

柏崎刈羽原子力発電所 7 号機
機器・配管系の耐震安全性評価について

(指摘事項に関する回答)

平成 20 年 12 月 25 日

東京電力株式会社

コメント内容

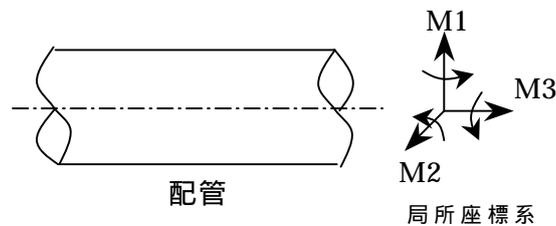
配管の評価において、ねじりのみを評価した値を確認したい。

(平成 20 年 12 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 25 回))

回答

1. ねじり応力値

ねじり応力は、計算機コードによるスペクトルモーダル解析法により算出される各方向のモーメント (M_1 、 M_2 、 M_3) のうち、配管の軸方向に対するモーメント (M_3) を用いて算出される。



第 1 図 配管に作用する各方向のモーメント

今回の耐震安全性評価で報告した主蒸気系配管および残留熱除去系配管における、ねじりモーメントのみによる応力値を以下に示す。

第 1 表 主蒸気系配管および残留熱除去系配管のねじり応力値

評価対象設備	評価部位	発生値 (MPa)
主蒸気系配管 (第 2 図参照)	分岐管	55
	主管	8
残留熱除去系配管 (第 3 図参照)	主管	83

2. 配管の応力評価におけるねじり応力の扱い

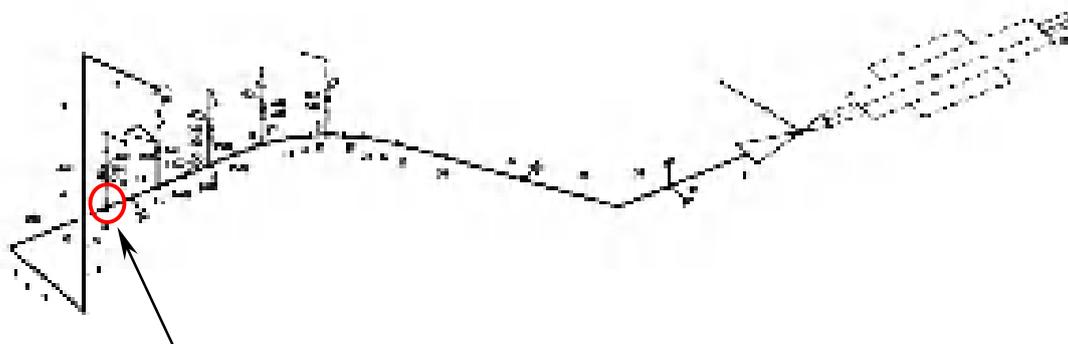
JEAG4601 では、第 1 種管（クラス 1 配管）の一次応力を算定する際に、ねじり応力のみによる制限を設け、それを超える場合には、第 2 表に示すとおり全体の許容応力を見直すこととしている。（制限値の詳細は 3 項参照）

次頁以降に、主蒸気系配管および残留熱除去系配管における、ねじり応力の評価結果を示す。いずれも、ねじり応力は制限値以下であるため、今回は全体の許容値の見直しは行っていない。

第 2 表 第 1 種管（クラス 1 配管）の許容応力

許容応力状態	一次一般膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)
A_S	$1.5S_m$	$2.25S_m$ ただし、ねじりによる応力が $0.55S_m$ を超える場合には、曲げとねじりによる応力について $1.8S_m$ とする。
A_S	$2S_m$	$3S_m$ ただし、ねじりによる応力が $0.73S_m$ を超える場合には、曲げとねじりによる応力について $2.4S_m$ とする。

評価対象設備	発生値 (MPa)	制限値 (MPa)
主蒸気系配管	63	91



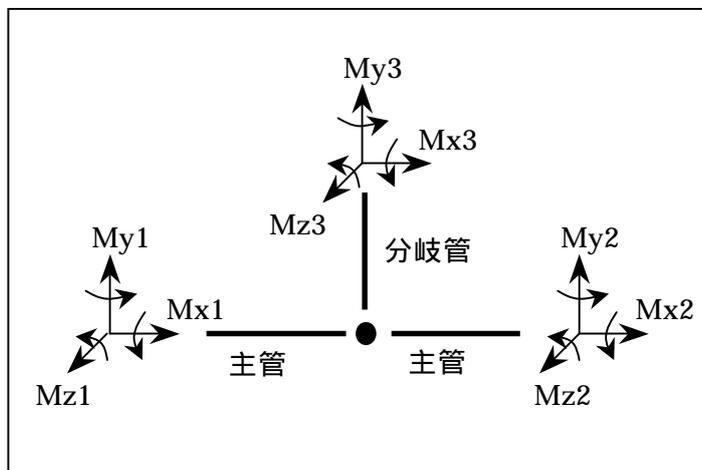
ねじり応力最大評価点

(全体の最大応力発生点と同じ)

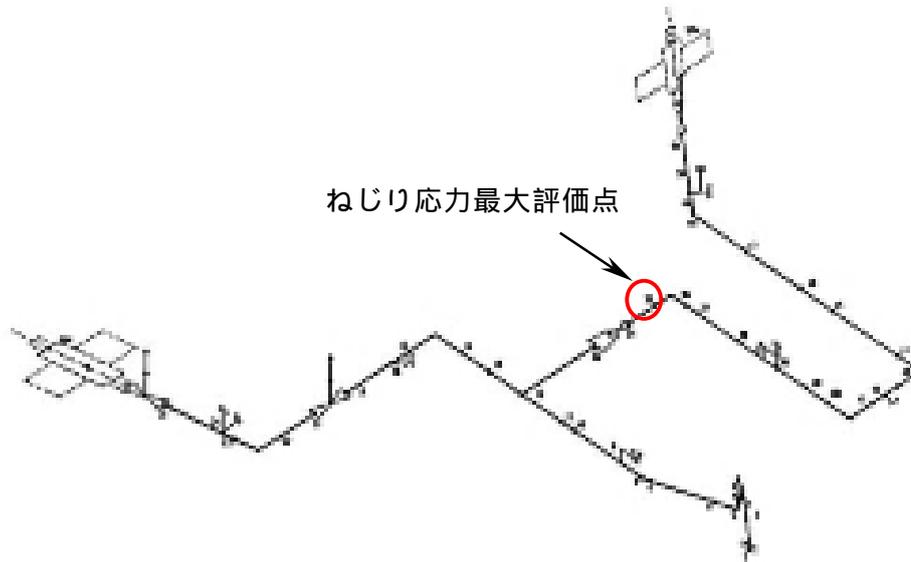
第 2 図 配管評価モデル (主蒸気系)

<参考 1>

上記ティール部におけるねじり応力の算出方法は以下のとおりである。主管と分岐管では、後者の方が配管径は小さいことから、評価は分岐管で代表して行っている。右図に示す分岐管のねじり応力は My_3 を用いて算出されるが、保守的に主管側の Mx_1 または Mx_2 (分岐管側とのモーメントの釣り合いを考慮し決定する) を用いたねじり応力を算出し、これらのねじり応力を組み合わせて分岐部の評価用ねじり応力としている。

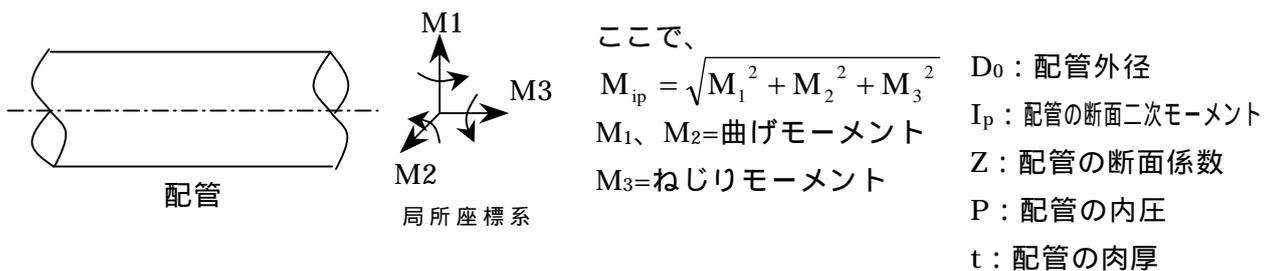


評価対象設備	発生値 (MPa)	制限値 (MPa)
残留熱除去系配管	83	89



第3図 配管評価モデル (残留熱除去系)

<参考2> 配管応力評価とねじりについて (発電用原子力設備規格設計 建設・規格 解説 PPB-3520 を引用)



配管の評価部位の座標系を上図のとおり定義し、上記の通りに記号を定義した場合、モーメントによって生じる応力は下記の通りとなる。

(1) 軸方向の応力 $S_1 = \frac{1}{2} \frac{PD_0}{2t} + \frac{M_1}{Z}$

(2) 円周方向の応力 $S_c = \frac{PD_0}{2t}$

(3) ねじり応力
$$S_t = \frac{D_0}{2I_p} M_3 = \frac{M_3}{2Z}$$

これより、応力強さ S を次の通り求めることができる。

$$S = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{1}{2}(S_1 + S_C) + \frac{1}{2}\sqrt{(S_1 - S_C)^2 + 4S_t^2} = \frac{1}{2} \frac{PD_0}{2t} + \frac{M_{ip}}{Z} \dots (a)$$

$$S = \sigma_1 - \sigma_2 = \sqrt{(S_1 - S_C)^2 + 4S_t^2} = \frac{1}{2} \frac{PD_0}{2t} + \frac{M_{ip}}{Z} \dots (b)$$

ここで、 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ は、主応力を示す。

この式 (a) および式 (b) は、配管の一次応力を算出する式 (設計・建設規格 PPB-3520 で規定されている) である下記式に対応している。

$$S_{prm} = \frac{B_1 PD_0}{2t} + \frac{B_2 M_{ip}}{Z_i}$$

S_{prm} : 一次応力

B_1, B_2 : 応力係数

B_1 : 0.5

B_2 : 1.0

D_0 : 配管外径

Z_i : 配管の断面係数

P : 配管の内圧

t : 配管の肉厚

3. 制限値について

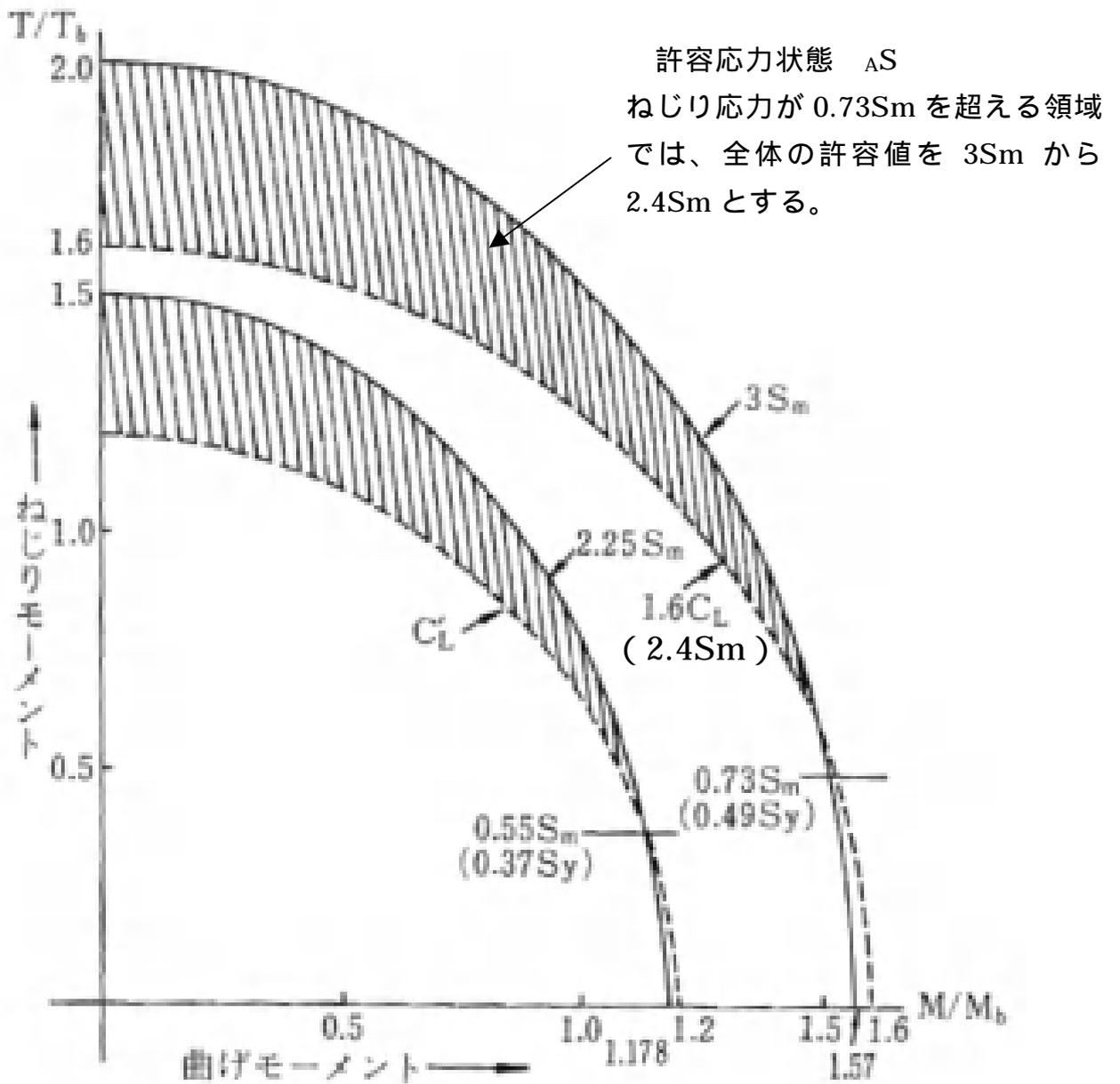
ねじり応力はせん断応力に分類され、全体の応力に対してせん断応力の寄与が大きくなると、引張応力に対しての剛性が低下する現象が見られる。そのため、JEAG4601では、第1種管（クラス1配管）の一次応力を算定する際に、ねじり応力のみによる制限を設け、それを超える場合には全体の許容応力を見直すこととしている。

具体的には、許容応力状態 A_S の許容応力は $3S_m$ であるが、ねじりによる応力が $0.73S_m$ を超える場合は、曲げとねじりによる応力について許容応力を $2.4S_m$ としている。その根拠は JEAG4601 には下記の通り記載されている。

材料の延性に期待した崩壊限界（ A_S に対しては設計降伏点 S_y の 1.6 倍）を定め、これと一次応力に対する許容限界との関係を第1図に示す。許容応力状態 A_S では、材料の延性に期待した崩壊限界 $1.6S_y$ と、地震時の一次応力に対する許容値 $3S_m$ との交点は、 $0.73S_m$ となる。したがって、ねじり応力が $0.73S_m$ を超える場合、曲げモーメントとねじりモーメントによる応力は $2.4S_m$ （ $1.6S_y$ を S_m 表示）を限界とする。（ S_y ：設計降伏点、 S_m ：設計応力強さ）

第3表 第1種管（クラス1配管）の許容応力（再掲）

許容応力状態	一次一般膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)
A_S	$1.5S_m$	$2.25S_m$ ただし、ねじりによる応力が $0.55S_m$ を超える場合には、曲げとねじりによる応力について $1.8S_m$ とする。
A_S	$2S_m$	$3S_m$ ただし、ねじりによる応力が $0.73S_m$ を超える場合には、曲げとねじりによる応力について $2.4S_m$ とする。



