

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	O2-他-F-19-0037_改1
提出年月日	2021年 8月 3日

女川原子力発電所第2号機 メカニカルスナツバの耐震評価について (指摘事項に対する回答)

2021年8月3日
東北電力株式会社

前回審査会合(6/1)における指摘事項及び回答概要

▶ 第979回審査会合において、審査の中で論点として新たに整理された「メカニカルスナツバの耐震評価」について説明し、以下の指摘があったことから、指摘事項に対する回答について説明する。

実施日	指摘事項
2021年6月1日 第979回審査会合	<ul style="list-style-type: none"> ①. メカニカルスナツバにおける耐震評価手法として、個別に部品を評価する方法とは別に、一次評価と同様に標準荷重を新たに設定する方法も考えられるが、前者の方法を採用する理由について説明すること。 ②. メカニカルスナツバの破壊試験を踏まえた機能維持評価法及び座屈評価法について、試験結果のばらつきの考え方を整理して説明すること。



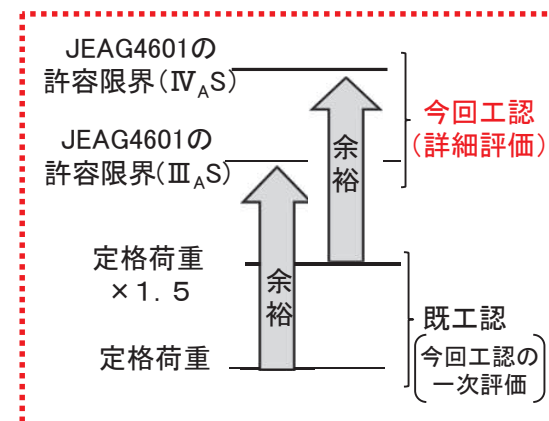
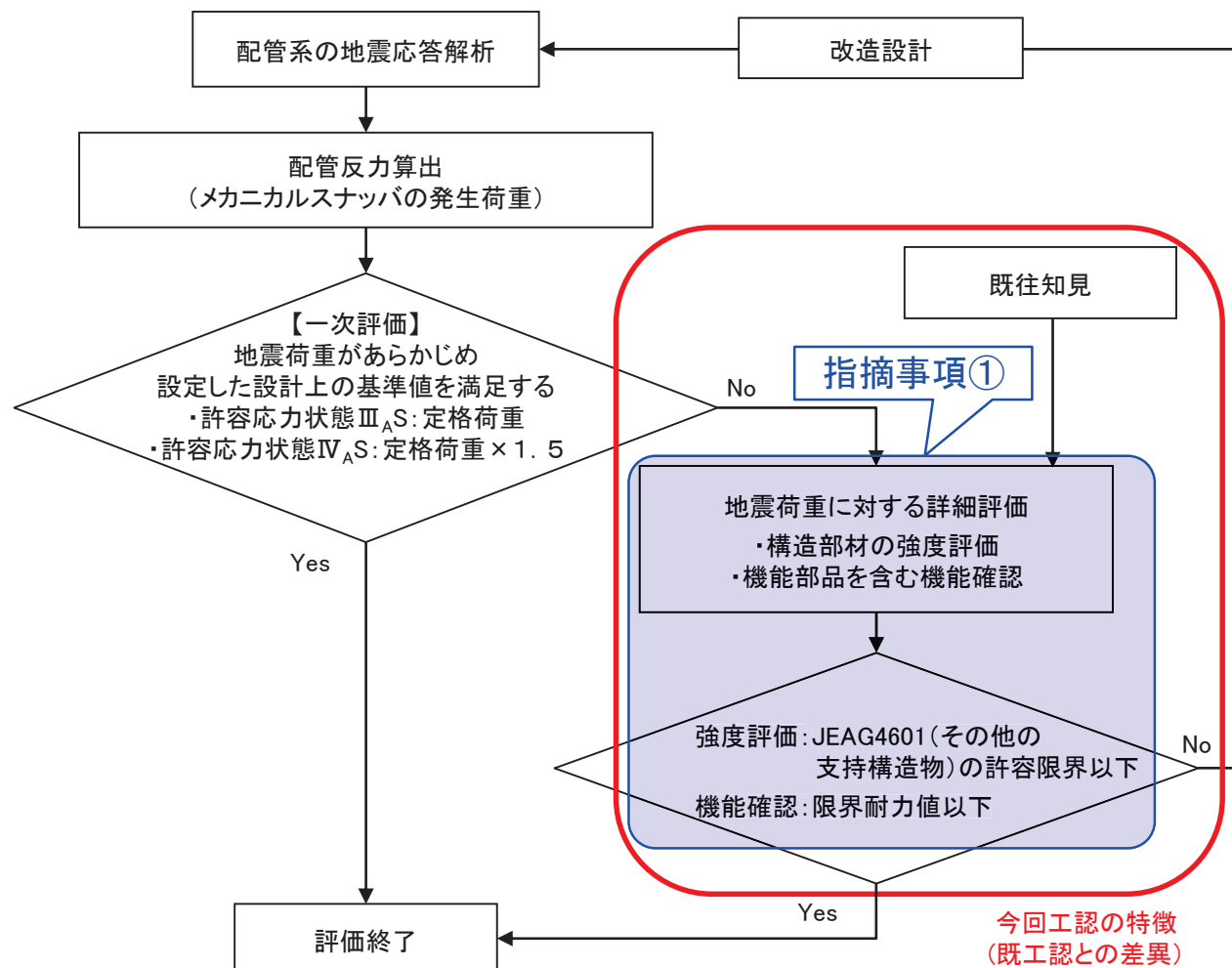
指摘事項	指摘事項に対する回答	記載箇所
①. メカニカルスナツバにおける耐震評価手法として、個別に部品を評価する方法とは別に、一次評価と同様に標準荷重を新たに設定する方法も考えられるが、前者の方法を採用する理由について説明すること。	既工認では、評価作業の合理化の観点で、あらかじめ設定した設計上の基準値による荷重評価としていたが、機器・配管系の耐震設計として地震荷重による個々の部品の発生応力が許容限界内であることを確認する標準的な考え方を採用しても、詳細評価の対象数がメカニカルスナツバ全体の一割程度である(評価作業が膨大ではない)ため、今回工認では、個々の構造部材に対する強度評価及び機能部品を含む機能確認を実施することにした。	p2~3
②. メカニカルスナツバの破壊試験を踏まえた機能維持評価法及び座屈評価法について、試験結果のばらつきの考え方を整理して説明すること。	メカニカルスナツバの詳細評価に適用する限界耐力値は、電共研での知見(機能維持評価法及び座屈評価法に係る試験結果)を踏まえて設定していることから、電共研の試験に対するばらつきの考え方を4つの項目について整理・検討した結果として、今回工認の詳細評価に対する説明性向上の観点から、試験データの拡充を図ってあらためて設定した荷重比により、メカニカルスナツバの機能確認に係る限界耐力値を低減させた。	p4~9

