

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震機電 17 <u>R6</u>
提出年月日	令和 5 年 10 月 23 日

設工認に係る補足説明資料

耐震設計の基本方針に関する

剛な設備の固有周期の算出について


1. 文章中の下線部は、R4 から R6 への変更箇所を示す。
2. 本資料(R5)は、令和 4 年 11 月 25 日に提示した「剛な設備の固有周期の算出について R4」に対し、後次回申請設備としていた横軸ポンプ及び矩形型設備の固有周期について、記載内容を見直したものである。
3. MOX 燃料加工施設の共通 12 説明 Gr1 における説明対象は、「4.2.1 横軸ポンプ」及び「別紙-2 横軸ポンプの固有周期の算出」である。
4. 「5. 矩形型設備の固有周期」及び「別紙-3 矩形型設備の固有周期について」については、再処理施設の共通 12 説明 Gr2 における説明対象である。

なお、再処理施設及び廃棄物管理施設に関する申請対象施設に関わる資料(別紙-3)については追而とする。

目次

1. 概要	1
2. 固有周期の確認方法	1
3. 固有周期の算出を行っていない設備	<u>2</u>
3.1 横軸ポンプ	2
3.2 冷却塔ファン	2
3.3 感知器	<u>3</u>
4. 固有周期の確認内容	<u>3</u>
4.1 固有周期算出方針	3
4.2 代表設備の選定	<u>3</u>
4.3 固有周期算出結果	<u>4</u>
5. 矩形型設備の固有周期	<u>4</u>
6. まとめ	<u>4</u>

添付－1 機器・配管系の耐震設計における剛柔判定のしきい値について

 : 商業機密の観点から公開できない箇所

1. 概要

本資料は、再処理施設の第1回設工認申請(令和2年12月24日申請)及び第2回設工認申請(令和4年12月26日申請)、MOX燃料加工施設の第2回設工認申請(令和5年2月28日申請)及び廃棄物管理施設の設工認申請(令和4年12月26日申請)(以下「再処理施設、MOX燃料加工施設及び廃棄物管理施設」については「当社施設」という。)のうち、以下の添付書類に示す剛な設備の固有周期について補足説明するものである。

・再処理施設 添付書類「IV-1-3-2-1 定式化された計算式を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」

・再処理施設 添付書類「IV-1-3-2-2 有限要素モデル等を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」

・MOX燃料加工施設 添付書類「III-1-3-2-1 定式化された計算式を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」

・MOX燃料加工施設 添付書類「III-1-3-2-2 有限要素モデル等を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」

・廃棄物管理施設 添付書類「II-1-3-2-1 定式化された計算式を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」

・廃棄物管理施設 添付書類「II-1-3-2-2 有限要素モデル等を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」

当社施設の設備については、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987, 1970(以下、「JEAG4601」という。)等に基づき、固有周期が0.050s以下の設備を剛な設備、固有周期が0.050sを上回る設備を剛ではない設備とした上で各設備に応じた評価を行う。

これら剛な設備と剛ではない設備の評価に用いる入力地震動の適用方法及び耐震評価手法等は、事業変更許可申請書及び添付書類「地震応答解析の基本方針」上に示している。

ここで、各設備の固有周期は、計算式、FEM解析又は振動特性試験により確認しているが、一部の設備については固有周期を算出せず剛とみなしている。

本資料では、耐震評価において固有周期の算出を行わず剛とみなす設備の考え方とその妥当性を示すための設備の固有周期の確認内容及び結果並びに振動試験により固有周期を確認している矩形型設備の固有周期の確認内容及び結果を示す。

なお、本資料で示す内容は、第3回申請以降のMOX燃料加工施設に対しても適用するものである。

2. 固有周期の確認方法

機器・配管系は、添付-1に示すように0.050sを固有周期のしきい値として剛な設

備か否か確認した上で、各設備の固有周期に応じて耐震評価する。

各設備の固有周期は、JEAG4601を基に設定した計算式、FEM解析モデルによる固有値解析及び振動特性試験により確認を行う以外に、一部の設備は固有周期を算出せず剛とみなしている。

