

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-他-F-19-0021_改0
提出年月日	2021年3月25日

弁の動的機能維持評価における最新知見の取り込み

2021年3月

東北電力株式会社

目次

1. はじめに	1
2. 現行の評価手法及び適用規格.....	1
3. 最新の研究成果による知見取り込みの検討.....	1
4. 最新研究の実施内容及び成果の概要.....	2
4.1 対象弁	2
4.2 試験概要	3
4.2.1 試験設備	3
4.2.2 試験体及び試験条件.....	4
4.3 試験結果概要.....	8
4.3.1 電動弁	8
4.3.2 主蒸気隔離弁.....	8
4.3.3 空気作動弁.....	8
4.3.4 安全弁（主蒸気逃がし安全弁）	8
4.3.5 試験成果まとめ.....	9
4.3.6 駆動部補強対策が必要な電動弁.....	9
4.4 参考文献	11
5. 今回工認（最新知見の取り込み）における弁動的機能維持評価手法.....	11

1. はじめに

弁の動的機能維持評価においては、J E A G 4 6 0 1 -1991 の評価手順及び機能維持確認済加速度（以下 A_T という。）を用いた評価を実施しているが、同規格の機能維持評価の基本方針において、『今後新たな試験等によって合理的な知見が得られた場合、これらを見直すものとする』旨の記載があり（添付-1 参照）、この考え方にに基づき、先行プラントにおいても、J E A G 4 6 0 1 -1991 の評価手順策定後の研究成果による知見を取り込んで、弁の動的機能維持評価を実施している。

また、地震応答加速度の増加等に対応するため、従来の A_T を大きく上回る加速度にて弁の作動を確認する必要性が生じており、高加速度を負荷した弁の加振試験が実施されている。今回工認においてそれらの最新の研究にて得られた知見を取り込んだ評価手法の適用を検討するにあたり、本資料にて弁の動的機能維持評価に係る現行の評価手法及び今回工認（最新知見の取り込み）における評価手法について説明する。概要は添付-2 のとおり。

なお、今回工認（最新知見を取り込み）における評価の詳細については、補足説明資料「補足 600-14-1 動的機能維持の詳細評価について（新たな検討又は詳細検討が必要な設備の機能維持評価について）」において説明する。

2. 現行の評価手法及び適用規格

先行プラントの弁の動的機能維持評価においては、動的機能維持評価の適用規格である J E A G 4 6 0 1 -1991 の評価手順及び A_T を用いた評価を実施している。機能維持評価対象弁、各弁の評価ポイント及び評価手順は添付-3 のとおり。

また、先行プラントでは当該規格の評価手法に加え、既往研究の成果に基づく知見を取り込んでいる。具体的には J E A G 4 6 0 1 -1991 の評価手法に加えて、鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究による検討結果を取り込んだ評価手法を適用しており、水平・鉛直個別の A_T を設定し、評価を実施している。

3. 最新の研究成果による知見取り込みの検討

以下の背景から、弁駆動部の機能確認済加速度に関する研究が新たに行われている。

① 評価条件の変更に伴う応答加速度の増加

基準地震動 S_s による入力が増大、高振動数領域の影響考慮等により、弁の動的機能維持評価の条件が厳しくなっており、動的機能維持評価において駆動部の応答加速度が J E A G 4 6 0 1 -1991 及び既往知見による A_T を超過する場合がある。その場合、J E A G 4 6 0 1 -1991 の評価手順では、弁最弱部の構造強度評価にて健全性を確認する手順となっているが、構造強度評価のみでは駆動部の作動性の確認ができないこと、駆動部の作動性は試験によって確認されるものであることから、 A_T を超過する加速度で弁の作動を確認するためには、高加速度を負荷した加振試験が必要となる。

② 弁駆動部の動作機能維持限界の把握

弁の A_T は J E A G 4 6 0 1 -1991 及び既往研究の知見に基づいて定められているが、当該の A_T の値は当時の試験等により機能維持が確認された加速度であり、弁駆動部が機能喪失に至るまでには更に裕度を持っていると考えられる。このため弁駆動部の機能維持限界を把握することは、知見の拡充として有益となる。

今回工認においては、基準地震動 S_s による入力が増大、高振動数領域の影響考慮等により弁駆動部の応答加速度が増加し、J E A G 4 6 0 1 -1991 及び既往研究の知見による A_T を超過する弁があることから、最新の研究成果を踏まえて、現状の評価手法に対して新たな知見の取り込みを検討する。

J E A G 4 6 0 1 -1991 において、駆動部の応答加速度が機能確認済加速度を超えた場合は、駆動装置単体の機能確認済加速度を許容値とした評価を行う考え方が記載されていること（添付-3 参照）、入力あるいは応答のレベルが機能確認済のレベルを大きく上回る場合には、機器本体あるいは動的機能の評価の対象となる要素について、試験による確認を行う必要があるとの記載がされていること（添付-1 参照）から、試験によって弁駆動部の作動を確認した加速度を許容値とする評価手法の適用は、J E A G 4 6 0 1 -1991 の考え方と比較しても問題ないと考えられる。

4. 最新研究の実施内容及び成果の概要

J E A G 4 6 0 1 -1991 及び既往知見による弁の A_T を上回る高加速度を負荷できる振動台（共振振動台）を用いた弁の加振試験により、高加速度負荷時の駆動部の動作機能を確認する研究が実施されている。（4.4 参考文献参照）

当該の研究概要を以下に示す。

4.1 対象弁

最新の研究にて加振試験の対象としている BWR の弁を表 1 に示す。

表 1 最新研究における BWR の加振試験対象弁

No	弁種類 (試験の分類)	弁種類 (J E A G 4 6 0 1 -1991 上の分類)
1	電動弁	一般弁 (グローブ、ゲート、バタフライ)
2	主蒸気隔離弁	主蒸気隔離弁
3	空気作動弁	一般弁 (グローブ、バタフライ)
4	安全弁 (主蒸気逃がし安全弁)	安全弁 (BWR 主蒸気逃がし安全弁)

4.2 試験概要

弁の加振試験において適用した試験設備、試験体等の概要を以下に示す。

4.2.1 試験設備

加振試験に使用した試験設備（共振振動台）の概略仕様を表 2 に示す。また、試験設備の写真を図 1 に示す。共振振動台は大型振動台に接続されており、加振源である大型振動台からの振動を共振現象により増幅することにより、最大 $20 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ の加速度を発生させる設備である。

表2 試験設備概略仕様

項目	大型振動台	共振振動台
振動台サイズ	5m × 5m	2m × 2m
加振方向	1 方向	1 方向
最大加速度	$2 \times 9.8 \text{ m/s}^2$	$20 \times 9.8 \text{ m/s}^2$
振動数範囲	0.5-30 Hz	10 Hz