1. 指摘事項①に対する回答

【構造部材の強度評価を個々の部品で評価することとした理由(1/2)】

第979回審査会合(2021年6月1日)資料1-4抜粋

- 今回工認では、既工認同様の一次評価を実施し、地震荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を超える場合、あらかじめ設定した設計上の基準値に余裕があることから、JEAG4601及び既往知見も踏まえ、詳細評価として構造部材の強度評価及び機能部品を含む機能確認を実施する。



JEAG4601の許容限界(Ⅳ_AS)に対する定格荷重 × 1.5の余裕
(型式SMS*-1(コネクティングチューブ)の例)

定格荷重 × 1.5 (A)	15kN
許容限界Ⅳ _A Sの許容応力に相当する荷重(B)	29.7kN
裕度(B/A)	1.98

* : SMSはメーカーの型式名称を示す。

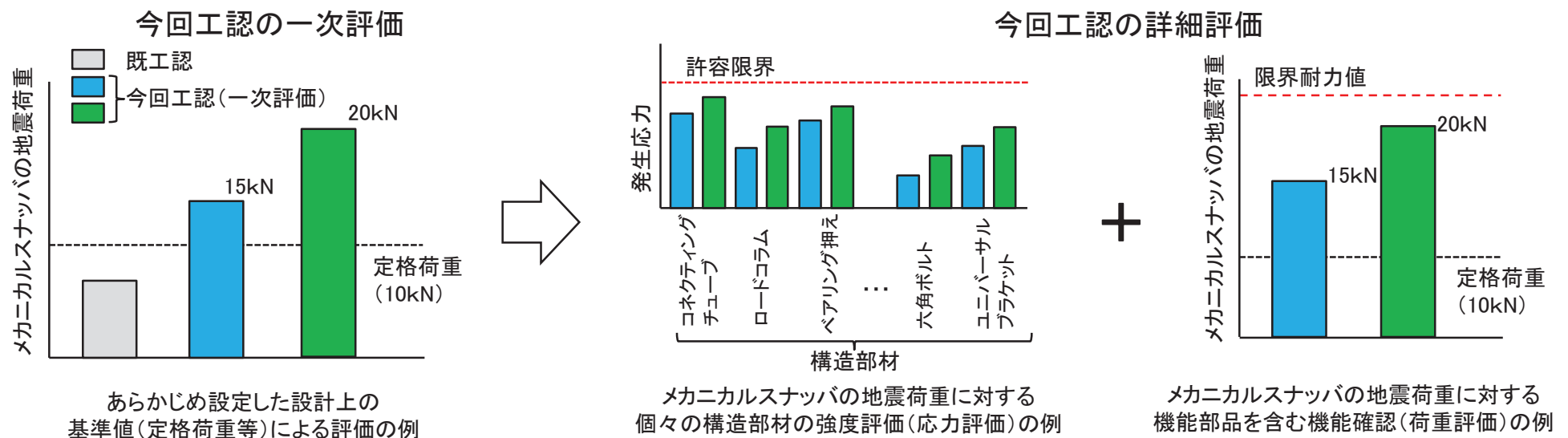
図3 今回工認における評価手順

今回工認の特徴
(既工認との差異)

