

# 女川原子力発電所2号炉 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の 変更について(コメント回答)

---

設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）

平成31年4月2日

東北電力株式会社

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

# 目次

---

1. 審査会合での指摘事項一覧
2. 審査会合での指摘事項に対する回答

# 1. 審査会合での指摘事項一覧

---

# 1. 審査会合での指摘事項一覧

No	項目	審査会合日	対応状況	回答
1	サプレッションチェンバの耐震設計の全体像を整理した上で、今回実施している評価の妥当性を提示すること。	H30.6.7	H31.1.29 ご説明済	既工認からの変更点及び目的を踏まえ、各変更点に対する検討内容、検討結果及び耐震設計への配慮事項について整理し、今回実施している評価の妥当性を確認した。
2	内部水の有効質量を適用して地震荷重を設定するにあたり、今回実施した振動試験や解析と、実機との相違をどのように設計へ反映するのか、整理して提示すること。	H30.6.7	H31.1.29 ご説明済	各段階で検討に用いた解析モデルと実機との相違を整理し、この相違に対する設計への配慮事項について整理した。
3	振動試験に用いている水が常温であることの妥当性を実機における水温との関係等も踏まえて整理して提示すること。	H30.6.7	H31.1.29 ご説明済	振動試験に用いている水が常温であることの妥当性を実機における水温との関係等も踏まえて整理した。
4	サプレッションチェンバに地震荷重として作用する有効質量は均一でないことを踏まえ、サプレッションチェンバ各部の地震荷重を算出するのに適した地震応答解析モデルとなっているか整理して提示すること。	H30.6.7	H31.1.29 ご説明済	内部水による流体圧力の観点、容器設計における配慮（強め輪）を踏まえ、3次元はりモデルを用いることは妥当であることを確認した。
5	スロッピングによる内部構造物の影響について、水平2方向の地震入力による影響も含めた評価を提示すること。	H30.6.7	H31.1.29 ご説明済	水平2方向の地震入力による影響も含めた評価を行い、設計基準事故に想定される水力学的動荷重と同程度であることを確認した。
6	Nastran とOpenFOAM の有効質量の算出結果について、縮小体モデルと実機モデルにおける解析結果の比率に差異があることの要因を提示すること。	H30.6.7	H31.1.29 ご説明済	NASTRANによる試験（試験体解析モデル）及び実機（実機解析モデル）による有効質量比の差が内部構造物（強め輪）の影響であることを確認した。

# 1. 審査会合での指摘事項一覧

No	項目	審査会合日	対応状況	回答
7	バルジング振動モードの影響評価における地震応答解析に3次元はりモデルを適用することの妥当性について、タンク構造体と内部水の各々の振動挙動とその相互影響を踏まえて、評価方針を整理して提示すること。	H31.1.29	本日回答	サプレッションチェンバの容器構造及び内部水を有することを踏まえ、バルジングによるサプレッションチェンバへの影響を解析的に分析し、地震応答解析に3次元はりモデルを適用することの妥当性を確認する方針とする。 本資料P6～8にて回答
8	ボックスサポート付け根部の局部変形の影響評価における3次元はりモデルの妥当性について、評価方針を整理して提示すること。	H31.1.29	本日回答	ボックスサポートとサプレッションチェンバの接合部(以下「ボックスサポート付け根部」という。)におけるサプレッションチェンバシェル部の局部剛性を考慮した応答解析を行い、サプレッションチェンバシェル部の局部変形による影響を定量的に確認することによって3次元はりモデルの妥当性を確認する方針とする。 本資料P9にて回答
9	3次元はりモデルで設定するGuyanの縮約法による回転質量について、加振試験で計測された脚部の鉛直荷重との比較等により妥当性の確認を行うこと。	H31.1.29	本日回答	実機を縮小模擬した円環形状容器(試験体)を用いた振動試験で計測された荷重と、地震応答解析(3次元シェルモデル、3次元はりモデル)によって得られる荷重とを比較した。 その結果、振動試験で計測された荷重と地震応答解析によって得られた荷重は、おおむね一致していることから、NASTRANのGuyan縮約法を用いた3次元はりモデルは妥当である。 本資料P10～16にて回答
10	地震応答解析に3次元はりモデルによるスペクトルモーダル解析を用いることの妥当性について、これまでの検討内容も踏まえて、詳細設計段階における妥当性の確認方針を提示すること。	H31.1.29	本日回答	3次元はりモデルを用いた動的解析に当たっては、高次モードを考慮したスペクトルモーダル解析を行い、高振動数の影響確認を行う方針について、まとめ資料(4条-別紙4-参7-9)に追記した。
11	Guyanの縮約法について、算定式等の算定プロセスを示すことにより、縮約法を用いることの妥当性及び適切性を提示すること。	H31.1.29	本日回答	Guyanの縮約法の算定式から、縮約法の妥当性及び適切性について、まとめ資料(4条-別紙4-参5-5)に追記した。

