

東海第二発電所 工事計画認可申請に係る論点整理について(コメント回答)

**【論点17】ブローアウトパネル及び関連設備の必要機能と確認方法
ブローアウトパネル閉止装置の不具合の対応について**

平成30年7月9日

日本原子力発電株式会社

1. 過去審査会合のコメント一覧
2. ブローアウト閉止装置に対する要求事項の整理
3. 加振試験結果のまとめ
4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析
 - (1)－① チェーン破損の状況
 - (1)－② チェーン破損の原因分析
 - (2)－① 扉移動後の再閉止不可に係る状況
 - (2)－② 扉移動後の再閉止不可に係る原因分析
5. 対策案について
6. 対策案の妥当性確認について
7. 第591回審査会合(6月26日)コメント回答

1. 過去審査会合のコメント一覧



No	審査会合コメント
①	門についてどの程度加振に耐えられるか、開機能に悪影響を与えないか説明すること。
②	閉止状態で開いたときの閉止対策(警報, 自動閉止)について検討すること。
③	対策を実施する場合, 先日のEディフェンスでの試験条件への影響について評価すること。
④	確認された不具合について分析を十分に行い, 広い視点から今回説明した対策に限定せずに, 最善の対策を検討すること。
⑤	対策は, 閉止装置に要求される機能に照らし合わせて検討すること。
⑥	チェーンの強度向上による他設備(他部位)への影響を耐震, 強度の観点も含めて説明すること。
⑦	設計で想定していた荷重と構造上の弱部が今回のチェーン破損状況と合致しているか確認し, そのうえで対策を検討すること。
⑧	扉の面外方向のランダム波に対する固有スペクトル16Hzを考慮した耐震計算を行うこと。
⑨	チェーンの有意な変形(判定基準)について具体的にすること。
⑩	チェーン破損のメカニズムをよく検討すること。
⑪	チェーンとチェーンの伸びの位置関係を明確にして対応を検討すること。
⑫	開状態, 閉状態での要求機能を整理すること。
⑬	あるところを強化すると別のところに問題が発生する可能性がある。総合的に確実な対策を検討すること。

2. ブローアウトパネル閉止装置に対する要求事項の整理



◆ ブローアウトパネル閉止装置に対する要求事項は次のとおり。

BOP閉止装置の機能要求

1. 技術基準第74条(運転員が原子炉制御室にとどまるための設備)

「原子炉制御室の居住性を確保するために原子炉建屋に設置されたブローアウトパネルを閉止する必要がある場合は、容易かつ確実に閉止操作ができること。また、ブローアウトパネルは、現場において人力による操作が可能なものとする。」(技術基準の解釈 2 e)

		実用発電用原子炉及びその附属設備の技術基準に関する規則	
		74条 原子炉制御室にとどまるための設備	50条 地震
ブローアウトパネル閉止装置 (SA緩和設備)	開状態 (SA前)	容易かつ確実に閉止操作ができること	基準地震動 S_s 機能維持
	閉状態 (SA後)	気密性確保※1	弾性設計用地震動 S_d ※2

※1 閉止装置の再閉止による場合を含む。

※2 SA事象発生後、閉止装置を使用することになるが、一定期間の地震動に対する頑健性を有するよう弾性設計用地震動 S_d とする。

2. その他手順上考慮している機能要求(自主対策設備)

(1) 技術的能力1. 10「水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための手順等」 原子炉建屋原子炉棟からの水素排出を行うため、閉状態における開機能

(2) 技術的能力2. 「大規模な自然災害又は故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムへの対応」
使用済燃料プールへの放水砲による注水を行うため、閉状態における開機能

◆ コメント⑫「開状態、閉状態での要求事項を技術基準に照らして整理すること」に対応

3. 実機大加振試験結果のまとめ



◆ 基準要求事項に照らして、E-ディフェンス(H30.6.20～H30.6.22)にて実施した加振試験結果は以下のとおり。

加振時扉状態	試験日	加振条件	試験体下端の計測結果の最大加速度	チェーン溶接有無	チェーン破損状況	扉状態	閉機能(電動)	開機能(電動)	開閉機能(手動)	気密性能
開	6/20	レベル3 (1.0Ss)	面外X: 1.51G 面内Y: 1.56G 鉛直Z: 1.64G	無	破損(開側)	—	有 (破損は扉を開ける側)	無 (破損は扉を開ける側)	有	0.26 m ³ /h・m ²
	6/22	レベル4 (1.1Ss)	面外X: 1.56G 面内Y: 1.57G 鉛直Z: 1.72G	有 (端部の3ピン分)	破損(開側)	—	有 (破損は扉を開ける側)	無 (破損は扉を開ける側)	有	0.27 m ³ /h・m ²
閉	6/20	レベル2 (0.6Ss)	—	無	破損なし	・扉は完全閉状態から開方向に52mm移動	有	有	有	0.24 m ³ /h・m ²
	6/21	レベル3 (1.0Ss)	面外X: 1.41G 面内Y: 1.61G 鉛直Z: 1.61G	無	破損(閉側)	・扉は完全閉状態から開方向に約300mm移動	無 (破損は扉を閉じる側)	有 (破損は扉を閉じる側)	有	0.26 m ³ /h・m ²
		レベル4 (1.1Ss)	面外X: 1.43G 面内Y: 1.58G 鉛直Z: 1.62G	有 (端部の3ピン分)	・破損なし(チェーン全体で38mmの伸び確認)	・扉は完全閉状態から開方向に約85mm移動	有	有	有	0.27 m ³ /h・m ²

<加振結果の概要>

- ◆ 開レベル3, 4でチェーン破損が発生し、電動での開操作は不可。
- ◆ 閉レベル3でチェーンが破損し、扉が開方向に移動したが、電動での閉止操作は不可。
- ◆ 閉止装置の主要な構造部品(ガイドレール, テーパーブロック, テーパーローラ, ハンガーレール等)については有意な損傷・変形はなかった。
- ◆ 加振試験後の気密性能試験結果は良好であった。

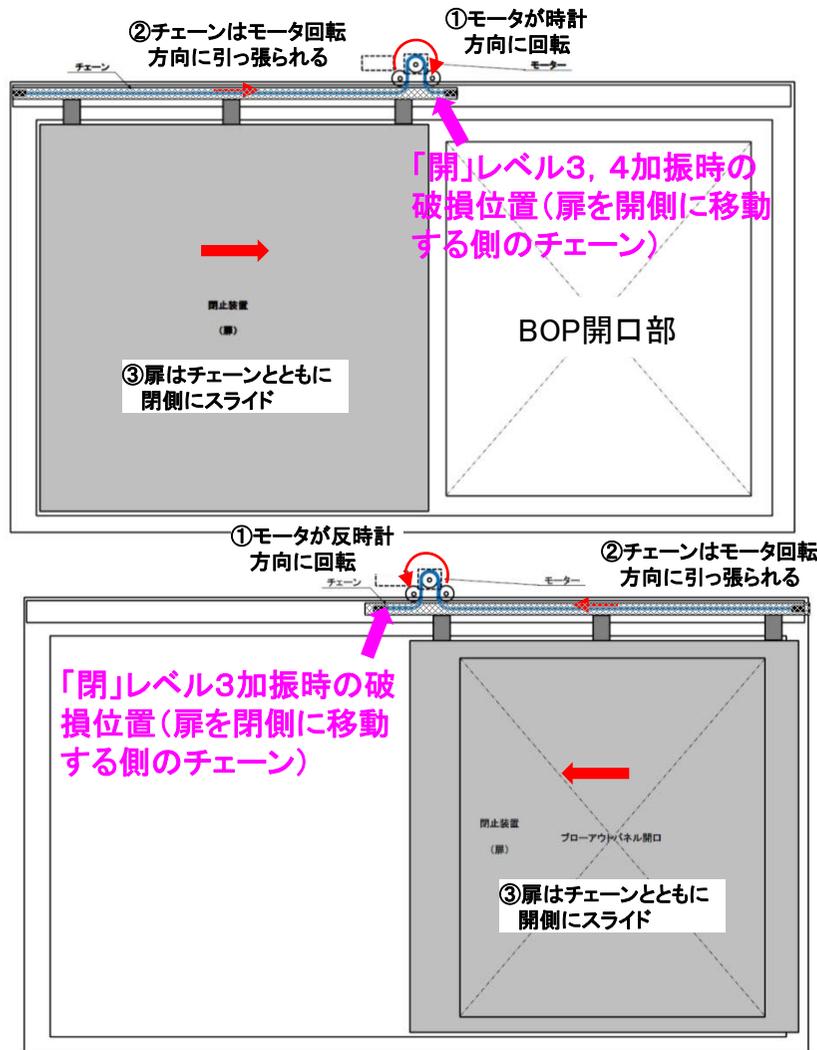
<基準要求等を踏まえ必要となる対策>

- ◆ 閉状態での閉機能の喪失(地震による開放に対し、電動にて再閉止できず)に対して、閉機能(チェーン健全性)が必要(赤枠)
- ◆ 扉開状態から閉止後に再度、開操作する場合に対して、開機能(チェーン健全性)が必要(青枠) (大規模損壊等の対応)

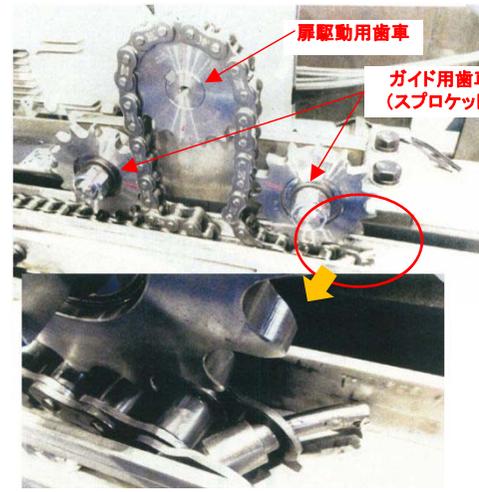
4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析 (1) - ① チェーン破損の状況(1/2)



◆チェーンの一部が破損する不具合を確認。破損箇所は、扉全開又は全閉時にガイド用歯車(スプロケット)とのチェーン端部までの距離が短尺側(全開時には開放側, 全閉時には閉止側のチェーン)であった。



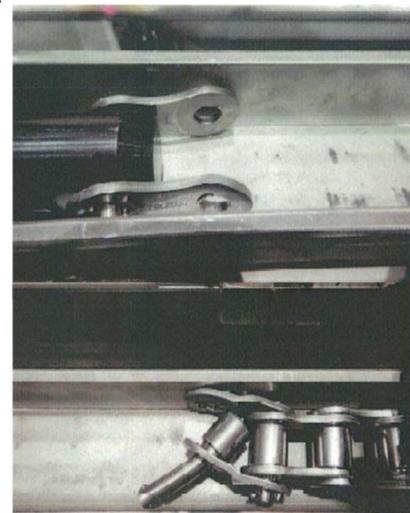
扉開閉のメカニズム



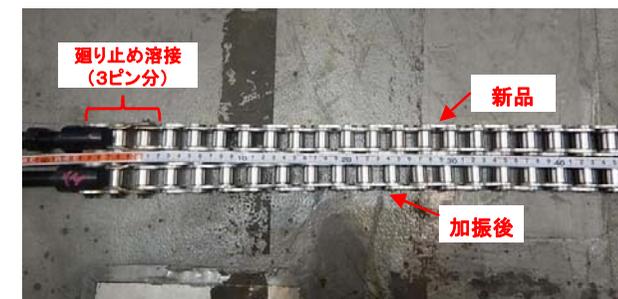
扉開状態レベル3加振後のチェーンの状態(6月20日)