1. 指摘事項①に対する回答

【構造部材の強度評価を個々の部品で評価することとした理由(2/2)】

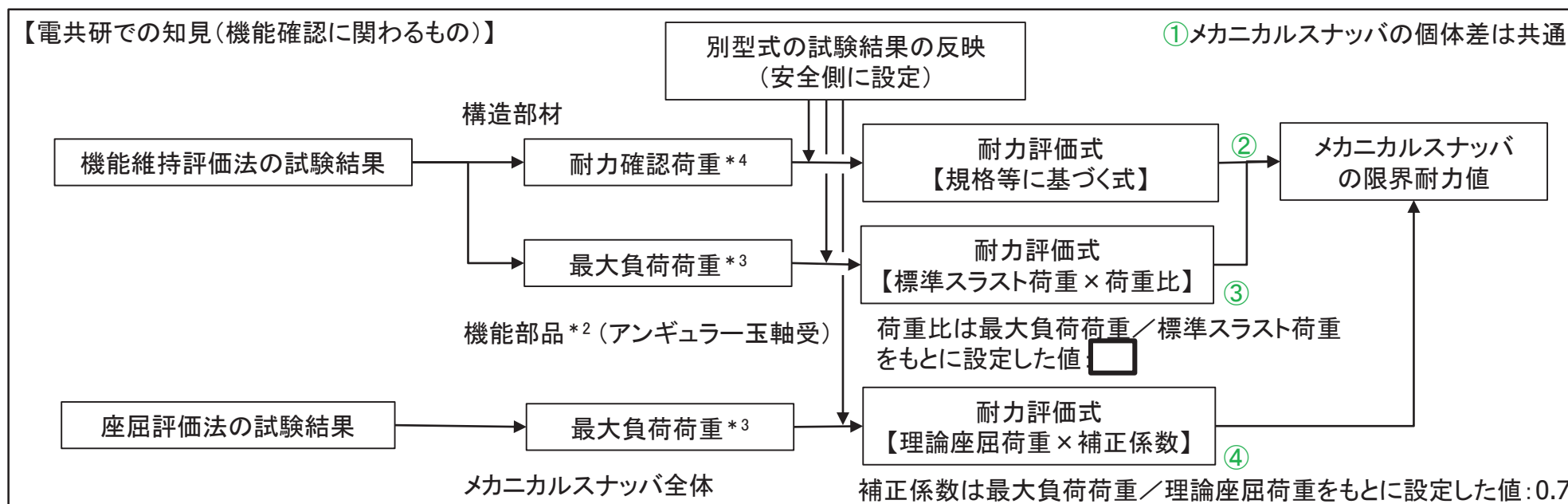
- 既工認におけるメカニカルスナツバの耐震設計は、メカニカルスナツバが標準化された製品で評価対象数も多いことから、評価作業の合理化のため、あらかじめ設定した設計上の基準値(定格荷重及び定格荷重×1.5)による荷重評価としていたが、今回工認では一部のメカニカルスナツバの地震荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を上回ることから詳細評価が必要となった。
- 機器・配管系の耐震設計においては、JEAG4601・補-1984「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」に示された許容応力状態、応力分類及び許容限界を踏まえて、評価対象設備(容器, 管, ポンプ等)の地震荷重による発生応力が許容限界内であることを確認する評価を基本としていること(耐震設計の標準的な考え方)から、メカニカルスナツバの個々の構造部材に対する強度評価を行うものである。
- メカニカルスナツバの詳細評価としては、既工認同様、構造部材は線形応答に基づく強度評価であるため、裕度最小部材に対する許容荷重をあらかじめ設定し、地震荷重と比較する荷重評価も可能である。
- これに対して今回工認では、耐震設計の標準的な考え方を採用しても、詳細評価の対象数がメカニカルスナツバ全体の一割程度である(評価作業が膨大とならない)ため、メカニカルスナツバの個々の構造部材に対する強度評価(応力評価)及び機能部品を含む機能確認(荷重評価)を実施することにした。



2. 指摘事項②に対する回答

【メカニカルスナツバの試験に対するばらつきの検討(1/6)】

- メカニカルスナツバの詳細評価における機能部品を含む機能確認(荷重評価)では、電共研*¹での知見等(試験結果)を踏まえて、メカニカルスナツバの限界耐力値を設定した。
- 電共研での知見は、試験結果を踏まえて、構造部材、機能部品(アンギュラー玉軸受)の機能維持評価法及びメカニカルスナツバ全体の座屈評価法に係る耐力評価式を検討している。
- メカニカルスナツバの限界耐力値は、上記の耐力評価式を適用しているため、①メカニカルスナツバの個体差、②構造部材の耐力評価式による限界耐力値の設定方法、③機能部品(アンギュラー玉軸受)の耐力評価式における荷重比及び④メカニカルスナツバ全体の座屈の耐力評価式における補正係数に着目して、試験結果に対するばらつきの考え方を整理する。



* 1: 平成12年度共同研究報告書耐震設計に関する新知見に対する機器耐震評価法の研究(Phase2)(以下「電共研」という。)

* 2: 機能部品のうち、ボールネジ及び球面軸受については、構造部材と同様に規格等に基づく式にて限界耐力値を設定

* 3: 最大負荷荷重: メカニカルスナツバの破損又は機能喪失が確認された試験条件の荷重記録のうち、メカニカルスナツバの機能が維持された状態における最大荷重

* 4: 耐力確認荷重: 最大負荷荷重が得られた試験条件の直前の試験条件における荷重記録の最大荷重

2. 指摘事項②に対する回答

【メカニカルスナツバの試験に対するばらつきの検討(2/6)】

① メカニカルスナツバの個体差によるばらつき

- メカニカルスナツバは、精密部品で構成されており、製作時の品質管理(材料, 製作等)が十分実施されている工業製品であることから、メカニカルスナツバの個体差によるばらつき(構造部材, 機能部品)は、基本的に小さいと考えられる。
- また、電共研での知見は、メカニカルスナツバ(SMS-3)の試験体3体に対する試験結果、いずれも同じ部品(球面軸受)が最初に、同じ損傷モードにて損傷(メカニカルスナツバとしての機能は維持)していることが確認されており、品質管理によってばらつきが小さいことを示している。

試験体	損傷箇所及び損傷モード
SMS-3-1	球面軸受内側割れ (メカニカルスナツバとしての機能は維持)
SMS-3-2	球面軸受内側割れ及びピン変形 (メカニカルスナツバとしての機能は維持)
SMS-3-3	球面軸受内側割れ (メカニカルスナツバとしての機能は維持)

