

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-34_改2
提出年月日	2021年9月16日

補足-600-40-34 原子炉ウェルカバーの耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

目次

1.	はじめに	1
2.	検討方針	2
2.1	支持部で想定される破壊形式に対する検討方針	2
2.2	浮上りに対する検討方針	2
3.	検討結果	2
3.1	支持部で想定される破壊形式に対する検討結果	2
3.2	浮上りに対する検討結果	4
3.2.1	浮上り量の評価方法	4
3.2.2	評価用地震動	7
3.2.3	浮上り量の評価結果	14
3.2.4	浮上りによる影響確認結果	15
4.	まとめ	19

1. はじめに

添付書類「VI-2-11-2-11 原子炉ウェルカバーの耐震性についての計算書」(以下「原子炉ウェルカバーの耐震計算書」という。)では、原子炉ウェルカバーの支持部について、圧縮力に対する耐震評価を実施しており、せん断力に対する耐震評価は原子炉ウェルカバー本体(以下「原子炉ウェルカバー」という。)に対してのみ実施している。

また、「補足-600-2 耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について」では、原子炉ウェルカバーについて、鉛直加速度により浮上りが発生しても設置状況へ影響を及ぼすことはないことを説明している。

本資料は、原子炉ウェルカバーの支持部で想定される破壊形式に対する検討を行うとともに、鉛直加速度が1Gを超えることにより発生する浮上りの影響確認を実施したものである。

2. 検討方針

2.1 支持部で想定される破壊形式に対する検討方針

原子炉ウェルカバールの支持部で想定される破壊形式を示した上で各破壊形式に対する検討を行う。その結果、原子炉ウェルカバールの耐震計算書における原子炉ウェルカバール支持部の耐震評価が適切であることを確認する。

2.2 浮上りに対する検討方針

原子炉ウェルカバールの設置レベルにおける地震応答(加速度時刻歴, 速度時刻歴及び変位時刻歴)を用いて, 鉛直加速度が 1G を超えることにより発生する浮上り量を算出し, 浮上りが発生しても嵌め込み深さを超えずに原子炉ウェルカバールの設置状況に影響がないことを確認する。また, 浮上りによる衝突時の荷重の影響についても検討する。

3. 検討結果

3.1 支持部で想定される破壊形式に対する検討結果

図 1 に原子炉ウェルカバールの支持部で想定される破壊形式を示す。図 1 に示すように, 原子炉ウェルカバールの支持部では, 斜め方向及び鉛直方向の滑りせん断破壊が考えられるため, それぞれについて検討した。

(1) 斜め方向の滑りせん断破壊

原子炉ウェルカバールが水平移動しないことを踏まえると, 斜め方向の滑りせん断破壊が発生した場合においても, 原子炉建屋の躯体(以下「建屋躯体」という。)に新たに支持点を生じ, 落下に至らないため影響はないと考えられる。

(2) 鉛直方向の滑りせん断破壊

鉛直方向の滑りせん断破壊については, 建屋躯体のせん断力に対する検討を実施することとなる。ここで, 建屋躯体の断面寸法は原子炉ウェルカバールの断面寸法より大きいため, 建屋躯体より先行して原子炉ウェルカバールの鉛直方向の滑りせん断破壊が生じると考えられる。原子炉ウェルカバールのせん断力に対する耐震評価は原子炉ウェルカバールの耐震計算書にて実施しており, その健全性が確認されていることを踏まえると, 建屋躯体の健全性は担保されていると言える。

