平成30年6月29日
日本原子力発電株式会社

東海第二発電所　工事計画認可申請資料　提出リスト(耐震計算書分)

No.	資料番号	資料名称	
1	工認-855 改0	Ⅴ-2-3-3-2-1 炉心支持構造物の応力解析の方針	
2	工認-856 改0	Ⅴ-2-3-4-4-1 原子炉圧力容器内部構造物の応力解析の方針	
3	工認-857 改0	Ⅴ-2-9-2-3 上部シアラグ及びスタビライザの耐震性についての計算書	
4	工認-778　改0	Ⅴ-2-3-4-3-1　原子炉圧力容器スタビライザの耐震性についての計算書	
5	工認-779　改0	Ⅴ-2-3-4-3-2　原子炉格納容器スタビライザの耐震性についての計算書	
6	工認-702　改0	Ⅴ-2-9-2-6　機器搬入用ハッチの耐震性についての計算書	
7	工認-701　改0	Ⅴ-2-9-2-7　所員用エアロックの耐震性についての計算書	
8	工認-700　改0	Ⅴ-2-9-2-8 サプレッション・チェンバアクセスハッチの耐震性についての計算書	
9	工認-780　改0	Ⅴ-2-9-2-1-1 ダイヤフラム・フロアの耐震性についての計算書	
10	工認-781 改0	Ⅴ-2-3-4-3-3 制御棒駆動機構ハウジング支持金具の耐震性についての	
11	工認-775　改0	Ⅴ-2-9-2-4_下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの耐震性についての計算書	
12	工認-782 改0	Ⅴ-2-9-2-5 胴アンカー部の耐震性についての計算書	
13	工認-770 改0	Ⅴ-2-9-2-9 配管貫通部の耐震性についての計算書	
14	工認-771　改0	Ⅴ-2-9-2-10_電気配線貫通部の耐震性についての計算書	
15	工認-772 改0	Ⅴ-2-9-4-2 ベント管の耐震性についての計算書	
16	工認-773 改0	Ⅴ-2-9-4-3-1 格納容器スプレイヘッダの耐震性についての計算書	
17	工認-746 改0	Ⅴ-2-4-2-3 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震性についての計算書	
18	工認-744 改0	Ⅴ-2-11-2-6 制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算書	
19	工認-745 改0	Ⅴ-2-11-2-7 制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書	
20	工認-762 改0	Ⅴ－5－28 計算機プログラム（解析コード）の概要・ＣＯＮＤＳＬＩＰ	
21	工認-601　改0	Ⅴ-2-5-8-1-1_管の耐震性についての計算書	
22	工認-604　改0	Ⅴ-2-9-5-4-2_管の耐震性についての計算書	
23	工認-606　改0	Ⅴ-2-5-5-2-3 管の耐震性についての計算書	
24	工認-774　改0	Ⅴ-2-5-7-1-1 残留熱除去系海水系ポンプの耐震性についての計算書	
25	工認-711　改0	Ⅴ-2-10-1-3-6 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	
26	工認-619　改0	Ⅴ-2-9-6-1-1 管の耐震性についての計算書	

27	工認-611　改0	Ⅴ-2-5-3-1-2管の耐震性についての計算書	
28	工認-776　改0	Ⅴ-2-10-1-2-3最新版_非常用ディーゼル発電機燃料油デイタンクの耐震計算書	
29	工認-777　改0	Ⅴ-2-10-1-3-3 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 燃料油デイタンクの耐震性についての計算書	
30	工認-615　改0	Ⅴ-2-6-6-2-1_管の耐震性についての計算書	
31	工認-613　改0	Ⅴ-2-6-6-1-1_管の耐震性についての計算書	
32	工認-621 改0	Ⅴ-2-9-5-1-1 管の耐震性についての計算書　（非常用ガス再循環系）	
33	工認-859 改0	Ⅴ-2-11-2-4 チャンネル着脱機の耐震性についての計算書	
34	TK-1-1363 改0	工事計画に係る補足説明資料　補足-500-1【計算機プログラム（解析コード）の概要に係る補足説明資料】 ［Ⅴ-5-3 計算機プログラム（解析コード）ＳＡＰⅣ］	
35	工認-387 改2	Ⅴ-5-3 計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＡＰ-Ⅳ	
36	TK-1-1300 改0	補足-500-1【計算機プログラム（解析コード）の概要に係る補足説明資料】	
37	工認-439 改1	Ⅴ-5-4 計算機プログラム（解析コード）の概要 ・ＨＩＳＡＰ及びＮＳＡＦＥ	
38	工認-828 改0	Ⅴ-2-4-2-4 使用済燃料プール温度（ＳＡ）の耐震性についての計算書	
39	工認-649 改0	Ⅴ-2-6-5-3 主蒸気流量の耐震性についての計算書	
40	工認-709 改0	Ⅴ-2-6-5-5 高圧代替注水系系統流量の耐震性についての計算書	
41	工認-791 改0	Ⅴ-2-6-5-11 代替循環冷却系ポンプ入口温度の耐震性についての計算書	
42	工認-798 改0	Ⅴ-2-6-5-12 残留熱除去系熱交換器入口温度の耐震性についての計算書	
43	工認-795 改0	Ⅴ-2-6-5-13 残留熱除去系熱交換器出口温度の耐震性についての計算書	
44	工認-829 改0	Ⅴ-2-6-5-14 原子炉隔離時冷却系系統流量の耐震性についての計算書	
45	工認-650 改0	Ⅴ-2-6-5-15 高圧炉心スプレイ系系統流量の耐震性についての計算書	
46	工認-651 改0	Ⅴ-2-6-5-16 低圧炉心スプレイ系系統流量の耐震性についての計算書	
47	工認-841 改0	Ⅴ-2-6-5-17 残留熱除去系系統流量の耐震性についての計算書	
48	工認-785 改0	Ⅴ-2-6-5-18 原子炉圧力の耐震性についての計算書	
49	工認-654 改0	Ⅴ-2-6-5-20 原子炉水位の耐震性についての計算書	
50	工認-661 改0	Ⅴ-2-6-5-21 原子炉水位（広帯域）の耐震性についての計算書	
51	工認-662 改0	Ⅴ-2-6-5-22 原子炉水位（燃料域）の耐震性についての計算書	
52	工認-635 改0	Ⅴ-2-6-5-25 ドライウェル圧力の耐震性についての計算書	
53	工認-839 改0	Ⅴ-2-6-5-26 サプレッション・チェンバ圧力の耐震性についての計算書	

54	工認-797 改0	Ⅴ-2-6-5-27 サプレッション・プール水温度の耐震性についての計算書	
55	工認-823 改0	Ⅴ-2-6-5-28 ドライウェル雰囲気温度の耐震性についての計算書	
56	工認-824 改0	Ⅴ-2-6-5-29 サプレッション・チェンバ雰囲気温度の耐震性についての計算書	
57	工認-786 改0	Ⅴ-2-6-5-30 格納容器内水素濃度の耐震性についての計算書	
58	工認-787 改0	Ⅴ-2-6-5-31 格納容器内水素濃度（ＳＡ）の耐震性についての計算書	
59	工認-840 改0	Ⅴ-2-6-5-32 格納容器内酸素濃度の耐震性についての計算書	
60	工認-788 改0	Ⅴ-2-6-5-33 格納容器内酸素濃度（ＳＡ）の耐震性についての計算書	
61	工認-825 改0	Ⅴ-2-6-5-36　西側淡水貯水設備水位の耐震性についての計算書	
62	工認-826 改0	Ⅴ-2-6-5-40 代替循環冷却系格納容器スプレイ流量の耐震性についての計算書	
63	工認-830 改0	Ⅴ-2-6-5-41 サプレッション・プール水位の耐震性についての計算書	
64	工認-789 改0	Ⅴ-2-6-7-8 原子炉再循環ポンプ遮断器の耐震性についての計算書	
65	工認-790 改0	Ⅴ-2-6-7-9 原子炉再循環ポンプ低速度用電源装置遮断器の耐震性についての計算書	
66	工認-842 改0	Ⅴ-2-6-7-10 格納容器内雰囲気ガスサンプリング装置の耐震性についての計算書	
67	工認-638 改0	Ⅴ-2-6-7-13 フィルタ装置水位の耐震性についての計算書	
68	工認-639 改0	Ⅴ-2-6-7-14 フィルタ装置圧力の耐震性についての計算書	
69	工認-793 改0	Ⅴ-2-6-7-15 フィルタ装置スクラビング水温度の耐震性についての計算書	
70	工認-640 改0	Ⅴ-2-6-7-16 残留熱除去系海水系系統流量の耐震性についての計算書	
71	工認-827 改0	Ⅴ-2-6-7-19 常設高圧代替注水系ポンプ吐出圧力の耐震性についての計算書	
72	工認-657 改0	Ⅴ-2-6-7-22 原子炉隔離時冷却系ポンプ吐出圧力の耐震性についての計算書	
73	工認-658 改0	Ⅴ-2-6-7-23 高圧炉心スプレイ系ポンプ吐出圧力の耐震性についての計算書	
74	工認-659 改0	Ⅴ-2-6-7-24 低圧炉心スプレイ系ポンプ吐出圧力の耐震性についての計算書	
75	工認-660 改0	Ⅴ-2-6-7-25 残留熱除去系ポンプ吐出圧力の耐震性についての計算書	
76	工認-642 改0	Ⅴ-2-6-7-26 非常用窒素供給系供給圧力の耐震性についての計算書	
77	工認-643 改0	Ⅴ-2-6-7-27 非常用窒素供給系高圧窒素ボンベ圧力の耐震性についての計算書	
78	工認-644 改0	Ⅴ-2-6-7-28 非常用逃がし安全弁駆動系供給圧力の耐震性についての計算書	
79	工認-645 改0	Ⅴ-2-6-7-29 非常用逃がし安全弁駆動系高圧窒素ボンベ圧力の耐震性についての計算書	

80	工認-796 改0	Ⅴ-2-8-2-1 主蒸気管放射線モニタの耐震性についての計算書	
81	工認-784 改0	Ⅴ-2-8-2-2 格納容器雰囲気放射線モニタ（Ｄ／Ｗ）の耐震性についての計算書	
82	工認-646 改0	Ⅴ-2-8-2-3 格納容器雰囲気放射線モニタ（Ｓ／Ｃ）の耐震性についての計算書	
83	工認-794 改0	Ⅴ-2-8-2-4 原子炉建屋換気系（ダクト）放射線モニタの耐震性についての計算書	
84	工認-647 改0	Ⅴ-2-8-2-8 使用済燃料プールエリア放射線モニタ（低レンジ） の耐震性についての計算書	
85	工認-648 改0	Ⅴ-2-8-2-9 使用済燃料プールエリア放射線モニタ（高レンジ） の耐震性についての計算書	
86	工認-747 改0	Ⅴ-2-8-3-2-2 中央制御室待避室差圧の耐震性についての計算書	
87	工認-748 改0	Ⅴ-2-8-3-4-2 第二弁操作室差圧の耐震性についての計算書	
88	工認-513 改0	Ⅴ-2-6-5-6 低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン用）の耐震性についての計算書	
89	工認-514 改0	Ⅴ-2-6-5-7 低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	
90	工認-515 改0	Ⅴ-2-6-5-8 低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	
91	工認-516 改0	Ⅴ-2-6-5-9 低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	
92	工認-824 改0	Ⅴ-2-6-5-29 サプレッション・チェンバ雰囲気温度の耐震性についての計算書	
93	工認-517 改0	Ⅴ-2-6-5-37 低圧代替注水系格納容器スプレイ流量（常設ライン用）の耐震性についての計算書	
94	工認-518 改0	Ⅴ-2-6-5-38 低圧代替注水系格納容器スプレイ流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	
95	工認-519 改0	Ⅴ-2-6-5-39 低圧代替注水系格納容器下部注水流量の耐震性についての計算書	
96	工認-792 改0	Ⅴ-2-6-7-1 計測制御設備の盤の耐震性についての計算書	
97	工認-520 改0	Ⅴ-2-6-7-20 常設低圧代替注水系ポンプ吐出圧力の耐震性についての計算書	
98	工認-641 改0	Ⅴ-2-6-7-21 代替循環冷却系ポンプ吐出圧力の耐震性についての計算書	
99	工認-860 改0	Ⅴ-2-8-3-3-4 緊急時対策所用差圧の耐震性についての計算書	
100	工認-876 改0	Ⅴ-2-別添1-6 ハロン消火設備制御盤の耐震計算書	
101	工認-877 改0	Ⅴ-2-別添1-7 二酸化炭素ボンベ設備の耐震計算書	
102	工認-878 改0	Ⅴ-2-別添1-8 二酸化炭素供給選択弁の耐震計算書	
103	工認-879 改0	Ⅴ-2-別添1-9 二酸化炭素消火設備制御盤の耐震計算書	
104	工認-880 改0	Ⅴ-2-別添1-11 火災防護設備の水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価	
105	工認-867 改0	Ⅴ-2-8-4-4 中央制御室待避室遮蔽の耐震性についての計算書	

106	工認-868 改0	Ⅴ-2-8-4-6 第二弁操作室遮蔽の耐震性についての計算書	
107	工認-248 改2	Ⅴ-2-10-2-5-7 格納容器圧力逃がし装置格納槽点検用水密ハッチの耐震性についての計算書	
108	工認-249 改2	Ⅴ-2-10-2-5-8 常設低圧代替注水系格納槽点検用水密ハッチの耐震性についての計算書	
109	工認-250 改1	Ⅴ-2-10-2-5-9 常設低圧代替注水系格納槽可搬型ポンプ用水密ハッチの耐震性についての計算書	
110	工認-820 改0	Ⅴ-2-10-2-5-5　緊急用海水ポンプ点検用開口部浸水防止蓋の耐震性についての計算書	
111	工認-821 改0	Ⅴ-2-10-2-5-6 緊急用海水ポンプ室人員用開口部浸水防止蓋の耐震性についての計算書	
112	工認-865 改0	Ⅴ-2-8-3-3-1 緊急時対策所非常用送風機の耐震性についての計算書	
113	工認-730 改0	Ⅴ-2-5-5-6-1　代替循環冷却系ポンプの耐震性についての計算書	
114	工認-811 改0	Ⅴ-2-4-3-3-2　代替燃料プール冷却系ポンプの耐震性についての計算書	
115	工認-812 改0	Ⅴ-2-5-7-2-1　緊急用海水ポンプの耐震性についての計算書	
116	工認-731 改0	Ⅴ-2-5-5-6-2 管の耐震性についての計算書	
117	工認-732 改0	Ⅴ-2-9-4-3-3-1 管の耐震性についての計算書	
118	工認-808 改0	Ⅴ-2-4-3-3-1 代替燃料プール冷却系熱交換器の耐震性についての計算書	
119	工認-861 改0	Ⅴ-2-10-1-5-2 緊急時対策所用発電機燃料油サービスタンクの耐震性についての計算書	
120	工認-806 改0	Ⅴ-2-10-3-1 可搬型設備用軽油タンクの耐震性についての計算書	
121	工認-706 改1	Ⅴ-2-10-1-6 その他の電源装置の耐震性についての計算書	
122	工認-707 改1	Ⅴ-2-10-1-7 その他の非常用電源設備の耐震性についての計算書	
123	工認-854 改0	Ⅴ-2-10-1-5 緊急時対策所用代替電源設備の耐震性についての計算書	
124	工認-738 改0	Ⅴ-5-54 計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＡＣＦ	
125	TK-1-1245 改0	工事計画に係る補足説明資料 補足-500-1【計算機プログラム（解析コード）の概要に係る補足説明資料】 ［Ⅴ-5-54 計算機プログラム（解析コード）TACF］	
126	工認-708 改0	Ⅴ-2-9-2-1 原子炉格納容器本体の耐震性についての計算書	
127	工認-890 改0	Ⅴ-3-9-2-2-1-1 格納容器スプレイヘッダの基本板厚計算書	
128	工認-891　改0	Ⅴ-3-9-2-2-1-2 格納容器スプレイヘッダの応力計算書	
129	工認-799 改0	Ⅴ-2-8-3-3-1 緊急時対策所換気系ダクトの耐震性についての計算書	
130	工認-800 改0	Ⅴ-3-8-1-3-2 緊急時対策所換気系ダクトの強度計算書	
131	工認-801 改0	Ⅴ-3-8-1-3-3 弁の強度計算書	

132	工認-802 改0	Ⅴ-3-8-1-2-3 管の応力計算書	
133	工認-803 改0	Ⅴ-3-8-1-4-3 管の応力計算書	
134	工認-804 改0	Ⅴ-2-8-3-2-1 中央制御室待避室空気ボンベユニット配管の耐震性についての計算書	
135	工認-805 改0	Ⅴ-2-8-3-4-1 第二弁操作室空気ボンベユニット配管の耐震性についての計算書	
136	工認-807 改0	Ⅴ-2-10-1-2-5軽油貯蔵タンクの耐震性についての計算書	
137	工認-809 改0	Ⅴ-2-5-7-2-2 緊急用海水系ストレーナの耐震性についての計算書	
138	工認-810 改0	Ⅴ-2-7-2-1-3 格納容器床ドレンサンプの耐震性についての計算書	
139	工認-813 改0	Ⅴ-2-10-1-3-4 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプの耐震性についての計算書	
140	工認-847 改0	Ⅴ-3-8-1-3-1 緊急時対策所加圧設備の強度評価書	
141	工認-853 改0	Ⅴ-2-10-1-5-7 管の耐震性についての計算書	
142	工認-862 改0	Ⅴ-2-10-1-5-4　緊急時対策所用発電機燃料油サービスタンクの耐震性についての計算書	
143	工認-863 改0	Ⅴ-3-8-1-4-2 管の基本板厚計算書	
144	工認-864 改0	Ⅴ-2-10-1-2-4 非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプの耐震性についての計算書	
145	工認-865 改0	Ⅴ-2-8-3-3-4 緊急時対策所非常用フィルタ装置の耐震性についての計算書	
146	工認-866 改0	Ⅴ-2-8-3-3-2 管の耐震性についての計算	
147	工認-869 改0	Ⅴ-3-8-1-2-2 管の基本板厚計算書	
148	工認-870 改0	Ⅴ-2-10-1-5-1　緊急時対策所用発電機内燃機関の耐震性についての計算書	
149	工認-883 改0	Ⅴ-2-8-3-3-3 緊急時対策所非常用送風機の耐震性についての計算書	
150	工認-884 改0	Ⅴ-2-10-1-5-3　緊急時対策所用発電機給油ポンプの耐震性についての計算書	
151	工認-885 改0	Ⅴ-3-7-1-1-2 管の応力計算書	
152	工認-888 改0	Ⅴ-2-10-1-4-3 常設代替高圧電源装置用燃料移送ポンプの耐震性についての計算書作成の基本方針	
153	工認-889 改0	Ⅴ-2-6-6-3-1 管の耐震性についての計算書	
154	工認-893 改0	Ⅴ-3-8-1-3-4 管の基本板厚計算書	
155	工認-894 改0	Ⅴ-3-9-2-2-5-1 管の基本板厚計算書	
156	工認-895 改0	Ⅴ-3-8-1-3-5 管の応力計算書	
157	工認-896 改0	Ⅴ-5-56 計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＰＡＮ２０００	

158	工認-892 改0	Ⅴ-2-11-2-15 耐火隔壁の耐震性についての計算書	
159	工認-887 改0	Ⅴ-2-別添1-5 ハロンガス供給選択弁の耐震計算書	
160	工認-886 改0	Ⅴ-2-別添1-10 ガス供給配管の耐震計算書	

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-855　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

V-2-3-3-2-1　炉心支持構造物の応力解析の方針

目　次

1.　概要 …… 1
1.1　一般事項 …… 1
1.2　構造の説明 …… 1
2.　記号の説明 …… 3
3.　計算条件 …… 4
3.1　適用基準 …… 4
3.2　解析箇所 …… 4
3.3　形状及び寸法 …… 4
3.4　物性値 …… 4
3.4.1　材料の物性値 …… 4
3.5　荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態） …… 4
3.6　許容応力 …… 5
3.7　溶接部の継手効率 …… 5
4.　荷重条件 …… 6
4.1　設計条件 …… 6
4.2　運転条件 …… 6
4.2.1　運転状態Ⅰ及びⅡ …… 6
4.2.2　運転状態Ⅲ …… 7
4.2.3　運転状態Ⅳ …… 7
4.3　重大事故等時の条件 …… 7
4.4　荷重の組合せ …… 7
4.4.1　荷重の組合せと応力評価 …… 7
5.　応力解析の手順 …… 8
5.1　解析手順の概要 …… 8
5.2　荷重条件の選定 …… 8
5.3　応力計算と応力の分類 …… 8
5.3.1　応力計算の方法 …… 8
5.3.2　応力の分類 …… 8
5.4　応力の評価 …… 8
5.4.1　主応力 …… 8
5.4.2　応力強さ …… 9
5.4.3　一次応力強さ …… 9

5.5　特別な応力の検討 …… 9
5.5.1　支圧応力の評価 …… 9
5.5.2　座屈の評価 …… 9
6.　解析及び評価結果の添付 …… 10
6.1　応力解析結果 …… 10
6.2　応力評価結果 …… 11
7.　引用文献 …… 11

図　表　目　次

図3－1　全体断面図 …… 12
図4－1　炉心支持構造物の設計差圧 …… 13
図4－2　炉心支持構造物の運転条件 …… 14
図5－1　応力解析の手順 …… 18

表1－1　炉心支持構造物の構造計画 …… 2
表3－1　材料の分類 …… 19
表3－2　応力計算に使用する材料の物性値 …… 20
表3－3　荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態） …… 21
表3－4　炉心支持構造物用材料の許容応力 …… 23
表4－1　外荷重 …… 26
表4－2　荷重の組合せ …… 33
表5－1　応力の分類 …… 34

1. 概要

1.1 一般事項

本書は，炉心支持構造物に関する応力解析の方針を述べるものである。

なお，炉心支持構造物は耐震Ｓクラスの設計基準対象施設であり，重大事故等対処設備に該当する。

注１：本書に記載していない特別な内容がある場合は，各計算書に示す。

注２：図表は，原則として巻末に示す。

1.2 構造の説明

炉心支持構造物の構造計画を表 1－1 に示す。

なお，炉心支持構造物は，下記の機器により構成される。

(1) 炉心シュラウド

(2) シュラウドサポート

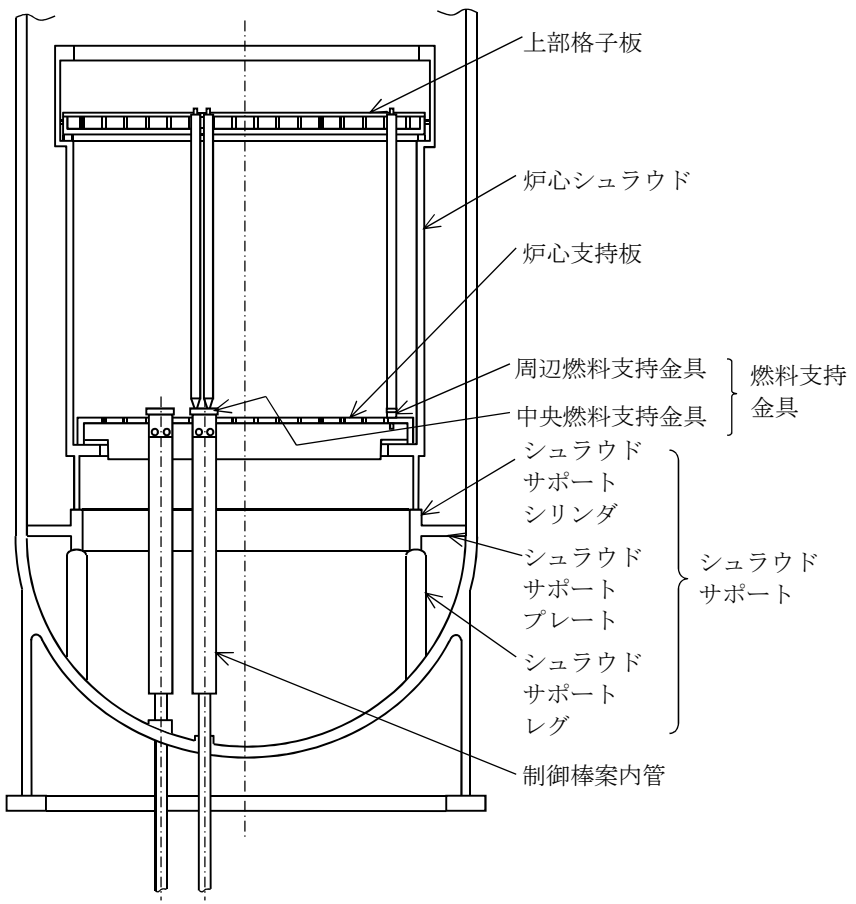
(3) 上部格子板

(4) 炉心支持板

(5) 燃料支持金具

(6) 制御棒案内管

表 1－1　炉心支持構造物の構造計画

主要区分	計画の概要		概略構造図
	基礎・支持構造	主体構造	
炉心支持構造物	炉心を構成する燃料集合体，制御棒は，炉心シュラウド内に設けられる。 炉心シュラウドは，原子炉圧力容器下部鏡板に溶接されたシュラウドサポートにより支持される。 燃料集合体は，燃料支持金具を介して制御棒案内管（ただし，周辺燃料支持金具を介する場合は炉心支持板）によって支持される。水平方向については，上部格子板及び炉心支持板によって支持される。	原子炉圧力容器内に炉心部が円柱状をなすように燃料集合体を十字形制御棒各体に隣接して装荷している。 炉心支持構造物は，炉心シュラウド，シュラウドサポート，上部格子板，炉心支持板，燃料支持金具，制御棒案内管により構成される。	

2. 記号の説明

本書及び各計算書において，以下の記号を使用する。ただし，本書添付及び各計算書中に別途記載ある場合は，この限りでない。

なお，各計算書における記号の字体及び大きさについては，本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
E	縦弾性係数	MPa
H	水平力	N
M	モーメント	N･mm
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
Ｓｄ*	弾性設計用地震動Ｓｄにより定まる地震力又は静的地震力	－
Ｓｓ	基準地震動Ｓｓにより定まる地震力	－
S_{12}	主応力差$\sigma_1-\sigma_2$	MPa
S_{23}	主応力差$\sigma_2-\sigma_3$	MPa
S_{31}	主応力差$\sigma_3-\sigma_1$	MPa
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
V	鉛直力	N
η	溶接部の継手効率	－
ν	ポアソン比	－
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_ℓ	軸方向応力	MPa
σ_r	半径方向応力	MPa
σ_t	周方向応力	MPa
$\tau_{\ell r}$	せん断応力	MPa
τ_{rt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\ell}$	せん断応力	MPa

3. 計算条件

3.1 適用基準

発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。））ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ1－2005/2007）（日本機械学会　2007 年）（以下「設計・建設規格」という。）及び原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編　ＪＥＡＧ４６０１・補－1984）（日本電気協会　電気技術基準調査委員会　昭和59年）を適用する。

注：本書及び各応力計算書において，設計・建設規格の条項は「設計・建設規格　○○○-△△△△(◇)a.(a)」として示す。

3.2 解析箇所

応力解析を行う箇所は，次のとおりである。（図3－1参照）

(1) 炉心シュラウド
(2) シュラウドサポート
(3) 上部格子板
(4) 炉心支持板
(5) 燃料支持金具
(6) 制御棒案内管

3.3 形状及び寸法

各部の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

3.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は，以下のとおりである。

3.4.1 材料の物性値

材料の物性値は，次のように定める。

(1) 縦弾性係数Ｅは，設計・建設規格　付録材料図表　Part6　表1及び表2に定められたものによる。

なお，物性値を補正して使用する場合には，補正方法を各計算書に示す。

(2) 材料は，表3－1に従って分類する。

主な温度における材料の物性値を表3－2に示す。

3.5 荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）

荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）は，表3－3に示すとおりである。また，各供用状態（許容応力状態）で考慮する荷重は，4章に示すとおりである。

なお，本書及び各計算書において，設計・建設規格　GNR-2120(1)の規定による最高使用圧力（供用状態Ａを定義する運転状態において機器が受ける最高の圧力以上の圧力であって，設計上定めるものをいう。）を「設計差圧」と呼ぶ。（図4－1参照）

3.6　許容応力

(1)　設計応力強さS_m，設計降伏点S_y及び設計引張強さS_uは，それぞれ設計・建設規格　付録材料図表　Part5　表1，表8及び表9に定められたものを使用する。

(2)　許容応力状態III_AS及び許容応力状態IV_ASの一次応力の評価には，各運転状態における流体の最高温度（運転状態Ⅰ及びⅡ：301 ℃）に対する許容応力を用いる。供用状態Ｅ*の一次応力の評価には，運転状態Ⅴにおける評価温度条件（302 ℃）に対する許容応力を用いる。

(3)　炉心支持構造物の各運転状態の応力評価に用いる許容応力は，設計・建設規格　CSS-3110により表3－4に示すとおりである。

これらの表に記載のない軸圧縮荷重及び外面に圧力を受ける場合に対する許容応力は，各計算書に記載するものとする。

注記　＊：供用状態Ｅとは，重大事故等時の状態（運転状態Ⅴ）であり，供用状態Ｄを超える状態である。許容応力の算出式は供用状態Ｄと同様とする。

3.7　溶接部の継手効率

(1)　溶接部の継手効率は，継手の種類と分類及び継手に適用する検査の種類により，設計・建設規格　CSS-3150に従って定める。

(2)　溶接部の許容応力は，表3－4に定める許容応力に継手効率を乗じたものである。

4. 荷重条件

炉心支持構造物は，以下の荷重条件に耐えるように設計する。

各機器の応力解析には本章に示す荷重を考慮する。

4.1 設計条件

原子炉圧力容器の最高使用圧力	：8.62 MPa
設計差圧	：図 4－1 に示す。
最高使用温度	：302 ℃

4.2 運転条件

運転条件及び記号は，次のとおりである。また，これらの記号を解析及び評価に用いる場合において，同一事象内に複数の解析時点がある場合は，記号に小番号を付して使用する。

［例 C03-01，C03-02］

なお，各応力計算書においては，{ }内の名称を用いる。

計算書では以下に示す運転条件のうち，一次応力強さの評価については，各供用状態（許容応力状態）を定義する各運転状態のうち，最も厳しい運転条件について選定する。

4.2.1 運転状態Ⅰ及びⅡ

(1) ボルト締付け	{ボルト締付け}	[C01]
(2) 耐圧試験（最高使用圧力以下）	{耐圧試験最高使用圧力以下}	[C02]
(3) 起動（昇温）	{起動昇温}	[C03]
(4) 起動（タービン起動）	{起動タービン起動}	[C04]
(5) 夜間低出力運転（出力 75 %）	{夜間低出力運転出力 75 %}	[C05]
(6) 週末低出力運転（出力 50 %）	{週末低出力運転出力 50 %}	[C06]
(7) 制御棒パターン変更	{制御棒パターン変更}	[C07]
(8) 給水加熱機能喪失（発電機トリップ）	{発電機トリップ}	[C08]
(9) 給水加熱機能喪失(給水加熱器部分バイパス)	{給水加熱器部分バイパス}	[C09]
(10) スクラム（タービントリップ）	{スクラムタービントリップ}	[C10]
(11) スクラム（その他のスクラム）	{スクラムその他のスクラム}	[C11]
(12) 定格出力運転	{定格出力運転}	[C12]
(13) 停止（タービン停止）	{停止タービン停止}	[C13]
(14) 停止（高温待機）	{停止高温待機}	[C14]
(15) 停止（冷却）	{停止冷却}	[C15]
(16) 停止（容器満水）	{停止容器満水}	[C16]
(17) 停止（満水後冷却）	{停止満水後冷却}	[C17]
(18) ボルト取外し	{ボルト取外し}	[C18]
(19) 燃料交換	{燃料交換}	[C19]
(20) スクラム(原子炉給水ポンプ停止)	{スクラム原子炉給水ポンプ停止}	[C20]

(21) スクラム(逃がし安全弁誤作動)　{スクラム逃がし安全弁誤作動}　[C21]

4.2.2 運転状態Ⅲ

(1) スクラム（過大圧力）　{スクラム過大圧力}　[C22]

(2) 冷却材再循環系仕切弁誤作動（冷状態）　{冷再循環系仕切弁誤作動}　[C23]

(3) 冷却材再循環ポンプ誤起動（冷状態）　{冷再循環ポンプ誤起動}　[C24]

4.2.3 運転状態Ⅳ

(1) 冷却材喪失事故　{冷却材喪失事故}　[C25]

各運転条件における外荷重を表 4－1 に示す。

各運転条件における設計上定めた炉心支持構造物の周囲の流体の温度，圧力の変化及びその繰返し回数を図 4－2 に示す。

4.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件は以下のとおりである。

温度条件：設計条件と同じ。

圧力条件：設計条件と同じ

差圧条件：運転状態Ⅳと同じ。

4.4 荷重の組合せ

4.4.1 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価項目の対応を表 4－2 に示す。表 4－2 及び各計算書において，荷重の種類と記号は以下のとおりである。

荷　重	記号
(1) 原子炉圧力容器の内圧	[L01]
(2) 差圧	[L02]
(3) 死荷重（機器の自重により生じる荷重）	[L04]
(4) 機器の地震時の振動による地震荷重Ｓｄ*（一次荷重）	[L14]
(5) 機器の地震時の振動による地震荷重Ｓｓ（一次荷重）	[L16]

5.　応力解析の手順

応力解析の手順について述べる。

5.1　解析手順の概要

解析手順の概要を図5－1に示す。本図において，内圧及び差圧による応力とその他の荷重による応力の計算で考慮する荷重を「機械荷重」という。

5.2　荷重条件の選定

応力解析においては，4 章に示した荷重条件のうちから，その部分に作用する荷重を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重を表 4－1 に示す。

5.3　応力計算と応力の分類

5.3.1　応力計算の方法

(1)　応力計算は，4.4.1 項に示す荷重の種類ごとに行う。

(2)　解析する箇所の形状は，次の方針に従ってモデル化する。

a.　内張り材は，強度部材に含めない。

b.

c.　溶接部は，溶接金属に相当する鋼材と同じ物性値及び機械的性質を用いる。

(3)　モデル図と使用する境界条件（拘束条件）は，各計算書に示す。

5.3.2　応力の分類

応力の計算結果は，表 5－1 の応力の分類方法に従って分類して，各計算書に示す。

5.4　応力の評価

5.4.1　主応力

5.3 節で計算された応力は，応力の分類ごとに重ね合わせ，組合せ応力を求める。

組合せ応力は，一般に σ_t，σ_ℓ，σ_r，$\tau_{t\ell}$，$\tau_{\ell r}$，τ_{rt} の 6 成分をもつが，主応力 σ は引用文献(1)の 1･3･6 項により，次式を満足する 3 根 σ_1，σ_2，σ_3 として計算する。

$$\sigma^3-(\sigma_t+\sigma_\ell+\sigma_r)\cdot\sigma^2+(\sigma_t\cdot\sigma_\ell+\sigma_\ell\cdot\sigma_r+\sigma_r\cdot\sigma_t-\tau_{t\ell}^2-\tau_{\ell r}^2-\tau_{rt}^2)\cdot\sigma-\sigma_t\cdot\sigma_\ell\cdot\sigma_r+\sigma_t\cdot\tau_{\ell r}^2+\sigma_\ell\cdot\tau_{rt}^2+\sigma_r\cdot\tau_{t\ell}^2-2\cdot\tau_{t\ell}\cdot\tau_{\ell r}\cdot\tau_{rt}=0$$

上式により主応力を求める。

5.4.2　応力強さ

以下の 3 つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$

$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$

$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$

5.4.3　一次応力強さ

許容応力状態ⅢＡＳ，許容応力状態ⅣＡＳ及び供用状態Ｅにおいて生じる一次一般膜応力及び一次一般膜＋一次曲げ応力の応力強さが，3.6 節及び 3.7 節に示す許容値を満足することを示す。

5.5　特別な応力の検討

5.5.1　支圧応力の評価

支圧荷重を受ける部分は，設計・建設規格 CSS-3115 により評価する。解析箇所を以下に示す。許容応力は，表 3－4(3)に示し，評価方法は，炉心シュラウドの計算書に示す。

(1)　炉心シュラウドの上部格子板及び炉心支持板支持面

5.5.2　座屈の評価

軸圧縮荷重又は外圧を受ける部分は，設計・建設規格　CSS-3116.1 又は CSS-3200 により評価する。ただし，シュラウドサポートレグの座屈は，設計・建設規格　CSS-3116.2 により評価する。解析箇所を以下に示す。許容応力及び評価方法は，各計算書に示す。

(1)　炉心シュラウド

(2)　シュラウドサポートレグ

(3)　制御棒案内管のボディ

6. 解析及び評価結果の添付

各計算書では，以下に示すように解析結果を添付する。

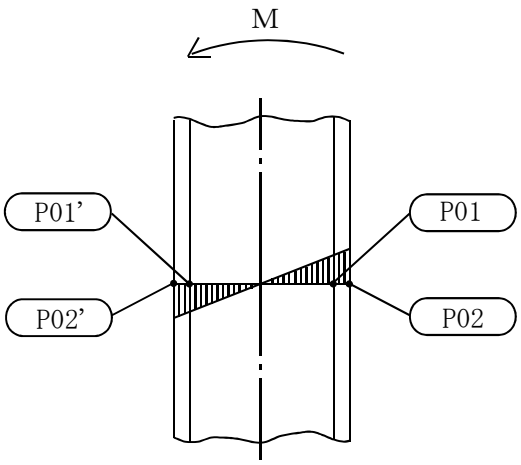
6.1 応力解析結果

全応力評価点（面）について考慮した荷重ごとに応力を分類し，その結果を示す。また，応力評価点の選定に当たっては，各部分ごとに応力評価上厳しくなる評価点を，各部分を代表する評価点として選定する。

応力評価点番号は，計算書ごとに記号 P01 からの連番とする。奇数番号を内面の点，偶数番号を外面の点として，各計算書の形状・寸法・材料・応力評価点を示す図において定義する。

なお，軸対称モデルにおいて，非軸対称な外荷重による応力評価を行った場合，荷重の入力方位と応力評価点の方位の関係により応力に極大値と極小値が生じる。外荷重による応力が極大となる方位の応力評価点は［例　P01］と表し，極小となる方位の応力評価点には，プライム（’）を付けて［例　P01’］と表す。

一次応力の評価は，内外面の応力評価点を含む断面（応力評価面）について行う。



6.2　応力評価結果

(1)　次の応力評価結果は，全応力評価点（面）について添付する。

a.　一次一般膜応力強さの評価のまとめ

b.　一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(2)　次の特別な応力は，対象となるすべての部位について評価し，この結果を記載する。

a.　支圧応力

b.　座屈

7.　引用文献

文献番号は，本書及び各計算書において共通である。

(1)　機械工学便覧　基礎編　α3（日本機械学会）

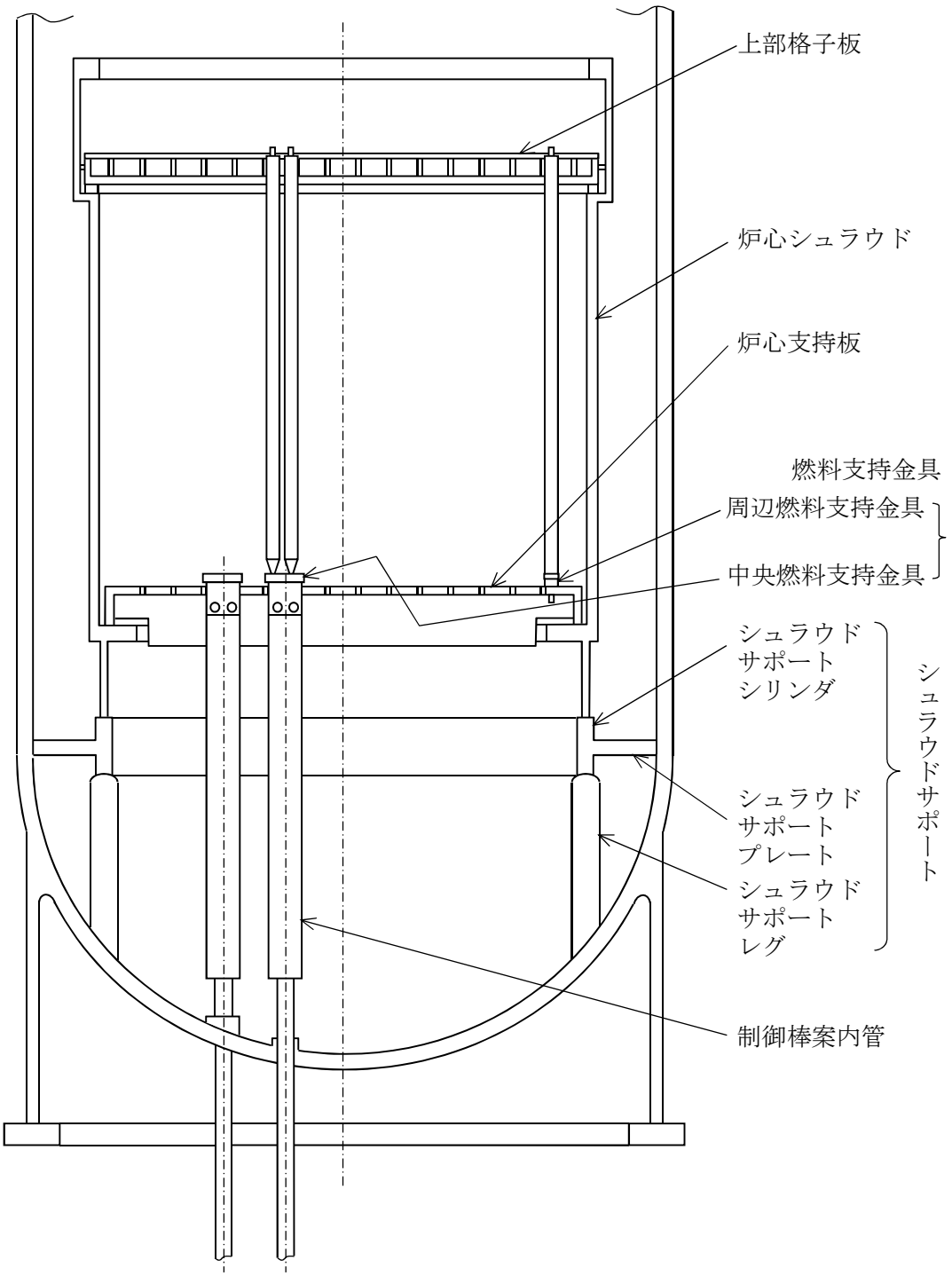
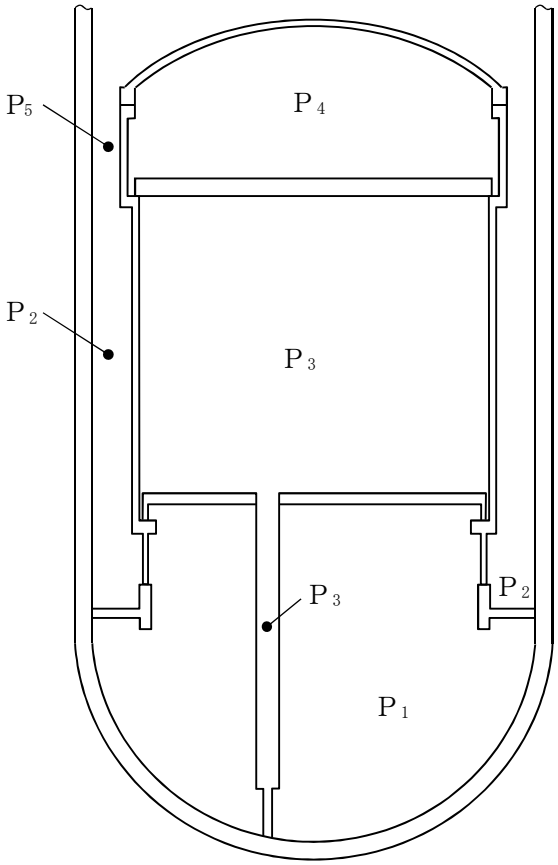

上部格子板
炉心シュラウド
炉心支持板
燃料支持金具
周辺燃料支持金具
中央燃料支持金具
シュラウドサポート
シュラウドサポートシリンダ
シュラウドサポートプレート
シュラウドサポートレグ
制御棒案内管

図 3－1　全体断面図



（単位：MPa）

部位		設計差圧
炉心シュラウド	$P_{45}=P_4-P_5$	
	$P_{32}=P_3-P_2$	
	$P_{12}=P_1-P_2$	
シュラウドサポート	$P_{12}=P_1-P_2$	
上部格子板	$P_{34}=P_3-P_4$	
炉心支持板	$P_{13}=P_1-P_3$	
燃料支持金具	$P_{13}=P_1-P_3$	
制御棒案内管	$P_{13}=P_1-P_3$	

図 4－1　炉心支持構造物の設計差圧

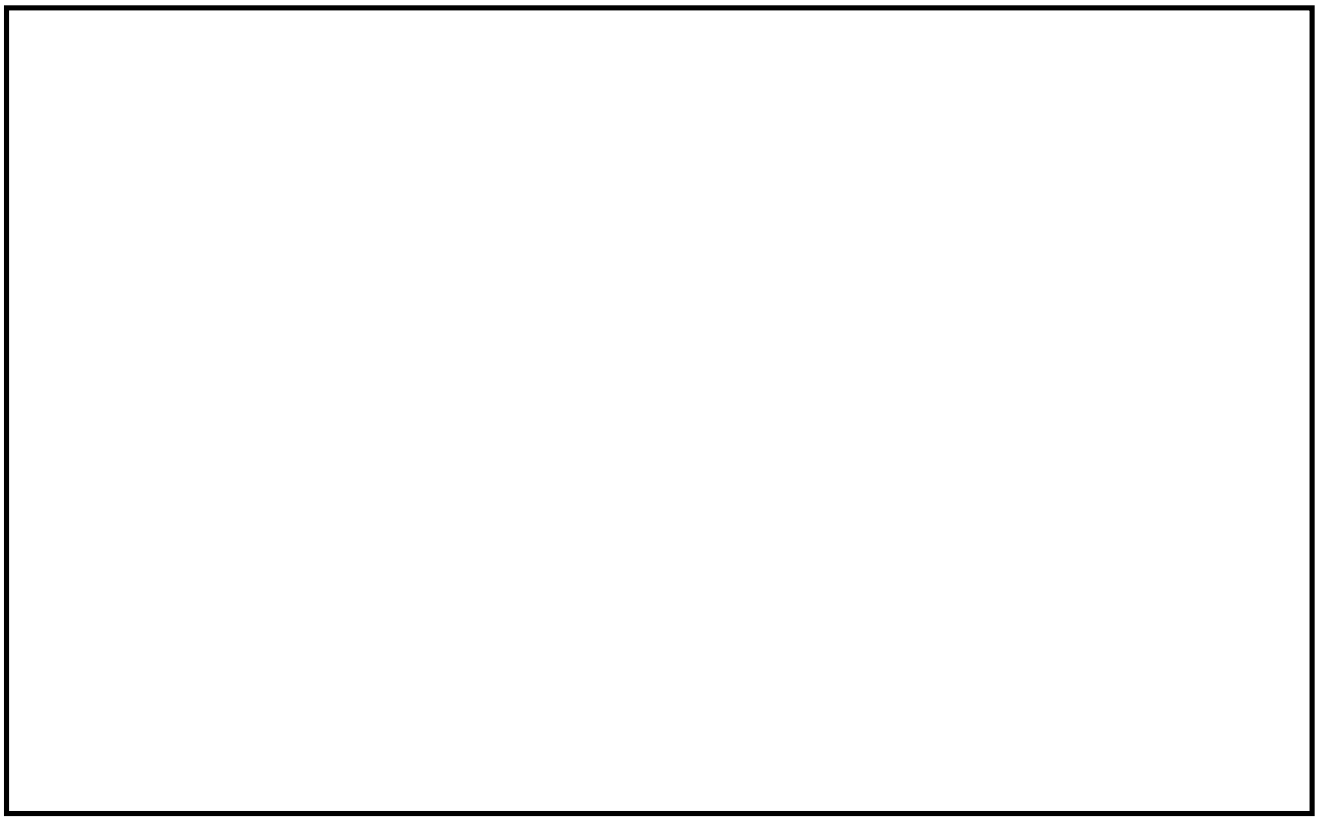
運転状態	I 及び II																				III			IV
運転条件	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25
運転名称	ボルト締付け	耐圧試験 最高使用圧力以下	起動 昇温	起動 タービン起動	夜間低出力運転(出力75%)	週末低出力運転(出力50%)	制御棒ﾊﾟﾀｰﾝ変更	給水加熱機能喪失 発電機ﾄﾘｯﾌﾟ	給水加熱機能喪失 給水加熱器部分ﾊﾞｲﾊﾟｽ	スクラム ﾀｰﾋﾞﾝﾄﾘｯﾌﾟ	スクラム その他のスクラム	定格出力運転	停止 ﾀｰﾋﾞﾝ停止	停止 高温待機	停止 冷却	停止 容器満水	停止 満水後冷却	ボルト取外し	燃料交換	スクラム 原子炉給水ﾎﾟﾝﾌﾟ停止	スクラム 逃がし安全弁誤作動	過大圧力	冷却材再循環系仕切弁誤作動(冷状態)	冷却材再循環ﾎﾟﾝﾌﾟ誤起動(冷状態)	冷却材喪失事故
回数																									

図4－2(1)　炉心支持構造物の運転条件

運転状態	Ⅰ及びⅡ																					Ⅲ			Ⅳ
運転条件	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25
運転名称	ボルト締付け	耐圧試験 最高使用圧力以下	起動 昇温	起動 タービン起動	夜間低出力運転（出力75%）	週末低出力運転（出力50%）	制御棒ﾊﾟﾀｰﾝ変更	給水加熱機能喪失 発電機ﾄﾘｯﾌﾟ	給水加熱機能喪失 給水加熱器部分ﾊﾞｲﾊﾟｽ	スクラム ﾀｰﾋﾞﾝﾄﾘｯﾌﾟ	スクラム その他のスクラム	定格出力運転	停止 ﾀｰﾋﾞﾝ停止	停止 高温待機	停止 冷却	停止 容器満水	停止 満水後冷却	ボルト取外し	燃料交換	スクラム 原子炉給水ﾎﾟﾝﾌﾟ停止	スクラム 逃がし安全弁誤作動	過大圧力	冷却材再循環系仕切弁誤作動（冷状態）	冷却材再循環ﾎﾟﾝﾌﾟ誤起動（冷状態）	冷却材喪失事故
回数																									

図4－2(2)　炉心支持構造物の運転条件

図 4－2(2)　炉心支持構造物の運転条件（続）



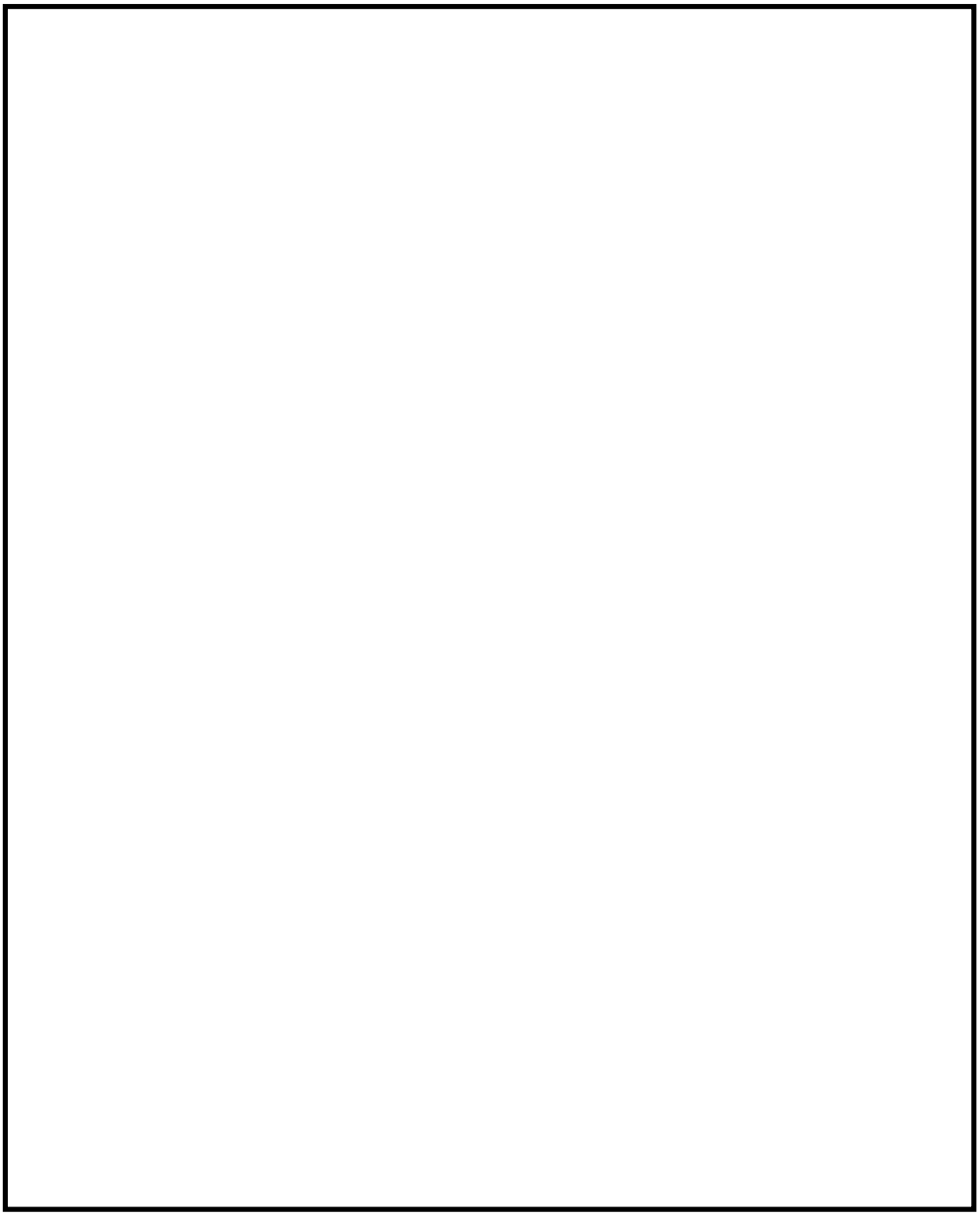


図 4－2(3)　炉心支持構造物の運転条件
（原子炉圧力容器内領域図）

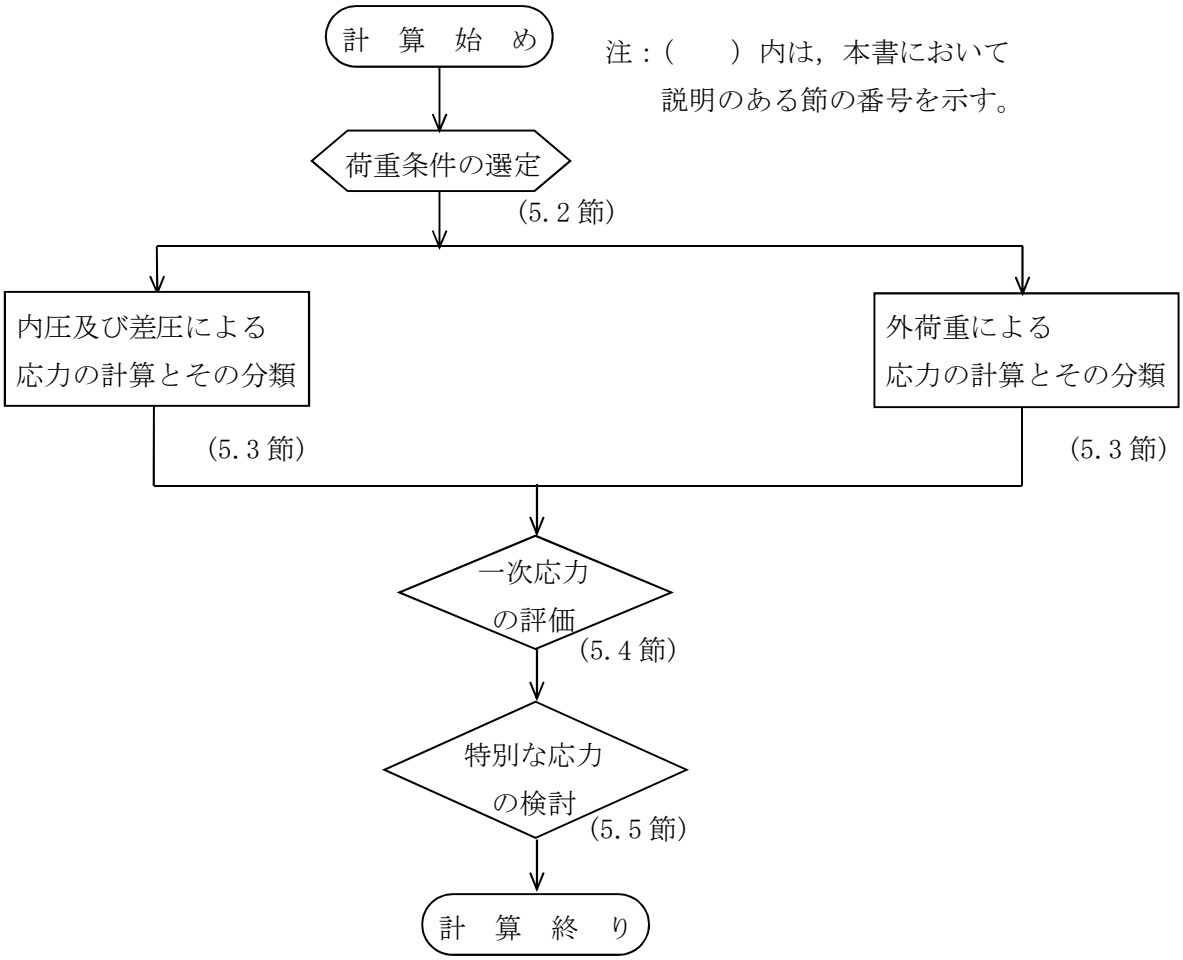

計　算　始　め
注：(　　) 内は，本書において
説明のある節の番号を示す。
荷重条件の選定
(5.2 節)
内圧及び差圧による
応力の計算とその分類
(5.3 節)
外荷重による
応力の計算とその分類
(5.3 節)
一次応力
の評価
(5.4 節)
特別な応力
の検討
(5.5 節)
計　算　終　り

図 5－1　応力解析の手順

表 3－1　材料の分類

種類	使用材料	備考
低合金鋼		SQV2A 相当
オーステナイト系ステンレス鋼		SUS304 相当
		SUS304L 相当
		SUS304TP 相当
		SCS13 相当
高ニッケル合金		NCF600 相当

表 3－2　応力計算に使用する材料の物性値

材料	温度 (℃)	E $\times 10^5$ (MPa)	ν
SQV2A	20		
	161		
	302		
SUS304 SUS304L SUS304TP SCS13	20		
	161		
	302		
NCF600	20		
	161		
	302		

表 3－3(1)　荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震設計上の重要度分類	機器等の区分	供用状態（許容応力状態）	荷重の組合せ
原子炉本体	炉心支持構造物	炉心シュラウド シュラウドサポート 上部格子板 炉心支持板 燃料支持金具 制御棒案内管	S	炉心支持構造物	III_A S	P＋D＋S d *
					IV_A S	P＋D＋S s

［記号の説明］

P　：　各供用状態（許容応力状態）における差圧

D　：　死荷重

S d *　：　弾性設計用地震動 S d により定まる地震力又は静的地震力

S s　：　基準地震動 S s により定まる地震力

表 3－3(2)　荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*1	耐震設計上の重要度分類	機器等の区分	供用状態（許容応力状態）	荷重の組合せ
原子炉本体	炉心支持構造物	炉心シュラウド シュラウドサポート 上部格子板 炉心支持板 燃料支持金具 制御棒案内管	常設耐震／防止 常設／緩和	S	－	V_AS*2	P_{SAL}＋D＋Ｓｄ**3
							P_{SALL}＋D＋Ｓｓ*3
						E	P＋D

［記号の説明］

P	：	各供用状態（許容応力状態）における差圧
P_{SAL}	：	重大事故等時の状態（運転状態Ⅴ）で長期的に作用する圧力荷重
P_{SALL}	：	重大事故等時の状態（運転状態Ⅴ）で超長期的に作用する圧力荷重
D	：	死荷重
Ｓｄ*	：	弾性設計用地震動Ｓｄにより定まる地震力又は静的地震力
Ｓｓ	：	基準地震動Ｓｓにより定まる地震力

注記　＊1 ：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

＊2 ：V_ASとして，$Ⅳ_AS$の許容限界を用いる。

＊3 ：「Ｐ＋Ｄ＋Ｓｓ」の評価に包絡されるため，評価結果の記載を省略する。

注：許容応力状態ＶＡＳにおける荷重の組合せで，重大事故後の状態における圧力荷重P_{SAL}及びP_{SALL}は，設計基準対象施設で想定される圧力と比べて小さいため，許容応力状態ＶＡＳにおける荷重の組合せによる評価は，設計基準対象施設の評価に包絡される。

表 3－4(1)　炉心支持構造物用材料の許容応力

（単位：MPa）

応　力　分　類		一次一般膜応力（P_m）		
供用状態（許容応力状態）		ⅢAS	ⅣAS	E
温　　度(℃)				
オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金	SUS304 SUS304TP	172	260	260
	SUS304L	145	232	232
	SCS13	146	227	227
	NCF600	246	334	334
許容応力の算出式		1.5・S_m	Min (2.4・S_m, 2/3・S_u)	Min (2.4・S_m, 2/3・S_u)

表 3－4(2)　炉心支持構造物用材料の許容応力

（単位：MPa）

応　力　分　類		一次一般膜＋一次曲げ応力（P_m＋P_b）		
供用状態（許容応力状態）		ⅢAS	ⅣAS	E
温　　度(℃)				
オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金	SUS304 SUS304TP	258	391	391
	SUS304L	218	348	348
	SCS13	220	341	341
	NCF600	369	501	501
許容応力の算出式		2.25・S_m	Min (3.6・S_m, S_u)	Min (3.6・S_m, S_u)

表 3－4(3)　炉心支持構造物用材料の許容応力

（単位：MPa）

応　力　分　類		支 圧 応 力		
供用状態（許容応力状態）		ⅢAS	ⅣAS	E
温　　度(℃)		[redacted]		
オーステナイト系ステンレス鋼	SUS304L	163	217	217
許容応力の算出式		1.5・S_y	2・S_y	2・S_y

表 4－1(1)　外荷重

炉心シュラウド外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	鉛直力 V (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN･m)
L04	死荷重	A			
		B			
		C			
		D			
		E			
		F			
		G			
L14	地震荷重Ｓｄ*	A			
		B			
		C			
		D			
		E			
		F			
		G			
L16	地震荷重Ｓｓ	A			
		B			
		C			
		D			
		E			
		F			
		G			

注：Ｖ，Ｈ及びＭは，Ａ～Ｇの各荷重作用点に作用する。

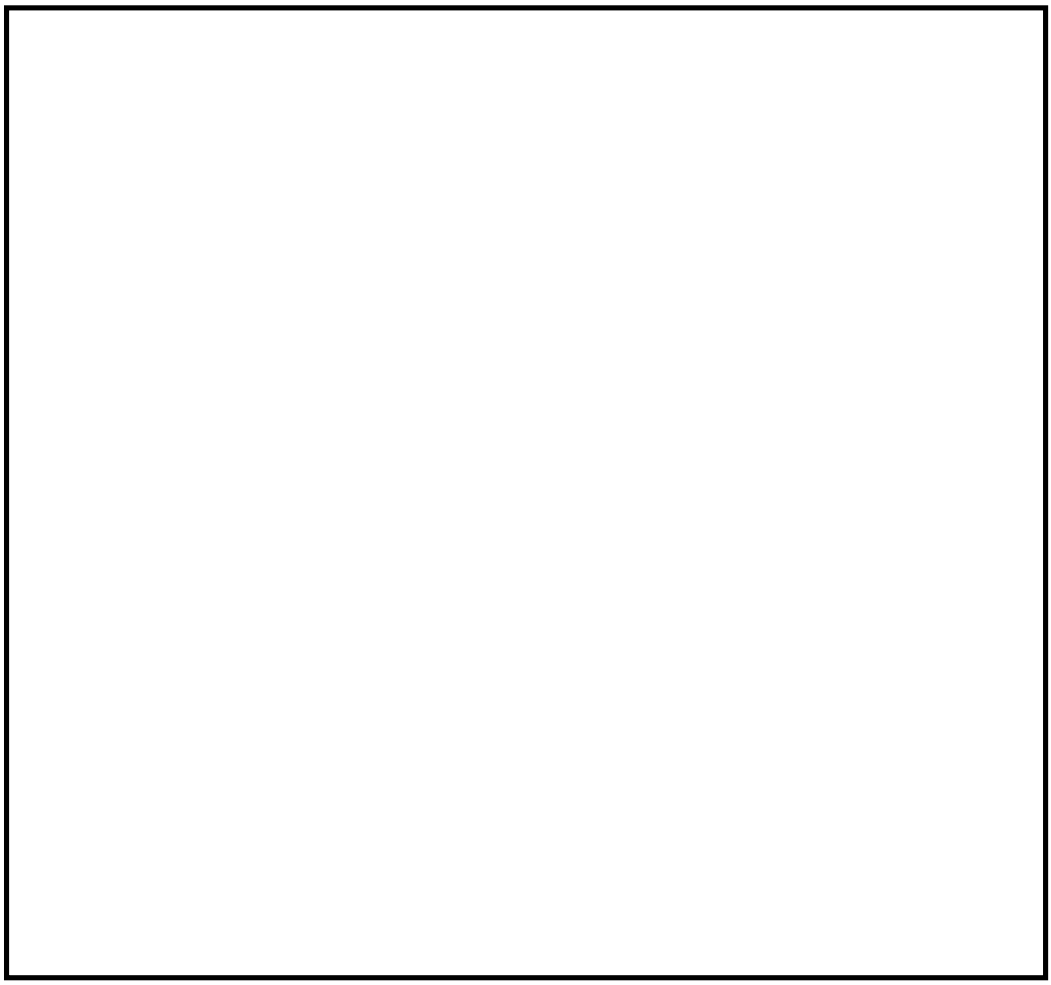


表 4－1(2)　外荷重

シュラウドサポート外荷重

記号	荷重名称	鉛直力		水平力	モーメント
		V_1 (kN)	V_2 (kN)	H (kN)	M (kN･m)
L04	死荷重				
L14	地震荷重Ｓｄ*				
L16	地震荷重Ｓｓ				

注 1：

注 2：

表 4－1(3)　外荷重

上部格子板外荷重

記号	荷重名称	鉛直力*1	水平力*2
		V(kN)	H(kN)
L04	死荷重		
L14	地震荷重Ｓｄ*		
L16	地震荷重Ｓｓ		

注記　＊1：

＊2：

表 4－1(4)　外荷重

炉心支持板外荷重

記号	荷重名称	鉛直力		水平力*3
		V_1(N) *1	V_2(N) *2	H(kN)
L04	死荷重			
L14	地震荷重Ｓｄ*			
L16	地震荷重Ｓｓ			

注記　＊1：

＊2：

＊3：

表 4－1(5)　外荷重

燃料支持金具外荷重

記号	荷重名称	荷重* 作用点	鉛直力 V (kN)	水平力 H (kN)
L04	死荷重	A		
		B		
L14	地震荷重Ｓｄ*	A		
		B		
L16	地震荷重Ｓｓ	A		
		B		

注記　＊：荷重作用点Ａは中央燃料支持金具を示し，荷重作用点Ｂは
周辺燃料支持金具を示す。

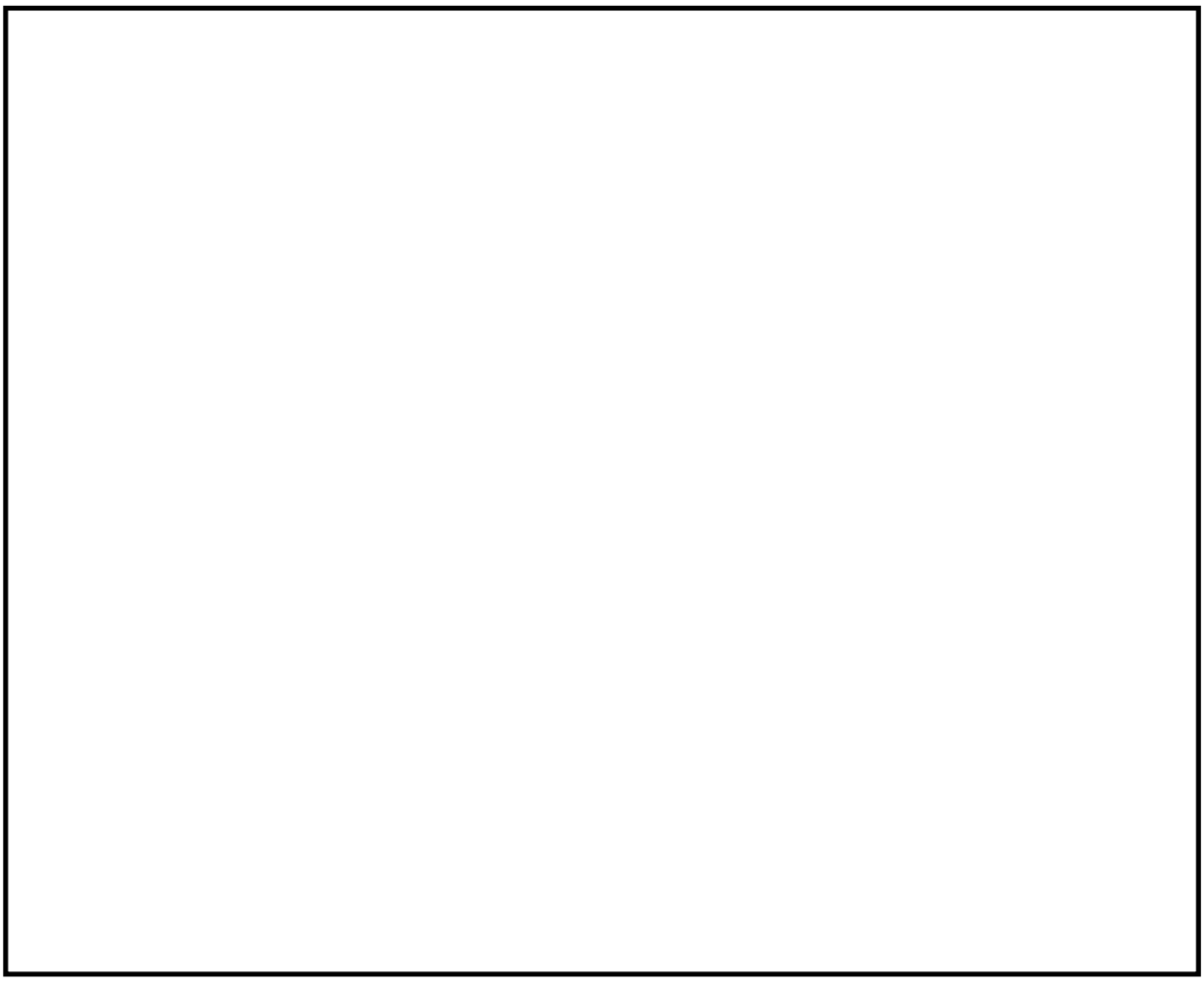


表 4－1(6)　外荷重

制御棒案内管外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	鉛直力 V(kN)	水平力 H(kN)	モーメント M(kN･m)
L04	死荷重	A			
		B			
L14	地震荷重Ｓｄ*	A			
		B			
L16	地震荷重Ｓｓ	A			
		B			

表 4－2　荷重の組合せ

供用状態 （許容応力状態）	荷重の組合せ	応力評価
許容応力状態ⅢＡＳ	L02＋L04＋L14	P_m P_m+P_b
許容応力状態ⅣＡＳ	L02＋L04＋L16	P_m P_m+P_b
供用状態Ｅ	L02＋L04	P_m P_m+P_b

表 5－1　応力の分類

炉心支持 構造物の要素	位　　置	荷重の種類	応力の分類	
円筒胴	不連続部より遠い胴板	圧力差	一般膜応力	P_m
胴	全胴部の任意断面	外荷重，モーメント又は圧力差	全断面について平均した一般膜応力，断面に垂直な応力成分	P_m
		外荷重又はモーメント	全断面の曲げ応力，断面に垂直な応力成分	P_m
平板	中央部	圧力差	一般膜応力 曲げ応力	P_m P_b
はり又は板	全般	圧力差，外荷重又はモーメント	全断面について平均した一般膜応力，断面に垂直な応力成分 曲げ応力	P_m P_b

注：

P_m　：圧力差又は機械的荷重によって生じる膜応力であって，構造上の不連続性及び局部的形状の変化によって生じる膜応力は除く。
ただし，実際の応力評価では，応力評価面を構造上の不連続部にとることが多いので，内径，板厚がその応力評価面での値に等しい単純な殻を仮定し，シェル理論又ははり理論を用いて計算した応力を，その応力評価面におけるP_mとする。

P_b　：外力，内力及びモーメントに対して，単純な平衡の法則を満足する曲げ応力をいう。

NT2 補③ V-2-3-3-2-1 R0E

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-856　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-3-4-4-1　原子炉圧力容器内部構造物の応力解析の方針

目次

1. 概要 1
1.1 一般事項 1
1.2 構造の説明 1
2. 記号の説明 3
3. 計算条件 4
3.1 適用基準 4
3.2 解析箇所 4
3.3 形状及び寸法 5
3.4 物性値 5
3.4.1 材料の物性値 5
3.5 荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態） 6
3.6 許容応力 6
3.7 溶接部の継手効率 6
4. 荷重条件 7
4.1 設計条件 7
4.2 運転条件 7
4.2.1 運転状態Ⅰ及びⅡ 7
4.2.2 運転状態Ⅲ 8
4.2.3 運転状態Ⅳ 8
4.3 重大事故等時の条件 8
4.4 荷重の組合せ 8
4.4.1 荷重の組合せと応力評価 8
5. 応力解析の手順 9
5.1 解析手順の概要 9
5.2 荷重の選定 9
5.3 応力計算と応力の分類 9
5.3.1 応力計算の方法 9
5.3.2 応力計算に使用する計算機コード 9
5.3.3 応力の分類 9
5.4 応力の評価 10
5.4.1 主応力 10
5.4.2 応力強さ 10
5.4.3 一次応力強さ 10
5.5 特別な応力の検討 10
5.5.1 純せん断応力の評価 10
5.6 極限解析による評価 10

5.6.1　極限解析の方法 ····· 10
5.6.2　極限解析に使用する計算機コード ····· 11
6.　解析及び評価結果の添付 ····· 12
6.1　応力解析結果 ····· 12
6.2　応力評価結果 ····· 12
7.　引用文献 ····· 13

図表目次

図 3－1　全体断面図 ····· 14
図 4－1　原子炉圧力容器内部構造物の設計差圧 ····· 15
図 4－2　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件 ····· 16
図 5－1　応力解析の手順 ····· 26

表 1－1　原子炉圧力容器内部構造物の構造計画 ····· 2
表 3－1　材料の分類 ····· 27
表 3－2　応力計算に使用する材料の物性値 ····· 28
表 3－3　極限解析による評価に使用する材料の物性値 ····· 29
表 3－4　荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態） ····· 30
表 3－5　原子炉圧力容器内部構造物用材料の許容応力 ····· 32
表 4－1　外荷重 ····· 35
表 4－2　荷重の組合せ ····· 46
表 5－1　応力の分類 ····· 47

1. 概要

1.1 一般事項

本書は，原子炉圧力容器内部構造物に関する応力解析の方針を述べるものである。

なお，原子炉圧力容器内部構造物は耐震Ｓクラスの設計基準対象施設であり，下記の機器は重大事故等対処設備に該当し，その他の機器は重大事故等対処設備に該当しない。

・ジェットポンプ
・高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ
・残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）
・高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）
・差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）

注１：本書に記載していない特別な内容がある場合は，各計算書に示す。

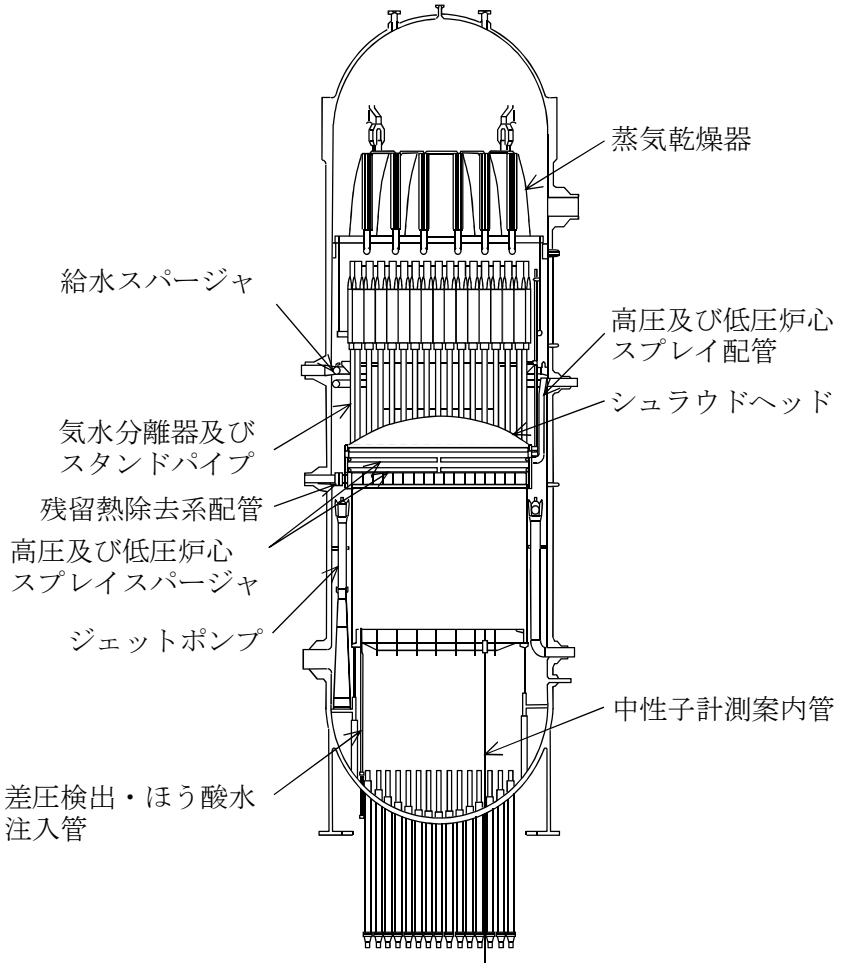
1.2 構造の説明

原子炉圧力容器内部構造物の構造計画を表 1－1 に示す。

なお，原子炉圧力容器内部構造物は，下記の機器により構成される。

(1) 蒸気乾燥器
(2) 気水分離器及びスタンドパイプ
(3) シュラウドヘッド
(4) ジェットポンプ
(5) 給水スパージャ
(6) 高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ
(7) 残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）
(8) 高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）
(9) 差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）
(10) 中性子計測案内管

表1－1　原子炉圧力容器内部構造物の構造計画

主要区分	計画の概要		概略構造図
	基礎・支持構造	主体構造	
原子炉圧力容器内部構造物	蒸気乾燥器，給水スパージャ，高圧及び低圧炉心スプレイ配管は，原子炉圧力容器内部に取り付けられたブラケットにより支持されている。 また，気水分離器及びスタンドパイプはシュラウドヘッドに溶接により接続され，シュラウドヘッドは炉心シュラウド上にボルトによりフランジ接続される。	原子炉圧力容器内部構造物は蒸気乾燥器，気水分離器及びスタンドパイプ，シュラウドヘッド，ジェットポンプ，給水スパージャ，高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ，残留熱除去系配管，高圧及び低圧炉心スプレイ配管，差圧検出・ほう酸水注入管，中性子計測案内管により構成される。	

2. 記号の説明

本書及び各計算書において，以下の記号を使用する。ただし，本書添付及び各計算書中に別途記載ある場合は，この限りでない。

なお，各計算書における記号の字体及び大きさについては，本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
E	縦弾性係数	MPa
F_L	軸力	N
F_S	せん断力	N
H	水平力	N
M	モーメント	N・mm
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
Ｓｄ*	弾性設計用地震動Ｓｄにより定まる地震力又は静的地震力	－
Ｓｓ	基準地震動Ｓｓにより定まる地震力	－
S_{12}	主応力差$\sigma_1-\sigma_2$	MPa
S_{23}	主応力差$\sigma_2-\sigma_3$	MPa
S_{31}	主応力差$\sigma_3-\sigma_1$	MPa
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
T	ねじりモーメント	N・mm
V	鉛直力	N
η	溶接部の継手効率	－
ν	ポアソン比	－
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_ℓ	軸方向応力	MPa
σ_r	半径方向応力	MPa
σ_t	周方向応力	MPa
$\tau_{\ell r}$	せん断応力	MPa
τ_{rt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\ell}$	せん断応力	MPa

3. 計算条件

3.1 適用基準

発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。））ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005/2007）（日本機械学会　2007 年）（以下「設計・建設規格」という。）及び原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編　ＪＥＡＧ４６０１・補－1984）（日本電気協会　電気技術基準調査委員会　昭和 59 年）を適用する。

注：本書及び各応力計算書において，設計・建設規格の条項は「設計・建設規格　○○○-△△△△(◇)a.(a)」として示す。

3.2 解析箇所

新規制対応工認対象となる設計用地震力及び重大事故等時に対する応力評価の対象箇所は，次のとおりである。（図 3－1 参照）

機器名称		設計用地震力に対する応力評価	重大事故等時に対する応力評価
(1)	蒸気乾燥器	○	×*
(2)	気水分離器及びスタンドパイプ	○	×*
(3)	シュラウドヘッド	○	×*
(4)	ジェットポンプ	○	○
(5)	給水スパージャ	○	×
(6)	高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ	○	○
(7)	残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）	○	○
(8)	高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）	○	○
(9)	差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）	○	○
(10)	中性子計測案内管	○	×*

注：「○」は評価対象，「×」は評価対象外を示す。

注記 ＊：原子炉冷却材の流路機能がないため，評価対象外とする。

3.3　形状及び寸法

各部の形状及び寸法は，各計算書に示す。

3.4　物性値

応力計算及び極限解析による評価に使用する材料の物性値は，以下のとおりである。

3.4.1　材料の物性値

材料の物性値は，次のように定める。

(1)　縦弾性係数Ｅは，設計・建設規格　付録材料図表　Part6　表1及び表2に定められたものによる。

(2)　材料は，表3－1に従って分類する。

主な温度における材料の物性値を表3－2に示す。

極限解析による評価に使用する物性値を表3－3に示す。

3.5　荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）

荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）は，表3－4に示すとおりである。また，各供用状態（許容応力状態）で考慮する荷重は，4章に示すとおりである。

なお，本書及び各計算書において，設計・建設規格　GNR-2120(1)の規定による最高使用圧力（供用状態Ａを定義する運転状態において機器が受ける最高の圧力以上の圧力であって，設計上定めるものをいう。）を「設計差圧」と呼ぶ。（図4－1参照）

3.6　許容応力

(1)　設計応力強さS_m，設計降伏点S_y及び設計引張強さS_uは，それぞれ設計・建設規格　付録材料図表　Part5　表1，表8及び表9に定められたものを使用する。

(2)　許容応力状態Ⅲ$_A$Ｓ及び許容応力状態Ⅳ$_A$Ｓの一次応力評価には，各運転状態における流体の最高温度（運転状態Ⅰ及びⅡ［　　］℃）に対する許容応力を用いる。供用状態Ｅ*の一次応力の評価には，運転状態Ⅴにおける評価温度条件［　　］℃）に対する許容応力を用いる。

(3)　原子炉圧力容器内部構造物の各運転状態の応力評価に用いる許容応力は，設計・建設規格CSS-3110により表3－6に示すとおりである。

注記　＊：供用状態Ｅとは，重大事故等時の状態（運転状態Ⅴ）であり，供用状態Ｄを超える状態である。許容応力の算出式は供用状態Ｄと同様とする。

3.7　溶接部の継手効率

(1)　溶接部の継手効率は，継手の種類と分類及び継手に適用する検査の種類により，設計・建設規格　CSS-3150に従って定める。

(2)　溶接部の許容応力は，表3－5に定める許容応力に継手効率を乗じたものである。

4. 荷重条件

原子炉圧力容器内部構造物は，以下の荷重条件に耐えるように設計する。

各機器の応力解析には，本章に示す荷重を考慮する。

4.1 設計条件

原子炉圧力容器の最高使用圧力	：8.62 MPa
設計差圧	：図 4－1 に示す。
最高使用温度	：302 ℃

4.2 運転条件

運転条件及び記号は，次のとおりである。また，これらの記号を解析及び評価に用いる場合において，同一事象内に複数の解析時点がある場合は記号に小番号を付して使用する。

［例 C03-01，C03-02］

なお，各応力計算書においては，{ }内の名称を用いる。

計算書では以下に示す運転条件のうち，一次応力強さの評価については，各供用状態（許容応力状態）を定義する各運転状態のうち，最も厳しい運転条件について選定する。

4.2.1 運転状態Ⅰ及びⅡ

(1) ボルト締付け	{ボルト締付け}	[C01]
(2) 耐圧試験（最高使用圧力以下）	{耐圧試験最高使用圧力以下}	[C02]
(3) 起動（昇温）	{起動昇温}	[C03]
(4) 起動（タービン起動）	{起動タービン起動}	[C04]
(5) 夜間低出力運転（出力 75 %）	{夜間低出力運転出力 75 %}	[C05]
(6) 週末低出力運転（出力 50 %）	{週末低出力運転出力 50 %}	[C06]
(7) 制御棒パターン変更	{制御棒パターン変更}	[C07]
(8) 給水加熱機能喪失（発電機トリップ）	{発電機トリップ}	[C08]
(9) 給水加熱機能喪失(給水加熱器部分バイパス)	{給水加熱器部分バイパス}	[C09]
(10) スクラム（タービントリップ）	{スクラムタービントリップ}	[C10]
(11) スクラム（その他のスクラム）	{スクラムその他のスクラム}	[C11]
(12) 定格出力運転	{定格出力運転}	[C12]
(13) 停止（タービン停止）	{停止タービン停止}	[C13]
(14) 停止（高温待機）	{停止高温待機}	[C14]
(15) 停止（冷却）	{停止冷却}	[C15]
(16) 停止（容器満水）	{停止容器満水}	[C16]
(17) 停止（満水後冷却）	{停止満水後冷却}	[C17]
(18) ボルト取外し	{ボルト取外し}	[C18]
(19) 燃料交換	{燃料交換}	[C19]
(20) スクラム(原子炉給水ポンプ停止)	{スクラム原子炉給水ポンプ停止}	[C20]

(21) スクラム(逃がし安全弁誤作動)　{スクラム逃がし安全弁誤作動}　[C21]

4.2.2 運転状態Ⅲ

(1) スクラム（過大圧力）　{スクラム過大圧力}　[C22]

(2) 冷却材再循環系仕切弁誤作動（冷状態）　{冷再循環系仕切弁誤作動}　[C23]

(3) 冷却材再循環ポンプ誤起動（冷状態）　{冷再循環ポンプ誤起動}　[C24]

4.2.3 運転状態Ⅳ

(1) 冷却材喪失事故　{冷却材喪失事故}　[C25]

各運転条件における外荷重を表 4－1 に示す。

各運転条件における原子炉圧力容器内部構造物の周囲の流体の温度，圧力の変化及びその繰返し回数を図 4－2 に示す。

4.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件は以下のとおりである。

温度条件：設計条件と同じ。

圧力条件：設計条件と同じ。

差圧条件：運転状態Ⅳと同じ。

4.4 荷重の組合せ

4.4.1 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価項目の対応を表 4－2 に示す。表 4－2 及び各計算書において，荷重の種類と記号は以下のとおりである。

荷重	記号
(1) 原子炉圧力容器の内圧	[L01]
(2) 差圧	[L02]
(3) 死荷重（機器の自重により生じる荷重）	[L04]
(4) 活荷重（流体反力）	[L08]
(5) 配管又は機器の地震時の振動による地震荷重Ｓｄ*（一次荷重）	[L14]
(6) 配管又は機器の地震時の振動による地震荷重Ｓｓ（一次荷重）	[L16]

注：L08は，L04として考慮する。

5.　応力解析の手順

応力解析の手順について述べる。

5.1　解析手順の概要

解析手順の概要を図5－1に示す。本図において，差圧による応力とその他の荷重による応力の計算で考慮する荷重を「機械荷重」という。

5.2　荷重の選定

応力解析においては，4章に示した荷重条件のうちから，その部分に作用する荷重を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重を表4－1に示す。

5.3　応力計算と応力の分類

5.3.1　応力計算の方法

(1)　応力計算は，4.4.1 項に示す荷重の種類ごとに行う。

(2)　解析する箇所の形状は，次の方針に従ってモデル化する。

a.　形状及び材料の不連続を考慮して，応力計算のためのメッシュ分割を行う。

b.　溶接部は，溶接金属に相当する鋼材と同じ物性値及び機械的性質を用いる。

(3)　モデル図と使用する境界条件（拘束条件）は，各計算書に示す。

5.3.2　応力計算に使用する計算機コード

(1)　ＡＢＡＱＵＳ

有限要素法による汎用解析コードである。

(2)　ＮＡＳＴＲＡＮ

有限要素法による汎用解析コードである。

5.3.3　応力の分類

応力の計算結果は，表 5－1 の応力の分類方法に従って分類して，各計算書に示す。

5.4　応力の評価

5.4.1　主応力

5.3 節で計算された応力は，応力の分類ごとに重ね合わせ，組合せ応力を求める。

組合せ応力は，一般にσ_t，σ_ℓ，σ_r，$\tau_{t\ell}$，$\tau_{\ell r}$，τ_{rt}の 6 成分をもつが，主応力σは，引用文献(1)の 1･3･6 項により，次式を満足する 3 根σ_1，σ_2，σ_3として計算する。

$$\sigma^3-(\sigma_t+\sigma_\ell+\sigma_r)\cdot\sigma^2+(\sigma_t\cdot\sigma_\ell+\sigma_\ell\cdot\sigma_r+\sigma_r\cdot\sigma_t-\tau_{t\ell}^2-\tau_{\ell r}^2-\tau_{rt}^2)\cdot\sigma-\sigma_t\cdot\sigma_\ell\cdot\sigma_r+\sigma_t\cdot\tau_{\ell r}^2+\sigma_\ell\cdot\tau_{rt}^2+\sigma_r\cdot\tau_{t\ell}^2-2\cdot\tau_{t\ell}\cdot\tau_{\ell r}\cdot\tau_{rt}=0$$

上式により主応力を求める。

5.4.2　応力強さ

以下の 3 つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$S_{12}=\sigma_1-\sigma_2$

$S_{23}=\sigma_2-\sigma_3$

$S_{31}=\sigma_3-\sigma_1$

5.4.3　一次応力強さ

許容応力状態ⅢＡＳ，許容応力状態ⅣＡＳ及び供用状態Ｅにおいて生じる一次一般膜応力及び一次一般膜＋一次曲げ応力の応力強さが，3.6 節及び 3.7 節に示す許容値を満足することを示す。

5.5　特別な応力の検討

5.5.1　純せん断応力の評価

純せん断荷重を受ける部分は，設計・建設規格　CSS-3114 により評価する。解析箇所を以下に示す。許容応力は，表 3－5(3)に示し，評価方法は計算書に示す。

(1)　蒸気乾燥器の耐震サポート

5.6　極限解析による評価

気水分離器及びスタンドパイプについては，許容応力状態ⅢＡＳ及び許容応力状態ⅣＡＳに対して，設計・建設規格　CSS-3160 に従い極限解析による評価を行う。

5.6.1　極限解析の方法

(1)　極限解析は，有限要素法による弾塑性解析を用いて行う。

(2)　解析する箇所の形状は，次の方針に従ってモデル化する。

a.　形状及び材料の不連続を考慮して，弾塑性解析のためのメッシュ分割を行う。

b.　溶接部は，溶接金属に相当する鋼材と同じ物性値及び機械的性質を用いる。

(3)　モデル図と使用する境界条件（拘束条件）は，計算書に示す。

5.6.2　極限解析に使用する計算機コード

(1)　ＡＢＡＱＵＳ

有限要素法による汎用解析コードであり，弾塑性解析に使用する。

このコードへのインプットは，解析しようとする箇所を形状，材料等の不連続部で小さなメッシュに分割することによって行う。

6. 解析及び評価結果の添付

各応力計算書では，以下に示すように解析結果を添付する。

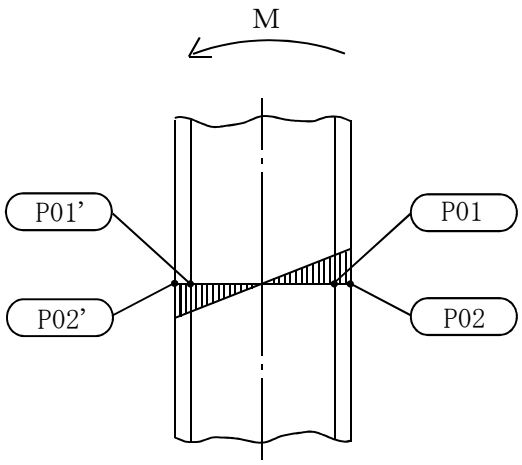
6.1 応力解析結果

全応力評価点（面）について考慮した荷重ごとに応力を分類し，その結果を示す。また，応力評価点の選定に当たっては，各部分ごとに応力評価上厳しくなる評価点を，各部分を代表する評価点として選定する。

応力評価点番号は，計算書ごとに記号 P01 からの連番とする。奇数番号を内面の点，偶数番号を外面の点として，各計算書の形状・寸法・材料・応力評価点を示す図において定義する。

なお，軸対称モデルにおいて，非軸対称な外荷重による応力評価を行った場合，荷重の入力方位と応力評価点の方位の関係により応力に極大値と極小値が生じる。外荷重による応力が極大となる方位の応力評価点は［例　P01］と表し，極小となる方位の応力評価点には，プライム（’）を付けて［例　P01’］と表す。

一次応力の評価は，内外面の応力評価点を含む断面（応力評価面）について行う。



6.2 応力評価結果

(1) 次の応力評価結果は，全応力評価点（面）について添付する。

a. 一次一般膜応力強さの評価のまとめ

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(2) 次の特別な応力は，対象となるすべての部位について評価し，この結果を記載する。

a. 純せん断応力

(3) 極限解析による評価は，対象となるすべての部位について，結果を記載する。

7. 引用文献

文献番号は，本書及び各応力計算書において共通である。

(1) 機械工学便覧　基礎編 α3（日本機械学会）

(2) Journal of Engineering for Industry,「Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates with Square and Triangular Penetration Patterns」(T.SLOT, W.J.O'DONNELL)

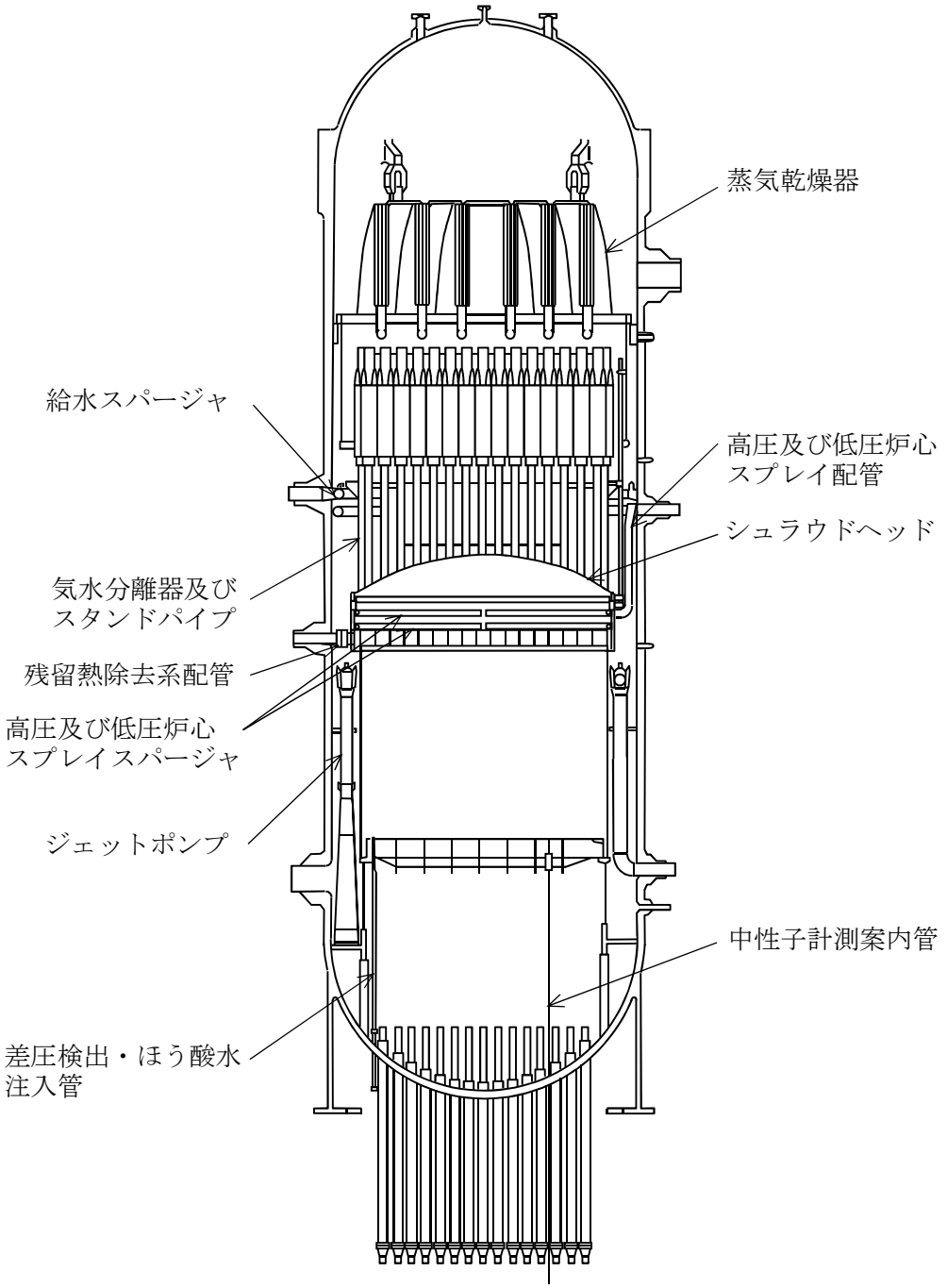
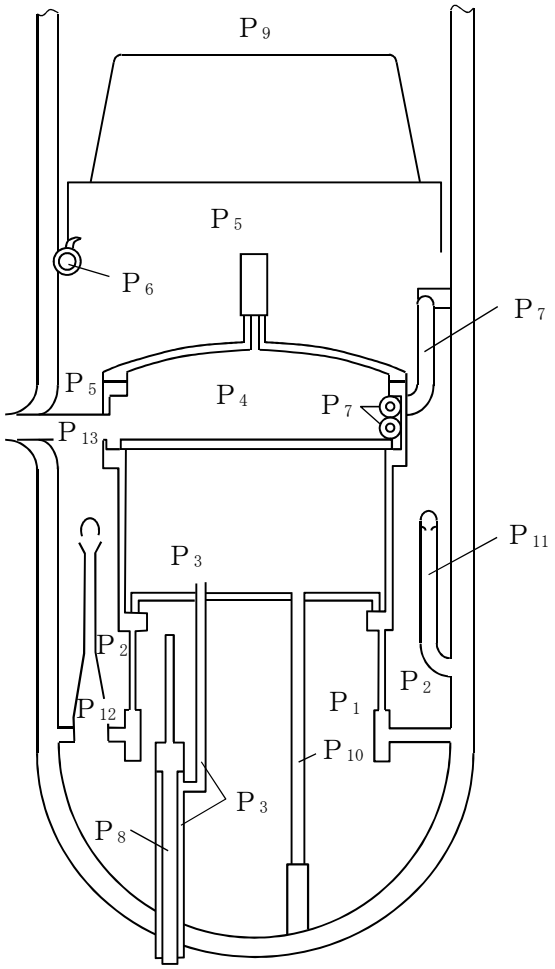

蒸気乾燥器
給水スパージャ
高圧及び低圧炉心
スプレイ配管
シュラウドヘッド
気水分離器及び
スタンドパイプ
残留熱除去系配管
高圧及び低圧炉心
スプレイスパージャ
ジェットポンプ
中性子計測案内管
差圧検出・ほう酸水
注入管

図 3－1　全体断面図



（単位：MPa）

部位		設計差圧
蒸気乾燥器	$P_{59}=P_5-P_9$	
気水分離器及びスタンドパイプ	$P_{45}=P_4-P_5$	
シュラウドヘッド	$P_{45}=P_4-P_5$	
ジェットポンプ	$P_{112}=P_{11}-P_2$	
	$P_{122}=P_{12}-P_2$	
給水スパージャ	$P_{65}=P_6-P_5$	
高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ	$P_{74}=P_7-P_4$	
残留熱除去系配管	$P_{135}=P_{13}-P_5$	
高圧及び低圧炉心スプレイ配管	$P_{75}=P_7-P_5$	
差圧検出・ほう酸水注入管	$P_{13}=P_1-P_3$	
	$P_{81}=P_8-P_1$	
	$P_{83}=P_8-P_3$	
中性子計測案内管	$P_{110}=P_1-P_{10}$	

図 4－1　原子炉圧力容器内部構造物の設計差圧

運転状態	I 及び II																				III			IV
運転条件	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25
運転名称	ボルト締付け	耐圧試験 最高使用圧力以下	起動 昇温	起動 タービン起動	夜間低出力運転(出力75%)	週末低出力運転(出力50%)	制御棒パターン変更	給水加熱機能喪失 発電機トリップ	給水加熱機能喪失 給水加熱器部分バイパス	スクラム タービントリップ	スクラム その他のスクラム	定格出力運転	停止 タービン停止	停止 高温待機	停止 冷却	停止 容器満水	停止 満水後冷却	ボルト取外し	燃料交換	スクラム 原子炉給水ポンプ停止	スクラム 逃がし安全弁誤作動	過大圧力	冷却材再循環系仕切弁誤作動(冷状態)	冷却材再循環ポンプ誤起動(冷状態)	冷却材喪失事故
回数																									
差圧 (MPa)																									

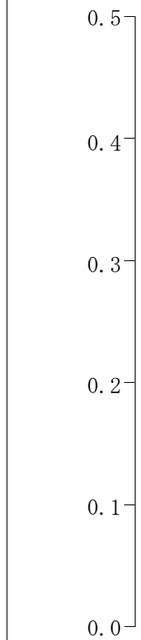


図4－2(1)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件

運転状態	I 及び II																				III			IV
運転条件	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25
運転名称	ボルト締付け	耐圧試験 最高使用圧力以下	起動 昇温	起動 タービン起動	夜間低出力運転（出力75%）	週末低出力運転（出力50%）	制御棒ﾊﾟﾀｰﾝ変更	給水加熱機能喪失 発電機ﾄﾘｯﾌﾟ	給水加熱機能喪失 給水加熱器部分ﾊﾞｲﾊﾟｽ	スクラム ﾀｰﾋﾞﾝﾄﾘｯﾌﾟ	スクラム その他のスクラム	定格出力運転	停止 ﾀｰﾋﾞﾝ停止	停止 高温待機	停止 冷却	停止 容器満水	停止 満水後冷却	ボルト取外し	燃料交換	スクラム 原子炉給水ﾎﾟﾝﾌﾟ停止	スクラム 逃がし安全弁誤作動	過大圧力	冷却材再循環系仕切弁誤作動（冷状態）	冷却材再循環ﾎﾟﾝﾌﾟ誤起動（冷状態）	冷却材喪失事故
回数																									

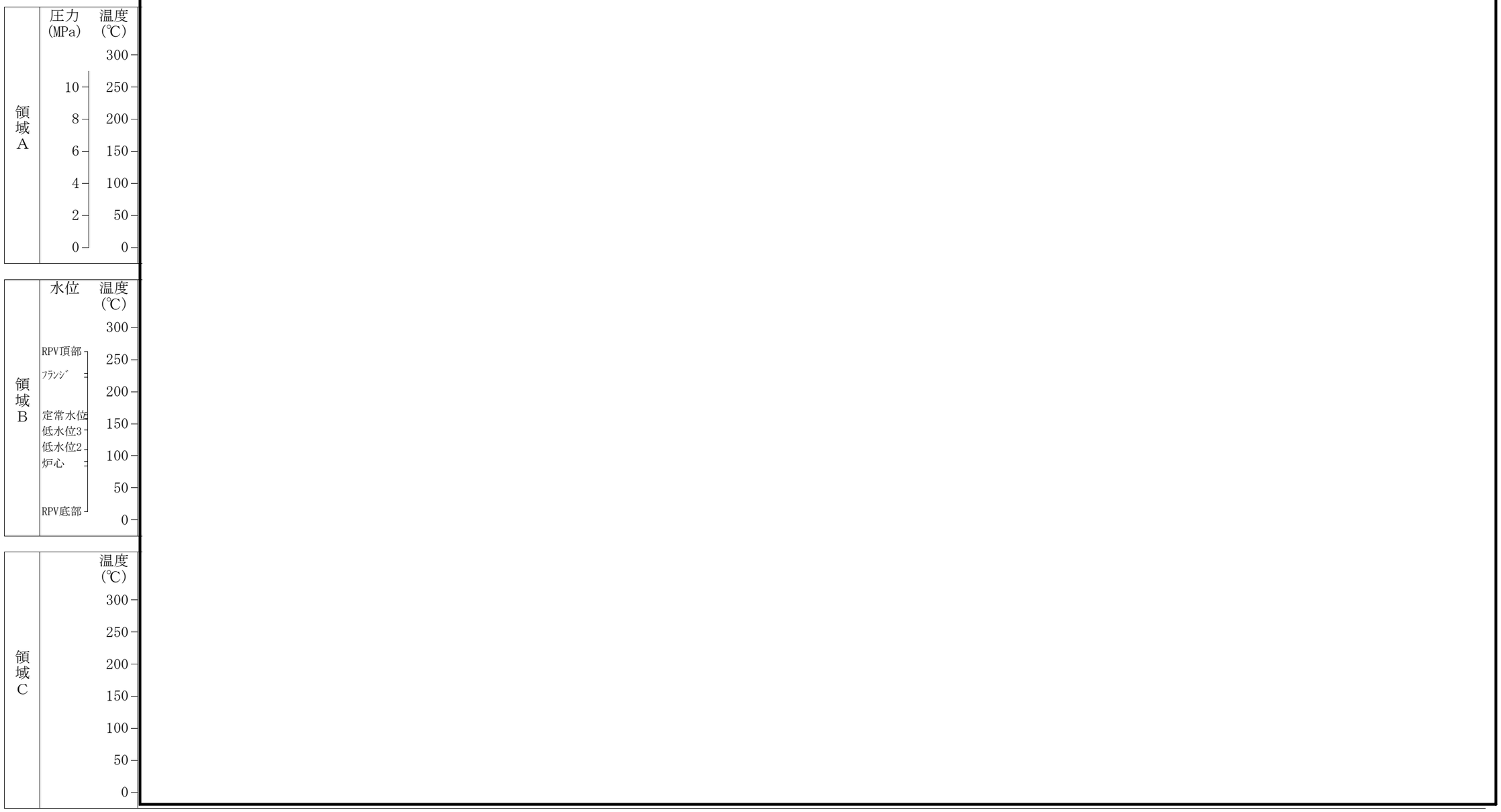
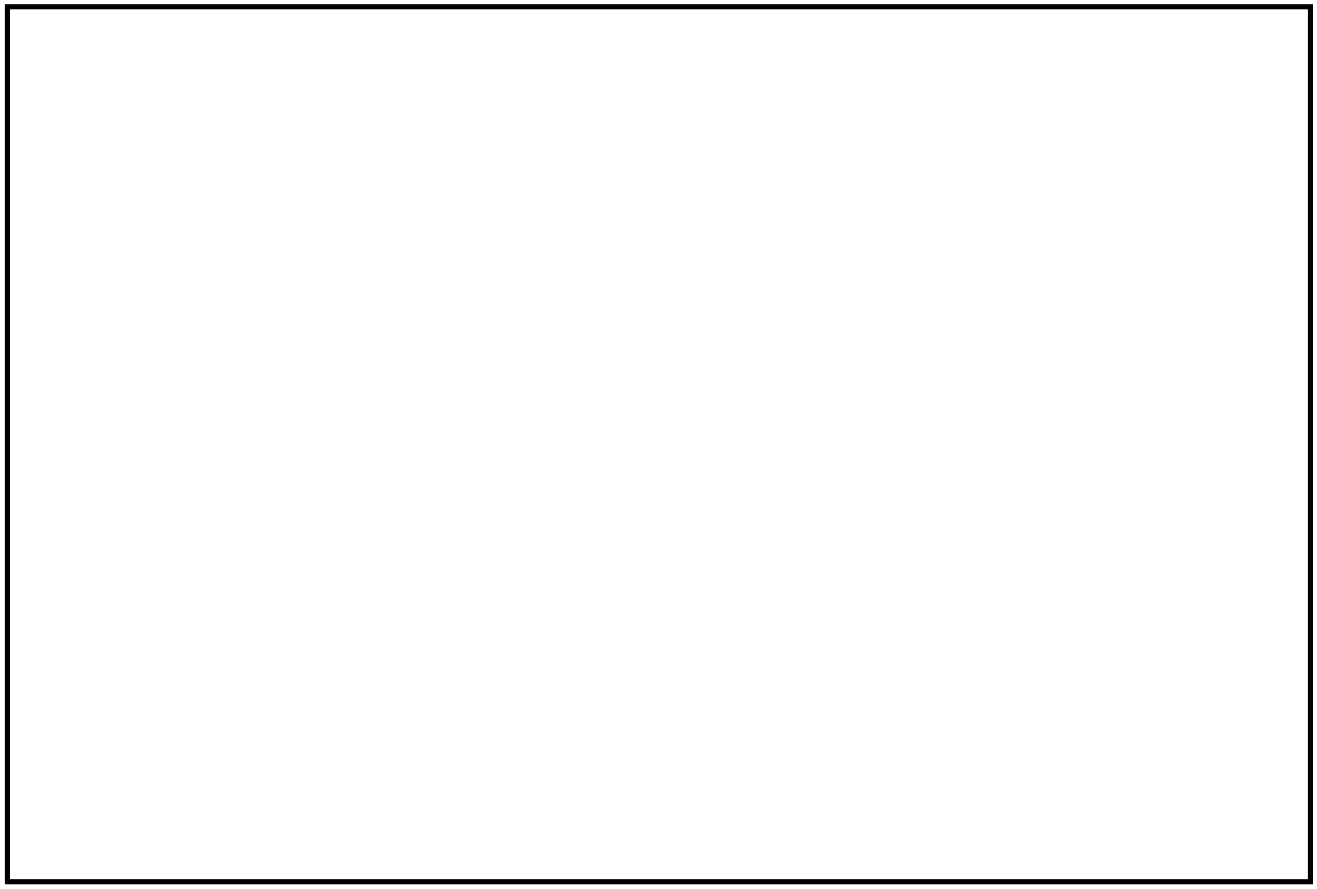


図4－2(2)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件

図 4－2(2)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（続）



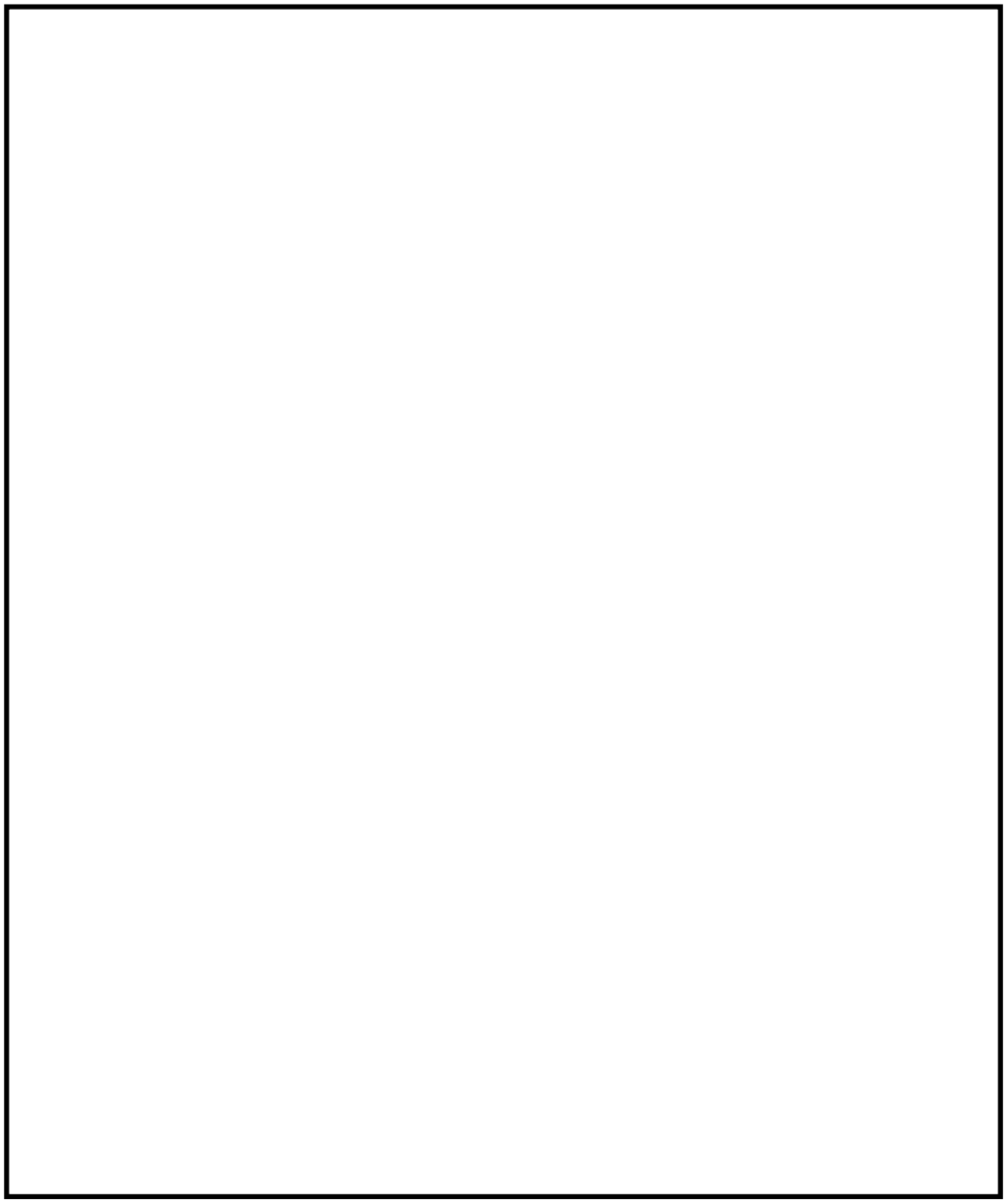


図 4－2(3)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件
（原子炉圧力容器内領域図）

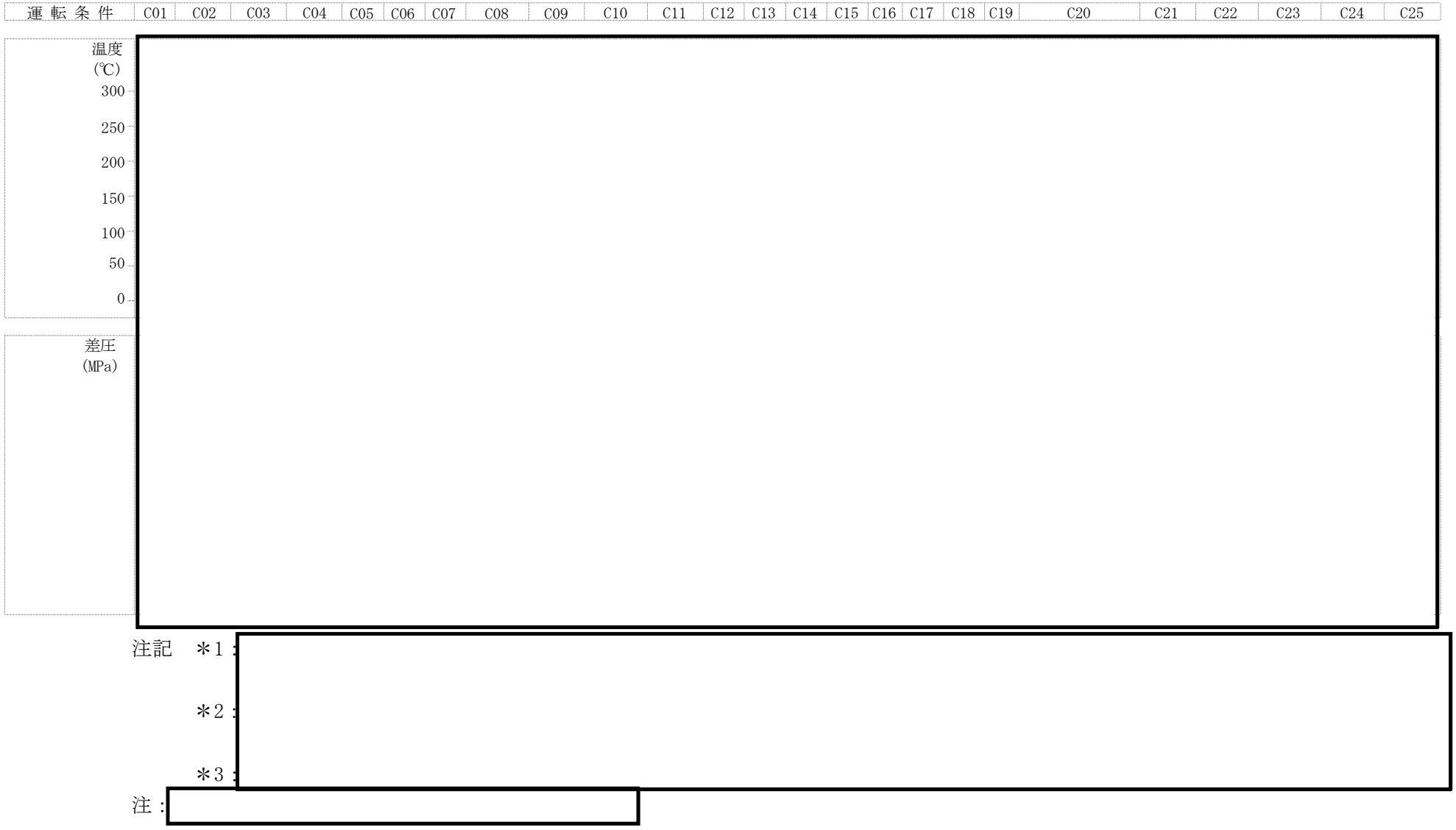


図 4－2(4)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（ジェットポンプ）

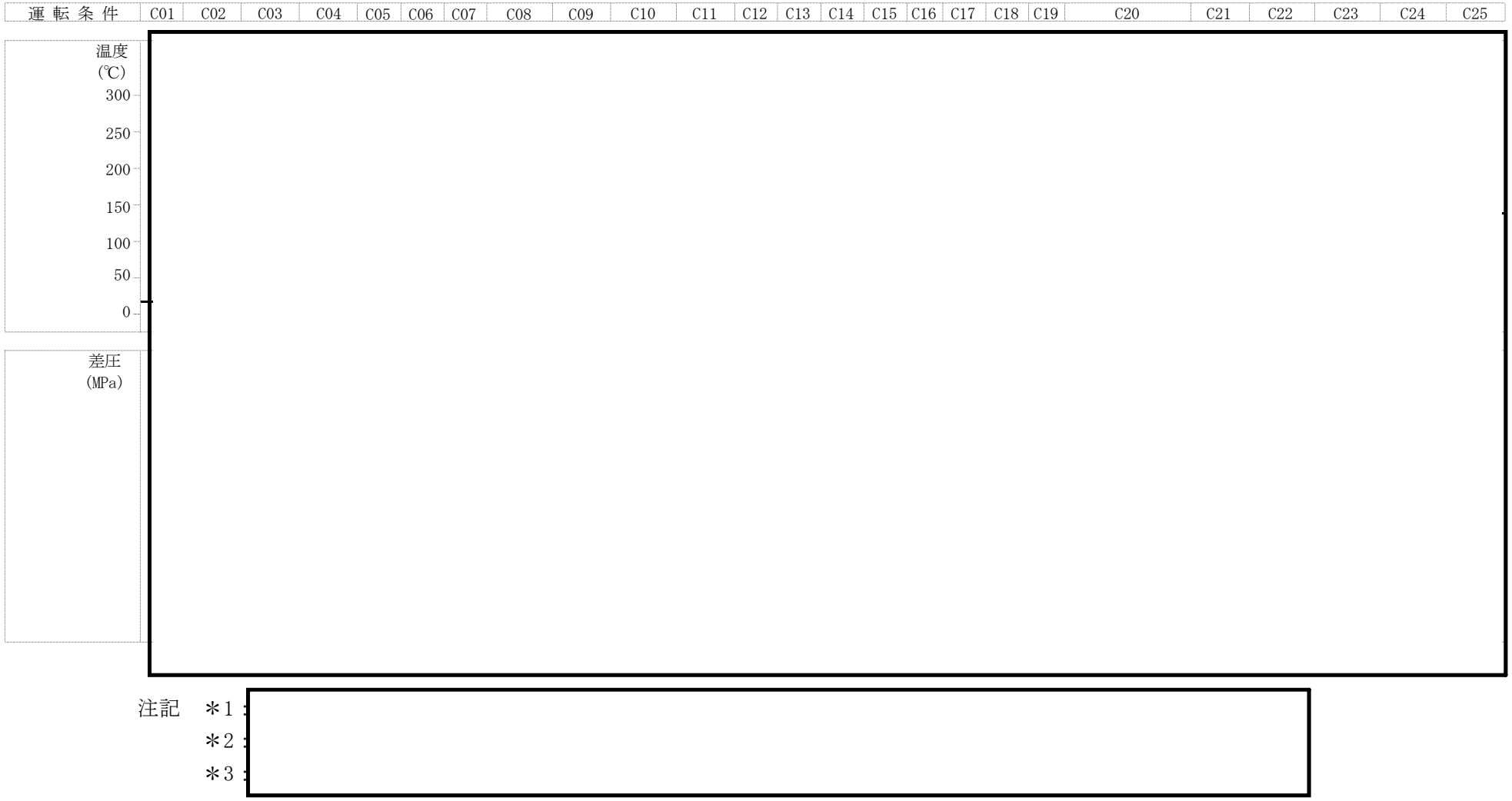
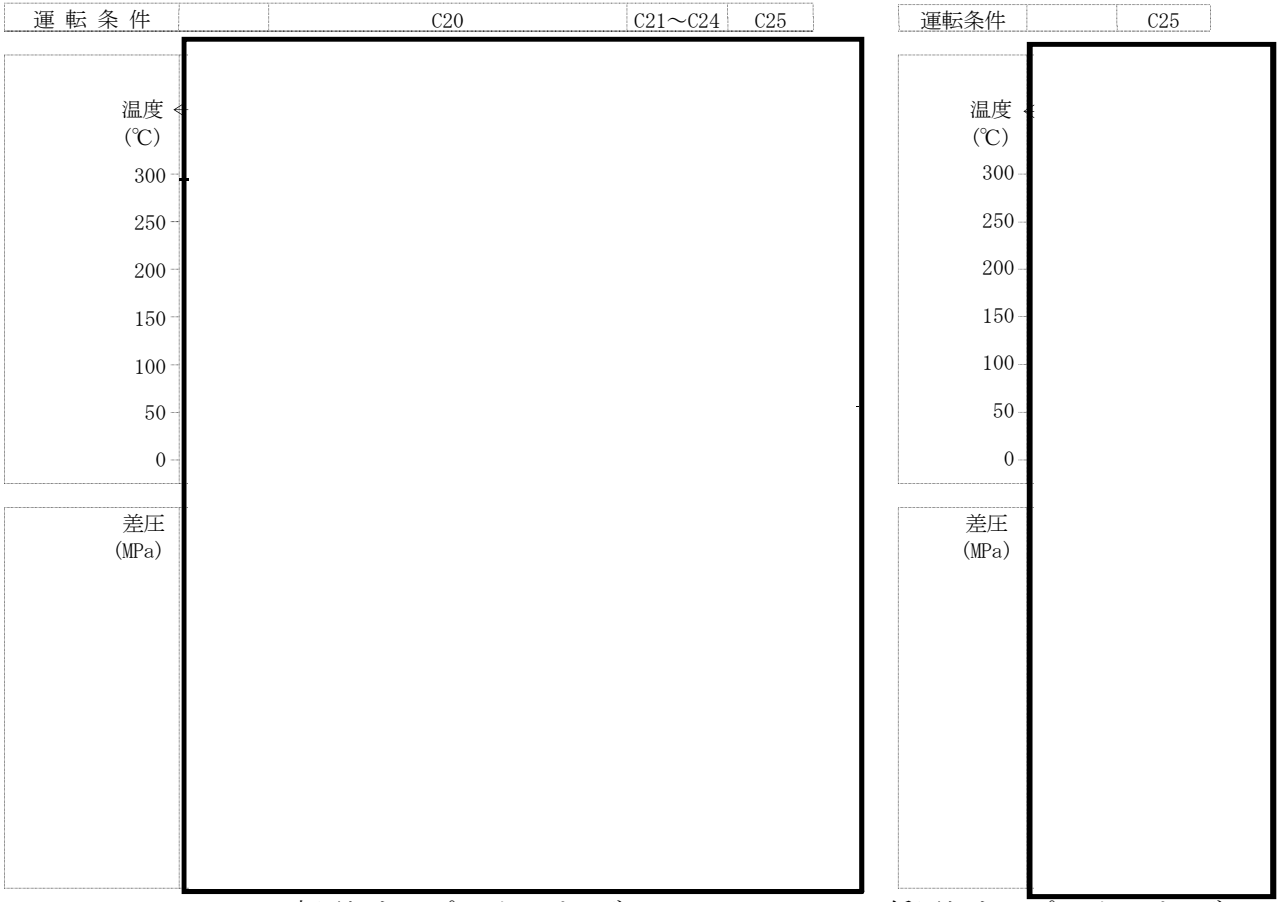


図 4－2(5)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（給水スパージャ）



高圧炉心スプレイスパージャ　　低圧炉心スプレイスパージャ

注記　＊1
　　＊2

注1：
注2：

図 4－2(6)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ）

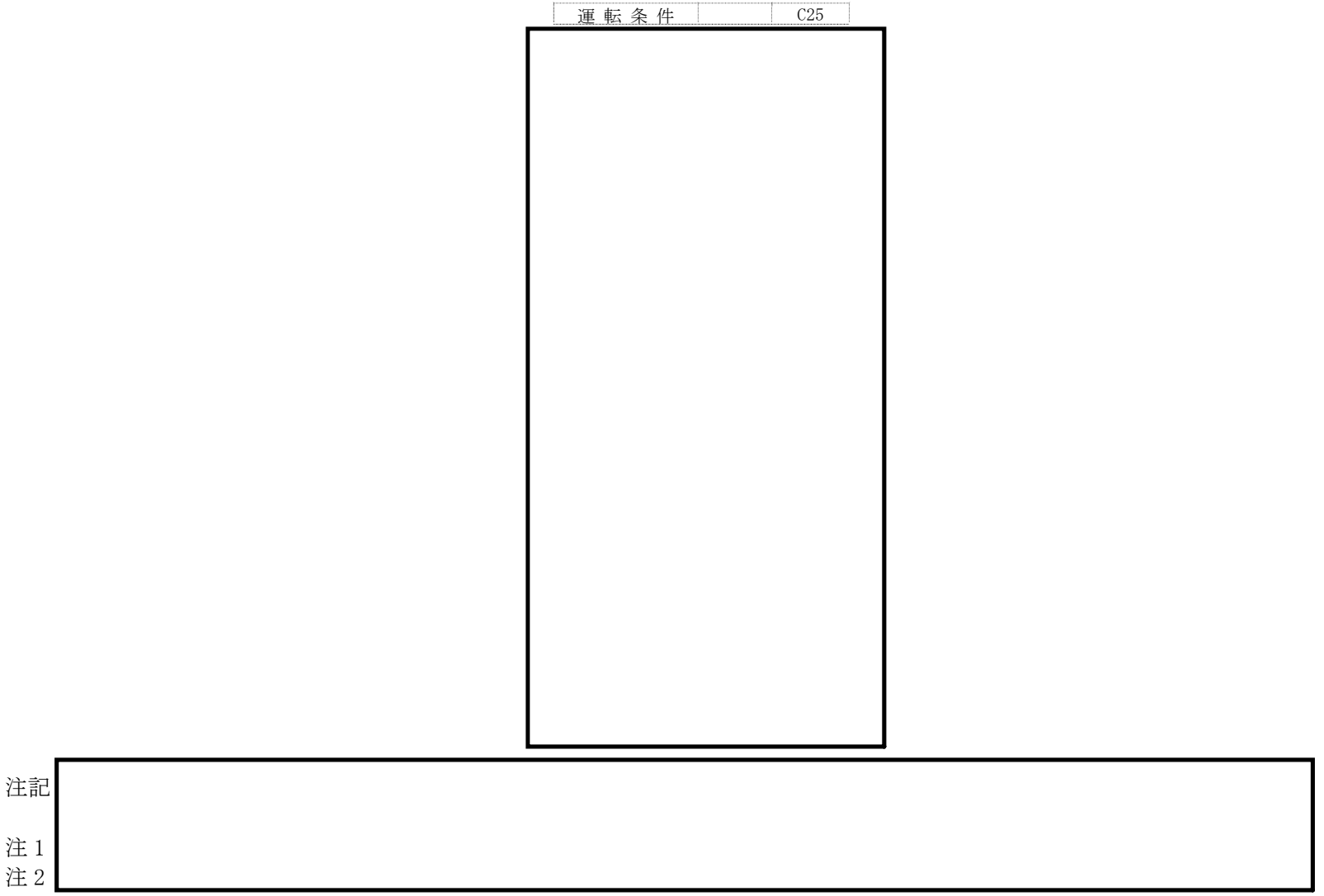


図 4－2(7)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（残留熱除去系配管）

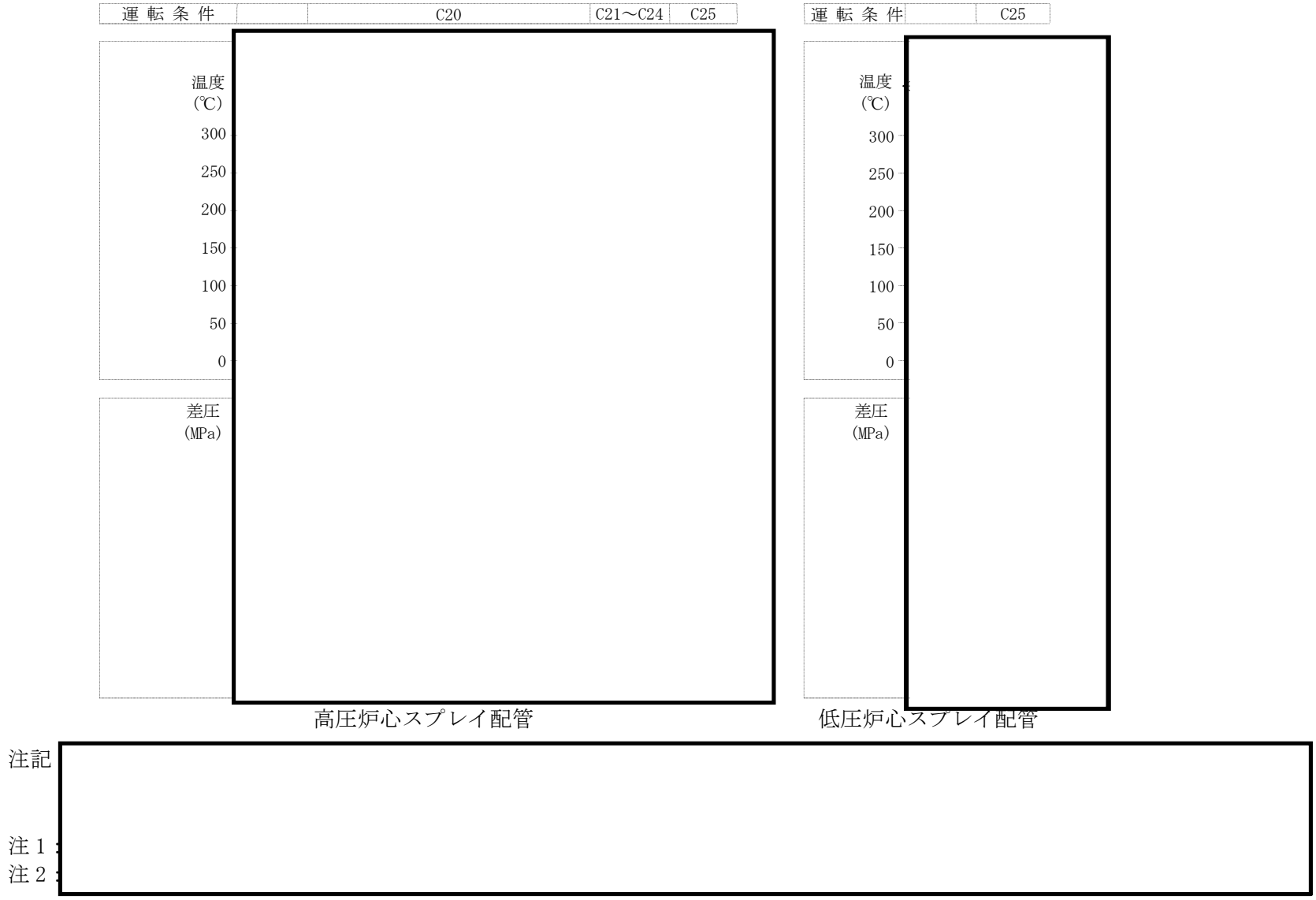


図４－２(8)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（高圧及び低圧炉心スプレイ配管）

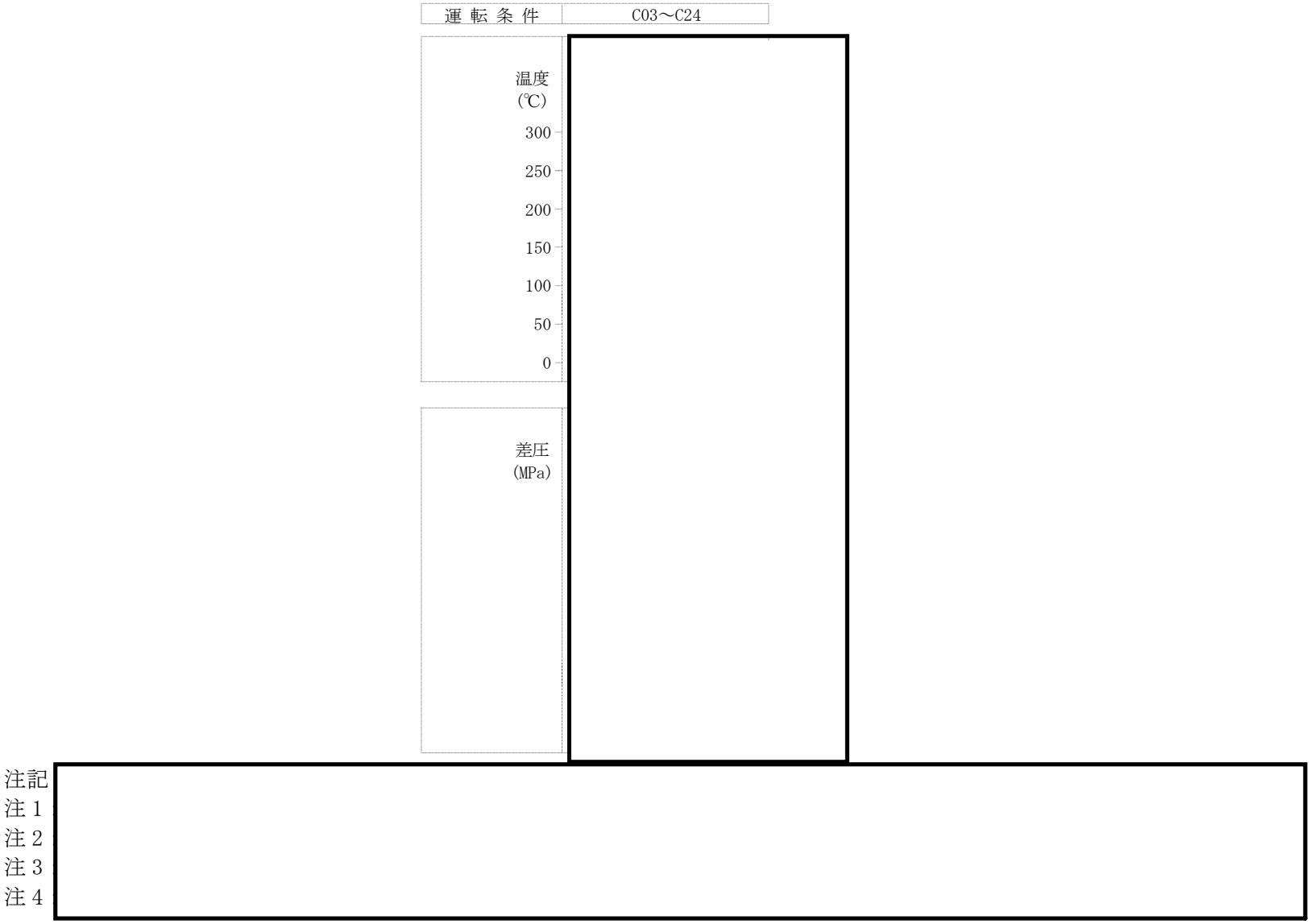


図4－2(9)　原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（差圧検出・ほう酸水注入管）

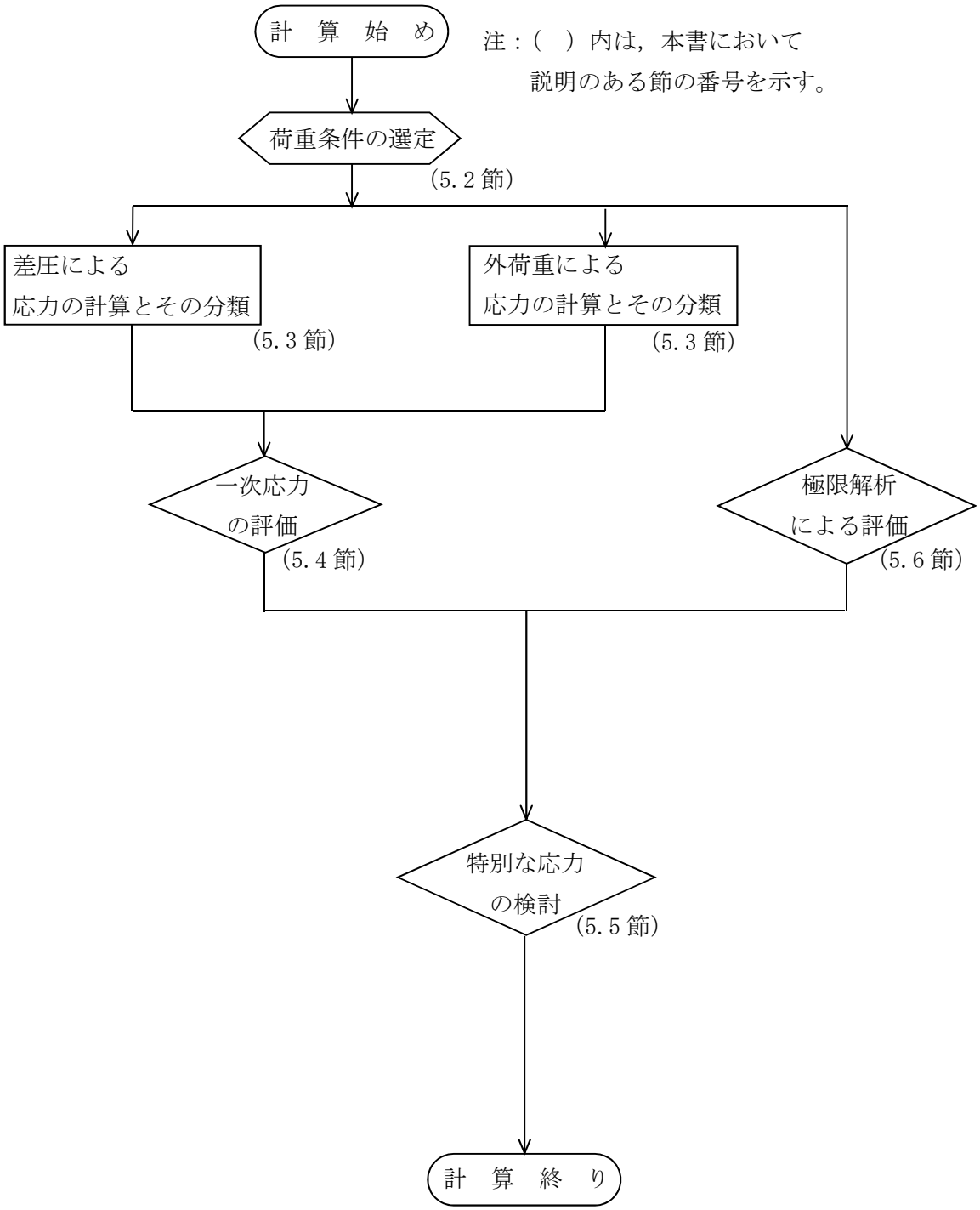

計　算　始　め
注：（　）内は，本書において
説明のある節の番号を示す。
荷重条件の選定
(5.2 節)
差圧による
応力の計算とその分類
(5.3 節)
外荷重による
応力の計算とその分類
(5.3 節)
一次応力
の評価
(5.4 節)
極限解析
による評価
(5.6 節)
特別な応力
の検討
(5.5 節)
計　算　終　り