扉開状態 レベル4加振後のチェーンの状態(6月22日)
(端部近傍の3つのピンについて廻り止め溶接を実施した結果、廻り止め溶接を実施していないチェーンに破損を確認)



扉閉状態レベル3加振後のチェーンの状態(6月21日)



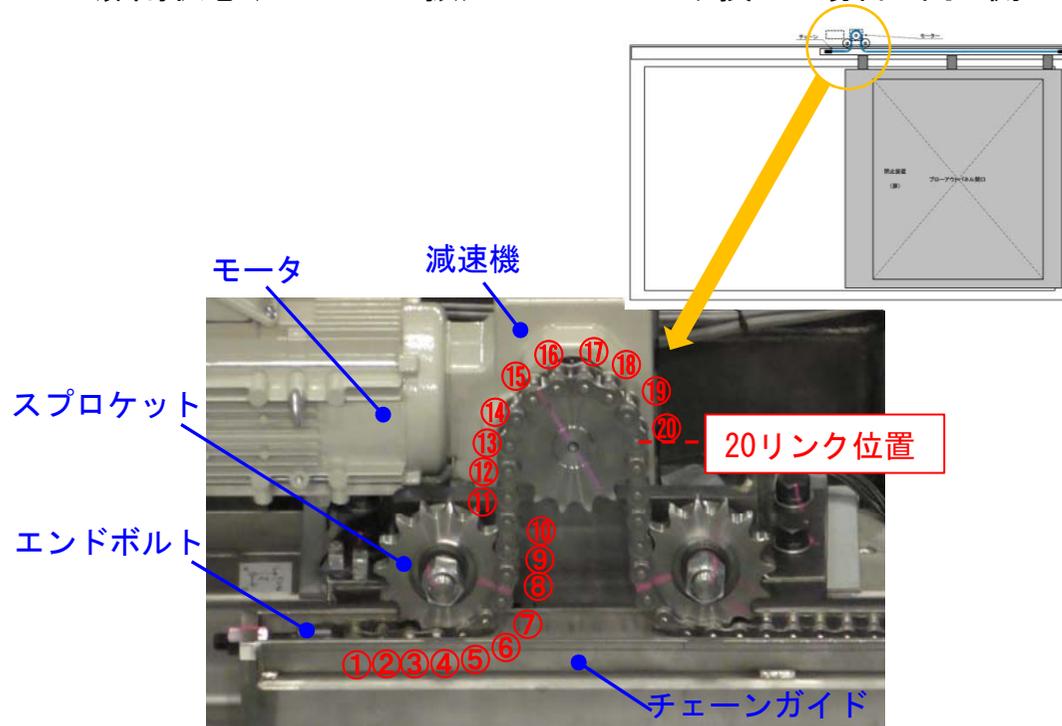
扉閉状態 レベル4加振後のチェーンの状態(6月21日)
(端部近傍の3つのピンについて廻り止め溶接を実施した結果、チェーン破損はなかったが約38mm(新品全長5584mm)の伸びが確認された)

4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析 (1) - ① チェーン破損の状況(2/2)

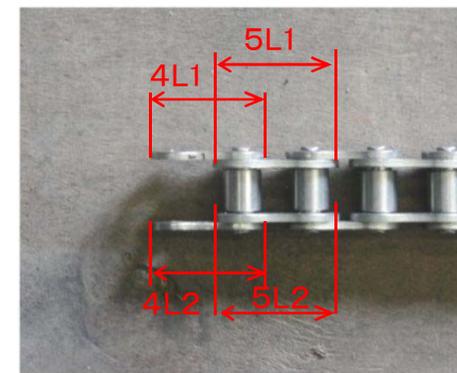


【チェーン破断箇所及びチェーンの伸び量の調査】

- ◆ 扉閉状態(レベル4加振)でのチェーン寸法測定結果から、チェーンの伸びはエンドボルト側から17リンク目までが伸びが大きいことが分かった。この部位は減速機からエンドボルトまでのチェーン短尺側(扉閉止側)の範囲であり、扉閉状態(レベル3加振)でチェーンが破損した場合と同じ側であった。



チェーン健全時の設置状況(扉閉側)



チェーンの伸び測定記録

(mm)

	リンク番号																
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L1	1.75	2.35	1.54	2.38	1.25	2.33	-0.02	1.54	0.52	1.17	0.81	1.45	0.5	1.4	-0.11	0.25	-0.05
L2	1.12	2.01	1.21	2.37	1.32	2.13	-0.04	1.14	0.67	1.42	1.02	2.08	0.81	1.15	-0.04	0.28	-0.03

1~3リンク部は、溶接で接続したため、寸法採取対象外とする。

伸びが大きい範囲

- ◆ コメント⑩「チェーンの伸び箇所とギア等との位置関係を明確にすること。」に対応

4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

(1)－② チェーン破損の原因分析(1/7)



- ◆チェーン損傷について原因を調査した結果は、以下のとおり。
- ◆チェーンに設計想定※を超える電動機のブレーキ反力が発生し、これがチェーンの引張強さを超えたためチェーンが破損した可能性が高い。

※:チェーンに電動機のブレーキ荷重(カタログ値ベース:19.6kN)以上の引張力が生じた場合には、電動機の滑りが発生するためチェーンは破損しない設計

要求事項	事象	要因1	要因2	調査項目	調査結果	破損原因	備考
容易かつ確実な閉止操作(再閉止含む)及び自主対応(大規模損壊等)としての開操作	チェーン破損	設計想定を超えた過大荷重	設計を超えた加振加速度	加振時の扉の最大加速度確認(扉面内方向)	<ul style="list-style-type: none"> ・チェーンに直接付加された荷重データはないが、加振試験時の扉には最大約9.6G(面内方向)が付加されており、設計想定1.66G(EL63.65mの最大加速度ZPA)を超えていた。 ・しかしながら、電動機ブレーキ荷重(約19.6kN)を超える荷重が付加された場合、ブレーキには滑りが発生するため、ブレーキ荷重以上の荷重がチェーンに付加されることはなく、チェーンは破損しない設計としていた。 	×	P.6
			設計を超える電動機のブレーキ反力がチェーンに発生	電動機のブレーキトルク測定	<ul style="list-style-type: none"> ・電動機ブレーキに滑りが発生する荷重を確認した結果、チェーン張力換算で最大約33kNであり、カタログから算出される電動機ブレーキ荷重約19.6kNを超えていた。 ・機械工学便覧によれば、ブレーキ荷重が方形波パルス形状の場合、チェーンに作用するブレーキ反力は、ブレーキ力の最大2倍となり得ることを確認したが、この影響は設計上、想定されていなかった。 ・チェーンに付加される荷重がブレーキ荷重の2倍になる場合、チェーン張力は、約66kN程度となり、試験にて確認したチェーンの引張強さ(約41.4～44.8kN)を超え、チェーンは破損することを確認した。 	○	P.7 P.9 P.8
			チェーンの強度不足	引張試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ブレーキ荷重(19.6kN)を超えた引張力がチェーンに付加されれば、すべりが発生し、チェーンは損傷しない設計としていた。 ・引張試験によれば、チェーン引張強さは約41.4～44.8kNであり、設計としたブレーキ荷重(19.6kN)を超えていることを確認した。 	△	P.8
		その他部品損傷による影響	その他部品損傷による影響	現品確認	<ul style="list-style-type: none"> ・加振後の電動機、減速機等に有意な変形、チェーンを拘束したような痕跡は認められないこと、また、チェーン取替後の扉開閉に伴う電動機電流値、開閉時間等の異常は確認されていないため、他の部品の損傷によりチェーンが損傷した可能性はない。 	×	P.10

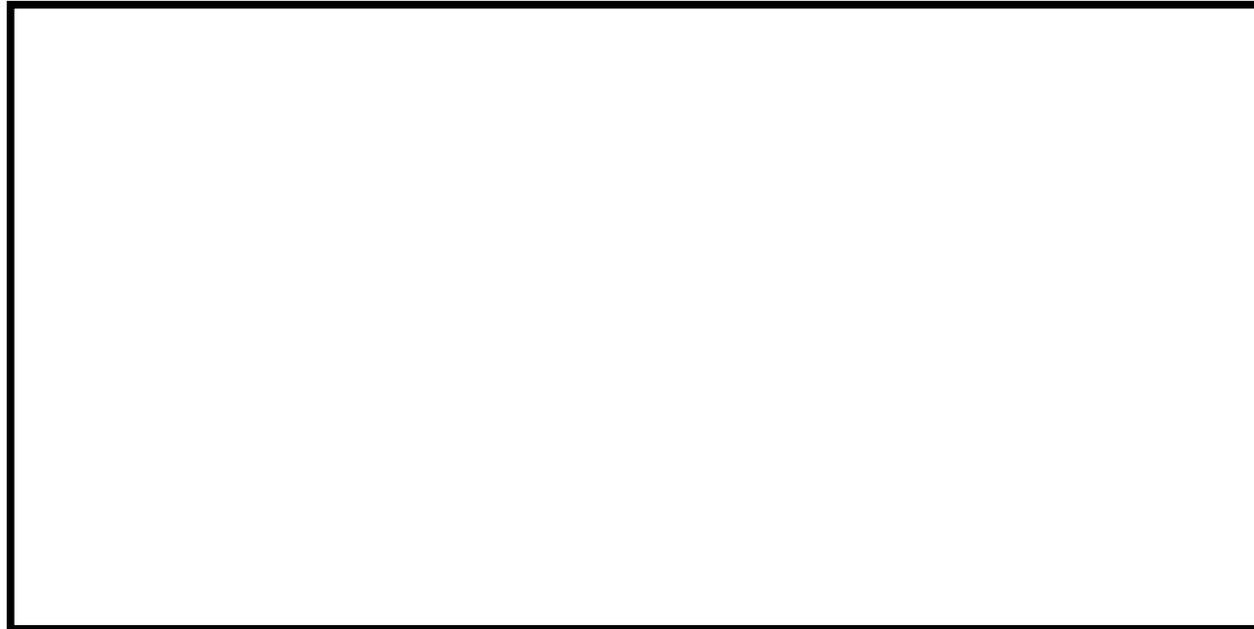
○:破損の主要因 △:間接的な要因 ×:原因ではない

4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

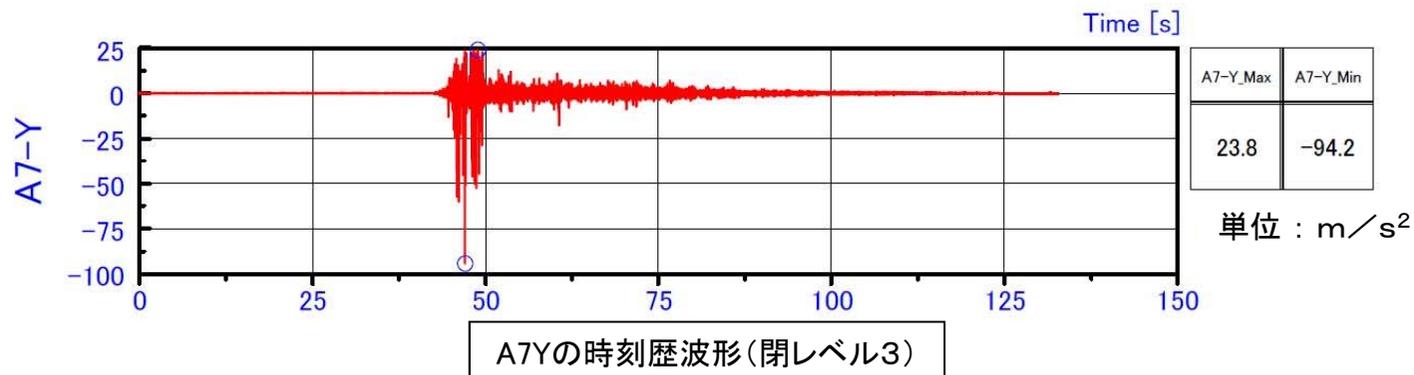
(1)－② チェーン破損の原因分析(2/7)



