

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-028-10-23 改0
提出年月日	2020年6月2日

容器のスロッシングによる影響評価について

2020年6月

東京電力ホールディングス株式会社

## 容器のスロッシングによる影響評価について

### 1. 概要

容器の内包流体には、水平方向の地震によりスロッシングが発生し、地震のエネルギーが分散される。そのため、容器胴板及び基礎ボルトの耐震強度評価はスロッシングを考慮しない方が保守的な評価結果となる。

一方、容器の屋根においては、スロッシングで内包流体が屋根に到達する際に荷重が作用する。そこで、スロッシングで内包流体が容器の屋根に与える影響について整理する。

### 2. 評価対象の選定

スロッシングによる影響評価の対象として、スロッシングによる溢水等のおそれがあるものを選定する。以下に影響評価の対象とした容器を示す。

名称	形状	内径 (mm)	全高 (mm)	胴高さ (mm)	水位 (mm)
軽油タンク A (7号機)	平底たて置き円筒形容器	9,800	10,392	9,500	7,495
軽油タンク B (7号機)	平底たて置き円筒形容器	9,800	10,344	9,500	7,495
軽油タンク A (6号機)	平底たて置き円筒形容器	9,800	10,344	9,500	7,495
軽油タンク B (6号機)	平底たて置き円筒形容器	9,800	10,392	9,500	7,495
ほう酸水注入系貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器	3,300	4,200	4,194	4,184

### 3. 評価方法

容器のスロッシングによる波面が屋根に衝突することで、屋根に荷重が作用する。この場合の流体力として、容器内包液の全質量 $m$ に水平方向応答加速度 $\alpha_H$ が作用した際の荷重 $F$ が、鉛直方向に作用するものと保守的に仮定する。

評価対象部位は、最弱部である屋根と胴板の溶接部または、屋根の設計弱部（以下「屋根の接続部」という。）とし、荷重 $F$ を屋根の接続部の全周断面積 $A$ で除した応力 $\sigma$ が評価基準値を下回ることを確認することで、屋根の接続部の応力評価（以下「保守的な評価」という。）を行う。

なお、評価に用いる荷重については、屋根の鉛直方向地震力による荷重とスロッシングによる荷重 $F$ との組合せが考えられるが、仮にこれらを組み合わせた場合であっても、屋根の質量は容器内包液の全質量 $m$ に比べて十分小さく、屋根の鉛直方向地震力による荷重として考えた場合には「保守的な手法」の荷重 $F$ に包絡される。

評価部位の概略図を図1に、評価に用いる記号の説明を表1に示す。

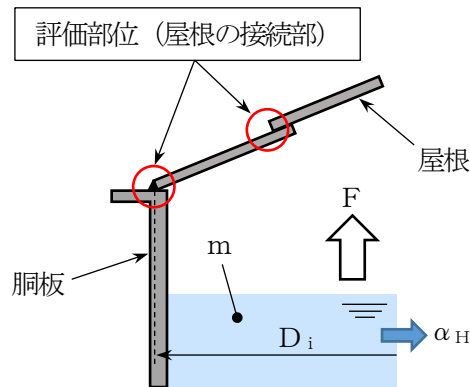


図1 評価部位の概略図

表1 評価に用いる記号

記号	記号の説明	単位
F	スロッシングによる荷重	N
m	容器内包液の質量	kg
$\alpha_H$	水平方向応答加速度	$m/s^2$
a	屋根の接続部ののど厚	mm
$D_i$	屋根の接続部の平均直径	mm
A	屋根の接続部の全周断面積	$mm^2$

評価式を以下に示す。

$$\text{発生応力 } \sigma = \frac{F}{A}$$

ここで、 $F = m \alpha_H$

$$A = \pi a D_i$$

容器について、屋根の接続部の強度を下記の手順で評価し、スロッシングの影響が無いことを確認する。評価フローを図2に示す。

- ① 屋根に内包液が到達するか。また、屋根に角度があるか\*1。
- ② 内包液が到達する場合は、「保守的な評価」で屋根の接続部の発生応力が評価基準値以内か。
- ③ 屋根の接続部の発生応力について、「詳細評価」が必要な場合\*2は、ハウスナー理論等によるスロッシングを考慮した応力評価を実施。

\*1 参考文献（容器構造設計指針・同解説）より容器の屋根の角度が小さい場合、固定屋根によるスロッシングの影響が拘束され、スロッシングを起こした内包液が上昇できず腰掛圧が生じないことが示されている。よって、容器の屋根の角度が小さい場合には、②以降の評価の対象外とする。