内圧 $P=0$ の場合 $C_L=1.2C_L$ $C_L=S_y$

$M_b = 4tr^2 S_y =$ 単純曲げの場合の限界曲げモーメント

$T_b = \pi tr^2 S_y =$ 単純ねじりの場合の限界ねじりモーメント

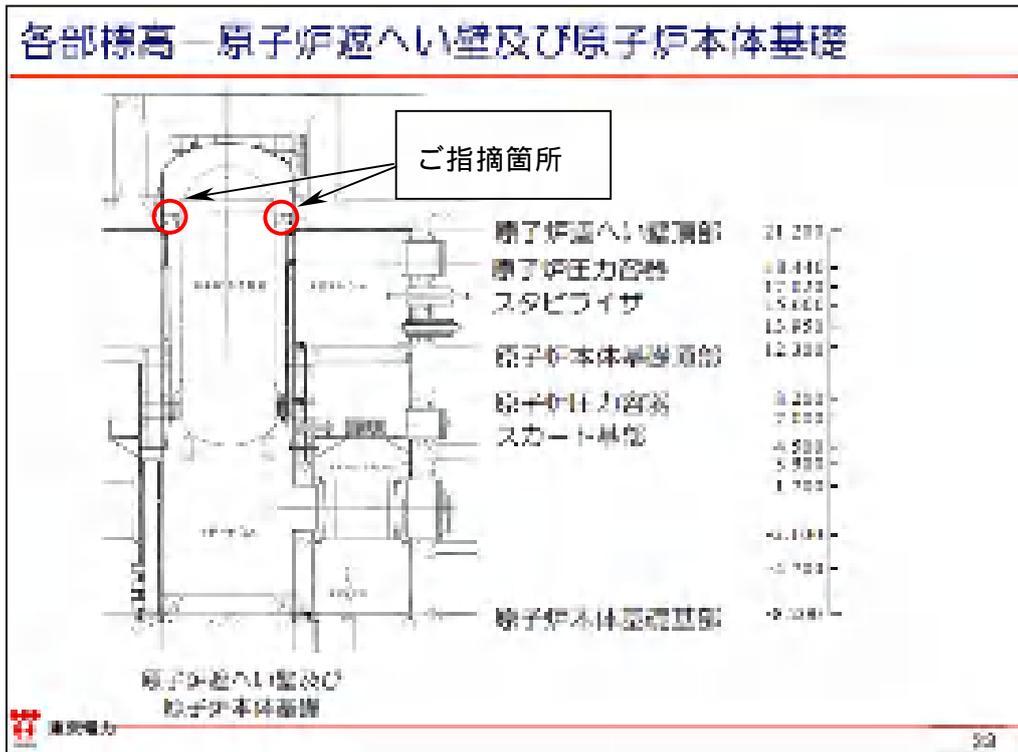
第4図 直管の崩壊限界荷重と地震時の許容限界との関係

(JEAG4601-1984 P.101 より引用)

コメント内容

原子炉格納容器ライナプレートの評価で、最大ひずみ発生点はどこか詳細に示すこと。

前回資料 P23 における原子炉压力容器上部付近の突起物(下図参照)は、解析モデルに含まれているのか。



(平成 20 年 12 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 25 回))

回答

1. 原子炉格納容器ライナの地震荷重について

原子炉格納容器ライナの荷重算定にあたっては、第 1 図に示す大型機器水平方向解析モデルを用いて、Ss 地震荷重に対する解析を行う。その地震応答解析から得られる荷重を用いて、原子炉格納容器の駆体構造解析を行う。その地震荷重の主なものは、以下の通りである。

(1)原子炉格納容器本体の地震応答荷重(せん断、モーメント等)

(2)ダイヤフラムフロアからの地震応答反力

(ダイヤフラムフロア反力の説明)

第 1 図の大型機器水平方向解析モデルは建屋 - 原子炉格納容器 - 原子炉遮へい壁 - 原子炉压力容器の相互作用を考慮したモデルになっている。すなわち、原子炉格納容器は原子炉建屋と一体となって揺れ、ダイヤフラムフロアを介して原子炉遮へい壁に荷重が伝達される。また、原子炉遮へい壁からは原子炉压力容器スタビライザを介して原子炉压力容器にも荷重が伝達される。さらに、原子炉压力容器と原子炉格納容器は、燃料交換ベローズを介して荷重が伝達される。なお、原子炉压力容器はスカート部で基礎ボルトにより原子炉本体基礎に取り付けられており、ここから原子炉本体基礎へも荷重が伝達される。

原子炉格納容器の解析にあたっては、原子炉遮へい壁から原子炉格納容器に作用する力として、ダイヤフラムフロアを模擬したばね要素の反力を原子炉格納容器駆体解析に用いている。

(参考)

ダイヤフラムフロアとは鉄筋コンクリート製原子炉格納容器をドライウェルとサプレッションチェンバに仕切る構造物である(第 1、3 図参照)。この構造物は、鉄筋コンクリートと鉄板から成る厚さ 1.2m のスラブであり、原子炉格納容器及び原子炉本体基礎で支持されている。

2. 最大ひずみ発生点について

1. で述べた地震荷重に加えて、圧力荷重などの地震以外の荷重も入力した

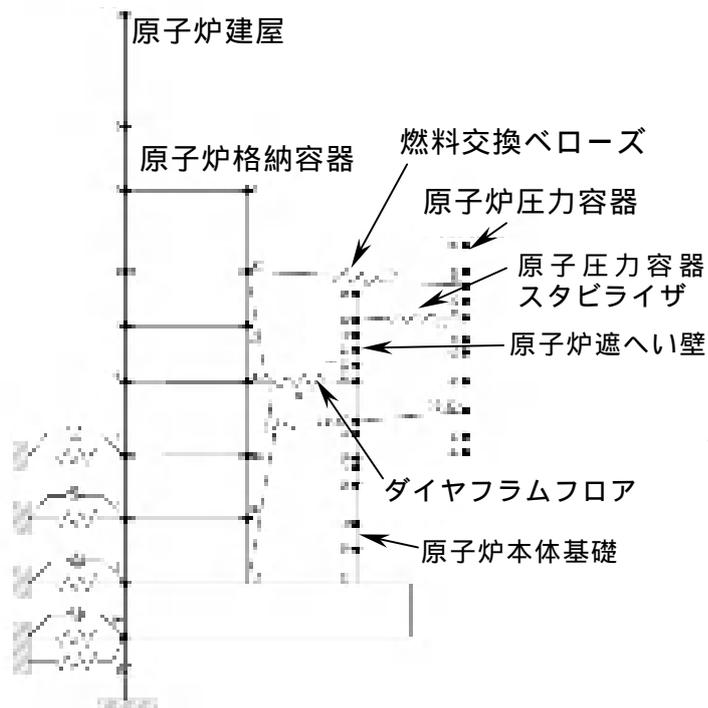
結果、得られたひずみの最大値は原子炉格納容器シェル部のダイヤフラムフロア直下の部分(第3図参照)であった。

(参考)

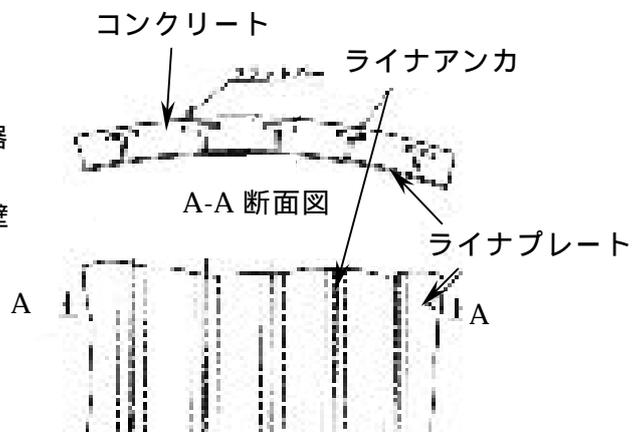
ライナプレートとは、例えば原子炉冷却材喪失事故などにより原子炉本体から放出される放射性物質等の有害な物質の漏えいを防止するためにコンクリート部に内張されている鋼板をいう(第2図参照)。

回 答

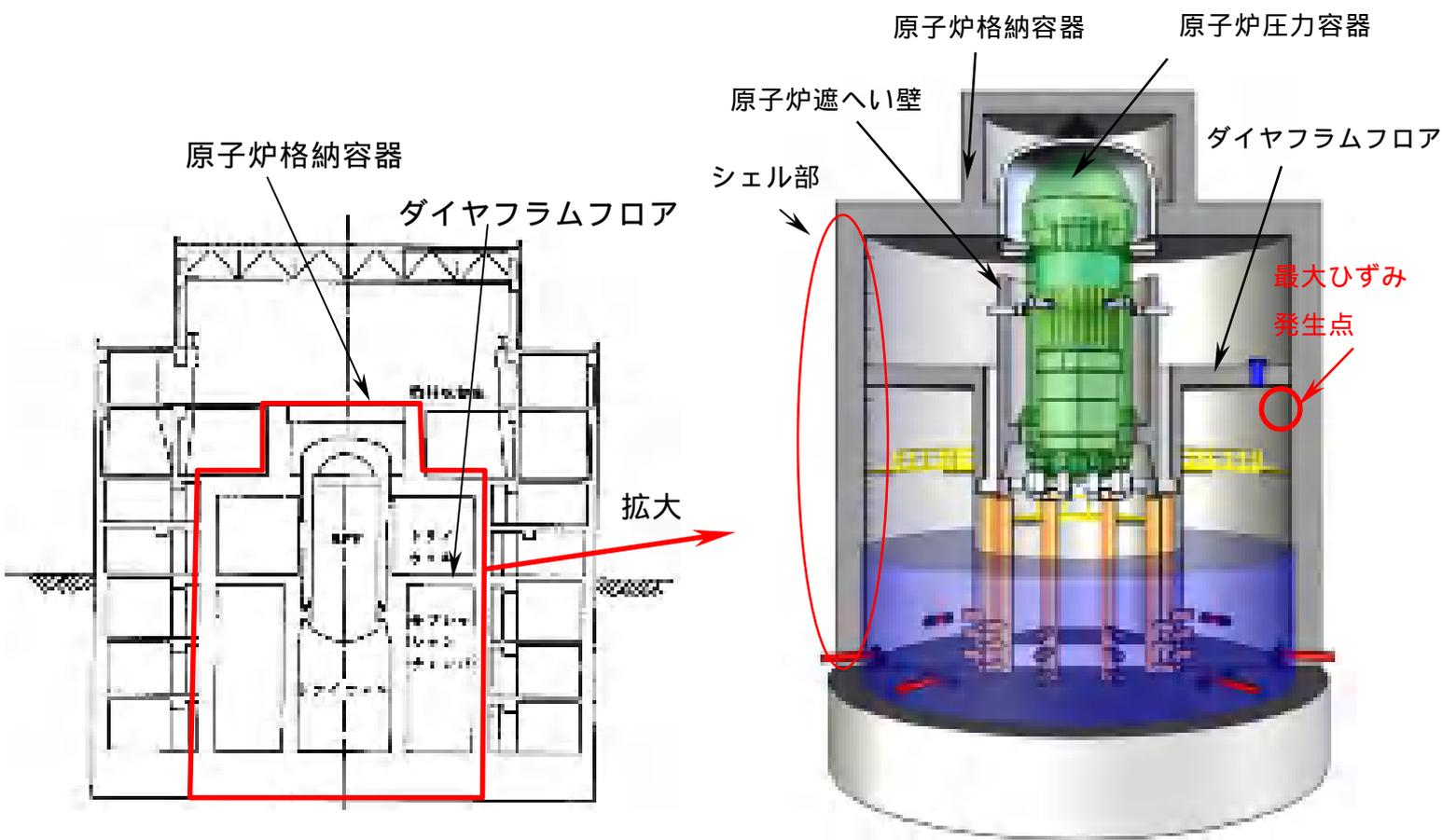
ご指摘の箇所は燃料交換ベローズを示している。第1図より、当該箇所は解析モデルに含まれており、原子炉压力容器と原子炉格納容器の荷重の伝達を行うバネとして模擬されている。



第 1 図 大型機器水平方向解析モデル(EW 方向)



第 2 図 シェル部のライナ形状



第 3 図 原子炉建屋、原子炉格納容器模式図

コメント内容

原子炉建屋クレーンの減衰定数を測定した実験について説明すること。また、天井クレーン試験時における建屋振動との関連をどう考えているのか示すこと。

(平成 20 年 12 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 25 回))

回答

1. 概要

JEAG4601 におけるクレーン類の水平方向の設計用減衰定数は、溶接構造物として 1% と規定されている。

クレーン類の減衰に寄与する要素には、材料減衰とクレーンを構成する部材間に生じる構造減衰に加え、車輪とレール間のガタや摩擦による減衰があり、溶接構造物としての 1% より大きな減衰定数を有すると考えられる。

そこで、電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(H7～H10)」では、実機を試験体とした振動試験が実施され、水平方向及び鉛直方向の設計用減衰定数を見直すための検討を行った。以下に試験方法、試験体、試験結果について示す。

2. 天井クレーンの試験方法

2-1. 試験条件

天井クレーンにおいては、第 1 表に示した方法で試験が行われている。天井クレーンは、ガーダ 2 本上にトロリが設置されている構造であるが、試験時の試験体の状態は、トロリの位置を試験体 No.1、2 ではクレーンガーダの中央部及び 1/4 位置、試験体 No.3 ではトロリの位置をガーダの中央部、1/4 位置及び端部としている。計測項目は、クレーンガーダ、トロリ、建屋レー

ルの加速度及び応答変位である。

2 - 2 . 加振方法

鉛直方向の試験では、天井クレーンに定格荷重相当の吊荷を吊り下げ、吊荷を床から 50mm 程度まで持ち上げた後、最大速度で下降させて床に着地させ、この時の自由振動を計測している。水平方向の試験では、クレーンを 1m 程度走行させ、急停止することにより、この時の自由振動を計測している。

2 - 3 . 加振レベル

鉛直方向の試験では、天井クレーンの定格荷重相当の吊荷で加振しており、試験体 No.1、2 では 150ton、試験体 No.3 では 200ton で実施している。

第 1 表 天井クレーンの振動試験方法

試験条件	(1) トロリ位置	試験体 No.1、2 : 中央、1/4 試験体 No.3 : 中央、1/4、及び端部
試験方法	(1) 加振方向	鉛直方向 水平方向 : ガーダ走行方向
	(2) 加振方法	吊荷着地による自由振動(鉛直) 急制動による自由振動(水平)
	(3) 加振波の種類	吊荷の開放(パルス波) 急制動(パルス波)
	(4) 加振レベル	定格荷重(鉛直) 試験体 No.1、2 : 150ton 試験体 No.3 : 200ton
計測項目		試験体の加速度 試験体の応答変位

3 . 天井クレーンの試験結果及び評価

3 - 1 . 鉛直方向の減衰定数

(1)試験結果

試験結果を第 1 図に示す。設計応答振幅レベル^{*1}(トロリ中央部：12.2mm、トロリ端部：6.0mm)に対し、試験はほぼ同じレベル（トロリ中央部：12.1mm、トロリ端部：10.1mm)まで実施している。

応答振幅に対する減衰比の傾向は、応答振幅が比較的小さい場合には減衰比のばらつきが大きいですが、応答振幅が大きくなると、減衰比の発生源となる構造減衰^{*2}が増加し、減衰比が徐々に増加するとともに、そのばらつきが小さくなる。天井クレーンでは応答振幅 5.0mm で減衰比 2.0%以上を得ている。