図 5－1　応力解析の手順

表 3－1　材料の分類

種類	使用材料	備考
低合金鋼		SQV2A 相当
		SFVQ2A 相当
炭素鋼		SFVC2B 相当
オーステナイト系ステンレス鋼		SUS304 相当
		SUS304TP 相当
		SUSF304 相当
		SUS304LTP 相当
高ニッケル合金		NCF600 相当

表 3－2　応力計算に使用する材料の物性値

材料	温度 (℃)	E $\times 10^5$ (MPa)	ν
SQV2A	20		
	161		
	302		
SFVQ2A	20		
	161		
	302		
SFVC2B	20		
	161		
	302		
SUS304 SUS304TP SUSF304 SUS304LTP	20		
	161		
	302		
NCF600	20		
	161		
	302		

表3－3　極限解析による評価に使用する材料の物性値

材料	E $\times 10^5$ (MPa)	ν	降伏点（MPa）	
			許容応力状態ⅢＡＳ	許容応力状態ⅣＡＳ
SUS304 SUS304TP	1.76	0.3	172	264
降伏点の算出式	－	－	1.5・Ｓm	Min (2.3・Ｓm，0.7・Ｓu)

注：運転状態Ⅰ及びⅡの最高温度 [redacted] に対する物性値

表 3－4(1)　荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震設計上の重要度分類	機器等の区分	供用状態（許容応力状態）	荷重の組合せ
原子炉本体	原子炉圧力容器内部構造物	蒸気乾燥器*1 気水分離器及びスタンドパイプ*1 シュラウドヘッド*1 ジェットポンプ*1 給水スパージャ*1 高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ*1 残留熱除去系配管*1 高圧及び低圧炉心スプレイ配管*1 差圧検出・ほう酸水注入管*1 中性子計測案内管*1	S	－	III_AS	P＋D＋Ｓｄ*
					IV_AS	P＋D＋Ｓｓ

［記号の説明］

Ｐ　　：　各供用状態（許容応力状態）における差圧

Ｄ　　：　死荷重

Ｓｄ*　：　弾性設計用地震動Ｓｄにより定まる地震力又は静的地震力

Ｓｓ　　：　基準地震動Ｓｓにより定まる地震力

注記　＊1 ：炉心支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

表３－４(2)　荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*1	機器等の区分	供用状態 （許容応力状態）	荷重の組合せ
原子炉 本体	原子炉 圧力容器 内部 構造物	ジェットポンプ*2 高圧及び低圧炉心 スプレイスパージャ*2 残留熱除去系配管*2 高圧及び低圧炉心 スプレイ配管*2 差圧検出・ほう酸水 注入管*2	常設耐震 ／防止 常設／緩和	－	ＶＡＳ*3	ＰＳＡＬ＋Ｄ＋Ｓｄ**4
						ＰＳＡＬＬ＋Ｄ＋Ｓｓ*4
					Ｅ	Ｐ＋Ｄ

［記号の説明］

Ｐ	：	各供用状態（許容応力状態）における差圧
Ｄ	：	死荷重
Ｓｄ*	：	弾性設計用地震動Ｓｄにより定まる地震力又は静的地震力
Ｓｓ	：	基準地震動Ｓｓにより定まる地震力

注記　＊1 ：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

＊2 ：炉心支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

＊3 ：ＶＡＳとして，ⅣＡＳの許容限界を用いる。

＊4 ：「Ｐ＋Ｄ＋Ｓｓ」の評価に包絡されるため，評価結果の記載を省略する。

注：許容応力状態ＶＡＳにおける荷重の組合せで，重大事故後の状態における圧力荷重ＰＳＡＬ及びＰＳＡＬＬは，設計基準対象施設で想定される圧力と比べて小さいため，許容応力状態ＶＡＳにおける荷重の組合せによる評価は，設計基準対象施設の評価に包絡される。

表 3－5(1)　原子炉圧力容器内部構造物用材料の許容応力

（単位：MPa）

応　力　分　類		一次一般膜応力（P_m）		
供用状態（許容応力状態）		$Ⅲ_AS$	$Ⅳ_AS$	E
温　　度（℃）				
オーステナイト系ステンレス鋼	SUS304 SUS304TP SUSF304	172	260	260
	SUS304LTP	145	232	232
許容応力の算出式		1.5・S_m	Min (2.4・S_m, 2/3・S_u)	Min (2.4・S_m, 2/3・S_u)

表 3－5(2)　原子炉圧力容器内部構造物用材料の許容応力

（単位：MPa）

応　力　分　類		一次一般膜＋一次曲げ応力（P_m＋P_b）		
供用状態（許容応力状態）		ⅢAS	ⅣAS	E
温　　度（℃）				
オーステナイト系ステンレス鋼	SUS304 SUS304TP SUSF304	258	391	391
	SUS304LTP	218	348	348
許容応力の算出式		2.25・S_m	Min (3.6・S_m, S_u)	Min (3.6・S_m, S_u)

表 3－5(3)　原子炉圧力容器内部構造物用材料の許容応力

（単位：MPa）

応　力　分　類		純　せ　ん　断　応　力		
供用状態（許容応力状態）		ⅢAS	ⅣAS	E
温　　度（℃）		[redacted]		
オーステナイト系ステンレス鋼	SUS304	103	137	137
許容応力の算出式		0.9・Sm	1.2・Sm	1.2・Sm

表 4－1(1)　外荷重

蒸気乾燥器外荷重

記号	荷重名称	鉛直力		水平力	
		全体に加わる荷重	最長の蒸気乾燥器ユニット列に加わる荷重	全体に加わる荷重	最長の蒸気乾燥器ユニット列に加わる荷重
		V_1 (kN)	V_2 (kN)	H_1 (kN)	H_2 (kN)
L04	死荷重				
L14	地震荷重Ｓｄ*				
L16	地震荷重Ｓｓ				

注 1

注 2

表 4－1(2)　外荷重

気水分離器及びスタンドパイプ外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	鉛直力	水平力	モーメント
			V (kN)	H (kN)	M* (kN･m)
L04	死荷重	A			
L14	地震荷重Ｓｄ*	A			
L16	地震荷重Ｓｓ	A			

注記　＊：

注：

表 4－1(3)　外荷重

シュラウドヘッド外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	鉛直力 V (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN･m)
L04	死荷重	A			
L14	地震荷重Ｓｄ*	A			
L16	地震荷重Ｓｓ	A			

注：

表 4－1(4)　外荷重

ジェットポンプ外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	軸力	せん断力	ねじりモーメント	曲げモーメント
			F_L (N)	F_S (N)	T (N･m)	M (N･m)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
L14	地震荷重Ｓｄ*	A				
		B				
		C				
L16	地震荷重Ｓｓ	A				
		B				
		C				

注記　＊：

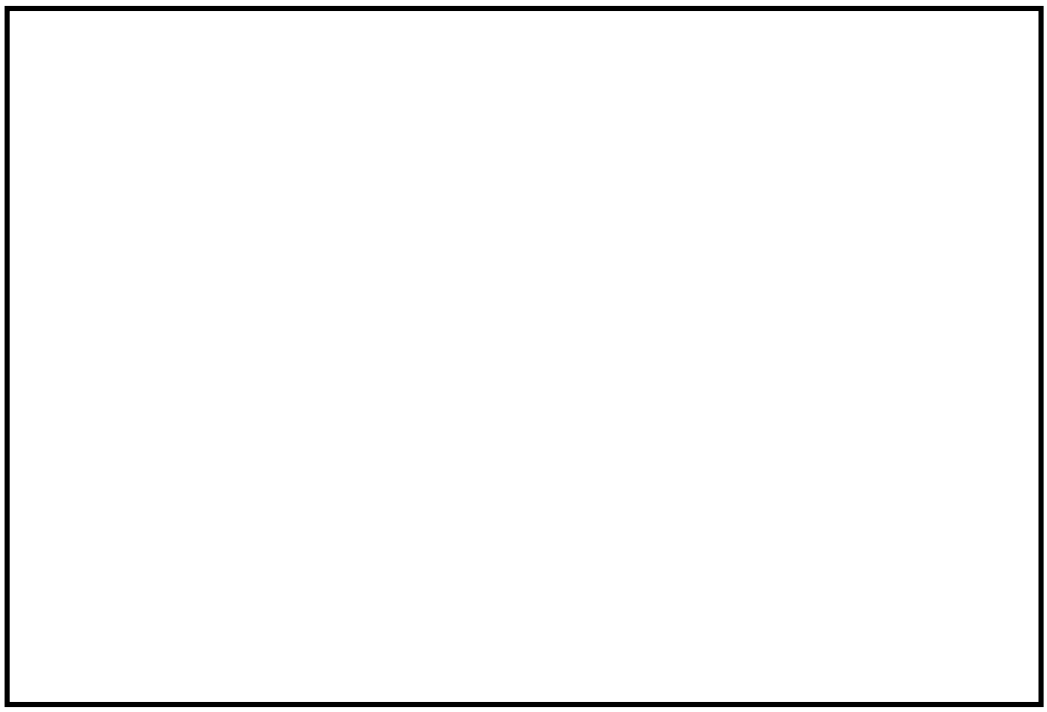


表 4－1(5)　外荷重

給水スパージャ外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	軸力	せん断力	ねじりモーメント	曲げモーメント
			F_L (N)	F_S (N)	T (N･m)	M (N･m)
L04	死荷重	A				
		B				
L14	地震荷重Ｓｄ*	A				
		B				
L16	地震荷重Ｓｓ	A				
		B				

注記　＊：

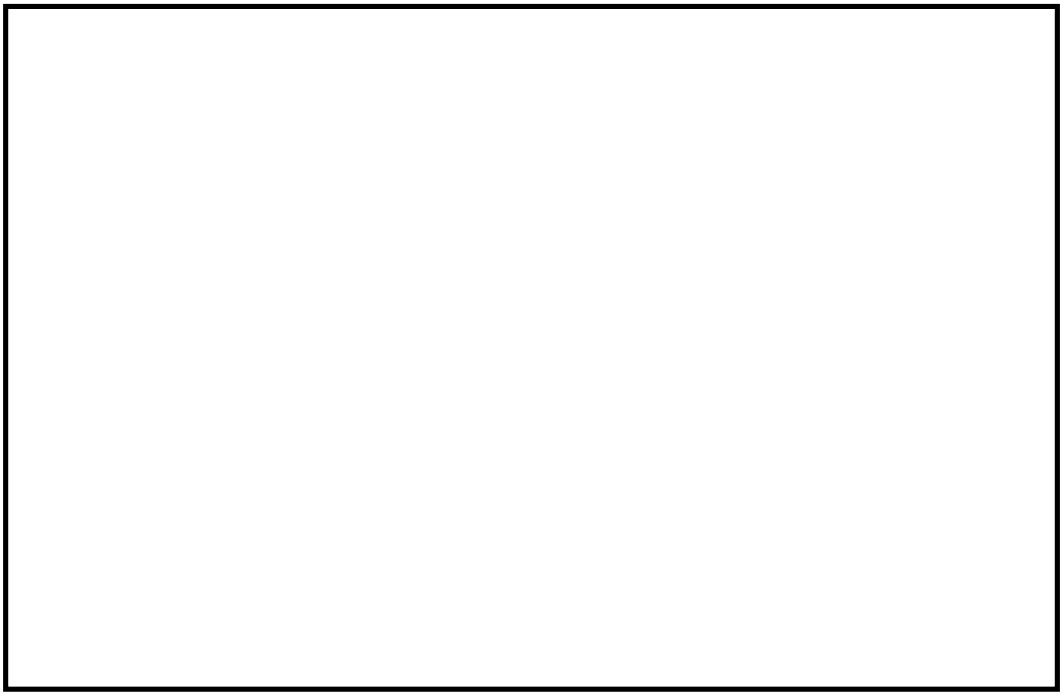


表 4－1(6)　外荷重

高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	軸力	せん断力	ねじりモーメント	曲げモーメント
			F_L (N)	F_S (N)	T (N･m)	M (N･m)
L04	死荷重	A				
		B				
L14	地震荷重Ｓｄ*	A				
		B				
L16	地震荷重Ｓｓ	A				
		B				

注記　＊

表 4－1(7)　外荷重

残留熱除去系配管外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	軸力	せん断力	ねじりモーメント	曲げモーメント
			F_L (N)	F_S (N)	T (N･m)	M (N･m)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
L14	地震荷重Ｓｄ*	A				
		B				
		C				
L16	地震荷重Ｓｓ	A				
		B				
		C				

表 4－1(8)－1　外荷重

高圧炉心スプレイ配管外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	軸力	せん断力	ねじりモーメント	曲げモーメント
			F_L (N)	F_S (N)	T (N･m)	M (N･m)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
L14	地震荷重Ｓｄ*	A				
		B				
		C				
L16	地震荷重Ｓｓ	A				
		B				
		C				

注記　＊

表 4－1(8)－2　外荷重

低圧炉心スプレイ配管外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	軸力	せん断力	ねじりモーメント	曲げモーメント
			F_L (N)	F_S (N)	T (N･m)	M (N･m)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
L14	地震荷重Ｓｄ*	A				
		B				
		C				
L16	地震荷重Ｓｓ	A				
		B				
		C				

注記　*

表 4－1(9)　外荷重

差圧検出・ほう酸水注入管外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	軸力	せん断力	ねじりモーメント	曲げモーメント
			F_L (N)	F_S (N)	T (N･mm)	M (N･mm)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
		D				
L14	地震荷重Ｓｄ*	A				
		B				
		C				
		D				
L16	地震荷重Ｓｓ	A				
		B				
		C				
		D				

注記　＊：

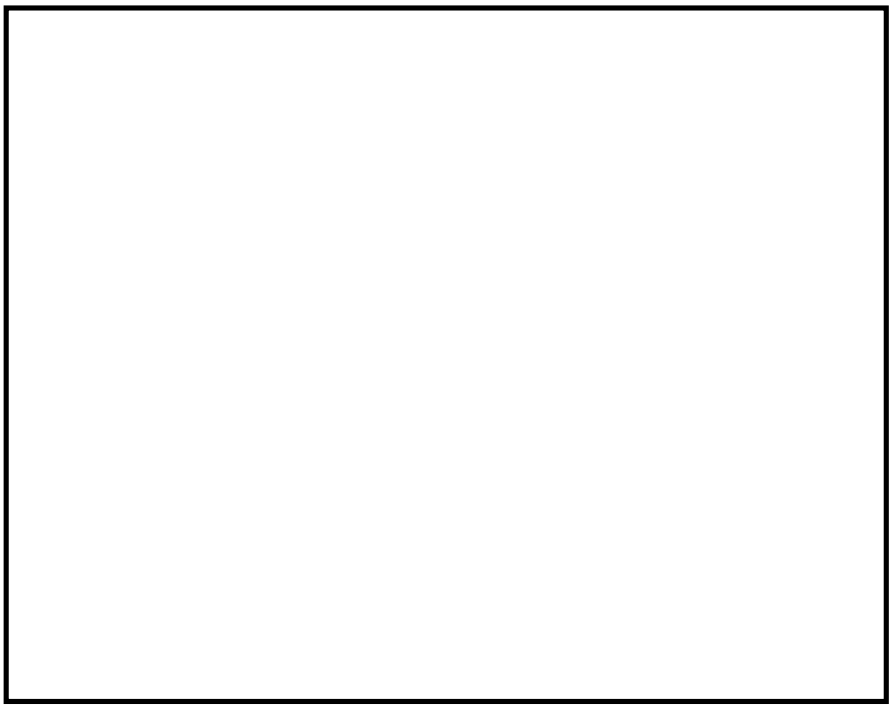


表 4－1(10)　外荷重

中性子計測案内管外荷重

記号	荷重名称	荷重作用点	軸力	せん断力	曲げモーメント
			F_L (N)	F_S (N)	M (N･m)
L04	死荷重	A			
L14	地震荷重Ｓｄ*	A			
L16	地震荷重Ｓｓ	A			

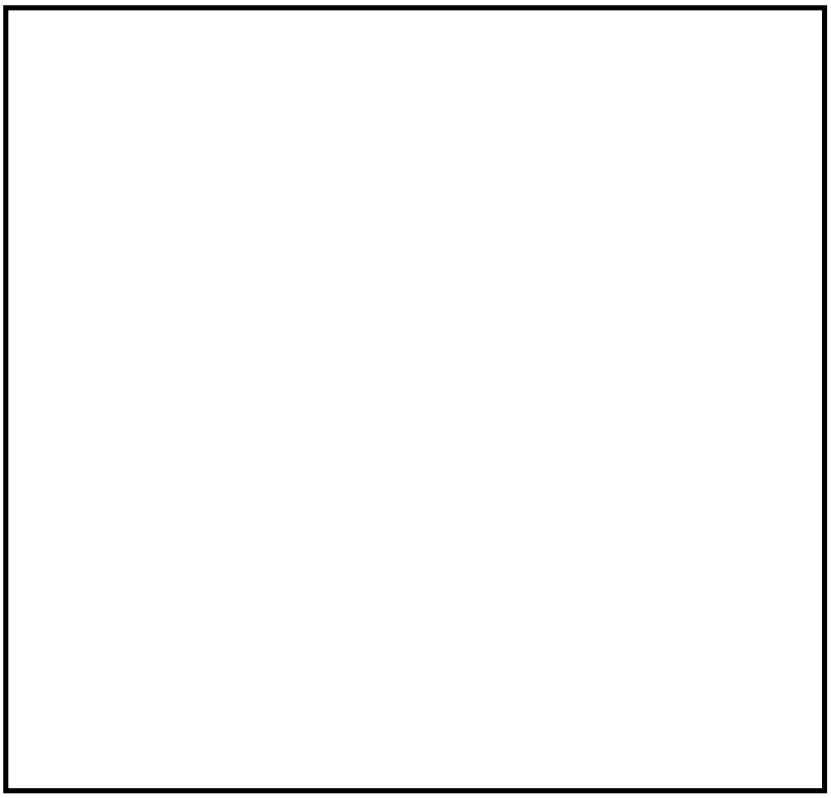


表 4－2　荷重の組合せ

条件	荷重の組合せ	応力評価
許容応力状態ⅢＡＳ	L02＋L04＋L14	P_m P_m+P_b 極限解析
許容応力状態ⅣＡＳ	L02＋L04＋L16	P_m P_m+P_b 極限解析
供用状態Ｅ	L02＋L04	P_m P_m+P_b

表 5－1　応力の分類

原子炉圧力容器 内部構造物の要素	位　　置	荷重の種類	応力の分類	
管状構造物	不連続部より遠い部分	圧力差	一般膜応力	P_m
		外荷重又はモーメント	全断面について平均した一般膜応力 曲げ応力	P_m P_b
	不連続部又はその付近	外荷重又はモーメント	全断面について平均した一般膜応力 曲げ応力	P_m P_b
平板又はさら形鏡板	中央部	圧力差	一般膜応力 曲げ応力	P_m P_b
はり，棒，板又はブラケット	全般	圧力差，外荷重又はモーメント	全断面について平均した一般膜応力 曲げ応力	P_m P_b

注：

P_m　：圧力差又は機械的荷重によって生じる膜応力であって，構造上の不連続性及び局部的形状の変化によって生じる膜応力は除く。
ただし，実際の応力評価では，応力評価面を，構造上の不連続部にとることが多いので，内径，板厚がその応力評価面での値に等しい単純な殻を仮定し，シェル理論又ははり理論を用いて計算した応力を，その応力評価面におけるP_mとする。

P_b　：外力，内力及びモーメントに対して，単純な平衡の法則を満足する曲げ応力をいう。

NT2 補③ V-2-3-4-4-1 R0E

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-857　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-9-2-3　上部シアラグ及びスタビライザの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 6
4.1 設計荷重 ····· 6
4.2 材料及び許容応力 ····· 9
5. 応力計算 ····· 11
5.1 応力評価点 ····· 11
5.2 計算方針 ····· 12
6. 評価結果 ····· 26

1. 概要

本計算書は，添付書類「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，上部シアラグ及びスタビライザが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は上部シアラグ及びスタビライザの地震応答解析，応力評価により行う。

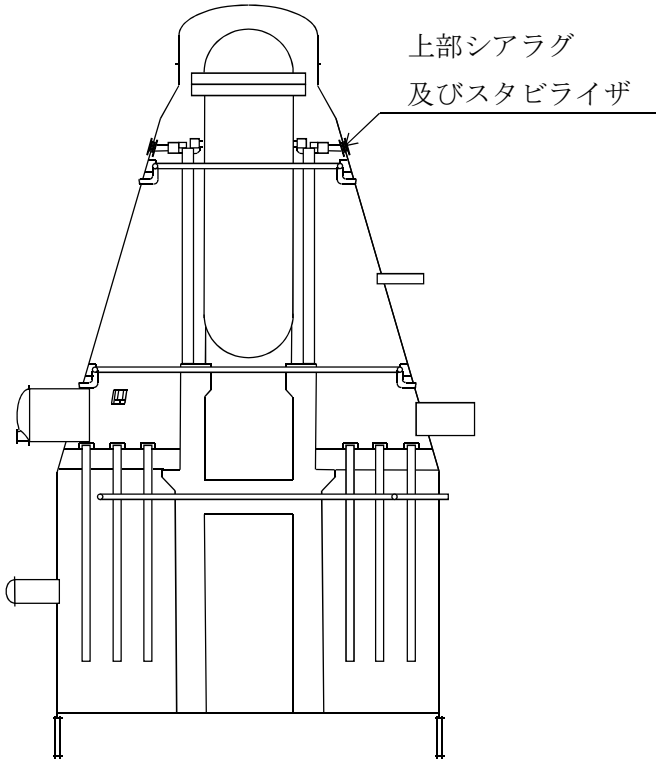
上部シアラグ及びスタビライザは設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に分類され，以下，基準地震動の策定に伴う耐震評価を行う。

2.　構造説明

2.1　構造計画

上部シアラグ及びスタビライザの構造計画を表 2－1 に示す。

表 2－1　構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
・メイルシアラグは原子炉格納容器胴に溶接され,フィメイルシアラグは原子炉建屋にアンカーボルトで固定される。	・ドライウェルの水平地震力をシアラグにより,原子炉建屋に伝達する。	

2.2　評価方針

(1)　上部シアラグ及びスタビライザの応力評価は，東海第二発電所　昭和 48 年 4 月 9 日付け 47 公第 12076 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。各荷重による応力は，実績のある三次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，「V-5-1　計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3. 形状及び主要寸法

原子炉格納容器の上部シアラグ及びスタビライザの形状及び主要寸法を図3－1及び図3－2に示す。

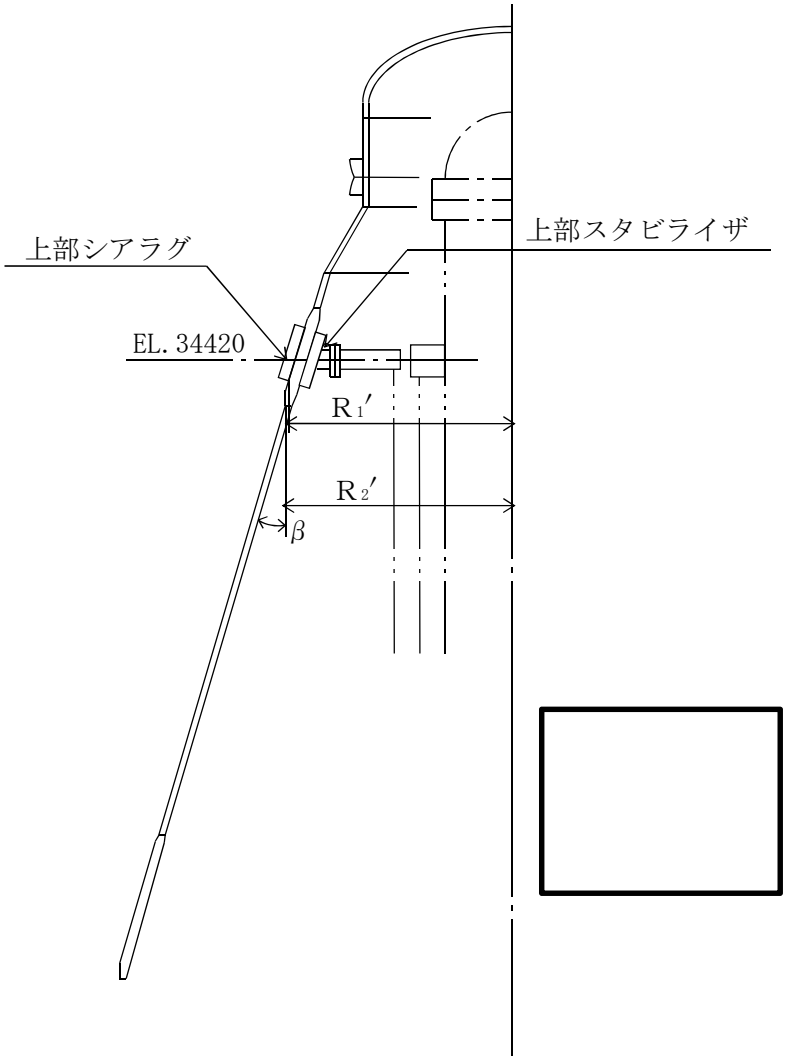


図3－1　上部シアラグ及びスタビライザの形状及び主要寸法（単位：mm）

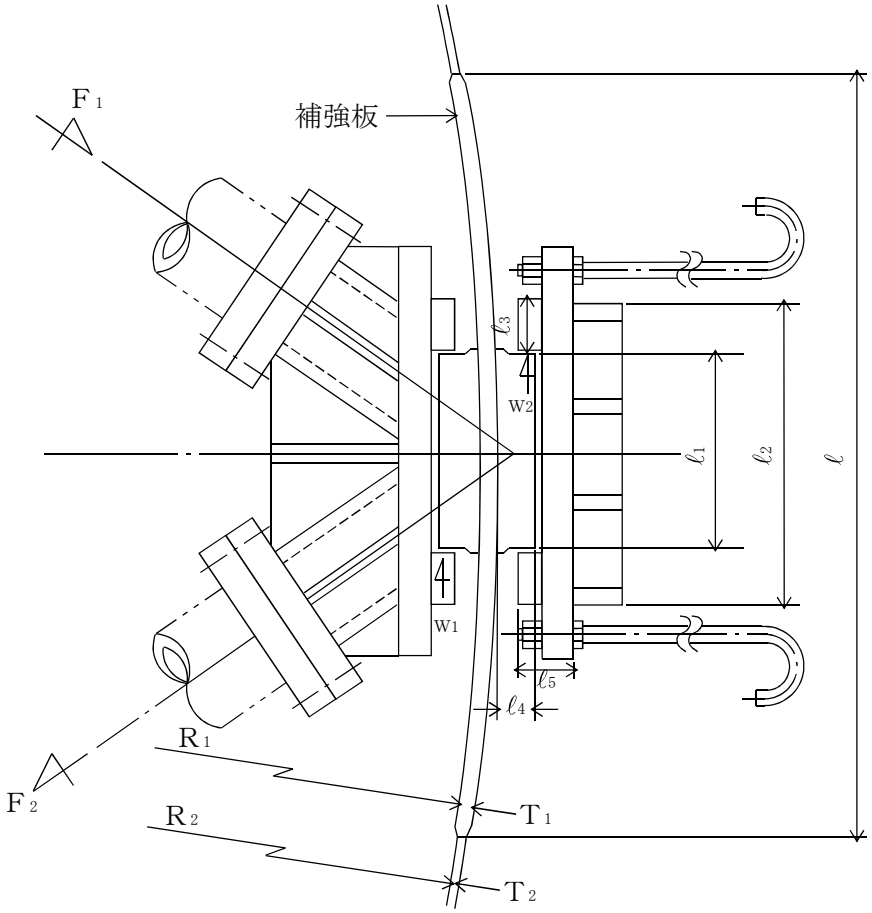


図 3－2　上部シアラグ及びスタビライザの形状及び主要寸法（単位：mm）

4.　設計条件

4.1　設計荷重

(1)　設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧 P_D　　310 kPa

外圧 P_{DO}　　14 kPa

温度 T_D　　171 ℃

(2)　冷却材喪失事故後の最大内圧 P_{DBA}　255 kPa

(3)　地震荷重

a.　圧力容器本体及び原子炉遮蔽壁からの地震荷重

上部シアラグ及びスタビライザと水平荷重の作用方向の関係を図 4－1 に示し，圧力容器本体及び原子炉遮蔽壁からの水平方向地震荷重を表 4－1 に示す。

ここに，

θ : [redacted]

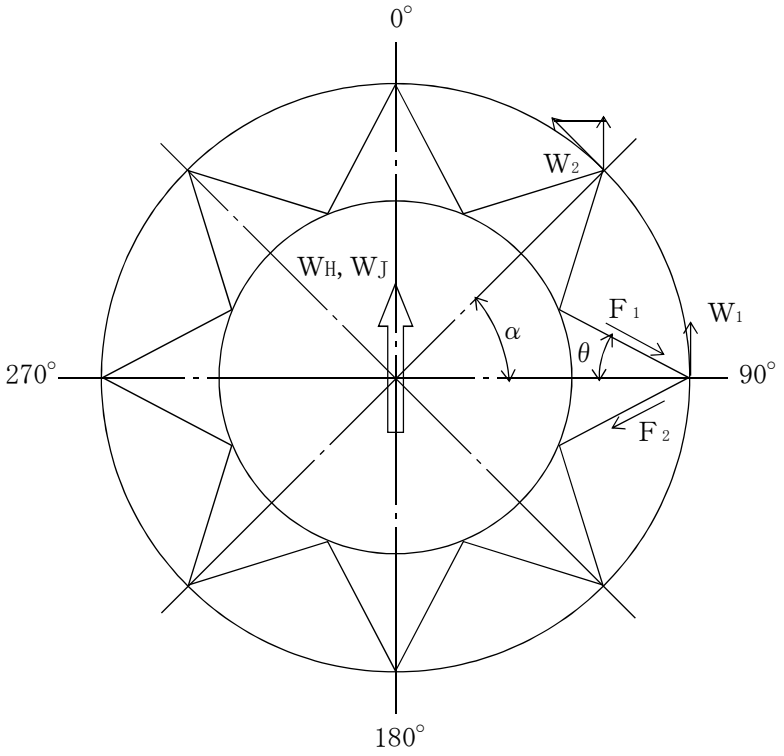


図 4－1　荷重の分配

表 4－1　圧力容器本体及び原子炉遮蔽壁からの水平方向地震荷重

（単位：N）

地震荷重	Sd*	Ss
水平方向地震荷重W_{HI}		
$W_{1SI}=\frac{1}{4}W_{HI}$		
$F_{1SI}=\frac{W_{1SI}}{2\times\sin\theta}$		

b.　格納容器及び原子炉建屋からの地震荷重

格納容器及び原子炉建屋からの地震荷重を表 4－2 に示す。

表 4－2　水平方向地震荷重

（単位：N）

地震荷重	Sd*	Ss
水平方向地震荷重W_{HO}		
$W_{1SO}=\frac{1}{4}W_{HO}$		
$F_{1SO}=\frac{W_{1SO}}{2\times\sin\theta}$		

(4)　設計荷重

応力計算は上部シアラグ及びスタビライザに分けて行なう。荷重は水平地震荷重を考える。格納容器内部にある部材は圧力容器本体及び原子炉遮蔽壁から水平地震荷重，外側にある部材は原子炉建屋からの水平地震荷重がそれぞれの部材の重心に加わるものとする。安全側の計算として，内側，外側の荷重が同時に加わるものとするならば，1 組当りのシアラグ及びスタビライザに加わる設計荷重は 4.1(3)，(4)項より表 4－3 に示すように与えられる。

表 4－3　シアラグ及びスタビライザに加わる設計荷重

荷重条件 / 部材	$D+P_D+M_D+Ss$	$D+P_D+M_D+Sd^*$
シアラグ		
スタビライザ		

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

ドライウェル円錐部シェル　(SGV480 相当)

メイルシアラグ　(SGV480 相当)

フィメイルシアラグ　(SGV480 相当)

スタビライザ

　ウェブ　(SGV480 相当)

　フランジ　(SGV480 相当)

アンカーボルト　SCM435

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4－4 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力を表 4－5 及び表 4－6 に示す。

表4－4　荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
－		上部シアラグ	S	－	D＋P_D＋M_D＋Sd*	ⅢAS
					D＋P_D＋M_D＋Ss	ⅣAS
原子炉本体	原子炉圧力容器付属構造物	原子炉格納容器スタビライザ	S	－	D＋P_D＋M_D＋Sd*	ⅢAS
					D＋P_D＋M_D＋Ss	ⅣAS
原子炉格納施設	原子炉格納容器	上部シアラグと格納容器胴との接合部	S	クラスＭＣ容器	D＋P＋M＋Sd*	ⅢAS
					D＋P＋M＋Ss	ⅣAS
					D＋P_L＋M_L＋Sd*	ⅣAS

表4－5　上部シアラグ取付部の許容応力

（単位：MPa）

材料	許容応力状態	許容応力		
		一次応力		一次＋二次応力
		P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]	ⅢAS	－	344	393
（SGV480 相当）	ⅣAS	－	380	393

表4－6　上部シアラグ及びスタビライザの許容応力

（単位：MPa）

材料	許容応力状態	基準応力 F	許容応力（一次応力）			
			引張り f_t	曲げ f_b	せん断 f_s	組合せ f_t
[redacted]（SGV480 相当）	ⅢAS	229	229	229 (264)＊	132	229
	ⅣAS	275	275	275 (317)＊	158	275
SCM435	ⅢAS	592	444	－	342	－
	ⅣAS	592	444	－	342	－

注記　＊：（　）内の値は，面外に曲げを受ける板の許容応力を示す。

5. 応力計算

5.1 応力評価点

上部シアラグ及びスタビライザの形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表5－1に示す。

表5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ１	メイルシアラグ
Ｐ２	フィメイルシアラグ
Ｐ３	アンカーボルト
Ｐ４	ベースプレート
Ｐ５	シアプレート
Ｐ６	上部スタビライザウェブ
Ｐ７	フランジとウェブの取付部
Ｐ８	上部シアラグと格納容器胴との接合部

5.2　計算方針

5.2.1　上部シアラグ

(1)　メイルシアラグ

a.　寸法

メイルシアラグの寸法を図 5－1 に示す。

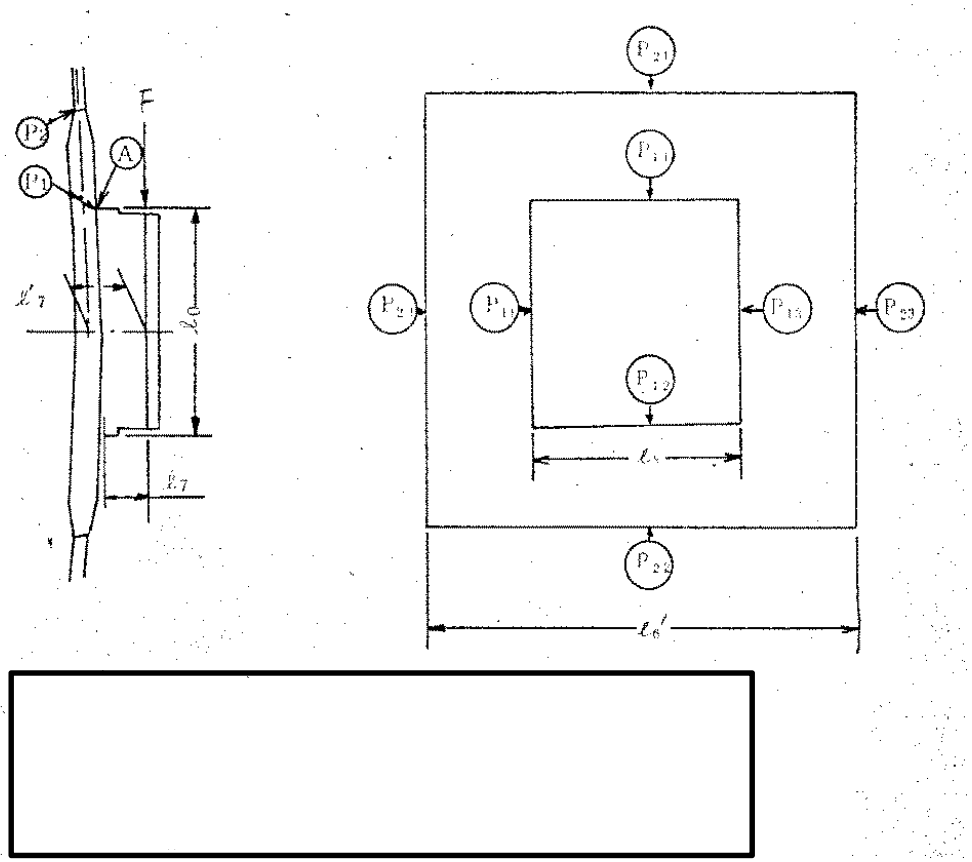


図 5－1　メイルシアラグ（単位：mm）

b.　せん断力及び曲げモーメント

メイルシアラグのせん断力及び曲げモーメントの荷重計算を表 5－2 に示す。

表 5－2　メイルシアラグの荷重計算

荷重 / 荷重の組合せ	Ⓐ部せん断力 F (N)	Ⓐ部曲げモーメント Mc (N･mm)
D＋P_D＋M_D＋Ss	F＝W＝	$M_c = F \cdot \ell_7$ ＝
D＋P_D＋M_D＋Sd*	F＝W＝	$M_c = F \cdot \ell_7$ ＝

c.　Ⓐ部の応力

(a)　断面の形状

Ⓐ部の断面の形状及び寸法は図 5－2 に示すような溶接部の断面である。

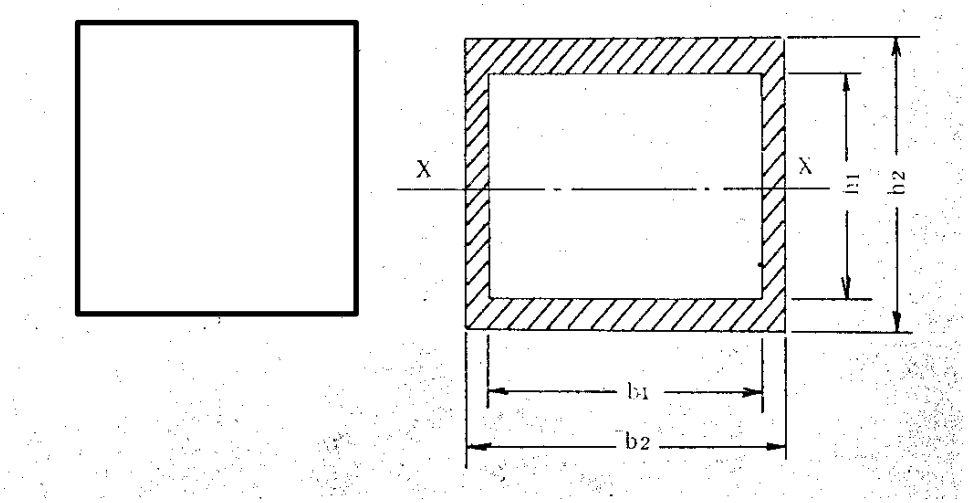


図 5－2　Ⓐ溶接部の断面（単位：mm）

(b)　せん断応力

$$\tau = \frac{F}{A_w}$$

ここに,

A_w：断面積＝

(c)　曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここに,

Z ：X－X軸に関する断面係数＝3.16×10^{7} mm^3

(d)　組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^{2} + 3\tau^{2}}$$

(2)　フィメイルシアラグ

a.　寸法

フィメイルシアラグの寸法を図 5－3 に示す。

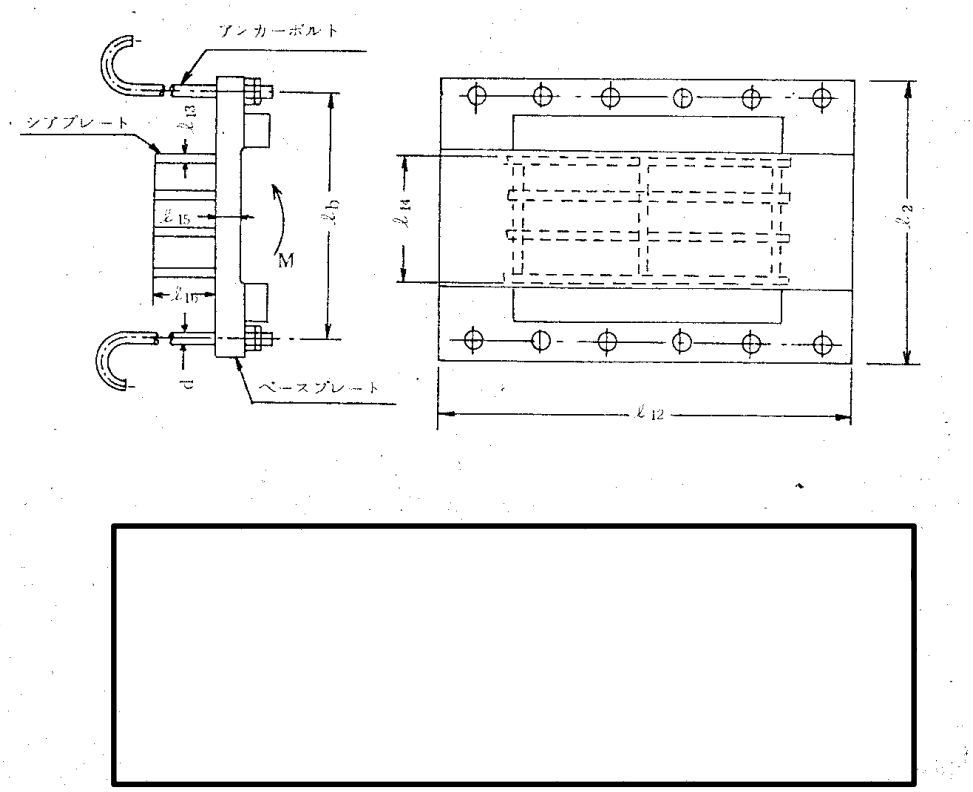


図 5－3　フィメイルシアラグ（単位：mm）

b.　せん断力及び曲げモーメント

フィメイルシアラグのせん断力及び曲げモーメントの荷重計算を表 5－3 に示す。

表 5－3　フィメイルシアラグの荷重計算

荷重 / 荷重の組合せ	Ⓑ部せん断力 F (N)	Ⓑ部曲げモーメント M(N･mm)
D＋P_D＋M_D＋Ss	F＝W＝	M＝F・ℓ_9 ＝
D＋P_D＋M_D＋Sd*	F＝W＝	M＝F・ℓ_9 ＝

c.　Ⓑ部の応力

(a)　断面の形状

点Ｂの断面の形状及び寸法は図 5－4 に示すように溶接部の断面である。

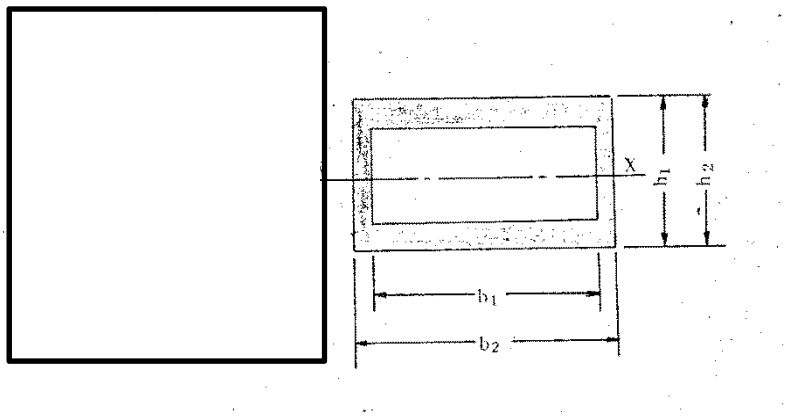


図 5－4　点Ｂの溶接部の断面（単位：mm）

(b)　せん断応力

$$\tau = \frac{F}{A_w}$$

ここに,

A_w：断面積＝

NT2 補③ V-2-9-2-3 R0

(c)　曲げ応力

$$\sigma_c = \frac{M}{Z}$$

ここに,

Z ：X－X軸に関する断面係数＝6.52×10^6 mm^3

(d)　組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_c^2 + 3\tau^2}$$

(3)　ベースプレート及びアンカーボルト

a.　寸法

ベースプレート及びアンカーボルトの形状及び寸法を図 5－5 に示す。

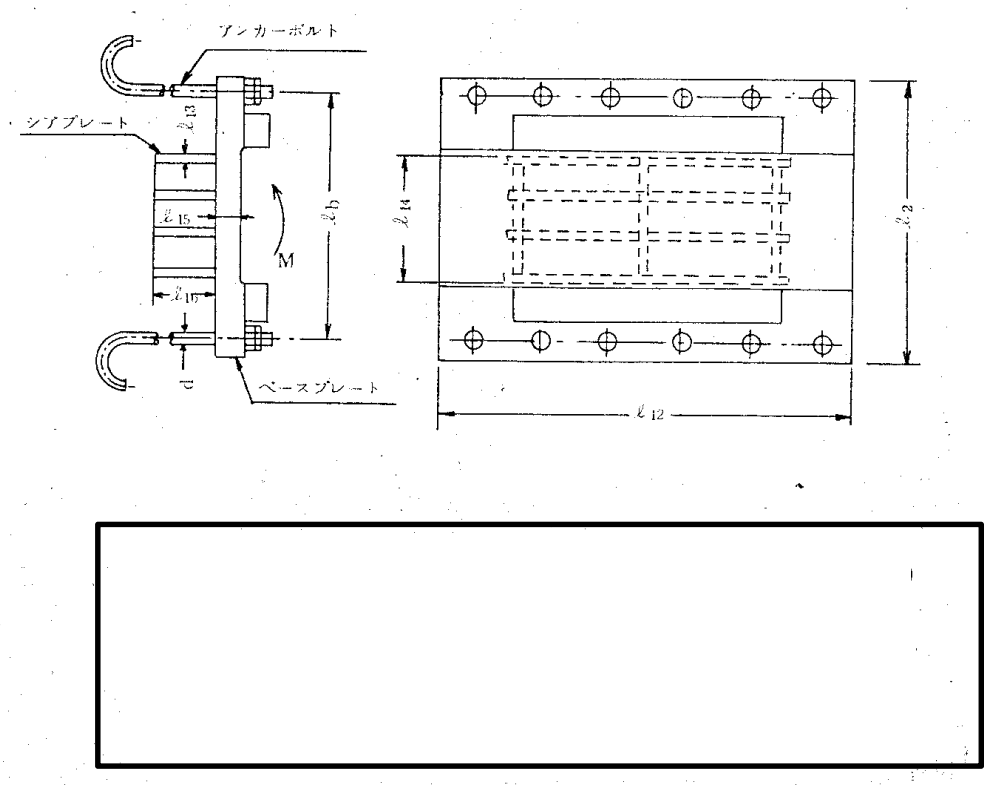


図 5－5　ベースプレート及びアンカープレート（単位：mm）

b.　せん断力及び曲げモーメント

5.2.1(2)b.表 5－3 より求めたベースプレート及びアンカープレートに加わる荷重を表 5－4 に示す。

表 5－4　ベースプレート及びアンカープレートに加わる荷重

荷重の組合せ ＼ 荷重	せん断力 F (N)	曲げモーメント M(N･mm)
D＋P_D＋M_D＋Ss		
D＋P_D＋M_D＋Sd*		

c.　アンカーボルトの応力

(a)　計算上の仮定

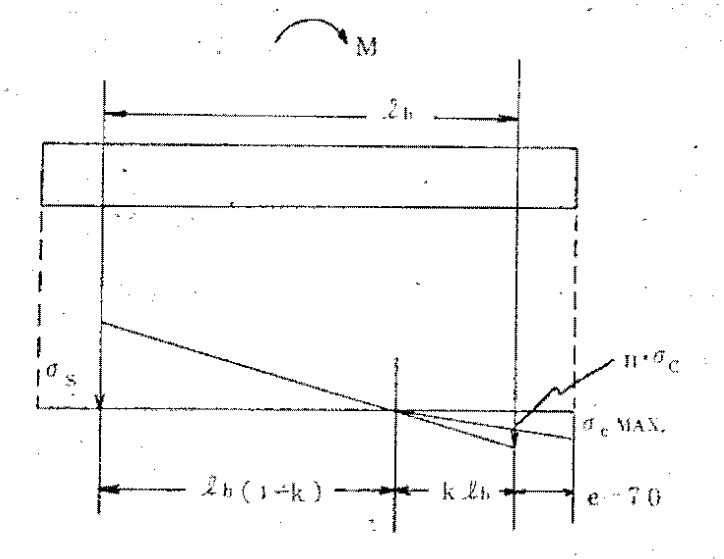
イ.　アンカーボルトを鉄筋とするベースプレートの形状の断面をもつ鉄筋コンクリート柱として計算する。

ロ.　シアプレート付アンカーとしての働きはもたないものとする。

(b)　計算方法

文献「S.P.Timoshenko：Strength of Materials Part.1,D Van Nostrand Co.Inc.(1955)」の ChapterⅦ(48)と同様な方法で計算を行なう。

(c)　コンクリートの支圧応力及びアンカーボルトの引張応力



上図の計算モデルより力の釣合いとモーメントとの釣合いからボルト引張応力σ_s及びボルトの下のコンクリート圧縮応力σ_cを求める。

・力の釣合い

$$6 \cdot A_b \cdot \sigma_s - 6 \cdot A_b \cdot (n \cdot \sigma_c) - \frac{1}{2} \cdot A_c \cdot \sigma_{cmax} = 0$$

・モーメントの釣合い

$$M - 6 \cdot A_b \cdot \sigma_s \cdot (1 - k) \cdot \ell_b - 6 \cdot A_b \cdot n \cdot \sigma_c \cdot k \cdot \ell_b - \frac{1}{2} \cdot \sigma_{cmax} \cdot A_c \cdot \frac{2}{3} \cdot (k \cdot \ell_b + 70) = 0$$

ここに,

M ：最大曲げモーメント

W_d ：最大圧縮荷重

σ_{cmax}：コンクリートの最大圧縮応力$= \dfrac{(k \cdot \ell_b + e)}{k \cdot \ell_b}$

k ：係数$= 1 / (1 + \sigma_s / n \cdot \sigma_c)$

E_s ：ボルトの縦弾性係数

E_c ：コンクリートの縦弾性係数

n ：$E_s / E_c =$ [redacted]

A_b ：ボルト１本分最小断面積＝ [redacted]

A_c ：圧縮側ベースプレート面積$= (k \cdot \ell_b + e) \cdot \ell_{12}$

(d) アンカーボルトのせん断応力

イ. せん断力

$$F_s = \frac{N_b \cdot d}{N_b \cdot d + N_P \cdot \ell_{17}} \cdot F$$

ここに,

N_b：アンカーボルト数＝ [redacted]

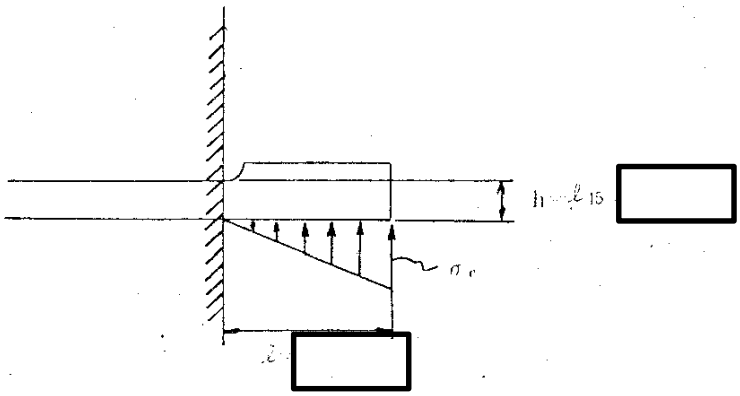
N_P：シアプレート数＝ [redacted]

ロ. せん断応力

$$\tau = \frac{F_s}{N_b \cdot A_b}$$

d. ベースプレートの曲げ応力

ベースプレートにはモーメントによる反力がシアプレートによって区分された長方形板に加わるものとする。



ベースプレート応力計算モデル

(a) 固定点の曲げモーメント

$$M=\frac{1}{3}\cdot\sigma_c\cdot\ell^2$$

(b) 曲げ応力

$$\sigma_b=\frac{M}{Z}$$

ここに,

Z ：断面係数＝

e. シアプレート

ベースプレートに加わるせん断力はアンカーボルトとシアプレートに分配されるものとする。

また，ベースプレートとシアプレートの溶接部の脚長はシアプレートの厚さ（ℓ_{13}）より大きいので以下の計算はシアプレートの厚さの断面をもつ梁として行う。

(a) 寸法

シアプレートの寸法を図 5－6 に示す。

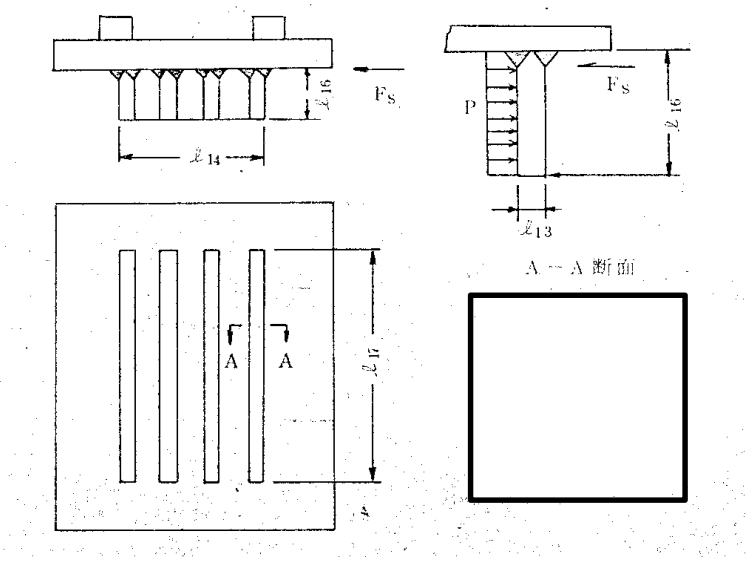


図 5－6　シアプレート（単位：mm）

(b)　せん断力及び曲げモーメント

イ．　せん断力

$$F_s = F' / N_P$$

ここに,

$$F' = \frac{N_P \cdot \ell_{17}}{N_b \cdot d + N_P \cdot \ell_{17}} \cdot F$$

ロ．　曲げモーメント

$$M = \frac{F_s \cdot \ell_{16}}{2}$$

(c)　シアプレートの応力

イ．　せん断応力

$$\tau = \frac{F_s}{A}$$

ここに,

$A =$ [redacted]

ロ．　曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここに,

$Z =$ [redacted]

ハ．　組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2}$$

5.2.2　上部スタビライザ

(1)　ウェブ

a.　寸法

ウェブの寸法を図 5－7 に示す。

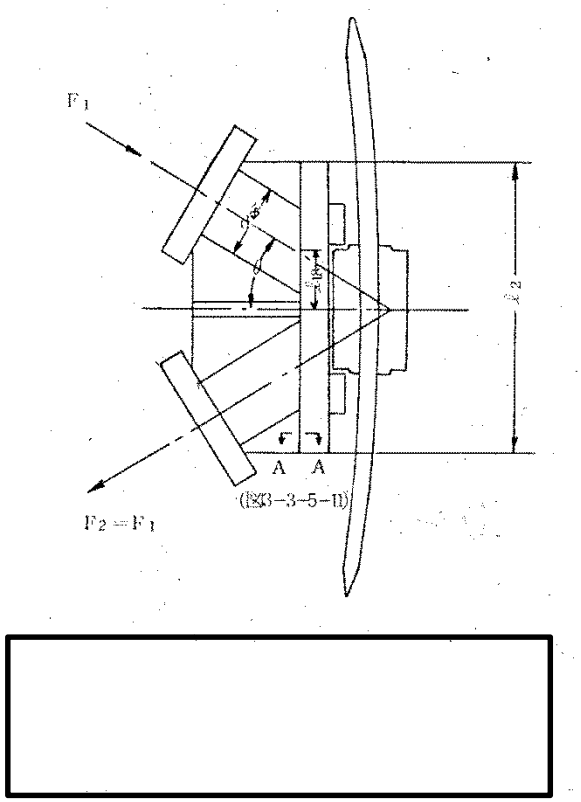


図 5－7　ウェブの寸法（単位：mm）

b.　せん断力及び曲げモーメント

ウェブのせん断力及び曲げモーメントの荷重計算を表 5－5 に示す。

NT2 補③ V-2-9-2-3 R0

表 5－5　ウェブの荷重計算

荷重 / 荷重の組合せ	せん断力 F (N)	曲げモーメント M(N･mm)
D＋P_D＋M_D＋Ss	$F=2F_1\sin\theta$ ＝	$M=2F_1\cos\theta \cdot \ell_{18}$ ＝
D＋P_D＋M_D＋Sd*	$F=2F_1\sin\theta$ ＝	$M=2F_1\cos\theta \cdot \ell_{18}$ ＝

c.　断面の形状

断面の形状は溶接部の幅がウェブの板厚に比べて大きくなるので最小厚さはウェブの板厚の 60 ㎜とする。ウェブに取付けられたパイプのドライウェル壁に取付けられた断面積は$\frac{\pi}{4}\times$ ㎜^{2}と仮定した。

d.　ウェブの応力

(a)　せん断力

$$\tau=\frac{F}{A}$$

ここに,

A：断面積＝

(b)　曲げ応力

$$\sigma_b=\frac{M}{Z}$$

ここに,

Z：断面係数＝

(c)　組合せ応力

$$\sigma=\sqrt{\sigma_b^2+3\tau^2}$$

(2)　フランジとウェブの取付部

a.　寸法

フランジとウェブの取付部の寸法を図 5－8 に示す。

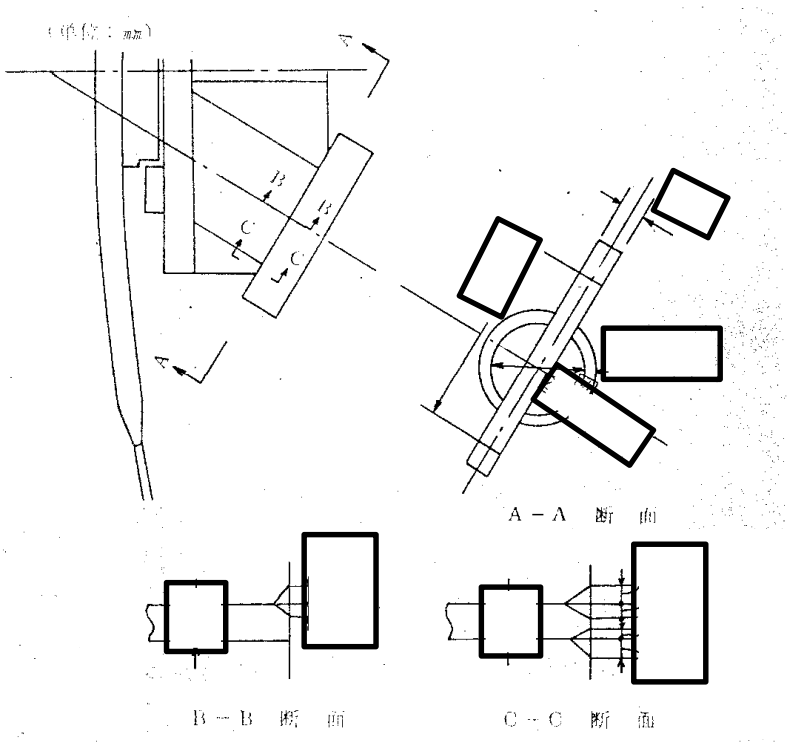


図 5－8　フランジとウェブの取付部（単位：mm）

b.　引張力

5.2.2(1)b.表 5－5 より求めたフランジとウェブの取付部に加わる荷重を表 5－6 に示す。

表 5－6　フランジとウェブの取付部に加わる荷重

荷重 荷重の組合せ	引張力 F_1 (N)
D＋P_D＋M_D＋Ss	F_1＝
D＋P_D＋M_D＋Sd*	$_1$＝

c. フランジとウェブの取付部の応力

(a) 引張応力

$$\sigma_t = \frac{F_1}{A}$$

ここに,

A：断面積＝

(b) 組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2}$$

5.2.3　上部シアラグと格納容器胴との接合部

各荷重により上部シアラグと格納容器胴との接合部に生じる応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。上部シアラグと格納容器胴との接合部の計算モデルを図５－９に示す。

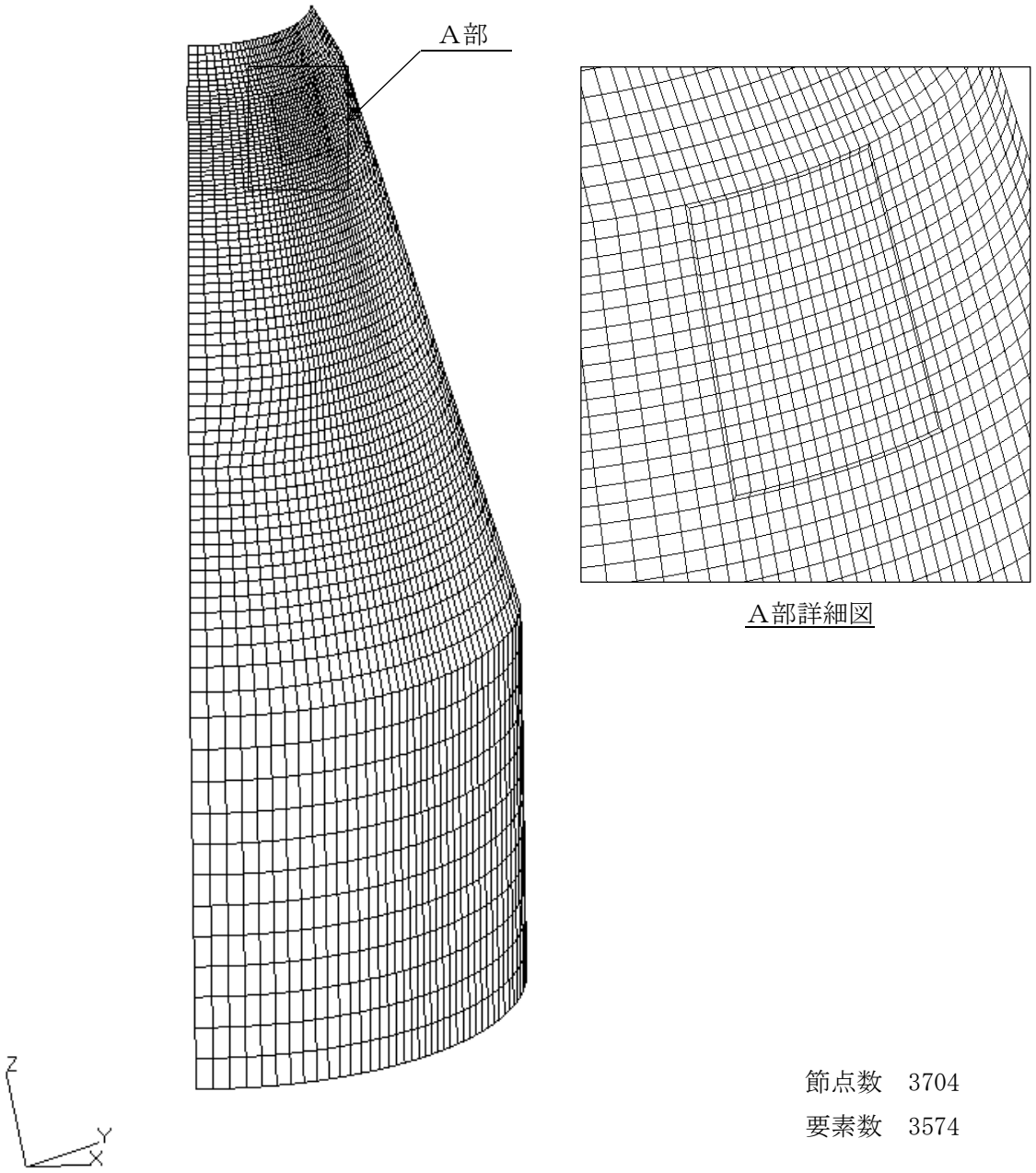


図５－９　計算モデル

6. 評価結果

上部シアラグ及びスタビライザの耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果を表6－1に示す。

表4－4に示す荷重の組合せのうち，D＋P＋M＋$\mathrm{S_s}$及びD＋$\mathrm{P_L}$＋$\mathrm{M_L}$＋$\mathrm{S_d^*}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2) 許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する応力評価結果を表6－2に示す。

表4－4に示す荷重の組合せのうち，D＋P＋M＋$\mathrm{S_d^*}$の評価について記載している。

表６－１　許容応力状態ⅣASに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓs 又はＤ＋PL＋ML＋Ｓd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
上部シアラグ及びスタビライザ	Ｐ１	メイルシアラグ	曲げ応力	27	275	○	
			せん断応力	68	158	○	
			組合せ応力	121	275	○	
	Ｐ２	フィメイルシアラグ	曲げ応力	65	275	○	
			せん断応力	75	158	○	
			組合せ応力	146	275	○	
	Ｐ３	アンカーボルト	引張応力	78	444	○	
			せん断応力	65	342	○	
	Ｐ４	ベースプレート	曲げ応力	10	317	○	
	Ｐ５	シアプレート	曲げ応力	254	317	○	
			せん断応力	29	158	○	
			組合せ応力	259	275	○	
	Ｐ６	ウェブ	曲げ応力	193	275	○	
			せん断応力	75	158	○	
			組合せ応力	233	275	○	
	Ｐ７	フランジとウェブの取付部	引張応力	155	275	○	
	Ｐ８	上部シアラグと格納容器胴との接合部	膜応力＋曲げ応力	144	380	○	
			一次＋二次応力	982	393	×*	
			疲労評価	0.834	1	○	

注記　＊：Ｐ８の一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005）PVB-3300 に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

表６－２　許容応力状態ⅢASに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
上部シアラグ及びスタビライザ	Ｐ１	メイルシアラグ	曲げ応力	22	229	○	
			せん断応力	54	132	○	
			組合せ応力	96	229	○	
	Ｐ２	フィメイルシアラグ	曲げ応力	52	229	○	
			せん断応力	60	132	○	
			組合せ応力	117	229	○	
	Ｐ３	アンカーボルト	引張応力	62	444	○	
			せん断応力	52	342	○	
	Ｐ４	ベースプレート	曲げ応力	8	264	○	
	Ｐ５	シアプレート	曲げ応力	205	264	○	
			せん断応力	23	132	○	
			組合せ応力	209	229	○	
	Ｐ６	ウェブ	曲げ応力	154	229	○	
			せん断応力	60	132	○	
			組合せ応力	186	229	○	
	Ｐ７	フランジとウェブの取付部	引張応力	124	229	○	
	Ｐ８	上部シアラグと格納容器胴との接合部	膜応力＋曲げ応力	96	344	○	
			一次＋二次応力	750	393	×*	
			疲労評価	0.326	1	○	

注記　＊：Ｐ８の一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005）PVB-3300 に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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- 778　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-3-4-3-1　原子炉圧力容器スタビライザの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 7
5. 応力計算 ····· 8
5.1 応力評価点 ····· 8
5.2 応力計算方法 ····· 9
6. 評価結果 ····· 10

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の検討方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，原子炉圧力容器スタビライザが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は原子炉圧力容器スタビライザの応力評価により行う。

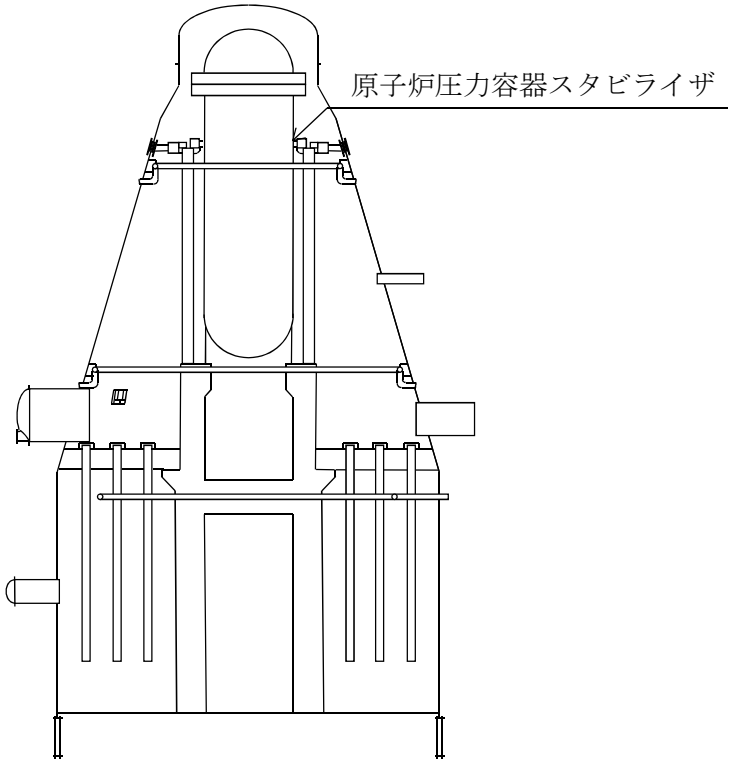
原子炉圧力容器スタビライザは設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に分類され，以下，基準地震動の策定に伴う耐震評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

原子炉圧力容器スタビライザの構造計画を表2－1に示す。

表2－1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
原子炉遮蔽壁に設置されたベースプレート上に溶接される。	原子炉圧力容器外周に□等間隔に配置されている。	

2.2　評価方針

原子炉圧力容器スタビライザの応力評価は，東海第二発電所　昭和 50 年 10 月 6 日付け 50 資庁第 8314 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。

3. 形状及び主要寸法

原子炉圧力容器スタビライザの形状及び主要寸法を図 3－1 に示す。

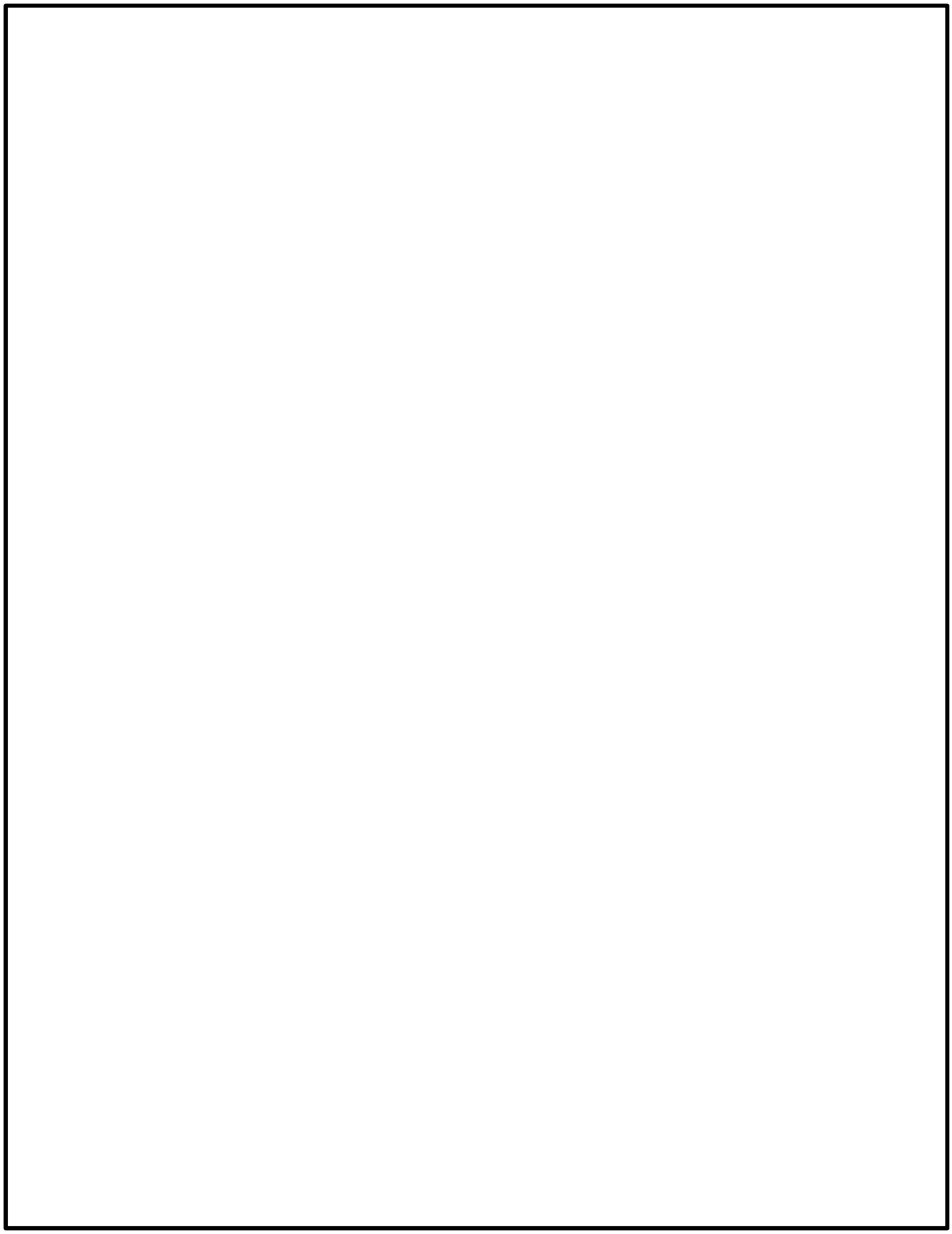


図 3－1　原子炉圧力容器スタビライザの形状及び主要寸法（単位：mm）

4.　設計条件

4.1　設計荷重

(1)　最高使用温度

温度T_D　　302 ℃

(2)　スタビライザ初期締付荷重

$F_o=1.69\times10^6$ N

(3)　地震荷重

スタビライザに加わる地震荷重を表 4－1 に示す。

また，スタビライザ各部における初期締め付け荷重と外力との力の釣合関係は図 4－1 に示すようになる。

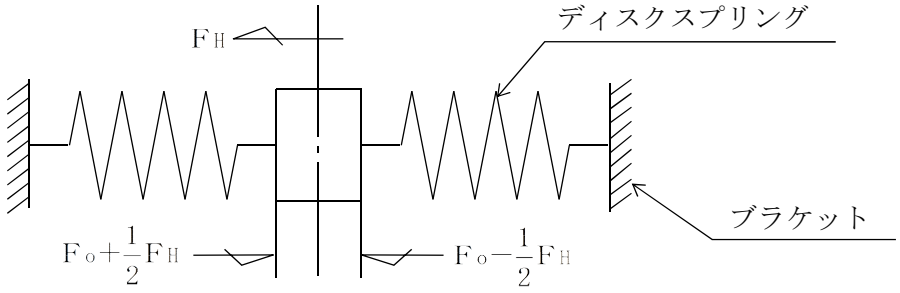


図 4－1　スタビライザに加わる荷重

表 4－1　弾性設計用地震動Ｓｄ又は静的地震力及び基準地震動Ｓｓによる水平方向地震荷重

（単位：N）

地震荷重	Ｓｄ*	Ｓｓ
水平方向地震荷重W_H		

(4)　スタビライザ各部に加わる荷重

a.　スタビライザブラケットに加わる荷重

$$F_H=\frac{1}{4}\cdot W_H$$

b.　ロッドに加わる荷重

構造上ロッドには初期締付荷重による引張荷重と水平荷重の 1/2 が加わる。

$$W_R=F_o+\frac{1}{2}\cdot F_H$$

c.　スプリング支持板に加わる荷重

構造上スプリング支持板には最大で次の荷重が加わる。

$$W_A=F_o+\frac{1}{2}\cdot F_H$$

荷重の計算結果を表 4－2 に示す。

NT2 補③ V-2-3-4-3-1 R0

表 4－2　スタビライザ各部に加わる設計荷重

（単位：N）

設計荷重	Ｓｄ*	Ｓｓ
スタビライザブラケットに加わる荷重F_H		
ロッドに加わる荷重W_R		
スプリング支持板に加わる荷重W_A		

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

ロッド　　SNCM439

ブラケット　　SM400A

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4－3 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力を表 4－4 に示す。

表4－3　荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉本体	原子炉圧力容器付属構造物	原子炉圧力容器スタビライザ	S	－	$D+P_D+M_D+S_d^*$	ⅢAS
					$D+P_D+M_D+S_s$	ⅣAS

表4－4　許容応力

（単位：MPa）

材料	許容応力状態	基準応力 F	許容応力（一次応力）			
			引張り f_t	曲げ f_b	せん断 f_s	組合せ f_t
SNCM439	ⅢAS	587	440	－	－	－
	ⅣAS	587	440	－	－	－
SM400A	ⅢAS	149	－	172	86	149
	ⅣAS	179	－	207	103	179

5. 応力計算

5.1 応力評価点

応力評価点を表5－1に示す。

表5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ１	ロッド
Ｐ２	スプリング支持板

5.2　応力計算方法

(1)　ロッド（応力評価点Ｐ１）

①点における引張応力

$$\sigma_t = \frac{W_R}{A}$$

ここで,

$A = 6.86 \times 10^3$ mm^2

(2)　スプリング支持板（応力評価点Ｐ２）

a.　曲げ応力

①，②点における曲げ応力

$$\sigma ① = \frac{6M①}{\ell_4 \cdot \ell_7^2}$$

$$\sigma ② = \frac{6M②}{\ell_2 \cdot \ell_7^2}$$

ここで,

$M① = \gamma ① \cdot q \cdot \ell_2^2$

$M② = \delta ② \cdot q \cdot \ell_2^2$

$\gamma ① = -0.0818$

$\delta ② = -0.0567$

$$q = \frac{W_A}{S_W}$$

S_W：ワッシャーの側面積$= 3.528 \times 10^4$ mm^2

b.　せん断応力

$$\tau = \frac{W_A}{A}$$

ここで,

$A = 1.245 \times 10^5$ mm^2

c.　組合せ応力

$$\sigma_\tau = \sqrt{\sigma ①^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\sigma ②^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

6. 評価結果

原子炉圧力容器スタビライザの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果を表6－1に示す。

表4－3に示す荷重の組合せのうち，$D+P_D+M_D+S_s$の評価について記載している。

(2) 許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する応力評価結果を表6－2に示す。

表4－3に示す荷重の組合せのうち，$D+P_D+M_D+S_d^*$の評価について記載している。

表６－１　許容応力状態Ⅳ$_A$Ｓに対する応力評価結果（Ｄ＋Ｐ$_D$＋Ｍ$_D$＋Ｓｓ）

評価対象設備	評価部位		応力分類	Ⅳ$_A$Ｓ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				(MPa)	(MPa)		
原子炉圧力容器 スタビライザ	Ｐ１	ロッド	引張応力	410	440	○	
	Ｐ２	スプリング支持板	曲げ応力	1	207	○	
			せん断応力	23	103	○	
			組合せ応力	40	179	○	

表６－２　許容応力状態ⅢASに対する応力評価結果（D＋P_D＋M_D＋Sd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				(MPa)	(MPa)		
原子炉圧力容器 スタビライザ	Ｐ１	ロッド	引張応力	404	440	○	
	Ｐ２	スプリング支持板	曲げ応力	1	172	○	
			せん断応力	23	86	○	
			組合せ応力	40	149	○	

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-779　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-3-4-3-2　原子炉格納容器スタビライザの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 7
5. 応力計算 ····· 8
5.1 応力評価点 ····· 8
5.2 応力計算方法 ····· 9
6. 評価結果 ····· 11

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の検討方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，原子炉格納容器スタビライザが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は原子炉格納容器スタビライザの応力評価により行う。

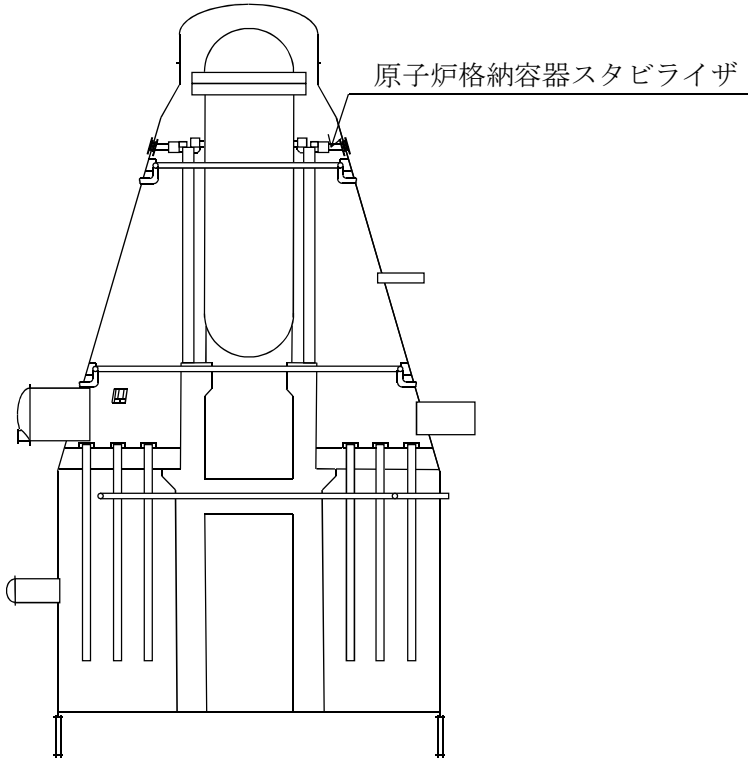
原子炉格納容器スタビライザは設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に分類され，以下，基準地震動の策定に伴う耐震評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

原子炉格納容器スタビライザの構造計画を表2－1に示す。

表2－1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
原子炉遮蔽壁に溶接される。	原子炉遮蔽壁外周に□個等間隔に配置されている。	

2.2　評価方針

原子炉格納容器スタビライザの応力評価は，東海第二発電所　昭和 50 年 10 月 6 日付け 50 資庁第 8314 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。

3. 形状及び主要寸法

原子炉格納容器スタビライザの形状及び主要寸法を図 3－1 に示す。

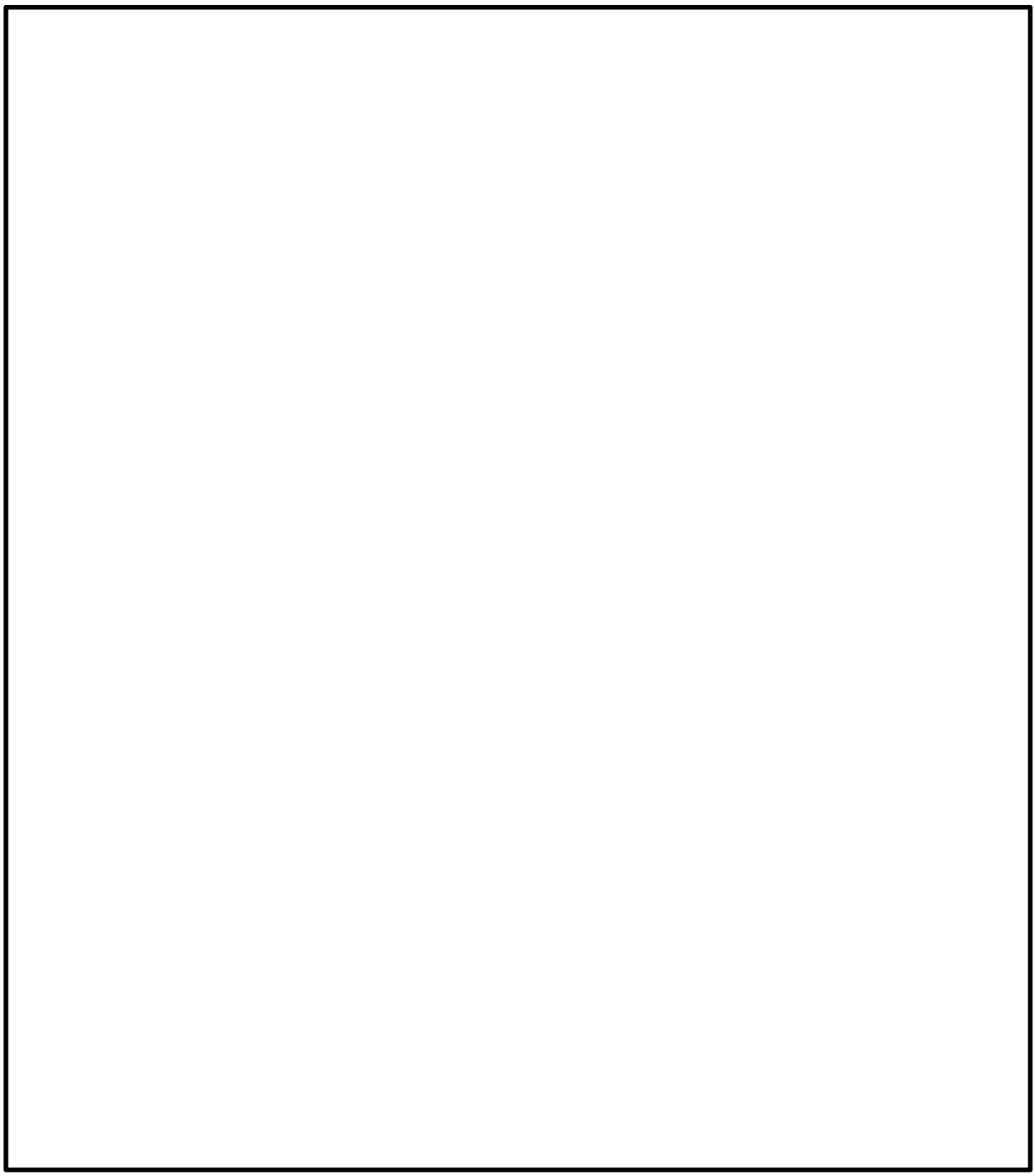


図 3－1　原子炉格納容器スタビライザの形状及び主要寸法（単位：mm）

4. 設計条件

4.1 設計荷重

(1) 最高使用温度T_D 171 ℃

(2) 死荷重W_D 2.618×10^4 N

(3) 地震荷重

スタビライザに加わる鉛直方向設計震度を表 4－1 に，水平方向地震荷重を表 4－2 に示す。

表 4－1 鉛直方向設計震度

方向	Ｓｄ*	Ｓｓ
鉛直方向C_V		

表 4－2 弾性設計用地震動Ｓｄ又は静的地震力及び基準地震動Ｓｓによる水平方向地震荷重

（単位：N）

地震荷重	Ｓｄ*	Ｓｓ
水平方向地震荷重W_H		

a. 原子炉格納容器スタビライザ 1 本に作用する荷重

スタビライザと水平方向地震荷重の作用方向の関係を図 4－1 に示す。

水平方向地震荷重が加わる場合の各位置における荷重の分配は次式で示される。

$$W_1=\frac{1}{4}\cdot W_H$$

$$F=F_1=\frac{1}{4}\cdot\frac{W_H}{2\sin\theta_1}$$

ここで，

$\theta_1=$

荷重の計算結果を表 4－3 に示す。

NT2 補③ V-2-3-4-3-2 R0

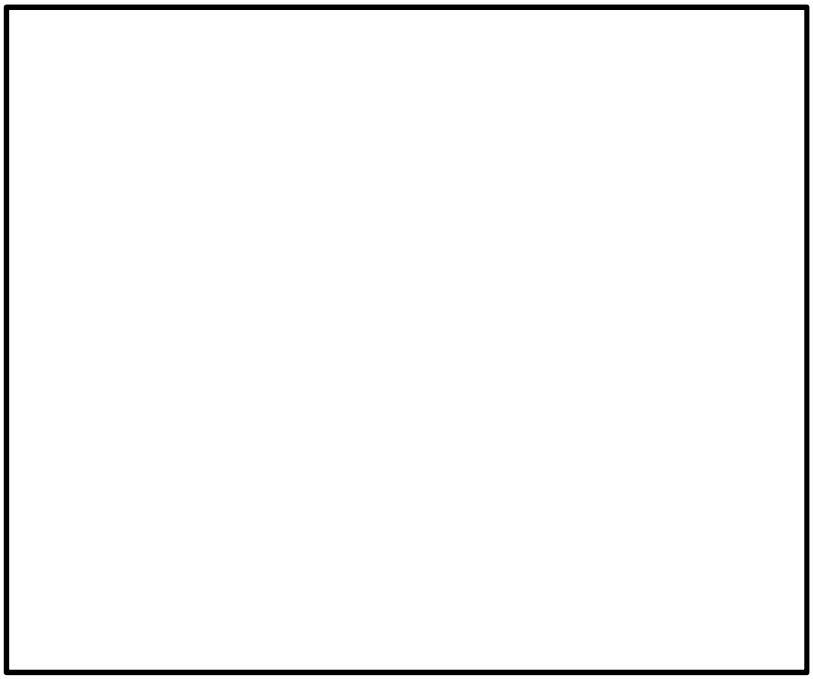


図 4－1　水平荷重の分配

表 4－3　原子炉格納容器スタビライザ 1 本に作用する荷重

（単位：N）

荷重	Ｓｄ*	Ｓｓ
F		

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

フランジ	SM400B
トラス	STKS1B
フランジボルト	SNB24-1

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4－4 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力を表 4－5 に示す。

表4－4　荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉本体	原子炉圧力容器付属構造物	原子炉格納容器スタビライザ	S	－	$D+P_D+M_D+S\,d^*$	ⅢAS
					$D+P_D+M_D+S\,s$	ⅣAS

表4－5　許容応力

（単位：MPa）

材料	許容応力状態	基準応力 F	許容応力				
			引張り f_t	曲げ f_b	せん断 f_s	圧縮 f_c	組合せ f_t
SM400B	ⅢAS	176	176	－	101	－	176
	ⅣAS	211	211	－	122	－	211
STKS1B	ⅢAS	384	384	384	221	303	384
	ⅣAS	384	384	384	221	303	384
SNB24-1	ⅢAS	713	534	－	－	－	－
	ⅣAS	713	534	－	－	－	－

5. 応力計算

5.1 応力評価点

応力評価点を表 5－1 に示す。

表 5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ１	フランジとトラスの取付部
Ｐ２	トラス
Ｐ３	トラスと原子炉遮蔽壁との取付部
Ｐ４	フランジボルト

5.2　応力計算方法

(1)　フランジとトラスの取付部（応力評価点Ｐ１）

a.　引張応力

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

ここで,

$A = 4.521 \times 10^4$ mm^2

b.　せん断応力

$$\tau = \frac{F}{A}$$

ここで,

$A = 1.061 \times 10^5$ mm^2

c.　組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

(2)　トラス（応力評価点Ｐ２）

a.　引張及び圧縮応力

$$\sigma_t = \frac{F}{A_p}$$ （引張側）

$$\sigma_c = \frac{F}{A_p}$$ （圧縮側）

ここで,

$A_p = 3.588 \times 10^4$ mm^2

b.　曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_p} = \frac{(1 + C_v) W_D \cdot \ell}{Z_p}$$

ここで,

$\ell = 2745$ mm

$Z_p = 2.613 \times 10^6$ mm^3

c.　せん断応力

$$\tau = \frac{F_s}{A_p} = \frac{(1 + C_v) W_D}{A_p}$$

ここで,

$A_p = 3.588 \times 10^4$ mm^2

d.　組合せ応力

(a)　垂直応力とせん断応力の組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_b)^2 + 3 \cdot \tau^2}$$ （引張側）

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_c + \sigma_b)^2 + 3 \cdot \tau^2}$$ （圧縮側）

(b)　圧縮力と曲げモーメントを受ける部材の組合せ応力

$$\frac{\sigma_c}{f_c}+\frac{\sigma_b}{f_b}\leqq 1$$

$$\frac{\sigma_b-\sigma_c}{f_t}\leqq 1$$

(c)　引張力と曲げモーメントを受ける部材の組合せ応力

$$\frac{\sigma_t+\sigma_b}{f_t}\leqq 1$$

$$\frac{\sigma_b-\sigma_t}{f_b}\leqq 1$$

(3)　トラスと原子炉遮蔽壁との取付部（応力評価点Ｐ３）

a.　せん断応力

$$\tau=\frac{F}{A}$$

ここで,

$A=7.205\times10^{4}$ mm^2

b.　引張応力

$$\sigma_t=\frac{F_t}{A}=\frac{(1+C_v)W_D}{A}$$

ここで,

$A=7.205\times10^{4}$ mm^2

c.　組合せ応力

$$\sigma=\sqrt{\sigma_t^2+3\cdot\tau^2}$$

(4)　フランジボルト（応力評価点Ｐ４）

a.　引張応力

$$\sigma_t=\frac{F}{A}$$

ここで,

ｎ：フランジボルト本数＝8 本

Ｄ：呼び径＝42 mm

Ａ：呼び径断面積＝$\pi/4\cdot D^2\cdot n=1.108\times10^{4}$ mm^2

6. 評価結果

原子炉格納容器スタビライザの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果を表6－1に示す。

表4－4に示す荷重の組合せのうち，$D+P_D+M_D+S_s$の評価について記載している。

(2) 許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する応力評価結果を表6－2に示す。

表4－4に示す荷重の組合せのうち，$D+P_D+M_D+S_d^*$の評価について記載している。

表6－1(1)　許容応力状態ⅣASに対する応力評価結果（D＋P_D＋M_D＋Ss）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				(MPa)	(MPa)		
原子炉格納容器 スタビライザ	Ｐ１	フランジとトラスの取付部	引張応力	125	211	○	
			せん断応力	54	122	○	
			組合せ応力	157	211	○	
	Ｐ２	トラス	引張応力	158	384	○	
			曲げ応力	155	384	○	
			せん断応力	4	221	○	
			圧縮応力	158	303	○	
			組合せ応力	313	384	○	
	Ｐ３	トラスと原子炉遮蔽壁との取付部	引張応力	2	384	○	
			せん断応力	79	221	○	
			組合せ応力	137	384	○	
	Ｐ４	フランジボルト	引張応力	509	534	○	

表6－1(2)　許容応力状態ⅣASに対する応力評価結果（D＋P_D＋M_D＋Ss）

評価対象設備	評価部位		荷重	評価式*1, *2	計算値		判定	備考
原子炉格納容器 スタビライザ	P2	トラス	圧縮力と 曲げモーメント	$\frac{\sigma_c}{f_c}+\frac{{}_c\sigma_b}{f_b}$	0.925	≦1	○	
				$\frac{{}_t\sigma_b-\sigma_c}{f_t}$	-0.008	≦1	○	
			引張力と 曲げモーメント	$\frac{\sigma_t+{}_t\sigma_b}{f_t}$	0.816	≦1	○	
				$\frac{{}_c\sigma_b-\sigma_t}{f_b}$	-0.008	≦1	○	

注記　＊1：設計・建設規格　SSB-3121.1(6)項より。

＊2：記号は以下のとおり。

f_c：許容圧縮応力　　f_b：許容曲げ応力　　f_t：許容引張応力

σ_c：平均圧縮応力　　${}_c\sigma_b$：圧縮側曲げ応力　　${}_t\sigma_b$：引張側曲げ応力

σ_t：平均引張応力

表6－2(1)　許容応力状態ⅢASに対する応力評価結果（D＋P_D＋M_D＋Sd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				(MPa)	(MPa)		
原子炉格納容器スタビライザ	Ｐ１	フランジとトラスの取付部	引張応力	107	176	○	
			せん断応力	46	101	○	
			組合せ応力	134	176	○	
	Ｐ２	トラス	引張応力	135	384	○	
			曲げ応力	143	384	○	
			せん断応力	4	221	○	
			圧縮応力	135	303	○	
			組合せ応力	278	384	○	
	Ｐ３	トラスと原子炉遮蔽壁との取付部	引張応力	2	384	○	
			せん断応力	67	221	○	
			組合せ応力	116	384	○	
	Ｐ４	フランジボルト	引張応力	435	534	○	

表6－2(2)　許容応力状態ⅢASに対する応力評価結果（D＋P_D＋M_D＋Sd*）

評価対象設備	評価部位		荷重	評価式*1, *2	計算値		判定	備考
原子炉格納容器 スタビライザ	P2	トラス	圧縮力と 曲げモーメント	$\frac{\sigma_c}{f_c}+\frac{{}_c\sigma_b}{f_b}$	0.818	≦1	○	
				$\frac{{}_t\sigma_b-\sigma_c}{f_t}$	0.021	≦1	○	
			引張力と 曲げモーメント	$\frac{\sigma_t+{}_t\sigma_b}{f_t}$	0.724	≦1	○	
				$\frac{{}_c\sigma_b-\sigma_t}{f_b}$	0.021	≦1	○	

注記　＊1：設計・建設規格　SSB-3121.1(6)項より。

＊2：記号は以下のとおり。

f_c：許容圧縮応力　　f_b：許容曲げ応力　　f_t：許容引張応力

σ_c：平均圧縮応力　　${}_c\sigma_b$：圧縮側曲げ応力　　${}_t\sigma_b$：引張側曲げ応力

σ_t：平均引張応力

本資料のうち，枠囲みの内容は，
営業秘密又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-702　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-9-2-6　機器搬入用ハッチの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 8
5. 応力計算 ····· 10
5.1 応力評価点 ····· 10
5.2 計算方針 ····· 12
6. 評価結果 ····· 13
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 13
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 16

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，機器搬入用ハッチが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は機器搬入用ハッチの地震応答解析，応力評価により行う。

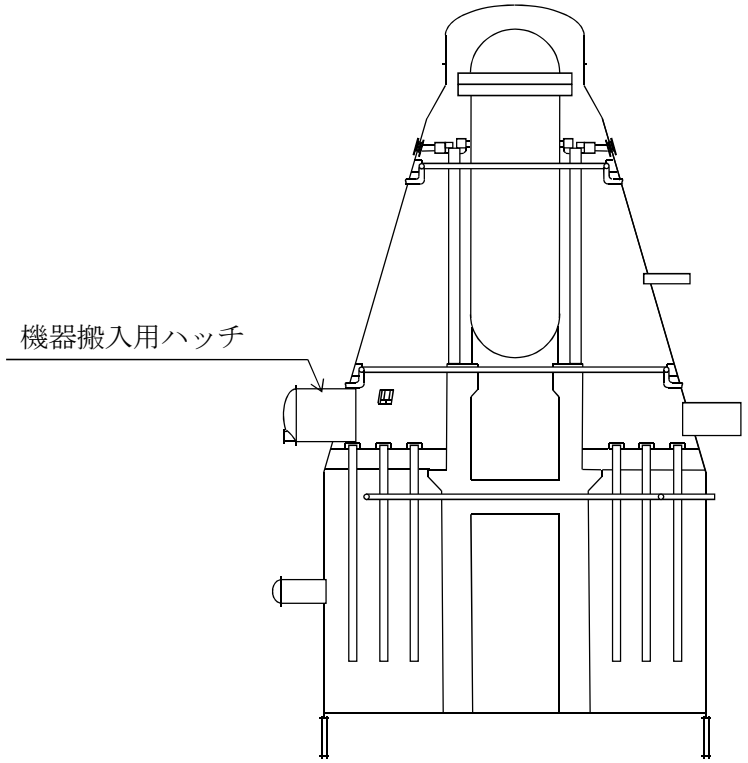
機器搬入用ハッチは設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下，それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

機器搬入用ハッチの構造計画を表2－1に示す。

表2－1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
機器搬入用ハッチは原子炉格納容器に支持される。	内径[ ]mm，板厚[ ]mm，長さ[ ]mmの円筒胴及び板厚[ ]mmの鏡板で構成される鋼製構造物である。	

2.2　評価方針

(1)　機器搬入用ハッチの応力評価は，東海第二発電所　昭和 48 年 4 月 9 日付け 47 公第 1207 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。各荷重による応力は，実績のある三次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3. 形状及び主要寸法

機器搬入用ハッチの形状及び主要寸法を図3－1に示す。

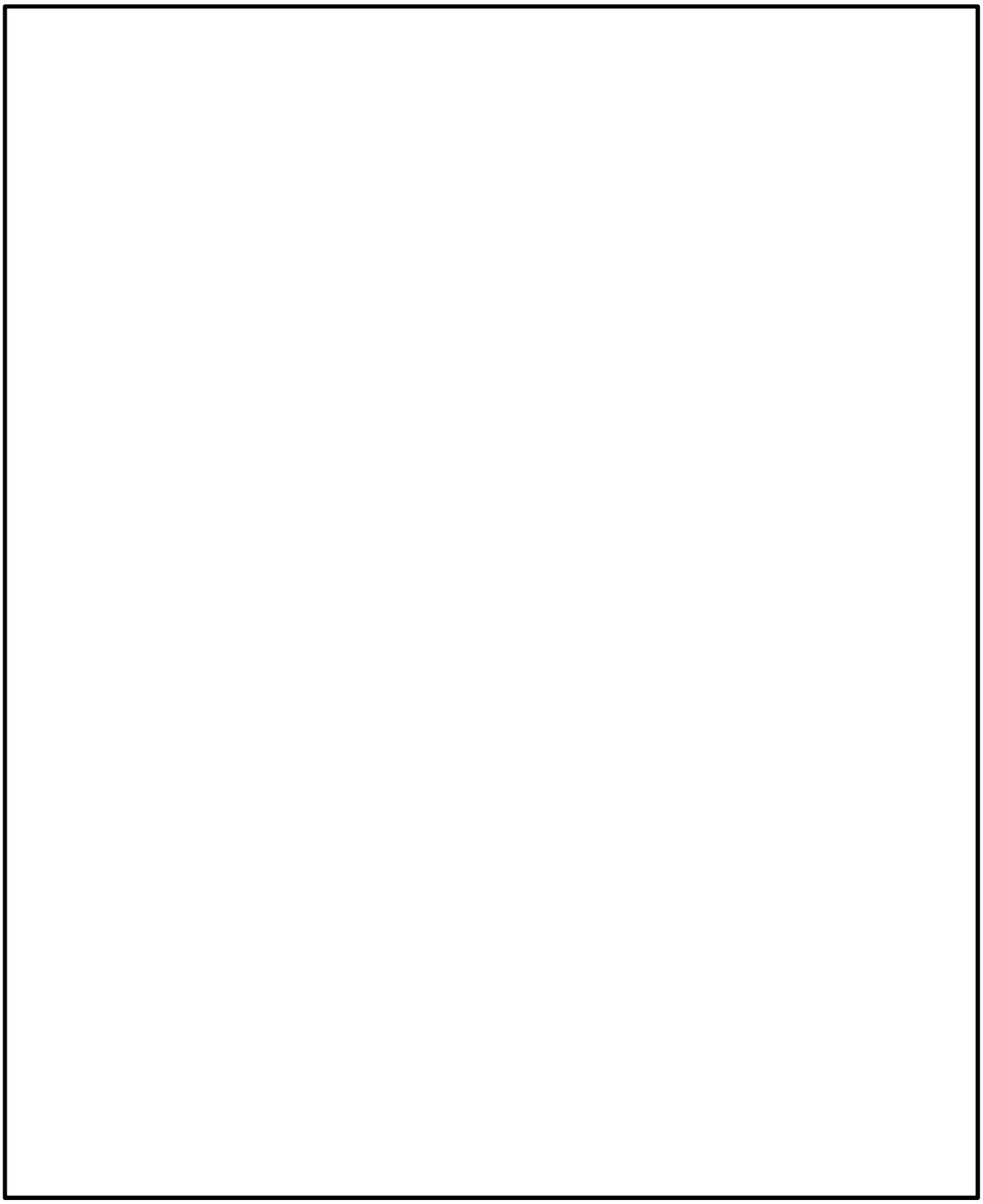


図3－1　機器搬入用ハッチの形状及び主要寸法（単位：mm）

4. 設計条件

4.1 設計荷重

(1) 設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧 P_D 310 kPa

外圧 P_{DO} 14 kPa

温度 T_D 171 ℃

(2) 冷却材喪失事故後の最大内圧 P_{DBA} 255 kPa

(3) 重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

内圧 P_{SAL} 465 kPa（ＳＡ後長期）

内圧 P_{SALL} 200 kPa（ＳＡ後長々期）

温度 T_{SAL} 171 ℃（ＳＡ後長期）

温度 T_{SALL} 150 ℃（ＳＡ後長々期）

(4) 死荷重

a. 機器搬入用ハッチの自重 [redacted] N（補強板重量含む）

b. ドライウェルの自重

機器搬入用ハッチより上部の原子炉格納容器の自重及び付加物の重量を死荷重とする。

(5) 活荷重

a. 床に加わる荷重 [redacted] N

b. ドライウェルの荷重

機器搬入用ハッチより上部の活荷重を考慮する。

(6) 地震力による荷重

a. 機器搬入用ハッチ

機器搬入用ハッチの設計震度について，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－1 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－2 に示す。

表 4－1 設計震度（設計基準対象施設）

方向	Ｓd*	Ｓs
鉛直方向	[redacted]	
水平方向		

表 4－2 設計震度（重大事故等対処設備）

方向	Ｓd	Ｓs
鉛直方向	[redacted]	
水平方向		

b.　原子炉格納容器

原子炉格納容器に加わる鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－3 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－4 に示す。弾性設計用地震動Ｓｄ及び基準地震動Ｓｓによる水平方向地震荷重のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－5 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－6 に示す。

表 4－3　鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重（設計基準対象施設）

（単位：N）

通常運転時			燃料交換時		
鉛直荷重	地震荷重		鉛直荷重	地震荷重	
	Ｓｄ*	Ｓｓ		Ｓｄ*	Ｓｓ

表 4－4　鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重（重大事故等対処設備）

（単位：N）

重大事故等時		
鉛直荷重	地震荷重	
	Ｓｄ*	Ｓｓ

表 4－5　水平方向地震荷重（設計基準対象施設）

弾性設計用地震動Ｓｄ*による地震荷重		基準地震動Ｓｓによる地震荷重	
せん断力 (N)	モーメント (N･mm)	せん断力 (N)	モーメント (N･mm)

表 4－6　水平方向地震荷重（重大事故等対処設備）

弾性設計用地震動Ｓd* による地震荷重		基準地震動Ｓs による地震荷重	
せん断力 (N)	モーメント (N･mm)	せん断力 (N)	モーメント (N･mm)

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

ドライウェル円錐部シェル　　(SGV480 相当)

補強板　　(SGV480 相当)

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－7 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－8 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－9 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－10 に示す。

表4－7　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	機器搬入用ハッチ	S	クラスMC容器	D＋P＋M＋Sd*	ⅢAS
					D＋P＋M＋Ss	ⅣAS
					D＋PL＋ML＋Sd*	ⅣAS

表4－8　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	機器搬入用ハッチ	常設耐震／防止常設／緩和	重大事故等クラス２容器	D＋PSALL＋MSALL＋Ss	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）
					D＋PSAL＋MSAL＋Sd*	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）

注記　＊：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表4－9　許容応力（設計基準対象施設）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	171	ⅢAS	－	344	393
		ⅣAS	－	380	393

表4－10　許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	150	ⅣAS	－	381	393
	171	ⅣAS	－	380	393

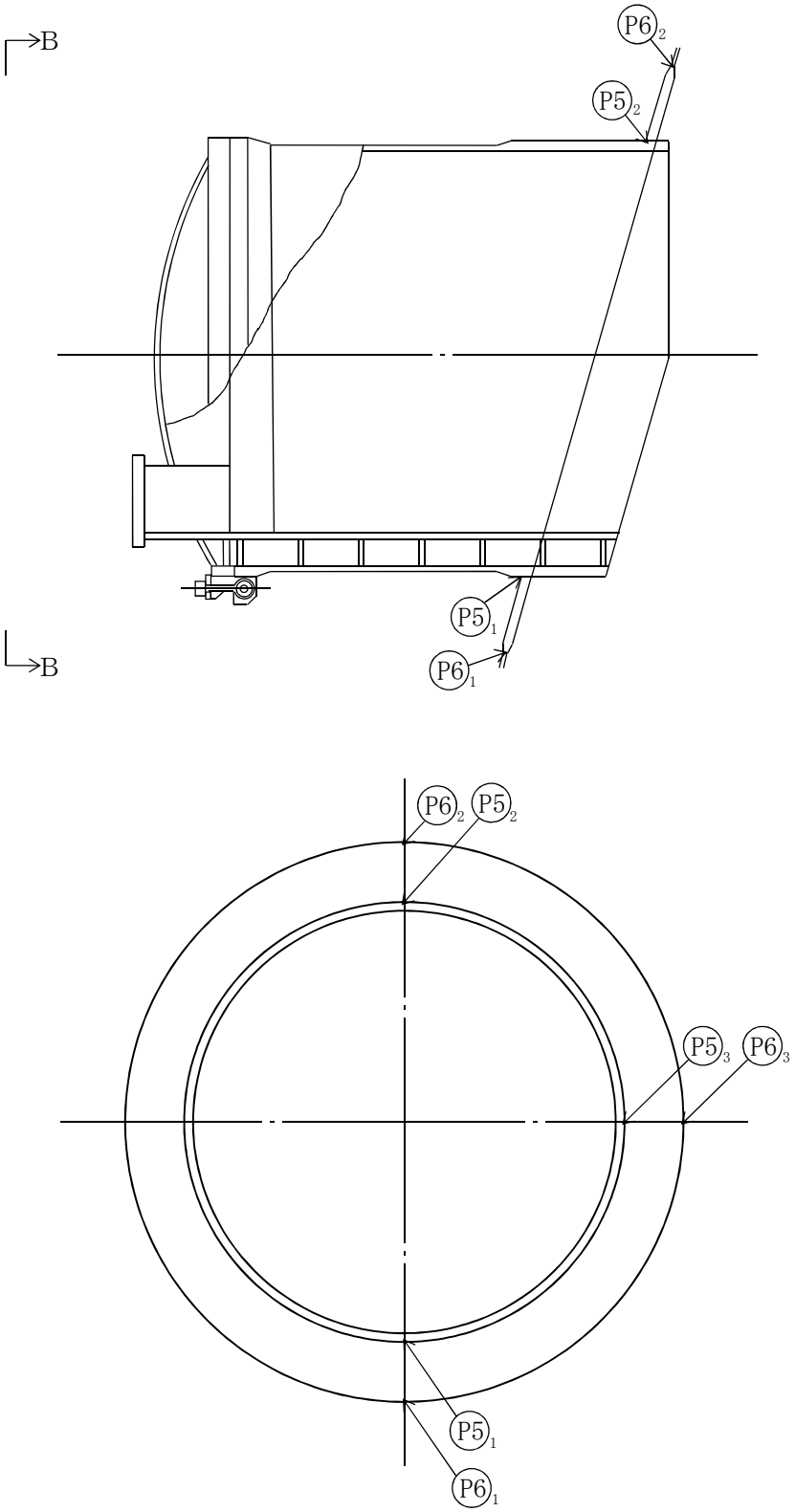
5. 応力計算

5.1 応力評価点

機器搬入用ハッチの形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表 5－1 及び図 5－1 に示す。

表 5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ５	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部 （Ｐ５－１～Ｐ５－３）
Ｐ６	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部 （Ｐ６－１～Ｐ６－３）

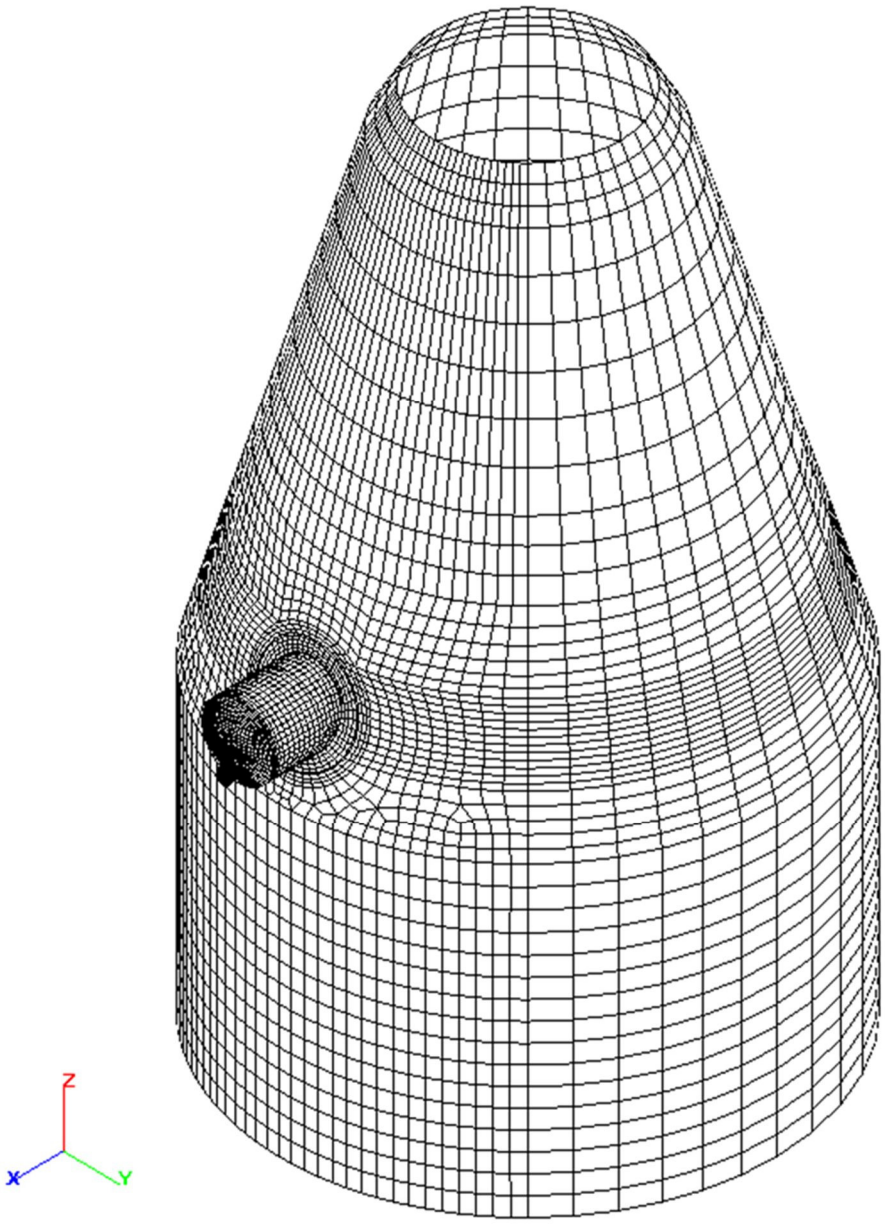


B～B視図

図 5－1　機器搬入用ハッチの応力評価点

5.2　計算方針

各荷重により機器搬入用ハッチに生じる応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。機器搬入用ハッチの計算モデルを図 5－2 に示す。



節点数　5942
要素数　5880

図 5－2　解析モデル

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

機器搬入用ハッチの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果を表6－1に示す。

表4－7に示す荷重の組合せのうち，D＋P＋M＋Ss及び$\mathrm{D+P_L+M_L+S}d^{*}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2) 許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する応力評価結果を表6－2に示す。

表4－7に示す荷重の組合せのうち，$\mathrm{D+P+M+S}d^{*}$の評価について記載している。

表6－1　許容応力状態ⅣASに対する評価結果（D＋P＋M＋Ss又はD＋PL＋ML＋Sd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
機器搬入用ハッチ	Ｐ５－１	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	113	380	○	②*
			一次＋二次応力	362	393	○	①*
	Ｐ５－２	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	115	380	○	②*
			一次＋二次応力	232	393	○	①*
	Ｐ５－３	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	118	380	○	①*
			一次＋二次応力	462	393	×*	①*
			疲労評価	0.392	1	○	単位なし
	Ｐ６－１	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	116	380	○	①*
			一次＋二次応力	336	393	○	①*
	Ｐ６－２	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	113	380	○	②*
			一次＋二次応力	178	393	○	①*
	Ｐ６－３	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	112	380	○	②*
			一次＋二次応力	718	393	×*	①*
			疲労評価	0.570	1	○	単位なし

注記　＊：①：D＋P＋M＋Ss / ②：D＋PL＋ML＋Sdにおける結果を示す。

Ｐ５－３及びＰ６－３の一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005）PVB-3300に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

表６－２　許容応力状態ⅢASに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
機器搬入用ハッチ	Ｐ５－１	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	53	344	○	
			一次＋二次応力	198	393	○	
	Ｐ５－２	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	51	344	○	
			一次＋二次応力	128	393	○	
	Ｐ５－３	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	72	344	○	
			一次＋二次応力	272	393	○	
	Ｐ６－１	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	71	344	○	
			一次＋二次応力	184	393	○	
	Ｐ６－２	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	49	344	○	
			一次＋二次応力	98	393	○	
	Ｐ６－３	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	62	344	○	
			一次＋二次応力	424	393	×*	
			疲労評価	0.032	1	○	単位なし

注記　＊：Ｐ６－３の一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005）PVB-3300 に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

機器搬入用ハッチの重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ⅤASに対する評価

許容応力状態ⅤASに対する応力評価結果を表6－3に示す。

表4－8に示す荷重の組合せのうち，D＋PSALL＋MSALL＋Ss及びD＋PSAL＋MSAL＋Sdの評価について，それぞれ評価基準値に対する発生値の割合が高い方の評価を記載している。

表６－３　許容応力状態ⅤASに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ$_{SALL}$＋Ｍ$_{SALL}$＋Ｓｓ 又はＤ＋Ｐ$_{SAL}$＋Ｍ$_{SAL}$＋Ｓｄ）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
機器搬入用ハッチ	Ｐ５－１	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	194	380	○	②*
			一次＋二次応力	228	393	○	①*
	Ｐ５－２	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	196	380	○	②*
			一次＋二次応力	162	393	○	①*
	Ｐ５－３	機器搬入用ハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	185	380	○	②*
			一次＋二次応力	254	393	○	①*
	Ｐ６－１	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	189	380	○	②*
			一次＋二次応力	214	393	○	①*
	Ｐ６－２	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	194	380	○	②*
			一次＋二次応力	128	393	○	①*
	Ｐ６－３	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	193	380	○	②*
			一次＋二次応力	390	393	○	①*

注記　＊：①：Ｄ＋Ｐ$_{SALL}$＋Ｍ$_{SALL}$＋Ｓｓ / ②：Ｄ＋Ｐ$_{SAL}$＋Ｍ$_{SAL}$＋Ｓｄにおける結果を示す。

本資料のうち，枠囲みの内容は，
営業秘密又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-701　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-9-2-7　所員用エアロックの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 8
5. 応力計算 ····· 10
5.1 応力評価点 ····· 10
5.2 計算方針 ····· 12
6. 評価結果 ····· 13
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 13
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 16

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，所員用エアロックが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は所員用エアロックの地震応答解析，応力評価により行う。

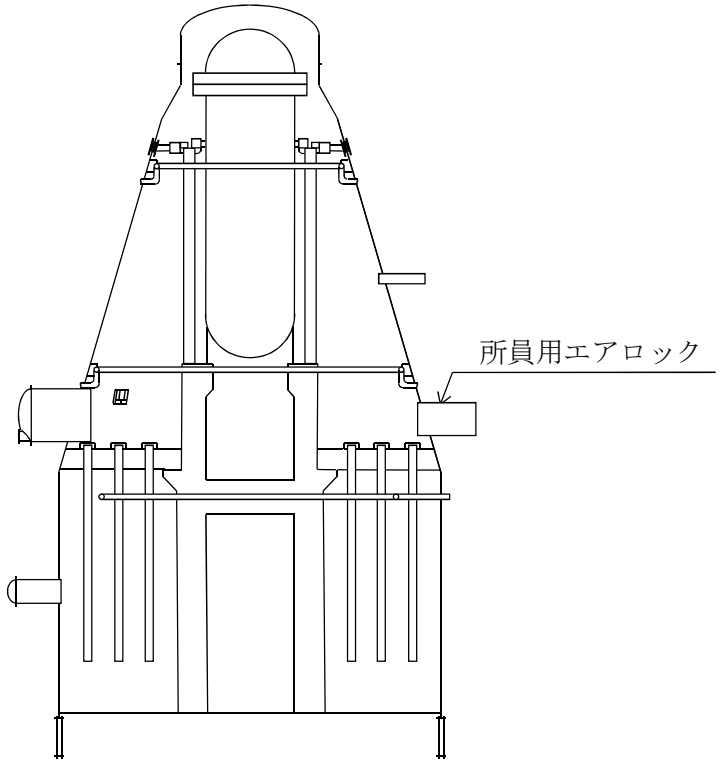
所員用エアロックは設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下，それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

所員用エアロックの構造計画を表2－1に示す。

表2－1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
・所員用エアロックは原子炉格納容器に支持される。	・内径[redacted]mm，板厚[redacted]mm，長さ[redacted]mmの円筒胴及び板厚[redacted]mmのとびら板で構成される鋼製構造物である。	

2.2　評価方針

(1)　所員用エアロックの応力評価は，東海第二発電所　昭和 48 年 4 月 9 日付け 47 公第 12076 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。各荷重による応力は，実績のある三次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3. 形状及び主要寸法

所員用エアロックの形状及び主要寸法を図3－1に示す。

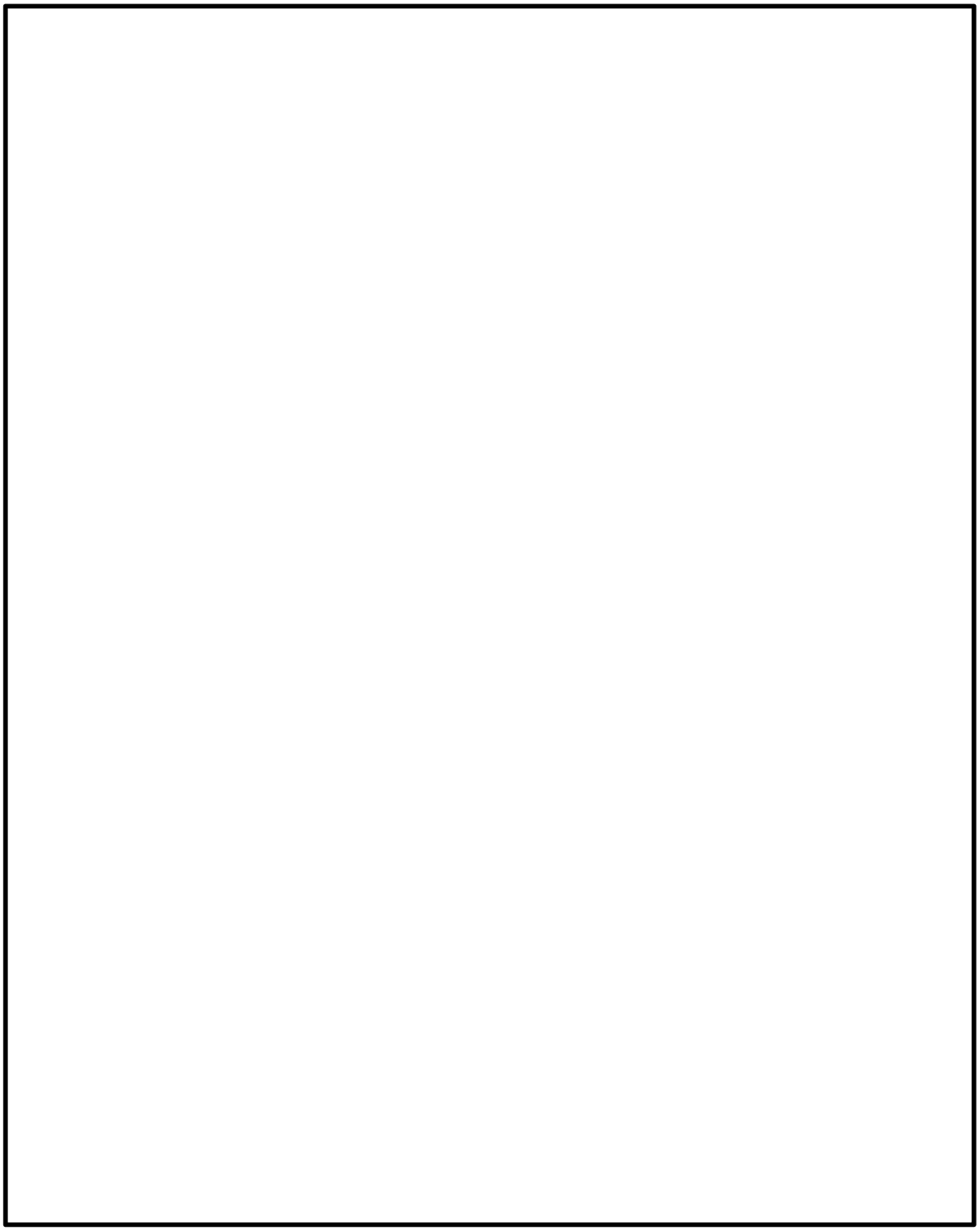


図3－1　所員用エアロックの形状及び主要寸法（単位：mm）

4. 設計条件

4.1 設計荷重

(1) 設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧 P_D 310 kPa

外圧 P_{DO} 14 kPa

温度 T_D 171 ℃

(2) 冷却材喪失事故後の最大内圧 P_{DBA} 255 kPa

(3) 重大事故等対処施設としての評価圧力及び評価温度

内圧 P_{SAL} 465 kPa（ＳＡ後長期）

内圧 P_{SALL} 200 kPa（ＳＡ後長々期）

温度 T_{SAL} 171 ℃（ＳＡ後長期）

温度 T_{SALL} 150 ℃（ＳＡ後長々期）

(4) 死荷重

a. 所員用エアロックの自重 [redacted] N

b. ドライウェルの自重

所員用エアロックより上部の原子炉格納容器の自重及び付加物の重量を死荷重とする。

(5) 活荷重

a. 床に加わる荷重 [redacted] N/m^2

b. ドライウェルの荷重

所員用エアロックより上部の活荷重を考慮する。

(6) 地震荷重

a. 所員用エアロック

所員用エアロックの設計震度について，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－1 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－2 に示す。

表 4－1 設計震度（設計基準対象施設）

方向	Ｓd*	Ｓs
鉛直方向	[redacted]	
水平方向		

表 4－2 設計震度（重大事故等対処設備）

方向	Ｓd	Ｓs
鉛直方向	[redacted]	
水平方向		

b.　原子炉格納容器

原子炉格納容器に加わる鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－3 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－4 に示す。弾性設計用地震動Ｓｄ 及び基準地震動Ｓｓ による水平方向地震荷重のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－5 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－6 に示す。

表 4－3　鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重（設計基準対象施設）

（単位：N）

通常運転時			燃料交換時		
鉛直荷重	地震荷重		鉛直荷重	地震荷重	
	Ｓｄ*	Ｓｓ		Ｓｄ*	Ｓｓ

表 4－4　鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重（重大事故等対処設備）

（単位：N）

重大事故等時		
鉛直荷重	地震荷重	
	Ｓｄ*	Ｓｓ

表 4－5　水平方向地震荷重（設計基準対象施設）

弾性設計用地震動Ｓｄ* による地震荷重		基準地震動Ｓｓ による地震荷重	
せん断力 (N)	モーメント (N･mm)	せん断力 (N)	モーメント (N･mm)

表 4－6　水平方向地震荷重（重大事故等対処設備）

弾性設計用地震動Ｓd* による地震荷重		基準地震動Ｓs による地震荷重	
せん断力 (N)	モーメント (N･mm)	せん断力 (N)	モーメント (N･mm)

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

ドライウェル円錐部シェル　　(SGV480 相当)

補強板　　(SGV480 相当)

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－7 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－8 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－9 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－10 に示す。

表4－7　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	所員用エアロック	S	クラスMC容器	D＋P＋M＋Sd*	ⅢAS
					D＋P＋M＋Ss	ⅣAS
					D＋PL＋ML＋Sd*	ⅣAS

表4－8　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	所員用エアロック	常設耐震／防止常設／緩和	重大事故等クラス2容器	D＋PSALL＋MSALL＋Ss	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）
					D＋PSAL＋MSAL＋Sd*	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）

注記　＊：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表4－9　許容応力（設計基準対象施設）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	171	ⅢAS	－	344	393
		ⅣAS	－	380	393

表4－10　許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	150	ⅣAS	－	381	393
	171	ⅣAS	－	380	393

5. 応力計算

5.1 応力評価点

所員用エアロックの形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表 5－1 及び図 5－1 に示す。

表 5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ１２	所員用エアロック本体と補強板との結合部 （Ｐ１２－１～Ｐ１２－３）
Ｐ１３	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部 （Ｐ１３－１～Ｐ１３－３）

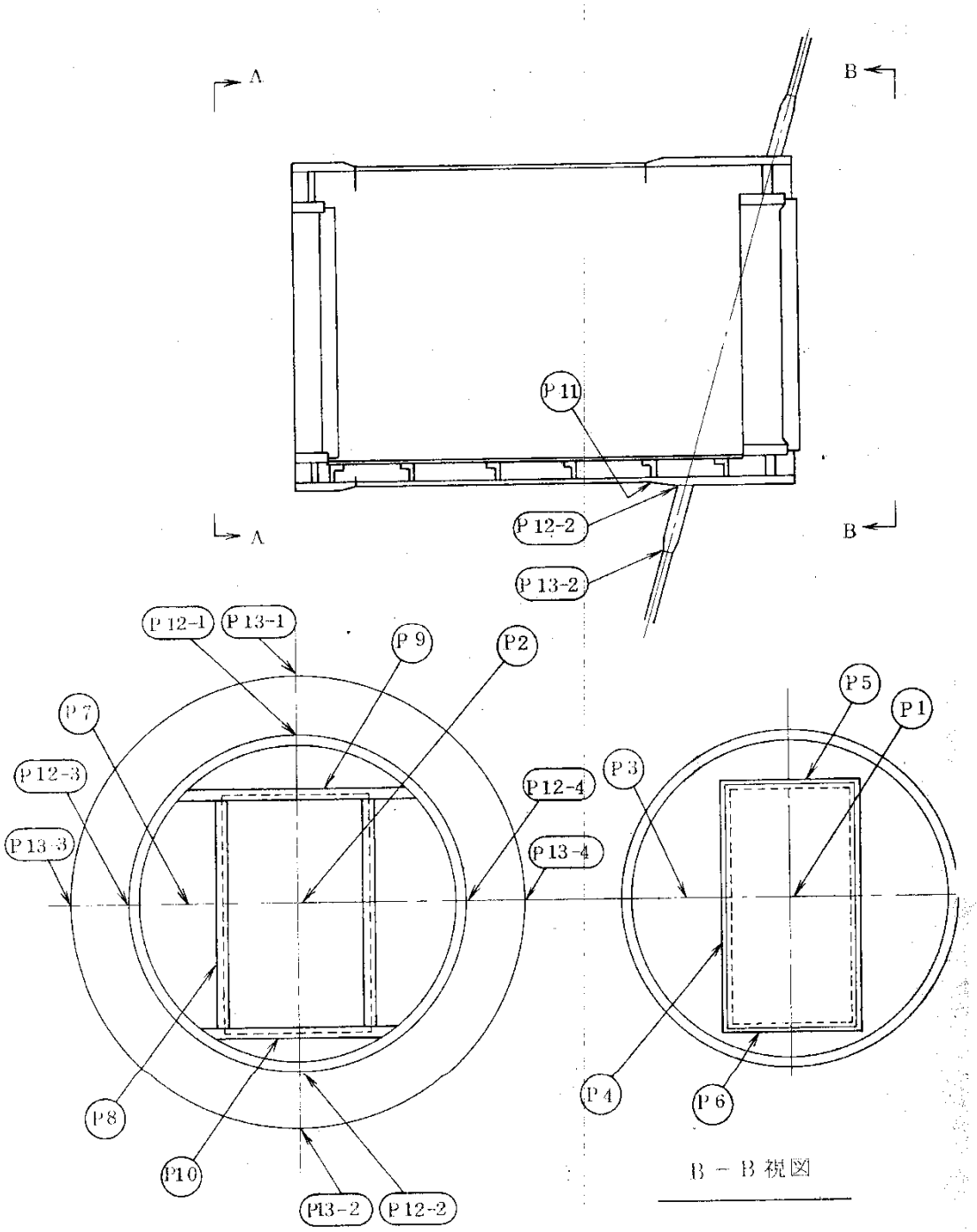
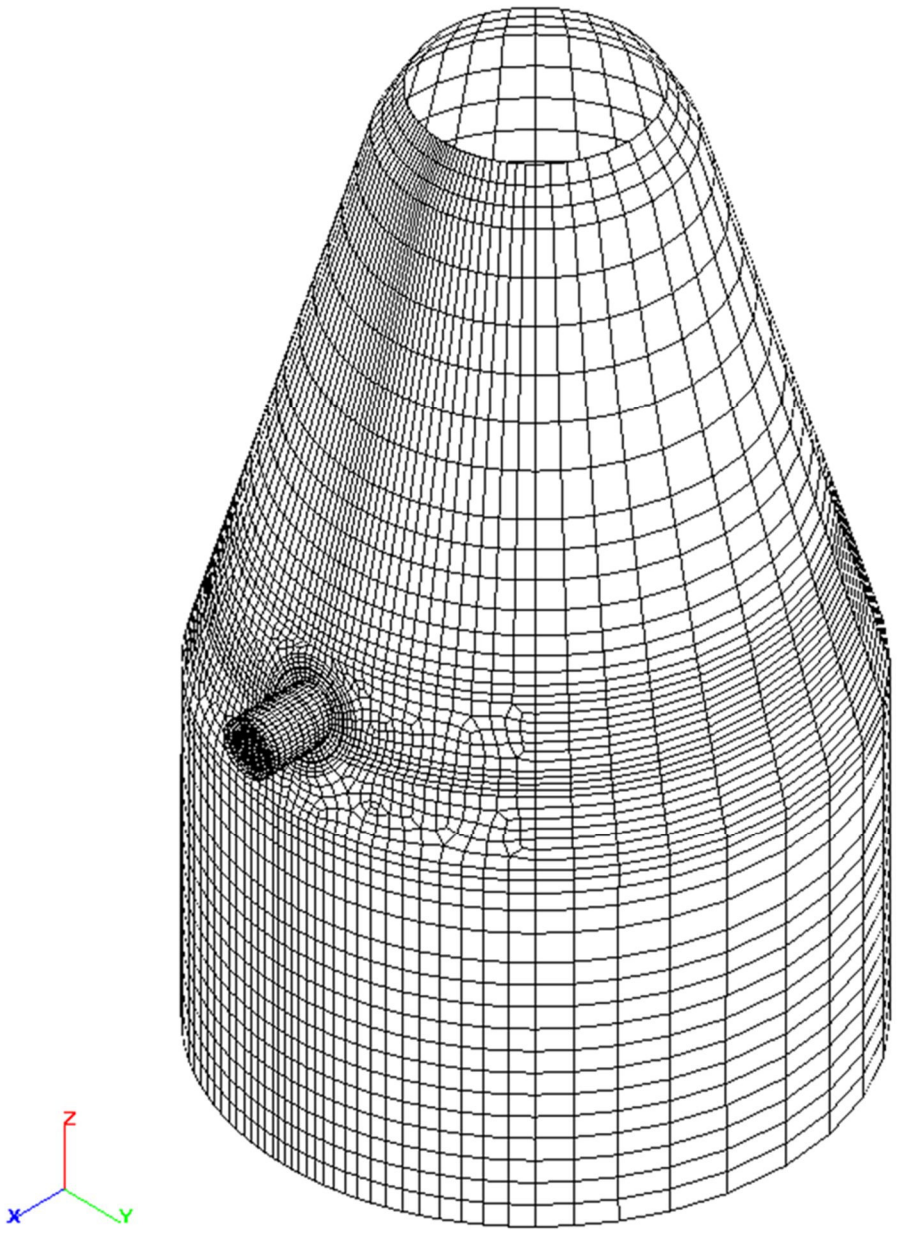


