

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密あるいは防護上の観点
から公開できません。

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	工認-167 改1
提出年月日	平成30年5月25日

V-2-3-2 炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに
原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算
書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 構造及びモデル化	2
2.2 解析方針	5
2.3 適用規格・基準等	6
3. 解析方法	7
3.1 入力地震動	7
3.2 地震応答解析モデル	8
3.2.1 水平方向	8
3.2.2 鉛直方向	8
3.3 解析方法	12
3.3.1 動的解析	12
3.3.2 静的解析	12
4. 解析結果	24
4.1 動的解析	24
4.1.1 固有値解析結果	24
4.1.2 地震応答解析結果及び静的解析結果	24
5. 引用図書	***

1. 概要

本資料は、資料V-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に基づく炉心、原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答解析について説明するものである。

地震応答解析により算出した各種応答値及び静的地震力は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に示す建物・構築物及び機器・配管系の設計用地震力として用いる。

2. 基本方針

2.1 構造及びモデル化

原子炉建屋内の原子炉格納容器，原子炉遮蔽，原子炉本体の基礎，原子炉圧力容器等の大型機器，構造物は，建物質量に対しその質量が比較的大きく，また，支持構造上からも建屋との連成が無視できないため，原子炉建屋と連成で解析する。

原子炉格納容器はシアラグ，スタビライザトラス，ダイヤフラム・フロア等により，原子炉建屋，原子炉遮蔽，原子炉圧力容器につながり，一方原子炉遮蔽の上部はスタビライザにより原子炉圧力容器につながっている。

原子炉圧力容器内には，気水分離器及びスタンドパイプ，炉心シュラウド，燃料集合体，制御棒，制御棒案内管，制御棒駆動機構ハウジング，ジェットポンプ等が収納される。

炉心シュラウドは薄肉円筒形で，下端において水平方向及び鉛直方向をシュラウドサポートにより原子炉圧力容器に支持されている。炉心シュラウド上部には，半球形のシュラウドヘッドがあり（以下，炉心シュラウド，シュラウドヘッドを「シュラウド」と総称する。），その上に 225 本のスタンドパイプが立ち，その上の気水分離器を支持している。シュラウド内部には 764 体の燃料集合体が収納され，下端を炉心支持板，上端を上部格子板で支持されることにより正確に位置が定められている。燃料集合体に加わる荷重は，水平方向は上部格子板及び炉心支持板を支持するシュラウド，鉛直方向は制御棒案内管及び制御棒案内管を支持する制御棒駆動機構ハウジングを介し，原子炉圧力容器に伝達される。

制御棒駆動機構は，原子炉圧力容器下鏡を貫通し取り付けられる 185 本より成る制御棒駆動機構ハウジング内に納められ，その上端に取り付けられる制御棒を炉心に挿入する機能を有している。

また，シュラウドと原子炉圧力容器の間には，ジェットポンプがシュラウドサポートに 20 組据付けられているが，質量が小さく，炉内の構造物の振動に与える影響は小さいため質量のみを考慮する。