\*2 屋根の接続部の発生応力は、容器屋根に作用する荷重に比例し、屋根の接続部の長さに反比例する。また、荷重が作用し得る屋根面積は容器径の二乗で増加し、屋根の接続部の長さは容器径に比例して増加するため、容器が大型化するほど屋根の接続部の発生応力が大きくなる傾向がある。（図3を参照）

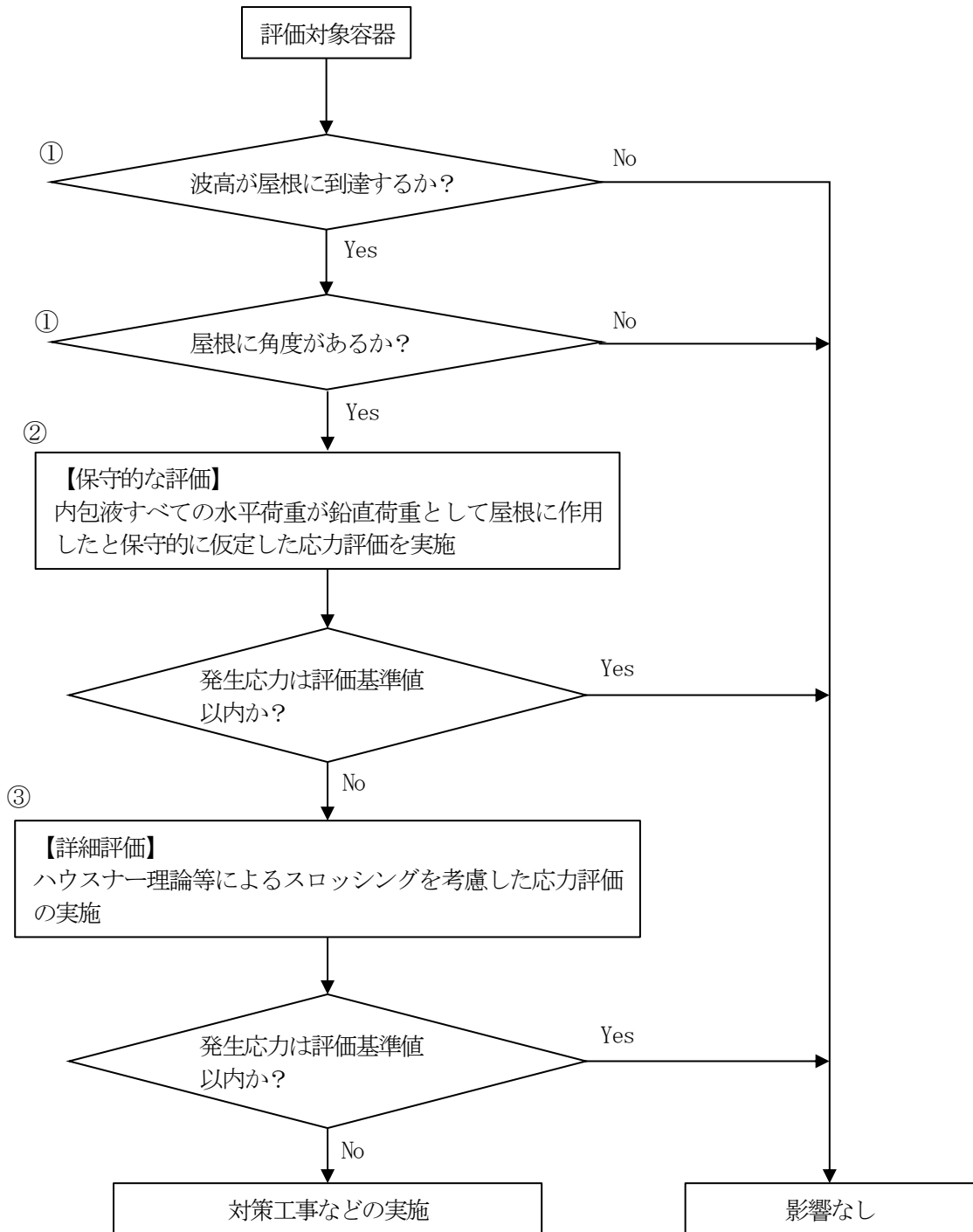


図2 屋根の接続部に対する耐震評価フロー

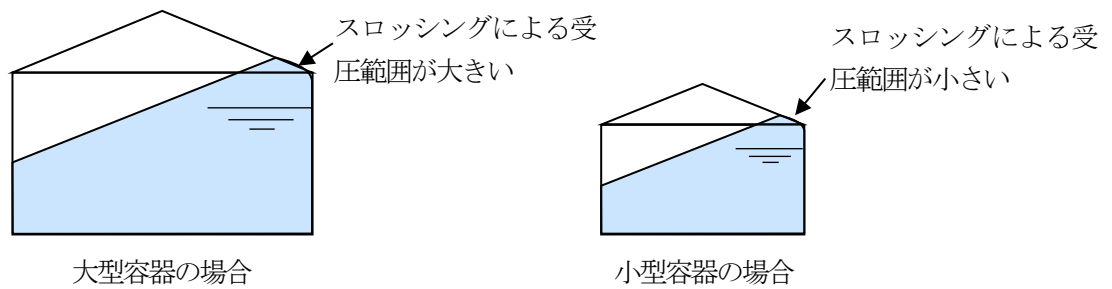


図3 開放容器の屋根に対するスロッシング評価の比較

4. 屋根の接続部に対する評価フローについて

図2に示す評価フローにおいて、①にて波高が容器屋根に到達するか評価した後、容器の屋根に角度がある場合には、「②【保守的な評価】」と「③【詳細評価】」の評価を行う。具体的な内容を以下に示す。

・②【保守的な評価】

内包液を容器質量と同様に死荷重とみなして応力評価を実施している。その理由として、内包液をスロッシングにより生じる動液圧荷重として考慮した場合、内包液の荷重が一部上方向に逃げてしまうが、内包液を死荷重とみなした場合、内包液の全荷重が一方方向に作用し、保守的な評価である。

・③【詳細評価】

ハウスナー理論やポテンシャル理論を適用する場合、地震荷重は静的荷重として扱う。そのため動液圧荷重は、時間経過に応じた動的荷重より荷重が大きくなり、保守的な評価である。

図2の評価フローによる各容器の評価手法を表2に示す。

表2 容器の評価手法

名称	形状	評価手法
軽油タンクA (7号機)	平底たて置き円筒形容器	②
軽油タンクB (7号機)	平底たて置き円筒形容器	②
軽油タンクA (6号機)	平底たて置き円筒形容器	②
軽油タンクB (6号機)	平底たて置き円筒形容器	②
ほう酸水注入系貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器	①

軽油タンクは、タンク胴板及び基礎ボルトについては、耐震評価において保守的な評価を実施していることから、図2の評価フローの①は屋根に到達するものとして、②の評価を行う。