- ◆扉の面内方向の加速度は、扉中央に取付けたA7Yの加速度計にて計測
- ◆チェーンに直接付加された荷重データはないが、加振試験時の扉には最大約9.6G(面内方向)が付加されており、設計想定1.66G(EL63.65mの最大加速度ZPA)を超えていた。



加速度計の取付位置



4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

(1)－② チェーン破損の原因分析(3/7)



- ◆設計で想定していた電動機のブレーキ荷重よりも大きな荷重が働いた可能性があることから、電動機及び減速機を取り付けた状態において、ブレーキトルクの実力値を測定。
- ◆カタログによる標準トルクから算出されるブレーキ荷重(19.6kN)よりも、大きな荷重(最大約33kN)が働いた可能性が高いことが判明。

○モータのブレーキトルクによる荷重

モータのブレーキの標準動摩擦トルク: $T_0 = 15 \text{ N}\cdot\text{m}$ (カタログ値)

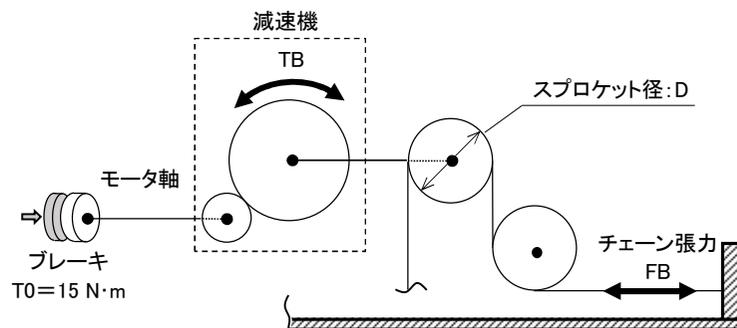
・実減速比: 78.57

・減速機の出力軸のブレーキトルク:

$$TB = 15 \times 78.57 = 1178 \text{ N}\cdot\text{m}$$

・スプロケット径: $D = 120 \text{ mm}$

・チェーン張力 FB : $FB = 2 \times TB / D = 2 \times 1178 / 0.12 = \underline{19.6 \text{ kN}}$



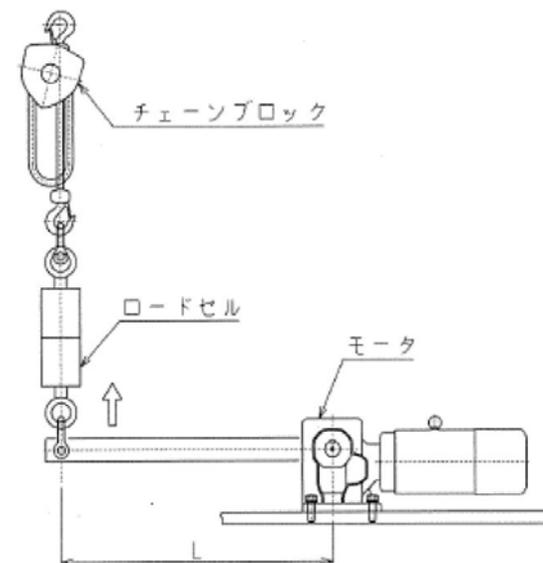
電動機ブレーキトルク体系図

○試験で得られたブレーキトルクによる荷重

最大トルク: $1934 \text{ N}\cdot\text{m}$

・チェーン張力 FB :

$$FB = 2 \times TB / D = 2 \times 1934 / 0.12 = \underline{33 \text{ kN}}$$



電動機ブレーキトルク試験概略図

4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

(1)－② チェーン破損の原因分析(4/7)

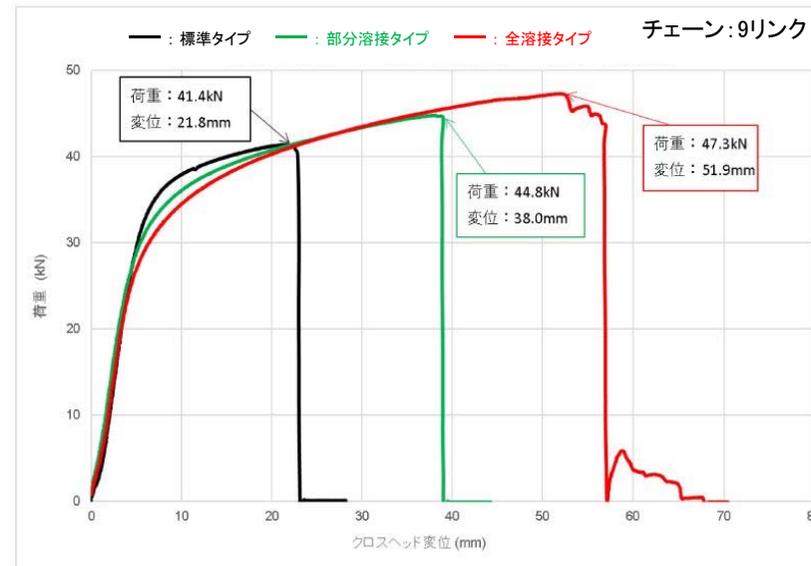


【チェーン破損に至る荷重について】

- ◆チェーン破損時にチェーンに付加された荷重を推定するため、標準タイプ、部分溶接(エンドボルトから3ピン目までを溶接)、全溶接の3種類に対して引張試験を実施
- ◆破損位置は加振試験時と同で、加振試験時にチェーンに付加された荷重は約41kN以上であることが判明
- ◆チェーンのピン部を溶接すると破損までの変位は増加するが、大幅な強度の向上はなかった。



引張試験の状況



荷重－クロスヘッド変位



標準タイプ(オリジナル)

加振時と同様にエンドボルト部近傍が破損



部分溶接タイプ

加振時と同様に補強隣接部が破損



【参考】全溶接タイプ
(加振試験では使用せず)

- ◆コメント⑦「設計で想定していた荷重と構造上の弱部が今回のチェーン破損状況と合致しているか確認し、そのうえで対策を検討すること。」に対応

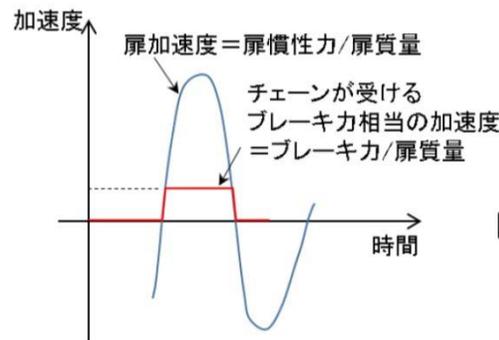
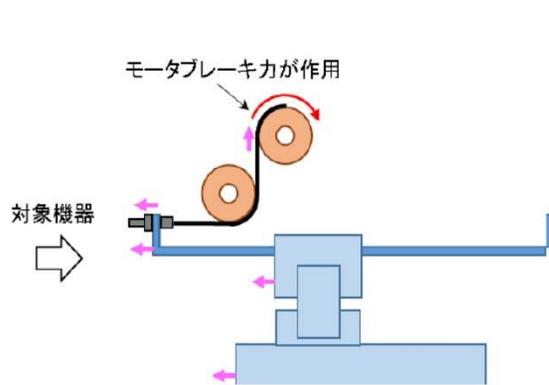
4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

(1) - ② チェーン破損の原因分析 (5/7)



【電動機のスライド方向支持による反力について】

- ◆ 1自由度系に方形波パルス形状の荷重(加速度)が入力された場合, その動的増倍係数は最大2倍となる(機械工学便覧)が, この影響は設計上, 想定されていなかった。
- ◆ 今回の加振試験に適用すると, 電動機ブレーキ力が方形波パルスとなった場合, チェーンに付加されるブレーキ反力は最大2倍程度に増幅され, 設計想定を超える可能性があることを確認した。
(ブレーキ荷重(最大約33kN)の2倍である約66kNの負荷が作用し, チェーンの引張強度(41kN~47kN)を超過)



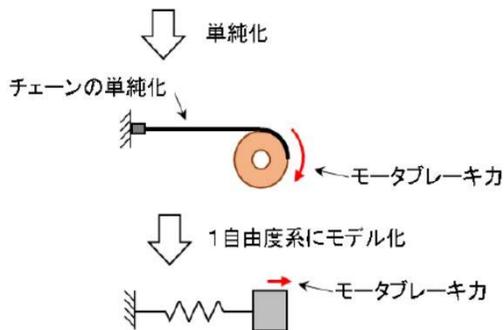
電動機ブレーキにブレーキ力を超える荷重が付加されると滑りが発生するため, 実際にブレーキに入力される加振時荷重(加速度)は方形波パルス形状となる

ブレーキ力

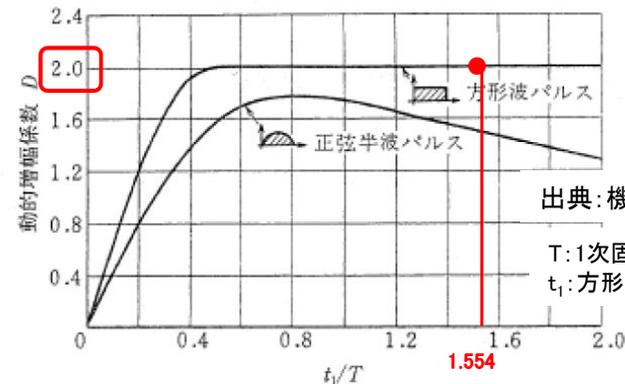
時間

t_1

図 加振試験時にチェーンが受けるブレーキ力のイメージ



1自由度系の衝撃応答



正弦半波パルスと方形波パルスの動的増倍係数

図 チェーン/電動機の単純化

4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

(1)－② チェーン破損の原因分析(6/7)



【電動駆動系の荷重伝達面から見た弱部の確認】

- ◆ ブローアウトパネル閉止装置の加振試験時の荷重伝達経路を構成する部品について、発生荷重に対する裕度を整理した結果、設計上の裕度が最も低い部位はチェーンであり、加振時のチェーン破損に合致していることを確認
- ◆ 加振後の外観目視点検の結果、チェーン破損部を除く荷重伝達経路の各部品に異常のないことを確認した。

<荷重伝達経路を構成する部品の強度評価>



電動機ブレーキ荷重(19.6kN)に対する簡易評価結果

No.	部品名	裕度 ^{※1}
1	ボルト1	
2	ハンガー	
3	ブラケット1	
3	リンク	
4	ローラ	
4	ブラケット2	
5	ボルト2	
6	ホルダ	
7	ボルト3	
8	チェーンガイド	
9	エンドボルト	
10	チェーン ^{※2}	
11	スプロケット 軸	
12	モーターベース	
13	ボルト4	
14	ハンガーレール	

電動機ブレーキ荷重の約2倍の荷重(66kN)に対する簡易評価結果

No.	部品名	裕度 ^{※1}
1	ボルト1	
2	ハンガー	
2	ブラケット1	
3	リンク	
4	ローラ	
4	ブラケット2	
5	ボルト2	
6	ホルダ	
7	ボルト3	
8	チェーンガイド	
9	エンドボルト	
10	チェーン ^{※2}	
11	スプロケット 軸	
12	モーターベース	
13	ボルト4	
14	ハンガーレール	