同様に中性子計測案内管，中性子計測ハウジングについても炉内の構造物の振動に与える影響は小さいため質量のみを考慮する。

これらの構造概要を図 2-1 及び図 2-2 に示す。

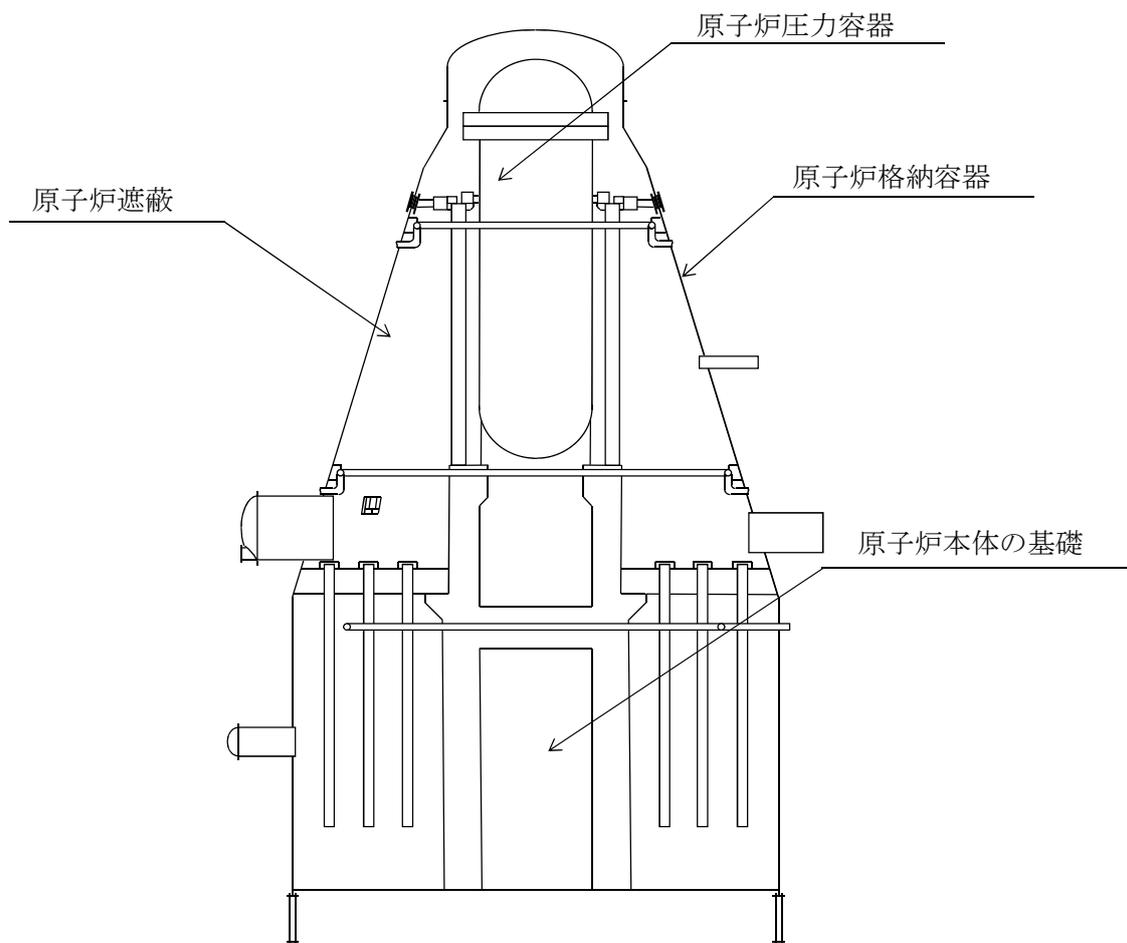


図 2-1 原子炉格納容器，原子炉遮蔽，原子炉本体の基礎，原子炉压力容器等の概要図

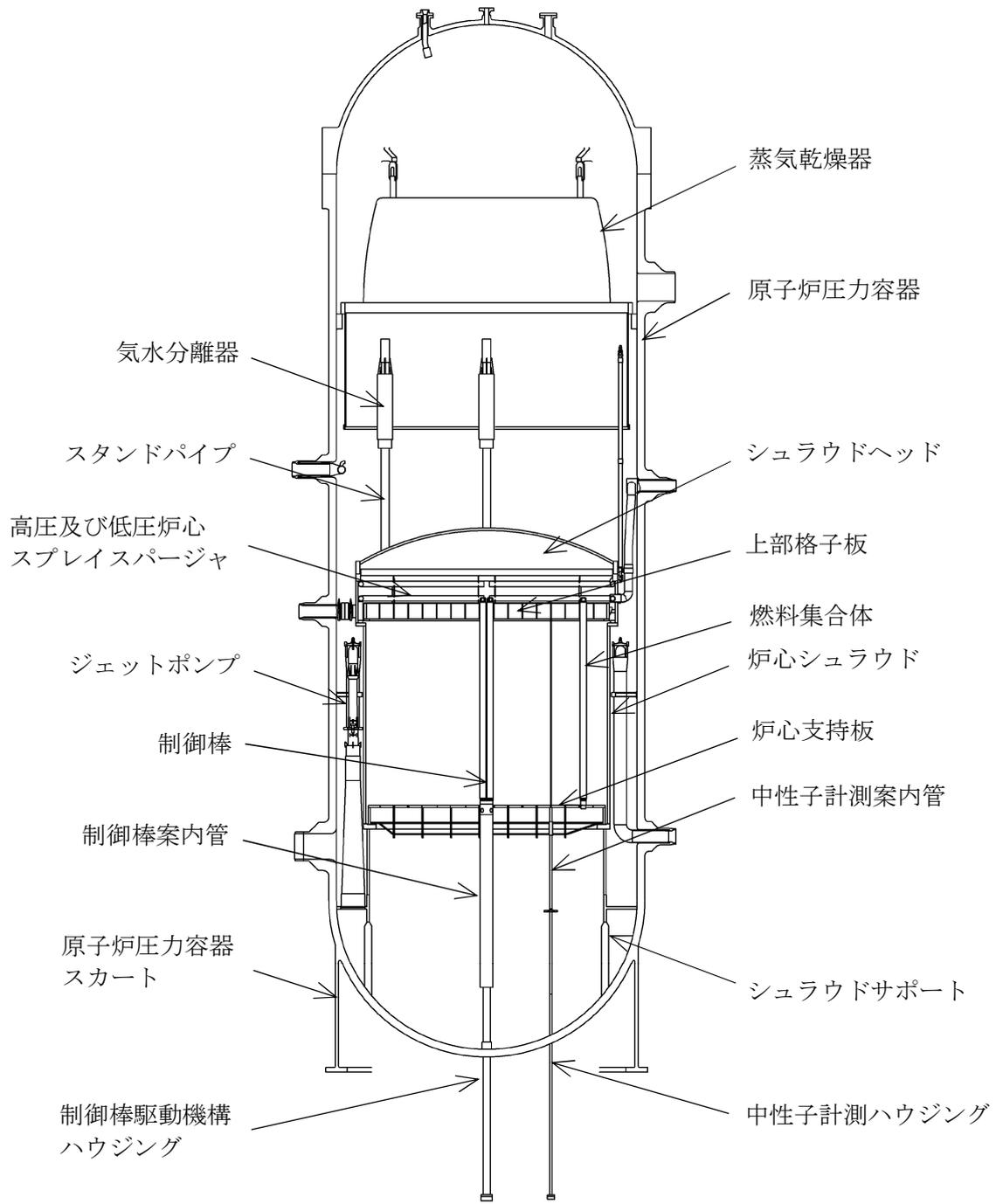


図 2-2 原子炉圧力容器内部構造図

2.2 解析方針

炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答解析は，資料V-2-1-5「地震応答解析の基本方針」に基づいて行う。