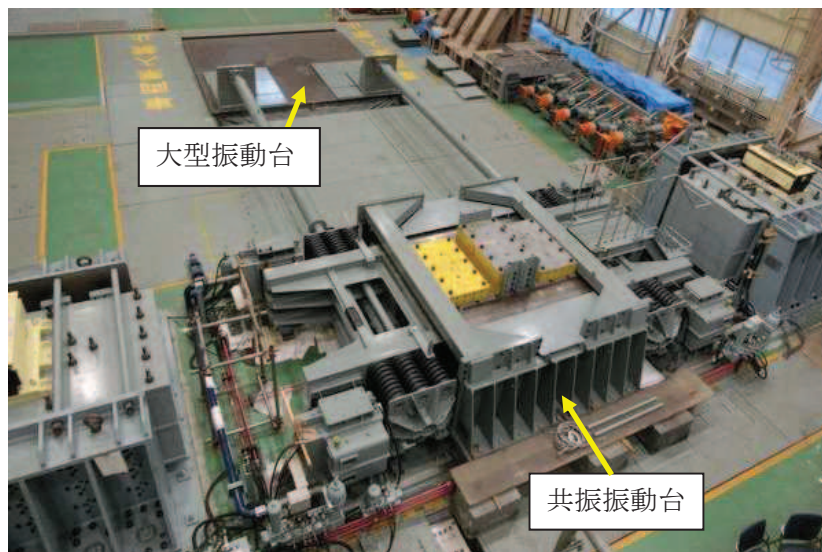


図1 試験設備

4.2.2 試験体及び試験条件

(1) 電動弁

電動弁の試験体の例及び加振方向を図2に示す。また、電動弁の試験条件を表3に示す。

なお、実際のプラントにおいては、様々な型式の電動弁を用いていることから、加振試験においても型式の異なる複数の試験体を用意し、試験を実施している。

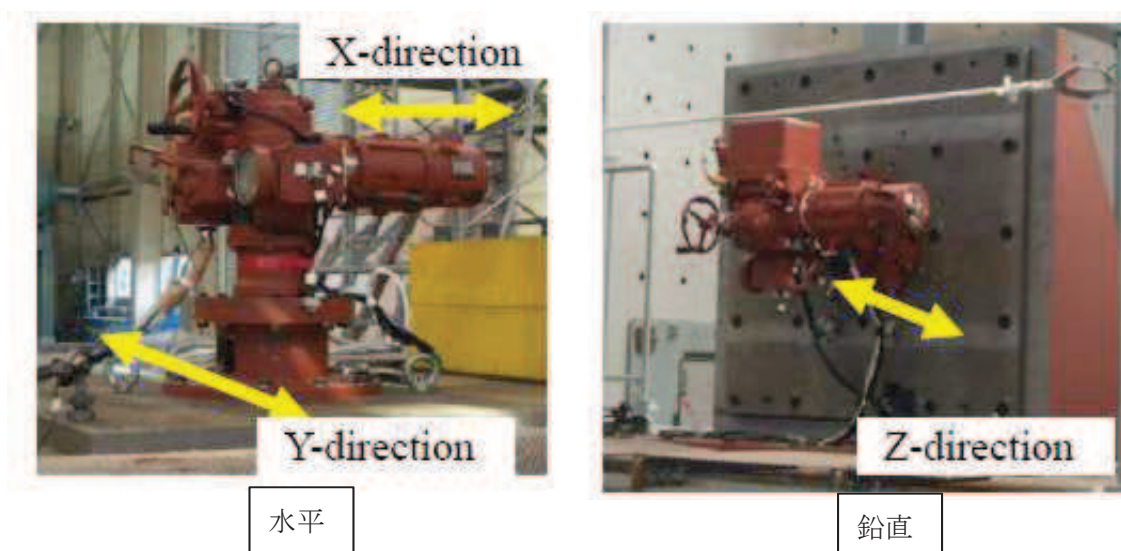


図2 電動弁の試験体の例及び加振方向（参考文献2）

表3 電動弁の試験条件

項目	内容
加振方向	水平2方向 (X, Y)、鉛直方向 (Z) (1方向ずつ)
目標加速度 (駆動部応答)	水平/鉛直 : 3, 15, 20 $\times 9.8\text{m/s}^2$
目標振動数	約 10Hz
加振波	正弦波
弁機能維持確認	加振中, 加振後の弁作動を実施 作動時間の測定
加振時間	各 15 秒以上

(2) 主蒸気隔離弁

主蒸気隔離弁の試験体及び加振方向を図3に示す。また、主蒸気隔離弁の試験条件を表4に示す。

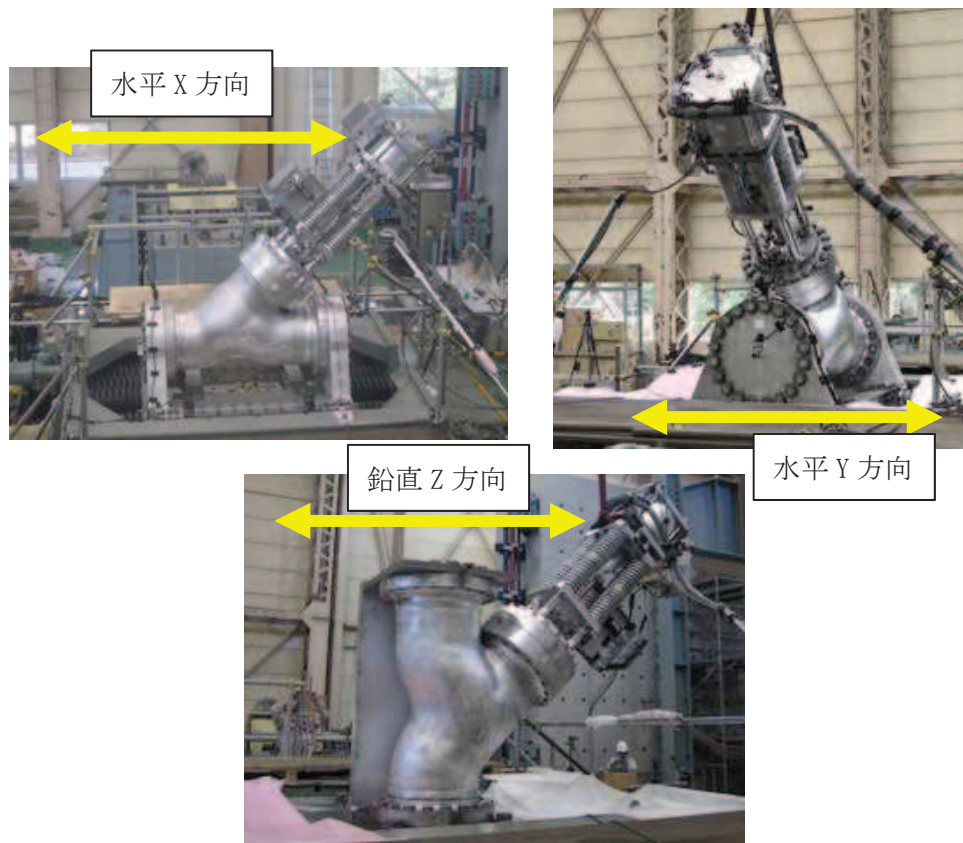


図3 主蒸気隔離弁の試験体及び加振方向（参考文献4）

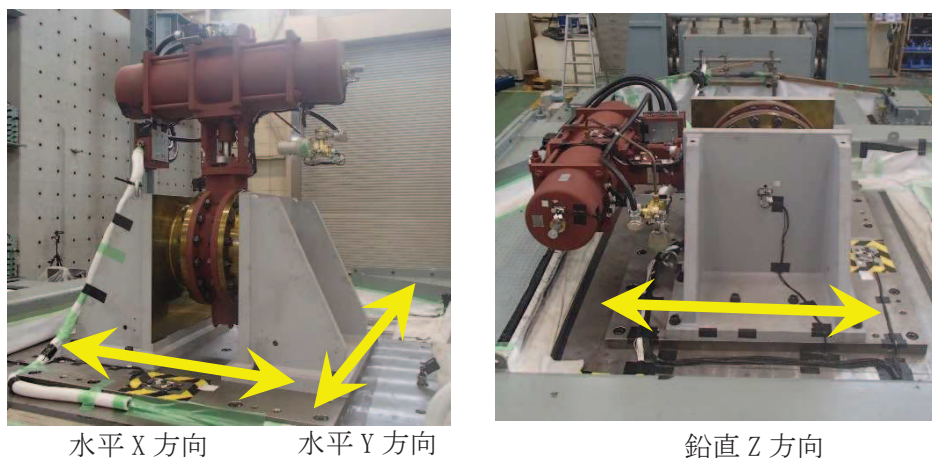
表4 主蒸気隔離弁の試験条件

項目	内容
加振方向	水平2方向 (X, Y)、鉛直方向 (Z) (1方向ずつ)
目標加速度 (駆動部応答)	水平(X): 3, 10, 13, 15 $\times 9.8\text{m/s}^2$ 水平(Y)/鉛直: 3, 10, 15 $\times 9.8\text{m/s}^2$
目標振動数	約 10Hz
加振波	正弦波
弁機能維持確認	加振時閉作動: 作動時間の測定 加振後漏えい試験: 漏えい率の測定
加振時間	各 15 秒以上

(3) 空気作動弁

空気作動弁の試験体の例及び加振方向を図4に示す。また、空気作動弁の試験条件を表5に示す。

なお、実際のプラントにおいては、様々な型式の空気作動弁を用いていることから、加振試験においても型式の異なる複数の試験体を用意し、試験を実施している。



水平 X 方向 水平 Y 方向 鉛直 Z 方向

図4 空気作動弁の試験体の例及び加振方向（参考文献5）

表5 空気作動弁の試験条件

項目	内容
加振方向	水平2方向 (X, Y)、鉛直方向 (Z) (1方向ずつ)
目標加速度 (駆動部応答)	水平/鉛直 : 3, 15, 20 × 9.8m/s ²
目標振動数	約 10Hz
加振波	正弦波
弁機能維持確認	加振中、加振後の弁作動を実施 作動時間の測定
加振時間	各 15 秒以上

(4) 安全弁（主蒸気逃がし安全弁）

安全弁（主蒸気逃がし安全弁）の試験体及び加振方向を図5に示す。また、試験条件を表6に示す。

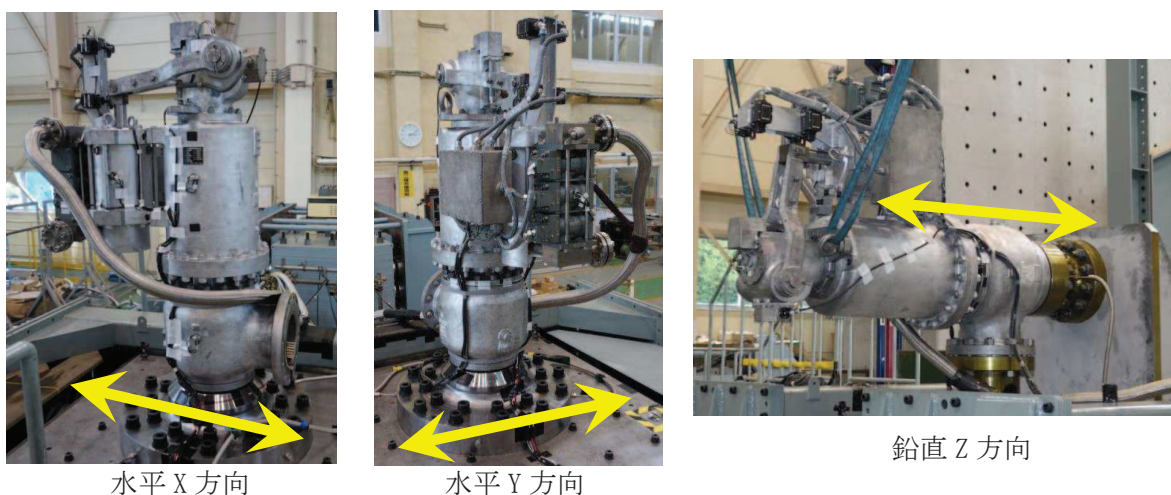


図5 安全弁（主蒸気逃がし安全弁）の試験体及び加振方向（参考文献1）

表6 安全弁（主蒸気逃がし安全弁）の試験条件

項目	内容
加振方向	水平2方向 (X, Y)、鉛直方向 (Z) (1方向ずつ)
目標加速度 (駆動部応答)	水平：3, 15, 20 $\times 9.8\text{m/s}^2$ 鉛直：3, 10, 20 $\times 9.8\text{m/s}^2$
目標振動数	約 10Hz
加振波	正弦波
弁機能維持確認	加振中，加振後の弁作動を確認 安全弁機能：吹き出し圧力の測定 逃し弁機能：作動時間の測定
加振時間	各 15 秒以上