(2)評価

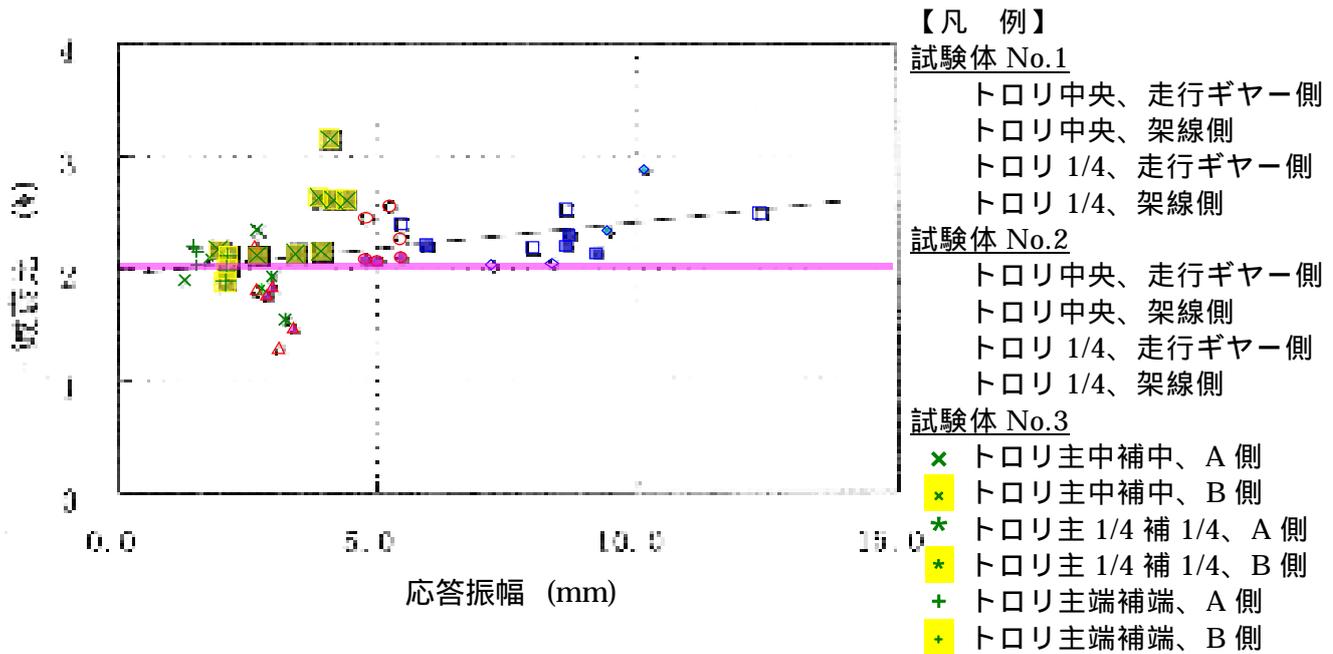
応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり、設計応答振幅レベルで減衰比 2.0%以上となっていることから、設計用減衰定数を 2.0%とした。

*1 ここで記載した設計応答振幅レベルは、天井クレーンに適用する設計用地震動における応答振幅レベルを示す。

*2 クレーンの減衰に影響する因子は材料減衰・構造減衰があり、減衰影響因子は以下のとおりである。

材料減衰：ガーダ等の骨組構造を構成する鋼材での内部減衰

構造減衰：ガーダ車輪とレールの摩擦・ガタ、及びトロリ車輪とレールの摩擦・ガタ



第 1 図 鉛直方向の減衰比と応答振幅の関係

3 - 2 . 水平方向の減衰定数

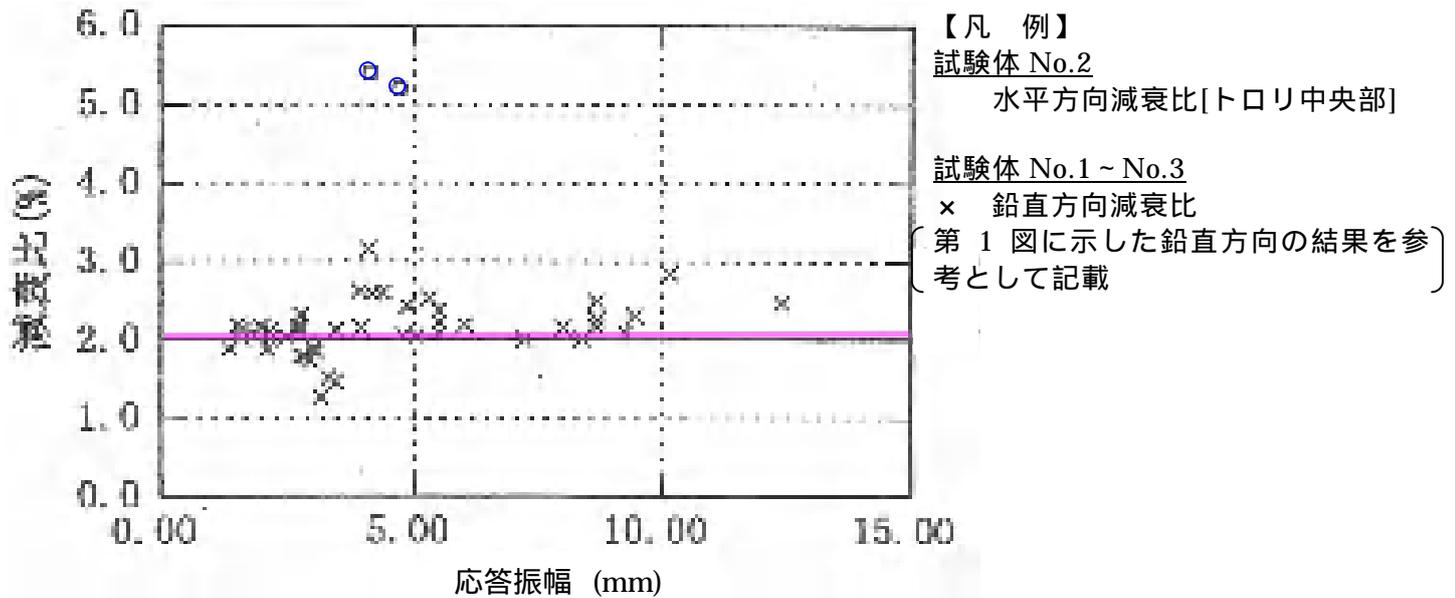
(1) 試験結果

水平方向の試験結果を鉛直方向の結果と合わせて第 2 図に示す。設計応答振幅レベル(トロリ中央部：8.9mm)に対し、試験は応答振幅レベル(トロリ中央部：4.7mm)まで実施している。

天井クレーンの水平方向の減衰比は、応答振幅 4.7mm において 5.2% という結果を得ている。

(2) 評価

水平方向の減衰比は、第 2 図のとおり応答振幅レベル 5.0mm でも鉛直方向の減衰比を上回ることが確認されており、第 1 図の鉛直方向の試験結果から、減衰比は応答振幅の増加とともに大きくなる傾向にあるが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ 2.0% を水平方向の設計用減衰定数としている。



第2図 水平方向の減衰比と応答振幅の関係

3 - 3 . 天井クレーン試験における建屋振動について

建屋の振動が、天井クレーンの振動に及ぼす影響としては、以下のことが考えられる。

- (1) 建屋の変形に伴う減衰によりクレーン振動エネルギーが逸散される。
- (2) 建屋 - クレーンが連成することによりクレーンの振動が抑制される。

天井クレーンの試験においては、クレーンのガーダの変位と共に、クレーン走行レールにおける振動変位（建屋の変位）を計測している。試験で得られている振幅（片振幅）は、各々以下のとおりである。

天井クレーンガーダの振幅（片振幅）	: 約 9.5 mm
走行レールでの振幅（建屋の振幅）	: 約 0.5 mm

建屋の振動が天井クレーンと連成し減衰効果をもたらす場合には、建屋より天井クレーンの振動を相殺するような荷重、減衰力の伝達が必要となる。減衰

力の発生要因としては、建屋側のランウェイガーダ、鋼製柱等の建屋の構造減衰及び建屋と天井クレーンの相対運動における慣性力が挙げられる。しかし、上記のように建屋の振幅は天井クレーンの振幅と比較して小さく、構造減衰及び相対運動は共に小さいと考えられる。

また、本試験での建屋では、試験を実施したクレーンの他に定格荷重 425ton の天井クレーン 2 機（原子炉圧力容器の運搬用）を有しており、建屋の剛性としては極端な柔構造とはなっていない。なお、建屋構造物の内、ランウェイガーダについては、実機天井クレーンにおいても連成による減衰効果が含まれると考えられる。

以上のことから、本試験結果では建屋の振動は生じているものの、その振幅は微小であり、天井クレーンの減衰への影響は小さいものと考えている。

参考 1 原子炉建屋クレーンの評価について

1 . 原子炉建屋クレーンの位置づけ

原子炉建屋クレーンは、耐震 S クラス設備に対して波及的破損を及ぼす可能性のある耐震 B クラス設備である。そのように位置づけられている理由は、本設備の設置場所が、耐震 S クラス設備である使用済燃料貯蔵設備の上部に配置されているためである。なお、同様な位置づけの設備として燃料取替機がある。

2 . 原子炉建屋クレーンと組み合わせる地震動

原子炉建屋クレーンは、使用時のみ耐震 S クラス設備の上を走行する場合があるが、通常時は耐震 S クラス設備があるエリア外に待機している。このことから、7号機の原子炉設置許可申請書や工事計画認可申請書においては、原子炉建屋クレーンの耐震重要度分類を、「耐震 B クラス・基準地震動 S1 に対する落下防止」としていた。原子力発電所耐震設計技術指針～重要度分類・許容応力編～JEAG4601・補-1984 でも、原子炉建屋クレーンは基準地震動 S1 に対して落下しないことを確認することと例示している。

一方、燃料取替機は、常時、使用済燃料貯蔵設備の上に待機している。このことから、7号機の原子炉設置許可申請書や工事計画認可申請書においては、燃料取替機の耐震重要度分類を、「耐震 B クラス・基準地震動 S2 に対する落下防止」としていた。原子力発電所耐震設計技術指針～重要度分類・許容応力編～JEAG4601・補-1984 でも、燃料取替機は基準地震動 S2 に対して落下しないことを確認することと例示している。

7号機の耐震安全性評価においては、この考え方を踏襲した。すなわち、常時、耐震 S クラス設備の上部に設置される燃料取替機の落下防止評価は、基準地震動 Ss を用い、使用時にのみ、一時的に耐震 S クラス設備の上を通過

するものについては、弾性設計用地震動 S_d を用いた評価とした。

3 . 原子炉建屋クレーンの評価について

原子炉建屋クレーンは、地震時に使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確認するため、以下に示すクレーンガーダ、脱線防止ラグ、トロリストッパに着目して評価を実施している。

3 - 1 . クレーンガーダの評価

(1) 曲げ応力

クレーンガーダの曲げ応力の評価は、ガーダに加わる鉛直方向のモーメント (M_V) および水平方向のモーメント (M_H) を用いて、以下の式で表される。

$$M_V / Z_X + M_H / Z_Y$$

ここで、

$$M_V = (M_1 + M_2 + M_3) \cdot (1 + C_V)$$

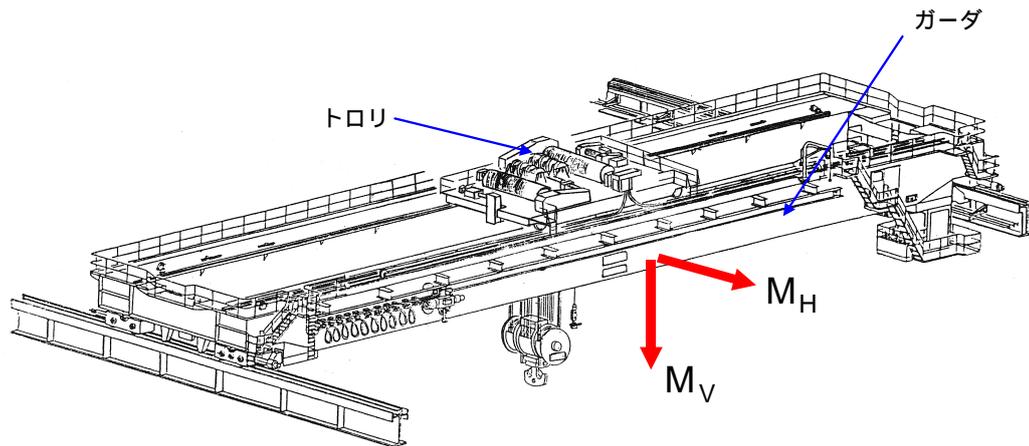
$$M_H = (M_1 + M_2) \cdot C_H$$

M_1 、 M_2 、 M_3 : ガーダ重量、トロリ重量、定格荷重による曲げモーメント

Z_X 、 Z_Y : ガーダの断面係数

C_V : 鉛直方向震度 (クレーン設置階の床応答スペクトルより読み取り)

C_H : 水平方向震度 (駆動輪における最大静止摩擦係数より算出)



第3図 クレーンガーダ概略図（曲げ応力）

(2) せん断応力

クレーンガーダのせん断応力の評価は、ガーダに加わるせん断力（ Q ）を用いて、以下の式で表される。

$$= Q/A_v$$

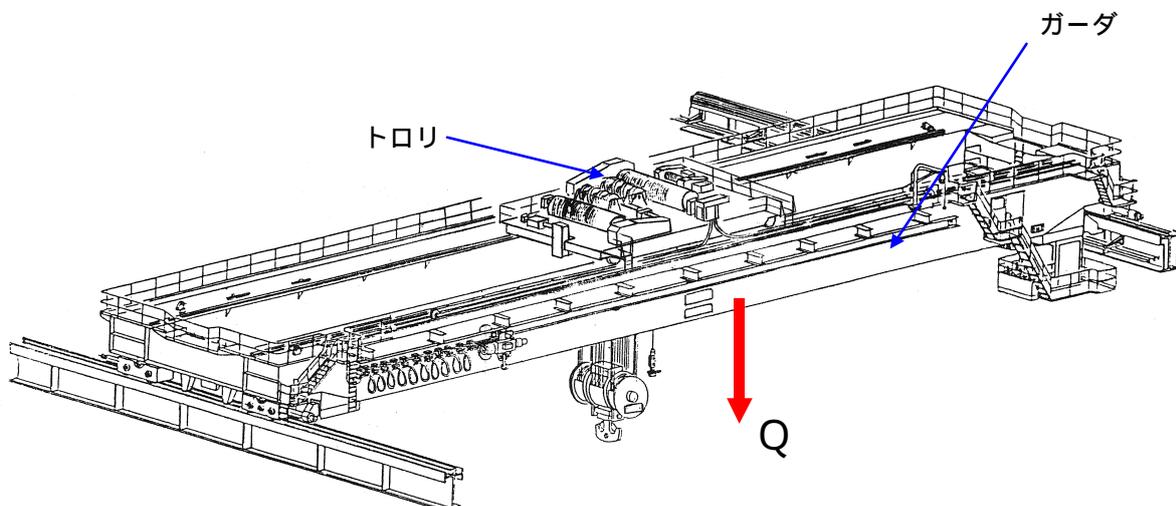
ここで、

$$Q = (Q_1 + Q_2 + Q_3) \cdot (1 + C_v)$$

Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ：ガーダ重量、トロリ重量、定格荷重によるせん断力

A_v ：せん断力を受けるガーダの断面積

C_v ：鉛直方向震度（クレーン設置階の床応答スペクトルより読み取り）



第4図 クレーンガーダ概略図（せん断応力）

3 - 2 . 脱線防止ラグの評価

脱線防止ラグの評価は、クレーンが水平方向に振動することにより、ランウェイガーダ（クレーンおよびレールを支える鉄骨）から受ける反力（ F_1 ）を用いて、以下の式で表される。