5. 屋根の接続部の耐震強度評価におけるスロッシングの影響

3項で示す②の評価式を用いて保守的な評価を行った結果、屋根の接続部の発生応力が評価基準値以内であることを確認した。表3に評価結果を示す。

表3 評価結果

名称	発生応力 [MPa]	評価基準値 [MPa]
軽油タンクA (7号機)	83	
軽油タンクB (7号機)	83	
軽油タンクA (6号機)	43	
軽油タンクB (6号機)	43	

なお、スロッシングによる屋根の接続部の評価としては、圧力技術第17巻第4号1979「固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計(第2報)」(浅井 修 他)において、屋根に働く流体力に衝撃圧 $P_i$ 及び腰掛圧 $P_h$ を用いる方法もあるが、「化学プラントの耐震設計」(柴田 碧)において、衝撃圧 $P_i$ について圧力自体大きい作用時間は短いため影響を無視して、作用時間の比較的長い腰掛圧 $P_h$ の影響だけを考えることができると記載されていることから、腰掛圧 $P_h$ について表4のとおり考察した。

その結果、「保守的な評価」により算出した評価用荷重が腰掛圧 $P_h$ による評価により算出した荷重より必ず大きくなることから、「保守的な評価」により影響がないことを確認した。

表4 容器内包流体のスロッシングによる評価用荷重の比較

比較項目	保守的な評価	腰掛圧 $P_h$ による評価
流体の質量	容器内包流体の全質量 (大)	スロッシング波高が評価点を越える部分の流体の質量 (小)
評価用加速度	地震による水平方向加速度 (>1 G) (大)	重力加速度 (=1 G) (小)
評価用荷重	大	小

## <参考1>スロッシングに対する評価対象部位の妥当性について

平底たて置円筒形容器を含む開放型タンクの屋根については、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005/2007年追補版) JSME S NC1-2005/2007」のうち、クラス2容器に係る要求事項である「PVC-3930 屋根がない場合の形状規定」及び同解説(別紙参照)に基づき、以下のとおり設計を行っている。

