

研究用原子炉（KUR）の標準応答スペクトルに基づく基準地震動(Ss-10)に対する
Sクラス施設・設備の耐震安全性の簡易評価結果について

1. はじめに

試験炉規則の解釈の一部改正(令和3年4月21日)を受け、研究用原子炉(KUR)の基準地震動に関し、標準応答スペクトルによる評価を行う方針及び方針に基づいた評価結果を記載した設置変更承認申請書を令和3年12月14日に原子力規制委員会に申請した。その後、3回の審査会合における審査の結果、令和4年7月22日の審査会合において、評価結果は概ね妥当との判断が下された。結果として基準地震動 Ss-10(表-1, 図-1)が新たに追記された。研究所としては、速やかに補正申請を行い、原子力規制委員会による承認を得た後、Sクラスの施設・設備の Ss-10 に対する耐震安全性を新規制基準対応時におけるそれぞれの施設・設備の評価手法等を参照しつつ確認し、報告する予定である。

今般、規制庁から補正申請前に Ss-10 に対する耐震評価が必要な施設・設備の耐震安全性についての簡易評価方法及びその結果についての説明を求められた。その後、R3年10月12日にまず、Sクラスの施設・設備が設置される原子炉建屋の Ss-10 に基づく地震応答解析を新規制基準対応時の方法(建屋の地震応答解析モデルを図-2に示す)によって行い、その結果、原子炉建屋の Sクラスへの波及的影響の観点から問題ないことを示した。また、Sクラスの施設・設備に対する設工認申請書(耐震評価)に基づき、簡易評価(応答倍率法)の考え方も示した。

本資料では、その後行った Sクラスの施設・設備の Ss-10 による安全性を応答倍率法によって簡易的に評価した。

なお、応答倍率法とは、原設計時の地震(Ss-1~Ss9)による応答と評価対象とする地震(Ss-10)による応答の比(加速度の比)を、原設計時の発生応力に乗ずることにより、評価対象とする地震による発生応力を求める方法を言う。

2. 簡易評価の概要

Sクラスの施設・設備は設置変更承認申請書の耐震重要度分類表(表-2)に示すように、生体遮蔽、燃料要素、炉心支持構造物、炉心直下1次冷却系配管、放射孔・照射孔・計測孔、使用済燃料プール室プール、粗調整用制御棒吸収体、粗調整用制御棒案内管、粗調整用制御棒取付金物の以上9施設・設備である。

また、Sクラスの施設・設備(使用済燃料プール室プール以外)については原子炉建屋を介して地震力が作用するため、応答倍率法を適用するに際しては、それぞれの施設・設備が支持される位置での原子炉建屋床応答加速度を用いる。結果的には、まず Ss-10 による最大床応答加

速度が Ss-1~Ss-9 による結果を下回っていれば安全性が確認できたこととなる。次に、上回った場合でも、当初応力 (Ss-1~Ss-9 による応力) にその増加分 (床応答加速度の比) を乗じることにより Ss-10 による発生応力を求め、許容値を下回っていることを確認することで安全性が確認できる (応答倍率法)。以下に S クラスの施設・設備に対するそれぞれの具体的な評価方法と結果を示す。

3. S クラスの施設・設備の簡易評価結果

1) 生体遮蔽、放射孔・照射孔・計測孔

生体遮蔽体は鉄筋コンクリート構造 (一部重コンクリート) で、その固有周期は 0.025 秒と短く非常に剛な構造物であり、基準地震動による動的地震力は原子炉建屋の 1 階床応答加速度波形の最大加速度から評価できる。ちなみに、放射孔・照射孔・計測孔は生体遮蔽を貫通して設置されていることから、その耐震安全性は、生体遮蔽の耐震安全性をもって確保されると考えている。表 3 に Ss-1 から Ss-10 の原子炉建屋 1 階の床応答最大加速度を示す。表-3 から Ss-10 による水平、鉛直両成分とも Ss-1 を下回っており、Ss-10 による耐震安全性に問題はない。

2) 燃料要素、炉心支持構造物、粗調整用制御棒吸収体、粗調整用制御棒取付金物

燃料要素、炉心支持構造物及び粗調整用制御棒吸収体の固有周期は 0.05 秒以下であり、剛体と考えられ、生体遮蔽と同様に動的地震力は原子炉建屋の 1 階床応答加速度波形の最大加速度から評価できる。なお、粗調整用制御棒取付金物は粗調整用制御棒吸収体に作用する地震力に基づき評価する。以上から、表-3 によりこれらの設備も生体遮蔽と同様、Ss-10 による水平、鉛直両成分とも Ss-1 を下回っており、Ss-10 による耐震安全性に問題はない。

3) 炉心直下 1 次冷却系配管 (S クラス) とその他の 1 次冷却系配管 (B クラス)

原子炉建屋地階に設置された 1 次冷却系配管は耐震 S クラスである炉心直下部 (評価上は炉心直下のサポートまでの区間としている) に加え、耐震 B クラスのその他の配管等 (ポンプや弁など) から構成される。例として図-3 に 1 次冷却系配管入口側の概略図を示す。S クラス部分及び B クラス部分は連続した構造となっているため、解析に際するモデル化は一体モデルとした。新規制基準対応時における耐震評価は、一体モデルでの固有周期が 0.05 秒以下の剛とはならないため、地震応答解析 (スペクトルモーダルアナリシス) による評価を行った。スペクトルモーダルアナリシスの適用に際してのスペクトルとしては、配管サポートが一部地下 1 階天井 (1 階床) に設置されているため、Ss-1~Ss-9 のすべての原子炉建屋地階と 1 階の床応答加速度スペクトルを包絡するスペクトルとして評価した。なお、水平成分は、NS 成分と EW 成分の 2 成分を考慮した。

以上から、簡易評価としては、スペクトルモーダルアナリシスに用いたスペクトル (SMA スペクトルと言う) と今回の Ss-10 によるスペクトルを比較することで行う。図-4、図-5 には減衰 1% (文献 3) の水平成分と鉛直成分についての SMA スペクトルと Ss-10 によるスペクトル

との比較を示す。図には配管系の固有値解析結果による固有周期（表 4）の内、1 次モードから 4 次モードまでを示す。

これらの図から、水平成分については Ss-10 によるスペクトルは対象とする周期範囲（1 次固有周期より短周期側）では SMA スペクトルを優位に下回っているが、鉛直成分については 1 次から 4 次モードの固有周期（0.169 秒、0.129 秒、0.078 秒、0.072 秒）における Ss-10 における応答値と SMA スペクトルを比較すると、その比は最大で 1.05 倍である（表-5 参照）。一方、SMA スペクトルに基づく S クラスの応力評価結果を表-6 に示す。Ss-10 による鉛直成分の倍率(1.06 倍)を水平成分も含め、すべてのモードの固有周期における倍率と見なした場合（非常に保守的）でも表-6 に示した応力比から判断すると Ss-10 による応力比（ $0.28 \times 1.06 \div 0.30$ ）は 1.0 を下回っており、S クラスの 1 次冷却系配管については Ss-10 による耐震安全性に問題はない。B クラスの 1 次冷却系配管についても表-7 に示した応力比から判断すると Ss-10 による応力比（ $0.56 \times 1.06 \div 0.60$ ）は 1.0 を下回っており、Ss-10 による耐震安全性に問題はない。

