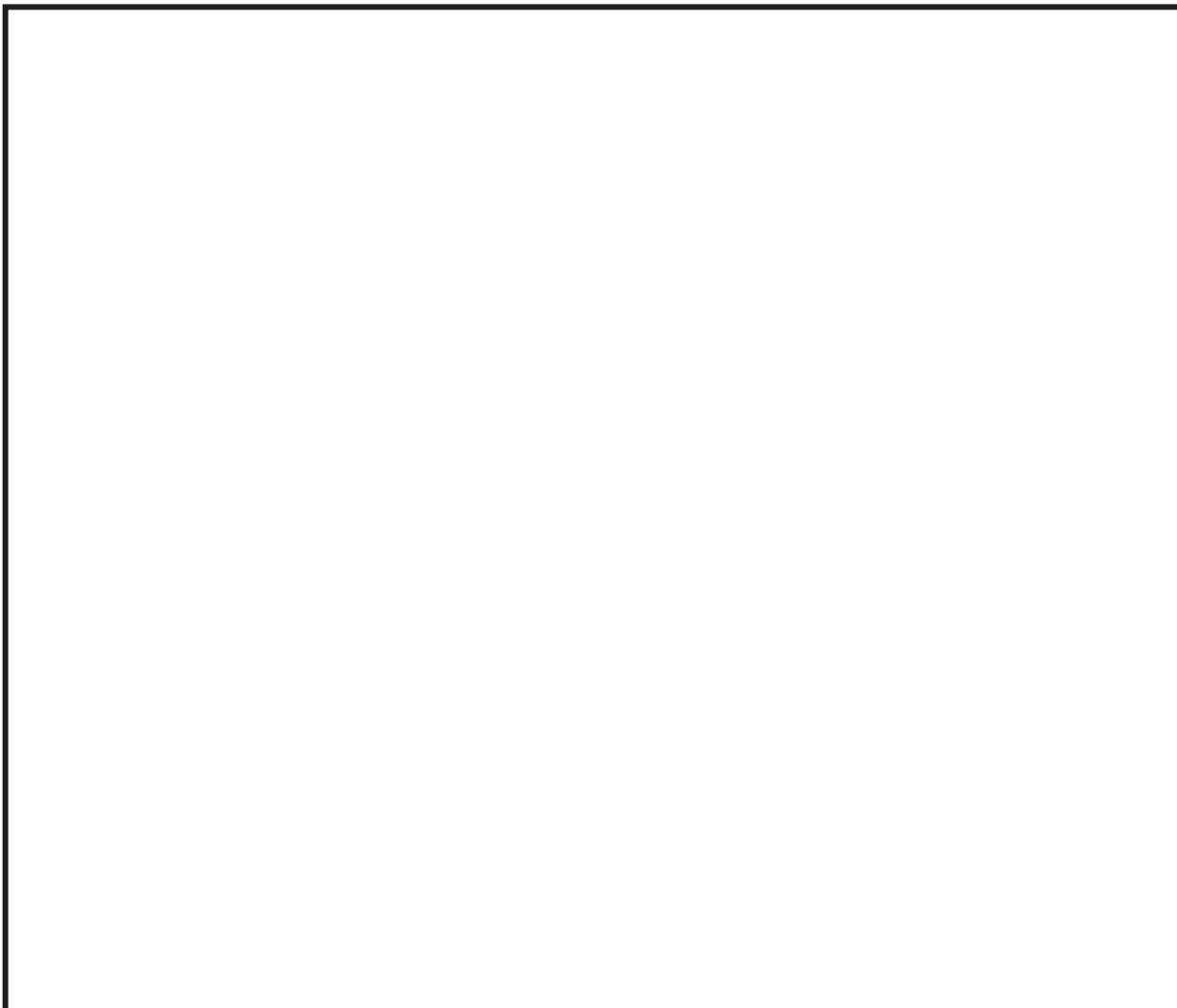
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

