

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7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7補足-028-10-30 改0
提出年月日	2020年6月25日

遠隔手動弁操作設備の耐震性についての計算書に関する補足説明資料

2020年6月

東京電力ホールディングス株式会社

遠隔手動弁操作設備加振試験について

1. 試験概要

遠隔手動弁操作設備は、既往の研究において動的機能維持が確認されている設備ではないことから、遠隔手動弁操作設備の構成要素毎の機能確認済加速度を設定することを目的とし、加振設備を用いて遠隔手動弁操作設備の構成要素毎の代表機器を加振した。

遠隔手動弁操作設備の外観図の例を図 1-1、構成要素の断面図を図 1-2 から図 1-5 に示す。試験方法としては振動特性把握試験を実施し、固有振動数を求め、柔構造又は剛構造であることを確認した後、機器の据付位置における機能維持評価用加速度を包絡する加振波で加振試験を実施した。また、加振試験に加え、加振試験後の構成要素毎の動作試験及び分解検査又は外観検査を実施することで健全性を確認している。振動試験装置外観を図 1-6 から図 1-8、加振台仕様を表 1-1 から表 1-3 に示す。また、試験体と実機の主な使用の比較を表 1-4 に示す。

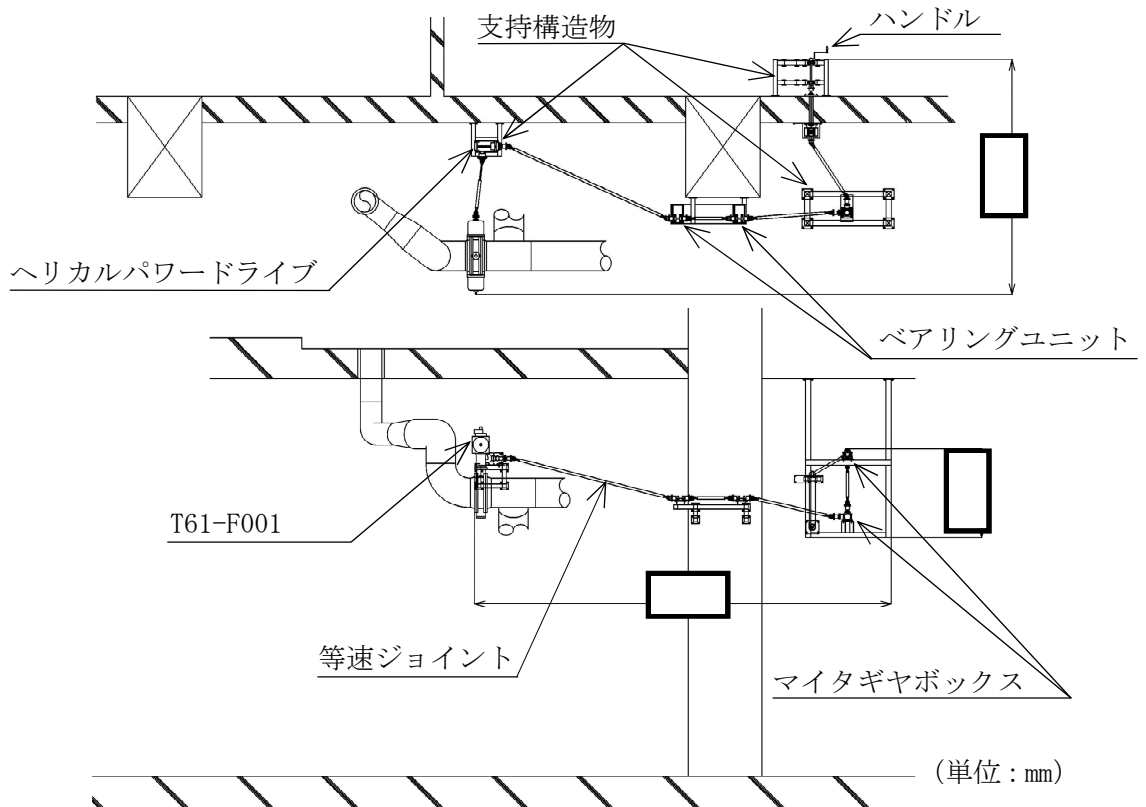


図 1-1 遠隔手動弁操作設備の外観図 (T61-A0-F001 の場合)