$$\text{圧縮応力} = F_1 / A_1$$

ここで、

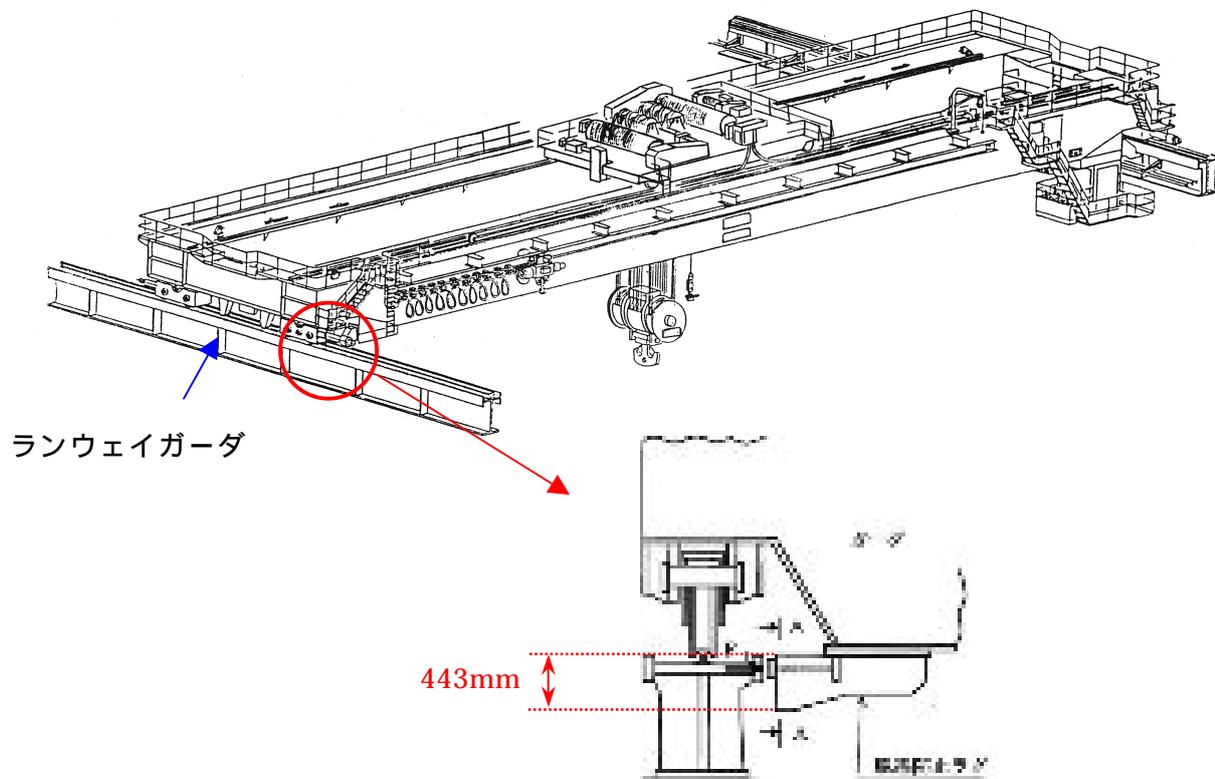
$$F_1 = 1/2 \cdot (m_1 + m_2 + m_3) \cdot g \cdot C_{H1} \text{ (脱線防止ラグ 1 個あたり)}$$

m_1 、 m_2 、 m_3 : ガーダ重量、トロリ重量、定格荷重

A_1 : 脱線防止ラグの断面積

C_{H1} : 水平方向設計震度(クレーン設置階の床応答スペクトルより読み取り)

g : 重力加速度



第 5 図 脱線防止ラグ概略図

3 - 3 . トロリストッパの評価

トロリストッパの評価は、トロリが水平方向に振動することにより、クレーンガーダから受ける反力（ F_2 ）を用いて、以下の式で表される。

$$\text{曲げ応力} \quad \sigma_1 = M_4 / Z$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau = F_2 / A_2$$

$$\text{組合せ応力} \quad \sigma_2 = \left(\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau^2 \right)$$

ここで、

$$F_2 = 1/2 \cdot m_2 \cdot g \cdot C_H \text{ (トロリストッパ1個あたり)}$$

M_4 : トロリ重量による曲げモーメント

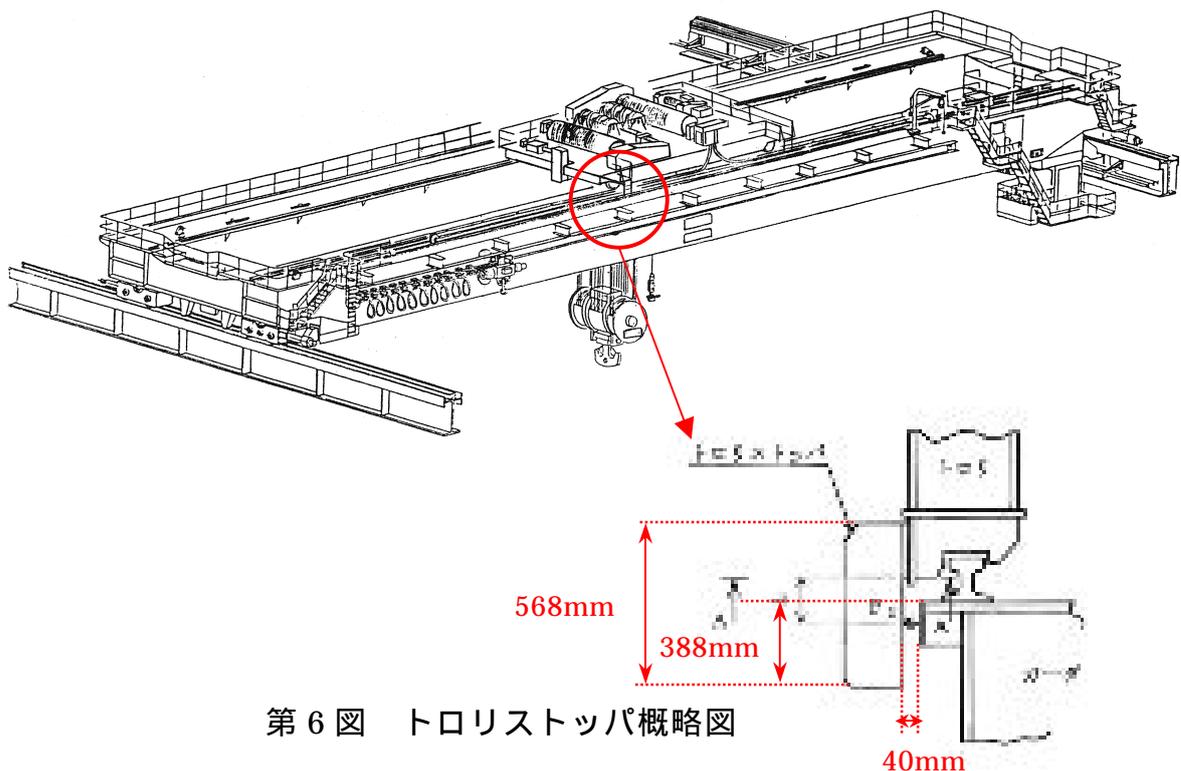
m_2 : トロリ重量

Z : トロリストッパの断面係数

A_2 : トロリストッパの断面積

C_H : 水平方向震度（駆動輪における最大静止摩擦係数より算出）

g : 重力加速度



第 6 図 トロリストッパ概略図

3 - 4 . 評価結果

クレーンガーダ、脱線防止ラグ、トロリストッパの評価結果を第 2 表に示す。発生値は、いずれも評価基準値以下であることを確認した。

第 2 表 クレーンガーダ、脱線防止ラグ、トロリストッパの評価結果

部材	応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
クレーンガーダ	曲げ応力	280	319
	せん断応力	70	139
脱線防止ラグ	圧縮応力	69	231
トロリストッパ	曲げ応力	22	231
	せん断応力	7	133
	組合せ応力	26	231

: 最大評価点 (報告書記載値)

参考 2 燃料取替機の減衰定数について

原子炉建屋クレーンの耐震安全性評価に用いた減衰定数を定めた試験について説明した。今回耐震安全性評価を行った設備のうち原子炉建屋クレーンと類似の設備として燃料取替機がある。燃料取替機の評価に用いた減衰定数についても試験により得られた値を用いている。ここでは、参考としてその試験についても合わせて説明する。

1 . 燃料取替機の試験方法

原子炉建屋クレーンと同様の考え方により、燃料取替機に関しても水平方向及び鉛直方向の設計用減衰定数を見直すための検討を行った。以下に試験方法、試験体、試験結果について示す。

1 - 1 . 試験条件

燃料取替機においては、第 3 表に示した方法で試験が行われている。燃料取替機はブリッジ(ガーダ 2 本)上にトロリが設置されている構造である。

振動試験時の試験体の状態は、トロリの停止位置をブリッジ(ガーダ)の中央部及び端部としている。計測項目は、加振加速度、トロリ、ブリッジ(ガーダ)の加速度、及び応答変位を計測している。

1 - 2 . 加振方法

加振方法は、トロリに加振装置を設置して強制加振で実施しており、加振振動数は 5.0 ~ 20Hz としている。

1 - 3 . 加振レベル

加振加速度レベルは、製品保護の観点から燃料取替機に発生する応力を許容応力の 1/10 以下、及びレールとガイドローラが接触しないように、燃料取替機の最大応答加速度レベルを上下方向で 200Gal、水平方向で 100Gal 程度を目安に実施している。

第 3 表 燃料取替機の振動試験方法

試験 条件	(1) トロリ位置	中央部と端部
	(2) 付加質量の有無	加振装置 : 有
試験 方法	(1) 加振方向	鉛直方向 水平方向：ブリッジ走行方向 (ガーダ)
	(2) 加振方法	加振装置による強制加振
	(3) 加振波の種類	強制加振；正弦波 5.0 ~ 20Hz
	(4) 加振レベル	許容応力の 1/10 以下(鉛直・水平)
計測 項目		加振加速度 試験体の加速度 試験体の応答変位

2. 燃料取替機の試験結果及び評価

2 - 1. 鉛直方向減衰定数

(1) 試験結果

試験結果を第 8 図に示す。設計応答振幅レベル*1(トロリ中央部：3.4mm、トロリ端部：0.8mm) に対し、試験は応答振幅レベル(トロリ中央部：0.49mm、トロリ端部：0.62mm)まで実施されている。

応答振幅に対する減衰比の傾向は、トロリ位置が中央部の場合では、応答振幅の増加にしたがって減衰比は増加する傾向を示している。応答振幅 0.40mm で減衰比 2.0%以上が得られている。トロリ位置が端部の場合では、応答振幅に係らず 1.5%程度の減衰比が得られている。

(2) 評価

トロリ位置が中央部の場合では、応答振幅の増加に伴い減衰比は増加傾向にあり、低振幅レベルでも減衰比 2.0%以上となっていること、応答振幅が増加すると取付器具の振動等で構造減衰*2 が増加し、設計応答振幅レベルでも減少することはないと考えられることから、設計用減衰定数 2.0%としている。

トロリ位置が端部の場合では、応答振幅に係らず 1.5%程度の減衰比が得られていることから、設計用減衰定数 1.5%としている。

*1 ここで記載した設計応答振幅レベルは、燃料取替機に適用する設計用地震動における応答振幅レベルを示す。

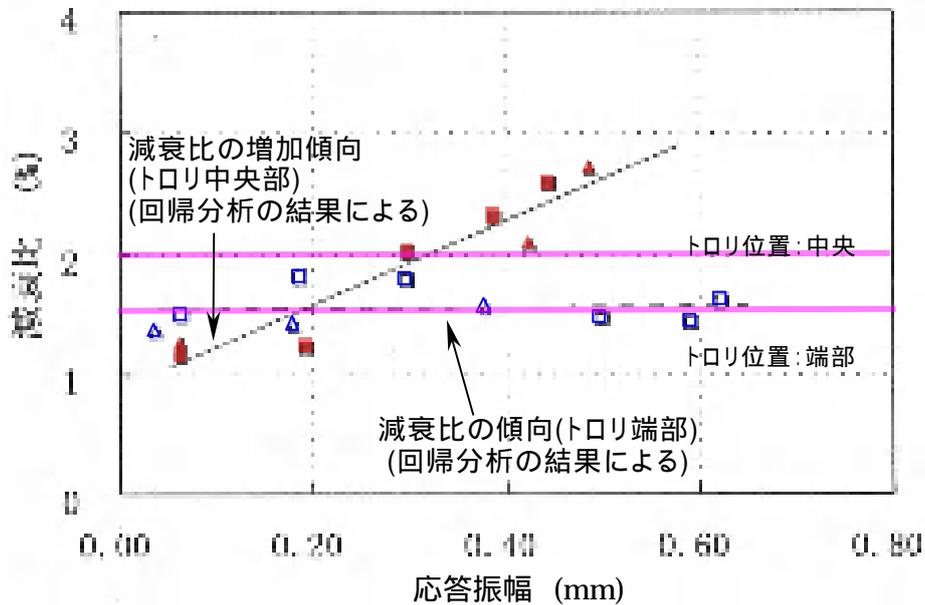
*2 クレーン類の減衰に影響する因子は材料減衰・構造減衰があり、減衰影響因子は以下のとおりである。

材料減衰：ガーダ、トロリフレーム等の骨組構造を構成する鋼材での内部減衰

構造減衰：ガーダ車輪とレールの摩擦・ガタ、及びトロリ車輪とレールの摩擦・ガタ、取付器具(手摺・主ホイスト等)・電気盤パネル(機上補助盤等)の振動、マストチューブの相互作用

【凡 例】

- マスト縮、トロリ中央
- マスト縮、トロリ端
- マスト縮、トロリ中央
- マスト縮、トロリ端



第 8 図 鉛直方向の減衰比と応答振幅の関係

2 - 2 . 水平方向減衰定数

(1) 試験結果

水平方向の試験結果を鉛直方向の結果と合わせて第 9 図に示す。設計応答振幅レベル(トロリ中央部 2.5mm)に対し、試験は応答振幅レベル(トロリ中央部 : 0.07mm、トロリ端部 : 0.07mm)まで実施されている。

燃料取替機の水平方向の減衰比は、トロリ位置が中央部では応答振幅 0.07mm において 3.6%、トロリ位置が端部では応答振幅 0.07mm において 3.1%という結果が得られている。

(2) 評価

水平方向の減衰比は、第 9 図のとおり応答振幅レベル 0.07mm でも鉛直方向の減衰比を上回ることが確認されており、第 8 図の鉛直方向の試験結果から、減衰比は応答振幅の増加とともに大きくなる傾向にあるが、データ点数が少ないため、鉛直方向と同じ 2.0% を水平方向の設計用減衰定数としている。

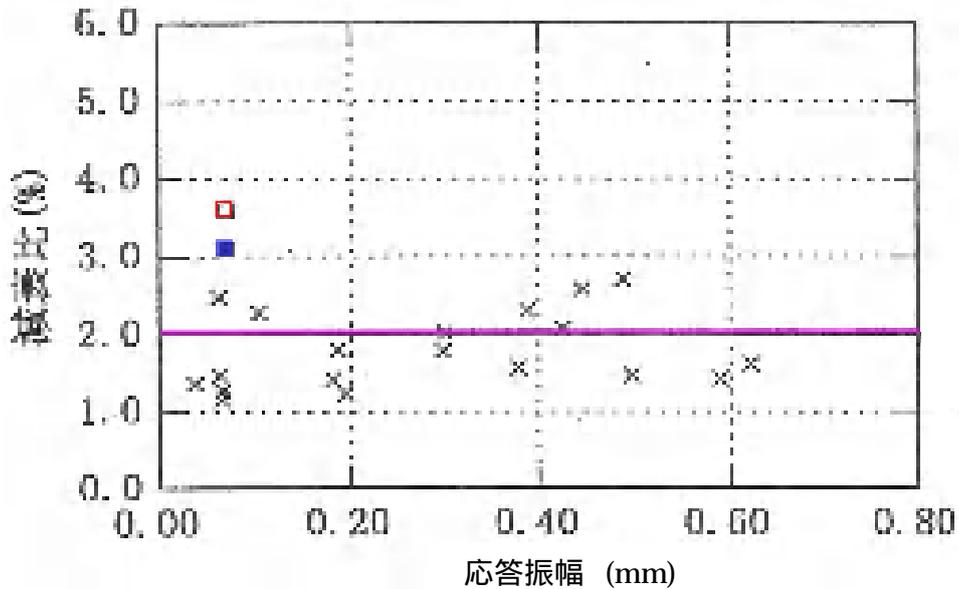
【凡 例】

水平方向減衰比[トロリ中央部]