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答

---

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 7】

### (1) 指摘事項

- ・バルジング振動モードの影響評価における地震応答解析に3次元はりモデルを適用することの妥当性について、タンク構造体と内部水の各々の振動挙動とその相互影響を踏まえて、評価方針を整理して提示すること。

### (2) 回答

- サプレッションチェンバの耐震設計においては、内部水及び容器の振動モードを考慮し、流体解析によるスロッシング評価及び3次元はりモデルによる地震応答解析を実施する。ここで、内部水を有する容器に対する既往知見<sup>※</sup>として、特に薄肉円筒容器(縦置き)については、バルジング(ビーム振動及びオーバル振動に分類)が生じることが知られていることから、サプレッションチェンバの耐震設計では、ビーム振動を3次元はりモデルを用いた地震応答解析により地震荷重を評価し、オーバル振動については、強め輪によりサプレッションチェンバの変形を防止する設計である。
- 本検討では、サプレッションチェンバの容器構造(円環形状)及び内部水を有することを踏まえ、バルジングによるサプレッションチェンバへの影響を解析的に分析し、地震応答解析に3次元はりモデルを適用することの妥当性を確認する方針とする。
- バルジングによる複雑な挙動を適切に把握するためには、段階的な検討が必要なため、まずは実機のサプレッションチェンバの一部(3セグメント)を3次元シェル(横置円筒形状)でモデル化して応答解析を行い、サプレッションチェンバの振動モード、強め輪の効果及び内部水の影響を定量的に確認する。
- また、上記の検討結果を踏まえ、より詳細な検討が必要となった場合は、次の段階として、サプレッションチェンバ全体をモデル化した検討を行う。
- 検討結果については、詳細設計段階にて説明する。

表1 振動モードに対するサプレッションチェンバの耐震設計

振動モード (既往知見 <sup>※</sup> に基づく定義)		振動の特徴	サプレッションチェンバの耐震設計
スロッシング		大きな液面変動を伴い揺動	汎用流体解析コードOpenFOAMにより算出したスロッシング荷重を考慮
バルジング	ビーム振動	タンクがあたかも梁のように振動	NASTRANにより算出した有効質量を考慮した3次元はりモデルによる地震荷重を考慮
	オーバル振動	タンク壁面が花びら状に変形する振動	S/C内部に強め輪(合計64枚)を取り付け、サプレッションチェンバの変形を防止(サプレッションチェンバのオーバル振動を抑制)

※ 振動試験による円筒形貯水タンクの耐震性評価—動液圧分布の入力加速度依存性について—, INSS JOURNAL, Vol.11, pp.117-128(2004)

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 7】

- 汎用流体解析コードOpenFOAMで算出した圧力コンター図によれば、地震時のサプレッションチェンバ内部水の圧力分布は各セグメントの範囲で極端な圧力変動を起こしていないため、1セグメントの内部水の圧力による振動影響を考慮することで、サプレッションチェンバ全体のオーバル振動の傾向を把握することが可能と考える。これを踏まえて、影響検討に用いるモデル化範囲は、対象の1セグメントに加えて両側セグメントを合わせた3セグメントとし、モデル境界部の影響を排除する。

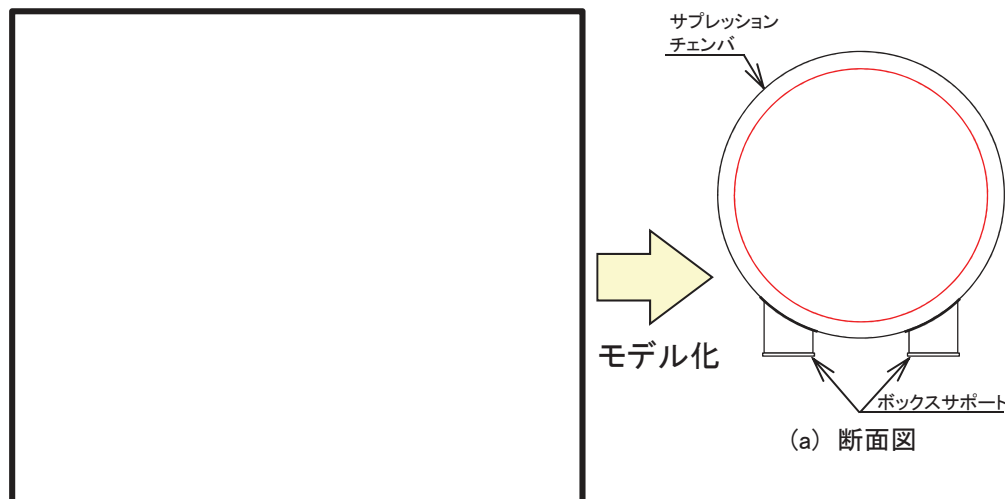
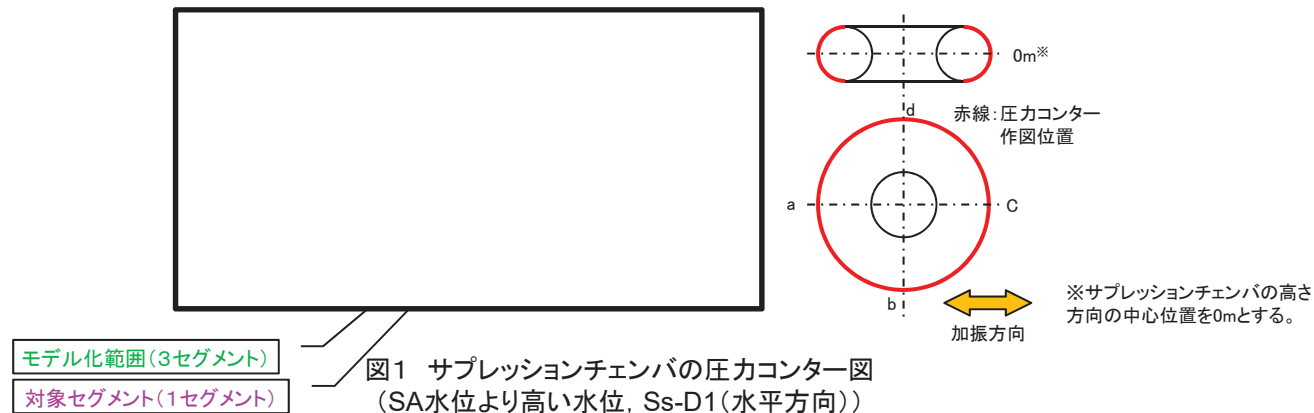