回転体の回転によるモーメント及び
回転体振動による加速度が作用したとした場合の影響検討

1. はじめに

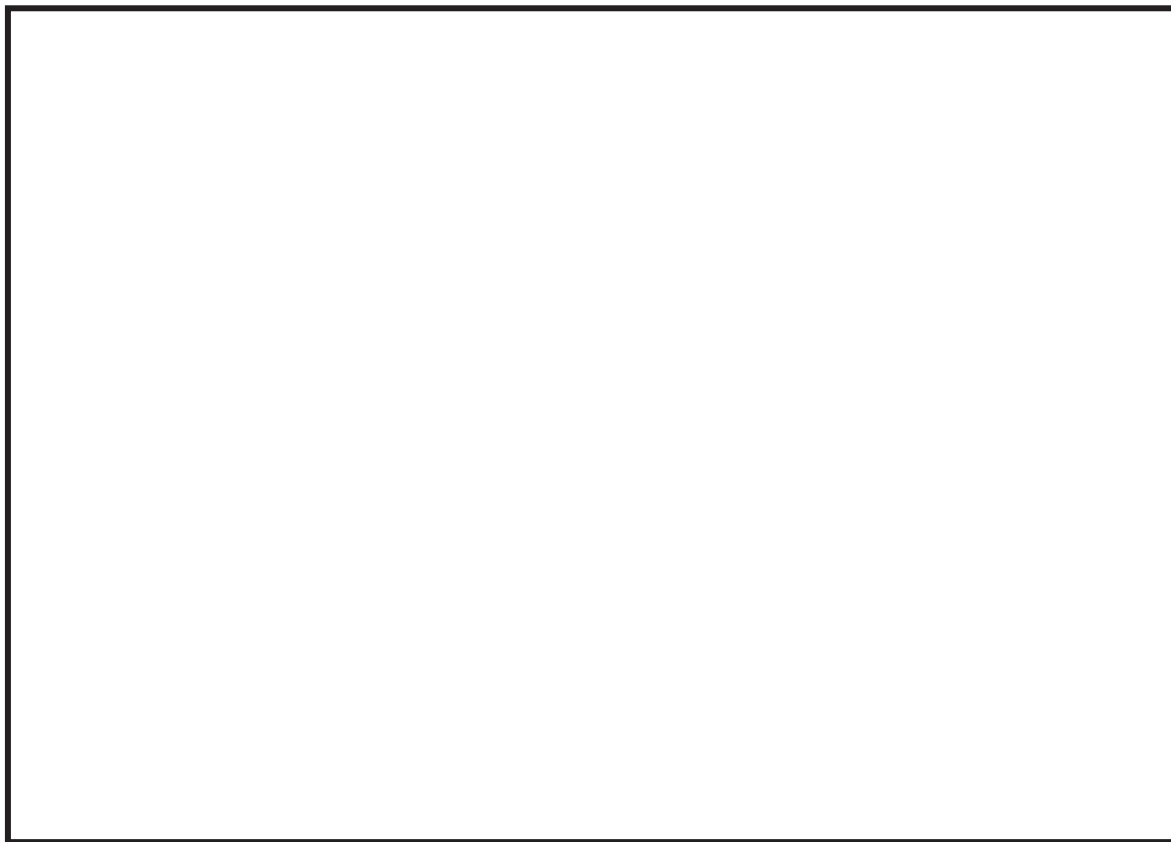
本資料は、原子炉補機冷却水ポンプのケーシングボルトに回転体の回転によるモーメント及び回転振動による加速度が作用すると仮定した場合において、ケーシングボルトの発生応力への影響を概略検討したものである。