4) 粗調整用制御棒案内管

粗調整用制御棒の案内管は、固有値解析の結果、剛構造と見なすことができないため、前述の 1 次冷却系配管と同様の地震応答解析（スペクトルモーダルアナリシス）によって動的地震力を求めている。鉛直方向はほぼ剛体と考えられるため、地震応答解析の適用は水平方向のみとしている。スペクトルモーダルアナリシスの適用に際してのスペクトルとしては、Ss-1～Ss-9 のすべての原子炉建屋 1 階の床応答加速度スペクトルの水平 2 成分（NS と EW）のベクトル合成値を包絡するスペクトルとしている。Ss-10 による水平成分は前述したように全周期帯において SMA スペクトルより優位に小さいため、問題なく、一方、鉛直成分については表-3 に示したように、Ss-10 の 1 階床応答加速度波形の最大加速度が Ss-1～Ss-9 の最大値を下回っており、問題ない。

5) 使用済燃料プール室プール

原子炉建屋の地震応答解析結果（Ss-10 も含む）による応答結果（図-6 から図-8）によれば、Ss-10 による基礎盤位置での応答は、水平及び鉛直成分とも Ss-1～Ss-9 の中でも応答値の大きい代表的な結果を下回っていることから、プールの Ss-10 による耐震安全性に問題はない。

4. 参考資料

- 1) 京都大学原子炉実験所の原子炉施設「京都大学研究用原子炉（KUR）」の変更に係る設計及び工事の方法の承認申請書（その 4）：28 京大施環化第 402 号（平成 29 年 3 月 31 日）
- 2) 京都大学原子炉実験所の原子炉施設「京都大学研究用原子炉（KUR）」の変更に係る設計及び工事の方法の承認申請書（その 4）の一部補正について：29 京大施環化第 29 号（平成 29 年 4 月 28 日）
- 3) 「原子力発電所耐震設計技術指. 針 JEAG4601-1991 追補版、(社)日本電気協会」

表-1 基準地震動の最大加速度

基準地震動		NS方向	EW方向	UD方向	
震源を特定して策定する地震動	応答スペクトル法	944	模擬地震波	358	
	断層モデルを用いた手法		Ss-1	中央構造線断層帯 (モデル1、ケース1)	215
			Ss-2	中央構造線断層帯 (モデル1、ケース4)	252
			Ss-3	中央構造線断層帯 (モデル1、ケース5)	133
			Ss-4	上町断層帯 (モデル1、ケース1)	194
			Ss-5	上町断層帯 (モデル1、ケース4)	213
			Ss-6	上町断層帯 (モデル1、ケース5)	170
			Ss-7	上町断層帯 (モデル1、ケース6)	196
			Ss-8	上町断層帯 (モデル2、ケース4)	293
			Ss-9	模擬地震波	586
震源を特定せず策定する地震動(標準応答スペクトルによる)	応答スペクトル法				

表-2 KUR)耐震重要度分類

耐震クラス	クラス別施設	施設名	当該構造物等を支持する建物・建築物等	支持機能を確認する地震動
S	炉心及び冠水維持設備を構成する機器・配管系	<ul style="list-style-type: none"> ・生体遮蔽(炉心タンクと一体) ・燃料要素 ・炉心支持構造物 ・炉心直下1次冷却系配管 ・放射孔、照射孔、計測孔(冠水維持に係る部分) 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・当該施設の支持構造物 ・生体遮蔽 	Ss
	炉心から取り出した直後の使用済燃料を貯蔵するための施設	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料プール室プール 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の基礎 	Ss
	原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を添加するための施設及び原子炉の停止状態を維持するための施設	<ul style="list-style-type: none"> ・粗調整用制御棒吸収体 ・粗調整用制御棒案内管 ・粗調整用制御棒取付金物 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の支持構造物 ・生体遮蔽 	Ss
B	原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設	<ul style="list-style-type: none"> ・1次循環ポンプ(無停電駆動電源含む) ・サブパイルルーム漏えい水汲み上げ設備 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の支持構造物 	注1
	1次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設	<ul style="list-style-type: none"> ・1次冷却系配管(炉心直下部以外) ・1次浄化設備(イオン交換塔) 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の支持構造物 	注1
	重水を内蔵しているか又は内蔵し得る施設	<ul style="list-style-type: none"> ・重水タンク 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の支持構造物 	注1
	1次冷却水に接している施設	<ul style="list-style-type: none"> ・熱交換器 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の支持構造物 	注1
	燃料を貯蔵する施設	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料貯蔵用ラック(炉心タンク内) ・燃料貯蔵用ラック(使用済燃料プール室) ・燃料貯蔵用ラック(使用済燃料室) ・燃料貯蔵用ラック(新燃料貯蔵室) ・使用済燃料室プール 	<ul style="list-style-type: none"> ・生体遮蔽 ・使用済燃料プール室プール ・使用済燃料室プール ・新燃料貯蔵室 ・当該施設の基礎 	注1
	放射性廃棄物を内蔵している施設	<ul style="list-style-type: none"> ・放射性廃液貯留槽 ・第2固形廃棄物倉庫 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の支持構造物 ・当該施設の基礎 	注1
	放射性物質の放出を伴うような場合、その外部放散を抑制するための設備	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋(注3) ・非常用排気設備 ・スタック、煙道 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の基礎 ・原子炉棟 	注1
	放射線の監視をするための設備	<ul style="list-style-type: none"> ・放射線監視盤(原子炉制御室) 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 	注1
	プラント状態の監視をするための設備	<ul style="list-style-type: none"> ・核計装盤 ・プロセス計装盤 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 	注1
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用電源設備 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・原子炉棟 ・臨界集合体棟電機室 	注1	
C	その他	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却塔 ・2次冷却系配管 ・2次循環ポンプ ・主排気設備 ・放射性廃水排水管 ・廃棄物処理棟 ・第1固形廃棄物倉庫 ・使用済燃料プール水汲み上げ設備 ・高架水槽給水設備 ・主要な実験設備 ・新燃料貯蔵室(注3) ・非常警報装置(中央管理室) ・使用済燃料プール室 	<ul style="list-style-type: none"> ・当該施設の基礎 ・当該施設の支持構造物 ・原子炉棟 ・原子炉建屋 	注2

表-3 原子炉建屋の地震応答解析による建屋1階床の最大応答加速度 (cm/s²)

入力地震動	NS(X)水平成分	EW(Y)水平成分	UD鉛直成分
Ss1	673	668	695
Ss2	558	618	294
Ss3	663	673	426
Ss4	484	979	279
Ss5	435	610	292
Ss6	563	897	441
Ss7	662	680	217
Ss8	647	618	240
Ss9	571	936	478
Ss10	367	369	524

表-4 一次冷却系配管の固有値解析結果

モード	固有周期 (周波数)
1次	0.169sec (5.921Hz)
2次	0.129sec (7.760Hz)
3次	0.078sec (12.786Hz)
4次	0.072sec (13.929Hz)
5次	0.051sec (19.446Hz)
6次	0.048sec (20.899Hz)
7次	0.043sec (23.211Hz)

表-5 各モードにおける Ss-10 のスペクトル と SMA の応答値の比

固有周期 (秒)	加速度応答 (Ss-10)	加速度応答 (SMA)	加速度応答比 (Ss-10)/(SMA)
0.169 (1次)	2108	2646	0.80
0.129 (2次)	2956	3428	0.86
0.078 (3次)	2443	2307	1.06
0.072 (4次)	1630	1666	0.98