4.3 試験結果概要

4.3.1 電動弁

電動弁の加振試験において、目標の加速度での加振中及び加振後に弁の作動確認を行い、要求される動作機能が維持されるかを確認した。電動弁においては、一部の型式を除いて最大の目標加速度である 20G ($1G=9.8m/s^2$) にて動作機能を確認した。

20G での動作機能維持が確認できなかった一部型式の駆動部を持つ電動弁については、駆動部の補強改造を行うことにより最大の目標加速度 20G においても動作機能が維持されることを確認した。

4.3.2 主蒸気隔離弁

主蒸気隔離弁の加振試験において、目標の加速度での加振時に弁の作動確認を行い、要求される動作機能が維持されるかを確認した。主蒸気隔離弁においては、最大の目標加速度である 15G にて動作機能を確認した。

4.3.3 空気作動弁

空気作動弁の加振試験において、目標の加速度での加振中及び加振後に弁の作動確認を行い、要求される動作機能が維持されるかを確認した。空気作動弁においては、駆動部型式によって動作機能を確認した最大加速度に相違があり、水平方向で 15G~20G、鉛直方向で 19G~20G にて動作機能を確認した。

4.3.4 安全弁（主蒸気逃がし安全弁）

主蒸気逃がし安全弁の加振試験において、目標の加速度での加振中及び加振後に弁の作動確認を行い、要求される動作機能が維持されるかを確認した。主蒸気逃がし安全弁においては、最大の目標加速度である 20G にて動作機能を確認した。

4.3.5 試験成果まとめ

加振試験により得られた駆動部の動作機能を確認した最大加速度を表 7 に示す。なお、表 7 では駆動部の動作機能を確認した最大加速度を水平・鉛直個別に記載しているが、評価の判定は水平・鉛直の加速度を合成した値で行う。評価例を以下に示す。

【評価例 電動弁の場合】

$$\sqrt{(\text{水平応答加速度})^2 + (\text{鉛直応答加速度})^2} \leq 20G$$

表 7 加振試験により得られた駆動部の動作機能を確認した最大加速度

No	弁種類 (試験の分類)	駆動部の動作機能を確認した最大加速度		備考
		水平	鉛直	
1	電動弁	20 G	20 G	型式によって駆動部の補強改造が必要
2	主蒸気隔離弁	15 G	15 G	
3	空気作動弁	15-20 G	19-20 G	駆動部型式に応じて動作機能を確認した最大加速度が異なる。
4	安全弁 (主蒸気逃がし安全弁)	20 G	20 G	

4.3.6 駆動部補強対策が必要な電動弁

上記試験結果の中で、電動弁のうち一部型式については従来の駆動部構造では高加速度負荷時に駆動部締結ボルトが損傷し、動作機能を喪失する結果が確認された。

当該型式の弁に対しても、基準地震動 S_s に対する機能維持が求められることから、駆動部の強度向上を目的として補強部材を追加する案を検討し、対策を反映した駆動部に対する加振試験を実施した。補強対策を実施した電動弁の駆動部において、加振試験により確認された駆動部補強対策反映前後の動作機能を確認した最大加速度を表 8 に示す。また、対策反映前後の駆動部の概略構造を図 6 に示す。図 6 に示す耐震ブラケットを追加することにより、駆動部の強度が改善されることを確認した。

表 8 駆動部補強を要する電動弁における駆動部の動作機能を確認した最大加速度（対策反映前後）

加振方向	駆動部の動作機能を確認した最大加速度	
	対策反映前	対策反映後
X (水平)	8.5 G	20 G
Y (水平)	20 G	20 G
Z (鉛直)	6.8 G	20 G

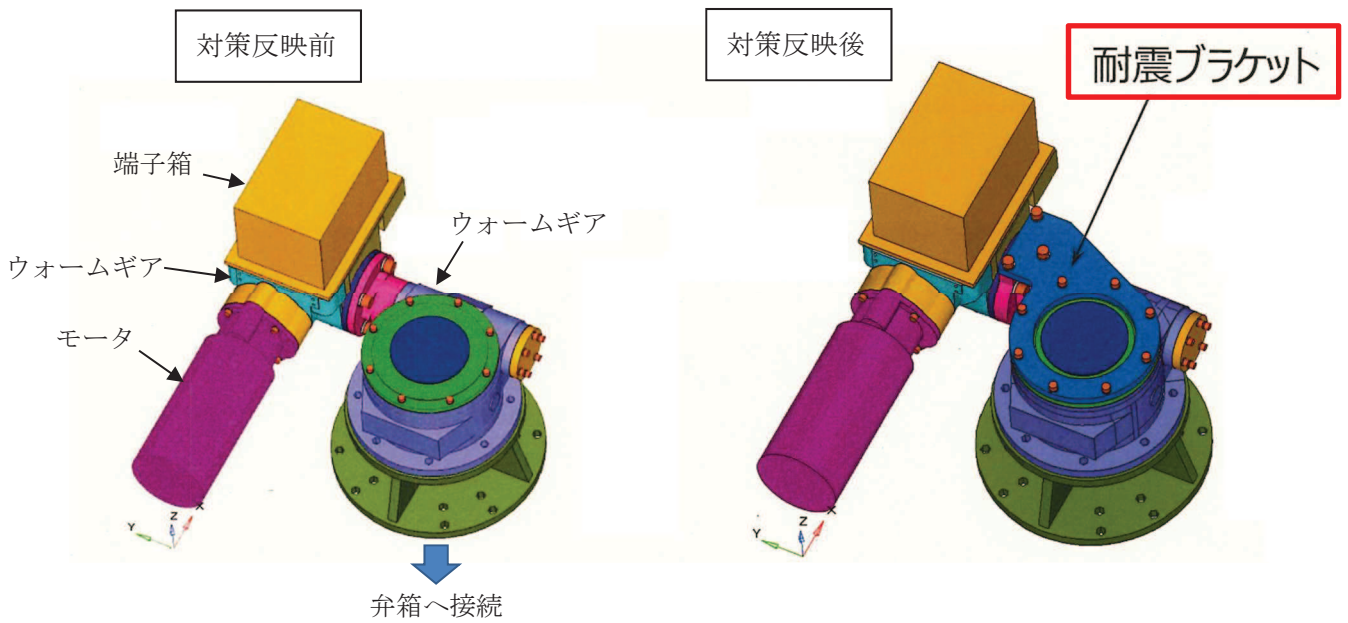


図 6 駆動部補強前後の構造（参考文献 3）

4.4 参考文献

1. Nishino et al., “Seismic test results of the main steam safety relief valve for Japanese boiling water reactor nuclear power plants”, PVP2017-65602 2017.7
2. Kojima et al., “Seismic test result of motor-operated valve actuators for nuclear power plant”, PVP2017-65600 2017.7
3. 堤他, “原子力発電所の電動バタフライ弁駆動部の耐震性向上確証試験” 日本保全学会第14回学術講演会, 2017.8
4. Itabashi et al., “Seismic test results of the main steam isolation valve for Japanese boiling water reactor nuclear power plants”, PVP2020-21362 2020.7
5. Matsubara et al., “Seismic test results of air-operated valve actuators for nuclear power plants(Air-operated butterfly valve(Direct-coupled type))”, PVP2019-93194 2019.7

5. 今回工認（最新知見の取り込み）における弁動的機能維持評価手法

以上より、J E A G 4 6 0 1 -1991 の機能維持評価の基本方針に基づいて実施した試験により得られた最新知見を取り込むことによって、弁駆動部の機能維持限界を踏まえた評価が可能となることから、今回工認の弁動的機能維持評価においては、J E A G 4 6 0 1 -1991 及び既往知見による評価手法に加え、最新知見に基づく駆動部の動作機能を確認した最大加速度を用いた弁の動的機能維持評価手法を適用する。