図2 サプレッションチェンバ断面図(平面)

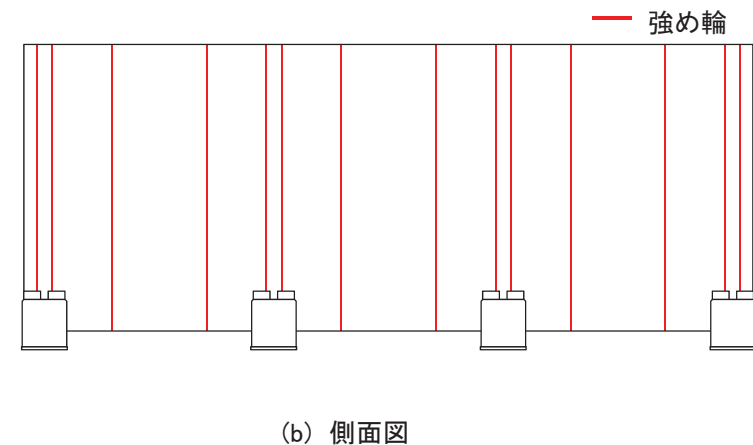


図3 解析モデル

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 7】

- 影響検討に用いる検討ケースを表2に示す。各検討ケースの結果の比較により、強め輪の効果、内部水の影響及びその組合せにより容器及び内部水による振動モードへの影響について分析を行う。

表2 バルジングに対する影響検討

検討 ケース	モデル化条件				解析方法	検討内容
	サプレッション チェンバシェル	ボックス サポート	強め輪	内部水		
1	3セグメントを 横置き円筒容器 として3次元シェル モデルでモデル化	実機 模擬	なし	なし	・応答解析 → NASTRAN  ・内部水のモデル化 → NASTRANの 仮想質量法	横置き円筒容器の振動モードを確認する
2			実機模擬	なし		ケース1との比較により、強め輪の効果を確認する
3			なし	考慮		ケース1との比較により、内部水の影響を確認する
4			実機模擬	考慮		サプレッションチェンバの振動モード、強め輪の効果及び内部水の影響を確認する

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 8】

### (1) 指摘事項

- ・ボックスサポート付け根部の局部変形の影響評価における3次元はりモデルの妥当性について、評価方針を整理して提示すること。

### (2) 回答

- ボックスサポートとサプレッションチェンバの接合部(以下「ボックスサポート付け根部」という。)におけるサプレッションチェンバシエルの局部変形を防止するため、ボックスサポートは当て板を介してサプレッションチェンバシエルに取り付けられている。また、サプレッションチェンバシエルの変形を防止するため、内部に強め輪が取り付けられている。そのため、ボックスサポート付け根部の剛性は高く、サプレッションチェンバの地震応答解析に用いる3次元はりモデルにおいては、ボックスサポート付け根部を剛構造としている。
- 本検討では、ボックスサポート付け根部のサプレッションチェンバシエルの局部剛性を考慮した応答解析を行い、サプレッションチェンバシエルの局部変形による影響を定量的に確認することによって3次元はりモデルの妥当性を確認する方針とする。なお、ボックスサポートは水平(半径)方向に可動する構造であり、ボックスサポート付け根部の水平(半径)方向の剛性は、地震応答解析へ影響を与えるものではないため、剛構造とする。
- 検討結果については、詳細設計段階にて説明する。