図 5－1　所員用エアロックの応力評価点

5.2　計算方針

各荷重により所員用エアロックに生じる応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。所員用エアロックの計算モデルを図 5－2 に示す。



節点数　4697
要素数　4656

図 5－2　解析モデル

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

所員用エアロックの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果を表6－1に示す。

表4－7に示す荷重の組合せのうち，D＋P＋M＋Ss及び$\mathrm{D+P_L+M_L+S}d^{*}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2) 許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する応力評価結果を表6－2に示す。

表 4－7 に示す荷重の組合せのうち，$\mathrm{D+P+M+S}d^{*}$の評価について評価を記載している。

表 6－1　許容応力状態ⅣASに対する評価結果（D＋P＋M＋Ss 又はD＋PL＋ML＋Sd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
所員用エアロック	Ｐ１２－１	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	115	380	○	②*
			一次＋二次応力	236	393	○	①*
	Ｐ１２－２	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	115	380	○	②*
			一次＋二次応力	128	393	○	①*
	Ｐ１２－３	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	107	380	○	②*
			一次＋二次応力	310	393	○	①*
	Ｐ１３－１	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	110	380	○	②*
			一次＋二次応力	232	393	○	①*
	Ｐ１３－２	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	111	380	○	②*
			一次＋二次応力	192	393	○	①*
	Ｐ１３－３	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	116	380	○	②*
			一次＋二次応力	456	393	×*	①*
			疲労評価	0.056	1	○	単位なし

注記　＊：①：D＋P＋M＋Ss / ②：D＋PL＋ML＋Sd における結果を示す。

Ｐ１３－３の一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ1－2005）PVB-3300 に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

表６－２　許容応力状態ⅢＡＳに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢＡＳ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
所員用エアロック	Ｐ１２－１	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	48	344	○	
			一次＋二次応力	132	393	○	
	Ｐ１２－２	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	42	344	○	
			一次＋二次応力	70	393	○	
	Ｐ１２－３	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	58	344	○	
			一次＋二次応力	192	393	○	
	Ｐ１３－１	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	61	344	○	
			一次＋二次応力	132	393	○	
	Ｐ１３－２	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	55	344	○	
			一次＋二次応力	110	393	○	
	Ｐ１３－３	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	54	344	○	
			一次＋二次応力	286	393	○	

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

所員用エアロックの重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ⅤASに対する評価

許容応力状態ⅤASに対する応力評価結果を表6－3に示す。

表4－8に示す荷重の組合せのうち，D＋PSALL＋MSALL＋Ss及びD＋PSAL＋MSAL＋Sdの評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

表６－３　許容応力状態ⅤASに対する評価結果（Ｄ＋PSALL＋MSALL＋Ｓｓ又はＤ＋PSAL＋MSAL＋Ｓｄ）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
所員用エアロック	Ｐ１２－１	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	196	380	○	②*
			一次＋二次応力	218	393	○	①*
	Ｐ１２－２	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	196	380	○	②*
			一次＋二次応力	122	393	○	①*
	Ｐ１２－３	所員用エアロック本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	187	380	○	②*
			一次＋二次応力	282	393	○	①*
	Ｐ１３－１	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	191	380	○	②*
			一次＋二次応力	214	393	○	①*
	Ｐ１３－２	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	192	380	○	②*
			一次＋二次応力	180	393	○	①*
	Ｐ１３－３	ドライウェル円錐胴と補強板との接合部	一次膜応力＋曲げ応力	196	380	○	②*
			一次＋二次応力	406	393	×*	①*
			疲労評価	0.026	1	○	単位なし

注記　＊：①：Ｄ＋PSALL＋MSALL＋Ｓｓ / ②：Ｄ＋PSAL＋MSAL＋Ｓｄにおける結果を示す。

Ｐ１３－３の一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ1－2005）PVB-3300に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-700　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-9-2-8　サプレッション・チェンバアクセスハッチの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 8
5. 応力計算 ····· 10
5.1 応力評価点 ····· 10
5.2 計算方針 ····· 12
6. 評価結果 ····· 13
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 13
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 16

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，サプレッション・チェンバアクセスハッチが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価はサプレッション・チェンバアクセスハッチの地震応答解析，応力評価により行う。

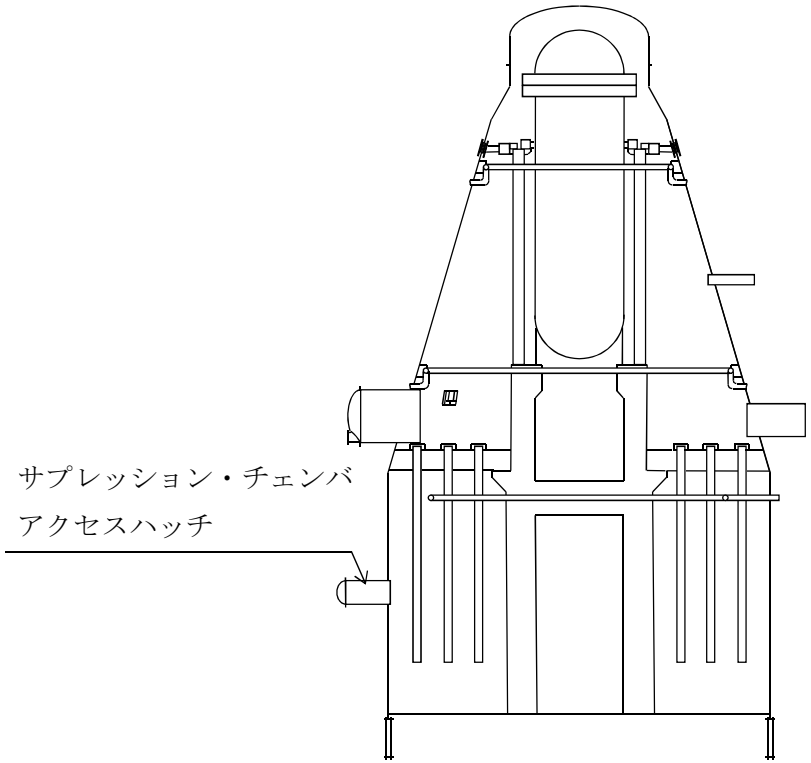
サプレッション・チェンバアクセスハッチは設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下，それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

サプレッション・チェンバアクセスハッチの構造計画を表 2－1 に示す。

表 2－1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
・サプレッション・チェンバアクセスハッチは原子炉格納容器に支持される。	・内径[ ]mm，板厚[ ]mm，長さ[ ]mm の円筒胴及び板厚[ ]mm の鏡板で構成される鋼製構造物である。	

2.2　評価方針

(1)　サプレッション・チェンバアクセスハッチの応力評価は，東海第二発電所　昭和 48 年 4 月 9 日付け 47 公第 12076 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。各荷重による応力は，実績のある３次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3. 形状及び主要寸法

サプレッション・チェンバアクセスハッチの形状及び主要寸法を図 3－1 に示す。

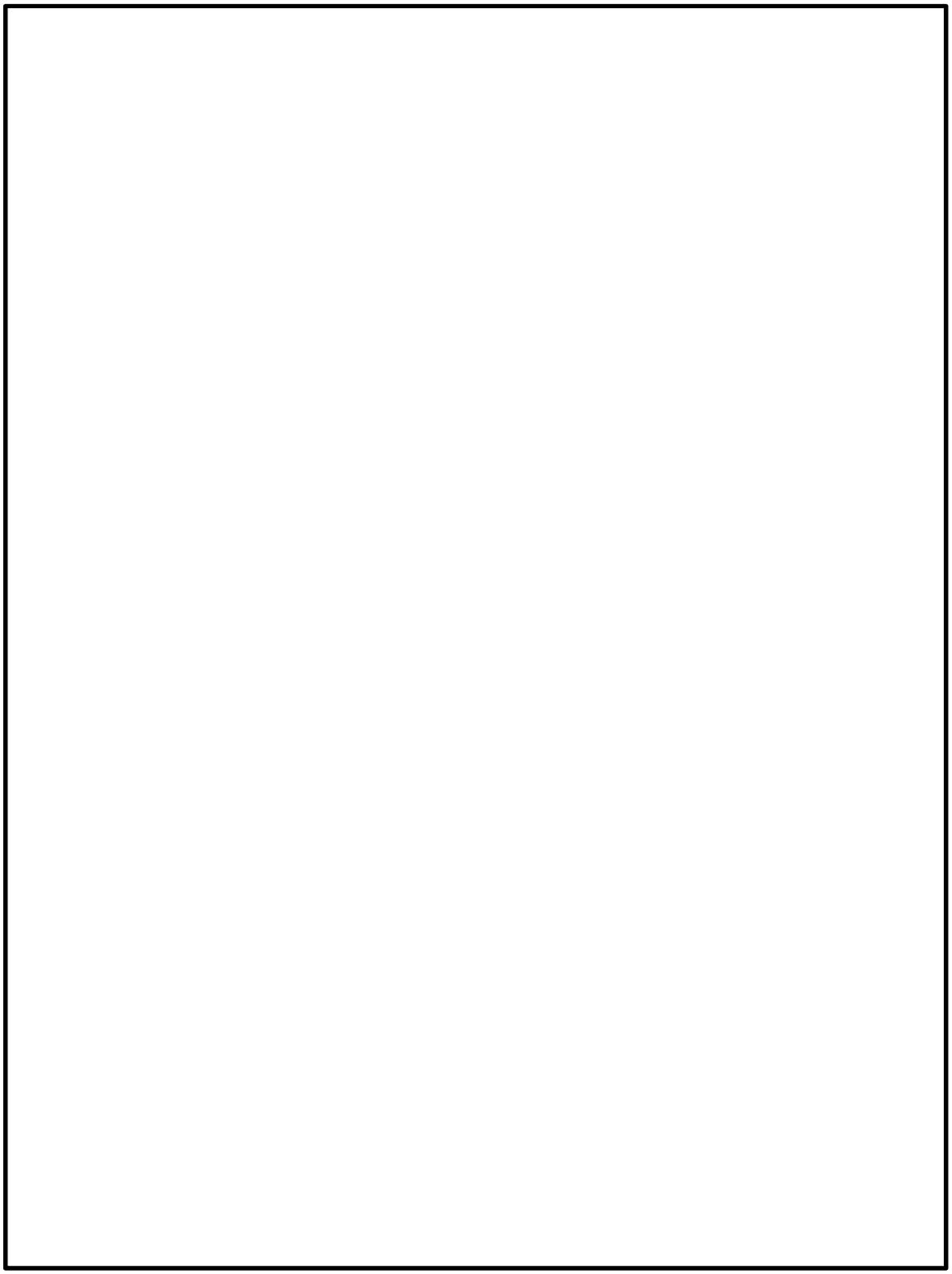


図 3－1　サプレッション・チェンバアクセスハッチの形状及び主要寸法（単位：mm）

4. 設計条件

4.1 設計荷重

(1) 設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧 P_D 310 kPa

外圧 P_{DO} 14 kPa

温度 T_D 104.5 ℃

(2) 冷却材喪失事故後の最大内圧 P_{DBA} 196 kPa

(3) 重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

内圧 P_{SAL} 465 kPa（SA 後長期）

内圧 $_{SALL}$ 200 kPa（SA 後長々期）

温度 T_{SAL} 171 ℃（SA 後長期）

温度 T_{SALL} 150 ℃（SA 後長々期）

(4) 死荷重

a. サプレッション・チェンバアクセスハッチの自重 [redacted] N（補強板重量含む）

b. ドライウェルの自重

サプレッション・チェンバアクセスハッチより上部の原子炉格納容器の自重及び付加物の重量を死荷重とする。

(5) 活荷重

a. 床に加わる荷重 [redacted] N/m^2

b. ドライウェルの荷重

サプレッション・チェンバアクセスハッチより上部の活荷重を考慮する。

(6) 地震力による荷重

a. サプレッション・チェンバアクセスハッチ

サプレッション・チェンバアクセスハッチの設計震度について，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－1 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－2 に示す。

表 4－1 設計震度（設計基準対象施設）

方向	S_d^*	S_s
鉛直方向	[redacted]	
水平方向		

表 4－2 設計震度（重大事故等対処設備）

方向	S_d^*	S_s
鉛直方向	[redacted]	
水平方向		

b.　原子炉格納容器

原子炉格納容器に加わる鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－3 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－4 に示す。弾性設計用地震動Ｓｄ及び基準地震動Ｓｓによる水平方向地震荷重のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－5 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－6 に示す。

表 4－3　鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重（設計基準対象施設）

（単位：N）

通常運転時			燃料交換時		
鉛直荷重	地震荷重		鉛直荷重	地震荷重	
	Ｓｄ*	Ｓｓ		Ｓｄ*	Ｓｓ

表 4－4　鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重（重大事故等対処設備）

（単位：N）

重大事故等時		
鉛直荷重	地震荷重	
	Ｓｄ*	Ｓｓ

表 4－5　水平方向地震荷重（設計基準対象施設）

弾性設計用地震動Ｓｄ*による地震荷重		基準地震動Ｓｓによる地震荷重	
せん断力 (N)	モーメント (N･mm)	せん断力 (N)	モーメント (N･mm)

表 4－6　水平方向地震荷重（重大事故等対処設備）

弾性設計用地震動Ｓd* による地震荷重		基準地震動Ｓs による地震荷重	
せん断力 (N)	モーメント (N･mm)	せん断力 (N)	モーメント (N･mm)

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

サプレッションチェンバ円筒部シェル　[redacted]　(SGV480 相当)

補強板　(SGV480 相当)

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－7 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－8 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－9 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－10 に示す。

表4－7　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	サプレッション・チェンバアクセスハッチ	S	クラスMC容器	D＋P＋M＋Sd*	ⅢAS
					D＋P＋M＋Ss	ⅣAS
					D＋PL＋ML＋Sd*	ⅣAS

表 4－8　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	サプレッション・チェンバアクセスハッチ	常設耐震／防止常設／緩和	重大事故等クラス２容器	D＋PSALL＋MSALL＋Ss	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）
					D＋PSAL＋MSAL＋Sd*	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）

注記　＊：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表4－9　許容応力（設計基準対象施設）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	104.5	ⅢAS	－	356	393
		ⅣAS	－	387	393

表4－10　許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	150	ⅣAS	－	381	393
	171	ⅣAS	－	380	393

5. 応力計算

5.1 応力評価点

サプレッション・チェンバアクセスハッチの形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表 5－1 及び図 5－1 に示す。

表 5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ５	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部（Ｐ５－１～Ｐ５－３）
Ｐ６	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部（Ｐ６－１～Ｐ６－３）

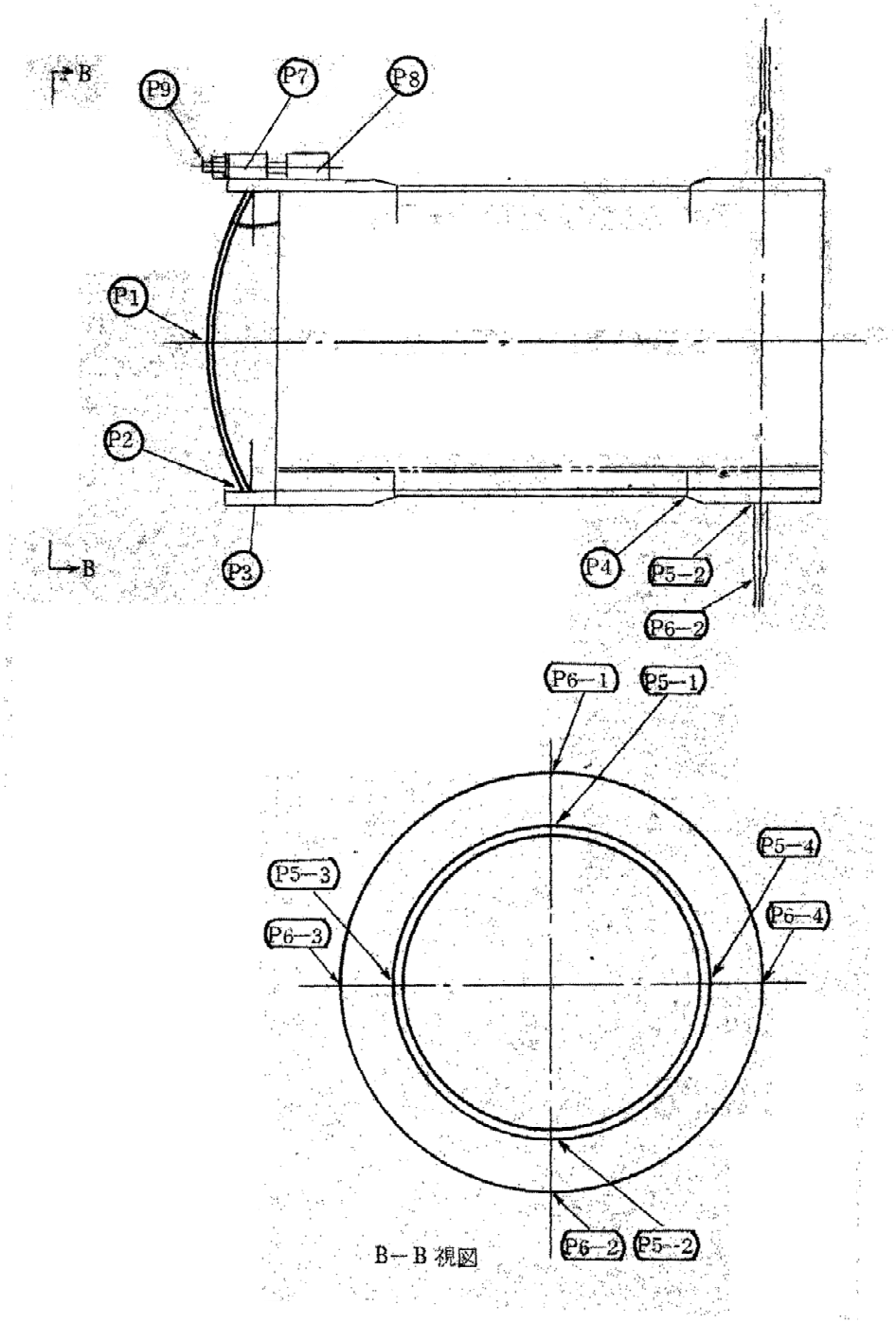
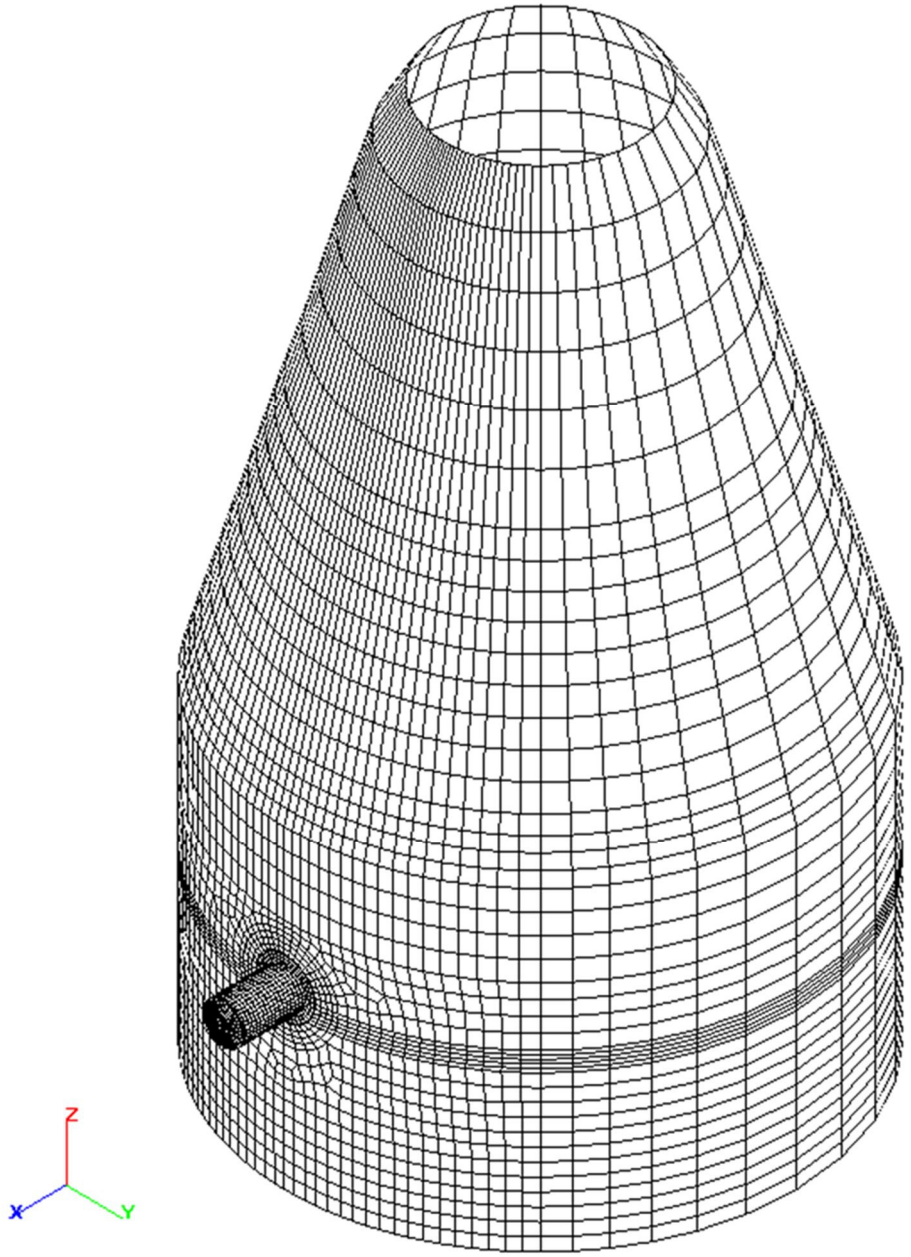


図 5－1　サプレッション・チェンバアクセスハッチの応力評価位置

5.2　計算方針

各荷重によりサプレッション・チェンバアクセスハッチに生じる応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。サプレッション・チェンバアクセスハッチの計算モデルを図5－2に示す。



節点数　4250
要素数　4186

図5－2　解析モデル

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

サプレッション・チェンバアクセスハッチの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果を表6－1に示す。

表4－7に示す荷重の組合せのうち，D＋P＋M＋Ss及び$\mathrm{D+P_L+M_L+S_d^*}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2) 許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する応力評価結果を表6－2に示す。

表4－7に示す荷重の組合せのうち，$\mathrm{D+P+M+S_d^*}$の評価について記載している。

表6－1　許容応力状態ⅣASに対する評価結果（D＋P＋M＋Ss又はD＋PL＋ML＋Sd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
サプレッション・チェンバアクセスハッチ	Ｐ５－１	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	108	387	○	①*
			一次＋二次応力	512	393	×*	①　*
			疲労評価	0.374	1	○	単位なし
	Ｐ５－２	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	123	387	○	①*
			一次＋二次応力	386	393	○	①*
	Ｐ５－３	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	120	387	○	①*
			一次＋二次応力	412	393	×*	①　*
			疲労評価	0.150	1	○	単位なし
	Ｐ６－１	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	138	387	○	①*
			一次＋二次応力	456	393	×*	①　*
			疲労評価	0.051	1	○	単位なし
	Ｐ６－２	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	111	387	○	②*
			一次＋二次応力	290	393	○	①*
	Ｐ６－３	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	176	387	○	①*
			一次＋二次応力	610	393	×*	①*
			疲労評価	0.283	1	○	単位なし

注記　＊：①：D＋P＋M＋Ss / ②：D＋PL＋ML＋Sdにおける結果を示す。

Ｐ５－１，Ｐ５－３及びＰ６－１，Ｐ６－３の一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005)PVB-3300に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

表６－２　許容応力状態ⅢASに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
サプレッション・チェンバアクセスハッチ	Ｐ５－１	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	62	356	○	
			一次＋二次応力	274	393	○	
	Ｐ５－２	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	71	356	○	
			一次＋二次応力	204	393	○	
	Ｐ５－３	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	69	356	○	
			一次＋二次応力	208	393	○	
	Ｐ６－１	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	79	356	○	
			一次＋二次応力	240	393	○	
	Ｐ６－２	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	54	356	○	
			一次＋二次応力	156	393	○	
	Ｐ６－３	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	104	356	○	
			一次＋二次応力	302	393	○	

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

サプレッション・チェンバアクセスハッチの重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ⅤASに対する評価

許容応力状態ⅤASに対する応力評価結果を表6－3に示す。

表4－8に示す荷重の組合せのうち，D＋PSALL＋MSALL＋Ss及びD＋PSAL＋MSAL＋Sdの評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

表６－３　許容応力状態ⅤASに対する評価結果（Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓｓ又はＤ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓｄ）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
サプレッション・チェンバアクセスハッチ	Ｐ５－１	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	221	380	○	②*
			一次＋二次応力	404	393	×*	①　*
			疲労評価	0.142	1	○	単位なし
	Ｐ５－２	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	263	380	○	②*
			一次＋二次応力	362	393	○	①*
	Ｐ５－３	サプレッション・チェンバアクセスハッチ本体と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	234	380	○	②*
			一次＋二次応力	436	393	×*	①　*
			疲労評価	0.199	1	○	単位なし
	Ｐ６－１	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	216	380	○	②*
			一次＋二次応力	378	393	○	①*
	Ｐ６－２	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	259	380	○	②*
			一次＋二次応力	286	393	○	①*
	Ｐ６－３	サプレッション・チェンバ円筒胴と補強板との結合部	一次膜応力＋曲げ応力	247	380	○	②*
			一次＋二次応力	668	393	×*	①　*
			疲労評価	0.428	1	○	単位なし

注記　＊：①：Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓｓ / ②：Ｄ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓｄにおける結果を示す。

Ｐ５－１，Ｐ５－３及びＰ６－３の一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005)PVB-3300に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-780　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-9-2-1-1　ダイヤフラム・フロアの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
1.1 基本方針 ····· 1
2. 形状及び主要寸法 ····· 2
3. 設計条件 ····· 3
3.1 設計荷重 ····· 3
3.2 材料及び許容応力 ····· 4
3.3 荷重の組合せ ····· 5
4. 応力評価 ····· 6
4.1 設計基準対象施設としてのダイヤフラムフロアの評価結果 ····· 8
5. 引用図書 ····· 12

1. 概要

本資料は，「実用発電用原子炉及びその付属設備の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第5条，第17条，並びにそれらの「実用発電用原子炉及びその付属設備の技術基準に関する規則の解釈」に基づき，ダイヤフラムフロアが設計上定める条件において要求される強度を確保していることを説明するものである。

なお，技術基準規則第17条において，設計基準対象施設に関しては，技術基準規則の要求に変更がないため，今回の申請において変更は行わない。

1.1 基本方針

ダイヤフラムフロアの応力評価は，発電用原子力設備規格（コンクリート製原子炉格納容器規格　ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＥ１-2003）（日本機械学会　2003年12月）（以下「ＣＣＶ規格」という。），鋼構造設計規準（日本建築学会　2005年改定），各種合成構造設計指針・同解説（日本建築学会　2010年改定）を適用して評価する。

2.　形状及び主要寸法

構造概要を図2－1に示す。

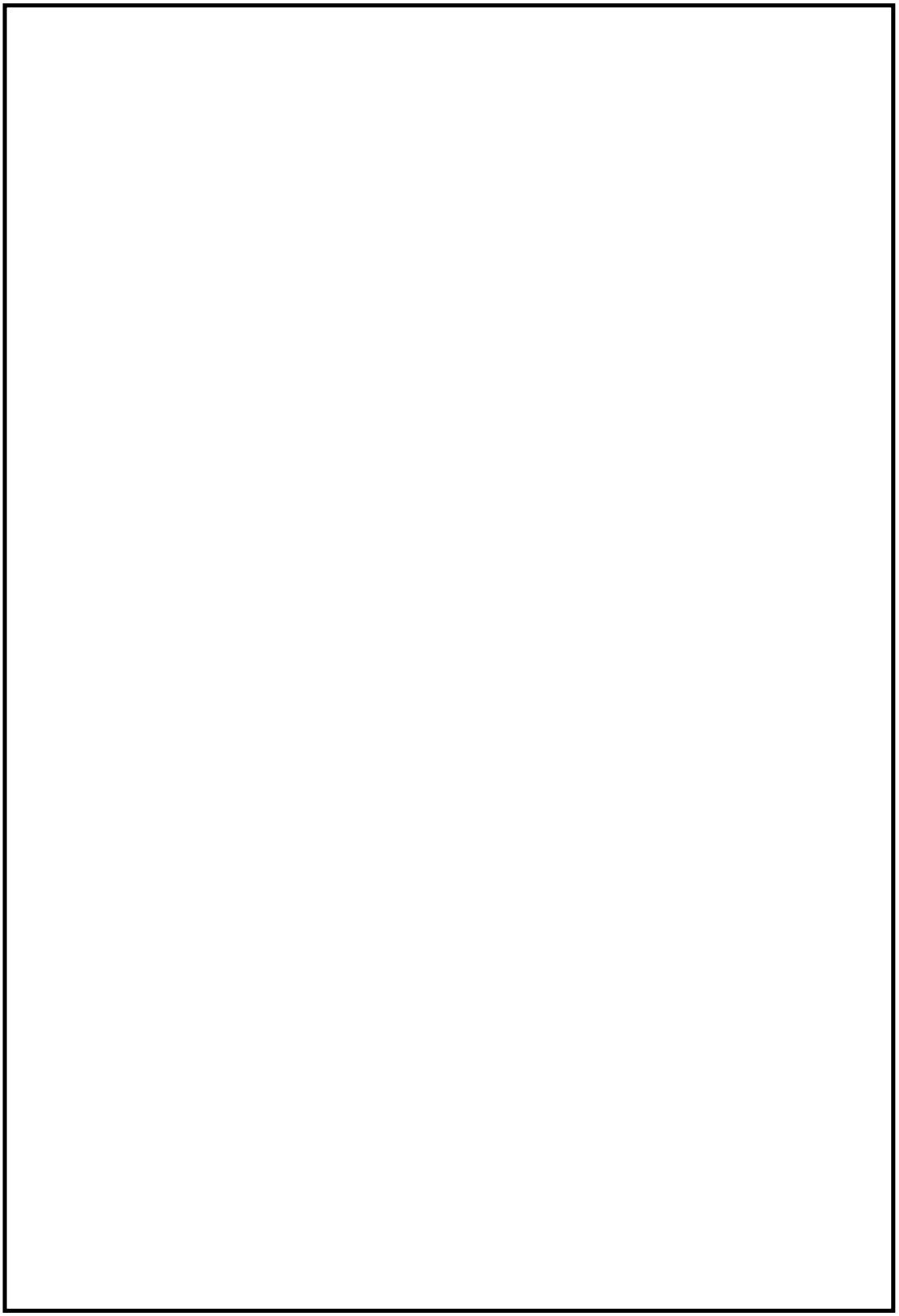


図 2－1　構造概要図（単位：mm）

3.　設計条件

3.1　設計荷重

設計基準対象施設の評価に用いる設計荷重を表3－1に示す。地震荷重は引用図書(1)「Ⅴ-2-1　耐震設計の基本方針」及び引用図書(2)「Ⅴ-2-3-2　炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」より設定する。

表3－1　設計荷重

荷重				鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄｽﾗﾌﾞに作用する荷重	直接鉄骨大ばりに作用する荷重	ｺﾗﾑｻﾎﾟｰﾄに作用する荷重
D	DL	死荷重		Ⅴ：スラブ用 Ⅴ：鉄骨はり用 [redacted]	Ⅴ:最大 [redacted]	Ⅴ: [redacted]
O	P_1	通常運転時	圧力	Ⅴ： [redacted]	－	－
	T_1		温度	上下面温度差 [redacted]	－	－
	H_1	逃し安全弁作動時空気泡圧力による荷重		R： [redacted] ﾍﾞﾝﾄ管１本	－	－
L	P_2	地震と組合せる異常時圧力		Ⅴ：10^{-1}年後 [redacted]	－	－
	T_2	地震と組合せる異常時温度		10^{-1}年後上下面温度差 [redacted]	－	－
S_d*	K_1	弾性設計用地震動S_dにより定まる地震力又は静的地震力		H：11400 kN　Ⅴ：鉛直震度±0.24	R_1：最大±1454 kN	－
S_s	K_2	基準地震動S_sにより定まる地震力		H：18600 kN　Ⅴ：鉛直震度±1.08	R_2：最大±2782 kN	－

注1：Ⅴは鉛直方向を示す。（下向きを正とする。）

注2：Hは水平方向を示す。

3.2　材料及び許容応力

設計基準強度　　Fc=27.4 N/mm^2

鉄筋　　SD345（SD35　ＪＩＳ　G3112）

各材料の許容応力度を表 3－2～表 3－6 に示す。

表 3－2　コンクリートの許容圧縮応力度

（単位：N/mm^2）

荷 重 状 態	応力状態1*1	応力状態*2
Ⅲ	18.2	20.5

注記　＊1：各荷重状態において，温度荷重により生じる応力を除いた応力が生じている状態。

＊2：各荷重状態において，応力が生じている状態。

表 3－3　コンクリートの許容せん断応力度

（単位：N/mm^2）

荷 重 状 態	許　容　値
Ⅲ	1.14

表3－4　鉄筋の許容応力度

（単位：N/mm^2）

荷 重 状 態	許　容　値	
	圧縮及び引張り	せん断
Ⅲ，Ⅳ	345	345

表3－5　鉄筋とコンクリートの許容ひずみ

荷 重 状 態	鉄筋		コンクリート
	引張り	圧縮	圧縮
Ⅳ	0.005	0.005	0.003

表3－6　構造用鋼材の許容応力度

（単位：N/mm²）

	材　料	板厚	F値	許 容 応 力 度
構造用鋼材	SM400B SS400	40≧	235	左記Fの値より求める。
		40＜	215	

3.3　荷重の組合せ

設計基準対象施設の評価に用いる（荷重状態Ⅲ，Ⅳ）の荷重組合せを表3－7に示す。

表3－7　荷重の組合せ

荷重状態	荷 重 時 名 称	地震荷重	荷重番号	荷 重 の 組 合 せ
Ⅲ	地　　震　　時	S_d^*	4	$DL+P_1+T_1+H_1+R_1+K_1$
Ⅳ	地　　震　　時	S_s	5	$DL+P_1+T_2+H_1+R_2+K_2$
	（異常＊＋地震）時	S_d^*	6	$DL+P_2+T_2+R_1+K_1$

注：異常時の圧力と温度と配管荷重については時間のずれを考慮する。

注記　＊：地震荷重と組み合わせる場合は，異常発生直後を除くその後の状態の荷重と組み合わせる。

4. 応力評価

ダイヤフラムフロアは鉛直方向を原子炉本体の基礎と柱によって支持され，水平方向はシアラグによって支持されている軸対称形の構造をしている。解析では，鉄筋コンクリートスラブ，鉄骨の大梁，小梁，柱を含む 360° 全体をモデル化した。非対称形の荷重に対応できるように三次元的にモデル化し有限要素法による弾性解析を行っている。

鉄筋コンクリートは，有限要素分割は四辺形及び三角形を用いることで板の曲げと膜力を同時に考慮している。また，鉄骨の大梁，小梁，柱ははり要素を用いて，軸力，曲げ，せん断力を同時に評価できるようにしている。

解析モデル概要図を図 4－1 に示す。

解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

解析に用いる材料の物性値は次のとおりとする。

コンクリートのヤング係数	$E_c = 2.43 \times 10^7$ kN/m^2
コンクリートのせん断弾性係数	$G_c = 1.04 \times 10^7$ kN/m^2
コンクリートのポアソン比	$\nu_c = 0.167$
コンクリートの線膨張係数	$\alpha_c = 1.0 \times 10^{-5}$ /℃
鉄筋コンクリートの単位体積質量	$\gamma_c = 24$ kN/m^3
鉄骨のヤング係数	$E_s = 2.06 \times 10^8$ kN/m^2
鉄骨のポアソン比	$\nu_s = 0.3$
鉄骨の線膨張係数	$\alpha_s = 1.0 \times 10^{-5}$ /℃
鉄骨の単位体積質量	$\gamma_s = 77$ kN/m^3

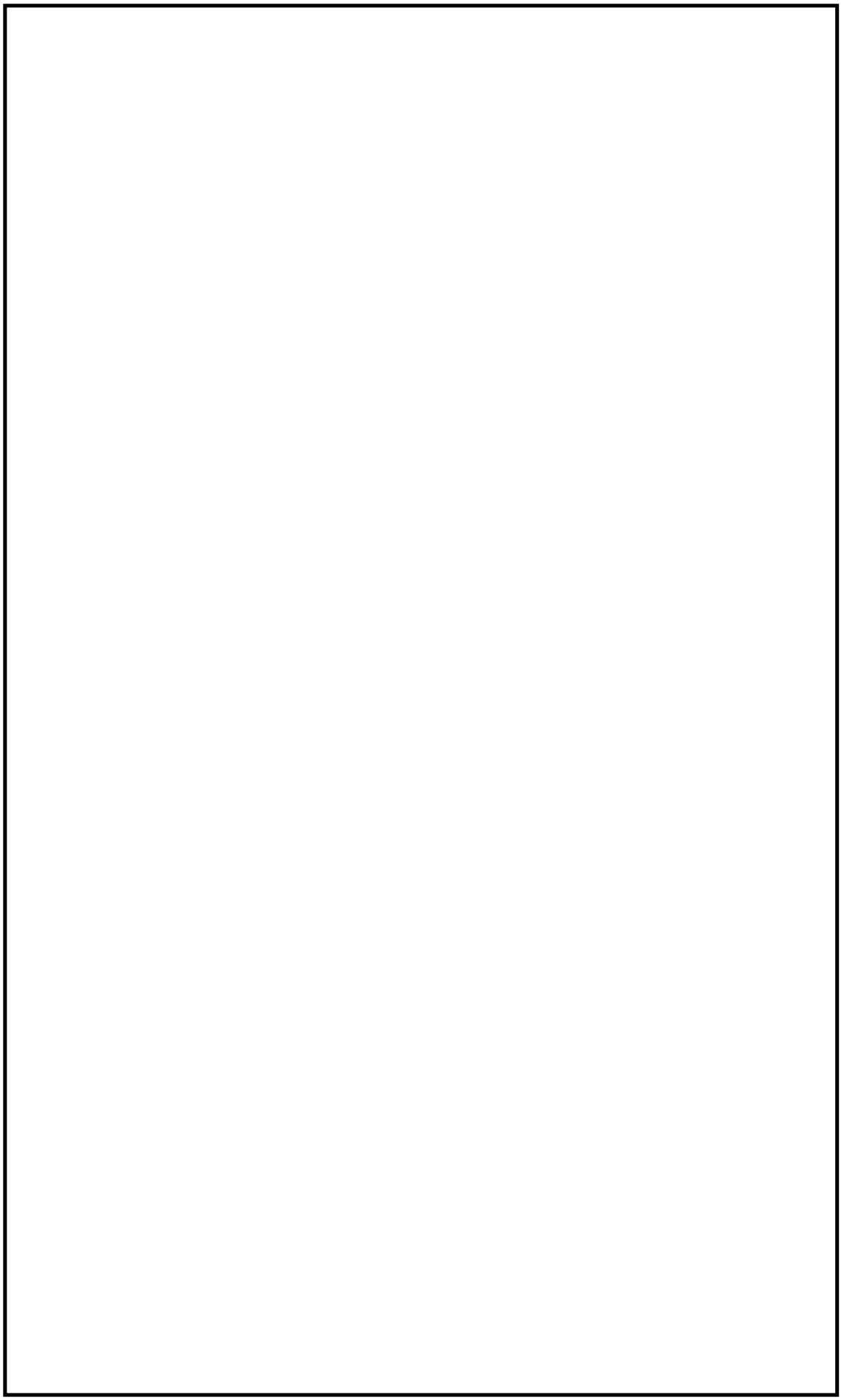


図 4－1　解析モデル概要図

4.1　設計基準対象施設としてのダイヤフラムフロアの評価結果

(1)　鉄筋コンクリート部

鉄筋コンクリート部の解析結果とそれに基づく断面算定結果を表 4－1～表 4－6 に示す。

表 4－1 荷重状態Ⅲの軸力及び曲げモーメントによる応力検討結果（円周方向）

箇所名	荷重状態	検討応力	荷重番号	応力状態	設計応力		a_{tx} (mm^2/m)	引張応力及び圧縮応力			許容値			判定
					N_x (kN/m)	M_x (kN·m/m)		$c\sigma c$ N/mm^2	$s\sigma c$ N/mm^2	$s\sigma t$ N/mm^2	$cf c$ N/mm^2	$sf c$ N/mm^2	$sf t$ N/mm^2	
No.1	Ⅲ	$c\sigma c$	4	2	−107	−9	3380	−0.5	−6.5	−0.3	−20.5	−345	345	可
	Ⅲ	$s\sigma t$	4	2	−98	−9	3380	−0.5	−6.2	0.2	−20.5	−345	345	可
No.2	Ⅲ	$c\sigma c$	4	2	−2699	103	16900	−4.3	−60.2	−31.2	−20.5	−345	345	可
	Ⅲ	$s\sigma t$	4	2	3187	103	16900	0.0	73.8	114.8	−20.5	−345	345	可
No.3	Ⅲ	$c\sigma c$	4	2	−587	−136	13520	−2.8	−34.1	15.5	−20.5	−345	345	可
	Ⅲ	$s\sigma t$	4	2	485	−136	13520	−1.4	−11.1	51.6	−20.5	−345	345	可
No.4	Ⅲ	$c\sigma c$	4	2	−638	−170	13520	−3.4	−41.0	22.5	−20.5	−345	345	可
	Ⅲ	$s\sigma t$	4	2	672	−170	13520	−1.6	−12.4	67.2	−20.5	−345	345	可

注１：□ は検討ひずみの最大値を示す。

表 4－2 荷重状態Ⅳの軸力及び曲げモーメントによる応力検討結果（円周方向）

箇所名	荷重状態	検討応力	荷重番号	応力状態	設計応力		a_{tx} (mm^2/m)	引張ひずみ及び圧縮ひずみ			許容値			判定
					N_x (kN/m)	M_x (kN·m/m)		$c\varepsilon c$ ($\times10^6$)	$s\varepsilon c$ ($\times10^6$)	$s\varepsilon t$ ($\times10^6$)	$c\varepsilon cu$ ($\times10^6$)	$s\varepsilon cu$ ($\times10^6$)	$s\varepsilon tu$ ($\times10^6$)	
No.1	Ⅳ	$s\varepsilon t$	5	1	15	−4	3380	−6	−2	28	−3000	−5000	5000	可
	Ⅳ	$s\varepsilon t$	6	1	8	−4	3380	−8	−4	26	−3000	−5000	5000	可
No.2	Ⅳ	$s\varepsilon t$	5	1	5253	178	16900	0	585	932	−3000	−5000	5000	可
	Ⅳ	$s\varepsilon t$	6	1	2941	114	16900	0	314	536	−3000	−5000	5000	可
No.3	Ⅳ	$s\varepsilon t$	5	1	1004	−226	13520	−126	−55	455	−3000	−5000	5000	可
	Ⅳ	$s\varepsilon t$	6	1	560	−130	13520	−75	−34	259	−3000	−5000	5000	可
No.4	Ⅳ	$s\varepsilon t$	5	1	1207	−281	13520	−161	−73	558	−3000	−5000	5000	可
	Ⅳ	$s\varepsilon t$	6	1	673	−164	13520	−97	−46	320	−3000	−5000	5000	可

注１：□ は検討ひずみの最大値を示す。

表 4－3 面外せん断力による検討結果（円周方向）

箇所名	荷重状態	荷重番号	応力状態	設計応力		Q_x (N/mm)	許容値	判定
				M_x (kN·m/m)	Q_x (kN/m)		Q_{A1} (N/mm)	
No.1	Ⅲ	4	2	−10	11	11	339	可
	Ⅳ	5	1	−4	16	16	339	可
No.2	Ⅲ	4	2	103	−256	256	5400	可
	Ⅳ	5	1	178	−361	361	5400	可
No.3	Ⅲ	4	2	−136	751	751	3780	可
	Ⅳ	5	1	−227	1292	1292	3780	可
No.4	Ⅲ	4	2	−171	−184	184	3780	可
	Ⅳ	5	1	−282	−304	304	3780	可

注1：□ は面外せん断力の最大値を示す。

表 4－4 荷重状態Ⅲの軸力及び曲げモーメントによる応力検討結果（半径方向）

箇所名	荷重状態	検討応力	荷重番号	応力状態	設計応力		a_{ty}	引張応力及び圧縮応力			許容値			判定
					N_y (kN/m)	M_y (kN·m/m)	(mm^2/m)	$_c\sigma_c$ N/mm^2	$_s\sigma_c$ N/mm^2	$_s\sigma_t$ N/mm^2	$_cf_c$ N/mm^2	$_sf_c$ N/mm^2	$_sf_t$ N/mm^2	
No.1	Ⅲ	$_c\sigma_c$	4	2	13	32	3380	−1.2	−11.0	34.1	−20.5	−345	345	可
	Ⅲ	$_s\sigma_t$	4	2	88	32	3380	−1.0	−7.1	45.0	−20.5	−345	345	可
No.2	Ⅲ	$_c\sigma_c$	4	2	−295	9	16900	−0.5	−6.3	−3.8	−20.5	−345	345	可
	Ⅲ	$_s\sigma_t$	4	2	382	9	16900	0.0	9.6	13.1	−20.5	−345	345	可
No.3	Ⅲ	$_c\sigma_c$	4	2	−89	−226	13520	−3.5	−39.3	54.2	−20.5	−345	345	可
	Ⅲ	$_s\sigma_t$	4	2	38	−226	13520	−3.4	−36.6	58.5	−20.5	−345	345	可
No.4	Ⅲ	$_c\sigma_c$	4	2	−291	−92	13520	−1.8	−21.2	13.8	−20.5	−345	345	可
	Ⅲ	$_s\sigma_t$	4	2	242	−92	13520	−1.1	−9.8	31.9	−20.5	−345	345	可

注１：□ は検討ひずみの最大値を示す。

表 4－5 荷重状態Ⅳの軸力及び曲げモーメントによる応力検討結果（半径方向）

箇所名	荷重状態	検討応力	荷重番号	応力状態	設計応力		a_{ty}	引張ひずみ及び圧縮ひずみ			許容値			判定
					N_y (kN/m)	M_y (kN·m/m)	(mm^2/m)	$_c\varepsilon_c$ ($\times10^6$)	$_s\varepsilon_c$ ($\times10^6$)	$_s\varepsilon_t$ ($\times10^6$)	$_c\varepsilon_{cu}$ ($\times10^6$)	$_s\varepsilon_{cu}$ ($\times10^6$)	$_s\varepsilon_{tu}$ ($\times10^6$)	
No.1	Ⅳ	$_s\varepsilon_t$	5	1	124	63	3380	−119	−56	389	−3000	−5000	5000	可
	Ⅳ	$_s\varepsilon_t$	6	1	68	37	3380	−71	−34	227	−3000	−5000	5000	可
No.2	Ⅳ	$_s\varepsilon_t$	5	1	605	19	16900	0	70	106	−3000	−5000	5000	可
	Ⅳ	$_s\varepsilon_t$	6	1	339	12	16900	0	38	61	−3000	−5000	5000	可
No.3	Ⅳ	$_s\varepsilon_t$	5	1	18	−395	13520	−375	−268	490	−3000	−5000	5000	可
	Ⅳ	$_s\varepsilon_t$	6	1	14	−222	13520	−209	−149	277	−3000	−5000	5000	可
No.4	Ⅳ	$_s\varepsilon_t$	5	1	490	−156	13520	−107	−59	278	−3000	−5000	5000	可
	Ⅳ	$_s\varepsilon_t$	6	1	274	−90	13520	−62	−35	159	−3000	−5000	5000	可

注１：□ は検討ひずみの最大値を示す。

表 4－6 面外せん断力による検討結果（半径方向）

箇所名	荷重状態	荷重番号	応力状態	設計応力		Q_y (N/mm)	許容値	判定
				M_y (kN·m/m)	Q_y (kN/m)		Q_{A1} (N/mm)	
No.1	Ⅲ	4	2	33	−26	26	339	可
	Ⅳ	5	1	64	−39	39	339	可
No.2	Ⅲ	4	2	9	13	13	5400	可
	Ⅳ	5	1	19	20	20	5400	可
No.3	Ⅲ	4	2	−227	−477	477	3780	可
	Ⅳ	5	1	−396	−846	846	3780	可
No.4	Ⅲ	4	2	−93	302	302	3780	可
	Ⅳ	5	1	−157	529	529	3780	可

注1：□ は面外せん断力の最大値を示す。

(2) 鉄骨部

鉄骨部の解析結果とそれに基づく評価結果を表 4－7～表 4－11 に示す。

表 4－7 大梁の水平方向荷重に対する評価結果

荷重組合せ	M (kN･m)	Q (kN)	σ b (N/mm²)	τ (N/mm²)	組合せ (N/mm²)	許容値(N/mm²)	
						せん断	曲げ組合せ
(4)	144.1	1440.6	37.0	33.4	68.7	135	235
(5)	222.9	2228.5	57.2	51.6	106.2		
(6)	124.7	1247.5	32.1	28.9	59.5		

表 4－8 大梁の鉛直方向荷重に対する評価結果

荷重組合せ	M (kN･m)	Q (kN)	σ b (N/mm²)	τ (N/mm²)	組合せ (N/mm²)	許容値(N/mm²)	
						せん断	曲げ組合せ
(4)	752.8	995.3	31.3	31.1	62.3	135	235
(5)	1105.7	1547.9	46.0	48.4	95.7		
(6)	723.1	1000.1	30.1	31.3	62.0		

表 4－9 小梁の評価結果

荷重組合せ	M (kN･m)	Q (kN)	σ b (N/mm²)	τ (N/mm²)	組合せ (N/mm²)	許容値(N/mm²)	
						せん断	曲げ組合せ
(4)	627.7	380.1	70.0	26.4	83.7	135	235
(5)	1019.5	645.1	113.6	44.8	137.6		
(6)	646.4	379.3	72.0	26.4	85.3		

表 4－10 柱の評価結果

荷重 組合せ	N (kN)	断面積 (mm^2)	σ c (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)
(4)	2349.8	52440	44.9	144
(5)	3426.8		65.4	
(6)	2355.1		45.0	

表 4－11 シアコネクタの評価結果

荷重 組合せ	F (kN)	T (kN/本)	本数	許容値 (kN/本)
(4)	1440.6	40.1	36	82
(5)	2228.5	61.9		
(6)	1247.5	34.7		

以上より，発生応力は許容値以下であり健全性を確認することができた。

5. 引用図書

(1) 「Ⅴ-2-1 耐震設計の基本方針」

(2) 「Ⅴ-2-3-2 炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」

(3) 「Ⅴ-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-781　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-3-4-3-3　制御棒駆動機構ハウジング支持金具の耐震性についての計算書

目　　次

1.　概要 ····· 1
2.　構造説明 ····· 2
2.1　構造計画 ····· 2
2.2　評価方針 ····· 3
3.　形状及び主要寸法 ····· 4
4.　設計条件 ····· 5
4.1　設計荷重 ····· 5
4.2　材料及び許容応力 ····· 6
5.　応力計算 ····· 7
5.1　応力評価点 ····· 7
5.2　応力計算方法 ····· 8
6.　評価結果 ····· 10

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，制御棒駆動機構ハウジング（以下「ＣＲＤハウジング」という）支持金具が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価はＣＲＤハウジング支持金具の応力評価により行う。

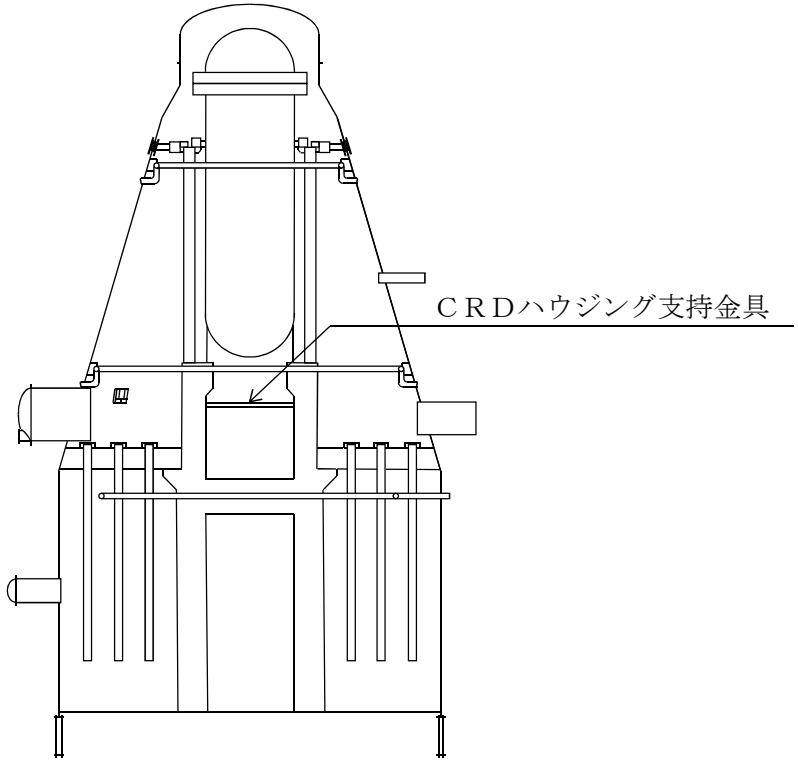
ＣＲＤハウジング支持金具は設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に分類され，以下，基準地震動の策定に伴う耐震評価を行う。

2.　構造説明

2.1　構造計画

ＣＲＤハウジング支持金具の構造計画を表 2－1 に示す。

表 2－1　構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
・制御棒駆動機構ハウジング支持金具は原子炉本体の基礎に支持される。	・制御棒駆動機構ハウジング支持金具は鋼製の支持構造物である。 ・制御棒駆動機構ハウジングが完全に破断またはフランジボルトが破断した場合に,制御棒を含めた駆動機構全体の落下を制限する。 ・制御棒駆動機構ハウジングの地震時横揺れを防止する。	

2.2　評価方針

ＣＲＤハウジング支持金具は，原子炉圧力容器付属構造物として地震荷重に対する機能維持評価を行う。なお，強度評価部位はレストレントビーム及びレストレントビームボルトとする。

また，設計荷重として，地震時の鉛直荷重，水平地震荷重とし，発生応力が許容応力を下回ることにより，地震荷重に対する機能維持を確認する。許容応力は，原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編　ＪＥＡＧ４６０１・補－1984）（日本電気協会　電気技術基準調査委員会　昭和 59 年 9 月）による。

3. 形状及び主要寸法

ＣＲＤハウジング支持金具各部の形状及び主要寸法を図 3－1 に示す。

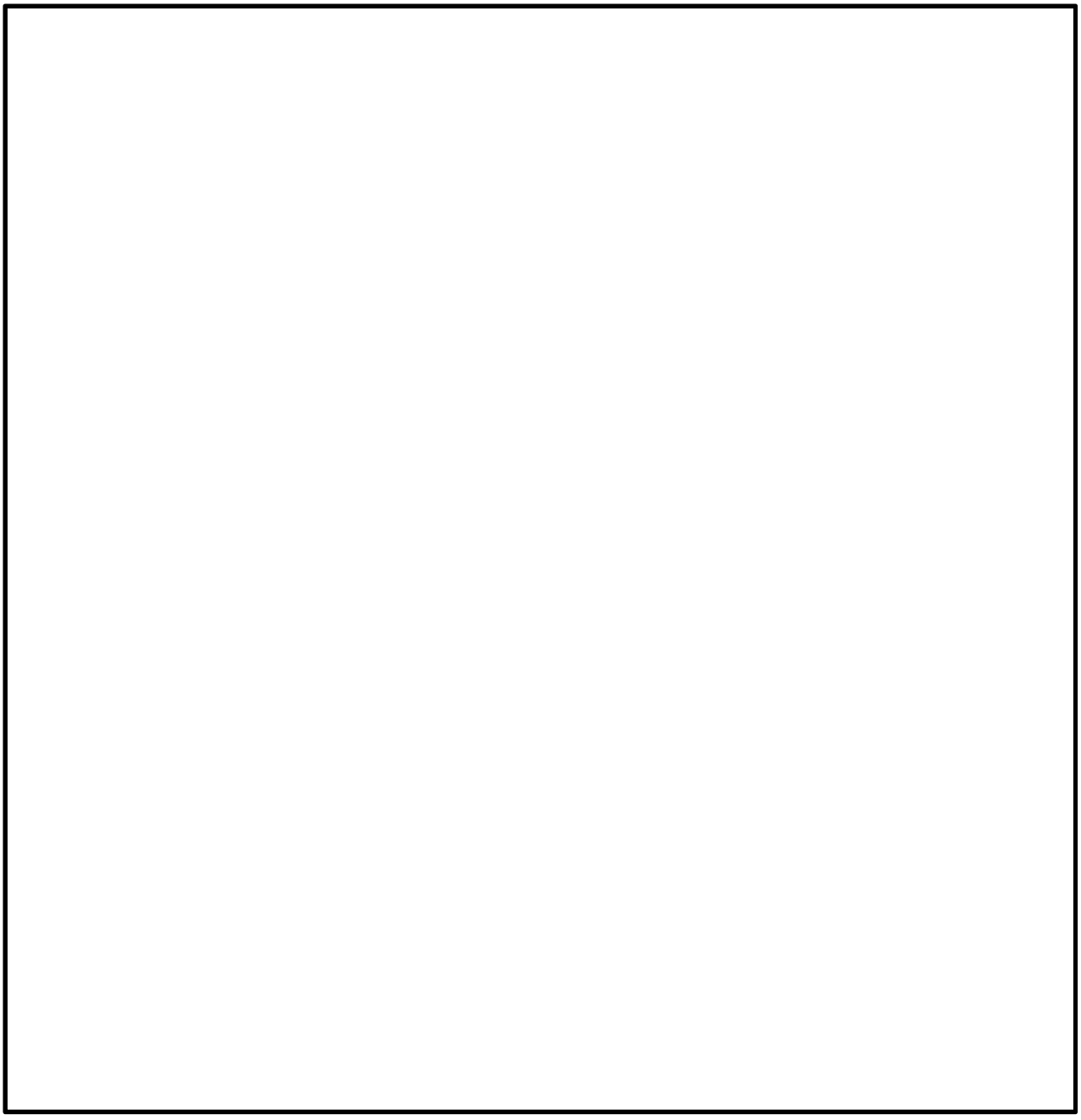


図 3－1　ＣＲＤハウジング支持金具の形状及び主要寸法（単位：㎜）

4.　設計条件

4.1　設計荷重

(1)　死荷重

レストレントビームの死荷重W_D

(2)　地震荷重

レストレントビームの設計震度を表 4－1 に，レストレントビームのばね反力による水平方向地震荷重を表 4－2 に示す。

表 4－1　設計震度

方向	Ｓｄ*	Ｓｓ
鉛直方向C_V		
水平方向C_H		

表 4－2　弾性設計用地震動Ｓｄ又は静的地震力及び基準地震動Ｓｓによるばね反力による水平方向地震荷重

地震荷重	Ｓｄ*	Ｓｓ
水平方向地震荷重Ｈ(N)		

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

レストレントビーム	SM400B
レストレントビーム結合ボルト	F10T

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4－3 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力を表 4－4 に示す。

表4－3　荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉本体	原子炉圧力容器付属構造物	ＣＲＤハウジング支持金具	Ｓ	－	$D+P_D+M_D+S_d^*$	ⅢＡＳ
					$D+P_D+M_D+S_s$	ⅣＡＳ

表4－4　許容応力状態に対する許容応力

（単位：MPa）

材料	許容応力状態	基準応力 F	許容応力		
			引張応力 f_t	曲げ応力 f_b	せん断応力 f_s
SM400B	ⅢＡＳ	201	－	201	－
	ⅣＡＳ	241	－	241	－
F10T	ⅢＡＳ	700	525	－	404
	ⅣＡＳ		394	－	404

5. 応力計算

5.1 応力評価点

応力評価点を表 5－1 及び図 5－1 に示す。

表 5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
A	レストレントビーム一般部
B	レストレントビーム端部
C	レストレントビームボルト

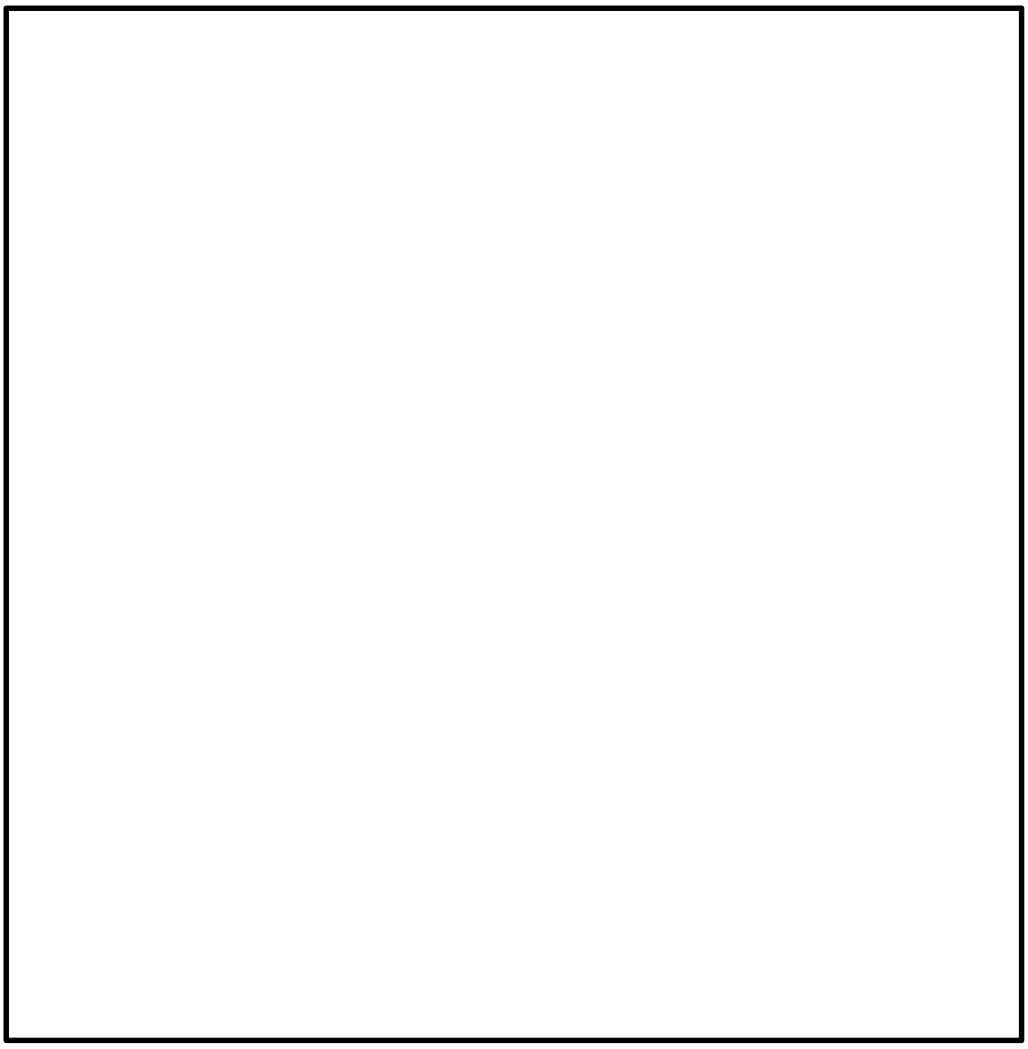


図 5－1 応力評価点（単位：mm）

5.2　応力計算方法

4章で示した荷重によりレストレントビームに生じる応力は，次式により計算する。

(1)　荷重

図5－2に示す両端支持ばりとして計算する。自重による鉛直荷重も考慮する。

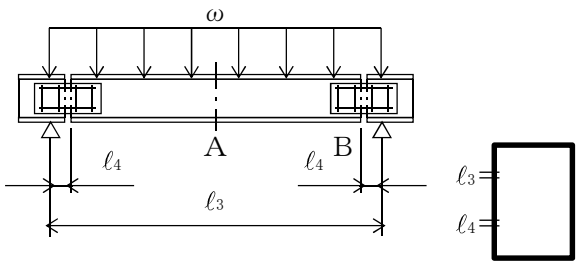


図5－2　計算モデル（単位：mm）

a.　分布荷重

(a)　死荷重W_Dによる等分布荷重

$$\omega_D = \frac{W_D}{L}$$

ここで，

L：レストレントビーム全長＝

(b)　水平方向地震による等分布荷重

$$\omega_H = \omega_1$$

ここで，

ω_1：水平方向地震荷重Hによる等分布荷重

$$\omega_1 = \frac{H}{\ell_3}$$

(c)　鉛直方向地震による等分布荷重

$$\omega_V = \omega_D \cdot (1 + C_V)$$

b.　A点での曲げモーメント

(a)　水平方向地震によるモーメント

$$M_{HA} = \frac{\omega_H \ell_3^2}{8}$$

(b)　鉛直方向地震によるモーメント

$$M_{VA} = \frac{\omega_V \ell_3^2}{8}$$

c.　B点での曲げモーメント

(a)　水平方向地震によるモーメント

$$M_{HB} = \frac{\omega_H \ell_4}{2}(\ell_3 - \ell_4)$$

(b) 鉛直地震によるモーメント

$$M_{VB}=\frac{\omega_V \ell_4}{2}(\ell_3-\ell_4)$$

(2) 応力

a. A点での曲げ応力

$$\sigma_{bA}=\frac{M_{HA}}{Z_{HA}}+\frac{M_{VA}}{Z_{VA}}$$

ここで,

$Z_{HA}=$

$Z_{VA}=$

b. B点での曲げ応力

$$\sigma_{bB}=\frac{M_{HB}}{Z_{HB}}+\frac{M_{VB}}{Z_{VB}}$$

ここで,

$Z_{HB}=$

$Z_{VB}=$

c. ボルトの引張応力

$$\sigma_t=\frac{F_1}{n_1 A}$$

ここで,

F_1：ボルトの引張力

$F_1=\omega_V \cdot \ell_3$

d ：ボルトの呼び径＝

A：ボルト断面積＝$\pi/4 \cdot d^2$＝

n_1：引張を受けるボルト本数＝

d. ボルトのせん断応力

$$\tau=\frac{F_2}{n_2 A}$$

ここで,

F_2：ボルトのせん断力

$F_2=\omega_H \cdot \ell_3/2$

n_2：せん断を受けるボルト本数＝

6.　評価結果

ＣＲＤハウジング支持金具の耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ⅣＡＳに対する評価

許容応力状態ⅣＡＳに対する応力評価結果を表 6－1 に示す。

表 4－3 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋P_D＋M_D＋Ｓｓの評価について記載している。

(2)　許容応力状態ⅢＡＳに対する評価

許容応力状態ⅢＡＳに対する応力評価結果を表 6－2 に示す。

表 4－3 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋P_D＋M_D＋Ｓｄ*の評価について記載している。

表６－１　許容応力状態ⅣＡＳに対する応力評価結果（Ｄ＋Ｐ$_{D}$＋Ｍ$_{D}$＋Ｓｓ）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣＡＳ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				(MPa)	(MPa)		
ＣＲＤハウジング支持金具	Ａ	レストレントビーム一般部	曲げ応力	149	241	○	
	Ｂ	レストレントビーム端部	曲げ応力	89	241	○	
	Ｃ	レストレントビームボルト	引張応力	3	394	○	
			せん断応力	213	404	○	

表 6－2　許容応力状態ⅢASに対する応力評価結果（D＋P_D＋M_D＋Sd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				(MPa)	(MPa)		
ＣＲＤハウジング支持金具	A	レストレントビーム一般部	曲げ応力	91	201	○	
	B	レストレントビーム端部	曲げ応力	54	201	○	
	C	レストレントビームボルト	引張応力	2	525	○	
			せん断応力	128	404	○	

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-775　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

V-2-9-2-4　下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 7
4.1 設計荷重 ····· 7
4.2 材料及び許容応力 ····· 10
5. 応力計算 ····· 12
5.1 応力評価点 ····· 12
5.2 計算方針 ····· 13
6. 評価結果 ····· 24

1. 概要

本計算書は，添付書類「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの地震応答解析，応力評価により行う。

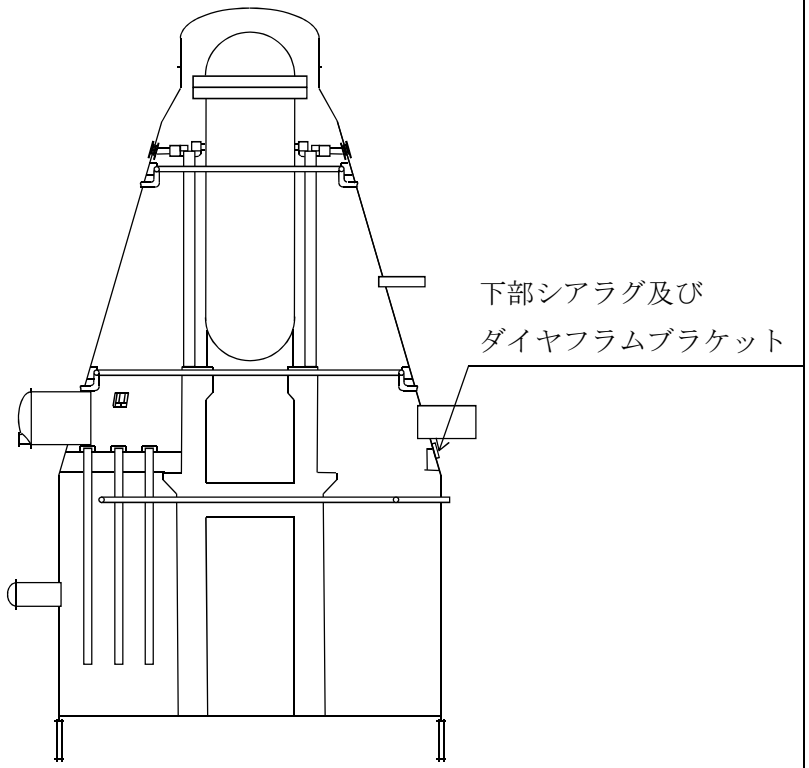
下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットは設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に分類され，以下，基準地震動の策定に伴う耐震評価を行う。

2.　構造説明

2.1　構造計画

下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの構造計画を表 2－1 に示す。

表 2－1　構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
・メイルシアラグは原子炉格納容器胴に溶接され，フィメイルシアラグは原子炉建屋にアンカーボルトで固定される。	・ドライウェルの水平地震力をシアラグにより，原子炉建屋に伝達する。	

2.2　評価方針

(1)　下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの応力評価は，東海第二発電所　昭和 48 年 4 月 9 日付け 47 公第 12076 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。各荷重による応力は，実績のある三次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，「V-5-1　計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3.　形状及び主要寸法

原子炉格納容器の下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの形状及び主要寸法を図 3－1，図 3－2 及び図 3－3 に示す。

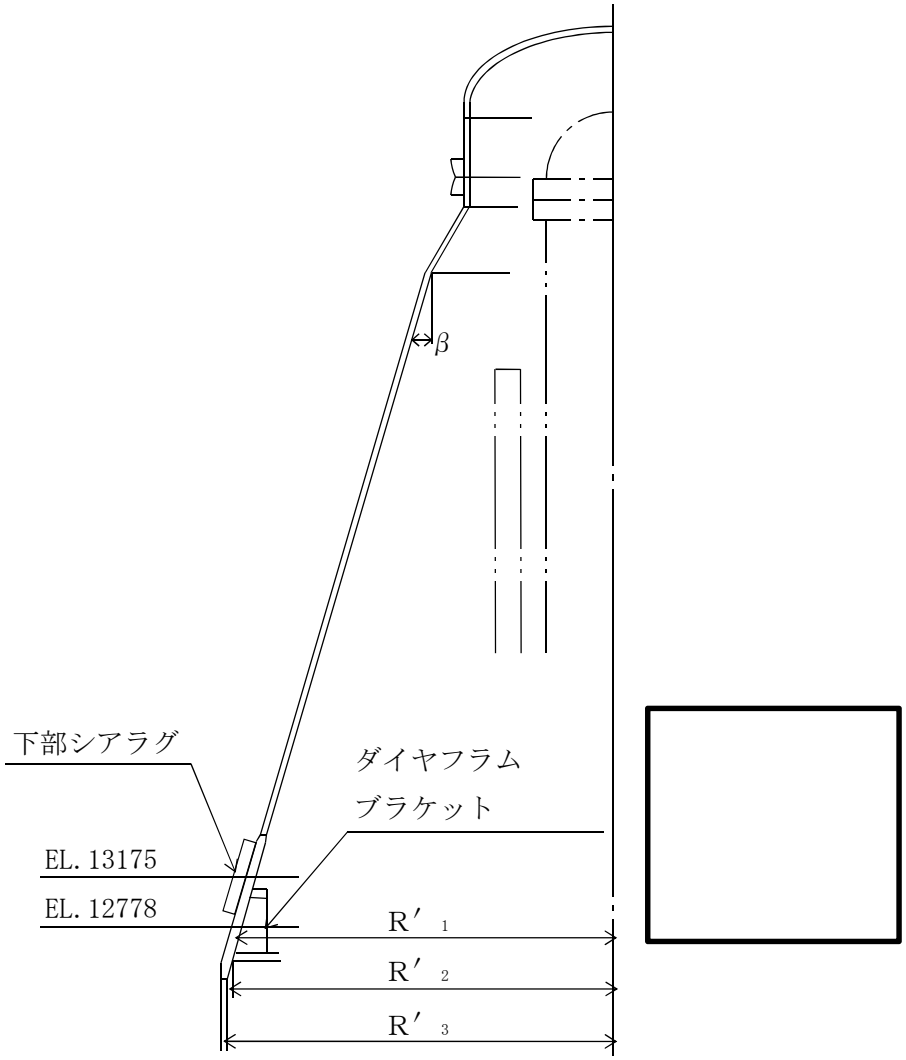


図 3－1　下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの形状及び主要寸法（単位：mm）

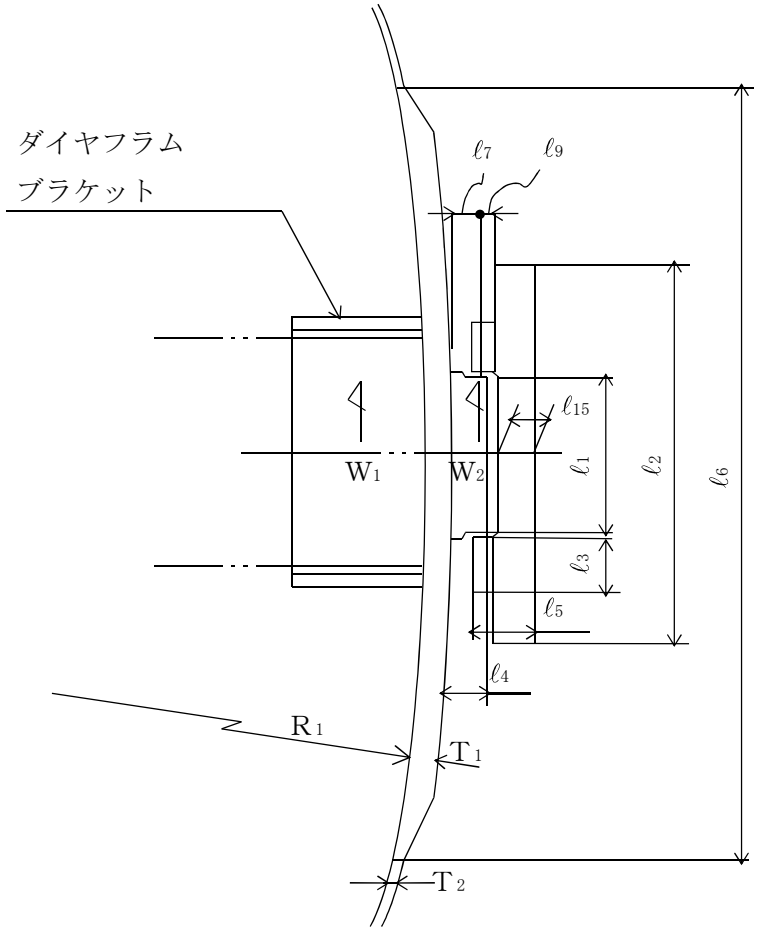


図 3－2　下部シアラグの形状及び主要寸法（単位：mm）

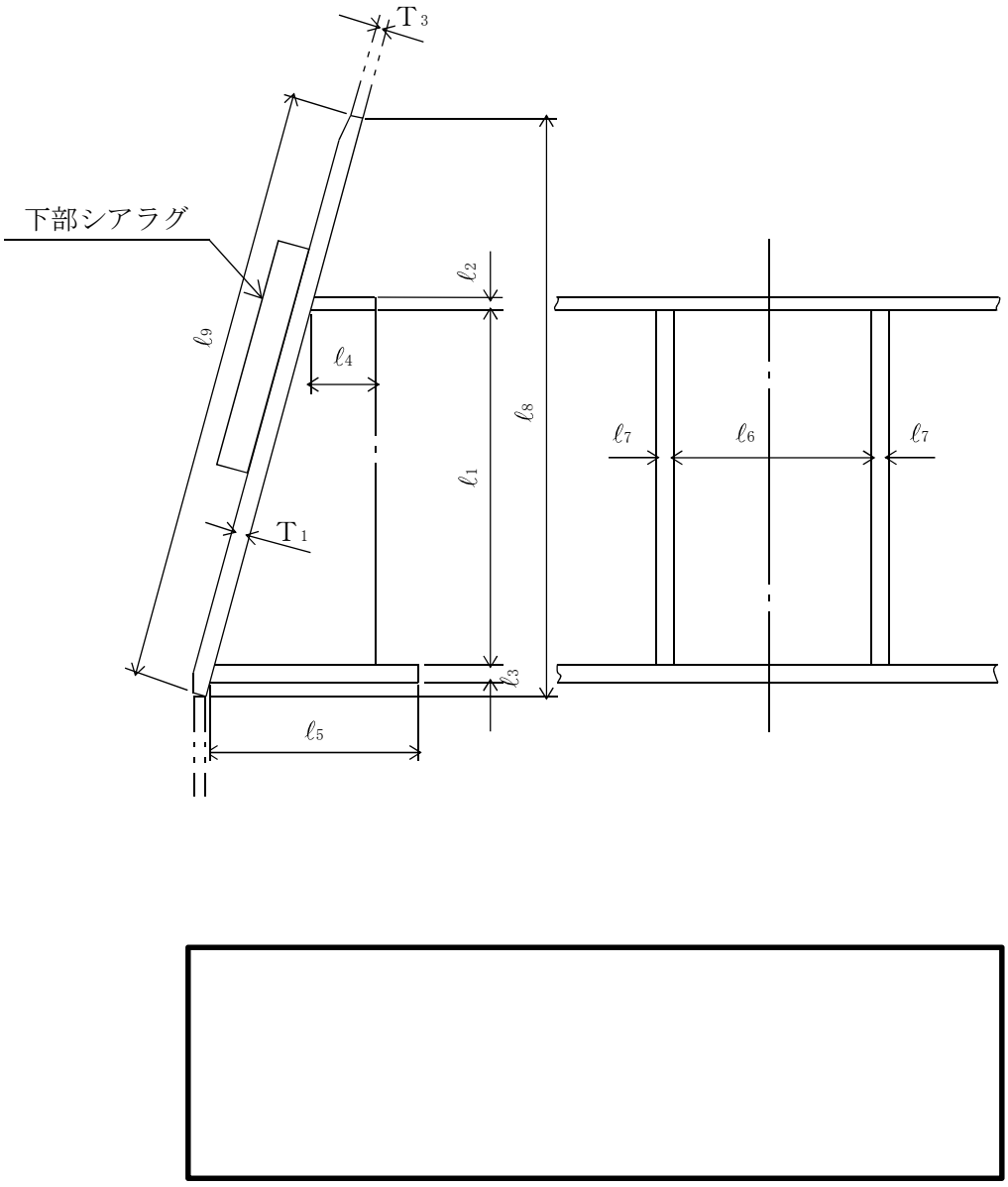


図 3－3　ダイヤフラムブラケットの形状及び主要寸法（単位：mm）

4.　設計条件

4.1　設計荷重

(1)　設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧 P_D　　310 kPa

外圧 P_{DO}　　14 kPa

温度 T_D　　171 ℃

(2)　冷却材喪失事故後の最大内圧 P_{DBA}　255 kPa

(3)　ジェット反力

下部シアラグ全体に作用するジェット反力 W_j　2.68×10^6 N

下部シアラグ及びダイヤフラムフロアと水平荷重の作用方向の関係を図 4－1 に示す。水平荷重が加わる場合の各位置における荷重の分配は次式で示される。

$$W_{1j}=\frac{1}{9}\cdot W_j=$$ [redacted]

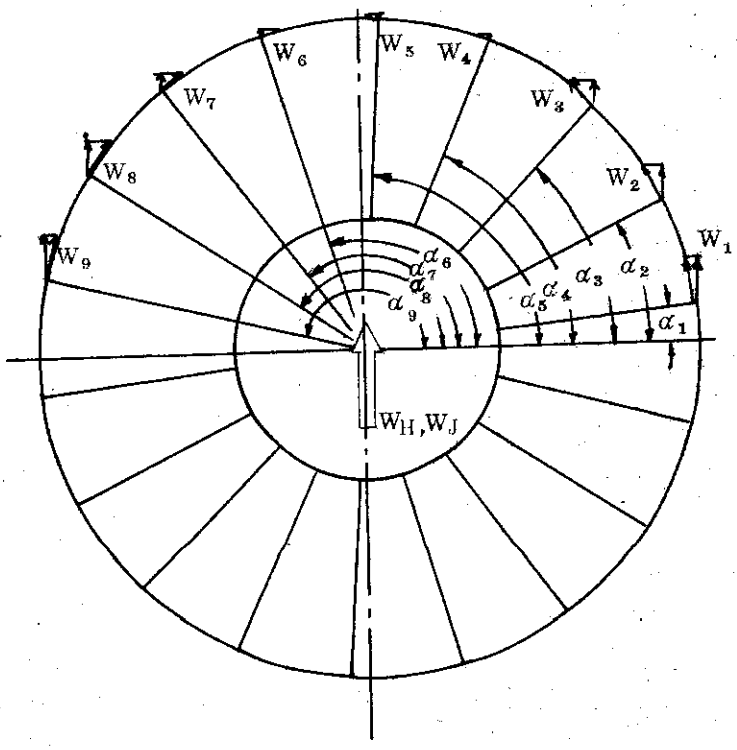


図 4－1　荷重の分配

(4)　地震荷重

a.　原子炉格納容器及び原子炉建屋からの地震荷重

原子炉格納容器及び原子炉建屋からの地震荷重を表 4－1 に示す。

表 4－1　原子炉格納容器及び原子炉建屋からの水平方向地震荷重

（単位：N）

地震荷重	Ｓｄ*	Ｓｓ
水平方向地震荷重W_{HS}		
$W_{1S}=\frac{1}{9}\cdot W_{HS}$		

b.　ダイヤフラムフロアからの地震荷重

ダイヤフラムフロアからの地震荷重を表 4－2 に示す。

表 4－2　ダイヤフラムフロアからの水平方向地震荷重

（単位：N）

地震荷重	Ｓｄ*	Ｓｓ
水平方向地震荷重W_{HD}		
$W_{1D}=\frac{1}{9}\cdot W_{HD}$		

(5)　設計荷重

荷重は水平方向地震荷重とジェット反力を考える。原子炉格納容器内部にある部材はダイヤフラムフロアから水平方向地震荷重，ジェット反力，外側にある部材は原子炉建屋からの水平方向地震荷重がそれぞれの部材の重心に加わるものとする。安全側の計算として，内側，外側の荷重が同時に加わるものとするならば 1 組当りのシアラグ及びダイヤフラムブラケットに加わる設計荷重は 4.1(3)，(4)項より表 4－3 に示すように与えられる。

表 4－3　シアラグ及びダイヤフラムブラケットに加わる設計荷重

荷重条件 / 部材	Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｓ	Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｄ*
シアラグ		
ダイヤフラムブラケット		
合計		

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

ドライウェル円錐部シェル	(SGV480 相当)
メイルシアラグ	(SGV480 相当)
フィメイルシアラグ	(SGV480 相当)
ダイヤフラムブラケット	(SGV480 相当)
アンカーボルト	SCM435

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態を表4－6に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力を表4－7及び表4－8に示す。

表4－6　荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
－		下部シアラグ及びダイヤフラムブラケット	S	－	D＋P_D＋M_D＋S d*	ⅢAS
					D＋P_D＋M_D＋S s	ⅣAS
原子炉格納施設	原子炉格納容器	下部シアラグと原子炉格納容器胴との接合部	S	クラスMC容器	D＋P＋M＋S d*	ⅢAS
					D＋P＋M＋S s	ⅣAS
					D＋P_L＋M_L＋S d*	ⅣAS

表4－7　下部シアラグ取付部の許容応力

（単位：MPa）

材料	許容応力状態	許容応力		
		一次応力		一次＋二次応力
		P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	ⅢAS	－	344	393
	ⅣAS	－	380	393

表4－8　下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの許容応力

（単位：MPa）

材料	許容応力状態	基準応力 F	許容応力（一次応力）			
			引張り f_t	曲げ f_b	せん断 f_s	組合せ f_t
[redacted]（SGV480 相当）	ⅢAS	229	－	229	132	229
	ⅣAS	275	－	275	158	275
SCM435	ⅢAS	592	444	－	342	－
	ⅣAS	592	444	－	342	－

5. 応力計算

5.1 応力評価点

下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表5－1に示す。

表5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ１	メイルシアラグ
Ｐ２	フィメイルシアラグ
Ｐ３	アンカーボルト
Ｐ４	ベースプレート
Ｐ５	シアプレート
Ｐ６	ダイヤフラムブラケット
Ｐ７	下部シアラグと原子炉格納容器胴との接合部

5.2　計算方針

5.2.1　下部シアラグ

(1)　メイルシアラグ

a.　寸法

メイルシアラグの寸法及び応力評価位置を図5－1に示す。

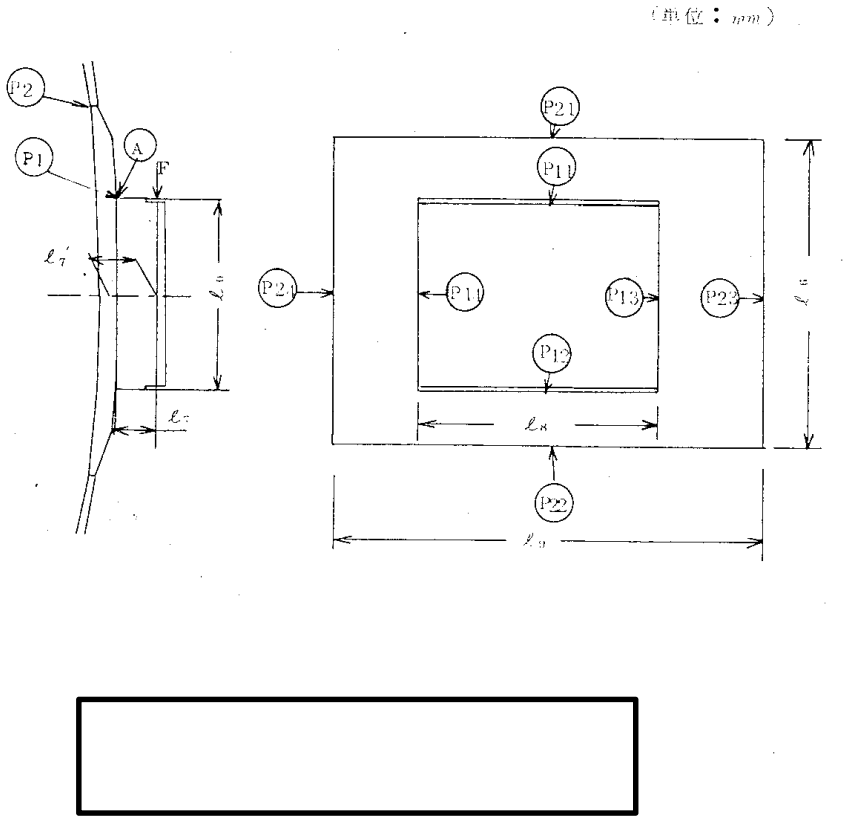


図5－1　メイルシアラグ（単位：mm）

b.　せん断力及び曲げモーメント

メイルシアラグのせん断力及び曲げモーメントの荷重計算を表 5－2 に示す。

表 5－2　メイルシアラグの荷重計算

荷重 / 荷重の組合せ	Ⓐ部せん断力 F (N)	Ⓐ部曲げモーメント Mc (N･mm)
D＋P_D＋M_D＋S s	F＝W＝	$M_c = F \cdot \ell_7$ ＝
D＋P_D＋M_D＋S d*	F＝W＝	$M_c = F \cdot \ell_7$ ＝

c.　Ⓐ部の応力

(a)　断面の形状

Ⓐ部の断面の形状及び寸法は図 5－2 に示すような溶接部の断面である。

接部の断面である。（単位mm）

b 1 ＝ 6 7 0

b 2 ＝ 7 1 2

h 1 ＝ 5 5 0

h 2 ＝ 6 4 0

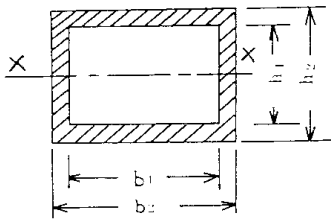


図 5－2　溶接部の断面（単位：mm）

(b)　せん断応力

$$\tau = \frac{F}{A_w}$$

ここに,

A_w：断面積＝

(c)　曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M_c}{Z}$$

ここに,

Z ：X－X軸に関する断面係数＝

(d)　組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2}$$

(2)　フィメイルシアラグ

a.　寸法

フィメイルシアラグの寸法を図 5－3 に示す。

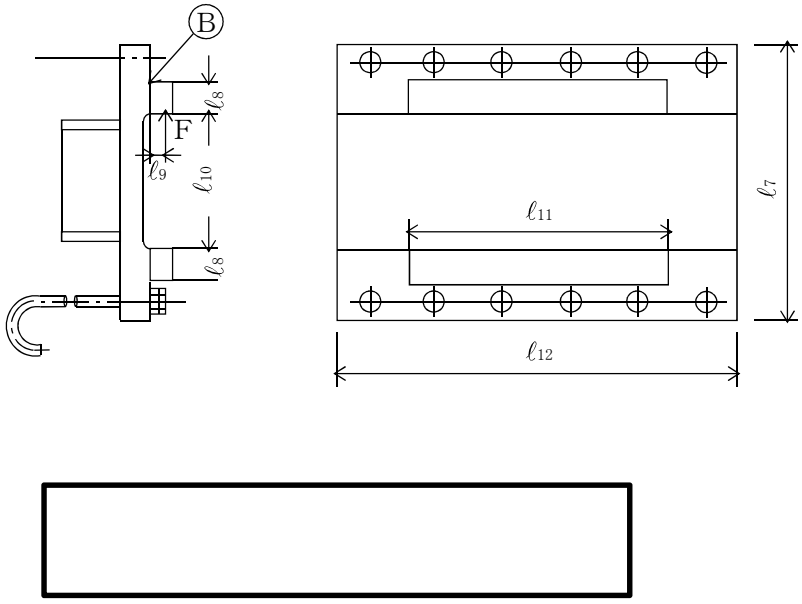


図 5－3　フィメイルシアラグ（単位：mm）

b.　せん断力及び曲げモーメント

フィメイルシアラグのせん断力及び曲げモーメントの荷重計算を表 5－3 に示す。

表 5－3　フィメイルシアラグの荷重計算

荷重 / 荷重の組合せ	Ⓑ部せん断力 F (N)	Ⓑ部曲げモーメント M(N･mm)
D＋P_D＋M_D＋S s	F＝W＝	M＝F・ℓ_9 ＝
D＋P_D＋M_D＋S d*	F＝W＝	M＝F・ℓ_9 ＝

c.　Ⓑ部の応力

(a)　断面の形状

Ⓑ部の断面の形状及び寸法を図 5－4 に示す。

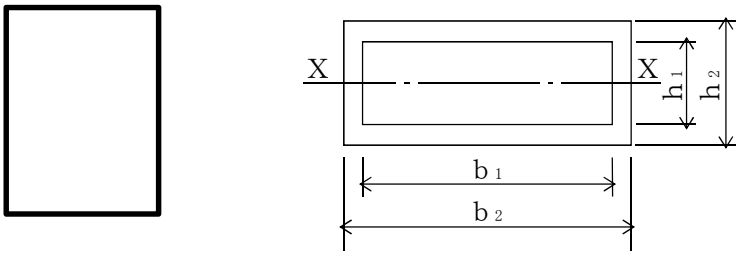


図 5－4　Ⓑ部の溶接部（単位：mm）

(b)　せん断応力

$$\tau = \frac{F}{A_w}$$

ここに，

A_w：断面積＝

(c)　曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここに，

Z：X－X軸に関する断面係数＝

(d)　組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2}$$

(3)　ベースプレート及びアンカーボルト

a.　寸法

ベースプレート及びアンカーボルトの形状及び寸法を図 5－5 に示す。

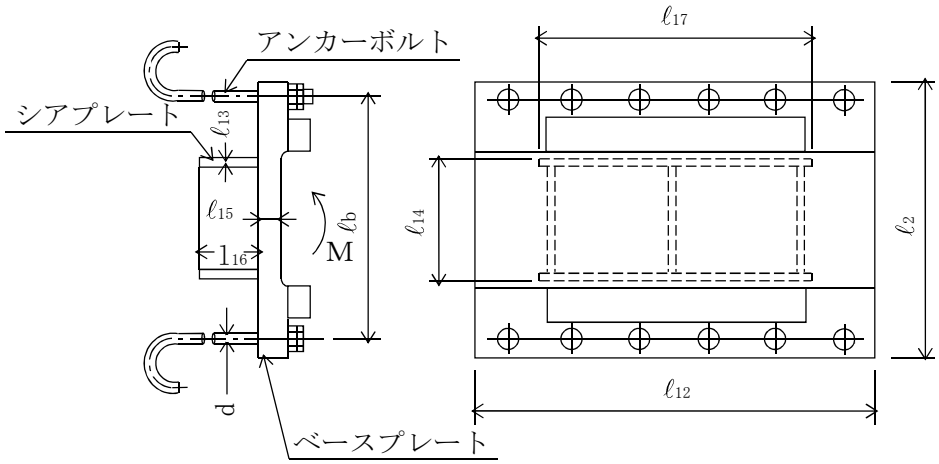


図 5－5　ベースプレート及びアンカーボルト（単位：mm）

b.　せん断力及び曲げモーメント

5.2.1(2)b.表 5－3 より求めたベースプレート及びアンカーボルトに加わる荷重を表 5－4 に示す。

表 5－4　ベースプレート及びアンカーボルトに加わる荷重

荷重 荷重の組合せ	せん断力 F (N)	曲げモーメント M(N･mm/mm)
D＋P_D＋M_D＋S s		
D＋P_D＋M_D＋S d*		

c. アンカーボルトの応力

(a) 計算上の仮定

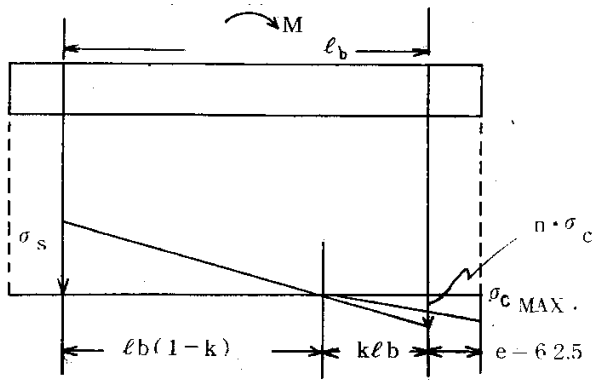
イ. アンカーボルトを鉄筋とするベースプレートの形状の断面をもつ鉄筋コンクリート柱として計算する。

ロ. シアプレートはアンカーとしての働きはもたないものとする。

(b) 計算方法

文献「S.P.Timoshenko：Strength of Materials Part.1,D Van Nostrand Co.Inc.(1955)」のChapterⅦ(48)と同様な方法で計算を行なう。

(c) コンクリートの支圧応力及びアンカーボルトの引張応力



上図の計算モデルより力の釣合いとモーメントとの釣合いからボルト引張応力σ_s及びボルトの下のコンクリート圧縮応力σ_cを求める。

・力の釣合い

$$6\cdot A_b\cdot\sigma_s-6\cdot A_b\cdot(n\cdot\sigma_c)-\frac{1}{2}\cdot A_c\cdot\sigma_{cmax}=0$$

・モーメントの釣合い

$$M-6\cdot A_b\cdot\sigma_s\cdot(1-k)\cdot\ell_b-6\cdot A_b\cdot n\cdot\sigma_c\cdot k\cdot\ell_b-\frac{1}{2}\sigma_{cmax}\cdot A_c\cdot\frac{2}{3}\cdot(k\cdot\ell_b+62.5)=0$$

ここに,

M ：最大曲げモーメント

W_d ：最大圧縮荷重

σ_{cmax}：コンクリートの最大圧縮応力$=\dfrac{(k\cdot\ell_b+e)\cdot\sigma_c}{k\cdot\ell_b}$

k ：係数$=1/(1+\sigma_s/n\cdot\sigma_c)$

E_s ：ボルトの縦弾性係数

E_c ：コンクリートの縦弾性係数

n ：$E_s/E_c=$ [redacted]

A_b ：ボルト１本の最小断面積$=$ [redacted]

A_c ：圧縮側ベースプレート面積$=(k\cdot\ell_b+e)\cdot\ell_{12}$

NT2 補③ V-2-9-2-4 R0

(d)　アンカーボルトのせん断応力

イ．　せん断力

$$F_s = \frac{N_b \cdot d}{N_b \cdot d + N_P \cdot \ell_{17}} \cdot F$$

ここに，

N_b：アンカーボルト数＝

N_P：シアプレート数＝

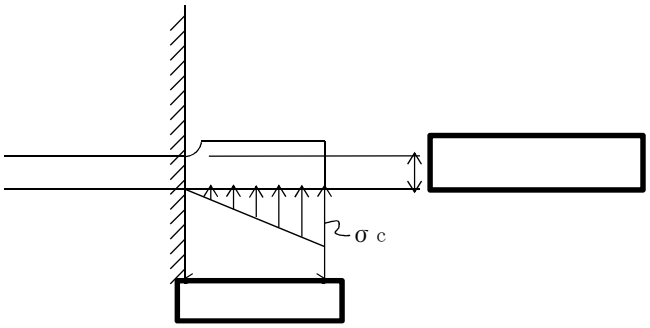
ロ．　せん断応力

$$\tau = \frac{F_s}{N_b \cdot A_b}$$

d.　ベースプレートの曲げ応力

ベースプレートにはモーメントによる反力がシアプレートによって区分された長方形板に加わるものとする。

このことは安全側の計算となる。



ベースプレート応力計算モデル

(a) 固定点の曲げモーメント

$$M = \frac{1}{3} \cdot \sigma_c \cdot \ell^2$$

(b)　曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここに，

Z ：断面係数＝

c.　シアプレート

ベースプレートに加わるせん断力はアンカーボルトとシアプレートに分配されるものとする。

また，ベースプレートとシアプレートの溶接部の脚長はシアプレートの厚さ（ℓ_{13}）より大きいので以下シアプレートの厚さの断面をもつ梁と仮定して計算する。

(a)　寸法

シアプレートの寸法を図5－6に示す。

（単位：mm）

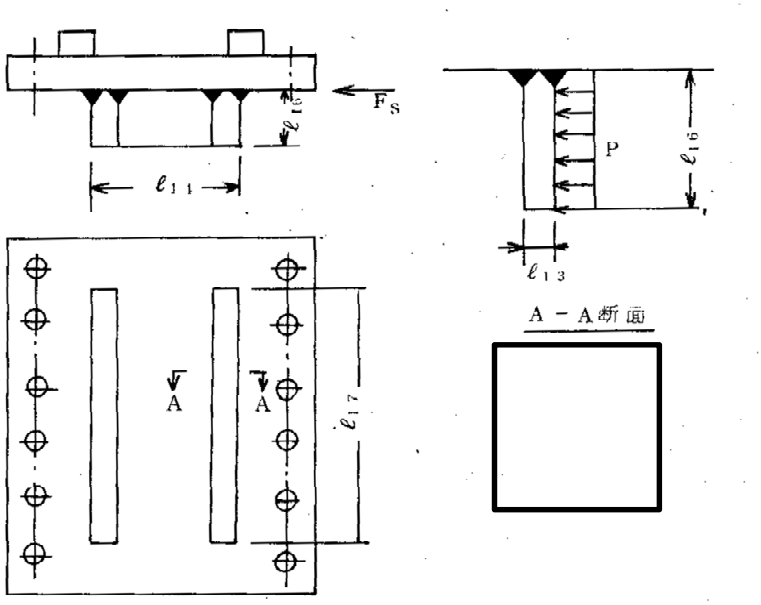


図5－6　シアプレート

(b)　せん断力及び曲げモーメント

イ．　せん断力

$$F_s = F' / N_P$$

ここに，

$$F' = \frac{N_P \cdot \ell_{17}}{N_b \cdot d + N_P \cdot \ell_{17}} \cdot W_1$$

ロ．　曲げモーメント

$$M = \frac{F_s \cdot \ell_{16}}{2}$$

(c)　シアプレートの応力

イ．　せん断応力

$$\tau = \frac{F_s}{A}$$

ここに，

A＝

ロ．　曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここに，

Z＝

ハ. 組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2}$$

5.2.2 ダイヤフラムブラケット

(1) 寸法

ダイヤフラムブラケットの寸法及び応力評価位置を図 5－7 に示す。

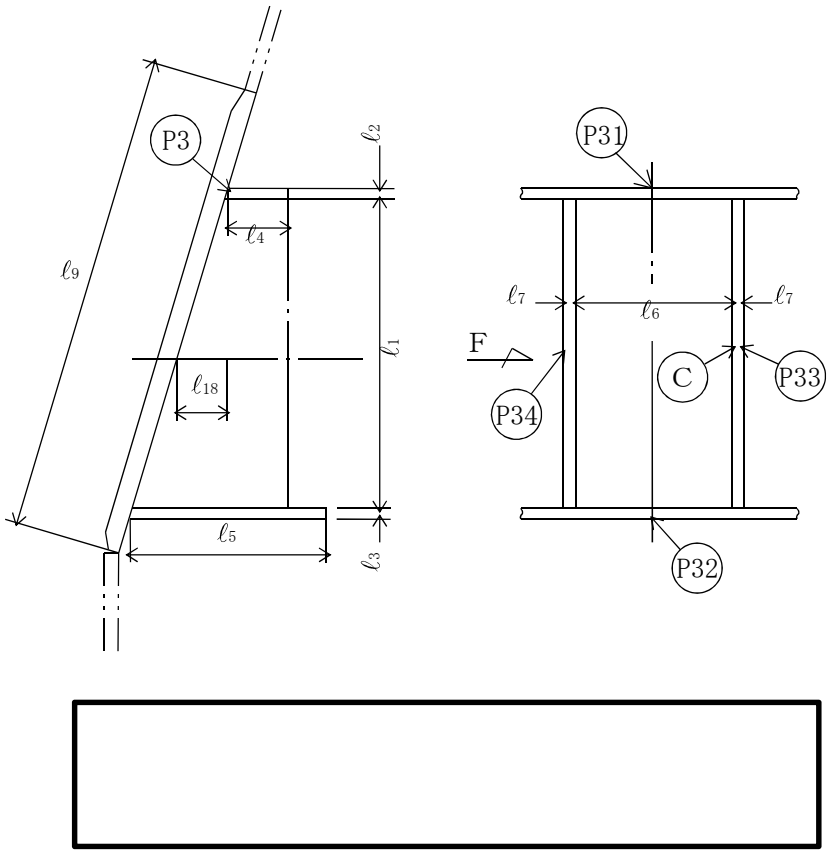


図 5－7 ダイヤフラムブラケット（単位：mm）

(2) せん断力

ダイヤフラムブラケットのせん断力の荷重計算を表 5－5 に示す。

表 5－5 ダイヤフラムブラケットの荷重計算

荷重 / 荷重の組合せ	Ⓒ部せん断力 F (N)
D＋P_D＋M_D＋S s	F＝W_2＝
D＋P_D＋M_D＋S d*	F＝W_2＝

(3)　Ⓒ部の応力

a.　形状及び寸法

Ⓒ部の形状及び寸法を図 5－8 に示す。

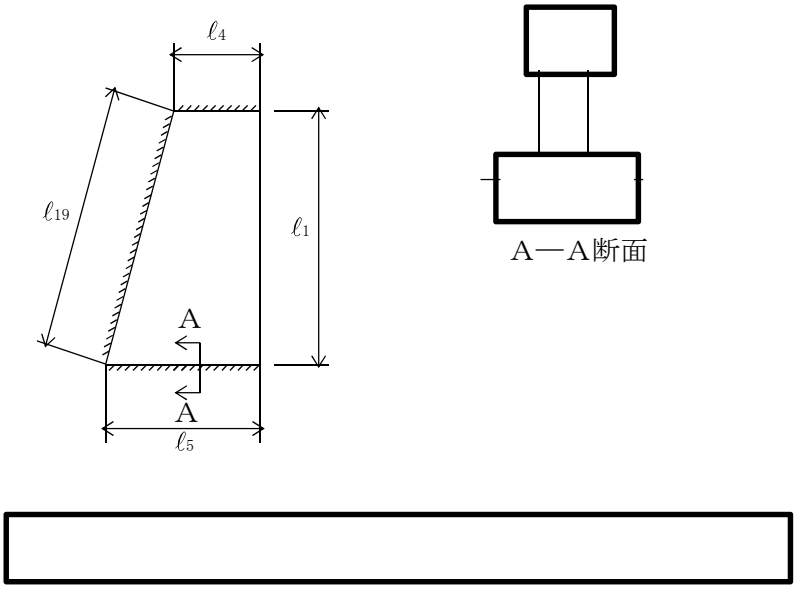


図 5－8　溶接部の形状（単位：mm）

b.　せん断応力

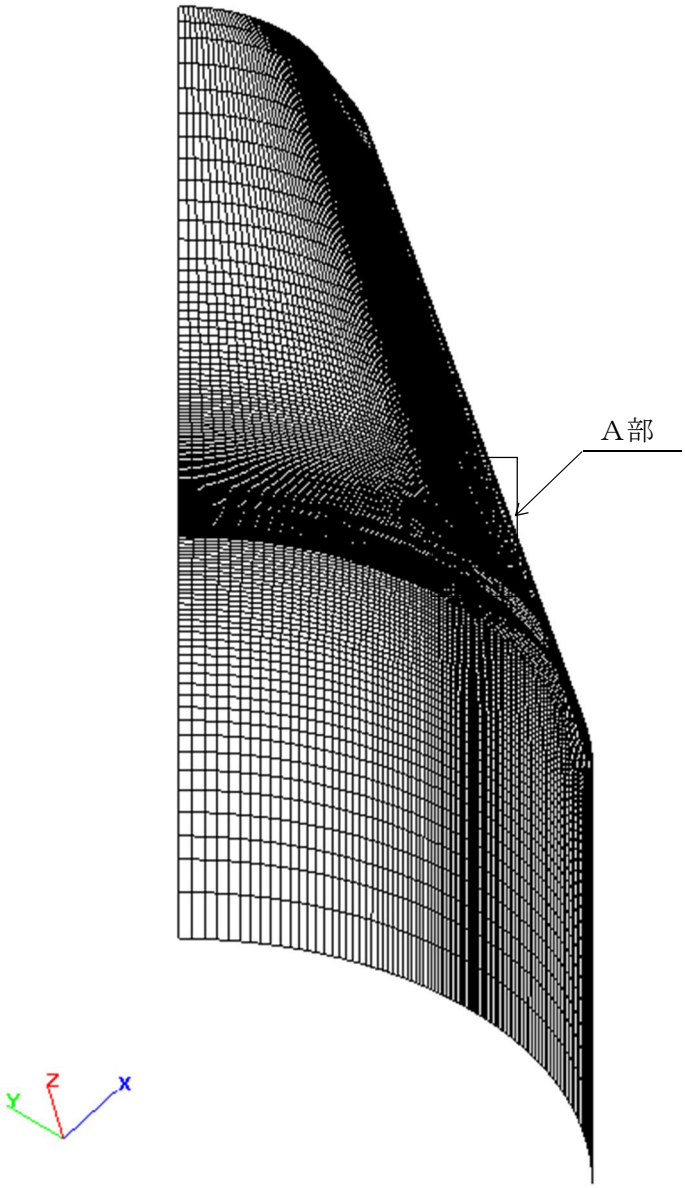
$$\tau = \frac{F}{A_w}$$

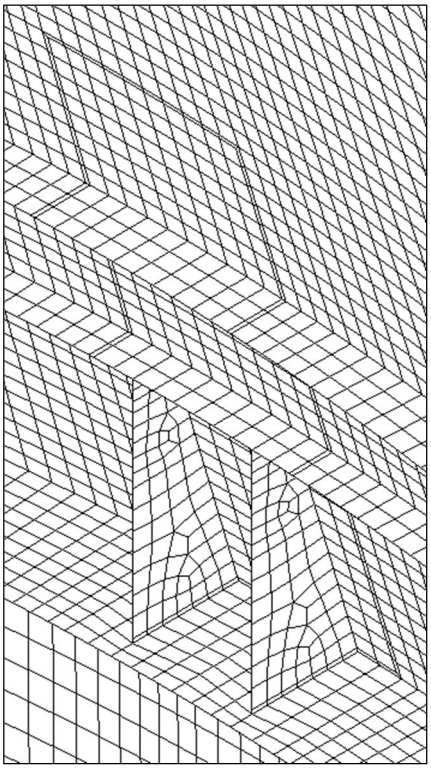
ここに，

A_w＝

5.2.3　下部シアラグと原子炉格納容器胴との接合部

各荷重により下部シアラグと原子炉格納容器胴との接合部に生じる応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。下部シアラグと原子炉格納容器胴との接合部の計算モデルを図 5－9 に示す。





A部詳細図

節点数　14976
要素数　14738

図 5－9　計算モデル

6. 評価結果

下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果を表6－1に示す。

表4－6に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｓ及び$\mathrm{D+P_L+M_L+Sd^*}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2) 許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する応力評価結果を表6－2に示す。

表4－6に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｄ*の評価について記載している。

表６－１　許容応力状態ⅣASに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｓ又はＤ＋PL＋ML＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
下部シアラグ及びダイヤフラムブラケット	Ｐ１	メイルシアラグ	曲げ応力	17	275	○	①*
			せん断応力	55	158	○	①*
			組合せ応力	97	275	○	①*
	Ｐ２	フィメイルシアラグ	曲げ応力	48	275	○	①*
			せん断応力	55	158	○	①*
			組合せ応力	107	275	○	①*
	Ｐ３	アンカーボルト	引張応力	46	444	○	①*
			せん断応力	97	342	○	①*
	Ｐ４	ベースプレート	曲げ応力	30	317	○	①*
	Ｐ５	シアプレート	曲げ応力	215	317	○	①*
			せん断応力	24	158	○	①*
			組合せ応力	219	275	○	①*
	Ｐ６	ダイヤフラムブラケット	せん断応力	23	158	○	①*
	Ｐ７	下部シアラグと原子炉格納容器胴との接合部	一次膜応力＋一次曲げ応力	86	380	○	①*
			一次＋二次応力	334	393	○	①*

注記　＊：①：Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｓ / ②：Ｄ＋PL＋ML＋Ｓｄ*における結果を示す。

表６－２　許容応力状態ⅢASに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
下部シアラグ及びダイヤフラムブラケット	Ｐ１	メイルシアラグ	曲げ応力	11	229	○	
			せん断応力	35	132	○	
			組合せ応力	62	229	○	
	Ｐ２	フィメイルシアラグ	曲げ応力	31	229	○	
			せん断応力	36	132	○	
			組合せ応力	70	229	○	
	Ｐ３	アンカーボルト	引張応力	30	444	○	
			せん断応力	63	342	○	
	Ｐ４	ベースプレート	曲げ応力	20	264	○	
	Ｐ５	シアプレート	曲げ応力	119	264	○	
			せん断応力	14	132	○	
			組合せ応力	122	229	○	
	Ｐ６	ダイヤフラムブラケット	せん断応力	18	132	○	
	Ｐ７	下部シアラグと原子炉格納容器胴との接合部	一次膜応力＋一次曲げ応力	54	344	○	
			一次＋二次応力	206	393	○	

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-782　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-9-2-5　胴アンカー部の耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 7
5. 応力計算 ····· 10
5.1 アンカーボルト及びコンクリート ····· 10
5.2 アンカープレート ····· 14
5.3 補強リブ及びベースプレート ····· 15
6. 評価結果 ····· 18
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 18
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 21

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，胴アンカー部が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は胴アンカー部の応力評価により行う。

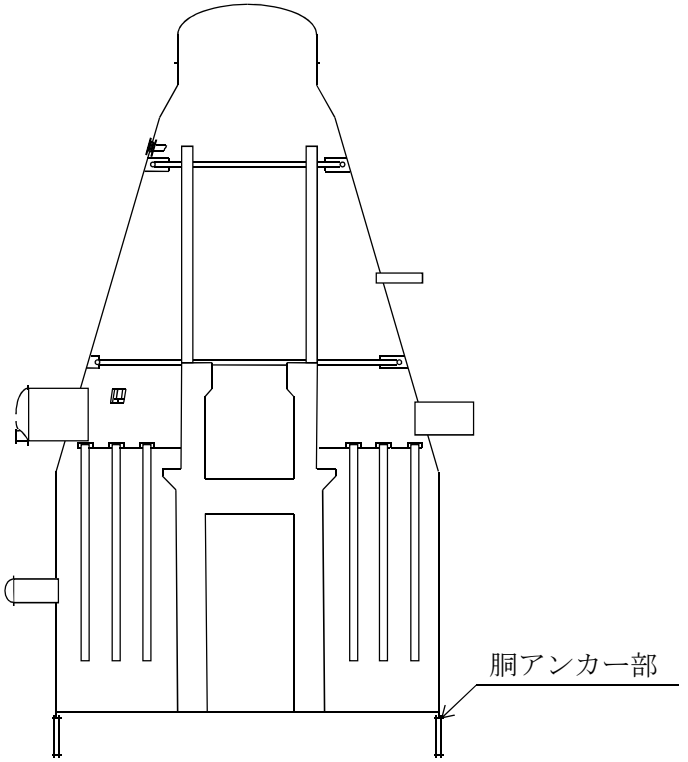
胴アンカー部は，設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下，それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2.　構造説明

2.1　構造計画

胴アンカー部の構造計画を表 2－1 に示す。

表 2－1　構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
炉心を中心に直径約[redacted]の円筒形の基礎で,原子炉格納容器底部コンクリートマットと一体となっている。	胴アンカー部は,原子炉格納容器底部コンクリートマットにアンカーボルトで一体化され,鉛直方向地震荷重は,このアンカーボルトを介して原子炉格納容器底部コンクリートマットに伝達させる。	

2.2　評価方針

胴アンカー部の応力評価は，東海第二発電所　昭和 48 年 4 月 9 日付け 47 公第 12075 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。

3. 形状及び主要寸法

胴アンカー部の形状及び主要寸法を図 3－1 に示す。

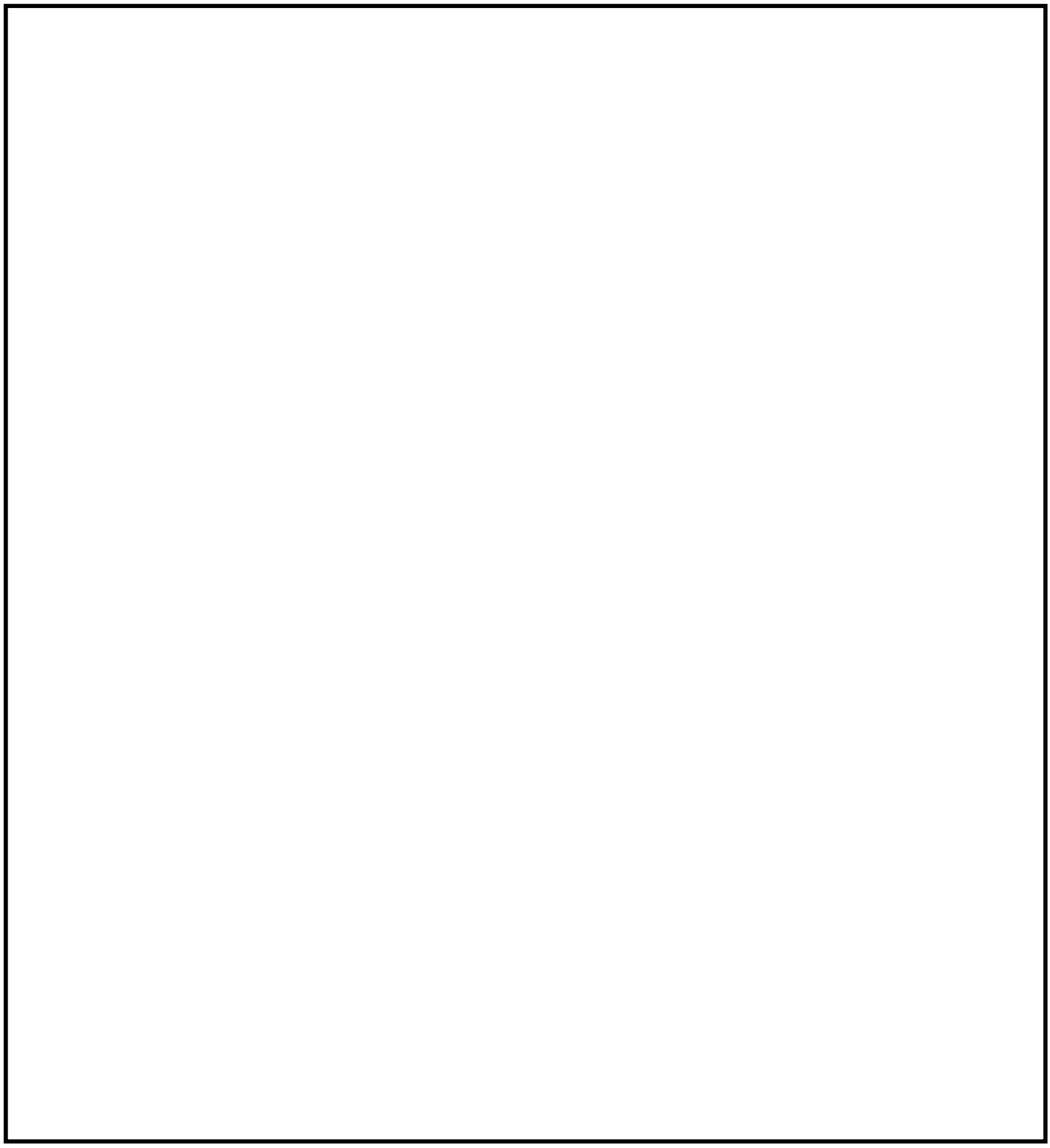


図 3－1　胴アンカー部の形状及び主要寸法（単位：mm）

4.　設計条件

4.1　設計荷重

(1)　設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧P_D	310 kPa
温度T_D	104.5 ℃

(2)　重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

内圧$P_{SA(L)}$	465 kPa（ＳＡ後長期）
内圧$P_{SA(LL)}$	200 kPa（ＳＡ後長々期）
温度$T_{SA(L)}$	171 ℃（ＳＡ後長期）
温度$T_{SA(LL)}$	150 ℃（ＳＡ後長々期）

(3)　自重（胴部）　[redacted]

(4)　水荷重

サプレッションチェンバ内保有水のうち，リングガーダ上にある水の重量は，原子炉格納容器側に加わるものと仮定する。

燫料交換時
通常運転時
事故時　[redacted]

(5)　活荷重

燫料交換時
燫料交換時以外　[redacted]

(6)　地震荷重

応力計算に用いる鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－1 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－2 に示す。また，弾性設計用地震動Ｓｄ又は静的地震力及び基準地震動Ｓｓによる水平方向地震荷重のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－3 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－4 に示す。

表 4－1　鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重（設計基準対象施設）

（単位：N）

荷重	通常運転時	燃料交換時
死荷重		
Ｓｄ*		
Ｓｓ		

表 4－2　鉛直荷重及び鉛直方向地震荷重（重大事故等対処設備）

（単位：N）

荷重	重大事故等時
死荷重	
Ｓｄ	
Ｓｓ	

表 4－3　水平方向地震荷重（設計基準対象施設）

荷重	せん断力 (N)	モーメント (N･mm)
Ｓｄ*		
Ｓｓ		

表 4－4　水平方向地震荷重（重大事故等対処設備）

荷重	せん断力 (N)	モーメント (N･mm)
Ｓｄ		
Ｓｓ		

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

アンカーボルト　[redacted]（GBL1～GBL5 相当）

リングガーダ　[redacted]（SGV480 相当）

補強リブ　（SGV480 相当）

アンカープレート　（SGV480 相当）

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－5 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－6 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－7 及び表 4－9 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－8 及び表 4－10 に示す。

表4－5　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	胴アンカー部	S	クラスMC支持構造物	D＋P＋M＋Ｓｄ*	ⅢAS
					D＋P＋M＋Ｓｓ	ⅣAS
					D＋PL＋ML＋Ｓｄ*	ⅣAS

表4－6　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	胴アンカー部	常設耐震／防止常設／緩和	重大事故等クラス２支持構造物	D＋P_{SALL}＋M_{SALL}＋Ｓｓ	V_AS（V_ASとして$Ⅳ_AS$の許容限界を用いる。）
					D＋P_{SAL}＋M_{SAL}＋Ｓｄ	V_AS（V_ASとして$Ⅳ_AS$の許容限界を用いる。）

注記　＊：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表 4－7　胴アンカー部の許容応力（設計基準対象施設）

（単位：MPa）

材料	許容応力状態	基準応力 F	許容応力（一次応力）				
			引張り f_t	曲げ f_b	せん断 f_s	圧縮 f_c	組合せ f_t
[redacted]（SGV480 相当）	ⅢAS	237	237	273	136	223	237
	ⅣAS	284	284	328	164	264	284
SA-320 L43（GBL1～GBL5 相当）	ⅢAS	603	452	－	－	－	－
	ⅣAS	603	452	－	－	－	－

表4－8　胴アンカー部の許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	基準応力 F	許容応力（一次応力）				
				引張り f_t	曲げ f_b	せん断 f_s	圧縮 f_c	組合せ f_t
[redacted]（SGV480 相当）	150	VAS	278	278	321	160	－	278
	171	VAS	275	275	317	158	－	275
[redacted]（GBL1～GBL5 相当）	150	VAS	603	452	－	－	－	－
	171	VAS	603	452	－	－	－	－

表 4－9　コンクリートの許容応力（設計基準対象施設）

（単位：N/mm^2）

材料	許容応力状態	基準強度 F_c	圧縮応力 f_c	せん断応力 f_s
コンクリート	ⅢAS	22.0	14.6	1.0
	ⅣAS	22.0	18.7	1.0

表 4－10　コンクリートの許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：N/mm^2）

材料	許容応力状態	基準強度 F_c	圧縮応力 f_c	せん断応力 f_s
コンクリート	VAS	22.0	18.7	1.0

5. 応力計算

5.1 アンカーボルト及びコンクリート

(1) 設計荷重

アンカーボルトに加わる軸力及びモーメントを表5－1及び表5－2に示す。

表5－1 アンカーボルトの荷重（設計基準対象施設）

荷重 / 荷重の組合せ	軸力* (N)		モーメント (N・mm)
	通常運転時	燃料交換時	
D＋P＋M＋S d*			
D＋P＋M＋S s			
D＋PL＋ML＋S d*			

注記 ＊：下方向を正とする。

表5－2 アンカーボルトの荷重（重大事故等対処設備）

荷重 / 荷重の組合せ	軸力 (N)	モーメント (N・mm)
D＋P_{SALL}＋M_{SALL}＋S s		
D＋P_{SAL}＋M_{SAL}＋S d		

(2) アンカーボルト及びコンクリートの応力

アンカーボルトの応力は次に示す仮定にもとづいて計算する。

① アンカーボルトの等価円筒及び荷重分布は図5－1に示す円周上2列のボルトサークルの平均径とする。また，そのボルトサークル上にボルトの全本数がある。

② 応力は最大引張応力（w_t）から最大圧縮応力（$n\,w_c$）まで直線的に変化する。

③ アンカーボルトに加わる荷重は平均径のサークル上のボルトの全断面積に等しい厚さの等価円筒に加わるものとする。

アンカーボルトに垂直荷重及びモーメントを受ける場合，断面に働く外力の合力の作用点が断面の中心から偏心する距離eは次式によって得られる。

$$e=\frac{M_o}{W_v}$$

a. アンカーボルトの等価円筒の板厚

$$t_1=\frac{N_b\times\frac{\pi}{4}\times d_{B2}{}^2}{\pi\times\frac{D_{B1}+D_{B2}}{2}}=\square\ \text{mm}$$

b. 圧縮側のコンクリートの板厚

$$t_2=\ell_{11}=\square\ \text{mm}$$

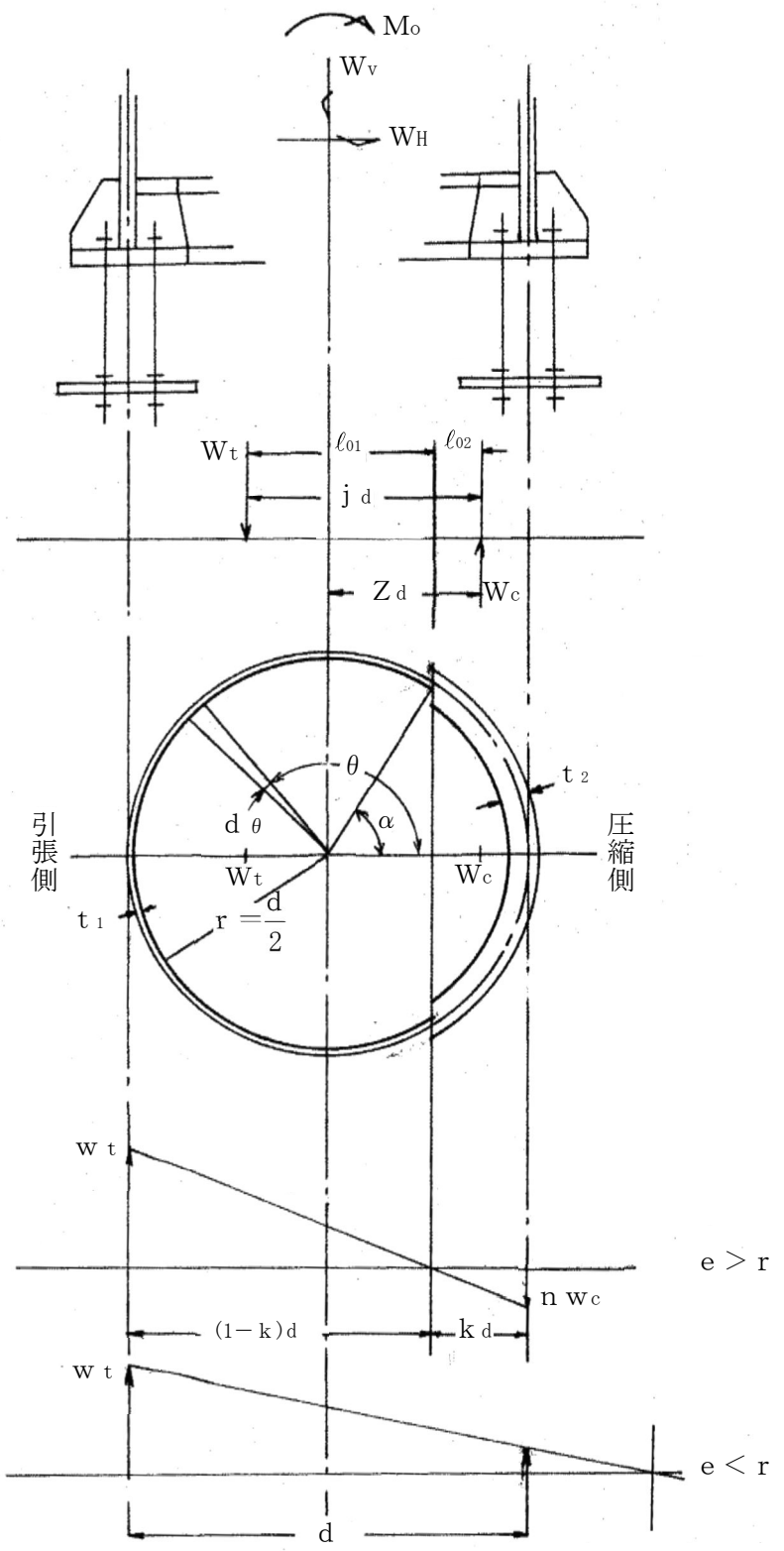


図 5−1　アンカーボルトの等価円筒及び荷重分布

c.　e＜rの場合（全面引張）

アンカーボルトの引張応力の最大値は次式により得られる。

$$w_t = \frac{W_v}{A} + \frac{M_o}{Z}$$

ここに,

$$A = \pi \cdot d \cdot t_1$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(d + t_1)^4 - (d - t_1)^4}{d + t_1}$$

d.　e＞rの場合

(a)　引張側で受ける全引張力

$$W_t = \frac{M_o - W_v \cdot Z \cdot d}{j \cdot d}$$

ここに,

j：W_tとW_cの作用点間の距離とdとの比

$$= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{(\pi - \alpha) \cdot \cos^2\alpha + \frac{3}{2} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha + \frac{1}{2} \cdot (\pi - \alpha)}{(\pi - \alpha) \cdot \cos\alpha + \sin\alpha} \right\}$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\alpha\cos^2\alpha - \frac{3}{2} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha + \frac{1}{2} \cdot \alpha}{\sin\alpha - \alpha\cos\alpha} \right\}$$

Z：スカートの中心線と中立軸の間の距離をZ_dとする係数

$$= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \cos\alpha + \frac{\alpha\cos^2\alpha - \frac{3}{2} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha + \frac{1}{2} \cdot \alpha}{\sin\alpha - \alpha\cos\alpha} \right\}$$

α：以下の式から求める。

$$e / r = \frac{(1 - P - n \cdot P) \cdot (\alpha - \sin\alpha \cdot \cos\alpha) + \pi \cdot n \cdot P}{2 \cdot \{(1 - P - n \cdot P) \cdot (\sin\alpha - \alpha\cos\alpha) - \pi \cdot n \cdot P \cdot \cos\alpha\}}$$

ここに,

$$P = \frac{t_1}{t_2}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \square$$

E_s：ボルトの縦弾性係数

E_c：コンクリートの縦弾性係数

(b)　圧縮側で受ける全圧縮力

$$W_c = W_t + W_v$$

(c)　アンカーボルトの引張応力

$$w_t = \frac{W_t}{t_1 \cdot r \cdot C_t}$$

NT2 補③ V-2-9-2-5 R0

ここに，

$$C_t = \frac{2}{1+\cos\alpha} \cdot \{(\pi - \alpha) \cdot \cos\alpha + \sin\alpha \}$$

(d) コンクリートの圧縮応力

$$w_c = \frac{W_c}{t_2 \cdot r \cdot C_c}$$

ここに，

$$C_c = \frac{2 \cdot (\sin\alpha - \alpha\cos\alpha)}{1-\cos\alpha}$$

(3) アンカーボルトの伸び量

$$\delta_B = \frac{w_t}{E} \cdot \left\{ \frac{A_{B1}}{A_{B2}} \cdot (\ell_{B2} + \ell_{B3}) + \ell_{B1} \right\}$$

ここに，

A_{B1}：ボルトの最大直径有効断面積＝π／4・d_{B1}^2＝[ ] mm^2

A_{B2}：ボルトの谷径有効断面積＝π／4・d_{B2}^2＝[ ] mm^2

E　：ボルトの縦弾性係数＝[ ] MPa

5.2　アンカープレート

(1)　アンカープレートと接するコンクリートの圧縮応力

$$\sigma_{cc}=\frac{2\cdot w_t\cdot A_{B2}}{A_p}$$

ここに,

A_p ：アンカープレートと接するコンクリートの面積

$=\ell_{14}\cdot\ell_{15}-2\cdot\pi/4\cdot d_{B1}^2=$ [redacted] mm^2

(2)　アンカープレートの曲げ応力

$$\sigma_b=\frac{M}{Z_{D-D}}$$

ここに,

$$M=\frac{\ell_{15}}{4}\cdot w_t\cdot A_{B2}$$

$$Z_{D-D}=\frac{1}{6}\cdot(\ell_{14}-2\cdot d_p)\cdot\ell_5^2=$$ [redacted] mm^3

(3)　アンカープレートによるコンクリートのせん断応力

$$\tau_c=\frac{2\cdot w_t\cdot A_{B2}}{(\ell_{BPO}+\ell_{BPI})\cdot\ell_4}$$

[redacted]