水平方向減衰比[トロリ端部]

× 鉛直方向減衰比

(第 8 図に示した鉛直方向の結果を
参考として記載)



第 9 図 水平方向の減衰比と応答振幅の関係

参考3 燃料取替機の評価について

7号機の燃料取替機の耐震安全性評価では参考2で述べた減衰定数を用いている。ここでは、その耐震安全性評価の概要について説明を行う。

1. 燃料取替機の耐震安全性評価

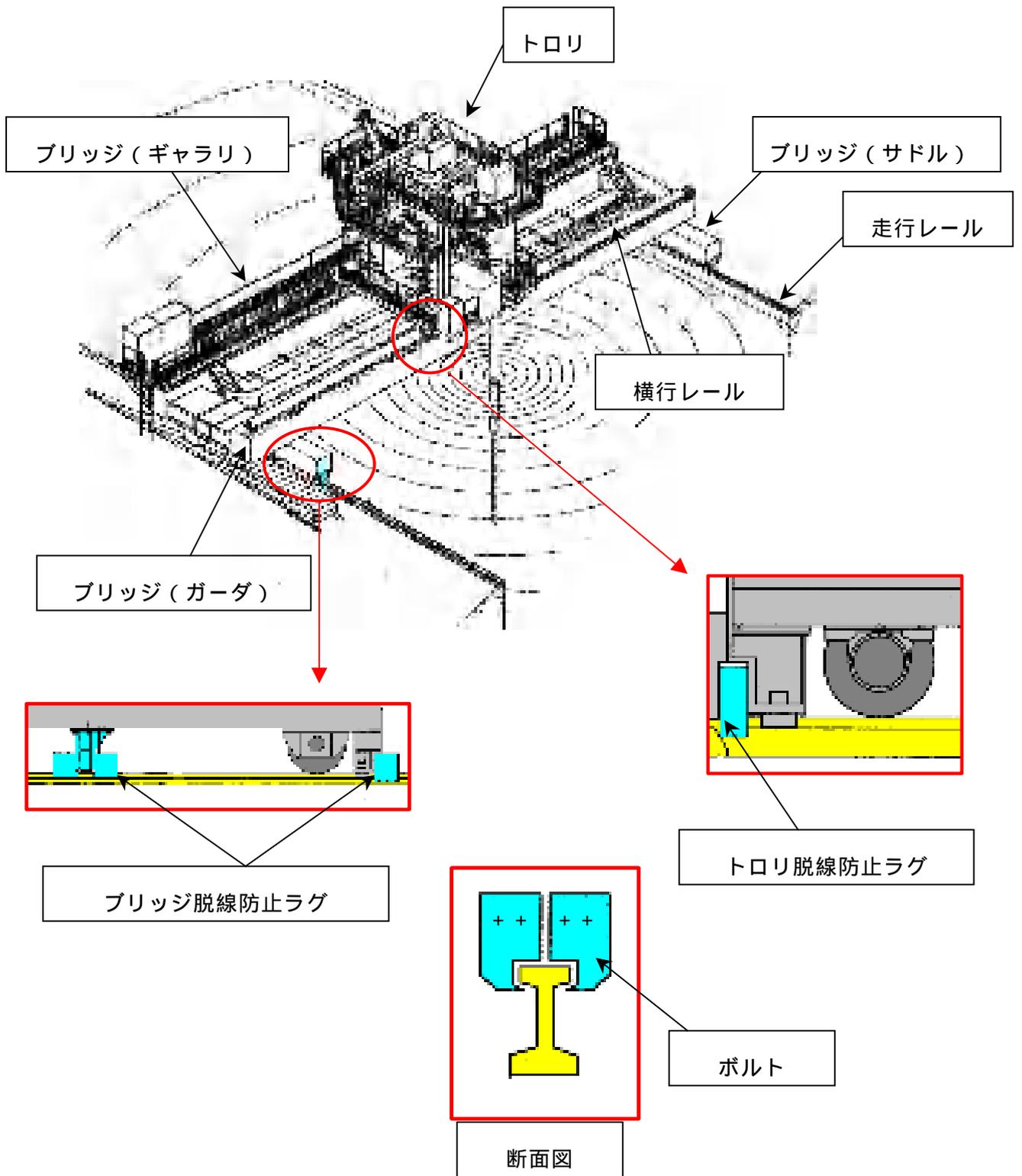
燃料取替機は、地震時に使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確認する必要がある。その観点から、構造物フレーム（ガーダ、サドル、ギャラリ、トロリ）、脱線防止ラグおよびレールに着目して評価を実施している。（第10図参照）以下、個別の部位毎に評価の概要を述べる。

2. 構造物フレームの評価

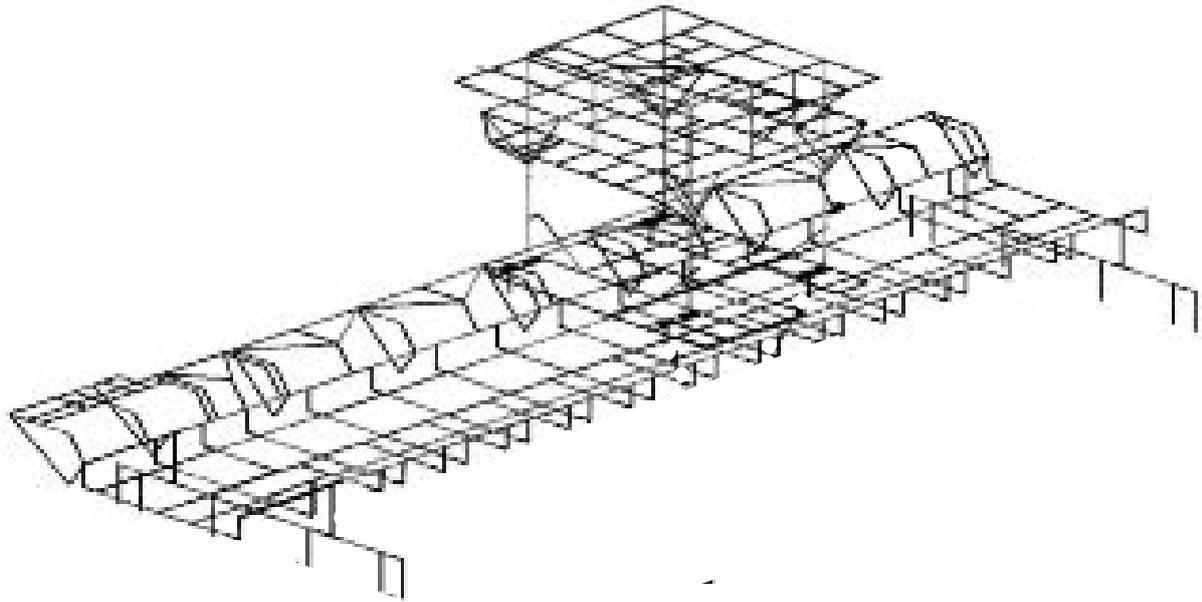
構造物フレームの応力は、燃料取替機をはり要素でモデル化し（第11図参照）、計算機を使用して曲げ応力（ σ_1 ）およびせん断応力（ τ_1 ）を算出する。

なお、組合せ応力は、フレームに加わる曲げ応力（ σ_1 ）およびせん断応力（ τ_1 ）を用いて、下記式で表される。

$$c_1 = \left(\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau_1^2 \right)$$



第 10 図 燃料取替機概略図



第 11 図 燃料取替機解析モデル

3. 脱線防止ラグの評価

(1) 脱線防止ラグ(本体)

脱線防止ラグ本体の曲げ応力、せん断応力および組合せ応力は、計算機による計算により得られたラグに加わる曲げモーメント(M_1)およびせん断力(P_1)を用いて、下記式で表される。

$$\text{曲げ応力} \quad \sigma_2 = M_1 / Z_1$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau_2 = P_1 / A_1$$

$$\text{組合せ応力} \quad \sigma_{c2} = \left(\sigma_2^2 + 3 \cdot \tau_2^2 \right)$$

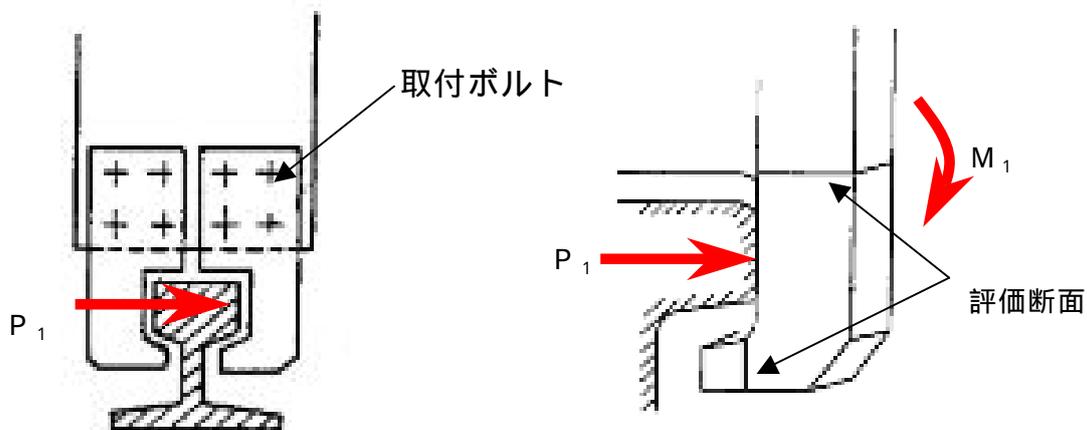
M_1 : 曲げモーメント
 Z_1 : 脱線防止ラグの断面係数
 P_1 : せん断力
 A_1 : 脱線防止ラグの断面積

(2) 取付ボルト

取付ボルトのせん断応力は、計算機による計算により得られたせん断力(P_1)を用いて、下記式で表される。

$$\tau_3 = P_1 / n \cdot A_2$$

P_1 : せん断力
 n : ボルト本数
 A_2 : ボルト1本の断面積



第 12 図 脱線防止ラグ概略図

4. レールの評価

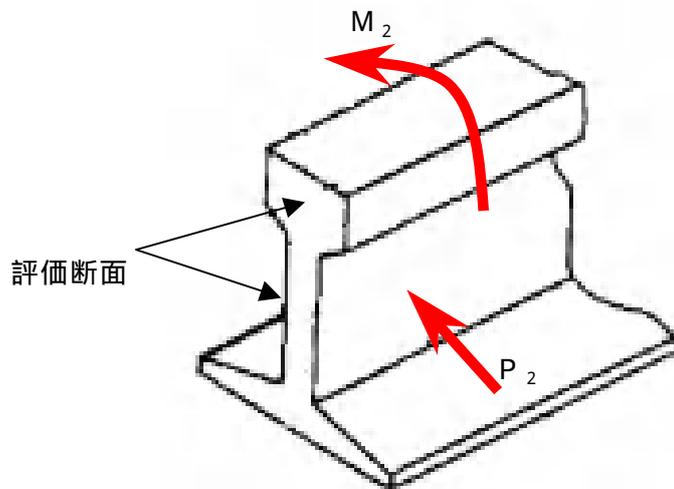
レールの曲げ応力、せん断応力および組合せ応力は、計算機による計算により得られたレールに加わる曲げモーメント (M_2) およびせん断力 (P_2) を用いて、下記式で表される。

$$\text{曲げ応力} \quad \sigma_3 = M_2 / Z_2$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau_4 = P_2 / A_3$$

$$\text{組合せ応力} \quad \sigma_{c3} = \left(\sigma_3^2 + 3 \cdot \tau_4^2 \right)$$

- M_2 : 曲げモーメント
- Z_1 : レールの断面係数
- P_2 : せん断力
- A_3 : レールの断面積



第 13 図 レール概略図

5 . 評価結果

各部材の評価結果を第 4 表に示す。

発生値は、いずれも評価基準値以下であることを確認した。

第 4 表 各部材の評価結果 (1/2)

部材		応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	
構造物フレーム	ブリッジ	ガーダ	引張応力	122	275
			せん断応力	11	158
			組合せ応力	124	275
		サドル	引張応力	154	275
			せん断応力	106	158
			組合せ応力	239	275
		ギャラリ	引張応力	149	275
			せん断応力	2	158
			組合せ応力	149	275
	トロリ	引張応力	185	275	
		せん断応力	19	158	
		組合せ応力	188	275	
脱線防止ラグ	ブリッジ脱線防止ラグ	引張応力	36	253	
		せん断応力	19	146	
		組合せ応力	48	253	
	取付ボルト	せん断応力	142	158	
	トロリ脱線防止ラグ	引張応力	88	253	
		せん断応力	34	146	
		組合せ応力	106	253	
取付ボルト	せん断応力	113	158		

: 最大評価点 (報告書記載値)

第 4 表 各部材の評価結果 (2/2)

部材		応力	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
レール	走行レール	引張/圧縮応力	239	546
		せん断応力	22	315
		組合せ応力	242	546
	横行レール	引張/圧縮応力	372	483
		せん断応力	15	278
		組合せ応力	373	483

コメント内容

事故時の条件（温度等）は時間の経過共に変化していくが、地震と事故との組合せにおいてどのように考えているか説明すること。

（平成 20 年 12 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造WG（第 25 回））

回答

地震と組合せる事故として、冷却材喪失事故を弾性設計用地震動 Sd と組合せている。冷却材喪失事故における荷重の組合せを考慮する条件として、長時間作用する圧力、温度を弾性設計用地震動 Sd と組合せて評価している。

JEAG4601・補-1984 重要度分類編においては、長時間（ 10^{-1} 年以上）継続するものとしており、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の設計においては、事故発生後 30 日（720 時間）後の圧力、温度を長時間継続するものとして組合せている。今回の耐震安全性評価においても、設計と同様に考えて荷重を組合せている。

コメント内容

動的機能維持評価における鉛直方向の評価基準値加速度に1.0Gを用いている根拠を説明すること。

(平成20年12月15日 耐震・構造設計小委員会構造WG(第25回))

回答

1. 概要

平成18年9月に改訂された耐震設計審査指針において、動的機器に対する地震時機能維持を確認することが明記されるとともに、これまで静的な取扱いのみであった鉛直方向の地震力についても、動的な地震力を考慮することとなった。

耐震設計審査指針改訂以前においても動的機器の地震時機能維持評価^{*1}は行われており、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版(以下、「JEAG4601-1991」という。)に基づき、動的地震力を考慮する水平方向に対しての評価が行われていた。

一方、耐震設計審査指針改訂に伴い、鉛直方向についても動的な地震力の考慮が必要となったことから、鉛直方向の地震力に対する地震時機能維持評価を行うにあたり、評価で用いる機能確認済加速度^{*2}について、これまでの水平方向に加え、鉛直方向についても設定が必要となった。

柏崎刈羽原子力発電所7号機では、電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(H10~H13)」(以下、「本研究」という。)の成果に基づき、地震時機能維持評価で必要となる、鉛直方向の機能確認済加速度を採用した。

*1：地震時又は地震後に動作の要求される安全上重要な設備について、ポンプの回転機能や弁の開閉動作機能等の動的機能が維持されることを確認する。なお、JEAG4601-1991には、以下の12機種に対する機能維持評価法が規定されている。