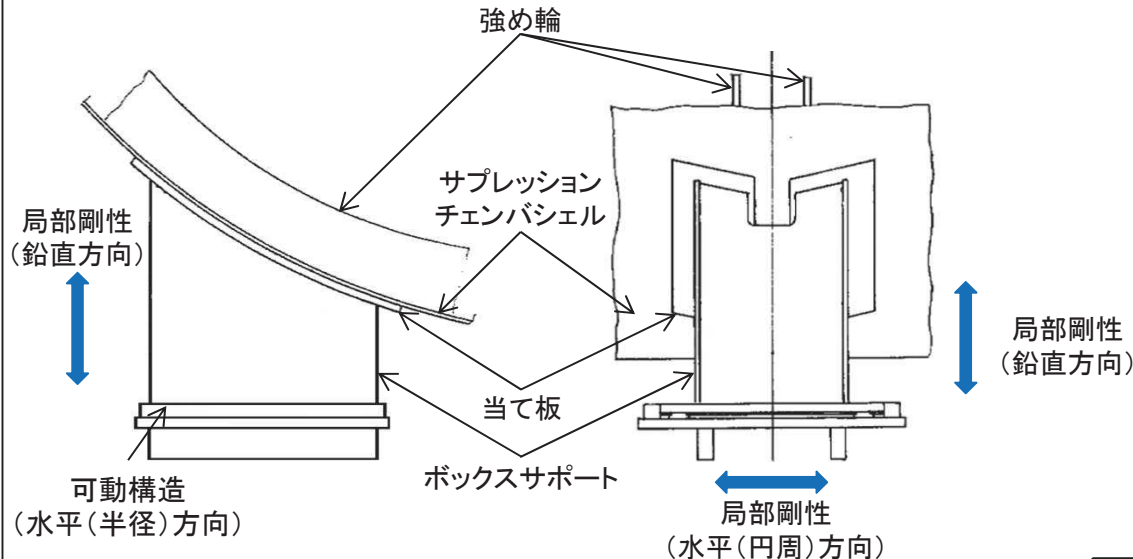


図4 ボックスサポート構造図



図5 サプレッションチェンバの地震応答解析モデル

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 9】

### (1) 指摘事項

- ・3次元はりモデルで設定するGuyanの縮約法による回転質量について、加振試験で計測された脚部の鉛直荷重との比較等により妥当性の確認を行うこと。

### (2) 回答

- サプレッションチェンバの地震応答解析モデルにおいては、内部水の重心位置を適切に考慮するため、NASTRANの機能であるGuyan縮約法により算出される有効質量を3次元はりモデルの質点位置に設定している。このGuyan縮約法については、前回会合にて、自由表面を有する円筒容器モデルに対する検討結果により妥当性を説明した。
- 本検討では、さらに、有効質量を考慮した地震応答解析における鉛直荷重の妥当性及びGuyan縮約法の妥当性を確認するため、実機を縮小模擬した円環形状容器（試験体）を用いた振動試験で計測された荷重と、以下の2モデルの地震応答解析によって得られる荷重とを比較した。

#### ① 3次元シェルモデル

NASTRANで算定した有効質量を試験体のシェル要素に付加した3次元シェルモデル

#### ② 3次元はりモデル

NASTRANで算定した有効質量をGuyan縮約法を用いて試験体のはり要素に付加した3次元はりモデル  
(今回工認におけるサプレッションチェンバの地震応答解析モデルの設定と同様)

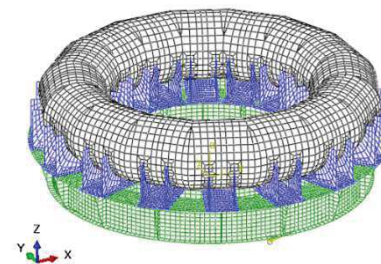
## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 9】

### (2) 回答

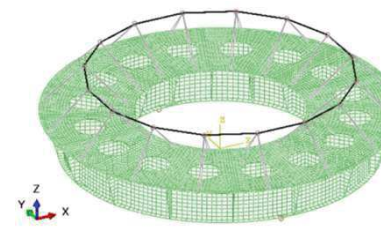
- ▶ 地震応答解析条件は、表3に示すとおり。地震応答解析における入力加速度は、架台上で計測された加速度を模擬する。ここで、解析上入力する加速度時刻歴は、振動台上の計測値を用いることとし、振動台上から架台上までの地震動の伝搬（構造減衰等）を考慮した加速度時刻歴を分力計位置に入力している。
- ▶ 水平方向（X方向）の加振に伴う内部水の有効質量による鉛直荷重は、加振直交方向（Y方向）を軸として、加振方向（X方向）に設置された分力計に作用するため、加振方向の分力計における荷重を比較対象とした。