以上より, 原子炉ウェルカバールの支持部について, 圧縮力に対する耐震評価を実施することが適切であることを確認した。

原子炉ウェルカバーのせん断力に対する健全性は、
原子炉ウェルカバーの耐震計算書にて確認済

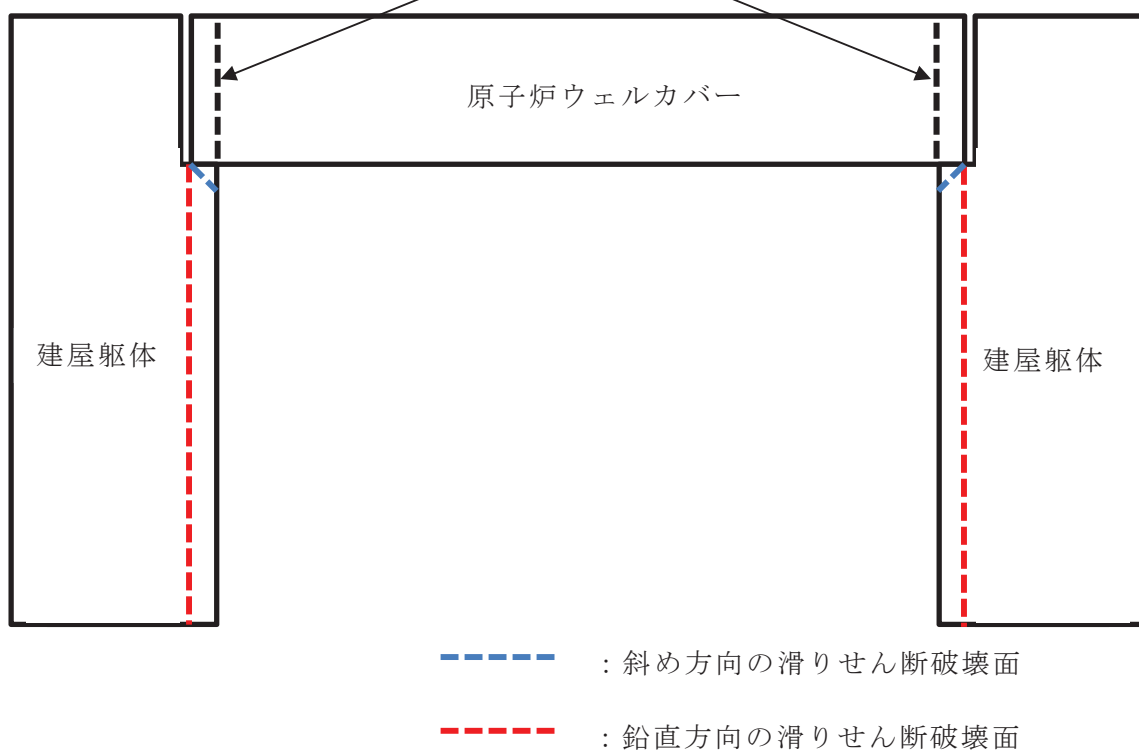


図1 原子炉ウェルカバーの支持部で想定される破壊形式

3.2 浮上りに対する検討結果

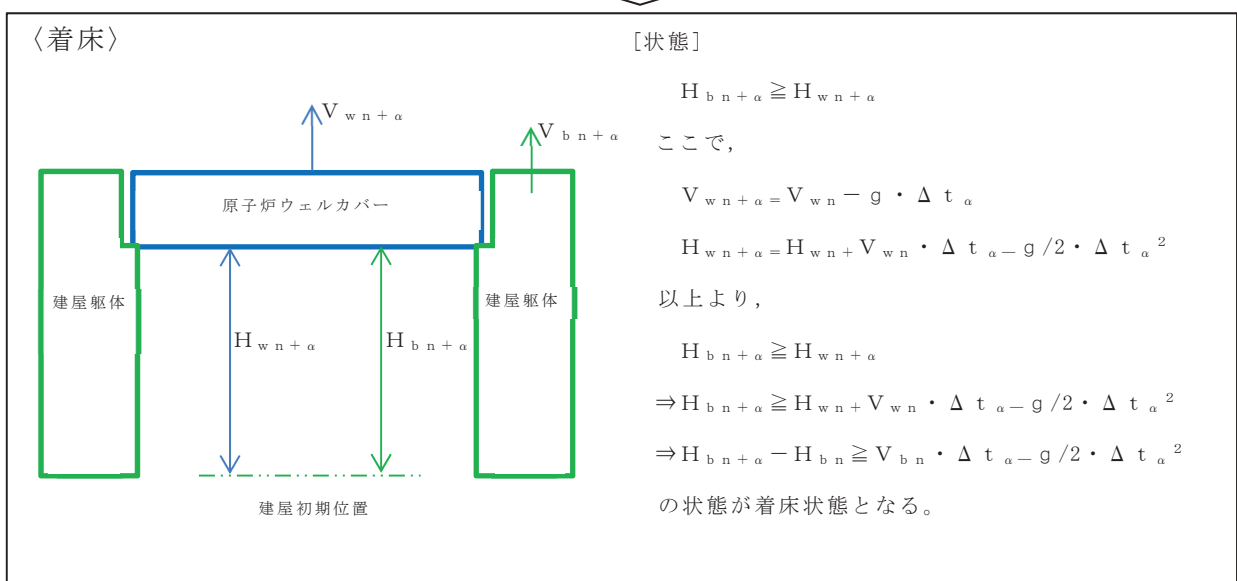
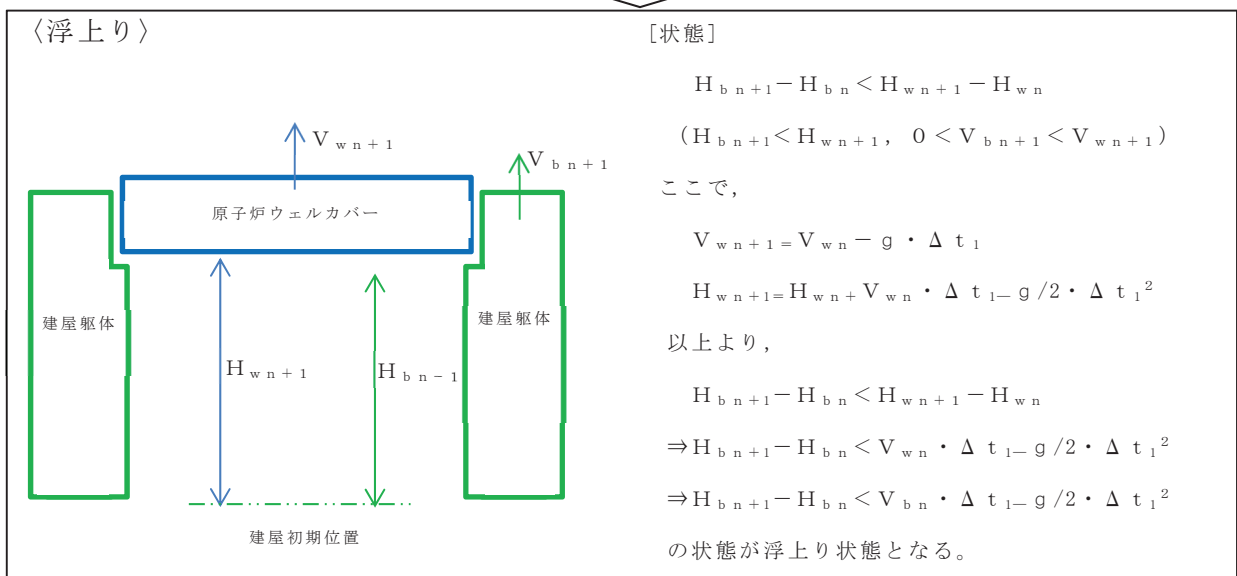
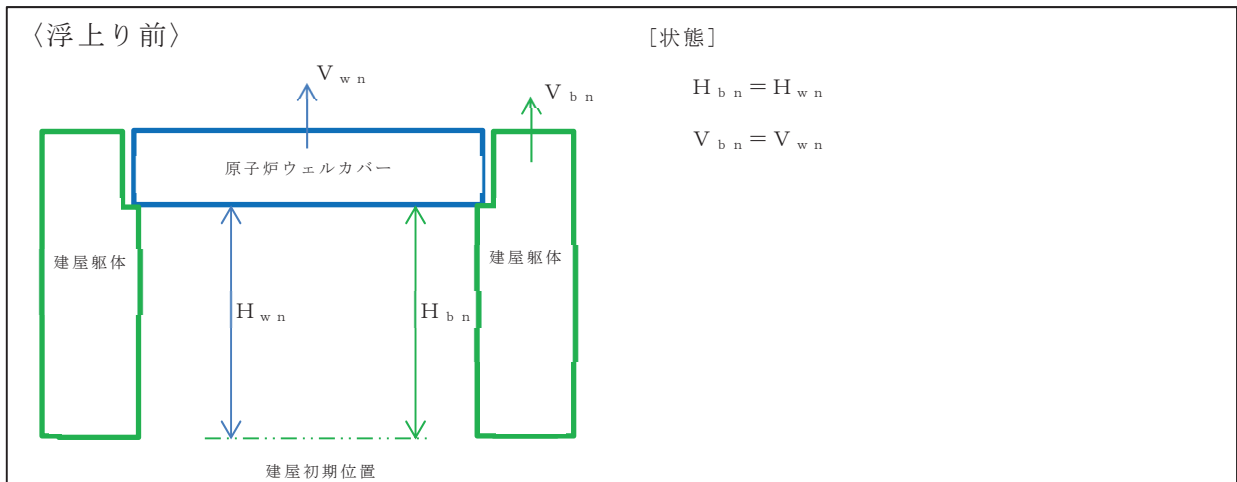
3.2.1 浮上り量の評価方法