表-6 1次冷却配管 (S クラス部分) の応力評価結果

最大応力度リスト

最大応力 評価節点	一次 応力評価			最大応力度比 発生位置図
	発生応力度	許容応力度	応力度比	
326	14	70.5	0.20	第 27 図

最大応力 評価節点	一次+二次 応力評価			最大応力度比 発生位置図
	発生応力度	許容応力度	応力度比	
322	22	81.6	0.28	第 28 図

※応力度は N/mm²、応力度比は発生応力と許容値の割合を示す。

表-7 1次冷却系配管（Bクラス）の応力評価結果

Bクラス部 最大応力リスト

最大応力 評価節点	一次応力評価			最大応力度比 発生位置図
	発生応力度	許容応力度	応力度比	
205	39	70.5	0.56	第 31 図

応力度は N/mm²、応力度比は発生応力と許容値の割合を示す。

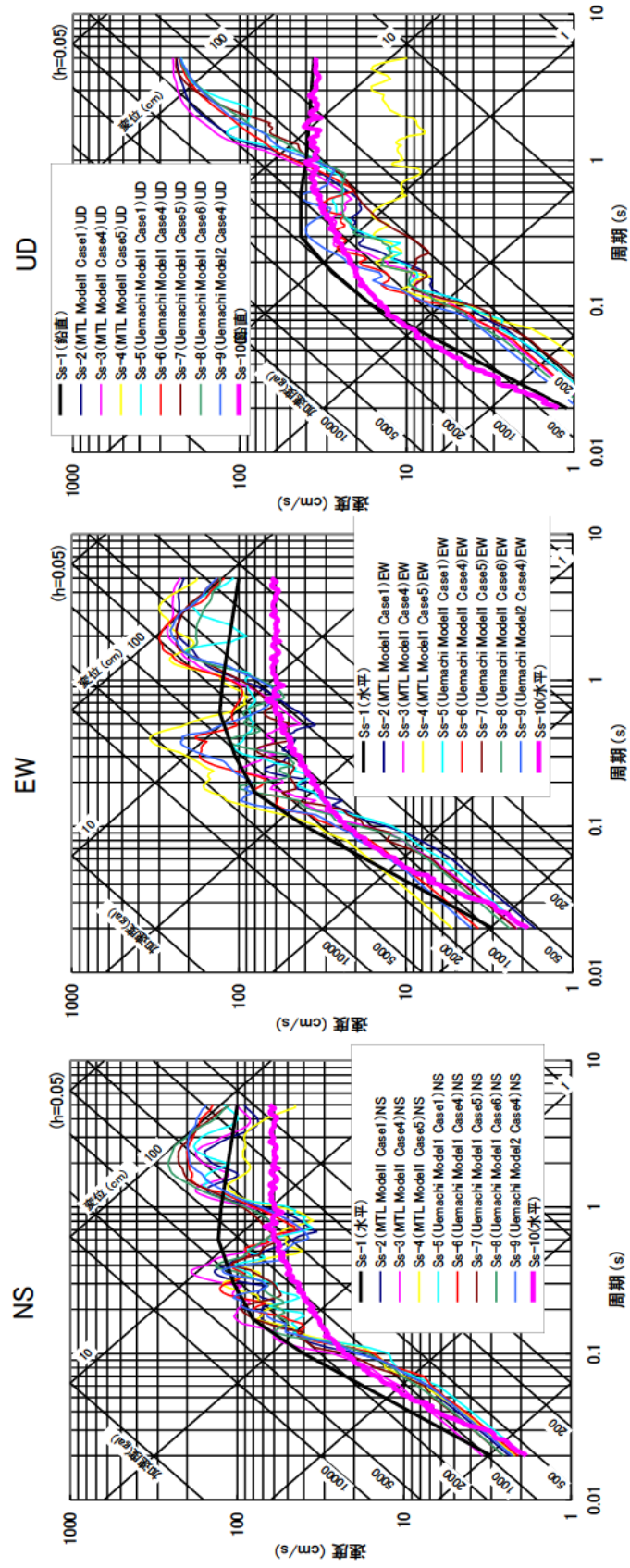


図-1 基準地震動

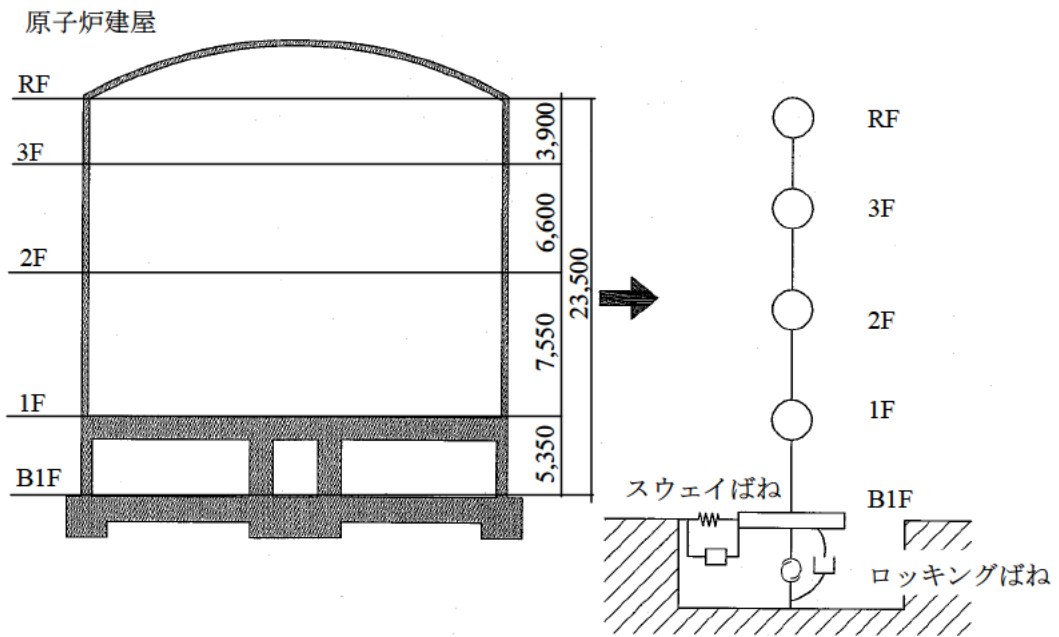


図-2 原子炉建屋の地震応答解析のための質点系モデル

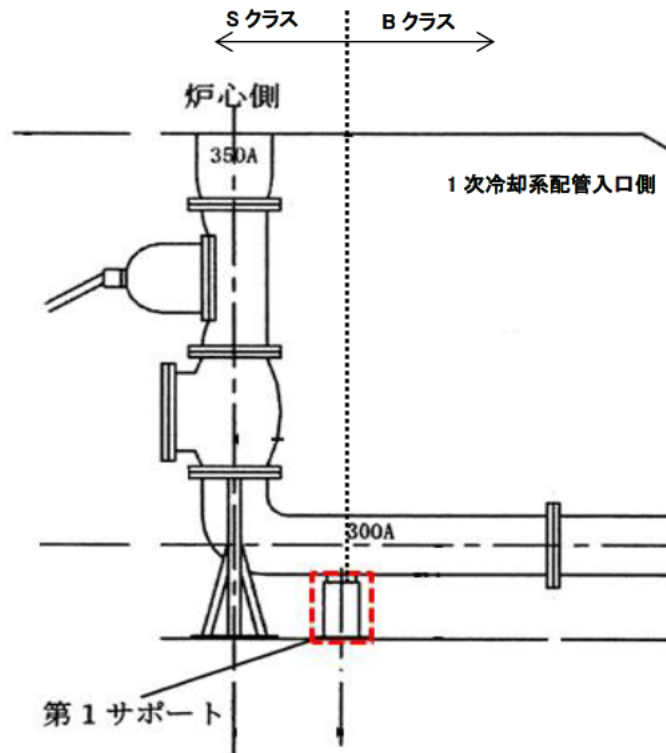


図-3 1次冷却系配管のSクラス部分の概略図

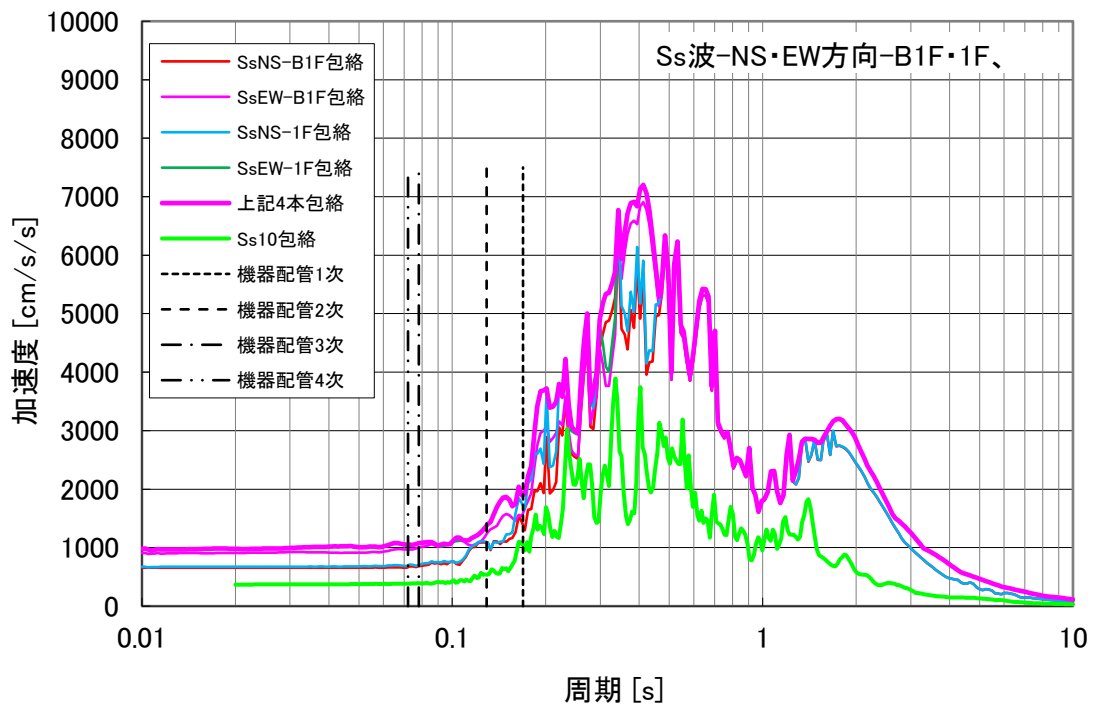


図-4 SMA スペクトルと Ss-10 のスペクトル (水平成分: 1%減衰)

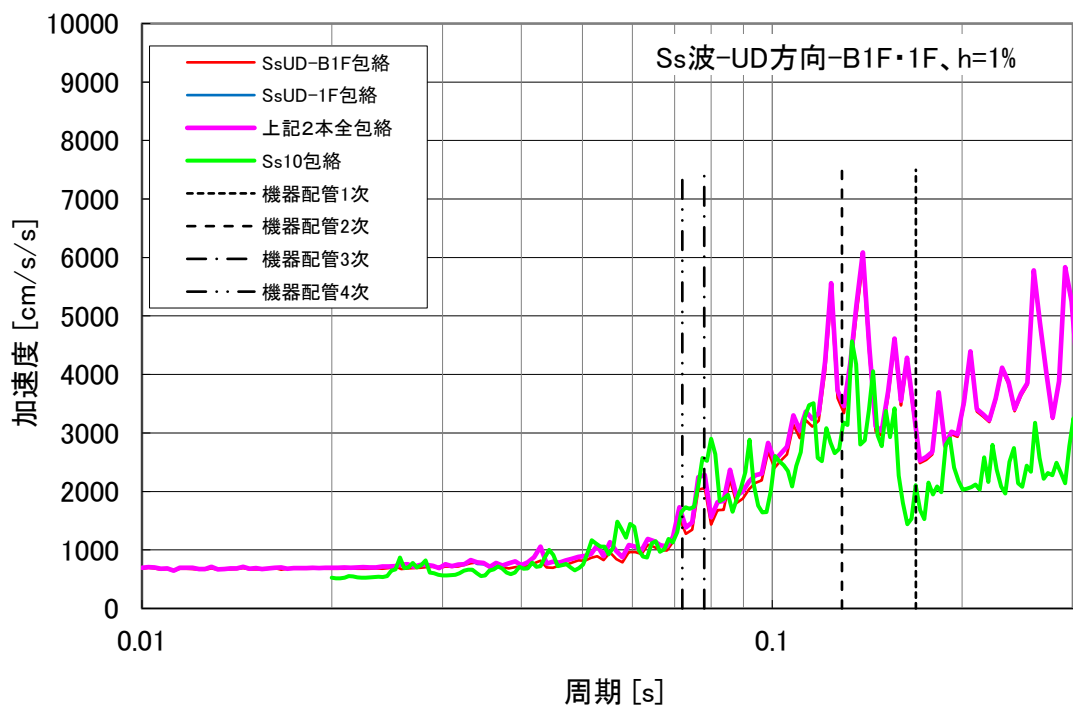
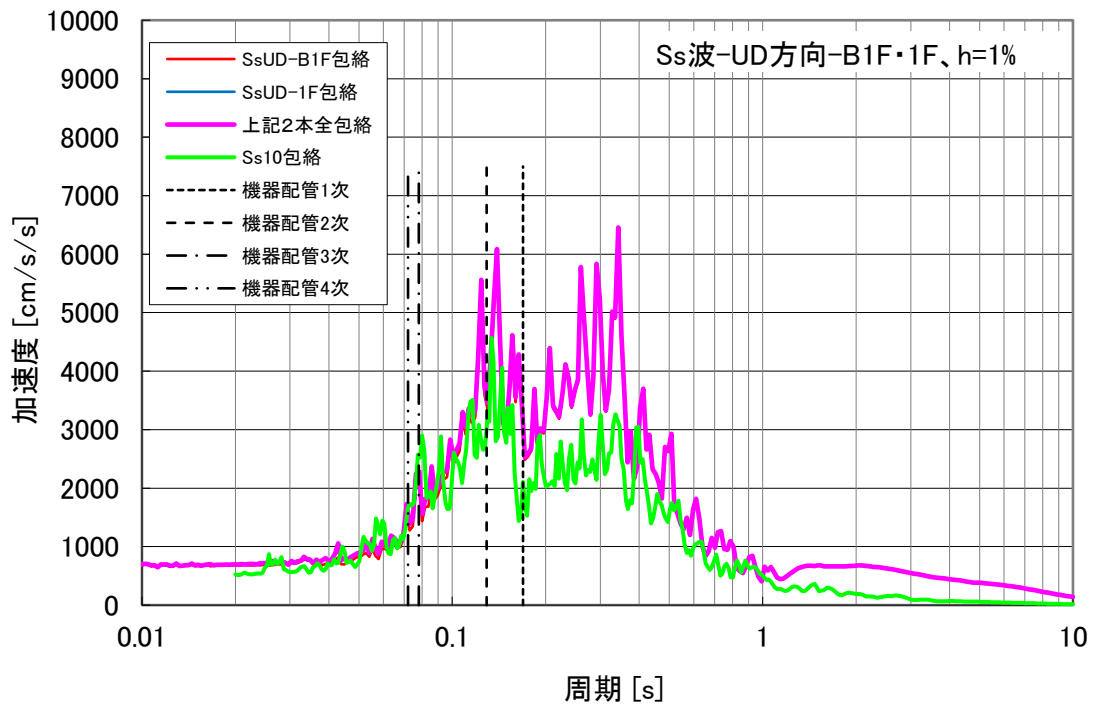