5.3　補強リブ及びベースプレート

(1)　設計荷重

補強リブ及びベースプレートに加わるせん断力を表5－3及び表5－4に示す。

表5－3　補強リブ及びベースプレートの荷重（設計基準対象施設）

荷重の組合せ ＼ 荷重	せん断力 (N)
D＋P＋M＋S d*	
D＋P＋M＋S s	
D＋PL＋ML＋S d*	

表5－4　補強リブ及びベースプレートの荷重（重大事故等対処設備）

荷重の組合せ ＼ 荷重	せん断力 (N)
D＋P_{SALL}＋M_{SALL}＋S s	
D＋P_{SAL}＋M_{SAL}＋S d	

(2)　サプレッションチェンバ本体及び補強リブの溶接部の応力

a.　引張応力

$$\sigma_t = \frac{w_t \cdot t_1 \cdot \ell_R}{A}$$

ここに,

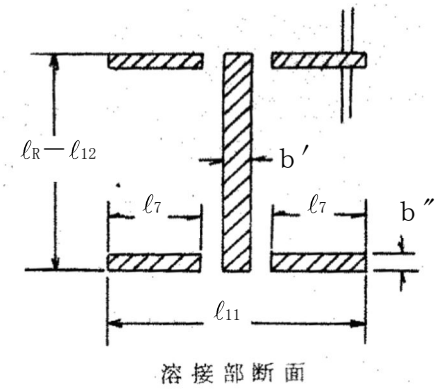
b’＝ℓ_6＝　mm

b’’＝ℓ_{12}＝　mm

ℓ_7＝　mm

A：溶接部の断面積

＝2・b’’・ℓ_7＋b’・(ℓ_R－ℓ_{12})＝　mm^2



溶接部断面

b.　せん断応力

$$\tau = \frac{F}{n_R \cdot A}$$

ここに,

n_R：補強リブの数＝

F　：せん断力

c.　合成応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

NT2 補③ V-2-9-2-5 R0

(3)　補強リブ及びサプレッションチェンバ本体の圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{w_c \cdot t_2 \cdot \ell_R}{A}$$

ここに,

A：補強リブ及びサプレッションチェンバ本体の断面積

$= \ell_6 \cdot \ell_R + \ell_8 \cdot \ell_{12} =$ [redacted] mm^2

(4)　ベースプレートの曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{\beta \cdot b^2}{t^2} \cdot q$$

ここに，

β ：R.J.ROARK "FORMULAS FOR STRESS AND STRAIN" 4TH EDITION の 227 ページ TABLE45 に示される 1 辺固定，1 辺自由，2 辺支持の平板に等分布荷重が加わるものと仮定して計算した値

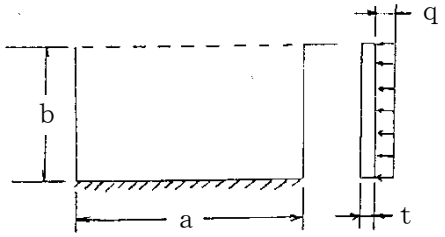
β =

a ：ℓ_R = mm

b ：ℓ_9 = ℓ_{10} = mm

t ：ℓ_3 = mm

$\frac{a}{b}$ = =



q ：引張側

$$= \frac{w_t \cdot t_1 \cdot \ell_R}{2 \cdot a \cdot b}$$

q ：圧縮側

$$= \frac{w_c \cdot t_2 \cdot \ell_R}{2 \cdot a \cdot b}$$

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

胴アンカー部の設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果を表6－1に示す。

表4－5に示す荷重の組合せのうち，D＋P＋M＋S s及び$\mathrm{D+P_L+M_L+S\ d^*}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2) 許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する評価

許容応力状態$\mathrm{III_AS}$に対する応力評価結果を表6－2に示す。

表4－5に示す荷重の組合せのうち，D＋P＋M＋S d*の評価について記載している。

表6－1　許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$に対する応力評価結果（D＋P＋M＋S s 又はD＋P_L＋M_L＋S d*）

評価対象設備	評価部位	応力分類	$\mathrm{IV_AS}$		判定	備考
			発生値	評価基準値		
			MPa	MPa		
胴アンカー部	アンカーボルト	引張応力	288	452	○	②*
	アンカープレート	曲げ応力	106	328	○	②*
	ベースプレート	曲げ応力（引張側）	203	328	○	②*
		曲げ応力（圧縮側）	185	328	○	①*
	補強リブ	引張応力	55	284	○	②*
		圧縮応力	57	264	○	①*
		せん断応力	10	164	○	①*
		組合せ応力	56	284	○	②*
	コンクリート	圧縮応力	6.8	18.7	○	②* 単位N/mm^2
		せん断応力	0.6	1.0	○	②* 単位N/mm^2

注記　＊：①：D＋P＋M＋S s　/ ②：D＋P_L＋M_L＋S d*における結果を示す。

表６－２　許容応力状態ⅢASに対する応力評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位	応力分類	ⅢAS		判定	備考
			発生値	評価基準値		
			MPa	MPa		
胴アンカー部	アンカーボルト	引張応力	59	452	○	
	アンカープレート	曲げ応力	22	273	○	
	ベースプレート	曲げ応力（引張側）	42	273	○	
		曲げ応力（圧縮側）	111	273	○	
	補強リブ	引張応力	11	237	○	
		圧縮応力	35	223	○	
		せん断応力	6	136	○	
		組合せ応力	16	237	○	
	コンクリート	圧縮応力	1.4	14.6	○	単位N/mm^2
		せん断応力	0.2	1.0	○	単位N/mm^2

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

胴アンカー部の重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ⅤASに対する評価

許容応力状態ⅤASに対する応力評価結果を表6－3に示す。

表4－6に示す荷重の組合せのうち，D＋PSALL＋MSALL＋Ｓｓ及びD＋PSAL＋MSAL＋Ｓｄの評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

表６－３　許容応力状態ⅣASに対する評価結果（Ｄ＋PSALL＋MSALL＋Ｓｓ又はＤ＋PSAL＋MSAL＋Ｓｄ）

評価対象設備	評価部位	応力分類	VAS		判定	備考
			発生値	評価基準値		
			MPa	MPa		
胴アンカー部	アンカーボルト	引張応力	364	452	○	②*
	アンカープレート	曲げ応力	134	317	○	②*
	ベースプレート	曲げ応力（引張側）	256	317	○	②*
		曲げ応力（圧縮側）	－	－	－	
	補強リブ	引張応力	69	275	○	②*
		圧縮応力	－	－	－	
		せん断応力	10	160	○	①*
		組合せ応力	70	275	○	②*
	コンクリート	圧縮応力	8.6	18.7	○	②*
		せん断応力	0.7	1.0	○	①*②*

注記　＊：①：Ｄ＋PSALL＋MSALL＋Ｓｓ / ②：Ｄ＋PSAL＋MSAL＋Ｓｄにおける結果を示す。

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-770　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-9-2-9　配管貫通部の耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 7
5. 応力計算 ····· 9
5.1 応力評価点 ····· 9
5.2 計算方針 ····· 11
5.2.1 原子炉格納容器に作用する荷重による応力 ····· 11
5.2.2 貫通部に作用する荷重による応力 ····· 11
6. 評価結果 ····· 13
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 13
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 16
7. 引用図書 ····· 18

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，配管貫通部が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は配管貫通部の地震応答解析，応力評価により行う。

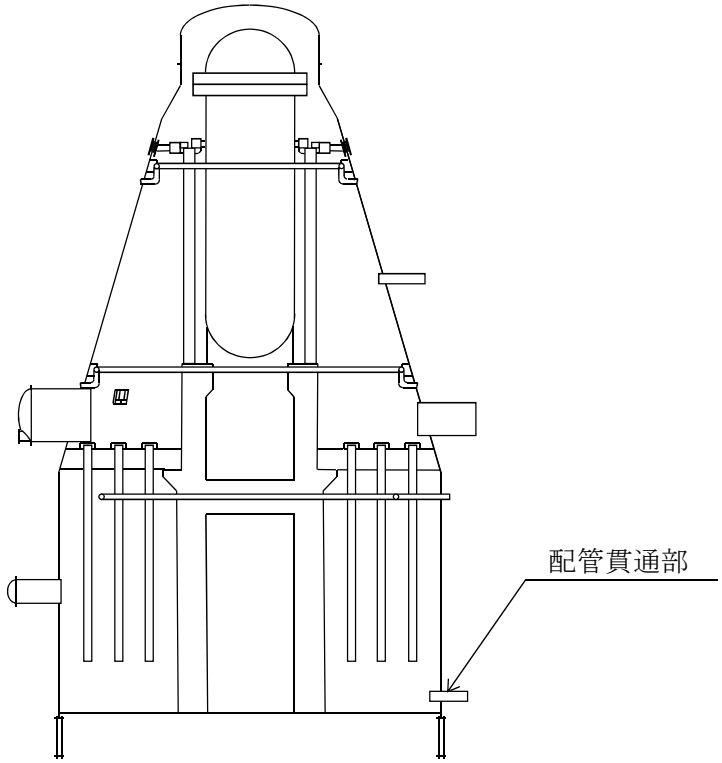
配管貫通部は設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下，それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2.　構造説明

2.1　構造計画

配管貫通部の構造計画を表 2－1 に示す。

表 2－1　構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
・配管貫通部は原子炉格納容器により支持される。	・原子炉格納容器に円筒形スリーブが取り付けられた鋼製構造物である。	

2.2　評価方針

(1)　配管貫通部の応力評価のうち，原子炉格納容器側の応力については，原子炉格納容器に作用する荷重（死荷重，圧力，地震荷重）による応力と，貫通部に作用する荷重（配管反力）による応力を組み合わせて評価する。原子炉格納容器に作用する荷重による応力は，引用図書(1)で計算した応力を用い，貫通部に作用する荷重による応力は，実績のある三次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，「Ⅴ-5-1　計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3. 形状及び主要寸法

配管貫通部の形状及び主要寸法を図3－1及び表3－1に示す。

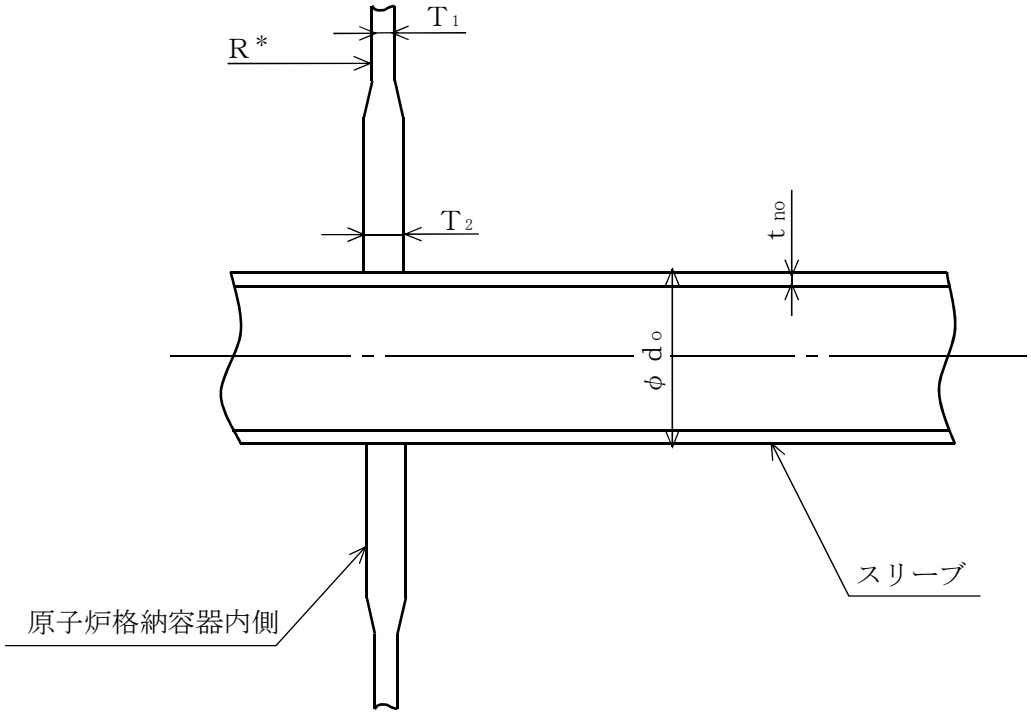


図3－1　配管貫通部の形状

表3－1　配管貫通部の主要寸法

（単位：mm）

貫通部番号	T1	T2	do	tno	R*
X-31					
X-34					

注記　＊：原子炉格納容器中心から原子炉格納容器内側までの距離

4. 設計条件

4.1 設計荷重

(1) 設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧 P_D 310 kPa

外圧 P_{DO} 14 kPa

温度 T_D 104.5 ℃

(2) 冷却材喪失事故後の最大内圧 P_{DBA} 196 kPa

(3) 重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

内圧 $P_{SA(L)}$ 465 kPa（ＳＡ後長期）

内圧 $P_{SA(LL)}$ 200 kPa（ＳＡ後長々期）

温度 $T_{SA(L)}$ 171 ℃（ＳＡ後長期）

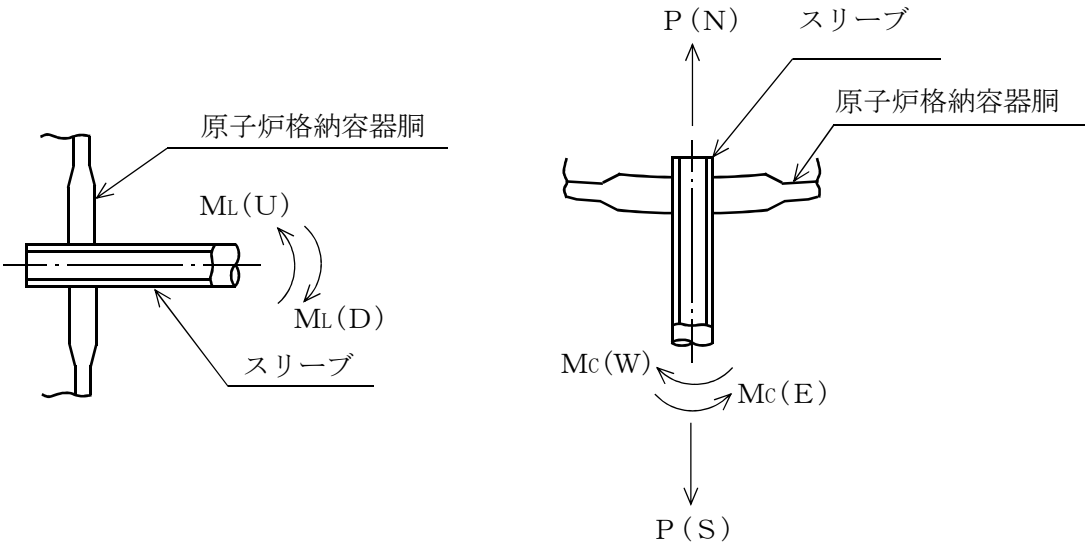
温度 $T_{SA(LL)}$ 150 ℃（ＳＡ後長々期）

(4) 配管荷重

貫通部に作用する配管反力による設計荷重を表 4－1 に示す。地震荷重の作用方向を図 4－1 に示す。

表 4－1 配管反力による設計荷重

貫通部番号	荷重の種類		軸力(N)	モーメント(N･mm)	
			P	M_C	M_L
X-31	死荷重				
	逃し安全弁作動時荷重				
	地震荷重	S_d			
		S_s			
X-34	死荷重				
	逃し安全弁作動時荷重				
	地震荷重	S_d			
		S_s			



鉛直方向　　水平方向

図 4－1　地震荷重の作用方向

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

原子炉格納容器胴　[redacted]　(SGV480 相当)

補強板　(SGV480 相当)

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－2 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－3 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－4 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－5 に示す。

表4－2　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	配管貫通部	S	クラスMC容器	D＋P＋M＋S_d*	ⅢAS
					D＋P＋M＋S_s	ⅣAS
					D＋P_L＋M_L＋S_d*	ⅣAS

表4－3　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	配管貫通部	常設耐震／防止 常設／緩和	重大事故等クラス2容器	D＋P_{SALL}＋M_{SALL}＋S_s	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）
					D＋P_{SAL}＋M_{SAL}＋S_d	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）

注記　＊：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表4－4　許容応力（設計基準対象施設）

（単位：MPa）

材料	温度 （℃）	許容応力 状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted] （SGV480 相当）	104.5	ⅢAS	－	356	393
		ⅣAS	－	356*1	393
			－	387*2	393

注記　＊1：構造不連続部に対する許容応力を示す。

＊2：構造連続部に対する許容応力を示す。

表4－5　許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度 （℃）	許容応力 状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted] （SGV480 相当）	171	VAS	－	344*1	393
			－	380*2	393
	150	VAS	－	348*1	393
			－	381*2	393

注記　＊1：構造不連続部に対する許容応力を示す。

＊2：構造連続部に対する許容応力を示す。

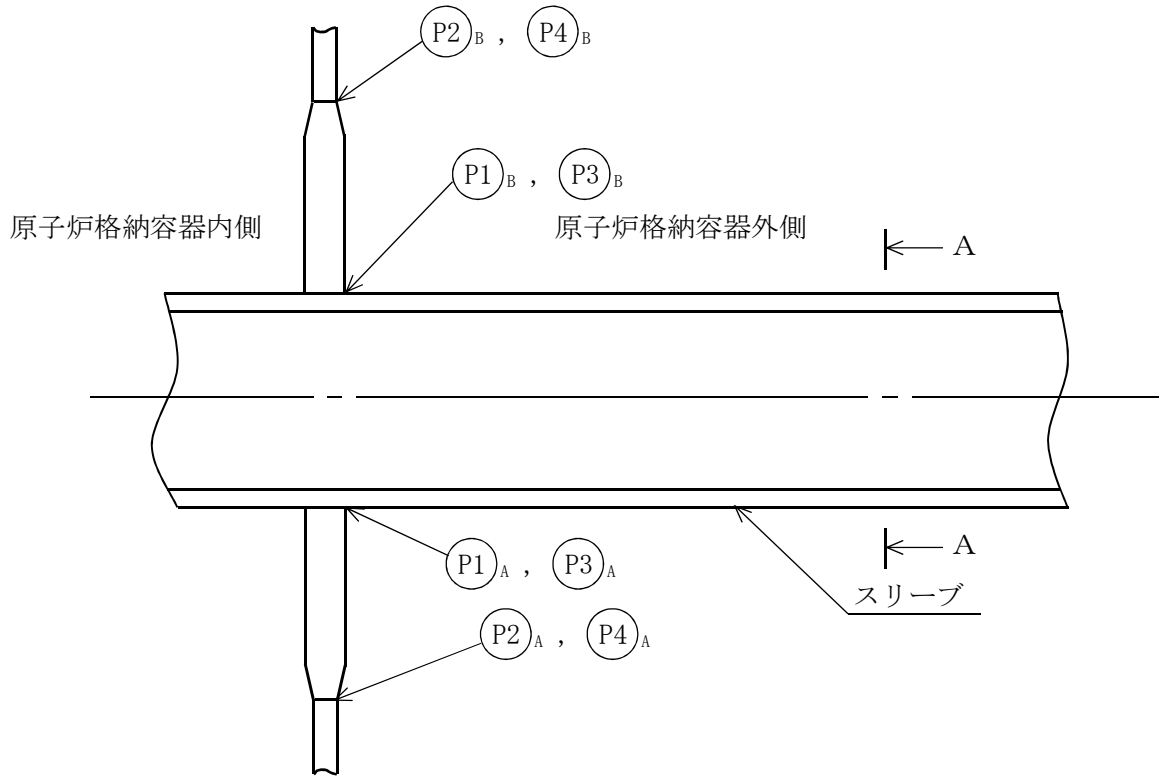
5.　応力計算

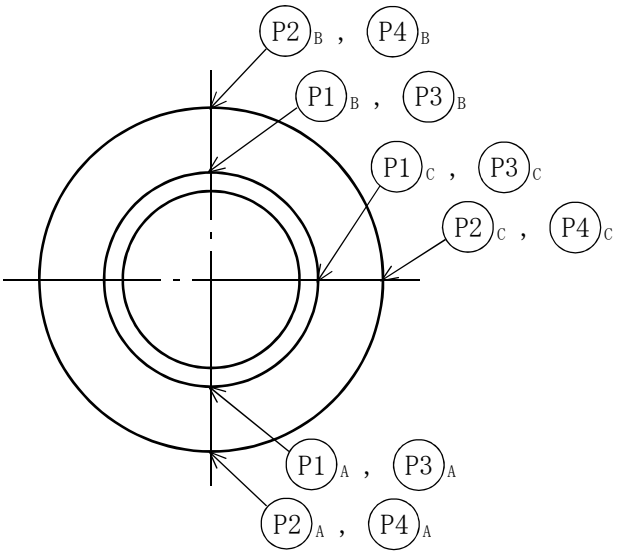
5.1　応力評価点

貫通部の形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表 5－1 及び図 5－1 に示す。

表 5－1　応力評価点

貫通部番号	応力評価点番号	応力評価点
X-31	Ｐ１	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部 （Ｐ１－Ａ～Ｐ１－Ｃ）
	Ｐ２	補強板取付部 （Ｐ２－Ａ～Ｐ２－Ｃ）
X-34	Ｐ３	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部 （Ｐ３－Ａ～Ｐ３－Ｃ）
	Ｐ４	補強板取付部 （Ｐ４－Ａ～Ｐ４－Ｃ）





A～A矢視図

図 5－1　応力評価点（○：応力評価点）

5.2　計算方針

5.2.1　原子炉格納容器に作用する荷重による応力

原子炉格納容器に作用する最高使用圧力(内圧)，最高使用圧力(外圧)，死荷重及び地震荷重による応力は，引用図書(1)で計算した応力を用いる。

5.2.2　貫通部に作用する荷重による応力

貫通部に作用する死荷重，地震荷重による応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを用いて計算する。

貫通部番号 X-31 及び X-34 の計算モデルを図 5－2 及び図 5－3 に示す。

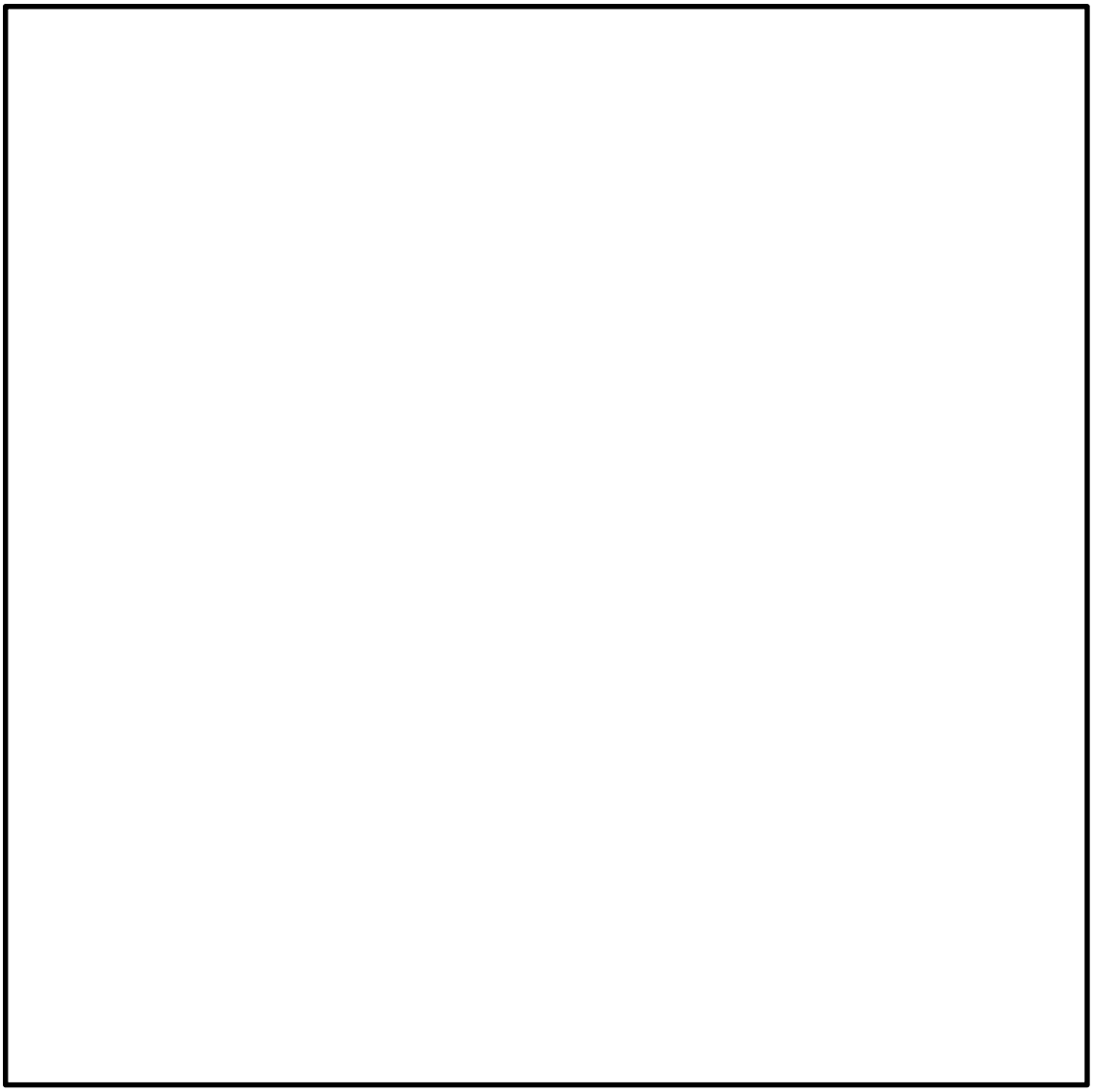


図 5－2　貫通部番号 X-31 の計算モデル

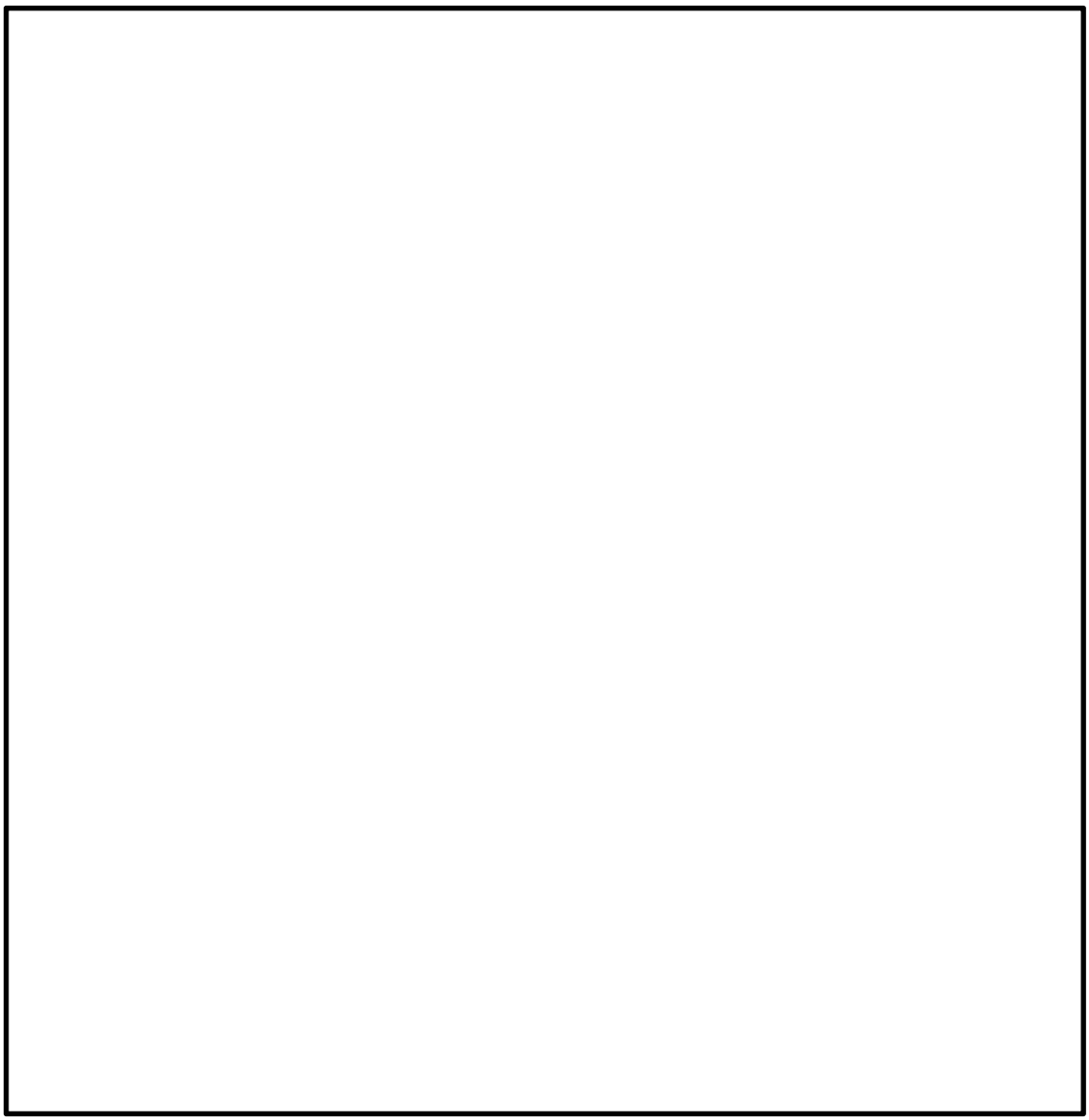


図 5－3　貫通部番号 X-34 の計算モデル

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

配管貫通部の設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態ⅣＡＳに対する評価

許容応力状態ⅣＡＳに対する応力評価結果を表 6－1 に示す。

表 4－2 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋Ｐ$_{L}$＋Ｍ$_{L}$＋Ｓ$_{d}$*及びＤ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓ$_{s}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2) 許容応力状態ⅢＡＳに対する評価

許容応力状態ⅢＡＳに対する応力評価結果を表 6－2 に示す。

表 4－2 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓ$_{d}$*の評価について評価を記載している。

表 6－1　許容応力状態ⅣＡＳに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｓ又はＤ＋ＰＬ＋ＭＬ＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣＡＳ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
配管貫通部 X-31	Ｐ１	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部	膜応力＋曲げ応力	176	356	○	①*
			一次＋二次応力	230	393	○	①*
	Ｐ２	補強板取付部	膜応力＋曲げ応力	166	387	○	①*
			一次＋二次応力	226	393	○	①*
配管貫通部 X-34	Ｐ３	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部	膜応力＋曲げ応力	176	356	○	①*
			一次＋二次応力	230	393	○	①*
	Ｐ４	補強板取付部	膜応力＋曲げ応力	166	387	○	①*
			一次＋二次応力	232	393	○	①*

注記　＊：①：Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｓ / ②：Ｄ＋ＰＬ＋ＭＬ＋Ｓｄ*における結果を示す。

表６－２　許容応力状態ⅢＡＳに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢＡＳ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
配管貫通部 X-31	Ｐ１	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部	膜応力＋曲げ応力	137	356	○	
			一次＋二次応力	130	393	○	
	Ｐ２	補強板取付部	膜応力＋曲げ応力	130	356	○	
			一次＋二次応力	130	393	○	
配管貫通部 X-34	Ｐ３	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部	膜応力＋曲げ応力	137	356	○	
			一次＋二次応力	130	393	○	
	Ｐ４	補強板取付部	膜応力＋曲げ応力	129	356	○	
			一次＋二次応力	130	393	○	

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

配管貫通部の重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ＶＡＳに対する評価

許容応力状態ＶＡＳに対する応力評価結果を表 6－3 に示す。

表 4－3 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋Ｐ$_{SAL}$＋Ｍ$_{SAL}$＋Ｓ$_{d}$又はＤ＋Ｐ$_{SALL}$＋Ｍ$_{SALL}$＋Ｓ$_{s}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

表6－3　供用状態ＶＡＳに対する評価結果（Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓs又はＤ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓd）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ＶＡＳ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
配管貫通部 X-31	Ｐ１	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部	膜応力＋曲げ応力	266	348	○	①*
			一次＋二次応力	346	393	○	①*
	Ｐ２	補強板取付部	膜応力＋曲げ応力	258	380	○	②*
			一次＋二次応力	346	393	○	①*
配管貫通部 X-34	Ｐ３	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部	膜応力＋曲げ応力	266	348	○	①*
			一次＋二次応力	344	393	○	①*
	Ｐ４	補強板取付部	膜応力＋曲げ応力	258	380	○	②*
			一次＋二次応力	350	393	○	①*

注記　＊：①：Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓs / ②：Ｄ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓdにおける結果を示す。

7. 引用図書

(1) Ⅴ-2-9-2-1 「原子炉格納容器本体の耐震性についての計算書」

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-771　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-9-2-10　電気配線貫通部の耐震性についての計算書

NT2 補③ Ⅴ-2-9-2-10 R0

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 7
5. 応力計算 ····· 9
5.1 応力評価点 ····· 9
5.2 計算方針 ····· 10
5.2.1 原子炉格納容器に作用する荷重による応力 ····· 10
5.2.2 貫通部に作用する荷重による応力 ····· 10
6. 評価結果 ····· 11
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 11
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 14
7. 引用文献 ····· 16

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，電気配線貫通部が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は電気配線貫通部の地震応答解析，応力評価により行う。

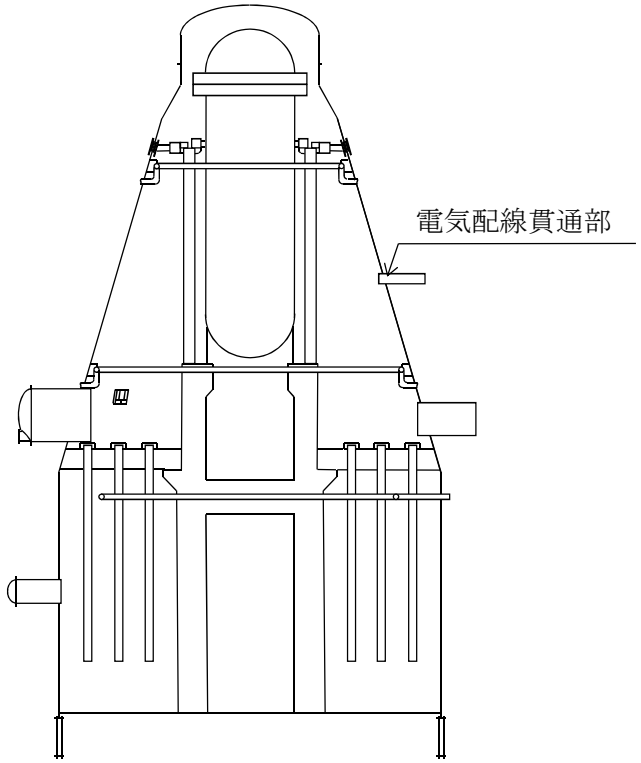
電気配線貫通部は設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下，それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

電気配線貫通部の構造計画を表2－1に示す。

表2－1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
電気配線貫通部は，原子炉格納容器に支持される。	・原子炉格納容器に円筒形スリーブ，アダプタ及びヘッダが取り付けられた鋼製構造物である。	

2.2　評価方針

(1)　電気配線貫通部の応力評価は，原子炉格納容器側の応力については，原子炉格納容器に作用する荷重（死荷重，圧力，地震荷重）による応力と，貫通部に作用する荷重による応力を組み合わせて評価する。原子炉格納容器に作用する荷重による応力は，引用文献(1)で計算した応力を用い，貫通部に作用する荷重による応力は，実績のある三次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，「Ⅴ-5-1　計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3. 形状及び主要寸法

電気配線貫通部の形状及び主要寸法を図 3－1 及び表 3－1 に示す。

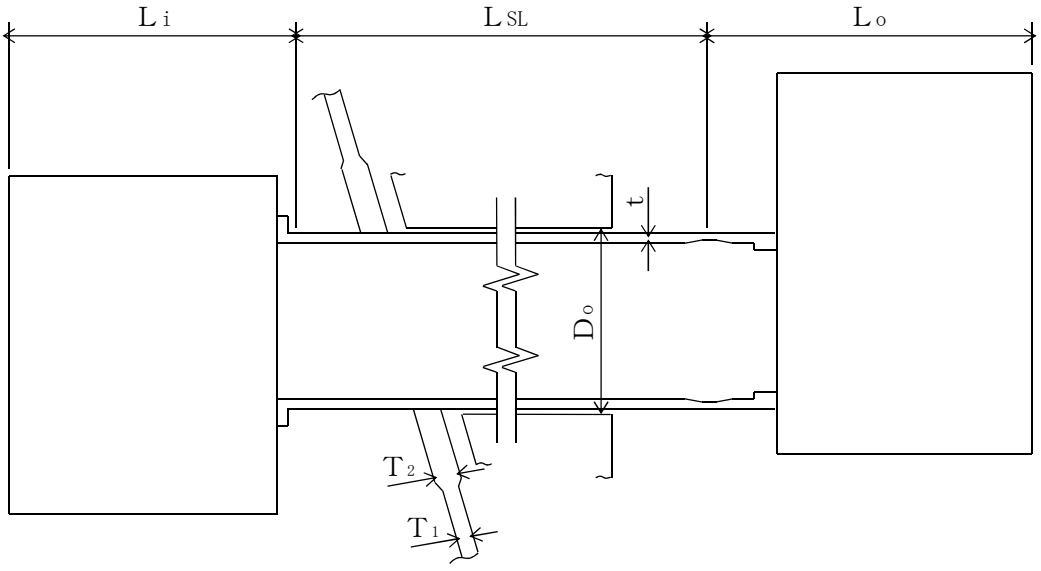


図 3－1　電気配線貫通部の形状

表 3－1　電気配線貫通部の寸法

（単位：mm）

貫通部番号	取付位置 (EL.)	D_o	t	T_1	T_2	L_{SL}	L_i	L_o
X-101D								

4. 設計条件

4.1 設計荷重

(1) 設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧 P_D	310 kPa
外圧 P_{DO}	14 kPa
温度 T_D	171 ℃

(2) 冷却材喪失事故後の最大内圧 P_{DBA} 255 kPa

(3) 重大事故等対処施設としての評価圧力及び評価温度

内圧 $P_{SA(L)}$	465 kPa （ＳＡ後長期）
内圧 $P_{SA(LL)}$	200 kPa （ＳＡ後長々期）
温度 $T_{SA(L)}$	171 ℃ （ＳＡ後長期）
温度 $T_{SA(LL)}$	150 ℃ （ＳＡ後長々期）

(4) 死荷重

a. 電気配線貫通部の自重

X-101D [redacted]

(5) 地震荷重

電気配線貫通部に加わる地震荷重について，添付書類「Ⅴ-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」にて設定した応答スペクトルの作成方針に基づき，作成した設計用床応答曲線を用いる。表 4－1 及び表 4－2 に示す設計震度により電気配線貫通部に加わる荷重を解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。計算モデルを図 4－1 に示す。

節点数 19

要素数 18

接続箱中心位置に接続箱質量を設定し，スリーブは等分布質量を設定

格納容器との接合はシェルバネを考慮

図 4－1 計算モデル

表 4－1　設計震度（設計用床応答曲線）（設計基準対象施設）

地震動	設置場所 及び床面高さ (m)	方向	減衰定数 (%)	備考
Ｓｄ	原子炉格納容器 EL.21.420～ EL.24.422	鉛直	1.0	水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。
		水平	1.0	
Ｓｓ	原子炉格納容器 EL.21.420～ EL.24.422	鉛直	1.0	水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。
		水平	1.0	

表 4－2　設計震度（設計用床応答曲線）（重大事故等対処設備）

地震動	設置場所 及び床面高さ (m)	方向	減衰定数 (%)	備考
Ｓｄ	原子炉格納容器 EL.21.420～ EL.24.422	鉛直	1.0	水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。
		水平	1.0	
Ｓｓ	原子炉格納容器 EL.21.420～ EL.24.422	鉛直	1.0	水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。
		水平	1.0	

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

原子炉格納容器胴　　(SGV480 相当)

補強板　　(SGV480 相当)

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－3 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－4 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－5 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－6 に示す。

表4－3　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	電気配線貫通部	S	クラスMC容器	D＋P＋M＋S_d*	ⅢAS
					D＋P＋M＋S_s	ⅣAS
					D＋P_L＋M_L＋S_d*	ⅣAS

表4－4　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	原子炉格納容器	電気配線貫通部	常設耐震／防止 常設／緩和	重大事故等クラス2容器	D＋P_{SALL}＋M_{SALL}＋S_s	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）
					D＋P_{SAL}＋M_{SAL}＋S_d	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）

注記　＊：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表4－5　許容応力（設計基準対象施設）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	171	ⅢAS	－	344	393
		ⅣAS	－	344*1	393
			－	380*2	393

注記　＊1：構造不連続部に対する許容応力を示す。

＊2：構造連続部に対する許容応力を示す。

表4－6　許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	171	VAS	－	344*1	393
			－	380*2	393
	150	VAS	－	348*1	393
			－	381*2	393

注記　＊1：構造不連続部に対する許容応力を示す。

＊2：構造連続部に対する許容応力を示す。

5. 応力計算

5.1 応力評価点

電気配線貫通部の形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表5－1及び図5－1に示す。

表5－1 応力評価点

貫通部番号	応力評価点番号	応力評価点
X-101D	Ｐ１	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側） （Ｐ１－Ａ～Ｐ１－Ｃ）
	Ｐ２	補強板取付部（胴側） （Ｐ２－Ａ～Ｐ２－Ｃ）

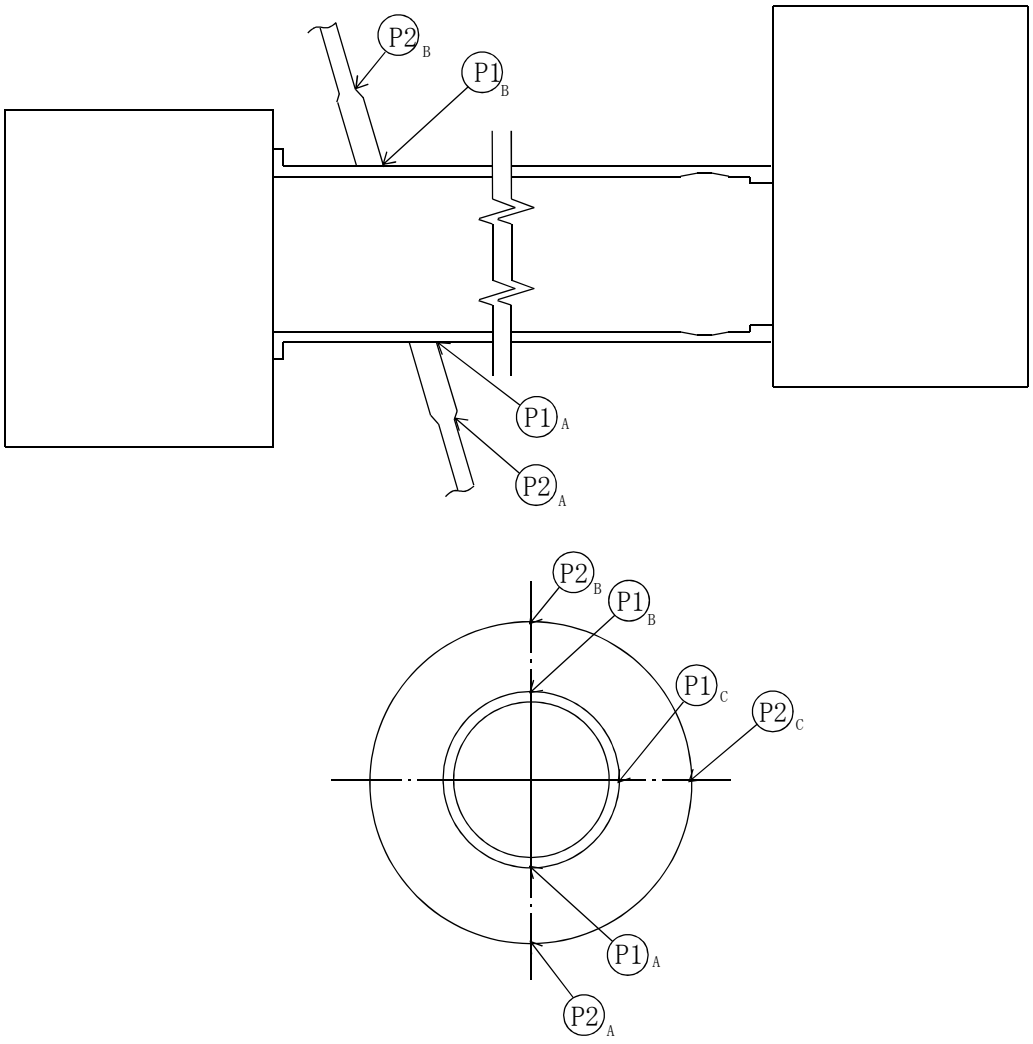


図5－1 応力評価点

5.2　計算方針

5.2.1　原子炉格納容器に作用する荷重による応力

原子炉格納容器に作用する最高使用圧力（内圧），最高使用圧力（外圧），死荷重及び地震荷重による応力は，引用文献(1)で計算した応力を用いる。

5.2.2　貫通部に作用する荷重による応力

貫通部に作用する死荷重，地震荷重による応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを用いて計算する。

計算モデルを図 5－2 に示す。

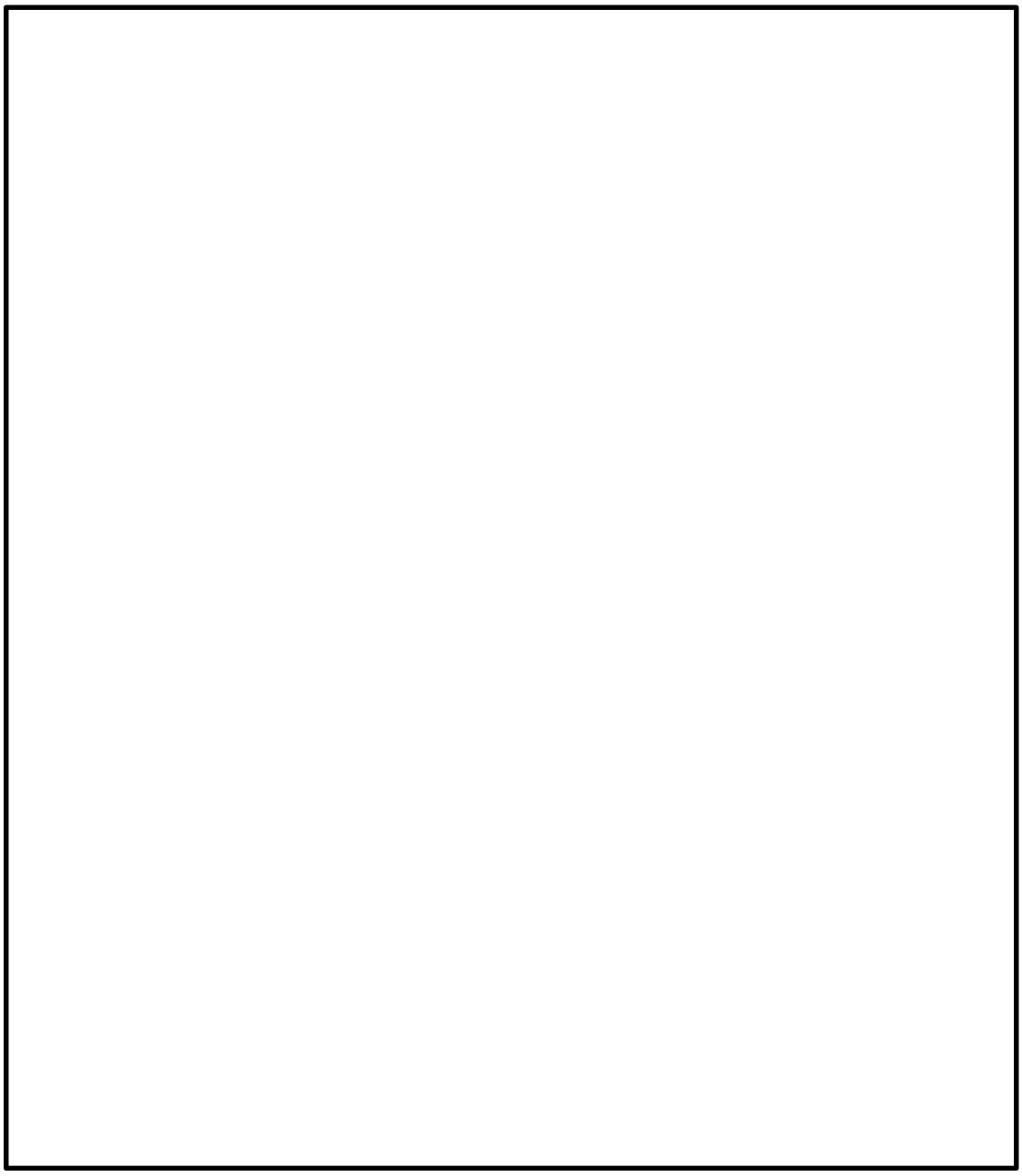


図 5－2　計算モデル（X-101D）

6.　評価結果

6.1　設計基準対象施設としての評価結果

配管貫通部の設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ⅣＡＳに対する評価

許容応力状態ⅣＡＳに対する応力評価結果を表 6－1 に示す。

表 4－3 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋Ｐ$_{L}$＋Ｍ$_{L}$＋Ｓ$_{d}$*及びＤ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓ$_{s}$の評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2)　許容応力状態ⅢＡＳに対する評価

許容応力状態ⅢＡＳに対する応力評価結果を表 6－2 に示す。

表 4－3 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓ$_{d}$*の評価について評価を記載している。

表6－1　許容応力状態ⅣＡＳに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｓ又はＤ＋ＰＬ＋ＭＬ＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣＡＳ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
電気配線貫通部	Ｐ１－Ａ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	112	344	○	①*
			一次＋二次応力	516	393	×*	①*
			疲労評価	0.346	1	○	単位なし
	Ｐ１－Ｂ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	117	344	○	①*
			一次＋二次応力	524	393	×*	①*
			疲労評価	0.378	1	○	単位なし
	Ｐ１－Ｃ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	96	344	○	①*
			一次＋二次応力	336	393	○	①*
	Ｐ２－Ａ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	104	380	○	②*
			一次＋二次応力	440	393	×*	①*
			疲労評価	0.065	1	○	単位なし
	Ｐ２－Ｂ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	112	380	○	②*
			一次＋二次応力	446	393	×*	①*
			疲労評価	0.069	1	○	単位なし
	Ｐ２－Ｃ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	98	380	○	②*
			一次＋二次応力	320	393	○	①*

注記　＊：①：Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｓ / ②：Ｄ＋ＰＬ＋ＭＬ＋Ｓｄ*における結果を示す。

Ｐ１－Ａ，Ｐ１－Ｂ及びＰ２－Ａ，Ｐ２－Ｂの一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥＳ　ＮＣ１－2005）PVB-3300に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

表6－2　許容応力状態ⅢＡＳに対する評価結果（Ｄ＋Ｐ＋Ｍ＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢＡＳ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
電気配線貫通部	Ｐ１－Ａ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	60	344	○	
			一次＋二次応力	274	393	○	
	Ｐ１－Ｂ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	66	344	○	
			一次＋二次応力	276	393	○	
	Ｐ１－Ｃ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	57	344	○	
			一次＋二次応力	180	393	○	
	Ｐ２－Ａ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	60	344	○	
			一次＋二次応力	234	393	○	
	Ｐ２－Ｂ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	59	344	○	
			一次＋二次応力	236	393	○	
	Ｐ２－Ｃ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	55	344	○	
			一次＋二次応力	170	393	○	

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

電気配線貫通部の重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ＶＡＳに対する評価

許容応力状態ＶＡＳに対する応力評価結果を表 6－3 に示す。

表 4－4 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓd又はＤ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓsの評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

表６－３　許容応力状態ＶＡＳに対する評価結果（Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓs又はＤ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓd）

評価対象設備	評価部位		応力分類	VAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
電気配線貫通部	Ｐ１－Ａ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	176	344	○	②*
			一次＋二次応力	512	393	×*	①*
			疲労評価	0.327	1	○	単位なし
	Ｐ１－Ｂ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	185	344	○	②*
			一次＋二次応力	520	393	×*	①*
			疲労評価	0.350	1	○	単位なし
	Ｐ１－Ｃ	原子炉格納容器胴とスリーブとの取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	162	344	○	②*
			一次＋二次応力	332	393	○	①*
	Ｐ２－Ａ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	174	380	○	②*
			一次＋二次応力	436	393	×*	①*
			疲労評価	0.059	1	○	単位なし
	Ｐ２－Ｂ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	182	380	○	②*
			一次＋二次応力	442	393	×*	①*
			疲労評価	0.063	1	○	単位なし
	Ｐ２－Ｃ	補強板取付部（胴側）	膜応力＋曲げ応力	166	380	○	②*
			一次＋二次応力	318	393	○	①*

注記　＊：①：Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓs / ②：Ｄ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓdにおける結果を示す。

Ｐ１－Ａ，Ｐ１－Ｂ及びＰ２－Ａ，Ｐ２－Ｂの一次＋二次応力評価結果は評価基準値を満足しないが，設計・建設規格（ＪＳＭＥ　ＳＮＣ１－2005）PVB-3300に基づいて疲労評価を行い，この結果より耐震性を有することを確認した。

7. 引用文献

(1) 「Ⅴ-2-9-2-1 原子炉格納容器本体の耐震性についての計算書」

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-772　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

V-2-9-4-2　ベント管の耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 5
4.1 設計荷重 ····· 5
4.2 材料及び許容応力 ····· 9
5. 応力計算 ····· 11
5.1 応力評価点 ····· 11
5.2 計算方針 ····· 12
6. 評価結果 ····· 13
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 13
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 16

1. 概要

本説明書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，ベント管が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価はベント管の地震応答解析，応力評価により行う。

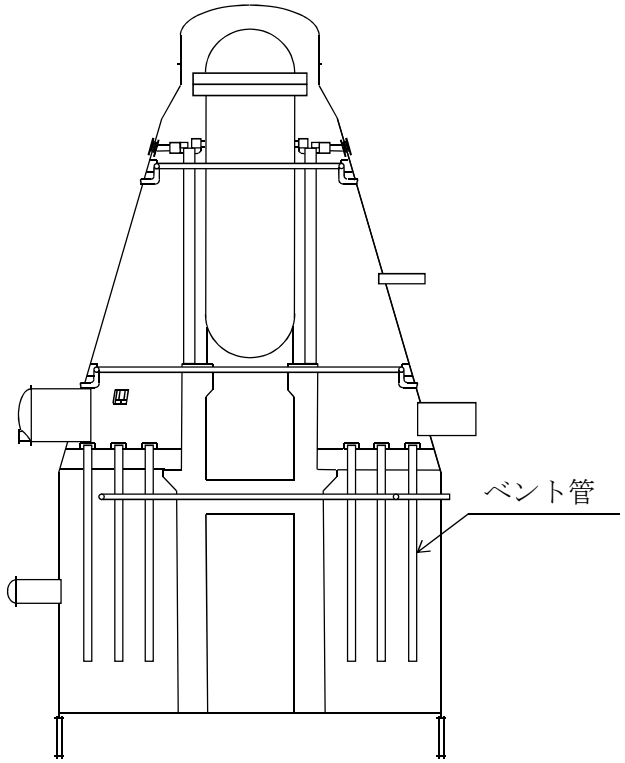
ベント管は設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下，それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

ベント管の構造計画を表2－1に示す。

表2－1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
・ベント管上部をダイヤフラムフロアに固定し，下部には水平ブレースにて支持している。	・ベント管は内径[redacted]mm，板厚[redacted]mm，長さ[redacted]mmの管でできている。 ・ベント管の上部には配管破断時の防護のためジェットデフレクタを取付けた構造である。	

2.2　評価方針

(1)　ベント管の応力評価は，東海第二発電所　昭和 48 年 10 月 22 日付け 48 公第 8316 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。各荷重による応力は，実績のある三次元ビームモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，「Ｖ-5-1　計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3. 形状及び主要寸法

ベント管の形状及び主要寸法を図3－1に示す。

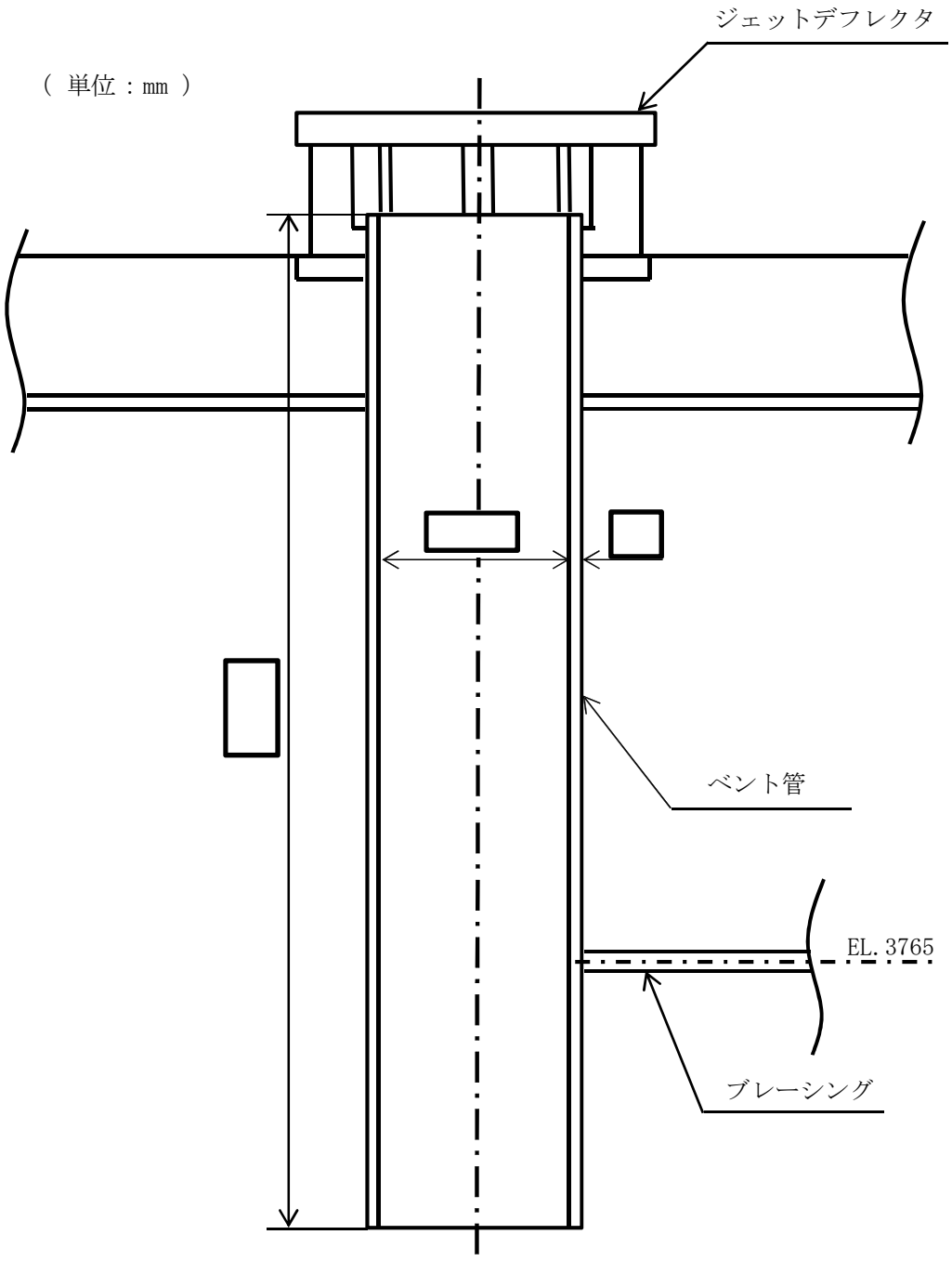


図3－1　ベント管の形状及び主要寸法（単位：mm）

4. 設計条件

4.1 設計荷重

(1) 設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

内圧P_D	173 kPa
温度T_D	171 ℃

(2) 重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

内圧$P_{SA(L)}$	173 kPa （ＳＡ後長期）
内圧$P_{SA(LL)}$	173 kPa （ＳＡ後長々期）
温度$T_{SA(L)}$	171 ℃ （ＳＡ後長期）
温度$T_{SA(LL)}$	150 ℃ （ＳＡ後長々期）

(3) 自重

ベント管 [redacted]

(4) 地震荷重

ベント管の設計震度について，水平方向については，「Ⅴ-2-1-7　設計用床応答曲線の作成方針」にて設定した応答スペクトルの作成方針に基づき，作成した（設計用床応答曲線）表 4－1 及び表 4－3 を用いる。また，鉛直方向については表 4－2 及び表 4－4 に示す設計震度を用いる。表 4－1～表 4－4 に示す設計震度によりベント管に加わる荷重を解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。計算モデルを図 4－1 に示す。

表 4－1　設計震度（設計用床応答曲線）（設計基準対象施設）

地震動	設置場所 及び床面高さ (m)	方向	減衰定数 (%)	備考
Ｓｄ	原子炉格納容器 EL. 13. 523 ペデスタル EL. 2. 189, EL. 8. 395 及び EL. 13. 198	水平	0. 5	水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。
Ｓｓ	原子炉格納容器 EL. 13. 523 ペデスタル EL. 2. 189, EL. 8. 395 及び EL. 13. 198	水平	0. 5	水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。

表 4－2　設計震度（設計基準対象施設）

機器	方向	Ｓｄ	Ｓｓ
ベント管	鉛直		

表 4－3　設計震度（設計用床応答曲線）（重大事故等対処設備）

地震動	設置場所 及び床面高さ (m)	方向	減衰定数 (%)	備考
Ｓｄ	原子炉格納容器 EL. 13. 523 ペデスタル EL. 2. 189, EL. 8. 395 及び EL. 13. 198	水平	0. 5	水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。
Ｓｓ	原子炉格納容器 EL. 13. 523 ペデスタル EL. 2. 189, EL. 8. 395 及び EL. 13. 198	水平	0. 5	水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。

表 4－4　設計震度（重大事故等対処設備）

機器	方向	Ｓｄ	Ｓｓ
ベント管	鉛直		

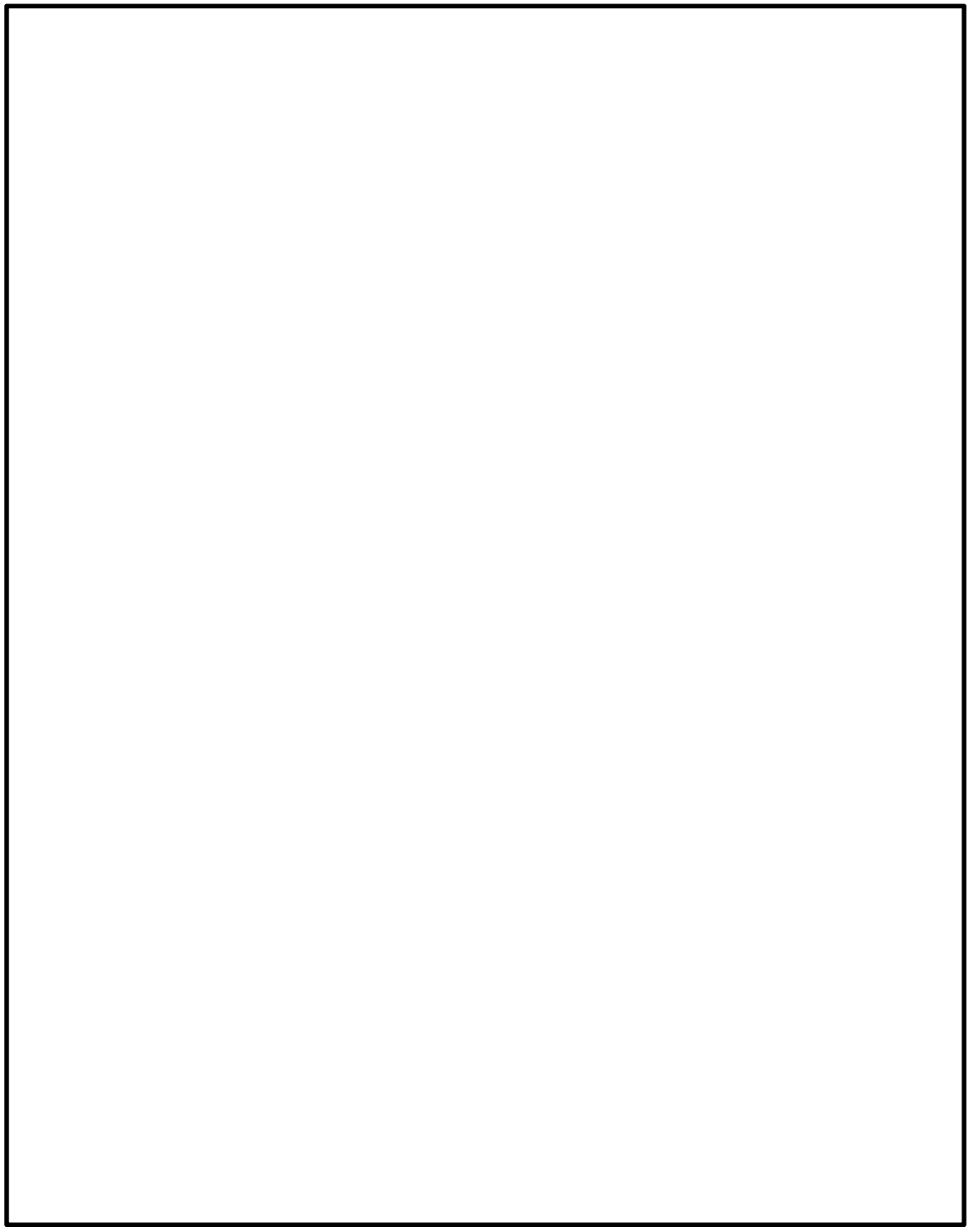


図 4－1　ベント管の計算モデル

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

ベント管　　(SGV480 相当)

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－5 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－6 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－7 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－8 に示す。

表4－5　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	圧力低減設備その他の安全設備	ベント管	S	クラス２管	$D+P_D+M_D+S_d^*$	ⅢAS
					$D+P_D+M_D+S_s$	ⅣAS

表4－6　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	圧力低減設備その他の安全設備	ベント管	常設耐震／防止常設／緩和	重大事故等クラス２管	$D+P_{SALL}+M_{SALL}+S_s$	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）
					$D+P_{SAL}+M_{SAL}+S_d$	VAS（VASとしてⅣASの許容限界を用いる。）

注記　＊：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表 4－7　許容応力（設計基準対象施設）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	171	ⅢAS	－	229	458
		ⅣAS	－	380	458

表4－8　許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	P_L+P_b	P_L+P_b+Q
[redacted]（SGV480 相当）	150	VAS	－	381	464
	171	VAS	－	380	458

5. 応力計算

5.1 応力評価点

ベント管の形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表5－1に示す。

表5－1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ１	上部
Ｐ２	ブレーシング部

5.2　計算方針

各荷重によりベント管に生じる応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。ベント管の計算モデルを図 4－1 に示す。

6.　評価結果

6.1　設計基準対象施設としての評価結果

ベント管の耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ⅣＡＳに対する評価

許容応力状態ⅣＡＳに対する応力評価結果を表 6－1 に示す。

表 4－5 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋ＰＤ＋ＭＤ＋Ｓｓの評価について記載している。

(2)　許容応力状態ⅢＡＳに対する評価

許容応力状態ⅢＡＳに対する応力評価結果を表 6－2 に示す。

表 4－5 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋ＰＤ＋ＭＤ＋Ｓｄ*の評価について記載している。

表 6－1　許容応力状態ⅣＡＳに対する評価結果（Ｄ＋ＰＤ＋ＭＤ＋Ｓｓ）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣＡＳ		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
ベント管	Ｐ１	上部	膜応力＋曲げ応力	139	380	○	
			一次＋二次応力	196	458	○	
	Ｐ２	ブレーシング部	膜応力＋曲げ応力	291	380	○	
			一次＋二次応力	422	458	○	

表６－２　許容応力状態ⅢASに対する評価結果（D＋PD＋MD＋Sd*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
ベント管	Ｐ１	上部	膜応力＋曲げ応力	101	229	○	
			一次＋二次応力	120	458	○	
	Ｐ２	ブレーシング部	膜応力＋曲げ応力	209	229	○	
			一次＋二次応力	258	458	○	

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

ベント管の重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ＶＡＳに対する評価

許容応力状態ＶＡＳに対する応力評価結果を表 6－3 に示す。

表 4－6 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋ＰＳＡＬＬ＋ＭＳＡＬＬ＋Ｓｓ及びＤ＋ＰＳＡＬ＋ＭＳＡＬ＋Ｓｄの評価について，それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

表６－３　許容応力状態ＶＡＳに対する評価結果（Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓs又はＤ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓd）

評価対象設備	評価部位		応力分類	VAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
ベント管	Ｐ１	上部	膜応力＋曲げ応力	159	381	○	①*
			一次＋二次応力	306	464	○	①*
	Ｐ２	ブレーシング部	膜応力＋曲げ応力	138	381	○	①*
			一次＋二次応力	264	464	○	①*

注記　＊：①：Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓs / ②：Ｄ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓdにおける結果を示す。

本資料のうち，枠囲みの内容は，営業秘密又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-773　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

V-2-9-4-3-1　格納容器スプレイヘッダの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 構造説明 ····· 2
2.1 構造計画 ····· 2
2.2 評価方針 ····· 3
3. 形状及び主要寸法 ····· 4
4. 設計条件 ····· 7
4.1 設計荷重 ····· 7
4.2 材料及び許容応力 ····· 12
5. 応力計算 ····· 14
5.1 応力評価点 ····· 14
5.2 計算方針 ····· 15
6. 評価結果 ····· 16
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 16
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 19

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき，格納容器スプレイヘッダが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は格納容器スプレイヘッダの地震応答解析，応力評価により行う。

格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）は設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。

格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）は設計基準対象施設においては既設のＳクラス施設に，重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。

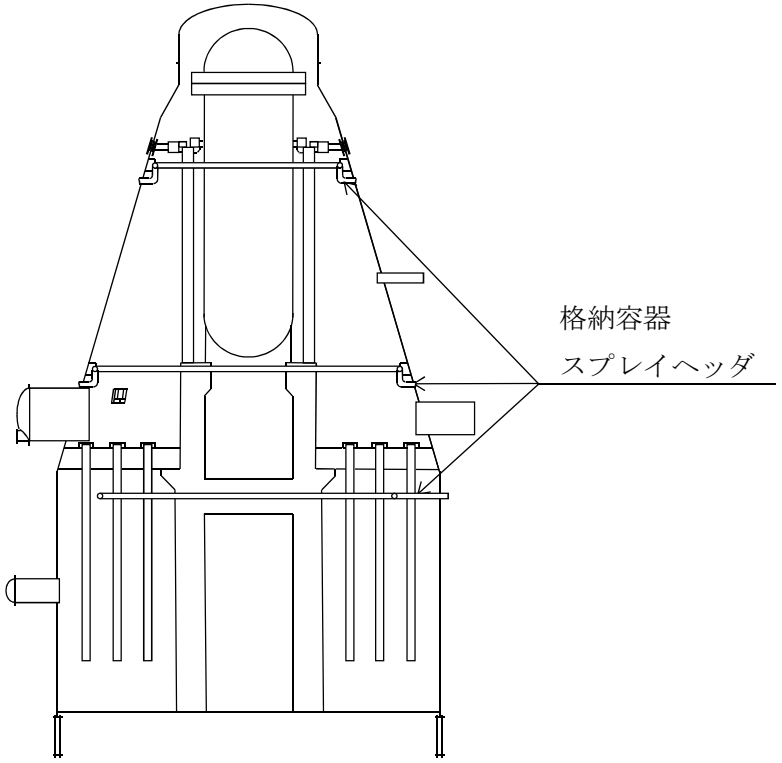
以下，それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

格納容器スプレイヘッダの構造計画を表2－1に示す。

表2－1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
・格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）の耐震サポートは，ドライウェルシェルよりとる。 ・格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）の耐震サポートは，ダイヤフラムフロアコラムサポートよりとる。	・格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）は，外径 [redacted] mm，[redacted] mm の管で作られ，上部スプレイヘッダは直径約 [redacted] m，下部スプレイヘッダは直径約 [redacted] m の円環構造となっている。 ・格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）は，外径 [redacted] mm の管で作られ，直径約 [redacted] m の円環構造となっている。	

2.2　評価方針

(1)　格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）の応力評価は，東海第二発電所　昭和 48 年 4 月 9 日付け 47 公第 12076 号（既工認），格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）の応力評価は，昭和 48 年 10 月 22 日付け 48 公第 8316 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。各荷重による応力は，実績のある三次元ビームモデルによる有限要素解析手法を適用する。

(2)　解析コードはＮＡＳＴＲＡＮを用いる。なお，評価に用いる解析コードＮＡＳＴＲＡＮの検証及び妥当性確認等の概要については，「Ⅴ-5-1　計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3. 形状及び主要寸法

格納容器スプレイヘッダの形状及び主要寸法を図 3－1～図 3－3 に示す。

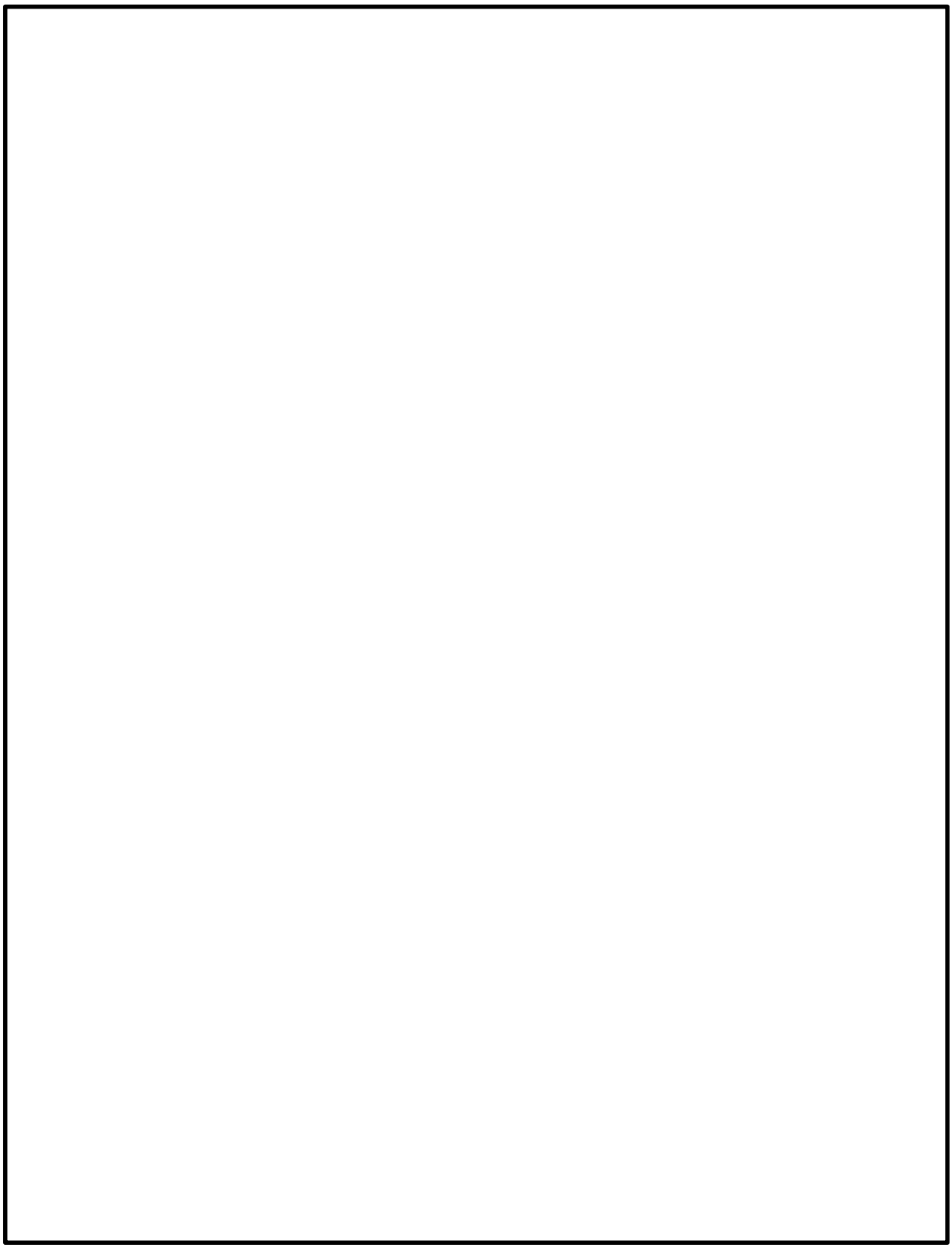


図 3－1　格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）及びサポートの形状及び主要寸法
（単位：mm）

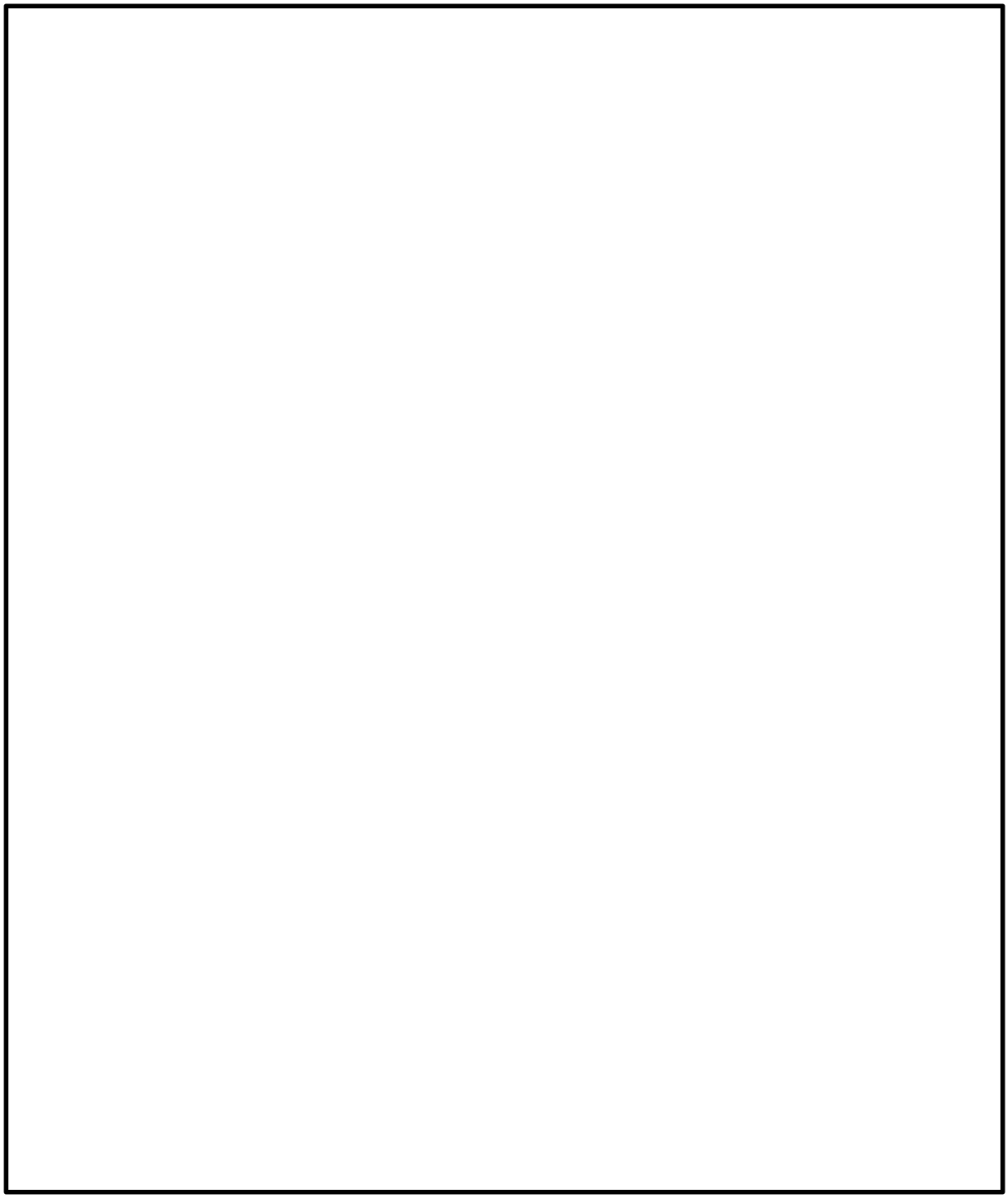


図 3－2　格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）案内管の形状及び主要寸法（単位：mm）

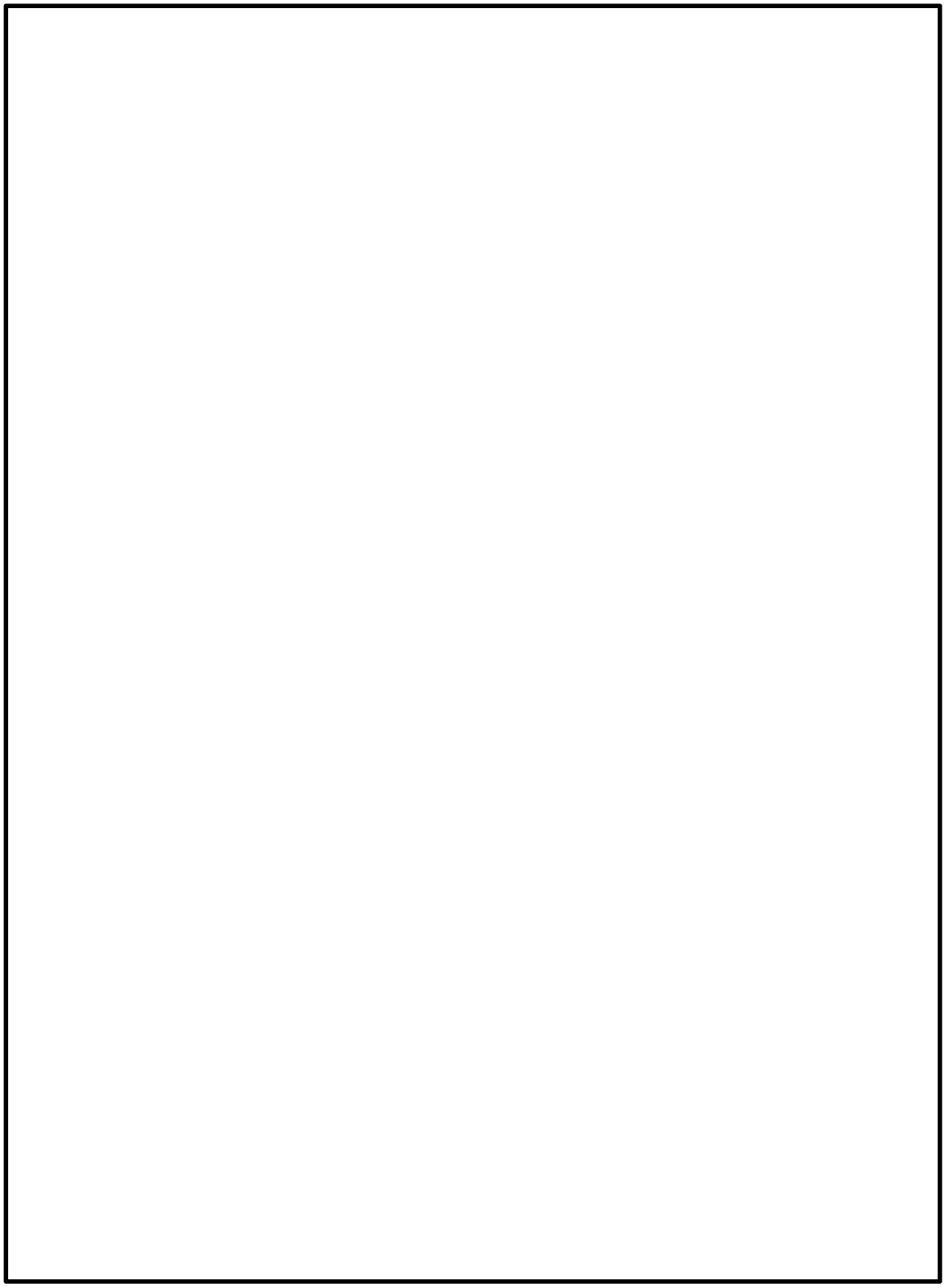


図 3－3　格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）の形状及び主要寸法
（単位：mm）

4. 設計条件

4.1 設計荷重

(1) 設計基準対象施設としての最高使用圧力及び最高使用温度

a. 格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）

内圧 P_D 3450 kPa

温度 T_D 76.7 ℃

b. 格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）

内圧 P_D 3450 kPa

温度 T_D 76.7 ℃

(2) 重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

a. 格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）

内圧 P_D 3450 kPa

温度 $T_{SA(L)}$ 171 ℃（ＳＡ後長期）

温度 $T_{SA(LL)}$ 150 ℃（ＳＡ後長々期）

b. 格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）

内圧 P_D 3450 kPa

温度 $T_{SA(L)}$ 171 ℃（ＳＡ後長期）

温度 $T_{SA(LL)}$ 150 ℃（ＳＡ後長々期）

(3) 地震荷重

a. 格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）

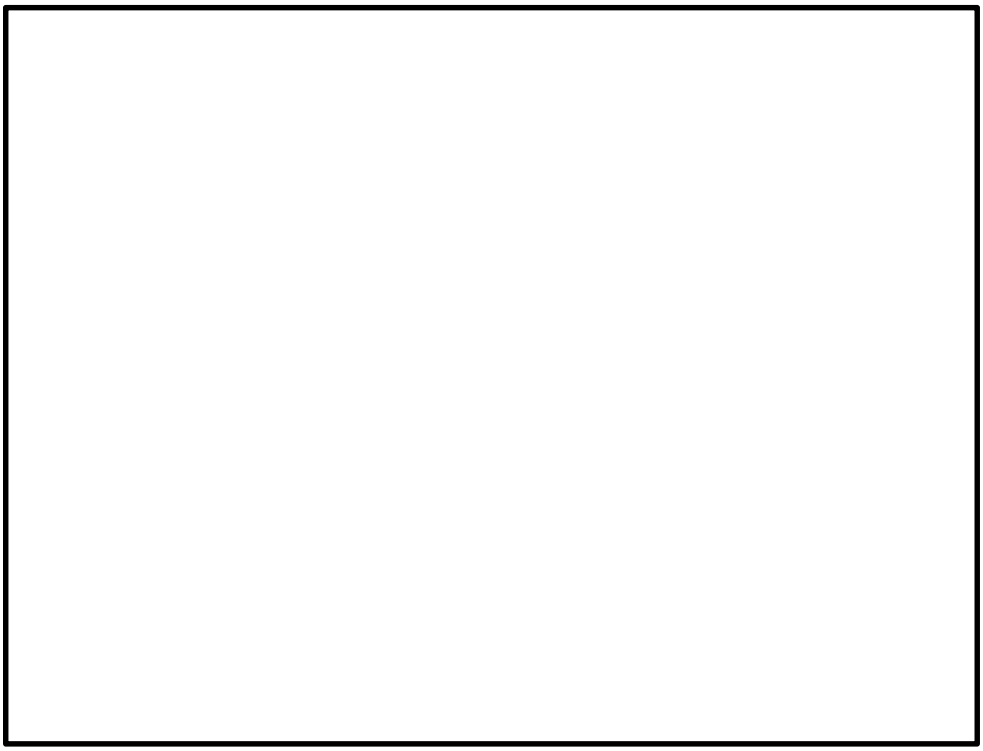
格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）の設計震度について，設計基準対象施設の評価に用いるものを表4－1に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表4－2に示す。表4－1及び表4－2に示す設計震度により格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）に加わる荷重を解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。計算モデルを図4－1に示す。

表4－1 設計震度（設計基準対象施設）

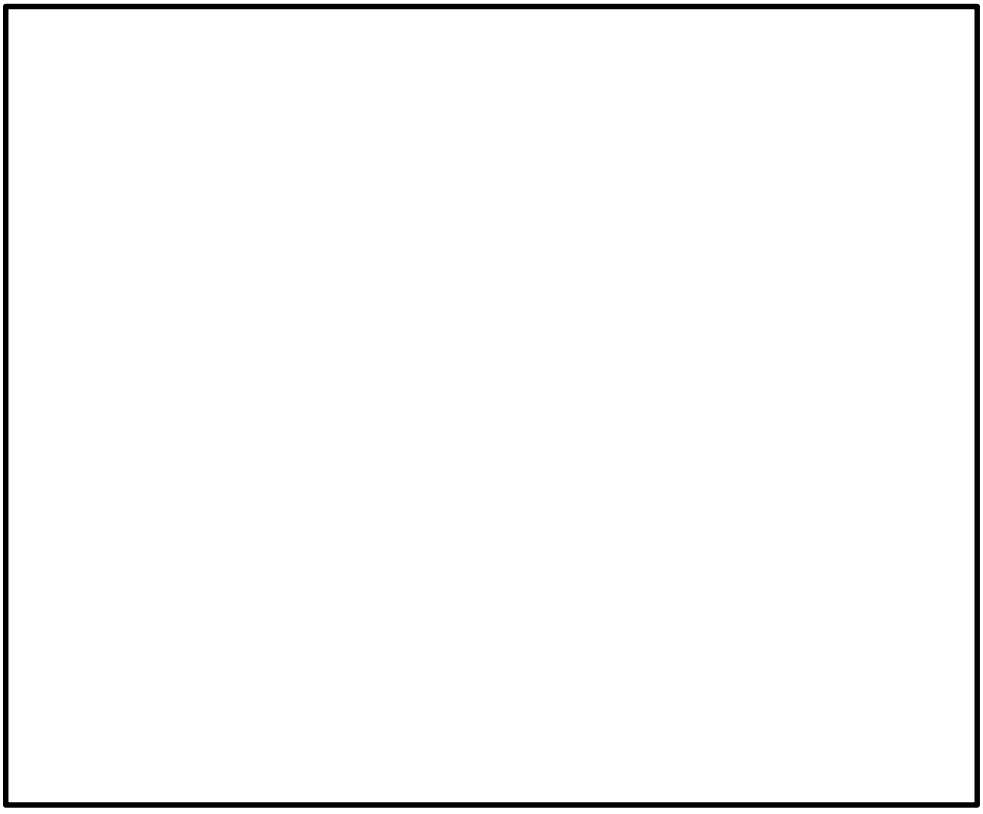
機器	床面高さ(m)	方向	Ｓｄ*	Ｓｓ
上部スプレイヘッダ				
下部スプレイヘッダ				

表 4－2　設計震度（重大事故等対処設備）

機器	床面高さ(m)	方向	Ｓｄ	Ｓｓ
上部スプレイヘッダ				
下部スプレイヘッダ				



上部ドライウェルスプレイヘッダ案内管



下部ドライウェルスプレイヘッダ案内管

図 4－1　格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）の計算モデル

b.　格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）

格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）の設計震度について，添付書類「Ⅴ-2-1-7　設計用床応答曲線の作成方針」にて設定した応答スペクトルの作成方針に基づき，作成した設計用床応答曲線を用いる。表 4－3 及び表 4－4 に示す設計震度により格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）に加わる荷重を解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。計算モデルを図 4－2 に示す。

表 4－3　設計震度（設計用床応答曲線）（設計基準対象施設）

地震動	設置場所 及び床面高さ (m)	方向	減衰定数 (%)	備考
Ｓd				水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。
Ｓs				水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。

表 4－4　設計震度（設計用床応答曲線）（重大事故等対処設備）

地震動	設置場所 及び床面高さ (m)	方向	減衰定数 (%)	備考
Ｓd				水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。
Ｓs				水平方向はＸ方向及びＹ方向の包絡曲線を用いる。

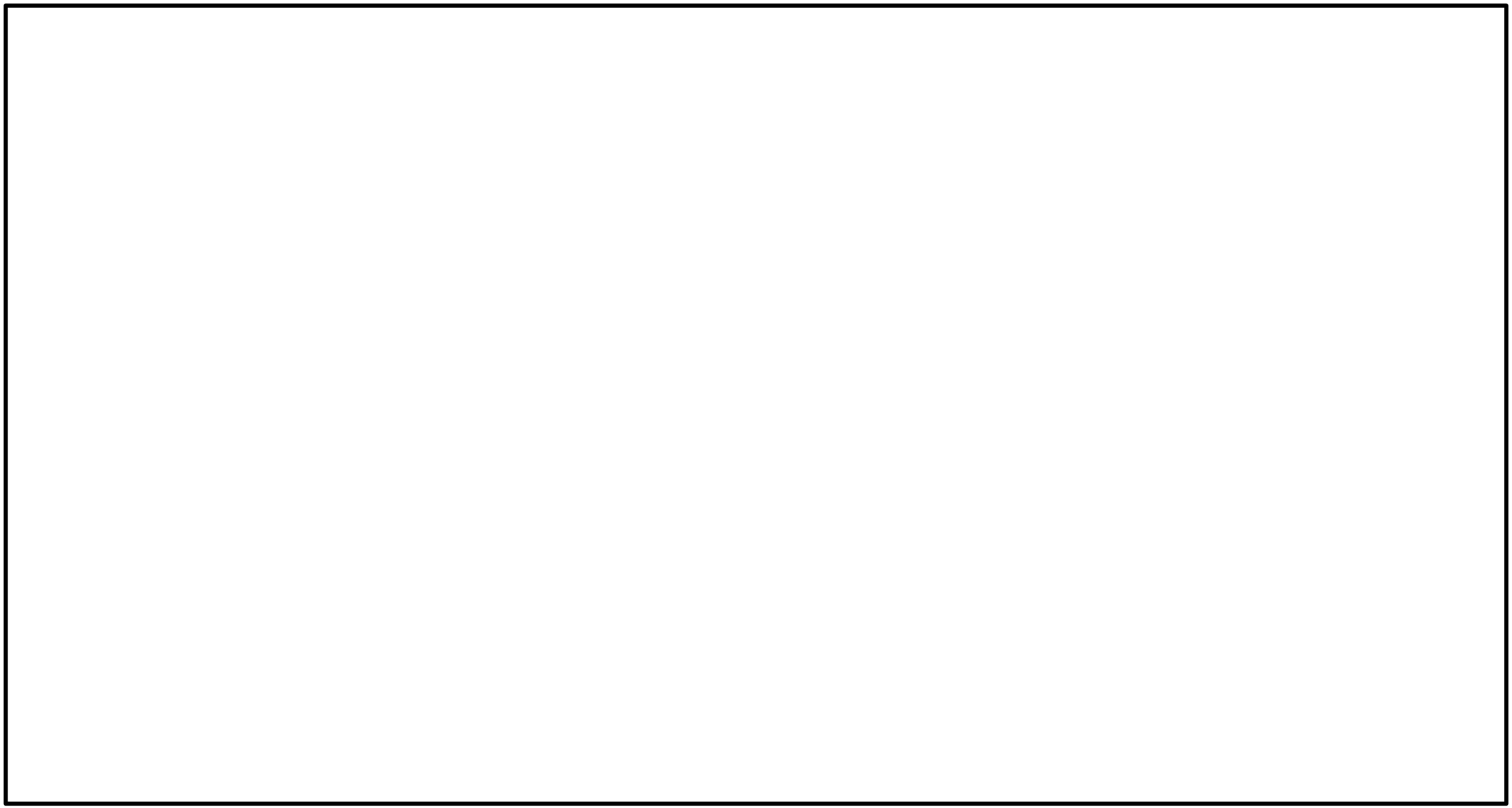


図 4－2　格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）の計算モデル

4.2　材料及び許容応力

(1)　材料

格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）　[redacted]　(GSTPL 相当)

格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）　(GSTPL 相当)

(2)　荷重の組合せ及び許容応力

基準地震動の策定に伴う地震荷重との組合せの評価として，荷重の組合せ及び許容応力状態のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－5 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－6 に示す。各材料の許容応力状態に対する許容応力のうち，設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－7 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－8 に示す。

表4－5　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	圧力低減設備	格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）	S	クラス２管	$D+P_D+M_D+S_d^*$	ⅢAS
					$D+P_D+M_D+S_s$	ⅣAS
		格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）			$D+P_D+M_D+S_d^*$	ⅢAS
					$D+P_D+M_D+S_s$	ⅣAS

表4－6　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉格納施設	圧力低減設備	格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）	常設耐震／防止 常設／緩和	重大事故等クラス２管	D＋P_{SALL}＋M_{SALL}＋S_s	V_AS（V_ASとしてIV_ASの許容限界を用いる。）
					D＋P_{SAL}＋M_{SAL}＋S_d	
		格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）	常設耐震／防止 常設／緩和		D＋P_{SALL}＋M_{SALL}＋S_s	V_AS（V_ASとしてIV_ASの許容限界を用いる。）
					D＋P_{SAL}＋M_{SAL}＋S_d	

注記　＊：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表4－7　許容応力状態に対する許容応力（設計基準対象施設）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	$P_L＋P_b$	$P_L＋P_b＋Q$
[redacted]（GSTPL 相当）	76.7	III_AS	－	226	453
		IV_AS	－	348	453

表4－8　許容応力状態に対する許容応力（重大事故等対処設備）

（単位：MPa）

材料	温度（℃）	許容応力状態	許容応力		
			一次応力		一次＋二次応力
			P_m	$P_L＋P_b$	$P_L＋P_b＋Q$
[redacted]（GSTPL 相当）	150	V_AS	－	339	428
	171	V_AS	－	339	422

5. 応力計算

5.1 応力評価点

格納容器スプレイヘッダの設計基準対象施設としての形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表5－1及び表5－2に示す。

表5－1 格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）の応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ１	上部ドライウェルスプレイヘッダ案内管直管部
Ｐ２	上部ドライウェルスプレイヘッダ案内管エルボ部
Ｐ３	下部ドライウェルスプレイヘッダ案内管直管部
Ｐ４	下部ドライウェルスプレイヘッダ案内管エルボ部

表5－2 格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）の応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
Ｐ１	サプレッション・チェンバスプレイヘッダスプレイ管部
Ｐ２	サプレッション・チェンバスプレイヘッダティー部
Ｐ３	サプレッション・チェンバスプレイヘッダ案内管部

5.2　計算方針

各荷重により格納容器スプレイヘッダに生じる応力は，解析コードＮＡＳＴＲＡＮを使用して計算する。格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）の計算モデルを図 4－1 に，格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）の計算モデルを図 4－2 に示す。

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

格納容器スプレイヘッダの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態ⅣＡＳに対する評価

許容応力状態ⅣＡＳに対する応力評価結果を表 6－1 に示す。

表 4－5 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋ＰＤ＋ＭＤ＋Ｓｓの評価について記載している。

(2) 許容応力状態ⅢＡＳに対する評価

許容応力状態ⅢＡＳに対する応力評価結果を表 6－2 に示す。

表 4－5 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋ＰＤ＋ＭＤ＋Ｓｄ*の評価について記載している。

表6－1　許容応力状態ⅣＡＳに対する応力評価結果（Ｄ＋ＰＤ＋ＭＤ＋Ｓｓ）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅣＡＳ		判定	備考
				発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)		
格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）	Ｐ１	上部ドライウェル スプレイヘッダ案内管直管部	膜応力＋曲げ応力	21	348	○	
			一次＋二次応力	6	453	○	
	Ｐ２	上部ドライウェル スプレイヘッダ案内管エルボ部	膜応力＋曲げ応力	20	348	○	
			一次＋二次応力	2	453	○	
	Ｐ３	下部ドライウェル スプレイヘッダ案内管直管部	膜応力＋曲げ応力	25	348	○	
			一次＋二次応力	14	453	○	
	Ｐ４	下部ドライウェル スプレイヘッダ案内管エルボ部	膜応力＋曲げ応力	21	348	○	
			一次＋二次応力	4	453	○	
格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）	Ｐ１	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダスプレイ管部	膜応力＋曲げ応力	32	348	○	
			一次＋二次応力	75	453	○	
	Ｐ２	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダティー部	膜応力＋曲げ応力	41	348	○	
			一次＋二次応力	284	453	○	
	Ｐ３	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダ案内管部	膜応力＋曲げ応力	34	348	○	
			一次＋二次応力	60	453	○	

表 6－2　許容応力状態ⅢＡＳに対する応力評価結果（Ｄ＋ＰＤ＋ＭＤ＋Ｓｄ*）

評価対象設備	評価部位		応力分類	ⅢＡＳ		判定	備考
				発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)		
格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）	Ｐ１	上部ドライウェル スプレイヘッダ案内管直管部	膜応力＋曲げ応力	20	226	○	
			一次＋二次応力	4	453	○	
	Ｐ２	上部ドライウェル スプレイヘッダ案内管エルボ部	膜応力＋曲げ応力	20	226	○	
			一次＋二次応力	2	453	○	
	Ｐ３	下部ドライウェル スプレイヘッダ案内管直管部	膜応力＋曲げ応力	22	226	○	
			一次＋二次応力	8	453	○	
	Ｐ４	下部ドライウェル スプレイヘッダ案内管エルボ部	膜応力＋曲げ応力	20	226	○	
			一次＋二次応力	2	453	○	
格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）	Ｐ１	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダスプレイ管部	膜応力＋曲げ応力	29	226	○	
			一次＋二次応力	50	453	○	
	Ｐ２	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダティー部	膜応力＋曲げ応力	34	226	○	
			一次＋二次応力	192	453	○	
	Ｐ３	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダ案内管部	膜応力＋曲げ応力	30	226	○	
			一次＋二次応力	39	453	○	

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

格納容器スプレイヘッダの重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており，耐震性を有することを確認した。

(1)　許容応力状態ＶＡＳに対する評価

許容応力状態ＶＡＳに対する応力評価結果を表 6－3 に示す。

表 4－6 に示す荷重の組合せのうち，Ｄ＋ＰＳＡＬＬ＋ＭＳＡＬＬ＋Ｓｓ及びＤ＋ＰＳＡＬ＋ＭＳＡＬ＋Ｓｄの評価について，それぞれ評価基準値に対する発生値の割合が高い方の評価を記載している。

表6－3　許容応力状態ＶＡＳに対する応力評価結果（Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓs及びＤ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓd）

評価対象設備	評価部位		応力分類	VAS		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				(MPa)	(MPa)		
格納容器スプレイヘッダ（ドライウェル側）	Ｐ１	上部ドライウェル スプレイヘッダ案内管直管部	膜応力＋曲げ応力	21	339	○	①*
			一次＋二次応力	6	428	○	①*
	Ｐ２	上部ドライウェル スプレイヘッダ案内管エルボ部	膜応力＋曲げ応力	20	339	○	①*②*
			一次＋二次応力	2	422	○	②*
	Ｐ３	下部ドライウェル スプレイヘッダ案内管直管部	膜応力＋曲げ応力	25	339	○	①*
			一次＋二次応力	14	428	○	①*
	Ｐ４	下部ドライウェル スプレイヘッダ案内管エルボ部	膜応力＋曲げ応力	21	339	○	①*
			一次＋二次応力	4	428	○	①*
格納容器スプレイヘッダ（サプレッション・チェンバ側）	Ｐ１	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダスプレイ管部	膜応力＋曲げ応力	32	339	○	①*
			一次＋二次応力	75	428	○	①*
	Ｐ２	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダティー部	膜応力＋曲げ応力	41	339	○	①*
			一次＋二次応力	284	428	○	①*
	Ｐ３	サプレッション・チェンバ スプレイヘッダ案内管部	膜応力＋曲げ応力	34	339	○	①*
			一次＋二次応力	60	428	○	①*

注記　＊：①：Ｄ＋ＰSALL＋MSALL＋Ｓs / ②：Ｄ＋ＰSAL＋MSAL＋Ｓdにおける結果を示す。

本資料のうち，枠囲みの内容は営業秘密又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-746　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-4-2-3　使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震性についての計算書

Ⅴ-2-4-2-3 ①キャスク容器及び中間胴の応力計算書

目次

1. 概要 ····· 1
1.1 形状・寸法・材料 ····· 1
1.2 計算結果の概要 ····· 1
2. 温度分布計算 ····· 2
2.1 計算方法 ····· 2
2.2 温度分布図 ····· 2
3. 応力計算 ····· 3
3.1 応力評価点 ····· 3
3.2 貯蔵時（S_d^*及びS_s地震力が作用する場合） ····· 3
3.2.1 荷重条件 ····· 3
3.2.2 計算方法 ····· 3
3.2.3 計算結果 ····· 3
4. 応力の評価 ····· 4
4.1 キャスク容器（ボルトを除く）の応力評価 ····· 4
4.2 ボルトの応力評価 ····· 4
4.3 中間胴の応力評価 ····· 4
4.4 特別な応力の評価 ····· 4
5. 繰返し荷重の評価 ····· 5
5.1 キャスク容器（ボルトを除く）の評価 ····· 5
5.2 ボルトの評価 ····· 5
5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122及び添付 4-2 3.4に対する検討 ····· 5
5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析 ····· 5
5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析 ····· 7
6. 穴の補強 ····· 8

補足資料－1

図表目次

図 1-1　形状・寸法・材料 ····· 9
図 2-1　温度分布計算モデル ····· 10
図 2-2　温度分布図（貯蔵時） ····· 11
図 3-1　キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面） ····· 12
図 3-2　キャスク容器及び中間胴の解析モデル（地震時） ····· 13
図 6-1　応力差の変動（一次蓋締付けボルト） ····· 14
図 6-2　応力差の変動（バルブカバー締付けボルト） ····· 15

表 1-1　計算結果の概要 ····· 16
表 2-1(1)　貯蔵時における熱伝達率の計算 ····· 19
表 2-1(2)　運搬時における熱伝達率の計算 ····· 20
表 2-2　温度分布計算の評価条件 ····· 21
表 3-1　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合） 22
表 3-2　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合） 27
表 4-1　キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合） ····· 32
表 4-2　キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合） ····· 35
表 5-1　キャスク容器(ボルトを除く)の疲労解析不要の評価結果 ·····
表 5-2　各事象の繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト） ····· 41
表 5-3　各事象の繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト） ····· 41
表 6-1　貫通孔部の応力強さ ····· 42

1. 概要

本計算書は，キャスク容器及び中間胴に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 温度分布計算

2.1 計算方法

温度分布計算は，解析コードＡＢＡＱＵＳにより行う。軸対称固体(連続体)要素による解析モデルを図 2-1 に示す。

温度分布計算に使用する外表面の熱伝達率を表 2-1 に示す。

2.2 温度分布図

2.1 項の計算により得られた温度分布を図 2-2 に示す。

3.　応力計算

3.1　応力評価点

キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面）を図 3-1 に示す。

3.2　貯蔵時（S_d^*及びS_s地震力が作用する場合）

3.2.1　荷重条件

貯蔵時においてS_d^*及びS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

キャスク容器内圧力（－0.1MPa)＋蓋間圧力(0.4MPa)＋ボルト初期締付け力
＋熱荷重＋地震力＋自重

3.2.2　計算方法

(1) 一次応力及び一次＋二次応力

a. 一次蓋，一次蓋締付けボルト，内胴，上部フランジ，底板及び中間胴

解析コードＡＢＡＱＵＳの三次元固体(連続体)要素による解析モデルを図 3-2 に示す。

熱荷重として，貯蔵時での熱解析の結果から得られたキャスク容器，中間胴及びガンマ線遮へい体に生じる温度変化，温度勾配による荷重を用いる。

加速度として次の値を用いる。

$G_1 = \alpha_H$, $G_2 = 9.81 - \alpha_V$

ここで，α_H：水平方向設計加速度（$= C_HG = 11.48 m/s^2$）

α_V：鉛直方向設計加速度（$= C_VG = 6.38 m/s^2$）

(2) 支圧応力

バスケット底面との接触部の底板に発生する平均支圧応力（σ_p）は次式で表わされる。

$\sigma_p = W_G \cdot G_Z / A$

ここで，W_G　：バスケット及び燃料の質量（=25200kg）

G_Z　：鉛直方向加速度（$=9.81 + \alpha_V = 16.19 m/s^2$）

A　：接触面積　（$=1.17 \times 10^6$ mm^2）

(3) 座屈応力

中間胴に生じる圧縮応力（σ_b）は（1）a.の計算方法と同様である。

3.2.3　計算結果

応力計算結果を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

4. 応力の評価

4.1 キャスク容器（ボルトを除く）の応力評価

各設計事象における評価を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，各設計事象の一次一般膜応力強さ（P_m），一次局部膜応力強さ（P_L），一次膜＋一次曲げ応力強さ（P_L+P_b）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ（P_L+P_b+Q）は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

4.2 ボルトの応力評価

各設計事象における評価を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，各設計事象の平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

4.3 中間胴の応力評価

各設計事象における評価を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，キャスク容器との溶接部近接部分における各設計事象の一次一般膜応力強さ（P_m），一次局部膜応力強さ（P_L），一次膜＋一次曲げ応力強さ（P_L+P_b）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ（P_L+P_b+Q）は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

また，上記以外の範囲における各設計事象の引張応力，せん断応力，圧縮応力，曲げ応力，支圧応力及び座屈応力並びに地震時の組合せ応力は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

4.4 特別な応力の評価

(1) 純せん断応力

各設計事象において純せん断応力（σ_s）に該当する評価箇所がないため，評価を省略する。

(2) 支圧応力

各設計事象における評価を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，各設計事象の平均支圧応力（σ_p）は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

(3) 圧縮応力

各設計事象における評価を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，各設計事象の圧縮応力（σ_b）は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

5.　繰返し荷重の評価

5.1　キャスク容器（ボルトを除く）の評価

設計・建設規格　PVB-3140 により，疲労解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を示す。地震力により発生する応力の全振幅を表 4-1 及び表 4-2 に示した応力強さ(一次＋二次応力：地震力のみによる全振幅を示す)の最大値(S_{max}＝62MPa)とすると，この応力値は設計・建設規格 添付 4-2 3.2 において 10 の 11 乗を許容繰返し数としたときにこれに対応する繰返しピーク応力強さの値の 114MPa(設計・建設規格 添付 4-2-2 曲線 B に相当)以下となる（表 5-1）。したがって，地震力による応力は設計・建設規格　PVB-3140 の規定を満足しているので，疲労評価を必要としない。

5.2　ボルトの評価

「応力解析の方針」5.5 項の規定にしたがって疲労解析を行う。なお，本項において燃料装荷･取出しサイクルの回数を 100 回に想定しても規定を十分満足することを示す。

5.2.1　設計・建設規格　PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討

(1) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの最小引張強さは 1000 MPa であり，設計・建設規格　PVB-3122(2)に従い，設計疲労曲線として設計・建設規格　添付 4-2 3.4 を使用する。

(2) ねじは三角ねじであり，ねじ底部の半径は一次蓋締付けボルトが 0.375 ㎜，バルブカバー締付けボルトが 0.25 ㎜であって 0.07 ㎜より大である。

(3) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は，

一次蓋締付けボルト　：$\dfrac{2.2}{31}$＝0.071

バルブカバー締付けボルト：$\dfrac{1.0}{13}$＝0.077

であって，0.06 以上である。

5.2.2　一次蓋締付けボルトの疲労解析

疲労解析で考慮する事象とその繰返し回数は以下とする。

① 運搬時（前後方向）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 各 800 回

② 吊上げ時・・2000 回

③ 支持構造物への衝突（下部トラニオンの衝突）・・・・・・・・・・・・・・・・3 回

④ 支持構造物への衝突（底部脚部の衝突）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3 回

⑤ 地震時（S_d*地震力及びS_s地震力が作用する場合）・・・・・・・ 各 60 回

⑥ 一次蓋締付けボルトの取付け（ゼロ応力状態）・・・・・・・・・・・・・・100 回

①から⑤の事象において，一次蓋締付けボルトに生じる繰返しピーク応力強さは，次式で計算する。

$$S_p = K \cdot \frac{W_\ell \cdot G_1}{A} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.1)$$

ただし，①から④の事象においては⑥の一次蓋締付けボルト締付けによるピーク

応力強さが付加される。

S_p　：繰返しピーク応力強さ（MPa）
K　：一次蓋締付けボルトのねじ部の応力集中係数（＝4）
W_ℓ　：運搬時においては（一次蓋＋バスケット＋燃料）の質量（=30600kg），運搬時以外は一次蓋の質量（=5400kg）
G_1　：軸方向の加速度
運搬時（前後方向）…… 19.62 m/s^2
吊上げ時…… 12.95 m/s^2
支持構造物への衝突（下部トラニオンの衝突）‥ 29.42 m/s^2
支持構造物への衝突（底部脚部の衝突）…… 68.85 m/s^2
地震時（S_d*地震力が作用する場合）…… 6.38 m/s^2
地震時（S_s地震力が作用する場合）…… 6.38 m/s^2
A　：全数のボルト最小断面積（＝3.01×10^{4}mm^2）

⑥の一次蓋締付けボルトの締付けによるピーク応力強さは，次式で計算する。

$$\left.\begin{aligned} S_p &= K \cdot S_b \\ S_b &= \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \\ \tau &= \frac{T}{\pi \cdot d_s^3 / 16} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad （５．２）$$

ここで，

S_p, K　：（５．１）式と同じ。
S_b　：ボルト締付け時に発生する応力強さ（＝385.6MPa）
σ　：設計時を除く全事象のうち一次蓋締付けボルトに発生する平均引張応力の最大値（213MPa）
τ　：ねじり応力（MPa）
T　：ボルト締付けトルク（＝9.4×10^5 N・mm）
d_s　：一次蓋締付けボルトの最小径（＝31 mm）

以上から，ピーク応力強さの範囲は図 5-1 に示すとおりとなる。

また，繰返しピーク応力強さは次式で計算する。ただし，S_p はピーク応力強さの変動範囲である。

$$S_\ell = \frac{1}{2} \cdot S_p \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad （５．３）$$

設計・建設規格　添付 4-2 3.4 (4)のとおり，（2.07×10^5）と材料の使用温度における縦弾性係数（E＝1.83×10^{5}MPa）の比を繰返しピーク応力強さに乗じて補正する。

$$S_{\ell}' = S_{\ell} \cdot \frac{2.07\times10^{5}}{E} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad （5．4）$$

設計・建設規格　添付 4-2 3.4により，補正した繰返しピーク応力強さ（S_{ℓ}'）に対する許容繰返し回数を求める。各応力サイクルの繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 5-2 に示すとおりとなり，疲労累積係数は次式で計算する。

$$U = \sum\left(\frac{N_c}{N_a}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad （5.5）$$

ここで，

U　：疲労累積係数（－）

N_c　：繰返し回数（回）

N_a　：許容繰返し回数（回）

したがって，表 5-2 に示すとおり設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱによる疲労累積係数は 1.0 以下であり，地震時における疲労累積係数との和も 1.0 以下となるため「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

5.2.3　バルブカバー締付けボルトの疲労解析

バルブカバー締付けボルトの疲労解析は一次蓋締付けボルトの場合と同様である。

ただし，

W_{ℓ}　：バルブカバーの質量（＝8kg）

A　：全数のボルト最小断面積（＝1.06×10^{3} mm^{2}）

T　：ボルト締付けトルク（＝8.0×10^{4} N・mm）

d_s　：バルブカバー締付けボルトの最小径（＝13 mm）

である。

ピーク応力の範囲は図 5-2 に示すとおりであり，各応力サイクルの繰返しサイクルと許容繰返し回数との比は表 5-3 に示すとおりである。

したがって，表 5-3 に示すとおり設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱによる疲労累積係数は 1.0 以下であり，地震時における疲労累積係数との和も 1.0 以下となるため「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

6. 穴の補強

設計・建設規格　PVB-3520により貫通孔の補強が不要となることを示す。

貫通孔部の応力強さは，応力集中係数を用いて次式で表わされる。

$$S_c = K \cdot S \quad \cdots\cdots\cdots \quad (7.1)$$

ここで，　S_c ：貫通孔部の応力強さ(MPa)

K　：応力集中係数（＝3.0）（参考文献（２）参照）

S　：貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ(MPa)

貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ（S）は表4-1及び表4-2より求められる。

したがって，貫通孔部の応力強さ（S_c）は表6-1に示すとおりとなり，すべて許容応力を満足するため，貫通孔の補強は不要となる。

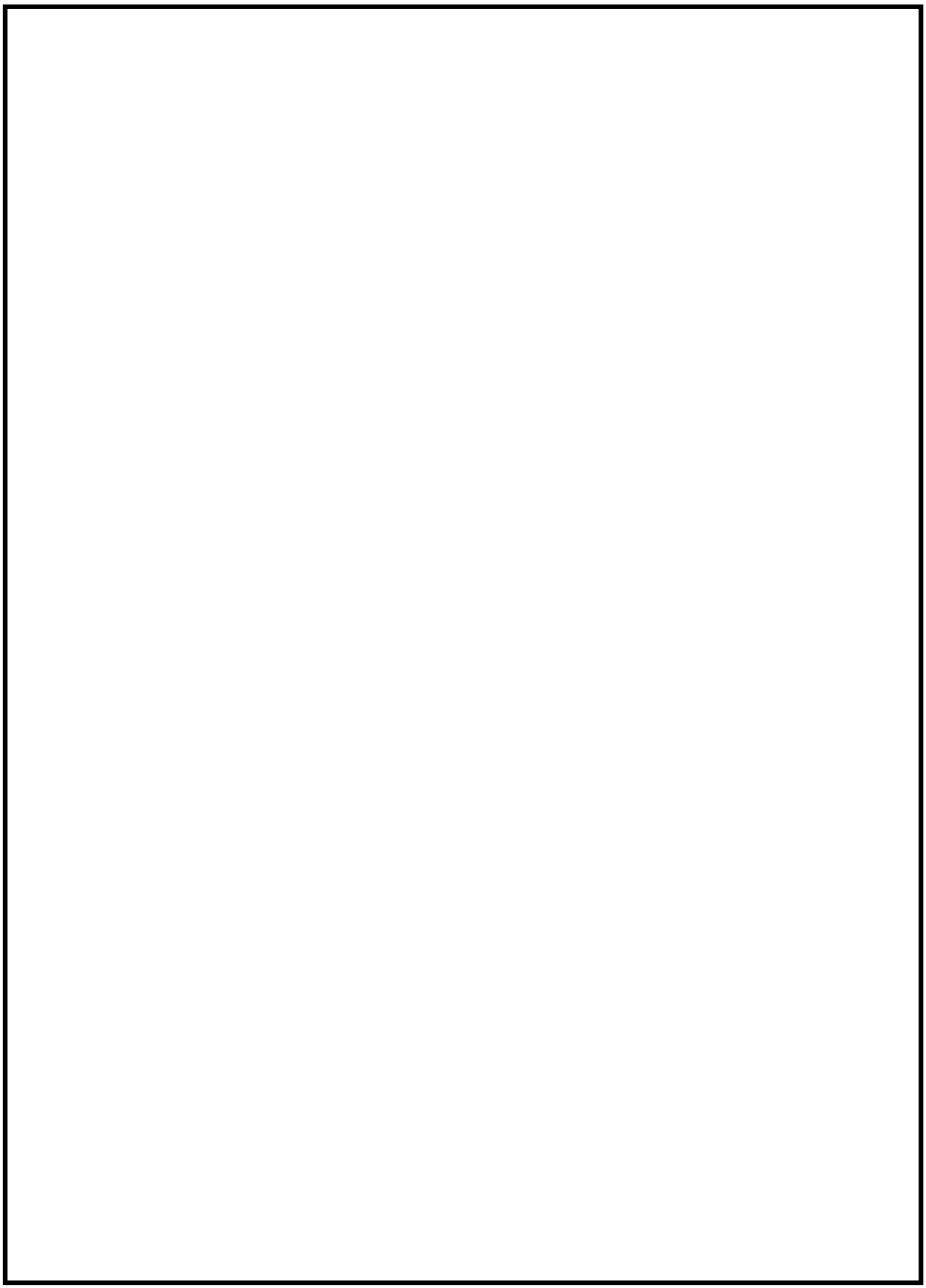


図 1-1　形状・寸法・材料

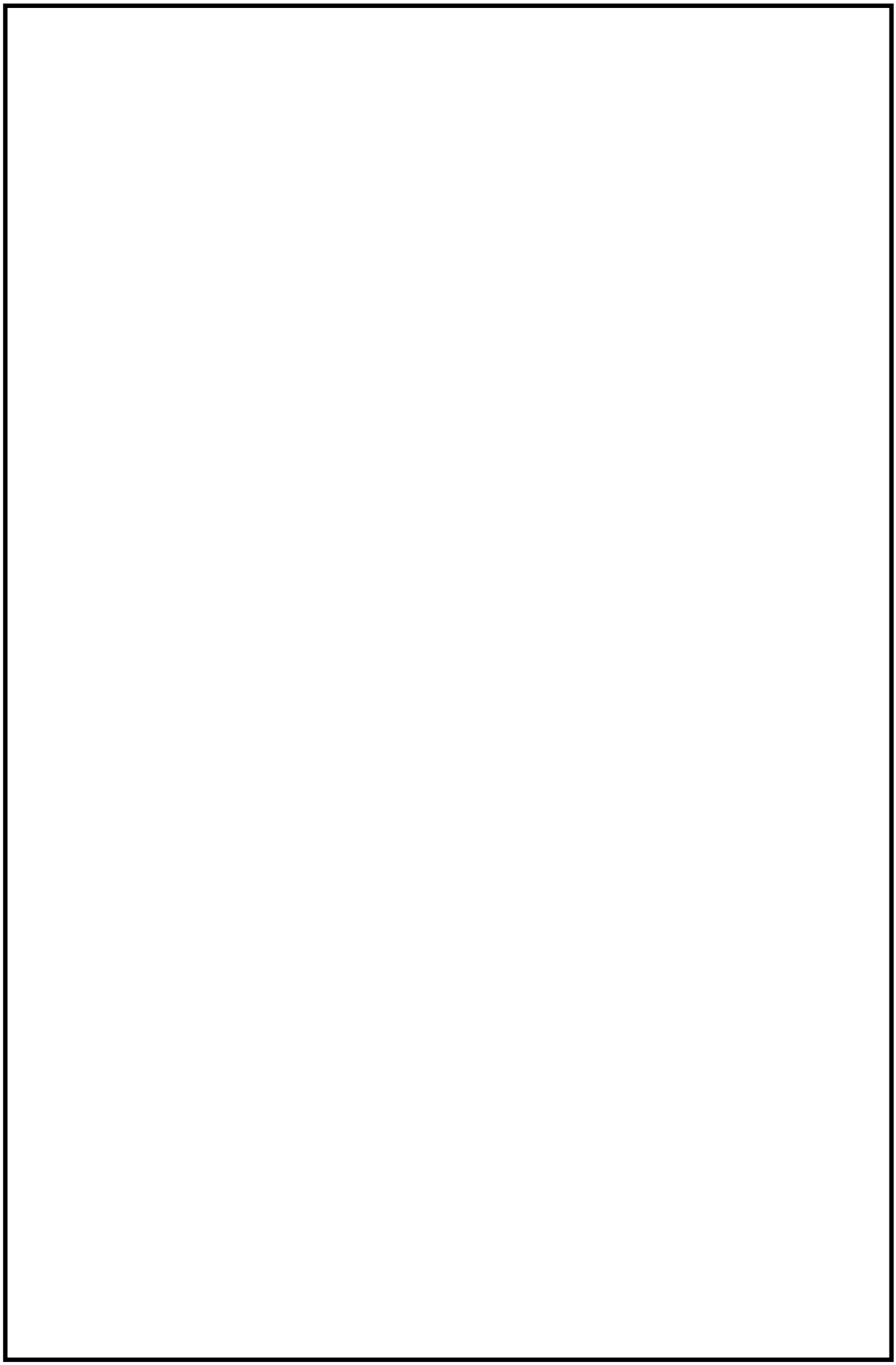


図 2-1　温度分布計算モデル

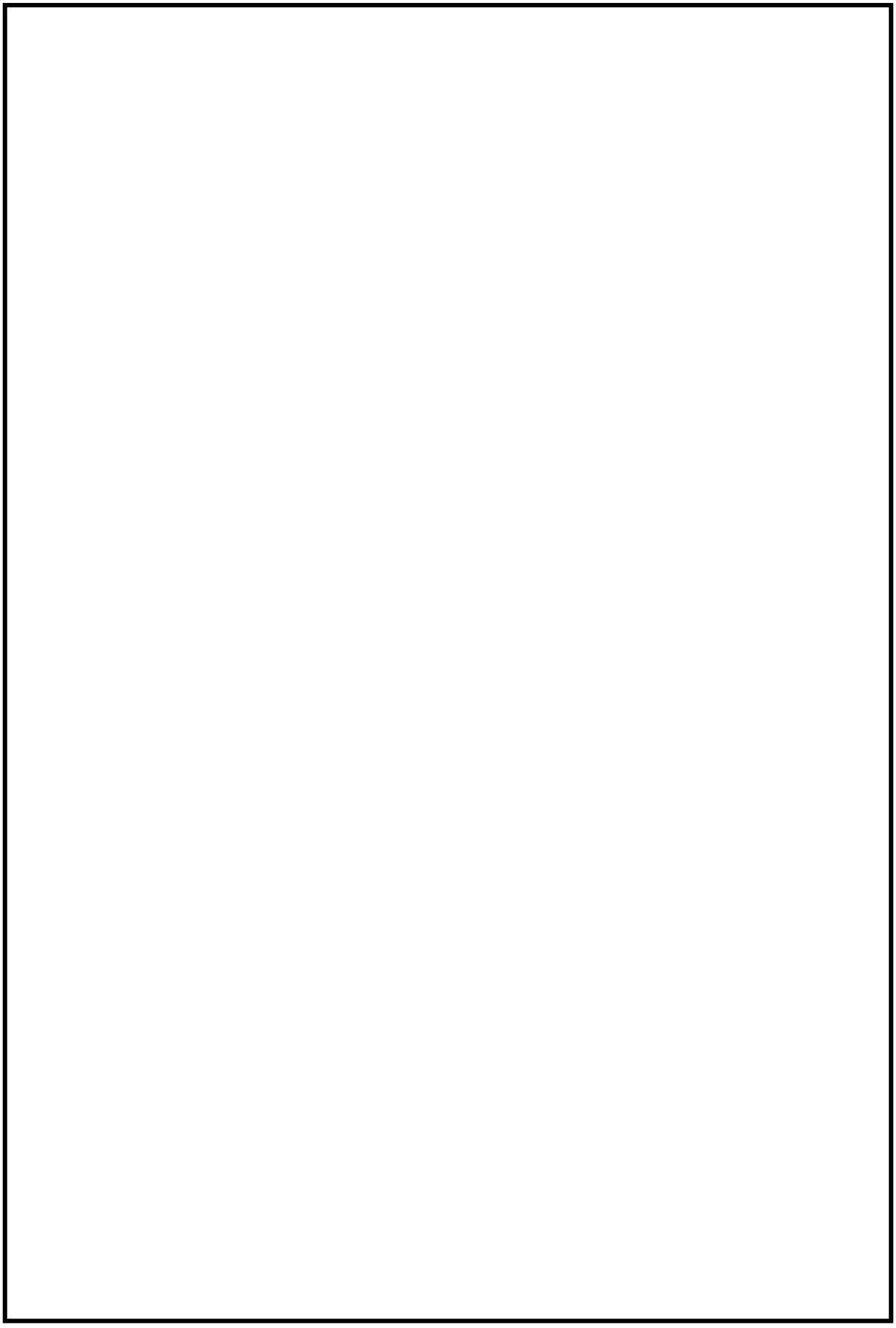


図 2-2　温度分布図（貯蔵時）

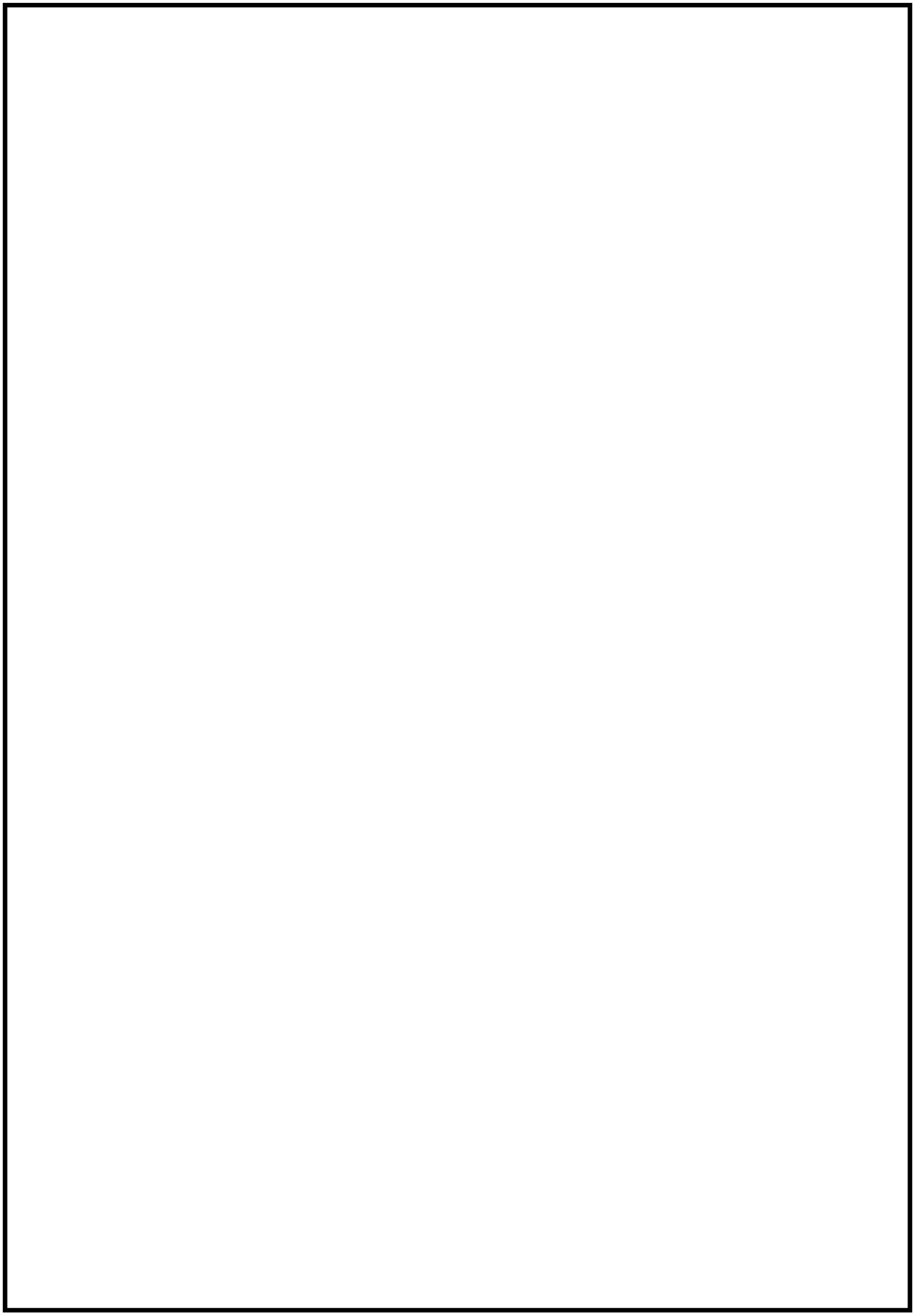


図 3-1　キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面）

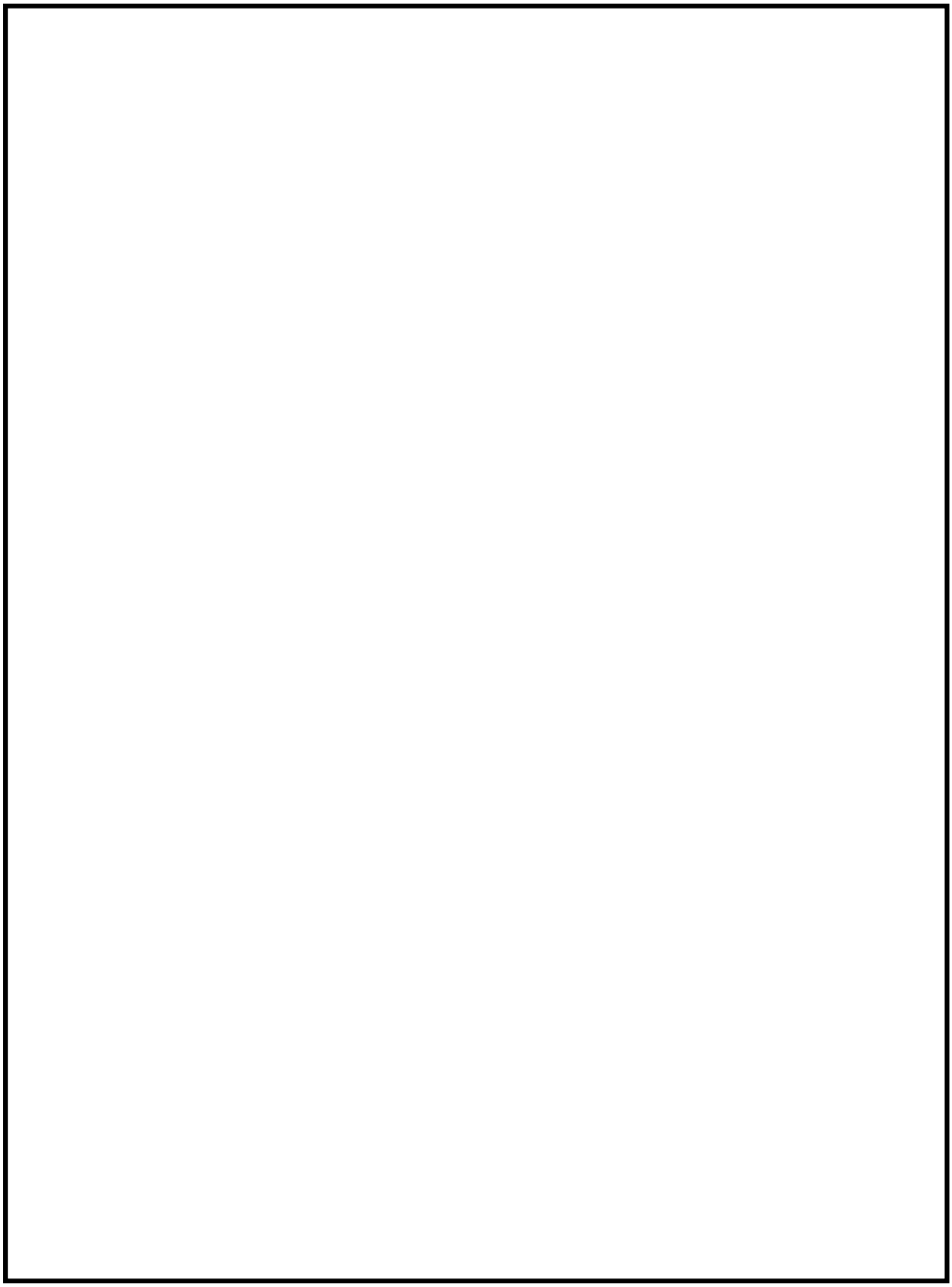
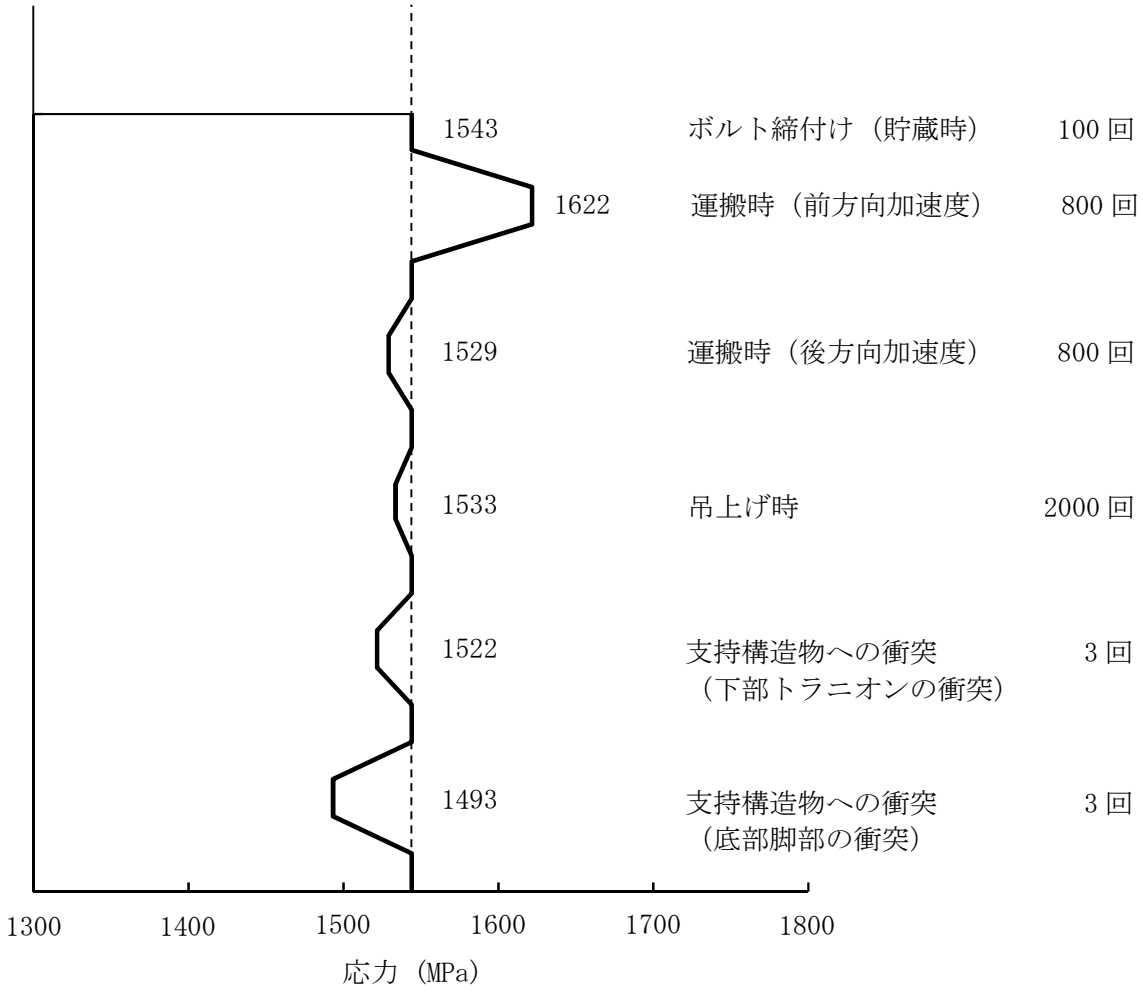