浮上り量の評価方法を以下に示す。

- ・浮上りが発生する現象としては，“建屋躯体の上向き速度が減速した場合に原子炉ウェルカバーが建屋躯体から投げ上げられる現象”（以下「投げ上げ」という。）と，“建屋躯体が原子炉ウェルカバーの自由落下速度よりも早い速度で下向きに移動し原子炉ウェルカバーが建屋躯体から剥離する現象”（以下「剥離」という。）の2種類が考えられる。
- ・投げ上げは以下の時系列で発生し、その過程で生じる原子炉ウェルカバーと建屋躯体の変位の差を浮上り量として算出する。なお、本資料で用いる浮上り量は、保守性を考慮し、原子炉ウェルカバーと建屋躯体の相対変位ではなく、原子炉ウェルカバーの最高到達点の高さと原子炉ウェルカバーが建屋躯体に着床する点の高さの差と定義する。（図3参照）
 - ①原子炉ウェルカバー及び建屋躯体が同速度で上向きに移動。
 - ②建屋躯体の上向き速度が減速。
 - ③原子炉ウェルカバーの上向き速度と建屋躯体の上向き速度に乖離が生じ原子炉ウェルカバーの投げ上げ発生。
→浮上り発生時の速度が初速
 - ④原子炉ウェルカバーの鉛直投げ上げにより建屋躯体に着床。
→③～④における原子炉ウェルカバーの最高到達点の高さと原子炉ウェルカバーが建屋躯体に着床する点の高さの差が浮上り量
- ・剥離は以下の時系列で発生し、その過程で生じる原子炉ウェルカバーと建屋躯体の変位の差を浮上り量として算出する。
 - ①原子炉ウェルカバー及び建屋躯体が同速度で下向きに移動。
 - ②建屋躯体の下向き速度が加速。
 - ③原子炉ウェルカバーの下向き速度と建屋躯体の下向き速度に乖離が生じ原子炉ウェルカバーの剥離発生。
→剥離発生時の速度が初速
 - ④原子炉ウェルカバーの自由落下により建屋躯体に着床。
→③～④における原子炉ウェルカバーの最高到達点の高さと原子炉ウェルカバーが建屋躯体に着床する点の高さの差が浮上り量

浮上り評価概要を図2及び記号の定義を表1に示す*。また、浮上り時のウェルカバーと建屋躯体の変位挙動の例を図3に示す。

注記*：今回の検討において原子炉ウェルカバーが建屋躯体から浮き上がる現象は、全て投げ上げによって発生していることから、以降の説明は投げ上げについて記載する。

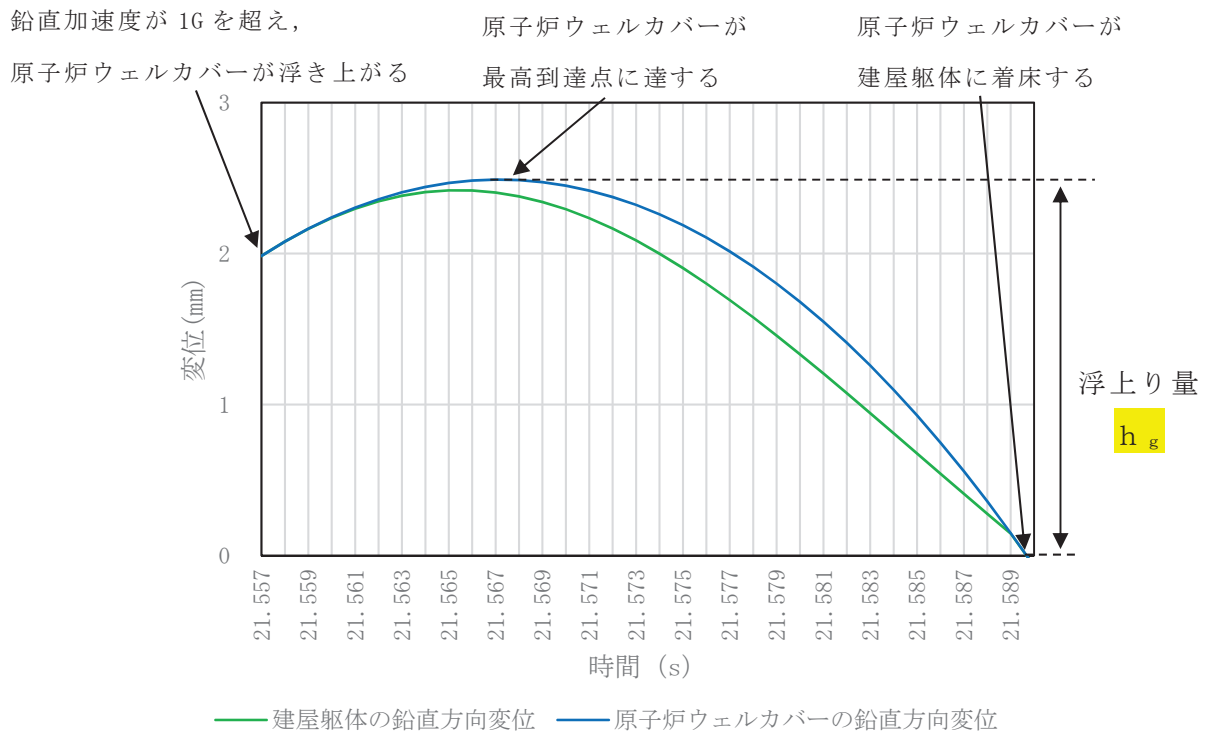


注：鉛直上向きを正，鉛直下向きを負とする。

図2 浮上り評価概要

表 1 記号の定義

記号	記号の説明	単位
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
Δt_1	浮上り発生時のステップ時間	s
Δt_α	着床時のステップ時間	s
H_{bn}	浮上り前の建屋躯体の変位	mm
H_{bn+1}	浮上り発生時の建屋躯体の変位	mm
$H_{bn+\alpha}$	着床時の建屋躯体の変位	mm
H_{wn}	浮上り前の原子炉ウェルカバーの変位	mm
H_{wn+1}	浮上り発生時の原子炉ウェルカバーの変位	mm
$H_{wn+\alpha}$	着床時の原子炉ウェルカバーの変位	mm
V_{bn}	浮上り前の建屋躯体速度	mm/s
V_{bn+1}	浮上り発生時の建屋躯体速度	mm/s
$V_{bn+\alpha}$	着床時の建屋躯体速度	mm/s
V_{wn}	浮上り前の原子炉ウェルカバーの速度	mm/s
V_{wn+1}	浮上り発生時での原子炉ウェルカバーの速度	mm/s
$V_{wn+\alpha}$	着床時の原子炉ウェルカバーの速度	mm/s



注：原子炉ウェルカバー及び建屋躯体の速度の関係については
3.2.4 (2) a. (d)項に示す。

図 3 浮上り時の変位挙動の例

(ケース名：ケース 2，地震動：S s - D 2，発生時間：21.557~21.590s)

3.2.2 評価用地震動

添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」による基準地震動 S_s の地震応答解析結果から算出された、原子炉ウェルカバーの設置レベル (O.P. 33.200) における地震応答のうち、鉛直上向き方向加速度が最大となる $S_s - D 2$ 及び鉛直下向き方向加速度が最大となる $S_s - D 1$ の地震動 (表 2) を評価用地震動とする。また、浮上り量の算出に当たっては、速度時刻歴及び変位時刻歴も用いるため、本評価に用いる時刻歴波形を次頁以降の図 4～図 9 に示す。

表 2 原子炉ウェルカバーの浮上りの影響評価に用いる評価用地震動

ケース名*		ケース 1 (基本ケース)	ケース 2	ケース 3
地震動	$S_s - D 1$	○	○	○
	$S_s - D 2$	○	○	○

注記*：添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」における材料物性の不確かさを考慮する地震応答解析ケース (表 3) 参照。

表 3 材料物性の不確かさを考慮する地震応答解析ケース
(添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」より抜粋)