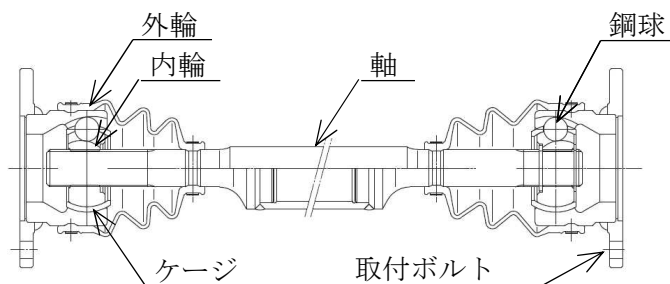


図 1-2 等速ジョイント (伸縮機構無し) 断面図

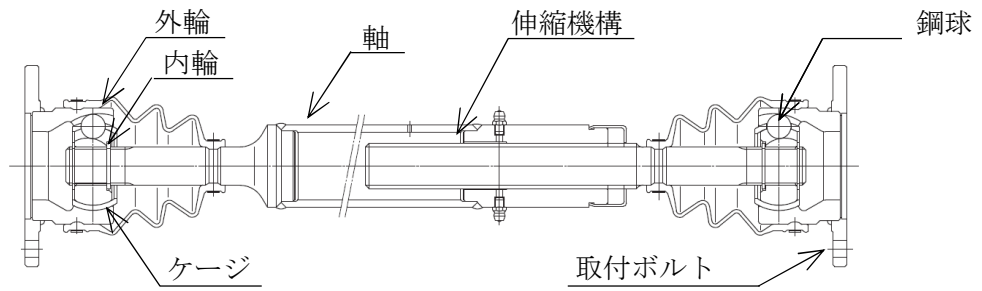


図 1-3 等速ジョイント（伸縮機構有り）断面図

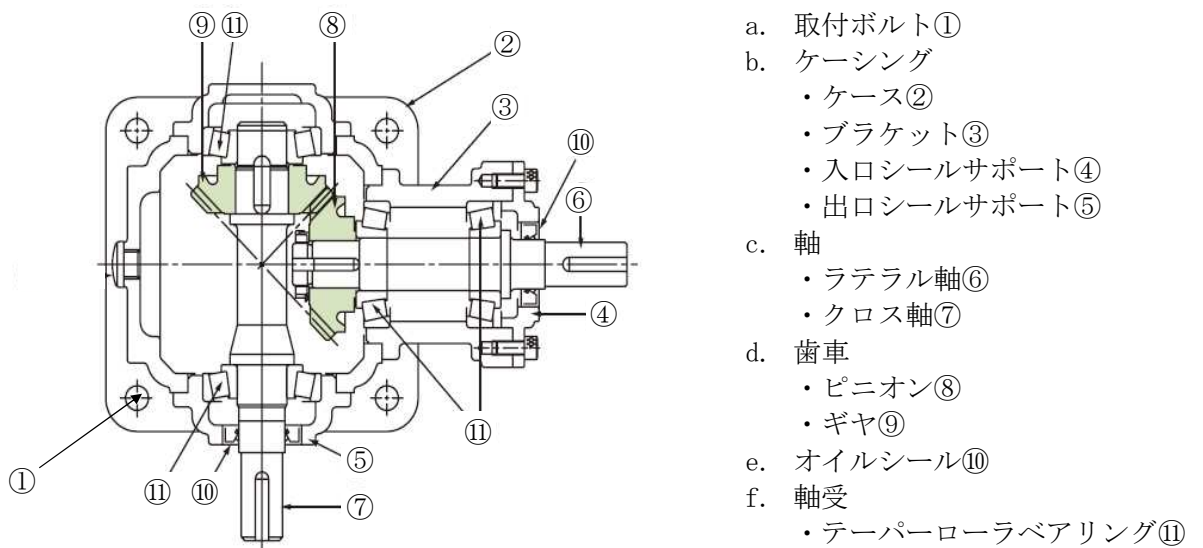


図 1-4 マイタギヤボックス 断面図

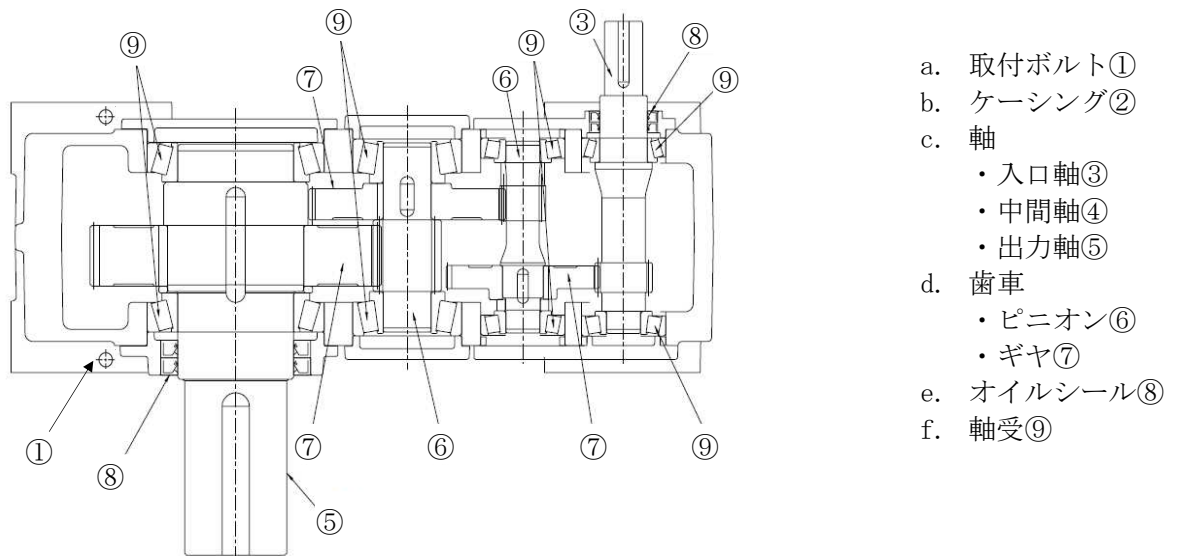
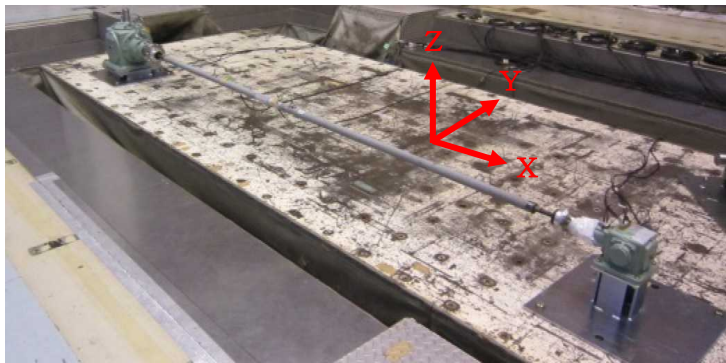
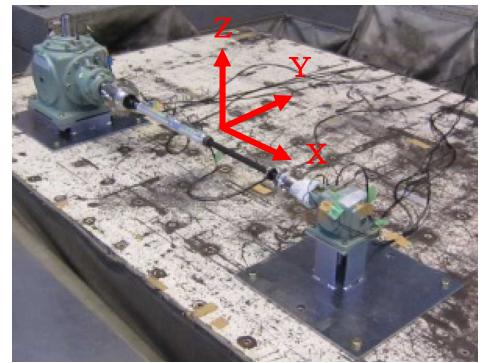


図 1-5 ヘリカルパワードライブ 断面図



伸縮機構無し (BJ75LACC102/103)



伸縮機構有り (BJ75LACC403)

図 1-6 振動試験装置外観 (等速ジョイント)



図 1-7 振動試験装置外観 (マイタギヤボックス (ED6M-1-L-Y))

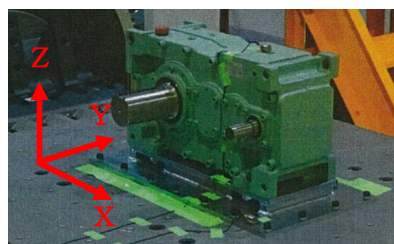


図 1-8 振動試験装置外観 (ヘリカルパワードライブ (HDR0103CL41N-1))

表 1-1 加振台仕様（等速ジョイント）

試験場	株式会社 MTI
寸法	2.6[m]×6.2[m]
最大積載量	20[t]
運転周波数帯域	0.5～80[Hz]

表 1-2 加振台仕様（マイタギヤボックス）

試験場	日測エンジニアリング株式会社
寸法	水平テーブル：2.0[m]×2.0[m] 鉛直テーブル：1.1[m]×1.1[m]
最大積載量	1.6[t]
運転周波数帯域	2～2100[Hz]

表 1-3 加振台仕様（ヘリカルパワードライブ）

試験場	IMV 株式会社
寸法	1.15[m]×1.15[m]
最大積載量	2.0[t]
運転周波数帯域	5～2000[Hz]

表 1-4 遠隔手動弁操作設備の主な仕様の比較

構成要素	仕様	試験体	実機
等速ジョイント (伸縮機構無し)	型式	BJ75LACC102/103	同左
	重量	22.1kg	20.7kg
	長さ	3673mm	3445mm
等速ジョイント (伸縮機構有り)	型式	BJ75LACC403	同左
	重量	8.8kg	同左
	長さ	1200mm	1046～1159mm
マイタギヤ ボックス	型式	ED6M-1-L-Y	同左
	重量	21kg	同左
ヘリカル パワードライブ	型式	HDR0103CL41N-1	同左
	重量	100kg	同左

2. 振動特性把握試験

2.1 試験方法

等速ジョイント、マイタギヤボックス及びヘリカルパワードライブに3軸加速度計を取付け、加振波として100Hzまでの範囲で、掃引速度1[オクターブ/min]の連続正弦波を使用した各軸単独加振を実施し、固有振動数を求める。なお、加振加速度に対する応答倍率が2倍以上となる加振周波数を共振点（固有振動数）と定義する。