なお、今回工認の弁の動的機能維持評価は J E A G 4 6 0 1 -1991 及び既往知見による評価手順に基づくことを基本とし、駆動部の応答加速度が J E A G 4 6 0 1 -1991 及び既往知見の A_T を超過した場合の詳細評価において、最新知見を取り込んだ評価を適用するものである。

表 9 に J E A G 4 6 0 1 -1991 と既往知見による評価手法及び今回工認（最新知見取り込み）における評価手法について整理した。 A_T 超過時は、詳細評価として弁最弱部の構造強度評価を実施するとともに、駆動部の応答加速度が加振試験より得られた駆動部の動作機能を確認した最大加速度以下であることを確認する。

表9 J E A G 4 6 0 1 - 1991, 既往知見及び今回工認 (最新知見取り込み) における弁動的機能維持評価手法の整理

弁種類	J E A G 4 6 0 1 - 1991 と既往知見取り込み (先行プラント許認可実績)		今回工認の評価 (最新知見取り込み)
	試験の分類	A _T	
J E A G 4 6 0 1 - 1991 の分類 一般弁 (グループ, ゲート, バタフライ)	電動弁 空気作動弁	水平 6.0 G 鉛直 6.0 G	A _T 超過時の詳細評価 • 最弱部の構造強度評価 • 加振試験にて駆動部の動作機能を確認した 最大加速度を適用
一般弁 (逆止弁)	(試験対象外)	水平 6.0 G 鉛直 6.0 G	• 開閉状態維持評価 • 構造強度評価 (最新知見取り込みなし)
主蒸気隔離弁	主蒸気隔離弁	水平 10.0 G 鉛直 6.2 G	• 最弱部の構造強度評価 • 加振試験にて駆動部の動作機能を確認した 最大加速度を適用
安全弁 (BWR 主蒸気逃がし 安全弁)	安全弁 (主蒸気逃がし安全弁)	水平 9.6 G 鉛直 6.1 G	• 最弱部の構造強度評価 (最新知見取り込みなし) ※

※今回工認における安全弁 (主蒸気逃がし安全弁) の評価は, J E A G 4 6 0 1 - 1991 及び既往知見の手法にて行うが, 弁の動作機能維持限界の把握のため, 加振試験により高加速度負荷時の動作機能の確認を行っている。

解析による評価法を適用できる。
 ・ 構造、作動原理等が、上記適用範囲の機種と著しく異なる場合には、本追補版で定める解析による評価法をそのまま適用することはできない。

- (2) 付属品の範囲について
- ・ 既往研究で付属品まで含めて機能維持の確認を行ったものは、その付属品を含めた解析による評価法を「3.5 機器の評価方法」に規定しており、これを付属品の適用範囲とする。
 - (3) 入力又は応答レベルについて
 - ・ 既往研究で機能維持の確認がなされた入力又は応答のレベルの範囲内（以下機能確認認知加速度という。「3.5 機器の評価方法」における各機種ごとの⑥評価基準に示す。）であれば、「3.5 機器の評価方法」に示すような比較的簡便な解析手法（1質点振動解析モデルによる基礎部だけの検討等）により評価することができる。
 - ・ 機能確認認知加速度を超える地震力を受ける場合には、詳細解析を行って動的機能の維持を確認する必要がある。

なお、当該機器の地震時機能維持評価のポイントが明確になっている場合には、その評価点に着目した解析で評価することができる。

- ・ 地震入力が高過ぎ、系に顕著な非線形性が生ずると予想される場合には、試験による確認が望ましい。

3. 4 動的機能維持評価の基本的考え方

3.4.1 機能維持評価の基本方針

- (1) 一般的原則

本追補版では、既往研究の成果をもとに合理的な範囲で一般化した解析手法による評価を行うことを原則とする。ただし、解析による評価の適用範囲を外れる場合には、試験による評価が望ましい。

なお、以降に述べる解析による評価の考え方、適用機種、あるいは機能確認認知加速度レベル、荷重レベル等については、今後新たな試験等によって合理的な知見が得られた場合、これらを見直すものとする。

- (2) 解析による評価の基本事項

対象機種によって異なる部分もあるが、既往研究の成果をもとに解析による評価を行う際の基本的な事項をまとめると次のとおりである。

評価のプロローブについて

- ① 対象機種ごとに、その構造、振動性状を考慮のうえ必要に応じて機器の構成要素（本体、電動機、付属品等）に分けて評価を行い、最終的には、構成要素間の相互関係も考慮して機器全体としての機能維持を評価する。なお、弁の応答を算出する場合には配管系の一部として評価する。

- ② 地震時の異常要因分析を考慮し、動的機能の維持に必要な評価のポイントを明確にする。

- ③ 適用範囲内の機種は、剛か否かを判断するため固有値解析を行う。
 剛か否かの判断は、原則として機器の固有周期がそれぞれの機器が設置されている建屋等の1次固有周期から十分離れているかどうかによる。

- ④ 剛な場合は、静的応答解析により、また剛でない場合には動的応答解析（原則としてスペクトルモード応答解析）により機器の応答を求め、許容値あるいは試験により確認済の応答加速度、荷重等と比較する。

- ⑤ 剛な場合の静的応答解析は床加速度の1.0倍を用いる。

- ⑥ 応答値が、許容値あるいは機能確認認知加速度、荷重等を超える場合は、3.3.3③項に述べたように詳細解析を行うか、あるいは設計変更などを行う。

- ⑦ 解析に用いる機器系の減衰定数については、第6章「1. 機器・配管系の設計用減衰定数」表1.2-1 設計用減衰定数に示される値を使用するものとする。

評価ポイントについて

- ⑧ 動的機能の維持に必要な静的な機能（例えば、取付ボルト、基礎ボルト）については、これらを評価の対象とする。

- ⑨ 地震荷重と他の荷重との組合せにおいて、地震荷重の占める割合が十分小さいことが明らかた場合（例えば、回転軸の応力）には、原則として地震荷重の評価は必要ではない。

ただし、設計思想や他の荷重条件等が大きく異なり、地震荷重が無視し得ない場合は、地震荷重を組合せた評価を行う必要がある。

3.4.2 解析（一部試験を含む）により機能維持評価を行う方法

- (1) 地震入力

機器への地震入力は、各々のプラントの設計条件に従い、当該機器が据付られる建屋床の設計用応答スペクトルとすることを原則とし、必要に応じて当該床の時刻歴床応答を用いるものとする。

- (2) 動的解析モデル基本方針

- (a) 対象機種ごとに、その機器の構造、振動性状、動的機能維持評価のポイント等を考慮し適切なモデル化を行う。

- (b) 適用範囲内の機種については、上に述べたモデルにより機能維持の評価を行うもの

注1) 地震時に発生する可能性のある異常現象を抽出し、その要因分析を行うものである。これは、地震時に要求される機能が、どのような要因とそれに基づく現象によって喪失するかを検討したものであり、同一の作動原理、同様の構造を有する機器には共通のものである。

注2) 強度設計では剛な場合は地震力として床加速度の1.2倍を用いて支持部の強度計算等を行っている。

い。全周期範囲にわたって、設計用床応答スペクトルと等価な時刻歴波とすることが困難な場合には、少なくとも対象機器の主要な固有周期が存在する領域について設計用床応答スペクトルと等価な入力波を選定する必要がある。1つの時刻歴波でこれらを実現することが困難な場合には、複数の時刻歴波による試験を行ってもよい。なお、単体機器、あるいは弁のような1次周期が卓越する機種については正弦波による試験を行ってもよい。

(2) 試験方法

試験では、振動特性試験と設計入力地震若しくは同等の地震レベルによる実証試験が必要であり、更に可能な範囲で入力レベルを上げた程度試験を行うことが望ましい。

地震時に機能維持が必要となる機種については、加振試験中に（場合によっては加振後にも）これを確認し、地震後に機能維持が必要となる機種については、加振試験後において機能が維持できることを確認する。

なお、試験計画に当たっては加振による供試体の累積疲労について注意を要する。

(3) 評価方法

(a) 当該機器の評価

振動特性試験により、振動特性、応答特性を把握するとともに、機能試験の結果を踏まえ、原案要因分析に基づく機能維持評価のポイントについて機能維持の確認を行う。

(b) 評価結果の検討

試験により機能維持の確認がなされた供試体について、その後解析による評価を行う場合には併行してシミュレーション解析を行い、試験に基づく解析手法の妥当性の確認を行うことが望ましい。更に、当該機種の適用範囲、試験結果の適用限界についても検討を行うことが望ましい。

3. 5 機器の評価方法

3.5.1 立形ポンプ

(1) 適用機種

現在原子力発電所で用いられている立形ポンプの代表例は、表3.5.1-1に示すとおりである。また立形ポンプを類別し、その構造を示すと図3.5.1-10のようになる。

ピットハレル形の立形単段斜流ポンプを例にとるとその構造は以下のようである。同ポンプは揚付基礎上部と、通常、ピットの中に設置される据付基礎下部から構成されている。上部には、ディスプレイケーシングがあり、その上に電動機フレームを介して電動機が取り付けられている。下部は、バルクケーシング、コラムパイプ及び軸から構成されている。バルクケーシングとディスプレイケーシングは基礎にボルトにより固定されている。軸は数箇所の水中軸受に支持され、下端に羽根車があって、軸継手を介して電動機