対象地震動	ケース名	スケルトンカーブ (初期剛性)	建屋 材料減衰	地盤物性	
				入力地震動	底面地盤ばね
基準地震動 S_s (鉛直)	ケース 1 (基本ケース)	設計剛性	5%	直接入力	標準地盤
	ケース 2	同上	同上	同上	標準地盤 $+\sigma$
	ケース 3				標準地盤 $-\sigma$

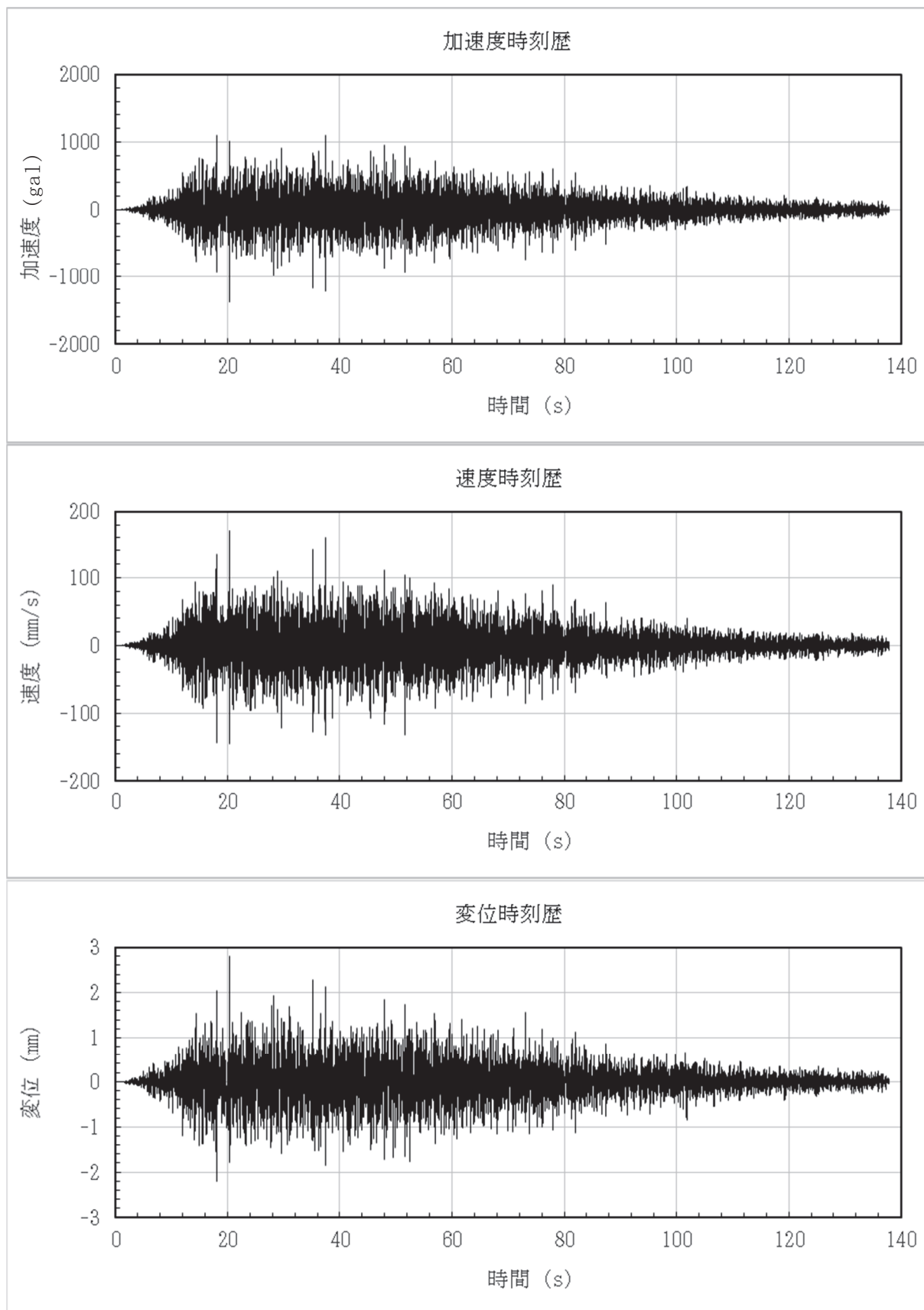


図4 原子炉ウェルカバーの浮上り量の評価に用いる時刻歴波形
(ケース名: ケース1 (基本ケース), 地震動: S s - D 1)