※1 裕度 = Su / 発生荷重

※2 チェーンについては、発生荷重と最少引張強さ(カタログ値)の比較で評価

⇒強度評価の結果、荷重伝達経路の中でチェーンが低く、推定した荷重で簡易評価した結果、チェーン及びスプロケット軸が裕度1を下回る結果であることを確認した。

- ◆ コメント⑦「設計で想定していた荷重と構造上の弱部が今回のチェーン破損状況と合致しているか確認し、そのうえで対策を検討すること。」に対応

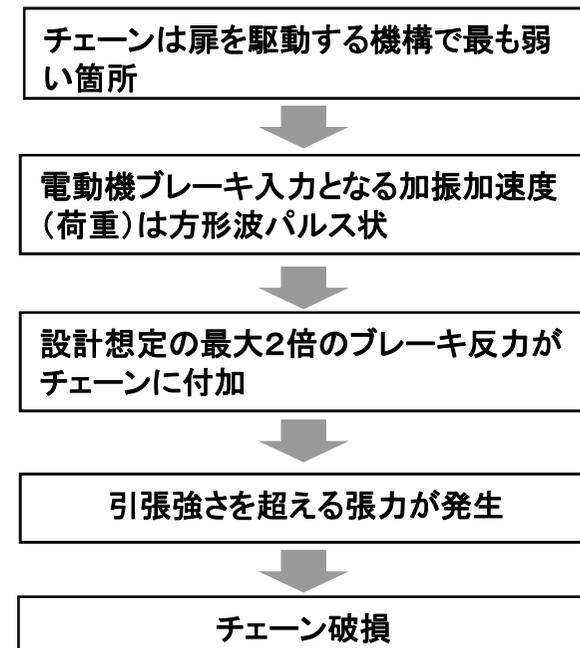
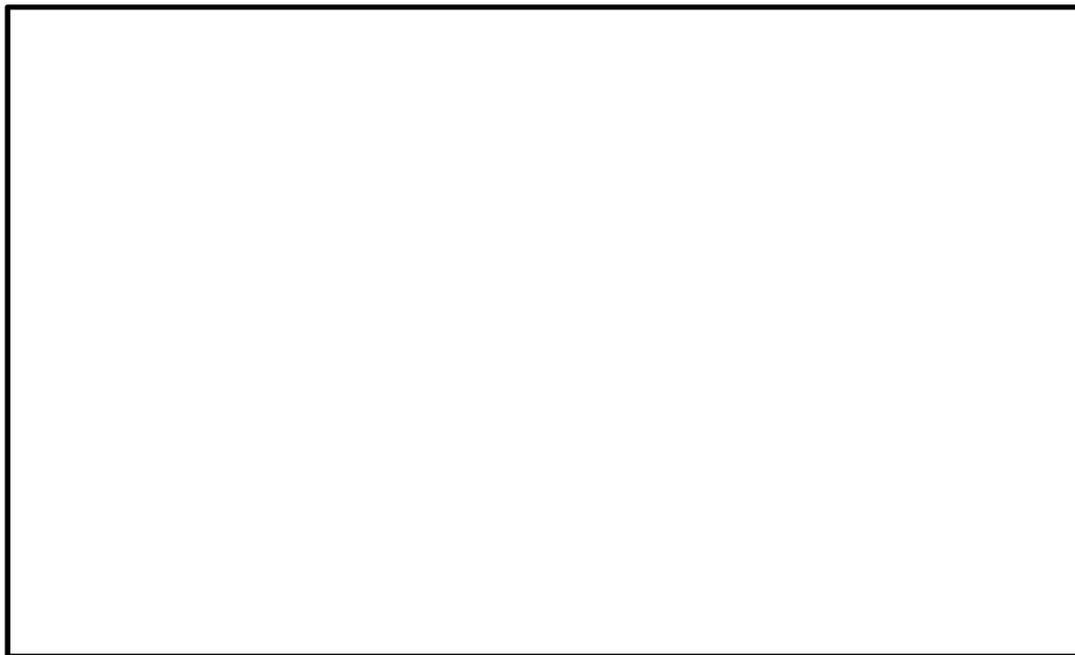
4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析
 (1)－② チェーン破損の原因分析(7/7)



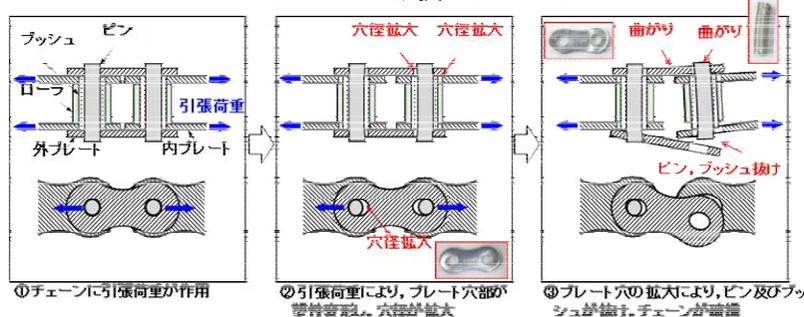
<チェーン破損の推定メカニズム>

- ◆ 加振試験により発生したスライド方向の慣性力の一部が、チェーン等を通じて電動機ブレーキに伝わり、その反力が動的に増倍されたことにより、チェーンに設計想定以上の過大な引張荷重が発生し、チェーンプレートが塑性変形してピン穴径が拡大した結果、ピンが抜け出てチェーンが破損したと推定

<チェーン破損のメカニズム(扉閉止状態加震時)の例>



<チェーンの破損メカニズム>



※図は扉閉状態のチェーン破損メカニズムであるが、扉開状態のチェーン破損メカニズムも同様。但し、扉が開状態であるためチェーン破損位置は扉を開ける側のチェーン端部近傍となる。

- ◆ コメント⑩:「チェーン破損のメカニズムについてよく検討すること」に対応

4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

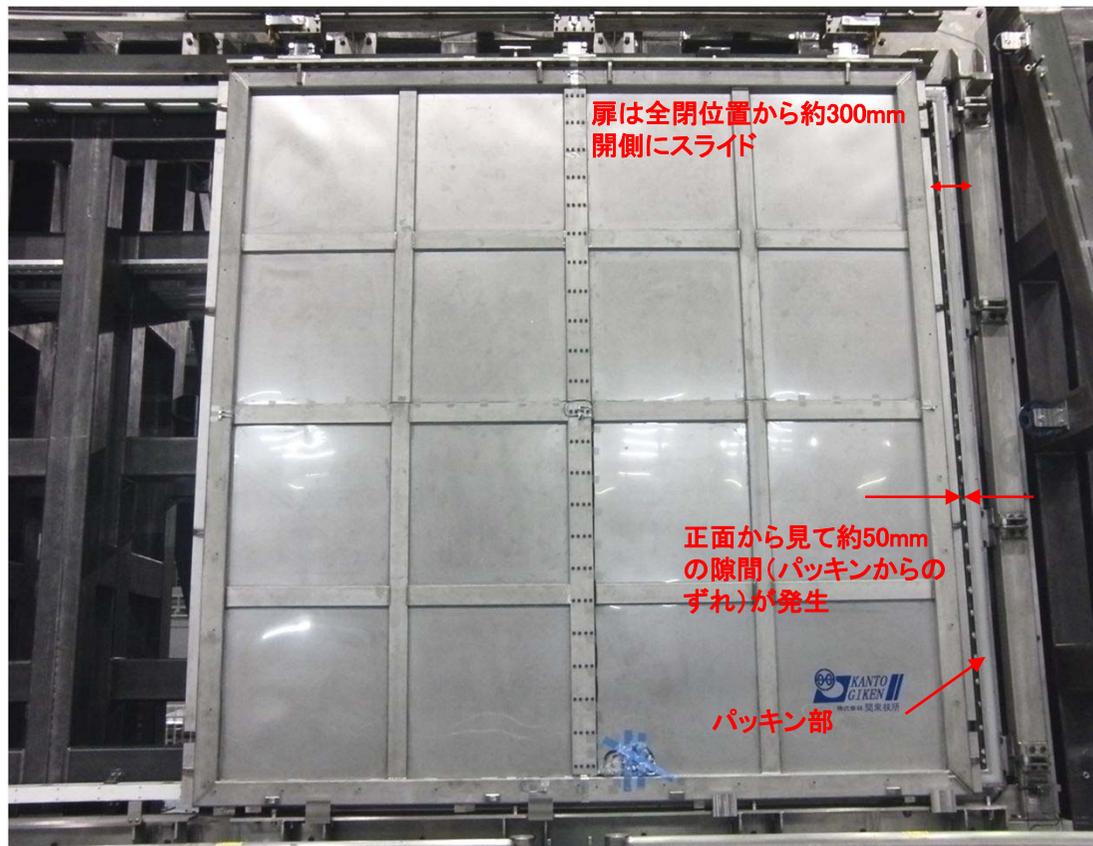
(2)－① 扉移動後の再閉止不可に係る状況(1/1)



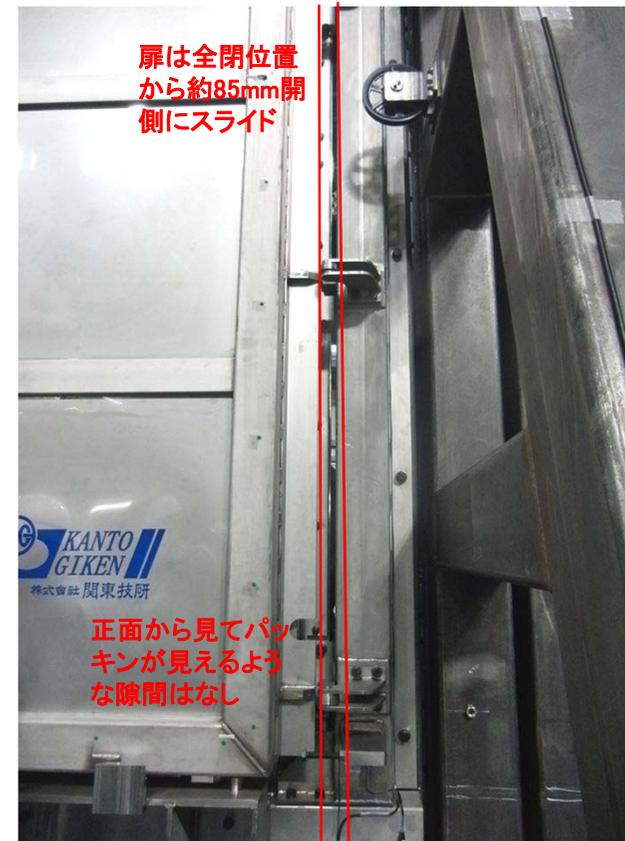
- ◆ 扉閉状態でのレベル3(1.0Ss)及びレベル4(1.1Ss目標)の加振にて、閉止中の扉が開方向に移動し、閉止が維持できないことを確認
- ◆ 扉閉状態でのレベル3(1.0Ss)では、チェーンが破損した結果、電動での再閉止はできない状態であった

※:扉閉状態でのレベル3(1.0Ss)時は標準チェーンを使用。

レベル4(1.1Ss目標)の加振時は、レベル3でのチェーン破損結果を踏まえて、標準チェーンの一部を溶接したチェーンを使用



扉閉レベル3(1.0Ss)後の扉状態(6月21日)



扉閉レベル4(1.1Ss)後の扉状態(6月21日)

4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

(2)－② 扉移動後の再閉止不可に係る原因分析(1/2)