計測センサー取付位置を図2-1から図2-4に示す。

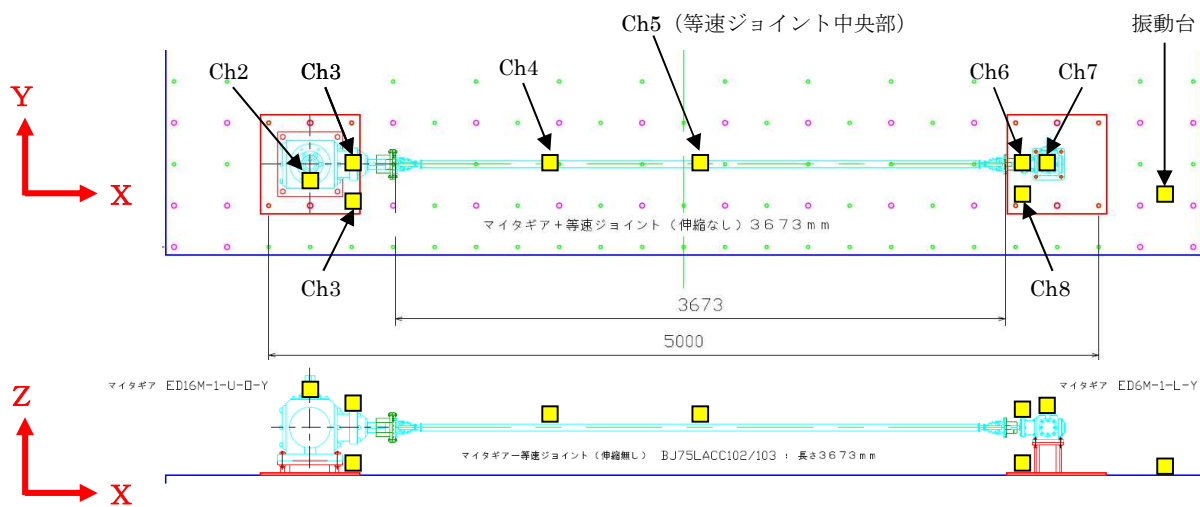


図2-1 計測センサー取付位置（等速ジョイント（伸縮機構無し））

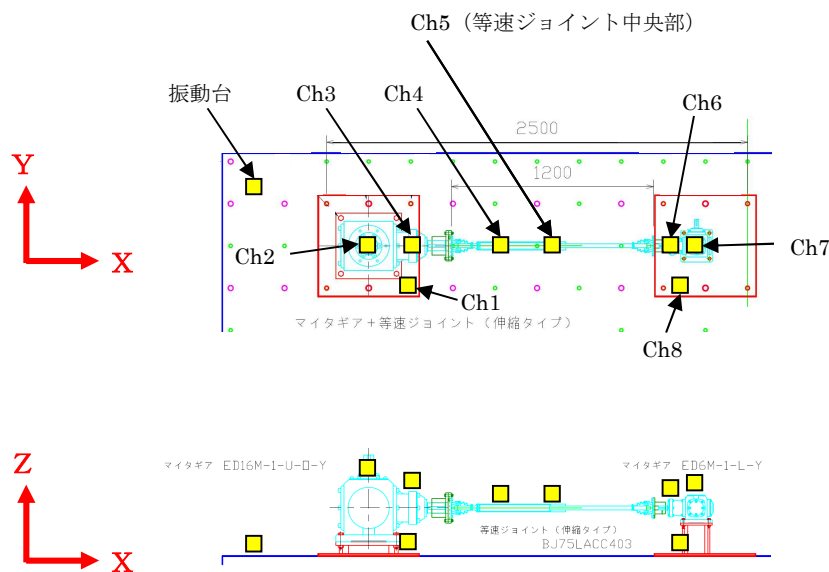


図2-2 計測センサー取付位置（等速ジョイント（伸縮機構有り））

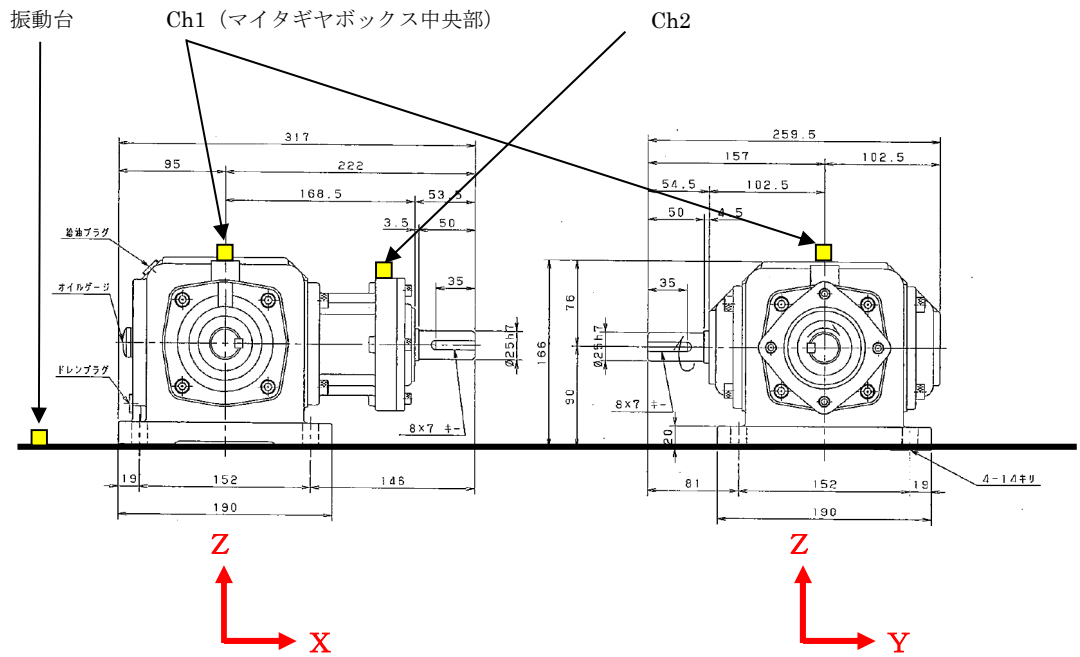


図 2-3 計測センサー取付位置 (マイタギヤボックス)

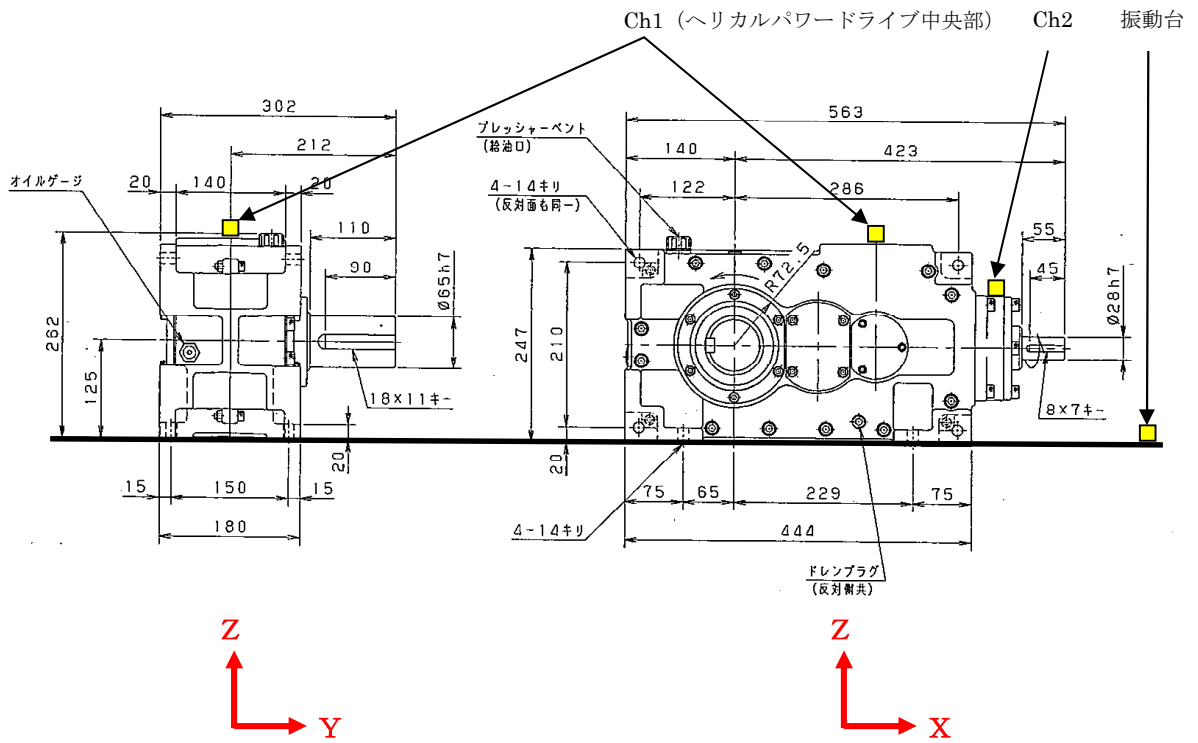
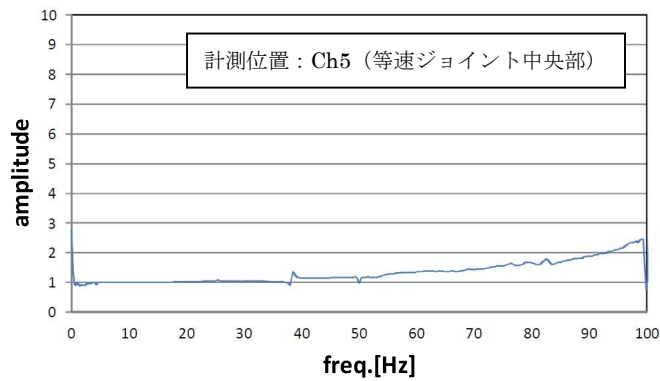