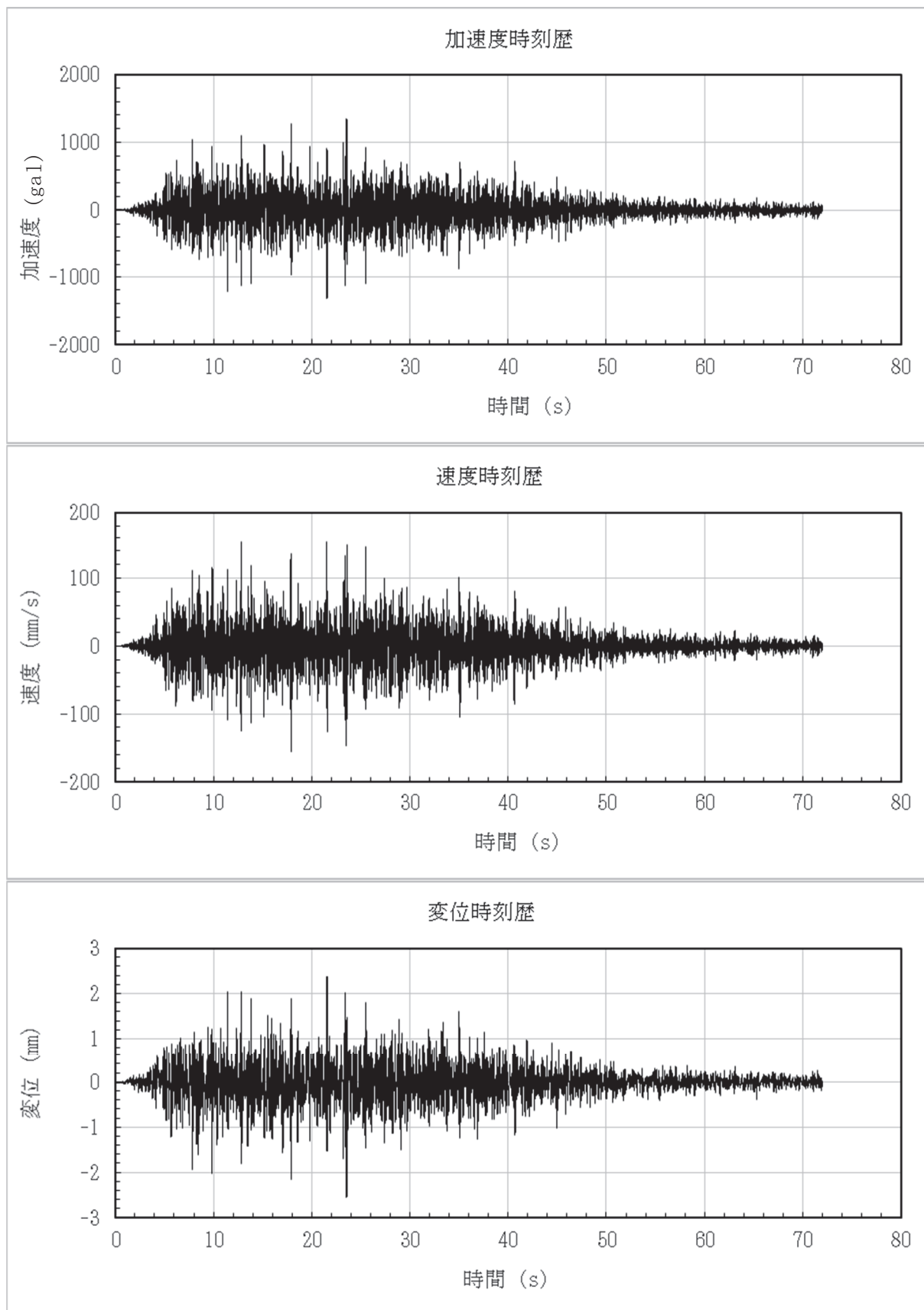


図5 原子炉ウェルカバーの浮上り量の評価に用いる時刻歴波形
 (ケース名：ケース1 (基本ケース)，地震動：S s - D 2)

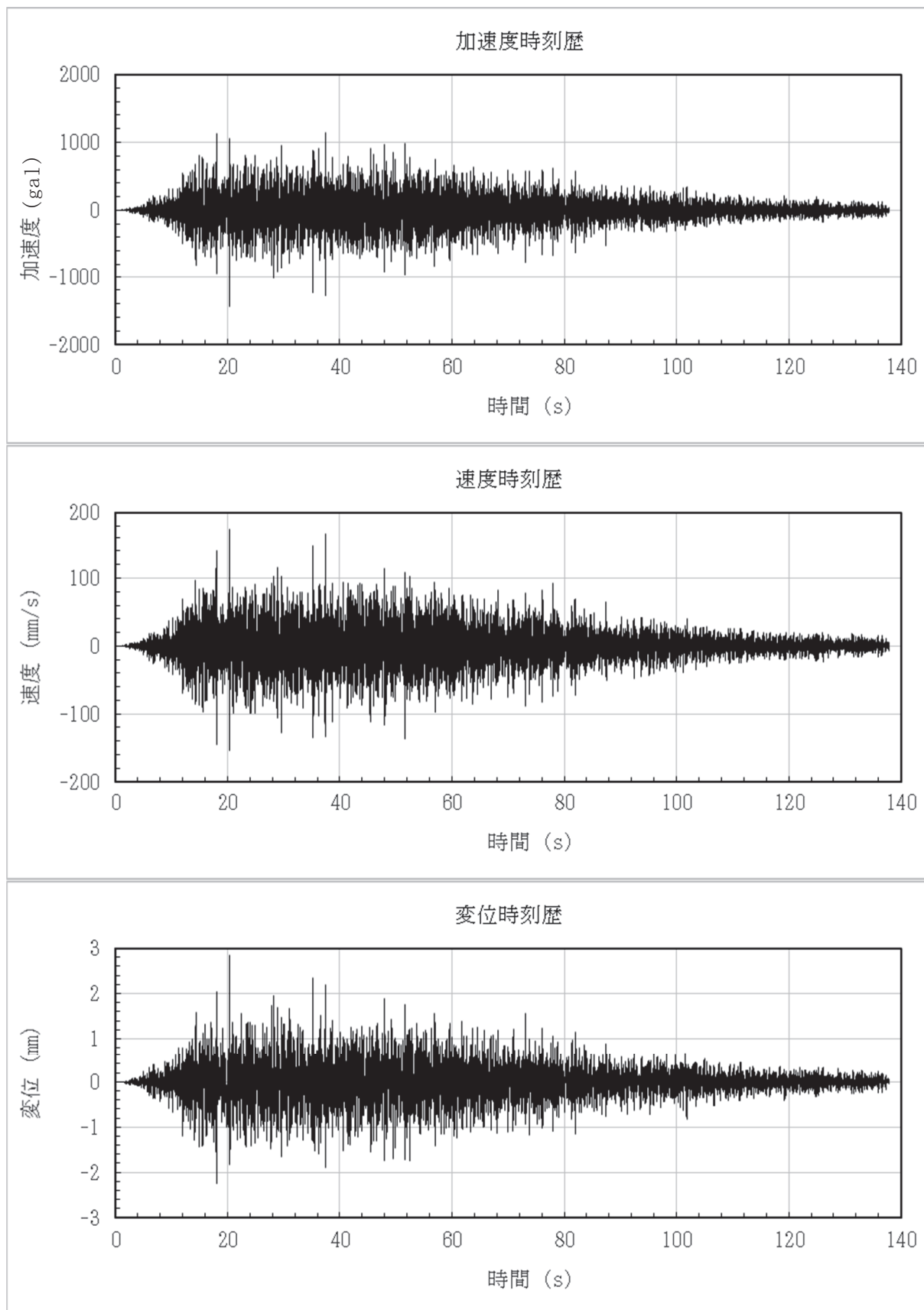


図6 原子炉ウェルカバーの浮上り量の評価に用いる時刻歴波形
(ケース名：ケース2，地震動：S s - D 1)