- ◆技術基準上要求されないが、閉状態において、扉が移動(開放)しないことを設計目標するため、要因分析を行いチェーンの破損と併せて対策を行う。
- ◆扉が加振後に開放した原因について検討した結果、要因として、①チェーン破損、②チェーンの伸び、③電動機ブレーキの滑りが考えられた。

要求事項	事象	要因1	要因2	確認のための調査項目	調査結果	移動原因	備考
設計目標としての扉が移動しないこと	扉の移動	チェーン破損	チェーン破損の原因分析と同じ			○	—
		チェーンの伸び	過大荷重の発生	チェーン伸び量確認	<ul style="list-style-type: none"> 引張試験によるチェーン破断直前の伸び量を基に、過度の伸びが認められた20リンク分に換算すると、①標準チェーン:約22mm、②部分溶接チェーン:約64mm、③全溶接チェーン:約73mmであった。扉閉状態レベル4加振時の17リンクまでの伸びが大きいことがわかった。 チェーンの引張試験結果では、約20kNを超える荷重が付加されると、チェーンは塑性域に入り伸び始めることを確認した。 ブレーキ力(19.6kN)はチェーンの弾性範囲内であるため、設計上、チェーンの伸びについては考慮していなかった。 	○	P4
				チェーンガイド等の伸び	<ul style="list-style-type: none"> 加振後の外観検査で有意な変形は確認されていない 	×	—
		電動機ブレーキのすべり	想定以上の電動機ブレーキ力	ブレーキの滑り荷重確認	<ul style="list-style-type: none"> 電動機ブレーキの滑り発生トルクを試験により確認した結果、ブレーキ力は、チェーン張力換算では最大約33kNであり、カタログから算出されるブレーキ力(設計値)約19.6kNより滑り難い状態であった。 	×	P.8
				ブレーキの滑り	<ul style="list-style-type: none"> チェーンの引張荷重は、電動機ブレーキを超えており、ブレーキには滑りが発生する状況にあったことを確認した。(扉閉レベル4加振時には扉は85mm移動したが、チェーン全体の伸びは38mmであり約47mm分は滑りにて扉が移動) 	○	P.2 閉レベル4加振結果
				スプロケットからのチェーン外れ	現品確認	<ul style="list-style-type: none"> 加振後のチェーンのスプロケットからの外れなし 	×
		扉変形	—	現品確認	<ul style="list-style-type: none"> 加振後の扉に有意な変形は認められない 	×	—
他の損傷	電動機等の変形	現品確認	<ul style="list-style-type: none"> 加振後の電動機、減速機等に有意な変形は認められない 	×	—		

○:破損の主要因 △:間接的な要因 ×:原因ではない

4. 加振試験で確認された不具合の状況と原因分析

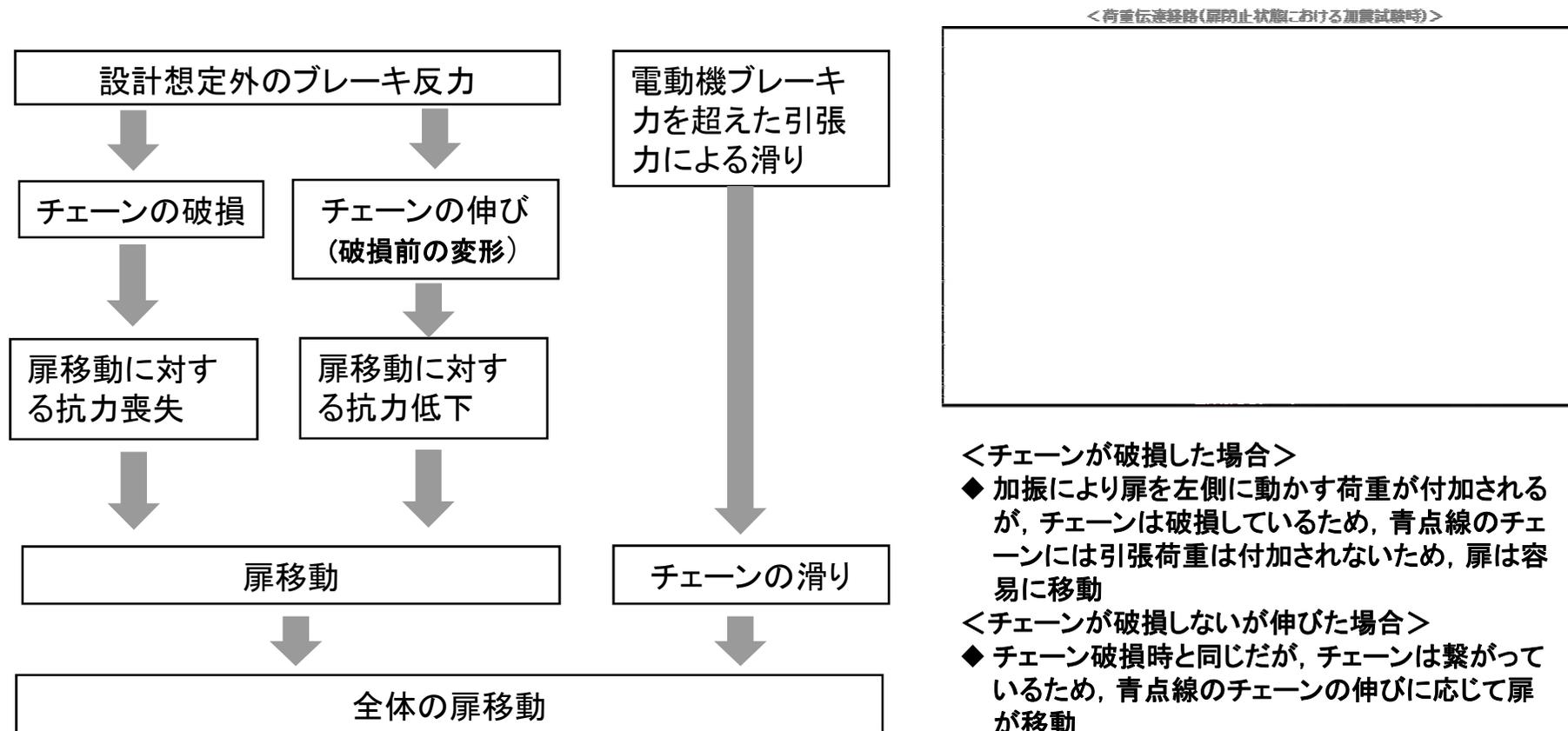
(2)－② 扉移動後の再閉止不可に係る原因分析(2/2)



<扉移動の推定メカニズム>

◆扉閉止時に扉が移動したメカニズムは以下の3つが重畳したものと推定

- ①電動機ブレーキ力を上回るチェーン引張力が作用したことによりチェーンが破損し、扉が開方向に移動
- ②チェーンに降伏荷重を超える荷重が付加されたことによりチェーンが伸び、扉が開方向に移動
- ③電動機ブレーキ力を上回るチェーン引張力が作用したことによるチェーンの滑りにより扉が移動



<チェーンが破損した場合>

◆加振により扉を左側に動かす荷重が付加されるが、チェーンは破損しているため、青点線のチェーンには引張荷重は付加されないため、扉は容易に移動

<チェーンが破損しないが伸びた場合>

◆チェーン破損時と同じだが、チェーンは繋がっているため、青点線のチェーンの伸びに応じて扉が移動

5. 対策案について(1/9)



◆チェーン破損／扉移動の対策としては、「慣性力による荷重に耐える対策」「チェーン部の荷重低減」「慣性力による荷重(変位)を低減」の観点から選定(以下のハッチング部分を選定)

	No.	対策案	実現性	切断防止	扉移動防止	基本構造変更	気密性影響	評価概要	総合評価	
チェーン破損対策／扉移動対策	慣性力による荷重に耐える対策	1	チェーン材質変更(高強度、耐候性有)	○	○	×	なし	なし	・引張試験結果によれば強度は増加するが、逆に伸び量は低下する	○
		2	現行チェーンの全溶接化	○	×	×	なし	なし	・引張試験結果によれば、全溶接タイプのチェーンは標準チェーンより破損までの変位は大きい、大幅な強度の向上は困難	×
		3	チェーンの構造変更(二列化、大型チェーン化) (二列化、チェーン大型化に伴う電動機、スプロケット構造強化も含む)	△	○	△	有	なし	・基本構造変更、扉上部の大幅な荷重増加が見込まれ、耐震上好ましくない	×
		4	動力伝達機構の変更(ワイヤーの採用) (ワイヤーの採用に伴う電動機、スプロケット構造強化も含む)	△	○	×	有	なし	・開閉のために巻き取り装置が2個必要であり、扉上部の大幅な荷重増加が見込まれ、耐震上好ましくない。また、ワイヤーのため伸びがチェーンより大きい。	×
		5	動力伝達機構の変更(平歯車等への変更) (平歯車作用に伴う電動機、スプロケット構造強化も含む)	×	○	△	有	なし	・上下動による歯車破損の可能性があり採用困難	×
		6	エンドボルトとチェーンの接続方法の変更(オフセットリンク構造の取り止め)	○	○	×	なし	なし	・チェーンの構造変化部の排除	○
	チェーン部の荷重低減	7	短尺部*チェーンの荷重低減 (可能な範囲でチェーン1個当たりの伸び低減)	○	○	×	なし	なし	・チェーン伸びのため、移動防止はできないが、チェーンガイドも含めて可能な範囲で延長することによりチェーン1個当たりの伸びを低減可能	○
		8	エンドボルト部への緩衝材の設置 (ばね等の設置により短尺部のチェーンの拘束を緩和)	△	○	×	なし	なし	・緩衝材(ばね、ダンパ等)の選定、確証が困難。ダンパやばねで地震慣性力を受けるためには、扉上部の大幅な荷重増加が見込まれ、耐震上好ましくない	×
	慣性力による荷重(変位)を低減	9	門設置 (エアシリンダ、油圧による駆動、手動抜き取り機能も付加)	○	○	○	有	なし	・閉止装置に取り付ける場合、空気系の方が複雑な系統・機器構成となるため、信頼性や保守性の観点からは電動が有利と判断	×
		10	門設置 (電動機による駆動、手動抜き取り機能も付加)	○	○	○	有	なし	手動のみ、空気作動に比べて駆動系の信頼性が高い	○
		11	門設置(動力なし、手動抜き取り)	○	○	○	有	なし	・手動のみの場合、基準要求の“容易かつ確実に閉操作できること”に合致しない	×

※ 扉が全閉時又は全開時において、電動機からチェーン端部までの距離が短い側(加振試験時にチェーンの破損又は著しい伸びが確認された範囲)

○対策として有効

△抑制はできるが完全な対策でない

×対策として効果が期待できない

◆コメント④「確認された不具合について分析を十分に行い、広い視点から今回説明した対策に限定せず、最善の対策を検討すること。」に対応

5. 対策案について(2/9)

【基本的な考え方】

- ◆ 基準要求から必須であるチェーン破損を防ぐ確実な対策として、①チェーンへの荷重対策、②チェーンの変位対策、③チェーン等の強度増加、④チェーン1個当たりの伸び対策を組み合わせる対策を実施する。
- ◆ チェーン破損対策の実施に合わせて、設計目標とした扉閉状態の維持が達成できるよう扉の動きを拘束する対策を実施する。

基準要求から必要な対策	No	具体的な対策
◆ 容易かつ確実な閉止操作（一時的な開放含む）のためチェーンが破損しない対策が必要	①	門を設置
	②	チェーン材質を変更, スプロケットの支持方法を変更(強化)
	③	チェーンのリンク数を増加
	④	エンドボルトとチェーンの接続方法の変更(オフセットリンク構造の取止め)

設計目標(基準要求以外)