② 構造部材

- 構造部材の限界耐力値は、機能維持評価法の試験におけるメカニカルスナツバの耐力確認荷重及び別型式の試験結果も反映して安全側に耐力評価式を設定しているため、試験のばらつきの影響は耐力評価式に含まれる。

2. 指摘事項②に対する回答

【メカニカルスナツバの試験に対するばらつきの検討(3/6)】

③ 機能部品(アンギュラー玉軸受)

- 電共研での知見は、メカニカルスナツバの試験体3体に対する機能部品(アンギュラー玉軸受)の荷重比(最大負荷荷重/標準スラスト荷重)の最小値(倍)を考慮し、機能部品(アンギュラー玉軸受)の限界耐力値を設定していたが、今回工認におけるばらつきの検討では、電共研の知見に加えて、類似の試験結果を有するJNES研究*¹を適用し、説明性向上(試験データの拡充)を図った。
- 機能部品(アンギュラー玉軸受)に対する荷重比の整理の結果、保守的な扱いとして平均値にばらつき(標準偏差値の2倍)を考慮した荷重比は、倍となるため、今回工認の機能部品(アンギュラー玉軸受)の耐力評価式における荷重比は電共研での知見である倍から倍に見直すことにした。

機能部品(アンギュラー玉軸受)の試験結果

型式	試験	(A) 標準スラスト荷重* ² (kN)	(B) 最大負荷荷重(kN)	荷重比 (B)/(A)
SMS-03	電共研			
SMS-1	電共研			
SMS-10	電共研			
	JNES研究			
SMS-25	JNES研究			
平均値				
標準偏差値(σ)				
平均値- 2σ				

* 1: JNES 平成21~22年度耐震機能限界試験(スナバ)に係る報告書

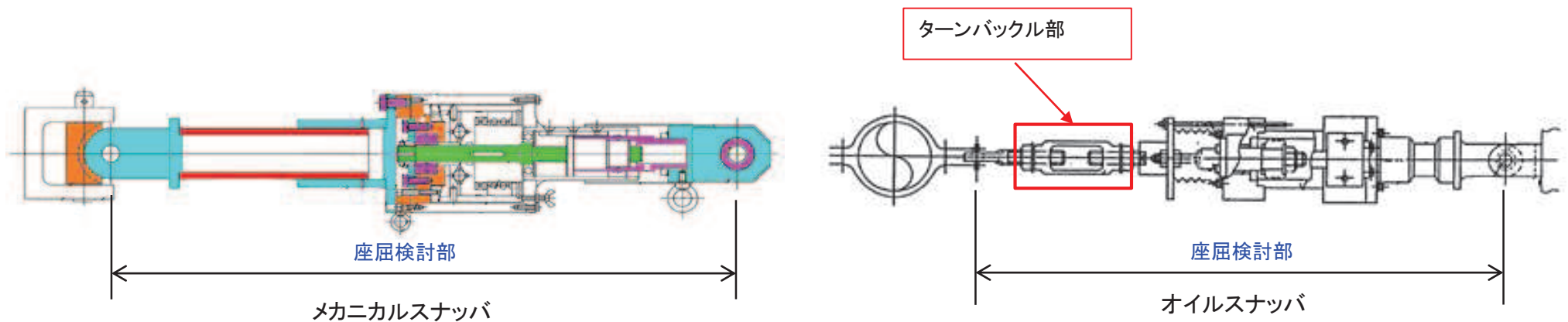
* 2: アンギュラー玉軸受の選定時の目安とする荷重値

2. 指摘事項②に対する回答

【メカニカルスナツバの試験に対するばらつきの検討(4/6)】

(4) メカニカルスナツバ全体に対する座屈

- 電共研の知見では、メカニカルスナツバの座屈試験結果(最大負荷荷重/理論座屈荷重=0.78)が得られており、耐力評価式における補正係数を0.7と設定している。
- メカニカルスナツバと類似形状のオイルスナツバに対する座屈試験を実施しており、オイルスナツバはターンバックル部を有しているものの、座屈荷重の計算の対象となる部位(座屈検討部)は、オイルスナツバ、メカニカルスナツバいずれも円柱状の部品等で構成されている(下図参照)。
- 座屈荷重の計算方法(座屈検討部のそれぞれの部品形状に対する断面二次モーメント及び長さに基づく)は、メカニカルスナツバとオイルスナツバで同じである。
- 以上を踏まえて、メカニカルスナツバとオイルスナツバの座屈試験結果を合わせてばらつきの検討に用いている。



メカニカルスナツバとオイルスナツバの概略構造

2. 指摘事項②に対する回答

【メカニカルスナツバの試験に対するばらつきの検討(5/6)】

- メカニカルスナツバとオイルスナツバの座屈試験結果から、最大負荷荷重/理論座屈荷重の比率は0.7以上であるため、メカニカルスナツバ全体の座屈の耐力評価式における補正係数*を0.7とすることには、試験のばらつきの影響が含まれる。