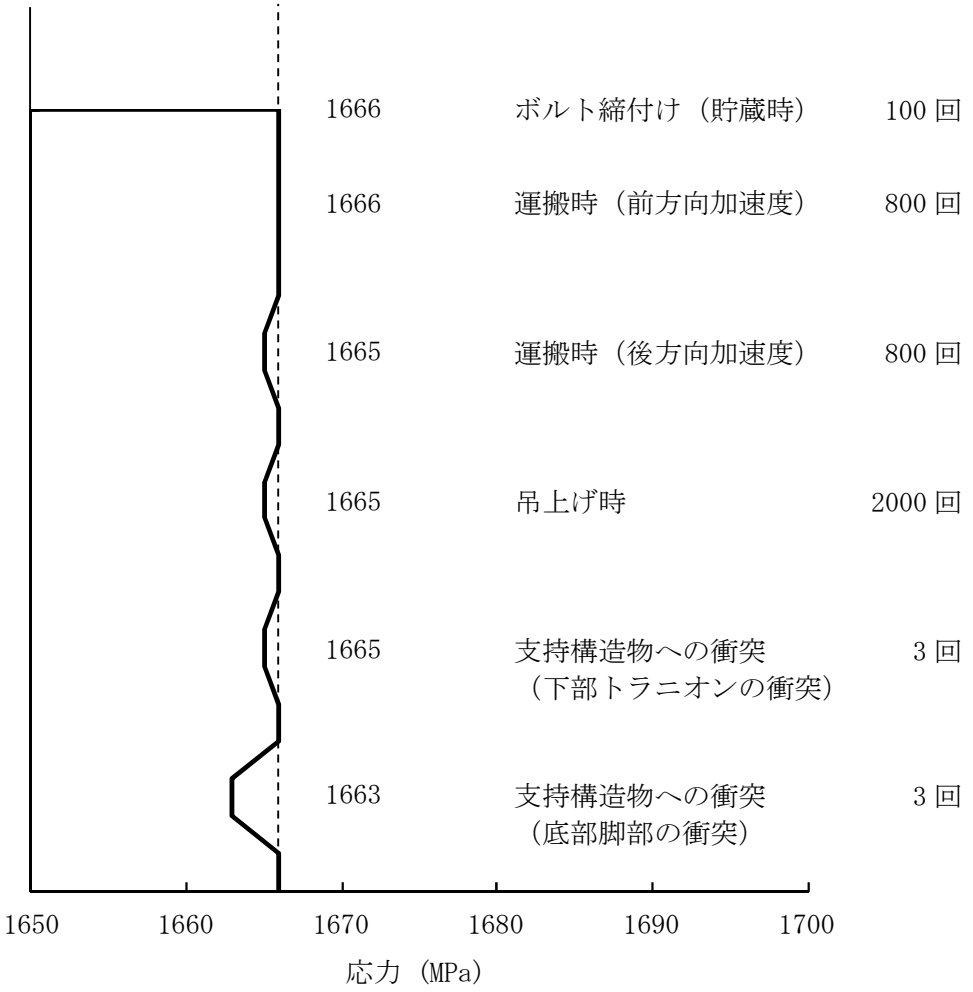
図 3-2　キャスク容器及び中間胴の解析モデル（地震時）



（単位：MPa）

No.	運転条件	運転条件	S_p
1	運搬時 （前方向加速度）	ゼロ応力状態	1622
2	運搬時 （前方向加速度）	支持構造物への衝突 （底部脚部の衝突）	129
3	運搬時 （前方向加速度）	支持構造物への衝突 （下部トラニオンの衝突）	101
4	運搬時 （前方向加速度）	運搬時 （後方向加速度）	94
5	貯蔵時	運搬時 （後方向加速度）	14
6	貯蔵時	吊上げ時	10

図 6-1　応力差の変動（一次蓋締付けボルト）



（単位：MPa）

No.	運転条件	運転条件	S_p
1	運搬時 （前方向加速度）	ゼロ応力状態	1666
2	運搬時 （前方向加速度）	支持構造物への衝突 （底部脚部の衝突）	3
3	運搬時 （前方向加速度）	支持構造物への衝突 （下部トラニオンの衝突）	2
4	運搬時 （前方向加速度）	運搬時 （後方向加速度）	2
5	貯蔵時	運搬時 （後方向加速度）	1
6	貯蔵時	吊上げ時	1

図 6-2　応力差の変動（バルブカバー締付けボルト）

表 1-1(1)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次局部膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次＋二次応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
一次蓋	SUSF304	Ⅰ＋S_d^*	17	162	①－①’	－	－	－	27	243	①’	2	405	②
		Ⅰ＋S_s	17	278	①－①’	－	－	－	27	418	①’	2	405	②
内　胴	SUS304	Ⅰ＋S_d^*	62	162	⑤－⑤’	72	243	⑥－⑥’	－	－	－	62	405	⑥’
		Ⅰ＋S_s	62	278	⑤－⑤’	72	418	⑥－⑥’	－	－	－	62	405	⑥’
上部フランジ	SUSF304	Ⅰ＋S_d^*	－	－	－	32	243	⑨－⑨’	－	－	－	4	405	⑩
		Ⅰ＋S_s	－	－	－	32	418	⑨－⑨’	－	－	－	4	405	⑩
底　板	SUSF304	Ⅰ＋S_d^*	30	162	⑪－⑪’	－	－	－	39	243	⑪	34	405	⑫
		Ⅰ＋S_s	30	278	⑪－⑪’	－	－	－	39	418	⑪	34	405	⑫
密　封 シール部	SUSF304	Ⅰ＋S_d^*	29	152	⑬	－	－	－	48	152	⑬	2	152	⑬
		Ⅰ＋S_s	29	152	⑬	－	－	－	48	152	⑬	2	152	⑬

表 1-1(2)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次局部膜応力強さ			一次膜＋一次曲げ応力強さ			一次＋二次応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
バルブカバー	SUS304	$I+S_d^*$	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
		$I+S_S$	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）	SUS304	$I+S_d^*$	－	－	－	113	243	⑧－⑧’	－	－	－	116	405	⑧
		$I+S_S$	－	－	－	113	418	⑧－⑧’	－	－	－	116	405	⑧
底部プラグ溶接部	SUSF304	$I+S_d^*$	68	81	⑲	－	－	－	－	－	－	94	202	⑲
		$I+S_S$	68	139	⑲	－	－	－	－	－	－	94	202	⑲

（単位：MPa）

部　位	材　料	設計事象		引張応力（引張・圧縮応力[1)]）			圧縮応力			せん断応力			曲げ応力			座屈応力		
				計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）	SUS304	$I+S_d^*$	一次応力	125	204	⑰	－	－	－	7	117	⑱	107	204	⑱			
			一次＋二次応力	71	408	⑱				14	234	⑱	71	408	⑱	－	－	－
		$I+S_S$	一次応力	125	204	⑰	－	－	－	7	117	⑱	107	204	⑱			
			一次＋二次応力	71	408	⑱				14	234	⑱	71	408	⑱	－	－	－

注記１）：一次＋二次応力に対する評価に用いる。

表 1-1(3)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材料	設計事象		垂直応力+せん断応力			圧縮又は引張応力+曲げ応力（引張･圧縮応力+曲げ応力[1)]）		
				計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）	SUS304	Ｉ＋Ｓ$_d$*	一次応力	110	204[2)]	⑰	107	204[2)]	⑱
			一次＋二次応力	65	408[2)]	⑱	71	408[2)]	⑱
		Ｉ＋Ｓ$_S$	一次応力	110	204[2)]	⑰	107	204[2)]	⑱
			一次＋二次応力	65	408[2)]	⑱	71	408[2)]	⑱

注記１）：一次＋二次応力に対する評価に用いる。

２）：$f_t=f_c=f_b$ 及び $f_t^*=f_c^*=f_b^*$ であるので，組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

（単位：MPa）

部　位	材　料	設計事象	平均引張応力			平均引張応力＋曲げ応力		
			計算値	許容応力	評価点（面）	計算値	許容応力	評価点（面）
一次蓋締付けボルト	SNB23-3	Ｉ＋Ｓ$_d$*	211	550	③	218	825	③
		Ｉ＋Ｓ$_S$	211	825	③	218	825	③
バルブカバー締付けボルト	SNB23-3	Ｉ＋Ｓ$_d$*	－	－	－	－	－	－
		Ｉ＋Ｓ$_S$	－	－	－	－	－	－

表 2-1(1)　貯蔵時における熱伝達率の計算

熱伝達の形式：空気(45℃)の自然対流による乱流熱伝達

領域[1]	部　位	形状	熱伝導率[2] λ (W/m･K)	ﾌﾟﾗﾝﾄﾙ数[2] Ｐｒ (－)	ﾚｰﾚｰ数[3] [4] Ｒａ (－)	熱伝達率[4] h (W/㎡･K)
①	貯蔵容器側面	垂直円筒	27.45×10^{-3}	0.719	1.33×10^{10}	$1.48\times\Delta T^{1/3}$
②	二次蓋表面	上向き水平平板	27.45×10^{-3}	0.719	6.22×10^{8}	$1.59\times\Delta T^{1/3}$
③	底板表面	下向き水平平板	27.45×10^{-3}	0.719	2.31×10^{8}	$0.133\times\Delta T^{1/3}$

注記１）：図 2-1 参照

２）：参考文献（１）参照

３）：温度差ΔＴ=1.0℃に対する値を示す。

４）：レーレー数及び熱伝達率は下記の式を用いて計算する。

$$Ra=\frac{G\ \beta\ \Delta T\ D^3\ Pr}{\nu^2}$$

$$h=0.13\ \sqrt[3]{Ra}\ \frac{\lambda}{D}\quad\text{（垂直円筒）}^{5)}$$

$$h=0.14\ \sqrt[3]{Ra}\ \frac{\lambda}{D}\quad\text{（上向き水平平板）}^{5)}$$

$$h=1.17\times10^{-2}\ \sqrt[3]{Ra}\ \frac{\lambda}{D}\quad\text{（下向き水平平板）}^{2)}$$

ここで　G　：重力加速度（＝9.81 m/s^2）

β　：体膨張係数（＝１/318　1/K）

ΔＴ：周囲空気と表面の温度差（℃）

Ｄ　：代表長さ（ｍ）

ν　：動粘性係数（=17.66×10^{-6} m^2/s）

５）：参考文献（４）参照

表 2-1(2)　運搬時における熱伝達率の計算

熱伝達の形式：空気(38℃)の自然対流による乱流熱伝達

領域[1]	部　位	形状	熱伝導率[2] λ (W/m･K)	ﾌﾟﾗﾝﾄﾙ数[2] Ｐｒ (－)	ﾚｰﾚｰ数[3] [4] Ｒａ (－)	熱伝達率[4] h (W/㎡･K)
①	貯蔵容器側面	水平円筒	26.94×10^{-3}	0.718	1.08×10^{9}	$1.16\times\Delta T^{1/3}$
②	二次蓋表面	垂直平板	26.94×10^{-3}	0.718	6.89×10^{8}	$1.50\times\Delta T^{1/3}$
③’	底板表面					

注記１）：図 2-1 参照

２）：参考文献（１）参照

３）：温度差ΔＴ=1.0℃に対する値を示す。

４）：レーレー数及び熱伝達率は下記の式を用いて計算する。

$$Ra=\frac{G\ \beta\ \Delta T\ D^3\ Pr}{\nu^2}$$

$$h=0.1\ \sqrt[3]{Ra}\ \frac{\lambda}{D}\quad\text{（水平円筒）}[2]$$

$$h=0.13\ \sqrt[3]{Ra}\ \frac{\lambda}{D}\quad\text{（垂直平板）}[5]$$

ここで　G　：重力加速度（＝9.81 m/s^2）

β　：体膨張係数（＝１/311　1/K）

ΔＴ：周囲空気と表面の温度差（℃）

Ｄ　：代表長さ（ｍ）

ν　：動粘性係数（=16.95×10^{-6} m^2/s）

５）：参考文献（４）参照

表 2-2　温度分布計算の評価条件

項　　目	評　価　条　件	
対象燃料	高燃焼度燃料[1)]	
収納体数（体）	61	
発 熱 量（kW）	17.1[2)]	
姿　　勢	縦置き	横置き[3)]
周囲温度（℃）	45	38

注記１）：８×８燃料，新型８×８燃料，新型８×８ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度８×８燃料のうち最も厳しい発熱量となる高燃焼度８×８燃料について行う。

２）：ＯＲＩＧＥＮ２コードにより求めた。

３）：運搬時における貯蔵容器姿勢及び周囲温度

表 3-1　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（1/5）
（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
一次蓋	①	P_m							17	162
		P_L+P_b							7	243
		P_L+P_b+Q[2]							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	①′	P_m							17	162
		P_L+P_b							27	243
		P_L+P_b+Q[2]							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②	P_m							—	—
		P_L+P_b							20	243
		P_L+P_b+Q[2]							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②′	P_m							—	—
		P_L+P_b							10	243
		P_L+P_b+Q[2]							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
一次蓋締付けボルト	③	平均引張応力							211	550
		平均引張応力+曲げ応力							218	825
内胴	④	P_m							—	—
		P_L							45	243
		P_L+P_b+Q[2]							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	④′	P_m							—	—
		P_L							45	243
		P_L+P_b+Q[2]							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力
σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力
２）：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-1　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（2/5）
（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
内胴	⑤	P_m							62	162
		P_L							—	—
		P_L+P_b+Q[2]							15	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑤′	P_m							62	162
		P_L							—	—
		P_L+P_b+Q[2]							11	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥	P_m							—	—
		P_L							72	243
		P_L+P_b+Q[2]							48	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥′	P_m							—	—
		P_L							72	243
		P_L+P_b+Q[2]							62	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
上部フランジ	⑨	P_m							—	—
		P_L							32	243
		P_L+P_b+Q[2]							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑨′	P_m							—	—
		P_L							32	243
		P_L+P_b+Q[2]							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力
σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力
２）：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-1　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（3/5）
（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
上部フランジ	⑩	P_m							—	—
		P_L							19	243
		P_L+P_b+Q[2]							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑩′	P_m							—	—
		P_L							19	243
		P_L+P_b+Q[2]							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底板	⑪	P_m							30	162
		P_L+P_b							39	243
		P_L+P_b+Q[2]							9	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	152
	⑪′	P_m							30	162
		P_L+P_b							23	243
		P_L+P_b+Q[2]							14	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	152
	⑫	P_m							—	—
		P_L+P_b							36	243
		P_L+P_b+Q[2]							34	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑫′	P_m							—	—
		P_L+P_b							29	243
		P_L+P_b+Q[2]							31	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
密封シール部	⑬	P_m							29	152
		P_L+P_b							48	152
		P_L+P_b+Q[2]							2	152

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力
σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力
２）：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-1　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（4/5）

（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）　　（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類		応力成分[1]						計算値	許容応力
				σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）	⑯	一次応力	引張応力							105	204
			圧縮応力							－	－
			せん断応力							2	117
			曲げ応力							79	204
			支圧応力							－	－
			垂直+せん断応力							93	204[3]
			圧縮+曲げ応力							－	－
			引張+曲げ応力							79	204[3]
		一次+二次応力	引張･圧縮応力[2]							3	408
			せん断応力[2]							3	234
			曲げ応力[2]							3	408
			支圧応力							－	－
			座屈応力							－	－
			垂直+せん断応力[2]							5	408[3]
			引張･圧縮+曲げ[2]							3	408[3]
	⑰	一次応力	引張応力							125	204
			圧縮応力							－	－
			せん断応力							3	117
			曲げ応力							77	204
			支圧応力							－	－
			垂直+せん断応力							110	204[3]
			圧縮+曲げ応力							－	－
			引張+曲げ応力							77	204[3]
		一次+二次応力	引張･圧縮応力[2]							10	408
			せん断応力[2]							6	234
			曲げ応力[2]							10	408
			支圧応力							－	－
			座屈応力							－	－
			垂直+せん断応力[2]							12	408[3]
			引張･圧縮+曲げ[2]							10	408[3]
	⑱	一次応力	引張応力							113	204
			圧縮応力							－	－
			せん断応力							7	117
			曲げ応力							107	204
			支圧応力							－	－
			垂直+せん断応力							110	204[3]
			圧縮+曲げ応力							－	－
			引張+曲げ応力							107	204[3]
		一次+二次応力	引張･圧縮応力[2]							71	408
			せん断応力[2]							14	234
			曲げ応力[2]							71	408
			支圧応力							－	－
			座屈応力							－	－
			垂直+せん断応力[2]							65	408[3]
			引張･圧縮+曲げ[2]							71	408[3]

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力

２）：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

３）：$f_t = f_c = f_b$であるので組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 3-1　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（5/5）
（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	τ_t	$\tau_{n\theta}$		
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）	⑦	P_m							—	—
		P_L							65	243
		P_L+P_b+Q[2]							5	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑦′	P_m							—	—
		P_L							65	243
		P_L+P_b+Q[2]							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧	P_m							—	—
		P_L							113	243
		P_L+P_b+Q[2]							116	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧′	P_m							—	—
		P_L							113	243
		P_L+P_b+Q[2]							36	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底部プラグ溶接部	⑲	P_m							68	81
		P_L							—	—
		P_L+P_b+Q[2]							94	202
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力
σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力
２）：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（1/5）
（貯蔵時：Ｓｓ地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1)]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
一次蓋	①	P_m							17	278
		P_L+P_b							7	418
		P_L+P_b+Q[2)]							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	①′	P_m							17	278
		P_L+P_b							27	418
		P_L+P_b+Q[2)]							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②	P_m							—	—
		P_L+P_b							20	418
		P_L+P_b+Q[2)]							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②′	P_m							—	—
		P_L+P_b							10	418
		P_L+P_b+Q[2)]							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
一次蓋締付けボルト	③	平均引張応力							211	825
		平均引張応力+曲げ応力							218	825
内胴	④	P_m							—	—
		P_L							45	418
		P_L+P_b+Q[2)]							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	④′	P_m							—	—
		P_L							45	418
		P_L+P_b+Q[2)]							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力
σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力
２）：Ｓｓ地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（2/5）
（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1)]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
内胴	⑤	P_m							62	278
		P_L							—	—
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							15	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑤′	P_m							62	278
		P_L							—	—
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							11	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥	P_m							—	—
		P_L							72	418
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							48	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥′	P_m							—	—
		P_L							72	418
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							62	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
上部フランジ	⑨	P_m							—	—
		P_L							32	418
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑨′	P_m							—	—
		P_L							32	418
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力
σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力
２）：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（3/5）
（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
上部フランジ	⑩	P_m							—	—
		P_L							19	418
		P_L+P_b+Q[2]							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑩′	P_m							—	—
		P_L							19	418
		P_L+P_b+Q[2]							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底板	⑪	P_m							30	278
		P_L+P_b							39	418
		P_L+P_b+Q[2]							9	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	418
	⑪′	P_m							30	278
		P_L+P_b							23	418
		P_L+P_b+Q[2]							14	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	418
	⑫	P_m							—	—
		P_L+P_b							36	418
		P_L+P_b+Q[2]							34	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑫′	P_m							—	—
		P_L+P_b							29	418
		P_L+P_b+Q[2]							31	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
密封シール部	⑬	P_m							29	152
		P_L+P_b							48	152
		P_L+P_b+Q[2]							2	152

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力
σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力
２）：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（4/5）

（貯蔵時：S_S地震力が作用する場合）　　（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類		応力成分[1]						計算値	許容応力
				σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）	⑯	一次応力	引張応力							105	204
			圧縮応力							－	－
			せん断応力							2	117
			曲げ応力							79	204
			支圧応力							－	－
			垂直+せん断応力							93	204[3]
			圧縮+曲げ応力							－	－
			引張+曲げ応力							79	204[3]
		一次+二次応力	引張・圧縮応力[2]							3	408
			せん断応力[2]							3	234
			曲げ応力[2]							3	408
			支圧応力							－	－
			座屈応力							－	－
			垂直+せん断応力[2]							5	408[3]
			引張・圧縮+曲げ[2]							3	408[3]
	⑰	一次応力	引張応力							125	204
			圧縮応力							－	－
			せん断応力							3	117
			曲げ応力							77	204
			支圧応力							－	－
			垂直+せん断応力							110	204[3]
			圧縮+曲げ応力							－	－
			引張+曲げ応力							77	204[3]
		一次+二次応力	引張・圧縮応力[2]							10	408
			せん断応力[2]							6	234
			曲げ応力[2]							10	408
			支圧応力							－	－
			座屈応力							－	－
			垂直+せん断応力[2]							12	408[3]
			引張・圧縮+曲げ[2]							10	408[3]
	⑱	一次応力	引張応力							113	204
			圧縮応力							－	－
			せん断応力							7	117
			曲げ応力							107	204
			支圧応力							－	－
			垂直+せん断応力							110	204[3]
			圧縮+曲げ応力							－	－
			引張+曲げ応力							107	204[3]
		一次+二次応力	引張・圧縮応力[2]							71	408
			せん断応力[2]							14	234
			曲げ応力[2]							71	408
			支圧応力							－	－
			座屈応力							－	－
			垂直+せん断応力[2]							65	408[3]
			引張・圧縮+曲げ[2]							71	408[3]

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力

２）：S_S地震力のみによる全振幅について示す。

３）：$f_t=f_c=f_b$及び$f_t^*=f_c^*=f_b^*$であるので組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 3-2　キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（5/5）
（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	τ_t	$\tau_{n\theta}$		
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）	⑦	P_m							—	—
		P_L							65	418
		P_L+P_b+Q[2]							5	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑦′	P_m							—	—
		P_L							65	418
		P_L+P_b+Q[2]							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧	P_m							—	—
		P_L							113	418
		P_L+P_b+Q[2]							116	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧′	P_m							—	—
		P_L							113	418
		P_L+P_b+Q[2]							36	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底部プラグ溶接部	⑲	P_m							68	139
		P_L							—	—
		P_L+P_b+Q[2]							94	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記１）：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ：円周方向応力
σ_t：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$：評価断面上のせん断応力
２）：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 4-1　キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）(1/3)

（単位：MPa）

部　　位	評価点（面）	応力分類	計算値 1)	許容応力
一　次　蓋	①－①’	P_m	17	162
	①	P_L+P_b	7	243
	①’		27	243
	①	P_L+P_b+Q	1	405
	①’		1	405
	②	P_L+P_b	20	243
	②’		10	243
	②	P_L+P_b+Q	2	405
	②’		1	405
一次蓋締付けボルト	③	平均引張応力	211	550
		平均引張応力+曲げ応力	218	825
内　　胴	④－④’	P_L	45	243
	④	P_L+P_b+Q	6	405
	④’		6	405
	⑤－⑤’	P_m	62	162
	⑤	P_L+P_b+Q	15	405
	⑤’		11	405
	⑥－⑥’	P_L	72	243
	⑥	P_L+P_b+Q	48	405
	⑥’		62	405

注記１）：P_L+P_b+Q はS_d^*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1　キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）(2/3)

（単位：MPa）

部　　位	評価点（面）	応力分類	計算値 1)	許容応力
上部フランジ	⑨－⑨’	P_L	32	243
	⑨	P_L+P_b+Q	2	405
	⑨’		2	405
	⑩－⑩’	P_L	19	243
	⑩	P_L+P_b+Q	4	405
	⑩’		2	405
底　　板	⑪－⑪’	P_m	30	162
		σ_P	1	152
	⑪	P_L+P_b	39	243
	⑪’		23	243
	⑪	P_L+P_b+Q	9	405
	⑪’		14	405
	⑫	P_L+P_b	36	243
	⑫’		29	243
	⑫	P_L+P_b+Q	34	405
	⑫’		31	405
密封シール部	⑬	P_m	29	152
		P_L+P_b	48	152
		P_L+P_b+Q	2	152
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分)	⑦-⑦’	P_L	65	243
	⑦	P_L+P_b+Q	5	405
	⑦’		4	405
	⑧-⑧’	P_L	113	243
	⑧	P_L+P_b+Q	116	405
	⑧’		36	405
底部プラグ溶接部	⑲	P_m	68	81
		P_L+P_b+Q	94	202

注記１）：P_L+P_b+Q はS_d^*地震力のみによる全振幅について評価する。（密封シール部を除く）

表 4-1　キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）(3/3)

（単位：MPa）

部位	評価点(面)	応力分類		計算値	許容応力
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）	⑯	一次応力	引張応力	105	204
			圧縮応力	－	―
			せん断応力	2	117
			曲げ応力	79	204
			垂直応力+せん断応力	93	204 2)
			圧縮応力+曲げ応力	－	―
			引張応力+曲げ応力	79	204 2)
		一次＋二次応力	引張・圧縮応力 1)	3	408
			せん断応力 1)	3	234
			曲げ応力 1)	3	408
			座屈応力	－	―
			垂直応力+せん断応力 1)	5	408 2)
			引張･圧縮応力+曲げ応力 1)	3	408 2)
	⑰	一次応力	引張応力	125	204
			圧縮応力	－	―
			せん断応力	3	117
			曲げ応力	77	204
			垂直応力+せん断応力	110	204 2)
			圧縮応力+曲げ応力	－	―
			引張応力+曲げ応力	77	204 2)
		一次＋二次応力	引張・圧縮応力 1)	10	408
			せん断応力 1)	6	234
			曲げ応力 1)	10	408
			座屈応力	－	―
			垂直応力+せん断応力 1)	12	408 2)
			引張･圧縮応力+曲げ応力 1)	10	408 2)
	⑱	一次応力	引張応力	113	204
			圧縮応力	－	―
			せん断応力	7	117
			曲げ応力	107	204
			垂直応力+せん断応力	110	204 2)
			圧縮応力+曲げ応力	－	―
			引張応力+曲げ応力	107	204 2)
		一次＋二次応力	引張・圧縮応力 1)	71	408
			せん断応力 1)	14	234
			曲げ応力 1)	71	408
			座屈応力	－	―
			垂直応力+せん断応力 1)	65	408 2)
			引張･圧縮応力+曲げ応力 1)	71	408 2)

注記１）：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

２）：$f_t=f_c=f_b$であるので，組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 4-2　キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：Ｓｓ地震力が作用する場合）(1/3)

（単位：MPa）

部　　位	評価点（面）	応力分類	計算値 1)	許容応力
一　次　蓋	①－①’	P_m	17	278
	①	P_L+P_b	7	418
	①’		27	418
	①	P_L+P_b+Q	1	405
	①’		1	405
	②	P_L+P_b	20	418
	②’		10	418
	②	P_L+P_b+Q	2	405
	②’		1	405
一次蓋締付けボルト	③	平均引張応力	211	825
		平均引張応力+曲げ応力	218	825
内　　胴	④－④’	P_L	45	418
	④	P_L+P_b+Q	6	405
	④’		6	405
	⑤－⑤’	P_m	62	278
	⑤	P_L+P_b+Q	15	405
	⑤’		11	405
	⑥－⑥’	P_L	72	418
	⑥	P_L+P_b+Q	48	405
	⑥’		62	405

注記１）：P_L+P_b+Q はＳｓ地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2　キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：Ｓs地震力が作用する場合）(2/3)

（単位：MPa）

部　　位	評価点（面）	応力分類	計算値 1)	許容応力
上部フランジ	⑨－⑨’	P_L	32	418
	⑨	P_L+P_b+Q	2	405
	⑨’		2	405
	⑩－⑩’	P_L	19	418
	⑩	P_L+P_b+Q	4	405
	⑩’		2	405
底　　板	⑪－⑪’	P_m	30	278
		σ_P	1	418
	⑪	P_L+P_b	39	418
	⑪’		23	418
	⑪	P_L+P_b+Q	9	405
	⑪’		14	405
	⑫	P_L+P_b	36	418
	⑫’		29	418
	⑫	P_L+P_b+Q	34	405
	⑫’		31	405
密封シール部	⑬	P_m	29	152
		P_L+P_b	48	152
		P_L+P_b+Q	2	152
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分)	⑦-⑦’	P_L	65	418
	⑦	P_L+P_b+Q	5	405
	⑦’		4	405
	⑧-⑧’	P_L	113	418
	⑧	P_L+P_b+Q	116	405
	⑧’		36	405
底部プラグ溶接部	⑲	P_m	68	139
		P_L+P_b+Q	94	202

注記１）：P_L+P_b+Q はＳs地震力のみによる全振幅について評価する。（密封シール部を除く）

表 4-2　キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）(3/3)

（単位：MPa）

部位	評価点(面)	応力分類		計算値	許容応力
中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）	⑯	一次応力	引張応力	105	204
			圧縮応力	－	―
			せん断応力	2	117
			曲げ応力	79	204
			垂直応力+せん断応力	93	204 2)
			圧縮応力+曲げ応力	－	―
			引張応力+曲げ応力	79	204 2)
		一次＋二次応力	引張・圧縮応力 1)	3	408
			せん断応力 1)	3	234
			曲げ応力 1)	3	408
			座屈応力	－	―
			垂直応力+せん断応力 1)	5	408 2)
			引張･圧縮応力+曲げ応力 1)	3	408 2)
	⑰	一次応力	引張応力	125	204
			圧縮応力	－	―
			せん断応力	3	117
			曲げ応力	77	204
			垂直応力+せん断応力	110	204 2)
			圧縮応力+曲げ応力	－	―
			引張応力+曲げ応力	77	204 2)
		一次＋二次応力	引張・圧縮応力 1)	10	408
			せん断応力 1)	6	234
			曲げ応力 1)	10	408
			座屈応力	－	―
			垂直応力+せん断応力 1)	12	408 2)
			引張･圧縮応力+曲げ応力 1)	10	408 2)
	⑱	一次応力	引張応力	113	204
			圧縮応力	－	―
			せん断応力	7	117
			曲げ応力	107	204
			垂直応力+せん断応力	110	204 2)
			圧縮応力+曲げ応力	－	―
			引張応力+曲げ応力	107	204 2)
		一次＋二次応力	引張・圧縮応力 1)	71	408
			せん断応力 1)	14	234
			曲げ応力 1)	71	408
			座屈応力	－	―
			垂直応力+せん断応力 1)	65	408 2)
			引張･圧縮応力+曲げ応力 1)	71	408 2)

注記１）：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

２）：$f_t=f_c=f_b$及び$f_t^*=f_c^*=f_b^*$であるので，組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 5-1　キャスク容器(ボルトを除く)の疲労解析不要の評価結果

設計・建設規格 PVB-3140	繰返し荷重		設定繰返し回数	評価値	許容値	評価
(6)	機械的荷重の変動	地震力	120	応力振幅，S=62 MPa	1×10^{11}回に対する許容繰返しピーク応力強さ， S_a=114 MPa	S ＜ S_aであるので本条件に対する評価に考慮する必要がない。

表 5-2　各事象の繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）

事　象		繰返し数 N_c（回）	繰返しピーク応力強さ S_ℓ（MPa）	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ S_ℓ'（MPa）	許容繰返し回数 N_a（回）	繰返し回数と許容繰返し回数の比 N_c/N_a（－）
No. 1		100	811	918	574	1.74×10^{-1}
No. 2		3	65	73	1.00×10^{6}	3.00×10^{-6}
No. 3		3	51	58	1.00×10^{6}	3.00×10^{-6}
No. 4		694	47	54	1.00×10^{6}	6.94×10^{-4}
No. 5		106	7	8	1.00×10^{6}	1.06×10^{-4}
No. 6		2000	5	6	1.00×10^{6}	2.00×10^{-3}
U（設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱ）						0.18
地震時	S_d^*	60	5	6	1.00×10^{6}	6.00×10^{-5}
	S_S	60	5	6	1.00×10^{6}	6.00×10^{-5}
U（地震時）						1.20×10^{-4}
U（設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱと地震時の和）						0.18

表 5-3　各事象の繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）

事　象		繰返し数 N_c（回）	繰返しピーク応力強さ S_ℓ（MPa）	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ S_ℓ'（MPa）	許容繰返し回数 N_a（回）	繰返し回数と許容繰返し回数の比 N_c/N_a（－）
No. 1		100	833	943	545	1.83×10^{-1}
No. 2		3	2	2	1.00×10^{6}	3.00×10^{-6}
No. 3		3	1	2	1.00×10^{6}	3.00×10^{-6}
No. 4		694	1	2	1.00×10^{6}	6.94×10^{-4}
No. 5		106	1	1	1.00×10^{6}	1.06×10^{-4}
No. 6		2000	1	1	1.00×10^{6}	2.00×10^{-3}
U（設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱ）						0.19
地震時	S_d^*	60	1	1	1.00×10^{6}	6.00×10^{-5}
	S_S	60	1	1	1.00×10^{6}	6.00×10^{-5}
U（地震時）						1.20×10^{-4}
U（設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱと地震時の和）						0.19

表 6-1　貫通孔部の応力強さ

（単位：MPa）

設計事象	応力分類	貫通孔を無視した場合の応力強さ（S）	貫通孔部の応力（S_c）	許容応力
Ⅰ＋S_d^*	P_L+P_b	27	81	243
	P_L+P_b+Q	2	6	405
Ⅰ＋S_S	P_L+P_b	27	81	418
	P_L+P_b+Q	2	6	405

補足資料－１

キャスク容器及び中間胴の応力解析の方針

目次

1. 概要 ····· 1
2. 適用基準 ····· 2
3. 記号 ····· 3
3.1 記号の説明 ····· 3
4. 設計条件 ····· 5
4.1 基本仕様 ····· 5
4.2 燃料条件 ····· 5
4.3 設計事象 ····· 5
4.4 荷重の種類とその組合せ ····· 5
5. 計算条件 ····· 6
5.1 解析対象とする事象 ····· 6
5.2 解析箇所 ····· 6
5.3 形状及び寸法 ····· 6
5.4 物性値 ····· 6
5.5 許容応力 ····· 7
6. 応力解析の手順 ····· 10
6.1 解析手順の概要 ····· 10
6.2 荷重条件の選定 ····· 10
6.3 温度分布計算 ····· 10
6.3.1 温度分布計算の方法 ····· 10
6.4 応力計算と評価 ····· 11
6.4.1 応力計算の方法 ····· 11
6.4.2 応力評価 ····· 12
6.4.3 数値の丸め方 ····· 13
7. 参考文献 ····· 14

図表目次

図 5-1　キャスク容器及び中間胴の応力解析箇所 ····· 15
図 6-1　キャスク容器及び中間胴の応力解析フロー図····· 17

表 4-1　使用済燃料の条件 ····· 18
表 4-2　貯蔵容器の設計事象 ····· 19
表 4-3　キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ····· 19
表 4-4　中間胴の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ····· 20
表 5-1　代表事象 ····· 21
表 5-2　温度分布計算に使用する材料の物性値 ····· 22
表 5-3　温度分布計算に使用するふく射率 ····· 23
表 5-4　熱応力計算に使用する材料の物性値 ····· 23
表 6-1　キャスク容器用材料の許容応力値 ····· 24
表 6-2　キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値····· 25
表 6-3　中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）用材料の許容応力値····· 25
表 6-4　中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値···· 26
表 6-5　数値の丸め方一覧表 ····· 28

1. 概要

本書は，使用済燃料乾式貯蔵容器のキャスク容器及び中間胴に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は，一括して巻末に示す。

2.　適用基準

(1) キャスク容器

使用済燃料乾式貯蔵容器において，放射性物質を閉じ込める圧力バウンダリ境界を構成しているキャスク容器は，貯蔵時において，放射性物質を貯蔵するという観点から，使用済燃料プールや使用済樹脂貯蔵タンク等と同様に「発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版(2007年追補版を含む)）JSME S NC1-2005/2007）（日本機械学会　2007年9月）」（以下，「設計・建設規格」という。）のクラス３容器相当に区分される。

したがって，圧力荷重に関してはクラス３容器における規格計算式に基づく手法で構造強度を評価することができる。しかし，熱荷重や取扱い時の衝撃荷重等の各種の荷重の作用が想定されることから，これらの荷重に対する強度評価に当たっては，圧力荷重も含め，応力解析により発生応力を求めて評価することが必要であり，同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス１容器に準じて設計する。

ここで，設計事象とその許容応力状態は下記のとおりとする。

・設計事象Ⅰ＋S_d^*は，地震力として基準地震動S_sを考慮し，
　許容応力状態$Ⅲ_AS$で評価する。
・設計事象Ⅰ＋S_sは，地震力として基準地震動S_sを考慮し，
　許容応力状態$Ⅳ_AS$で評価する。

(2) 中間胴

中間胴は，キャスク容器胴部を支持する部材であることから，キャスク容器の評価手法との整合性をとり，設計・建設規格のクラス１支持構造物に準じて設計する。

ここで，設計事象とその許容応力状態はキャスク容器と同じとする。

注：本書及び応力計算書において，設計･建設規格の条項は「設計･建設規格○○○－○○○○」として示す。

3. 記　号

3.1　記号の説明

本書及び応力計算書において，応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし，本文中に特記ある場合は，この限りでない。

なお，応力計算書の字体及び大きさについては，本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
A	断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
D	直径	mm
E	縦弾性係数	MPa
G	重力加速度(=9.80665)	m/s^2
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_L	一次局部膜応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_s	基準地震動S_sにより定まる地震力	—
S_{12}	主応力差　$\lvert \sigma_1 - \sigma_2 \rvert$	MPa
S_{23}	主応力差　$\lvert \sigma_2 - \sigma_3 \rvert$	MPa
S_{31}	主応力差　$\lvert \sigma_3 - \sigma_1 \rvert$	MPa
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
S_ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S_ℓ'	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
K	応力集中係数	—
U	疲労累積係数	—
T	締付けトルク	N・mm
N	許容繰返し回数	回
W	質量	kg
α	熱膨張係数	mm／mm℃
f_t	許容引張応力	MPa

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
f_p	許容支圧応力	MPa
$f_t^{*1)}$	許容引張応力	MPa
$f_s^{*1)}$	許容せん断応力	MPa
$f_c^{*1)}$	許容圧縮応力	MPa
$f_b^{*1)}$	許容曲げ応力	MPa
$f_p^{*1)}$	許容支圧応力	MPa
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_b	圧縮応力	MPa
σ_{bb}	曲げ応力	MPa
${}_c\sigma_{bb}$	圧縮側曲げ応力	MPa
${}_t\sigma_{bb}$	引張側曲げ応力	MPa
σ_{cc}	圧縮応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_{tt}	引張応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{n\theta}$	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s^2
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s^2
Ⅰ＋S_d^*	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用した場合の許容応力区分	―
Ⅰ＋S_S	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_S地震力が作用した場合の許容応力区分	―

注記 1)：f_t^*，f_s^*，f_c^*，f_b^*，f_p^*：f_t，f_s，f_c，f_b，f_p の値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値。

4.　設計条件

キャスク容器及び中間胴は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1　基本仕様

最高使用圧力　　1.0MPa

最高使用温度　　160℃

4.2　燃料条件

使用済燃料乾式貯蔵容器の収納物である使用済燃料の条件を表 4-1 に示す。

4.3　設計事象

設計上考慮する事象については表 4-2 に示す。

4.4　荷重の種類とその組合せ

キャスク容器及び中間胴の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-3 及び表 4-4 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5.　計算条件

5.1　解析対象とする事象

表 5-1 に示すように解析対象とする設計事象はＩ＋Ｓ$_{d}^{*}$及びＩ＋Ｓ$_{s}$とし,解析を実施する。

5.2　解析箇所

キャスク容器及び中間胴の応力解析を行う箇所は，次のとおりである(図 5-1 参照)。

(1)　内胴
(2)　中間胴
(3)　上部フランジ
(4)　底板
(5)　一次蓋
(6)　一次蓋締付けボルト
(7)　バルブカバー
(8)　バルブカバー締付けボルト
(9)　密封シール部
(10) 底部プラグ

5.3　形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

5.4　物性値

温度分布計算，応力計算及び疲労解析の必要性検討に使用する材料の物性値は以下のとおりである。

(1) 温度分布計算に使用する物性値を表 5-2 及び表 5-3 に示す。
　なお，熱伝導率はその温度依存性を考慮する。
(2) 熱応力計算に使用する物性値を表 5-4 に示す。
　なお，熱応力計算に使用する物性値はその温度依存性を考慮する。
(3) 内圧及び機械的荷重による応力計算に使用する物性値は，最高使用温度に対する値を用いる。なお，常温は 20℃とする。
(4) 物性値を温度補正して使用する場合には，補正方法を応力計算書に示す。

5.5　許容応力

材料の応力強さ限界及び許容応力は，次の各号に掲げるとおりとする。

Ⅰ　キャスク容器

(1)　キャスク容器（穴の周辺部及びボルトを除く。）にあっては，次によること。この場合において，キャスク容器に直接溶接されるブラケット等（バスケット及び中間胴を除く）を取り付けるすみ肉溶接部にあっては，次の値の２分の１とする。

a.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは，設計・建設規格　PVB-3111(2)a.及び d. の規定を満足すること。

b.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは，設計・建設規格　PVB-3111(3)a.及び c. の規定を満足すること。

c.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*又はS_s地震動のみによって生じる一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて，その最大値と最小値との差は，設計・建設規格　PVB-3112 の規定を満足すること。

d.　設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて生じる応力の疲労解析は，設計・建設規格 PVB-3114 の規定を満足すること。

e.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*又はS_s地震動のみによる応力の疲労解析を行い，疲労累積係数を求め，d.で求めた疲労累積係数との和が 1.0 を超えないこと。

f.　純せん断荷重を受ける部分にあっては，a.及び b.の規定にかかわらず，平均せん断応力は，次の規定を満足すること。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_d^*地震力が作用する場合においては，設計・建設規格　PVB-3115(1)の規定

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用する場合においては，設計・建設規格　PVB-3115(2)の規定

g.　支圧荷重を受ける部分にあっては，平均支圧応力は，次の規定を満足すること。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_d^*地震力が作用して生じる場合においては，設計・建設規格 PVB-3116(1)又は(2)の規定。

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用して生じる場合で，支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の平均支圧応力は，設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に規定する値の 1.5 倍の値を超えないこと。

(c) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用して生じる場合で，(b)以外の場合の平均支圧応力は，設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に規定する値を超えないこと。

h. 密封シール部にあっては，次によること。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてＳ$_d$*地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ，並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて，その最大値と最小値との差は，いずれも設計・建設規格　付録材料図表 Part5 表 8 に規定する値を超えないこと。

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてＳ$_s$地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ，並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて，その最大値と最小値との差は，いずれも設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に規定する値を超えないこと。

(2) ボルトにあっては，次によること。

a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてＳ$_d$*地震力が作用する場合において生じる応力は，設計・建設規格 PVB-3121(2)の規定を満足すること。

b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてＳ$_s$地震力が作用する場合において生じる応力は，次の規定を満足すること。

(a) 軸方向に垂直な断面の平均引張応力は，設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値を超えないこと。

(b) (a) に規定する平均引張応力と曲げ応力の和は，ボルトの断面の外周において，設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値を超えないこと。

c. 設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて生じる応力の疲労解析は，設計・建設規格 PVB-3122 の規定を満足すること。

d. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，Ｓ$_d$*又はＳ$_s$地震動のみによる応力の疲労解析を行い，疲労累積係数を求め，c. で求めた疲労累積係数との和が 1.0 を超えないこと。

(3) 疲労解析において使用する疲労強度減少係数及び応力集中係数は設計・建設規格　PVB-3130 の規定によること。

(4) (1)及び(2)において，繰返し荷重が設計・建設規格　PVB-3140(1)から(6)の規定に適合するときは，疲労解析を行うことを要しない。

(5) (1)，(2)，(3)及び(4)の場合において，設計・建設規格の“供用状態Ａ，供用状態Ｂ”はそれぞれ“設計事象Ⅰ，設計事象Ⅱ”と読み替える。

(6) キャスク容器に穴を設ける場合は，設計・建設規格　PVB-3500 の規定を満足すること。

許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

Ⅱ　中間胴

(1)　中間胴(キャスク容器との溶接部近接部分)にあっては，5.5 項Ⅰ(1)の規定による。

(2)　中間胴（前号に掲げる範囲を除く）にあっては，次によること。

a.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.2 の規定を満足すること。

b.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.3 の規定を満足すること。

c.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）は，次の値を超えないこと。

(a) 引張応力と圧縮応力（引張応力の符号は正とし，圧縮応力の符号は負として計算する。），せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差，並びに支圧応力については，設計・建設規格　SSB-3122.1(1)，(2)，(3)及び(4)に定める値

(b) 座屈応力については，設計・建設規格　SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の 1.5 倍の値

d.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）は，次の値を超えないこと。

(a) 引張応力と圧縮応力（引張応力の符号は正とし，圧縮応力の符号は負として計算する。），せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差は，設計・建設規格 SSB-3122.1(1)，(2)及び(3)に定める値

(b) 支圧応力については，設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。この場合において，設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのは，「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」に読み替えるものとする。

(c) 座屈応力については，設計・建設規格 SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の 1.5 倍の値

e.　a.，b.，c.，及び d.において応力の組合せが考えられる場合は，組合せ応力に対する評価は，設計・建設規格　SSB-3121.1(6)の規定による。

(3)　(2)の場合において，設計・建設規格の“供用状態Ａ，供用状態Ｂ”はそれぞれ“設計事象Ⅰ，設計事象Ⅱ”と読み替える。

許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

6.　応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1　解析手順の概要

キャスク容器及び中間胴の応力解析フローを図 6-1 に示す。

キャスク容器及び中間胴の応力解析は，想定される圧力荷重，機械的荷重及び熱荷重を基に，キャスク容器及び中間胴の実形状をモデル化し，汎用解析コードである
ＡＢＡＱＵＳ及び応力評価式を用いて行う。

ＡＢＡＱＵＳとは，有限要素法に基づく，伝熱解析，応力解析等の汎用解析コードである。温度分布計算及び応力計算は，解析しようとする箇所を形状，材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し，各メッシュについて計算を実施することによって行う。

6.2　荷重条件の選定

荷重条件は 4.項に示されているが，各部の計算においては，その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3　温度分布計算

6.3.1　温度分布計算の方法

(1) 計算を行う設計事象は，貯蔵容器姿勢が縦置きの貯蔵時及び横置きの運搬時とする。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

a. 温度分布計算では，軸対称要素による解析モデル（以下「軸対称モデル」という）を用いる。軸対称モデルは，キャスク容器，中間胴，ガンマ線遮へい体，二次蓋及び外筒の形状について対称性を考慮する。また，キャスク容器内面に伝わる熱流束の周方向変化は熱伝導のよいアルミニウム合金のバスケットにより小さくなるので，バスケット，使用済燃料及びヘリウムを均質化して燃料有効長で発熱させ，その発熱量をキャスク容器内面に与える。

中性子遮へい体及び伝熱フィンについては均質体として扱うため，二次元平面要素によるモデルにより中間胴外面と外筒内面との温度を求め伝熱抵抗と等価な熱伝導率を与える。

b. 形状及び材料の不連続性を考慮して，温度計算のためのメッシュ分割を行う。

c. 外表面からの放熱は自然対流及びふく射とする。

d. モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

なお，境界には計算で求めた熱伝達率を考慮する。

(3) 計算機コードを用いて，温度分布を計算する。

(4) 温度分布の計算結果を応力計算書に示す。

6.4 応力計算と評価

6.4.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は代表事象毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の３つである。

a. 内圧

b. 機械的荷重

自重(燃料集合体を含む貯蔵容器(二次蓋を含む)の貯蔵時の設計重量を用いる。)，衝撃荷重及びその他の負荷荷重をいう。

c. 熱荷重

キャスク容器に生じる温度変化，温度勾配による荷重であって，温度分布計算の結果から得られるものをいう。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

a. モデル化に当たっては，キャスク容器，中間胴，ガンマ線遮へい体の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。

b. 解析モデルは，1/2 対称の三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。また，モデル化に当たり対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

(3) 構造及び材料の不連続性を考慮して，応力評価点（面）をとる。評価点（面）は，応力計算書に示す。応力評価は，この応力評価点（面）について行う。

(4) 溶接部については，母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

6.4.2　応力評価

応力の計算結果は，設計・建設規格　GNR-2130 による定義に従い，応力の種類毎に分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ_θ　：円周方向応力

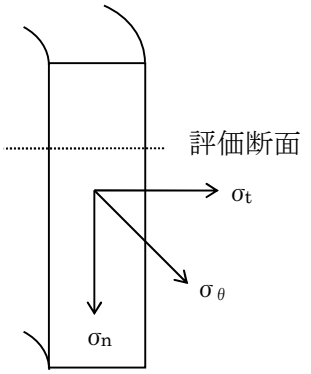
σ_n　：評価断面に垂直な方向の応力

σ_t　：評価断面に平行な方向の応力

$\tau_{n\theta}$　：せん断応力

τ_{nt}　：せん断応力

$\tau_{t\theta}$　：せん断応力



キャスク容器用材料の許容応力値を表 6-1 及び表 6-2 に示す。

また，中間胴用材料の許容応力値を表 6-3 及び表 6-4 に示す。

(1)　キャスク容器（ボルトを除く）及び中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）の応力評価

キャスク容器及び中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）の応力評価は，設計・建設規格　PVB-3110 に従い以下の項目を実施する。

a．一次応力強さ

b．一次＋二次応力強さ

c．繰返し荷重の評価

d．特別な応力の検討

(a) 純せん断応力の評価

(b) 支圧応力の評価

(c) 圧縮応力の評価

(2)　ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は，設計・建設規格　PVB-3120 に従い実施する。

(3)　中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）の応力評価

中間胴の応力評価は，設計・建設規格　SSB-3010 に従い以下の項目を実施する。

a．一次応力強さ

b．一次＋二次応力強さ

c．組合せ応力

6.4.3　数値の丸め方

数値は，原則として四捨五入とする。また，評価に用いる許容応力及び算出応力等については，安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-5 に示す。

7. 参考文献

文献番号は，本書及び応力計算書において共通である。

(1) 伝熱工学資料　第4版，日本機械学会（1986）

(2) 機械工学便覧　新版，日本機械学会（1987）

(3) 伝熱工学資料　第3版，日本機械学会（1975）

(4) Mc Adams,W.H.，”Heat Transmission”，Third Edition，Mc Graw Hill.

(5) 鉛ハンドブック，日本鉛亜鉛需要研究会（1975）

(6) 使用済核燃料輸送容器の構造解析プログラムの開発・整備に関する調査報告書(Ⅲ)，
日本機械学会（1985）

(7)

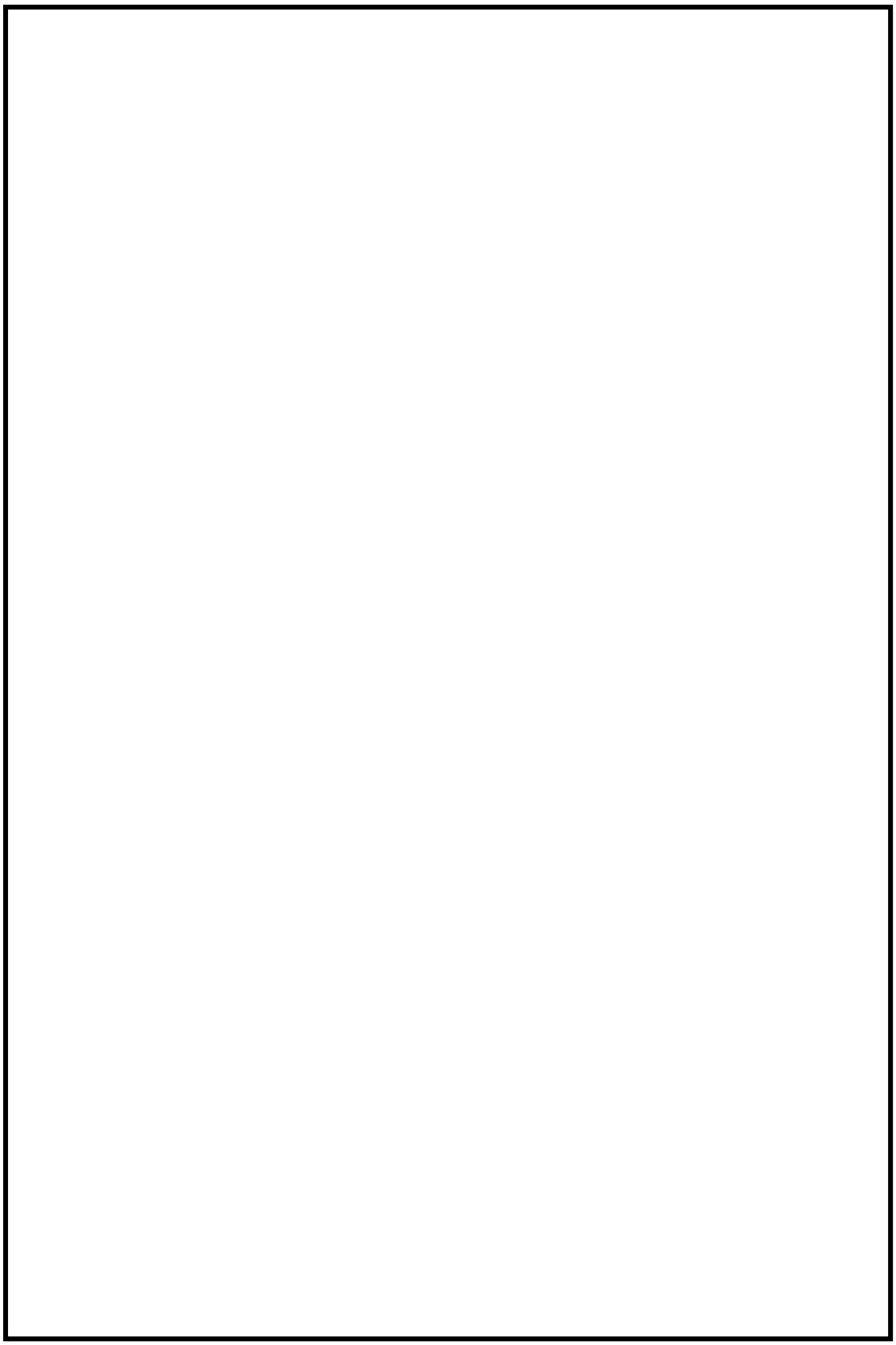


図 5-1(1)　キャスク容器及び中間胴の応力解析箇所（全体断面図）

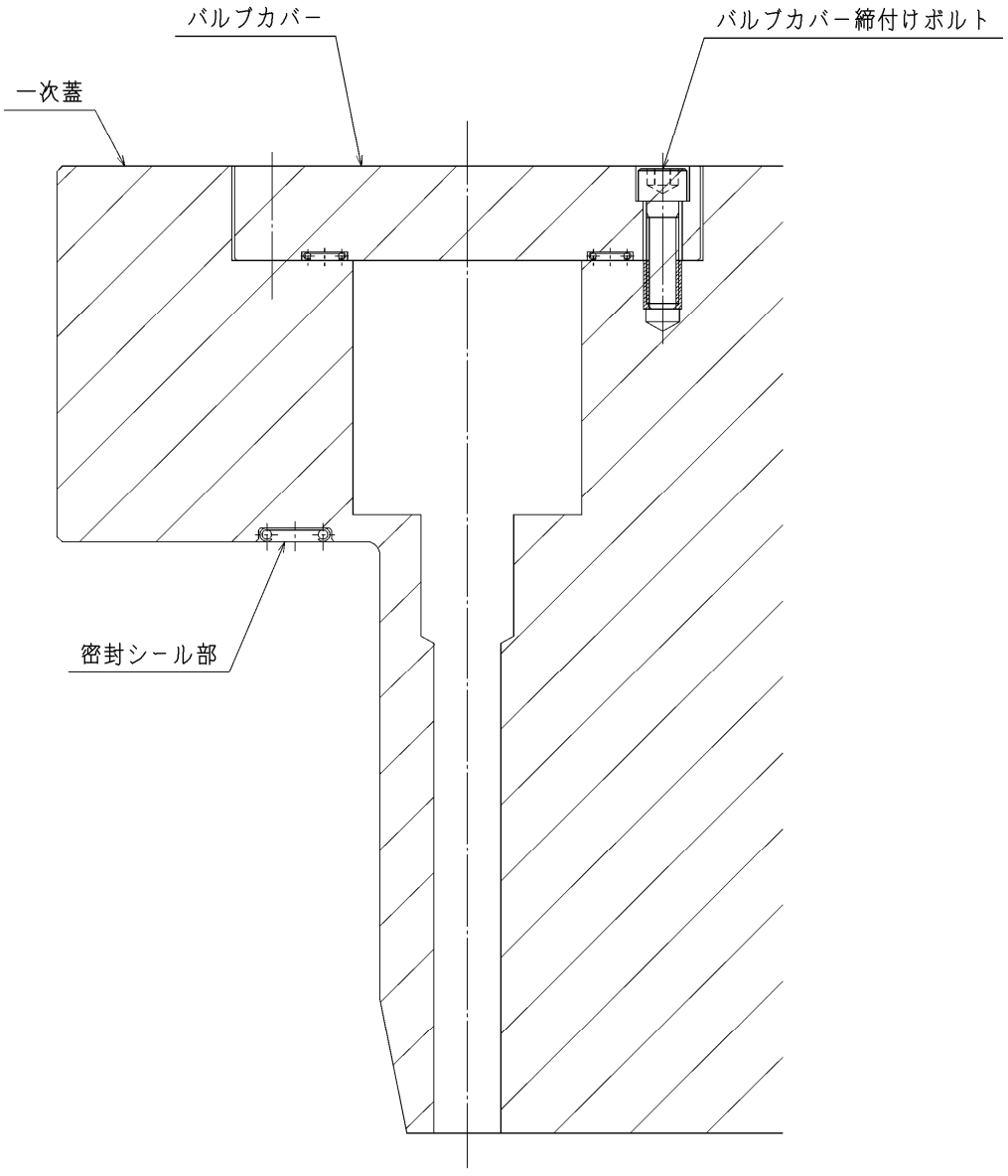


図 5-1(2)　キャスク容器及び中間胴の応力解析箇所（一次蓋貫通部）

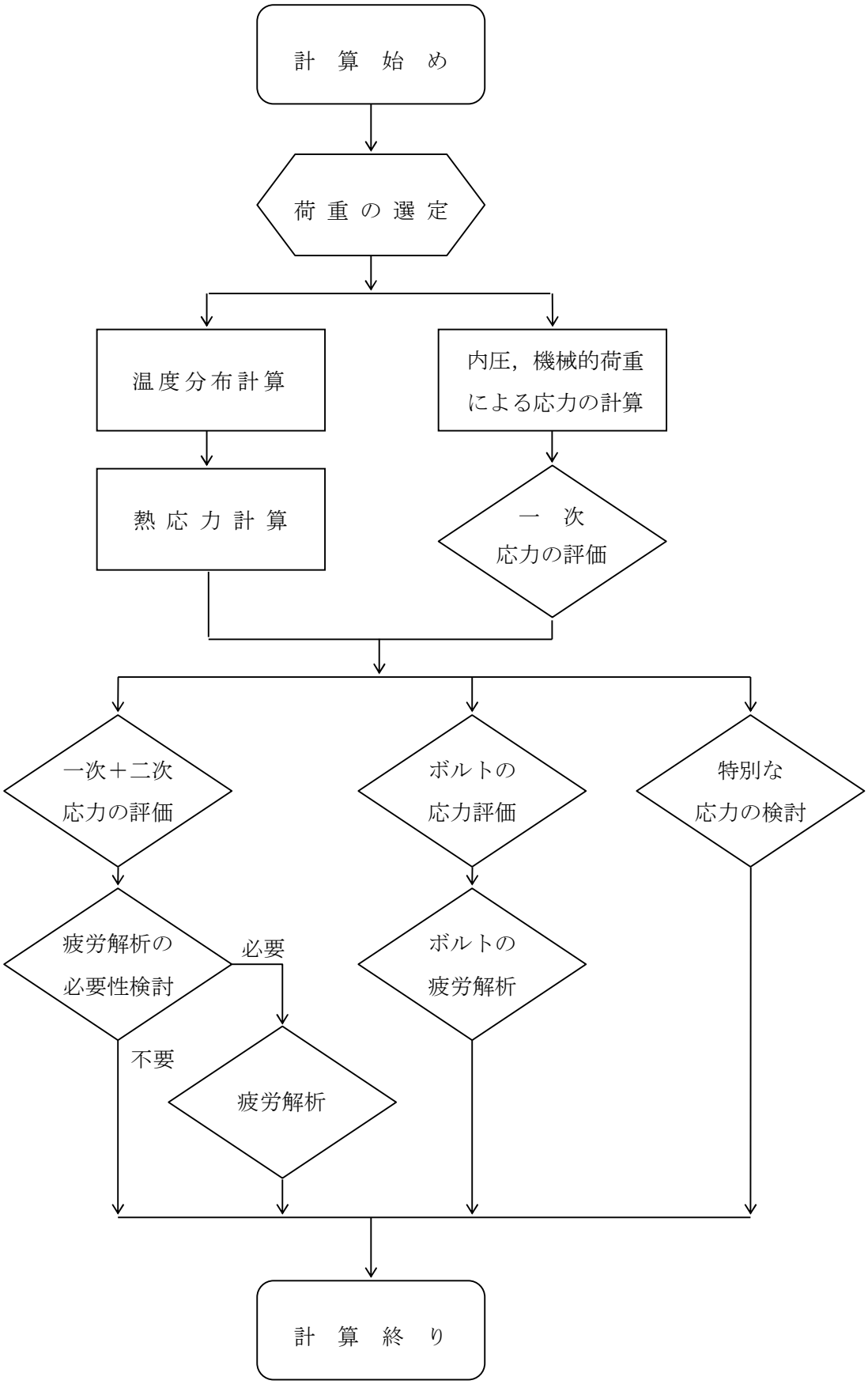


図 6-1　キャスク容器及び中間胴の応力解析フロー図

表 4-1　使用済燃料の条件

項　目	燃料条件
対象燃料	高燃焼度８×８燃料[1)]
貯蔵容器１基当たりの収納体数(体)	61
貯蔵容器１基当たりの発熱量(kW)	17.1 [2)]
姿勢	縦置き／横置き [3)]
周囲温度(℃)	45／38 [3)]

注記 1)：８×８燃料，新型８×８燃料，新型８×８ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度８×８燃料のうち最も厳しい発熱量となる高燃焼度８×８燃料について行う。

2)：ＯＲＩＧＥＮ２コードにより求めた。

3)：貯蔵時／運搬時における貯蔵容器姿勢及び周囲温度

表 4-2　貯蔵容器の設計事象

設計事象	定　　義	解　　説	事象の例	選定事象
I	貯蔵容器の通常の取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬	・貯蔵

表 4-3　キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷重 ／ 設計事象・荷重時		圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付け力	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重（異常着床・支持構造物への衝突）	熱荷重	備考
I	貯　蔵　時	○	○	○				○	(1)

(1) S_d^*地震力及びS_s地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 4-4　中間胴の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷重 / 設計事象	荷重時	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重 異常着床・支持構造物への衝突	熱荷重 (1)	備考
I	貯　蔵　時	○				○	(2)

(1) キャスク容器の熱膨張により生ずる応力に限る。

(2) S_d^*地震力及びS_s地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1　代　表　事　象

設計事象	代表事象 1)	包絡される事象	荷重条件	備　　考
Ⅰ＋S_d^*	貯　蔵　時 （S_d^*地震力が作用する場合）	―――	キャスク容器内圧：-0.1MPa 蓋間圧力：0.4MPa 自　重:1G(=9.81m/s^2) ボルト初期締付け力 地震力 水平方向: C_HG=1.17G(=11.48m/s^2) 鉛直方向: C_VG=0.65G(= 6.38m/s^2) 熱荷重	―――
Ⅰ＋S_s	貯　蔵　時 （S_s地震力が作用する場合）	―――	キャスク容器内圧：-0.1MPa 蓋間圧力：0.4MPa 自　重:1G(=9.81m/s^2) ボルト初期締付け力 地震力 水平方向: C_HG=1.17G(=11.48m/s^2) 鉛直方向: C_VG=0.65G(= 6.38m/s^2) 熱荷重	―――

注記 1)：本事象について応力解析を行う。

表 5-2　温度分布計算に使用する材料の物性値

構　成　部　材	材　　料	温　度 (℃)	熱伝導率[1)] (W／m・K)
内　　胴 上部フランジ 底　　板 底部プラグ 中 間 胴 外　　筒 一 次 蓋 バルブカバー 二 次 蓋	ステンレス鋼 (SUS304 又は SUSF304)	27 127 327	16.0 16.5 19.0
ガンマ線遮へい体	鉛	27	35.2
伝熱フィン	銅 (C1020)	27 327	398 383
中性子遮へい体	レジン	—	
内部気体	ヘリウム	27 127 227 327	0.1527 0.1882 0.2212 0.2523
周囲環境	空気	27 127 227 327	0.02614 0.03305 0.03951 0.0456

注記１）：参考文献（１）参照。ただし，レジンは参考文献（７）参照。

表 5-3　温度分布計算に使用するふく射率

構 成 部 材	材　　料	ふ　く　射　率 [1)]
外　　筒 二　次　蓋 内　　胴 中　間　胴 上部フランジ 一次蓋 バルブカバー 底　　板 底部プラグ	ステンレス鋼 （SUS304 又は SUSF304）	0.15
ガンマ線遮へい材	鉛	0.28

注記１）：参考文献（３）参照

表 5-4　熱応力計算に使用する材料の物性値

構成部材	材　　料	温　度 （℃）	縦弾性係数 [1)] （MPa）	熱膨張係数 [1)] （×10^{-6}mm/mm℃）	ポアソン比 （－）
内　　胴 上部フランジ 底　　板 底部プラグ 一　次　蓋 中　間　胴	ステンレス鋼 (SUS304 又は SUSF304)	20 50 75 100 125 150 175 200	195000 193000 191000 190000 188000 186000 184000 183000	15.21 15.49 15.68 15.87 16.05 16.21 16.37 16.52	0.3
一次蓋締付けボルト バルブカバー締付けボルト	合金鋼 (SNB23－3)	20 50 75 100 125 150 175 200	192000 189000 188000 186000 185000 184000 182000 180000	11.14 11.40 11.62 11.82 12.00 12.21 12.37 12.54	—
ガンマ線遮へい材	鉛	20 100 200	1370 1280 1170	28.8 29.0 29.6	0.44 0.45 0.45

注記１）：鉛については，参考文献（５）及び（６）参照。

表 6-1　キャスク容器用材料の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類	許容応力値			
		オーステナイト系ステンレス鋼			
		密封シール部以外の部位 1)		密封シール部	
		SUS 304 SUS F304	許容値基準	SUS F304	許容値基準
設計事象Ⅰ＋S_d^*	一次一般膜応力強さ　P_m	162	$1.2S_m$	152	$Min\{S_y, 1.2S_m\}$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ　P_L+P_b 4)	243	$1.8S_m$	152	S_y
	一次＋二次応力強さ　P_L+P_b+Q 3)	405	$3S_m$	152	S_y
	純せん断応力　σ_s	81	$0.6S_m$		
	支圧応力　σ_p 2)	152(228)	$S_y(1.5S_y)$		
設計事象Ⅰ＋S_s	一次一般膜応力強さ　P_m	278	$Min\{2.4S_m, 2/3S_u\}$	152	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ　P_L+P_b 4)	418	$Min\{3.6S_m, S_u\}$	152	S_y
	一次＋二次応力強さ　P_L+P_b+Q 3)	405	$3S_m$	152	S_y
	純せん断応力　σ_s	167	$0.4S_u$		
	支圧応力　σ_p 2)	418(627)	$S_u(1.5S_u)$		

注記１）：底部プラグ溶接部の許容応力値は表に示される値の 1/2 とする。

２）：（　）内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

３）：S_d^*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

４）：P_Lの許容応力はP_L+P_bの許容応力と同一とする。

表 6-2　キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類	許容応力値	
		合金鋼 SNB23－3	許容値基準
設計事象Ⅰ＋S_d^*	平均引張応力	550	2 S_m
	平均引張応力＋曲げ応力	825	3 S_m
設計事象Ⅰ＋S_s	平均引張応力	825	S_y
	平均引張応力＋曲げ応力	825	S_y

表 6-3　中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）用材料の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類	許容応力値	
		オーステナイト系ステンレス鋼	
		SUS 304	許容値基準
設計事象Ⅰ＋S_d^*	一次一般膜応力強さ　P_m	162	1.2 S_m
	一次膜＋一次曲げ応力強さ　P_L+P_b 3)	243	1.8 S_m
	一次＋二次応力強さ　P_L+P_b+Q 2)	405	3 S_m
	純せん断応力　σ_s	81	0.6 S_m
	支圧応力　σ_p 1)	152(228)	S_y(1.5S_y)
設計事象Ⅰ＋S_s	一次一般膜応力強さ　P_m	278	Min {2.4S_m, 2/3S_u}
	一次膜＋一次曲げ応力強さ　P_L+P_b 3)	418	Min {3.6S_m, S_u}
	一次＋二次応力強さ　P_L+P_b+Q 2)	405	3 S_m
	純せん断応力　σ_s	167	0.4 S_u
	支圧応力　σ_p 1)	418(627)	S_u(1.5S_u)

注記１）：（　）内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

２）：S_d^*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

３）：P_Lの許容応力はP_L+P_bの許容応力と同一とする。

表 6-4(1)　中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類		許容応力値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUS304	許容値基準
設計事象 $I + S_d^{*1)}$	一次応力	引張応力	204	1.5 f_t
		圧縮応力	204	1.5 f_c
		せん断応力	117	1.5 f_S
		曲げ応力	204	1.5 f_b
		支圧応力	279	1.5 f_P
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力 2)	408	3 f_t
		せん断応力 2)	234	3 f_S
		曲げ応力 2)	408	3 f_b
		支圧応力	279	1.5 f_P
		座屈応力	117	1.5 f_b, 1.5 f_S 又は 1.5f_c

注記１）：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力とせん断応力を組み合わせた応力（σ_T）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_t^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_n \cdot \sigma_t - \sigma_t \cdot \sigma_\theta - \sigma_\theta \cdot \sigma_n + 3\tau_{nt}^2 + 3\tau_{t\theta}^2 + 3\tau_{n\theta}^2}$$

②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{cc}|}{1.5f_c} + \frac{|{}_c\sigma_{bb}|}{1.5f_b} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_t\sigma_{bb}| - |\sigma_{cc}|}{1.5f_t} \leqq 1$$

③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{tt}| + |{}_t\sigma_{bb}|}{1.5f_t} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_c\sigma_{bb}| - |\sigma_{tt}|}{1.5f_b} \leqq 1$$

ただし，②及び③において，一次応力については上式による。一次＋二次応力の場合，分母の 1.5 f_c，1.5 f_b，1.5 f_t は，3 f_c，3 f_b，3 f_t とする。

２）：S_d^*地震力のみによる応力振幅について評価する。

表 6-4(2)　中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類		許容応力値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUS304	許容値基準
設計事象 $I+S_s$ [1)]	一次応力	引張応力	204	1.5 f_t*
		圧縮応力	204	1.5 f_c*
		せん断応力	117	1.5 f_S*
		曲げ応力	204	1.5 f_b*
		支圧応力	279	1.5 f_P*
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力 [2)]	408	3 f_t
		せん断応力 [2)]	234	3 f_S
		曲げ応力 [2)]	408	3 f_b
		支圧応力	279	1.5 f_P*
		座屈応力	117	1.5 f_b, 1.5 f_S 又は 1.5f_c

注記１）：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力とせん断応力を組み合わせた応力（σ_T）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T=\sqrt{\sigma_n{}^2+\sigma_t{}^2+\sigma_\theta{}^2-\sigma_n\cdot\sigma_t-\sigma_t\cdot\sigma_\theta-\sigma_\theta\cdot\sigma_n+3\tau_{nt}{}^2+3\tau_{t\theta}{}^2+3\tau_{n\theta}{}^2}$$

②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{cc}|}{1.5f_c}+\frac{|{}_c\sigma_{bb}|}{1.5f_b}\leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_t\sigma_{bb}|-|\sigma_{cc}|}{1.5f_t}\leqq 1$$

③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{tt}|+|{}_t\sigma_{bb}|}{1.5f_t}\leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_c\sigma_{bb}|-|\sigma_{tt}|}{1.5f_b}\leqq 1$$

ただし，②及び③において，一次応力については上式による。一次＋二次応力の場合，分母の 1.5 f_c，1.5 f_b，1.5 f_t は，3 f_c，3 f_b，3 f_t とする。

２）：S_s 地震力のみによる応力振幅について評価する。

表 6-5　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単　位	処　理　桁	処　理　法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	－	－	設　計　値
最高使用温度	℃	－	－	設　計　値
縦弾性係数	MPa	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁
許容応力値	MPa	小数点以下第1位	切　捨　て	整数値位
計算応力値[1)]	MPa	小数点以下第1位	切　上　げ	整数値位
長　さ	mm	－	－	設　計　値
設計震度	－	小数点以下第3位	切　上　げ	小数点以下第2位
面　積	mm^2	有効数字4桁目	安全側に処理する	有効数字3桁
角　度	°	－	－	設　計　値
質　量	kg	－	－	設　計　値
力	N	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁

注記１）：応力成分は，小数点以下第2位を四捨五入し，小数点以下第1位までの値を記載する。

Ⅴ-2-4-2-3 ②二次蓋の強度計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 適用基準 ····· 1
3. 記号 ····· 2
3.1 記号の説明 ····· 2
4. 設計条件及び構造 ····· 3
4.1 設計条件 ····· 3
4.2 数値の丸め方 ····· 3
4.3 二次蓋の構造 ····· 3
5. 応力計算（S_d^*及びS_s地震時） ····· 4
5.1 荷重条件 ····· 4
5.2 計算方法 ····· 4
5.3 評価方法 ····· 5
5.4 計算結果 ····· 5
6. 応力評価（S_d^*及びS_s地震時） ····· 6

図表目次

図 4-1　二次蓋の構造 ····· 7
図 5-1　応力評価点（面） ····· 8
図 5-2　計算モデル ····· 9

表 4-1　設計条件 ····· 10
表 4-2　数値の丸め方一覧表 ····· 10
表 5-1　応力計算に使用する材料の物性値 ····· 11
表 5-2　二次蓋の許容応力値 ····· 11
表 5-3　二次蓋締付けボルトの許容応力値 ····· 11
表 5-4　二次蓋の応力計算結果 ····· 12
表 6-1　二次蓋の応力評価 ····· 14

1. 概要

本計算書は，使用済燃料乾式貯蔵容器の二次蓋に関する応力計算書である。

2. 適用基準

二次蓋は，貯蔵時の密封監視のために圧力空間を保持するための部材であり，二次蓋及び一次蓋の蓋間内が正圧となることから，構造強度評価手法としては「発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版(2007 年追補版を含む)）JSME S NC1-2005/2007）（日本機械学会　2007 年 9 月）」（以下，「設計・建設規格」という。）のクラス３容器に従って設計する。

また，地震時における荷重の組合せ及び許容応力については設計・建設規格　GNR-2200 に従い，「日本電気協会　原子力発電所耐震設計技術指針・補　許容応力・重要度分類編」（JEAG 4601・補－1984）に準ずる。

ここで，設計事象とその許容応力状態は下記のとおりとする。

・設計事象Ⅰ＋S_d^*は，地震力として基準地震動S_sを考慮し，
　許容応力状態$Ⅲ_AS$で評価する。

・設計事象Ⅰ＋S_sは，地震力として基準地震動S_sを考慮し，
　許容応力状態$Ⅳ_AS$で評価する。

3. 記　号

3.1　記号の説明

本計算書において，応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし，本文中に特記ある場合は，この限りでない。

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
D	死荷重	—
G	重力加速度(=9.80665)	m/s^2
M_d	当該設備に設計上定められた機械的荷重	—
P_d	当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重	MPa
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
P_L	一次局部膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S	最高使用温度における設計・建設規格　付録材料図表 Part5 表5に規定する材料の許容引張応力	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_S	基準地震動S_Sにより定まる地震力	—
S_{12}	主応力差　$\lvert \sigma_1 - \sigma_2 \rvert$	MPa
S_{23}	主応力差　$\lvert \sigma_2 - \sigma_3 \rvert$	MPa
S_{31}	主応力差　$\lvert \sigma_3 - \sigma_1 \rvert$	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{n\theta}$	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s^2
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s^2
$I+S_d^*$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I+S_S$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_S地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件及び構造

4.1 設計条件

最高使用圧力及び最高使用温度を表 4-1 に示す。

4.2 数値の丸め方

数値は，原則として四捨五入とする。また，評価に用いる許容応力及び算出応力等については，安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 4-2 に示す。

4.3 二次蓋の構造

二次蓋の構造を図 4-1 に示す。

5. 応力計算（S_d^*及びS_s地震時）

5.1 荷重条件

応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の３つである。

a. 最高使用圧力（0.4MPa）

b. ボルト初期締付け力（4.6×10^6N）

c. 地震力

5.2 計算方法

(1) 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 4-1 に示す。

(2) 物性値

応力計算に使用する材料の物性値を表 5-1 に示す。

(3) 計算モデル

二次蓋の応力計算は，二次蓋の実形状をモデル化し，汎用解析コードである
ＡＢＡＱＵＳを用いて行う。

ＡＢＡＱＵＳとは，有限要素法に基づく，伝熱解析，応力解析等の汎用解析コードである。応力計算は，解析しようとする箇所を形状，材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し，各メッシュについて計算を実施することによって行う。

計算モデルは次の方針に従う。

a. モデル化に当たっては，二次蓋の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。

b. 解析モデルは三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

加速度として次の値を用いる。

S_d^*地震力が作用する場合：$\alpha_H=C_HG=11.48\text{m/s}^2$，$\alpha_V=C_VG=6.38\ \text{m/s}^2$

S_s 地震力が作用する場合：$\alpha_H=C_HG=11.48\text{m/s}^2$，$\alpha_V=C_VG=6.38\ \text{m/s}^2$

二次蓋の応力評価点（面）を図 5-1 に示す。解析コードＡＢＡＱＵＳの三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-2 に示す。

5.3　評価方法

応力の計算結果は，設計・建設規格　GNR-2130 による定義に従い，応力の種類毎に分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は下記のとおりである。

σ_θ　：円周方向応力

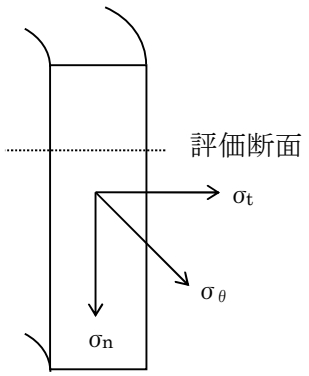
σ_n　：評価断面に垂直な方向の応力

σ_t　：評価断面に平行な方向の応力

$\tau_{n\theta}$　：せん断応力

τ_{nt}　：せん断応力

$\tau_{t\theta}$　：せん断応力



二次蓋用材料の許容応力値を表 5-2 に示す。

二次蓋締付けボルトの許容応力値を表 5-3 に示す。

(1) 二次蓋の応力評価

二次蓋の応力評価は，以下の項目を実施する。

a.　一次応力強さ

b.　一次＋二次応力強さ（地震力のみによる応力振幅）

(2) 二次蓋締付けボルトの応力評価

二次蓋締付けボルトの応力評価は一次応力強さについて実施する。

5.4　計算結果

評価対象として応力評価点（面）についての応力評価を表 5-4 に示す。

6. 応力評価（S_d^*及びS_s地震時）

各設計事象における二次蓋及び二次蓋締付けボルトの評価を表 6-1 に示す。

表 6-1 より各部の一次応力は許容値を満足する。また，二次蓋の一次＋二次応力は 2 S_y 以下となり，疲労評価不要の条件を満足する。

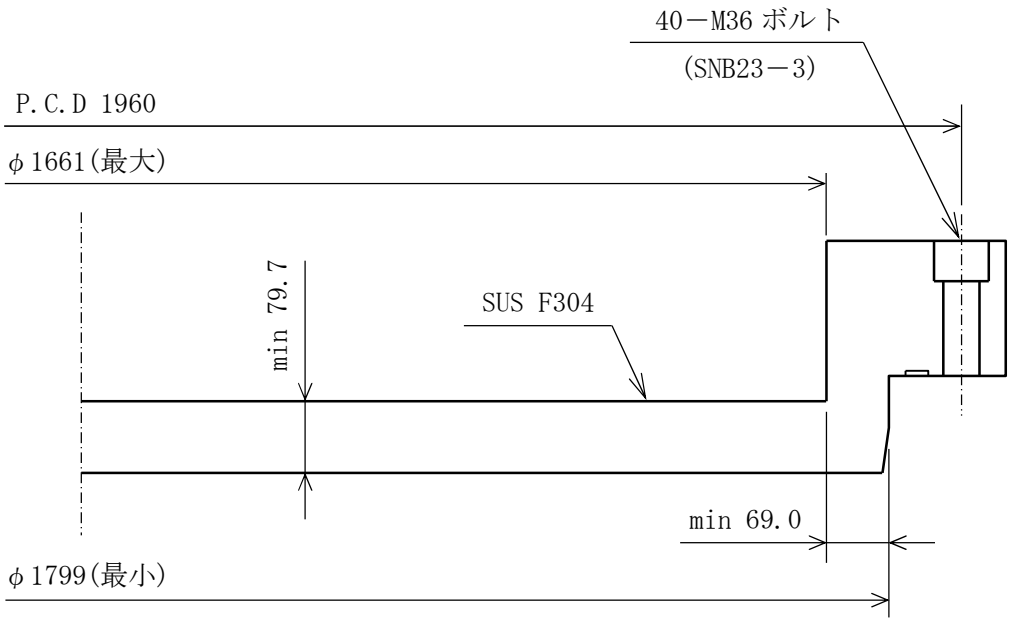

40－M36 ボルト
(SNB23－3)
P.C.D 1960
φ1661(最大)
min 79.7
SUS F304
min 69.0
φ1799(最小)

図 4-1　二次蓋の構造

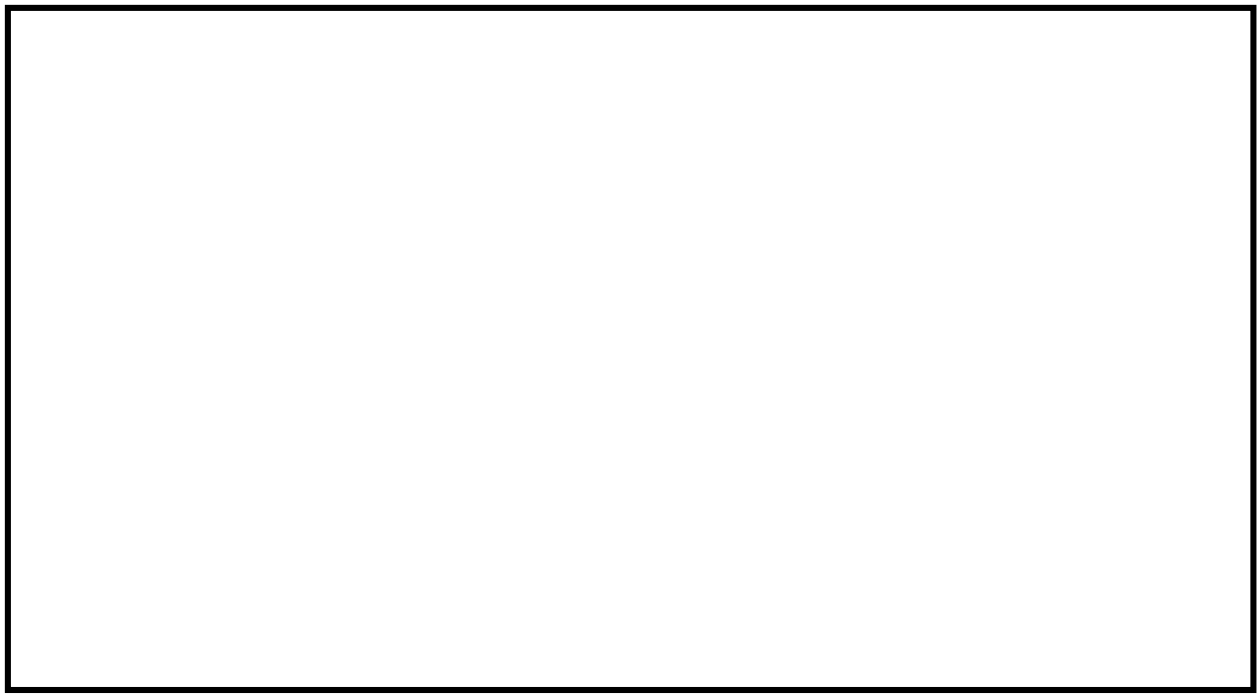


図 5-1　応力評価点（面）

表 4-1　設　計　条　件

項　　目		設　計　値
最高使用圧力	MPa	0.4
最高使用温度	℃	160

表 4-2　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単　位	処　理　桁	処　理　法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	－	－	設　計　値
最高使用温度	℃	－	－	設　計　値
許容応力値	MPa	小数点以下第１位	切　捨　て	整 数 値 位
計算応力値[1)]	MPa	小数点以下第１位	切　上　げ	整 数 値 位
必　要　厚　さ	mm	小数点以下第２位	切　上　げ	小数点以下第１位
最　小　厚　さ	mm	小数点以下第２位	切　捨　て	小数点以下第１位
長　　さ	mm	－	－	設　計　値
面　　積	mm^2	有効数字４桁目	安全側に処理する	有効数字３桁
力	N	有効数字４桁目	切　上　げ	有効数字３桁

注記　1)：応力成分は，小数点以下第２位を四捨五入し，小数点以下第１位までの値を記載する。

表 5-1　応力計算に使用する材料の物性値

部位	材料	温度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比 (－)
二次蓋	ステンレス鋼 (SUSF304)	160	185000	0.3
二次蓋締め付けボルト	合金鋼 (SNB23-3)	160	183000	－

表 5-2　二次蓋の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力区分	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUSF304	許容値基準
Ⅰ＋S_d^*	$D+P_d+M_d+S_d^*$	一次一般膜応力(P_m)	152	$Min\{S_y, 0.6S_u\}$と1.2Sの大きい方
		一次膜＋一次曲げ応力(P_L+P_b)	228	上記の1.5倍
		一次＋二次応力 1) (P_L+P_b+Q)	304	$2S_y$
Ⅰ＋S_s	$D+P_d+M_d+S_s$	一次一般膜応力(P_m)	250	$0.6S_u$
		一次膜＋一次曲げ応力(P_L+P_b)	376	$0.9S_u$
		一次＋二次応力 1) (P_L+P_b+Q)	304	$2S_y$

注記１)：S_d^*又はS_s地震動のみによる応力振幅について評価する。

表 5-3　二次蓋締付けボルトの許容応力値

(単位：MPa)

許容応力区分	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			合金鋼　SNB23-3	許容値基準
Ⅰ＋S_d^*	$D+P_d+M_d+S_d^*$	平均引張応力	300	1.5S
Ⅰ＋S_s	$D+P_d+M_d+S_s$	平均引張応力	400	2S

表 5-4(1)　二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：$D+P_d+M_d+S_d^*$の場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1)]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
二次蓋	①-①’	P_L+P_b							23	228
	①	$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
	①’								1	304
	②-②’	P_L+P_b							22	228
	②	$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
	②’								1	304
	③-③’	P_L+P_b							18	228
	③	$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
	③’								1	304
	④-④’	P_m							5	152
	④	P_L+P_b							34	228
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
	④’	P_L+P_b							25	228
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
ボルト締付け二次蓋	⑤	平均引張応力							146	300

注記１）：σ_n　：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　：円周方向応力

σ_t　：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$　：評価断面上のせん断応力

２）：S_d^*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-4(2)　二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：$D+P_d+M_d+S_S$ の場合）

（単位：MPa）

部位	評価点（面）	応力分類	応力成分[1)]						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
二次蓋	①-①’	P_L+P_b							23	376
	①	$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
	①’								1	304
	②-②’	P_L+P_b							22	376
	②	$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
	②’								1	304
	③-③’	P_L+P_b							18	376
	③	$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
	③’								1	304
	④-④’	P_m							5	250
	④	P_L+P_b							34	376
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
	④’	P_L+P_b							25	376
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							1	304
ボルト 締付け 二次蓋	⑤	平均引張応力							146	400

注記１）：σ_n　：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　：円周方向応力

σ_t　：評価断面に平行な方向の応力　　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{n\theta}$　：評価断面上のせん断応力

２）：S_S 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1　二次蓋の応力評価

（単位：MPa）

許容応力区分	荷重の組合せ	部　位	応力分類	評価点	計算値	許容応力値
Ⅰ＋S_d^*	$D+P_d+M_d+S_d^*$	二次蓋	P_m	④－④’	5	152
			P_L+P_b	④	34	228
			$P_L+P_b+Q^{1)}$	②	1	304
		二次蓋締付けボルト	平均引張応力	⑤	146	300
Ⅰ＋S_S	$D+P_d+M_d+S_S$	二次蓋	P_m	④－④’	5	250
			P_L+P_b	④	34	376
			$P_L+P_b+Q^{1)}$	②	1	304
		二次蓋締付けボルト	平均引張応力	⑤	146	400

注記１）：S_d^*及びS_S地震動のみによる応力振幅について評価する。

Ⅴ-2-4-2-3 ③バスケットの応力計算書

目次

1. 概要 ····· 1
1.1 形状・寸法・材料 ····· 1
1.2 計算結果の概要 ····· 1
2. 温度分布計算 ····· 2
2.1 計算方法 ····· 2
2.2 温度分布図 ····· 2
3. 応力計算 ····· 3
3.1 応力評価点 ····· 3
3.2 貯蔵時（S_d^*及びS_s地震力が作用する場合） ····· 3
3.2.1 荷重条件 ····· 3
3.2.2 計算方法 ····· 3
3.2.3 計算結果 ····· 5
4. 応力の評価 ····· 6
4.1 応力強さの評価 ····· 6
4.2 特別な応力の評価 ····· 6
4.2.1 純せん断応力 ····· 6
4.2.2 支圧応力 ····· 6
4.2.3 座屈応力 ····· 6

補足資料 バスケットの応力解析の方針

図表目次

図 1-1　形状・寸法・材料 ····· 7
図 2-1　温度分布計算モデル ····· 8
図 2-2　温度分布図 ····· 9
図 3-1　バスケットの応力評価点(面) ····· 10
図 3-2　バスケットの解析モデル ····· 11
図 3-3　サポートガイドの解析モデル ····· 14

表 1-1　計算結果の概要 ····· 15
表 2-1　熱伝達率の計算 ····· 16
表 2-2　温度分布計算の評価条件 ····· 17
表 3-1　S_d^*地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 ····· 18
表 3-2　S_s地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 ····· 20
表 4-1　バスケットの応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合） ····· 22
表 4-2　バスケットの応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合） ····· 23

1. 概　　要

本計算書は，使用済乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，応力評価上厳しくなる代表的な評価点(面)を本計算書に記載している。

表中の「－」は，評価すべき応力が発生しない又は評価上厳しくないため評価を省略している。以下，本計算書において同様である。

2. 温度分布計算

2.1 計算方法

温度分布計算は，解析コードＡＢＡＱＵＳにより行う。計算のためのモデル図を図 2-1 に示す。

温度分布計算に使用する外表面の熱伝達率の計算条件と計算結果を表 2-1 に示す。

2.2 温度分布図

2.1 項の計算により得られた温度分布図を図 2-2 に示す。

3. 応力計算

3.1 応力評価点

バスケットの応力評価点(面)を図 3-1 に示す。

3.2 貯蔵時（S_d^*及びS_s地震力が作用する場合）

3.2.1 荷重条件

貯蔵時においてS_d^*及びS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重＋熱荷重

3.2.2 計算方法

(1) チャンネル，サポートブロック，補強板及び仕切板

a. 一次応力強さ

(a) 鉛直方向(Z 方向)の加速度による応力

鉛直方向加速度により発生するバスケット軸方向の応力(σ_y)は次式で表される。

$\sigma_y = -\rho \cdot G_1 \cdot L$

ここで，ρ ：材料の密度（$=2.70\times10^{-6}$ kg／mm^3）

G_1 ：鉛直方向加速度（m/s^2）

L ：バスケット全長（＝4495 mm）

他の応力成分は零である。

ただし，$G_1 = 9.81 + \alpha_v$

α_v：鉛直方向設計加速度（$=C_vG=6.38$ m/s^2）

(b) 水平方向（X 方向または Y 方向）の加速度による応力

解析コードＡＢＡＱＵＳの二次元平面固体(連続体)要素及びはり要素による解析モデルを図 3-2(1)及び図 3-2(2)に示す。

各部材間は相互の接触を考慮し，サポートブロックは内胴に設置されているサポートガイド接触面と接触境界を設けている。加速度は X 方向または Y 方向に作用されるものとし，その大きさは以下の通りとする。

X 方向加速度：G_2（$=\alpha_H$）

Y 方向加速度：G_3（$=\alpha_H$）

ただし，α_H：水平方向設計加速度（$=C_HG=11.48$ m/s^2）

b．支圧応力

水平方向加速度によりサポートブロックにおいてサポートガイドとの接触部に発生する平均支圧応力(σ_p)は次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{W \cdot \alpha_H}{4 \cdot A}$$

ここで，W　：バスケット＋使用済燃料(61 体)の質量（=25200kg)

A　：サポートガイドとの接触面積（＝1.76×10^5 mm^2)

α_H：a.と同じ

c．座屈応力

チャンネル及び仕切板に発生する圧縮応力は a.と同様にして求められる。ただし，熱荷重は，2.2 項の結果から得られた貯蔵時(縦置き姿勢)での温度分布による。

(2) サポートガイド

a．一次応力強さ

解析コードＡＢＡＱＵＳの二次元平面固体(連続体)要素による解析モデルを図 3-3 に示す。

水平方向（X 方向または Y 方向）に加速度がバスケットに作用する場合，サポートガイド１個に作用する貯蔵容器軸方向単位長さ当たりの荷重は次式で与えられる。

$$F_X = \frac{W \cdot G_2}{4 \cdot L_S}$$

$$F_Y = \frac{W \cdot G_3}{4 \cdot L_S}$$

ここで，F_X：X 方向荷重（N/mm)

F_Y：Y 方向荷重（N/mm)

W：バスケット＋使用済燃料(61 体)の質量（=25200kg)

G_2：X 方向加速度（= α_H =11.48 m/s^2)

G_3：Y 方向加速度（= α_H =11.48 m/s^2)

L_S：サポートガイドの長さ（＝4350 mm)

したがって，

F_X = 16.6 N/mm,　　F_Y = 16.6 N/mm

内胴との溶接部(コーナー)を拘束する。

(3) サポートガイド溶接部

a. 平均せん断応力

サポートガイド溶接部において発生する平均せん断応力(σ_s)は次式で表される。

$$\sigma_s = \frac{W \cdot G_2}{4 \cdot A} \quad \text{または}$$

$$\sigma_s = \frac{W \cdot G_3}{4 \cdot A}$$

ここで，W，G_2，G_3 ：(2)と同じ

A ：サポートガイド溶接部の断面積（=4.31×10^4mm^2）

(4) 底板

a. 支圧応力

底板底面に発生する平均支圧応力(σ_p)は次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{W \cdot G_1}{A}$$

ここで，W ：(2)と同じ

G_1 ：(1)と同じ

A ：底板底面のキャスク容器との接触面積（＝1.17×10^6 mm^2）

3.2.3 計算結果

応力計算結果を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

4. 応力の評価

4.1 応力強さの評価

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，各設計事象の一次一般膜応力強さ（P_m）及び一次膜＋一次曲げ応力強さ（$P_m + P_b$）は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

4.2 特別な応力の評価

4.2.1 純せん断応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，各設計事象の平均せん断応力（σ_s）は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

4.2.2 支圧応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，各設計事象の平均支圧応力（σ_p）は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

4.2.3 座屈応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より，各設計事象の座屈応力（σ_b）は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

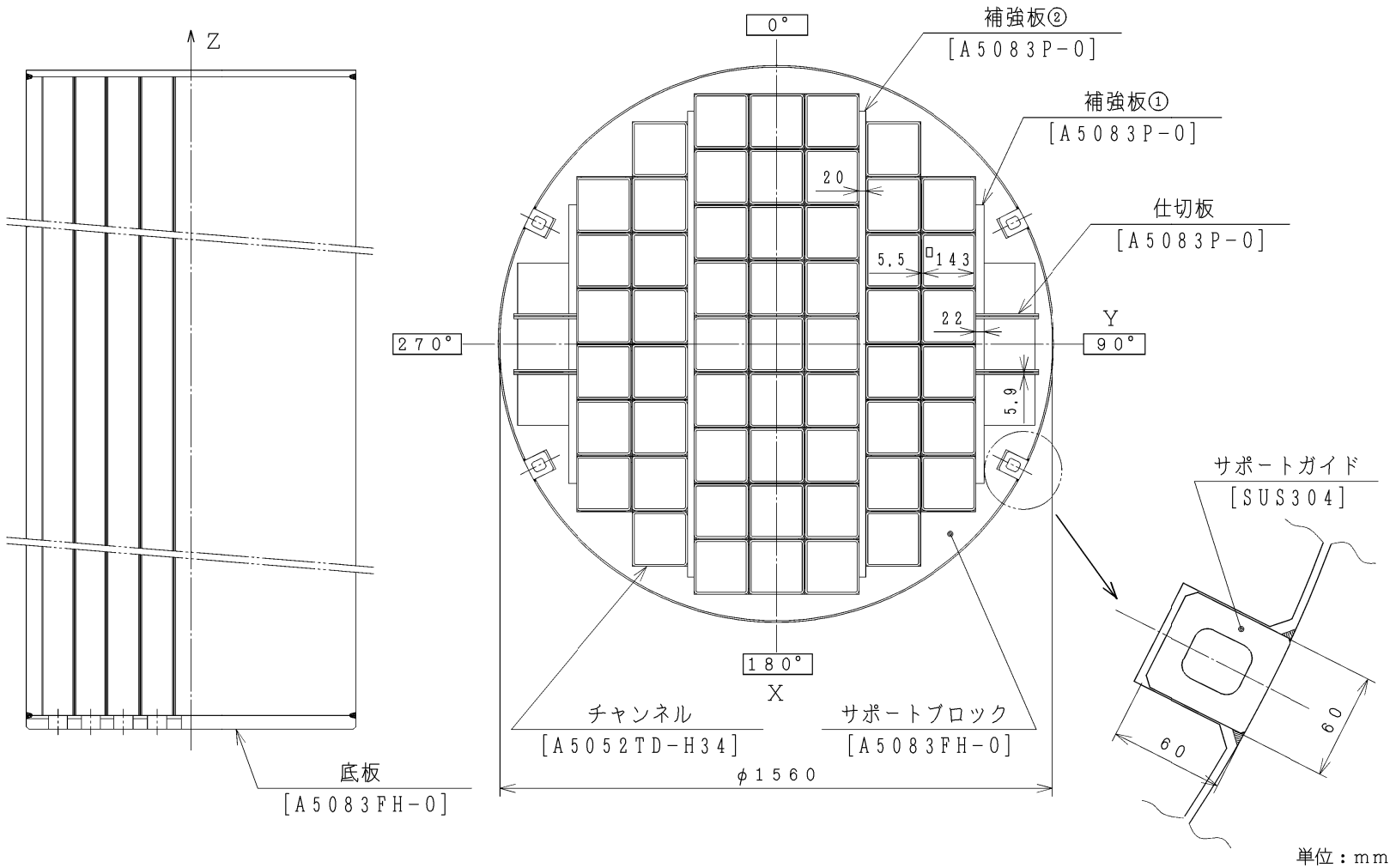

Z
0°
補強板②
[A5083P-O]
補強板①
[A5083P-O]
仕切板
[A5083P-O]
20
5.5
143
22
Y
270°
90°
5.9
180°
X
サポートガイド
[SUS304]
チャンネル
[A5052TD-H34]
サポートブロック
[A5083FH-O]
底板
[A5083FH-O]
φ1560
60
60
単位：mm
[ ]：材料

図 1-1　形状・寸法・材料

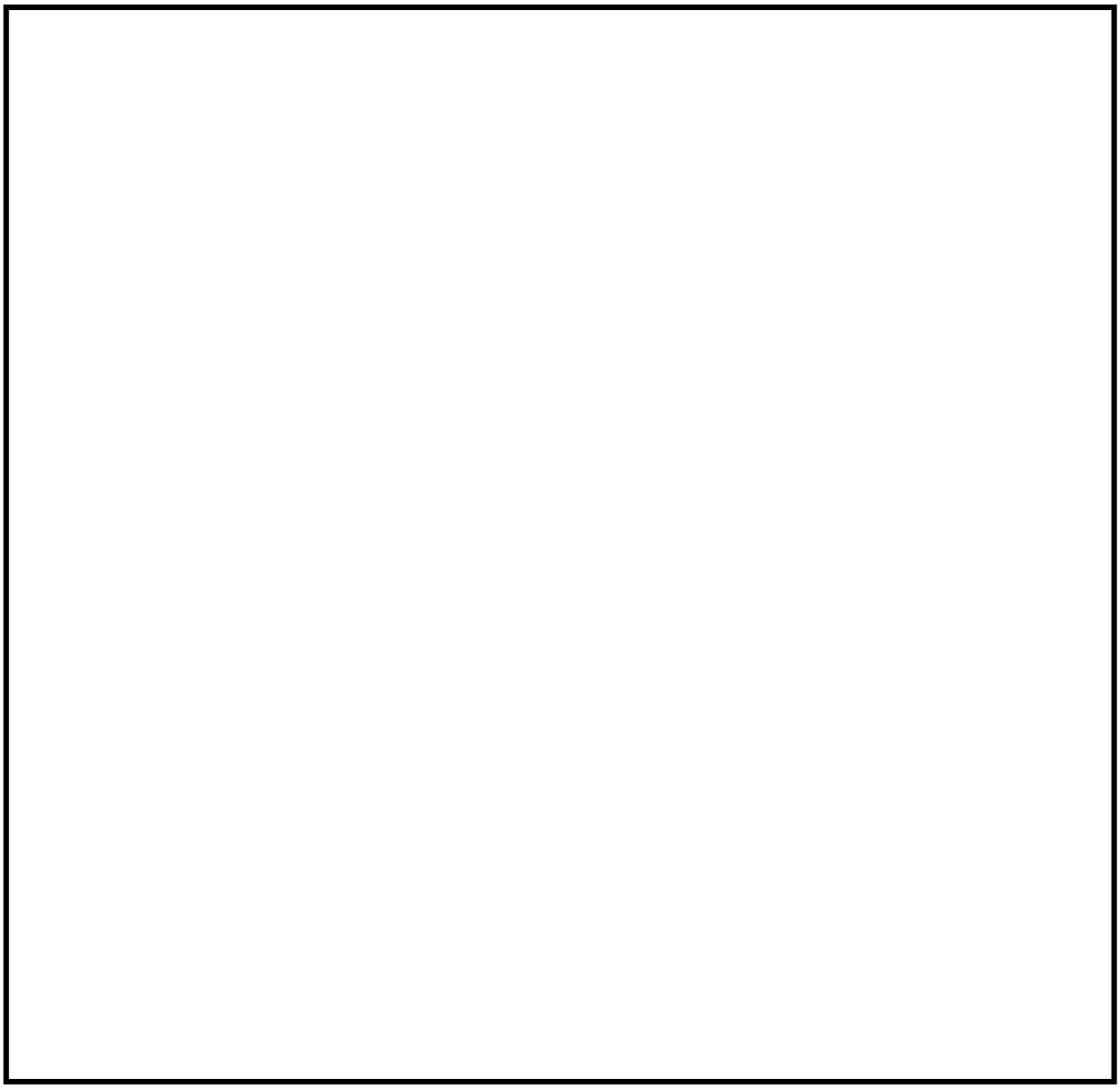


図 2-1　温度分布計算モデル

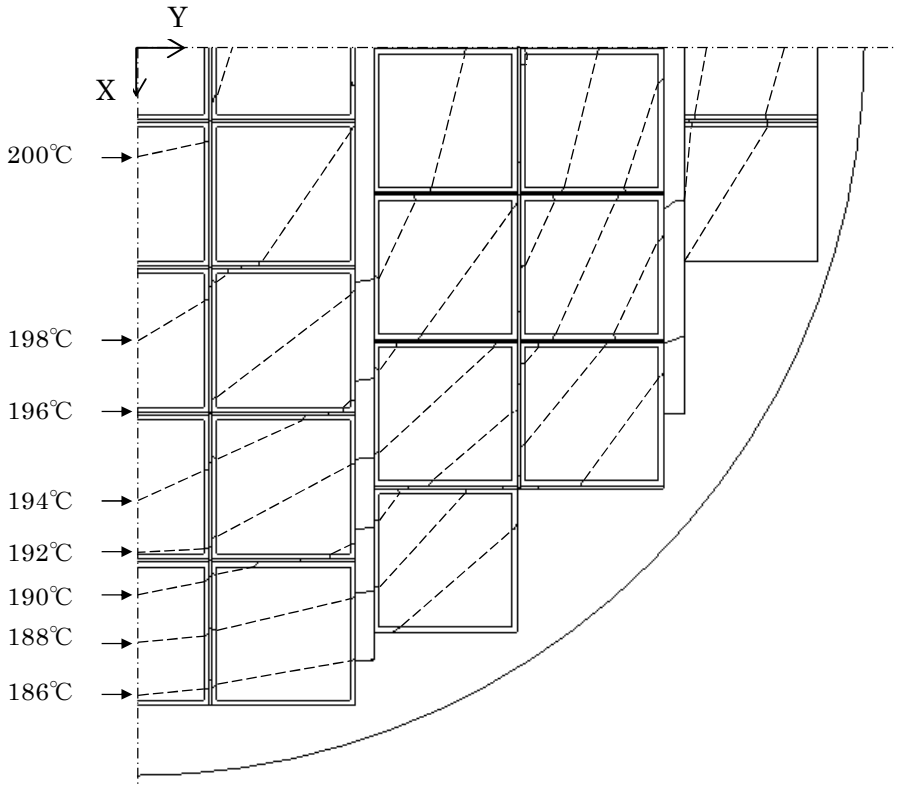


図 2-2　温度分布図（貯蔵時）

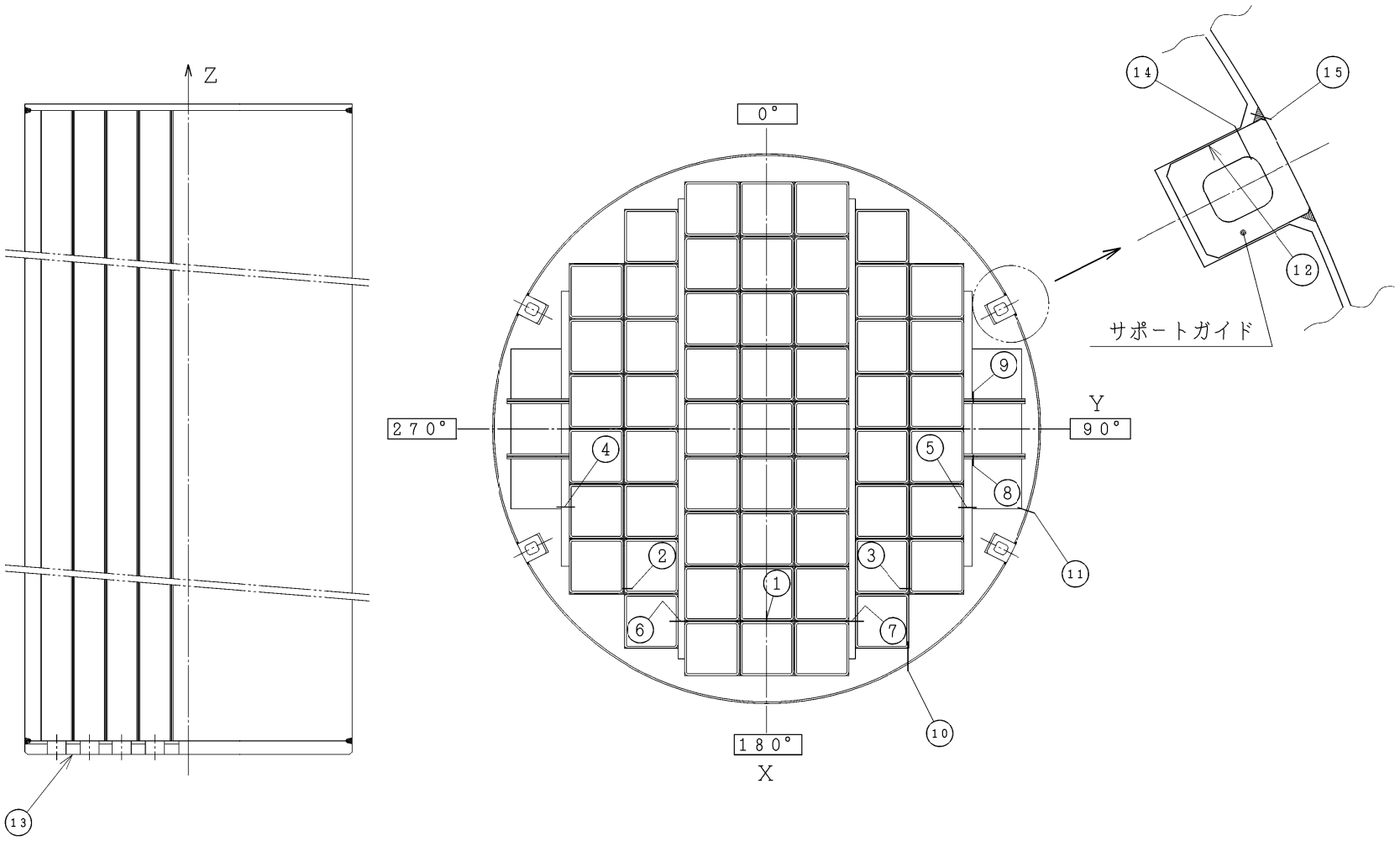
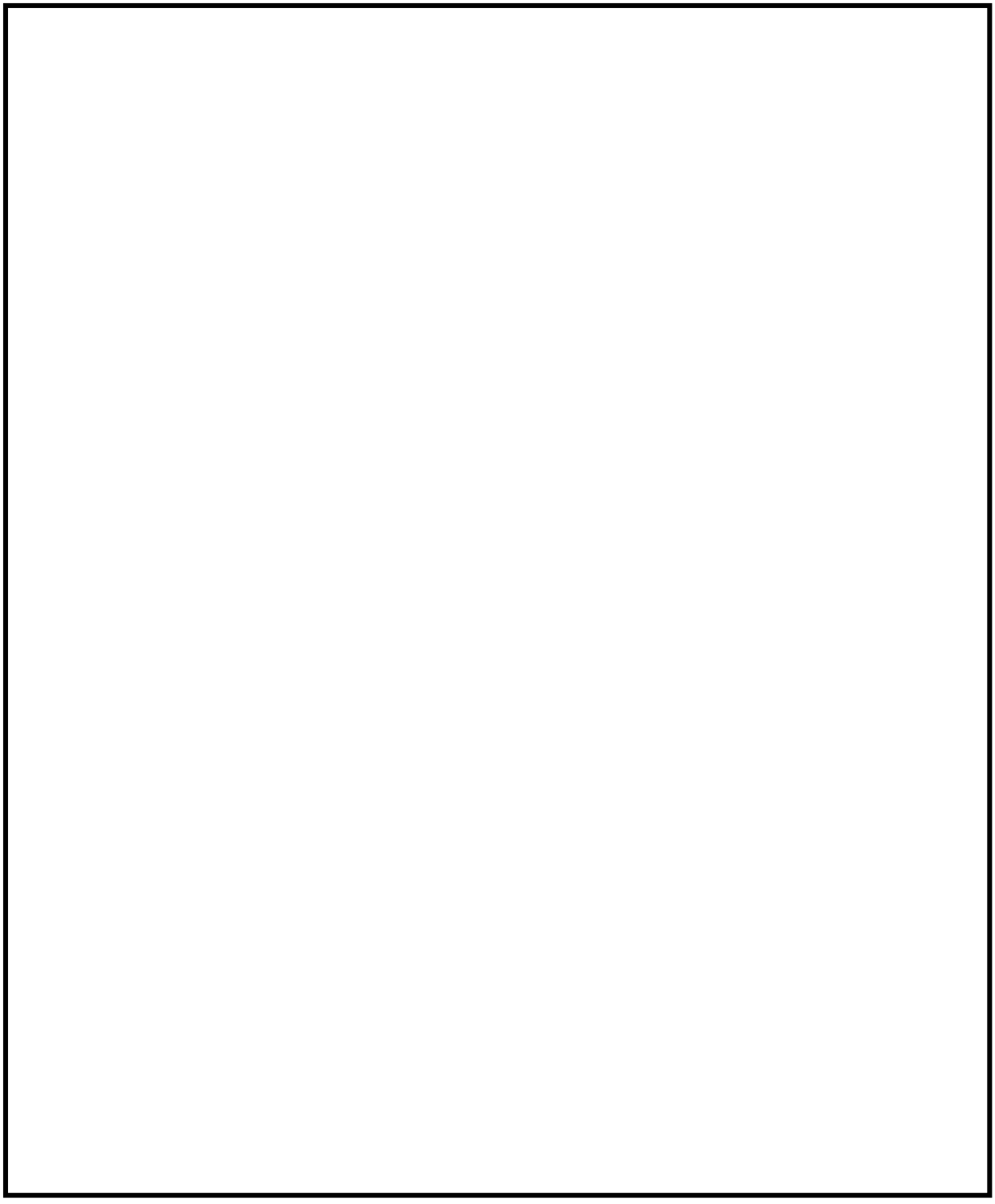


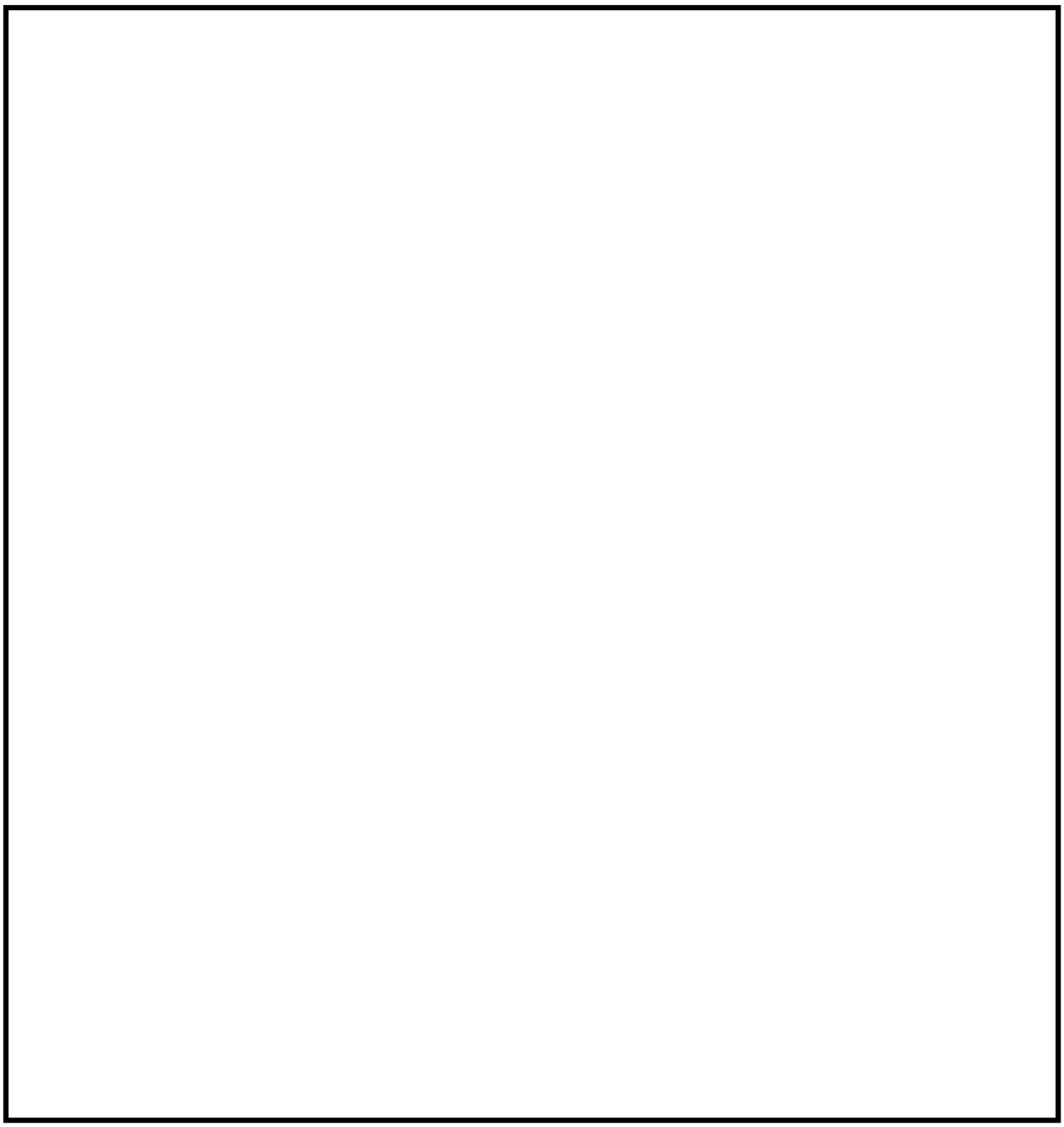
図 3-1　バスケットの応力評価点（面）



（単位：mm）

図 3-2(1) バスケットの解析モデル

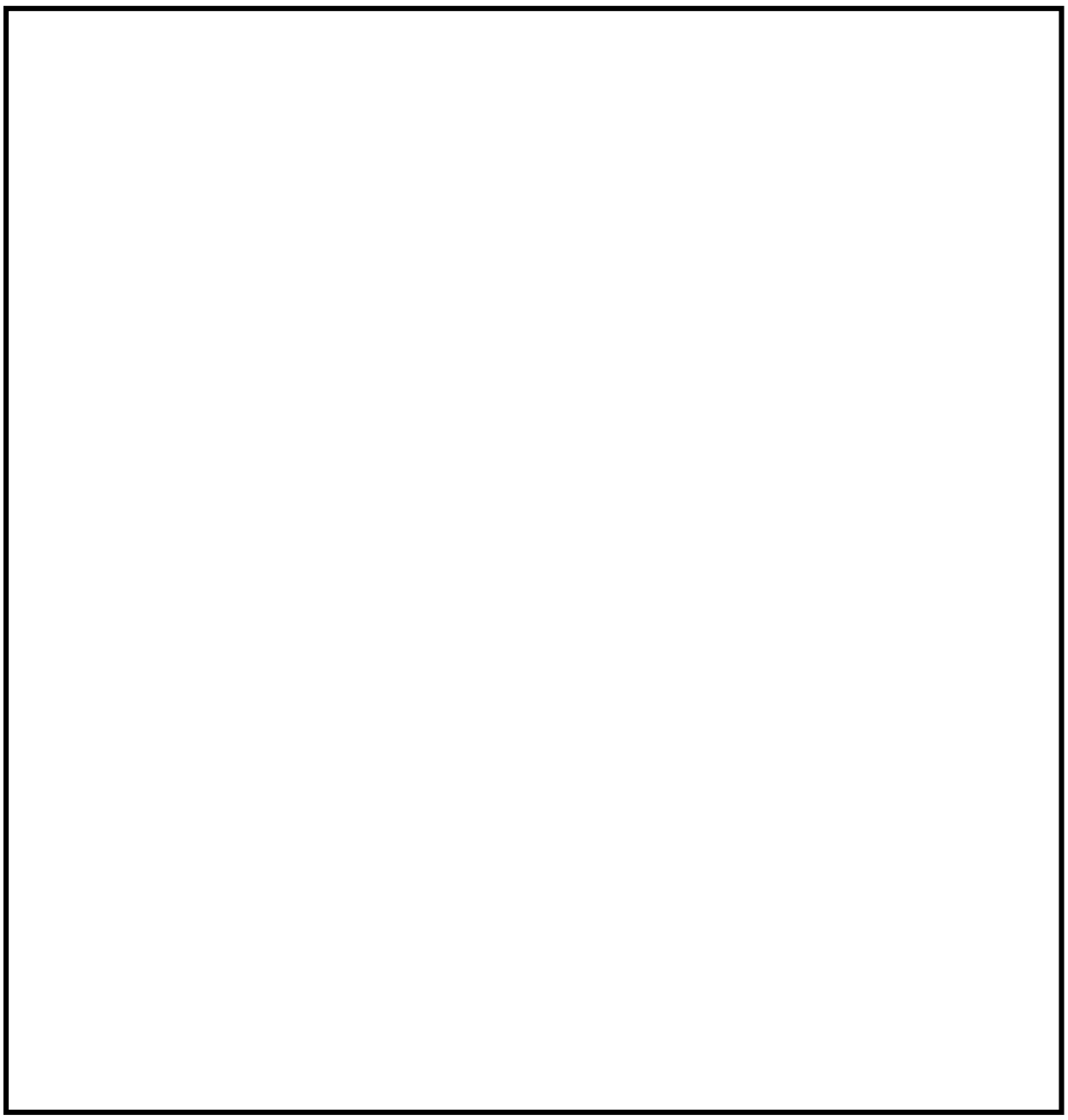
（X方向の加速度が作用する場合）



（単位：mm）

図 3-2(2) バスケットの解析モデル

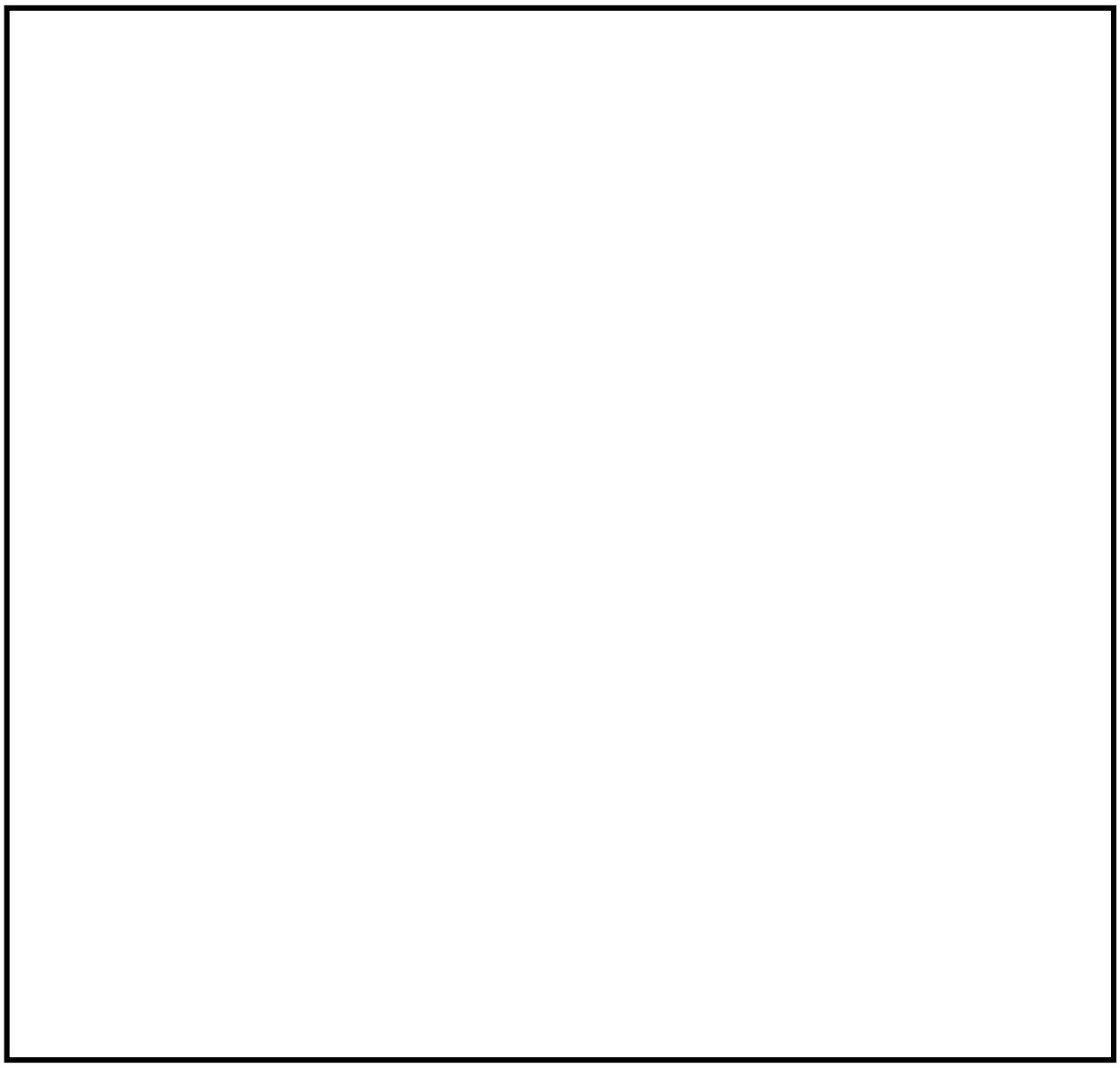
（Y方向の加速度が作用する場合）



（単位：mm）

図 3-2(3)　バスケットの解析モデル

（熱荷重作用時）



（単位：mm）

図 3-3　サポートガイドの解析モデル

表 1-1　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　　位	材　料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次膜＋一次曲げ応力強さ			一次＋二次応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
チャンネル	A5052TD－H34相当	Ⅰ＋S_d^*	1		①	3		①			
		Ⅰ＋S_s	1		①	3		①			
補強板	A5083P－O	Ⅰ＋S_d^*	1		⑤	4		⑥			
		Ⅰ＋S_s	1		⑤	4		⑥			
仕切板	A5083P－O	Ⅰ＋S_d^*	1		⑨	3		⑨			
		Ⅰ＋S_s	1		⑨	3		⑨			
サポートブロック	A5083FH－O	Ⅰ＋S_d^*	3		⑪	6		⑪			
		Ⅰ＋S_s	3		⑪	6		⑪			
サポートガイド	SUS304	Ⅰ＋S_d^*	4	202	⑭	6	303	⑭			
		Ⅰ＋S_s	4	278	⑭	6	418	⑭			

表 2-1　熱伝達率の計算

熱伝達の形式：空気の自然対流による乱流熱伝達

事　象	領域 1)	部　位	形　状	空気温度 (℃)	熱伝導率 2) λ (W/m・K)	ﾌﾟﾗﾝﾄﾙ数 2) Pr (－)	ﾚｰﾚｰ数 3) 4) Ra (－)	熱伝達率 4) h (W/m²・K)
貯蔵時	①	貯蔵容器側面	垂直円筒	45	27.45×10^{-3}	0.719	1.33×10^{10}	$1.48\times\Delta T^{1/3}$
運搬時			水平円筒	38	26.94×10^{-3}	0.718	1.08×10^{9}	$1.16\times\Delta T^{1/3}$

注記　1)：図 3-1 参照

2)：参考文献（１）参照

3)：温度差ΔT=1.0℃に対する値を示す。

4)：レーレー数及び熱伝達率は下記の式を用いて計算する。

$$Ra=\frac{G\cdot\beta\cdot\Delta T\cdot D^{3}\cdot Pr}{\nu^{2}}$$

$$h=0.13\cdot\sqrt[3]{Ra}\cdot\frac{\lambda}{D}\quad\text{（垂直円筒）}\ 5)$$

$$h=0.1\cdot\sqrt[3]{Ra}\cdot\frac{\lambda}{D}\quad\text{（水平円筒）}\ 2)$$

ここで　G　：重力加速度（＝9.81 m/s²）

β　：熱膨張係数（＝１/318　mm/mm℃：貯蔵時）

（＝１/311　mm/mm℃：運搬時）

ΔT　：周囲空気と表面の温度差（℃）

D　：代表長さ（m）

ν　：動粘性係数（$=17.66\times10^{-6}$ m²/s：貯蔵時）

（$=16.95\times10^{-6}$ m²/s：運搬時）

5)：参考文献（５）参照

表 2-2　温度分布計算の評価条件

項　　目	評　価　条　件
対象燃料	高燃焼度８×８燃料 1)
収納体数（体）	61
発 熱 量（kW）	17.1 2)
姿　　勢	縦置き／横置き 3)
周囲温度（℃）	45／38 3)

注記　1)：８×８燃料，新型８×８燃料，新型８×８ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度８×８燃料のうち最も厳しい発熱量となる高燃焼度８×８燃料について行う。

2)：ＯＲＩＧＥＮ２コードにより求めた。

3)：貯蔵時／運搬時における貯蔵容器姿勢及び周囲温度

表 3-1　S_d^*地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果（1/2）

（単位：MPa）

部位	応力分類	評価点（面）	応力成分[1)]						計算値	許容応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
チャンネル	P_m	①							1	
		②							1	
		③							1	
	P_m+P_b	①							3	
		②							2	
		③							3	
	σ_s	－							－	
	σ_p	－							－	
	σ_b	①							1	
補強板①	P_m	④							1	
		⑤							1	
	P_m+P_b	④							2	
		⑤							3	
	σ_s								－	
	σ_p								－	
	σ_b								－	
補強板②	P_m	⑥							1	
		⑦							1	
	P_m+P_b	⑥							4	
		⑦							4	
	σ_s								－	
	σ_p								－	
	σ_b								－	
仕切板	P_m	⑧							1	
		⑨							1	
	P_m+P_b	⑧							2	
		⑨							3	
	σ_s								－	
	σ_p								－	
	σ_b	⑨							1	

注記　1）σ_x：評価断面に垂直な方向の応力

σ_y：評価断面に平行な方向の応力

σ_z：評価断面に平行な方向の応力

τ_{xy}，τ_{yz}，τ_{zx}：評価断面上のせん断応力

表 3-1　S_d^*地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果（2/2）

（単位：MPa）

部位	応力分類	評価点（面）	応力成分[1)]						計算値	許容応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
サポートブロック	P_m	⑩							2	
		⑪							3	
	P_m+P_b	⑩							3	
		⑪							6	
	σ_s	—							—	
	σ_p	⑫							1	
	σ_b	—							—	
サポートガイド	P_m	⑭							4	202
	P_m+P_b	⑭							6	303
	σ_s	—							—	—
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
サポートガイド溶接部	P_m	—							—	—
	P_m+P_b	—							—	—
	σ_s	⑮							2	48
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
底板	P_m	—							—	—
	P_m+P_b	—							—	—
	σ_s	—							—	—
	σ_p	⑬							1	150
	σ_b	—							—	—

注記　1）σ_x：評価断面に垂直な方向の応力

σ_y：評価断面に平行な方向の応力

σ_z：評価断面に平行な方向の応力

τ_{xy}，τ_{yz}，τ_{zx}：評価断面上のせん断応力

表 3-2　Ｓｓ地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果（1/2）

（単位：MPa）

部位	応力分類	評価点（面）	応力成分[1)]						計算値	許容応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
チャンネル	P_m	①							1	
		②							1	
		③							1	
	P_m+P_b	①							3	
		②							2	
		③							3	
	σ_s	－							－	
	σ_p	－							－	
	σ_b	①							1	
補強板①	P_m	④							1	
		⑤							1	
	P_m+P_b	④							2	
		⑤							3	
	σ_s	－							－	
	σ_p	－							－	
	σ_b	－							－	
補強板②	P_m	⑥							1	
		⑦							1	
	P_m+P_b	⑥							4	
		⑦							4	
	σ_s	－							－	
	σ_p	－							－	
	σ_b	－							－	
仕切板	P_m	⑧							1	
		⑨							1	
	P_m+P_b	⑧							2	
		⑨							3	
	σ_s	－							－	
	σ_p	－							－	
	σ_b	⑨							1	

注記　1）σ_x ：評価断面に垂直な方向の応力

σ_y ：評価断面に平行な方向の応力

σ_z ：評価断面に平行な方向の応力

τ_{xy}，τ_{yz}，τ_{zx} ：評価断面上のせん断応力

表 3-2　Ｓｓ地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果（2/2）

（単位：MPa）

部位	応力分類	評価点（面）	応力成分[1)]						計算値	許容応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
サポートブロック	P_m	⑩							2	
		⑪							3	
	P_m+P_b	⑩							3	
		⑪							6	
	σ_s	—							—	
	σ_p	⑫							1	
	σ_b	—							—	
サポートガイド	P_m	⑭							4	278
	P_m+P_b	⑭							6	418
	σ_s	—							—	—
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
サポートガイド溶接部	P_m	—							—	—
	P_m+P_b	—							—	—
	σ_s	⑮							2	64
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
底板	P_m	—							—	—
	P_m+P_b	—							—	—
	σ_s	—							—	—
	σ_p	⑬							1	200
	σ_b	—							—	—

注記　1）σ_x ：評価断面に垂直な方向の応力

σ_y ：評価断面に平行な方向の応力

σ_z ：評価断面に平行な方向の応力

τ_{xy}，τ_{yz}，τ_{zx} ：評価断面上のせん断応力

表 4-1　バスケットの応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
チャンネル	P_m	①	1	
	P_m+P_b	①	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	①	1	
補強板①	P_m	⑤	1	
	P_m+P_b	⑤	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
補強板②	P_m	⑥	1	
	P_m+P_b	⑥	4	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
仕切板	P_m	⑨	1	
	P_m+P_b	⑨	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	⑨	1	
サポートブロック	P_m	⑪	3	
	P_m+P_b	⑪	6	
	σ_s	—	—	
	σ_p	⑫	1	
	σ_b	—	—	
サポートガイド	P_m	⑭	4	202
	P_m+P_b	⑭	6	303
	σ_s	—	—	—
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
サポートガイド 溶　接　部	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	⑮	2	48
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
底　　板	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	—	—	—
	σ_p	⑬	1	150
	σ_b	—	—	—

表 4-2　バスケットの応力評価（貯蔵時：Ｓｓ地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
チャンネル	P_m	①	1	
	P_m+P_b	①	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	①	1	
補強板①	P_m	⑤	1	
	P_m+P_b	⑤	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
補強板②	P_m	⑥	1	
	P_m+P_b	⑥	4	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
仕切板	P_m	⑨	1	
	P_m+P_b	⑨	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	⑨	1	
サポートブロック	P_m	⑪	3	
	P_m+P_b	⑪	6	
	σ_s	—	—	
	σ_p	⑫	1	
	σ_b	—	—	
サポートガイド	P_m	⑭	4	278
	P_m+P_b	⑭	6	418
	σ_s	—	—	—
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
サポートガイド 溶　接　部	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	⑮	2	64
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
底　　板	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	—	—	—
	σ_p	⑬	1	200
	σ_b	—	—	—

補足資料

バスケットの応力解析の方針

目次

1. 概要 ····· 1
2. 適用基準 ····· 2
3. 記号 ····· 3
3.1 記号の説明 ····· 3
4. 設計条件 ····· 5
4.1 基本仕様 ····· 5
4.2 温度分布計算条件 ····· 5
4.3 設計事象 ····· 5
4.4 荷重の種類とその組合せ ····· 5
5. 計算条件 ····· 6
5.1 解析対象とする事象 ····· 6
5.2 解析箇所 ····· 6
5.3 形状及び寸法 ····· 6
5.4 物性値 ····· 6
5.5 許容応力 ····· 7
6. 応力解析の手順 ····· 8
6.1 解析手順の概要 ····· 8
6.2 荷重条件の選定 ····· 8
6.3 温度分布計算 ····· 8
6.3.1 温度分布計算の方法 ····· 8
6.4 応力計算と評価 ····· 9
6.4.1 応力計算の方法 ····· 9
6.4.2 応力評価 ····· 9
6.4.3 数値の丸め方 ····· 10
7. 参考文献 ····· 11

図 表 目 次

図 5-1　バスケットの応力解析箇所 ····· 12
図 6-1　バスケットの応力解析フロー図 ····· 13

表 4-1　使用済燃料の条件 ····· 14
表 4-2　貯蔵容器の設計事象 ····· 15
表 4-3　バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ ····· 15
表 5-1　代表事象 ····· 16
表 5-2　温度分布計算に使用する材料の物性値 ····· 17
表 5-3　温度分布計算に使用するふく射率 ····· 18
表 5-4　熱応力計算に使用する材料の物性値 ····· 18
表 6-1　バスケット用材料の許容応力値 ····· 19
表 6-2　数値の丸め方一覧表 ····· 20

1. 概　　要

本書は，使用済燃料乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は，一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において，バスケットは，貯蔵時において，使用済燃料貯蔵ラックと同様に「発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版(2007年追補版を含む)）JSME S NC1-2005/2007)（日本機械学会　2007年9月)」(以下,「設計・建設規格」という。)の機器等の区分に当てはまらないと考えられるが，使用済燃料集合体を直接支持する部材であるため，炉心支持構造物に準じて設計する。

ここで，設計事象とその許容応力状態は下記のとおりとする。

・設計事象Ⅰ＋S_d^*は，地震力として基準地震動S_sを考慮し，
許容応力状態$Ⅲ_AS$で評価する。

・設計事象Ⅰ＋S_sは，地震力として基準地震動S_sを考慮し，
許容応力状態$Ⅳ_AS$で評価する。

注：本書及び応力計算書において，設計・建設規格の条項は「設計・建設規格○○○－○○○○」として示す。

3. 記　号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において，応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし，本文中に特記ある場合は，この限りでない。

なお，応力計算書の字体及び大きさについては，本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
A	断面積または接触面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
F_X	単位長さあたりのX方向荷重	N／mm
F_Y	単位長さあたりのY方向荷重	N／mm
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
G	重力加速度(=9.80665)	$m／s^2$
G_1	Z方向加速度	$m／s^2$
G_2	X方向加速度	$m／s^2$
G_3	Y方向加速度	$m／s^2$
L	バスケット全長	mm
L_S	サポートガイドの長さ	mm
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_S	基準地震動S_Sにより定まる地震力	—
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
W	質量	kg
Z	断面係数	mm^3
α_H	水平方向設計加速度	$m／s^2$
α_V	鉛直方向設計加速度	$m／s^2$
ρ	密度	$kg／mm^3$
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
σ_b	座屈応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_x	評価断面に垂直な方向の応力(x 方向)	MPa
σ_y	評価断面に平行な方向の応力(y 方向)	MPa
σ_z	評価断面に平行な方向の応力(z 方向)	MPa
τ_{xy}	せん断応力	MPa
τ_{yz}	せん断応力	MPa
τ_{zx}	せん断応力	MPa
Ⅰ＋S_d^*	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用した場合の許容応力区分	―
Ⅰ＋S_S	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_S地震力が作用した場合の許容応力区分	―

4. 設計条件

バスケット及びサポートガイドは，以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度（バスケット）　　：　210 ℃

最高使用温度（サポートガイド）　：　160 ℃

4.2 温度分布計算条件

温度分布計算条件として，使用済燃料乾式貯蔵容器の収納物(使用済燃料)，姿勢及び周囲温度の条件を表 4-1 に示す。

4.3 設計事象

設計上考慮する事象を表 4-2 に示す。

4.4荷重の種類とその組合せ

バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-3 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように，設計事象は I＋S$_d$*及び I ＋S$_s$とし，解析を実施する。

5.2 解析箇所

バスケットの応力解析を行う箇所は次のとおりである(図 5-1 参照)。

(1) チャンネル
(2) サポートブロック
(3) 補強板①
(4) 補強板②
(5) 仕切板
(6) 底板
(7) サポートガイド
(8) サポートガイド溶接部

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

5.4 物性値

温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

(1) 温度分布計算に使用する物性値を表 5-2 及び表 5-3 に示す。
なお，熱伝導率はその温度依存性を考慮する。

(2) 熱応力計算に使用する物性値を表 5-4 に示す。
なお，熱応力計算に使用する物性値はその温度依存性を考慮する。

(3) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は，最高使用温度に対する値を用いる。
なお，常温は 20℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は，次に各号に掲げるとおりとする。

(1) バスケットにあっては，次によること。

a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは，設計・建設規格 CSS-3111(3) の規定を満足すること。

b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは，設計・建設規格 CSS-3111(4) の規定を満足すること。

c. 純せん断荷重を受ける部分にあっては，a.及び b.の規定にかかわらず，平均せん断応力は，次の規定を満足すること。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる場合においては，設計・建設規格 CSS-3114(2)に定める値を超えないこと。

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる場合においては，設計・建設規格 CSS-3114(3)に定める値を超えないこと。

d. 支圧荷重を受ける部分にあっては，平均支圧応力は，次の規定を満足すること。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる場合においては，設計・建設規格 CSS-3115(2)に定める値を超えないこと。

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる場合においては，設計・建設規格 CSS-3115(3)に定める値を超えないこと。

e. 圧縮荷重を受ける部分にあっては，座屈応力は，次の規定を満足すること。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力又はS_s地震力が作用して生じる場合においては，設計・建設規格 SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の 1.5 倍の値を超えないこと。

f. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用してバスケットに塑性変形が生じる場合には，臨界防止評価のため変形量の評価を行う。

g. 溶接部にあっては，設計・建設規格　CSS-3150 に規定される継手効率を考慮すること。

(2) (1)において，設計・建設規格の「供用状態Ａ」及び「供用状態Ｂ」は，それぞれ「設計事象Ⅰ」及び「設計事象Ⅱ」と読み替える。

許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

バスケット及びサポートガイドの応力解析フローを図 6-1 に示す。

バスケット及びサポートガイドの応力解析は，想定される機械的荷重及び熱荷重を基にバスケット及びサポートガイドの実形状をモデル化し，汎用解析コードであるＡＢＡＱＵＳ及び応力評価式を用いて行う。

ＡＢＡＱＵＳとは，有限要素法に基づく，伝熱解析，応力解析等の汎用解析コードである。温度分布計算及び応力計算は，解析しようとする箇所を形状，材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し，各メッシュについて計算を実施することによって行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4.項に示されているが，各部の計算においては，その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 温度分布計算

6.3.1 温度分布計算の方法

(1) 計算を行う設計事象は，貯蔵容器姿勢が縦置きの貯蔵時及び横置きの運搬時とする。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

ａ．チャンネル，中性子吸収板，補強板，仕切板，サポートブロック，内胴，ガンマ線遮へい体，中間胴，中性子遮へい体，伝熱フィン及び外筒は形状の対称性を考慮し，二次元 1/4 断面モデルとする。

なお，使用済燃料はチャンネル内面に伝わる熱流束の対称性を考慮し集合体毎に均質化してこの領域の発熱量をチャンネル内面に与える。

ｂ．形状及び材料の不連続性を考慮して，温度計算のためのメッシュ分割を行う。

ｃ．バスケット各部の温度差が最も大きくなる貯蔵容器中央部の半径方向断面についてモデル化し，軸方向の熱の流れはないと仮定する。

ｄ．外表面からの放熱は自然対流及びふく射とする。

ｅ．モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

なお，境界には計算で求めた熱伝達率を考慮する。

(3) 計算機コードを用いて，温度分布を計算する。

(4) 温度分布の計算結果を応力計算書に示す。

6.4 応力計算と評価

6.4.1　応力計算の方法

(1) 応力計算は代表事象毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の２つである。

a．機械的荷重

自重（燃料集合体を含む貯蔵容器の貯蔵時の設計重量を用いる。），衝撃荷重及びその他の負荷荷重をいう。

b．熱荷重

バスケットに生じる温度変化，温度勾配による荷重であって，温度分布計算の結果から得られるものをいう。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

a．モデル化にあたっては，バスケットの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮し，1/2 形状の２次元平面固体要素及びはり要素による解析モデルとする。ただし，熱荷重に対しては，対称性を考慮し，1/4 形状の解析モデルとする。

b．中性子吸収板は非構造強度部材としてモデルより除外する。

(3) 構造の不連続性を考慮して，応力評価点(面)をとる。評価点(面)は，計算書に示す。

応力評価は，この応力評価点(面)について行う。

6.4.2　応力評価

応力の計算結果は，設計・建設規格　GNR-2130 による定義に従い，応力の種類毎に分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ_x　：評価断面に垂直な方向の応力（x 方向）

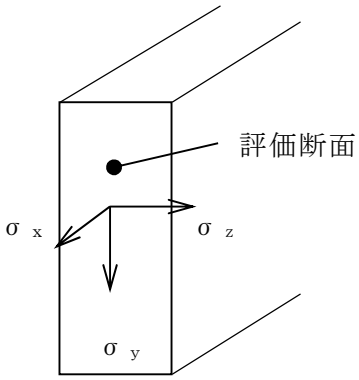
σ_y　：評価断面に平行な方向の応力（y 方向）

σ_z　：評価断面に平行な方向の応力（z 方向）

τ_{xy}：せん断応力

τ_{yz}：せん断応力

τ_{zx}：せん断応力



バスケット用材料の許容応力値を表 6-1 に示す。

(1) バスケット及びサポートガイドの応力評価

バスケット及びサポートガイドの応力評価は，設計・建設規格 CSS-3110 及び SSB-3120 に従い以下の項目を実施する。

a．一次応力強さ

b．特別な応力の検討

(a) 純せん断応力の評価

(b) 支圧応力の評価

(c) 座屈応力の評価

6.4.3 数値の丸め方

数値は，原則として四捨五入とする。また，評価に用いる許容応力及び算出応力等については，安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-2 に示す。

7. 参考文献

文献番号は，本書及び応力計算書において共通である。

（１） 伝熱工学資料　第４版，日本機械学会（1986）

（２） 伝熱工学資料　第３版，日本機械学会（1975）

（３） 機械工学便覧　新版，日本機械学会（1987）

（４）

（５） McAdams, W.H., ”Heat Transmission”, Third Edition McGraw Hill.