図-5 SMA スペクトルと Ss-10 のスペクトル (鉛直成分：1%減衰)

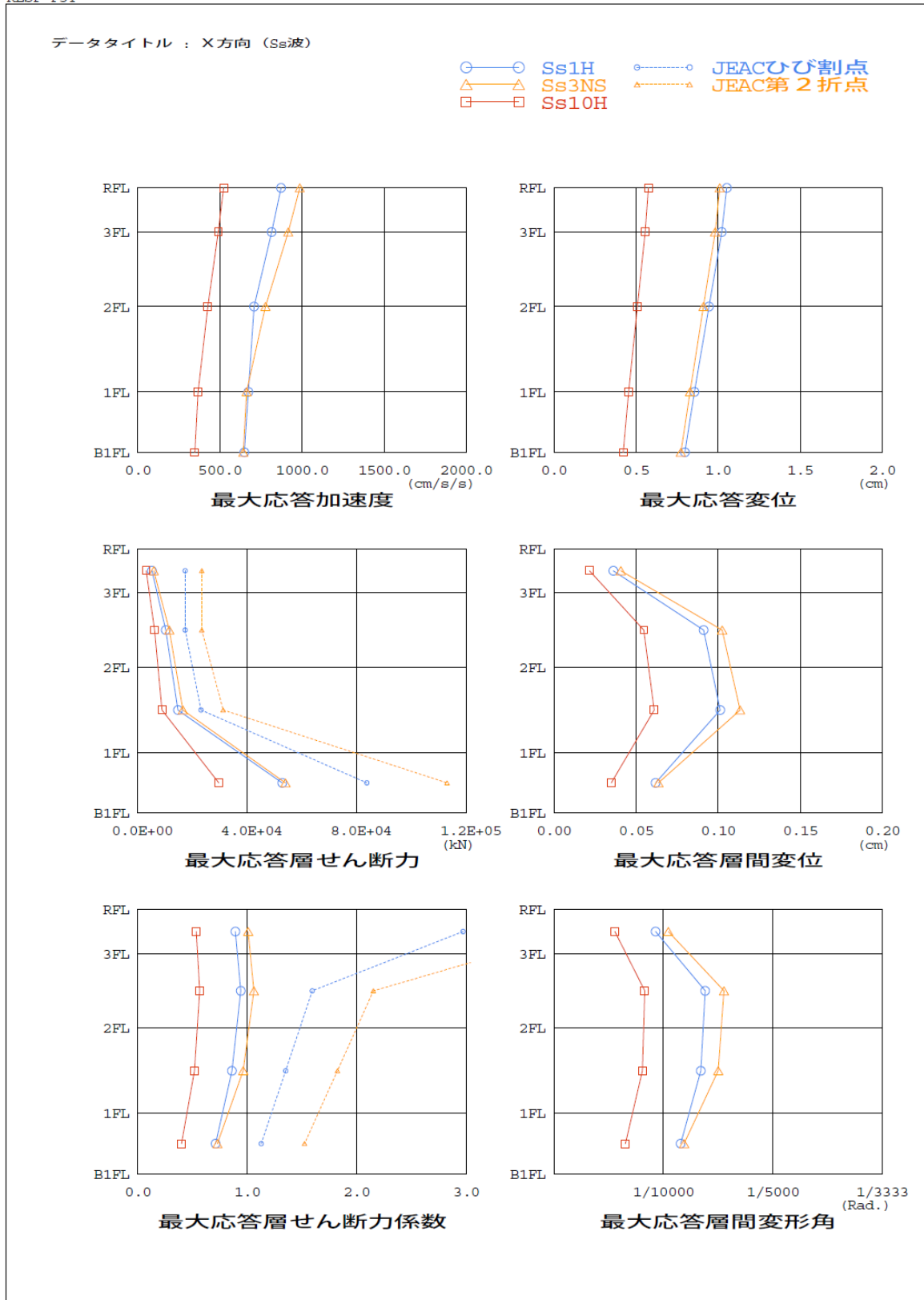


図-6 原子炉建屋の地震応答解析結果 (NS 方向)

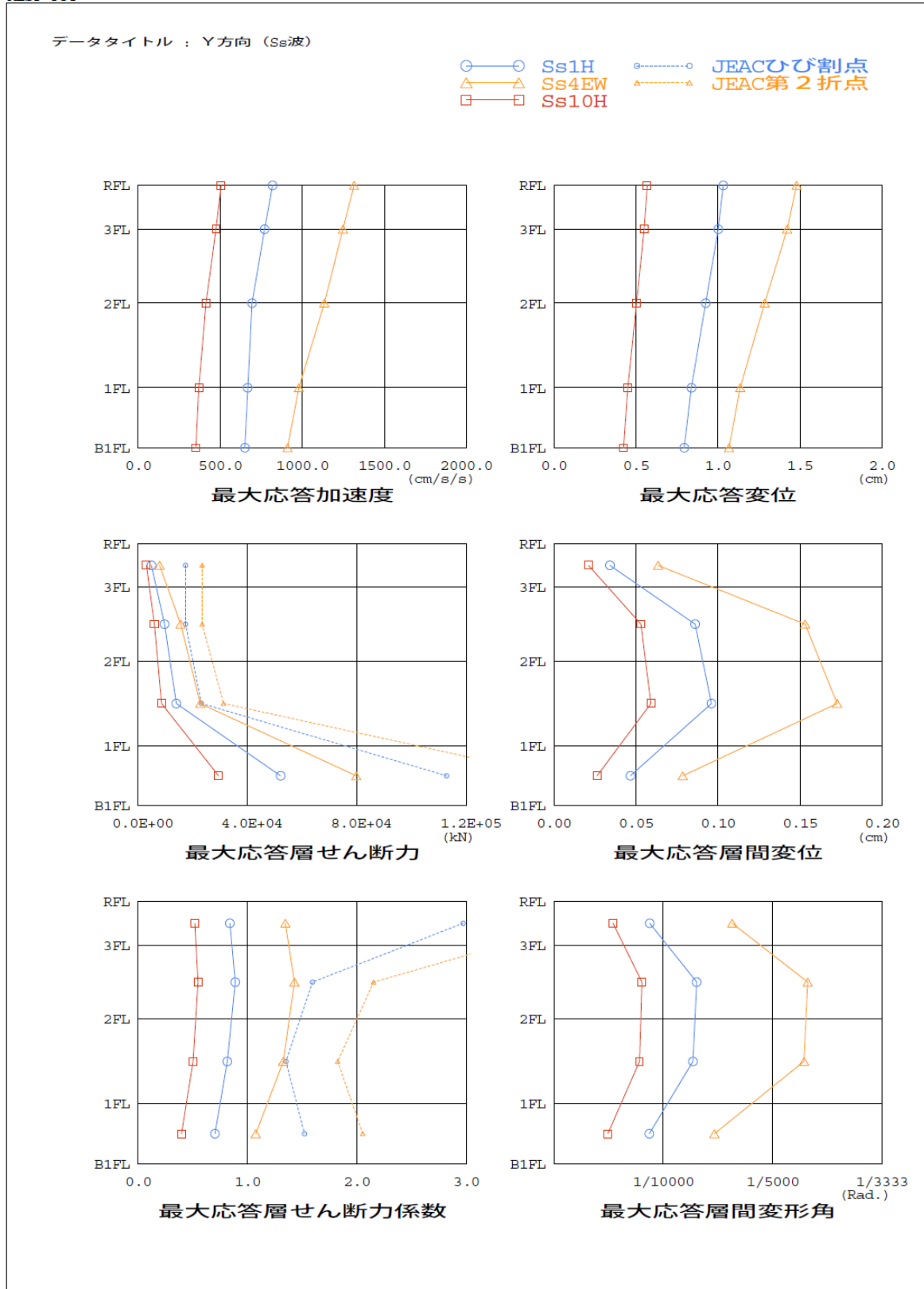


図-7 原子炉建屋の地震応答解析結果 (EW 方向)