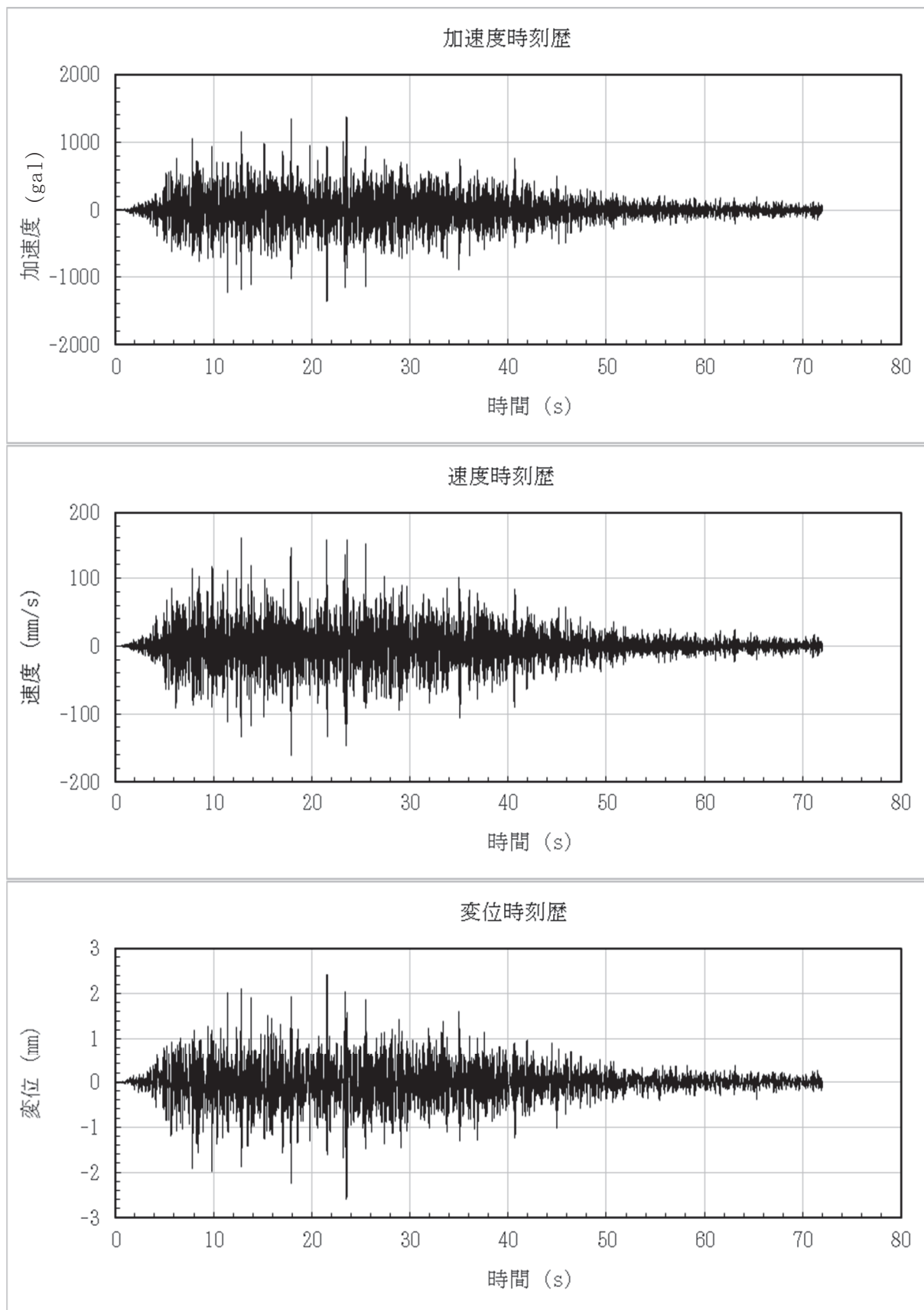


図7 原子炉ウェルカバーの浮上り量の評価に用いる時刻歴波形
 (ケース名：ケース2，地震動：S s - D 2)

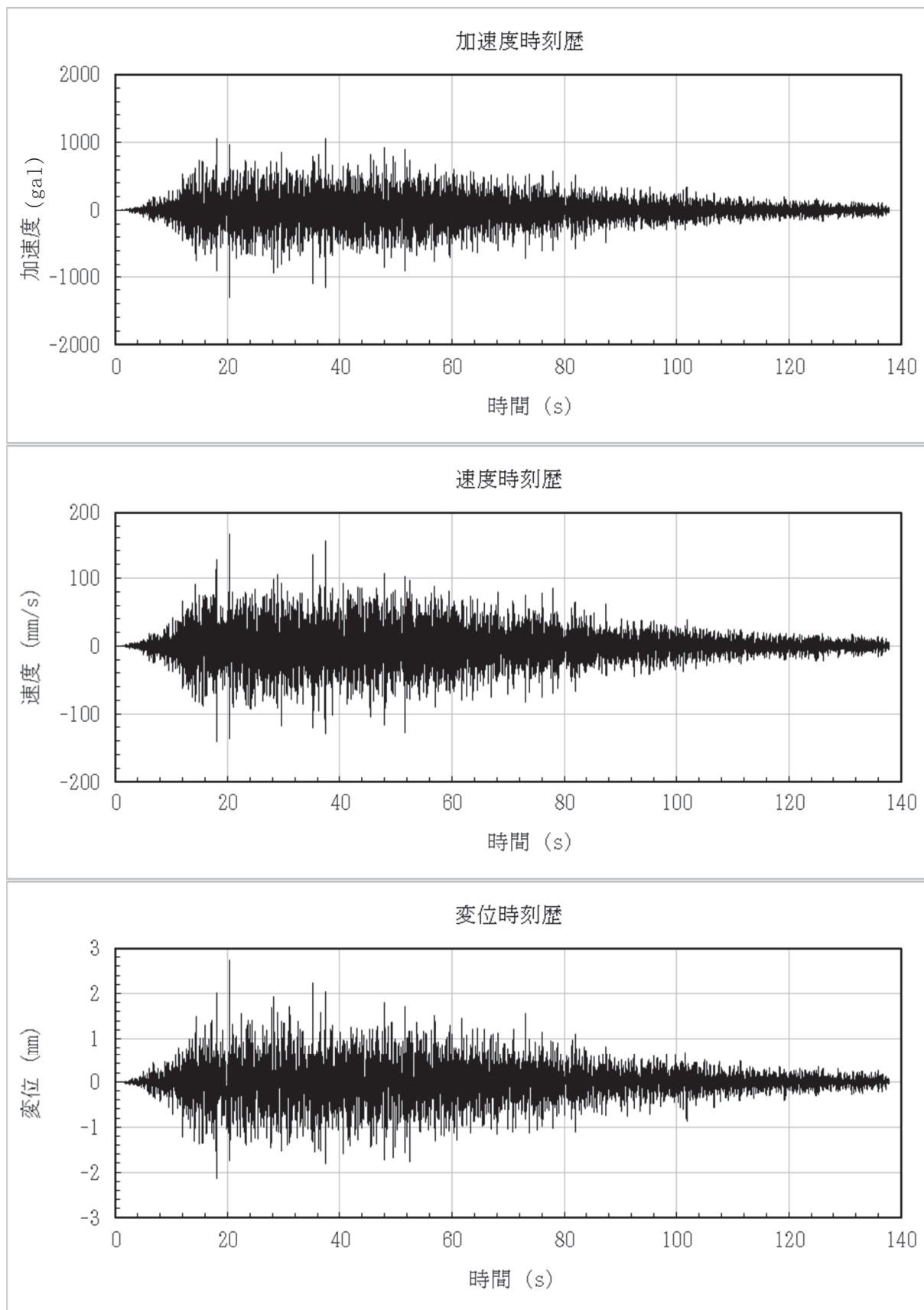


図8 原子炉ウェルカバーの浮上り量の評価に用いる時刻歴波形
(ケース名：ケース3，地震動：S s - D 1)