- ・屋根の板厚は、4.5 mm 以上であること。
- ・(屋根と胴板の) すみ肉溶接部が4.5 mm を超える場合は、過圧力時の逃がし装置を設けること。

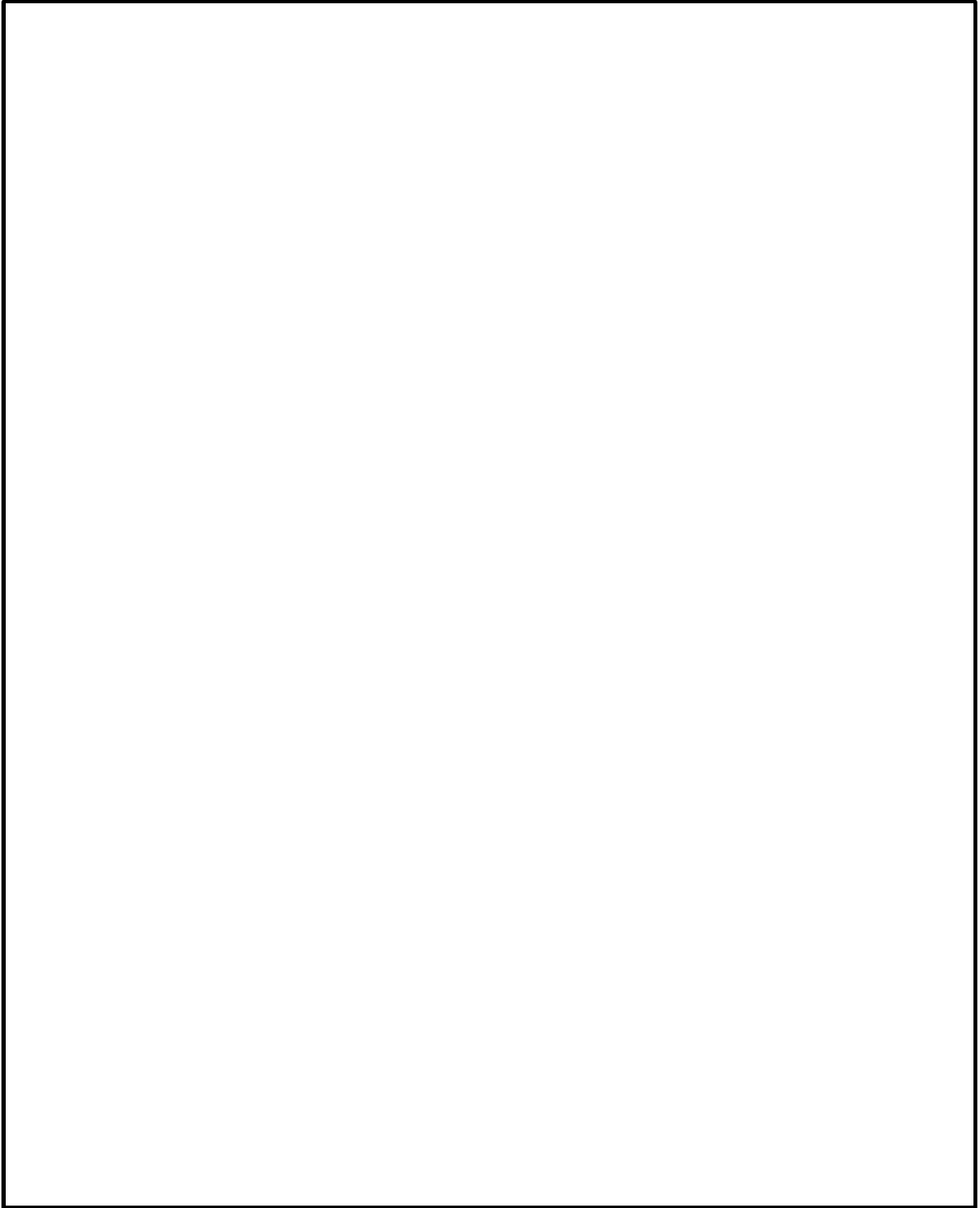
上記2点から、すみ肉溶接部を4.5 mm 未満と設計する場合は、当該部位が最弱部となり、過圧時にここから圧力を逃がすような設計となっている。

軽油タンクは、平底たて置円筒形容器に該当し、屋根の板厚を22 mm、屋根と胴板のすみ肉溶接部を22 mm として設計し、加圧力時に圧力を逃がす設計として、屋根と胴板の接続部よりタンク中心側に、4.5 mm 未満のすみ肉溶接部(設計弱部)を設けている。