地震応答解析は，「3.2 地震応答解析モデル」において設定した地震応答解析モデル及び「3.1 入力地震動」において設定した入力地震動を用いて直接積分法による解析を実施し，各種応答値を算出する。

2.3 適用規格・基準等

炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答解析において適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力度編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
(以下「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」という。)

3. 解析方法

3.1 入力地震動

入力地震動として、下記に示す基準地震動 S_s 、弾性設計用地震動 S_d より算出した地震動を用いるものとする。

基準地震動 S_s		最大加速度 (cm/s^2)		
		N S成分	E W成分	U D成分
$S_s - D 1$	応答スペクトル手法による基準地震動	870		560
$S_s - 1 1$	F1断層，北方陸域の断層，塩ノ平地震断層の連動による地震 (短周期レベルの不確かさ，破壊開始点1)	717	619	579
$S_s - 1 2$	F1断層，北方陸域の断層，塩ノ平地震断層の連動による地震 (短周期レベルの不確かさ，破壊開始点2)	871	626	602
$S_s - 1 3$	F1断層，北方陸域の断層，塩ノ平地震断層の連動による地震 (短周期レベルの不確かさ，破壊開始点3)	903	617	599
$S_s - 1 4$	F1断層，北方陸域の断層，塩ノ平地震断層の連動による地震 (断層傾斜角の不確かさ，破壊開始点2)	586	482	451
$S_s - 2 1$	2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)	901	887	620
$S_s - 2 2$	2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)	1009	874	736
$S_s - 3 1$	2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動	610		280

弾性設計用地震動 S_d	最大加速度 (cm/s^2)		
	N S成分	E W成分	U D成分
$S_d - D 1$	435		280
$S_d - 1 1$	359	309	290
$S_d - 1 2$	435	313	301
$S_d - 1 3$	452	309	300
$S_d - 1 4$	293	241	226
$S_d - 2 1$	451	443	310
$S_d - 2 2$	505	437	368
$S_d - 3 1$	305		140

3.2 地震応答解析モデル

地震応答解析モデルは、資料V-2-1-5「地震応答解析の基本方針」に記載の解析モデルの設定方針に基づき、水平方向及び鉛直方向についてそれぞれ設定する。

3.2.1 水平方向

水平方向地震応答解析モデルは図3-1に示すように、原子炉建屋、原子炉格納容器、原子炉遮蔽、原子炉本体の基礎、原子炉圧力容器、シュラウド、燃料集合体、制御棒案内管及び制御棒駆動機構ハウジング等の各質点間を等価な曲げ、せん断剛性を有する無質量のはり又は無質量のばねにより結合する。

原子炉格納容器は19質点、原子炉遮蔽は5質点、原子炉本体の基礎は8質点、原子炉圧力容器は25質点でモデル化する。原子炉格納容器はシアラグと等価なばねで建屋と結合され、下端は原子炉建屋と剛に結合される。原子炉圧力容器は原子炉圧力容器スタビライザと等価なばねで原子炉遮蔽上端と結合され、更に原子炉格納容器スタビライザと等価なばねにより原子炉格納容器を介し、原子炉建屋に結合される。原子炉圧力容器スカートの下端は、原子炉本体の基礎上端に剛に結合されており、原子炉本体の基礎は、その下端において原子炉建屋と剛に結合される。

気水分離器及びスタンドパイプは各々2質点、シュラウドは12質点、燃料集合体は7質点、制御棒案内管は6質点、制御棒駆動機構ハウジングは内側7質点、外側5質点でモデル化する。これらをEL. 23.378mでシュラウドサポートと等価な回転ばねを介して、原子炉圧力容器と結合する。

なお、ジェットポンプ、中性子計測案内管、中性子計測ハウジングについては、質量が小さく炉内の構造物の振動に与える影響は小さいため質量のみを考慮する。

3.2.2 鉛直方向

鉛直方向地震応答解析モデルは図3-2に示すように、原子炉建屋、原子炉格納容器、原子炉遮蔽、原子炉本体の基礎、原子炉圧力容器、シュラウド、燃料集合体、制御棒案内管及び制御棒駆動機構ハウジング等の各質点間を等価な軸剛性を有する無質量のばねにより結合する。また、屋根トラスは、各質点間を等価な曲げ、せん断剛性を有する無質量のはりで結合し、支持端部の回転拘束と等価な回転ばねで結合する。

原子炉格納容器は20質点、原子炉遮蔽壁は5質点、原子炉本体の基礎は8質点、原子炉圧力容器は27質点でモデル化する。原子炉格納容器の下端は、原子炉建屋と剛に結合される。原子炉圧力容器スカートの下端は、原子炉本体の基礎の上端に剛に結合されており、原子炉本体の基礎の下端は、原子炉建屋と剛に結合される。

気水分離器及びスタンドパイプは各々2質点、シュラウドは14質点、燃料集合体は7質点、制御棒案内管は5質点、制御棒駆動機構ハウジングは内側6質点、外側5質点でモデル化する。

ジェットポンプ、中性子計測案内管、中性子計測ハウジングについては、水平方向と同様に質量のみを考慮する。

炉内構造物の質点は原則として、水平方向と同一とし、部材の端点及び剛性の変化する点、

応力評価点等に設けるが、全体の振動特性が把握できるよう、質点間隔については、工学的判断を加えて定めるものとする。ただし、シュラウドについては、シュラウドサポートレグ上下端に質点を設け、原子炉压力容器下鏡に結合する。