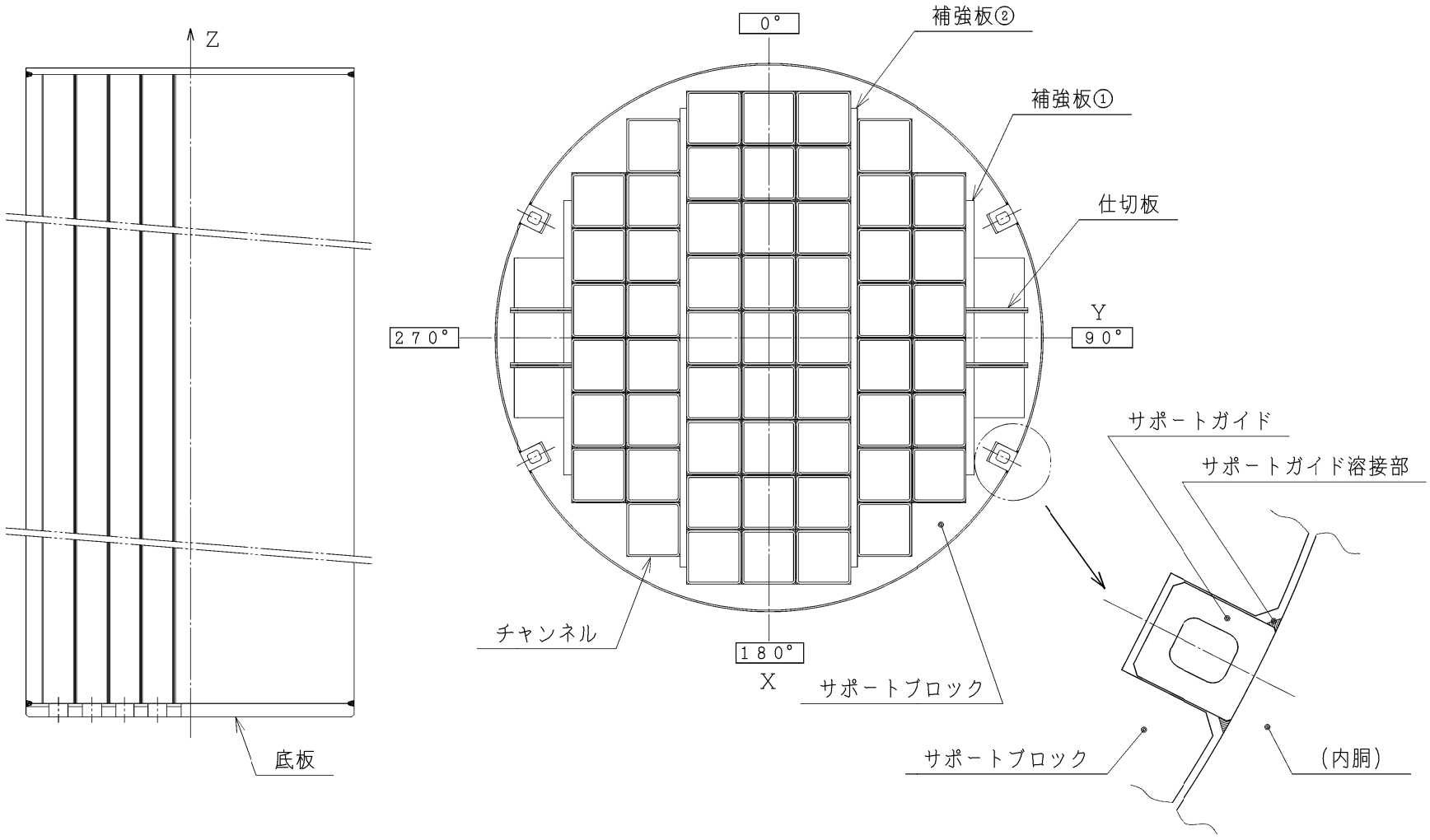


図 5-1　バスケットの応力解析箇所

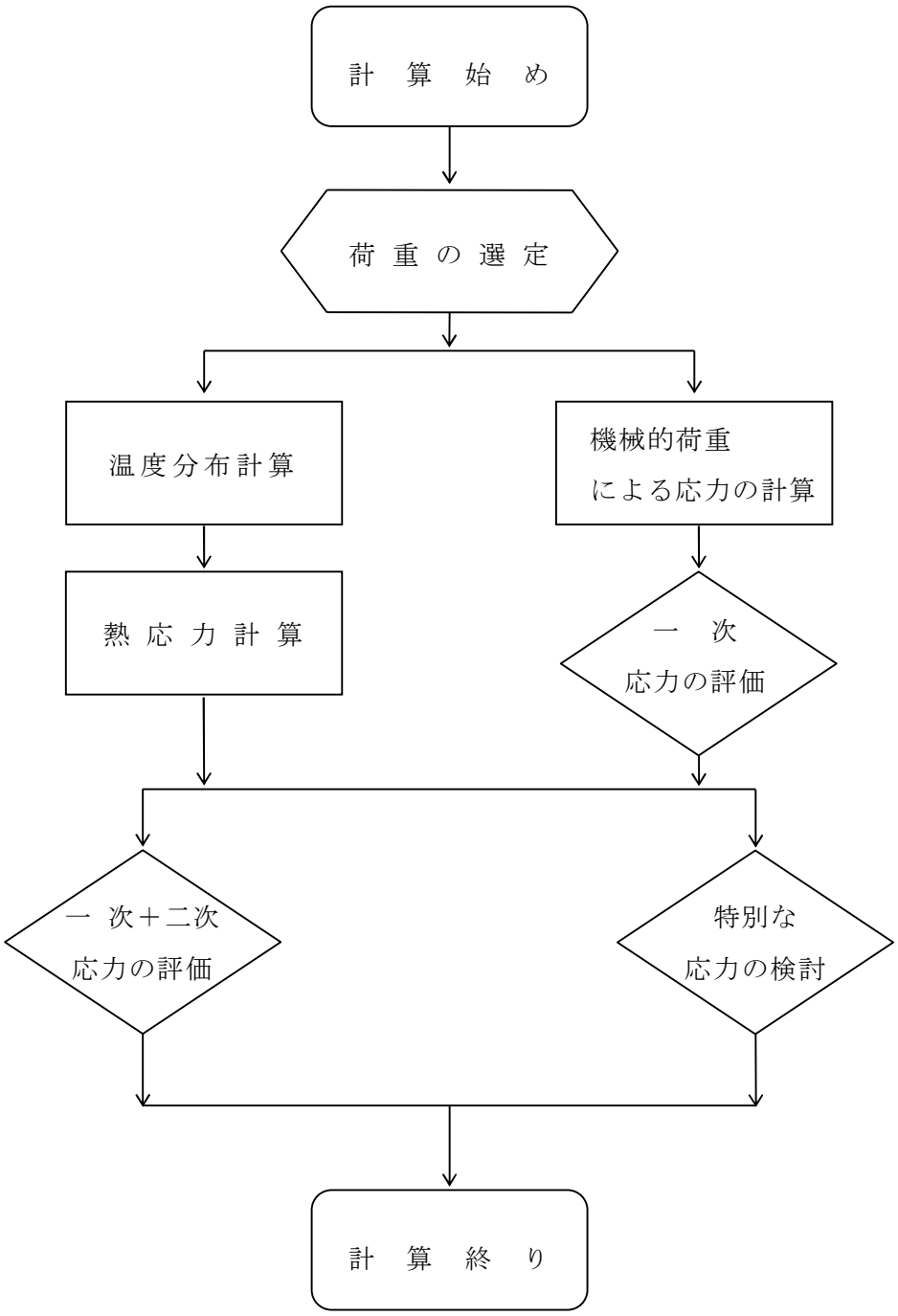


図 6-1　バスケットの応力解析フロー図

表 4-1　使用済燃料の条件

項　目	燃料条件
対象燃料	高燃焼度８×８燃料 [1)]
貯蔵容器１基当たりの収納体数(体)	61
貯蔵容器１基当たりの発熱量(kW)	17.1 [2)]
姿勢	縦置き／横置き [3)]
周囲温度(℃)	45／38 [3)]

注記 1)：８×８燃料，新型８×８燃料，新型８×８ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度８×８燃料のうち最も厳しい発熱量となる高燃焼度８×８燃料について行う。

2)：ＯＲＩＧＥＮ２コードにより求めた。

3)：貯蔵時／運搬時における貯蔵容器姿勢及び周囲温度

表 4-2　貯蔵容器の設計事象

設計事象	定　　義	解　　説	事象の例	選定事象
I	貯蔵容器の通常の取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬	・貯蔵

表 4-3　バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷重 / 設計事象	荷重時	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重 異常着床・支持構造物への衝突	熱荷重	備考
I	貯　蔵　時	○				○	(1)

(1) S_d^*地震力及びS_s地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1　代　表　事　象

設計事象	代表事象 1)	包絡される事象	荷重条件	備　　考
Ⅰ＋S_d^*	貯　蔵　時 （S_d^*地震力が作用する場合）	―――	自　重:1G(=9.81m/s^2) 地震力 水平方向: C_HG=1.17G(=11.48m/s^2) 鉛直方向: C_VG=0.65G(= 6.38m/s^2) 熱荷重	―――
Ⅰ＋S_S	貯　蔵　時 （S_S地震力が作用する場合）	―――	自　重:1G(=9.81m/s^2) 地震力 水平方向: C_HG=1.17G(=11.48m/s^2) 鉛直方向: C_VG=0.65G(= 6.38m/s^2) 熱荷重	―――

注記 1)：本事象について応力解析を行う。

表 5-2　温度分布計算に使用する材料の物性値

構　成　部　材	材　　料	温　度 (℃)	熱伝導率 1) (W／m・K)
内　　胴 中　間　胴 外　　筒	ステンレス鋼 (SUS304 又は SUSF304)	27 127 327	16.0 16.5 19.0
ガンマ線遮へい体	鉛	27	35.2
中性子遮へい体	レジン	－	
伝熱フィン	銅 (C1020)	27 327	398 383
チャンネル	アルミニウム合金 (A5052TD-H34 相当)	20 50 100 150 200 250	
補強板 仕切板 サポートブロック 底板	アルミニウム合金 (A5083FH－0 又は A5083P－0)	20 50 100 150 200 250	
中性子吸収板	ボロン添加アルミニウム合金及びアルミニウム合金	20 100 200	
内部気体	ヘリウム	27 127 227 327	0.1527 0.1882 0.2212 0.2523
周囲気体	空気	27 127 227 327	0.02614 0.03305 0.03951 0.0456

注記　1)：参考文献（１）参照。ただし，レジンは参考文献（４）参照。

表 5-3　温度分布計算に使用するふく射率

構 成 部 材	材　　料	ふ　く　射　率 [1)]
外　　筒 内　　胴 中　間　胴	ステンレス鋼 (SUS304 又は SUSF304)	0.15
ガンマ線遮へい体	鉛	0.28
チャンネル，補強板，仕切板，サポートブロック，底板	アルミニウム合金 (A5052TD-H34， A5083FH-0 又は A5083P-0)	0.04

注記　1)：参考文献（２）参照。

表 5-4　熱応力計算に使用する材料の物性値

構成部材	材　　料	温　度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm℃)	ポアソン比 (－)
チャンネル	アルミニウム合金 (A5052TD -H34)	20 50 100 150 200 250			
サポートブロック 補　強　板 仕　切　板 底　板	アルミニウム合金 (A5083FH-0 又は A5083P-0)	20 50 100 150 200 250			
サポートガイド	ステンレス鋼 (SUS304)	20 50 75 100 125 150 175 200	195000 193000 191000 190000 188000 186000 184000 183000	15.21 15.49 15.68 15.87 16.05 16.21 16.37 16.52	0.3

表 6-1　バスケット用材料の許容応力値

許容応力区分	応力の種類	許容応力値（MPa）				
		アルミニウム合金[2]			ｵｰｽﾃﾅｲﾄ系ｽﾃﾝﾚｽ鋼	
		A5052TD -H34	A5083FH-O[2] 及び A5083P-O	許容値 基準	SUS304[2]	許容値 基準
設計事象 Ⅰ＋S_d^*	一次一般膜応力強さ P_m			1.5 S_m	202	1.5 S_m
	一次膜＋一次曲げ応力強さ P_m+P_b			2.25 S_m	303	2.25 S_m
	純せん断応力 σ_s			0.9 S_m	121	0.9 S_m
	支圧応力 σ_p[1]			1.5 S_y (2.25 S_y)	228 (342)	1.5 S_y (2.25 S_y)
	座屈応力 σ_b			$1.5f_b$, $1.5f_s$ 又は 1.5 f_c	117	$1.5f_b$, $1.5f_s$ 又は 1.5 f_c
設計事象 Ⅰ＋S_s	一次一般膜応力強さ P_m			2/3 S_u	278	Min{2.4S_m, 2/3S_u}
	一次膜＋一次曲げ応力強さ P_m+P_b			S_u	418	Min{3.6S_m, S_u}
	純せん断応力 σ_s			1.2 S_m	162	1.2 S_m
	支圧応力 σ_p[1]			2 S_y (3 S_y)	304 (456)	2 S_y (3 S_y)
	座屈応力 σ_b			$1.5f_b$, $1.5f_s$ 又は 1.5 f_c	117	$1.5f_b$, $1.5f_s$ 又は 1.5 f_c

注記　1)：(　　)内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

2)：サポートブロック内の周溶接は完全溶込み溶接とし，設計・建設規格 CSS-3150 に定められる検査の種類を A とするため，溶接効率は 1.0 である。また，サポートガイドと内胴との溶接は片側すみ肉溶接とし，設計・建設規格 CSS-3150 に定められる検査の種類を E とするため，溶接効率は 0.4 である。

表 6-2　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単　位	処　理　桁	処　理　法	表示最小桁
最高使用温度	℃	－	－	設　計　値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切　捨　て	整 数 値 位
計算応力値 1)	MPa	小数点以下第 1 位	切　上　げ	整 数 値 位
長　　さ	mm	－	－	設　計　値
設 計 震 度	－	小数点以下第 3 位	切　上　げ	小数点以下第 2 位
面　　積	mm^2	有効数字 4 桁目	安全側に処理する	有効数字 3 桁
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
角　　度	°	－	－	設　計　値
質　　量	kg	－	－	設　計　値

注記　1)：応力成分は，小数点以下第 2 位を四捨五入し，小数点以下第 1 位までの値を記載する。

Ⅴ-2-4-2-3 ④トラニオンの応力計算書

目次

1. 概要 ····· 1
1.1 形状・寸法・材料 ····· 1
1.2 計算結果の概要 ····· 1
2. 応力計算 ····· 2
2.1 応力評価点 ····· 2
2.2 貯蔵時（S_d^*及びS_s地震力が作用する場合） ····· 2
2.2.1 荷重条件 ····· 2
2.2.2 計算方法 ····· 2
2.2.3 計算結果 ····· 3
3. 応力の評価 ····· 4
3.1 一次応力の評価 ····· 4
3.2 一次＋二次応力の評価 ····· 4
3.3 組合せ応力の評価 ····· 4

補足資料 トラニオンの応力解析の方針

図表目次

図 1-1　形状・寸法・材料・応力評価点（面） ····· 5
図 2-1　地震時に作用する荷重の計算モデル ····· 6

表 1-1　計算結果の概要 ····· 7
表 2-1　トラニオンの応力評価
（貯蔵時：　S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合） ····· 8

1. 概要

本計算書は，使用済燃料乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，応力評価上厳しくなる代表的な評価点(面)を本計算書に記載している。

表中の「－」は，評価すべき応力が発生しない又は評価上厳しくないため評価を省略している。以下，本計算書において同様である。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

トラニオンの応力評価点(面)を図 1-1 に示す。

2.2 貯蔵時（S_d^*及びS_s地震力が作用する場合）

2.2.1 荷重条件

貯蔵時においてS_d^*及びS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重＋熱荷重

2.2.2 計算方法

(1) 一次応力

a. せん断応力

最大応力が発生する箇所は，図 1-1 に示す下部トラニオンの評価点①である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力(τ)は，次式で表わされる(図 2-1 参照)。

$$\left.\begin{aligned}\tau &= \frac{F_W}{A} \\ F_W &= \frac{W \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_3 \cdot a_2)}{\frac{2a_2^{\,2}}{a_1} + a_1}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 1)$$

ここで，$G_1 = \alpha_H$，$G_3 = 9.81 - \alpha_V$

h_{CG} ：貯蔵容器底面から重心までの高さ（＝2870mm）

a_1 ：支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離（＝2077.5mm）

a_2 ：支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離（＝949.5mm）

F_W ：地震力によりトラニオンに作用する荷重（$=1.19\times10^6$N）

W ：貯蔵容器の質量(=118000 kg)

A ：図 1-1 の評価点①の断面積($=1.75\times10^4$ mm^2)

α_H ：水平方向設計加速度($=C_HG=11.48$m/s^2)

α_V ：鉛直方向設計加速度($=C_VG=6.38$m/s^2)

b. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は，図 1-1 に示す下部トラニオンの評価点④である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力(σ_b)は，次式で表わされる。

$$\sigma_b = \frac{F_W \cdot L}{Z} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 2)$$

ここで，F_W ：（2．1）式と同じ

Z ：図 1-1 の評価点④の断面係数(=1.04×10^6 ㎜^{3})

L ：図 1-1 の評価点④と荷重作用位置との距離(=184.5 ㎜)

c．支圧応力

応力が発生する箇所は，図 1-1 の下部トラニオンの評価点⑤である。トラニオン固定金具によって生じる支圧応力は（σ_p）は，次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{F_w}{A_5} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 3)$$

ここで，

F_W ：（2．1）式と同じ

A_5 ：評価点⑤に接触するトラニオン固定金具の投影面積（＝1.94×10^3 ㎜^{2}）

d．組合せ応力

せん断応力（τ）と曲げ応力（σ_b）との組合せ応力（σ_T）は，次式で表される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b{}^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 4)$$

ここで，

σ_b ：（2．2）式と同じ

τ ：（2．1）式と同じ

(2) 一次＋二次応力

a. せん断応力

せん断応力の全振幅(τ)は，（2．1）式と同様に与えられる。

b. 曲げ応力

曲げ応力の全振幅(σ_b)は，（2．2）式と同様に与えられる。

c．支圧応力

支圧応力の全振幅（σ_p）は，（2．3）式と同様に与えられる。

d．組合せ応力

せん断応力（τ）と曲げ応力（σ_b）との組合せ応力（σ_T）は，（2．4）式と同様に与えられる。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より，各設計事象の一次応力は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

3.2 一次＋二次応力の評価

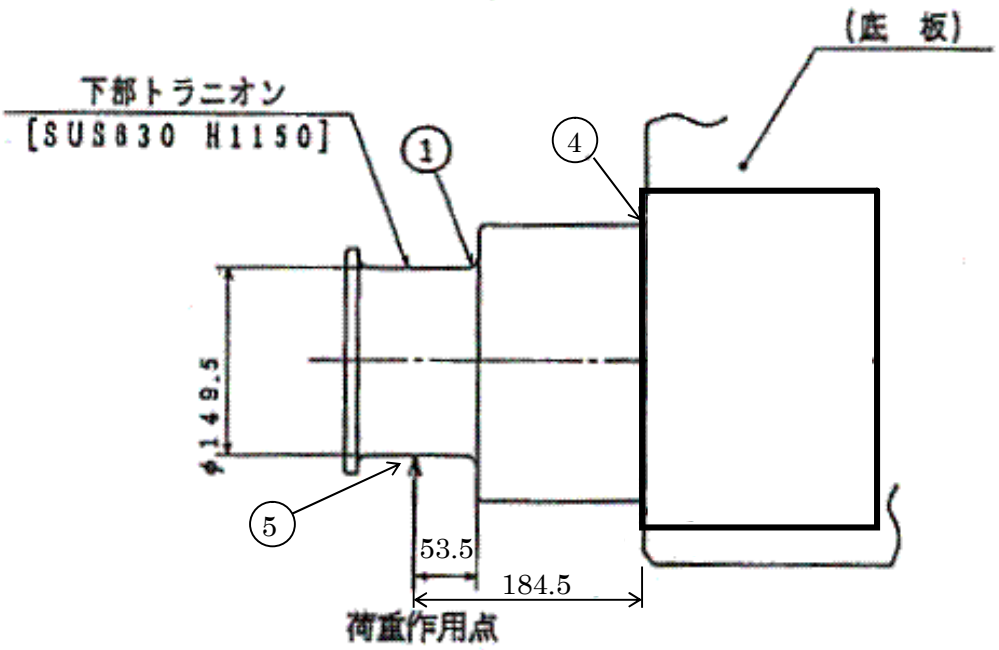
各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より，各設計事象の一次＋二次応力は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

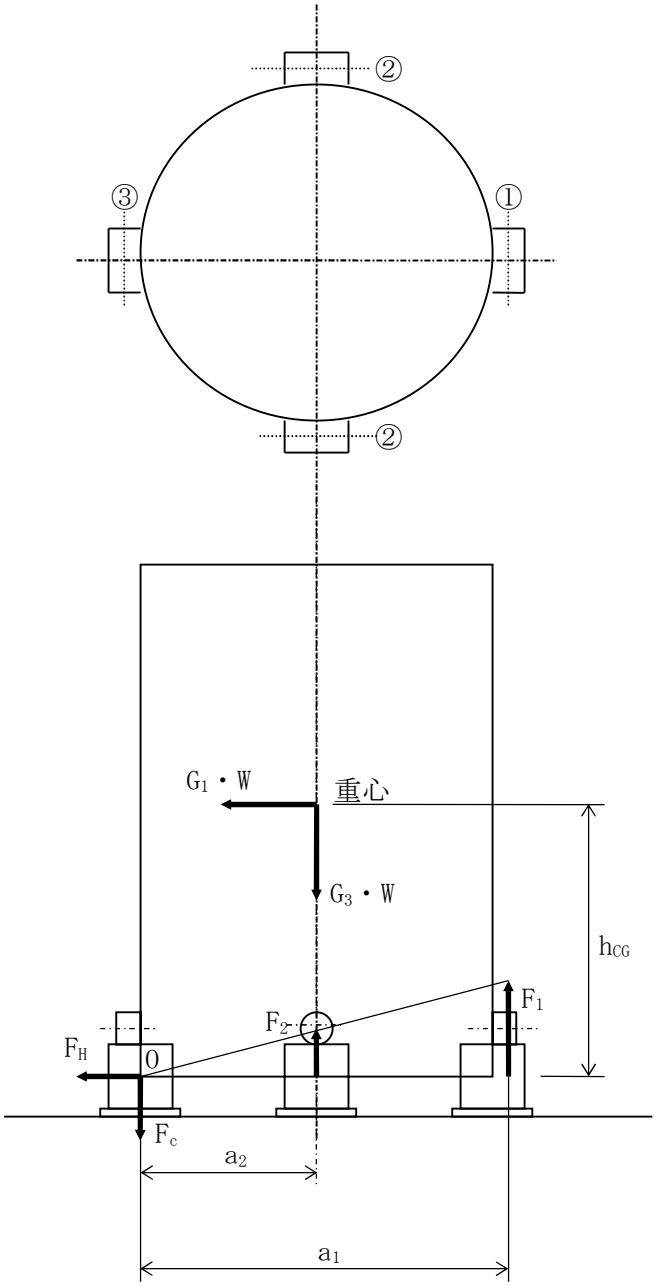
各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より，地震時における組合せ応力は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。



下部トラニオン

図 1-1　形状・寸法・材料・応力評価点（面）



①　～③：支持台番号

図 2-1 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1-1　計算結果の概要

（単位：MPa）

部 位	材 料	設 計 事 象	一次応力									
			せん断応力		曲げ応力		支圧応力		圧縮応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	SUS630 H1150	$I+S_d^*$	68	339	212	588	614	801	－	－	243	588
		$I+S_S$	68	339	212	588	614	801	－	－	243	588

注１：各設計事象において，既存設備により荷重作用点がずれた場合でも評価結果は許容応力を満足する。また，一次＋二次応力の計算値は一次応力と等しく，許容応力は大きくなるため問題ない。

（単位：MPa）

部位	材 料	設 計 事 象	一次応力+二次応力									
			せん断応力		曲げ応力		支圧応力		座屈応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	SUS630 H1150	$I+S_d^*$	68	678	212	1176	614	801	－	－	243	1176
		$I+S_S$	68	678	212	1176	614	801	－	－	243	1176

表 2-1　トラニオンの応力評価（貯蔵時：S_d^* 地震力及びS_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類		S_d^* 地震力		S_s地震力		許容応力
			計算値	評価点（面）	計算値	評価点（面）	
下部トラニオン	一次応力	せん断応力	68	①	68	①	339
		曲げ応力	212	④	212	④	588
		支圧応力	614	⑤	614	⑤	801
		組合せ応力	243	④	243	④	588
	一次＋二次応力[1)]	せん断応力	68	①	68	①	678
		曲げ応力	212	④	212	④	1176
		支圧応力	614	⑤	614	⑤	801
		組合せ応力	243	④	243	④	1176

注記　1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

補足資料

トラニオンの応力解析の方針

目次

1. 概要 ····· 1
2. 適用基準 ····· 2
3. 記号 ····· 3
3.1 記号の説明 ····· 3
4. 設計条件 ····· 5
4.1 基本仕様 ····· 5
4.2 設計事象 ····· 5
4.3 荷重の種類とその組合せ ····· 5
5. 計算条件 ····· 6
5.1 解析対象とする事象 ····· 6
5.2 解析箇所 ····· 6
5.3 形状及び寸法 ····· 6
5.4 物性値 ····· 6
5.5 許容応力 ····· 6
6. 応力解析の手順 ····· 8
6.1 解析手順の概要 ····· 8
6.2 荷重条件の選定 ····· 8
6.3 応力計算と評価 ····· 8
6.3.1 応力計算の方法 ····· 8
6.3.2 応力評価 ····· 8
6.3.3 数値の丸め方 ····· 9

図表目次

図 5-1　トラニオンの応力解析箇所 ····· 10
図 6-1　トラニオンの応力解析フロー図 ····· 11

表 4-1　貯蔵容器の設計事象 ····· 12
表 4-2　トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ ····· 12
表 5-1　代表事象 ····· 13
表 5-2　熱応力計算に使用する材料の物性値 ····· 13
表 6-1　トラニオン用材料の許容応力値 ····· 14
表 6-2　数値の丸め方一覧表 ····· 15

1. 概　　要

本書は，使用済燃料乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は，一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において，トラニオンは，貯蔵容器の取扱時及び貯蔵時の支持のための部品であり，貯蔵容器全体を支持する。したがって，キャスク容器の評価方法と整合をとり，「発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版(2007 年追補版を含む)）JSME S NC1-2005/2007）（日本機械学会　2007 年 9 月)」(以下，「設計・建設規格」という。）のクラス 1 支持構造物に従って設計する。

ここで，設計事象とその許容応力状態は下記のとおりとする。

・設計事象Ⅰ＋S_d^*は，地震力として基準地震動S_sを考慮し，許容応力状態を$Ⅲ_AS$で評価する。

・設計事象Ⅰ＋S_sは，地震力として基準地震動S_sを考慮し，許容応力状態を$Ⅳ_AS$で評価する。

注：本書及び応力計算書において，設計・建設規格の条項は「設計・建設規格○○○－○○○○」として示す。

3. 記　号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において，応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし，本文中に特記ある場合は，この限りでない。

なお，応力計算書の字体及び大きさについては，本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
A	断面積	mm^2
a_1	地震時の貯蔵容器回転支点Ｏから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a_2	地震時の貯蔵容器回転支点Ｏから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離	mm
C_H	水平方向設計震度	―
C_V	鉛直方向設計震度	―
F_W	トラニオンに作用する荷重	N
G	重力加速度(=9.80665)	$m／s^2$
f_t	許容引張応力	MPa
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
f_p	許容支圧応力	MPa
$f_t^{*\ 1)}$	許容引張応力	MPa
$f_s^{*\ 1)}$	許容せん断応力	MPa
$f_c^{*\ 1)}$	許容圧縮応力	MPa
$f_b^{*\ 1)}$	許容曲げ応力	MPa
$f_p^{*\ 1)}$	許容支圧応力	MPa
G_1	貯蔵容器軸に直角方向の加速度	$m／s^2$
G_3	貯蔵容器軸方向の加速度	$m／s^2$
h_{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm
L	荷重位置と評価点との距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
S_d^*	弾性設計用地震動Ｓ$_d$による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	―

注記　1)：f_t^*，f_s^*，f_c^*，f_b^*，f_p^*：f_t，f_s，f_c，f_b，f_pの値を算出する際に設計・建設規格SSB-3121.1(1)における「付録材料図表　Part5　表８に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表　Part5　表８に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」と読み替えて算出した値。

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
S_S	基準地震動S_Sにより定まる地震力	—
W	質量	kg
Z	断面係数	mm^3
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	曲げ応力	MPa
$_c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
$_t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s^2
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s^2
$I+S_d^*$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I+S_S$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_S地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

トラニオンは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度：160 ℃

注：トラニオンはキャスク容器に取り付けられており一体であることから，トラニオンの最高使用温度は，キャスク容器と同じ 160℃とする。

4.2 設計事象

設計上考慮する事象を表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

設計事象Ⅰにおける事象のうち，表 5-1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し，代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

トラニオンの応力解析を行う箇所は，次のとおりである(図 5-1 参照)。

(1) トラニオン

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

5.4 物性値

温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

(1) 熱応力計算に使用する物性値を表 5-2 に示す。

(2) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は，最高使用温度（160℃）に対する値を用いる。

なお，常温は 20℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は，次の各号に掲げるとおりとする。

(1) トラニオンにあっては，次によること。

a．設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^* 地震力が作用して生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.2 の規定を満足すること。

b．設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s 地震力が作用して生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.3 の規定を満足すること。

c．設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^* 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は，次の値を超えないこと。

(a) 引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし，圧縮応力の符号は負として計算する。）については，設計・建設規格　SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。

(b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。

(c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。

(d) 支圧応力については，設計・建設規格　SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。

(e) 座屈応力については，設計・建設規格　SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める

値の 1.5 倍を超えないこと。

d．設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，Ｓs地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は，次の規定を満足すること。

(a) 引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし，圧縮応力の符号は負として計算する。）については，設計・建設規格　SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。

(b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。

(c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。

(d) 支圧応力については，設計・建設規格　SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。この場合において，設計・建設規格　SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのは，「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」に読み替えるものとする。

(e) 座屈応力については，設計・建設規格　SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の 1.5 倍を超えないこと。

e．ｃ.及びｄ.において応力の組合せが考えられる場合は，組合せ応力に対する評価は設計・建設規格　SSB-3121.1(6)の規定による。

(2) (1)において，設計・建設規格の「供用状態Ａ」及び「供用状態Ｂ」は，それぞれ「設計事象Ⅰ」及び「設計事象Ⅱ」と読み替える。

許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

トラニオンの応力解析フローを図 6-1 に示す。

トラニオンの応力解析は，想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4.項に示されているが，各部の計算においては，その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の２つである。

a．機械的荷重

b．熱荷重

(2) 貯蔵時においては，地震力が作用する場合の鉛直方向及び水平方向荷重は，下部トラニオン４個で支持する。

なお，荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

(3) 構造の不連続性を考慮して，応力評価点（面）をとる。評価点（面）は，応力計算書に示す。

応力評価は，この応力評価点（面）について行う。

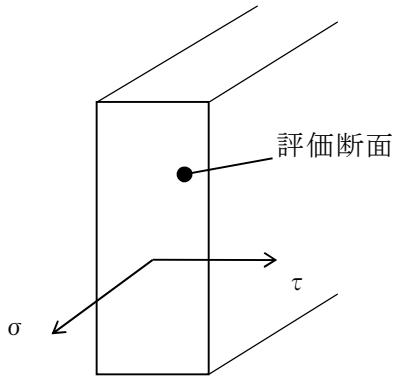
6.3.2 応力評価

応力の計算結果は，設計・建設規格　GNR-2130 による定義に従い，応力の種類毎に分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ ：評価断面に垂直な方向の応力

τ ：せん断応力



トラニオン用材料の許容応力値を表 6-1 に示す。

(1) トラニオンの応力評価

トラニオンの応力評価は，設計・建設規格　SSB-3120 に従い以下の項目を実施する。

a. 一次応力

b. 一次＋二次応力

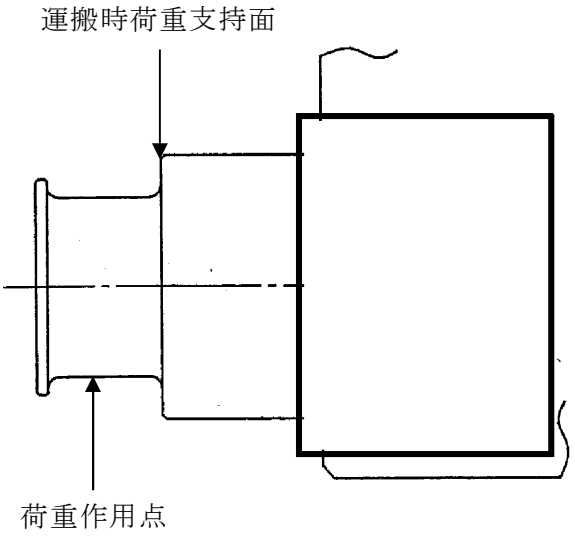
c. 組合せ応力

6.3.3　数値の丸め方

数値は，原則として四捨五入とする。また，評価に用いる許容応力及び算出応力等については，安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めず，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-2 に示す。



下部トラニオン

注記）貯蔵時に地震力が作用する場合は，下部トラニオンのみで荷重を支持する。

図 5-1　トラニオンの応力解析箇所

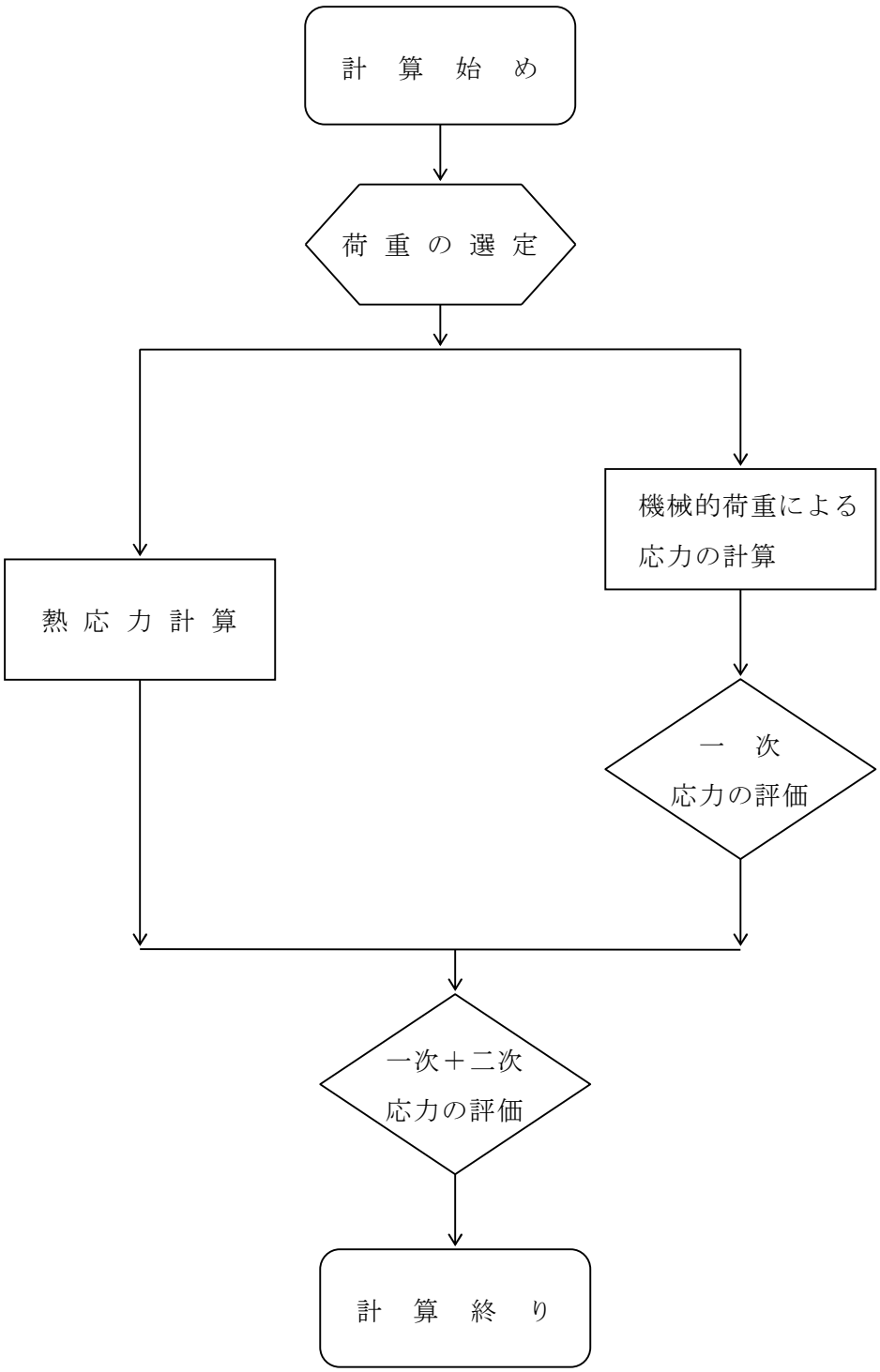


図 6-1　トラニオンの応力解析フロー図

表 4-1　貯蔵容器の設計事象

設計事象	定　　義	解　　説	事象の例	選定事象
I	貯蔵容器の通常の取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬	・貯蔵

表 4-2　トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷重 / 設計事象	荷重時	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重（異常着床・支持構造物への衝突）	熱荷重(1)	備考
I	貯　蔵　時	○				○	(2)

(1) キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。

(2) S_d^* 地震力及び S_s 地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1　代　表　事　象

設計事象	代表事象 1)	包絡される事象	荷重条件	備　　考
Ⅰ＋S_d^*	貯　蔵　時 （S_d^* 地震力が作用する場合）	――――	自　重:1G(=9.81m/s^2) 地震力 水平方向: C_HG=1.17G(=11.48m/s^2) 鉛直方向: C_VG=0.65G(= 6.38m/s^2) 熱荷重	許容応力状態 ⅢＡＳで評価
Ⅰ＋S_S	貯　蔵　時 （S_S地震力が作用する場合）	――――	自　重:1G(=9.81m/s^2) 地震力 水平方向: C_HG=1.17G(=11.48m/s^2) 鉛直方向: C_VG=0.65G(= 6.38m/s^2) 熱荷重	許容応力状態 ⅣＡＳで評価

注記 1)：本事象について応力解析を行う。

表 5-2　熱応力計算に使用する材料の物性値

構成部材	材　　料	温　度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	熱膨張係数 ($\times10^{-6}$mm/mm℃)
上部トラニオン 下部トラニオン	析出硬化 ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	160	185000	11.37

表 6-1　トラニオン用材料の許容応力値

許容応力区分	応力の種類		許容応力値（MPa）	
			析出硬化ステンレス鋼	
			SUS630 H1150	許容値基準
I＋S_d^{*} 1)	一次応力	引張応力	588	1.5 f_t
		圧縮応力	570	1.5 f_c
		せん断応力	339	1.5 f_S
		曲げ応力	588	1.5 f_b
		支圧応力	801	1.5 f_P
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力 2)	1176	3 f_t
		せん断応力 2)	678	3 f_s
		曲げ応力 2)	1176	3 f_b
		支圧応力	801	1.5 f_P
		座屈応力	339	1.5 f_b, 1.5 f_S 又は 1.5 f_c
I＋S_S 1)	一次応力	引張応力	588	1.5 f_t^{*}
		圧縮応力	570	1.5 f_c^{*}
		せん断応力	339	1.5 f_S^{*}
		曲げ応力	588	1.5 f_b^{*}
		支圧応力	801	1.5 f_P^{*}
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力 2)	1176	3 f_t
		せん断応力 2)	678	3 f_s
		曲げ応力 2)	1176	3 f_b
		支圧応力	801	1.5 f_P^{*}
		座屈応力	339	1.5 f_b, 1.5 f_S 又は 1.5 f_c

注記１）：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力（σ）とせん断応力（τ）を組み合わせた応力（σ_T）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3\cdot\tau^2}$$

②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c} + \frac{|{}_c\sigma_b|}{1.5f_b} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5f_t} \leqq 1$$

③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |{}_t\sigma_b|}{1.5f_t} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5f_b'} \leqq 1$$

ただし，②及び③において，I＋S_d^{*} の一次応力については上式による。
I＋S_S の一次応力の場合，分母の 1.5 f_c，1.5 f_b，1.5 f_t は，1.5 f_c^{*}，1.5 f_b^{*}，1.5 f_t^{*} とする。一次＋二次応力の場合，分母の 1.5 f_c，1.5 f_b，1.5 f_t は，3 f_c，3 f_b，3 f_t とする。

２）：S_d^{*} 地震力及び S_S 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単　位	処　理　桁	処　理　法	表示最小桁
最高使用温度	℃	－	－	設　計　値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切　捨　て	整 数 値 位
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切　上　げ	整 数 値 位
長　　さ	mm	－	－	設　計　値
設 計 震 度	－	小数点以下第 3 位	切　上　げ	小数点以下第 2 位
面　　積	mm^2	有効数字 4 桁目	安全側に処理する	有効数字 3 桁
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
断 面 係 数	mm^3	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
質　　量	kg	－	－	設　計　値

Ⅴ-2-4-2-3　使用済燃料乾式貯蔵容器の強度計算書
（支持構造物の応力計算書）

目　　次

1.　概要 ····· 1
1.1　形状・寸法・材料 ····· 1
1.2　計算結果の概要 ····· 1

2.　応力計算 ····· 2
2.1　応力評価点 ····· 2
2.2　貯蔵時 ····· 2
2.2.1　荷重条件 ····· 2
2.2.2　計算方法 ····· 2
2.2.3　計算結果 ····· 3
2.3　貯蔵時（S_d^*及びS_s地震力が作用する場合） ····· 4
2.3.1　荷重条件 ····· 4
2.3.2　計算方法 ····· 4
2.3.3　計算結果 ····· 7

3.　応力の評価 ····· 8
3.1　一次応力の評価 ····· 8
3.2　一次＋二次応力の評価 ····· 8
3.3　組合せ応力の評価 ····· 8

・補足資料－1　支持構造物の応力解析の方針

図 表 目 次

図 1－1　形状・寸法・材料・応力評価点(面)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9
図 2－1　地震時に作用する荷重の計算モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　10

表 1－1　計算結果の概要・・・　11
表 2－1　支持構造物の応力評価（設計事象Ⅰ）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　12
表 2－2　支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_d^* 地震力が作用する場合）・・・・・・・・・　13
表 2－3　支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s 地震力が作用する場合）・・・・・・・・・・　14

1. 概要

本計算書は，使用済燃料乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，応力評価上厳しくなる評価点(面)を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

支持構造物の応力評価点（面）を図 1-1 に示す。

2.2 貯蔵時

2.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

自重＋熱荷重

2.2.2 計算方法

リブ及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。なお，トラニオン固定ボルト，容器押え金具，アンカーボルト及びトラニオン固定金具については，(自重＋熱荷重)により発生する応力は無視できるため評価を省略する。

(1) リ　　ブ

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

自重によりリブに生じる圧縮応力(σ_c)は次式により与えられる。

$$\sigma_c=(W_c+n\cdot W_s)\cdot G/(n\cdot A) \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 1)$$

ここで，W_c　：貯蔵容器質量（＝118000 kg）

n　：支持台の数（＝4）

W_s　：支持台 1 個の質量（＝700kg）

G　：重力加速度（＝9.81 m/s^2）

A　：断面積（＝5.29×10^4 mm^2）

b. 一次＋二次応力

(a) 引張・圧縮応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので，リブに発生する応力は(2．1)式と同様に与えられる。

(2) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

自重により支持台座に生じる支圧応力(σ_p)は次式により与えられる。

$$\sigma_p=W_c\cdot G/(n\cdot A) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 2)$$

ここで，W_c，G，n ：2.2.2 項(1)a.(a)と同じ

A　　：支持台座のキャスク容器底面接触面積（＝1.18×10^{5}mm^2）

b. 一次＋二次応力

(a) 支圧応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので，支持台座に発生する支圧応力は，（２．２)式と同様に与えられる。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 に示す。

2.3 貯蔵時（S_d^*及びS_s地震力が作用する場合）

2.3.1 荷重条件

貯蔵時においてS_d^*及びS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重＋熱荷重

2.3.2 計算方法

トラニオン固定ボルト，トラニオン固定金具，リブ，アンカーボルト，容器押え金具及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。

(1) トラニオン固定ボルト

a. 引張応力

トラニオン固定ボルトに作用する最大引張力(F_1)は，図 2-1 に示す支持台①に生じ，次式により与えられる。

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2}{\frac{2a_2^2}{a_1} + a_1} W_C \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 3)$$

ここで，$G_1 = \alpha_H$，$G_2 = 9.81 - \alpha_v$

α_H ：水平方向設計加速度（$=C_H G = 11.48 m/s^2$）

α_v ：鉛直方向設計加速度（$=C_V G = 6.38 m/s^2$）

h_{CG} ：貯蔵容器底面から重心までの高さ（＝2870mm）

a_1 ：支点Ｏから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離（＝2077.5mm）

a_2 ：支点Ｏから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離（＝949.5mm）

W_c ：2.2.2 項(1)a.(a)と同じ

この引張力(F_1)によりトラニオン固定ボルトに発生する引張応力(σ_t)は次式で表わされる。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 4)$$

ここで，F_1 ：引張力（$=1.19 \times 10^6$ N）

n ：トラニオン固定金具１組当たりのボルトの本数（＝2）

A ：トラニオン固定ボルト(M45)の断面積（$=1.59 \times 10^3$ mm^2）

(2) トラニオン固定金具

a. 一次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定金具にはトラニオン固定ボルトの引張力(F_1)により曲げ応力(σ_b)が発生し，次式により与えられる。

$$\sigma_b = \frac{L}{4 \cdot Z} F_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 5)$$

ここで，F_1　：引張力（＝1.19×10^6 N）

L　：トラニオン固定ボルト間距離（＝245 mm）

Z　：トラニオン固定金具の断面係数（＝1.53×10^5 mm^3）

b. 一次＋二次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)による曲げ応力の全振幅(σ_b)は，(２．５)式と同様に与えられる。

(3) リ　　ブ

a. 一次応力

(a) 引張応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)によりリブに発生する引張応力(σ_t)は，次式により与えられる。

$$\sigma_t = F_1 / A \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 6)$$

ここで，F_1　：引張力(= 1.19×10^6 N)

A　：2.2.2 項(1)a.(a)と同じ

(b) 圧縮応力

リブに作用する最大圧縮力(Fc)は支持台③に生じ，次式により与えられる。

$$F_c = G_2 \times (W_c + W_s) + 2F_2 + F_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 7)$$

ここで，$G_1 = \alpha_H$，$G_2 = 9.81 + \alpha_v$

α_H, α_v　：2.3.2 項(1)a.と同じ

W_c, W_s　：2.2.2 項(1)a.(a)と同じ

F_1　：(２．３)式と同じ（＝1.19×10^6 N）

F_2　：支持台②での引張力（＝$\frac{a_2}{a_1}F_1$ =5.44×10^5 N）

a_1, a_2　：2.3.2 項(1)a.と同じ

この圧縮力(F_c)によりリブに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表わされる。

$$\sigma_c = F_c / A \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 8)$$

ここで，　F_c　：圧縮力（＝4.20×10^6 N)

A　：2.2.2 項(1)a.(a)と同じ

b. 一次＋二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は，次式で表わされる。

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.\ 9)$$

ここで，σ_t：2.3.2 項(3)a.(a)と同じ

σ_c：2.3.2 項(3)a.(b)と同じ

(4) アンカーボルト

a. 引張応力

（２．３)式により与えられる引張力(F_l)によりアンカーボルトに生じる引張応力(σ_t)は次式により与えられる。

$$\sigma_t = F_l / (n \cdot A) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (２．１０)$$

ここで，F_l ：引張力（$=1.19\times10^6$ N)

n ：支持台１個当たりのアンカーボルトの本数（＝6)

A ：アンカーボルト(M36)の断面積（$=1.01\times10^3$ mm^2)

b. せん断応力

アンカーボルトに作用する最大水平力(F_H)は支持台③に生じ，次式により与えられる。

$$F_H = \alpha_H \cdot (W_c + W_s) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (２．１１)$$

ここで，α_H ：2.3.2項(1)a.と同じ

W_c, W_s ：2.2.2項(1)a.(a)と同じ

この水平力(F_H)によりアンカーボルトに発生するせん断応力(τ)は，次式で表わされる。

$$\tau = F_H / (n \cdot A) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (２．１２)$$

ここで，F_H ：水平力（$=1.36\times10^6$ N)

n，A ：2.3.2 項(4)a.と同じ

(5) 容器押え金具

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

容器押え金具に作用する最大水平力(F_H)は支持台③に生じ，次式により与えられる。

$$F_H = \alpha_H \cdot W_c \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (２．１３)$$

ここで，α_H ：2.3.2項(1)a.と同じ

W_c ：2.2.2項(1)a.(a)と同じ

水平力(F_H)より容器押え金具に発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表わされる。

$$\sigma_c = F_H / (n \cdot A) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (２．１４)$$

ここで，F_H ：水平力（$=1.35\times10^6$ N)

n ：支持台１個当たりの容器押え金具の本数（＝2)

A ：容器押え金具の断面積（$=1.78\times10^3$ mm^2)

b. 一次＋二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は，（２．１４)式と同様に与えられる。

(6) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

支持台座に作用する最大圧縮力(F_c)は支持台③に生じ，次式により与えられる。

$$F_c = G_2 \times W_c + 2F_2 + F_1 \cdots\cdots (2.15)$$

ここで，$G_1 = \alpha_H$，$G_2 = 9.81 + \alpha_v$

α_H，α_v ：2.3.2 項(1)a. と同じ

W_c ：2.2.2 項(1)a. (a)と同じ

F_1，F_2 ：2.3.2 項(3)a. (b)と同じ

圧縮力(F_c)により発生する支圧応力(σ_p)は次式で表わされる。

$$\sigma_p = F_c / A \cdots\cdots (2.16)$$

ここで，F_c ：圧縮力（$=4.19 \times 10^6$ N）

A ：2.2.2 項(2)a. (a)と同じ

b. 一次＋二次応力

(a) 支圧応力

地震力のみによる支圧応力の全振幅(σ_p)は(２．１６)式と同様に与えられる。

2.3.3 計算結果

応力計算結果を表 2-2 及び表 2-3 に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1，表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-1，表 2-2 及び表 2-3 より，各設計事象の一次応力は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

3.2 一次＋二次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1，表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-1，表 2-2 及び表 2-3 より，各設計事象の一次＋二次応力は「応力解析の方針」5.5 項の規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

各設計事象において，組合せ応力の評価はない。

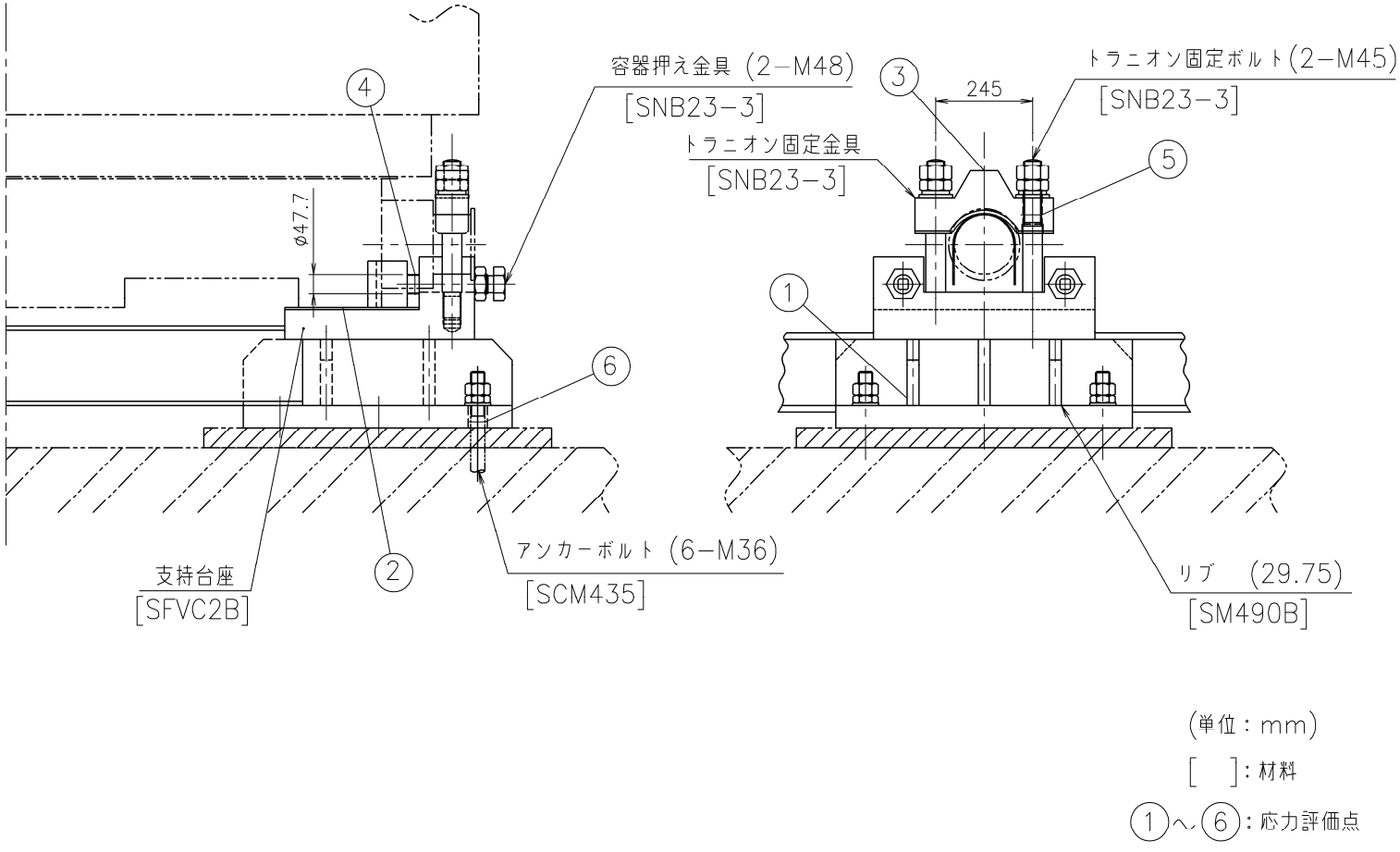
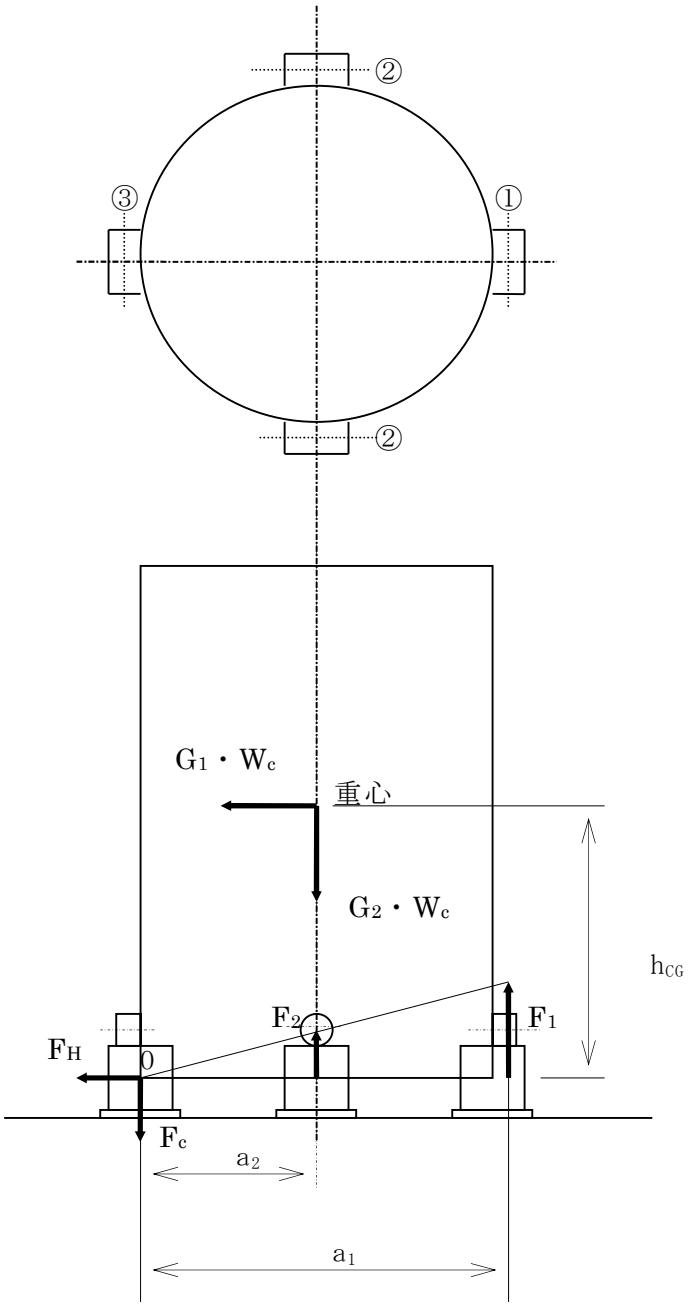


図 1-1　形状・寸法・材料・応力評価点(面)



○：支持台番号

図 2-1 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1-1　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　　料	設計事象	一次応力		一次＋二次応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
リブ	SM490B	Ⅰ	6	181	6	543
		Ⅰ＋S_d^*	80	271	103	543
		Ⅰ＋S_s	80	307	103	543
支持台座	SFVC2B	Ⅰ	3	201	3	301
		Ⅰ＋S_d^*	36	301	36	301
		Ⅰ＋S_s	36	361	36	361
トラニオン固定金具	SNB23-3	Ⅰ＋S_d^*	477	637	477	1275
		Ⅰ＋S_s	477	637	477	1275
容器押え金具	SNB23-3	Ⅰ＋S_d^*	380	543	380	1275
		Ⅰ＋S_s	380	543	380	1275

（単位：MPa）

部　位	材　　料	設計事象	引張応力		せん断応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン固定ボルト	SNB23-3	Ⅰ＋S_d^*	375	478		
		Ⅰ＋S_s	375	478		
アンカーボルト	SCM435	Ⅰ＋S_d^*	197	261	225	340
		Ⅰ＋S_s	197	261	225	340

表 2-1　支持構造物の応力評価（設計事象Ⅰ）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			計算値	評価点（面）	
リ　　ブ	一次応力	圧縮応力	6	①	181
	一次＋二次応力	圧縮応力	6	①	543
支持台座	一次応力	支圧応力	3	②	201
	一次＋二次応力	支圧応力	3	②	301

表 2-2　支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_d^* 地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点（面）	許容応力 2)
トラニオン固定金具	一次応力	曲げ応力	477	③	637
	一次＋二次応力 1)	曲げ応力	477	③	1275
リ　　ブ	一次応力	引張応力	23	①	271
		圧縮応力	80	①	271
	一次＋二次応力 1)	引張・圧縮応力	103	①	543
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	380	④	543
	一次＋二次応力 1)	引張・圧縮応力	380	④	1275
支持台座	一次応力	支圧応力	36	②	301
	一次＋二次応力 1)	支圧応力	36	②	301
トラニオン固定ボルト	—	引張応力	375	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	197	⑥	261
		せん断応力	225	⑥	340

注記　1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

2)：許容応力状態$\mathrm{III}_A S$の許容応力にて評価を行う。

表 2-3　支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_S地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点（面）	許容応力 2)
トラニオン固定金具	一次応力	曲げ応力	477	③	637
	一次＋二次応力 1)	曲げ応力	477	③	1275
リ　　ブ	一次応力	引張応力	23	①	307
		圧縮応力	80	①	307
	一次＋二次応力 1)	引張・圧縮応力	103	①	543
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	380	④	543
	一次＋二次応力 1)	引張・圧縮応力	380	④	1275
支持台座	一次応力	支圧応力	36	②	361
	一次＋二次応力 1)	支圧応力	36	②	361
トラニオン固定ボルト	―	引張応力	375	⑤	478
アンカーボルト	―	引張応力	197	⑥	261
		せん断応力	225	⑥	340

注記　1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

2)：許容応力状態$\mathrm{IV}_A S$の許容応力にて評価を行う。

補足資料－1

支持構造物の応力解析の方針

目　　次

1.　概要 ····· 補 1-4

2.　適用基準 ····· 補 1-5

3.　記号 ····· 補 1-6
3.1　記号の説明 ····· 補 1-6

4.　設計条件 ····· 補 1-8
4.1　基本仕様 ····· 補 1-8
4.2　設計事象 ····· 補 1-8
4.3　荷重の種類とその組合せ ····· 補 1-8

5.　計算条件 ····· 補 1-9
5.1　解析対象とする事象 ····· 補 1-9
5.2　解析箇所 ····· 補 1-9
5.3　形状及び寸法 ····· 補 1-9
5.4　物性値 ····· 補 1-9
5.5　許容応力 ····· 補 1-9

6.　応力解析の手順 ····· 補 1-12
6.1　解析手順の概要 ····· 補 1-12
6.2　荷重条件の選定 ····· 補 1-12
6.3　応力計算と評価 ····· 補 1-12
6.3.1　応力計算の方法 ····· 補 1-12
6.3.2　応力評価 ····· 補 1-12
6.3.3　数値の丸め方 ····· 補 1-13

図 表 目 次

図 5－1　支持構造物の応力解析箇所･････････････････････････････････････　補 1-14
図 6－1　支持構造物の応力解析フロー図･･･････････････････････････････････　補 1-15

表 4－1　貯蔵容器の設計事象･･･　補 1-16
表 4－2　支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ････････････　補 1-16
表 5－1　代表事象･･　補 1-17
表 5—2　熱応力計算に使用する材料の物性値･･･････････････････････････････　補 1-17
表 6－1　支持構造物用材料の許容応力値･･･････････････････････････････････　補 1-18
表 6－2　支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値･･･････････････････　補 1-20
表 6－3　数値の丸め方一覧表･･･　補 1-21

1. 概要

本書は，使用済燃料乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は，一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において，支持構造物は，貯蔵時においての貯蔵容器を固縛する構造物であり，キャスク容器の評価方法との整合をとり，「発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版(2007年追補版を含む)）JSME S NC1-2005/2007）（日本機械学会　2007年9月）」（以下，「設計・建設規格」という。）のクラス1支持構造物に従って設計する。

注：本書及び応力計算書において，設計・建設規格の条項は「設計・建設規格○○○－○○○○」として示す。

3. 記　号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において，応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし，本文中に特記ある場合は，この限りでない。

なお，応力計算書の字体及び大きさについては，本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
A	断面積	mm^2
a_1	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a_2	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離	mm
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
F_c	圧縮力	N
F_1	支持台①の引張力	N
F_2	支持台②の引張力	N
f_T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
f_t	許容引張応力	MPa
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
f_p	許容支圧応力	MPa
$f_t^{*\ 1)}$	許容引張応力	MPa
$f_s^{*\ 1)}$	許容せん断応力	MPa
$f_c^{*\ 1)}$	許容圧縮応力	MPa
$f_b^{*\ 1)}$	許容曲げ応力	MPa
$f_p^{*\ 1)}$	許容支圧応力	MPa
G_1	水平方向加速度	$m／s^2$
G_2	鉛直方向加速度	$m／s^2$
G	重力加速度(=9.80665)	$m／s^2$
h_{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm

注記　1)：f_t^*，f_s^*，f_c^*，f_b^*，f_p^*：f_t，f_s，f_c，f_b，f_pの値を算出する際に設計・建設規格SSB-3121.1(1)における「付録材料図表　Part5 表８に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表　Part5 表８に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」と読み替えて算出した値。

計算書の記号	記　号　の　説　明	単　位
L	トラニオン固定ボルト間距離	mm
N	部材の数	—
S_d^*	弾性設計用地震動S_d^*による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_S	基準地震動S_Sにより定まる地震力	—
W_c	貯蔵容器質量	kg
W_S	支持台1個の質量	kg
Z	断面係数	mm^3
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	曲げ応力	MPa
$_c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
$_t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_p	支圧応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s^2
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s^2
$I+S_d^*$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I+S_S$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_S地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

支持構造物は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度： 130 ℃

4.2 設計事象

設計上考慮する事象を表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

設計事象Ⅰにおける事象のうち，表 5-1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し，代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

支持構造物の応力解析を行う箇所は次のとおりである。(図 5-1 参照)

(1) 支持台座
(2) トラニオン固定金具
(3) 容器押え金具
(4) トラニオン固定ボルト
(5) リブ
(6) アンカーボルト

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

(1) 熱応力計算に使用する物性値を表 5-2 に示す。
(2) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は，最高使用温度（130℃）に対する値を用いる。
なお，常温は 20℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は，次の各号に掲げるとおりとする。

(1) 支持構造物（ボルトを除く）にあっては，次によること。
a. 設計事象Ⅰにおいて生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.1 の規定を 満足すること。
b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^* 地震力が作用して生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.2 の規定を満足すること。
c. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s 地震力が作用して生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.3 の規定を満足すること。
d. 設計事象Ⅰにおいて生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は，設計・建設規格　SSB-3122.1 の規定を満足すること。
e. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^* 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて

求めた応力は，次の値を超えないこと。

(a) 引張応力と圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし，圧縮応力の符号は負として計算する。）については，設計・建設規格　SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。

(b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。

(c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。

(d)支圧応力については,設計･建設規格　SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。

(e) 座屈応力については，設計・建設規格　SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の 1.5 倍を超えないこと。

f.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は，次の規定を満足すること。

(a) 引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし，圧縮応力の符号は負として計算する。）については，設計・建設規格　SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。

(b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。

(c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。

(d)支圧応力については,設計･建設規格　SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。この場合において，設計・建設規格　SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5　表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのは，「付録材料図表 Part5　表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」に読み替えるものとする。

(e) 座屈応力については，設計・建設規格　SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の 1.5 倍を超えないこと。

g.　e.及び f.において応力の組合せが考えられる場合は，組合せ応力に対する評価は設計・建設規格　SSB-3121.1(6)の規定による。

(2)　ボルトにあっては，次によること。

a．設計事象Ⅰにおいて呼び径断面に生じる応力は，設計・建設規格　SSB-3131 の規定を満足すること。

b．設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は，設計・建設規格　SSB-3132 の規定を満足すること。

c．設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は，設計・建設規格　SSB-3133 の規定を満足すること。

(3)　(1)及び(2)において，設計・建設規格の「供用状態Ａ」及び「供用状態Ｂ」は，

それぞれ「設計事象Ⅰ」及び「設計事象Ⅱ」と読み替える。
許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

支持構造物の応力解析フローを図 6-1 に示す。

支持構造物の応力解析は，想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4.項に示されているが，各部の計算においては，その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の２つである。

a．機械的荷重

b．熱荷重

(2) 貯蔵時に貯蔵容器に地震力が作用する場合の上方向,下方向,水平方向荷重は，それぞれトラニオン固定金具，支持台座，容器押え金具で支持する。

なお，荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

(3) 構造の不連続性を考慮して応力評価点(面)をとる。評価点(面)は，応力計算書に示す。

応力評価は，この応力評価点(面)について行う。

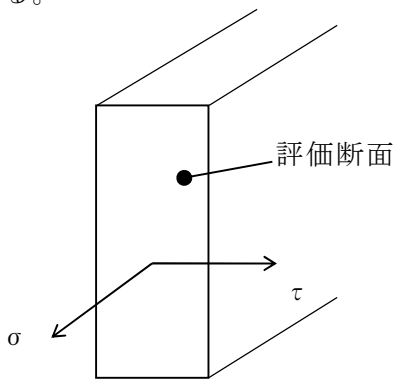
6.3.2 応力評価

応力の計算結果は，設計･建設規格 GNR-2130 による定義に従い，応力の種類毎に分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ ：評価断面に垂直な方向の応力

τ ：せん断応力



支持構造物用材料の許容応力値を表 6-1 及び表 6-2 に示す。

(1) 支持構造物（ボルトを除く）の応力評価

支持構造物の応力評価は，設計・建設規格　SSB-3120 に従い以下の項目を実施する。

a. 一次応力

b. 一次＋二次応力

c. 組合せ応力

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は，設計・建設規格　SSB-3130 に従い実施する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は，原則として四捨五入とする。また，評価に用いる許容応力及び算出応力等については，安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めず，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-3 に示す。

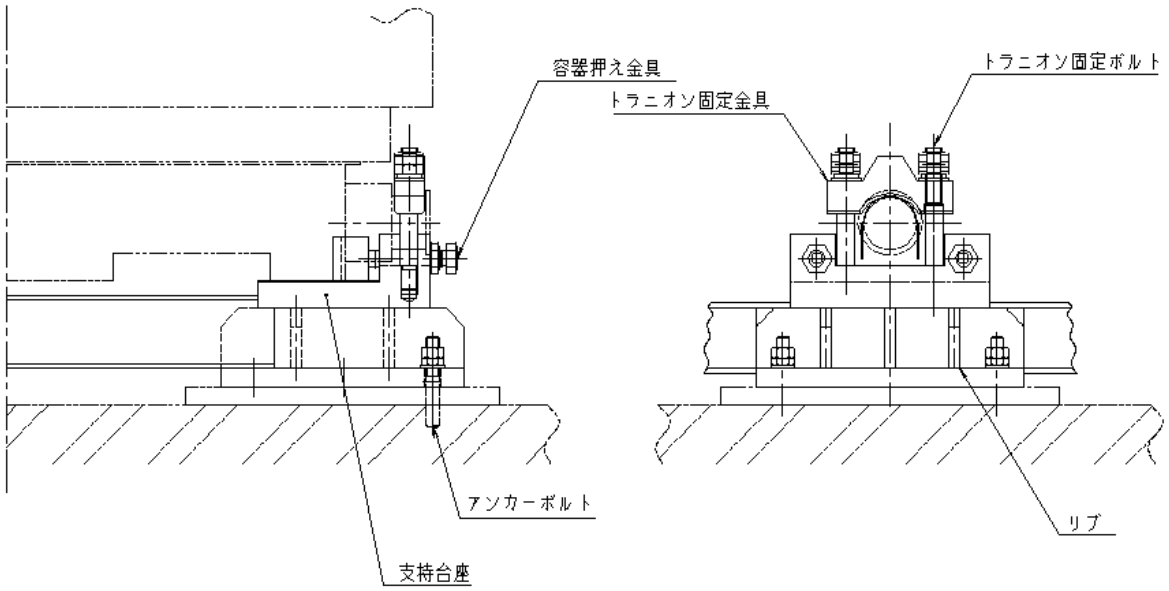


図 5-1　支持構造物の応力解析箇所

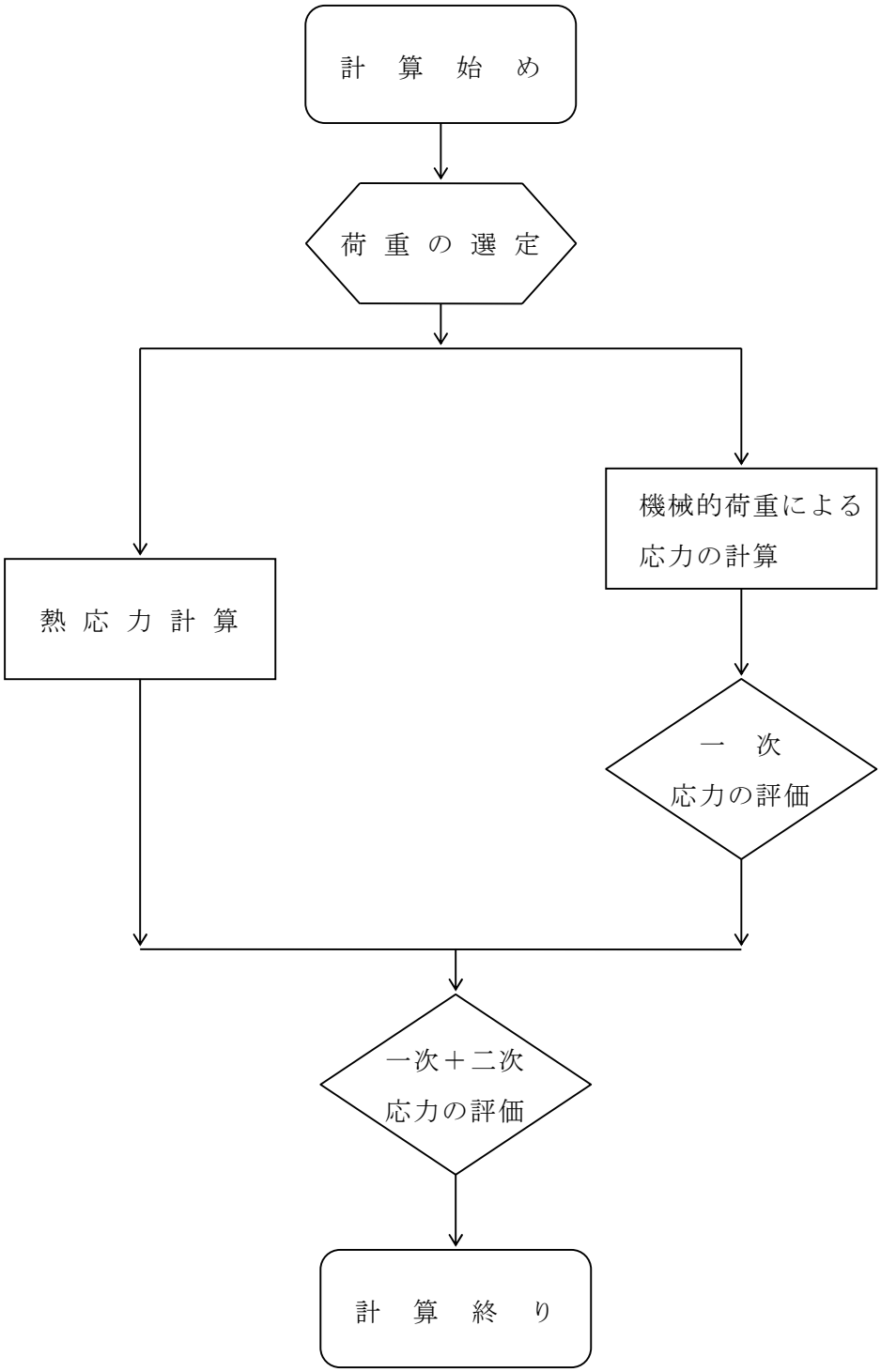


図 6-1　支持構造物の応力解析フロー図

表 4-1　貯蔵容器の設計事象

設計事象	定　　義	解　　説	事象の例	選定事象
Ⅰ	貯蔵容器の通常の取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬	・貯蔵

表 4-2　支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷重 / 設計事象 / 荷重時	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重 異常着床・支持構造物への衝突	熱荷重 (1)	備考
Ⅰ　貯蔵時	○				○	(2)

(1)　キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。

(2)　S_d^* 地震力及び S_s 地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1　代　表　事　象

設計事象	代表事象 1)	包絡される事象	荷重条件	備　　考
Ⅰ	貯　蔵　時	―――	自　重:1G(=9.81m/s^2) 熱荷重	設計事象Ⅰのうち大半の期間を占める代表事象。
Ⅰ＋S_d^*	貯　蔵　時 (S_d^*地震力が作用する場合)	―――	自　重:1G(=9.81m/s^2) 地震力 水平方向: C_HG=1.17G(=11.48m/s^2) 鉛直方向: C_VG=0.65G(=6.38m/s^2) 熱荷重	許容応力状態 $Ⅲ_AS$で評価
Ⅰ＋S_S	貯　蔵　時 (S_S地震力が作用する場合)	―――	自　重:1G(=9.81m/s^2) 地震力 水平方向: C_HG=1.17G(=11.48m/s^2) 鉛直方向: C_VG=0.65G(=6.38m/s^2) 熱荷重	許容応力状態 $Ⅳ_AS$で評価

注記　1)：本事象について応力解析を行う。

表 5-2　熱応力計算に使用する材料の物性値

構成部材	材　　料	温　度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	熱膨張係数 ($\times10^{-6}$mm/mm℃)
リ　　ブ	炭素鋼 (SM490B)	130	196000	11.38
支持台座	炭素鋼 (SFVC2B)	130	196000	11.38
アンカーボルト	低合金鋼 (SCM435)	130	198000	11.38
トラニオン固定ボルト 容器押え金具	合金鋼 (SNB23-3)	130	185000	12.04
トラニオン固定金具	合金鋼 (SNB23-3)	130	185000	12.04

表 6-1 (1)　支持構造物用材料の許容応力値

許容応力区分	応力の種類		許容応力値 (MPa) 炭素鋼 リブ SM490B	炭素鋼 支持台座 SFVC2B	合金鋼 ﾄﾗﾆｵﾝ固定金具 SNB23-3	合金鋼 容器押え金具 SNB23-3	許容値基準
設計事象 I [1)]	一次応力	引張応力	181	148	425	425	f_t
		圧縮応力	181	147	421	362	f_c
		せん断応力	104	85	245	245	f_S
		曲げ応力	181	148	425	425	f_b
		支圧応力	247	201	580	580	f_P
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力	543	444	1275	1275	3 f_t
		せん断応力	312	255	735	735	3 f_S
		曲げ応力	543	444	1275	1275	3 f_b
		支圧応力	370	301	870	870	1.5 f_P
		座屈応力	156	127	367	367	1.5 f_S 又は 1.5 f_c
$I+S_d^*$ [1)]	一次応力	引張応力	271	222	637	637	1.5 f_t
		圧縮応力	271	220	631	543	1.5 f_c
		せん断応力	156	127	367	367	1.5 f_S
		曲げ応力	271	222	637	637	1.5 f_b
		支圧応力	370	301	870	870	1.5 f_P
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力 [2)]	543	444	1275	1275	3 f_t
		せん断応力 [2)]	312	255	735	735	3 f_S
		曲げ応力 [2)]	543	444	1275	1275	3 f_b
		支圧応力	370	301	870	870	1.5 f_P
		座屈応力	156	127	367	367	1.5 f_b, 1.5 f_S 又は 1.5 f_c

注記１）：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3\cdot\tau^2}$$

②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{f_c} + \frac{|{}_c\sigma_b|}{f_b} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_t\sigma_b| - |\sigma_c|}{f_t} \leqq 1$$

③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |{}_t\sigma_b|}{f_t} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_c\sigma_b| - |\sigma_t|}{f_b} \leqq 1$$

ただし，②及び③において，設計事象Ⅰの一次応力については上式による。

$I+S_d^*$ の一次応力の場合，分母の f_c，f_b，f_t は，1.5 f_c，1.5 f_b，1.5 f_t とする。

$I+S_d^*$ の一次＋二次応力の場合，分母の f_c，f_b，f_t は，3 f_c，3 f_b，3 f_t とする。

２）：S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1（2）　支持構造物用材料の許容応力値

許容応力区分	応力の種類		許容応力値（MPa）				
			炭素鋼		合金鋼	合金鋼	許容値基準
			リブ	支持台座	ﾄﾗﾆｵﾝ固定金具	容器押え金具	
			SM490B	SFVC2B	SNB23-3	SNB23-3	
$I+S_S$ [1)]	一次応力	引張応力	307	265	637	637	1.5 f_t^*
		圧縮応力	307	265	631	543	1.5 f_c^*
		せん断応力	177	153	367	367	1.5 f_S^*
		曲げ応力	307	265	637	637	1.5 f_b^*
		支圧応力	420	361	870	870	1.5 f_P^*
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力 [2)]	543	444	1275	1275	3 f_t
		せん断応力 [2)]	312	255	735	735	3 f_S
		曲げ応力 [2)]	543	444	1275	1275	3 f_b
		支圧応力	420	361	870	870	1.5 f_P^*
		座屈応力	156	127	367	367	1.5 f_b, 1.5 f_S 又は 1.5 f_c

注記１）：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力（σ）とせん断応力（τ）を組み合わせた応力（σ_T）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3\cdot\tau^2}$$

②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c^*} + \frac{|{}_c\sigma_b|}{1.5f_b^*} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5f_t^*} \leqq 1$$

③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |{}_t\sigma_b|}{1.5f_t^*} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5f_b^*} \leqq 1$$

ただし，②及び③において，一次応力については上式による。一次＋二次応力の場合，分母の 1.5 f_c^*，1.5 f_b^*，1.5 f_t^*は，3 f_c，3 f_b，3 f_tとする。

２）：S_S地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2　支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値

許容応力区分	応力の種類	許容応力値（MPa）		
		合金鋼	低合金鋼	許容値基準
		ﾄﾗﾆｵﾝ固定ﾎﾞﾙﾄ	ｱﾝｶｰﾎﾞﾙﾄ	
		SNB23-3	SCM435	
設計事象Ⅰ 1)	引張応力	319 1)	296 1)	f_t
	せん断応力	245	227	f_S
Ⅰ＋S_d^* 1)	引張応力	478 1)	261 1)	1.5 f_t
	せん断応力	367	340	1.5 f_S
Ⅰ＋S_S 1)	引張応力	478 1)	261 1)	1.5 f_t^*
	せん断応力	367	340	1.5 f_S^*

注記１）：組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は，次の２つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$f_T=1.4\ f_t-1.6\tau$

$f_T=f_t$

ここで，τ ：ボルトに発生するせん断応力（MPa）

ただし，設計事象Ⅰの一次応力については上式による。

Ⅰ＋S_d^*の場合，f_tは 1.5 f_tとする。

Ⅰ＋S_Sの場合，f_tは 1.5 f_t^*とする。

表 6-3　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単　位	処　理　桁	処　理　法	表示最小桁
最高使用温度	℃	－	－	設　計　値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切　捨　て	整 数 値 位
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切　上　げ	整 数 値 位
長　　さ	mm	－	－	設　計　値
設 計 震 度	－	小数点以下第 3 位	切　上　げ	小数点以下第 2 位
面　　積	mm^2	有効数字 4 桁目	安全側に処理する	有効数字 3 桁
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
断 面 係 数	mm^3	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
質　　量	kg	－	－	設　計　値

Ⅴ-2-4-2-3 ①　キャスク容器の応力計算書

（タイプⅡ）

目次

1. 概要 …… 1
1.1 形状・寸法・材料 …… 1
1.2 計算結果の概要 …… 1
2. 温度分布計算 …… 2
2.1 計算方法 …… 2
2.2 温度分布図 …… 2
3. 応力計算 …… 3
3.1 応力評価点 …… 3
3.2 貯蔵時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合） …… 3
3.2.1 荷重条件 …… 3
3.2.2 計算方法 …… 3
3.2.3 計算結果 …… 4
4. 応力の評価 …… 5
4.1 キャスク容器（ボルトを除く。）の応力評価 …… 5
4.2 ボルトの応力評価 …… 5
4.3 特別な応力の評価 …… 5
5. 繰返し荷重の評価 …… 6
5.1 キャスク容器（ボルトを除く。）の評価 …… 6
5.2 ボルトの評価 …… 6
5.2.1 「設計・建設規格」 PVB-3122 及び「設計・建設規格」 付録材料図表 Part8 図 4 の備考に対する検討 …… 6
5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲れ解析 …… 7
5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲れ解析 …… 8
6. 穴の補強 …… 10

・補足資料：キャスク容器の応力解析の方針

図表目次

図1－1　形状・寸法・材料 …… 11
図2－1　温度分布計算モデル …… 12
図2－2　温度分布図（貯蔵時） …… 13
図3－1　キャスク容器の応力評価点（面） …… 14
図3－2　キャスク容器の解析モデル（圧力＋ボルト初期締付け力作用時） …… 15
図3－3　キャスク容器の解析モデル（地震時） …… 16
図3－4　キャスク容器の解析モデル（熱荷重作用時） …… 17

表1－1　計算結果の概要 …… 18
表2－1　熱伝達率の計算 …… 20
表3－1　キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合） …… 21
表3－2　キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合） …… 24
表4－1　キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合） …… 27
表4－2　キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合） …… 29
表5－1　キャスク容器（ボルトを除く。）の疲労解析不要の評価結果 …… 31
表5－2　応力差の変動（一次蓋締付けボルト） …… 32
表5－3　疲れ累積係数（一次蓋締付けボルト） …… 33
表5－4　応力差の変動（バルブカバー締付けボルト） …… 34
表5－5　疲れ累積係数（バルブカバー締付けボルト） …… 35
表6－1　貫通孔部の応力強さ …… 36

1. 概要

本計算書は，キャスク容器に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1－1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1－1 に示す。

なお，応力評価点については解析上最も厳しい部位を選定し，代表評価点（面）として本計算書に記載している。

表中の「－」は，評価すべき応力が発生しない又は，評価上厳しくないため評価を省略している。以下，本計算書において同様である。

2. 温度分布計算

2.1 計算方法

温度分布計算は，解析コードＡＢＡＱＵＳにより行う。軸対称固体（連続体）要素による解析モデルを図 2－1 に示す。

温度分布計算に使用する外表面の熱伝達率の計算条件と計算結果を表 2－1 に示す。

2.2 温度分布図

2.1 節の計算により得られた温度分布を図 2－2 に示す。

3.　応力計算

3.1　応力評価点

キャスク容器の応力評価点（面）を図 3－1 に示す。

3.2　貯蔵時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合）

3.2.1　荷重条件

貯蔵時においてS_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

なお，地震力にはS_s地震力を適用する。

キャスク容器内圧力（－0.1 MPa）＋蓋間圧力（0.4 MPa）＋ボルト初期締付け力＋熱荷重＋地震力＋自重

3.2.2　計算方法

(1)　一次応力及び一次＋二次応力

a.　一次蓋，一次蓋締付けボルト，胴及び底板

(a)　圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コードＡＢＡＱＵＳの軸対称固体（連続体）要素による解析モデルを図 3－2 に示す。

(b)　地震力が作用する場合

解析コードＡＢＡＱＵＳの三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 3－3 に示す。

加速度として次の値を用いる。

$G_1 = C_H \cdot G$，$G_2 = (1 - C_V) \cdot G$　・・・・・・・・・・・・・・・・　(3.1)

ここで，　C_H ：水平方向設計震度（＝1.17）

C_V ：鉛直方向設計震度（＝0.65）

(c)　熱荷重が作用する場合

解析コードＡＢＡＱＵＳの軸対称固体（連続体）要素による解析モデルを図 3－4 に示す。

熱荷重として，貯蔵時での熱解析の結果から得られたキャスク容器に生じる温度変化，温度勾配による荷重を用いる。

(2) 支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力（σ_p）は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2}{A} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.2)$$

ここで，$G_2 = (1 + C_V) \cdot G$

m_G ：バスケット及び燃料の質量（＝ [redacted] kg）

A　：接触面積（＝ [redacted] mm²）

C_V ：(1)a. (b) と同じ

3.2.3 計算結果

応力計算結果を表 3－1 及び表 3－2 に示す。

4.　応力の評価

4.1　キャスク容器（ボルトを除く。）の応力評価

地震時における評価を表 4－1 及び表 4－2 に示す。

表 4－1 及び表 4－2 より，地震時の一次一般膜応力強さ（P_m），一次局部膜応力強さ（P_L），一次膜＋一次曲げ応力強さ（P_L+P_b）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ（P_L+P_b+Q）は補足資料「キャスク容器の応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。

4.2　ボルトの応力評価

地震時における評価を表 4－1 及び表 4－2 に示す。

表 4－1 及び表 4－2 より，地震時の平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力は補足資料「キャスク容器の応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。

4.3　特別な応力の評価

(1)　純せん断応力

地震時において純せん断応力を評価すべき箇所がないため，評価を省略する。

(2)　支圧応力

地震時における評価を表 4－1 及び表 4－2 に示す。

表 4－1 及び表 4－2 より，地震時の平均支圧応力（σ_p）は補足資料「キャスク容器の応力解析の方針」5.5 節の規定を満足する。

(3)　軸圧縮応力

地震時において軸圧縮応力を評価すべき箇所がないため，評価を省略する。

5. 繰返し荷重の評価

5.1 キャスク容器（ボルトを除く。）の評価

「設計・建設規格」 PVB-3140 により，疲れ解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を示す。地震力により発生する応力の変動回数は，貯蔵時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合）の最大回数である10^4回であると想定する。

この回数に対応する繰り返しピーク応力強さＳは，「設計・建設規格」付録図表 Part8 図1より，

Ｓ＝262 MPa

となる。

地震力により発生する応力の全振幅最大値を表4－1及び表4－2に示した応力強さの最大値（$\Delta\sigma_2$＝123 MPa）とすると，

$\Delta\sigma_2 < S$

であり，条件を満足する。

したがって，地震力により発生する応力は「設計・建設規格」PVB-3140 の規定に適合しているので，疲れ解析を必要としない。

5.2 ボルトの評価

補足資料「キャスク容器の応力解析の方針」5.5 節の規定に従って疲れ解析を行う。なお，本項においても燃料装荷・取出しサイクルの回数を 100 回に想定しても規定を満足することを示す。

5.2.1 「設計・建設規格」PVB-3122 及び「設計・建設規格」付録材料図表 Part8 図4の備考に対する検討

(1) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの最小引張強さは 1000 MPa であり，「設計・建設規格」 PVB-3122(2)に従い，設計疲れ曲線として「設計・建設規格」付録材料図表 Part8 図4を使用する。

(2) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの平均引張応力＋曲げ応力の許容値を$3S_m$としたので，設計疲れ曲線として，「設計・建設規格」付録材料図表 Part8 図4の“曲線2”を使用する。

(3) ねじは三角ねじであり，ねじ底部の半径は一次蓋締付けボルトが［　　］mm，バルブカバー締付けボルトが［　　］mm であって 0.07 mm より大である。

(4) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は，

一次蓋締付けボルト　：［　　］＝0.062

バルブカバー締付けボルト　：［　　］＝0.072

であって，0.06 以上である。

5.2.2　一次蓋締付けボルトの疲れ解析

疲れ解析で考慮する事象は以下とする。

①　一次蓋締付けボルトの取付け・取外し

②　運搬時（前方向加速度及び後方向加速度が作用する場合）

③　吊上げ時

④　衝突時（輸送架台及び支持構造物への衝突）

⑤　地震時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合）

①の事象において，一次蓋締付けボルトの取付け・取外しにおけるボルト締付け力によるボルトのピーク応力強さは，次式で計算する。

$$\left.\begin{aligned} S &= K \cdot S_b \\ S_b &= \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \\ \tau &= \frac{T_r}{\frac{\pi \cdot d_s^3}{16}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.1)$$

ここで，　S　：ボルトのピーク応力強さ（MPa）

K　：一次蓋締付けボルトのねじ部の応力集中係数（＝4）

S_b　：ボルト締付け時に発生する応力強さ（MPa）

σ　：ボルト初期締付け時の応力（＝265 MPa）

τ　：ねじり応力（MPa）

T_r　：ボルト締付けトルク（＝[redacted]N･mm）

d_s　：一次蓋締付けボルトの最小径（＝[redacted]mm）

②③④の事象において，一次蓋締付けボルトのピーク応力強さは，次式により計算する。

$$S = K \cdot \left(S_b + \frac{m_\ell \cdot G_1}{A}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.2)$$

ここで，S，S_b，K：(5.1) 式に同じ

m_ℓ：運搬時で後方向加速度が生じる場合においては，一次蓋＋バスケット＋燃料の質量（＝[redacted]kg）

運搬時で前方向加速度が生じる場合，吊上げ時及び衝突時においては，一次蓋の質量（＝[redacted]kg）

G_1：軸方向の加速度

運　搬	±19.62 m/s^2
吊上げ	−12.95 m/s^2
輸送架台への衝突	−29.42 m/s^2
支持構造物への衝突	−58.84 m/s^2

Ａ　：全数のボルト最小断面積（＝[redacted]mm^2）

⑤事象においては，地震動のみによる疲れ解析を行うため，一次蓋締付けボルトのピーク応力強さは，次式により計算する。

$$S = K \cdot (\pm \frac{m_\ell \cdot G_1}{A}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.3)$$

ここで，　Ｓ，Ｋ：(5.1) 式に同じ

Ａ　：(5.2) 式に同じ

m_ℓ　：一次蓋の質量（＝4900 kg）

G_1　：軸方向の加速度

地　震　　S_d^*　　6.38 m/s^2

S_s　　6.38 m/s^2

(5.1) 式，(5.2) 式及び (5.3) 式で求めたボルトのピーク応力強さと各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル及びそれに対応するピーク応力強さの範囲（S_P）並びに各事象の繰返し回数を表 5－2 に示す。

各応力サイクルに対応したピーク応力強さの範囲（S_P）から，次式により繰返しピーク応力強さ（S_ℓ，S_ℓ’）を求める。ここで，繰返しピーク応力強さ（S_ℓ）は，「設計・建設規格」 付録材料図表　Part8　図 4 に使用されている縦弾性係数（E_0＝2.07×10^5 MPa）と解析に用いる縦弾性係数（Ｅ＝1.82×10^5 MPa）との比を考慮し補正する。

$$\left.\begin{aligned} S_\ell &= \frac{1}{2} \cdot S_P \\ S_\ell' &= S_\ell \cdot \frac{E_0}{E} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4)$$

「設計・建設規格」　付録材料図表　Part8　図 4 より，補正した繰返しピーク応力強さ（S_ℓ’）に対する許容繰返し回数（Ｎ）を求める。各サイクルの繰返し回数（N_C）と許容繰返し回数（N_a）との比は表 5－3 に示す通りとなり，設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱによる疲れ累積係数は 1.0 以下であり，地震時における疲れ累積係数との和も 1.0 以下となるため，補足資料「キャスク容器の応力解析の方針」5.5 節の規定を満足する。

5.2.3　バルブカバー締付けボルトの疲れ解析

疲れ解析で考慮する事象は以下とする。

①　バルブカバー締付けボルトの取付け・取外し

②　運搬時（前方向加速度及び後方向加速度が作用する場合）

③　吊上げ時

④　衝突時（輸送架台及び支持構造物への衝突）

⑤　地震時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合）

①の事象において，バルブカバー締付けボルトの取付け・取外しにおけるボルト締付け力によるボルトのピーク応力強さは（5.1）式により同様に求める。また，②③④の事象におけるボルトのピーク応力強さの計算は（5.2）式，⑤の事象におけるボルトのピーク応力強さの計算は（5.3）式により同様に求める。

なお，m_ℓはm_rに読み替える。

ここで，　S，K，S_b，τ：（5.1）式と同じ

G_1　：（5.2），（5.3）式と同じ

σ　：ボルト初期締付け時の応力（＝209 MPa）

T_r　：ボルト締付けトルク（＝[redacted] N･mm）

d_s　：バルブカバー締付けボルトの最小径（＝[redacted] mm）

m_r　：バルブカバーの質量（＝6 kg）

A　：全数のボルト最小断面積（＝[redacted] mm^2）

ボルトのピーク応力強さと各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル及びそれに対応するピーク応力強さの範囲（S_P）並びに各事象の繰返し回数を表5－4に示す。

繰返しピーク応力強さ（S_ℓ，S_ℓ’）は，（5.4）式により同様に求める。

各サイクルの繰返し回数（N_C）と許容繰返し回数（N_a）との比は表5－5に示す通りとなり，設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱによる疲れ累積係数は1.0以下であり，地震時における疲れ累積係数との和も1.0以下となるため，補足資料「キャスク容器の応力解析の方針」5.5節の規定を満足する。

6. 穴の補強

「設計・建設規格」　PVB-3520により貫通孔の補強が不要となることを示す。

貫通孔部の応力強さは，応力集中係数を用いて次式で計算する。

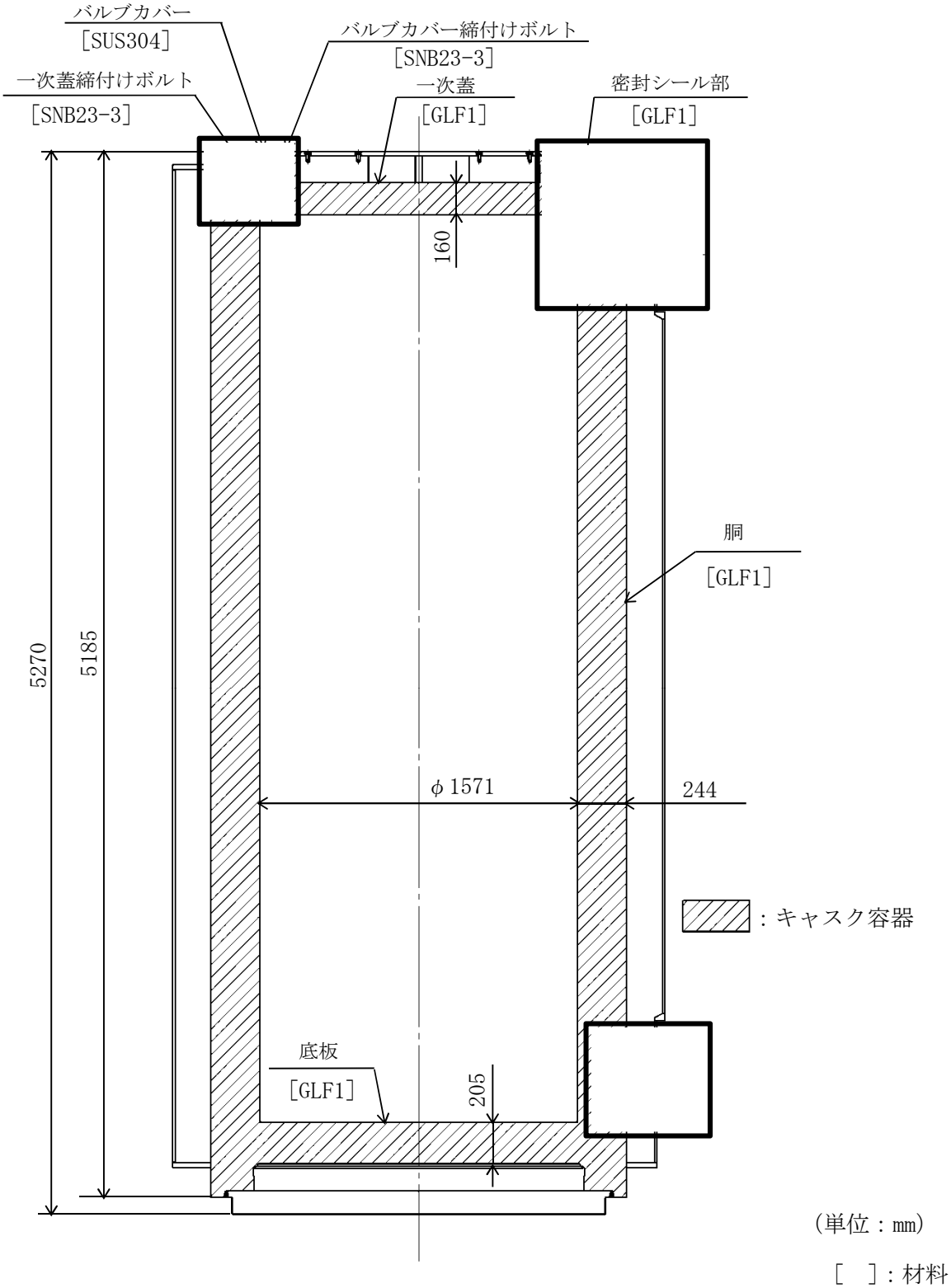
$$S_c = K \cdot S \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6.1)$$

ここで，S_c：貫通孔部の応力強さ（MPa）

K　：応力集中係数（＝4.0（引用文献(9)参照））

S　：貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ（MPa）

貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ（S）と貫通孔部の応力強さ（S_c）は表6－1に示す通りとなり，すべて許容応力を満足するため，貫通孔の補強は不要となる。



(単位：mm)

[ ]：材料

図 1－1　形状・寸法・材料

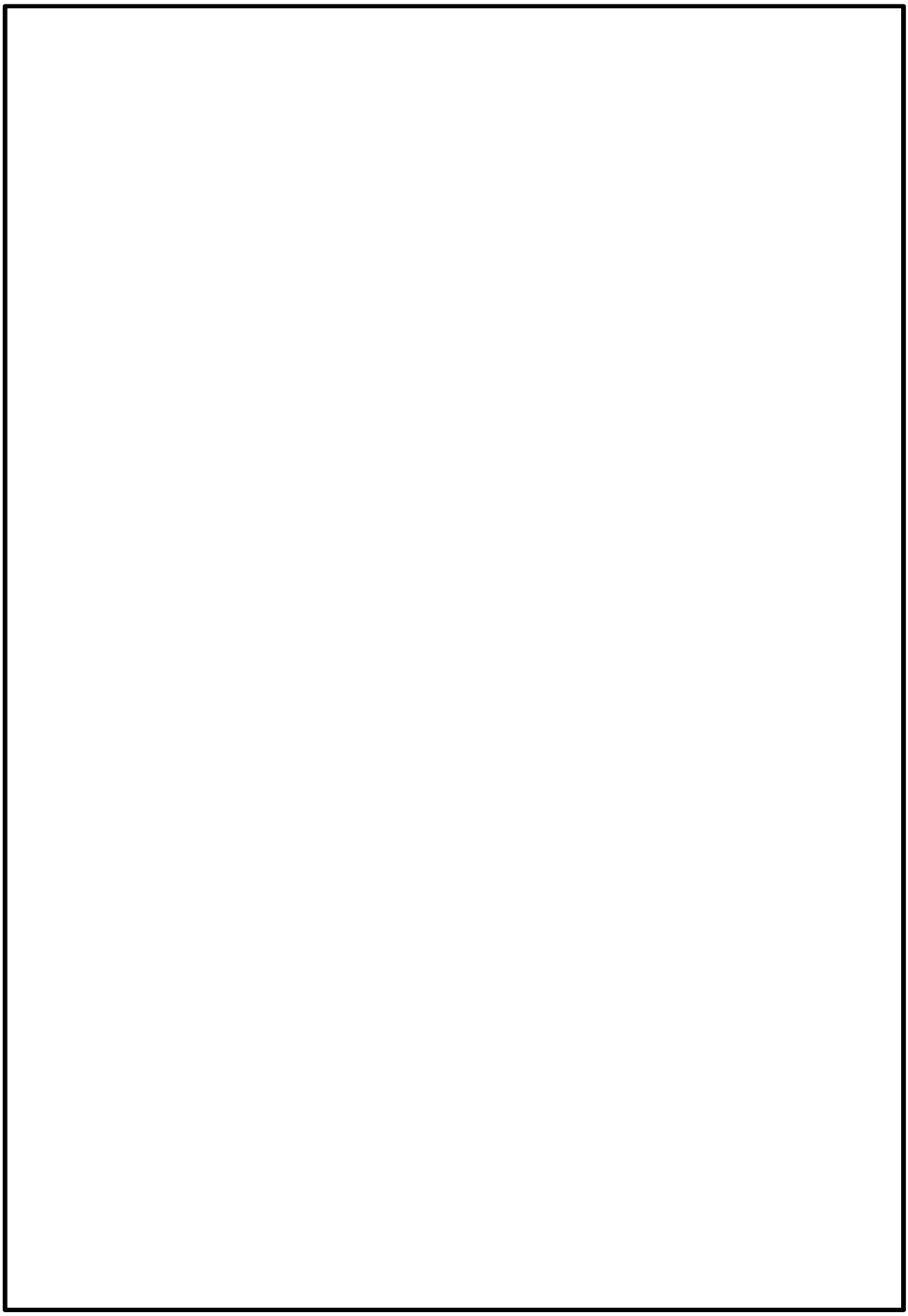
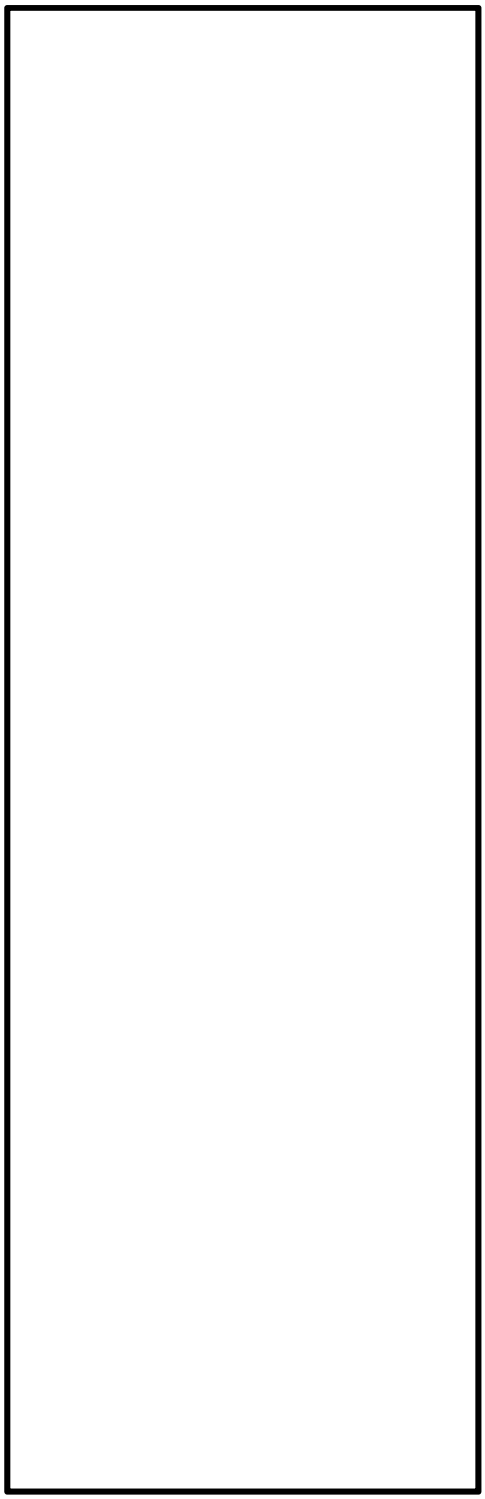
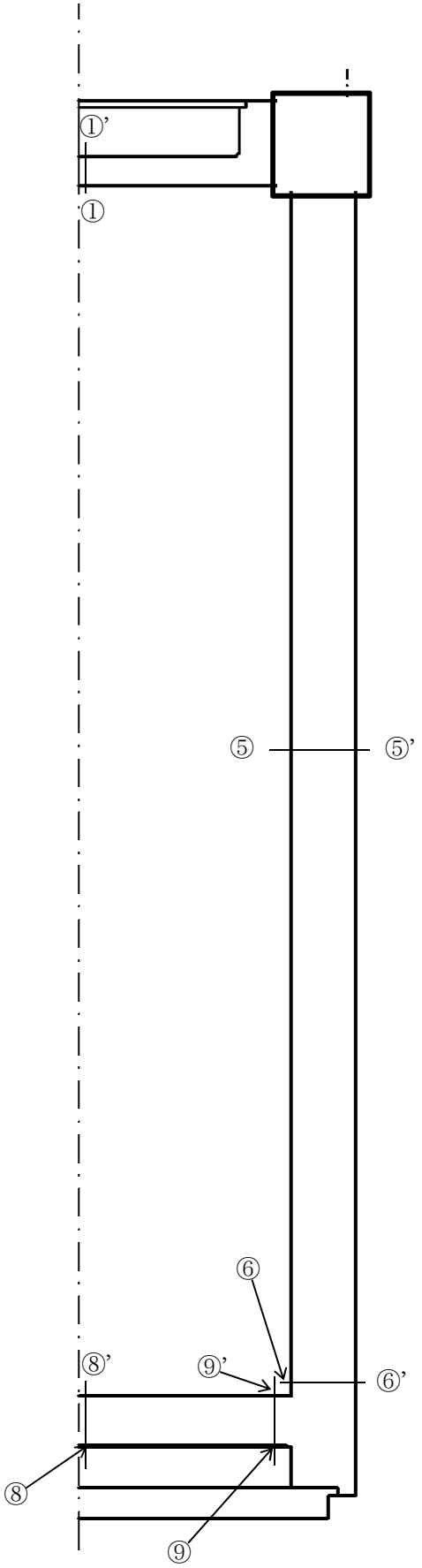


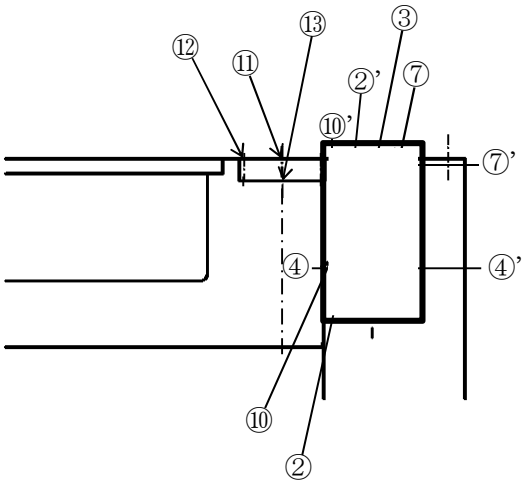
図 2－1　温度分布計算モデル



（単位：℃）

図 2－2　温度分布図（貯蔵時）





応力評価点	評価部位
①	一次蓋（中央）
②	一次蓋（端部）
③	一次蓋締付けボルト
④	胴（密封シール部）
⑤	胴（中央）
⑥	胴（下部）
⑦	胴（上端部）
⑧	底板（中央）
⑨	底板（端部）
⑩	一次蓋（密封シール部）
⑪	バルブカバー
⑫	バルブカバー締付けボルト
⑬	貫通孔部

図 3－1　キャスク容器の応力評価点（面）

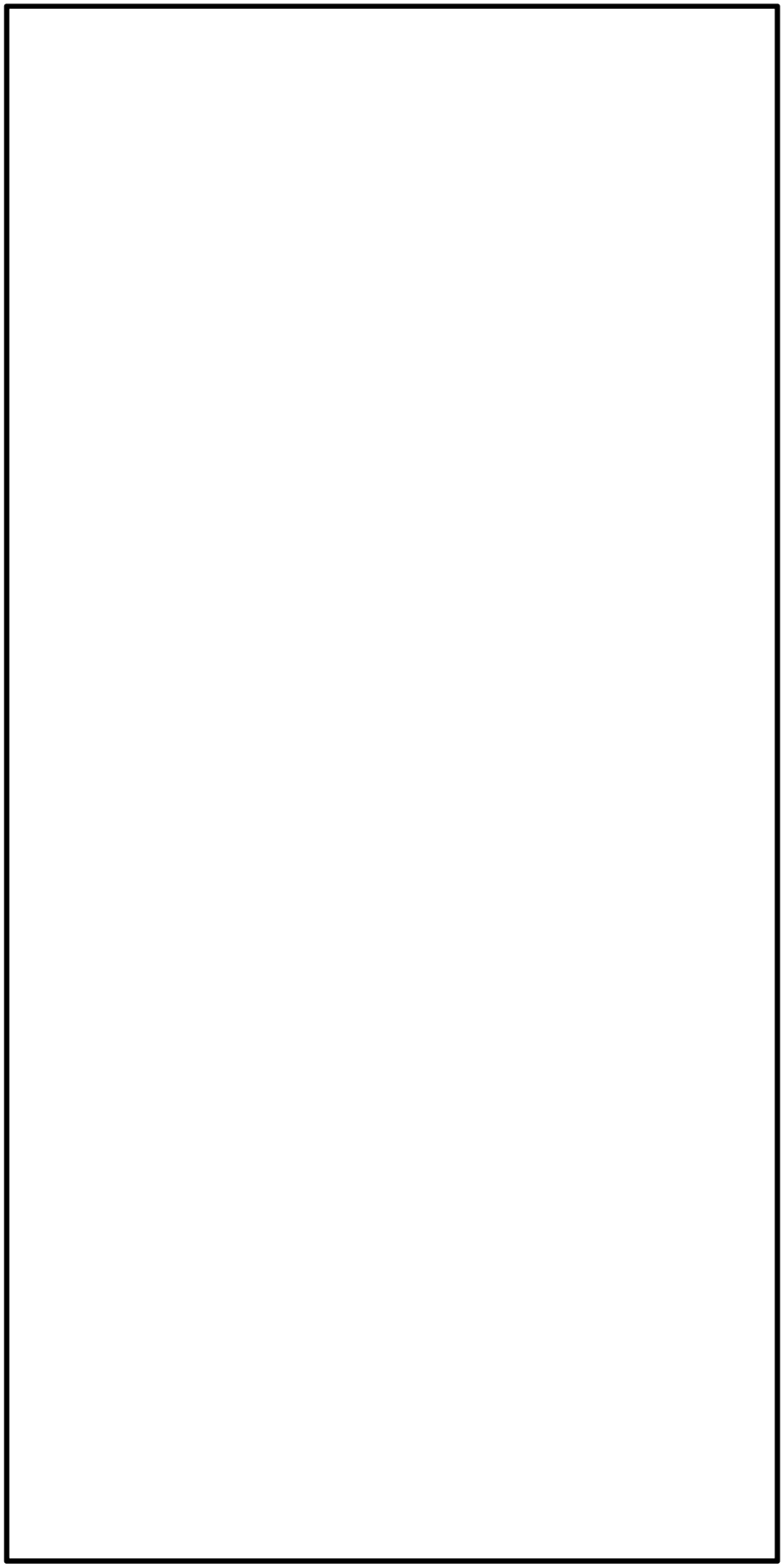


図 3－2　キャスク容器の解析モデル
（圧力＋ボルト初期締付け力作用時）

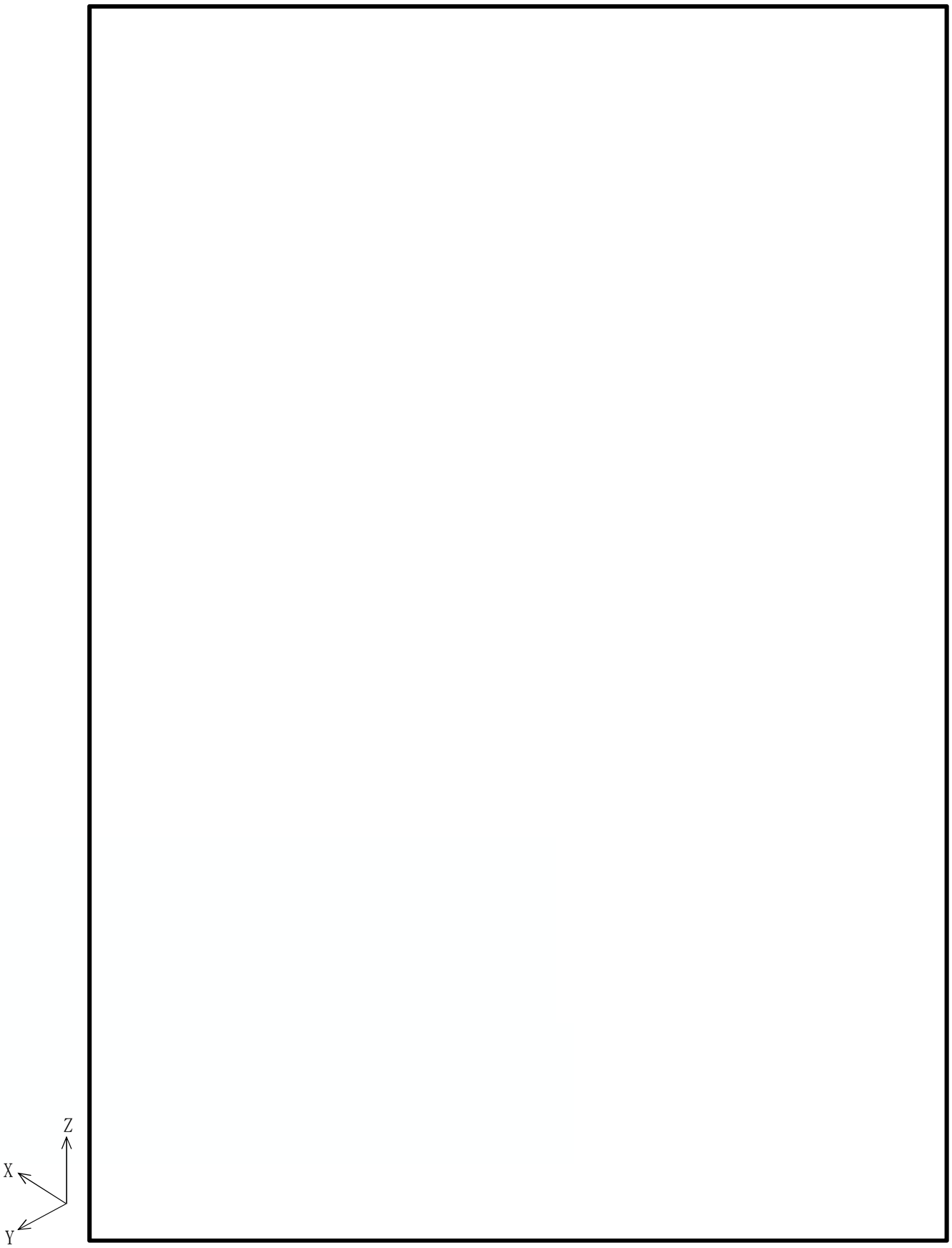


図 3－3　キャスク容器の解析モデル（地震時）

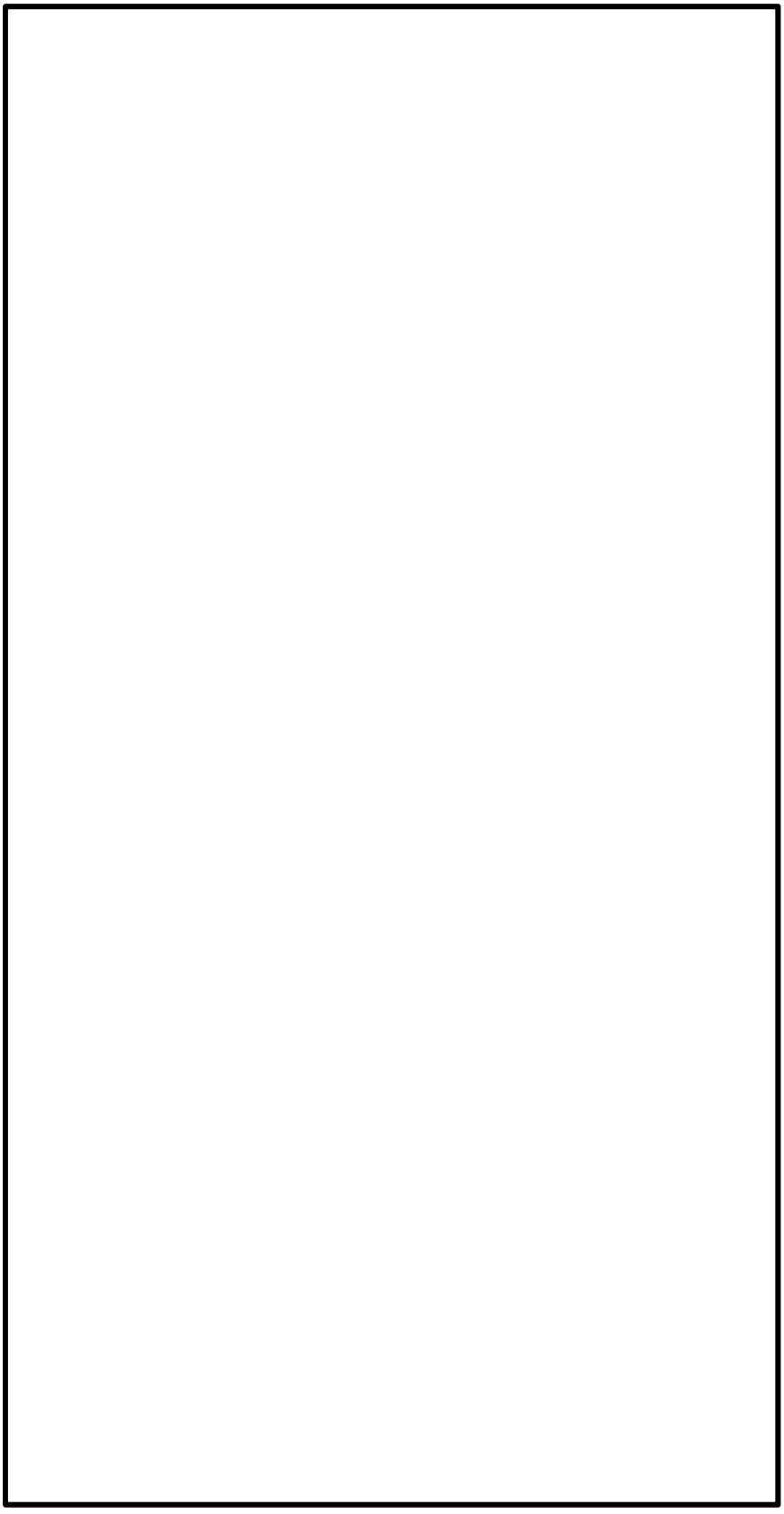


図 3－4　キャスク容器の解析モデル（熱荷重作用時）

表 1－1(1)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次局部膜応力強さ			一次膜＋一次曲げ応力強さ			一次＋二次応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
一次蓋	炭素鋼 (GLF1)	$I+S_d^*$	3	181	①-①’				42	271	②	28	362	②
		$I+S_s$	3	251	①-①’				42	377	②	28	362	②
胴	炭素鋼 (GLF1)	$I+S_d^*$	4	181	⑤-⑤’				27	271	⑥	123	362	⑥’
		$I+S_s$	4	251	⑤-⑤’				27	377	⑥	123	362	⑥’
底板	炭素鋼 (GLF1)	$I+S_d^*$	3	181	⑧-⑧’				11	271	⑨	45	362	⑨’
		$I+S_s$	3	251	⑧-⑧’				11	377	⑨	45	362	⑨’
密　封 シール部	炭素鋼 (GLF1)	$I+S_d^*$	10	181	⑩-⑩’				26	181	⑩	23	181	⑩
		$I+S_s$	10	181	⑩-⑩’				26	181	⑩	23	181	⑩

表 1－1(2)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　　位	材　料	設計事象	支圧応力		
			計算値	許容応力	評価点
底板	炭素鋼 (GLF1)	Ⅰ＋S_d^*	1	181	⑧’
		Ⅰ＋S_s	1	377	⑧’

表 1－1(3)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　　位	材　料	設計事象	平均引張応力			平均引張応力＋曲げ応力		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
一次蓋締付けボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	Ⅰ＋S_d^*	272	547	③	335	821	③
		Ⅰ＋S_s	272	820	③	335	820	③

表 2－1　熱伝達率の計算

ケース：貯蔵時

領域 *1	部　位	形状	温度 (K)	温度 (℃)	熱伝達率 *2 (W/(m²･K))
①	貯蔵容器 側面	垂直円筒	293	20	$1.55\times\Delta T^{1/3}$
			373	100	$1.31\times\Delta T^{1/3}$
			473	200	$1.11\times\Delta T^{1/3}$
②	貯蔵容器 上面	上向き 水平平板	293	20	$1.57\times\Delta T^{1/3}$
			373	100	$1.32\times\Delta T^{1/3}$
			473	200	$1.12\times\Delta T^{1/3}$
③	貯蔵容器 底面	下向き 水平平板	293	20	$0.546\times\Delta T^{1/5}$
			373	100	$0.534\times\Delta T^{1/5}$
			473	200	$0.523\times\Delta T^{1/5}$
④	貯蔵容器 下部外筒端板	下向き 水平平板	293	20	$0.907\times\Delta T^{1/5}$
			373	100	$0.888\times\Delta T^{1/5}$
			473	200	$0.869\times\Delta T^{1/5}$

注記　＊1：　図 2－1 参照

＊2：　熱伝達率は下記の式を用いて計算する。

$$R_a = \frac{G\cdot\beta\cdot\Delta T\cdot D^3\cdot P_r}{\nu^2}$$

$$h = 0.129\cdot\sqrt[3]{R_a}\cdot\frac{\lambda}{D}$$ （垂直円筒）*3

$$h = 0.13\cdot\sqrt[3]{R_a}\cdot\frac{\lambda}{D}$$ （上向き水平平板）*4

$$h = 0.6\cdot\sqrt[5]{R_a}\cdot\frac{\lambda}{D}$$ （下向き水平平板）*4

ここで　R_a　：レーレー数

G　：重力加速度（＝9.80665 m/s²）

β　：熱膨張係数（mm/（mm･℃））

ΔT　：周囲空気と表面の温度差（℃）

D　：代表長さ（m）

P_r　：プラントル数*4

ν　：動粘性係数（m²/s）*4

h　：熱伝達率（W/（m²･K））

λ　：熱伝導率（W/（m･K））*4

＊3：　引用文献(6)参照

＊4：　引用文献(1)参照

表 3－1　キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）（1／3）

（単位：MPa）

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
一次蓋（中央）	①	P_m	0.8	-0.2	0.7	1.3	0.0	0.0	3
		P_L+P_b	9.3	0.0	8.8	1.0	0.0	0.0	10
		P_L+P_b+Q*2	-1.6	0.0	-1.9	0.2	0.0	0.0	2
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	①’	P_m	0.8	-0.2	0.7	1.3	0.0	0.0	3
		P_L+P_b	-7.7	-0.4	-7.2	1.0	0.0	0.0	8
		P_L+P_b+Q*2	1.2	0.1	1.2	0.2	0.0	0.0	2
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
一次蓋（端部）	②	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	4.8	-33.9	-13.5	7.4	-2.8	0.1	42
		P_L+P_b+Q*2	10.9	-8.2	-5.6	8.1	-4.7	0.2	28
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	②’	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	-1.8	-21.9	-8.2	-13.0	-0.3	-0.6	33
		P_L+P_b+Q*2	7.0	0.2	2.6	7.7	1.2	-0.6	17
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
一次蓋締付けボルト	③	平均引張応力	271.9	－	－	－	－	－	272
		平均引張応力＋曲げ応力	335.0	－	－	－	－	－	335
胴（密封シール部）	④	P_m	-1.1	4.0	-0.2	0.8	0.0	0.1	6
		P_L+P_b	-9.1	6.4	-2.7	2.9	0.0	0.2	17
		P_L+P_b+Q	5.3	11.9	8.8	5.1	0.4	-0.3	12
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	④’	P_m	-1.1	4.0	-0.2	0.8	0.0	0.1	6
		P_L+P_b	6.9	1.7	2.3	-1.3	0.0	-0.1	6
		P_L+P_b+Q	5.7	-0.9	3.5	-3.1	-0.4	0.0	10
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－

注記　＊1：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　　：周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{\theta n}$　：せん断応力

＊2：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

表3－1　キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）（2／3）

（単位：MPa）

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴（中央）	⑤	P_m	0.4	-0.1	-3.2	-0.1	0.1	0.0	4
		P_L+P_b	－	－	－	－	－	－	－
		$P_L+P_b+Q^{*2}$	1.9	-0.3	-4.6	-0.2	0.1	-0.1	7
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑤’	P_m	0.4	-0.1	-3.2	-0.1	0.1	0.0	4
		P_L+P_b	－	－	－	－	－	－	－
		$P_L+P_b+Q^{*2}$	4.3	-0.1	1.8	-0.1	0.1	0.0	5
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
胴（下部）	⑥	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	-10.0	-7.4	-0.2	-13.2	-1.7	-1.4	27
		$P_L+P_b+Q^{*2}$	48.6	-35.2	12.1	-19.2	-1.3	0.6	93
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑥’	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	-10.0	-7.4	-0.2	-13.2	-1.7	-1.4	27
		$P_L+P_b+Q^{*2}$	-92.2	2.4	-12.5	-38.2	-6.2	-6.7	123
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
胴（上端部）	⑦	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	1.4	0.6	-0.6	-0.1	-0.1	0.0	2
		$P_L+P_b+Q^{*2}$	0.2	-0.3	-0.8	-0.1	-0.1	-0.1	1
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑦’	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	1.4	0.6	-0.6	-0.1	-0.1	0.0	2
		$P_L+P_b+Q^{*2}$	0.2	-0.3	1.2	0.3	-0.2	0.0	2
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－

注記　＊1：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　　：周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{\theta n}$　：せん断応力