ここでは、固有周期を算出せず剛とみなしている設備及び振動特性試験により剛であることの確認を行っている設備に対する考え方を次項以降に示す。

3. 固有周期の算出を行っていない設備

固有周期の算出を行っていない設備としては、添付書類「定式化された計算式を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」に示す機器形状に応じた計算式の組合せのうち横軸ポンプ及び矩形型設備が該当する。

また、上記に加えて添付書類「有限要素モデル等を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」において添付書類「定式化された計算式を用いて評価を行う機器の耐震計算書作成の基本方針」の計算式を適用している設備のうち横軸ポンプ又は矩形型設備の式を適用する冷却塔の構成部材となるファン駆動部(以下、「冷却塔ファン」という。), 感知器も該当する。

このうち、矩形型設備は、剛となるように設計し、振動特性試験にて剛であることを確認する設備であり、固有周期を算出していない理由が他設備と異なることから、5項で詳細を示す。

3.1 横軸ポンプ

横軸ポンプの評価に用いる定式化された計算式については、JEAG4601の計算式を基にしている。JEAG4601上の計算式としては、固有周期の計算、応力の計算それぞれの考え方が示されており、応力の計算については基礎ボルトに対する応力計算式が示されている。これに対し、固有周期の計算については、構造と重心位置の関係から一つの大きなブロック状の構造であり、固有周期が十分に小さい剛体とみなすことができるため、算出を省略できることが示されている。

このため、基本方針上における横軸ポンプの定式化された計算式としては、JEAG4601に示されている応力算出式と固有周期に対する考え方を適用している。よって、横軸ポンプは「剛」とみなしており、同一の計算式を用いているポンプ、ブロワについては、固有周期の算出を行っていない。

3.2 冷却塔ファン

冷却塔ファンについては、横軸ポンプと同様に一つの大きなブロック状の構造である剛体とみなしているため、添付書類「機器の耐震計算に関する基本方針」の「3.2 固有周期の算出」の中で固有周期算出方法の考え方を示しており、固有周期の算

出を行っていない。

3.3 感知器

感知器については、振動特性試験のうち、加振試験等により固有周期の確認を行うことを添付書類「機器の耐震計算に関する基本方針」で示しており、固有周期の算出を行っていない。

これら固有周期の算出を行っていない設備が「剛」であることに対する確認内容を次項に示す。なお、感知器の固有周期は加振試験で確認しており、加振試験では機能確認済加速度及び固有周期の確認を行っているため、これらの試験内容を補足説明資料「耐震機電 24 電氣的機能維持評価手法の適用について」で示す。

4. 固有周期の確認内容

固有周期の算出を行っていない横軸ポンプ、冷却塔ファン及び感知器は、3項に示した理由により剛と判断しているが、代表設備を選定し、剛であることの確認を行う。

4.1 固有周期算出方針

固有周期の算出に当たっては、JEAG4601 又は JEAG4601-1991 追補版に準拠し算出する。

4.2 代表設備の選定

固有周期を確認する代表設備の選定に当たっては、3.1項、3.2項それぞれの対象設備ごとに選定を行う。

4.2.1 横軸ポンプ

横軸ポンプについて、本体がブロック状の構造であり固有周期に影響を及ぼす因子としては、質量、重心高さ、支持部剛性の固定部曲げ剛性とボルトの伸び剛性となる。そのうち、固定部及びボルトの設計は支持するポンプ本体の質量に応じて部材を選定することから設備ごとに質量との関係性は同等となる。その場合、固有周期に与える影響が支配的となる質量が当社施設において最も大きい設備を代表設備として選定する。

4.2.2 冷却塔ファン

冷却塔ファンについては、横軸ポンプと同様に質量が最も大きい設備を代表設備として選定する。

4.3 固有周期算出結果

4.1 項の固有周期算出方針に基づいて算出した結果について、代表設備に対する固有周期算出結果を別紙に示す。

その結果、固有周期の算出を行っていない設備について、固有周期は0.050s以下であった。

5. 矩形型設備の固有周期

矩形型設備に属する盤及びラックは、剛となるよう設計している。盤及びラックが剛であることは、添付書類「機器の耐震計算に関する基本方針」に基づき振動特性試験又は解析により確認することとしている。このうち振動特性試験により固有周期を確認している設備について、試験結果の一例を別紙に示す。