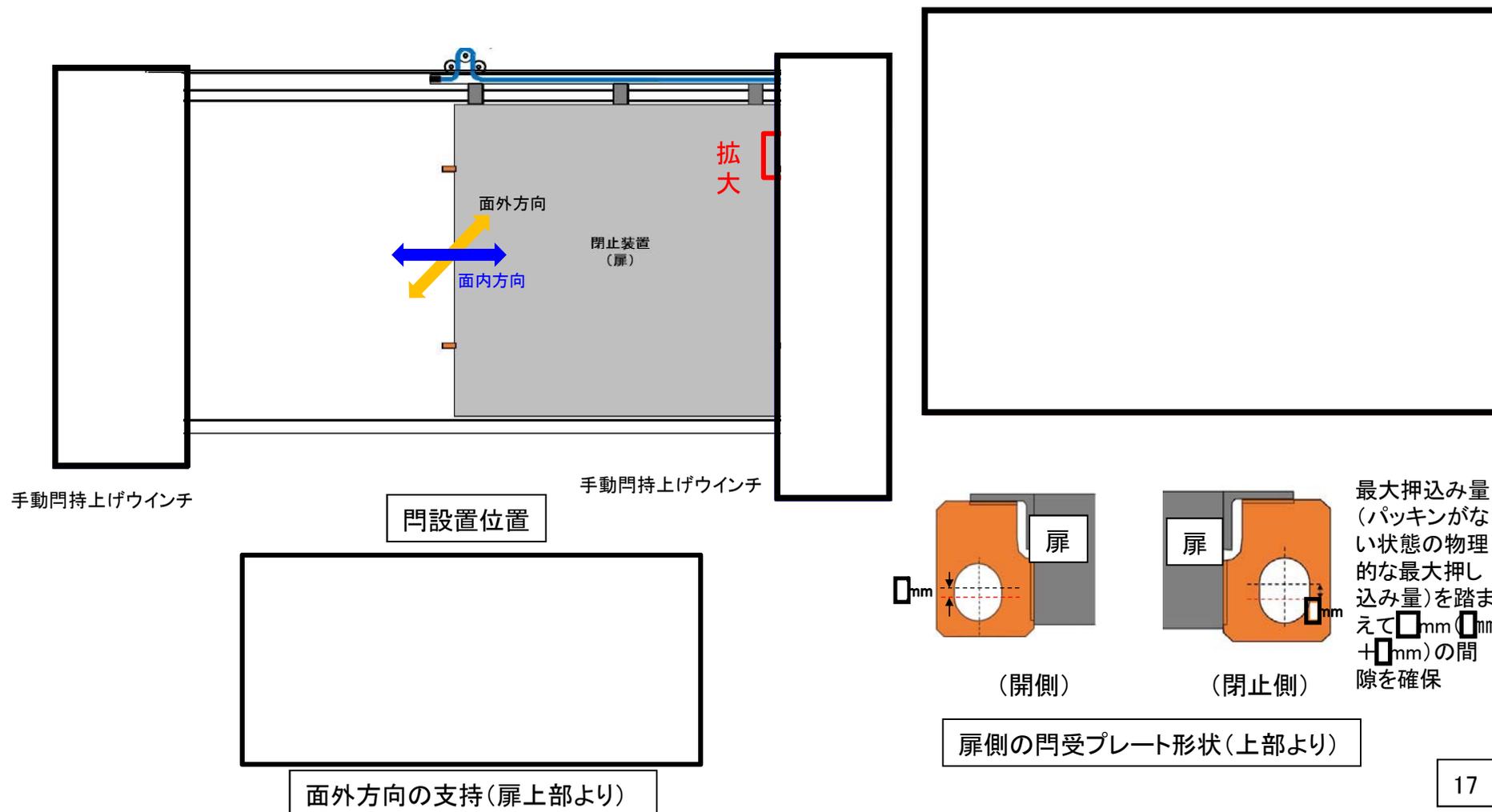
◆ 扉が閉状態時に移動(開放)しない対策が必要

チェーン破損対策①により本対策を実施

5. 対策案について(3/9)

【門構造について】

- ◆ 扉開状態でのチェーン破損防止, 閉状態でのチェーン破損防止及び閉状態の維持のため, 扉の両側に門を設置
- ◆ 門は面内方向の荷重のみ支持し, 面外方向の荷重は当初設計どおりテーパブロック及びプッシュローラで支持
- ◆ 門と門受の面内方向の間隙(ギャップ)は \square mmとし, 扉が開かず気密性が維持できるように設計
- ◆ 門と門受の面外方向の荷重はテーパブロック及びプッシュローラで支持されるため, 門と門穴の間隙(ギャップ)は広く設計し, 扉の移動を拘束しない設計



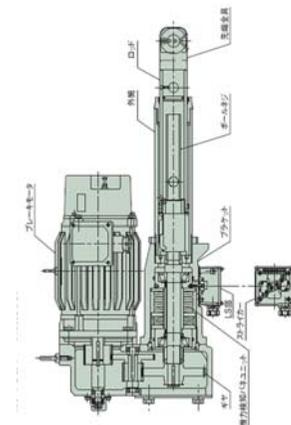
5. 対策案について(4/9)

【門構造について(つづき)】

- ◆ 門用電動機及び電動駆動シリンダは、門とは物理的に接続せず、扉が開状態又は閉状態での門からの荷重は受けない設計とすることで、地震時に門からのシリンダ駆動系への衝撃を受けない構造
- ◆ 門部のかじりを防止するため、ピンについては強度が高く、表面に焼き入れ処理を実施した鋼材を使用し、プレート側にはピンよりも柔らかいステンレスを採用。
- ◆ 門は屋外で使用するため、電動機等は屋外仕様とし、門重量(約 kgf)に対して、十分な能力を有する揚重能力(約306kgf)のものを採用する。



電動駆動シリンダ部



電動駆動シリンダ仕様
ストローク: 300mm (30秒)

【門部の異物混入対策について(案)】

- ◆ ブローアウトパネル閉止装置は原子炉建屋原子炉棟の5階面、6階面の高所に設置され、砂等の異物が混入する可能性は非常に小さく、また、門と門受けの間隙は片側 mmと間隙としては大きく、砂等の異物が隙間に入り閉塞させる可能性は小さい。気象庁黄砂の関する資料によれば、通常浮遊するものは直径50 μ m以下程度である。

5. 対策案について(5/9)

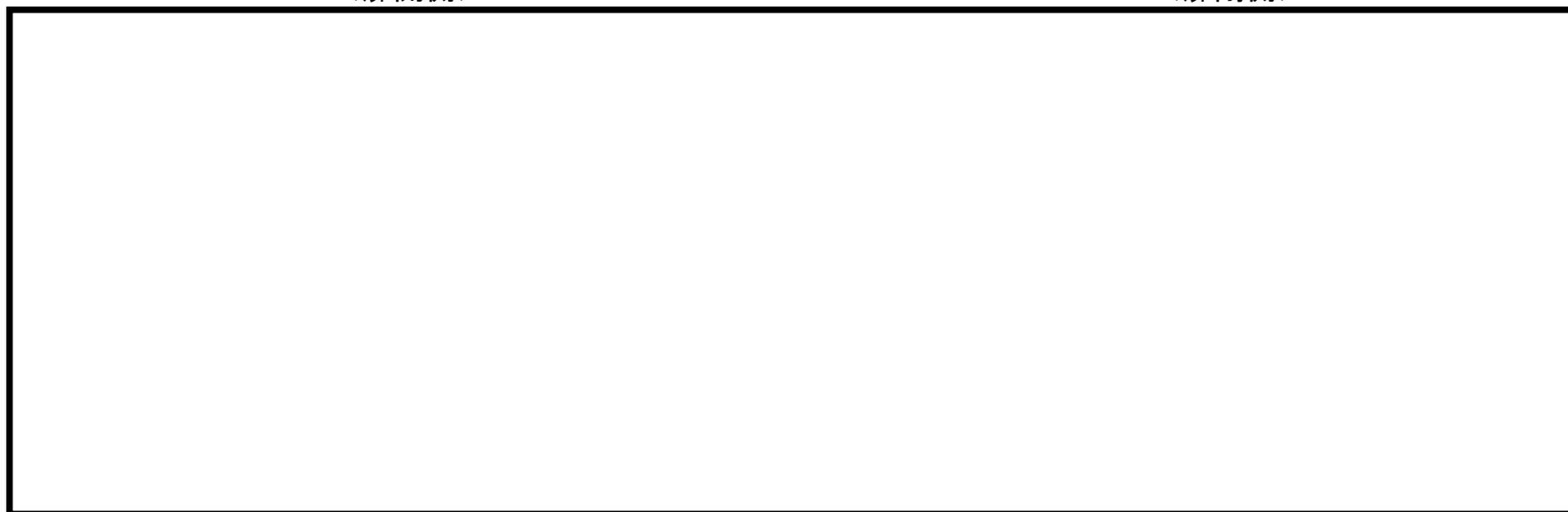


【門の動作原理について】

- ◆ 門を外す際には電動駆動シリンダにより門を持ち上げ、門挿入時には電動駆動シリンダを下げることにより、門の自重により扉及びフレーム側の門受に挿入される設計
- ◆ 手動操作時は、ウインチにて門を引き抜き、挿入時にはワイヤーを緩めることにより、門の自重により扉及びフレーム側の門受に挿入される設計

<扉開側>

<扉閉側>



扉全開から全閉への動作フロー(案)

5. 対策案について(6/9)



【門の構造強度について】

- ◆ 門は、想定する材質、寸法で門が受ける面内の荷重(面外の荷重はテーパーブッシュにて受ける)が許容値に対して十分な強度(弾性範囲内)を有することを確認した。

<設計条件>

扉本体: 2500kg

加速度: 9.6G(閉止状態での1.0Ss実測値) 裕度: 2

荷重: $W = \text{約 } \square \text{ kN}$

せん断力: $F = \text{約 } \square \text{ kN}$

モーメント: $M = \text{約 } \square \text{ N}\cdot\text{mm}$

ピンの数: 2個

D(ピンの直径): $\square \text{ mm}$

A(ピンの断面積): $A = \text{約 } \square \text{ mm}^2$

Z(ピンの断面係数): $Z = \text{約 } \square \text{ mm}^3$

(1)ピンに生じるせん断応力: $\tau 1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

$\tau 1 = \text{約 } \square$

(2)ピンに生じる曲げ応力: $\sigma 1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

$\sigma 1 = \text{約 } \square$

(3)ピンに生じる組合せ応力: $\sigma 2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

$\sigma 2 = \text{約 } \square$

(4)許容応力

ピン材質: S45C $S_y = 345 \text{ N/mm}^2$ (曲げ応力、組合せ応力) $S_y / \sqrt{3} = 199 \text{ N/mm}^2$ (せん断応力)