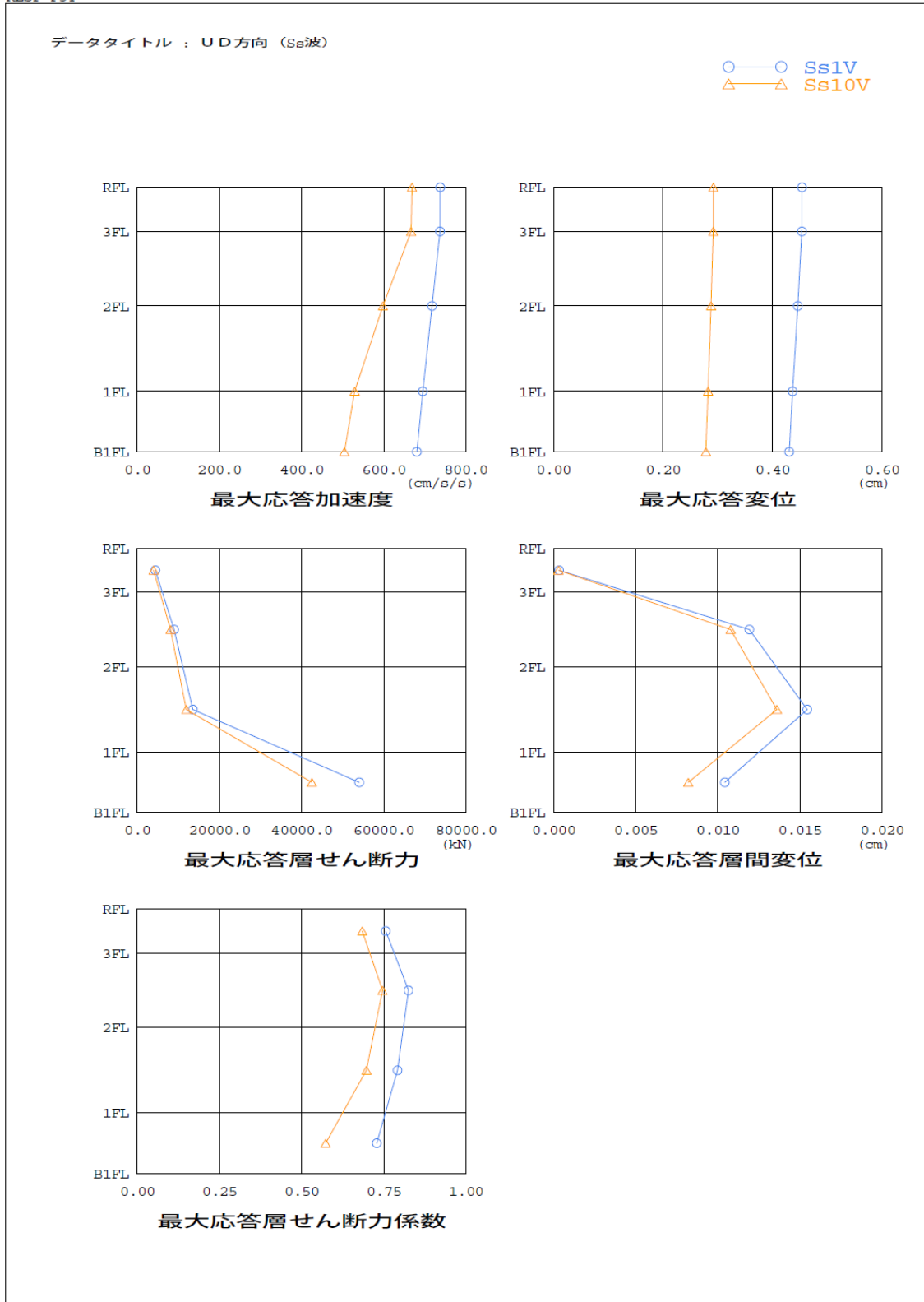
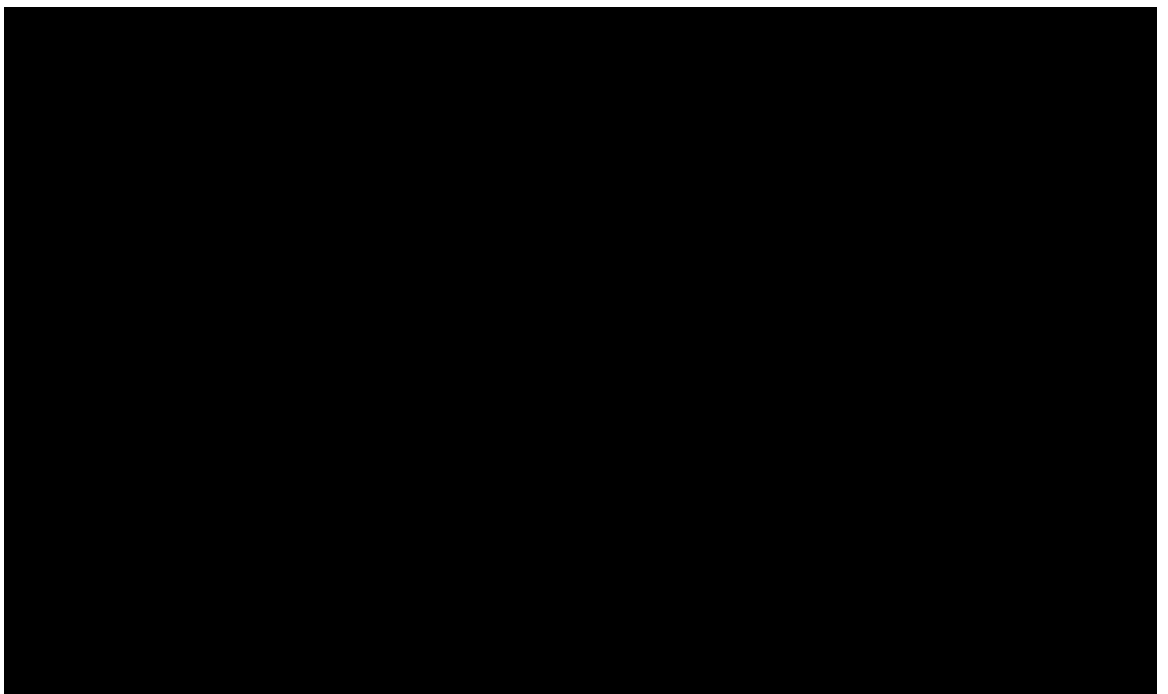
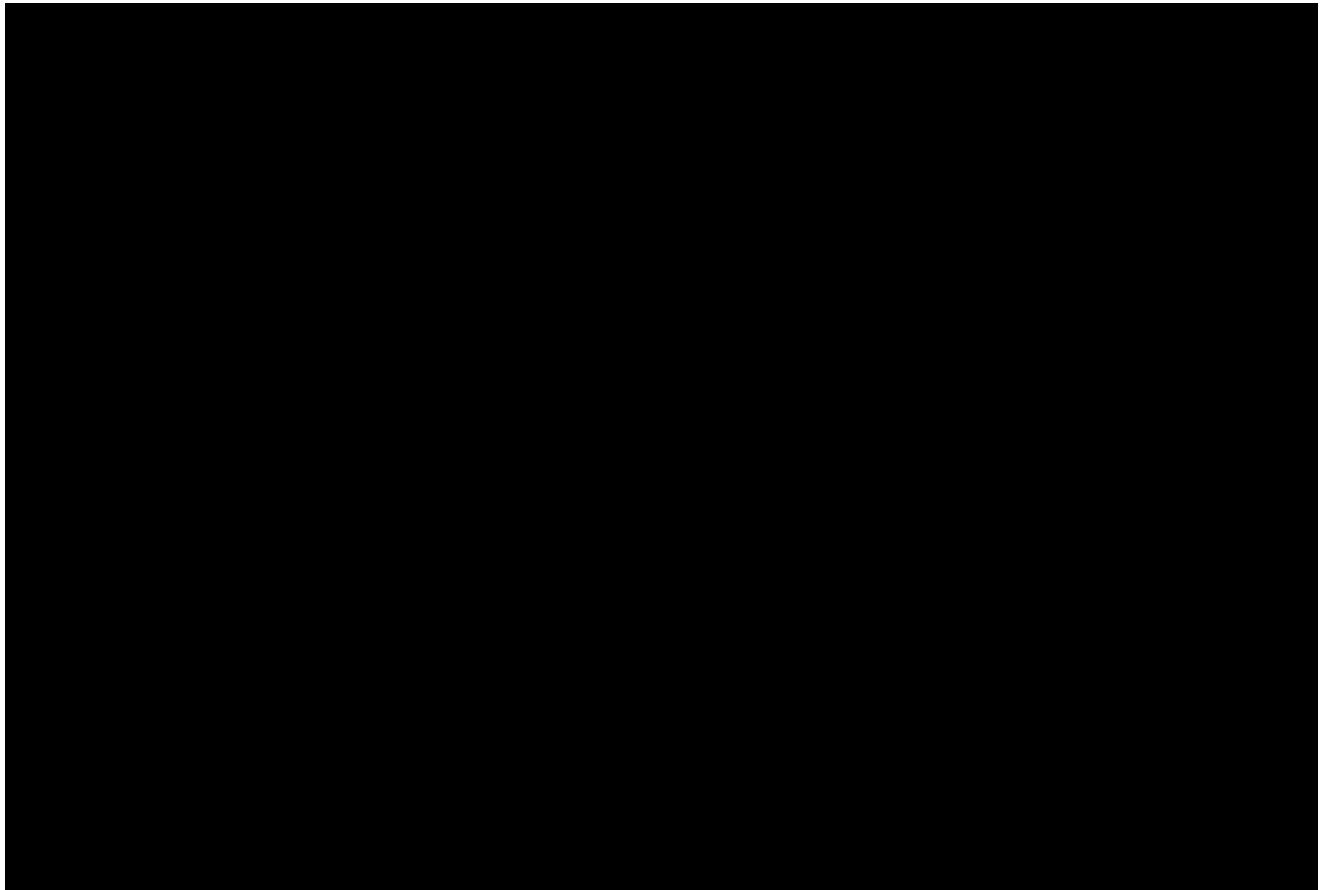
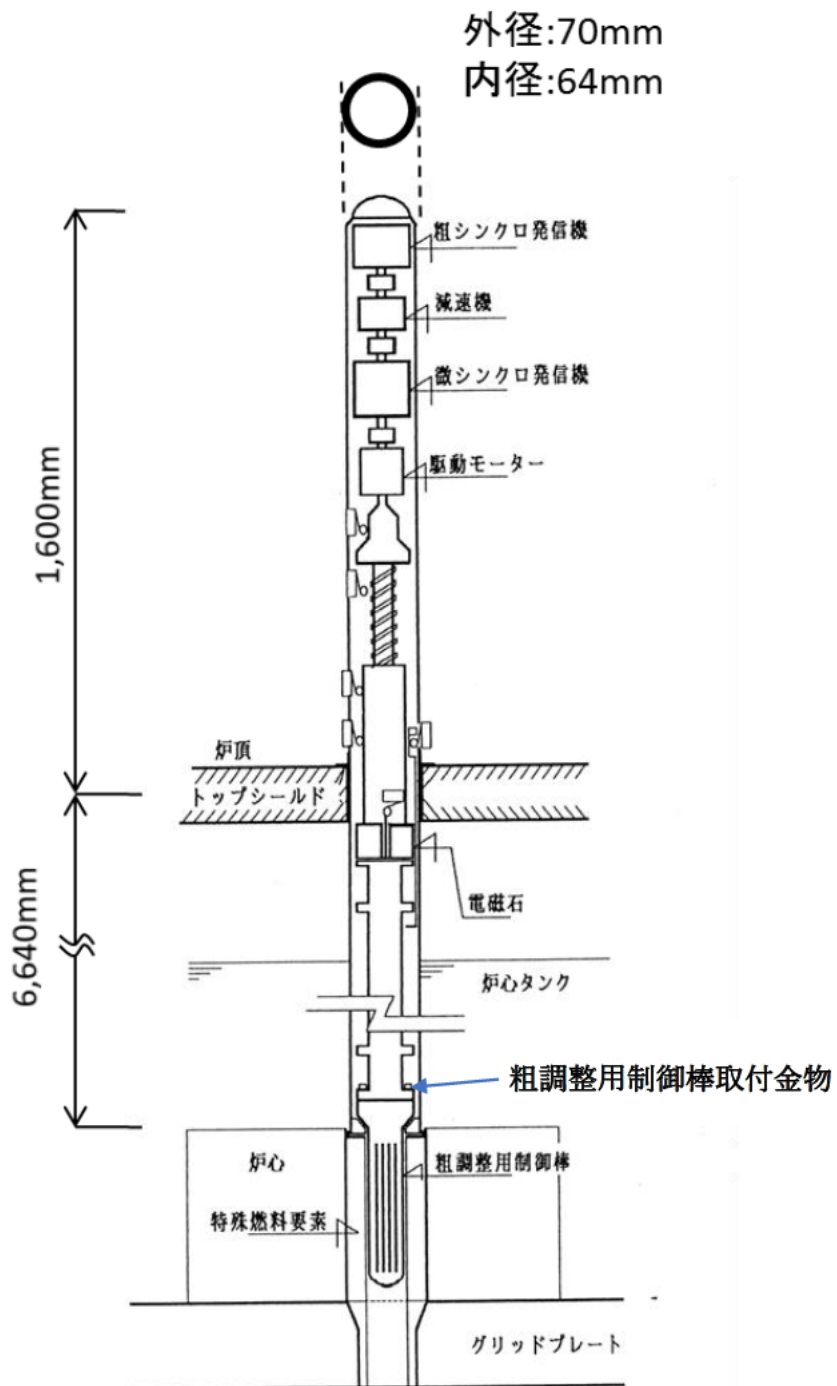