＊2：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

表3－1　キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）（3／3）

（単位：MPa）

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
底板（中央）	⑧	P_m	-1.4	0.0	0.8	-0.3	0.0	0.0	3
		P_L+P_b	-3.8	-0.1	-2.3	0.0	0.0	0.0	4
		P_L+P_b+Q*2	-8.3	-0.3	-6.5	0.3	0.0	0.0	8
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑧’	P_m	-1.4	0.0	0.8	-0.3	0.0	0.0	3
		P_L+P_b	0.7	0.2	2.5	0.0	0.0	0.0	3
		P_L+P_b+Q*2	1.8	0.7	5.0	0.3	0.0	0.1	5
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	0.2	－	－	－	－	－	1
底板（端部）	⑨	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	-6.5	3.0	1.7	-2.7	-0.3	-0.4	11
		P_L+P_b+Q*2	-26.3	-21.6	-9.4	18.5	-1.0	0.5	38
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑨’	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	-6.5	3.0	1.7	-2.7	-0.3	-0.4	11
		P_L+P_b+Q*2	-36.1	7.6	-2.6	-4.0	-0.9	-1.4	45
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	0.2	－	－	－	－	－	1
一次蓋（密封シール部）	⑩	P_m	-0.5	-9.1	-6.8	0.7	-1.1	-0.1	10
		P_L+P_b	2.4	-21.6	-9.1	3.6	-1.6	-0.5	26
		P_L+P_b+Q	-0.7	-23.2	-5.5	1.4	-0.7	0.1	23
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑩’	P_m	-0.5	-9.1	-6.8	0.7	-1.1	-0.1	10
		P_L+P_b	9.6	7.8	2.5	-2.3	-0.5	0.3	9
		P_L+P_b+Q	10.7	9.9	1.6	-3.0	-1.1	0.8	12
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－

注記　＊1：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　　：周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{\theta n}$　：せん断応力

＊2：S_d^*地震力のみによる全振幅について示す。

表3－2　キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（1／3）

（単位：MPa）

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
一次蓋（中央）	①	P_m	0.8	-0.2	0.7	1.3	0.0	0.0	3
		P_L+P_b	9.3	0.0	8.8	1.0	0.0	0.0	10
		P_L+P_b+Q*2	-1.6	0.0	-1.9	0.2	0.0	0.0	2
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	①’	P_m	0.8	-0.2	0.7	1.3	0.0	0.0	3
		P_L+P_b	-7.7	-0.4	-7.2	1.0	0.0	0.0	8
		P_L+P_b+Q*2	1.2	0.1	1.2	0.2	0.0	0.0	2
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
一次蓋（端部）	②	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	4.8	-33.9	-13.5	7.4	-2.8	0.1	42
		P_L+P_b+Q*2	10.9	-8.2	-5.6	8.1	-4.7	0.2	28
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	②’	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	-1.8	-21.9	-8.2	-13.0	-0.3	-0.6	33
		P_L+P_b+Q*2	7.0	0.2	2.6	7.7	1.2	-0.6	17
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
一次蓋締付けボルト	③	平均引張応力	271.9	－	－	－	－	－	272
		平均引張応力＋曲げ応力	335.0	－	－	－	－	－	335
胴（密封シール部）	④	P_m	-1.1	4.0	-0.2	0.8	0.0	0.1	6
		P_L+P_b	-9.1	6.4	-2.7	2.9	0.0	0.2	17
		P_L+P_b+Q	5.3	11.9	8.8	5.1	0.4	-0.3	12
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	④’	P_m	-1.1	4.0	-0.2	0.8	0.0	0.1	6
		P_L+P_b	6.9	1.7	2.3	-1.3	0.0	-0.1	6
		P_L+P_b+Q	5.7	-0.9	3.5	-3.1	-0.4	0.0	10
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－

注記　＊1：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　　：周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{\theta n}$　：せん断応力

＊2：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表3－2　キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2／3）

（単位：MPa）

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴（中央）	⑤	P_m	0.4	-0.1	-3.2	-0.1	0.1	0.0	4
		P_L+P_b	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b+Q*2	1.9	-0.3	-4.6	-0.2	0.1	-0.1	7
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑤’	P_m	0.4	-0.1	-3.2	-0.1	0.1	0.0	4
		P_L+P_b	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b+Q*2	4.3	-0.1	1.8	-0.1	0.1	0.0	5
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
胴（下部）	⑥	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	-10.0	-7.4	-0.2	-13.2	-1.7	-1.4	27
		P_L+P_b+Q*2	48.6	-35.2	12.1	-19.2	-1.3	0.6	93
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑥’	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	-10.0	-7.4	-0.2	-13.2	-1.7	-1.4	27
		P_L+P_b+Q*2	-92.2	2.4	-12.5	-38.2	-6.2	-6.7	123
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
胴（上端部）	⑦	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	1.4	0.6	-0.6	-0.1	-0.1	0.0	2
		P_L+P_b+Q*2	0.2	-0.3	-0.8	-0.1	-0.1	-0.1	1
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－
	⑦’	P_L	－	－	－	－	－	－	－
		P_L+P_b	1.4	0.6	-0.6	-0.1	-0.1	0.0	2
		P_L+P_b+Q*2	0.2	-0.3	1.2	0.3	-0.2	0.0	2
		σ_s	－	－	－	－	－	－	－
		σ_p	－	－	－	－	－	－	－

注記　*1：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　　：周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{\theta n}$　：せん断応力

*2：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表3－2　キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（3／3）

（単位：MPa）

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
底板（中央）	⑧	P_m	-1.4	0.0	0.8	-0.3	0.0	0.0	3
		P_L+P_b	-3.8	-0.1	-2.3	0.0	0.0	0.0	4
		P_L+P_b+Q*2	-8.3	-0.3	-6.5	0.3	0.0	0.0	8
		σ_s	—	—	—	—	—	—	—
		σ_p	—	—	—	—	—	—	—
	⑧’	P_m	-1.4	0.0	0.8	-0.3	0.0	0.0	3
		P_L+P_b	0.7	0.2	2.5	0.0	0.0	0.0	3
		P_L+P_b+Q*2	1.8	0.7	5.0	0.3	0.0	0.1	5
		σ_s	—	—	—	—	—	—	—
		σ_p	0.2	—	—	—	—	—	1
底板（端部）	⑨	P_L	—	—	—	—	—	—	—
		P_L+P_b	-6.5	3.0	1.7	-2.7	-0.3	-0.4	11
		P_L+P_b+Q*2	-26.3	-21.6	-9.4	18.5	-1.0	0.5	38
		σ_s	—	—	—	—	—	—	—
		σ_p	—	—	—	—	—	—	—
	⑨’	P_L	—	—	—	—	—	—	—
		P_L+P_b	-6.5	3.0	1.7	-2.7	-0.3	-0.4	11
		P_L+P_b+Q*2	-36.1	7.6	-2.6	-4.0	-0.9	-1.4	45
		σ_s	—	—	—	—	—	—	—
		σ_p	0.2	—	—	—	—	—	1
一次蓋（密封シール部）	⑩	P_m	-0.5	-9.1	-6.8	0.7	-1.1	-0.1	10
		P_L+P_b	2.4	-21.6	-9.1	3.6	-1.6	-0.5	26
		P_L+P_b+Q	-0.7	-23.2	-5.5	1.4	-0.7	0.1	23
		σ_s	—	—	—	—	—	—	—
		σ_p	—	—	—	—	—	—	—
	⑩’	P_m	-0.5	-9.1	-6.8	0.7	-1.1	-0.1	10
		P_L+P_b	9.6	7.8	2.5	-2.3	-0.5	0.3	9
		P_L+P_b+Q	10.7	9.9	1.6	-3.0	-1.1	0.8	12
		σ_s	—	—	—	—	—	—	—
		σ_p	—	—	—	—	—	—	—

注記　＊1：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　　：周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{\theta n}$　：せん断応力

＊2：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 4－1　キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）（1／2）

（単位：MPa）

部　　位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 （中央）	①－①’	P_m	3	251
	①	P_L+P_b	10	271
	①’	P_L+P_b	8	271
	①	$P_L+P_b+Q^*$	2	362
	①’	$P_L+P_b+Q^*$	2	362
一次蓋 （端部）	②	P_L+P_b	42	271
	②’	P_L+P_b	33	271
	②	$P_L+P_b+Q^*$	28	362
	②’	$P_L+P_b+Q^*$	17	362
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	272	547
		平均引張応力＋ 曲げ応力	335	821
胴 （密封シール部）	④－④’	P_m	6	181
	④	P_L+P_b	17	181
	④’	P_L+P_b	6	181
	④	P_L+P_b+Q	12	181
	④’	P_L+P_b+Q	10	181
胴 （中央）	⑤－⑤’	P_m	4	181
	⑤	$P_L+P_b+Q^*$	7	362
	⑤’	$P_L+P_b+Q^*$	5	362

注記　＊：S_d^*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4－1　キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）(2／2)

（単位：MPa）

部　　位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
胴 （下部）	⑥	P_L+P_b	27	271
	⑥’	P_L+P_b	27	271
	⑥	$P_L+P_b+Q^*$	93	362
	⑥’	$P_L+P_b+Q^*$	123	362
胴 （上端部）	⑦	P_L+P_b	2	271
	⑦’	P_L+P_b	2	271
	⑦	$P_L+P_b+Q^*$	1	362
	⑦’	$P_L+P_b+Q^*$	2	362
底板 （中央）	⑧－⑧’	P_m	3	181
	⑧’	σ_p	1	181
	⑧	P_L+P_b	4	271
	⑧’	P_L+P_b	3	271
	⑧	$P_L+P_b+Q^*$	8	362
	⑧’	$P_L+P_b+Q^*$	5	362
底板 （端部）	⑨’	σ_p	1	181
	⑨	P_L+P_b	11	271
	⑨’	P_L+P_b	11	271
	⑨	$P_L+P_b+Q^*$	38	362
	⑨’	$P_L+P_b+Q^*$	45	362
一次蓋 （密封シール部）	⑩－⑩’	P_m	10	181
	⑩	P_L+P_b	26	181
	⑩’	P_L+P_b	9	181
	⑩	P_L+P_b+Q	23	181
	⑩’	P_L+P_b+Q	12	181

注記　＊：S_d^*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4－2　キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（1／2）

（単位：MPa）

部　　位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 （中央）	①－①’	P_m	3	251
	①	P_L+P_b	10	377
	①’	P_L+P_b	8	377
	①	$P_L+P_b+Q^*$	2	362
	①’	$P_L+P_b+Q^*$	2	362
一次蓋 （端部）	②	P_L+P_b	42	377
	②’	P_L+P_b	33	377
	②	$P_L+P_b+Q^*$	28	362
	②’	$P_L+P_b+Q^*$	17	362
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	272	820
		平均引張応力＋ 曲げ応力	335	820
胴 （密封シール部）	④－④’	P_m	6	181
	④	P_L+P_b	17	181
	④’	P_L+P_b	6	181
	④	P_L+P_b+Q	12	181
	④’	P_L+P_b+Q	10	181
胴 （中央）	⑤－⑤’	P_m	4	251
	⑤	$P_L+P_b+Q^*$	7	362
	⑤’	$P_L+P_b+Q^*$	5	362

注記　＊：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4－2　キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2／2）

（単位：MPa）

部　　位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
胴 （下部）	⑥	P_L+P_b	27	377
	⑥’	P_L+P_b	27	377
	⑥	$P_L+P_b+Q^*$	93	362
	⑥’	$P_L+P_b+Q^*$	123	362
胴 （上端部）	⑦	P_L+P_b	2	377
	⑦’	P_L+P_b	2	377
	⑦	$P_L+P_b+Q^*$	1	362
	⑦’	$P_L+P_b+Q^*$	2	362
底板 （中央）	⑧－⑧’	P_m	3	251
	⑧’	σ_p	1	377
	⑧	P_L+P_b	4	377
	⑧’	P_L+P_b	3	377
	⑧	$P_L+P_b+Q^*$	8	362
	⑧’	$P_L+P_b+Q^*$	5	362
底板 （端部）	⑨’	σ_p	1	377
	⑨	P_L+P_b	11	377
	⑨’	P_L+P_b	11	377
	⑨	$P_L+P_b+Q^*$	38	362
	⑨’	$P_L+P_b+Q^*$	45	362
一次蓋 （密封シール部）	⑩－⑩’	P_m	10	181
	⑩	P_L+P_b	26	181
	⑩’	P_L+P_b	9	181
	⑩	P_L+P_b+Q	23	181
	⑩’	P_L+P_b+Q	12	181

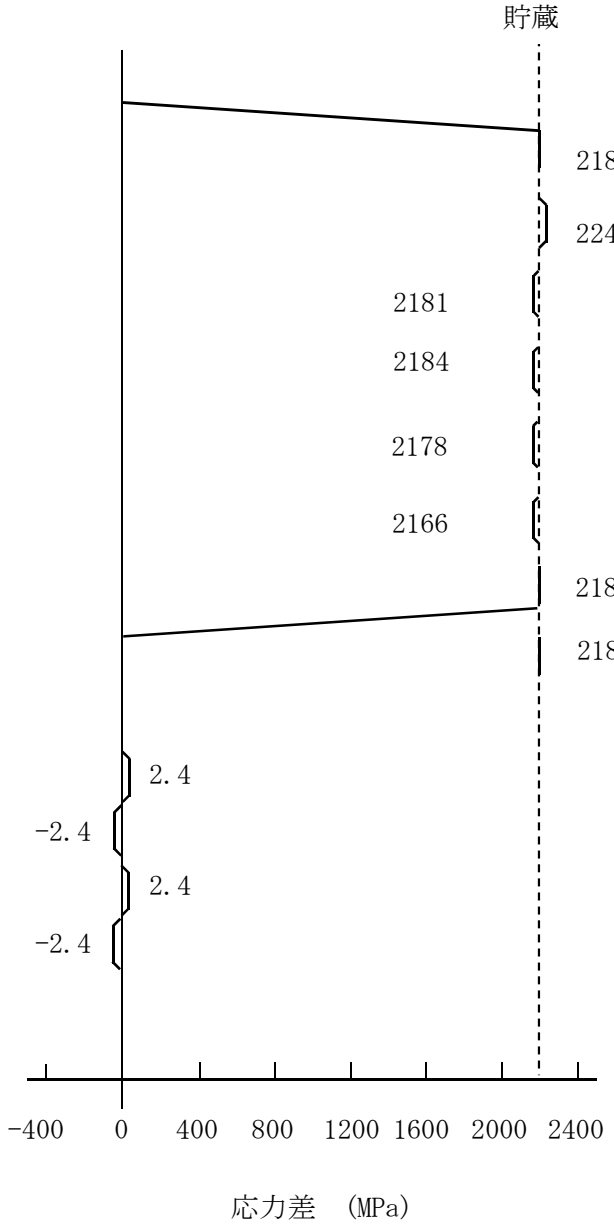
注記　＊：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5－1　キャスク容器（ボルトを除く。）の疲労解析不要の評価結果

「設計・建設規格」 PVB-3140	繰返し荷重		設定繰返し回数	評価値	許容値	評価
(6)	機械的荷重の変動	地震力	－	応力の全振幅 $\Delta\sigma_2$＝123 MPa	1×10^4回に対する許容繰返しピーク応力強さ S ＝262 MPa	$\Delta\sigma_2$＜Sであるので本条件に対する評価で考慮する必要がない。

表 5－2　応力差の変動（一次蓋締付けボルト）

No.	運転条件	運転条件	S_P(MPa)
1	C02-01	C00	2240
2	C02-01	C05-01	74
3	C02-01	C04-01	63
4	CSd	―	5
5	CSs	―	5



C01-01	ボルト取付け	100 回
C02-01	運搬（後方向加速度による場合）	400 回
C02-02	運搬（前方向加速度による場合）	400 回
C03-01	吊上げ	2000 回
C04-01	輸送架台への衝突	3 回
C05-01	支持構造物への衝突	3 回
C06-01	ボルト取外し	100 回
C07-01	貯蔵	―
CSd	地震荷重 S_d^*	10000 回
CSs	地震荷重 S_s	10000 回
C00	応力零状態	

表 5－3　疲れ累積係数（一次蓋締付けボルト）

No.	S_P* (MPa)	S_ℓ (MPa)	S_ℓ' (MPa)	N_a	N_c	N_c/N_a
1	2240	1120	1274	240	100	0.4169
2	74	37	42	457725	3	0.0000
3	63	31	36	1000000	3	0.0000
疲れ累積係数　Un＝0.4169						
4	5	2	3	1000000	10000	0.0100
疲れ累積係数　USd＝0.0100						
5	5	2	3	1000000	10000	0.0100
疲れ累積係数　USs＝0.0100						
疲れ累積係数　Uf＝Un＋USs＝0.4269						

注記　＊：S_Pは表 5－2 による。

表 5－4　応力差の変動（バルブカバー締付けボルト）

No.	運転条件	運転条件	S_P(MPa)
1	C02-01	C00	1762
2	C02-01	C05-01	2
3	CSd	－	0
4	CSs	－	0

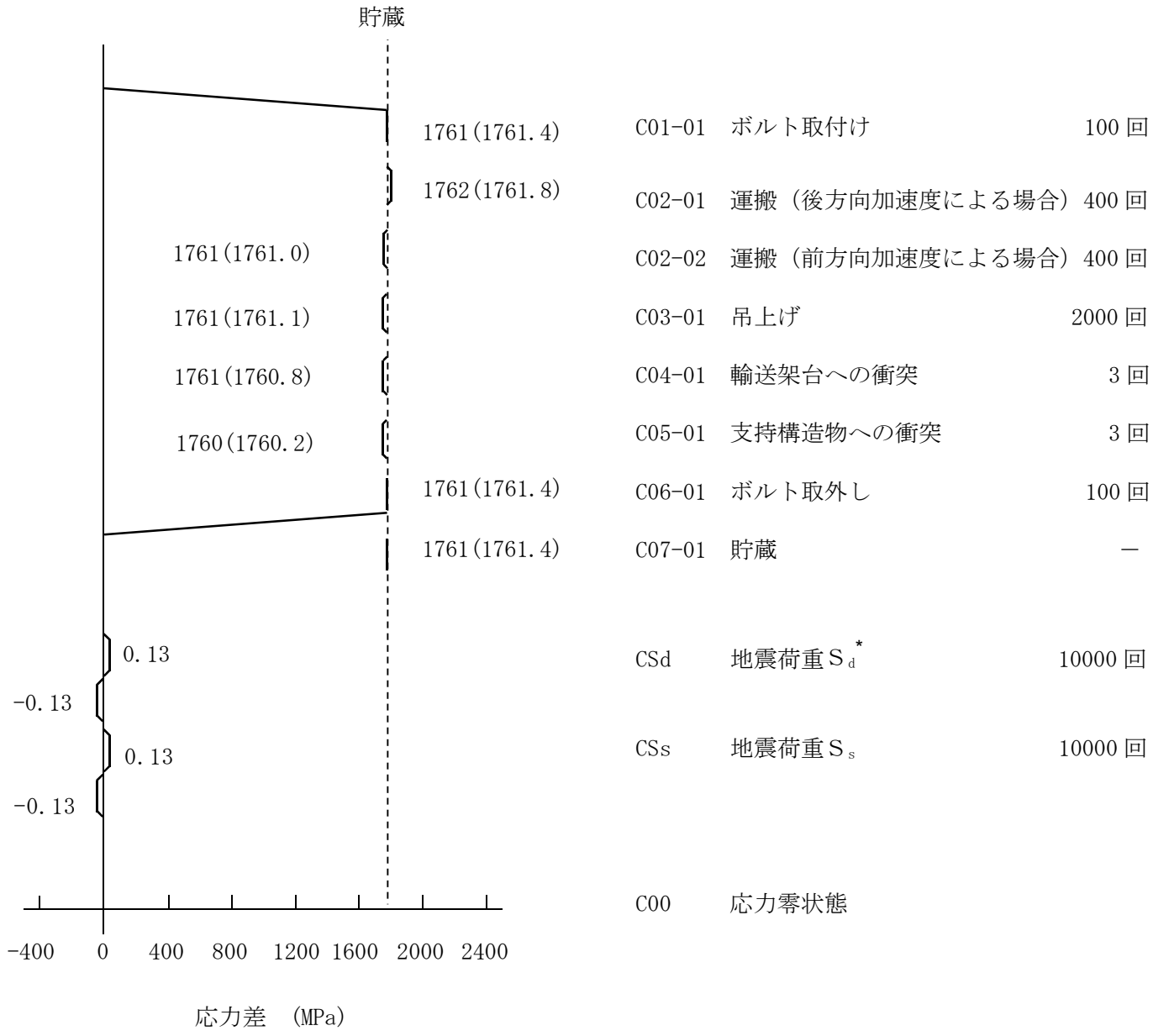


表 5－5　疲れ累積係数（バルブカバー締付けボルト）

No.	S_P* (MPa)	S_ℓ (MPa)	S_ℓ' (MPa)	N_a	N_c	N_c/N_a
1	1762	881	1002	367	100	0.2728
2	2	1	1	100000	3	0.0000
疲れ累積係数　Un＝0.2728						
3	0	0	0	1000000	10000	0.0100
疲れ累積係数　USd＝0.0100						
4	0	0	0	1000000	10000	0.0100
疲れ累積係数　USs＝0.0100						
疲れ累積係数　Uf＝Un＋USs＝0.2828						

注記　＊：S_Pは表 5－4 による。

表 6－1　貫通孔部の応力強さ

（単位：MPa）

設計事象	応力評価点	応力分類	貫通孔を無視した場合の応力強さ（S）	貫通孔部の応力（S_c）	許容応力
$I+S_d^*$	⑬	P_L+P_b	7	29	271
	⑬	P_L+P_b+Q	7	27	362
$I+S_s$	⑬	P_L+P_b	7	29	377
	⑬	P_L+P_b+Q	7	27	362

補足資料

キャスク容器の応力解析の方針

目次

1. 概要 ····· 補-4
2. 適用基準 ····· 補-4
3. 記号 ····· 補-5
3.1 記号の説明 ····· 補-5
4. 設計条件 ····· 補-7
4.1 基本仕様 ····· 補-7
4.2 燃料条件 ····· 補-7
4.3 荷重の種類とその組合せ ····· 補-7
5. 計算条件 ····· 補-8
5.1 解析対象とする事象 ····· 補-8
5.2 解析箇所 ····· 補-8
5.3 形状及び寸法 ····· 補-8
5.4 物性値 ····· 補-8
5.5 許容応力 ····· 補-8
6. 応力解析の手順 ····· 補-11
6.1 解析手順の概要 ····· 補-11
6.2 荷重条件の選定 ····· 補-11
6.3 温度分布計算 ····· 補-11
6.3.1 温度分布計算の方法 ····· 補-11
6.4 応力計算と評価 ····· 補-11
6.4.1 応力計算の方法 ····· 補-11
6.4.2 応力評価 ····· 補-12
6.4.3 数値の丸め方 ····· 補-13
7. 引用文献 ····· 補-14

図表目次

補図 5－1　キャスク容器の応力解析箇所 ····· 補-15
補図 6－1　キャスク容器の応力解析フロー図 ····· 補-17

補表 4－1　使用済燃料の条件 ····· 補-18
補表 4－2　キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ ····· 補-19
補表 5－1　代表事象 ····· 補-20
補表 5－2　温度分布計算に使用する材料の物性値 ····· 補-21
補表 5－3　温度分布計算に使用するふく射率 ····· 補-22
補表 5－4　熱応力計算に使用する材料の物性値 ····· 補-23
補表 6－1　キャスク容器用材料の許容応力値 ····· 補-24
補表 6－2　キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値 ····· 補-26
補表 6－3　数値の丸め方一覧表 ····· 補-27

1. 概要

本図書は,使用済燃料乾式貯蔵容器のキャスク容器に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

キャスク容器は放射性物質を貯蔵するという観点から，発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。））ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005/2007）（日本機械学会　2007 年 9 月）（以下「設計・建設規格」という。）の GNR-1210（機器等の区分）及び GNR-1220（機器等の定義）によりクラス 3 容器に相当すると考えられるが，熱荷重や取扱い時の衝撃荷重等，各種の荷重の作用が想定されることから，応力解析により発生応力を求めて評価をすることが必要であり，「解析による設計」の考え方が採用されているクラス 1 容器に準じて強度評価を行う。

3.　記号

3.1　記号の説明

本書及び応力計算書において，応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし，本文中に特記のある場合は，この限りでない。

なお，応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm^2
B	「設計・建設規格」付録材料図表　Part7　図2の縦軸のB値	－
C_H	水平方向設計震度	－
C_V	鉛直方向設計震度	－
E	縦弾性係数	MPa
G	重力加速度（＝9.80665）	m/s^2
G_1	水平方向加速度	m/s^2
G_2	鉛直方向加速度	m/s^2
K	応力集中係数	－
m	質量	kg
N_a	許容繰返し回数	回
N_c	繰返し回数	回
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_{do}	最高使用圧力（外圧）	MPa
P_L	一次局部膜応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	－
S_s	基準地震動S_sによる地震力	－
S_{12}	主応力差　　$\sigma_1-\sigma_2$	MPa
S_{23}	主応力差　　$\sigma_2-\sigma_3$	MPa
S_{31}	主応力差　　$\sigma_3-\sigma_1$	MPa
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
S_ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S_ℓ'	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
T_r	締付けトルク	N･mm
Uf	疲れ累積係数	－

計算書の記号	記号の説明	単位
α	熱膨張係数	mm/(mm・℃)
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{\theta n}$	せん断応力	MPa
$I+S_d^*$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用した場合の許容応力状態	－
$I+S_s$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用した場合の許容応力状態	－

4. 設計条件

キャスク容器は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用圧力	1.0 MPa
最高使用温度	170 ℃

4.2 燃料条件

使用済燃料乾式貯蔵容器の収納物である使用済燃料の条件を補表 4－1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを補表 4－2 に示す。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

補表 5－1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し，代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

キャスク容器の応力解析を行う箇所は，次の通りである（補図 5－1 参照)。

(1) 胴
(2) 底板
(3) 一次蓋
(4) 一次蓋締付けボルト
(5) バルブカバー
(6) バルブカバー締付けボルト
(7) 密封シール部

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

5.4 物性値

温度分布計算，応力計算及び疲れ解析の必要性検討に使用する材料の物性値は以下の通りである。

(1) 温度分布計算に使用する物性値を補表 5－2 及び補表 5－3 に示す。
なお，熱伝導率はその温度依存性を考慮する。
(2) 熱応力計算に使用する物性値を補表 5－4 に示す。
なお，熱応力計算に使用する物性値はその温度依存性を考慮する。
(3) 内圧及び機械的荷重による応力計算に使用する物性値は，最高使用温度に対する値を用いる。なお，常温は 20 ℃とする。
(4) 物性値を温度補正して使用する場合には，補正方法を応力計算書に示す。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は，次に掲げる通りとする。

(1) キャスク容器（穴の周辺部及びボルトを除く。）にあっては，次によること。
a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは，「設計・建設規格」 PVB-3111(2)a.及び d.に定める値を超えないこと。
b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは，「設計・建設規格」 PVB-3111(3)a.及び c.に定める値を超えないこと。
c. 設計事象Ⅰの貯蔵時において，S_d^*又はS_s地震動のみによって生じる一次応力と二次応

力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて，その最大値と最小値の差は，「設計・建設規格」　PVB-3112 に定める値を超えないこと。

d. キャスク容器の胴にあっては設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて生じる応力解析による熱応力のサイクルにおいて，その最大値と最小値との差は「設計・建設規格」　PVB-3113 に定める値を超えないこと。

e. 設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて生じる応力の疲れ解析は，「設計・建設規格」　PVB-3114 に定める値を超えないこと。

f. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*又はS_s地震動のみによる応力の疲れ解析を行い，疲れ累積係数を求め，e.で求めた疲れ累積係数との和が 1.0 を超えないこと。

g. 純せん断荷重を受ける部分にあっては，a.及びb.の規定にかかわらず，平均せん断応力は，次の値を超えないこと。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_d^*地震力が作用する場合においては，「設計・建設規格」　付録材料図表　Part5　表 1 に定める値の 0.6 倍の値

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用する場合においては，「設計・建設規格」　付録材料図表　Part5　表 9 に定める値の 0.4 倍の値

h. 支圧荷重を受ける部分にあっては，平均支圧応力は，次の値を超えないこと。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_d^*地震力が作用する場合においては，「設計・建設規格」　PVB-3116(1)及び(2)に定める値

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用して生じる場合で，支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合は，「設計・建設規格」　付録材料図表　Part5　表 9 に定める値の 1.5 倍の値

(c) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用して生じる場合で，(b)以外の場合は，「設計・建設規格」　付録材料図表　Part5　表 9 に定める値

i. 密封シール部にあっては，次によること。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_d^*地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さは，「設計・建設規格」　PVB-3111(2)a.に定める値を超えないこと。また，一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ，並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さは，いずれも「設計・建設規格」　付録材料図表　Part5　表 8 に定める値を超えないこと。

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ，並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さは，いずれも「設計・建設規格」　付録材料図表　Part5　表 8 に定める値を超えないこと。

(2) ボルトにあっては，次によること。

a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_d^*地震力が作用する場合において生じる応力は，「設計・建設規格」　PVB-3121(2)に定める値を超えないこと。

b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用する場合において生じる応力は，次

に定める値を超えないこと。

(a) 軸方向に垂直な断面の平均引張応力は,「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表 8 に定める値

(b) (a)に規定する平均引張応力と曲げ応力の和は,ボルトの断面の外周において,「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表 8 に定める値

c. 設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて生じる応力の疲れ解析は,「設計・建設規格」 PVB-3122 によること。

d. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において,S_d^*又はS_s地震動のみによる応力の疲れ解析を行い,疲れ累積係数を求め,c.で求めた疲れ累積係数との和が 1.0 を超えないこと。

(3) 疲れ解析において使用する疲れ強度減少係数及び応力集中係数は「設計・建設規格」 PVB-3130 に定めるものによる。

(4) (1)及び(2)において,繰返し荷重が「設計・建設規格」 PVB-3140(1)から(6)までの規定に適合するときは,疲れ解析を行うことを要しない。

(5) (1)から(4)において,「設計・建設規格」の「供用状態Ａ」,「供用状態Ｂ」,「供用状態Ｃ」及び「供用状態Ｄ」は,それぞれ「設計事象Ⅰ」,「設計事象Ⅱ」,「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において,S_d^*地震力が作用して生じる場合」及び「設計事象Ⅰの状態において,S_s地震力が作用して生じる場合」と読み替える。

(6) キャスク容器に穴を設ける場合は,「設計・建設規格」 PVB-3500 の規定による。

許容応力は,最高使用温度に対する値を用いる。

6.　応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1　解析手順の概要

キャスク容器の応力解析フローを補図 6－1 に示す。

キャスク容器の応力解析は，想定される圧力荷重，機械的荷重及び熱荷重を基に，キャスク容器の実形状をモデル化し，解析コードであるＡＢＡＱＵＳ及び応力評価式を用いて行う。

ＡＢＡＱＵＳとは，有限要素法に基づく伝熱解析，応力解析の汎用解析コードである。

温度分布計算は，領域を小さなメッシュに分割し，各メッシュについての熱平衡方程式を立て，微小時間でステップごとの温度分布を順次求める方式によっている。

応力計算は，解析しようとする箇所を形状，材料等の不連続部で小さなメッシュに分割することによって行う。

6.2　荷重条件の選定

荷重条件は 4 章に示されているが，各部の計算においては，その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3　温度分布計算

6.3.1　温度分布計算の方法

(1)　計算を行う設計事象は，貯蔵容器の姿勢が縦置きの貯蔵時とする。

(2)　計算モデルは次の方針に従う。

a.　温度分布計算では，軸対称要素による解析モデル（以下「軸対称モデル」という。）を用いる。軸対称モデルは，キャスク容器，底部中性子遮へい体カバー（底部レジンカバー），二次蓋及び外筒の形状について対称性を考慮する。キャスク容器内面に伝わる熱流束の対称性を考慮し，バスケット及び使用済燃料を均質化して燃料有効長の部分を発熱させる。

レジン及び伝熱フィンについては均質体として扱うため，二次元平面要素によるモデルによりキャスク容器外面と外筒内面との温度を求め伝熱抵抗と等価な熱伝導率を与える。

b.　形状及び材料の不連続性を考慮して，温度計算のためメッシュ分割を行う。

c.　外表面からの放熱は自然対流及びふく射とする。

d.　モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

なお，境界には計算で求めた熱伝達率を考慮する。

(3)　計算コードを用いて，温度分布を計算する。

(4)　境界における熱伝達率，温度分布の計算結果を応力計算書に示す。

6.4　応力計算と評価

6.4.1　応力計算の方法

(1)　応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えるものは次の 3 つである。

a. 内圧

b. 機械的荷重

自重（燃料集合体含む貯蔵容器（二次蓋含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。），衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

c. 熱荷重

キャスク容器に生じる温度変化，温度勾配による荷重であって，温度分布計算の結果から得られるものをいう。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

a. モデル化に当たっては，キャスク容器及び底部中性子遮へい体カバーの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。

b. 解析モデルは原則として軸対称固体（連続体）要素による解析モデルとするが，荷重が局部的に作用する事象については，その局部的荷重による発生応力を評価するため三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

また，モデル化に当たり，対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

(3) 構造及び材料の不連続性を考慮して，応力評価点（面）をとる。評価点（面）は，計算書の形状図中に，番号〔例①〕で示す。

(4) 応力評価は，この応力評価点（面）について行う。

(5) 溶接部については，母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

6.4.2 応力評価

応力の計算結果は，「設計・建設規格」GNR-2130 による定義に従い，応力種類ごとに分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は下記の通りである。

σ_θ ： 円周方向応力

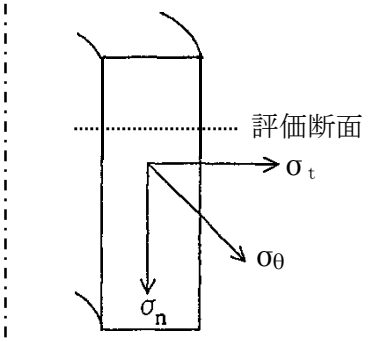
σ_n ： 評価断面に垂直な方向の応力

σ_t ： 評価断面に平行な方向の応力

$\tau_{\theta n}$ ： せん断応力

τ_{nt} ： せん断応力

$\tau_{t\theta}$ ： せん断応力



キャスク容器用材料の許容応力を補表 6－1～補表 6－2 に示す。

(1) キャスク容器（ボルトを除く。）の応力評価

キャスク容器の応力評価は，「設計・建設規格」PVB-3110 に従い，以下の項目を評価する。

a. 一次応力強さ

b. 一次＋二次応力強さ

c. 繰返し荷重の評価

d. 特別な応力の検討

(a) 純せん断応力の評価

(b) 支圧応力の評価

(c) 軸圧縮応力の評価

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は，「設計・建設規格」PVB-3120 に従い評価する。

6.4.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めず，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を補表 6－3 に示す。

7. 引用文献

文献番号は，本書及び応力計算書において共通である。

(1) 伝熱工学資料　改訂第4版，日本機械学会（1986）

(2) 機械工学便覧　新版，日本機械学会（1987）

(3) 伝熱工学資料　改訂第3版，日本機械学会（1975）

(4) 平成12年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験（金属キャスク貯蔵技術確証試験）報告書，(財)原子力発電技術機構

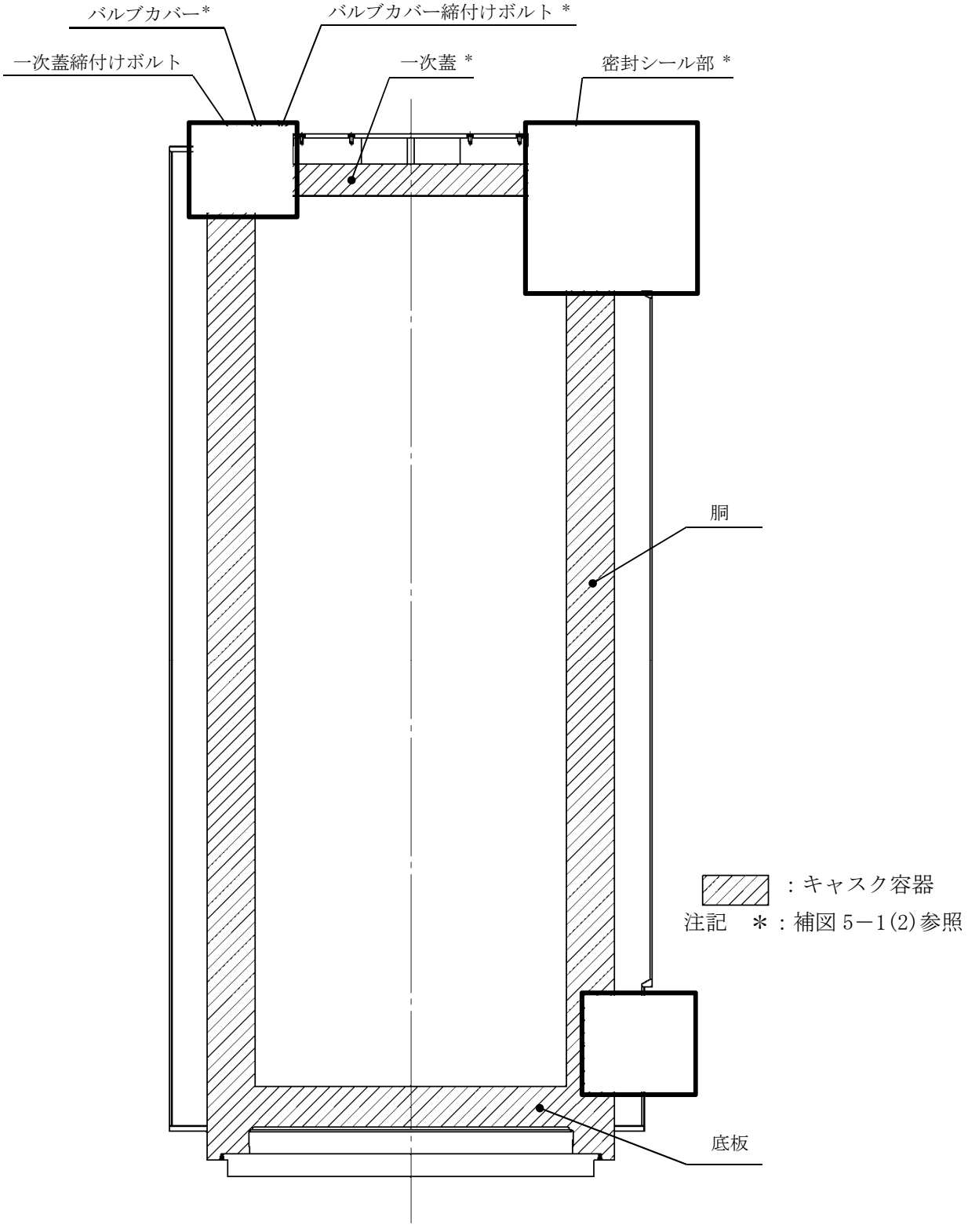
(5) Siegel, R., and Howell, J.R., “THERMAL RADIATION HEAT TRANSFER”, Second Edition, Hemisphere Publishing Corporation, New York, (1980)

(6) Jakob, M., “Heat Transfer”, Volume I, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1962)

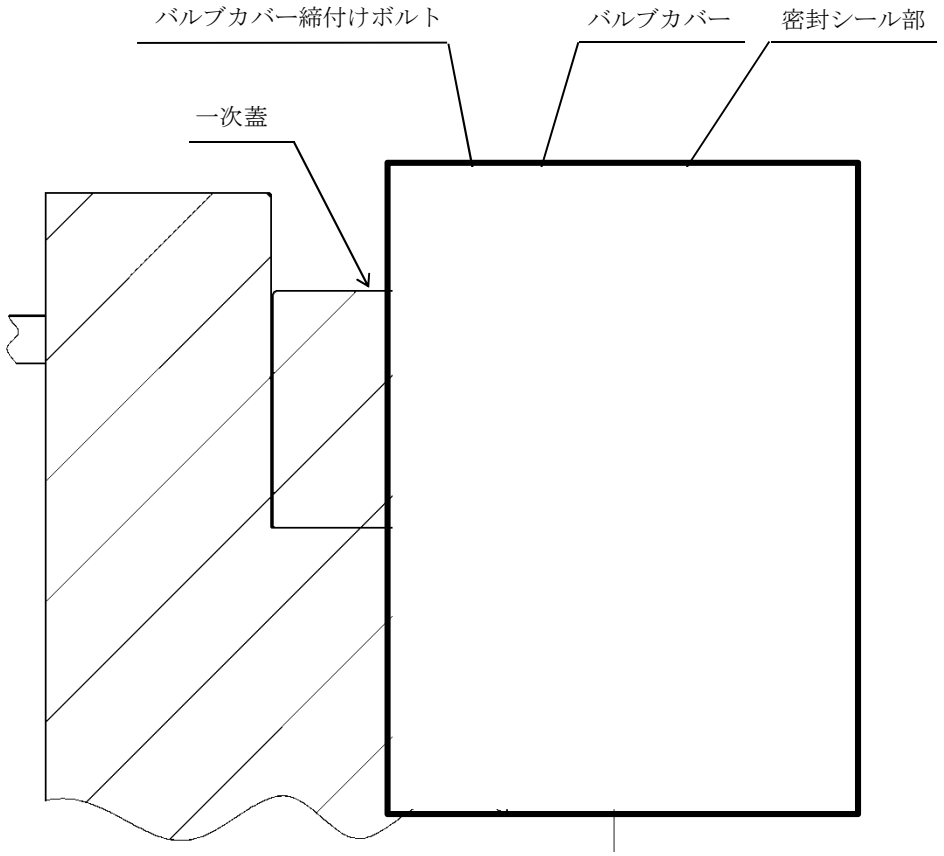
(7) “NS-4-FR FIRE RESISTANT NUETRON SHIELDING MATERIAL”, GENDEN ENGINEERING SERVICES & CONSTRUCTION COMPANY LTD.

(8) 化学工学便覧　第5版，化学工学協会（1988）

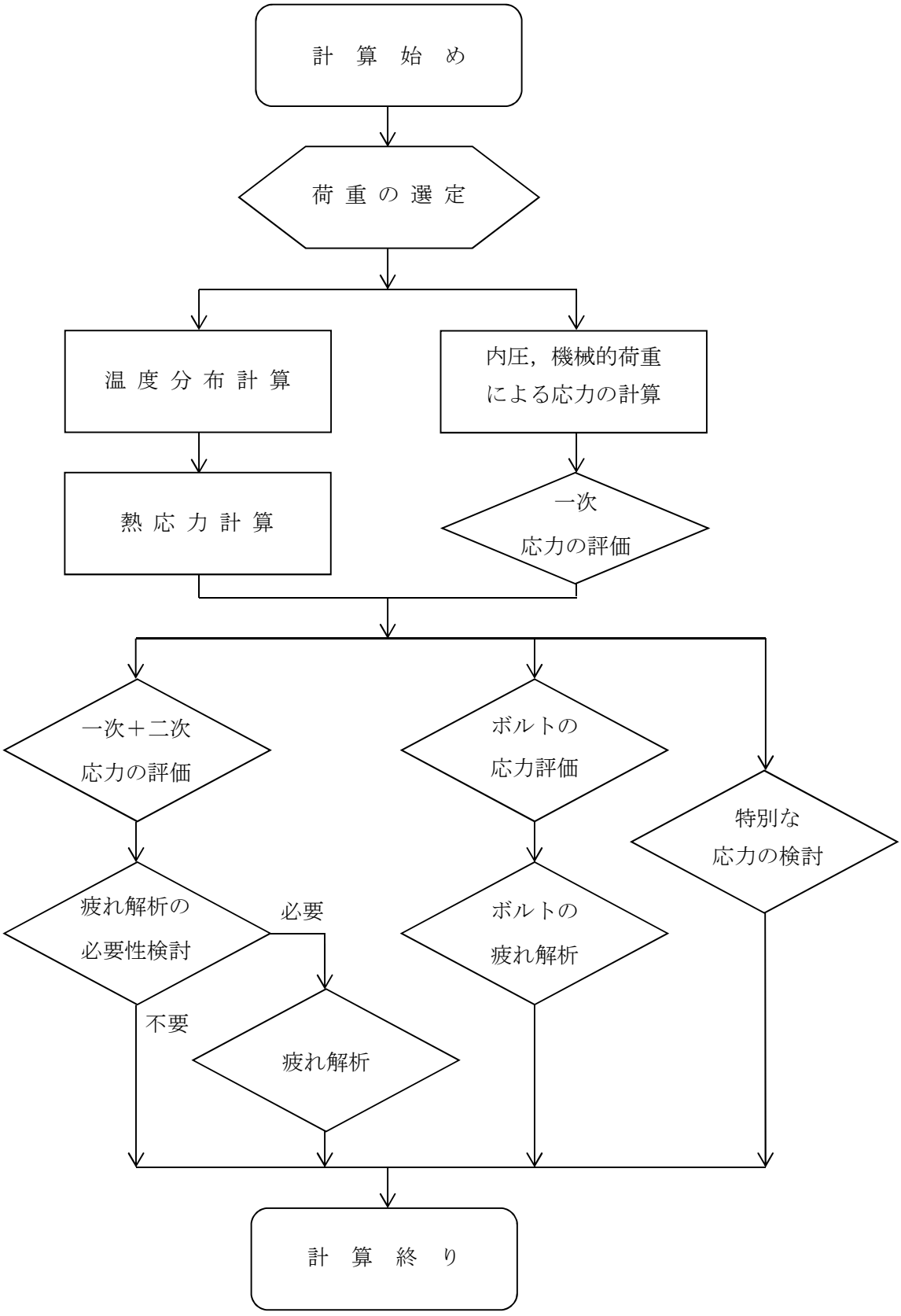
(9) 応力集中　増補版，西田正孝，森北出版（1973）



補図 5－1(1)　キャスク容器の応力解析箇所（全体断面図）



補図 5－1(2)　キャスク容器の応力解析箇所（一次蓋貫通部）



補図 6－1　キャスク容器の応力解析フロー図

補表 4－1　使用済燃料の条件

項目	燃料条件
対象燃料	高燃焼度 8×8 燃料*1
収納対数（体）	61
発熱量（kW）	17.1*2
姿勢	縦置き
周囲温度（℃）	45

注記　＊1：8×8 燃料，新型 8×8 燃料，新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料のうち最も厳しい発熱量となる高燃焼度 8×8 燃料について行う。

＊2：ＯＲＩＧＥＮ２コードより求めた。

補表 4－2　キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷重 / 設計事象	荷重時	圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付け力	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重	備考
							支持構造物への衝突 異常着床		
Ⅰ	貯蔵時	○	○	○	－	－	－	○	＊1

注記　＊1：支持構造物であるトラニオン固定ボルトの初期締付け力，S_d^*地震力及びS_s地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

補表 5－1　代表事象

設計事象	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
Ⅰ＋S_d^*	貯蔵時 （S_d^*地震力が作用する場合）	－	キャスク容器内圧：－0.1 MPa 蓋間圧力：□ MPa 自重 ボルト初期締付け力 地震力 水平方向：1.17G（＝11.48 m/s^2） 鉛直方向：0.65G（＝6.38 m/s^2） 熱荷重	－
Ⅰ＋S_s	貯蔵時 （S_s地震力が作用する場合）	－	キャスク容器内圧：－0.1 MPa 蓋間圧力：□ MPa 自重 ボルト初期締付け力 地震力 水平方向：1.17G（＝11.48 m/s^2） 鉛直方向：0.65G（＝6.38 m/s^2） 熱荷重	－

注記　＊1：本事象について応力解析を行う。

補表 5－2　温度分布計算に使用する材料の物性値

構成部材	材料	温度 (℃)	熱伝導率* (W/(m･K))
胴 一次蓋 二次蓋	炭素鋼(GLF1)	27 227	43.0 38.6
底部中性子遮へい体カバー 一次蓋リブ	炭素鋼(SGV480)		
外筒 一次蓋中性子遮へい体カバー 外筒端板 伝熱フィン	炭素鋼(SM400B)		
伝熱フィン	銅(C1020)	27 327	398 383
中性子遮へい体	レジン(NS-4-FR)	－	0.98
内部気体	ヘリウム	27 127 227 327	0.1527 0.1882 0.2212 0.2523
周囲気体	空気	27 127 227	0.02614 0.03305 0.03951

注記　＊：引用文献(1)参照。ただし，レジンは引用文献(4)参照。

補表 5－3　温度分布計算に使用するふく射率

構成部材	材料	ふく射率*
胴(内面溶射)	アルミニウム(粗面)	0.055
一次蓋(内面溶射)	アルミニウム(酸化面)	0.33
サポートシリンダ	ステンレス鋼(SUS304)	0.15
一次蓋(外面) 二次蓋(内面)	炭素鋼(SM400B, GLF1)	0.17
外筒(外面) 胴(外面) 二次蓋(外面) 底部中性子遮へい体カバー(外面)	塗装	0.8

注記　＊：引用文献(3)参照。ただし，塗装面は引用文献(1)参照。一次蓋の溶射面では保守的に酸化を考慮，値は引用文献(5)参照。

補表 5－4　熱応力計算に使用する材料の物性値

構成部材	材料	温度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm・℃))	ポアソン比 (－)
胴 一次蓋	炭素鋼 (GLF1)	20	203000	9.73	0.3
		50	201000	10.10	
		75	200000	10.39	
		100	198000	10.69	
		125	196000	11.00	
		150	195000	11.28	
		175	193000	11.56	
		200	191000	11.85	
バルブカバー	ステンレス鋼 (SUS304)	20	195000	15.21	0.3
		50	193000	15.49	
		75	191000	15.68	
		100	190000	15.87	
		125	188000	16.05	
		150	186000	16.21	
		175	184000	16.37	
		200	183000	16.52	
一次蓋締付け ボルト バルブカバー 締付けボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	20	192000	11.14	0.3
		50	189000	11.40	
		75	188000	11.62	
		100	186000	11.82	
		125	185000	12.00	
		150	184000	12.21	
		175	182000	12.37	
		200	180000	12.54	

補表 6－1　キャスク容器用材料の許容応力値（1／2）

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類	許容応力値			
		炭素鋼			
		密封シール部以外		密封シール部	
		GLF1	許容値基準	GLF1	許容値基準
$I+S_d^*$	一次一般膜応力強さ　P_m	181	Min $\{S_y, 2/3S_u\}$	181	Min $\{S_y, 2/3S_u\}$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ　P_L+P_b	271	Min $\{1.5S_y, S_u\}$	181	S_y
	一次＋二次応力強さ　P_L+P_b+Q*2	362	$3S_m$	181	S_y
	平均せん断応力　σ_s	72	$0.6S_m$		
	平均支圧応力　σ_p*1	181(271)	S_y $(1.5S_y)$		
$I+S_s$	一次一般膜応力強さ　P_m	251	$2/3S_u$	181	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ　P_L+P_b	377	S_u	181	S_y
	一次＋二次応力強さ　P_L+P_b+Q*2	362	$3S_m$	181	S_y
	平均せん断応力　σ_s	150	$0.4S_u$		
	平均支圧応力　σ_p*1	377(565)	S_u $(1.5S_u)$		

注記　＊1：（　）内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

＊2：S_d^*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

補表 6－1　キャスク容器用材料の許容応力値（2／2）

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類	許容応力値	
		ステンレス鋼	
		密封シール部以外	
		SUS304	許容値基準
$I+S_d^*$	一次一般膜応力強さ　P_m	160	$1.2S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ　P_L+P_b	240	$1.8S_m$
	一次＋二次応力強さ　P_L+P_b+Q *2	401	$3S_m$
	平均せん断応力　σ_s	80	$0.6S_m$
	平均支圧応力　σ_p *1	150（225）	S_y（$1.5S_y$）
$I+S_s$	一次一般膜応力強さ　P_m	276	Min {$2.4S_m$，$2/3S_u$}
	一次膜＋一次曲げ応力強さ　P_L+P_b	414	Min {$3.6S_m$，S_u}
	一次＋二次応力強さ　P_L+P_b+Q *2	401	$3S_m$
	平均せん断応力　σ_s	165	$0.4S_u$
	平均支圧応力　σ_p *1	414（621）	S_u（$1.5S_u$）

注記　＊1：（　）内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

＊2：S_d^*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

補表 6－2　キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類	許容応力値	
		低合金鋼	
		一次蓋締付けボルト バルブカバー締付けボルト	
		SNB23-3	許容値基準
$I+S_d^*$	平均引張応力	547	$2S_m$
	平均引張応力＋曲げ応力	821	$3S_m$
$I+S_s$	平均引張応力	820	S_y
	平均引張応力＋曲げ応力	820	S_y

補表 6－3　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	－	－	設計値
最高使用温度	℃	－	－	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
計算応力値*	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
長さ	mm	－	－	設計値
設計震度	－	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm^2	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角度	°	－	－	設計値
質量	kg	－	－	設計値
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

注記　＊：応力成分は，小数点以下第 2 位を四捨五入し，小数点以下第 1 位までの値を記載する。

Ⅴ-2-4-2-3 ②　二次蓋の応力計算書

目次

1. 一般事項 ····· 1
1.1 計算条件 ····· 1
1.2 記号の説明 ····· 3
1.3 数値の丸め方 ····· 4
2. 計算方法 ····· 5
2.1 固有周期の計算方法 ····· 5
2.2 応力の計算方法 ····· 5
3. 評価方法 ····· 9
3.1 設計震度の評価 ····· 9
3.2 応力の評価 ····· 9
4. 設計条件 ····· 11
5. 機器要目 ····· 11
6. 評価結果 ····· 12
7. 結論 ····· 15
7.1 固有周期 ····· 15
7.2 応力 ····· 15

図表目次

図 1－1　貯蔵容器の概略構造図 ····· 2
図 2－1　二次蓋の形状・寸法・材料と応力評価点（面）····· 7
図 2－2　計算モデル····· 8

表 1－1　数値の丸め方一覧表 ····· 4
表 2－1　応力計算に使用する材料の物性値 ····· 5
表 3－1　二次蓋の許容応力値 ····· 10
表 3－2　二次蓋締付けボルトの許容応力値 ····· 10
表 6－1　二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D＋P_d＋M_d＋S_d*の場合）····· 13
表 6－2　二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D＋P_d＋M_d＋S_Sの場合）····· 14

1. 一般事項

本計算書は，貯蔵容器のうち二次蓋の耐震性についての計算方法と計算結果を示す。

なお，二次蓋は，設計上，蓋方向への遮へい及び密封機能を有する部品であり，キャスク容器に取付けられる構造部材である。

1.1 計算条件

(1) 貯蔵容器は縦置きで支持する。

(2) 貯蔵容器の自重（内部を含む）を 4 個の下部トラニオンを介して支持構造物に固定する。

(3) 支持構造物はアンカーボルトで基礎に固定する。

(4) 二次蓋は二次蓋締付けボルトでキャスク容器に固定する。

(5) 概略構造図を図 1－1 に示す。

なお，キャスク容器とは，バスケット，二次蓋（ボルトを含む），トラニオン，支持構造物及びアンカーボルトを除く部材をいう。

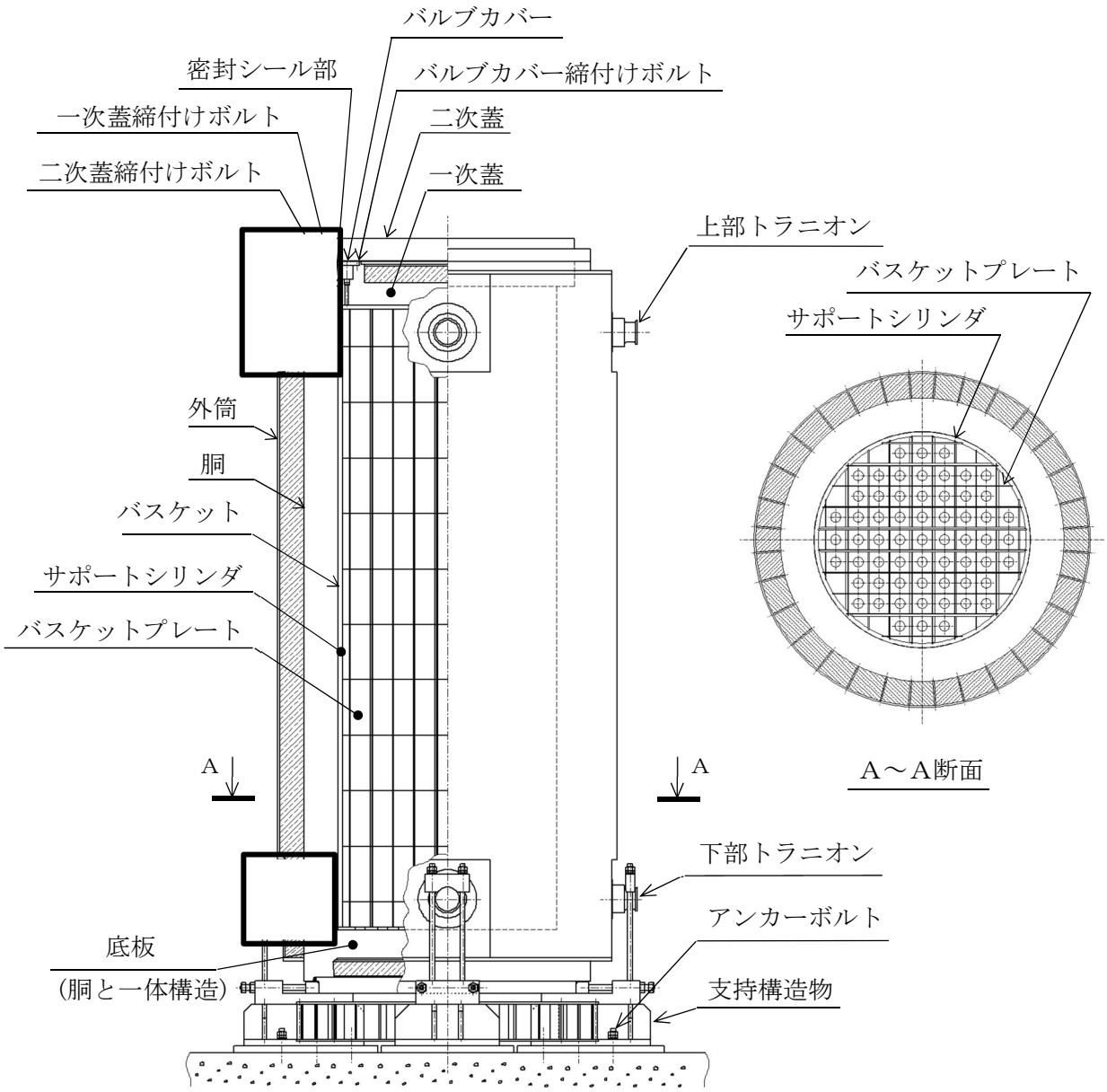


図 1－1　貯蔵容器の概略構造図

1.2　記号の説明

本書において，応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし，本文中に特記ある場合は，この限りでない。なお，記号の字体及び大きさについては，異なる場合がある。

記　号	記　号　の　説　明	単　位
C_H	水平方向設計震度	－
C_V	鉛直方向設計震度	－
D	死荷重	－
d_o	胴の外径	mm
d_i	胴の内径	mm
E	胴の縦弾性係数	MPa
I	胴の断面二次モーメント	mm^4
L	貯蔵容器の全長	mm
M	貯蔵容器（内部も含む）の総質量	kg
M_d	当該設備に設計上定められた機械的荷重	－
m	単位長さ当たりの質量	kg/mm
P_d	当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重	－
P_b	一次曲げ応力強さ	MPa
P_m	一次一般膜応力強さ	MPa
P_L	一次局部膜応力強さ	MPa
Q	二次応力	MPa
S	許容引張応力	MPa
S_d*	弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	－
S_S	基準地震動S_Sによる地震力	－
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
T	貯蔵容器の固有周期	s
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{\theta n}$	せん断応力	MPa
$I+S_d$*	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_d*地震力が作用した場合の許容応力状態	－
$I+S_S$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態においてS_s地震力が作用した場合の許容応力状態	－

1.3　数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めず，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

本計算書に表示する数値の丸め方を表1－1に示す。

表1－1　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単　位	処　理　桁	処　理　法	表示最小桁
最高使用温度	℃	－	－	設計値
最高使用圧力	MPa	－	－	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁
許容応力値	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数
計算応力値*	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数
長さ	mm	－	－	設計値
設計震度	－	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
質量	kg	－	－	設計値

注記　＊：応力成分は，小数点以下第2位を四捨五入し，小数点以下第1位までの値を記載する。

2. 計算方法

2.1 固有周期の計算方法

貯蔵容器を上端自由及び下端固定のはりでモデル化するものとして，固有周期（T）を次式で計算する。

$$T=\frac{2\cdot\pi\cdot L^2}{1.875^2}\cdot\sqrt{\frac{m}{1000\cdot E\cdot I}}$$

$$m=\frac{M}{L}$$

$$I=\frac{\pi}{64}\cdot\left(d_o{}^4-d_i{}^4\right)$$

ここで，

L ：貯蔵容器の全長（mm）
E ：胴の縦弾性係数（MPa）
I ：胴の断面二次モーメント（mm^4）
M ：貯蔵容器（内部も含む）の総質量（kg）
m ：単位長さ当たりの質量（kg/mm）
d_o ：胴の外径（mm）
d_i ：胴の内径（mm）

2.2 応力の計算方法

二次蓋及び二次蓋締付けボルトの応力の計算方法を以下に示す。

(1) 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料と応力評価点（面）を図2－1に示す。

(2) 物性値

応力計算に使用する材料の物性値を表2－1に示す。

表2－1 応力計算に使用する材料の物性値

部　位	材　料	温度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比 (－)
二次蓋	GLF1	100	198000	0.3
二次蓋締付けボルト	SNB23-3	100	186000	0.3

(3) 荷重

応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の4つである。

a. 最高使用圧力

b. ボルト初期締付け力

c. 死荷重

d. 地震力（水平方向設計震度（C_H），鉛直方向設計震度（C_v））

(4) 計算モデル

計算モデルは次の方針に従う。図2－2に計算モデルを示す。

a. モデル化に当たっては，荷重の対称性，二次蓋の形状の対称性を考慮する。

b. 解析モデルは三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

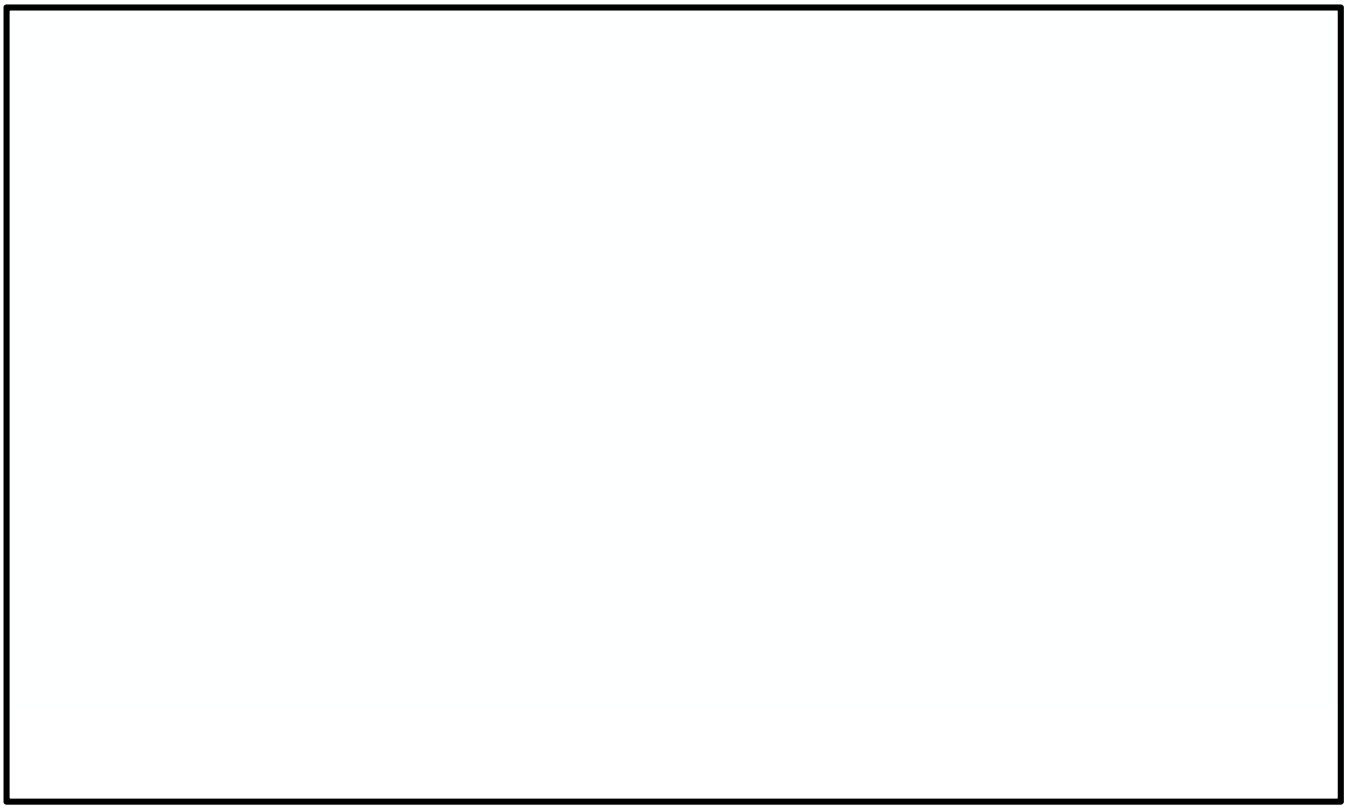
(5) 応力計算に使用する計算機コード

a. ＡＢＡＱＵＳ

有限要素法に基づく伝熱解析，応力解析の汎用解析コードである。

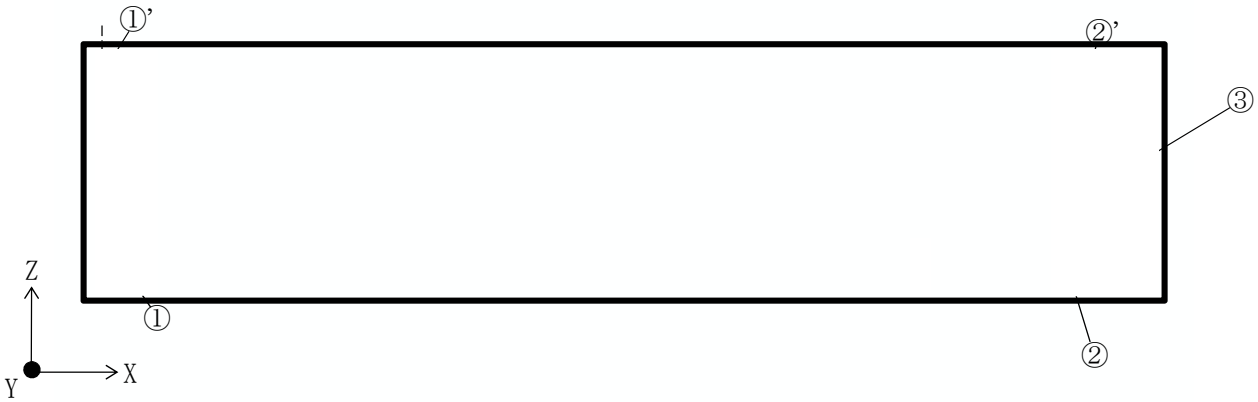
圧力荷重，機械的荷重及び熱荷重によって生じる形状の不連続部を含む応力の解析に使用する。

応力計算は，解析しようとする箇所を形状，材料等の不連続部で小さなメッシュに分割することによって行う。



寸法･形状･材料

①：二次蓋中央部
②：二次蓋端部
③：二次蓋締付けボルト



応力評価断面

図 2－1　二次蓋の形状・寸法・材料と応力評価点（面）

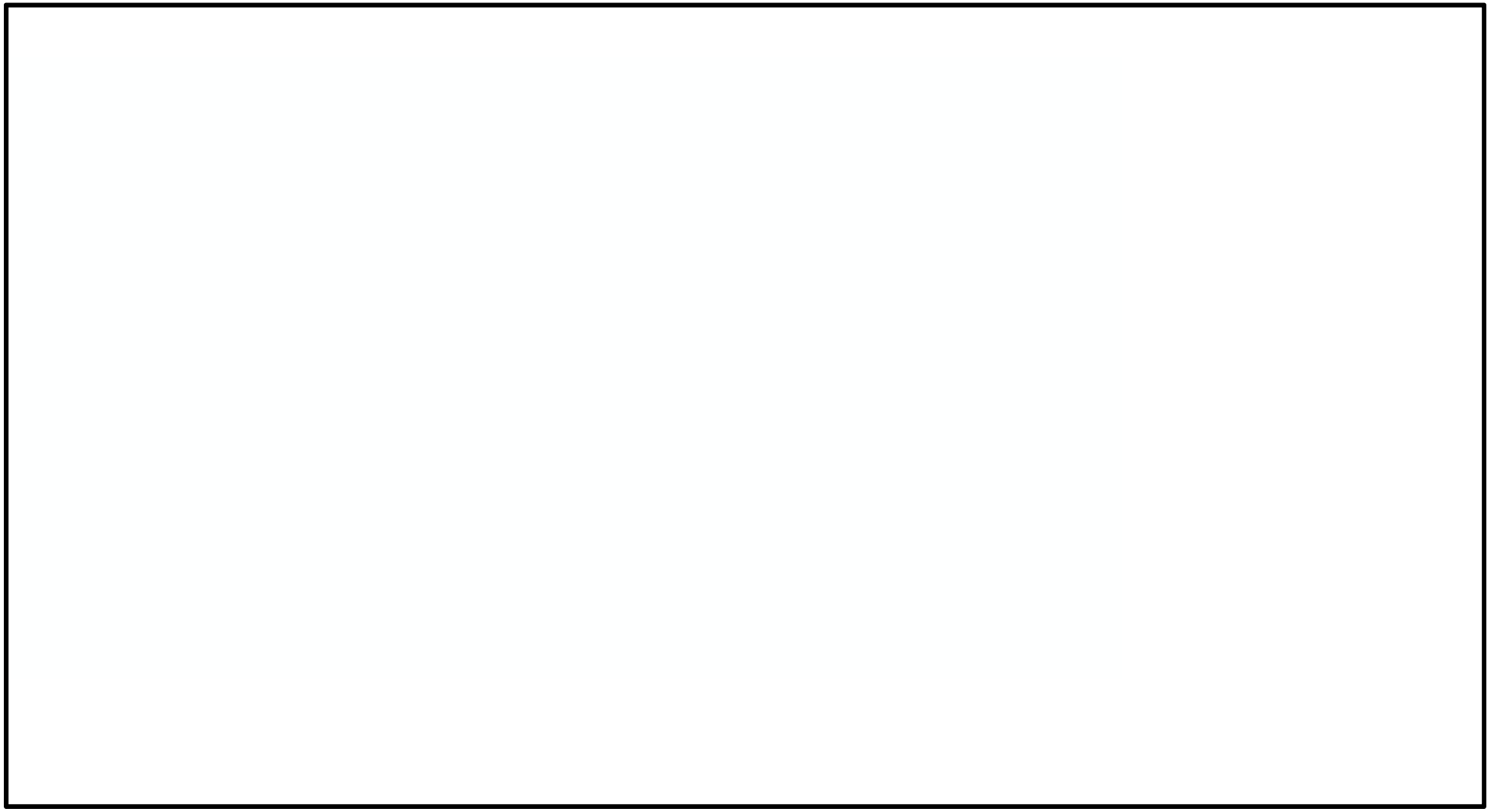


図 2－2　計算モデル

3.　評価方法

3.1　設計震度の評価

2 章で求めた固有周期から添付書類「Ⅴ-2-1　耐震設計の基本方針」に基づき，設計震度を定める。

3.2　応力の評価

二次蓋及び二次蓋締付けボルトの応力の評価方法を以下に示す。

(1)　二次蓋の応力評価

a.　一次応力強さ

内圧及び機械的荷重により発生する一次一般膜応力として求めた応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さが，表 3－1 に示す許容応力値以下であることを示す。

b.　一次＋二次応力強さ

地震力のみによる応力振幅により評価した一次＋二次応力として求めた応力強さが，表 3－1 に示す許容応力値以下であることを示す。

(2)　二次蓋締付けボルトの応力評価

ボルトの応力評価は表 3－2 に示す許容応力値以下であることを示す。

表 3－1　二次蓋の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力状態	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			炭素鋼	
			二次蓋	
			GLF1	許容値基準
Ⅰ＋S_d*	D＋P_d＋M_d＋S_d*	一次一般膜応力（P_m）	187	Ｍｉｎ（S_y，0.6S_u）
		一次膜＋一次曲げ応力（P_L＋P_b）	280	上記の 1.5 倍
		一次＋二次応力*（P_L＋P_b＋Q）	374	2S_y
Ⅰ＋S_S	D＋P_d＋M_d＋S_S	一次一般膜応力（P_m）	226	0.6S_u
		一次膜＋一次曲げ応力（P_L＋P_b）	339	0.9S_u
		一次＋二次応力*（P_L＋P_b＋Q）	374	2S_y

注記　＊：S_d*又はS_S地震動のみによる全振幅について評価する。

表 3－2　二次蓋締付けボルトの許容応力値

（単位：MPa）

許容応力状態	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			低合金鋼	
			二次蓋締付けボルト	
			SNB23-3	許容値基準
Ⅰ＋S_d*	D＋P_d＋M_d＋S_d*	平均引張応力	300	1.5S
Ⅰ＋S_S	D＋P_d＋M_d＋S_S	平均引張応力	400	2S

4. 設計条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)	弾性設計用地震動S_d又は静的震度		基準地震動S_S		最高使用圧力 (MPa)	ボルト荷重 (N)	最高使用温度 (℃)
				水平方向設計震度	鉛直方向設計震度	水平方向設計震度	鉛直方向設計震度			
貯蔵容器（二次蓋を除く）	As	使用済燃料乾式貯蔵建屋 EL. 8.3 *1	[redacted]	C_H＝1.17	C_V＝0.65	C_H＝1.17	C_V＝0.65	1.0	－	170
二　次　蓋								[redacted]	[redacted]	100

注記　＊1：基準床レベルを示す。

＊2：[redacted](s)は二次蓋を含んだ値である。

5. 機器要目

d_o (mm)	d_i (mm)	L (mm)	M (kg)	E (MPa)
2059	1571	5435	[redacted]	193000

6. 評価結果

二次蓋及び二次蓋締付けボルトにおける応力評価点（面）についての応力計算結果を表6－1及び表6－2に示す。

表6－1及び表6－2より，二次蓋における一次一般膜応力（P_m），一次膜＋一次曲げ応力（P_L+P_b），一次＋二次応力（P_L+P_b+Q）及び二次蓋締付けボルトの平均引張応力は，表3－1及び表3－2に示す許容応力値以下である。

表6－1　二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D＋P_d＋M_d＋S_d^*の場合）

（単位：MPa）

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$		
二次蓋	①-①’	P_m	0.8	−0.2	0.8	−0.1	0.0	0.0	1	187
	①	P_L+P_b	−14.1	−0.9	−14.1	0.0	0.0	0.0	14	280
		P_L+P_b+Q*2	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1	374
	①’	P_L+P_b	15.6	0.6	15.6	−0.2	0.0	0.0	15	280
		P_L+P_b+Q*2	−0.5	0.0	−0.5	0.0	0.0	0.0	1	374
	②	P_L+P_b	17.6	−14.7	−13.1	−13.7	−7.2	−1.0	47	280
		P_L+P_b+Q*2	0.8	0.0	0.1	−0.1	0.0	0.0	1	374
	②’	P_L+P_b	3.4	−3.3	3.5	2.9	1.5	−0.9	10	280
		P_L+P_b+Q*2	0.2	0.0	0.0	−0.3	0.0	0.0	1	374
二次蓋締付けボルト	③	平均引張応力	107.5	－	－	－	－	－	108	300

注記　*1：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　　：円周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{\theta n}$：評価断面上のせん断応力

*2：S_d^*地震力のみによる全振幅について評価する。

表6－2　二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D＋P_d＋M_d＋S_Sの場合）

（単位：MPa）

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$		
二次蓋	①-①’	P_m	0.8	−0.2	0.8	−0.1	0.0	0.0	1	226
	①	P_L+P_b	−14.1	−0.9	−14.1	0.0	0.0	0.0	14	339
		P_L+P_b+Q*2	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1	374
	①’	P_L+P_b	15.6	0.6	15.6	−0.2	0.0	0.0	15	339
		P_L+P_b+Q*2	−0.5	0.0	−0.5	0.0	0.0	0.0	1	374
	②	P_L+P_b	17.6	−14.7	−13.1	−13.7	−7.2	−1.0	47	339
		P_L+P_b+Q*2	0.8	0.0	0.1	−0.1	0.0	0.0	1	374
	②’	P_L+P_b	3.4	−3.3	3.5	2.9	1.5	−0.9	10	339
		P_L+P_b+Q*2	0.2	0.0	0.0	−0.3	0.0	0.0	1	374
二次蓋締付けボルト	③	平均引張応力	107.5	－	－	－	－	－	108	400

注記　*1：σ_n：評価断面に垂直な方向の応力　　σ_θ　　：円周方向応力

σ_t：評価断面に平行な方向の応力　τ_{nt}，$\tau_{t\theta}$，$\tau_{\theta n}$：評価断面上のせん断応力

*2：S_S地震力のみによる全振幅について評価する。

7. 結論

7.1 固有周期

（単位：s）

固有周期
T＝

7.2 応力

二次蓋の応力は，以下に示す通り，すべて許容応力値以下である。

（単位：MPa）

許容応力区分	荷重の組合せ	部位	応力分類	応力評価点	計算値	許容応力値
$I+S_d^*$	$D+P_d+M_d+S_d^*$	二次蓋	P_m	①－①’	1	187
			P_L+P_b	②	47	280
			$P_L+P_b+Q^*$	①	1	374
		二次蓋締付けボルト	平均引張応力	③	108	300
$I+S_S$	$D+P_d+M_d+S_S$	二次蓋	P_m	①－①’	1	226
			P_L+P_b	②	47	339
			$P_L+P_b+Q^*$	①	1	374
		二次蓋締付けボルト	平均引張応力	③	108	400

注記　＊：S_d^*又はS_S地震力のみによる全振幅について評価する。

Ⅴ-2-4-2-3 ③　バスケットの応力計算書

（タイプⅡ）

目次

1. 概要 ····· 1
1.1 形状・寸法・材料 ····· 1
1.2 計算結果の概要 ····· 1
2. 応力計算 ····· 2
2.1 応力評価点 ····· 2
2.2 貯蔵時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合） ····· 2
2.2.1 荷重条件 ····· 2
2.2.2 計算方法 ····· 2
2.2.3 計算結果 ····· 4
3. 応力の評価 ····· 5
3.1 応力強さの評価 ····· 5
3.2 特別な応力の評価 ····· 5
3.2.1 純せん断応力 ····· 5
3.2.2 支圧応力 ····· 5
3.2.3 軸圧縮応力 ····· 5
3.2.4 座屈応力 ····· 5

・補足資料：バスケットの応力解析の方針

図表目次

図 1－1　形状・寸法・材料 ･･･　6
図 2－1　バスケットの応力評価点（面） ･････････････････････････････････････　7
図 2－2　地震時におけるバスケットの姿勢と荷重方向 ･･････････････････････････　8

表 1－1　計算結果の概要 ･･　9
表 2－1　バスケットの応力評価（貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合） ･･･････････････　10
表 2－2　バスケットの応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合） ･･･････････････　11

NT2 補② V-2-4-2-3 R0

1. 概要

本計算書は，バスケットに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1－1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1－1 に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2.　応力計算

2.1　応力評価点

バスケットの応力評価点（面）を図2－1に示す。

2.2　貯蔵時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合）

2.2.1　荷重条件

貯蔵時において，S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合の荷重は，次に示す組合せとする。荷重の方向を図2－2に示す。なお，地震力には，S_s地震力を適用する。

地震力＋自重＋熱荷重

2.2.2　計算方法

(1)　バスケットプレート

a.　一次一般膜応力

最大応力が発生するのは，バスケットプレート端部（図2－1①部）である。

水平方向加速度により発生する応力（σ_x）は，次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_A \cdot G_1}{A_1} \quad \cdots\cdots (2.1)$$

ここで，$G_1 = C_H \cdot G$

m_A：図2－1に示す斜線部Aに含まれる使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量（＝[redacted]kg）

A_1：バスケットプレートの断面積（＝[redacted]mm^2）

C_H：水平方向設計震度（＝1.17）

G　：重力加速度（＝9.80665 m/s^2）

下方向加速度により発生する応力（σ_y）は，次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{m_b \cdot G_2}{A_b} \quad \cdots\cdots (2.2)$$

ここで，$G_2 = (1 + C_V) \cdot G$

m_b：バスケットプレートの全質量（＝[redacted]kg）

C_V：鉛直方向設計震度（＝0.65）

A_b：バスケットプレート底部の全面積（＝[redacted]mm^2）

他の応力成分は，零である。

b.　一次一般膜＋一次曲げ応力

最大応力が発生するのは，バスケットプレート格子端部（図2－1②部）である。

水平方向加速度により発生する応力（σ_x，τ_{zx}）は，次式で計算する。

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{M}{Z} \\ M &= \frac{m_B \cdot G_1 \cdot \ell_p}{12 \cdot \frac{\ell_w}{2}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (2.3)$$

$$\tau_{zx}=\frac{m_B \cdot G_1}{2 \cdot \frac{A_1}{2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.4)$$

ここで，M　：バスケットプレート格子中央部の単位幅当たりの曲げモーメント（N･mm/mm）

Z　：バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数（＝[redacted]mm^3/mm）

m_B：図 2－1 に示す斜線部Ｂに含まれる使用済燃料，伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量（＝[redacted]kg）

ℓ_p　：バスケットプレートの内のり（＝[redacted]mm）

ℓ_w　：バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ（燃料集合体の負荷面の軸方向長さ）（＝[redacted]mm）
ただし，バスケットプレート同士の嵌合のための切欠きがあるため実際の荷重負荷面の長さをℓ_w／2 とする。

G_1　：a.と同じ

下方向加速度により発生する応力（σ_y）は，一次一般膜応力と同様である。

ここで，G_2：a.と同じ

他の応力成分は，零である。

c.　純せん断応力

バスケットプレート格子端部（図 2－1②部）に発生する平均せん断応力（σ_s）は，(2.4)式で計算する。

なお，熱応力については，バスケットプレート間及びバスケットプレートとサポートシリンダ間の嵌合部には，ギャップを設けており，熱膨張による拘束が生じず，著しい熱応力は生じないため，考慮しない。以下本項において同様である。

d.　支圧応力

バスケットプレート端部（図 2－1①部）に発生する平均支圧応力（σ_p）は，(2.1)式で計算する。

e.　座屈応力

バスケットプレート下端部（図 2－1③部）に発生する座屈応力（σ_b）は，(2.2)式で計算する。

(2)　サポートシリンダ

a.　一次一般膜応力

最大応力が発生するのは，サポートシリンダ下端部（図 2－1④部）であり，下方向加速度により発生する応力（σ_x）は，次式で計算する。

$$\sigma_x=\frac{m_S \cdot G_2}{A_S} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.5)$$

ここで，G_2：(1)a.と同じ

A_S：サポートシリンダの断面積（＝[redacted]mm^2）

m_S：サポートシリンダの質量（＝[redacted]kg）

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

サポートシリンダには，曲げ応力は発生しないので，一次一般膜応力と同様である。

c. 支圧応力

サポートシリンダのバスケットプレート支持部（図 2－1⑤部）に発生する平均支圧応力（σ_p）は，（2.1）式で計算する。

d. 軸圧縮応力

サポートシリンダ下端部（図 2－1④部）に発生する軸圧縮応力（σ_c）は，（2.5）式で計算する。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2－2 及び表 2－3 に示す。

3. 応力の評価

3.1 応力強さの評価

地震時における応力強さの計算結果と許容応力を表 2－1 及び表 2－2 に示す。

表 2－1 及び表 2－2 より，地震時の一次一般膜応力強さ（P_m）及び一次一般膜＋一次曲げ応力強さ（P_m+P_b）は，補足資料「バスケットの応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。

3.2 特別な応力の評価

3.2.1 純せん断応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 2－1 及び表 2－2 に示す。

表 2－1 及び表 2－2 より，地震時の平均せん断応力（σ_s）は，補足資料「バスケットの応力解析の方針」5.5 節の規定を満足する。

3.2.2 支圧応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 2－1 及び表 2－2 に示す。

表 2－1 及び表 2－2 より，地震時の平均支圧応力（σ_p）は，補足資料「バスケットの応力解析の方針」5.5 節の規定を満足する。

3.2.3 軸圧縮応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 2－1 及び表 2－2 に示す。

表 2－1 及び表 2－2 より，地震時の軸圧縮応力（σ_c）は，補足資料「バスケットの応力解析の方針」5.5 節の規定を満足する。

3.2.4 座屈応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 2－1 及び表 2－2 に示す。

表 2－1 及び表 2－2 より，地震時の座屈応力（σ_b）は，補足資料「バスケットの応力解析の方針」5.5 節の規定を満足する。

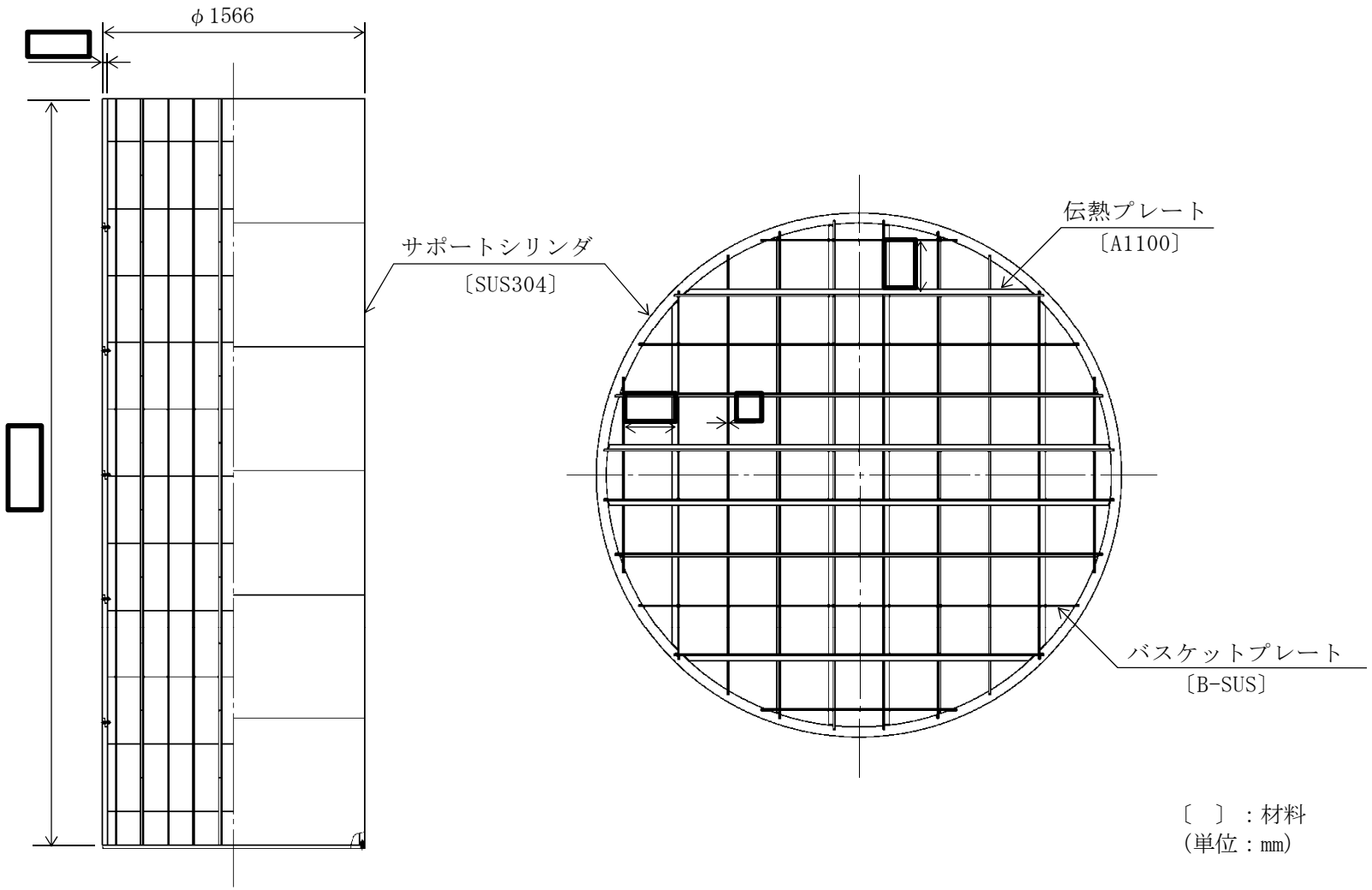


図1－1　形状・寸法・材料

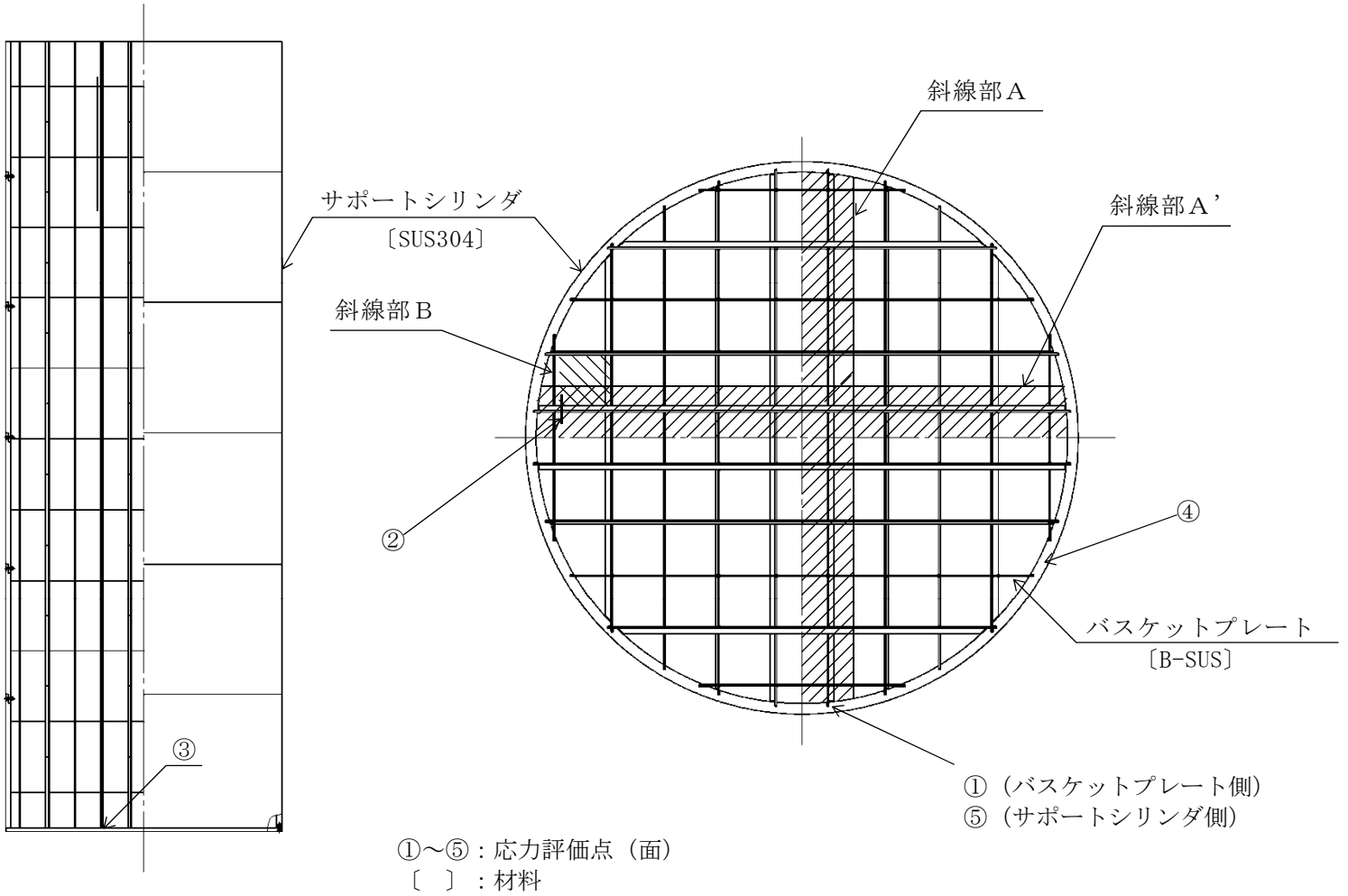


図２－１　バスケットの応力評価点（面）

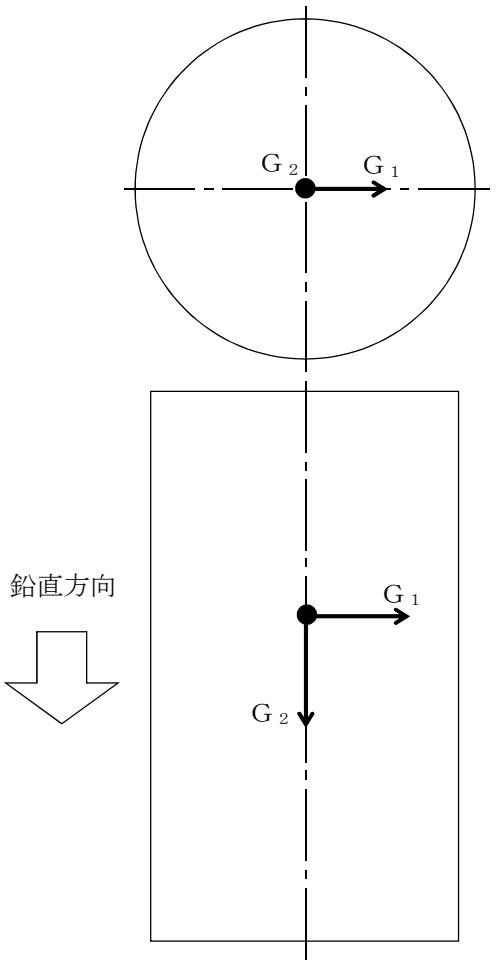


図 2－2　地震時におけるバスケットの姿勢と荷重方向

表 1－1(1)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点（面）	計算値	許容応力	評価点（面）
バスケットプレート	ボロン添加ステンレス鋼板（B-SUS）	$I+S_d^*$	2	201	①	7	301	②
		$I+S_s$	2	269	①	7	404	②
サポートシリンダ	ステンレス鋼（SUS304）	$I+S_d^*$	1	180	④	1	270	④
		$I+S_s$	1	263	④	1	395	④

表 1－1(2)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　料	設計事象	平均せん断応力			平均支圧応力			軸圧縮応力			座屈応力		
			計算値	許容応力	評価面	計算値	許容応力	評価面	計算値	許容応力	評価面	計算値	許容応力	評価面
バスケットプレート	ボロン添加ステンレス鋼板（B-SUS）	$I+S_d^*$	1	120	②	2	311	①				1	180	③
		$I+S_s$	1	160	②	2	415	①				1	180	③
サポートシリンダ	ステンレス鋼（SUS304）	$I+S_d^*$				2	200	⑤	1	92	④			
		$I+S_s$				2	266	⑤	1	123	④			

表 2－1　バスケットの応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
バスケットプレート	P_m	①	2	201
	P_m+P_b	②	7	301
	σ_s	②	1	120
	σ_p	①	2	311
	σ_b	③	1	180
サポートシリンダ	P_m	④	1	180
	P_m+P_b	④	1	270
	σ_s	－	－	108
	σ_p	⑤	2	200
	σ_c	④	1	92

表 2－2　バスケットの応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
バスケットプレート	P_m	①	2	269
	P_m+P_b	②	7	404
	σ_s	②	1	160
	σ_p	①	2	415
	σ_b	③	1	180
サポートシリンダ	P_m	④	1	263
	P_m+P_b	④	1	395
	σ_s	－	－	144
	σ_p	⑤	2	266
	σ_c	④	1	123

補足資料

バスケットの応力解析の方針

目次

1.　概要 ･･･ 補-4
2.　適用基準 ･･ 補-5
3.　用語及び記号 ･･ 補-6
3.1　用語の説明 ･･ 補-6
3.2　記号の説明 ･･ 補-6
4.　荷重条件 ･･ 補-8
4.1　設計条件 ･･ 補-8
4.2　設計事象 ･･ 補-8
4.3　荷重の種類とその組合せ ････････････････････････････････ 補-8
5.　計算条件 ･･ 補-9
5.1　解析対象とする事象 ････････････････････････････････････ 補-9
5.2　解析箇所 ･･ 補-9
5.3　形状及び寸法 ･･ 補-9
5.4　物性値 ･･ 補-9
5.5　許容応力 ･･ 補-9
6.　応力解析の手順 ･･ 補-11
6.1　解析手順の概要 ･･ 補-11
6.2　荷重条件の選定 ･･ 補-11
6.3　応力計算と応力の分類 ･･････････････････････････････････ 補-11
6.3.1　応力計算の方法 ･･････････････････････････････････････ 補-11
6.3.2　応力の分類 ･･ 補-11
6.4　応力の評価 ･･ 補-12
6.4.1　主応力 ･･ 補-12
6.4.2　応力強さ ･･ 補-12
6.4.3　一次応力強さ ･･ 補-12
6.5　特別な応力の検討 ･･････････････････････････････････････ 補-12
6.5.1　純せん断応力の評価 ･･････････････････････････････････ 補-12
6.5.2　支圧応力の評価 ･･････････････････････････････････････ 補-12
6.5.3　軸圧縮応力の評価 ････････････････････････････････････ 補-12
6.5.4　座屈応力の評価 ･･････････････････････････････････････ 補-12
7.　解析及び評価結果の添付 ････････････････････････････････ 補-13
7.1　応力解析結果 ･･ 補-13
7.2　応力評価結果 ･･ 補-13
8.　引用文献 ･･ 補-13

NT2 補② Ⅴ-2-4-2-3 R0

図表目次

補図５－１　バスケットの応力解析箇所 ･････････････････････････････････ 補-14
補図６－１　バスケットの応力解析フロー図 ･･･････････････････････････････ 補-15

補表４－１　乾式貯蔵キャスクの設計事象･･････････････････････････････････ 補-16
補表４－２　バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ･･･････････････ 補-17
補表５－１　代表事象･･･ 補-18
補表５－２　バスケット用材料の許容応力値 ･･･････････････････････････････ 補-19
補表６－１　数値の丸め方一覧表 ･･････････････････････････････････････ 補-20

NT2 補② Ⅴ-2-4-2-3 R0

1. 概要

本図書は，使用済燃料乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は，一括して巻末に示す。

2. 適用基準

当該バスケットは，使用済燃料集合体を直接支持する部材であることから，発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。））ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005/2007）（日本機械学会　2007 年 9 月）（以下「設計・建設規格」という。）における炉心支持構造物に準じて強度評価を行う。

3.　用語及び記号

3.1　用語の説明

本書及び応力計算書において，使用済燃料乾式貯蔵容器（以下，「乾式貯蔵キャスク」という。）の構造体に関する下記の用語を使用する。ただし，本文中に特記のある場合は，この限りでない。

(1)　乾式貯蔵キャスク

内部を乾燥させ，不活性ガスを封入し，使用済燃料を収納する容器で，事業所内運搬及び貯蔵を兼用する容器であり，キャスク容器，バスケット，トラニオン等により構成されるものをいう。

(2)　キャスク容器

乾式貯蔵キャスクのうち，放射性物質を閉じ込めるための圧力バウンダリを構成するものであって，胴，一次蓋，一次蓋締付けボルト，バルブカバー及びバルブカバー締付けボルトをいう。

(3)　バスケット

キャスク容器内に配置され，使用済燃料を収納し，かつ燃料間距離を保つことにより，燃料の支持機能及び臨界防止機能を併せ持つものであって，バスケットプレート，伝熱プレート及びサポートシリンダ等により構成されるものをいう。

3.2　記号の説明

本書及び応力計算書において，応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし，本文中に特記のある場合は，この限りでない。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積，又は接触面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	－
C_V	鉛直方向設計震度	－
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
G	重力加速度（＝9.80665）	m/s^2
G_1	水平方向加速度	m/s^2
G_2	鉛直方向加速度	m/s^2
ℓ	バスケットプレート長さ	mm
M	曲げモーメント	N･mm
m	質量	kg
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	－
S_s	基準地震動S_sによる地震力	－
S_{12}	主応力差$\sigma_1-\sigma_2$	MPa
S_{23}	主応力差$\sigma_2-\sigma_3$	MPa
S_{31}	主応力差$\sigma_3-\sigma_1$	MPa
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
Z	断面係数	mm^3
ρ	密度	kg/mm^3
σ	主応力	MPa
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_b	座屈応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_c	胴部軸方向に受ける圧縮応力	MPa
σ_x	評価断面に垂直な方向の応力（ｘ方向）	MPa
σ_y	評価断面に平行な方向の応力（ｙ方向）	MPa
σ_z	評価断面に平行な方向の応力（ｚ方向）	MPa
τ_{xy}	せん断応力	MPa
τ_{yz}	せん断応力	MPa
τ_{zx}	せん断応力	MPa
$I+S_d^*$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用した場合の許容応力状態	－
$I+S_s$	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用した場合の許容応力状態	－

4. 荷重条件

バスケットは，以下の荷重条件に耐えるように設計する。

各部の応力解析は，本章に示す荷重を考慮する。応力解析に用いる荷重は，応力計算書に記載する。

4.1 設計条件

最高使用温度　：260 ℃

機械的荷重　　：自重及び地震力による荷重をいう。

熱荷重　　：バスケットに生じる温度変化，温度勾配による荷重をいう。

4.2 設計事象

考慮する設計事象を補表 4－1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを補表 4－2 に示す。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

補表 5－1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し，代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

応力解析を行う箇所の形状を補図 5－1 に示す。

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

5.4 物性値

機械的荷重による応力計算に使用する物性値は，最高使用温度に対する値を用いる。

なお，常温は，20 ℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は，次に掲げる通りとする。

(1) バスケットにあっては，次によること。

a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは，設計・建設規格　CSS-3111.3 に定める値を超えないこと。

b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは，設計・建設規格　CSS-3111.4 に定める値を超えないこと。

c. 純せん断荷重を受ける部分にあっては，a.及び b.の規定にかかわらず，平均せん断応力は，次の値を超えないこと。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる場合においては，
設計・建設規格　CSS-3114(2)に定める値

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる場合においては，
設計・建設規格　CSS-3114(3)に定める値

d. 支圧荷重を受ける部分にあっては，平均支圧応力は，次の値を超えないこと。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる場合においては，
設計・建設規格　CSS-3115(2)に定める値

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる場合においては，
設計・建設規格　CSS-3115(3)に定める値

e. 軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴にあっては，圧縮応力は，次の値を超えないこと。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる場合においては，
設計・建設規格　CSS-3116.1(2)に定める値

(b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる場合においては，
設計・建設規格　CSS-3116.1(3)に定める値

f.　圧縮荷重を受ける部分にあっては，座屈応力は，次の値を超えないこと。

(a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力，又はS_s地震力が作用して生じる場合においては，設計・建設規格　SSB-3121.1(2)，(3)，又は(4)に定める値の1.5倍の値

g.　設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用してバスケットに塑性変形が生じる場合には，臨界防止評価のため変形量の評価を行う。

(2)　(1)において，設計・建設規格の「供用状態C」及び「供用状態D」は，それぞれ「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる場合」及び「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる場合」と読み替える。

許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

バスケット用材料の許容応力値を補表5－2に示す。

6.　応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1　解析手順の概要

バスケットの応力解析フローを補図 6－1 に示す。

バスケットの応力解析は，想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2　荷重条件の選定

荷重条件は 4 章に示されているが，各部の計算においては，その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。

6.3　応力計算と応力の分類

6.3.1　応力計算の方法

(1)　応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは，次の 2 つである。

a.　機械的荷重

b.　熱荷重

(2)　伝熱プレートは，非構造強度部材として評価対象より除外する。

(3)　構造の不連続性を考慮して，応力評価点（面）をとる。評価点（面）は，計算書の形状図中に，番号〔例①〕で示す。

応力評価は，この応力評価点（面）について行う。

(4)　数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については，丸めないことを原則とし，規格，基準等を内挿して使用する場合は，原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を補表 6－1 に示す。

6.3.2　応力の分類

応力の計算結果は，補表 5－2 に示すように応力の種類ごとに分類して，応力計算書に示す。このときの応力の定義と分類は，設計・建設規格　GNR-2130 による。

なお，応力の記号とその方向は以下の通りである。

σ_x　：評価断面に垂直な方向の応力（x 方向）

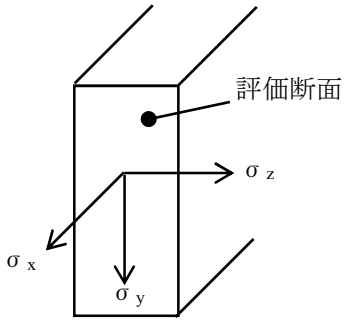
σ_y　：評価断面に平行な方向の応力（y 方向）

σ_z　：評価断面に平行な方向の応力（z 方向）

τ_{xy}　：せん断応力

τ_{yz}　：せん断応力

τ_{zx}　：せん断応力



6.4　応力の評価

6.4.1　主応力

計算された各種の荷重による応力を重ね合わせ，各応力評価点（面）の組合せ応力を求める。

組合せ応力は，一般にσ_x，σ_y，σ_z，τ_{xy}，τ_{yz}，τ_{zx}の6成分をもち，応力評価点（面）の主応力は，引用文献(補-1)のA4編1.4.1項により次式を満足する3根として計算する。

$$\sigma^3-(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z)\cdot\sigma^2+(\sigma_x\cdot\sigma_y+\sigma_y\cdot\sigma_z+\sigma_z\cdot\sigma_x-\tau_{xy}^2-\tau_{yz}^2-\tau_{zx}^2)\cdot\sigma-\sigma_x\cdot\sigma_y\cdot\sigma_z+\sigma_x\cdot\tau_{yz}^2+\sigma_y\cdot\tau_{zx}^2+\sigma_z\cdot\tau_{xy}^2-2\cdot\tau_{xy}\cdot\tau_{yz}\cdot\tau_{zx}=0$$

上式により主応力σ_1，σ_2，σ_3が求まる。

6.4.2　応力強さ

下記の3つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$S_{12}=\sigma_1-\sigma_2$

$S_{23}=\sigma_2-\sigma_3$

$S_{31}=\sigma_3-\sigma_1$

6.4.3　一次応力強さ

機械的荷重により発生する一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さが，5.5(1)a.及びb.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.5　特別な応力の検討

6.5.1　純せん断応力の評価

純せん断荷重を受ける部分は，5.5(1)c.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.5.2　支圧応力の評価

支圧荷重を受ける部分は，5.5(1)d.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.5.3　軸圧縮応力の評価

軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴の部分は，5.5(1)e.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.5.4　座屈応力の評価

圧縮荷重を受ける部分は，5.5(1)f.に示す許容応力値を満足することを示す。

7. 解析及び評価結果の添付

応力計算書では，以下に示すように解析結果を添付する。

7.1 応力解析結果

考慮した荷重ごとに評価対象とした応力評価点（面）について，応力の種類ごとに解析結果を示す。

7.2 応力評価結果

次の応力評価結果を，評価対象とした応力評価点（面）について添付する。

(1) 一次一般膜応力強さ

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力強さ

(3) 純せん断応力

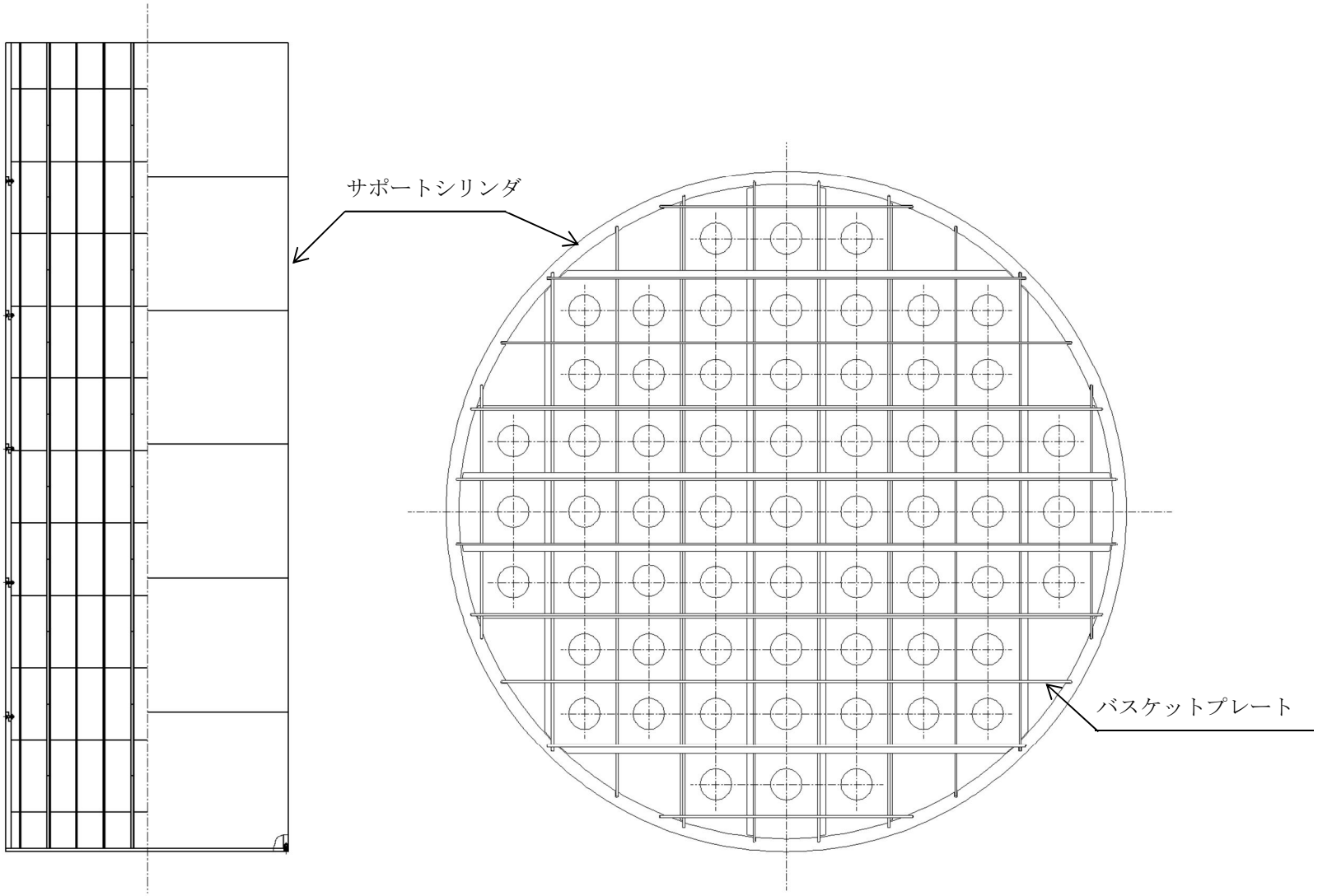
(4) 支圧応力

(5) 軸圧縮応力

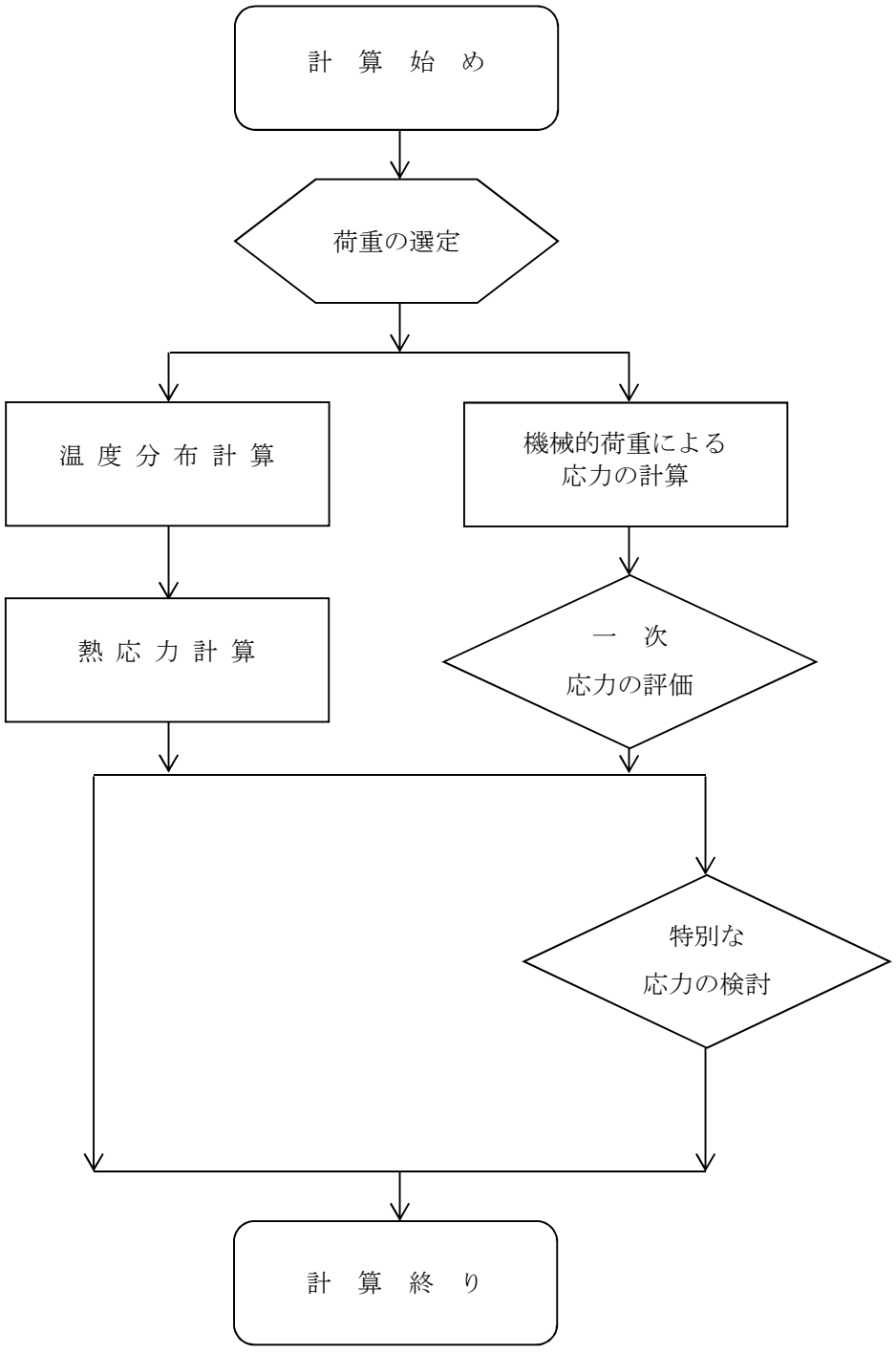
(6) 座屈応力

8. 引用文献

(補-1) 機械工学便覧　新版，日本機械学会（1987）



補図 5－1　バスケットの応力解析箇所



補図 6－1　バスケットの応力解析フロー図

補表 4－1　乾式貯蔵キャスクの設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	選定事象
I	乾式貯蔵キャスクの通常の取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・乾式貯蔵キャスクの吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬	・貯蔵

補表 4－2　バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 ＼ 荷重	荷重時	自重による荷重	熱荷重	備考
Ⅰ	貯蔵時	○	○	*1

注記　＊1：S_d^*地震力及びS_s地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組合せるものとする。

補表 5－1　代表事象

設計事象	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
$I+S_d^*$	貯蔵時 （S_d^*地震力が作用する場合）	－	自重 地震力 水平方向：1.17G（＝11.48m/s^2） 鉛直方向：0.65G（＝6.38m/s^2） 熱荷重	－
$I+S_s$	貯蔵時 （S_s地震力が作用する場合）	－	自重 地震力 水平方向：1.17G（＝11.48 m/s^2） 鉛直方向：0.65G（＝6.38 m/s^2） 熱荷重	－

注記　＊1：本事象について応力解析を行う。

補表 5－2　バスケット用材料の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類	許容応力値			
		バスケットプレート		サポートシリンダ	
		B-SUS	許容値基準	SUS304	許容値基準
$I+S_d^*$	一次一般膜応力強さ P_m	201	$1.5S_m$	180	$1.5S_m$
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ P_m+P_b	301	$2.25S_m$	270	$2.25S_m$
	平均せん断応力 σ_s	120	$0.9S_m$	108	$0.9S_m$
	平均支圧応力 σ_p *1	311 (467)	$1.5S_y$ ($2.25S_y$)	200 (300)	$1.5S_y$ ($2.25S_y$)
	軸圧縮応力*2 σ_c	－	－	92	$1.5\times$Min{S_m, B*3}
	座屈応力 σ_b	184	$1.5f_b$，$1.5f_s$ 又は $1.5f_c$	179	$1.5f_b$，$1.5f_s$ 又は $1.5f_c$
$I+S_s$	一次一般膜応力強さ P_m	269	Min{$2.4S_m$, $2/3S_u$}	263	Min{$2.4S_m$, $2/3S_u$}
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ P_m+P_b	404	Min{$3.6S_m$, S_u}	395	Min{$3.6S_m$, S_u}
	平均せん断応力 σ_s	160	$1.2S_m$	144	$1.2S_m$
	平均支圧応力 σ_p *1	415(622)	$2S_y$($3S_y$)	266(400)	$2S_y$($3S_y$)
	軸圧縮応力*2 σ_c	－	－	123	$2\times$Min{S_m, B*3}
	座屈応力 σ_b	184	$1.5f_b$，$1.5f_s$ 又は $1.5f_c$	179	$1.5f_b$，$1.5f_s$ 又は $1.5f_c$

注記　＊1：（　）内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

＊2：円筒形の軸方向の圧縮に対して適用する。

＊3：Ｂ値は，設計・建設規格 付録材料図表 Part7 図 1 から図 20 までにより求められた値。

補表 6－1　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用温度	℃	－	－	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	－	－	設計値
設計震度	－	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm^2	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	－	－	設計値

Ⅴ-2-4-2-3 ④　トラニオンの応力計算書
（タイプⅡ）

目次

1. 概要 ····· 1
1.1 形状・寸法・材料 ····· 1
1.2 計算結果の概要 ····· 1
2. 応力計算 ····· 2
2.1 応力評価点 ····· 2
2.2 貯蔵時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合） ····· 2
2.2.1 荷重条件 ····· 2
2.2.2 計算方法 ····· 2
2.2.3 計算結果 ····· 5
3. 応力の評価 ····· 6
3.1 一次応力の評価 ····· 6
3.2 一次＋二次応力の評価 ····· 6
3.3 組合せ応力の評価 ····· 6

・補足資料：トラニオンの応力解析の方針

図表目次

図1－1　形状・寸法・材料・応力評価点（面）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7
図2－1　トラニオンボルトの荷重説明図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8
図2－2　地震時に作用する荷重の計算モデル　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9

表1－1　計算結果の概要　・・　10
表2－1　トラニオンの応力評価
（貯蔵時：S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合）　・・・・・・・・・・・・・・・・・・　12

1. 概要

本計算書は，トラニオンに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1－1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1－1 に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2.　応力計算

2.1　応力評価点

トラニオンの応力評価点（面）を図1－1に示す。

2.2　貯蔵時（S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合）

2.2.1　荷重条件

貯蔵時において，S_d^*地震力及びS_s地震力が作用する場合の荷重は，次に示す組合せとする。なお，地震力には，S_s地震力を適用する。

地震力＋自重＋熱荷重＋トラニオン固定ボルトの初期締付け力

2.2.2　計算方法

(1)　トラニオン

a.　一次応力

(a)　せん断応力

最大応力が発生する箇所は，図1－1に示す下部トラニオンの評価点①である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力（τ）は，次式で計算する（図2－2参照）。

$$\left.\begin{aligned}\tau &= \frac{(F_m + F_1)}{A} \\ F_m &= \frac{m \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2)}{\dfrac{2 \cdot a_2^{\,2}}{a_1} + a_1}\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.1)$$

ここで，$G_1 = C_H \cdot G$，$G_2 = (1 - C_V) \cdot G$

G_1　：水平方向加速度（m/s^2）

G_2　：鉛直方向加速度（m/s^2）

h_{CG}　：貯蔵容器底面から重心までの高さ（＝2720 mm）

a_1　：支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離（＝2238 mm）

a_2　：支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離（＝924.5 mm）

F_m　：地震力によりトラニオンに作用する荷重（N）

m　：貯蔵容器の質量（＝[redacted] kg）

A　：図1－1の評価点①の断面積（＝[redacted] mm^2）

C_H　：水平方向設計震度（＝1.17）

C_V　：鉛直方向設計震度（＝0.65）

F_1　：トラニオン固定ボルトの初期締付け力（＝[redacted] N）

G　：重力加速度（＝9.80665 m/s^2）

(b)　曲げ応力

最大応力が発生する箇所は，図 1－1 に示す下部トラニオンの評価点②である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力（σ_b）は，次式で計算する。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_b &= \frac{M}{Z}\\ M &= (F_m + F_1)\cdot L\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.2)$$

ここで，F_m　：(2.1)式と同じ

F_1　：(a)と同じ

Z　：図 1－1 の評価点②の断面係数（＝[redacted] mm^3）

L　：図 1－1 の評価点②と荷重作用位置との距離（＝274 mm）

(c)　組合せ応力

イ．せん断応力と曲げ応力

最大応力が発生する箇所は，図 1－1 に示す下部トラニオンの評価点②である。

せん断応力（τ）と曲げ応力（σ_b）との組合せ応力（σ_T）は，次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\cdot\tau^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3)$$

ここで，σ_b　：(2.2)式と同じ

τ　：(2.1)式と同じ

A　：図 1－1 の評価点②の断面積（＝[redacted] mm^2）

b.　一次＋二次応力

(a)　せん断応力

せん断応力（τ）の全振幅は，(2.1)式で計算する。

(b)　曲げ応力

曲げ応力（σ_b）の全振幅は，(2.2)式で計算する。

(c)　組合せ応力

せん断応力（τ）と曲げ応力（σ_b）との組合せ応力（σ_T）は，(2.3)式で計算する。

ここで，σ_b　：(2.2)式と同じ

τ　：(2.1)式と同じ

A　：a.(c).と同じ

(2)　トラニオンボルト

トラニオンボルトに発生する引張応力（σ_{tb}）は，次のように求める。

曲げモーメントが作用した場合に生じるトラニオンボルトの引張荷重とキャスク容器の圧縮荷重については，図 2－1 に示すように荷重の釣合い条件を考慮することにより求める。

以下にその手順を示す。

a.　σ_{tb}及びσ_{cc}を仮定してトラニオンボルトの応力計算における中立軸の荷重係数 k を求める。

$$k=\frac{1}{1+\frac{\sigma_{tb}}{\sigma_{cc}}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.4)$$

ここで，k　：トラニオンボルト計算における中立軸の荷重係数(－)

σ_{tb}　：トラニオンボルトの引張応力(MPa)

σ_{cc}　：キャスク容器の圧縮応力(MPa)

b.　トラニオンボルトの応力計算における中立軸を定める角度αを求める。

$$\alpha=\cos^{-1}(1-2\cdot k) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.5)$$

ここで，α　：トラニオンボルト計算における中立軸を定める角度(rad)

c.　各定数e，z，C_t及びC_cを求める。

$$e=\frac{1}{2}\cdot\left\{\frac{(\pi-\alpha)\cdot\cos^2\alpha+\frac{1}{2}\cdot(\pi-\alpha)+\frac{3}{2}\cdot\sin\alpha\cdot\cos\alpha}{(\pi-\alpha)\cdot\cos\alpha+\sin\alpha}+\frac{\frac{1}{2}\cdot\alpha-\frac{3}{2}\cdot\sin\alpha\cdot\cos\alpha+\alpha\cdot\cos^2\alpha}{\sin\alpha-\alpha\cdot\cos\alpha}\right\} \quad \cdots\cdots \quad (2.6)$$

$$z=\frac{1}{2}\cdot\left(\cos\alpha+\frac{\frac{1}{2}\cdot\alpha-\frac{3}{2}\cdot\sin\alpha\cdot\cos\alpha+\alpha\cdot\cos^2\alpha}{\sin\alpha-\alpha\cdot\cos\alpha}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.7)$$

$$C_t=\frac{2\cdot\{(\pi-\alpha)\cdot\cos\alpha+\sin\alpha\}}{1+\cos\alpha} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.8)$$

$$C_c=\frac{2\cdot(\sin\alpha-\alpha\cdot\cos\alpha)}{1-\cos\alpha} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.9)$$

ここで，e，z，C_t，C_c　：トラニオンボルト計算における係数(－)

d.　各定数を用いてF_{tb}及びF_{cc}を求める。

$$F_{tb}=\frac{M}{e\cdot D_c} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.10)$$

$$F_{cc}=F_{tb} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.11)$$

ここで，F_{tb}　：トラニオンボルトに作用する引張力(N)

M　：(2.2) 式と同じ

L　：図1－1のトラニオンボルトと荷重作用点との距離(＝342 mm)

D_c　：トラニオンボルトのピッチ円直径(＝340 mm)

F_{cc}　：キャスク容器に作用する圧縮力(N)

e.　σ_{tb}及びσ_{cc}を求める。

$$\sigma_{tb}=\frac{2\cdot F_{tb}}{t_1\cdot D_c\cdot C_t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.12)$$

$$\sigma_{cc}=\frac{2\cdot F_{cc}}{(t_2+t_1)\cdot D_c\cdot C_c} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.13)$$

$$t_1=\frac{n\cdot A_b}{\pi\cdot D_c} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.14)$$

$$t_2=\frac{1}{2}\cdot(D_{bo}-D_{bi})-t_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.15)$$

ここで，t_1　：トラニオンボルト面積相当板幅(mm)

t_2　：圧縮側相当幅(mm)

n　：トラニオンボルト本数(＝16)

A_b　：トラニオンボルト(M36)の断面積(＝1.018×10^3 mm^2)

D_{bo}：トラニオンボルト取付部の外径(＝419.2 mm)

D_{bi}：トラニオンボルト取付部の内径(＝200.5 mm)

2.2.3　計算結果

応力計算結果を表2－1に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

地震時における評価を表 2－1 に示す。

表 2－1 より，地震時の一次応力は，補足資料「トラニオンの応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。

3.2 一次＋二次応力の評価

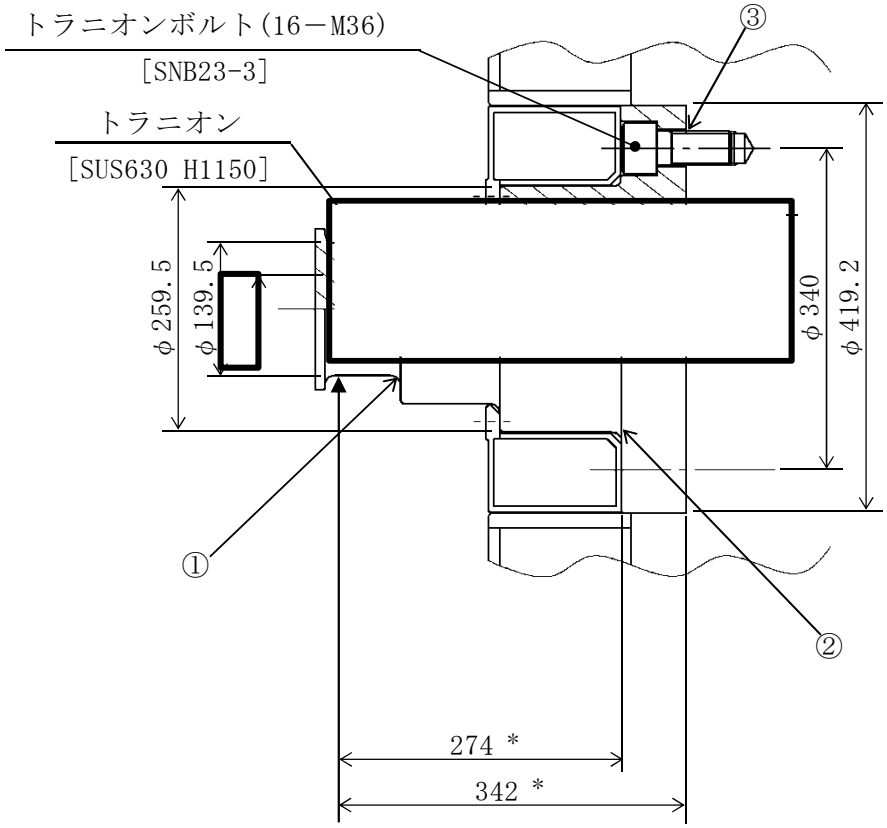
地震時における評価を表 2－1 に示す。

表 2－1 より，地震時の一次＋二次応力は，補足資料「トラニオンの応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

地震時における評価を表 2－1 に示す。

表 2－1 より，地震時における組合せ応力は，補足資料「トラニオンの応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。



注記　＊：貯蔵時の荷重作用点までの距離

（単位　：mm）

［　］　：材料

①～③　：応力評価点（面）

下部トラニオン

図 1－1　形状・寸法・材料・応力評価点（面）

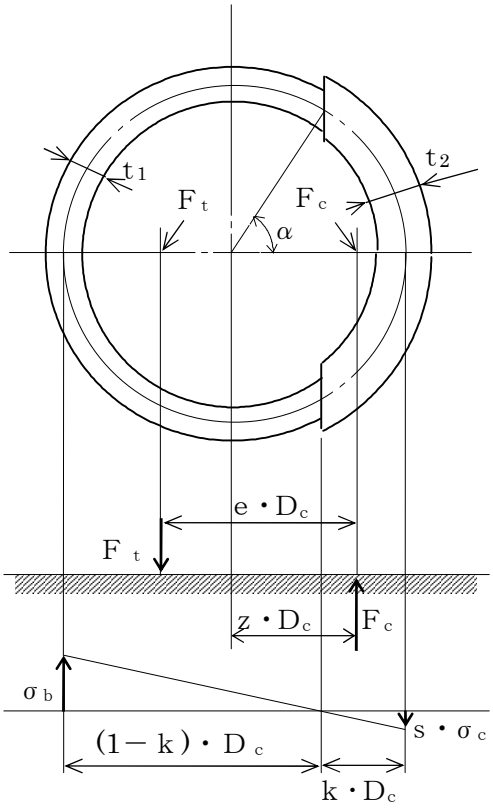
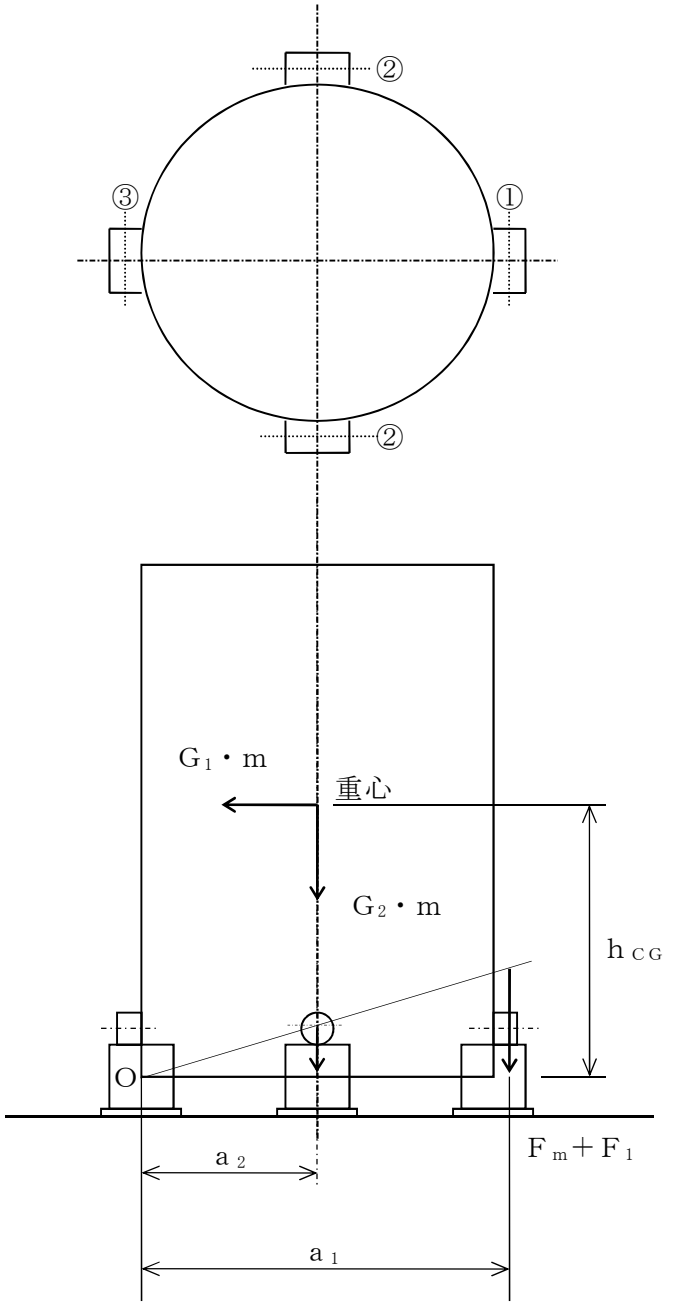


図2－1　トラニオンボルトの荷重説明図



①～③：支持台番号

図 2－2 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1－1(1)　計算結果の概要

部　位	材　　料	設計事象	一次応力					
			せん断応力 (MPa)		曲げ応力 (MPa)		垂直応力とせん断応力の組合せ (MPa)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	Ｉ＋S_d*	148	341	419	591	441	591
		Ｉ＋S_s	148	341	419	591	441	591

部　位	材　　料	設計事象	一次＋二次応力					
			せん断応力 (MPa)		曲げ応力 (MPa)		垂直応力とせん断応力の組合せ (MPa)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	Ｉ＋S_d*	148	682	419	1182	441	1182
		Ｉ＋S_s	148	682	419	1182	441	1182

表 1－1(2)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　料	設計事象	引張応力	
			計算値	許容応力
トラニオンボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	Ⅰ＋S_d*	323	475
		Ⅰ＋S_s	323	475

表 2－1　トラニオンの応力評価（貯蔵時：S_d*地震力及びS_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類		S_d*地震力		S_s地震力		許容応力
			計算値	評価点（面）	計算値	評価点（面）	
下部トラニオン	一次応力	せん断応力	148	①	148	①	341
		曲げ応力	419	②	419	②	591
		垂直応力とせん断応力の組合せ	441	②	441	②	591
	一次＋二次応力*	せん断応力	148	①	148	①	682
		曲げ応力	419	②	419	②	1182
		垂直応力とせん断応力の組合せ	441	②	441	②	1182
トラニオンボルト	－	引張応力	323	③	323	③	475

注記　＊：地震力のみによる全振幅について評価する。

補足資料

トラニオンの応力解析の方針

目次

1. 概要 ····· 補-4
2. 適用基準 ····· 補-5
3. 用語及び記号 ····· 補-6
3.1 用語の説明 ····· 補-6
3.2 記号の説明 ····· 補-7
4. 荷重条件 ····· 補-9
4.1 設計条件 ····· 補-9
4.2 設計事象 ····· 補-9
4.3 荷重の種類とその組合せ ····· 補-9
5. 計算条件 ····· 補-10
5.1 解析対象とする事象 ····· 補-10
5.2 解析箇所 ····· 補-10
5.3 形状及び寸法 ····· 補-10
5.4 物性値 ····· 補-10
5.5 許容応力 ····· 補-10
6. 応力解析の手順 ····· 補-12
6.1 解析手順の概要 ····· 補-12
6.2 荷重条件の選定 ····· 補-12
6.3 応力計算と応力の分類 ····· 補-12
6.3.1 応力計算の方法 ····· 補-12
6.3.2 応力の分類 ····· 補-13
6.4 応力の評価（ボルトを除く） ····· 補-13
6.4.1 一次応力 ····· 補-13
6.4.2 一次＋二次応力 ····· 補-13
6.4.3 組合せ応力 ····· 補-13
6.5 ボルトの応力評価 ····· 補-13
7. 解析及び評価結果の添付 ····· 補-14
7.1 応力解析結果 ····· 補-14
7.2 応力評価結果 ····· 補-14

図表目次

補図 5－1　トランニオンの応力解析箇所 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 補-15
補図 6－1　トランニオンの応力解析フロー図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 補-16

補表 4－1　乾式貯蔵キャスクの設計事象 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 補-17
補表 4－2　トランニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ ・・・・・・・・・・・・・ 補-17
補表 5－1　代表事象 ・・・ 補-18
補表 5－2　熱応力計算に使用する材料の物性値 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 補-18
補表 5－3　トランニオン用材料の許容応力値 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 補-19
補表 5－4　トランニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 補-20
補表 6－1　数値の丸め方一覧表 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 補-21

1. 概要

本図書は,使用済燃料乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

当該トラニオンは，使用済燃料乾式貯蔵容器の取扱い時及び貯蔵時の支持のための部材であることから，キャスク容器の評価手法との整合をとり，発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。））ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005/2007）（日本機械学会　2007年9月）（以下「設計・建設規格」という。）におけるクラス1支持構造物に準じて強度評価を行う。

3.　用語及び記号

3.1　用語の説明

本書及び応力計算書において，使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式貯蔵キャスク」という。）の構造体に関する下記の用語を使用する。ただし，本文中に特記のある場合は，この限りでない。