とする。
(c) 既往研究で本体部分が十分剛であることが確認されているものは、支持構造物部分の剛性のみを考慮してモデル化すればよい。

(d) モデル諸元の計算方法については、できるだけ、「3.5 機器の評価方法」に記載された手法を用いるものとする。

(e) モデル諸元のうち、解析による評価が困難な部分の諸元については、試験で得られたデータをもとにモデル諸元を算定する。

(3) 解析方法

固有値解析の結果、剛なものについては、床加速度を応答加速度とする静的応答解析により、剛でないものについては、動的応答解析（原則としてスペクトルモータル応答解析）により応答を求め、許容値とすることを原則とする。

なお、詳細解析等において必要な場合には、時刻歴応答解析を行ってもよい。

(4) 評価方法

上記の解析から得られた地震応答値より動的機能維持評価点の加速度、荷重、応力あるいは変位を求め、許容値あるいは、機能確認加速度、荷重、変位と比較し、動的機能を評価する。

算定された応答値が、許容値あるいは機能確認加速度等を超えた場合には、更に詳細な解析を行うか、あるいは設計の見直し等を行う。

なお、軸受荷重等で地震時のような短期荷重に対する許容値が明確になっていない場合には、当面、通常運転荷重に対する許容値を地震荷重を含めた荷重に対して用いてもよい。

3.4.3 試験により機能維持評価を行う方法

適用範囲を外れる機種、あるいは適用範囲内であっても入力あるいは応答のレベルが機能確認経済のレベルを大きく上回る場合には、機器本体あるいは動的機能の評価の対象となる要素について、試験による確認を行う必要がある。

本項では、このような場合の試験及び評価の方法について基本的な考え方を示す。

(1) 入力波の選定

対象とする機器の設計用床応答スペクトルと等価な時刻歴波を選定することが望まし

注1) 「3.5 機器の評価方法」に述べている各機種の具体的な評価基準には、既往研究における代等実機加振加速度レベル（供試体の耐震性能ではなく、加振装置の能力で決まっている場合が大部分）を各型式の許容加速度として用いる場合や、地震時のような短期専門家に対する許容値のみならず、一般にこれより厳しい通常運転条件としての許容値（軸受における動定格荷重等）を適用している場合も少なくない。したがって、各機器が実際に有している耐震性能より低く評価される場合もあることに留意が必要である。

先行プラントにおける現行の動的機能維持評価手法

J E A G 4 6 0 1 - 1991 の地震時機能維持評価法

- ◆ 水平地震動に対する地震時の機能維持評価法を策定
- ◆ A C T 研究※等の成果に基づいて、機能維持評価法の基本方針及び下記 12 種類の評価法を策定
 - (1) 立形ポンプ、(2) 横形ポンプ、(3) ポンプ駆動用タービン、(4) 電動機、(5) フォーン、(6) 冷凍機
 - (7) 非常用ディーゼル発電機、(8) 制御用空気圧縮機、(9) 往復動式ポンプ、(10) 弁
 - (11) ダンパ、(12) 制御弁

※「動的機器の地震時機能維持に関する研究」昭和 55-57 年、当該の研究成果を J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に反映

既往知見研究の動向

- <背景>
- 耐震設計審査指針改訂による鉛直地震動の導入、鉛直地震動を考慮した機能維持評価法の策定が必要
- ◆ 鉛直地震動に対する機能維持評価法の検討を実施
 - 水平地震動に対する機能維持評価法策定の考え方を鉛直地震動にも展開し、鉛直動への適用性を検討した。
 - 「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究」平成 6 年度-13 年度

<検討結果>

- 鉛直方向の応答増幅の影響は小さいこと、新たな評価項目の追加は不要なことを確認した。
- 水平・鉛直方向ともに A_T 以下であれば、代表評価項目の評価により機能維持が可能なることを確認した。
- 水平・鉛直方向で A_T を超える方向がある場合は、詳細評価（構造強度、漏えい、作動）により機能維持可能なことを確認した。
- 鉛直方向の A_T を設定した。
- 一部の設備について、水平方向の A_T を見直した。

先行プラントにおける弁の動的機能維持評価手法

以上の検討結果を踏まえた先行プラントにおける現行の弁の A_T は表添-1 の通り。

表添-1 既往知見取り込み後の弁の A_T

弁種類	A_T	
	水平	鉛直
一般弁 (グローブ、ゲート、バタフライ)	6.0 G	6.0 G
一般弁 (逆止弁)	6.0 G	6.0 G
主蒸気隔離弁	10.0 G	6.2 G
安全弁 (BWR 主蒸気逃がし安全弁)	9.6 G	6.1 G

最新知見の取り込み

最新研究の動向

<背景>

- 基準地震動 S_s による入力増加、高振動数領域の影響考慮等による弁駆動部の応答加速度の増加 A_T を超過する弁の増加、詳細評価を実施（構造強度、漏えい、作動）
- 弁駆動部の動作機能維持限界の把握を目的とした調査
 - ⇒ A_T を上回る加速度での加振試験が必要
- ◆ 高加速度を負荷できる試験設備による弁の加振試験を実施、最大 20G における弁の作動性を確認
 - 対象弁：一般弁（グローブ、ゲート、バタフライ）、主蒸気隔離弁、安全弁（BWR 主蒸気逃がし安全弁）
 - （4.4 参考文献参照）

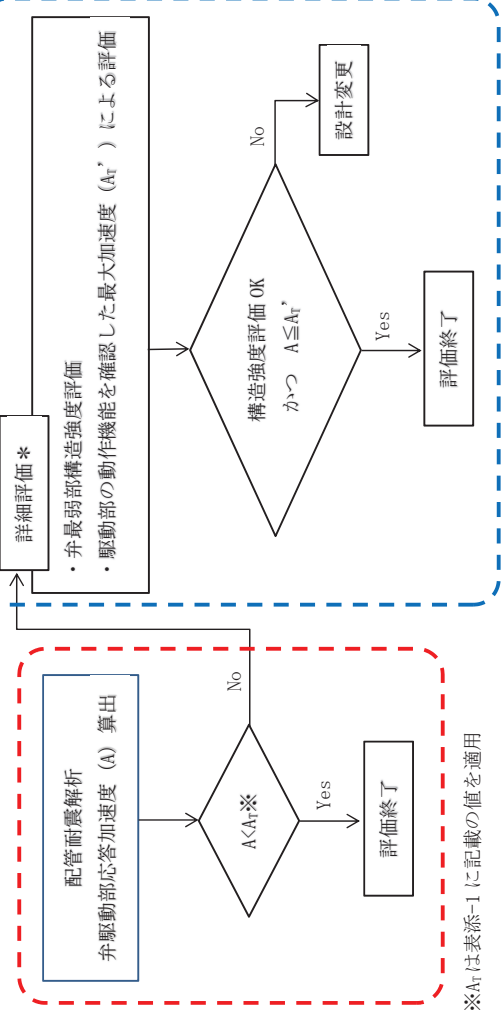


最新知見を取り込んだ弁の動的機能維持評価

<反映内容>

A_T 超過時の詳細評価に、加振試験により得られた弁駆動部の動作機能を確認した最大加速度を適用
 詳細評価では、弁駆動部の構造強度評価及び弁駆動部の動作機能を確認した最大加速度による評価を行う。

<弁の動的機能維持評価フロー>



※ A_T は表添-1 に記載の値を適用

J E A G 4 6 0 1 - 1991 と既往知見の範囲 (先行プラント評価手法)

今回工認の評価 (最新知見取り込み)

* 詳細評価は J E A G 4 6 0 1 - 1991 の考え方に基づく対応

J E A G 4 6 0 1 - 1 9 9 1 (抜 粋) 弁 機 能 維 持 評 価

(d) 前項で入力加速度の確認を満足したものについては、静的応答解析（応答倍率1.0）によって各取付ボルト及び基礎ボルトの応力を算定し、許容値と比較して機能維持を確認する。

(b) 評価ポイント
動的機能に関し、次の項目をポンプ本体及び減速機系の代表値として評価する。

- (1) ポンプ本体及び減速機各駆動部の健全性確認として、
 - ・ポンプへの入力加速度比較評価
 - ・減速機への入力加速度比較評価
- (ii) ポンプ本体及び減速機の支持機能確認として、
 - ・各取付ボルトの強度評価
 - iii 全体系の支持機能確認として、
 - ・基礎ボルトの強度評価
- (3) 入力地震動
- (4) モデル化
- (5) 地震応答解析

静的応答計算には、原則として往復動式ポンプ設備設置床の最大加速度を用いる。

(4) モデル化
往復動式ポンプは前述の考え方に従い、脚部も含めて全体を剛体として扱う。

(5) 地震応答解析
ポンプ本体及び減速機の取付ボルトや米運来台の基礎ボルトの発生応力は、原則として静的応答解析（応答倍率1.0）にて算定する。

(6) 評価基準
(a) 往復動式ポンプについては、機能確認用加速度の範囲で本項に示す評価手法が適用可能である。この入力加速度は下記の値である。

- (b) 基礎ボルト、固定ボルトの応力を計算し、許容応力と比較して評価を行う。
- (7) まよめ
往復動式ポンプの動的機能は、前項に示す各項目が許容値以下であることと合わせ、駆動源である電動機（「3.5.4 電動機」参照）の動的機能の確認をもって、地震時の機能維持を満足するものとする。