また、水平方向解析モデルで考慮している水平ばね（原子炉格納容器スタビライザ等）については、鉛直方向に対しては拘束効果がない構造となっているか、拘束効果があっても本体部材の鉛直剛性に対して無視できる程度に小さい値であるため、鉛直方向モデルでは考慮しない。

なお、水平方向解析モデルでは原子炉压力容器内の炉内構造物が水中で振動する影響を考慮するため付加質量を設定しているが、鉛直方向では影響が小さいため付加質量を考慮しない。

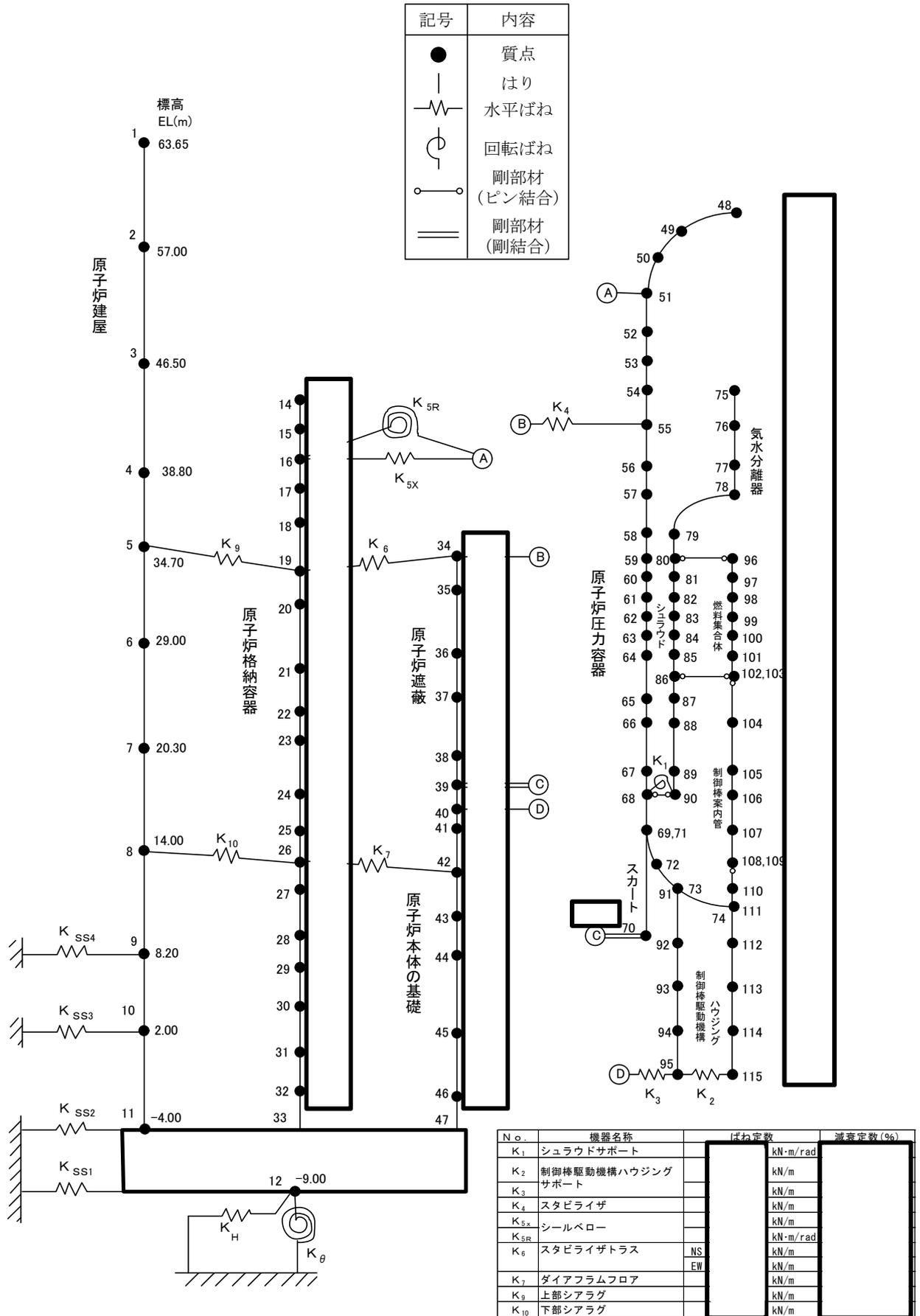


図 3-1 大型機器, 構造物地震応答解析モデル (水平方向) (単位: m)