スロッシングによる荷重は、屋根と胴板の接続部に最も大きな荷重が作用する。

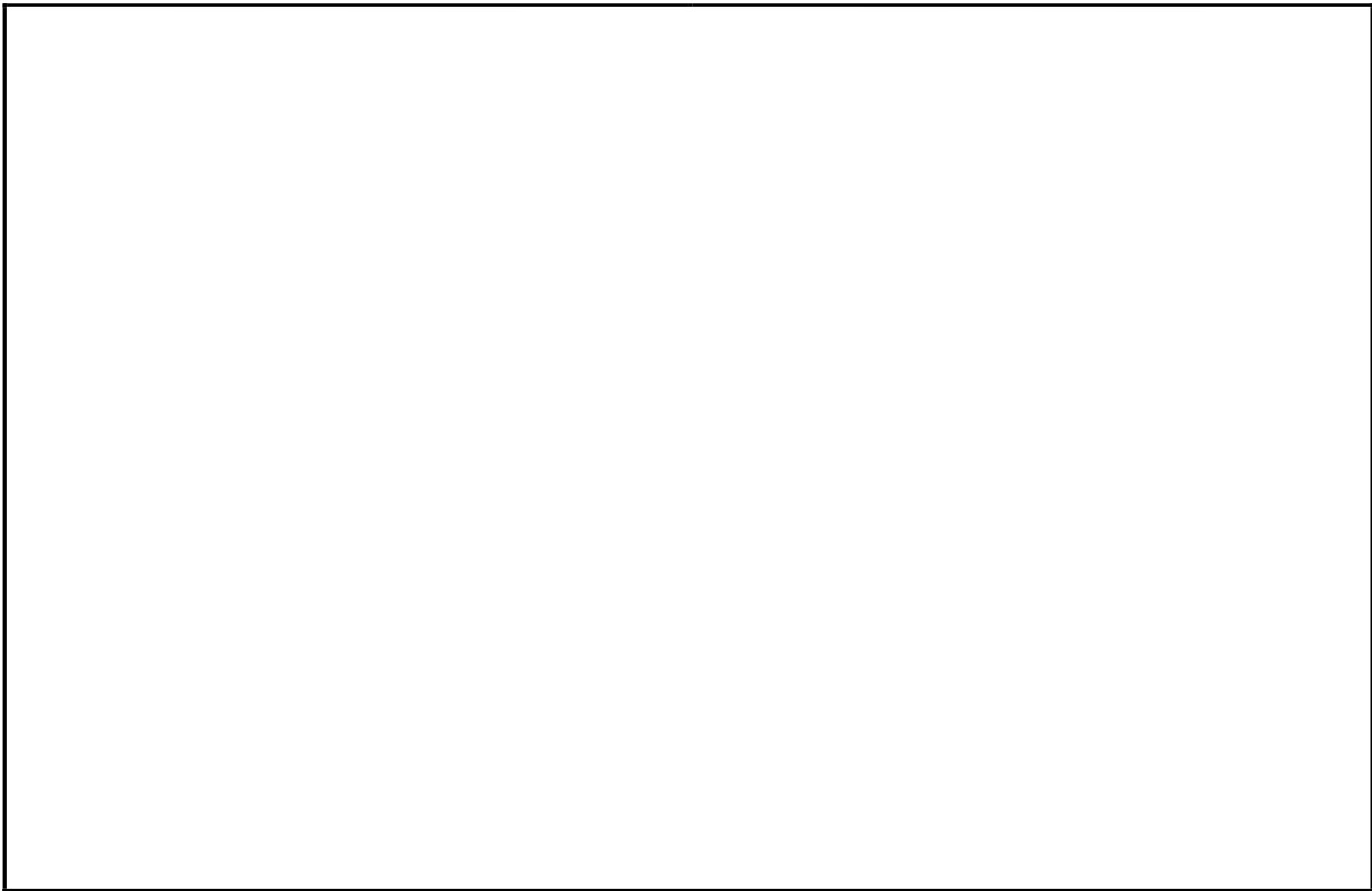
一方の設計弱部である屋根の接続部は、評価点が屋根と胴板の接続部に比べ内側にあるため、作用する荷重も屋根と胴板の接続部に比べ小さいが、荷重を負担する断面積が小さいことから、それぞれのすみ肉溶接部(「屋根の接続部」)を評価対象部位に設定し、それぞれの屋根の接続部の水平投影面に対する内包流体の質量を考慮して評価を行うことは妥当であると考えられる。

発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005/2007年追補版） JSME S NC1-2005/2007 抜粋





<参考2> 容器構造設計指針・同解説 抜粋



<参考3>化学プラントの耐震設計 抜粋