6. まとめ

固有周期の算出を行っていない設備に対して、しきい値である0.050s以下であることを確認した。

機器・配管系の耐震設計における剛柔判定のしきい値について

1. 剛柔判定のしきい値である固有周期の考え方

機器・配管系の耐震設計では、基準地震動 S_s ，弾性設計用地震動 S_d に対して動的解析を行い水平及び鉛直方向の動的地震力を定める。その機器・配管系が柔構造(剛ではない設備)と判断される場合には、動的解析により地震力を算定し、剛構造(剛な設備)と判断される場合には、機器・配管系の設置床面の最大応答加速度の 1.2 倍の加速度を震度 (1.2ZPA) とした静的解析により地震力を算定する。

ここで、剛柔判定のしきい値である固有周期(0.050s)と動的解析の適用範囲の概要を図 1 に示す。剛柔判定の固有周期は、地震動による応答増幅が大きくなる建物・構築物の卓越周期から十分離隔した位置に設定し、動的解析の適用要否の決定に用いている。なお、この考え方は、JEAG4601-1970 に示されている。

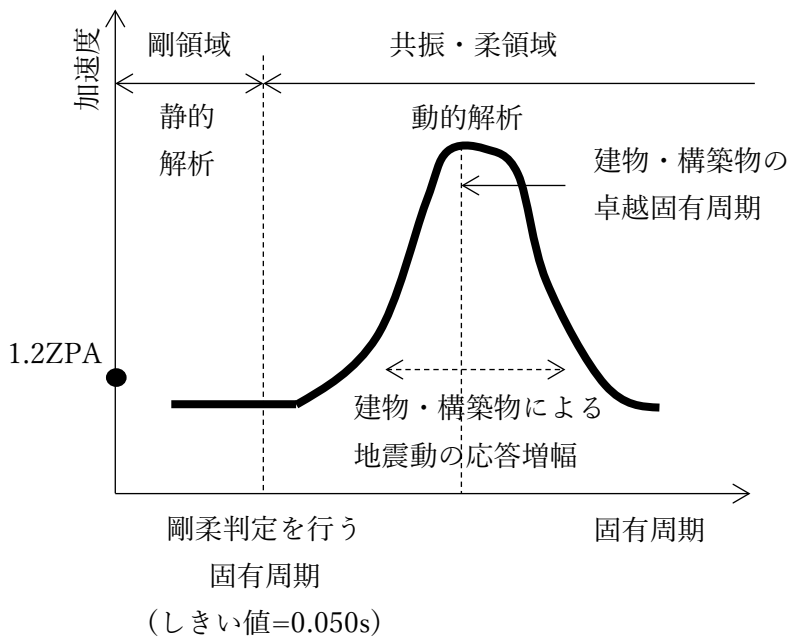


図 1 剛柔判定のしきい値である固有周期と動的解析の適用範囲

2. 剛柔判定を行う固有周期と地震力の算定法

JEAG4601-1987 の抜粋を図2 に示す。機器・配管系の剛柔判定については、JEAG4601-1987 に例示されているとおり、機器・配管系の1次固有周期が0.050s以下の場合には剛な設備、0.050sを超える場合は剛ではない設備とする。この方針は、既設工認と同様である。

機器・配管系の耐震設計では、剛柔判定のしきい値である固有周期(0.050s)を超える場合は地震応答を動的解析により行い、0.050s以下の場合の地震応答は動的解析に代えて静的解析を行う。

6.4.3 動的地震力の概要

機器・配管系の耐震設計に用いる動的地震力は、重要性の高いAsクラス機器の地震力を基本に定めるものである。本項では、その概要を示し、地震力算定の詳細は「6.5地震応答解析」に述べることとする。

(1) As及びAクラス機器

Aクラス機器に関しては、基準地震動S₁に対し動的解析（地盤-建屋-機器連成の解析あるいは据付位置における設計用床応答スペクトルを用いた解析等）により算定される水平地震力を適用する。Aクラス機器の中で特に重要なAsクラス機器に関しては、さらに基準地震動S₂に対し動的解析によって得られる水平地震力をも適用する。ただし、その機器が剛構造と判断される場合（例えば機器の1次固有振動数が20Hz以上、あるいは、設計用床応答スペクトルの卓越する領域より高い固有振動数を有する場合）には、その機器の据付位置における建物の応答加速度を基に定まる震度により地震力を算定する。なお、As、Aクラスの機器については鉛直地震力をも考慮し、基準地震動の最大加速度を1/2とした鉛直震度（高さ方向については一定とする）より求まる鉛直地震力を水平地震力と同時に不利な方向で組合せる。