*: 座屈耐力を算出する際の理論式に乗ずる係数

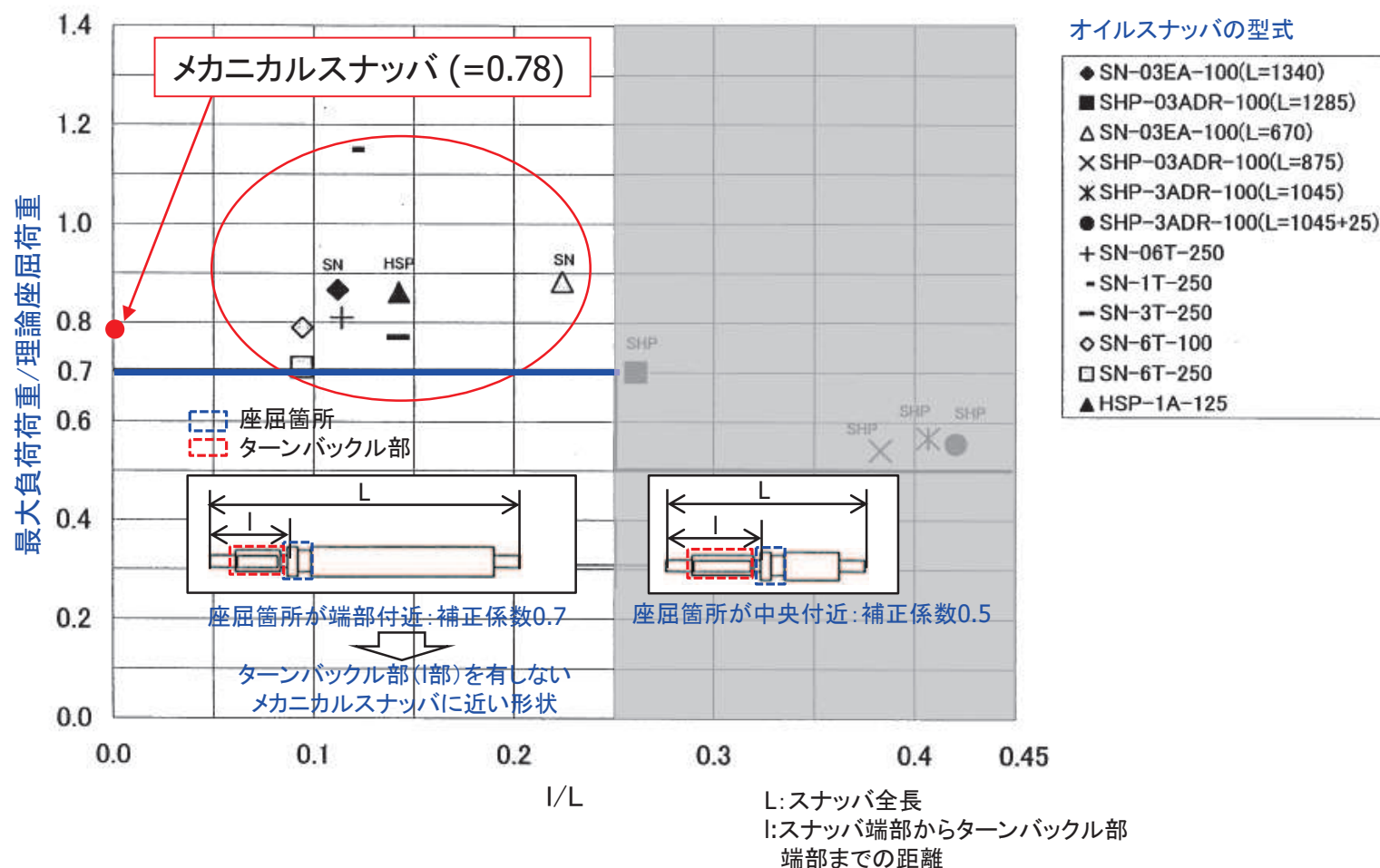


図 座屈試験結果

2. 指摘事項②に対する回答

【メカニカルスナツバの試験に対するばらつきの検討(6/6)】

- 今回工認のメカニカルスナツバの詳細評価における機能部品を含む機能確認(荷重評価)では、電共研での知見等(試験結果)を踏まえて、メカニカルスナツバの限界耐力値を設定しているため、電共研の試験に対するばらつきの考え方を4つの項目について整理・検討した。
- その結果、今回工認の詳細評価に対する説明性向上の観点から、機能部品(アンギュラー玉軸受)に対する荷重比については、試験データの拡充を図ってあらためて設定することとした。
- 上記の荷重比を設定することによって、今回工認の詳細評価における機能部品を含む機能確認に適用する限界耐力値が機能部品(アンギュラー玉軸受)によって決定される以下の2つの型式(SMS-3, SMS-10)については、メカニカルスナツバの限界耐力値を低減させる。

今回工認の詳細評価における
機能部品を含む機能確認に適用する限界耐力値
(試験データの拡充による低減)

型式	定格荷重(kN)	試験データの拡充前の 限界耐力値(kN)	試験データの拡充後の 限界耐力値(kN)
SMS-3	30	75.3	70.1
SMS-10	100	224.5	219.1

- 熱膨張が発生する高温配管の耐震用支持装置として、地震荷重のような急激な配管移動は拘束し、熱膨張のような緩やかな配管移動は拘束しない機能をもつ製品。
(メカニカルスナツバの設置状況例は別紙7参照)
- 配管から伝達される荷重を支持するための構造部材(ロードコラム等)及び配管移動に追従するための機能部品(ボールねじ等)で構成されている。