(5)結果

曲げ応力: $\text{約 } \square \text{ N/mm}^2$ は、許容曲げ応力: 345 N/mm^2 を下回る。

せん断応力: $\text{約 } \square \text{ N/mm}^2$ は、許容せん断応力: 199 N/mm^2 を下回る。

組合せ応力: $\text{約 } \square \text{ N/mm}^2$ は、許容組合せ応力: 345 N/mm^2 を下回る。



門構造図

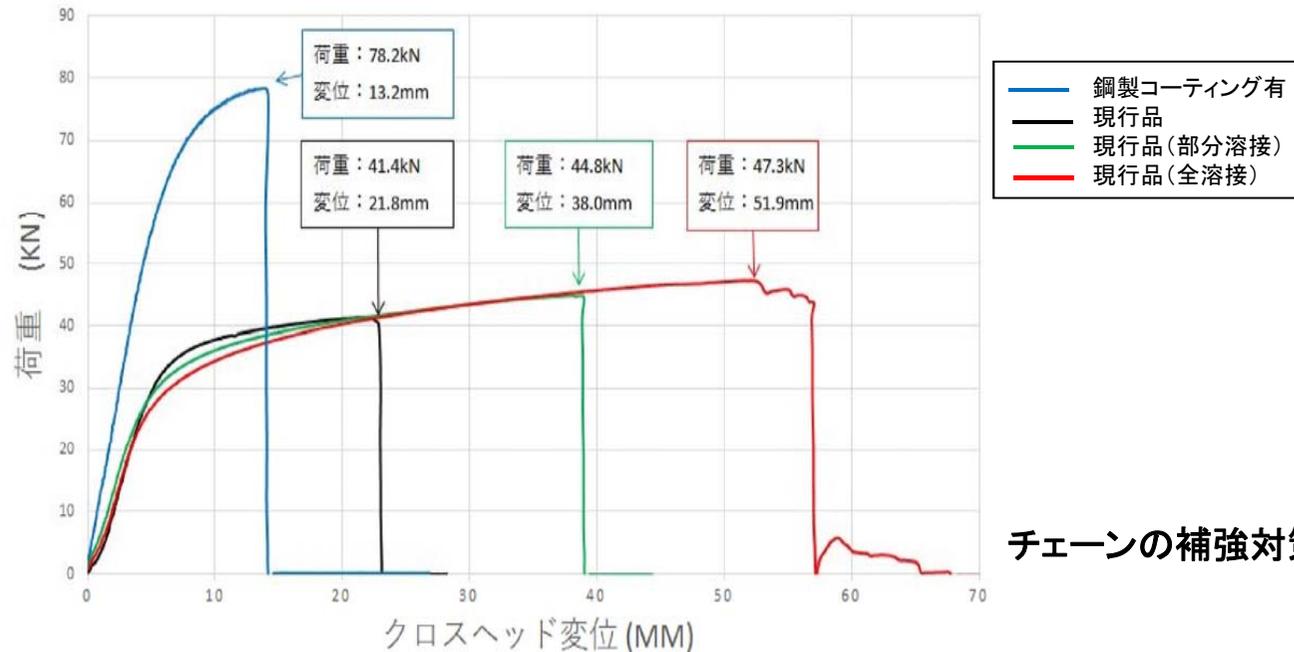
- ◆ コメント⑦「門についてどの程度の加振に耐えられるか、開機能に悪影響を与えないかを説明すること。」に対応

5. 対策案について(7/9)



【チェーン材質の変更について】

- ◆ チェーン破損防止のため、円構造を採用することにより、チェーンを含む扉の駆動系が、過大な加振荷重や変位を受けない設計とするが、電動機ブレーキ反力に関する知見を踏まえて、チェーンを高強度で耐候性を有する材質に変更する。候補とするチェーンの引張試験結果と評価を下表に示す。
- ◆ 材料強度を上げたチェーンについて、引張試験を実施し、破断荷重は現行品の約1.8倍の約78kNであり、電動機ブレーキ荷重の最大反力66kNが発生しても破損しないこと、また、チェーンは概ね弾性域であることを確認した。



チェーンの補強対策の荷重-変位線図

種類	実測した引張強さ[kN] (カタログ値)	備考	総合評価
①SUS製 	41.4 (—)	・チェーン破損に至る	△
②鋼製 	— (71.6)	・耐候性上の課題有	×
③鋼製コーティング 	78.2 (71.6)	・コーティングにより耐候性上問題なし	○
④熱処理 	— (95.1)*	・耐候性上の課題有	△

* 平均引張強さ(最小値の記載なし)

5. 対策案について(8/9)

【チェーン材質変更に伴う弱部の対策について】

- ◆ チェーン材質変更に伴う荷重伝達経路の他部位への影響について評価した。その結果、スプロケット軸の裕度が低いことから、スプロケット軸についても構造を変更
- ◆ チェーン破損原因を踏まえて、設計上は電動機ブレーキの2倍(約66kN)の張力が付加されても各部位に1以上の裕度があることを確認

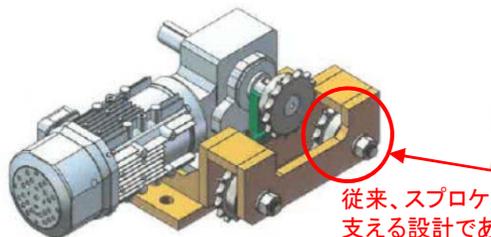
＜荷重伝達経路を構成する部品の強度評価＞

各部の破損に対する裕度の簡易評価結果※1



対策前			
No.	部品名		裕度※2
1	ボルト1		
2	ハンガー	ブラケット1	
3	ローラ	リンク	
4		ブラケット2	
5	ボルト2		
6	ホルダ		
7	ボルト3		
8	チェーンガイド		
9	エンドボルト		
10	チェーン※3		
11	スプロケット 軸		
12	モーターベース		
13	ボルト4		
14	ハンガーレール		

対策後			
No.	部品名		裕度※2
1	ボルト1		
2	ハンガー	ブラケット1	
3	ローラ	リンク	
4		ブラケット2	
5	ボルト2		
6	ホルダ		
7	ボルト3		
8	チェーンガイド		
9	エンドボルト		
10	チェーン(対策品)※3		
11	スプロケット 軸(対策品)		
12	モーターベース		
13	ボルト4		
14	ハンガーレール		
15	かんぬき(新規)		



従来、スプロケットの軸は、1か所で支える設計であったが、ベースを改良することにより2か所で荷重を支持

スプロケット改良予定図

※1 門以外の各部については、要因分析のために簡易的に電動機ブレーキ力の約2倍の荷重(60kN)がかかったと推定して評価した裕度。

※2 裕度 = $S_u / \text{発生荷重}$

※3 チェーンについては、発生荷重と最少引張強さ(カタログ値)の比較で評価

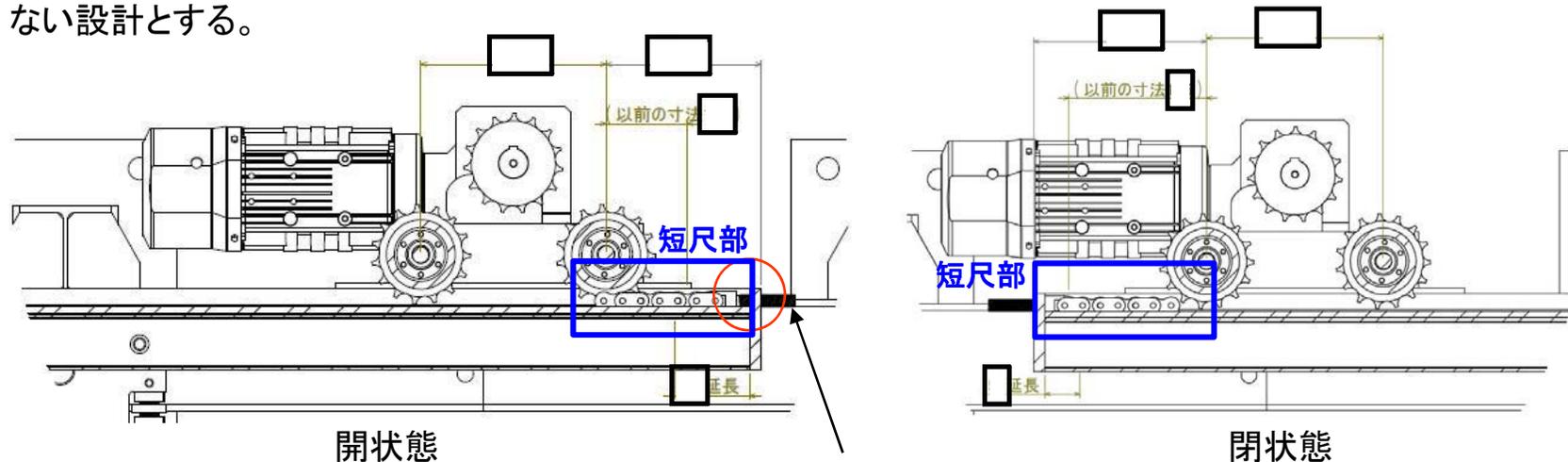
※4 門については、加振試験時の扉の最大加速度(9.6G)の2倍の荷重で評価した値

- ◆ コメント⑥「チェーンの強度向上による他部位への影響を耐震、強度の観点も含めて説明すること。」に対応

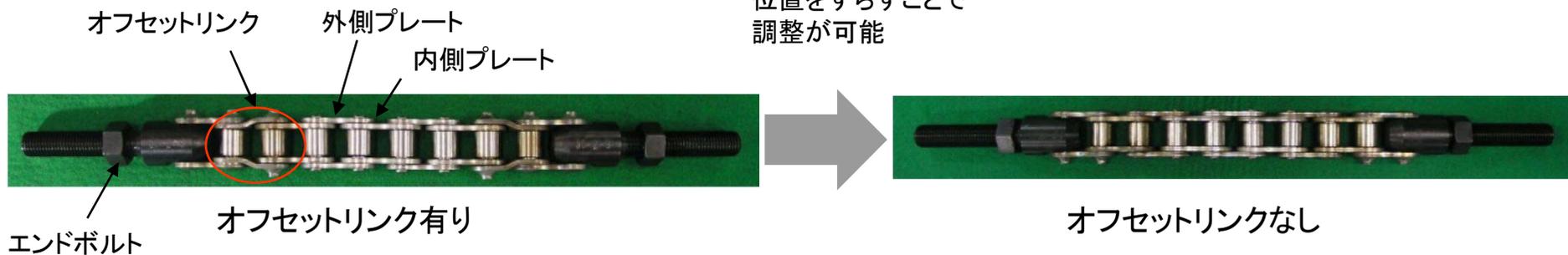
5. 対策案について(9/9)

【短尺部のチェーンの荷重低減／エンドボルトとチェーンの接続方法の変更について】

- ◆ チェーンに破損が発生する短尺部のチェーンの荷重低減策として、短尺部を長尺化し、チェーン1個あたりの伸び量を低減することで、地震荷重を緩和する効果を期待できるため、加振試験体形状の制限を踏まえて、短尺部について、開状態で約□mm(4リンク分)、閉状態で約□mm(2リンク分)を延長する。
- ◆ 併せて、現設計では、チェーン端部とエンドボルトの接続ためオフセットリンク※が使用されているが、構造変化部となるため、エンドボルトのガイドレールへの固定位置を調整しチェーン長さを調整することでオフセットリンクを使用しない設計とする。



エンドボルトの固定位置をずらすことで調整が可能



※オフセットリンクを使用する目的:エンドボルトと外側チェーンを接続する仕様となっているが、チェーンの長さによっては、内側プレートがエンドボルトの位置に来る場合がある。その際に、オフセットリンク(内→外の変換リンク)を使用し、外側プレートがエンドボルトの位置に来るよう調整する。

6. 対策案の妥当性確認について



【実施対策の確認】

- ◆ 実施対策の妥当性を確認するため、今月、下旬にE-ディフェンスにて実機大の加振試験を実施

扉初期状態	加振レベル	確認内容とその順序(案)	備考
開・閉状態	—	・固有値確認	
開状態 (門挿入)	1.0Ss加振	<ul style="list-style-type: none"> ・1.0Ss加振 ・加振後の門動作確認(扉閉操作前の門の抜き取り) ・加振後の扉の閉動作確認 ・扉閉後の門動作確認(閉じた扉への門の挿入) ・加振後の気密性能確認 <ul style="list-style-type: none"> ・門の手動抜き取り操作及び挿入操作 	
閉状態 (門挿入)	1.0Ss加振	<ul style="list-style-type: none"> ・1.0Ss加振 ・加振後の気密性能確認 ・加振後の門動作確認(閉扉からの門の抜き操作) ・加振後の扉の開動作確認 ・扉開放後の門動作確認(扉開後の門の挿入操作) <ul style="list-style-type: none"> ・門の手動抜き取り操作及び挿入操作 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐震裕度を確認するため、基準地震動Ss加振波を用いる