図2 JEAG4601-1987(抜粋)

3. 実機に対する適用性

JEAG4601-1987 の記載は、水平方向の動的解析への適用として剛柔判定の固有周期 $0.050s$ の考え方を例示したものである。新規制基準においては、鉛直方向についても水平方向と同様に動的な扱いとするため、鉛直方向も含め剛柔判定のしきい値である固有周期 ($0.050s$) が地震力算定に適用可能であることを検討した。本検討に際して参照した JEAG4601-1970 の抜粋を図3に示す。JEAG4601-1970には、建物・構築物の卓越固有周期の $1/2$ 程度を剛柔判定のしきい値である固有周期とするとの考えが示されており、原子力発電所の場合については、建物・構築物の卓越周期は一般に $0.100 \sim 0.500s$ ($2 \sim 10Hz$) であることを考慮して、 $0.050s$ を剛柔判定のしきい値とすれば十分であると記載されている。

第1回申請対象であるMOX燃料加工施設の燃料加工建屋地震応答解析モデルに基づく、水平方向及び鉛直方向における固有周期を表1～表3に示す。建屋の卓越固有周期は水平及び鉛直方向ともおおよそ $0.200s$ 以上であり、剛柔判定のしきい値である固有周期 $0.050s$ は、燃料加工建屋の卓越固有周期に対して十分な離隔(卓越固有周期の $1/2$ 以下)をもって設定されている。なお、その他当社施設における各建屋においても同様の傾向であることを確認している。

原子力発電所の場合について一般的にみると、地盤の卓越振動数、構築物の固有振動数をあわせ考えて、 $2 \sim 10 Hz$ が取付け点の卓越振動数域すなわち床応答曲線が持ち上げる領域と考えられる。したがって動特性がまったく不明な場合には一応これより共振領域としては $1 \sim 20 Hz$ を考えれば一応十分であろう。

そこで固有振動数の評価に当たって重要なことは、対象となっている機械系が固有振動数解析を必要とする範囲にあるか否かを判定することである。明らかに $20 Hz$ よりはるかに高い固有振動数を有すると推定される対象につき、多くの計算を行なう必要はない。その推定は在来の経験であってもよし、対象物あるいはそれと類似な機器についての試験の結果であってもよい。この試験もたとえば簡単に木槌でたたいてみるといったことであってよいのである。ときには、これによって支持金具の不完全さなどを見出すことができる。

図3 JEAG4601-1970(抜粋)

表1 燃料加工建屋地震応答解析モデルの固有値解析結果(水平(NS)方向)

次数	固有周期(s)	固有振動数(Hz)	刺激係数	卓越
1	0.310	3.22	1.382	○
2	0.157	6.36	0.334	
3	0.084	11.88	-0.160	
4	0.065	15.33	0.135	

表2 燃料加工建屋地震応答解析モデルの固有値解析結果(水平(EW)方向)

次数	固有周期(s)	固有振動数(Hz)	刺激係数	卓越
1	0.307	3.26	1.336	○
2	0.158	6.33	0.321	
3	0.080	12.47	-0.133	
4	0.060	16.71	0.070	

表3 燃料加工建屋地震応答解析モデルの固有値解析結果(鉛直方向)

次数	固有周期(s)	固有振動数(Hz)	刺激係数	卓越
1	0.199	5.02	1.096	○
2	0.046	21.96	-0.125	

4. まとめ

3項の検討結果より、既設工認と同様の剛柔判定のしきい値である固有周期0.050sは、建屋の卓越固有周期に対して十分な離隔をもっており、当社施設の水平及び鉛直方向の地震力算定に適用可能であることを確認した。

別紙

耐震機電17 【剛な設備の固有周期の算出について】

資料No.	別紙		Rev	備考
	名称	提出日		
別紙-1	冷却塔ファンの固有周期の算出	2023/10/12	2	
別紙-2	横軸ポンプの固有周期の算出	2023/10/12	0	
別紙-3	矩形型設備の固有周期について			追函