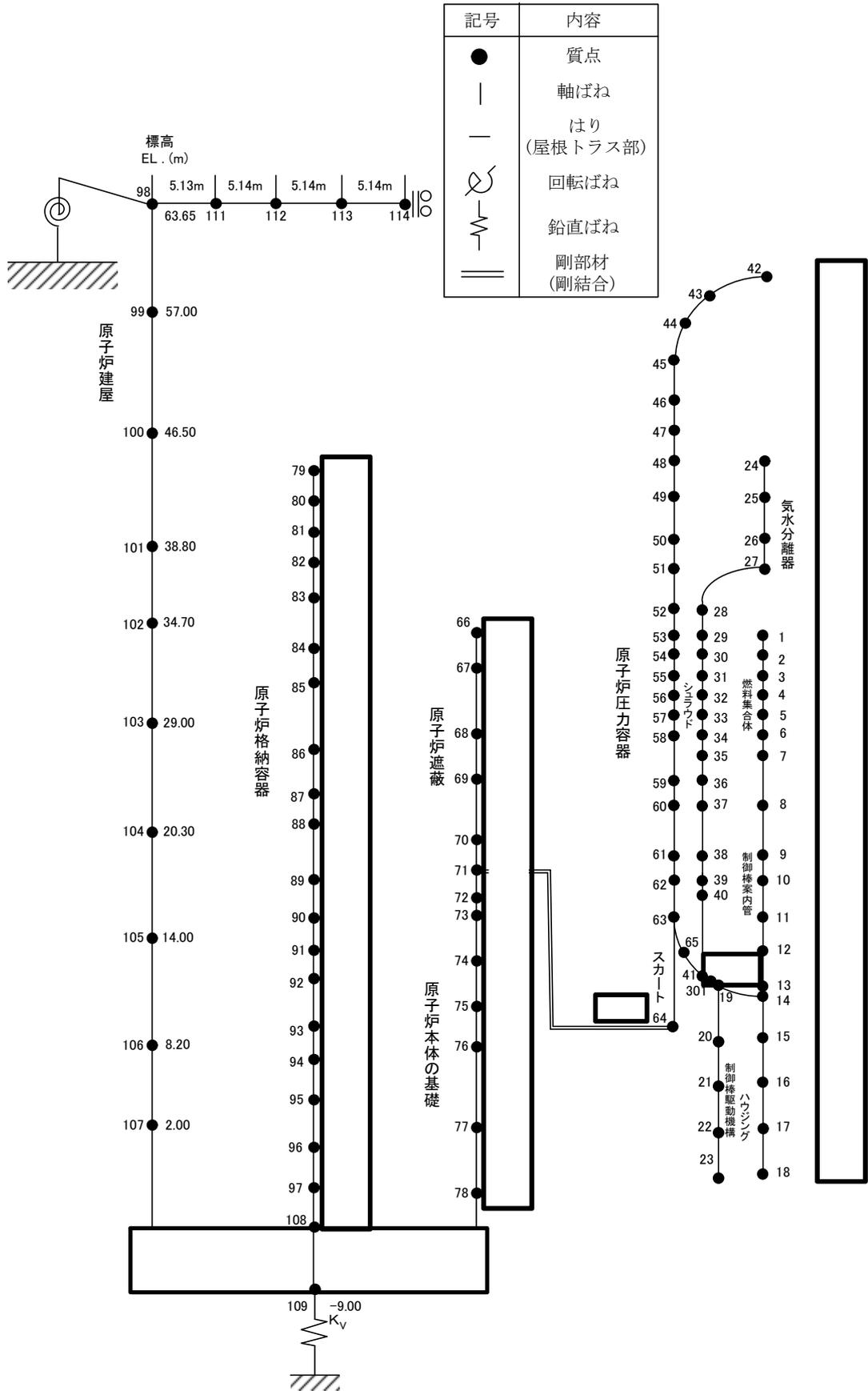


図 3-3 大型機器, 構造物地震応答解析モデル (鉛直方向) (単位: m)

3.3 解析方法

図 1-2 に示した水平方向地震応答解析モデルの各質点質量，部材長，断面二次モーメント，有効せん断断面積等を表 3-1～表 3-5 に，図 1-3 に示した鉛直方向地震応答解析モデルの各質点質量，部材長，ばね定数等を表 3-6～表 3-10 に示す。また，解析に用いる各構造物の物性値を表 3-11 に示す。

これらのデータをもとに，電子計算機により，剛性マトリックス，質量マトリックスを作り，固有振動数，固有モードマトリックス等を求める。次に，入力地震動に対する各質点の加速度，変位，せん断力（軸力）等を時刻歴応答解析法により時間の関数として求め，地震継続時間中のこれらの最大値を求める。

以上の計算は，計算機コード「DYNA 2 E」（「5. 引用図書(1)」参照）を使用して計算する。

3.3.1 動的解析

炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書の動的解析は，資料 V-2-1-5 「地震応答解析の基本方針」に記載の解析方法に基づき，時刻歴応答解析により実施する。

3.3.2 静的解析

(1) 水平地震力

水平地震力算定用の基準面は地表面 (EL. 8.0 m) とし，基準面より上の部分 (地上部分) の地震力は，地震層せん断力係数を用いて，次式により算出する。

(2) 鉛直地震力

鉛直地震力は，鉛直震度 0.3 を基準とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して，次式によって算定する鉛直震度を用いて定める。

表 3-1 原子炉格納容器のデータ諸元 (水平方向)

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	有効せん断 断面積 (m^2)	断面二次 モーメント (m^4)	回転慣性 ($kN \cdot m^2$)
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					

NT2 補① V-2-3-2 R1

表 3-2 原子炉遮蔽及び原子炉本体の基礎のデータ諸元（水平方向）

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	有効せん断 断面積 (m^2)	断面二次 モーメント (m^4)	回転慣性 ($kN \cdot m^2$)
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					
41					
42					
43					
44					
45					
46					
47					

NT2 補① V-2-3-2 R1

表 3-3 原子炉圧力容器のデータ諸元 (水平方向)

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	有効せん断 断面積 (m ²)	断面二次 モーメント (m ⁴)
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				
61				
62				
63				
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				

表 3-4 気水分離器, スタンドパイプ及びビュラウドのデータ諸元 (水平方向)