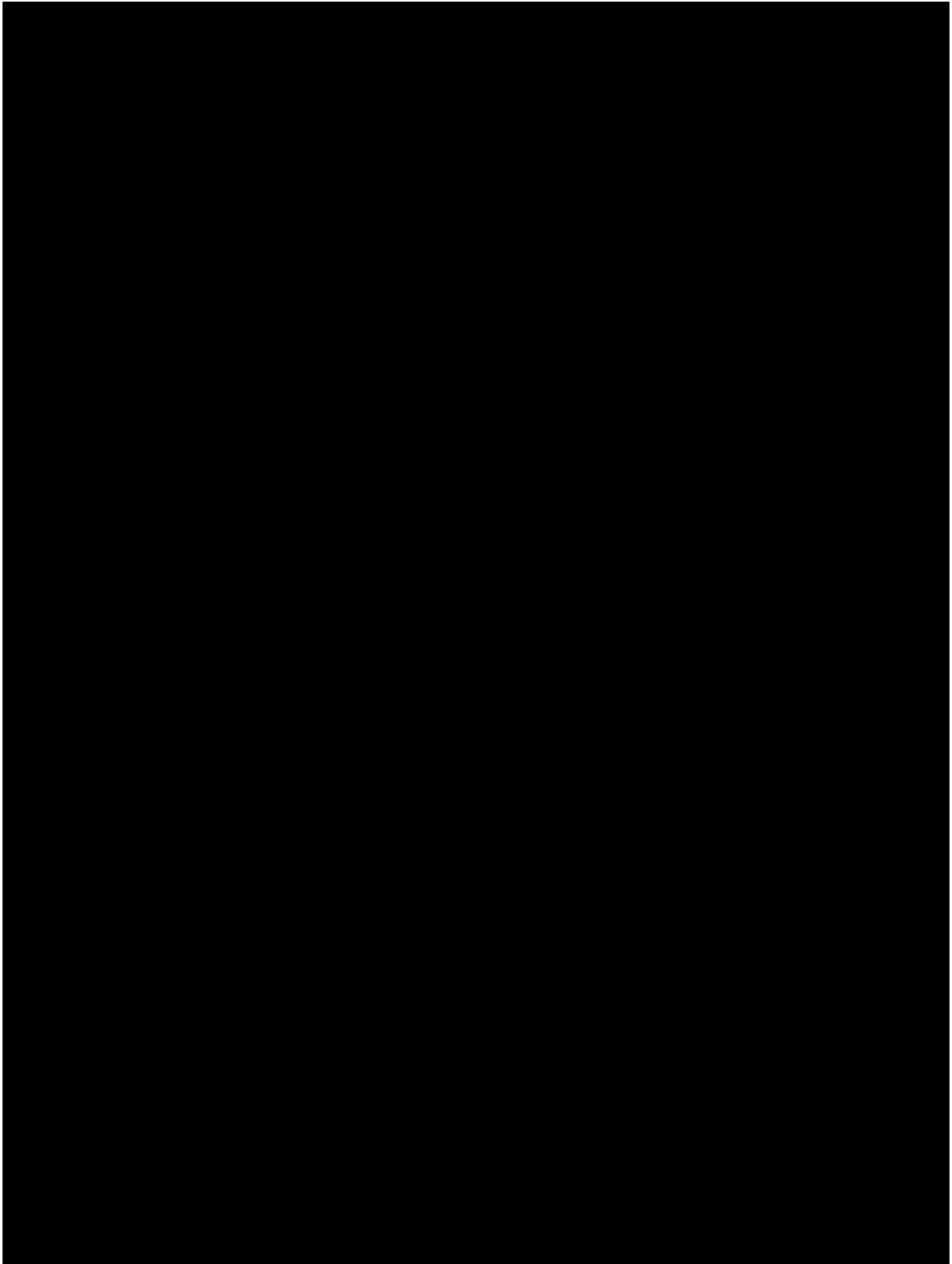
図-8 原子炉建屋の地震応答解析結果 (UD 方向)