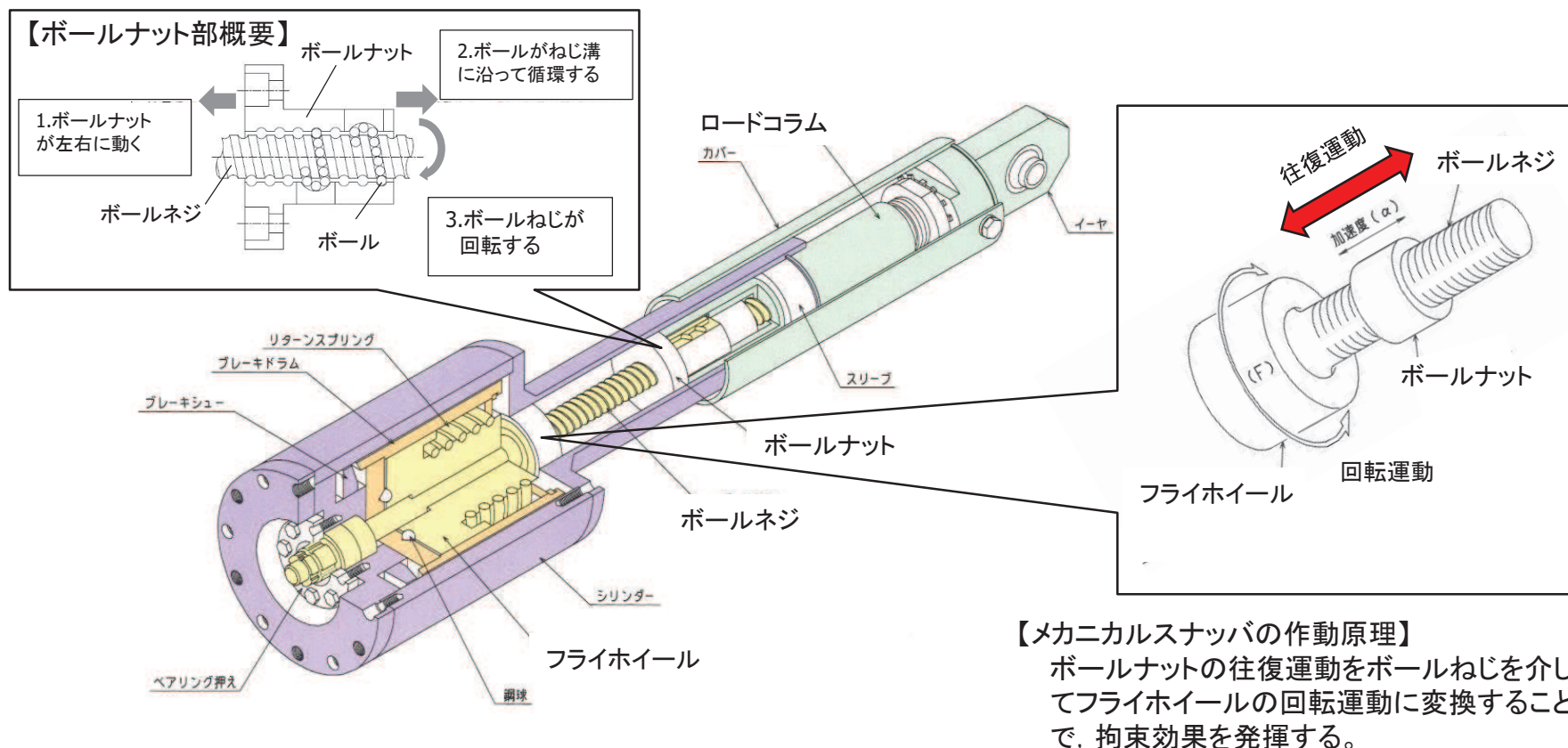
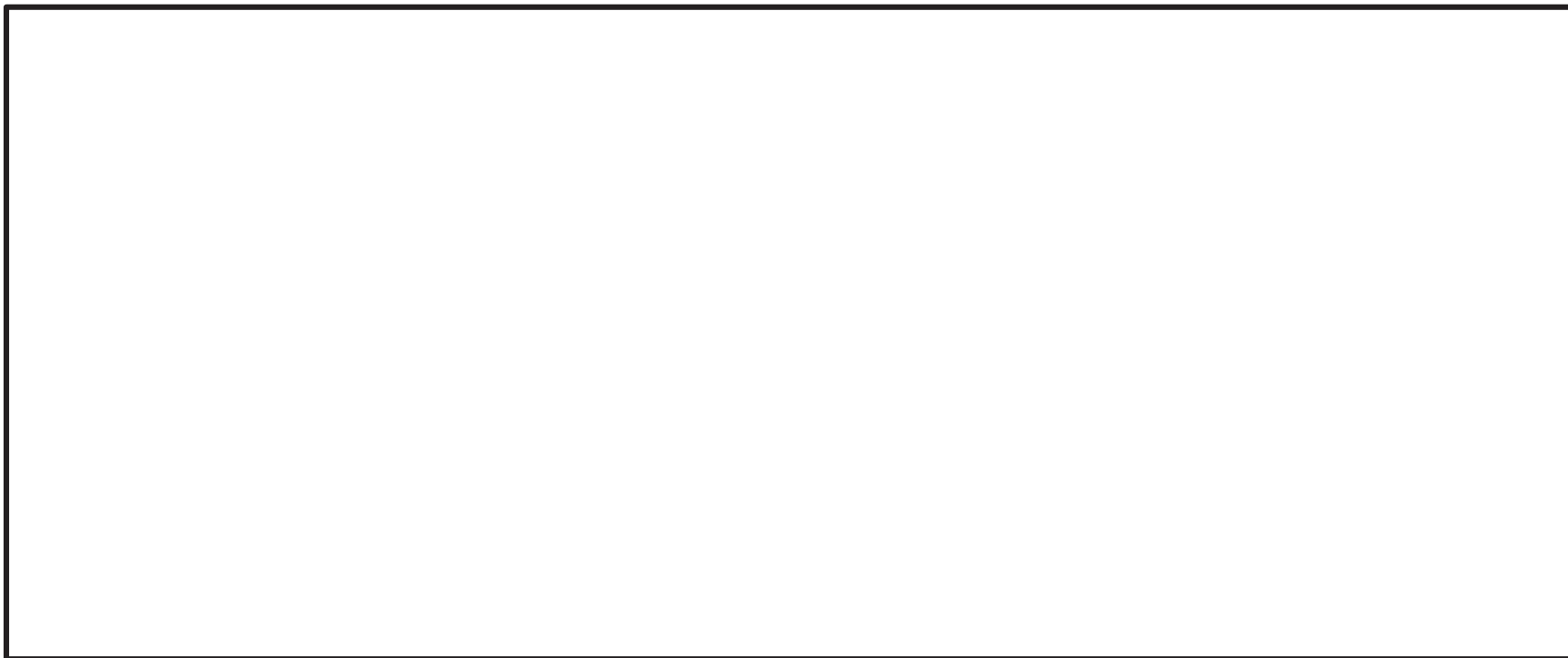