別紙－ 1

冷却塔ファンの固有周期の算出

目次

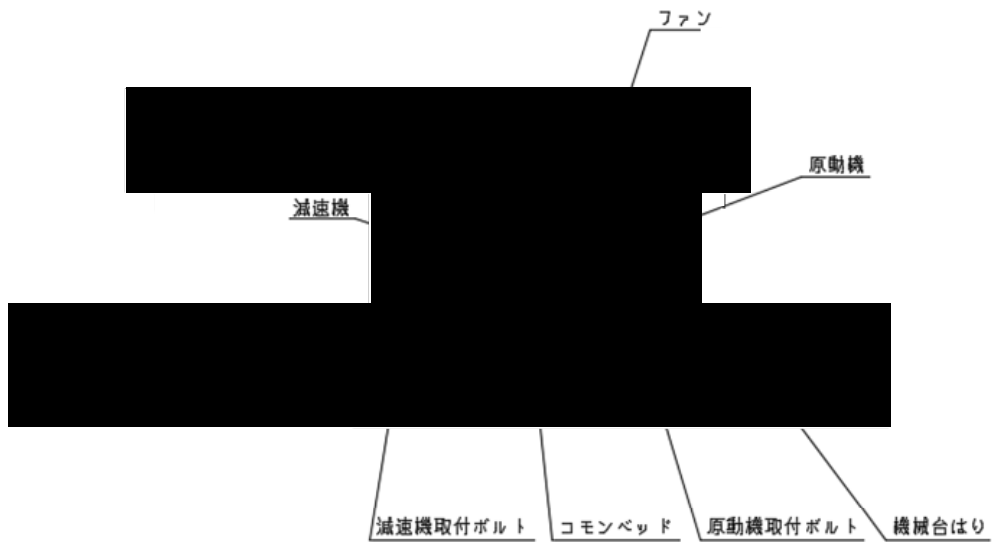
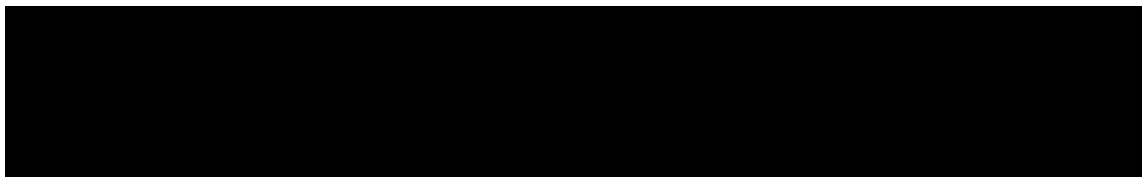
1. 概要	1
2. 固有周期の算出方法	1
3. 固有周期の算出結果	4

1. 概要

冷却塔ファンの [REDACTED]
固有周期の算出を省略している。本資料では、冷却塔ファンの代表設備として [REDACTED]
[REDACTED] に対する固有周期算出結果を示す。 [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

2. 固有周期の算出方法

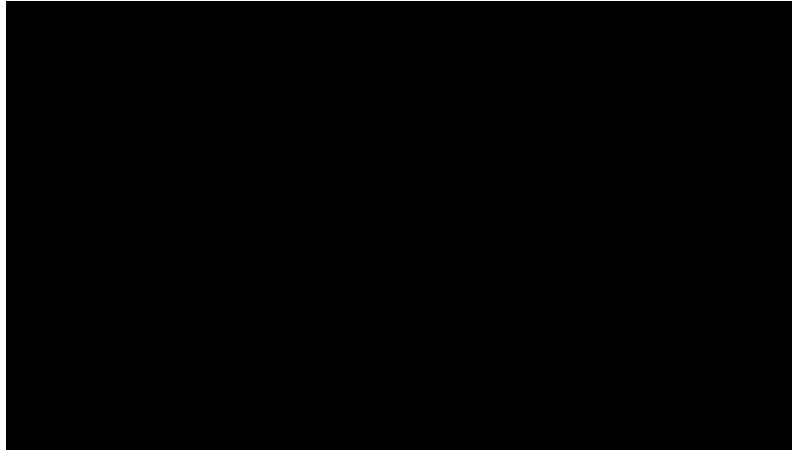
冷却塔ファンは、ファンとこれを駆動する減速機及び原動機で構成され、 [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] 固有周期算出においてはそれらの剛性を考慮する。冷却塔ファンの外形図を第2-1図に示す。