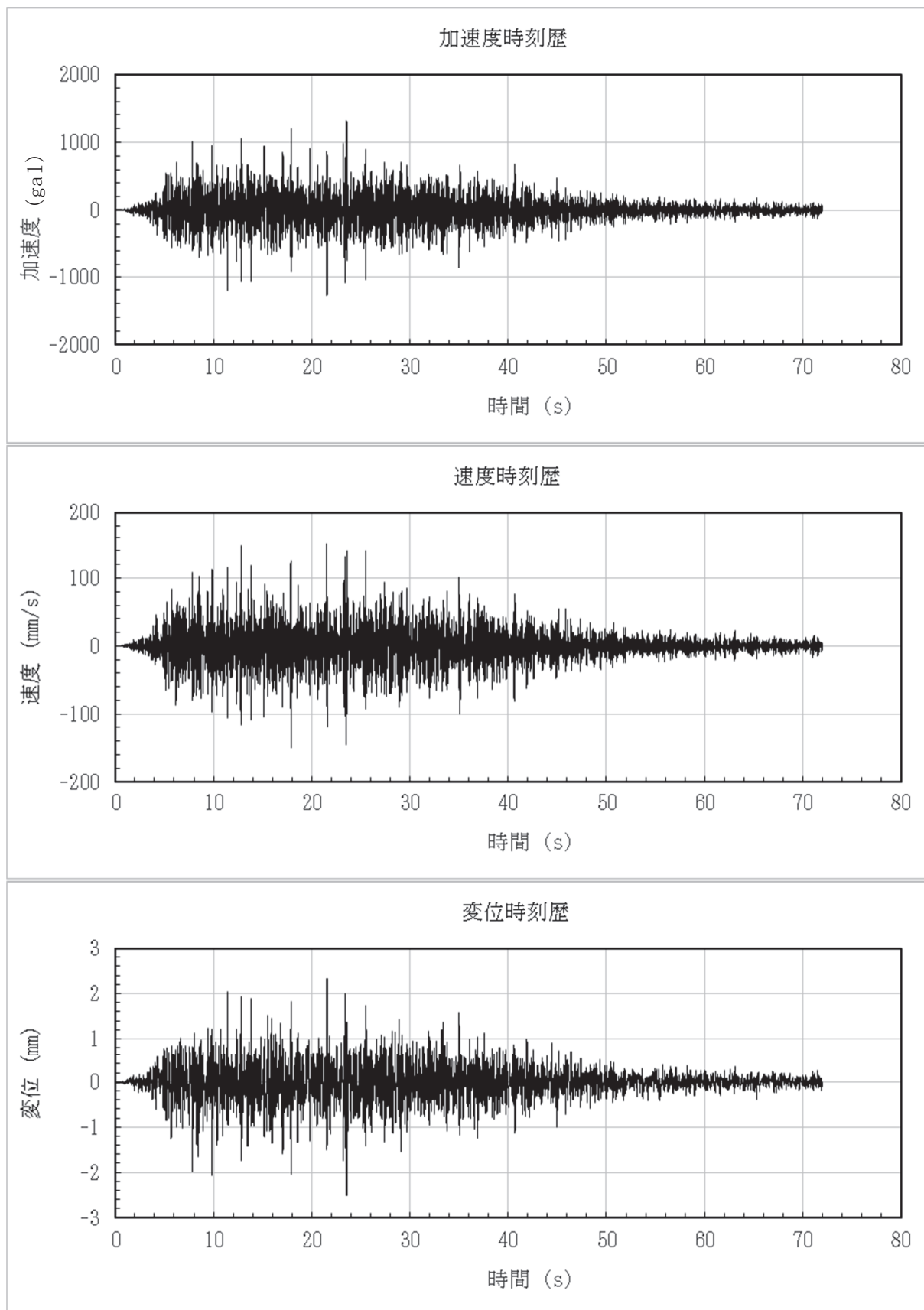


図9 原子炉ウェルカバーの浮上り量の評価に用いる時刻歴波形
 (ケース名：ケース3，地震動：S s - D 2)

3.2.3 浮上り量の評価結果

3.2.1 項の方法に基づき浮上り量を算出した。算出結果を表4～表9に示す。

表4 浮上り量の算出結果

(ケース名：ケース1 (基本ケース) , 地震動：S s - D 1)

発生時間 (s)	20.395～ 20.422	35.186～ 35.206	35.259～ 35.273	37.444～ 37.467	51.584～ 51.594
浮上り量 (mm)	1.5	1.3	0.4	0.9	0.5

表5 浮上り量の算出結果

(ケース名：ケース1 (基本ケース) , 地震動：S s - D 2)

発生時間 (s)	11.439～ 11.462	12.840～ 12.866	13.828～ 13.850	21.558～ 21.588	23.416～ 23.429	25.534～ 25.544
浮上り量 (mm)	1.4	1.6	1.4	2.2	0.4	0.1

表6 浮上り量の算出結果

(ケース名：ケース2, 地震動：S s - D 1)

発生時間 (s)	20.394～ 20.426	35.186～ 35.206	35.257～ 35.279	37.443～ 37.471	51.583～ 51.596
浮上り量 (mm)	2.3	1.4	1.2	1.4	0.8

表7 浮上り量の算出結果

(ケース名：ケース2, 地震動：S s - D 2)

発生時間 (s)	11.438～ 11.462	12.839～ 12.869	13.827～ 13.850	21.557～ 21.590	23.415～ 23.432	25.533～ 25.549
浮上り量 (mm)	1.4	2.1	1.5	2.6	0.7	0.3

表8 浮上り量の算出結果

(ケース名：ケース3, 地震動：S s - D 1)

発生時間 (s)	20.400～ 20.413	35.187～ 35.205	37.446～ 37.462
浮上り量 (mm)	0.4	1.1	0.4

表9 浮上り量の算出結果

(ケース名：ケース3, 地震動：S s - D 2)

発生時間 (s)	11.439～ 11.462	12.842～ 12.861	13.828～ 13.849	21.558～ 21.585
浮上り量 (mm)	1.3	0.8	1.2	1.6

3.2.4 浮上りによる影響確認結果

(1) 浮上りによる設置状況への影響確認

a. 評価基準値

原子炉ウェルカバーの許容浮上り量 H_g は建屋躯体との嵌め込み深さとする(図10)。

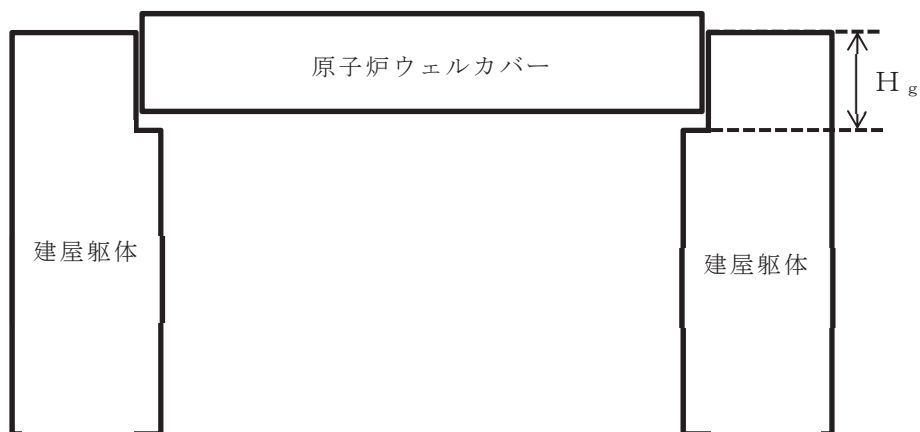


図10 原子炉ウェルカバーの許容浮上り量

b. 影響確認結果

原子炉ウェルカバーの浮上り量の評価結果を表10に示す。浮上り量は2.6 mmであり許容浮上り量1800 mm以下となることから、浮上りが発生しても嵌め込み深さを超えずに原子炉ウェルカバーの設置状況に影響がないことを確認した。