図 2-4 計測センサー取付位置 (ヘリカルパワードライブ)

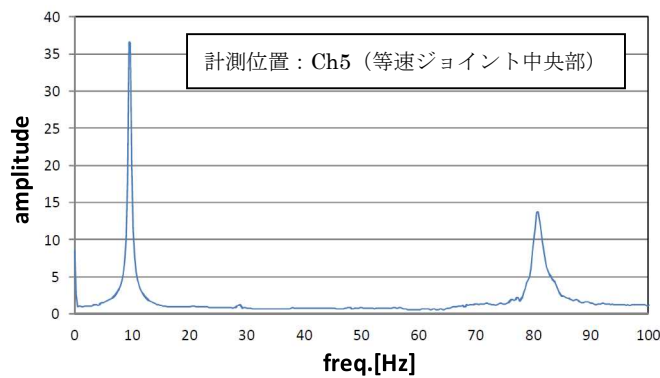
2.2 試験結果

試験により得られた周波数応答関数を図 2-5 から図 2-8 に、各軸方向の固有周期を表 2-1 から表 2-4 に示す。等速ジョイント（伸縮機構無し）の固有周期は 0.05 秒以上であり、柔構造であることを確認した。また、等速ジョイント（伸縮機構有り）、マイタギヤボックス、ヘリカルパワードライブは剛構造と見なせる固有周期 0.05 秒を下回る結果が得られた。



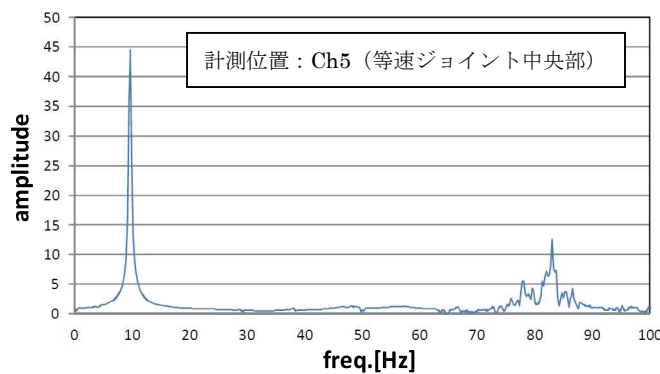
卓越振動数 5-X		
	周波数	応答倍率
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-

a. 水平 X 方向



卓越振動数 5-Y		
	周波数	応答倍率
1	9.5	36.56
2	80.8	13.78
3	-	-
4	-	-
5	-	-

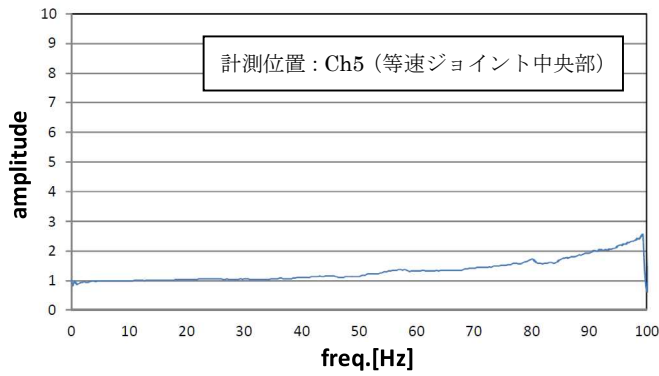
b. 水平 Y 方向



卓越振動数 5-Z		
	周波数	応答倍率
1	9.8	44.55
2	83.0	12.50
3	-	-
4	-	-
5	-	-

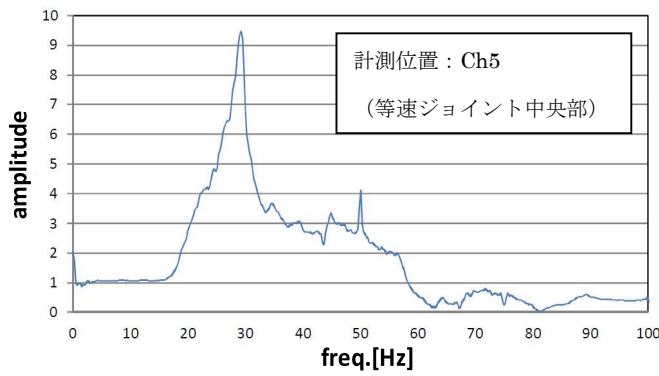
c. 鉛直 Z 方向

図 2-5 周波数応答関数（等速ジョイント（伸縮機構無し））



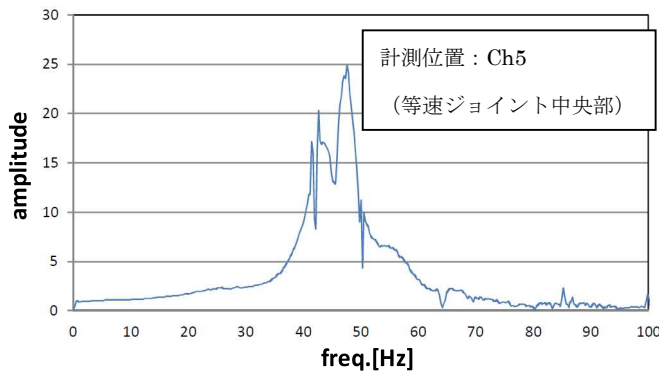
卓越振動数 マイタギア5-X		
	周波数	応答倍率
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-

a. 水平 X 方向



卓越振動数 マイタギア5-Y		
	周波数	応答倍率
1	29.3	9.47
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-