表3 解析条件

項目	内容	
解析モデル	3次元シェルモデル	3次元はりモデル
モデル	試験体	シェル要素
	架台	はり要素
内部水の有効質量の算定方法	NASTRANの仮想質量法により有効質量を算定	
内部水の有効質量のモデル化	試験体のシェル要素に付加	Guyan縮約法を用いて試験体のはり要素に付加
境界条件	試験体と架台、架台と分力計：剛結合	
水位条件	高水位	
入力加速度	架台上の加速度時刻歴を模擬（水平方向(X方向)、鉛直方向(Z方向)）	
解析コード	NASTRAN	



a. 3次元シェルモデル



b. 3次元はりモデル

図6 解析モデル

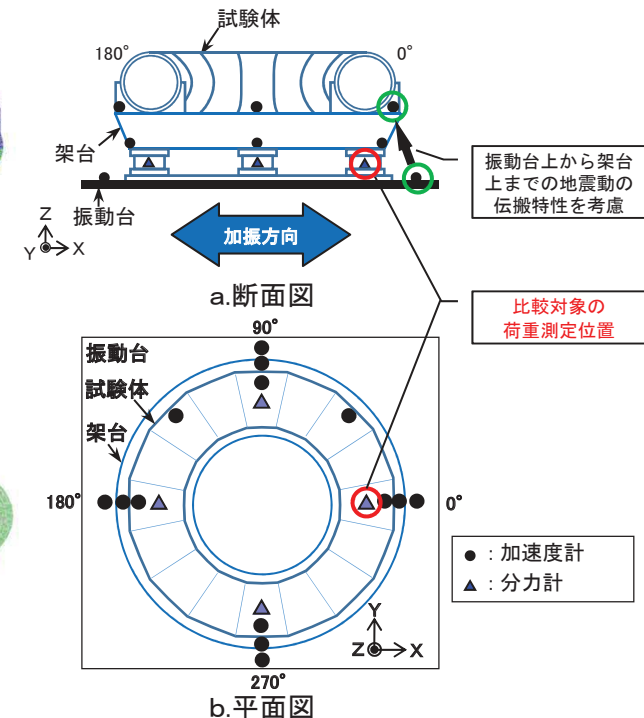
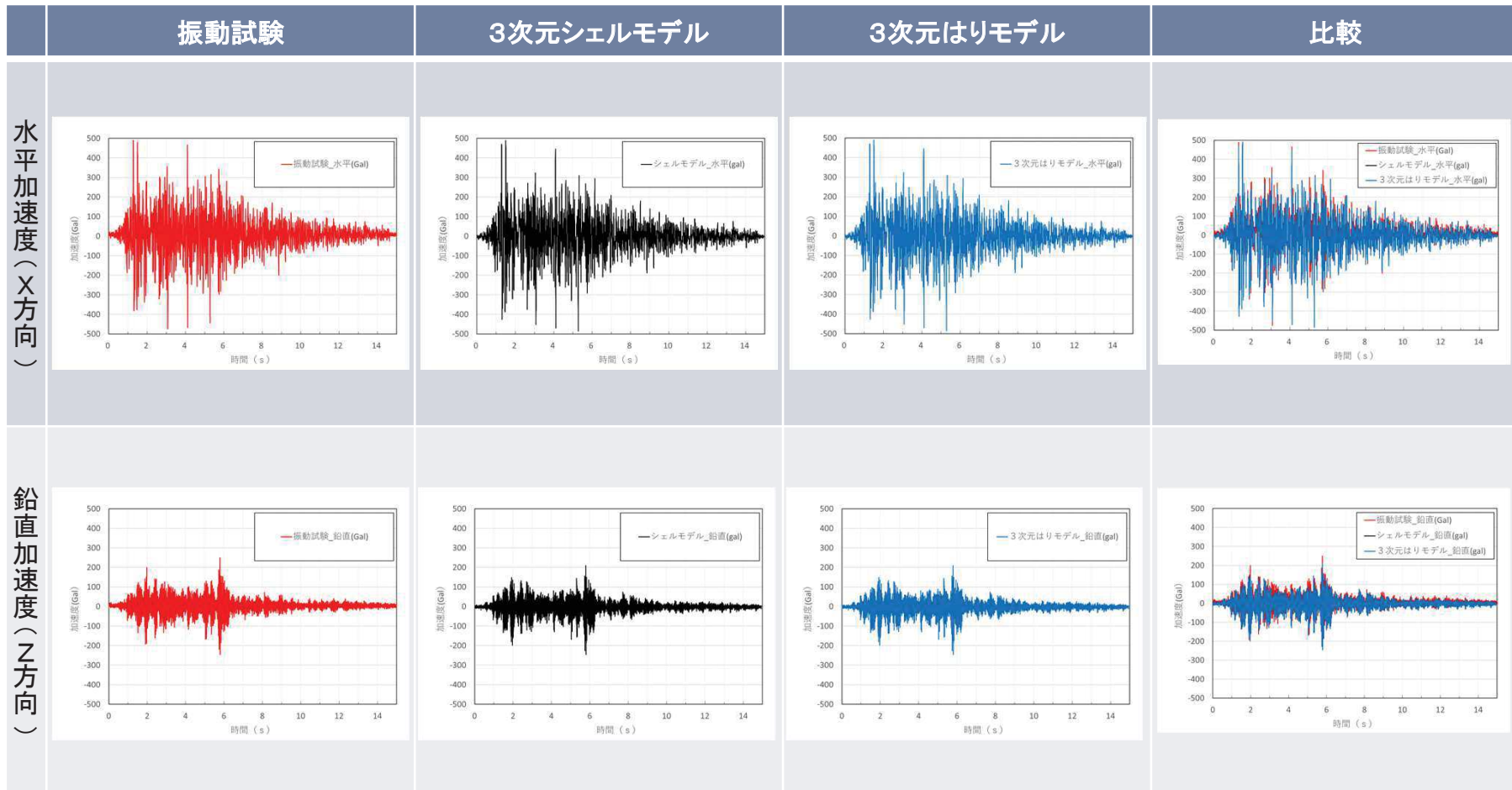