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	有効せん断 断面積 (m ²)	断面二次 モーメント (m ⁴)
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				

NT2 補① V-2-3-2 R1

表 3-5 制御棒駆動機構ハウジング，燃料集合体及び制御棒案内管のデータ諸元（水平方向）

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	有効せん断 断面積 (m ²)	断面二次 モーメント (m ⁴)
91				
92				
93				
94				
95				
96				
97				
98				
99				
100				
101				
102				
103				
104				
105				
106				
107				
108				
109				
110				
111				
112				
113				
114				
115				

NT2 補① V-2-3-2 R1

表 3-6 原子炉格納容器のデータ諸元 (鉛直方向)

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	部材長 (m)	ばね定数 ($\times 10^6$ kN/m)
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				
91				
92				
93				
94				
95				
96				
97				
108				

表 3-7 原子炉遮蔽及び原子炉本体の基礎のデータ諸元（鉛直方向）

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	部材長 (m)	ばね定数 ($\times 10^6$ kN/m)
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
108				

表 3-8 原子炉圧力容器のデータ諸元 (鉛直方向)

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	部材長 (m)	ばね定数 ($\times 10^6$ kN/m)
42				
43				
44				
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				
61				
62				
63				
64				
63				
65				
301				
19				
14				

表 3-9 気水分離器, スタンドパイプ及びビュラウドのデータ諸元 (鉛直方向)

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	部材長 (m)	ばね定数 ($\times 10^6$ kN/m)
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				

NT2 補① V-2-3-2 R1

表 3-10 制御棒駆動機構ハウジング、燃料集合体及び制御棒案内管のデータ諸元（鉛直方向）

質点 番号	標高 EL. (m)	質量 (t)	部材長 (m)	ばね定数 ($\times 10^6$ kN/m)
19				
20				
21				
22				
23				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				

NT2 補① V-2-3-2 R1

表 3-11 解析に用いる機器の物性値

機器名称	縦弾性係数E (MPa)	ポアソン比 ν	減衰定数 (%)
燃料集合体			
制御棒案内管, シュラウド			
気水分離器			
制御棒駆動機構ハウジング			
原子炉圧力容器			
スカート			
原子炉本体の基礎			
原子炉遮蔽壁			
原子炉格納容器			

4. 解析結果

4.1.1 固有値解析結果

計算の結果得られた固有値の中で、固有周期 0.050 s 以上の次数についてまとめた結果を表 4-1～表 4-48（基準地震動 S_s : 表 4-1～表 4-24, 弾性設計用地震動 S_d : 表 4-25～表 4-48）に各地震動の固有値を示す。また、図 4-1～図 4-512（基準地震動 S_s : 図 4-1～図 4-256, 弾性設計用地震動 S_d : 図 4-257～図 4-512）に各地震動の刺激関数を示す。

なお、刺激係数は、各次の固有ベクトル {u} に対し、最大振幅が 1.0 となるように規準化した値を示す。

また、図中の機器名称は次の通り読み替える。

- ・ 遮へい壁 → 原子炉遮蔽
- ・ ペデスタル → 原子炉本体の基礎

4.1.2 地震応答解析結果及び静的解析結果

基準地震動 S_s での水平方向の応答計算より得られた各点の最大応答加速度, 最大応答変位, 最大応答せん断力, 最大応答モーメントを図 4-513～図 4-584 に, 鉛直方向の応答計算より得られた各点の最大応答加速度, 最大応答変位, 最大応答軸力を図 4-585～図 4-605 に示す。

弾性設計用地震動 S_d での水平方向の応答計算及び静的解析より得られた各点の最大応答加速度, 最大応答変位, 最大応答せん断力, 最大応答モーメントを図 4-606～図 4-677 に, 鉛直方向の応答計算及び静的解析より得られた各点の最大応答加速度, 最大応答変位, 最大応答軸力を図 4-678～図 4-698 に示す。

また, 制御棒駆動機構ハウジングサポート, スタビライザ, スタビライザトラス, ダイアフラムフロア, 上部シアラグ, 下部シアラグに加わる力を基準地震動 S_s : 表 4-49, 弾性設計用地震動 S_d : 表 4-50 に, 燃料集合体の相対変位を基準地震動 S_s : 図 4-699, 弾性設計用地震動 S_d : 図 4-670 に示す。

表 4-1 固有値解析結果* (Ss-D1, NS 方向)

次数	周期(s)	刺激係数	卓越部位
1	0.411	1.915	
2	0.203	-1.154	
3	0.196	-0.175	
4	0.136	-0.638	
5	0.114	0.634	
6	0.103	0.146	
7	0.086	0.776	
8	0.084	-0.892	
9	0.077	0.369	
10	0.063	-0.126	
11	0.059	-0.040	
12	0.057	-0.075	
13	0.052	0.024	

注記* : 固有周期 0.05 以上の次数について記載した。

表 4-50 機器系ばねに加わる力 (弾性設計用地震動 S d) (単位 : kN)

構造物	ばね反力 (kN)																	
	弾性設計用地震動 S d																	
	Sd-DI		Sd-11		Sd-12		Sd-13		Sd-14		Sd-21		Sd-22		Sd-31		静的解析	
NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	
制御棒駆動機構ハウジングサポート																		
スタビライザ																		
スタビライザトラス																		
ダイアフラムフロア																		
上部シアラグ																		
下部シアラグ																		