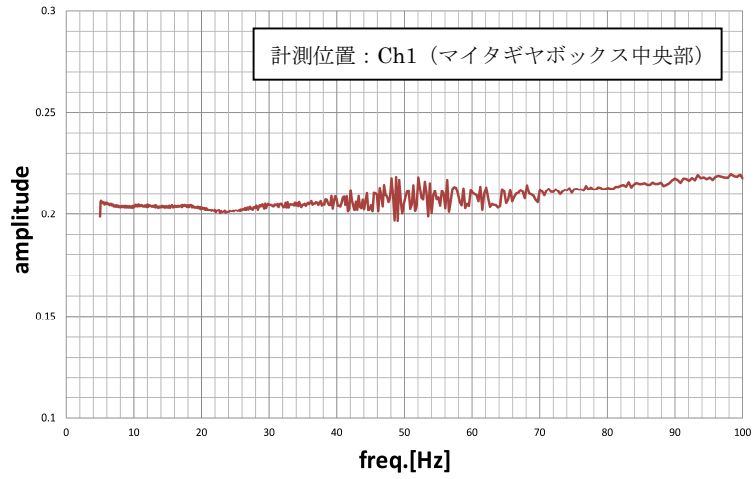
b. 水平 Y 方向



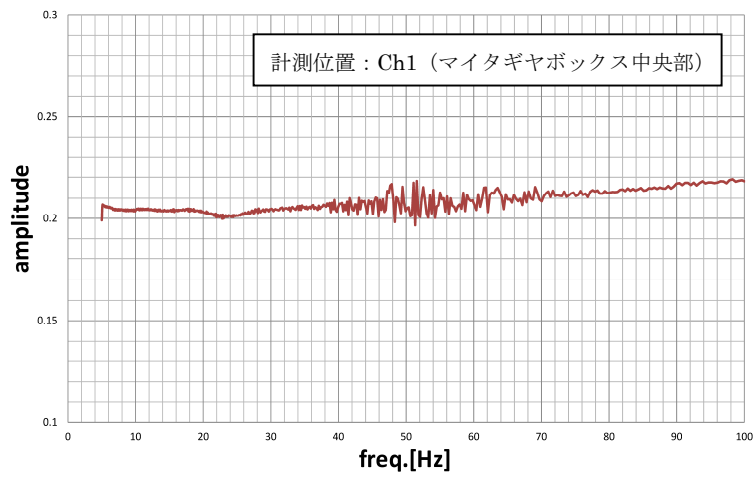
卓越振動数 マイタギア5-Z		
	周波数	応答倍率
1	47.6	24.91
2	42.7	20.31
3	-	-
4	-	-
5	-	-

c. 鉛直 Z 方向

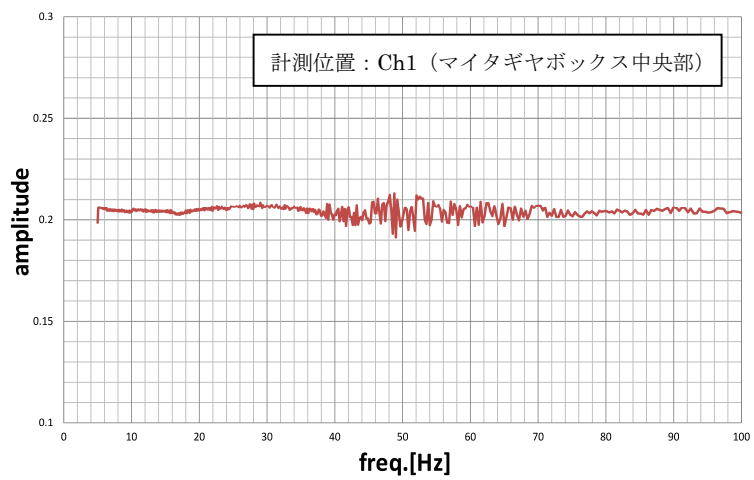
図 2-6 周波数応答関数 (等速ジョイント (伸縮機構有り))



a. 水平 X 方向



b. 水平 Y 方向

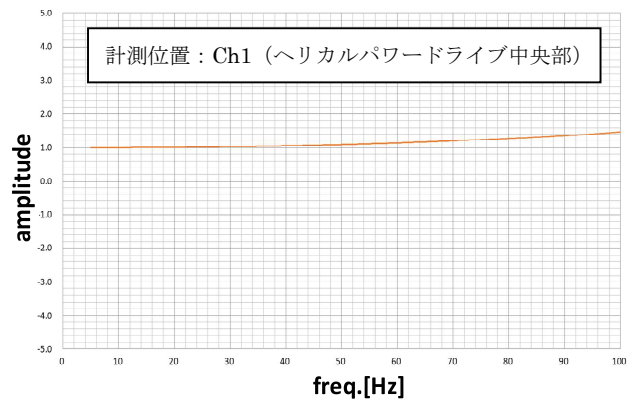


c. 鉛直 Z 方向

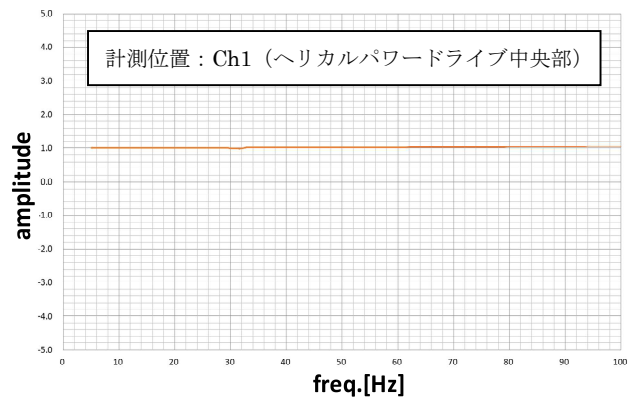
図 2-7 周波数応答関数 (マイタギヤボックス)



a. 水平 X 方向



b. 水平 Y 方向



c. 鉛直 Z 方向

図 2-8 周波数応答関数 (ヘリカルパワードライブ)

表 2-1 各軸方向での固有周期（等速ジョイント（伸縮機構無し））

方向	固有周期[s]	固有振動数[Hz]
X	—*	—*
Y	0.10	9.5
Z	0.10	9.8

注記*：5Hz から 100Hz までの範囲に共振点無し

表 2-2 各軸方向での固有周期（等速ジョイント（伸縮機構有り））

方向	固有周期[s]	固有振動数[Hz]
X	—*	—*
Y	0.03	29.3
Z	0.02	47.6

注記*：5Hz から 100Hz までの範囲に共振点無し

表 2-3 各軸方向での固有周期（マイタギヤボックス）

方向	固有周期[s]	固有振動数[Hz]
X	—*	—*
Y	—*	—*
Z	—*	—*

注記*：5Hz から 100Hz までの範囲に共振点無し

表 2-4 各軸方向での固有周期（ヘリカルパワードライブ）

方向	固有周期[s]	固有振動数[Hz]
X	—*	—*
Y	—*	—*
Z	—*	—*

注記*：5Hz から 100Hz までの範囲に共振点無し

3. 加振試験

3.1 試験方法

(1) 等速ジョイント（伸縮機構無し）

「2.2 試験結果」で示しているように、等速ジョイントの固有周期は 0.05 秒を上回っており、柔構造であることから、機器据付位置における設計用床応答曲線を包絡するような加振波を生成し、各軸単独加振試験を実施する。加振波は水平（前後）＋水平（左右）＋鉛直方向を加振方向として、次のように生成される。

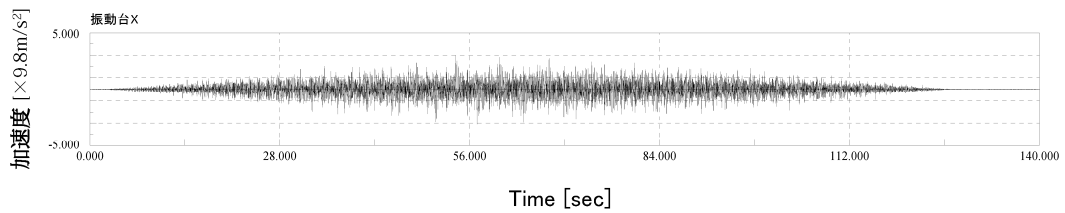
- 機器据付位置における設計用床応答曲線と等価な試験用床応答曲線を設定し、ランダム波を作成する。