図7 荷重の比較位置

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 9】

- 3次元シェルモデル及び3次元はりモデルにて解析した架台上の加速度時刻歴は、振動試験で得られた架台上の計測加速度時刻歴をおおむね模擬できていることを確認した。

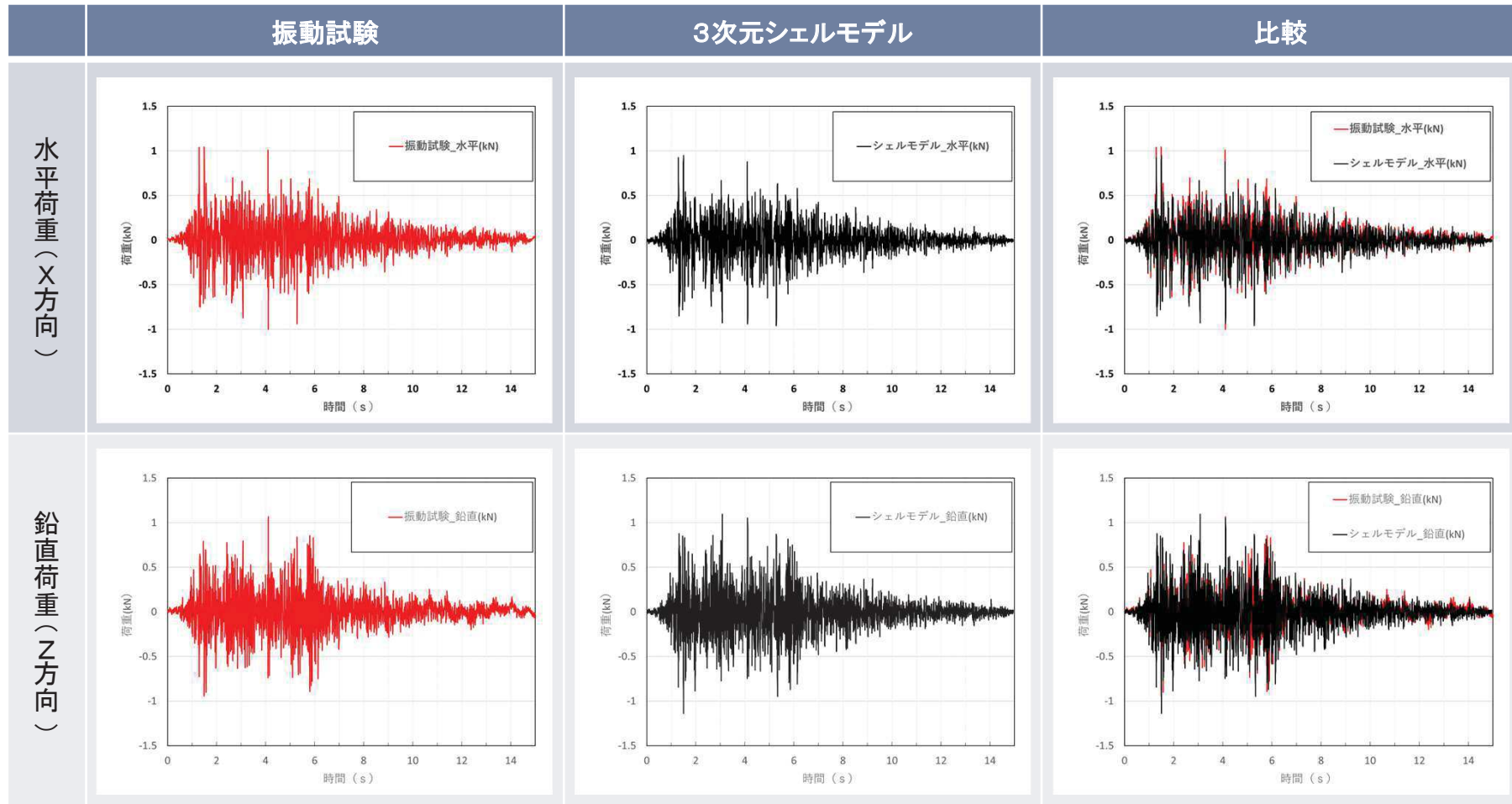