プラント名：東海第二発電所

- | | |
|------------------|--------------------|
| 1 原子炉格納容器 | 6 制御棒駆動機構ハウジング(外側) |
| 2 シヤヘい壁及びベDESTAL | 7 燃料集合体 |
| 3 原子炉圧力容器 | 8 制御棒案内管 |
| 4 原子炉圧力容器(下鏡) | 9 制御棒駆動機構ハウジング(内側) |
| 5 気水分離器及びシュラウド | 10 原子炉建屋 |

固有周期 (s) ; 0.411 刺激係数 ; 1.915

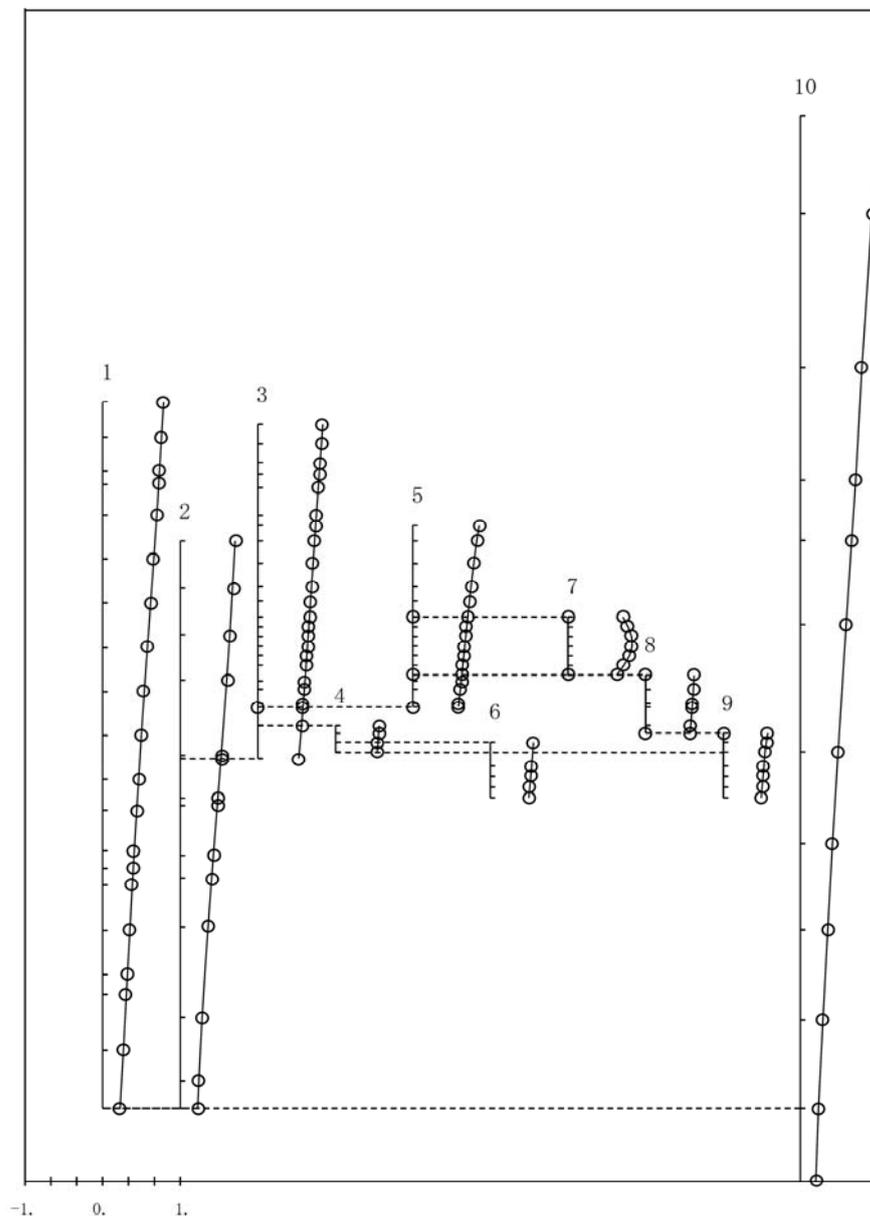


図 4-1 第 1 次刺激関数 (Ss-D1, NS 方向)