- ・ 作成されたランダム波を入力とした加振台の時刻歴加速度波形から床応答曲線に変換し、試験用床応答曲線と比較する。
- ・ ここで加振台での床応答曲線が試験用床応答曲線を満足する場合、これを最終的な入力加振波とする。満足していない場合、ランダム波を補正し、再度確認するプロセスを繰り返して試験用床応答曲線を満足する入力加振波を作成する。

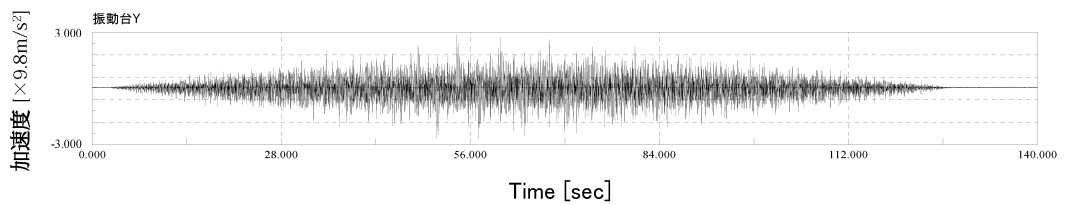
加振試験における試験条件を表 3-1 に、加振波を図 3-1 に示す。

表 3-1 加振試験条件

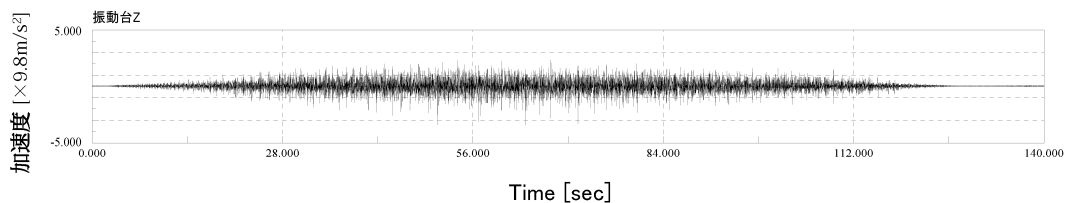
項目	試験条件
加振地震波	ランダム波
加振方向	水平 2 方向，鉛直方向の各軸単独加振
運転状態	停止中加振
取付状態	加振台上に設置された台板にボルトにて取り付け
試験回数	1 回



a. 水平 X 方向



b. 水平 Y 方向



c. 鉛直 Z 方向

図 3-1 加振試験に用いた加振波（加振台上での計測データ）の加速度時刻歴波形（等速ジョイント（伸縮機構無し））

- (2) 等速ジョイント（伸縮機構有り）、マイタギヤボックス、ヘリカルパワードライブ
「2.2 試験結果」で示しているように、等速ジョイント（伸縮機構有り）、マイタギヤボックス、ヘリカルパワードライブの固有周期は0.05秒を下回っており、剛構造とみなせることから、機器据付位置における機能維持評価用加速度（1.0ZPA）を包絡するような連続正弦波（33Hz）にて各軸単独加振試験を実施する。

加振試験における試験条件を表3-2に示す。

表3-2 加振試験条件

項目	試験条件
加振地震波	正弦波
加振方向	水平2方向、鉛直方向の各軸単独加振
運転状態	停止中加振
取付状態	加振台上に設置された台板にボルトにて取り付け
試験回数	1回

3.2 試験結果

- (1) 等速ジョイント（伸縮機構無し）

等速ジョイント（伸縮機構無し）は柔構造であり、共振による増幅を考慮する必要があるため、等速ジョイント中央部で測定された最大加速度を小数点以下第2位で切捨てた値を機能確認済加速度とした。表3-3に機能確認済加速度を示す。また、図3-2に設計用床応答曲線及び加振台床応答曲線を示す。

なお、加振試験後に以下について機器に異常がないことを確認した。

- ・変形が無いこと（外観検査）
- ・内部に損傷が無いこと（分解検査）
- ・試験体の軸を回転させ、試験前後で変化が無いこと（動作試験）

表3-3 機能維持評価用加速度と試験時の機能確認済加速度との比較
（等速ジョイント（伸縮機構無し））

(×9.8 m/s²)

方向	機能維持評価用加速度	機能確認済加速度	加振台加振試験時 最大応答加速度
X	2.15		
Y	2.15		
Z	5.40		

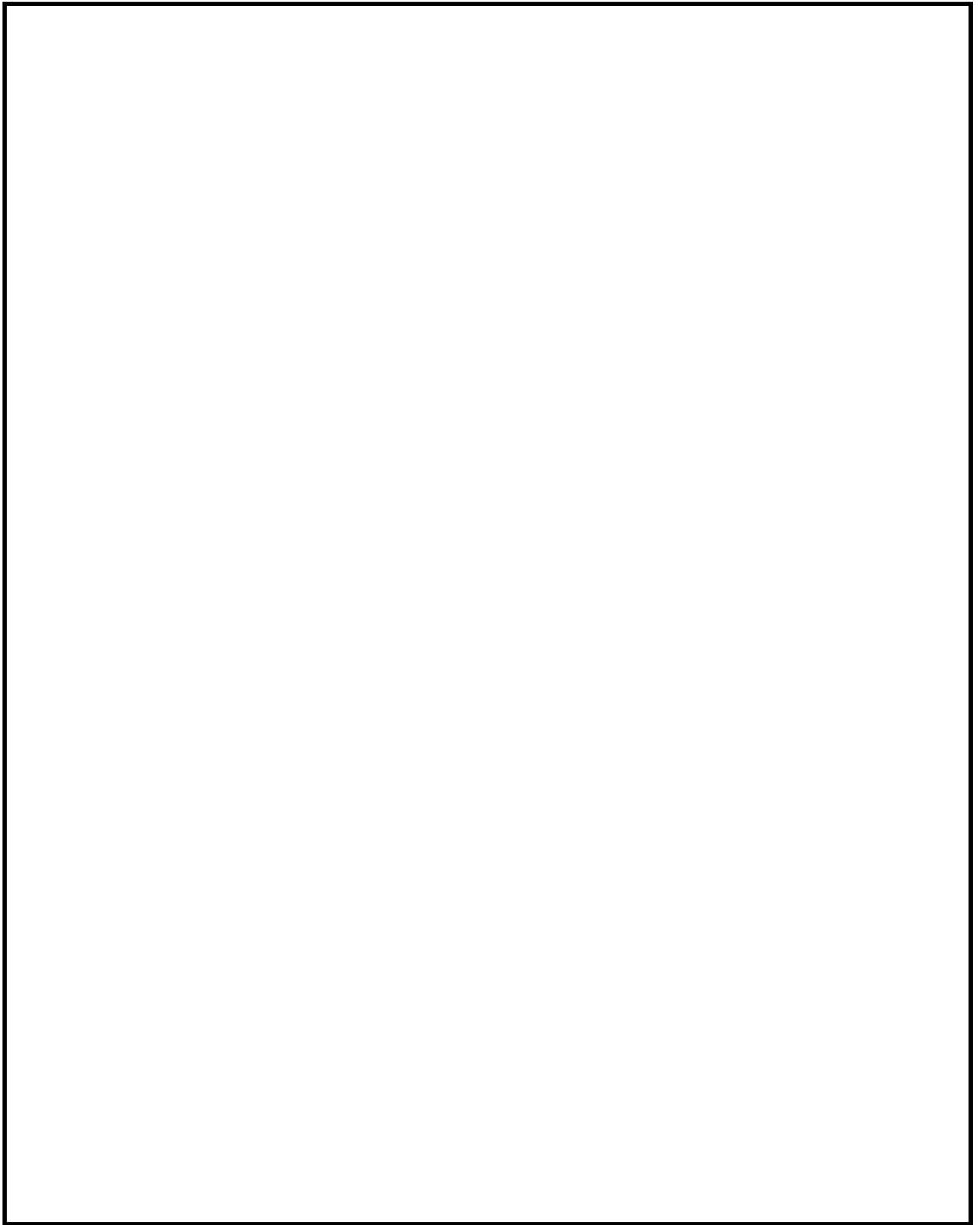


図 3-2 設計用床応答曲線と加振台床応答曲線との比較

(2) 等速ジョイント（伸縮機構有り）

以下について機器に異常がないことを確認し、本試験において加振台での最大加速度を小数点以下第2位で切捨てた値を機能確認済加速度とした。表3-4に機能確認済加速度を示す。