図1 メカニカルスナツバの構造概要及び作動原理

- 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則
 - 機器・配管系の支持構造物であるメカニカルスナツバは、第5条及び第50条(地震による損傷の防止)に基づき、「施設の機能を維持していること又は構造強度を確保していること」が要求される。

- 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601)
 - メカニカルスナツバは、JEAG4601の「その他の支持構造物」に該当するため、配管からの地震荷重に対するメカニカルスナツバの発生応力がその他の支持構造物に規定される許容限界を満足することが要求される。
 - 耐震評価は、解析による設計を基本として、機能維持上の評価が必要な場合は試験による設計も可能であること、許容限界内であることの確認では、荷重による評価としてあらかじめ計算により求めた標準荷重や試験で確認した許容荷重を用いる場合が認められている。

- 今回工認の詳細評価における構造部材の強度評価では、電共研の知見及び荷重伝達経路を考慮して評価部位及び評価項目を追加した。今回工認の詳細評価において追加した評価部位、評価項目を別紙3に示す。
- 地震荷重に対する各構造部材の発生応力がJEAG4601の許容限界を満足することを確認する。

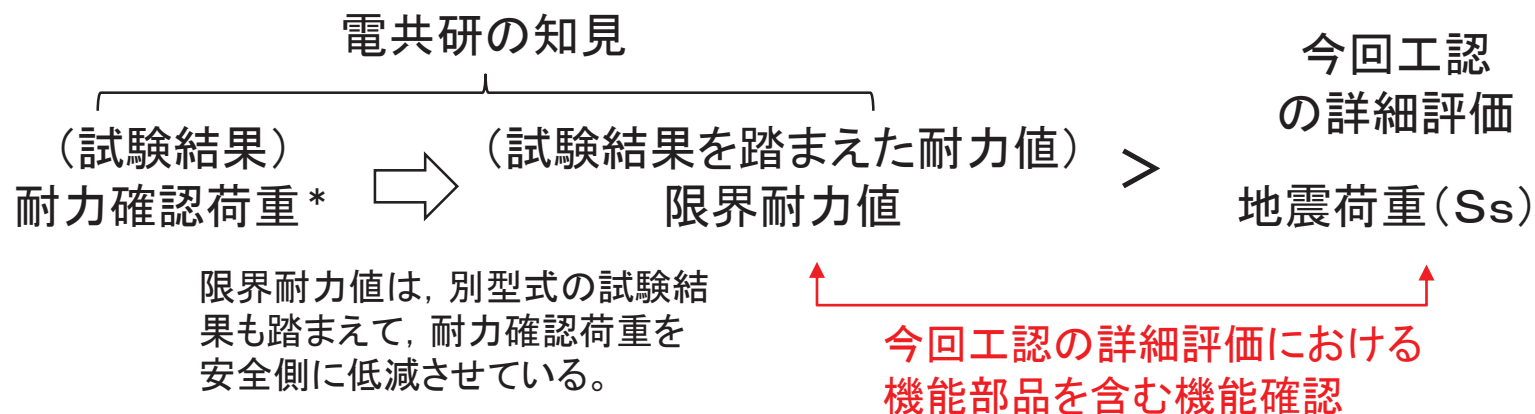


注: 枠内の部位, メカニカルスナツバ全体の座屈評価が追加項目

図4 メカニカルスナツバの荷重伝達経路

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

- 今回工認の詳細評価におけるメカニカルスナツバの機能部品を含む機能確認は、メカニカルスナツバの地震荷重が電共研での知見である限界耐力値を下回っていることを確認する。
- 限界耐力値は、メカニカルスナツバに対する振動応答試験及び低速走行試験の試験結果を踏まえて、型式ごとに策定された荷重値であり、機能部品を含むメカニカルスナツバの機能が確認されたものである。



評価例

94.2 [kN] ⇒ 75.3 [kN] > 67.3 [kN]

支持点番号: PLR-002-406SB
 型式: SMS-3(最小裕度部位: アンギュラー玉軸受)

*: 耐力確認荷重とは、破損又は機能喪失が確認される前の試験条件(機能維持されている状態)における最大荷重である。

参考6 限界耐力評価法による限界耐力値

第979回審査会合(2021年6月1日)資料1-4抜粋

- 電共研における試験結果を踏まえて策定された限界耐力評価法に基づく、機能部品を含むメカニカルスナツバの機能維持が確認できる限界耐力値は、以下のとおり。
- なお、限界耐力値は、耐力確認荷重(試験結果)に対して余裕がある。

限界耐力値(SMS型の例)