第2-1図 冷却塔ファン外形図

冷却塔ファンの固有周期は、

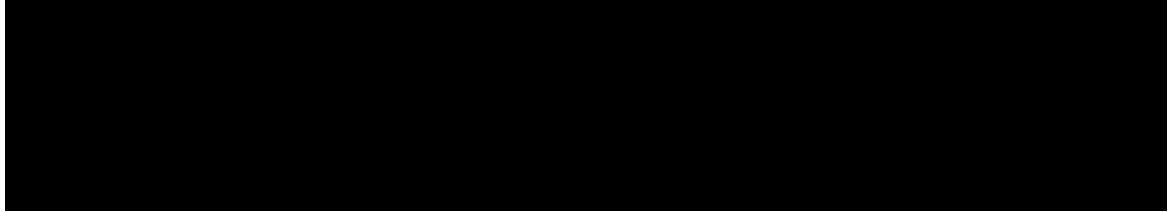
_____剛性を考慮して算出する。計算モデルを第2-2図に示す。



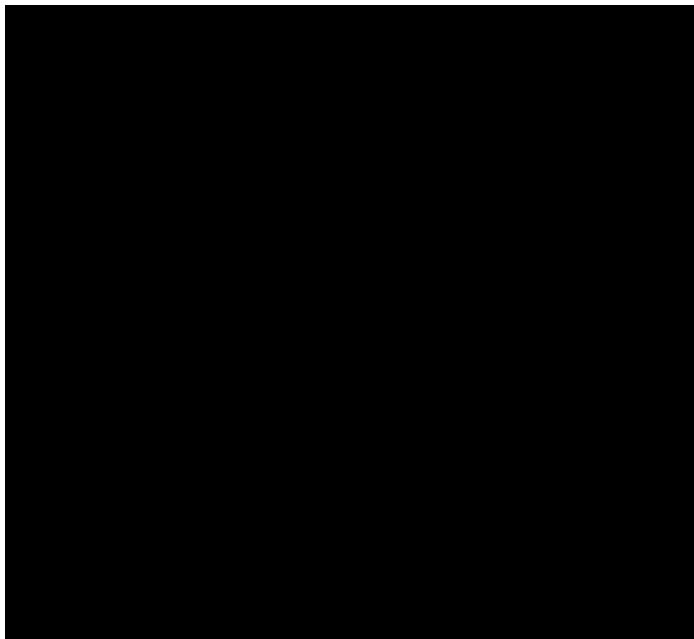
第2-2図 計算モデル

冷却塔ファンの固有周期Tは下記に示す算出式にて求める。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K \cdot 10^3}}$$



なお、各ばね定数は下記に示す算出式にて求める。



3. 固有周期の算出結果

固有周期の算出に用いる機器要目及び算出結果を第3-1表に示す。

第3-1表 機器要目及び算出結果

記号	記号説明	値	単位
			MPa
			mm ²
			mm ²
			mm
			mm
			MPa
			—
			mm
			N/m
			N/m
			N/m
K	全体ばね定数		N/m
m	機器質量		kg
T	固有周期		確認結果*
			良