表4 架台上の加速度時刻歴の比較



## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 9】

- 3次元シェルモデルによる水平及び鉛直荷重の解析結果は、振動試験で得られた計測荷重時刻歴とおおむね一致している。

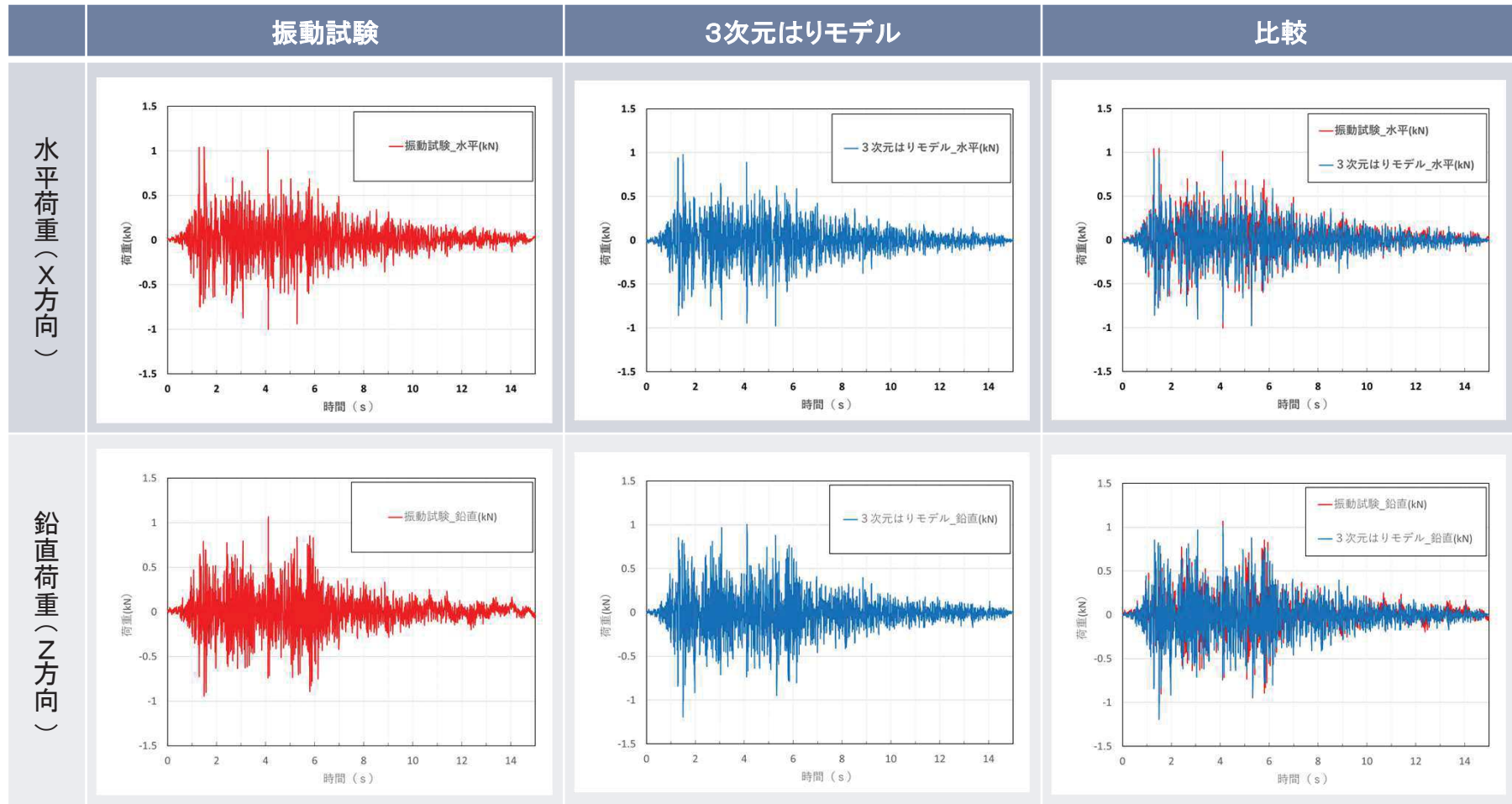
表5 荷重時刻歴の比較(振動試験, 3次元シェルモデル)



## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 9】

- 3次元はりモデルによる水平及び鉛直荷重の解析結果は、3次元シェルモデルと同様に振動試験で得られた計測荷重時刻歴とおおむね一致している。

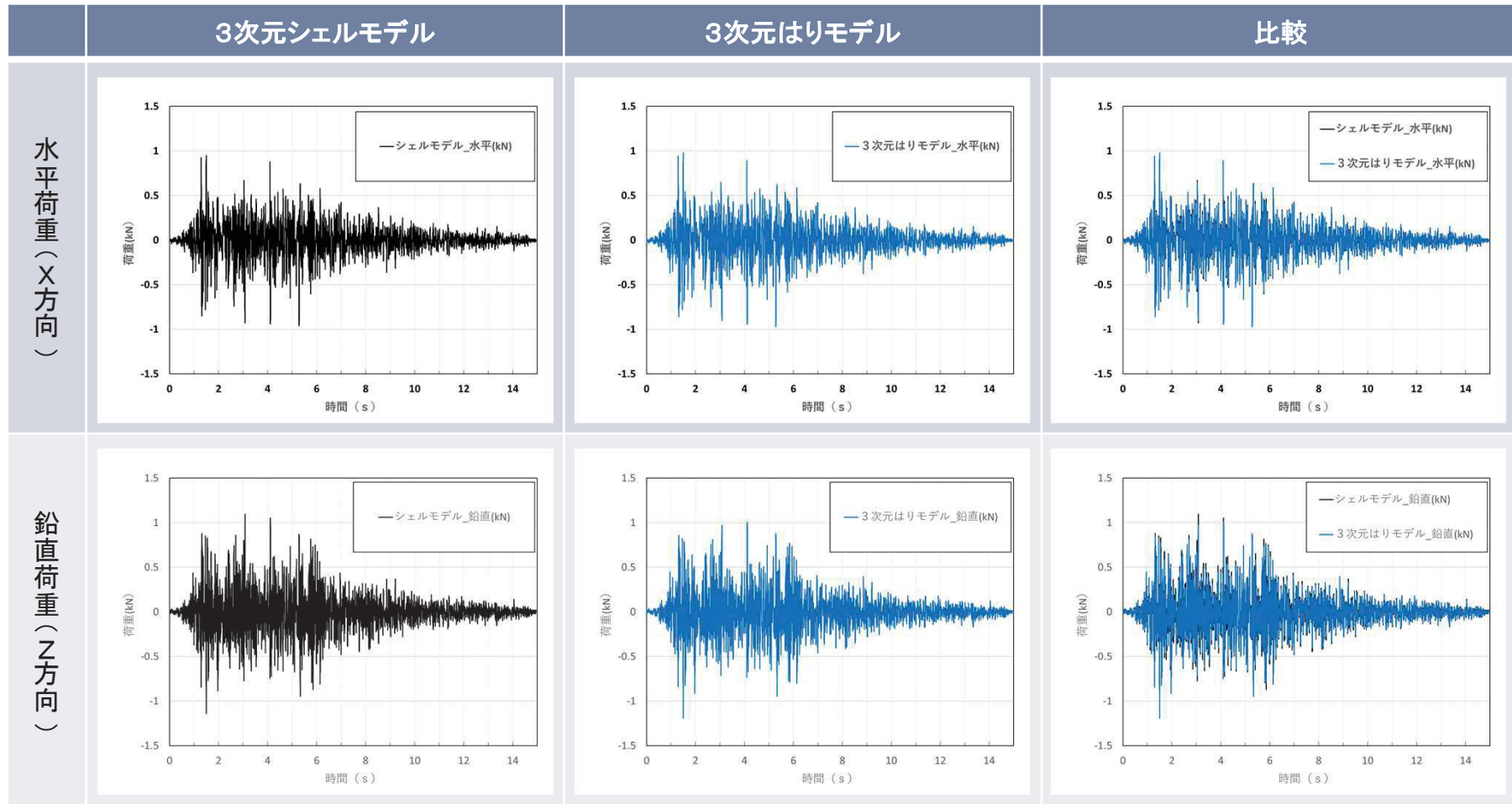
表6 荷重時刻歴の比較(振動試験, 3次元はりモデル)



## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 9】

- 3次元シェルモデルと3次元はりモデルによる水平及び鉛直荷重の解析結果は、よく一致している。

表7 荷重時刻歴の比較(3次元シェルモデル, 3次元はりモデル)



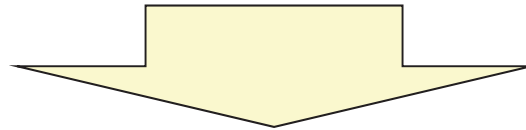


## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 9】

- 振動試験の計測荷重の最大値に対して3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる荷重の解析結果の最大値は、水平及び鉛直方向ともにおおむね一致している。
- ここで、水平方向の最大荷重について、振動試験よりも地震応答解析（3次元シェルモデル及び3次元はりモデル）がわずかに小さくなった要因は、振動試験ではスロッシング荷重も含んでいることに対して、地震応答解析はスロッシング荷重を含まず、有効質量による地震荷重のみを評価するためと考えられる。なお、実機の耐震評価では、個別にスロッシング荷重を算出するため、このことは実機の耐震評価において影響を与えるものではない。

表8 最大荷重の比較

		①振動試験	②3次元シェルモデル	③3次元はりモデル	荷重比		
					②/①	③/①	③/②
最大荷重 (kN)	水平方向 (X方向)	1.05	0.96	0.98	0.92	0.94	1.02
	鉛直方向 (Z方向)	1.07	1.14	1.20	1.07	1.12	1.05



- したがって、振動試験で計測された荷重に対して3次元シェルモデル及び3次元はりモデルによる地震応答解析で得られた荷重時刻歴及び最大荷重ともにおおむね一致していること、また、3次元シェルモデルと3次元はりモデルの荷重時刻歴及び最大荷重がよく一致していることから、サプレッションチェンバに対する耐震評価におけるNASTRANのGuyan縮約法を用いた3次元はりモデルは妥当である。