立形ポンプ	横形ポンプ	ポンプ駆動用タービン
電動機	ファン	冷凍機
非常用ディーゼル発電機	制御用空気圧縮機	往復動式ポンプ
弁	ダンパ	制御棒

*2：振動試験や解析により、地震時機能維持が確認された加速度

2．柏崎刈羽原子力発電所7号機で用いる機器の鉛直方向における機能確認済加速度

機器の内部部品等の浮き上がりを考慮する必要のない限界値（1.0G）に対する解析的な検討を行い、許容値に対する余裕が確認されたことから、鉛直方向の機能確認済加速度に1.0Gを採用した。次項に残留熱除去系ポンプの機能確認済加速度を例として示す。

第1表 機能確認済加速度（鉛直方向加速度1.0Gを用いる機器）

種別 ^{*1}			機能確認済加速度		主な安全上重要な設備
			鉛直方向(G ^{*3})		
			現行	柏崎刈羽7号機	
立形ポンプ	ピットバレル形ポンプ		-	1.0	残留熱除去系ポンプ
	立形斜流ポンプ				原子炉補機冷却海水系ポンプ
横形ポンプ	横形単段遠心式ポンプ		-	1.0	原子炉補機冷却水系ポンプ
	横形多段遠心式ポンプ				原子炉隔離時冷却系ポンプ
ポンプ駆動用タービン			-	1.0	原子炉隔離時冷却系ポンプ駆動用蒸気タービン
電動機	横形ころがり軸受電動機		-	1.0	原子炉補機冷却水系ポンプ用電動機
	立形すべり軸受電動機				残留熱除去系ポンプ用電動機
ファン	遠心直結型ファン		-	1.0	中央制御室送風機
	遠心直動型ファン				中央制御室排風機
非常用ディーゼル発電機	高速形ディーゼル機関	機関本体	-	1.0	非常用ディーゼル発電機
		ガバナ			
往復動式ポンプ	横形3連往復動式ポンプ	重心位置	-	1.0	ほう酸水注入系ポンプ

注記 *1：JEAG4601-1991に記載された12機種のうち柏崎7号機で評価を行う機種を記載

*2：JEAG4601-1991に追加及び変更した箇所を下線で示す。

*3：G = 9.80665(m/s²)

3. 残留熱除去系ポンプの機能確認済加速度

残留熱除去系ポンプ（柏崎刈羽原子力発電所7号機では「立形ポンプ（ピットバレル形ポンプ）」を使用）の地震時機能確認済加速度は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に規定されているが、水平方向のみであり、鉛直方向については規定されていない。

したがって、鉛直方向の機能確認済加速度については、既往の試験研究⁽¹⁾をもとに定めた。

具体的には、立形ポンプは、鉛直方向の剛性が高く応答増幅が小さいことから、鉛直方向の内部品の浮き上がりによる非線形特性を考慮する必要のない限界値（1.0G）を鉛直方向の機能確認済加速度として設定した。（第2表）

第2表 機能確認済加速度

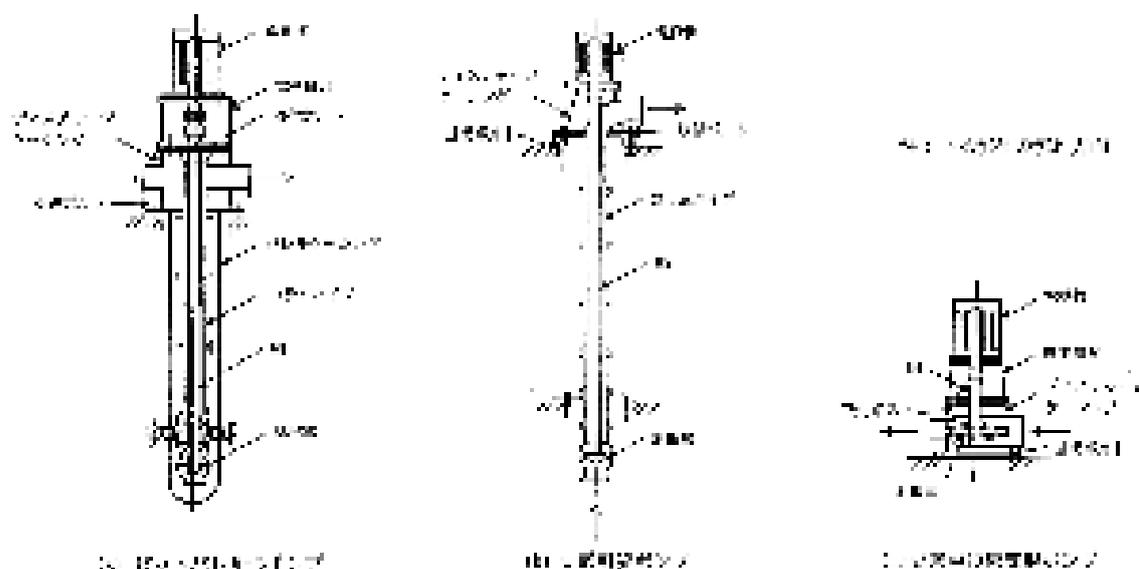
種別	機種	加速度 確認部位	機能確認済加速度	
			水平方向(G ¹)	鉛直方向(G ¹)
立形ポンプ	ピットバレル形 ポンプ	コラム 先端部	10.0	<u>1.0</u>

1 G=9.80665(m/s²)

この設定にあたり、既往の試験研究⁽¹⁾⁽²⁾においては、当該のピットバレル形ポンプについて解析的な検討を実施した。解析的な検討においては、地震時に水力性能を確保するための水平・鉛直地震動に対する異常要因分析を行い、損傷若しくは異常が生じれば機能喪失に至ると評価される項目を抽出した上で、水平方向の機能確認済加速度（10.0G）及び鉛直方向の機能

確認済加速度（1.0G）が加わった場合の健全性評価を実施している。

具体的には、強度確保に係る項目として、長手方向の曲げで影響を受けるポンプケーシング、コラムパイプ、各部取付ボルトと全体の支持部である基礎ボルト等の強度評価、及び、回転機能確保に係る項目として、水平地震力によるポンプ軸受のラジアル荷重評価、鉛直地震力による電動機軸受のスラスト荷重評価を実施している。



第1図 立形ポンプの構造例

ピットバレル形ポンプの代表ポンプについての評価結果を第3表及び第4表に示す。

ポンプは、水平方向10.0Gに加えて鉛直方向に1.0Gが作用しても、各評価部位の発生応力、軸受の面圧は許容値に対して余裕があり、水平・鉛直地震動に対して動的機能が維持されることを確認している。

電動機軸受のスラスト荷重についても、鉛直地震力が上向きである場合、下向きである場合ともに、発生荷重はいずれも許容値以下となり問題ないことを確認している。

第3表 立形ポンプの機能維持評価結果（水平・鉛直地震動に対する評価）

評価項目	基礎ボルト 取付ボルト	ディスチャージケーシング	バレルケーシング	コラムパイプ	ポンプ軸受	軸	水力性能
評価方法	解析により応力を評価	解析により応力を評価	解析によりバレルの応力を評価	解析により応力を評価	解析により面圧を評価	解析により応力を評価	ACT 研究 ³ での成果をもとに左記評価項目により水力性能を代替評価
確認 余裕度 ¹ ²	実機ピットバレル形 基礎ボルト 70 ポンプ取付ボルト 53 電動機取付ボルト 6.3	42	4.7	10	1.6	13	-
評価結果	許容応力を下回っている	許容応力を下回っている	許容応力を下回っている	許容応力を下回っている	許容面圧を下回っている	許容応力を下回っている	左記評価結果により水力性能が維持されると判断

1 余裕度の算定は、水平方向加速度 10.0G と鉛直方向加速度 1.0G を使用。

2 余裕度 = (許容値 - 通常発生値) / 地震による発生値

3 ACT 研究とは、動的機器の地震時機能維持に関する試験研究であり、JEAG4601-1991 追補版にその成果が反映された。

第4表 ピットバレル形ポンプの電動機軸受におけるスラスト荷重

	停止時	起動時	定常運転時
自重 (×10 ³ N)	+ 46.1	+ 46.1	+ 46.1
地震力 (×10 ³ N)	± 46.1	± 46.1	± 46.1
軸推力 (×10 ³ N)	-	+ 122.5	+ 39.2
合計 (×10 ³ N)	0 ~ +92.2	+ 122.5 ~ + 214.7	+ 39.2 ~ + 131.4
許容値 (×10 ³ N)	+ 841.8	+ 841.8	+ 841.8

注) 1 : 鉛直方向加速度 ± 1.0G を考慮。

2 : + は下方向、- は上方向の荷重を示す。

【参考文献】

- (1)(社)日本電気協会 (2006): 水平・鉛直地震動に対する動的機器の地震時機能維持評価法の改定案について、第15回機器・配管系検討会資料 No.15-4-4-2、平成18年9月11日
- (2)共同研究報告書 鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(ステップ3) 平成13年度上半期最終報告書 平成13年9月

コメント内容

応答倍率法による非常用ガス処理系排風機の評価結果が評価基準値に近い値を示しているため、別の評価手法による結果を確認すること。

(平成20年12月15日 耐震・構造設計小委員会構造WG(第25回))

回答

1. 非常用ガス処理系排風機の評価

非常用ガス処理系排風機における基準地震動 S_s に対する設計と同等の手法により耐震安全性評価を実施した結果、第1表のとおりとなり、評価基準値を下回ることを確認した。

第1表 耐震安全性評価結果の比較

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 [MPa]		評価基準値 [MPa]
			応答倍率法	設計と同等の手法	
非常用ガス処理系排風機	排風機取付ボルト	引張応力	169	67	177

なお、応答倍率法による評価手法、設計と同等な手法による評価手法を以下に示す。

(1) 評価条件

非常用ガス処理系排風機における評価条件を第2表に示す。

第2表 評価条件

機器名称	据付場所及び床面高さ [m]	固有周期	水平方向評価震度	鉛直方向評価震度	排風機振動による震度
非常用ガス処理系排風機	原子炉建屋 T.M.S.L.23.5 ^{*1}	- ^{*2}	$C_{H0}=0.78$ (設計時)	$C_{V0}=0.29$ (設計時)	$C_p=0.21$
			$C_H=1.18$ (耐震安全性評価)	$C_V=1.06$ (耐震安全性評価)	

*1：基準床レベルを示す

*2：0.05秒以下であり剛である

(2) 機器要目

排風機取付ボルトの評価に必要な機器要目を第3表に示す。

第3表 機器要目

部材	運転時重量 Wi [kg]	取付ボルト基準面から重心までの距離 hi [mm]	重心とボルト間の水平方向距離 li [mm]	重心とボルト間の水平方向距離 li2 [mm]
	420	600	40	90
排風機取付ボルト	ボルトの軸断面積 Abi [mm ²]	ボルトの本数 ni	評価上引張力を受けるとして期待するボルト本数 nfi	転倒方向
	201.0	4	2	軸

1 - 1 . 応答倍率法による評価手法

(1) 応答比の算定

設備の発生値を算定するにあたり、非常用ガス処理系排風機においては水平加速度、鉛直加速度を用いる機器に分類されるため、基準地震動 S_s による評価震度と、既往評価で用いた評価震度から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を応答比とした。

$$\begin{aligned} \text{応答比} &= \text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right) = \text{MAX} \left(\frac{1.18}{0.78}, \frac{1.06}{0.29} \right) = \text{MAX} (1.52, 3.66) \\ &= 3.66 \end{aligned}$$

(2) 応答倍率法による評価結果

設計時における排風機取付ボルトの引張応力は、 $4.7 \text{ [kg/mm}^2\text{]}$ であることから、(1)で求めた応答比 3.66 を乗じた結果、以下のとおりとなる。

$$\text{算定値} = 4.7 \text{ [kg/mm}^2\text{]} \times 3.66 = 17.20 \text{ [kg/mm}^2\text{]} \quad 169 \text{ [MPa]}$$

1 - 2 . 設計と同等な手法

ボルトの応力は地震による震度、ポンプによる震度およびポンプ回転により作用するモーメントによる引張応力について計算する。

ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として第1図で最外列のボルトを支点とする転倒を考え、これを他方の最外列のボルトで受けるものとして計算する。

引張力 (F_{bi})

$$F_{bi} = \frac{W_i \cdot (C_H + C_P) \cdot h_i + M_P - W_i \cdot (1 - C_P - C_V) \cdot l_i}{n f_i \cdot (l_1 + l_2)}$$

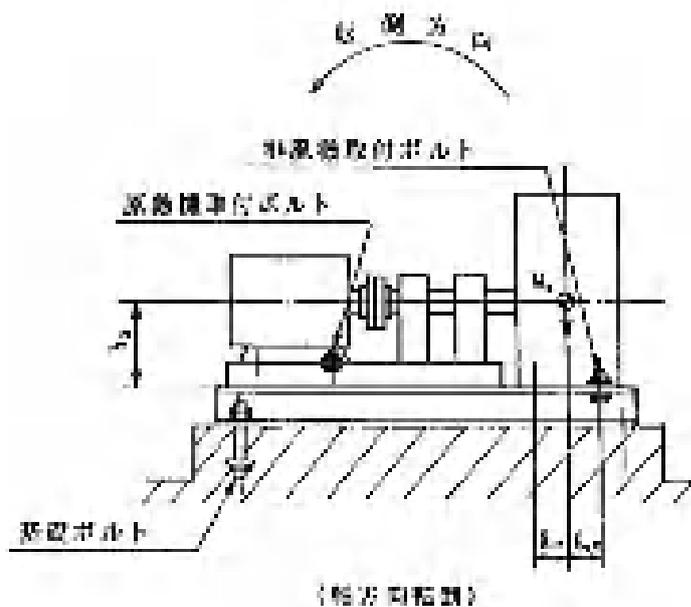
M_p : 排風機の回転により作用するモーメント

$$= \frac{420 \times (1.18 + 0.21) \times 600 + 0 - 420 \times (1 - 0.21 - 1.06) \times 40}{2 \cdot (40 + 90)}$$

$$= 1364.68[\text{kg}] = 13383[\text{N}]$$

引張応力 (σ_{bi})

$$\sigma_{bi} = \frac{F_{bi}}{A_{bi}} = \frac{13383}{201.0} = 67[\text{N}/\text{mm}^2]$$



第1図 計算モデル (軸方向転倒)

2. ほう酸水注入系貯蔵タンクの評価

1. 非常用ガス処理系排風機と同様に、応答倍率法により評価基準値に比較的近い値となったほう酸水注入系貯蔵タンク（基礎ボルト）について設計と同等の手法による耐震安全性評価を実施した。その結果、第4表のとおりとなり、評価基準値を下回ることを確認した。

第4表 耐震安全性評価結果の比較

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 [MPa]		評価基準値 [MPa]
			応答倍率法	設計と同等の手法	
ほう酸水注入系貯蔵タンク	基礎ボルト	せん断応力	126	52	159

なお、応答倍率法による評価手法、設計と同等な手法による評価手法を以下に示す。

(1) 評価条件

ほう酸水注入系貯蔵タンクにおける評価条件を第5表に示す。

第5表 評価条件

機器名称	据付場所及び床面高さ [m]	固有周期	水平方向 評価震度	鉛直方向 評価震度	排風機振動 による震度
ほう酸水注入系貯蔵タンク	原子炉建屋 T.M.S.L.23.5 ^{*1}	0.032	$C_{H0}=0.78$ (設計時)	$C_{V0}=0.29$ (設計時)	$C_p=0.21$
			$C_H=1.18$ (耐震安全性評価)	$C_V=1.06$ (耐震安全性評価)	