型式	定格荷重 (kN)	耐力確認 荷重(kN)	限界耐力値 (kN)	最小裕度部品	限界耐力値／定格荷重
SMS-01	1	—	19.0	六角ボルト	19.0
SMS-03	3	29.9	18.8	六角ボルト	6.26
SMS-06	6	—	16.8	ベアリング押え	2.80
SMS-1	10	56.2	53.9	コネクティングチューブ	5.39
SMS-3	30	94.2	75.3	アンギュラー玉軸受	2.51
SMS-6	60	190.5	170.6	ベアリング押え	2.84
SMS-10	100	244.7	224.5	ベアリング押え	2.24
SMS-16	160	—	344.2	ベアリング押え	2.15
SMS-25	250	—	490.3	ベアリング押え	1.96
SMS-40	400	—	941.4	コネクティングチューブ	2.35

参考7 今回工認の詳細評価結果 機能部品を含む機能確認(1/2) (試験データの拡充後の限界耐力値を反映)

第979回審査会合(2021年6月1日)資料1-4抜粋(赤字部加筆)

配管モデル名	支持点番号	型式	地震荷重[kN]		電共研 限界耐力値 [kN]	試験データの拡充後の 限界耐力値
			弾性設計用地震 動Sd	基準地震動 Ss		
MS-001	MS-001-026S	NMB-075	76.6	125.5	169.7	
MS-001	MS-001-109S	SMS-10	103.2	136.6	224.5	219.1 ⇒ ○
MS-001	MS-001-426S	NMB-075	76.6	112.1	169.7	
MS-001	MS-001-919S	SMS-6	56.9	96.5	170.6	
MS-002	MS-002-921S	SMS-10	100.3	158.9	224.5	219.1 ⇒ ○
MS-003	MS-003-026S	SMS-10	107.1	165.5	224.5	219.1 ⇒ ○
MS-003	MS-003-921SB	SMS-10	133.7	197.0	224.5	219.1 ⇒ ○
MS-004	MS-004-336S	SMS-10	135.1	186.7	224.5	219.1 ⇒ ○
MS-004	MS-004-430S	SMS-10	109.6	137.9	224.5	219.1 ⇒ ○
MS-004	MS-004-935S	SMS-6	61.3	85.4	170.6	
PLR-001	PLR-001-027S	SMS-16	200.5	317.4	344.2	
PLR-001	PLR-001-307S	SMS-25	241.9	435.3	490.3	
PLR-001	PLR-001-316S	SMS-40	437.6	744.1	941.4	
PLR-001	PLR-001-317S	SMS-40	440.8	745.5	941.4	
PLR-001	PLR-001-318S	SMS-40	367.3	604.9	941.4	
PLR-001	PLR-001-319S	SMS-40	428.3	699.5	941.4	
PLR-001	PLR-001-901S	SMS-10	119.3	212.1	224.5	219.1 ⇒ ○
PLR-001	PLR-001-902SA	SMS-7.5	76.1	132.9	170.6	
PLR-001	PLR-001-906S	SMS-10	107.1	175.1	224.5	219.1 ⇒ ○
PLR-001	PLR-001-912S	SMS-6	54.2	95.1	170.6	
PLR-002	PLR-002-008S	SMS-10	117.4	187.1	224.5	219.1 ⇒ ○
PLR-002	PLR-002-010S	SMS-16	193.2	330.7	344.2	
PLR-002	PLR-002-027S	SMS-16	171.6	293.8	344.2	

参考7 今回工認の詳細評価結果 機能部品を含む機能確認(2/2) (試験データの拡充後の限界耐力値を反映)

第979回審査会合(2021年6月1日)資料1-4抜粋(赤字部加筆)

配管モデル名	支持点番号	型式	地震荷重[kN]		電共研 限界耐力値 [kN]
			弾性設計用 地震動Sd	基準地震動 Ss	
PLR-002	PLR-002-111S	NMB-030	30.7	49.0	67.4
PLR-002	PLR-002-215S	SMS-10	109.4	186.7	224.5
PLR-002	PLR-002-307S	SMS-25	260.4	470.5	490.3
PLR-002	PLR-002-308S	SMS-25	251.8	452.1	490.3
PLR-002	PLR-002-315S	SMS-40	374.5	605.6	941.4
PLR-002	PLR-002-406SA	SMS-3	36.5	65.8	75.3
PLR-002	PLR-002-406SB	SMS-3	37.8	67.3	75.3
RHR-001	RHR-001-903S	SMS-6	60.8	96.3	170.6
RHR-003	RHR-003-901SB	SMS-10	84.9	153.4	224.5
RHR-009	RHR-009-087SA	SMS-1	9.7	17.9	53.9
RHR-009	RHR-009-087SB	SMS-1	9.7	18.0	53.9
RHR-010	RHR-010-910S	SMS-6	60.2	104.3	170.6
RHR-010	RHR-010-911S	SMS-1	11.7	13.2	53.9
RHR-011	RHR-011-009S	SMS-10	94.8	158.4	224.5
RHR-011	RHR-011-047S	SMS-6	60.2	110.4	170.6
RHR-011	RHR-011-088S	SMS-6	50.0	93.4	170.6
RHR-011	RHR-011-089S	NMB-030	28.6	50.0	67.4
HPCS-001	HPCS-001-035S	SMS-10	87.1	159.6	224.5
HPCS-003	HPCS-003-102S	SMS-6	58.1	91.8	170.6
HPCS-003	HPCS-003-907S	SMS-7.5	77.8	119.3	170.6
RCIC-004	RCIC-004-045S	SMS-06	5.6	10.5	16.8

試験データの拡充後の
限界耐力値

219.1 ⇒ ○

70.1 ⇒ ○

70.1 ⇒ ○

219.1 ⇒ ○

219.1 ⇒ ○

219.1 ⇒ ○