表10 原子炉ウェルカバーの浮上り量の評価結果

浮上り量 h_g	許容浮上り量 H_g
2.6 mm	1800 mm

(2) 浮上りによる衝突時の荷重の影響確認

a. 衝突時の荷重の評価方法

原子炉ウェルカバーの浮上りによる衝突時の荷重は、衝突時の原子炉ウェルカバーと建屋躯体との相対速度を初期速度とした1自由度系の振動応答として評価を行い、最大応答荷重を衝突荷重として算出する。評価方法を以下に示す。

原子炉ウェルカバーの剛性Kは、曲げ剛性 K_b 及びせん断剛性 K_s から、次式より算出する。評価モデルを図11に示す。

(a) 原子炉ウェルカバー曲げ剛性

原子炉ウェルカバーの曲げ剛性(kN/m)は次式より算出する。

$$K_b = \frac{384 \times E \times I}{5 \times L^3}$$

ここで、

E : 縦弾性係数(kN/m²)

I : 断面二次モーメント(m⁴)

L : 支持スパン(m)

(b) 原子炉ウェルカバーせん断剛性

原子炉ウェルカバーのせん断剛性(kN/m)は次式より算出する。

$$K_s = \frac{G \times A}{L/2}$$

ここで、

G : せん断弾性係数(kN/m²)

A : ウェルカバー断面積(m²)

L : 支持スパン(m)

(c) 原子炉ウェルカバー全体剛性

原子炉ウェルカバーの全体剛性(kN/m)は図11に示すとおり曲げ剛性 K_b とせん断剛性 K_s との直列ばねとして次式より算出する。

$$K = \frac{K_b \times K_s}{K_b + K_s}$$

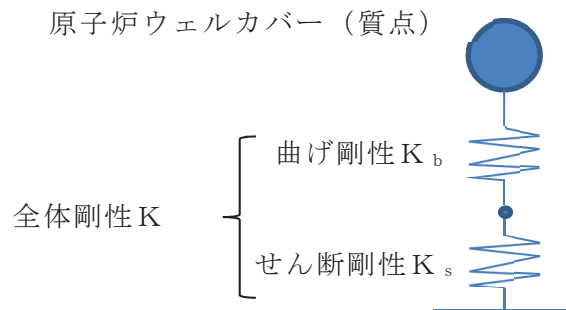


図11 原子炉ウェルカバー剛性評価モデル

原子炉ウェルカバーの衝突時の最大変位量 δ_{\max} について、次式により算出する。

(d) 原子炉ウェルカバー衝突時の最大変位

原子炉ウェルカバーが建屋躯体に着床する際に生じる最大変位は次式より算出する。

$$\delta_{\max} = \frac{V_r}{\omega}$$

ここで、

V_r : 次式より算出する、衝突時における原子炉ウェルカバーと建屋躯体との相対速度 (m/s)

$$V_r = V_w - V_b$$

V_w : 衝突時における原子炉ウェルカバーの落下速度 (m/s)

V_b : 衝突時における建屋躯体速度* (m/s)

$$V_w = \sqrt{2g h_g}$$

h_g : 浮上り量 (m)

注記* : 建屋応答解析結果より算出

ω : 次式より算出する、原子炉ウェルカバーの固有振動数 (rad/s)

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{W}}$$

K : 原子炉ウェルカバー全体剛性 (kN/m)

W : 原子炉ウェルカバー質量 (ton)

(e) 原子炉ウェルカバーの浮上りによる衝突時の荷重

原子炉ウェルカバー全体剛性 K (kN/m) と衝突時の最大変位 δ_{\max} (m) から次式より発生荷重を算出する。

$$F = K \times \delta_{\max}$$

b. 計算条件

浮上りによる衝突時の荷重の評価に用いる計算条件を表 11 に示す。なお、3.2.3 項に示した浮上り量の評価結果のうち、最も大きい浮上り量 2.6mm が生じた、ケース名：ケース 2、地震動：S s - D 2、発生時間 21.557~1.590 s での浮上りに対して衝突時の荷重を評価する。

表 11 衝突時の荷重の評価に用いる計算条件

項目	計算条件
縦弾性係数 E	2.51×10^7 (kN/m ²)
せん断弾性係数 G	1.04×10^7 (kN/m ²)
断面二次モーメント I	0.8797 (m ⁴)
ウェルカバー断面積 A	3.258 (m ²)
支持スパン L	11.4536 (m)
原子炉ウェルカバー曲げ剛性 K _b	1.13×10^6 (kN/m)
原子炉ウェルカバーせん断剛性 K _s	5.94×10^6 (kN/m)
原子炉ウェルカバー全体剛性 K	9.47×10^5 (kN/m)
衝突時における原子炉ウェルカバーの落下速度 V _w	0.224 (m/s)
衝突時における建屋躯体速度 V _b	0.128 (m/s)
衝突時における原子炉ウェルカバーと建屋躯体との相対速度 V _r	0.096 (m/s)
浮上り量 h _g	2.6×10^{-3} (m)
原子炉ウェルカバー質量 (固定荷重 + 積載荷重) W	92.7 (ton)
原子炉ウェルカバーの固有振動数 ω	101 (rad/s)
原子炉ウェルカバーが建屋躯体に着床する際に生じる最大変位 δ _{max}	9.52×10^{-4} (m)

c. 衝突時の荷重の評価結果

原子炉ウェルカバーの浮上りによる衝突時の荷重の評価結果を以下に示す。

浮上りによる衝突時の荷重 F : 901kN

また、上記の浮上りによる衝突時の荷重に、原子炉ウェルカバー本体の固定荷重及び積載荷重を加えた上で、原子炉ウェルカバーの支持スパンで割り等分布荷重に変換した評価用荷重を以下に示す。

評価用荷重 w_c : 158.04kN/m

上記の評価用荷重を用いて、原子炉ウェルカバー本体及び支持部を評価した結果を表 12 に示す。表 12 のとおり、浮上りによる衝突時の発生荷重は許容荷重以下となることから、浮上りによる衝突荷重の影響がないことを確認した。

表 12 浮上りによる衝突時の荷重に対する

原子炉ウェルカバー及び支持部の発生荷重及び許容荷重

部位*	荷重*	発生荷重	許容荷重*
原子炉ウェルカバー 本体	曲げモーメント (kN・m)	2592	4205
	せん断力 (kN)	905	2389
支持部	圧縮力 (kN)	905	7508

注記* : 部位, 荷重及び許容荷重については, 添付書類「VI-2-11-2-11 原子炉ウェルカバーの耐震性についての計算書」による

4. まとめ

原子炉ウェルカバーの支持部で想定される破壊形式に対する検討を行い、原子炉ウェルカバーの支持部について、圧縮力に対する耐震評価を実施することが適切であることを確認した。

鉛直加速度が1Gを超えることにより発生する浮上りの影響確認の結果、浮上り量（2.6 mm）は許容浮上り量（1800 mm）以下となり浮上りが発生しても嵌め込み深さを超えないことから原子炉ウェルカバーの設置状況に影響がないことを確認した。また、浮上り量による衝突評価の結果、浮上りによる衝突時の荷重に対する原子炉ウェルカバー及び支持部の発生荷重が許容荷重以下となることから、浮上りによる衝突時の荷重の影響がないことを確認した。

よって、原子炉ウェルカバーの浮上りの影響は軽微であることを確認した。