*1：基準床レベルを示す

(2) 機器要目

ほう酸水注入系貯蔵タンク（基礎ボルト）の評価に必要な機器要目を第6表に示す。

第6表 機器要目

機器名称	運転時重量 Wo[kg]	ボルトの 軸断面積 Ab[mm ²]	ボルトの本数 n
ほう酸水注入系貯蔵 タンク	40200	452.3	20

2 - 1 . 応答倍率法による評価手法

(1) 応答比の算定

設備の発生値を算定するにあたり、ほう酸水注入系貯蔵タンクにおいては水平加速度、鉛直加速度を用いる機器に分類されるため、基準地震動 Ss による評価震度と、既往評価で用いた評価震度から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を応答比とした。

$$\begin{aligned} \text{応答比} &= \text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right) = \text{MAX} \left(\frac{1.18}{0.78}, \frac{1.06}{0.29} \right) = \text{MAX} (1.52, 3.66) \\ &= 3.66 \end{aligned}$$

(2) 応答倍率法による評価結果

設計時における基礎ボルトのせん断応力は、3.5[kg/mm²]であることから、(1)で求めた応答比 3.66 を乗じた結果、以下のとおりとなる。

$$\text{算定値} = 3.5[\text{kg/mm}^2] \times 3.66 = 12.81[\text{kg/mm}^2] \quad 126[\text{MPa}]$$

2 - 2 . 設計と同等な手法

ボルトのせん断応力は地震による震度により作用するせん断力について計

算する。

せん断応力 (τ_{bi})

$$\begin{aligned}\tau_{bi} &= \frac{C_H \cdot W_O}{n \cdot A_b} \\ &= \frac{1.18 \times 40200}{20 \times 452.3} = 5.243 \text{ [kg/mm}^2 \text{]} \quad 52 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

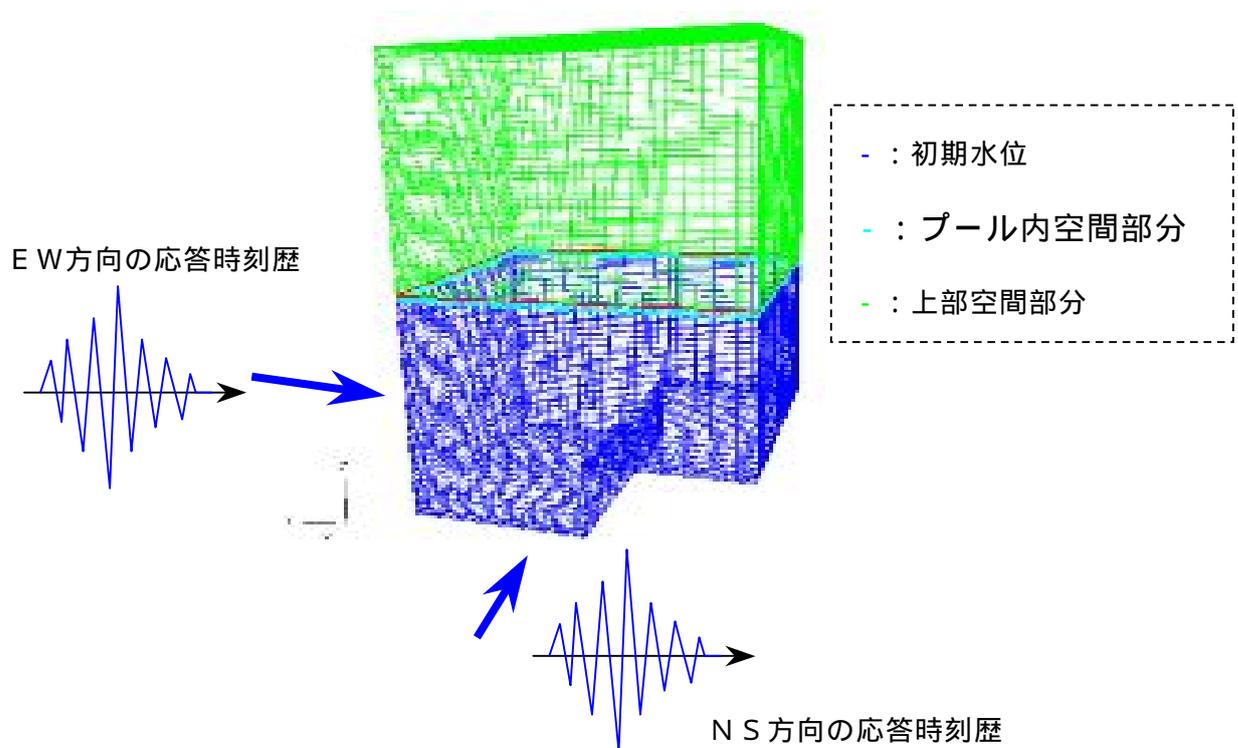
コメント内容

使用済燃料貯蔵プールのスロッシング評価の評価方法を説明すること。

(平成20年12月15日 耐震・構造設計小委員会構造WG(第25回))

回答

使用済燃料貯蔵プールのスロッシング評価は、NS、EWの各方向について、非圧縮性二相流解析コード(解析モデルは第1図参照)にて基準地震動Ss-5を入力とした時刻歴解析を実施している。



第1図 使用済燃料貯蔵プールの解析モデル概要

上記評価により算定した溢水量を踏まえて、以下の確認をしている。

1. 基準地震動Ssによる使用済燃料プールからの溢水量の推定

上記方法にて推定した基準地震動Ssにおける使用済燃料プールスロッシ

ングによる溢水量を第 1 表に示す。

第 1 表 基準地震動 S_s における使用済燃料プール
スロッシングによる溢水量

NS 方向	EW 方向
739m ³	237m ³

2. 溢水による使用済燃料プール水位低下に対する使用済燃料の冷却能力への影響確認

推定した溢水量は、使用済燃料を冷却する能力に影響を与えない。すなわち、溢水の補給は、サプレッションプールから残留熱除去系を通じて補給可能であり、燃料が露出するものではない。

第 2 表 溢水時の燃料プール水位確認結果

	NS 方向	EW 方向
推定溢水量	739m ³	237m ³
使用済燃料プール面積	約 250.6m ²	約 250.6m ²
通常時使用済燃料プール水位	11.5m	11.5m
水位低下量	約 3.0m	約 1.0m
溢水後使用済燃料プール水位	約 8.5m	約 10.5m
使用済燃料貯蔵ラック高さ	4.49m	4.49m

3．溢水による下階の安全系機器への影響確認

使用済燃料貯蔵プール内から溢水した水は、床に設定されているファンネルより最下階の高電導度廃液系サンプピットに流入し、流入した水は当該サンプピットに設置されているサンプポンプにて収集タンクへ送水される。万が一、当該サンプポンプが機能せず当該フロアに水が溜まったとしても、安全上重要な設備は水密扉にて隔離されていることから、溢水により安全機能を喪失することはない。なお、溜まった水は必要に応じて拭き取り作業、仮設ポンプにて汲み出す作業により対応することになると考えている。

コメント内容

荷重の組み合わせの評価において、参照すべきスペクトルの超過発生確率の考え方を示すこと。

(平成 20 年 12 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 25 回))

回答

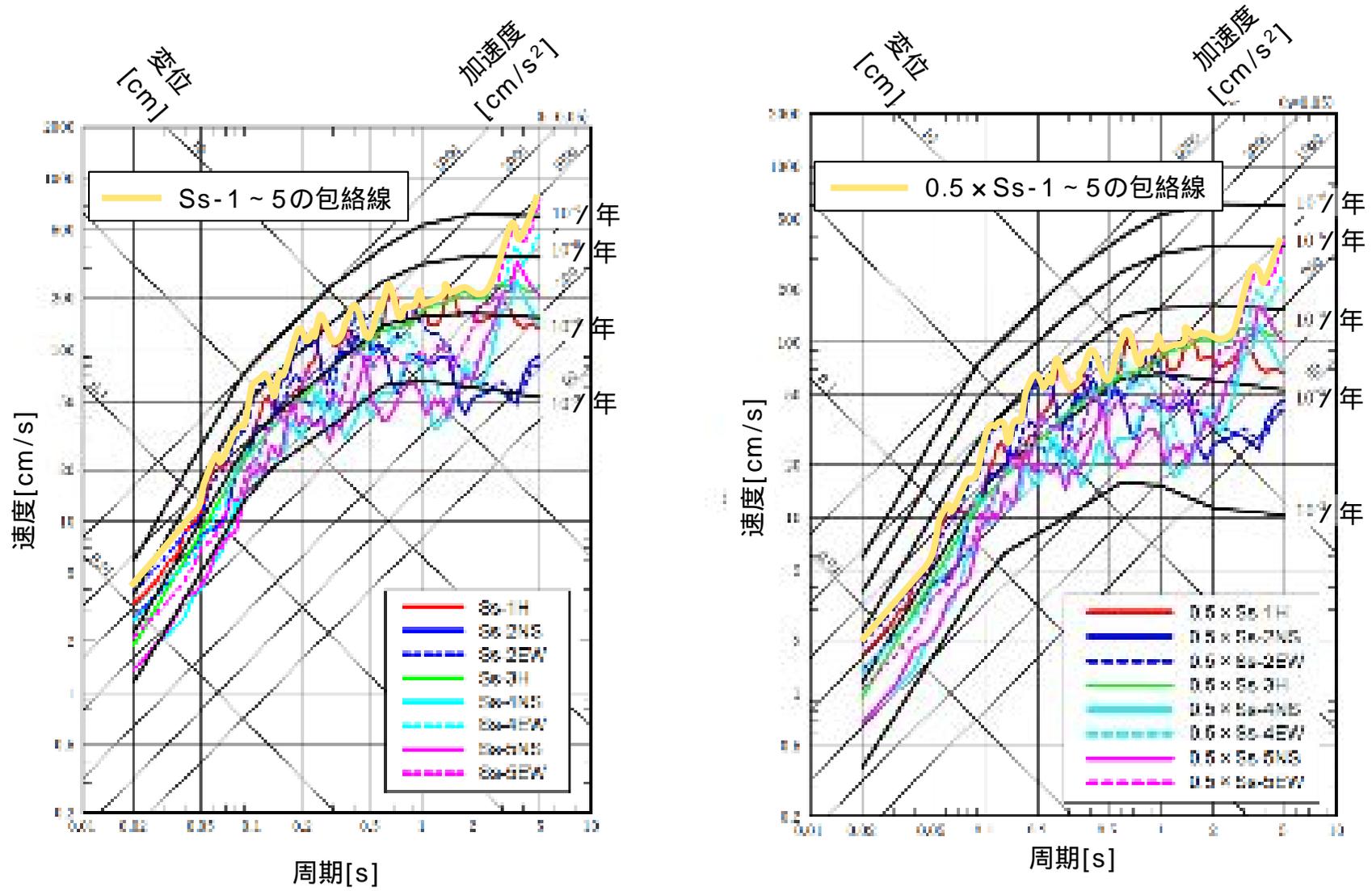
現行の「原子力発電所の耐震設計技術指針」(JEAG 4601・補-1984)(以下、「技術指針」という)においては、プラントの運転状態と基準地震動の同時発生について、その重畳確率により評価の要否を判断することとしている。

これまでの設計においては、根拠となる複数の個別地震動(いわゆる「種地震」による地震動)を一定の発生確率のもと想定し、これらを包絡して基準地震動を定めており、この包絡波の発生確率を上記の重畳確率の算定に使用している。

設計用限界地震 S2	5×10^{-3}	~	1×10^{-5}	回 / 年
設計用最強地震 S1	1×10^{-2}	~	5×10^{-3}	回 / 年

このたび当社は基準地震動 S_s の想定にあたり、F-B 断層、長岡西縁断層帯等、個別地震動として計 5 波を定めたところであるが、上に示したこれまでの設計プラクティスにならい、これらを包絡した地震動を考慮して地震応答解析を実施するとともに、基準地震動の発生確率についても包絡波の発生確率を参照した(第 1 図参照)。

なお、それぞれの個別地震動の発生確率と運転状態の確率との重畳を考慮して、個別地震動ごとに荷重の組合せの要否を判断することも考えられるが、複数の地震動ごとに評価を実施することは、設計ないし評価が煩雑となり合理的ではなく、また、支配的である包絡波について評価を実施しても工学的妥当性は損なわれないと判断されたものと推定する。



第 1 図 Ss、0.5 x Ss の年超過確率

コメント内容

Sd を 0.5 倍の Ss にしたのはなぜか説明すること。

(平成 20 年 12 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 25 回))

回答

1. 弾性設計用地震動 Sd に関する整理

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」で述べられている Sd の設定に関する記述を次の通り整理した。(6. 耐震設計方針(解説) (2) より抜粋)

(1) Sd の設定方法

当該係数の設定に当たっては、基準地震動 Ss の策定の際に参照した超過確率を参考とすることができる。・・・・・・(中略)・・・・・・弾性設計用地震動 Sd と基準地震動 Ss の応答スペクトルの比率 (Sd / Ss) の値は、弾性設計用地震動 Sd に求められる性格上、ある程度以上の大きさであるべきであり、めやすとして、0.5 を下回らないような値で求められることが望ましい。

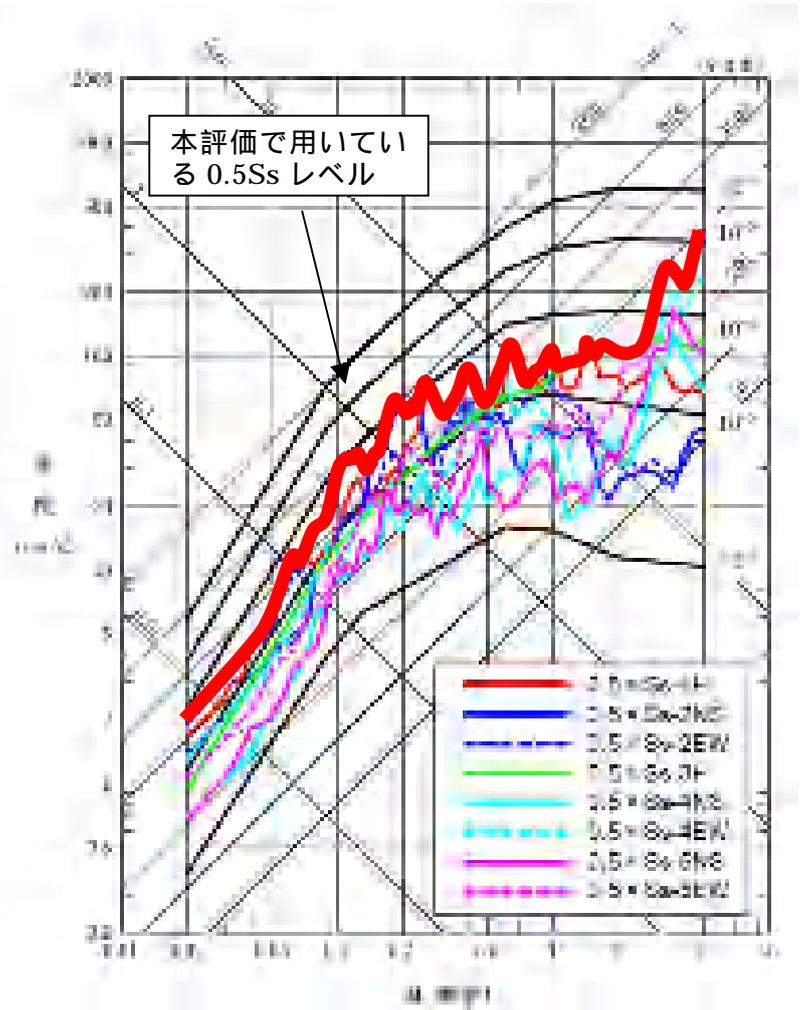
2. 弾性設計用地震動 Sd の設定

(1) 設定方針

弾性設計用地震動 Sd の設定に際しては、事故時荷重と地震荷重を組み合わせる観点から、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1984 に記載のある基準地震動 S1 と事故時荷重の組合せの考え方を参考に設定することとした。