注記 * : しきい値である 0.050s に対する判定

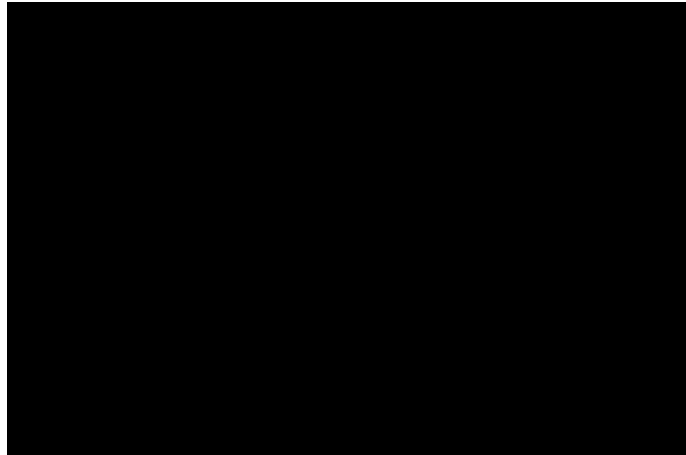
別紙-2

横軸ポンプの固有周期の算出

目次

1. 概要	1
2. 固有周期の算出方法	1
3. 固有周期の算出結果	4

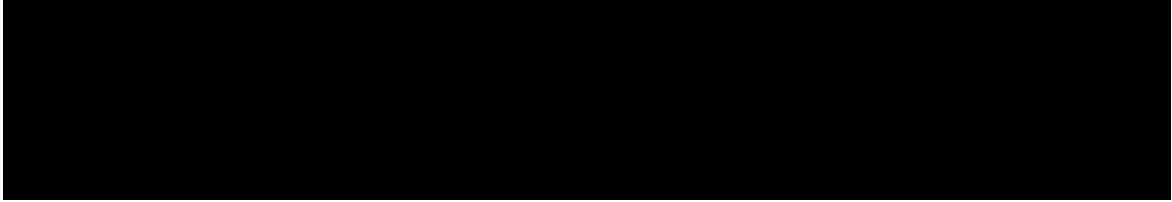
原動機の固有周期は、
剛性を考慮して算出する。計算モデルを第2-2図に示す。



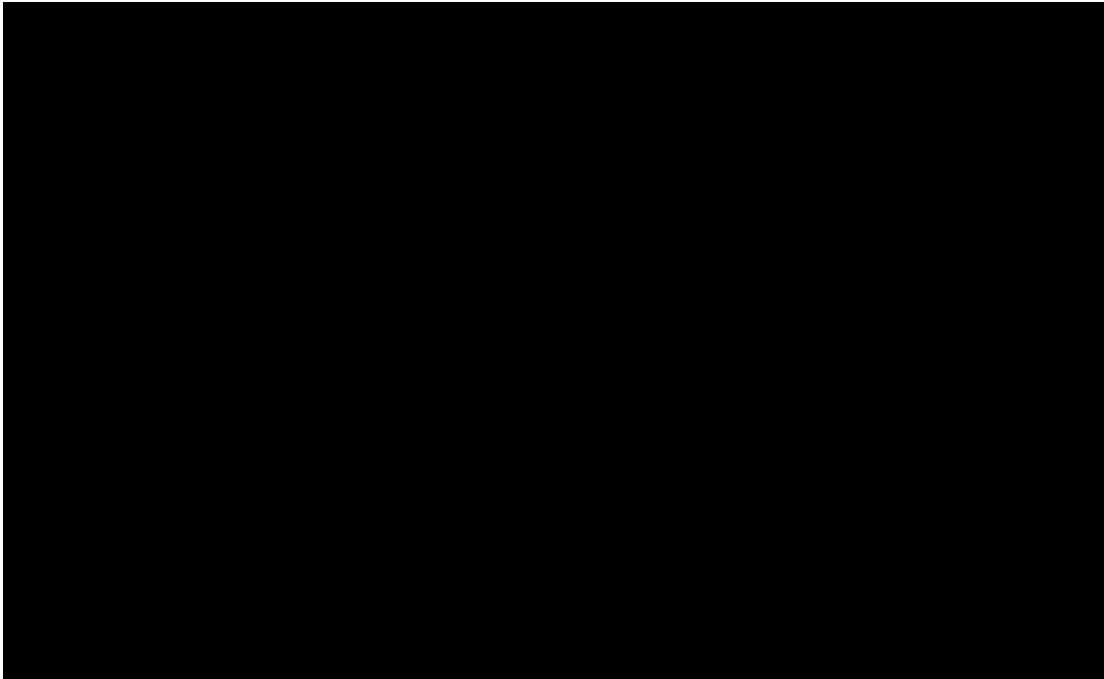
第2-2図 計算モデル

原動機の固有周期Tは下記に示す算出式にて求める。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K \cdot 10^3}}$$



なお、各ばね定数は下記に示す算出式にて求める。



3. 固有周期の算出結果

固有周期の算出に用いる機器要目及び算出結果を第3-1表に示す。

第3-1表 機器要目及び算出結果

記号	記号説明	値	単位
			MPa
			mm ²
			mm ²
			mm
			mm
			MPa
			mm ⁴
			mm
			N/mm
			N/mm
			N/mm
K	全体ばね定数		N/mm
m	機器質量		kg
T	固有周期		s
			確認結果*
			良

注記 *しきい値である 0.050s に対する判定