- ・変形が無いこと（外観検査）
- ・内部に損傷が無いこと（分解検査）
- ・試験体の軸を回転させ、試験前後で変化が無いこと（動作試験）

表 3-4 機能維持評価用加速度と試験時の機能確認済加速度との比較
（等速ジョイント（伸縮機構有り））

(×9.8 m/s²)

方向	機能維持評価用加速度	機能確認済加速度	加振台加振試験時 最大応答加速度
X	1.15		
Y	1.15		
Z	0.96		

(3) マイタギヤボックス，ヘリカルパワードライブ

以下について機器に異常がないことを確認し、本試験において加振台での最大加速度を小数点以下第2位で切捨てた値を機能確認済加速度とした。表3-5、表3-6に機能確認済加速度を示す。

- ・変形，破損等がないこと（外観検査）
- ・試験体の軸を回転させ、試験前後で変化が無いこと（動作試験）

表 3-5 機能維持評価用加速度と試験時の機能確認済加速度との比較
（マイタギヤボックス）

(×9.8 m/s²)

方向	機能維持評価用加速度	機能確認済加速度	加振台加振試験時 最大応答加速度
X	1.15		
Y	1.15		
Z	0.96		

表 3-6 機能維持評価用加速度と試験時の機能確認済加速度との比較
(ヘリカルパワードライブ)

($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)

方向	機能維持評価用加速度	機能確認済加速度	加振台加振試験時 最大応答加速度
X	1.15		
Y	1.15		
Z	0.96		

3.3 まとめ

加振試験の結果、等速ジョイント（伸縮機構無し）は、水平方向 $16.6 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 、鉛直方向 $12.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ まで、等速ジョイント（伸縮機構有り）は、水平方向 $3.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 、鉛直方向 $5.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ まで、マイタギヤボックスは、水平方向 $3.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 、鉛直方向 $2.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ まで、ヘリカルパワードライブは、水平方向 $6.1 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 、鉛直方向 $6.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ まで問題ないことを確認した。また、加振試験後の外観検査、分解検査、動作試験において機器の健全性及び動作性に異常のないことを確認し、遠隔手動弁操作設備の動的機能が維持されることを確認した。

加振試験を行う構成要素毎の代表機器選定の考え方について

1. 概要

本資料では、加振試験を行う遠隔手動弁操作設備の構成要素毎の代表機器選定の考え方について示す。

2. 遠隔手動弁操作設備の構成要素

遠隔手動弁操作設備は、格納容器圧力逃がし装置及び耐圧強化ベント系の隔離弁を原子炉建屋二次格納施設外から人力により開閉操作するための設備である。

遠隔手動弁操作設備の構成要素のうち駆動力を伝達する等速ジョイントは、剛構造のマイタギヤボックス、ヘリカルパワードライブ又はベアリングユニットを経由して対象弁に接続され、マイタギヤボックス、ヘリカルパワードライブ及びベアリングユニットは剛構造の支持構造物を経由して基礎ボルトにより原子炉建屋の床又は壁に固定されている。

各隔離弁の遠隔手動弁操作設備の構成要素は基本的に同じであるが、隔離弁から操作位置までの経路は各々の遠隔手動操作設備で異なることから、構成要素の寸法や個数が異なる。

遠隔手動弁操作設備の構成要素を表 2-1 に示す。

表 2-1 遠隔手動弁操作設備の構成要素

等速ジョイント
マイタギヤボックス
ヘリカルパワードライブ
ベアリングユニット
支持構造物

3. 構成要素毎の加振試験

遠隔手動弁操作設備の構成要素のうち、マイタギヤボックス、ヘリカルパワードライブ、ベアリングユニットは振動特性把握試験により剛構造であることを確認している。また、支持構造物については、原子炉建屋と共振しないように十分な剛性を持たせた設計としている。

そのため、遠隔手動弁操作設備の原子炉建屋への固定部はアンカと見なすことができ、構成要素間の連成影響は無視できることから、遠隔手動弁操作設備の加振試験は構成要素毎に分けて実施する。

なお、遠隔手動弁操作設備の構成要素のうち支持構造物は、静的機器であるため加振試験の対象外とする。

4. 構成要素毎の代表選定の考え方

遠隔手動弁操作設備の構成要素（支持構造物を除く）は、寸法、重量が異なるものの、基本的な構造は同じであることから、遠隔手動弁操作設備毎の構成要素を抽出し、構成要素の種類毎に寸法、重量を整理することで評価上最も厳しくなる代表を選定する。

遠隔手動弁操作設備の構成要素毎の整理結果を表 4-2 から表 4-5、遠隔手動弁操作設備の構成要素毎の代表選定の考え方を以下に示す。

(1) 等速ジョイント

最も長く重い等速ジョイントの1次固有周期は、振動特性把握試験において [] (計算機コード「ABAQUS」による解析において0.094s)であり、柔構造であることから共振に対する考慮が必要となる。なお、等速ジョイントの構造は長さが変わっても同じであり、その固有周期は短く軽くなるほど小さくなることから、各等速ジョイントの固有周期は [] 以下に分布していると考えられる。ここで、耐震計算で用いている原子炉建屋 (T.M.S.L. 31700mm) の設計用床応答曲線は図 4-1 の通りであり、固有周期が [] 以下の範囲では震度は減少傾向となり [] の震度が最大となることから、最も長く重い等速ジョイントの地震荷重が最大となる。また、長く重い等速ジョイントほど地震荷重によるたわみ量も大きくなる。