(2) Sd の設定

Sd/Ss の比率は、0.5 を下回らないこととされている。その 0.5 を採用して年超過確率を参照したところ、全ての 0.5Ss の包絡レベルにおいて、年超過確率が概ね $10^{-3} \sim 10^{-4}$ であった。JEAG4601-1984 で想定している事故発生確率が 10^{-4} /年であることを考慮すると、Sd/Ss の比率を 0.5 を超えて設定すると、地震と事故が同時に発生する確率が 10^{-7} /年を下回り、耐震安全性評価において考慮すべき事象とはいえなくなる。このことから、本評価においては、Sd/Ss の比率を 0.5 とした。



第 1 図 0.5Ss の年超過確率

コメント内容

実験等で妥当性が確認された評価基準値を用いているか。

(平成 20 年 12 月 15 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 25 回))

回答

1. 実験等による評価基準値

実験等で妥当性が確認された評価基準値は、以下の通りである。

構造強度評価

1. 配管支持装置（メカニカルスナップ）の評価基準値

動的機能維持評価

1. 制御棒挿入性の評価基準値

構造 W23-1-2「柏崎刈羽原子力発電所 7 号機耐震設計上重要な機器・配管系の耐震安全性評価について」にて説明を実施

2. 弁等の動的機能維持評価基準値

報告書添付 7.4「動的機器の地震時機能確認済加速度について」にて説明を実施

3. 弁を除く機器の鉛直方向の動的機能維持評価基準

本資料の別コメントに対する回答として説明を実施

ここでは、上記のうち、説明を行っていない の配管支持装置（メカニカルスナップ）の評価基準値について説明する。

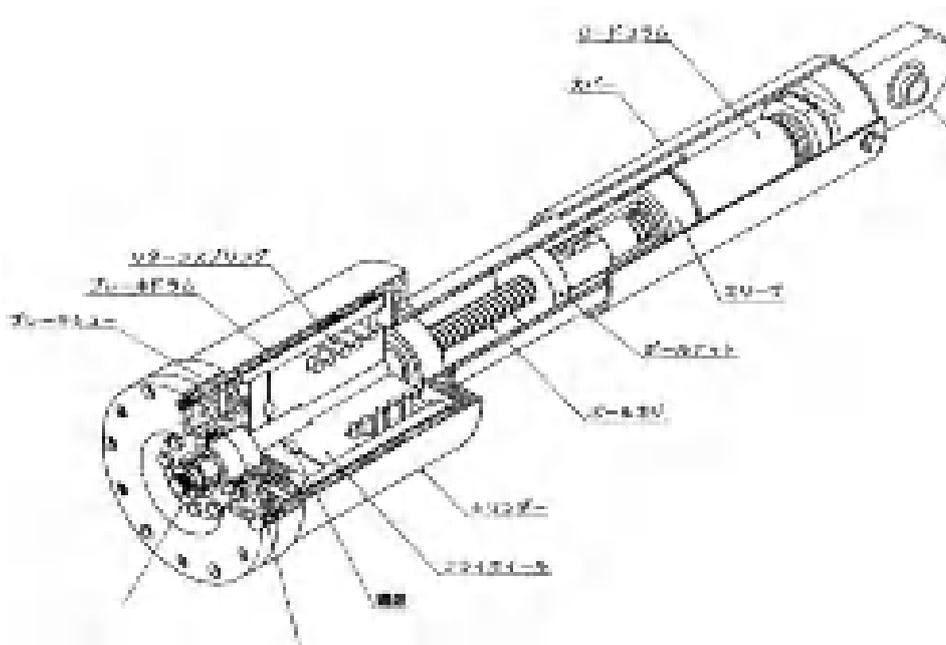
2. 配管支持装置（メカニカルスナップ）の評価基準値について

原子力発電施設が建設されはじめた当初は、配管系の防振装置として油圧防振器（オイルスナップ）が多用されてきた。その後、機械式防振器（メカ

ニカルスナップ)が開発された。メカニカルスナップは、オイルスナップに比べてメンテナンス性が高く、防火対策上の利点があることなどから、現在では、配管の防振器として主流をなしているものである。

(1) メカニカルスナップの機能

メカニカルスナップは、地震によって生じる振動等に対して拘束するとともに、熱膨張などによって生じる低速度移動に対しては拘束せず自由に伸縮する機能を有する支持装置である。第1図にメカニカルスナップ構造図を示す。



第1図 メカニカルスナップ構造図

(2) 既往の研究

a. メカニカルスナップの実用化の検討

メカニカルスナップが開発されたころ、原子力発電施設への実用化の可否を判断するために、各電力会社と各プラントメーカーの共同研究で、メカニ

カルスナップの試験が行われた（「メカニカルスナップの実証に関する研究 昭和 55～56 年度」）。そのなかの一環として、メカニカルスナップの負荷振動試験が行われた。

メカニカルスナップには、その製造メーカーが定める定格容量（荷重値）が存在する。スナップ製造メーカーは、定格容量の 1.5 倍までの配管反力であれば、メカニカルスナップの性能を保証している。この当時の共同研究における負荷振動試験では、この $1.5 \times$ 定格容量の負荷による振動試験を行い、スナップ製造メーカーの性能保証の妥当性を確認した。

b．耐震設計の高度化に伴う検討

前述したメカニカルスナップの実用化の研究では、スナップ製造メーカーの性能保証値の確認にとどまっていた。その後においても、各電力会社と各プラントメーカーは、メカニカルスナップの知見拡充を図っていた（「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） 平成 12 年」）。その知見拡充の研究では、スナップ製造メーカーの保証値である $1.5 \times$ 定格容量を超える範囲の負荷による負荷振動試験を行い、配管反力に対するメカニカルスナップの設計上の適用範囲の明確化を図った。本評価では、この知見拡充の研究による成果を許容基準値とした。

知見拡充の研究では、メカニカルスナップの適用範囲について、1) 試験によりその機能が維持される負荷荷重の確認、2) 各部材の構造強度評価に基づく許容荷重の確認、の 2 つの手法を用いて確認を実施している。

前者の試験による確認は、定格容量を超える荷重を段階的に負荷し、その機能が維持される荷重を確認するものであり、後者は規格等に準拠した構造評価を行い許容される荷重を算出するものである。

(3) 耐震安全性評価における許容基準値

7号機の残留熱除去系配管の支持装置については、前述の知見拡充の研究のうち、試験により機能維持が確認された負荷荷重が得られていたため、その値を評価基準値として適用した。第1表に、関連する評価基準値を示す。

第1表 メカニカルスナップの評価基準値とSsによる評価荷重

基準地震動 Ss による評価荷重 [kN]	スナップメーカー保証値 [kN]	知見拡充による許容基準値 [kN]	
		試験による許容基準値	構造強度評価に基づく許容基準値
5 発生値 4.6 を切り上げ	4 1.5 × 定格容量である 4.5 を切り捨て	27.09	18.82

評価荷重は、残留熱除去系配管の支持装置の耐震安全性評価における発生値（配管反力）を記載

耐震安全性評価のうち、配管支持装置としてのメカニカルスナップの構造強度評価基準値については、ここまで述べてきたとおり、下記の3種類が存在する。

スナップメーカーによる保証値

試験による許容基準値

スナップ構成部品の構造強度評価に基づく許容基準値

および は、ともに試験に基づく許容基準値である。メカニカルスナップの実用化の研究では、 の妥当性を確認した。メカニカルスナップの知見拡充の研究では、 の妥当性を確認した試験方法と同様の試験方法を用いて、 を超える条件でも、スナップ製造メーカーが保証する範囲と同等の性

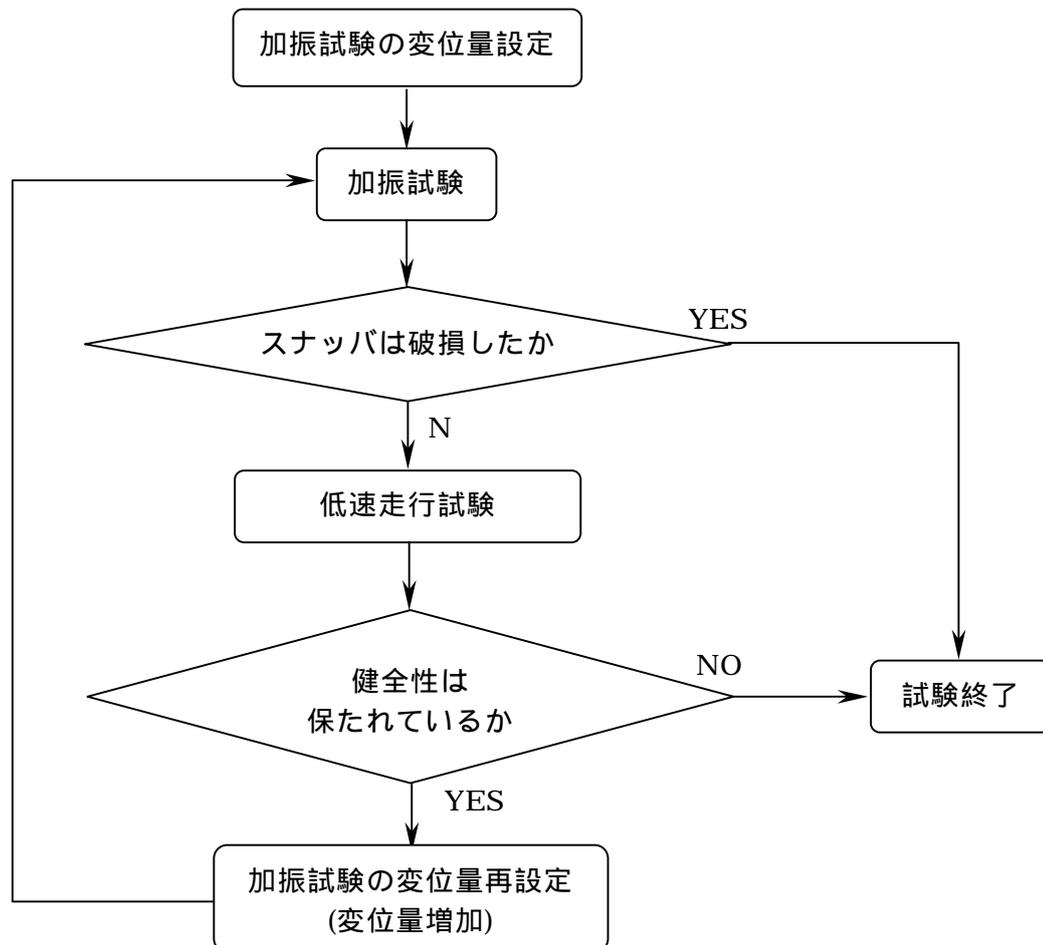
能でメカニカルスナップを使用できることが確認された。また、については、規格等に基づく構造強度評価から、メカニカルスナップの許容基準値を設定した。

耐震安全性評価においては、これらのどの評価基準値を用いることもできると考えている。

< 参考 > メカニカルスナップの機能確認試験と構造強度評価について

1. 機能確認試験

試験のフローを第 2 図に示す。試験は、加振試験と低速走行試験を一連として実施し、設定した変位量（負荷容量）での加振試験を実施したのち、低速走行試験を実施し、健全性が確認されていることを確認する。加振試験での負荷容量を段階的に増加させることにより、機能維持が保たれている負荷容量を確認している。

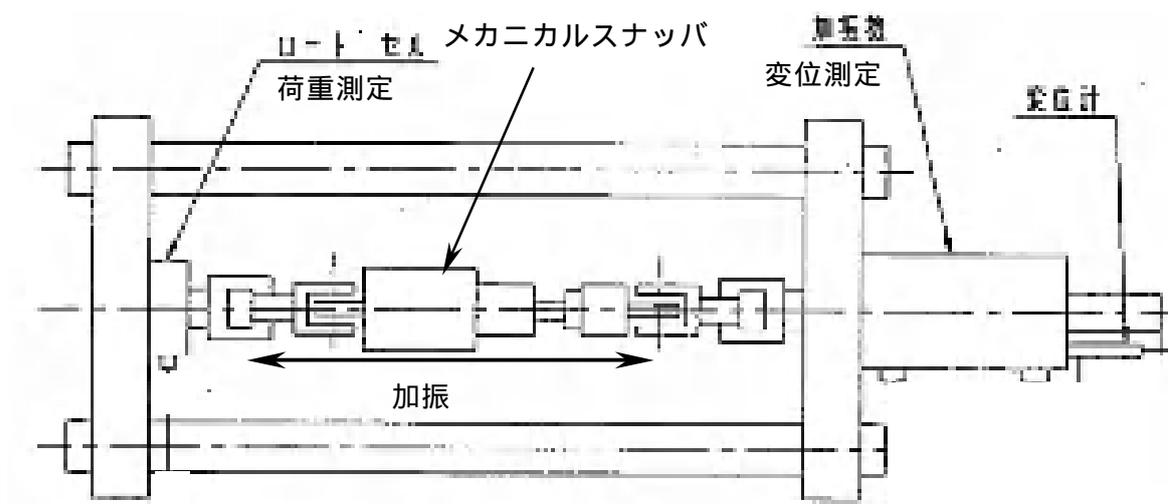


第 2 図 試験フロー

なお、メカニカルスナップのこれらの機能は、通常以下の試験により確認を行っている。

加振試験

メカニカルスナップに繰り返し荷重（振動荷重）を負荷し、振動に対して拘束していることを確認。



第3図 加振試験装置概要

低速速走行試験

低速での引張り・圧縮試験により抵抗力を測定し、健全性が保たれていることを確認。

2. 各部材の構造強度評価

メカニカルスナップが機能維持されるためには、各 부품の構造健全性が維持されることが必要である。この観点から、負荷される荷重に対して各 部品の荷重伝達及び損傷形態を想定したうえで規格等に準拠した構造強度 評価に基づく許容荷重を評価する。各部品毎の許容荷重のうち、最も小さ い荷重を、メカニカルスナップの許容荷重として採用する。

メカニカルスナップ部品の評価法について、ベアリング押え板を例とし て以下に示す。ベアリング押え板及びボルト部拡大図を第 4 図に示す。

当該部品の耐力算出式は下記のように与えられる。

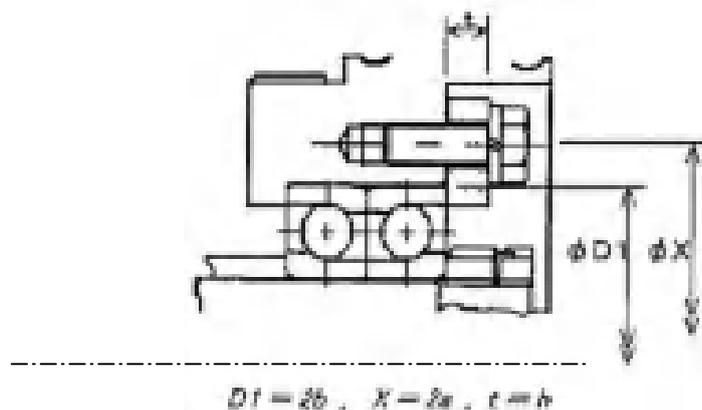
$$F = \frac{0.7Su}{h^2} \times h^2 \times 0.9$$

F : 評価荷重

h : ベアリング押え板の厚さ

：応力係数（機械工学便覧に基づく）

Su : 引張強さ（SMS-3A-100 : 774.2MPa , SMS-6A-100 : 779.1MPa）



第 4 図 ベアリング押え板及びボルト部拡大図

同様の評価を各部品に対してそれぞれ実施し、全部品のうち最小値を許容荷重とするものである。メカニカルスナッパ型式「SMS-03A-100」の評価例を第2表に示す。

第2表 メカニカルスナッパ各部品の構造強度評価

部品	評価	構造強度評価に基づく 許容荷重 [kN]		
		...	SMS-03A-100	...
イーヤ	引張			
ロードコラム	引張		x x x	
ベアリングケース	せん断			
六角ボルト	引張		(最小値)	
ベアリングナット	せん断			
球面軸受	-			
座屈				
最小値 (許容荷重)	