2. 回転体の回転によるモーメント及び回転体振動による加速度について



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

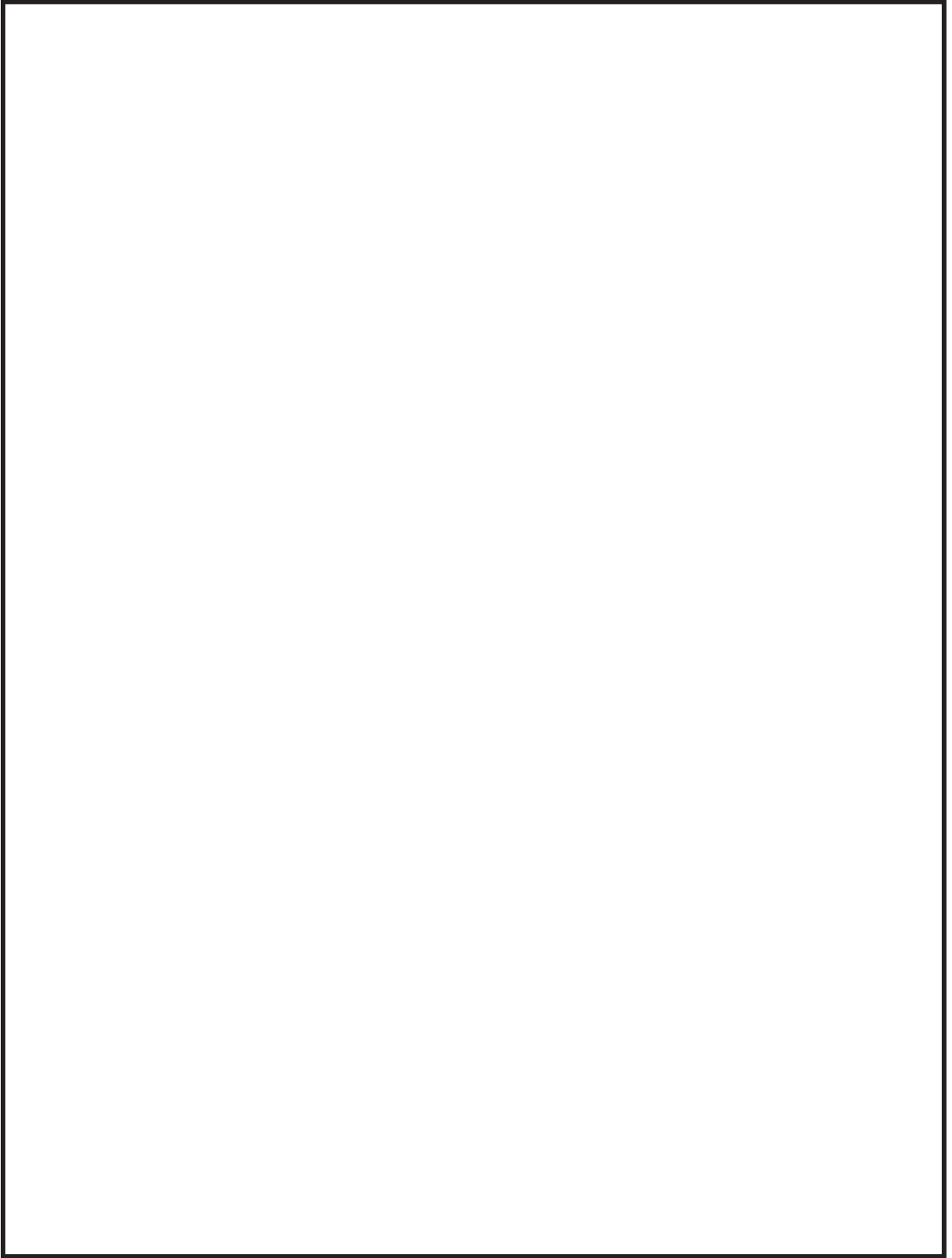
3. ケーシングボルトの応力計算



3.1 回転体の回転によるモーメントによる引張応力



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. まとめ



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(補足)

ボルト評価で考慮すべき荷重の抽出 (ケーシングボルト)

1. 荷重の抽出

クラス 1 容器の規定を参考とした評価を実施する場合において考慮すべき荷重について、以下の通り整理を実施した。

荷重は設計・建設規格で規定されている荷重及び設計・建設規格で規定されていない荷重に分けて整理し、設計・建設規格で規定されていない荷重については、さらにケーシング外から受ける荷重、ケーシング内から受ける荷重及び過去の事件事例から想定される荷重を挙げ、それら荷重のうちケーシングボルトの評価において考慮すべき荷重の選定を実施した。

ケーシング外から受ける荷重については、耐震を含む自然現象等による影響 (荷重) を抽出し、ケーシング内から受ける荷重についてはポンプにおいて想定される内圧に影響を及ぼす事象として、人的影響を想定し抽出を実施した。

なお、想定される荷重は、設計・建設規格で規定されている荷重 (①) 及び設計・建設規格で規定されていない荷重 (②) に整理し、設計・建設規格で規定されていない荷重 (②) については、さらにケーシング外から受ける荷重 (②- (1)), ケーシング内から受ける荷重 (②- (2)), 過去の事件事例 (②- (3)) に整理した。

2. 整理結果

	① 設計・建設規格で規定されている荷重		② 設計・建設規格で規定されていない荷重				
			(1)ケーシング外から受ける荷重		(2)ケーシング内から受ける荷重		(3)過去の事故事例
想定荷重	①-1	使用状態での荷重	②-(1)-1	竜巻	②-(2)-1	回転体振動による影響	②-(3)-1 (ニューシア) 報告書番号： 2004-関西-T029 件名： B-充てんポンプマニホールドカバーの損傷について
	①-2	ガスケット締付による荷重	②-(1)-2	火山	②-(2)-2	締切圧力による影響	
	①-3	内圧により付加される荷重	②-(1)-3	津波	②-(2)-3	キャビテーションによる影響	
	①-4	熱により付加される荷重	②-(1)-4	溢水	②-(2)-4	組立不良による影響	
			②-(1)-5	地震	②-(2)-5	短期的な内圧による影響	
			②-(1)-6	天候			
(注1) 選定	↓ 全て考慮		↓ 各添付資料で考慮されているものは除外 除外対象： ②-(1)-1～6		↓ 十分影響が小さいものは除外 除外対象： ②-(2)-1～4		↓ ケーシングボルトの評価において考慮すべきではない場合は除外 除外対象： ②-(3)-1
考慮する荷重	①-1	使用状態での荷重	-		②-(2)-5	内圧により付加される荷重に短期的な内圧による荷重を考慮	-
	①-2	ガスケット締付による荷重					
	①-3	内圧により付加される荷重 (注2)					
	①-4	熱により付加される荷重					

(注1) 表中の枠内に選定の考え方を記載

(注2) 保守的な評価をするために短期的な内圧による荷重を内圧により付加される荷重に付加して評価する。(②-(2)-5)