3.5.10 弁
(1) 適用機種
現在、原子力発電所で用いられている動的機能が要求される弁は、表3.5.10-1に示すとおりである。各弁の代表的構造に関し、電動機駆動のグローブ弁、ゲート弁、バタフライ弁、空気作動のグローブ弁、バタフライ弁、また逆止弁等の各系統に一般的に用いられている一般弁の例を図3.5.10-1に、空気作動ゴムダイヤフラム弁、主蒸気隔離弁、主蒸気隔離弁操作電磁弁、安全弁、制御棒駆動系スクラム弁等の特殊弁の例を図

3.5.10-2に示す。これらの弁は、既往研究において地震時機能維持が確認された機種と類似の振動特性を持つものであり、以下に述べる標準的評価手法が適用できる。なお、弁箱形状、シート方式及び駆動装置が現状のものより著しく変更された場合は、評価手順、評価ポイント等の再検討を行う必要がある。

表3.5.10-1 地震時機能維持を要求される弁の例

分類	弁型式	口径(A)	代表的			系統名
			B	W	R	
一般	グローブ	~ 500	種別除去系			1次冷却系 化学体積制御系 主蒸気系 主給水系
	ゲート	~ 650	主蒸気系 凝縮機除去系 高圧炉心スプレイス系 低圧炉心スプレイス系 原子炉隔離時冷却系 原子炉冷却材浄化系 主蒸気隔離弁備えい制御系 圧縮機カラム隔離制御系			化学体積制御系 安全注入系 余熱除去系 格納容器スプレイス系
弁	バタフライ	~ 1800	非常用ガス処理系 非常用種別冷却系 (海水系)			格納容器減圧系 海水系 アニュラス空気浄化系
	逆止弁	~ 850	給水系 格納容器バウンダリ			主給水系
特殊	ゴムダイヤフラム弁	~ 100				格納容器減圧系
	主蒸気隔離弁	~ 850	主蒸気系			主蒸気系
弁	主蒸気隔離弁 操作電磁弁	~ 25				主蒸気系
	安全弁	~ 200	主蒸気系			1次冷却系 主蒸気系
	制御棒駆動系 スクラム弁	~ 50	制御棒駆動機構			—

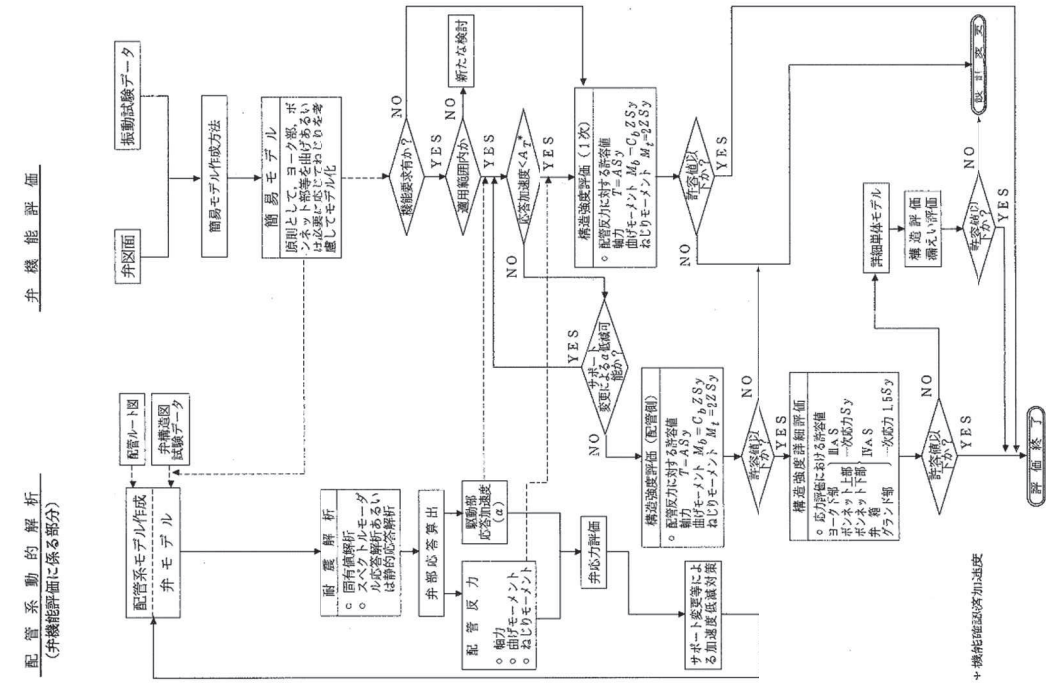


図 3.5.10-3 一般井評価手順 (グループ井, ゲート井, バタフライ井)

(2) 評価の基本的考え方

井機能評価に当たっては、作動特性、耐漏えい性、耐圧性能並びにこれらに係る構造強度についての検討が原則として必要となる。ただし、機能確認経済加速度の範囲内においては、各機能に対する健全性が確認されている。したがって、これらのものについては、井駆動部の応答加速度を代表値として評価することを基本とする。

以下に井型式ごとの考え方を示す。

(a) 一般井 (グループ井, ゲート井, バタフライ井)

(i) 評価手順

- ① 図 3.5.10-3 に一般井の機能維持評価作業の基本的な流れを示す。
配管系モデルに一般井の簡易モデルを組み込み、地震応答解析を実施する。この解析結果より得られる井駆動部応答加速度を、機能確認経済加速度と比較検討することにより評価を行う。ここで、井駆動部応答加速度は、配管系のサポート変位等による応答の低減を考慮することが可能であるが、本対策を踏まえても応答が大となる場合には、井の構造上の最弱部に着目して強度検討を行う。
- ② 配管反力に関しては、「告示501号」に規定される配管側の評価を満足することを確認する。

(ii) 評価ポイント

(1) 構造強度

強度評価においては、基本的には構造上の最弱部に着目して検討を行う必要がある。既往研究によれば、一般井の最弱部は弁構造による違いはあるものの、ヨーク下部、ポンネット上部及びポンネット下部のいずれかであることが確認されている。したがって、一般井における地震時の加振による弁強度評価は、ヨーク下部、ポンネット上部及びポンネット下部のいずれかの発生応力を代表値として評価を行えばよい。

しかし、既往研究においては、機能確認経済加速度の範囲内であれば強度上問題ないことが確認されており、この範囲においては井駆動部応答加速度を代表値として評価することができる。

また、配管反力に対する弁の強度についても、既往研究により弁箱の発生応力が十分小さいことが確認されている。したがって、配管系の解析により配管反力が許容値以下であることを確認すればよい。

表3.5.10-2 漏えいパターンの一般的分類

区分	漏えいに至る要因	対応する現象	原因	地震との関連
弁座漏えい	弁体と弁座の相対変位	(1) 配管反力による弁座の変形 (2) 弁座と弁体のずれ (3) 地震力による弁座の変形 (4) 異物のかみこみ	配管反力の大きさ 構造及び摩耗等の荷重 弁座の地震応力	○ ○ ○ ×
	弁体の衝突による弁座の塑性変形	(1) 弁体の振動	弁体の振動特性	○
グラント部漏えい	疵の発生	(1) 異物のかみこみ	---	×
	通常の洩れ	(1) 傷、エロージョン	---	×
	弁棒とパッキンの相対変位	(1) 加速度による弁棒の変形	グラント部の応力およびモーメント	○
弁座漏えい	通常の締め	(1) グラントパッキンの経年劣化	---	×
	弁ふたのゆれ	(1) 弁ふたフランジの変形 (2) フランジボルトのゆるみ	弁駆動部の振動	○ ○

注) ○ 関連あり
× 関連なし

(b) 一般弁（逆止弁）

(i) 評価手順

評価手順は図3.5.10-4に示すように、逆止弁簡易モデルを組み込んだ配管系モデルの地震応答解析結果より得られる弁部応答加速度と、機能確認加速度を比較検討することにより評価を行う。ここで、配管系のサポート変更等による応答加速度低減対策を踏まえても応答が大となる場合には、ディスタクの開あるいは閉状態の維持、また、強制閉閉装置付きのテラスタブル逆止弁は駆動部本体取付ボルトの強度について⁽³⁻⁵⁾も合わせて評価する。
配管反力については、「告示501号」に規定される評価値を満足することを確認する。