以上のことから、長く重い等速ジョイントほど、構造上最も厳しい評価となることから、最も長く重い等速ジョイントを代表に選定する。

また、等速ジョイントは伸縮機構無しと伸縮機構有りの2種類が存在するため、それぞれについて最も長く重い等速ジョイントを代表に選定する。

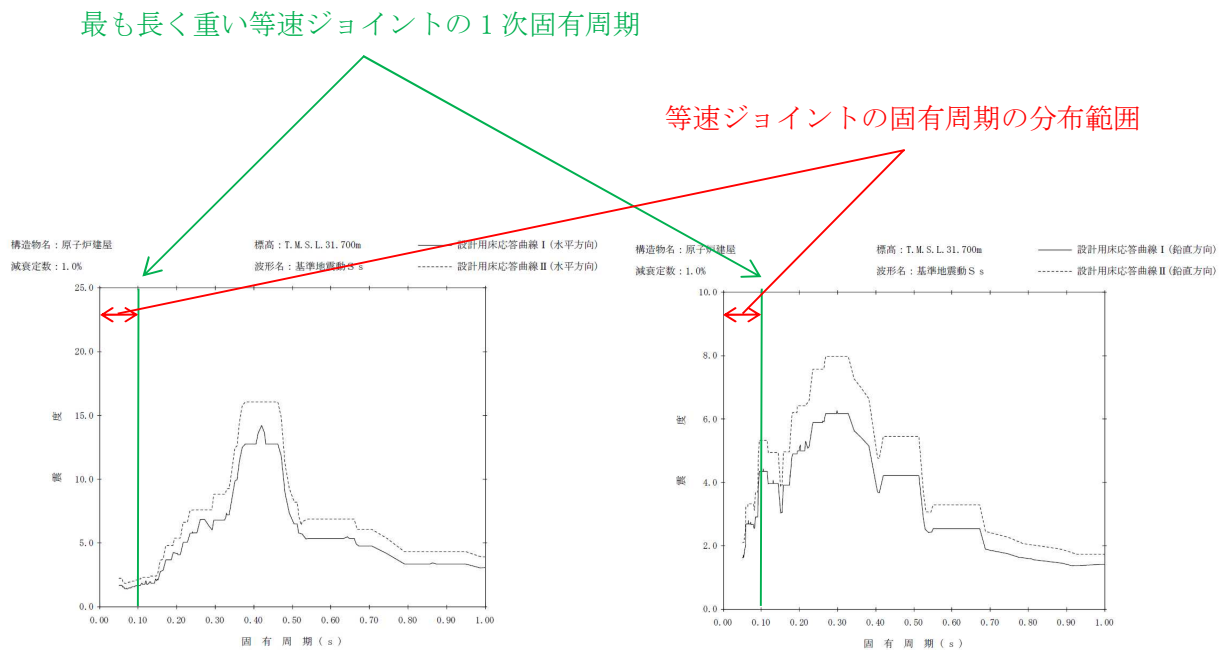


図 4-1 設計用床応答曲線（原子炉建屋，減衰定数：1%，標高：T.M.S.L 31.7m）

(2) マイタギヤボックス

マイタギヤボックスは、2つの傘歯車（マイタギヤ）により駆動力の軸方向を変えるためのギヤボックスである。遠隔手動弁操作設備では、取付方向に対する傘歯車の軸配置の違う3種類のマイタギヤボックスを使用しているが、基本構造及び重量は全て同一あることから、このうちの1つを代表に選定する。

(3) ヘリカルパワードライブ

ヘリカルパワードライブは、同時かみ合い歯数の多いはすば歯車（ヘリカルギヤ）を用いて高効率に減速を行うギヤボックスである。遠隔手動弁操作設備では、重量の異なる2種類のヘリカルパワードライブ（100kg, 75kg）を使用しているが、重量が大きいほど構造上最も厳しい評価となることから、重量の大きい方を代表に選定する。

(4) ベアリングユニット

ベアリングユニットは、軸受箱に軸受が組み込まれたものである。構造上マイタギヤボックス、ヘリカルギヤボックスの軸受部と同様であり、これらの加振試験に包絡されていること及び重量が軽く応答も小さいため共振による影響は軽微であると考えられることから、加振試験の代表として選定しない。

なお、等速ジョイント側からの反力の影響については、ベアリングユニットの定格荷重内であり問題無い事を確認している（表 4-1 参照）。ベアリングユニットを図 4-1 に示す。

表 4-1 ベアリングユニットに加わる反力と定格荷重の関係

等速ジョイント反力	460.7[N] (計算機コード「ABAQUS」 による解析において)
ベアリングユニット 定格荷重	7.85[kN]



図 4-1 ベアリングユニット

表 4-2 等速ジョイント（伸縮機構無し）の整理結果及び代表設備

弁番号	設備名	重量[kg]	長さ[mm]	代表	選定理由
T31-F019	BJ75LACC102/103	15	2288	—	—
	BJ75LACC102/103	8.8	1016	—	—
	BJ75LACC102/103	11.2	1505	—	—
	BJ75LACC102/103	11.3	1520	—	—
	BJ75LACC102/103	9.2	1084	—	—
	BJ75LACC102/103	10.6	1383	—	—
T31-F022	BJ75ACP101	5.2	298	—	—
	BJ75LACC102/103	9.1	1078	—	—
	BJ75LACC102/103	10.4	1345	—	—
	BJ75LACC102/103	7.4	730	—	—
	BJ75LACC102/103	10.4	1335	—	—
	BJ75LACC102/103	9.8	1296	—	—
	BJ75ACP101	5.1	304	—	—
T31-F070	BJ75LACM909	10.1	1149	—	—
T31-F072	BJ75LACC403	8.9	877	—	—
	BJ75LACC102/103	7.1	1195	—	—
	BJ75LACC102/103	14.2	2994	—	—
	BJ75LACC102/103	7.6	758	—	—
	BJ75LACC102/103	12.4	1746	—	—
	BJ75LACC102/103	8.3	920	—	—
	BJ75LACC102/103	10.5	1355	—	—
T61-F001	BJ75LACC102/103	20.7	3445	○	重量：最大 長さ：最長
	BJ75LACC102/103	7.9	833	—	—
	BJ75LACC102/103	11.8	1626	—	—
	BJ75LACC102/103	7.3	710	—	—
	BJ75LACC102/103	10.6	1355	—	—
T61-F002	BJ75LACC102/103	12.1	1692	—	—
	BJ75LACC102/103	14.3	2139	—	—
	BJ75LACC102/103	7.9	833	—	—
	BJ75LACC102/103	10.8	1429	—	—
	BJ75LACC102/103	11.1	1473	—	—

表 4-3 等速ジョイント（伸縮機構有り）の整理結果及び代表設備

弁番号	設備名	重量[kg]	長さ[mm]	代表	選定理由
T31-F019	BJ75LACC403	8.9	879～1011	—	—
T31-F022	BJ75LACC403	8.9	1046～1159	○	重量：同等 長さ：最長
T61-F001	BJ75LACC403	8.9	1006～1138	—	—
T61-F002	BJ75LACC403	8.9	848～980	—	—

表 4-4 マイタギヤボックスの整理結果及び代表設備

弁番号	設備名	重量[kg]
T31-F019	ED6M-1-D-Y	21
	ED6M-1-U-0-Y	21
	ED6M-1-L-Y	21
	ED6M-1-U-0-Y	21
	ED6M-1-D-Y	21
T31-F022	ED6M-1-D-Y	21
	ED6M-1-U-0-Y	21
	ED6M-1-L-Y	21
	ED6M-1-D-Y	21
	ED6M-1-U-0-Y	21
	ED6M-1-D-Y	21
	ED6M-1-U-0-Y	21
T31-F072	ED6M-1-L-Y	21
	ED6M-1-U-0-Y	21
	ED6M-1-D-Y	21
T61-F001	ED6M-1-U-0-Y	21
	ED6M-1-D-Y	21
T61-F002	ED6M-1-L-Y	21
	ED6M-1-L-Y	21

パターン	重量[kg]	代表	選定理由
ED6M-1-D-Y	21	—	同等
ED6M-1-U-0-Y	21	—	同等
ED6M-1-L-Y	21	○	同等

表 4-5 ヘリカルパワードライブの整理結果及び代表設備

弁番号	設備名	重量[kg]
T31-F019	HDR0103CL41N-1	100
T31-F022	HDR0003AL41N-1	75
T61-F001	HDR0003AL41N-1	75
T61-F002	HDR0003AL41N-1	75

パターン	重量[kg]	代表	選定理由
HDR0103CL41N-1	100	○	重量：最大
HDR0003AL41N-1	75	—	—