- ◆ コメント③「対策を実施する場合、先日のEディフェンスでの試験条件への影響について評価すること。」に対応

7. 第591回審査会合(6月26日)コメント回答(1/2)



<コメント>

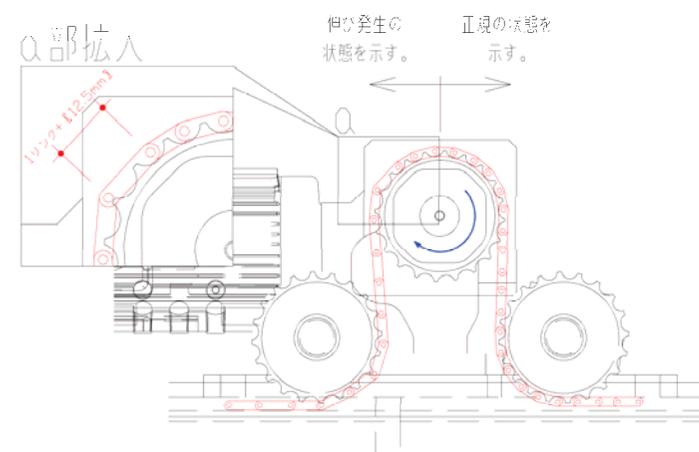
- ⑬一部を強化すると別の箇所に問題が発生する可能性がある。総合的に確実な対策を検討すること。
- ⑧工事計画書の耐震計算書においては、扉の面外方向のランダム波に対する固有振動数16Hzを考慮した耐震計算を行うこと。
- ⑨チェーンの変形量に対する許容値を明確にすること。

<回答>

- ⑬今回の事象に対する対策は以下のとおり。なお、確実な対策であることを確認するため、Eディフェンスにて実機大モデルにて再加振試験を実施し、各部の構造強度、機能を確認する。
 - ・扉の動きを抑制することにより物理的にチェーンに過大な荷重や変位が付加されず、扉の閉状態を維持できる門構造の採用
 - ・チェーン材質変更によるチェーン強度の向上とチェーン材質変更にともない弱部となるスプロケットの支持構造変更
 - ・チェーン破損や著しい伸びが確認された短尺部のチェーンの負荷低減等(リンク数追加, チェーンとエンドボルト接続部の設計変更(オフセットリンク構造の変更))

- ⑧今回の不具合に対する対策として、扉が開状態、閉状態においては、門構造を採用するため、固有振動数が変化することも考えられるため、再度、固有振動数を測定し、測定結果を踏まえた耐震計算を実施する。

- ⑨チェーンが1リンクあたり12.5mm伸びた場合、チェーンと歯車が噛み合わなくなり、チェーンが外れる可能性が発生する。



7. 第591回審査会合(6月26日)コメント回答(2/2)

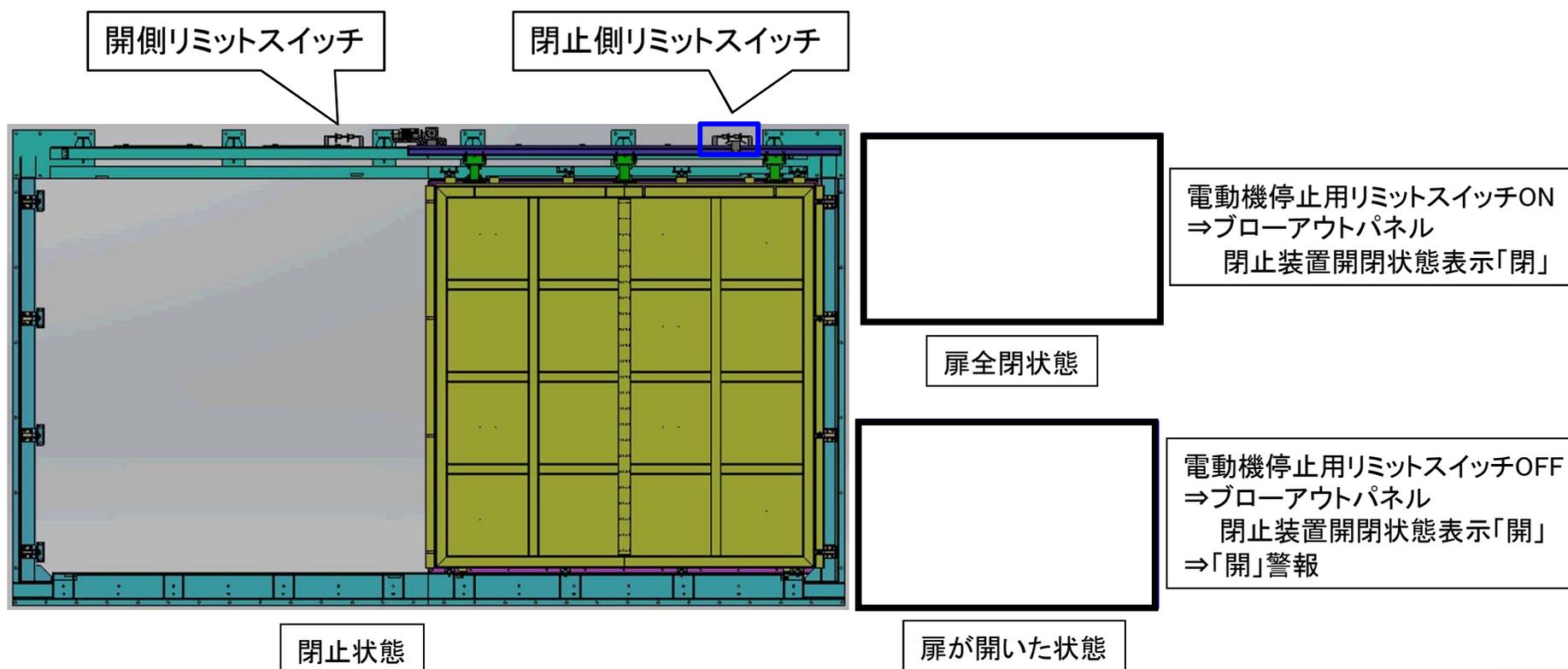
<コメント>

②閉止状態で開いたときの閉止対策(警報, 自動閉止)について検討すること。

<回答>

◆今回, 門構造を採用することにより, 扉が閉止状態で地震が発生した場合でも, 開放しない設計とする。

このため, 自動閉止機能は不要だが, 警報については当初から設置予定



<参考-1> ブローアウトパネル閉止装置の一時的な開放を仮定した被ばく評価結果



- ◆ ブローアウトパネル閉止装置が閉状態で一時的な扉の開放を仮定し、中央制御室員の被ばく影響を評価した。
- ◆ 以下の評価条件に示すとおり、技術的能力1.16に定める閉止時間17分を基に、更に20分の開放を仮定しても、居住性評価の対象ケースの評価結果に包絡され、被ばく評価上問題ないことを確認

【評価条件】

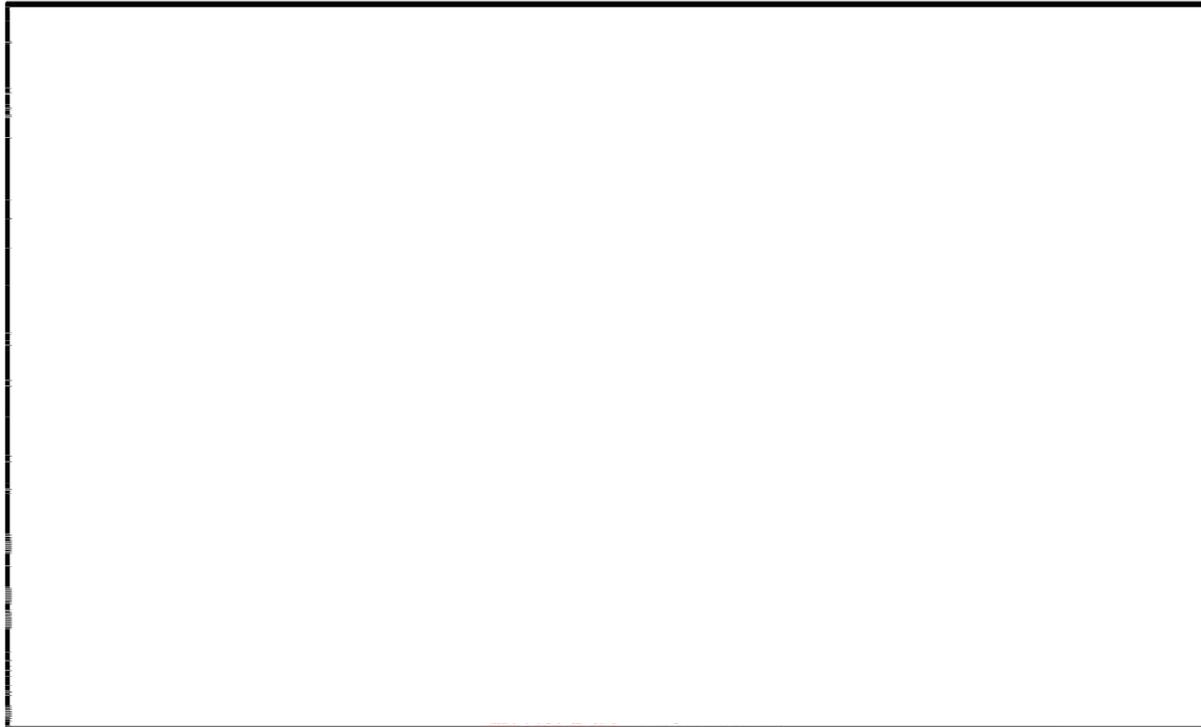
項目	評価条件	設定の考え方
起因事象	過渡事象	ブローアウトパネルが開放し、閉止装置に期待するシーケンスとして、主蒸気管破断を含む起因事象を仮定
開放時間	20分	技術的能力1.16に定める閉止時間17分を基に保守的に設定 SGTSの起動時間を事故後2時間20分(2時間+開放時間20分)として評価
その他	居住性評価 ベースケース準拠	ベースケース(大破断LOCA, 格納容器ベント)と同様の条件 ・当直運転員交代の考慮 ・マスク着用(事故後3時間及び入退域時)の考慮

【評価結果】

ケース	閉止装置の開放なし (2時間後からSGTSに期待)	閉止装置の開放あり (2時間20分後からSGTSに期待)	【参考】居住性評価の対象ケース (大破断LOCA, 格納容器ベント)
被ばく量 (最大となる班)	約28mSv	約31mSv	約60mSv
20分開放による 増分	約3mSv		

・20分の開放を仮定しているが、実態の閉止操作は速やかに実施するため、開放の影響は更に軽減される

<荷重伝達経路(扉閉止状態における加震試験時)>



- ◆ 加振により扉を更に右側に動かす荷重が付加されても、扉は物理的に移動しないためチェーンに過度な引張荷重は付加されない。
- ◆ 加振により扉を左側に動かす荷重が付加される場合、チェーン(上図の青点線内)には、引張荷重は付加されない。



扉閉状態で扉を開放する側のチェーンは破損しない

※: 同じメカニズムで扉開状態では、扉を閉にする側のチェーンは破損しない