- ② 漏えい
一般弁、特殊弁を含め、弁の漏えいパターンの一般的分類を表3.5.10-2に示す。本表に示される地震との関連が考えられる現象のうち、弁体の衝突による弁座の変形からの弁座漏えい及び弁ふたの変形、フランジボルトのゆるみからの弁ふたフランジ漏えいは、既往研究より十分小さく無視できることが判明している。したがって、一般弁の漏えいに対しては以下の評価を行えばよい。
- ③ 弁座漏えいのうち、弁箱等の変形による弁座の変形は弁箱の強度に関連して評価する。
- ④ グラント部からの漏えいは、弁ふたグラント部の変形に関連するため、弁の最弱部の強度評価により確認する。
しかし、既往研究において一般弁の機能確認加速度の範囲内であれば、漏えいに対する問題はないことが確認されている。そのため、この加速度の範囲内であれば、弁駆動部応答加速度を代表値として評価することができる。
- ⑤ 作動
作動に関する機能喪失としては、弁駆動装置の作動不良あるいはグラントパッキンの摺動抵抗の増大に対する弁駆動装置の駆動力量不足が考えられ、これらについての評価が必要である。
弁駆動装置は強度のみによる評価はできないが、機能確認加速度の範囲では正常に作動することが確認されている。グラントパッキンの摺動抵抗の増大に対する駆動力量の評価については、グラント部の歪に関連することからグラント部の発生応力を指標として評価できる。しかしながら、機能確認加速度の範囲内では健全性が確認されている。したがって作動機能に関しては、この加速度の範囲内では弁駆動部応答加速度を代表値として評価を行うことができる。

- (6) 評価ポイント
- 逆止弁に要求される機能としては、地震時においても要求される閉状態あるいは閉状態を維持すること、及びそれらに至る作動が阻害されないことが求められる。ただし、ディスクの作動の確認は閉状態あるいは閉状態の維持の確認で代表できるため、地震時機能は以下により評価できる。
- (閉状態の維持)
- ・内部流体の動圧によりディスクに作用する閉モーメントが、ディスク自重による閉モーメント及び地震加速度による閉モーメントの和に比べ大であることを確認する。
 - (閉状態の維持)
 - ・内部流体の背圧によりディスクをシートに押しつける圧力（背圧による閉力と地震加速度によりディスクを開こうとする力の差をシート面積で除した値）が、シートの流体をシールするのに必要な最小面圧より大であることを確認する。
- またテストダブル逆止弁については、構造上の最弱部である操作部本体の取付ボルトの強度評価を実施し、健全性を確認する。
- しかし、既往研究における機能確認加速度の範囲内では、弁駆動部応答加速度を代表値として評価を行うことができる。

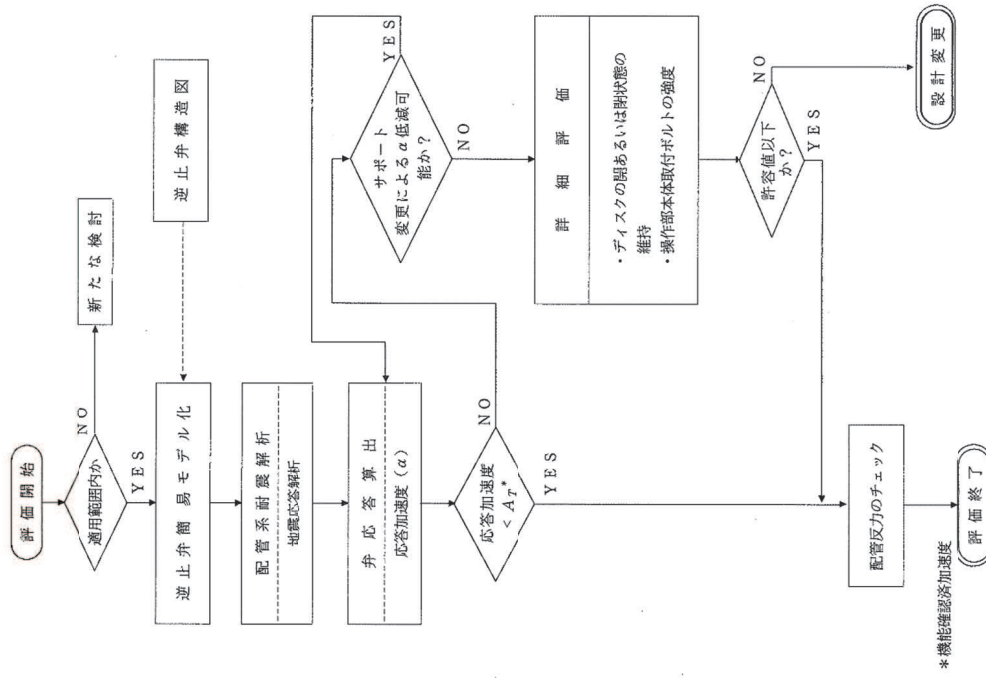


図3.10-4 逆止弁評価手順

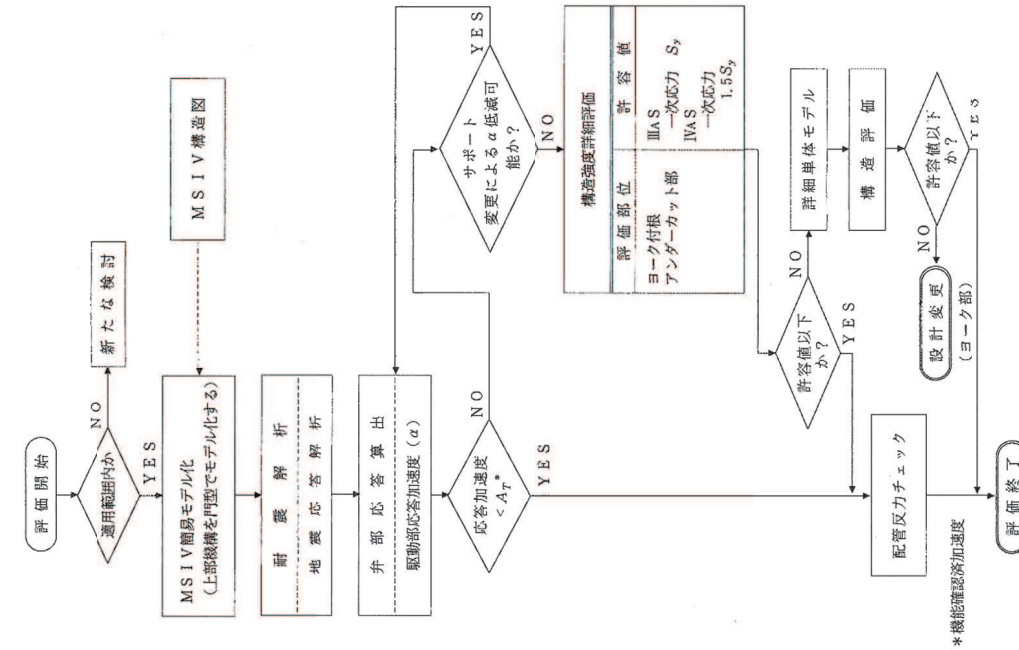


図3.5.10-5 MSIV 評価手順

(c) ゴムダイヤフラム弁

評価手順及び評価ポイントは、(a)一般弁に準じる。

(d) 主蒸気隔離弁 (MSIV)

(i) 評価手順

図3.5.10-5にMSIVの機能維持評価作業の基本的な流れを示す。

① 本評価手順は基本的に一般弁と同様であり、MSIV簡易モデルを組み込んだ配管系モデルの地震応答解析結果より得られる弁駆動部応答加速度を、機能確認済加速度と比較検討することにより評価を行う。ここで、配管系サポータ変更等による応答加速度低減対策を踏まえても応答が大となる場合には、構造上の最弱部であるヨーク付根部に着目して強度検討を行う。

② 配管反力に関しては、「告示501号」に規定される配管側の評価を満足することを確認する。

(ii) 評価ポイント

① 構造強度

強度評価においては、既往研究により確認された本体の最弱部であるヨーク付根のアンダーカット部の発生応力を指標として評価を行う。しかし、機能確認済加速度の範囲内であれば強度上問題ないことが確認されており、この範囲においては弁駆動部応答加速度を代表値として評価することができる。また、配管反力に対する強度についても、既往研究成果により弁箱の発生応力が十分小さいことが確認されており、配管系の解析により配管の反力が許容値以下であることを確認すればよい。

② 漏えい及び作動

本項目に関しては、一般弁と同様な機能が要求されるため、弁箱及びグランド部の発生応力を指標として評価を行えばよい。しかし、機能確認済加速度の範囲内であれば、漏えい及び作動機能が問題ないことが確認されており、この範囲においては弁駆動部応答加速度を代表値として評価することができる。

(e) 主蒸気隔離弁操作作用電磁弁

(i) 評価手順

図3.5.10-6に主蒸気隔離弁の機能維持評価作業の基本的な流れを示す。

- ① 主蒸気隔離弁操作作用電磁弁は、パネル構造で直接建屋に剛に設置されるもので、既往研究でもパネル一体として実証試験を行っている。
- したがって、設置場所の応答加速度を弁部応答加速度として機能確認評価加速度と比較検討することにより評価を行う。
- ② 本弁は、配管系の影響を受けないので配管反力に対する評価は必要としない。