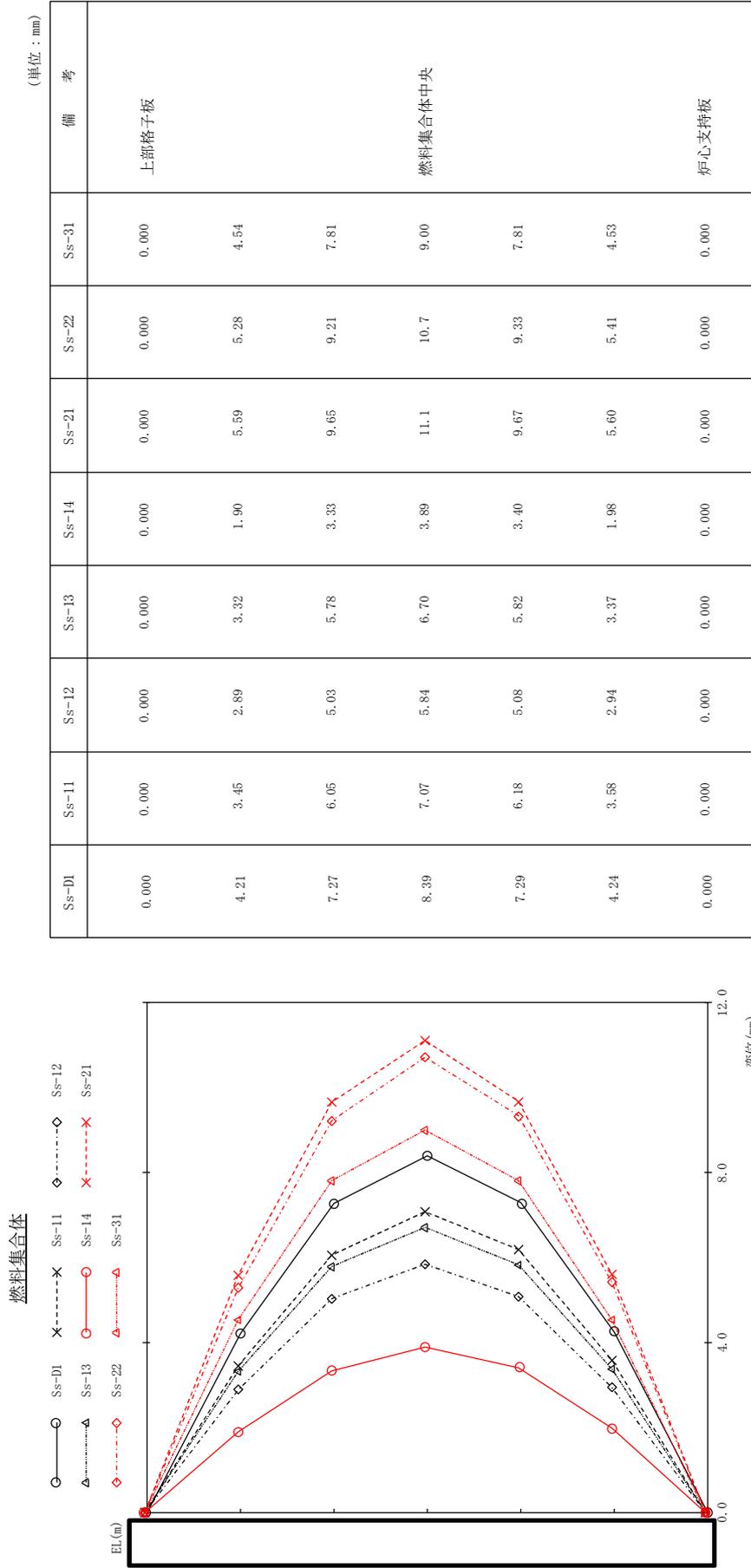
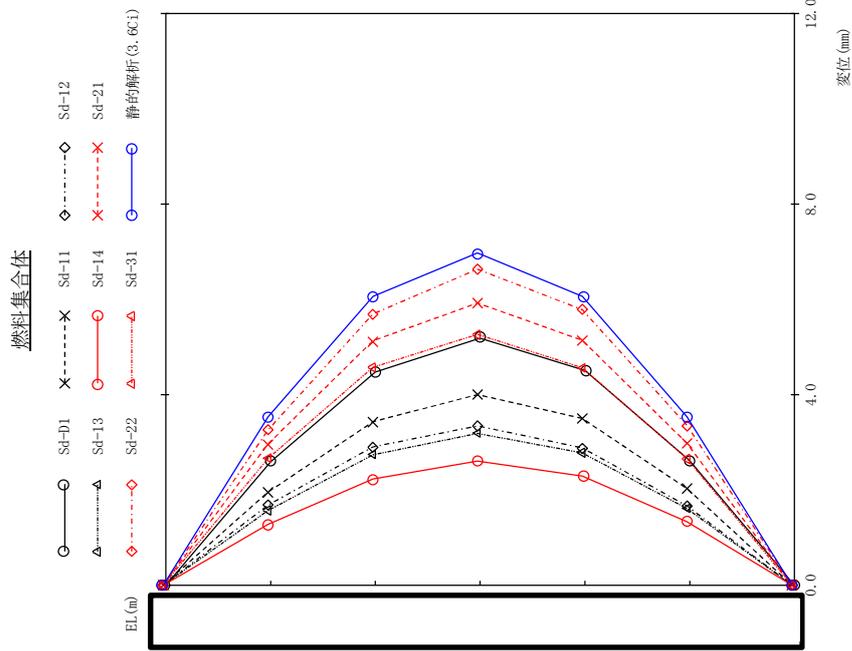


図 4-699 最大応答変位 基準地震動 S s (NS 方向 燃料集合体)



(単位: mm)

Sd-D1	Sd-11	Sd-12	Sd-13	Sd-14	Sd-21	Sd-22	Sd-31	静的解析 (3.6G)	備 考
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	上部格子板
2.59	1.95	1.68	1.57	1.28	2.96	3.26	2.66	3.53	
4.48	3.42	2.90	2.74	2.23	5.12	5.69	4.57	6.06	
5.19	3.99	3.34	3.19	2.61	5.91	6.63	5.26	6.97	燃料集合体中央
4.51	3.49	2.88	2.78	2.29	5.13	5.78	4.56	6.06	
2.62	2.02	1.66	1.61	1.33	2.97	3.35	2.65	3.53	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	炉心支持板

図 4-670 最大応答変位 基準地震動 S d (NS 方向 燃料集合体)

5. 引用図書

- (1) 付録 16 計算機プログラム (解析コード) の概要 D Y N A 2 E