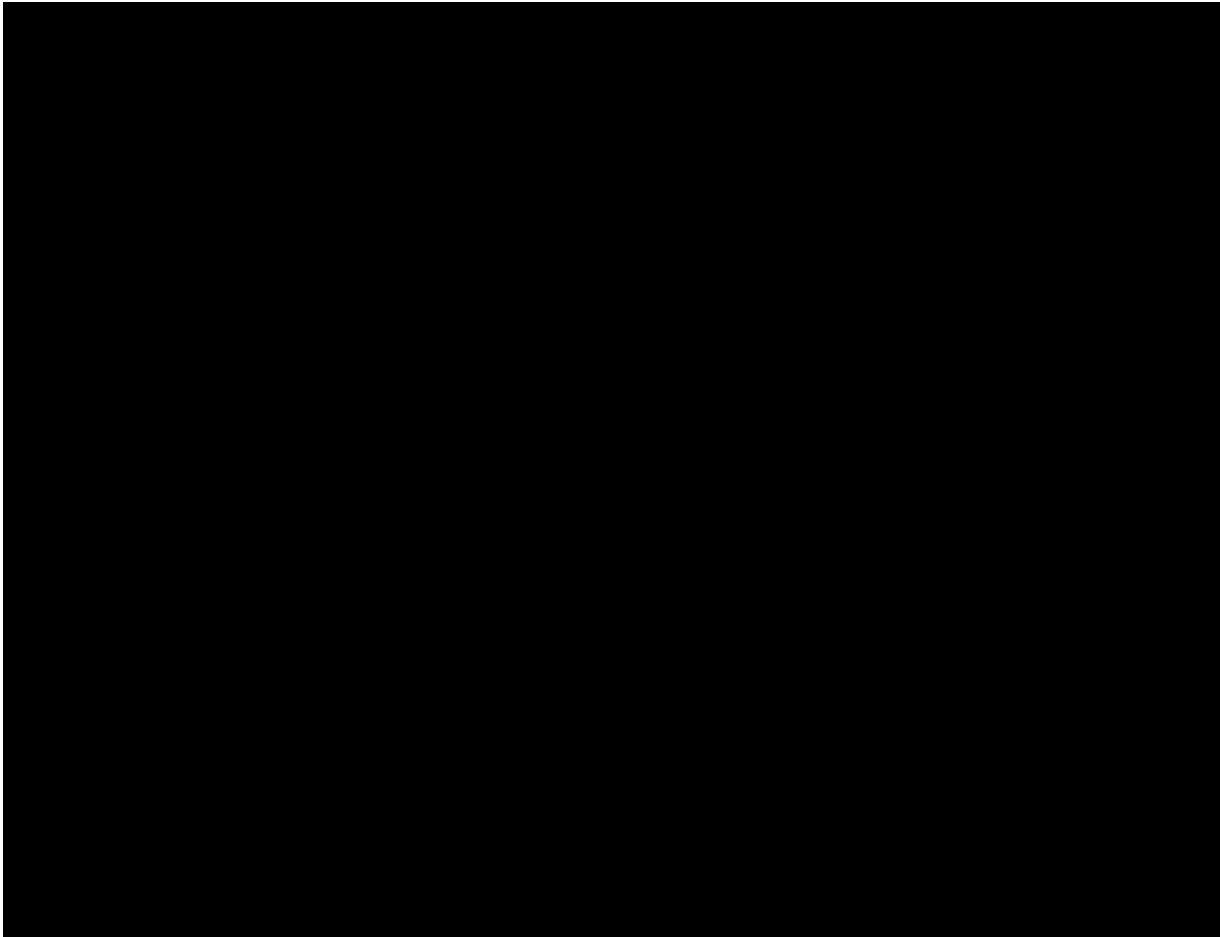
使用済燃料プール室プールの概略図



粗調整用制御棒案内管、粗調整用制御棒取付金物の概略図



燃料要素の概略図と片持ちばりモデル



炉心支持構造物の概略図

Sクラス施設・設備の固有周期

Sクラスの施設・設備	固有周期(秒)
生体遮蔽	0.025
一次冷却系配管	別資料に記載
燃料要素	0.012
粗調整用制御棒案内管	1次：0.318 2次：0.128 3次：0.057
炉心支持構造物	0.015