(ii) 評価ポイント

本弁は、使用範囲が限られており、機能確認評価加速度の範囲においては、構造強度、漏えい及び作動機能に関して弁部応答加速度を代表値として評価できる。

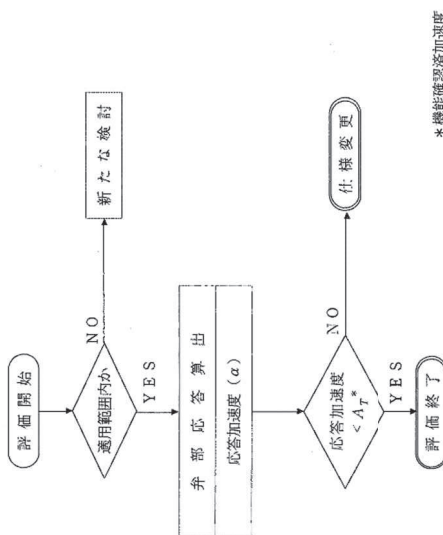


図3.5.10-6 主蒸気隔離弁操作作用電磁弁評価手順

(f) 安全弁

(i) 評価手順

図3.5.10-7に安全弁の機能維持評価作業の基本的な流れを示す。

- ① 本評価手順は基本的に一般弁と同様であり、安全弁簡易モデルを組み込んだ配管系モデルの地震応答解析結果より得られる弁部応答加速度を、機能確認評価加速度と比較検討することにより評価を行う。ここで、配管系のサポート変更等による応答加速度低減対策を踏まえても応答が大となる場合には、構造上の最弱部に着目して強度検討を行う。更に固有値解析結果より剛とならない場合には、弁座漏えいに対する検討が必要である。
- ② 配管反力に関しては、「告示501号」⁽³⁻³⁾に規定される配管側の評価を満足することを確認する。

(ii) 評価ポイント

① 構造強度及び作動

安全弁は使用範囲が限られており、機能確認評価加速度の範囲においては構造強度、作動機能に関しては弁部応答加速度を代表値として評価できる。

② 漏えい

既往研究においては、平面弁座を有する比較的剛性の低い安全弁については弁座漏えいの問題が指摘されている。すなわち、通常のプラント運転圧力加圧状態では、吹出圧力と運転圧力の差が弁座押付力となる。この面圧の低い状態で安全弁が加振されると、条件によっては弁体と弁座が滑動することがあり、この滑動によってシート面に傷が発生し漏えいの原因となる。評価の手法としては、解析によって弁体弁座をすべらそうとする横押力を算出し、上記の（弁座押付力×摩擦係数）との比較によって、弁体と弁座がすべるか否かの判定を行う。

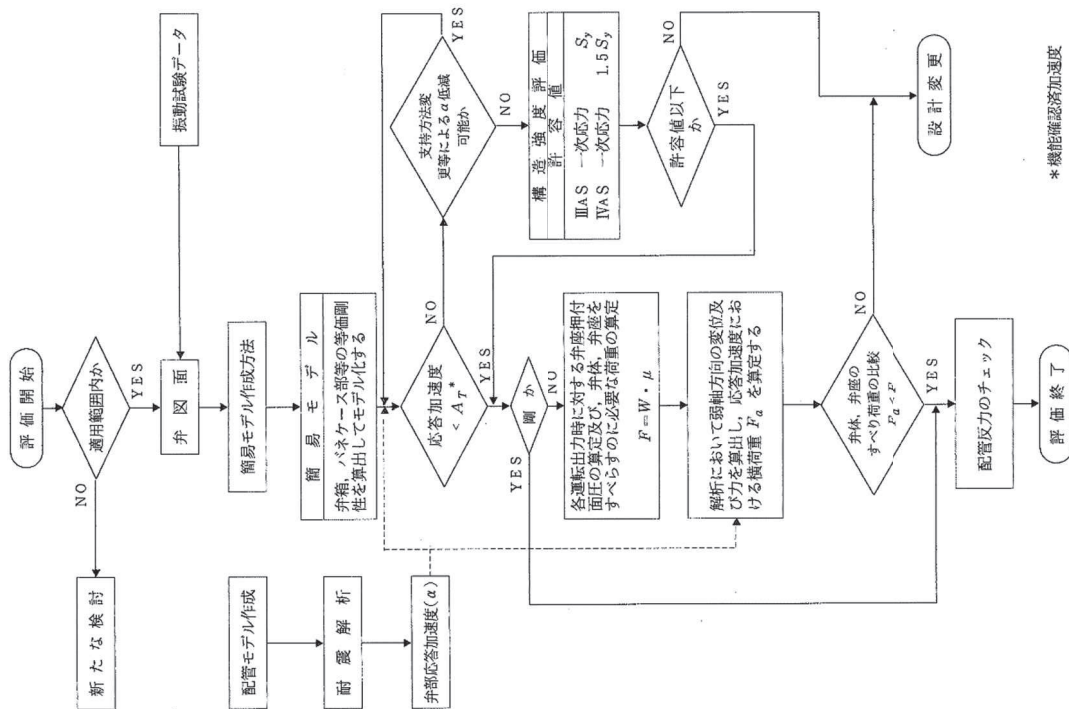


図3.10-7 安全弁評価手順

表3.5.10-9 配管反力に対する許容値

荷重	許容値 ⁽¹⁾	備考
軸力	$A_a S_y$	A_a : 接続配管断面積の1/2
曲げモーメント	$C_b Z S_y$	Z : 接続配管断面係数
ねじりモーメント	$2 Z S_y$	C_b : 応力係数

注: (1) 「告示501号」に規定される値

(7) まとめ

- (a) 弁の動的機能は、前項に示す各項目が機能確認経済加速度値あるいは許容値以下であることを確認をもって、地震時の機能維持を満足するものとする。なお、弁の応答は配管系の中ポート変異等による低減が可能であり、これらを踏まえて評価を基軸することが望まれる。
- (b) 駆動部応答加速度が、前項の機能確認経済加速度を超える場合について、現状の知見による対処方法の一案を以下に示す。

- (i) 弁の要求機能のうち強度、漏えいに関しては、②項に述べたごとく弁最弱部の強度評価に含めて検討できる。したがって、ヨーク、ボンネット等の応力評価が必要となる部分を考慮した詳細モデルを作成し、配管系の応答解析により発生応力を算出する。この際の詳細モデルの作成に関する考え方を解説3に示す。本解析より得られる発生応力に対する許容値は、一次応力について、許容応力状態ⅢASにおいて S_y 、許容応力状態ⅣASにおいて $1.5 S_y$ を目安として評価する。

- (ii) 作動機能に関し、弁駆動装置は解析的な評価が困難であるため、駆動装置単体の機能確認経済加速度を許容値とする。

また、グラブドバックの指動抵抗の増大に対する駆動力の評価は、許荷重による試験を実施し、作動特性に対して有意差が生じないことを確認する等により行うことができる。この際の試験の内容と構成及び試験のプロックチャートの例を解説4に示す。

解説1 MS1V弁箱の剛性評価

- (1) はりモデルによる弁箱の剛性評価
 弁箱を図3.5.10-13に示すように断面が一様なはりモデル化し、弁箱の上部に流れ方向(X方向)、上下方向(Y方向)及び、流れ直角方向(Z方向)の三方向に単位荷重を加えて、各方向の変位と剛性値を、はり理論を用いて導くと下記の式となる。

$$w_x = \frac{P \cdot c^3}{6EI} \left(1 + \frac{3a}{c} \left(1 - 4 \frac{a}{l} + 6 \frac{a^2}{l^2} - 3 \frac{a^3}{l^3} \right) \right) + \frac{Pl}{2AE} \left(1 + \frac{2ab}{l^2} \right)$$

..... (3.5.10-2)

$$R_x = \frac{P}{w_x}$$

..... (3.5.10-3)

配管系の固有面が剛と判断される場合は、静的応答解析を行うが、この場合弁に加わる加速度は設計用応答スペクトルのZPA（ゼロ周期加速度）であり、これを弁駆動部応答加速度と見なして評価を行う。また、剛の範囲にない場合には、原則として③項で定めた設計用応答スペクトルを入力とする配管系のスベクトル解析を行い、算出された弁駆動部応答加速度を用いて弁の評価を実施する。更に、弁の詳細評価が必要となる場合には、弁各部の強度評価に必要な応答荷重を算出する。

なお、減衰定数については現在配管系の解析に使用されている0.5~2.5%の値を用いるものとする。

(6) 評価基準

弁の機能評価においては、③項に示すごとく強度、漏えい、作動の各機能は、機能確認経済加速度の範囲内では弁駆動部応答加速度を代表値として評価することができる。この機能確認経済の弁駆動部の応答加速度を表3.5.10-8に示す。

配管反力に対する強度評価については、弁箱の発生応力が十分小さいことが確認されていることより、配管側の許容値を満足すればよい。この許容値を表3.5.10-9に示す。弁盛漏えいに関しては、(2)、(a)、(ii)、②項に示す考え方に基つき評価を行う。

表3.5.10-8 弁駆動部の機能確認経済加速度

種別	弁型式	機能確認経済加速度 (G)
一般弁	グローブ弁	6.0
	ゲート弁	6.0
	バタフライ弁	6.0
	逆止弁	6.0
特殊弁	ゴムダイヤフラム弁	2.7
	玉蒸気閉鎖弁	0.3
	玉蒸気開閉弁操作用電磁弁	2.2
	CRDスクラム弁	2.5
	安全弁	9.6
安全弁	PWR加圧器安全弁	5.0
安全弁	PWR玉蒸気安全弁	10.0