(1)　乾式貯蔵キャスク

内部を乾燥させ，不活性ガスを封入し，使用済燃料を収納する容器で，事業所内運搬及び貯蔵を兼用する容器であり，キャスク容器，バスケット，トラニオン等により構成されるものをいう。

(2)　キャスク容器

乾式貯蔵キャスクのうち，放射性物質を閉じ込めるための圧力バウンダリを構成するものであって，胴，一次蓋，一次蓋締付けボルト，バルブカバー及びバルブカバー締付けボルトをいう。

(3)　トラニオン

乾式貯蔵キャスクの取扱い時及び貯蔵時の支持のため，吊上げ及び固定に使用されるものであって，トラニオン及びトラニオンボルトをいう。

3.2　記号の説明

本書及び応力計算書において，応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし，本文中に特記のある場合は，この限りでない。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	トラニオンの断面積	mm^2
A_b	トラニオンボルトの断面積	mm^2
a_1	地震時の乾式貯蔵キャスク回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a_2	地震時の乾式貯蔵キャスク回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
C_c	トラニオンボルト計算における係数	－
C_H	水平方向設計震度	－
C_t	トラニオンボルト計算における係数	－
C_V	鉛直方向設計震度	－
D_{bi}	トラニオンボルト取付部の内径	mm
D_{bo}	トラニオンボルト取付部の外径	mm
D_c	トラニオンボルトのピッチ円直径	mm
e	トラニオンボルト計算における係数	－
F_{cc}	キャスク容器に作用する圧縮力	N
F_m	トラニオンに作用する荷重	N
F_{tb}	トラニオンボルトに作用する引張力	N
F_1	トラニオン固定ボルトの初期締付け力	N
f_T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
f_t	許容引張応力	MPa
f_s	許容せん断応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
f_t^*	許容引張応力 *	MPa
f_s^*	許容せん断応力 *	MPa
f_b^*	許容曲げ応力 *	MPa
G	重力加速度(＝9.80665)	m/s^2
G_1	乾式貯蔵キャスク軸に直角方向（上下方向）の加速度	m/s^2
G_2	乾式貯蔵キャスク軸方向（前後方向）の加速度	m/s^2
h_{CG}	乾式貯蔵キャスク底面から重心までの高さ	mm

注記　＊：f_t^*，f_s^*，f_b^*は，各々f_t，f_s，f_bの値を算出する際に設計・建設規格SSB-3121.1(1)a.の本文中「付録材料図表　Part5　表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表　Part5　表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」と読み替えて算出した値。

計算書の記号	記号の説明	単位
k	トラニオンボルト計算における中立軸の荷重係数	－
L	荷重位置と評価点との距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
m	質量	kg
n	トラニオンボルト本数	－
S_d*	弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	－
S_s	基準地震動S_sによる地震力	－
t_1	トラニオンボルト面積相当幅	mm
t_2	圧縮側相当幅	mm
Z	トラニオンの断面係数	mm^3
z	トラニオンボルト計算における係数	－
α	トラニオンボルト計算における中立軸を定める角度	rad
σ	トラニオンの評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	トラニオンの曲げ応力	MPa
σ_{cc}	キャスク容器の圧縮応力	MPa
σ_T	トラニオンの組合せ応力	MPa
σ_{tb}	トラニオンボルトの引張応力	MPa
τ	トラニオンのせん断応力	MPa
Ⅰ＋S_d*	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d*地震力が作用した場合の許容応力状態	－
Ⅰ＋S_s	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用した場合の許容応力状態	－

4. 荷重条件

トラニオンは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 設計条件

最高使用温度： 140 ℃

機械的荷重 ： 自重及び地震力による荷重をいう。
なお，自重には燃料集合体を含む乾式貯蔵キャスクの貯蔵時の設計質量を用いる。

熱荷重 ： キャスク容器の熱膨張によりトラニオンに生じる荷重をいう。

4.2 設計事象

考慮する設計事象を補表 4－1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを補表 4－2 に示す。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

補表 5－1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し,代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

応力解析を行う箇所の形状を補図 5－1 に示す。

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は以下の通りである。

(1) 熱応力計算に使用する物性値を補表 5－2 に示す。

(2) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は,最高使用温度に対する値を用いる。なお,常温は 20 ℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は，次に掲げる通りとする。

(1) トラニオン（ボルトを除く）にあっては，次によること。

a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.2 に定める値を超えないこと。

b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s 地震力が作用して生じる一次応力は，設計・建設規格　SSB-3121.3 に定める値を超えないこと。

c. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は，次の値を超えないこと。

(a) せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値の差については，設計・建設規格　SSB-3122.1(2)及び(3)に定める値

d. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は，次の値を超えないこと。

(a) せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値の差は，設計・建設規格 SSB-3122.1(2)及び(3)に定める値

e. c.及び d.において応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は設計・建設規格 SSB-3121.1(6)による。この場合において，それぞれの式中の各許容応力は3倍した値とする。

(2) ボルトにあっては，次によること。

a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は，設計・建設規格 SSB-3132 に定める値を超えないこと。

b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は，設計・建設規格 SSB-3133 に定める値を超えないこと。

(3) (1)及び(2)において，設計・建設規格の「供用状態C」及び「供用状態D」は，それぞれ「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる場合」及び「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる場合」と読み替える。

許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

トラニオン用材料の許容応力値を補表5－3及び補表5－4に示す。

6.　応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1　解析手順の概要

トラニオンの応力解析フローを補図 6－1 に示す。

トラニオンの応力解析は,想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2　荷重条件の選定

荷重条件は 4 章に示されているが，各部の計算においては，その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。

6.3　応力計算と応力の分類

6.3.1　応力計算の方法

(1)　応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の 2 つである。

a.　機械的荷重

b.　熱荷重

(2)　貯蔵時において，地震力が作用する場合の鉛直方向及び水平方向荷重は，下部トラニオン 4 個で支持する。

なお，荷重作用点位置は荷重支持面の中央部とする。

(3)　構造の不連続性を考慮して，応力評価点（面）をとる。評価点（面）は，計算書の形状図中に，番号〔例①〕で示す。

応力評価は，この応力評価点（面）について行う。

(4)　数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を補表 6－1 に示す。

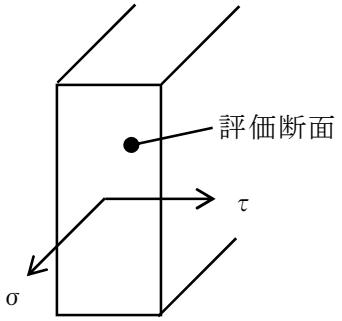
6.3.2　応力の分類

応力の計算結果は補表 5－3 及び補表 5－4 に示すように応力の種類ごとに分類して，応力計算書に示す。このときの応力の定義と分類は設計・建設規格　GNR-2130 による。

なお，応力の記号とその方向は，以下の通りである。

σ ：評価断面に垂直な方向の応力

τ ：せん断応力



6.4　応力の評価（ボルトを除く）

6.4.1　一次応力

機械的荷重により発生する一次応力が，5.5(1)a.及び b.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.4.2　一次＋二次応力

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力及びS_s地震力のみによって発生する一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力が，5.5(1) c.及び d.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.4.3　組合せ応力

応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は，5.5(1)a.，b.及び e.により行う。

6.5　ボルトの応力評価

ボルトの応力評価として，5.5(2)に示す許容応力値を満足することを示す。また，応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は 5.5(2)により行う。

7. 解析及び評価結果の添付

応力計算書では，以下に示すように解析結果を添付する。

7.1 応力解析結果

考慮した荷重ごとに評価対象とした応力評価点（面）について，応力の種類ごとに解析結果を示す。

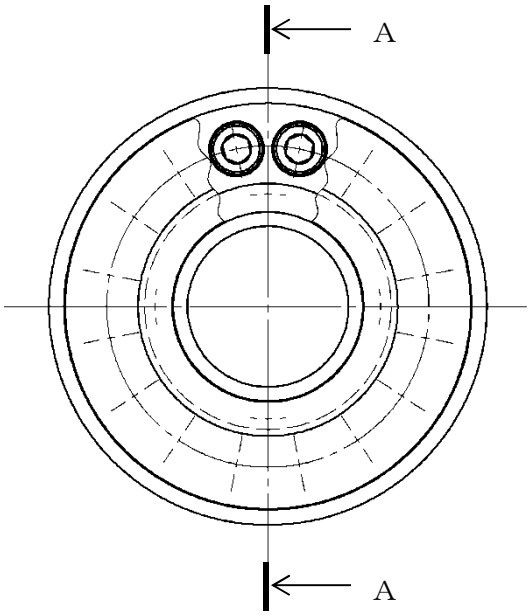
7.2 応力評価結果

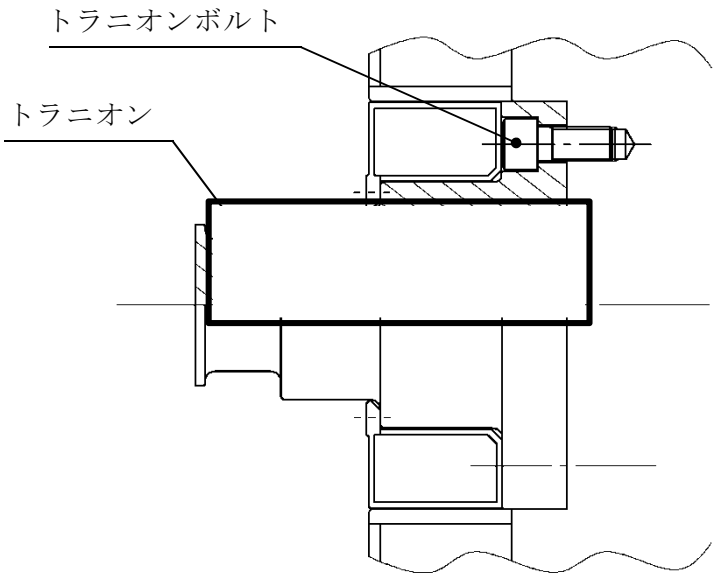
次の応力評価結果を，評価対象とした応力評価点（面）について添付する。

(1) 一次応力

(2) 一次＋二次応力

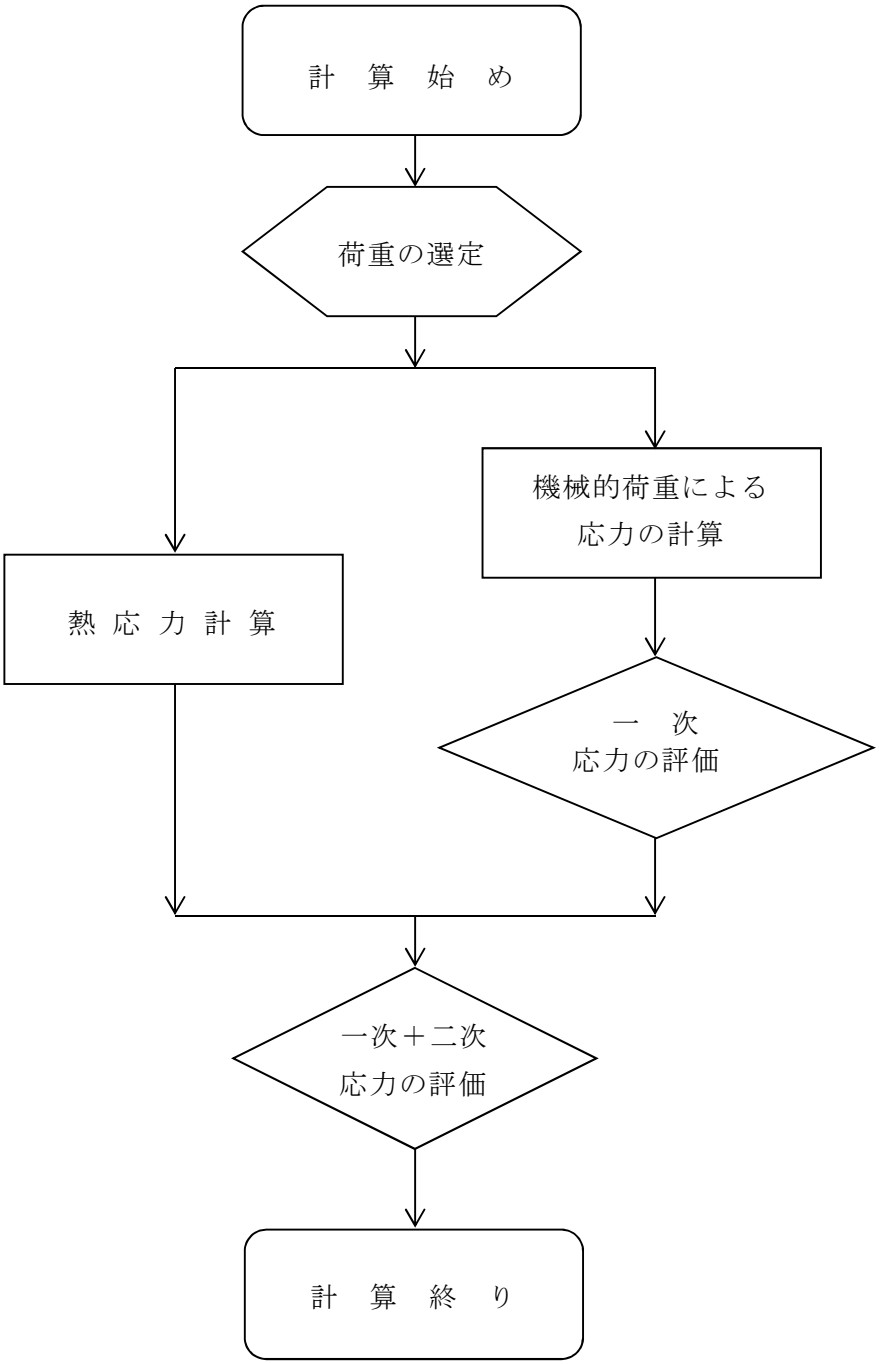
(3) 組合せ応力





A～A矢視図

補図 5－1　トラニオンの応力解析箇所



補図 6－1　トラニオンの応力解析フロー図

補表 4－1　乾式貯蔵キャスクの設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	乾式貯蔵キャスクの通常の取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・乾式貯蔵キャスクの吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬	・貯蔵

補表 4－2　トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷重 ＼ 設計事象 荷重時	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重 *1	備考
				支持構造物への衝突 異常着床		
I　貯蔵時	○	－	－	－	○	*2

注記　＊1：キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。

＊2：トラニオン固定ボルトの初期締付け力，S_d^*地震力及びS_s地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

補表 5－1　代表事象

設計事象	代表事象 *	包絡される事　象	荷重条件	備考
Ｉ＋Ｓ$_{d}$*	貯蔵時 （Ｓ$_{d}$*地震力が作用する場合）	－	自重 トラニオン固定ボルトの初期締付け力 地震力 水平方向：1.17 G(＝11.48 m/s^{2}) 鉛直方向：0.65 G(＝6.38 m/s^{2}) 熱荷重	－
Ｉ＋Ｓ$_{s}$	貯蔵時 （Ｓ$_{s}$地震力が作用する場合）	－	自重 トラニオン固定ボルトの初期締付け力 地震力 水平方向：1.17 G(＝11.48 m/s^{2}) 鉛直方向：0.65 G(＝6.38 m/s^{2}) 熱荷重	－

注記　＊：本事象について応力解析を行う。

補表 5－2　熱応力計算に使用する材料の物性値

構成部材	材料	温度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm･℃))
トラニオン	SUS630 H1150	140	187000	11.30
トラニオンボルト	SNB23-3	140	184000	12.13

補表 5－3　トラニオン用材料の許容応力値

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類		許容応力値	
			トラニオン SUS630 H1150	許容値基準
$I+S_d^*$ *1	一次応力	せん断応力	341	$1.5f_s$
		曲げ応力	591	$1.5f_b$
	一次＋二次応力	せん断応力 *2	682	$3f_s$
		曲げ応力 *2	1182	$3f_b$
$I+S_s$ *1	一次応力	せん断応力	341	$1.5f_s$*
		曲げ応力	591	$1.5f_b$*
	一次＋二次応力	せん断応力*2	682	$3f_s$
		曲げ応力*2	1182	$3f_b$

注記　＊1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力（σ）とせん断応力（τ）を組み合わせた応力（σ_T）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2+3\cdot\tau^2}$$

＊2：地震力のみによる全振幅について評価する。

補表 5－4　トラニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値

（単位：MPa）

設計応力区分	応力の種類	許容応力値	
		トラニオンボルト SNB23-3	許容値基準
Ⅰ＋ S_d* *	引張応力	475	1.5 f_t
	せん断応力	366	1.5 f_s
Ⅰ＋ S_s *	引張応力	475	1.5 f_t*
	せん断応力	366	1.5 f_s*

注記　＊：組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は，次の 2 つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$

$f_T \leqq f_t$

ここで，τ：ボルトに発生するせん断応力（MPa）

ただし，

Ⅰ＋S_d*の場合，f_tは 1.5 f_tとする。

Ⅰ＋S_s の場合，f_tは 1.5 f_t*とする。

補表 6－1　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用温度	℃	－	－	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	－	－	設計値
設計震度	－	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm^2	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	－	－	設計値

Ⅴ-2-4-2-3　使用済燃料乾式貯蔵容器の強度計算書
（支持構造物の応力計算書）

目次

1. 概要 ····· 1
1.1 形状・寸法・材料 ····· 1
1.2 計算結果の概要 ····· 1
2. 応力計算 ····· 2
2.1 応力評価点 ····· 2
2.2 貯蔵時 ····· 2
2.2.1 荷重条件 ····· 2
2.2.2 計算方法 ····· 2
2.2.3 計算結果 ····· 3
2.3 貯蔵時（S_d^*地震力が作用する場合） ····· 3
2.3.1 荷重条件 ····· 3
2.3.2 計算方法 ····· 3
2.3.3 計算結果 ····· 7
2.4 貯蔵時（S_s地震力が作用する場合） ····· 7
2.4.1 荷重条件 ····· 7
2.4.2 計算方法 ····· 7
2.4.3 計算結果 ····· 7
3. 応力の評価 ····· 8
3.1 一次応力の評価 ····· 8
3.2 一次＋二次応力の評価 ····· 8
3.3 組合せ応力の評価 ····· 8

・補足資料－１：支持構造物の応力解析の方針

図表目次

図1－1　形状・寸法・材料・応力評価点（面）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9
図1－2　形状・寸法・材料・応力評価点（面）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　10
図2－1　地震時に作用する荷重の計算モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　11

表1－1　計算結果の概要 ・・　12
表2－1　支持構造物の応力評価（設計事象Ⅰ）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　13
表2－2　支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_d^* 地震力が作用する場合）　・・・・・・・・・　14
表2－3　支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）　・・・・・・・・・・・　15

1. 概要

本計算書は，支持構造物に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1－1及び図1－2に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表1－1(1)，(2)に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

支持構造物の応力評価点（面）を図1－1及び図1－2に示す。

2.2 貯蔵時

2.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

自重＋熱荷重

2.2.2 計算方法

リブ及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。なお，トラニオン固定ボルト，容器押えボルト，アンカーボルト，トラニオン固定金具及び支持台用フレームについては，(自重＋熱荷重)により発生する応力は無視できるため評価を省略する。

(1) リブ

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

自重によりリブに生じる圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c=(m_c+n\cdot m_s)\cdot G/(n\cdot A) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.1)$$

ここで，m_c ：貯蔵容器質量（＝ ）

n ：支持台の数（＝ ）

m_s ：支持台1個の質量（＝ ）

G ：重力加速度（＝9.80665m/s^2）

A ：断面積（＝ ）

b. 一次＋二次応力

(a) 引張・圧縮応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので，リブに発生する応力は(2.1)式と同様に計算する。

(2) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

自重により支持台座に生じる支圧応力(σ_p)は次式で計算する。

$$\sigma_p=m_c\cdot G/(n\cdot A) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.2)$$

ここで，m_c，G，n ：(1)a.(a)と同じ

A ：支持台座の貯蔵容器底面接触面積

（＝ ）

b.　一次＋二次応力

(a)　支圧応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので，支持台座に発生する支圧応力は，(2.2)式と同様に計算する。

2.2.3　計算結果

応力計算結果を表2－1に示す。

2.3　貯蔵時（S_d^*地震力が作用する場合）

2.3.1　荷重条件

貯蔵時においてS_d^*地震力が作用する場合の荷重は，次に示す組合せとする。なお，地震力にはS_s地震力を適用する。

地震力＋自重＋熱荷重＋トラニオン固定ボルトの初期締付け力

2.3.2　計算方法

トラニオン固定ボルト，トラニオン固定金具，リブ，アンカーボルト，容器押えボルト，支持台座及び支持台用フレームの応力計算は以下に示すとおりである。

(1)　トラニオン固定ボルト

a.　引張応力

トラニオン固定ボルトに作用する最大引張力（F_1）は，図2－1に示す支持台①に生じ，次式で計算する。

$$F_1=\frac{G_1\cdot h_{CG}-G_2\cdot a_2}{\frac{2\cdot a_2^{\,2}}{a_1}+a_1}\cdot m_c \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3)$$

ここで，$G_1=C_H\cdot G$，$G_2=(1-C_V)\cdot G$

G_1　：水平方向加速度(m/s^2)

G_2　：鉛直方向加速度(m/s^2)

C_H　：水平方向設計震度（＝1.17）

C_V　：鉛直方向設計震度（＝0.65）

G　：2.2.2(1)a.(a)と同じ

h_{CG}　：貯蔵容器底面から重心までの高さ（＝[redacted]）

a_1　：支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離（＝[redacted]）

a_2　：支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離（＝[redacted]）

m_c　：2.2.2(1)a.(a)と同じ

この引張力（F_1）によりトラニオン固定ボルトに発生する引張応力（σ_t）は次式で計算する。

$$\sigma_t=F_1/(n\cdot A)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.4)$$

ここで，F_1 ：(2.3)式と同じ

n ：トラニオン固定金具１組当たりのボルトの本数（＝[redacted]

A ：トラニオン固定ボルト[redacted]の断面積（＝[redacted]

(2) トラニオン固定金具

a. 一次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定金具にはトラニオン固定ボルトの引張力(F_1)及びトラニオン固定ボルトの初期締付け力(F_3)により曲げ応力(σ_b)が発生し，次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{L}{4 \cdot Z} \cdot (F_1 + F_3) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.5)$$

ここで，F_1 ：(2.3)式と同じ

F_3 ：トラニオン固定ボルトの初期締付け力（＝[redacted]

L ：トラニオン固定ボルト間距離（＝[redacted]

Z ：トラニオン固定金具の断面係数（＝[redacted]

b. 一次＋二次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)による曲げ応力の全振幅(σ_b)は，(2.5)式と同様に計算する。

(3) リブ

a. 一次応力

(a) 引張応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)によりリブに発生する引張応力(σ_t)は，次式で計算する。

$$\sigma_t = F_1 / A \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.6)$$

ここで，F_1 ：(2.3)式と同じ

A ：2.2.2(1)a.(a)と同じ

(b) 圧縮応力

リブに作用する最大圧縮力(F_c)は図2－1に示す支持台③に生じ，次式で計算する。

$$F_c = G_2 \cdot (m_c + m_s) + 2 \cdot F_2 + F_1 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.7)$$

ここで，$G_1 = C_H \cdot G$，$G_2 = (1 + C_V) \cdot G$

G_1 ：水平方向加速度(m/s^2)

G_2 ：鉛直方向加速度(m/s^2)

C_H，C_V ：(1)a.と同じ

m_c，m_s，G ：2.2.2(1)a.(a)と同じ

F_1 ：(2.3)式と同じ

F_2 ：支持台②での引張力（$= \frac{a_2}{a_1} \cdot F_1$）(N)

a_1，a_2 ：(1)a.と同じ

この圧縮力(F_c)によりリブに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c = F_c / A \cdots\cdots (2.8)$$

ここで，F_c ：(2.7)式と同じ

A ：2.2.2(1)a.(a)と同じ

b. 一次＋二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は，次式で計算する。

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c \cdots\cdots (2.9)$$

ここで，σ_t ：(2.6)式と同じ

σ_c ：(2.8)式と同じ

(4) アンカーボルト

支持台は図1－2に示すように形鋼で互いに接合されている。荷重がA部に加わると支持台用フレームを介してB部の支持台でも荷重を受ける。

a. 引張応力

(2.3)式により計算する引張力(F_1)によりアンカーボルトに生じる引張応力(σ_t)は次式で計算する。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \cdots\cdots (2.10)$$

ここで，F_1 ：(2.3)式と同じ

n ：支持台1個当たりのアンカーボルトの本数（＝[redacted]

A ：アンカーボルト[redacted]の断面積（＝[redacted]

b. せん断応力

アンカーボルトに作用する最大水平力(F_H)は図2－1に示す支持台③に生じ，次式で計算する。

$$F_H = C_H \cdot G \cdot (m_c + n_1 \cdot m_s) \cdots\cdots (2.11)$$

ここで，C_H ：(1)a.と同じ

m_c，m_s，G ：2.2.2(1)a.(a)と同じ

n_1 ：支持台の数（＝[redacted]

この水平力(F_H)は支持台2箇所で受けることから，アンカーボルトに発生するせん断応力(τ)は，次式で計算する。

$$\tau = F_H / (2 \cdot n \cdot A) \cdots\cdots (2.12)$$

ここで，F_H ：(2.11)式と同じ

n，A ：a.と同じ

(5) 容器押えボルト

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

容器押えボルトに作用する最大水平力(F_H)は図2－1に示す支持台③に生じ，次式で計算する。

$$F_H = C_H \cdot G \cdot m_c \cdots\cdots (2.13)$$

ここで，C_H　　：(1)a.と同じ

m_c，G　：2.2.2(1)a.(a)と同じ

水平力(F_H)により容器押えボルトに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c = F_H / (n \cdot A) \cdots\cdots (2.14)$$

ここで，F_H ：(2.13)式と同じ

n　：支持台１個当たりの容器押えボルトの本数（=[redacted]

A　：容器押えボルトの断面積（=[redacted]

b.　一次＋二次応力

(a)　座屈応力

容器押えボルトには地震時以外に外荷重が作用しないので，地震力による座屈応力の最大値(σ)は，(2.14)式と同様に計算する。

(6)　支持台座

a.　一次応力

(a)　支圧応力

支持台座に作用する最大圧縮力(F_c)は図2－1に示す支持台③に生じ，次式で計算する。

$$F_c = G_2 \cdot m_c + 2 \cdot F_2 + F_1 + F_3 \cdots\cdots (2.15)$$

ここで，$G_1 = C_H \cdot G$，$G_2 = (1 + C_V) \cdot G$

G_1　　：水平方向加速度(m/s^2)

G_2　　：鉛直方向加速度(m/s^2)

C_H，C_V　：(1)a.と同じ

m_c，G　：2.2.2(1)a.(a)と同じ

F_1　　：(2.3)式と同じ

F_2　　：(3)a.(b)と同じ

F_3　　：(2)a.(a)と同じ

圧縮力(F_c)により発生する支圧応力(σ_p)は次式で計算する。

$$\sigma_p = F_c / A \cdots\cdots (2.16)$$

ここで，F_c ：(2.15)式と同じ

A　：2.2.2(2)a.(a)と同じ

b.　一次＋二次応力

(a)　支圧応力

支圧応力(σ_p)は(2.16)式と同様に計算する。

(7)　支持台用フレーム

a.　一次応力

(a)　引張応力

支持台用フレームには，(2.11)式により計算する最大水平力(F_H)の 1/2 の荷重が加わり，このときの引張応力（σ_t)は次式で計算する。

$$\sigma_t = F_H / (2 \cdot A) \cdots\cdots (2.17)$$

ここで，F_H：(2.11)式と同じ

Ａ：支持台用フレームの断面積（＝[redacted]

b. 一次＋二次応力

(a) 引張応力

最大水平荷重による引張応力の全振幅(σ_t)は，(2.17)式と同様に計算する。

2.3.3 計算結果

応力計算結果を表2－2に示す。

2.4 貯蔵時（S_s地震力が作用する場合）

2.4.1 荷重条件

貯蔵時においてS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重＋熱荷重＋トラニオン固定ボルトの初期締付け力

2.4.2 計算方法

トラニオン固定ボルト，トラニオン固定金具，リブ，アンカーボルト，容器押えボルト，支持台座及び支持台用フレームの応力計算は2.3.2項と同様である。

ただし，C_H　：水平方向設計震度（＝1.17）

C_V　：鉛直方向設計震度（＝0.65）

2.4.3 計算結果

応力計算結果を表2－3に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 2－1，表 2－2 及び表 2－3 に示す。

表 2－1，表 2－2 及び表 2－3 より，各設計事象の一次応力は補足資料－1「支持構造物の応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。

3.2 一次＋二次応力の評価

各設計事象における評価を表 2－1，表 2－2 及び表 2－3 に示す。

表 2－1，表 2－2 及び表 2－3 より，各設計事象の一次＋二次応力は補足資料－1「支持構造物の応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

各設計事象における評価を表 2－2 及び表 2－3 に示す。

表 2－2 及び表 2－3 より，各設計事象における組合せ応力は補足資料－1「支持構造物の応力解析の方針」5.5 節の各規定を満足する。

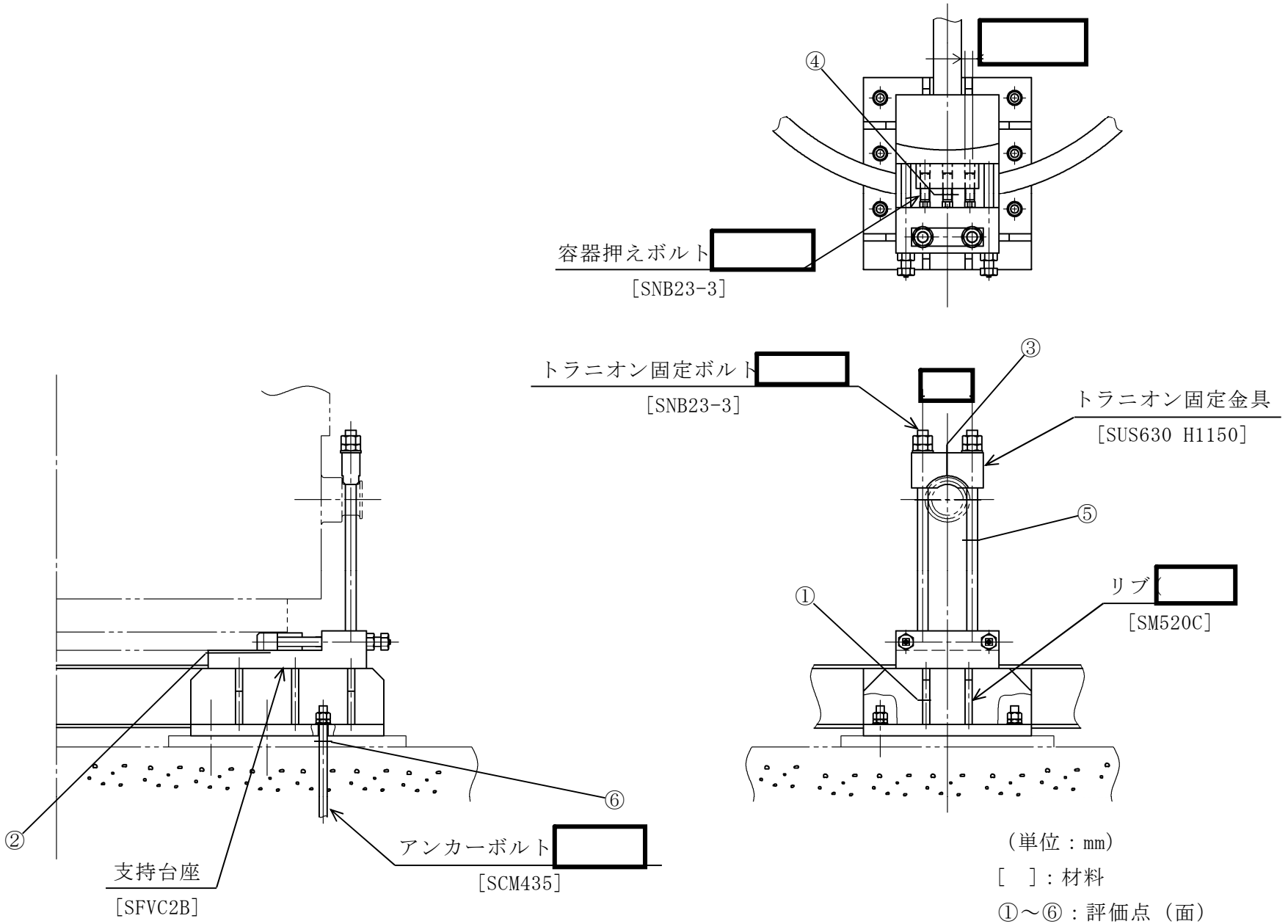
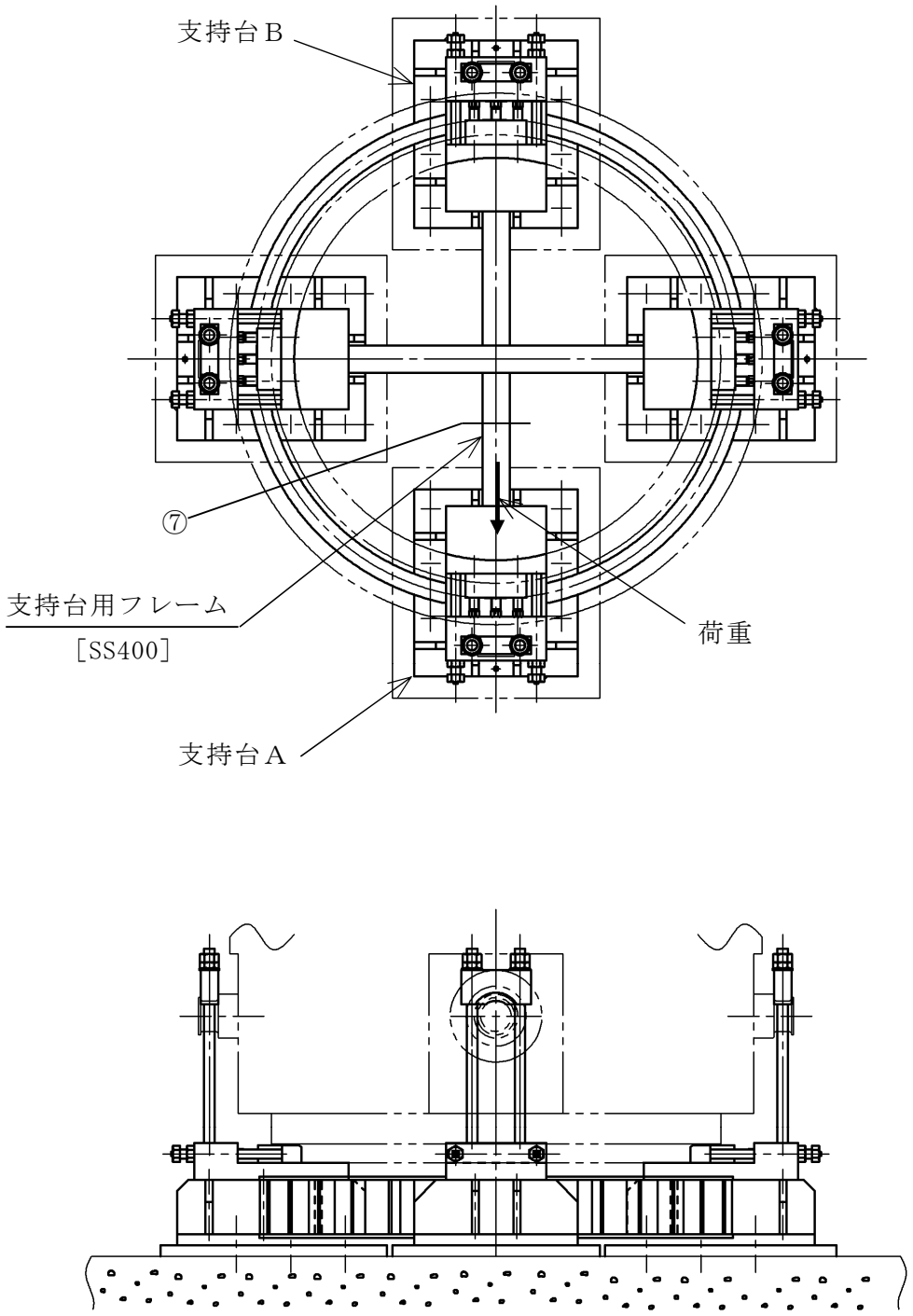
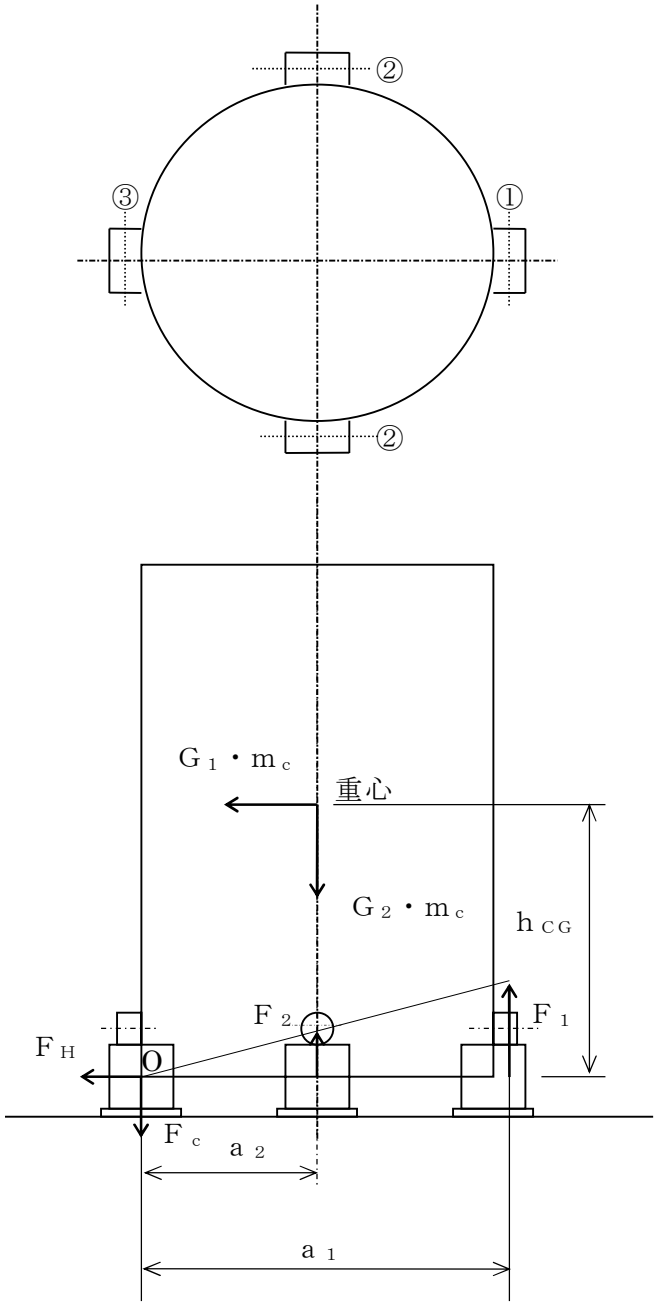


図 1－1　形状・寸法・材料・応力評価点（面）



［　］　：材料
⑦　　：応力評価点（面）

図 1－2　形状・寸法・材料・応力評価点（面）



①～③：支持台番号

図 2－1 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1－1(1)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　　料	設計事象	一次応力		一次＋二次応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
リブ	炭素鋼 (SM520C)	Ⅰ	5		5	
		Ⅰ＋S_d*	64		81	
		Ⅰ＋S_s	64		81	
支持台座	炭素鋼 (SFVC2B)	Ⅰ	3		3	
		Ⅰ＋S_d*	41		41	
		Ⅰ＋S_s	41		41	
トラニオン固定金具	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	Ⅰ＋S_d*	401		401	
		Ⅰ＋S_s	401		401	
容器押えボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	Ⅰ＋S_d*	417		417	
		Ⅰ＋S_s	417		417	
支持台用フレーム	炭素鋼 (SS400)	Ⅰ＋S_d*	99		99	
		Ⅰ＋S_s	99		99	

表 1－1(2)　計算結果の概要

（単位：MPa）

部　位	材　　料	設計事象	引張応力		せん断応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン固定ボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	Ⅰ＋S_d*	305		—	—	—	—
		Ⅰ＋S_s	305		—	—	—	—
アンカーボルト	低合金鋼 (SCM435)	Ⅰ＋S_d*	181		113		181	
		Ⅰ＋S_s	181		113		181	

表 2－1　支持構造物の応力評価（設計事象Ⅰ）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			計算値	評価点（面）	
リ　　ブ	一次応力	圧縮応力	5	①	
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力	5	①	
支持台座	一次応力	支圧応力	3	②	
	一次＋二次応力	支圧応力	3	②	

表 2－2　支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_d^*地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点（面）	許容応力
トラニオン固定金具	一次応力	曲げ応力	401	③	
	一次＋二次応力 *	曲げ応力	401	③	
リ　　ブ	一次応力	引張応力	18	①	
		圧縮応力	64	①	
	一次＋二次応力 *	引張・圧縮応力	81	①	
容器押えボルト	一次応力	圧縮応力	417	④	
	一次＋二次応力	座屈応力	417	④	
支持台座	一次応力	支圧応力	41	②	
	一次＋二次応力	支圧応力	41	②	
支持台用フレーム	一次応力	引張応力	99	⑦	
	一次＋二次応力*	引張応力	99	⑦	
トラニオン固定ボルト	―	引張応力	305	⑤	
アンカーボルト	―	引張応力	181	⑥	
		せん断応力	113	⑥	
		組合せ応力	181	⑥	

注記　＊：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 2－3　支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点（面）	許容応力
トラニオン固定金具	一次応力	曲げ応力	401	③	
	一次＋二次応力 *	曲げ応力	401	③	
リ　　ブ	一次応力	引張応力	18	①	
		圧縮応力	64	①	
	一次＋二次応力 *	引張・圧縮応力	81	①	
容器押えボルト	一次応力	圧縮応力	417	④	
	一次＋二次応力	座屈応力	417	④	
支持台座	一次応力	支圧応力	41	②	
	一次＋二次応力	支圧応力	41	②	
支持台用フレーム	一次応力	引張応力	99	⑦	
	一次＋二次応力*	引張応力	99	⑦	
トラニオン固定ボルト	—	引張応力	305	⑤	
アンカーボルト	—	引張応力	181	⑥	
		せん断応力	113	⑥	
		組合せ応力	181	⑥	

注記　＊：地震力のみによる全振幅について評価する。

補足資料－１

支持構造物の応力解析の方針

目次

1. 概要 ・・・ 補1－4
2. 適用基準 ・・・ 補1－5
3. 記号 ・・・ 補1－6
 3.1 記号の説明 ・・・ 補1－6
4. 設計条件 ・・・ 補1－8
 4.1 基本仕様 ・・・ 補1－8
 4.2 設計事象 ・・・ 補1－8
 4.3 荷重の種類とその組合せ ・・・ 補1－8
5. 計算条件 ・・・ 補1－9
 5.1 解析対象とする事象 ・・・ 補1－9
 5.2 解析箇所 ・・・ 補1－9
 5.3 形状及び寸法 ・・・ 補1－9
 5.4 物性値 ・・・ 補1－9
 5.5 許容応力 ・・・ 補1－9
6. 応力解析の手順 ・・・ 補1－11
 6.1 解析手順の概要 ・・・ 補1－11
 6.2 荷重条件の選定 ・・・ 補1－11
 6.3 応力計算と評価 ・・・ 補1－11
  6.3.1 応力計算の方法 ・・・ 補1－11
  6.3.2 応力評価 ・・・ 補1－11
  6.3.3 数値の丸め方 ・・・ 補1－12

図表目次

図 5－1　支持構造物の応力解析箇所 ･････････････････････････････････ 補 1－13
図 6－1　支持構造物の応力解析フロー図 ･･･････････････････････････････ 補 1－14

表 4－1　貯蔵容器の設計事象 ･････････････････････････････････････ 補 1－15
表 4－2　支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ･･････････････ 補 1－16
表 5－1　代表事象 ･･ 補 1－17
表 5－2　熱応力計算に使用する材料の物性値 ･･････････････････････････ 補 1－18
表 6－1　支持構造物用材料の許容応力値･･･････････････････････････････ 補 1－19
表 6－2　支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値･･････････････････ 補 1－21
表 6－3　数値の丸め方一覧表 ･････････････････････････････････････ 補 1－22

1. 概要

本図書は,使用済燃料乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

当該支持構造物は，貯蔵時において貯蔵容器を固縛する構造物であることから，キャスク容器の評価手法との整合をとり，発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。））ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005/2007）（日本機械学会　2007 年 9 月）におけるクラス１支持構造物に準じて強度評価を行う。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において，応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし，本文中に特記のある場合は，この限りでない。

なお，応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm^2
a_1	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a_2	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
C_H	水平方向設計震度	－
C_V	鉛直方向設計震度	－
F_c	圧縮力	N
F_1	支持台①の引張力	N
F_2	支持台②の引張力	N
F_3	トラニオン固定ボルトの初期締付け力	N
F_H	水平力	N
f_T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
f_t	許容引張応力	MPa
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
f_p	許容支圧応力	MPa
f_t^*	許容引張応力 *	MPa
f_s^*	許容せん断応力 *	MPa
f_c^*	許容圧縮応力 *	MPa
f_b^*	許容曲げ応力 *	MPa
f_p^*	許容支圧応力 *	MPa
G	重力加速度(＝9.80665)	m/s^2
G_1	水平方向加速度	m/s^2
G_2	鉛直方向加速度	m/s^2
h_{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm
L	トラニオン固定ボルト間距離	mm
m_c	貯蔵容器質量	kg

注記　＊：f_t^*，f_s^*，f_c^*，f_b^*，f_p^*：f_t，f_s，f_c，f_b，f_pの値を算出する際に「設計・建設規格」 SSB-3121.1(1)a.の本文中「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値

計算書の記号	記号の説明	単位
m_s	支持台１個の質量	kg
n	部材の数	－
n_1	支持台の数	－
S_d*	弾性設計用地震動S_dによる地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	－
S_s	基準地震動S_sによる地震力	－
Z	断面係数	mm^3
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	曲げ応力	MPa
$_c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
$_t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_p	支圧応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
Ⅰ＋S_d*	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d*地震力が作用した場合の許容応力状態	－
Ⅰ＋S_s	設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用した場合の許容応力状態	－

4. 設計条件

支持構造物は以下の荷重条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度： 130 ℃

4.2 設計事象

設計上考慮する事象については表 4－1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4－2 に示す。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

設計事象Ⅰにおける事象のうち,表 5－1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し，代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

支持構造物の応力解析を行う箇所は，次のとおりである。(図 5－1 参照)

(1) 支持台座
(2) トラニオン固定金具
(3) 容器押えボルト
(4) トラニオン固定ボルト
(5) リブ
(6) 支持台用フレーム
(7) アンカーボルト

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は，応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は以下のとおりである。

(1) 熱応力計算に使用する物性値を表 5－2 に示す。
(2) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は,最高使用温度に対する値を用いる。なお,常温は 20 ℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は，次に掲げるとおりとする。

(1) 支持構造物（ボルトを除く）にあっては，次によること。
   a. 設計事象Ⅰにおいて生じる一次応力は,「設計・建設規格」 SSB-3121.1 に定める値を超えないこと。
   b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる一次応力は,「設計・建設規格」 SSB-3121.2 に定める値を超えないこと。
   c. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる一次応力は,「設計・建設規格」 SSB-3121.3 に定める値を超えないこと。
   d. 設計事象Ⅰにおいて生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は,「設計・建設規格」 SSB-3122.1 に定める値を超えないこと。
   e. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は，次の値を

超えないこと。

(a) 引張応力と圧縮応力（引張応力の符号は正とし，圧縮応力の符号は負として計算する。），せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値の差，並びに支圧応力については，「設計・建設規格」　SSB-3122.1(1)，(2)，(3)及び(4)に定める値。

(b) 座屈応力については，「設計・建設規格」　SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の1.5倍の値。

f. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は，次の値を超えないこと。

(a) 引張応力と圧縮応力（引張応力の符号は正とし，圧縮応力の符号は負として計算する。），せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値の差は，「設計・建設規格」SSB-3122.1(1)，(2)及び(3)に定める値。

(b) 支圧応力については，「設計・建設規格」　SSB-3122.1(4)に定める値。この場合において，「設計・建設規格」SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表　Part5　表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのは，「付録材料図表　Part5　表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」に読み替える。

(c) 座屈応力については，「設計・建設規格」　SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の1.5倍の値。

g. e.及びf.において応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は「設計・建設規格」　SSB-3121.1(6)による。

(2) ボルトにあっては，次によること。

a. 設計事象Ⅰにおいて呼び径断面に生じる応力は，「設計・建設規格」　SSB-3131に定める値を超えないこと。

b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は，「設計・建設規格」　SSB-3132に定める値を超えないこと。

c. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は，「設計・建設規格」　SSB-3133に定める値を超えないこと。

(3) (1)及び(2)において，「設計・建設規格」の「供用状態Ａ」，「供用状態Ｂ」，「供用状態Ｃ」及び「供用状態Ｄ」は，それぞれ「設計事象Ⅰ」，「設計事象Ⅱ」，「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_d^*地震力が作用して生じる場合」及び「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において，S_s地震力が作用して生じる場合」と読み替える。

許容応力は，最高使用温度に対する値を用いる。

6.　応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1　解析手順の概要

支持構造物の応力解析フローを図 6－1 に示す。

支持構造物の応力解析は,想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2　荷重条件の選定

荷重条件は 4 章に示されているが，各部の計算においては，その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。

6.3　応力計算と評価

6.3.1　応力計算の方法

(1)　応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の 2 つである。

a.　機械的荷重

b.　熱荷重

(2)　貯蔵時に貯蔵容器に地震力が作用する場合の上方向，下方向，水平方向荷重は，それぞれトラニオン固定金具，支持台座，容器押えボルト及び支持台用フレームで支持する。なお，荷重作用点位置は荷重支持面の中央部とする。

(3)　構造の不連続性を考慮して，応力評価点（面）をとる。評価点（面）は，計算書の形状図中に，番号〔例①〕で示す。

(4)　応力評価は，この応力評価点（面）について行う。

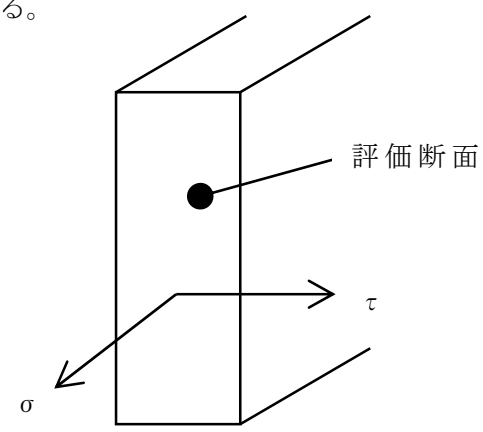
6.3.2　応力評価

応力の計算結果は,「設計・建設規格」GNR-2130 による定義に従い，応力の種類ごとに分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は以下のとおりである。

σ ：評価断面に垂直な方向の応力

τ ：せん断応力



支持構造物用材料の許容応力値を表 6－1 及び 6－2 に示す。

(1)　支持構造物（ボルトを除く。）の応力評価

支持構造物の応力評価は，「設計・建設規格」SSB-3120 に従い以下の項目を評価する。

a.　一次応力

b.　一次＋二次応力

c.　組合せ応力

(2)　ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は，「設計・建設規格」SSB-3130 に従い評価する。

6.3.3　数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めず，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6－3 に示す。

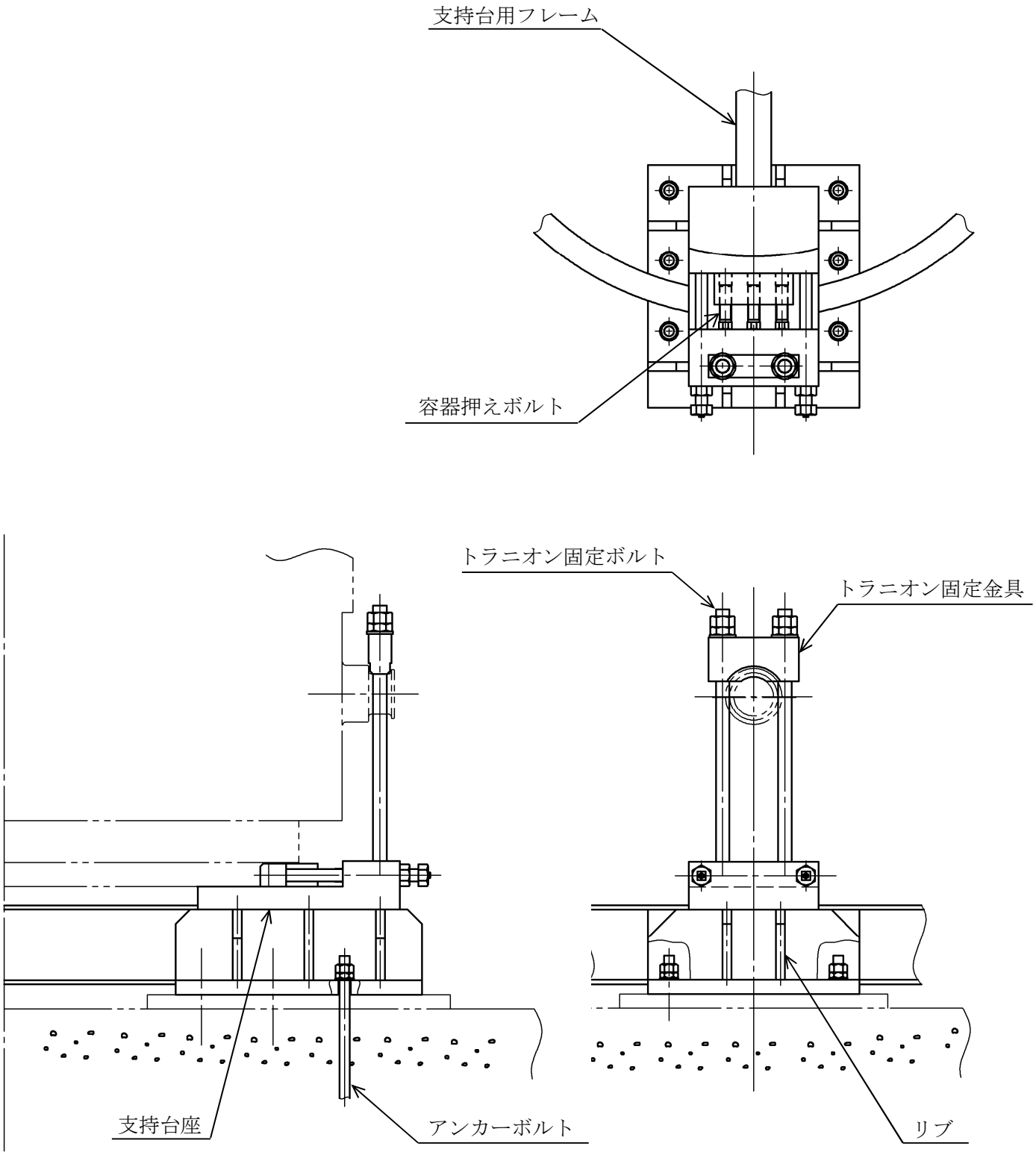


図 5－1　支持構造物の応力解析箇所

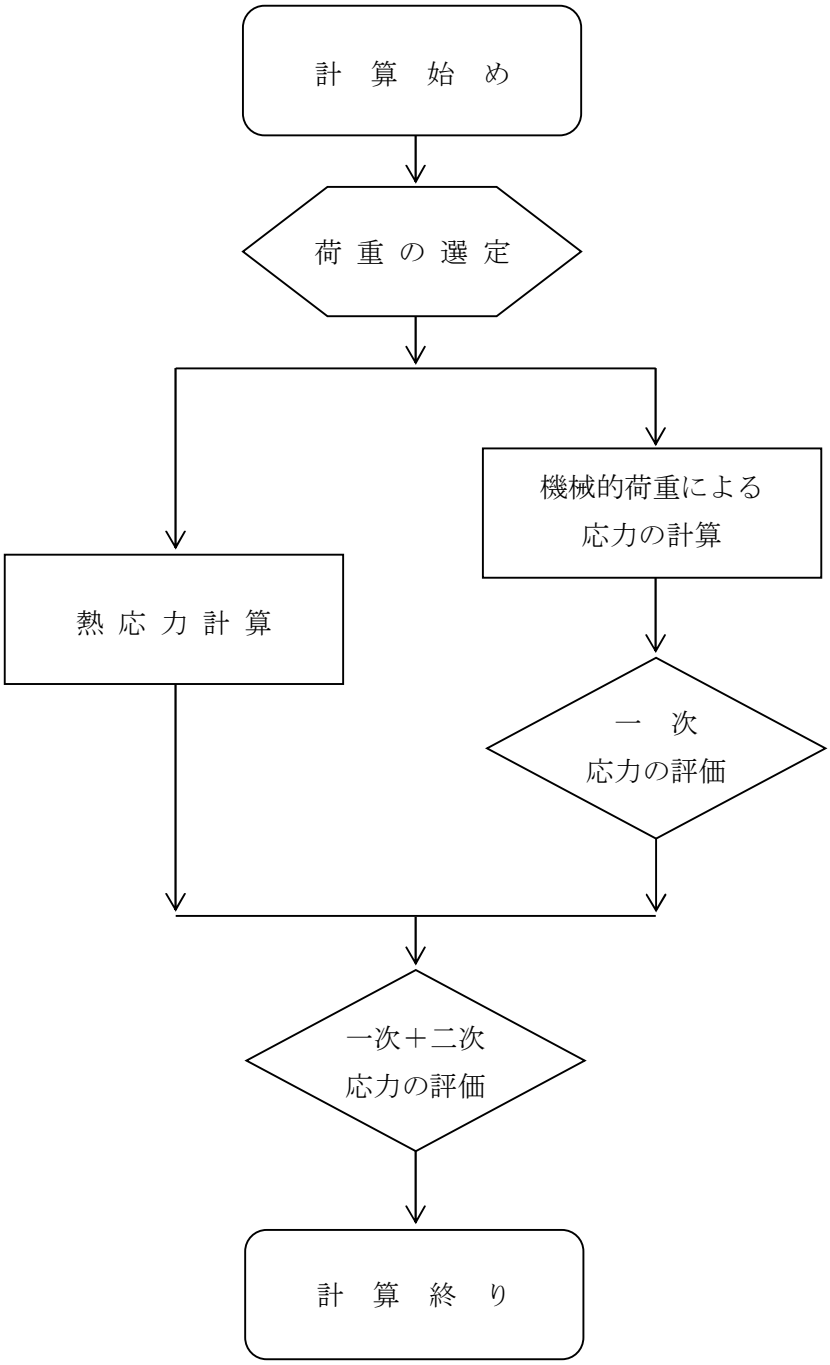


図 6－1　支持構造物の応力解析フロー図

表 4－1　貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
Ⅰ	貯蔵容器の通常の取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬 ・搬出前作業及び燃料取出し作業
Ⅱ	設計事象Ⅰ，設計事象Ⅲ，設計事象Ⅳ及び試験状態以外の状態をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間中に予想される取扱い機器の単一故障，単一誤動作等の事象によって，貯蔵容器が通常貯蔵状態あるいは通常取扱い状態から外れるような状態をいう。	・貯蔵容器の異常着床 ・取扱い機器の単一故障，誤動作	・貯蔵容器の異常着床 ・貯蔵容器の支持構造物への衝突
Ⅲ	貯蔵容器又はその取扱い機器等の故障，異常な作動等により，貯蔵又は計画された取扱いの停止が緊急に必要とされる状態をいう。	発生頻度が十分低い事象によって引き起こされる状態をいう。すなわち，設計事象Ⅱでいう機器の単一故障，運転員の単一誤操作等によって引き起こされるもののうち，その発生頻度が十分に低いと考えられるものを分類する。		
Ⅳ	貯蔵容器の安全設計上想定される異常な事態が生じている状態をいう。	発生頻度が極めて低く，貯蔵容器の寿命中に起こることは考えられない事象によって引き起こされる状態をいうが，万一発生した場合の設計の妥当性を確保するために特に設けたものをいう。	・貯蔵容器の落下	
試験状態	耐圧試験によりキャスク容器に最高使用圧力を超える圧力が加えられている状態をいう。		・耐圧試験（製造時）	・耐圧試験（製造時）

表 4－2　支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷重 / 設計事象	荷重時	自重による荷重	熱荷重 *1	備考
I	貯蔵時	○	○	*2

注記　＊1：キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。

＊2：トラニオン固定ボルトの初期締付力，S_d^*地震力及びS_s地震力は，設計事象Ⅰの貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表5－1　代表事象

設計事象	代表事象＊	包絡される事象	荷重条件	備考
Ⅰ	貯蔵時	－	自重 熱荷重	設計事象Ⅰのうち大半の期間を占める代表事象。
Ⅰ＋S_d*	貯蔵時 （S_d*地震力が作用する場合）	－	自重 トラニオン固定ボルトの初期締付け力 地震力 水平方向：1.17G（＝11.48m/s^2） 鉛直方向：0.65G（＝6.38m/s^2） 熱荷重	－
Ⅰ＋S_s	貯蔵時 （S_s地震力が作用する場合）	－	自重 トラニオン固定ボルトの初期締付け力 地震力 水平方向：1.17G（＝11.48m/s^2） 鉛直方向：0.65G（＝6.38m/s^2） 熱荷重	－

注記　＊：本事象について応力解析を行う。

表 5－2　熱応力計算に使用する材料の物性値

構成部材	材料	温度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$mm/(mm･℃))
リブ	炭素鋼 (SM520C)	130	196000	11.38
支持台座	炭素鋼 (SFVC2B)	130	196000	11.38
トラニオン固定ボルト 容器押えボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	130	185000	12.04
トラニオン固定金具	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	130	188000	11.25
アンカーボルト	低合金鋼 (SCM435)	130	198000	11.38
支持台用フレーム	炭素鋼 (SS400)	130	195000	12.24

表６－１　支持構造物用材料の許容応力値（1/2）

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類		許容応力値					
			炭素鋼	炭素鋼	ｽﾃﾝﾚｽ鋼	低合金鋼	炭素鋼	許容値基準
			リブ	支持台座	トラニオン固定金具	容器押えボルト	支持台用フレーム	
			SM520C	SFVC2B	SUS630 H1150	SNB23-3	SS400	
設計事象Ⅰ	一次応力 *1	引張応力	203	148	394	425	141	f_t
		圧縮応力	189	148	394	421	141	f_c
		せん断応力	117	85	227	245	81	f_s
		曲げ応力	203	148	394	425	141	f_b
		支圧応力	277	201	537	580	192	f_p
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力	610	444	1182	1276	424	$3f_t$
		せん断応力	352	256	682	736	244	$3f_s$
		曲げ応力	610	444	1182	1276	424	$3f_b$
		支圧応力	415	302	805	870	289	$1.5f_p$
		座屈応力	176	128	341	631	122	$1.5f_s$又は$1.5f_c$
Ⅰ＋S_d^* *1	一次応力	引張応力	305	222	591	638	212	$1.5f_t$
		圧縮応力	284	222	591	631	212	$1.5f_c$
		せん断応力	176	128	341	368	122	$1.5f_s$
		曲げ応力	305	222	591	638	212	$1.5f_b$
		支圧応力	415	302	805	870	289	$1.5f_p$
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力 *2	610	444	1182	1276	424	$3f_t$
		せん断応力 *2	352	256	682	736	244	$3f_s$
		曲げ応力 *2	610	444	1182	1276	424	$3f_b$
		支圧応力	415	302	805	870	289	$1.5f_p$
		座屈応力	176	128	341	631	122	$1.5f_b$，$1.5f_s$又は$1.5f_c$

注記＊1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力（σ）とせん断応力（τ）を組合わせた応力（σ_T）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{f_c} + \frac{|{}_c\sigma_b|}{f_b} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{{}_t\sigma_b - |\sigma_c|}{f_t} \leqq 1$$

③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + {}_t\sigma_b}{f_t} \leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_c\sigma_b| - \sigma_t}{f_b} \leqq 1$$

ただし，②及び③において，設計事象Ⅰの一次応力については上式による。

Ⅰ＋S_d^*の一次応力の場合，分母のf_c，f_b，f_tは$1.5f_c$，$1.5f_b$，$1.5f_t$とする。

Ⅰ＋S_d^*の一次＋二次応力の場合，分母のf_c，f_b，f_tは$3f_c$，$3f_b$，$3f_t$とする。

＊2：S_d^*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6－1　支持構造物用材料の許容応力値（2/2）

（単位：MPa）

許容応力区分	応力の種類		許容応力値					
			炭素鋼	炭素鋼	ｽﾃﾝﾚｽ鋼	低合金鋼	炭素鋼	許容値基準
			リブ	支持台座	トラニオン固定金具	容器押えボルト	支持台用フレーム	
			SM520C	SFVC2B	SUS630 H1150	SNB23-3	SS400	
$I+S_s$ *1	一次応力	引張応力	340	266	591	638	254	$1.5f_t$*
		圧縮応力	314	266	591	631	254	$1.5f_c$*
		せん断応力	196	153	341	368	146	$1.5f_s$*
		曲げ応力	340	266	591	638	254	$1.5f_b$*
		支圧応力	463	362	805	870	346	$1.5f_p$*
	一次＋二次応力	引張･圧縮応力 *2	610	444	1182	1276	424	$3f_t$
		せん断応力 *2	352	256	682	736	244	$3f_s$
		曲げ応力 *2	610	444	1182	1276	424	$3f_b$
		支圧応力	463	362	805	870	346	$1.5f_p$*
		座屈応力	176	128	341	631	122	$1.5f_b$, $1.5f_s$ 又は $1.5f_c$

注記＊1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力（σ）とせん断応力（τ）を組合わせた応力（σ_T）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T=\sqrt{\sigma^2+3\cdot\tau^2}$$

② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c^*}+\frac{|{}_c\sigma_b|}{1.5f_b^*}\leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{{}_t\sigma_b-|\sigma_c|}{1.5f_t^*}\leqq 1$$

③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t+{}_t\sigma_b}{1.5f_t^*}\leqq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_c\sigma_b|-\sigma_t}{1.5f_b^*}\leqq 1$$

ただし，②及び③において，一次応力については上式による。一次＋二次応力の場合，分母の $1.5f_c$*，$1.5f_b$*，$1.5f_t$*は $3f_c$，$3f_b$，$3f_t$とする。

＊2：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6－2　支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値

（単位：MPa）

設計応力区分	応力の種類	許容応力値		
		低合金鋼 トラニオン固定ボルト SNB23-3	低合金鋼 アンカーボルト SCM435	許容値基準
設計事象Ⅰ＊	引張応力	319	296	f_t
	せん断応力	245	227	f_s
Ⅰ＋S_d＊＊	引張応力	478	444	$1.5f_t$
	せん断応力	368	341	$1.5f_s$
Ⅰ＋S_s＊	引張応力	478	444	$1.5f_t$＊
	せん断応力	368	341	$1.5f_s$＊

注記　＊：組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は，次の 2 つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$

$f_T \leqq f_t$

ここで，τ：ボルトに発生するせん断応力（MPa）

ただし，設計事象Ⅰについては上式による。Ⅰ＋S_d＊の場合，f_tは$1.5f_t$とする。

Ⅰ＋S_sの場合，f_tは$1.5f_t$＊とする。

表 6－3　数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用温度	℃	－	－	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字４桁目	四捨五入	有効数字３桁
許容応力値	MPa	小数点以下第１位	切捨て	整数
計算応力値	MPa	小数点以下第１位	切上げ	整数
長さ	mm	－	－	設計値
設計震度	－	小数点以下第３位	切上げ	小数点以下第２位
面積	mm^2	有効数字５桁目	四捨五入	有効数字４桁
力	N	有効数字５桁目	四捨五入	有効数字４桁
断面係数	mm^3	有効数字５桁目	四捨五入	有効数字４桁
質量	kg	－	－	設計値

本資料のうち，枠囲みの内容は営業秘密又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-744　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-11-2-6　制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 …… 1
2. 一般事項 …… 1
2.1 配置概要 …… 1
2.2 構造計画 …… 2
2.3 評価方針 …… 3
2.4 適用基準 …… 4
2.5 記号の説明 …… 5
2.6 計算精度と数値の丸め方 …… 9
3. 評価部位 …… 9
4. 固有周期 …… 10
4.1 固有周期の計算方法 …… 10
4.2 固有周期の計算条件 …… 11
4.3 固有周期の計算結果 …… 11
5. 構造強度評価 …… 12
5.1 構造強度評価方法 …… 12
5.2 荷重の組合せ及び許容応力 …… 15
5.3 設計用地震力 …… 19
5.4 計算方法 …… 20
5.5 計算条件 …… 26
5.6 応力の評価 …… 32
6. 評価結果 …… 33
6.1 設計基準対象施設としての評価結果 …… 33
6.2 重大事故時等対処設備としての評価結果 …… 33

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-11-1　波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」の耐震評価方針に基づき，制御棒貯蔵ラック（以下「ラック」という。）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認することで，Ｓクラス施設への波及的影響を及ぼさないことを説明するものである。その耐震評価は，応力評価により行う。

2. 一般事項

2.1 配置概要

ラックは使用済燃プール内に設置される。ラックは，図 2-1 の位置関係図に示すように，上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックが設置された使用済燃料プール上に設置されていることから，ラックの転倒により使用済燃料貯蔵ラック及び使用済燃料プールに対して波及的影響を及ぼすおそれがある。

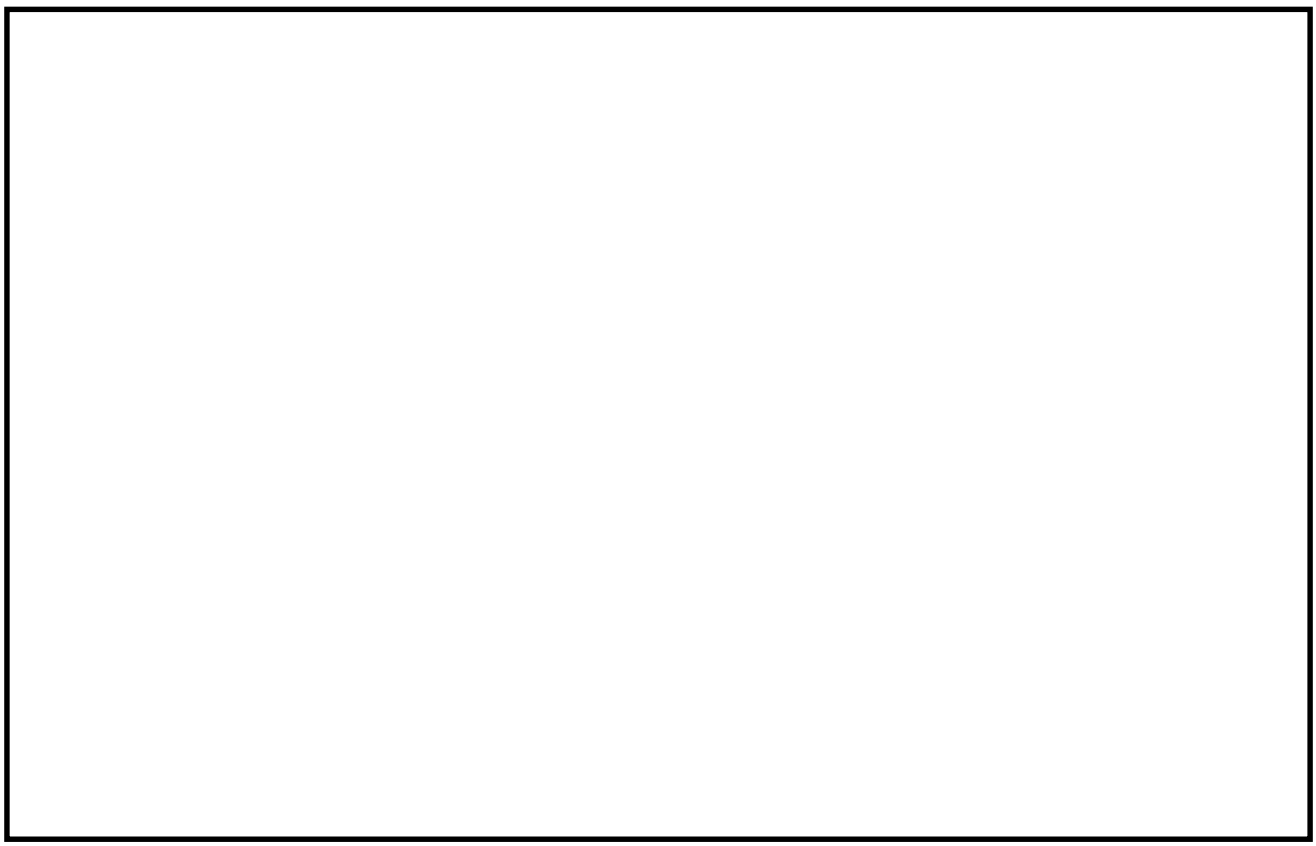
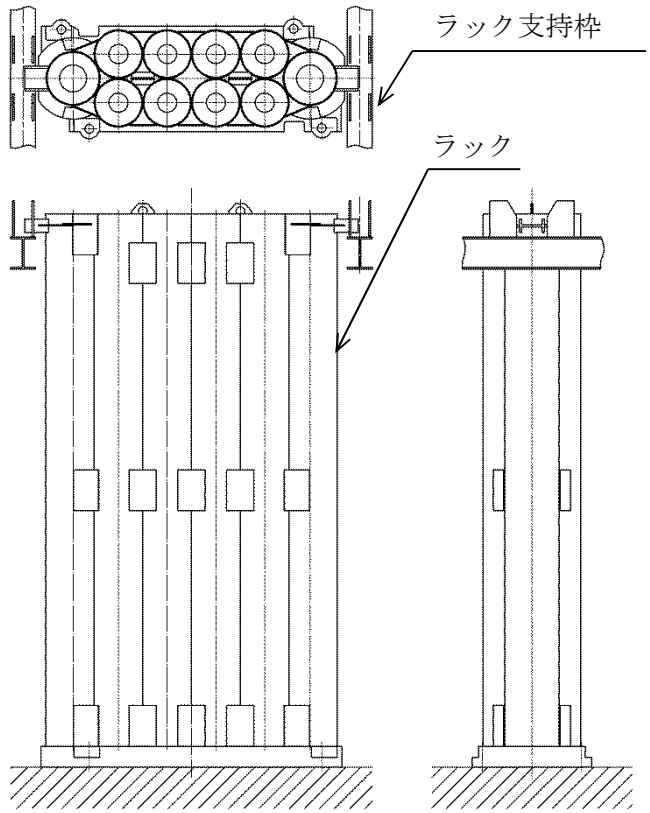


図 2-1　ラックの位置関係図

2.2　構造計画

ラックの構造計画を表2－1に示す。

表2－1　構造計画

主要区分	計画の概要		概略構造図
	基礎・支持構造	主体構造	
制御棒貯蔵ラック	ラックは，たて置きラック式で基礎ボルトで使用済燃料プールの底部に固定及びラック支持枠から支持する。 ラック支持枠は，基礎ボルトで使用済燃料プールの底部に固定及び使用済燃料プールの壁に埋め込まれた埋込金物に固定される。	アルミニウム合金製筒型枠組構造	

2.3　評価方針

ラックの応力評価は「V-2-1-9　機能維持の基本方針　3.1　構造強度上の制限」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき，「2.2　構造計画」にて示すラックの部位を踏まえ「3.　　評価部位」にて設定する箇所において，「4.1　固有周期の計算方法」及び「4.3 固有周期の計算結果」で算出した固有周期及び荷重に基づく応力等が許容限界内に収まることを，「5.　構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「6.　評価結果」に示す。

ラックの耐震評価フローを図2－2に示す。

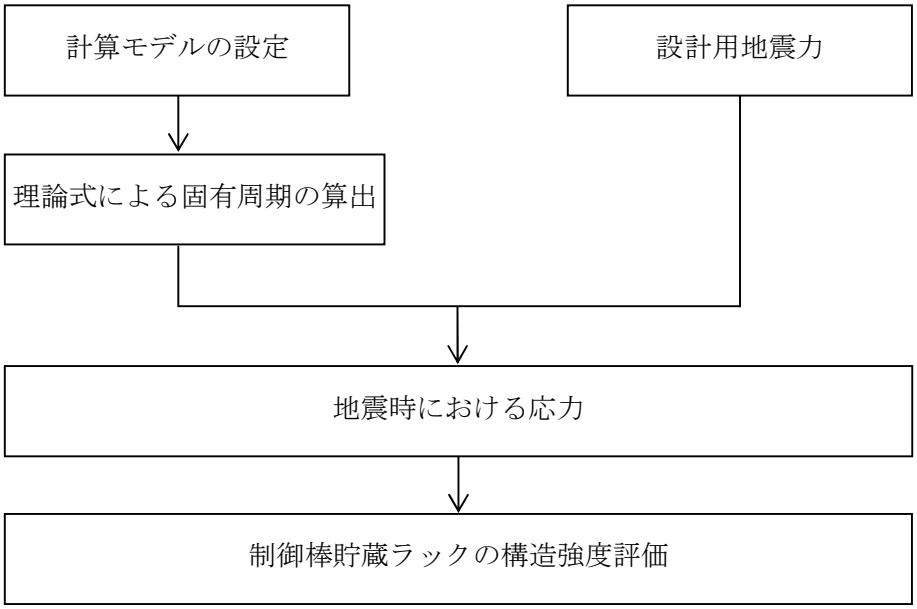


図2－2　ラックの耐震評価フロー

2.4　適用基準

適用基準を以下に示す。

(1)　原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編　ＪＥＡＧ４６０１・補－1984及びＪＥＡＧ４６０１－1987）（日本電気協会　電気技術基準調査委員会　昭和59年9月及び昭和62年8月）

(2)　発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。））ＪＳＭＥＳ　ＮＣ１－2005/2007）（日本機械学会　2007年9月）（以下「設計・建設規格」という。）

2.5　記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	ラックの断面積	mm^2
A_b	ラック基礎ボルトの軸断面積	mm^2
A_{b1}	ラック支持枠基礎ボルト①の軸断面積	mm^2
A_{b2}	ラック支持枠基礎ボルト②の軸断面積	mm^2
A_{bn}	ネルソンスタッドの断面積	mm^2
A_{si}	ラックのせん断断面積	mm^2
A_p	サポート部の断面積	mm^2
A_{p2}	ラック支持枠筋交いの断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	－
C_v	鉛直方向設計震度	－
D	死荷重	N
E	縦弾性係数	MPa
F^*	設計・建設規格　SSB－3121.3 又は SSB－3133 に定める値	MPa
F_1	ラック支持枠上部に生じる水平荷重	N
F_2	ラック支持枠底部端に生じる鉛直荷重	N
F_3	ラック支持枠筋交いに生じる荷重	N
F_4	ラック支持枠斜壁側に生じる水平荷重	N
F_c	サポート部に働くせん断力	N
F_f	ラック支持枠に働くせん断力	N
F_i	ラックに働くせん断力	N
F_s	ラック支持枠底部中央に働くせん断力	N
F_{xn}	埋込金物に働く引張力	N
F_{yn}, F_{zn}	埋込金物に働くせん断力	N
F_{yB}	ベース底部に働くせん断力	N
f_{1i}, f_{2i}	ラック基礎ボルトに働く引張力（1 本当たり）	N
f_b	部材の許容曲げ応力	MPa
f_c	部材の許容圧縮応力	MPa
f_s	部材の許容せん断応力	MPa
f_{sb}	せん断力のみを受けるネルソンスタッド及び基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f_t	部材の許容引張応力	MPa

記号	記号の説明	単位
f_{to}	引張力のみを受けるネルソンスタッド及び基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受けるネルソンスタッド及び基礎ボルトの許容引張応力	MPa
G	せん断弾性係数	MPa
g	重力加速度（＝9.80665）	m/s^2
h_1	制御棒及び制御棒案内管貯蔵時のラック重心高さ（応力評価時に使用）	mm
h_2	制御棒及び制御棒案内管貯蔵時のラック重心からサポートまでの高さ（応力評価時に使用）	mm
h_3	サポート高さ	mm
h_4	サポートからラック上端までの高さ	mm
h_{x1}	制御棒及び制御棒案内管貯蔵時のラック重心高さ（X方向の固有周期計算時に使用）	mm
h_{y1}	制御棒及び制御棒案内管貯蔵時のラック重心高さ（Y方向の固有周期計算時に使用）	mm
h_{y2}	制御棒及び制御棒案内管貯蔵時のラック重心からサポートまでの高さ（Y方向の固有周期計算時に使用）	mm
h_{z1}	制御棒及び制御棒案内管貯蔵時のラック重心高さ（Z方向の固有周期計算時に使用）	mm
I_x	ラックの断面二次モーメント（X軸回り）	mm^4
I_y	ラックの断面二次モーメント（Y軸回り）	mm^4
K_i	ラックのばね定数	N/mm
K_z	ラックのばね定数（Z方向の固有周期計算時に使用）	N/mm
ℓ_{gi}	ベース端からラック重心までの距離	mm
ℓ_{1i}，ℓ_{2i} ℓ_{3i}，ℓ_{4i}	ベース端からラック基礎ボルトまでの距離	mm
ℓ_{1n}，ℓ_{2n} ℓ_{3n}，ℓ_{4n}	埋込金物端から各ネルソンスタッドまでの距離	mm
ℓ_5	ラック支持枠の高さ	mm
ℓ_6	ラック支持枠底部の長さ	mm
ℓ_7	ラック支持枠筋交いの長さ	mm
ℓ_s	ラック支持枠からサポートまでの距離	mm

記号	記号の説明	単位
M_D	機械的荷重	N
M_{SAD}	重大事故等時の状態（運転状態Ⅴ）における運転状態等を考慮して当該設備に設計上定められた機械的荷重	N
M_i	ラックの転倒モーメント	N･mm
M_p	サポートの転倒モーメント	N･mm
M_{XB}	ラック重心位置の転倒モーメント	N･mm
M_{yn}, M_{zn}	埋込金物に働く曲げモーメント	N･mm
m	制御棒及び制御棒案内管貯蔵時のラックの全質量	kg
m_c	制御棒の質量	kg
m_g	制御棒案内管の質量	kg
m_R	ラックの質量	kg
m_s	ラック支持枠の質量	kg
m_{vi}	ラックの排除水質量	kg
m_{vz}	ラックの排除水質量（Z方向）	kg
m_w	ラックに含まれる水の質量	kg
n	ラック基礎ボルトの全本数	—
n_{1i}, n_{2i} n_{3i}, n_{4i}	各部のラック基礎ボルトの本数	—
n_{1n}, n_{2n} n_{3n}, n_{4n}	ネルソンスタッドの各部の本数	—
N_m	M_{yn}, M_{zn}により生じるネルソンスタッド1 本当たりの最大引張力	N
n_n	ネルソンスタッドの全本数	—
n_{s1}	ラック支持枠基礎ボルト①の本数	—
n_{s2}	ラック支持枠基礎ボルト②の本数	—
P_D	最高使用圧力による荷重	MPa
P_{SAD}	重大事故等時の状態（運転状態Ⅴ）における運転状態等を考慮して当該設備に設計上定められた設計圧力による荷重	MPa
R_s	ラック支持枠底部端に生じる反力	N
S_s	基準地震動S_sにより定まる地震力	N
S_u	設計・建設規格　付録材料図表　Part5　表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格　付録材料図表　Part5　表8に定める値	MPa
T_i	固有周期	s
T_z	固有周期（Z方向）	s

記号	記号の説明	単位
Z_p	サポート部の断面係数	mm^3
θ_n	ネルソンスタッドとラック支持枠斜壁側の角度	rad
θ_s	ラック支持枠筋交いの角度	rad
σ_b	ラック基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_{bn}	ネルソンスタッドに生じる引張応力	MPa
σ_c	サポート部に生じる組合せ応力	MPa
σ_{cs}	ラック支持枠筋交いに生じる圧縮応力	MPa
σ_p	サポート部に生じる曲げ応力	MPa
σ_t	ラック支持枠基礎ボルト①に生じる引張応力	MPa
τ_b	ラック基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{bn}	ネルソンスタッドに生じるせん断応力	MPa
τ_s	ラック支持枠基礎ボルト②に生じるせん断応力	MPa
τ_p	サポート部に生じるせん断応力	MPa
IV_AS	発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。））ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005/2007）（日本機械学会2007年9月）（以下「設計・建設規格」という。）の運転状態Ⅳ相当の許容応力を基準として，それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	－
V_AS	運転状態Ⅴ相当の応力評価を行う許容応力状態を基本として，それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	－

注：A_{si}，F_i，f_{1i}，f_{2i}，K_i，ℓ_{gi}，ℓ_{1i}，ℓ_{2i}，M_i，m_{vi}，n_{1i}，n_{2i}，n_{3i}，n_{4i}及びT_iの添え字ｉの意味は，以下のとおりとする。

ｉ＝ｘ：Ｘ方向（ＥＷ：長辺方向）

ｉ＝ｙ：Ｙ方向（ＮＳ：短辺方向）

2.6　計算精度と数値の丸め方

精度は6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2－2に示すとおりとする。

表2－2　表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
設計震度	－	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
最高使用温度	℃	－	－	整数位
質量	kg	－	－	整数位
長さ	mm	－	－	整数位*1
面積	mm^2	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
モーメント	N･mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力*3	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位
角度	rad	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位

注記　＊1：設計上定める値が小数点以下第1位の場合は，小数点以下第1位表示とする。

＊2：絶対値が1000以上のときは，べき数表示とする。

＊3：設計・建設規格　付録材料図表に記載された温度の中間における許容引張強さ及び設計降伏点は，比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て，整数位までの値とする。

3.　評価部位

ラックの耐震評価は，「5.1　構造強度評価方法」に示す条件に基づき，耐震評価上厳しくなるサポート部材，ラック基礎ボルト及びラック支持枠，ネルソンスタッド，ラック支持枠基礎ボルトについて実施する。

4.　固有周期

4.1　固有周期の計算方法

ラックの計算モデルを図 4－1 に示す。また計算モデルの概要を以下に示す。

(1) ラックの質量は，制御棒 8 体の質量，制御棒案内管 2 体の質量，ラック自身の質量，ラックに含まれる水の質量及び排除水の質量を考慮した値とする。

(2) ラックは，ベース底部で基礎ボルトを介し床に完全固定とする。変形モードは，曲げたわみとせん断たわみの合成とする。

(3) ラックは，Ｙ方向の振動に対してサポートにより支持されるものとする。

(4) 本ラックは，各部材をすべて溶接にて接合されており，一体の構造物とみなして，上述より図 4－1 に示すようなラックの重心位置での１質点系の計算モデルと考える。

(5)　計算モデルの固有周期は，(4.1.1)及び(4.1.2) 式より求める。

$$T_i = 2\cdot\pi\cdot\sqrt{\frac{m+m_{vi}}{1000\cdot K_i}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.1.1)$$

（ｉ＝ｘ：Ｘ方向（ＥＷ：長辺方向），ｙ：Ｙ方向（ＮＳ：短辺方向））

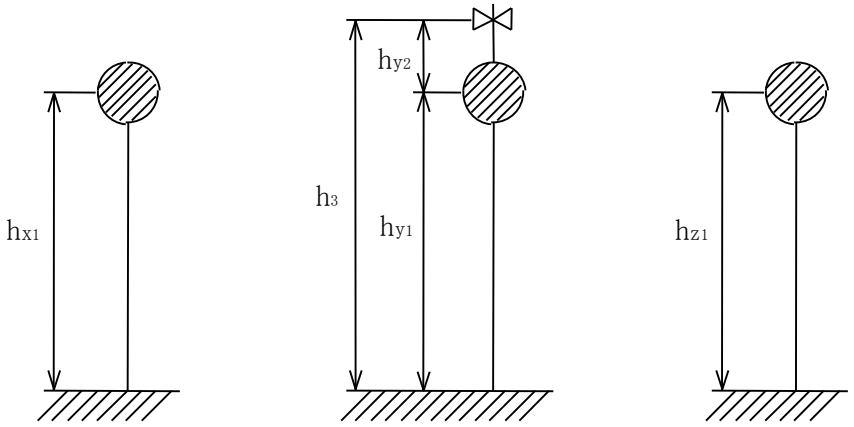
$$T_z = 2\cdot\pi\cdot\sqrt{\frac{m+m_{vz}}{1000\cdot K_z}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.1.2)$$

ただし，ラックのばね定数は，(4.1.3)，(4.1.4) 及び(4.1.5) 式より求める。

$$K_x = \frac{1}{\dfrac{{h_{x1}}^3}{3\cdot E\cdot I_y} + \dfrac{h_{x1}}{A_{sx}\cdot G}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.1.3)$$

$$K_y = \frac{1}{\dfrac{{h_{y2}}^2\cdot{h_{y1}}^3\cdot(4\cdot h_{y2}+3\cdot h_{y1})}{12\cdot E\cdot I_x\cdot {h_3}^3} + \dfrac{h_{y2}\cdot h_{y1}}{A_{sy}\cdot G\cdot h_3}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.1.4)$$

$$K_z = \frac{A\cdot E}{h_{z1}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.1.5)$$



Ｘ方向（ＥＷ：長辺方向）　Ｙ方向（ＮＳ：短辺方向）　Ｚ方向（鉛直方向）

図 4－1　計算モデル

4.2　固有周期の計算条件

固有周期の計算に用いる数値を表 4－1 に示す。

表 4－1　機器要目（固有周期の算出に用いる要目）

m (kg)	m_c (kg)	m_g (kg)	m_R (kg)	m_W (kg)	m_{vx} (kg)	m_{vy} (kg)
					2594	9881

m_{vz} (kg)	A (mm^2)	A_{sx} (mm^2)	A_{sy} (mm^2)	I_x (mm^4)	I_y (mm^4)	E＊ (MPa)
0	4.495×10^4	2.248×10^4	2.248×10^4	1.056×10^9	8.539×10^9	67300

G＊ (MPa)	h_{x1} (mm)	h_{y1} (mm)	h_{z1} (mm)	h_{y2} (mm)	h_3 (mm)
25900	1987	1779	1868	1256.2	

注記　＊：最高使用温度（66 ℃）で算出

4.3　固有周期のの計算結果

固有周期の計算結果を表 4－2 に示す。

表 4－2　固有周期

	固有周期(s)
水平方向	
鉛直方向	

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

(1) ラックは，原子炉建屋の使用済燃料プールの底部（EL. 34.689 m）に基礎ボルトで固定し，更にラック支持枠で支持されるものとする。

(2) ラック支持枠は，原子炉建屋の使用済燃料プールの底部（EL. 34.689 m）に基礎ボルトで固定し，更に使用済燃料プールの壁に埋め込まれた埋込金物に固定されるものとする。

(3) ラックの質量には，制御棒 8 体の質量，制御棒案内管 2 体の質量，ラック自身の質量，ラックに含まれる水の質量及び排除水質量を考慮する。

(4) 地震力は，ラック及びラック支持枠に対して水平方向から作用するものとする。ここで水平方向地震力は，ラックの長辺方向に作用する場合と短辺方向に作用する場合を考慮する。また，鉛直方向地震力は，水平方向地震力と同時に不利な方向に作用するものとする。

(5) ラックの構造概要図を図 5－1 に，ラック支持枠の構造概要図を図 5－2 に示す。

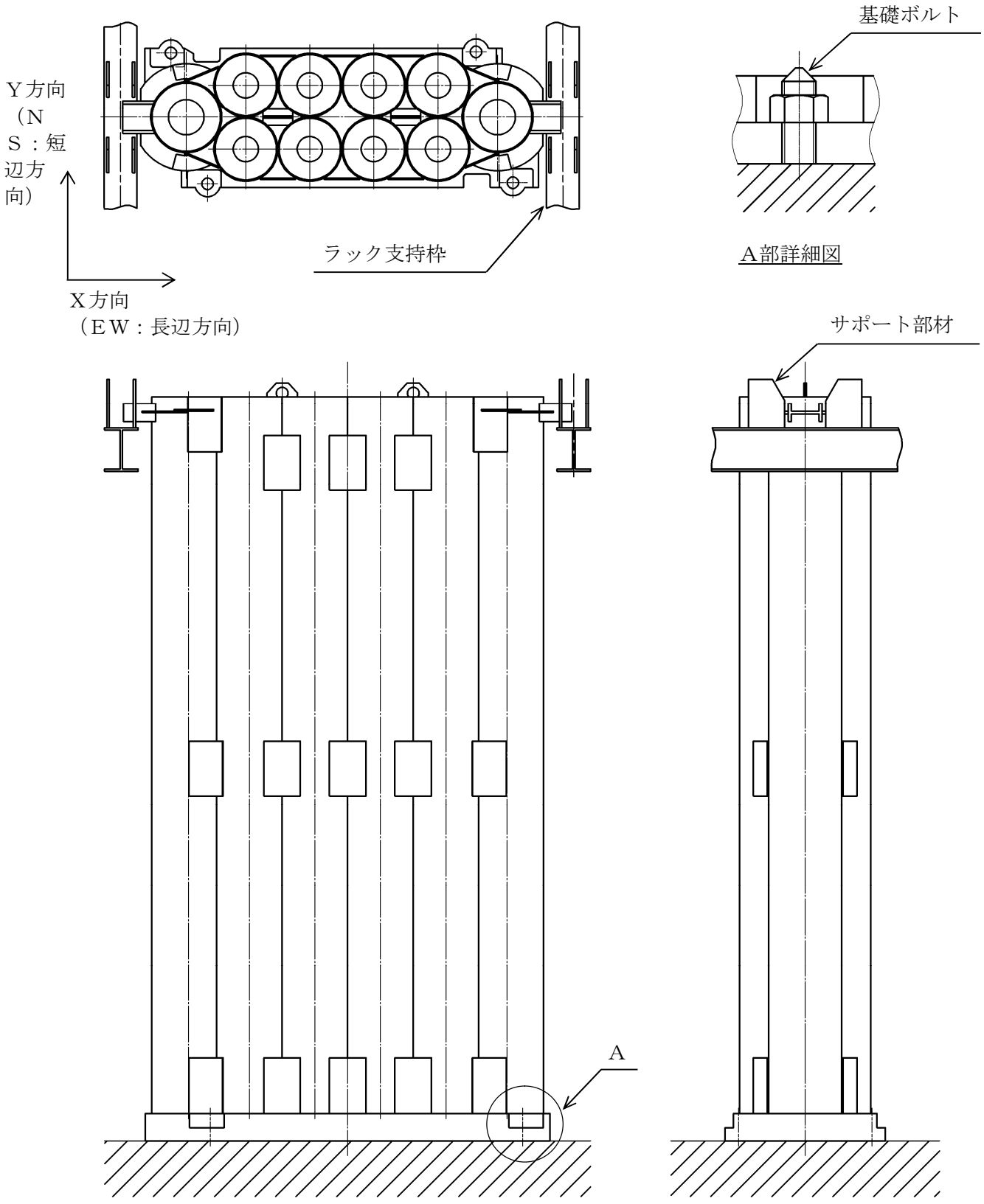
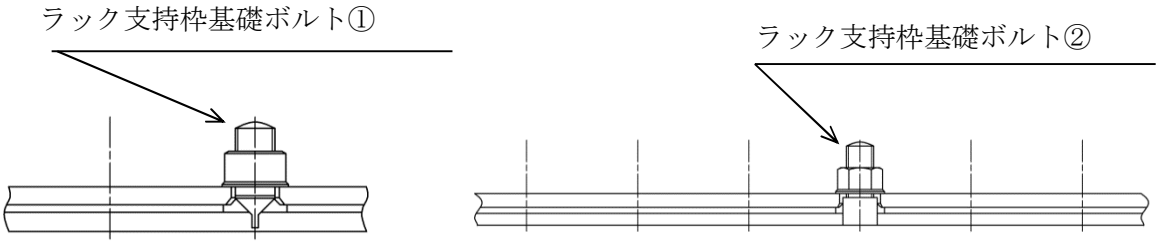
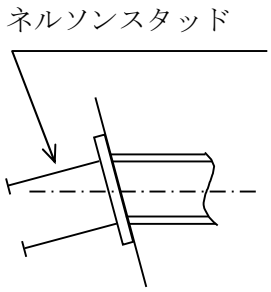


図 5－1　ラック構造概要図



A部詳細図　　B部詳細図



C部詳細図

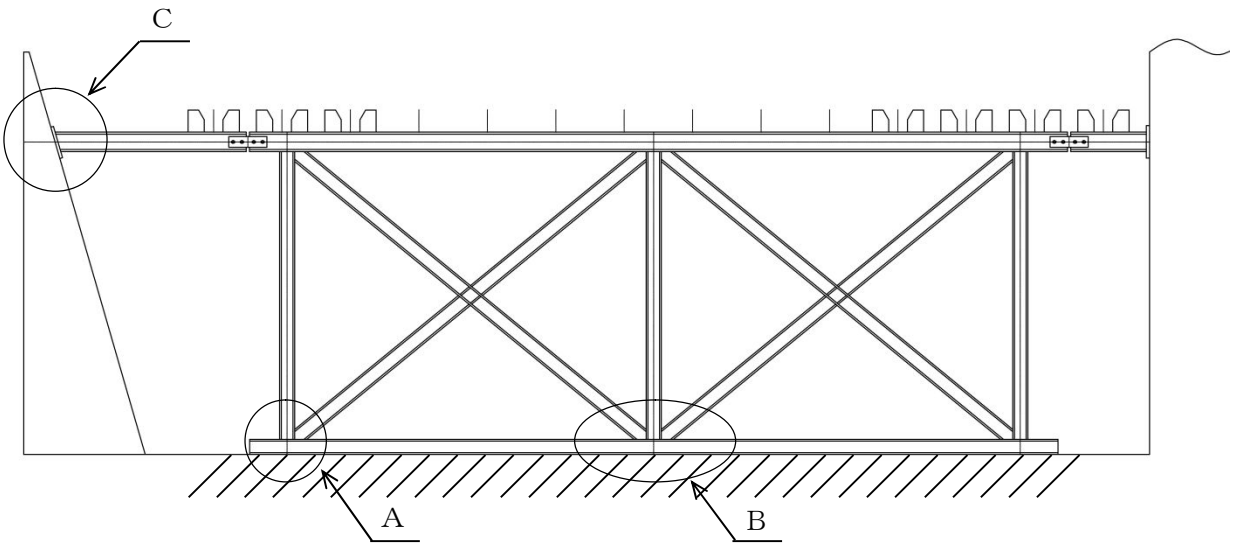


図 5－2　ラック支持枠構造概要図

5.2　荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1　荷重の組合せ及び許容応力状態

ラックの荷重の組合せ及び許容応力状態のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表5－1に，重大事故等対処施設の評価に用いるものを表5－2に示す。

ラックは設計基準対処施設においてはＢクラス，重大事故等対処設備には該当しないが，上位クラスへの波及的影響を踏まえて，基準地震動S_Sに対する荷重の組合せに対して，$Ⅳ_AS$及びV_ASによる評価を行う。

5.2.2　許容応力

ラックの許容応力を表5－3に示す。

5.2.3　使用材料の許容応力評価条件

ラックの許容応力評価条件のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表5－4に，重大事故等対処施設の評価に用いるものを表5－5に示す。

表 5－1　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震設計上の重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	制御棒貯蔵ラック	B	－*	$D+P_D+M_D+S_s$	$\mathrm{IV_AS}$

注記　＊：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

表 5－2　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	制御棒貯蔵ラック	－	－*1	$D+P_{SAD}+M_{SAD}+S_s$	$\mathrm{V_AS}$*2

注記　＊1：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

＊2：$\mathrm{V_AS}$として$\mathrm{IV_AS}$の許容限界を用いる。

表5－3　許容応力（その他の支持構造物及び重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界（ボルト等以外）*1			許容限界（ボルト等）*1	
	一次応力			一次応力	
	引張り	せん断	圧縮	引張り	せん断
$\mathrm{IV_AS}$	1.5・ft*	1.5・fs*	1.5・fc*	1.5・ft*	1.5・fs*
$\mathrm{V_AS}$（$\mathrm{V_AS}$として$\mathrm{IV_AS}$の許容限界を用いる。）	1.5・ft*	1.5・fs*	1.5・fc*	1.5・ft*	1.5・fs*

注記　＊1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

表 5－4　使用材料の許容応力評価条件（設計基準対象施設）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	Ｓｙ (MPa)	Ｓｕ (MPa)	Ｓｙ（ＲＴ） (MPa)
サポート	SUS304	周囲環境温度	66	－	188	479	205
ラック支持枠	SUS304	周囲環境温度	66	－	188	479	205
ネルソンスタッド	SS400	周囲環境温度	66	－	234	385	－
ラック基礎ボルト及び ラック支持枠基礎ボルト	SUS304	周囲環境温度	66	－	188	479	205

表 5－5　使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	Ｓｙ (MPa)	Ｓｕ (MPa)	Ｓｙ（ＲＴ） (MPa)
サポート	SUS304	周囲環境温度	100	－	171	441	205
ラック支持枠	SUS304	周囲環境温度	100	－	171	441	205
ネルソンスタッド	SS400	周囲環境温度	100	－	221	373	－
ラック基礎ボルト及び ラック支持枠基礎ボルト	SUS304	周囲環境温度	100	－	171	441	205

5.3 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表5－6及び表5－7に示す。

基準地震動S_sによる地震力は，「Ⅴ-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づく。

表5－6 設計用地震力（設計基準対象施設）

耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s) 水平方向	固有周期 (s) 鉛直方向	方向	基準地震動S_s 水平方向設計震度	基準地震動S_s 鉛直方向設計震度	最高使用温度 (℃)	減衰定数 (%)
B	原子炉建屋 EL. 34. 7[*1]			NS	C_H ＝ 1.67 又は＊2	C_V ＝ 1.44		
				EW	C_H ＝ 1.67			

注記 ＊1：基準床レベルを示す。

＊2：評価用震度及び基準地震動S_sに基づく設計用床応答スペクトルより得られる値の大きい方とする。

表5－7 設計用地震力（重大事故等対処施設）

設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s) 水平方向	固有周期 (s) 鉛直方向	方向	基準地震動S_s 水平方向設計震度	基準地震動S_s 鉛直方向設計震度	最高使用温度 (℃)	減衰定数 (%)
－	原子炉建屋 EL. 34. 7[*1]			NS	C_H ＝ 1.67 又は＊2	C_V ＝ 1.44		
				EW	C_H ＝ 1.67			

注記 ＊1：基準床レベルを示す。

＊2：評価用震度及び基準地震動S_sに基づく設計用床応答スペクトルより得られる値の大きい方とする。

5.4　計算方法

5.4.1　応力の計算方法

5.4.1.1　サポート部材の計算方法

サポート部材の荷重状態を図5－3に示す。

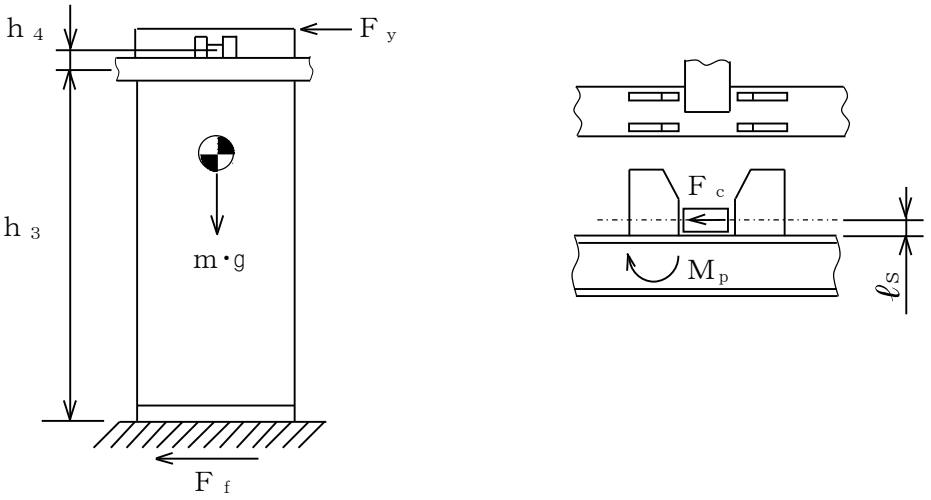


図5－3　荷重状態（Y方向（ＮＳ：短辺方向））

ラックの全質量は，(5.4.1)式により求める。

$$m = m_c + m_g + m_R + m_w \quad \cdots\cdots (5.4.1)$$

(1)　せん断応力

せん断力Ｆｃにより部材に生じるせん断応力τ_pは，(5.4.2)式により求める。

$$\tau_p = \frac{F_c}{2 \cdot A_p} \quad \cdots\cdots (5.4.2)$$

ここで，サポート部に働くせん断力Ｆｃは，(5.4.3)，(5.4.4)及び(5.4.5)式により求める。

$$F_y = C_H \cdot m \cdot g \quad \cdots\cdots (5.4.3)$$

$$F_f = \frac{3 \cdot F_y \cdot h_4}{2 \cdot h_3} \quad \cdots\cdots (5.4.4)$$

$$F_C = F_y + F_f \quad \cdots\cdots (5.4.5)$$

(2)　曲げ応力

モーメントM_pにより部材に生じる曲げ応力σ_pは，(5.4.6)及び(5.4.7)式により求める。

$$\sigma_p = \frac{M_p}{Z_p} \quad \cdots\cdots (5.4.6)$$

ここで，サポート部に働くモーメントM_pは，(5.4.7)式により求める。

$$M_p = \frac{F_c}{2} \cdot \ell_s \quad \cdots\cdots (5.4.7)$$

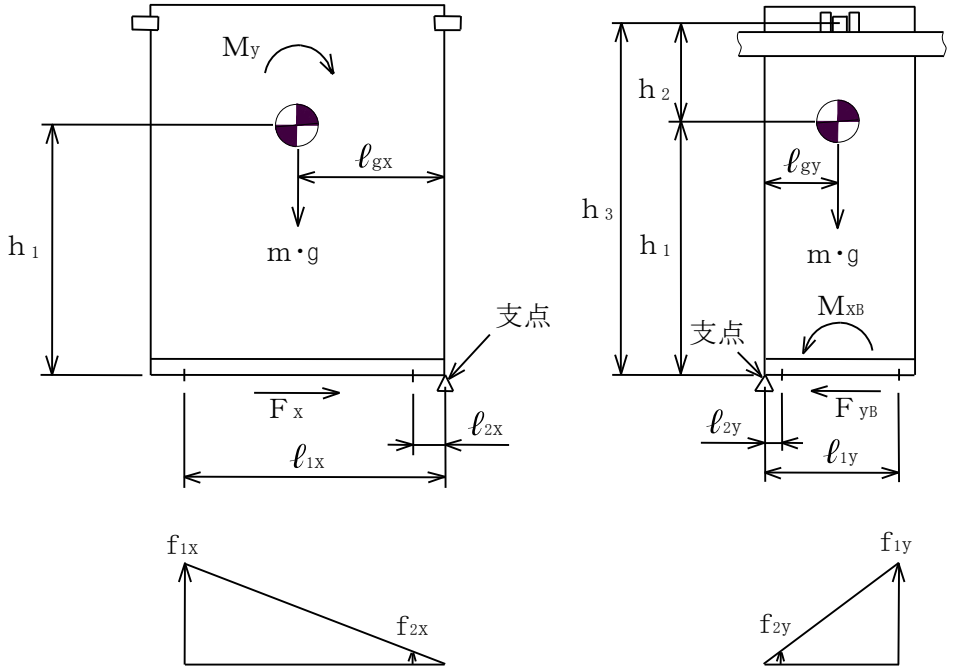
(3) 組合せ応力

組合せ応力σ_cは，(5.4.8)式により求める。

$$\sigma_c=\sqrt{\sigma_p^{\ 2}+3\cdot\tau_p^{\ 2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.8)$$

5.4.1.2　ラック基礎ボルトの応力

ラック基礎ボルトの荷重状態を図5－4に示す。



X方向（ＥＷ：長辺方向）　　Y方向（ＮＳ：短辺方向）

図5－4　荷重状態

(1)　せん断応力

ベース底部に働くせん断力F_x又はF_{yB}により，ラック基礎ボルトに生じるせん断応力τ_bは(5.4.9)及び(5.4.10)式より求める。

$$\tau_b=\frac{F_x}{n\cdot A_b} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.9)$$

$$\tau_b=\frac{F_{yB}}{n\cdot A_b} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.10)$$

(2) 引張応力

図 5－4 の荷重状態において支点まわりのモーメントの平衡によりラック基礎ボルト 1 本当たりの引張力 f_{1i}, f_{2i} を求める。

$f_{1i} > f_{2i}$ の関係にあるので f_{1i} のみを(5.4.11)及び(5.4.12)式より求める。

$$f_{1x}=\frac{\ell_{1x}\cdot\left\{M_y-\left(1-C_v\right)\cdot m\cdot g\cdot\ell_{gx}\right\}}{n_{1x}\cdot\ell_{1x}^2+n_{2x}\cdot\ell_{2x}^2+n_{3x}\cdot\ell_{3x}^2+n_{4x}\cdot\ell_{4x}^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.11)$$

$$f_{1y}=\frac{\ell_{1y}\cdot\left\{M_{xB}-\left(1-C_v\right)\cdot m\cdot g\cdot\ell_{gy}\right\}}{n_{1y}\cdot\ell_{1y}^2+n_{2y}\cdot\ell_{2y}^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.12)$$

したがって，引張力 f_{1i} によりラック基礎ボルトに生じる引張応力 σ_b は，(5.4.13)式より求める。

$$\sigma_b=\frac{f_{1i}}{A_b} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.13)$$

（ｉ＝ｘ：Ｘ方向（ＥＷ：長辺方向），ｙ：Ｙ方向（ＮＳ：短辺方向））

ただし，f_{1i} の値が負となった場合は，引張力が生じないので以後の引張応力の計算は省略する。

5.4.1.3　ラック支持枠の応力

ラック支持枠の荷重状態を図 5－5 に示す。

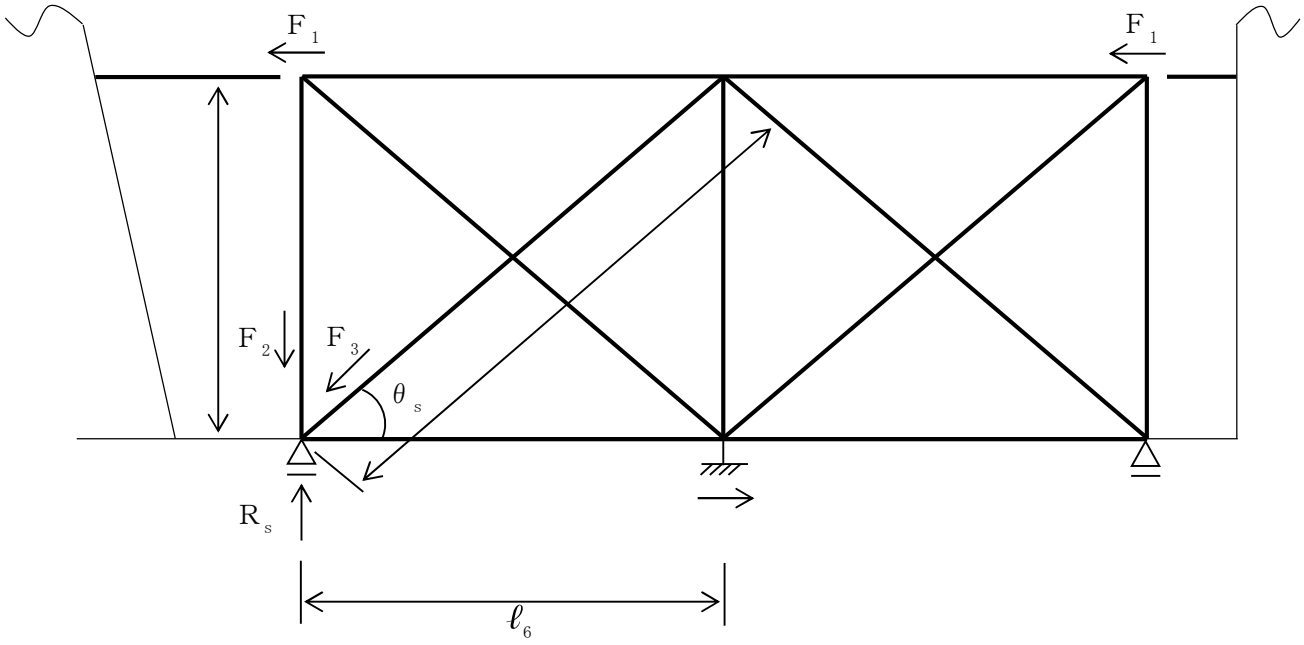


図 5－5　荷重状態（ＮＳ方向）

(1)　圧縮応力

支持枠筋交いに生じる圧縮応力σ cs は，(5.4.14)式より求める。

$$\sigma_{cs}=\frac{F_3}{A_{p2}} \qquad \cdots\cdots (5.4.14)$$

ここで，F3 は，(5.4.15) 式より求める。

$$\cdots\cdots (5.4.15)$$

5.4.1.4　ネルソンスタッドの応力

ネルソンスタッドの荷重状態を図 5－6 に示す。

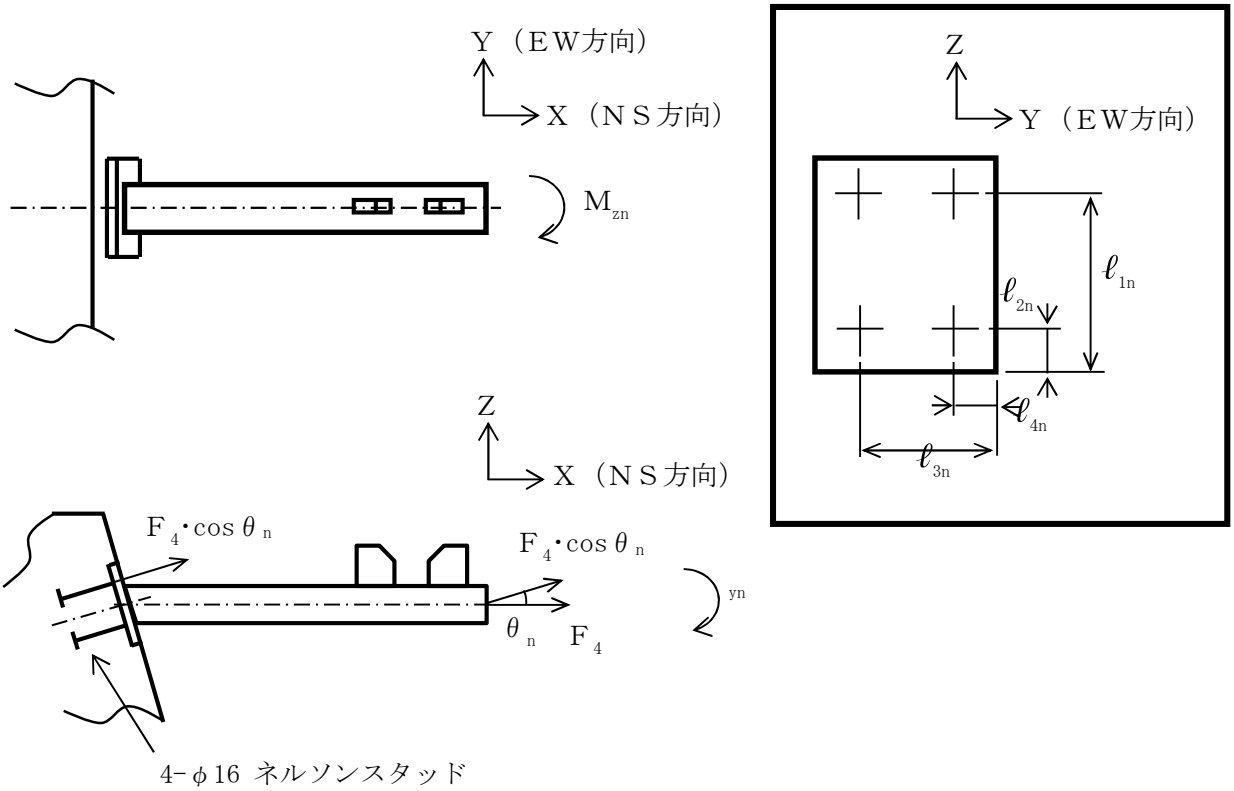


図 5－6　荷重状態

(1)　引張応力

曲げモーメントM_{yn}, M_{zn}により生じるネルソンスタッド 1 本当たりの最大引張力N_m及び引張力F_{xn}より生じるネルソンスタッドの引張応力σ_{bn}は, (5.4.16)式より求める。

$$\sigma_{bn} = \frac{N_m}{A_{bn}} + \frac{F_{xn}}{n_n \cdot A_{bn}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.16)$$

ここで,

$$N_m = \frac{\ell_{1n} \cdot M_{yn}}{n_{1n} \cdot \ell_{1n}^2 + n_{2n} \cdot \ell_{2n}^2} + \frac{\ell_{3n} \cdot M_{zn}}{n_{3n} \cdot \ell_{3n}^2 + n_{4n} \cdot \ell_{4n}^2}$$

$$F_{xn} = F_4 \cdot \cos\left(\theta_n\right)$$

(2)　せん断応力

ネルソンスタッドに生じるせん断応力τ_{bn}は, (5.4.17) 式より求める。

$$\tau_{bn} = \frac{\sqrt{F_{yn}^2 + F_{zn}^2}}{n_n \cdot A_{bn}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.17)$$

5.4.1.5　ラック支持枠基礎ボルトの応力

ラック支持枠基礎ボルトの荷重状態を図 5－5 に示す。

(1)　せん断応力

ラック支持枠底部中央に働くせん断力F_sにより，ラック支持枠基礎ボルト②に生じるせん断応力τ_sは，(5.4.18)より求める。

$$\tau_s = \frac{F_s}{n_{s2} \cdot A_{b2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.18)$$

(2)　引張応力

ラック支持枠底部端に生じる反力R_sにより，ラック支持枠基礎ボルト①に生じる引張応力σ_tは，(5.4.19)式より求める。

$$\sigma_t = \frac{R_s}{n_{s1} \cdot A_{b1}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4.19)$$

5.5　計算条件

5.5.1　サポート部材の応力算定条件

サポート部材の応力計算に用いる数値を表 5－8 に示す

5.5.2　ラック基礎ボルトの応力算定条件

ラック基礎ボルトの応力計算に用いる数値を表 5－9 に示す

5.5.3　ラック支持枠の応力算定条件

ラック支持枠の応力計算に用いる数値を表 5－10 に示す

5.5.4　ネルソンスタッドの応力算定条件

ネルソンスタッドの応力計算に用いる数値を表 5－11 に示す

5.5.5　ラック支持枠基礎ボルトの応力算定条件

ラック支持枠基礎ボルトの応力計算に用いる数値を表 5－12 に示す

表5－8　サポート部材の応力計算条件

m (kg)	m_c (kg)	m_g (kg)	m_R (kg)	m_w (kg)	A_p (mm^2)	Z_p (mm^3)	h_3 (mm)	h_4 (mm)
					1500	3.750×10^4		

（設計基準対象施設）

部材	材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F* (MPa)
サポート	SUS304	188	205	479	205

注記　＊1：最高使用温度（66 ℃）で算出

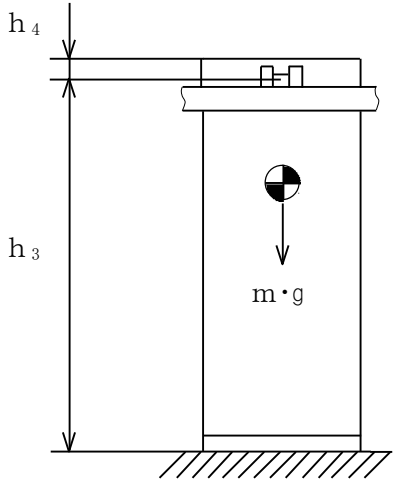
　　＊2：室温で算出

（重大事故等対処設備）

部材	材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F* (MPa)
サポート	SUS304	171	205	441	205

注記　＊1：最高使用温度（100 ℃）で算出

　　＊2：室温で算出



Y方向（ＮＳ：短辺方向）

表5－9　ラック支持枠の応力評価条件

m_s (kg)	A_{p2} (mm^2)	ℓ_5 (mm)	ℓ_6 (mm)	ℓ_7 (mm)	θ_s (rad)	F_1 (N)	F_2 (N)	F_3 (N)	F_s (N)	R_s (N)
[redacted]	5.560×10^3	[redacted]			0.695	1.305×10^5	[redacted]		2.610×10^5	2.175×10^5

（設計基準対象施設）

部材	材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F^* (MPa)
ラック支持枠	SUS304	188	205	479	205

注記　＊1：最高使用温度（66 ℃）で算出

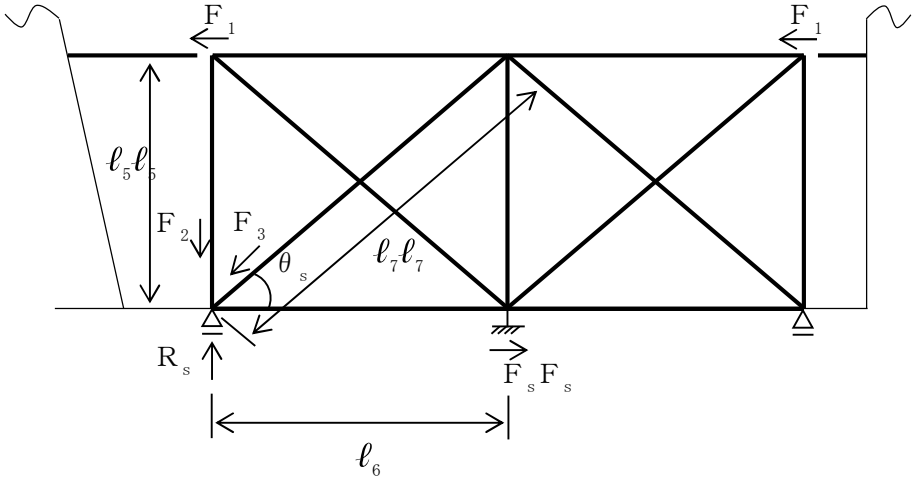
＊2：室温で算出

（重大事故等対処設備）

部材	材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F^* (MPa)
ラック支持枠	SUS304	171	205	441	205

注記　＊1：最高使用温度（100 ℃）で算出

＊2：室温で算出



ＮＳ方向

表5－10　ネルソンスタッドの応力評価条件

A_{bn} (mm^2)	ℓ_1 (mm)	ℓ_2 (mm)	ℓ_3 (mm)	ℓ_4 (mm)	θ_n (rad)	n_n	n_{1n}	n_{2n}	n_{3n}	n_{4n}
201.1 (ϕ16)					0.280	4				

F_4 (N)	F_{xn} (N)	F_{yn} (N)	F_{zn} (N)	M_{yn} (N・mm)	M_{zn} (N・mm)
5.835×10^4	5.608×10^4	0	2.455×10^3	9.171×10^6	0

（設計基準対象施設）

ネルソンスタッド 材料	S_y* (MPa)	S_u* (MPa)	F* (MPa)
SS400	234	385	234

注記　＊：最高使用温度（66 ℃）で算出

（重大事故等対処設備）

ネルソンスタッド 材料	S_y* (MPa)	S_u* (MPa)	F* (MPa)
SS400	221	373	221

注記　＊：最高使用温度（100 ℃）で算出

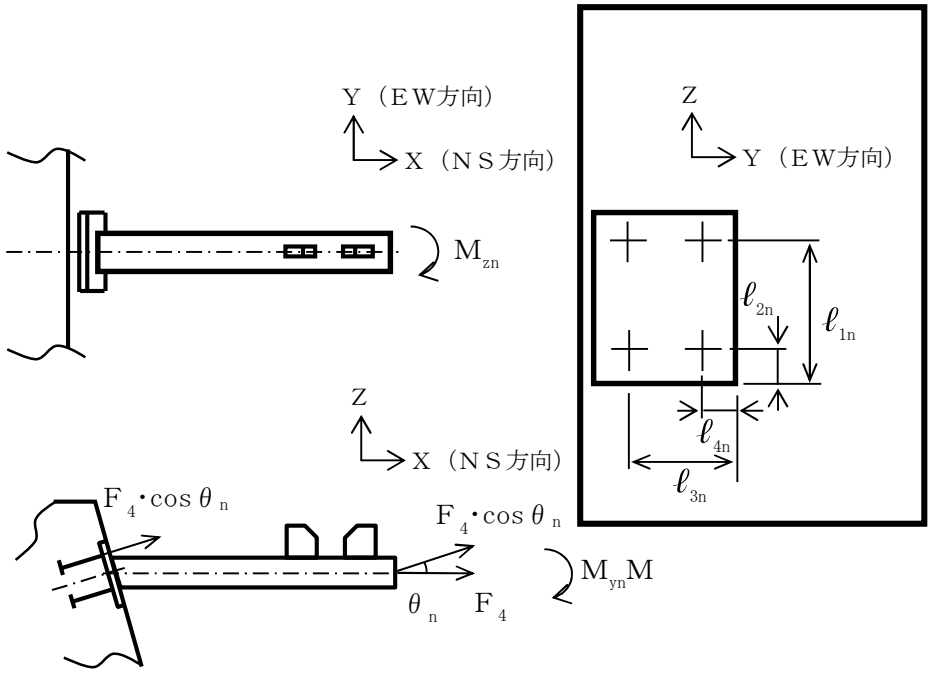


表5－11　ラック基礎ボルトの応力評価条件

m (kg)	Ab (mm^2)	ℓ_{1X} (mm)	ℓ_{2X} (mm)	ℓ_{3x} (mm)	ℓ_{4x} (mm)	ℓ_{1y} (mm)	ℓ_{2y} (mm)	ℓ_{gx} (mm)	ℓ_{gy} (mm)
3350		1558.5	1401.5	256.5	99.5	577	20	829	296

n	n_{1X}	n_{2X}	n_{3x}	n_{4x}	n_{1y}	n_{2y}
4	1	1	1	1	2	2

（設計基準対象施設）

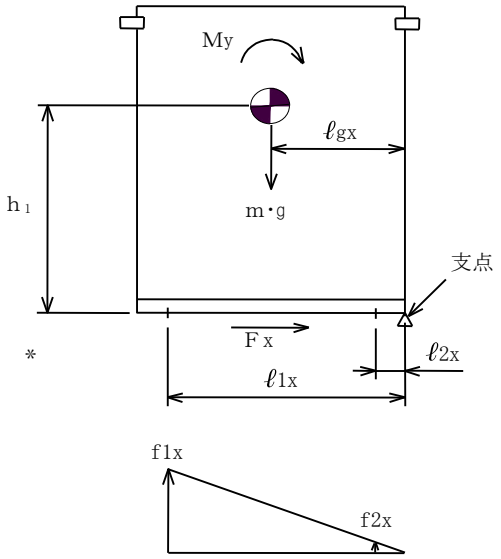
ラック 基礎ボルト材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F* (MPa)
SUS304	188	205	479	205

注記　＊1：最高使用温度（66 ℃）で算出
　　＊2：室温で算出

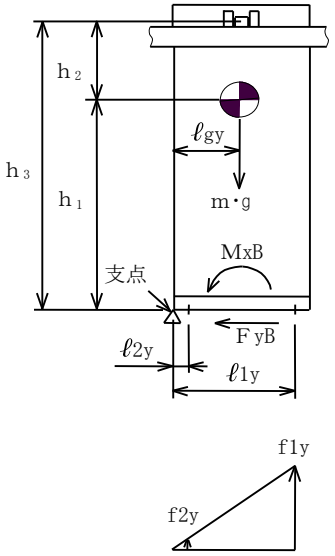
（重大事故等対処設備）

ラック 基礎ボルト材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F (MPa)
SUS304	171	205	441	205

注記　＊1：最高使用温度（100 ℃）で算出
　　＊2：室温で算出



X方向（ＥＷ：長辺方向）



Y方向（ＮＳ：短辺方向）

表5－12　ラック支持枠基礎ボルトの応力評価条件

A_{b1} (mm^2)	A_{b2} (mm^2)	N_{s1}	N_{s2}	F_s (N)	R_s (N)
855.3 (M33)	1257 (ϕ40)	4	12	2.610×10^5	2.175×10^5

（設計基準対象施設）

ラック支持枠 基礎ボルト材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F * (MPa)
SUS304	188	205	479	205

注記　＊1：最高使用温度（66 ℃）で算出

＊2：室温で算出

（重大事故等対処設備）

ラック支持枠 基礎ボルト材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F * (MPa)
SUS304	171	205	441	205

注記　＊1：最高使用温度（100 ℃）で算出

＊2：室温で算出

5.6　応力の評価

5.6.1　サポート部材及びラック支持枠の応力評価

5.4.1.1 項で求めた部材の曲げ応力 σ_p 及び組合せ応力 σ_c が，許容引張応力 f_t 以下であること。

また，5.4.1.1 項で求めた部材のせん断応力 τ_p が，許容せん断応力 f_s 以下であること。

ただし，f_t 及び f_s は下表による。

	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_t	$\dfrac{F^*}{1.5}\cdot 1.5$
許容せん断応力 f_s	$\dfrac{F^*}{1.5\cdot\sqrt{3}}\cdot 1.5$

5.4.1.3 項で求めた部材の圧縮応力 σ_{cs} が許容圧縮応力 f_c 以下であること。

ただし，f_c は(5.6.1)式による。

$$f_c=\left\{1-0.4\cdot\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\}\cdot\frac{F^*}{\nu}\cdot 1.5 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.6.1)$$

ここで，

$$\Lambda=\sqrt{\frac{\pi^2\cdot E}{0.6\cdot F^*}}$$

$$\nu=1.5+\frac{2}{3}\cdot\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$$

ν：安全率

Λ：限界細長比

λ：圧縮材の有効細長比

5.6.2　ネルソンスタッド及び基礎ボルトの応力評価

5.4.1.2 項,5.4.1.4 項及び 5.4.1.5 項で求めた基礎ボルト及びネルソンスタッドの引張応力 σ_b，σ_{bn} 及び σ_t が，(5.6.2)及び(5.6.3)式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。

また，5.4.1.2 項，5.4.1.4 項及び 5.4.1.5 項で求めた基礎ボルト及びネルソンスタッドのせん断応力 τ_b，τ_{bn} 及び τ_s が，せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。

$$f_{ts}=1.4\cdot f_{to}-1.6\cdot \tau_b \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.6.2)$$

かつ，

$$f_{ts}\leqq f_{to} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.6.3)$$

ただし，f_{to} 及び f_{sb} は下表による。

	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F^*}{2}\cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5\cdot\sqrt{3}}\cdot 1.5$

6.　評価結果

6.1　設計基準対象施設としての評価結果

ラックの耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1)　構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次項以降の【制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】に示す。

6.2　重大事故等対処設備としての評価結果

ラックの耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1)　構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次項以降の【制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】に示す。

【制御棒貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		方向	基準地震動S_s		最高使用温度 (℃)	減衰定数 (%)
			水平方向	鉛直方向		水平方向設計震度	鉛直方向設計震度		
制御棒貯蔵ラック	B	原子炉建屋 EL. 34.7[*1]			NS	C_H = 1.67 又は*2	C_V = 1.44		
					EW	C_H = 1.67			

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：評価用震度及び基準地震動S_sに基づく設計用床応答スペクトルより得られる値の大きい方とする。

1.2　計算数値

(1)　サポート部材に生じる応力

（単位：MPa）

部材	応力	基準地震動Ｓ$_s$	
		Ｘ方向	Ｙ方向
サポート	曲げ　σ_p	－	48
	せん断　τ_p	－	19
	組合せ　σ_c	－	58
ラック支持枠	圧縮　σ_{cs}	－	31

(2)　ネルソンスタッド及び基礎ボルトに生じる応力

（単位：MPa）

ネルソンスタッド及び基礎ボルト	応力	基準地震動Ｓ$_s$	
		Ｘ方向	Ｙ方向
ネルソンスタッド	引張り　σ_{bn}	－	158
	せん断　τ_{bn}	－	3
ラック基礎ボルト	引張り　σ_b	26	18
	せん断　τ_b	9	5
ラック支持枠基礎ボルト	引張り　σ_t	－	64
	せん断　τ_s	－	18

1.3　結論

1.3.1　固有周期

（単位：s）

方向	固有周期
X方向	
Y方向	
Z方向	

1.3.2　応力（設計基準対象施設）

(1)　部材に生じる応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	基準地震動S_s	
			算出応力	許容応力
サポート	SUS304	曲げ	σ_p＝ 48	f_t＝205
		せん断	τ_p＝ 19	f_s＝118
		組合せ	σ_c＝ 58	f_t＝205
ラック支持枠	SUS304	圧縮	σ_{cs}＝ 31	f_c＝97

すべて許容応力以下である。

(2)　ネルソンスタッド及び基礎ボルトに生じる応力

（単位：MPa）

ネルソンスタッド及び基礎ボルト	材料	応力	基準地震動S_s	
			算出応力	許容応力
ネルソンスタッド	SS400	引張り	σ_{bn}＝ 158	f_{ts}＝175
		せん断	τ_{bn}＝ 3	f_{sb}＝135
ラック基礎ボルト	SUS304	引張り	σ_b＝ 26	f_{ts}＝153
		せん断	τ_b＝ 9	f_{sb}＝118
ラック支持枠基礎ボルト	SUS304	引張り	σ_t＝ 64	f_{ts}＝153
		せん断	τ_s＝ 18	f_{sb}＝118

すべて許容応力以下である。

2.　重大事故等対処施設

2.1　設計条件

機器名称	設備区分	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		方向	基準地震動S_s		最高使用温度 (℃)	減衰定数 (%)
			水平方向	鉛直方向		水平方向設計震度	鉛直方向設計震度		
制御棒貯蔵ラック	－	原子炉建屋 EL. 34.7[*1]			NS	C_H ＝ 1.67 又は＊2	C_V ＝ 1.44		
					EW	C_H ＝ 1.67			

注記　＊1：基準床レベルを示す。

＊2：評価用震度及び基準地震動S_sに基づく設計用床応答スペクトルより得られる値の大きい方とする。

2.2　応力（重大事故等対処設備）

(1)　部材に生じる応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	基準地震動Ｓ$_s$	
			算出応力	許容応力
サポート	SUS304	曲げ	σ_p＝ 48	f_t＝205
		せん断	τ_p＝ 19	f_s＝118
		組合せ	σ_c＝ 58	f_t＝205
ラック支持枠	SUS304	圧縮	σ_{cs}＝ 31	f_c＝97

すべて許容応力以下である。

(2)　ネルソンスタッド及び基礎ボルトに生じる応力

（単位：MPa）

ネルソンスタッド及び基礎ボルト	材料	応力	基準地震動Ｓ$_s$	
			算出応力	許容応力
ネルソンスタッド	SS400	引張り	σ_{bn}＝ 158	f_{ts}＝165
		せん断	τ_{bn}＝ 3	f_{sb}＝127
ラック基礎ボルト	SUS304	引張り	σ_b＝ 26	f_{ts}＝153
		せん断	τ_b＝ 9	f_{sb}＝118
ラック支持枠基礎ボルト	SUS304	引張り	σ_t＝ 64	f_{ts}＝153
		せん断	τ_s＝ 18	f_{sb}＝118

すべて許容応力以下である。

本資料のうち，枠囲みの内容は営業秘密又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-745　改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ-2-11-2-7　制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書

目次

1. 概要 ····· 1
2. 一般事項 ····· 1
2.1 配置概要 ····· 1
2.2 構造計画 ····· 2
2.3 評価方針 ····· 3
2.4 適用基準 ····· 4
2.5 記号の説明 ····· 5
2.6 計算精度と数値の丸め方 ····· 7
3. 評価部位 ····· 8
4. 地震応答解析及び構造強度評価 ····· 8
4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法 ····· 8
4.2 荷重の組合せ及び許容応力 ····· 10
4.3 設計用地震力 ····· 14
4.4 解析モデル及び諸元 ····· 15
4.5 固有周期 ····· 17
4.6 計算方法 ····· 18
4.7 計算条件 ····· 20
4.8 応力の評価 ····· 20
5. 評価結果 ····· 21
5.1 設計基準対象施設としての評価結果 ····· 21
5.2 重大事故等対処設備としての評価結果 ····· 21

1. 概要

本計算書は,「V-2-11-1　波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」の耐震評価方針に基づき，制御棒貯蔵ハンガ（以下「ハンガ」という。）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認することで，Ｓクラス施設への波及的影響を及ぼさないことを説明するものである。その耐震評価は，応力評価により行う。

2. 一般事項

2.1 配置概要

ハンガは原子炉建屋原子炉棟に設置される。ハンガは,図 2-1 の位置関係図に示すように,上位クラス施設である使用済燃料貯蔵ラックが設置された使用済燃料プール上に設置されていることから，落下により使用済燃料貯蔵ラック及び使用済燃料プールに対して波及的影響を及ぼすおそれがある。

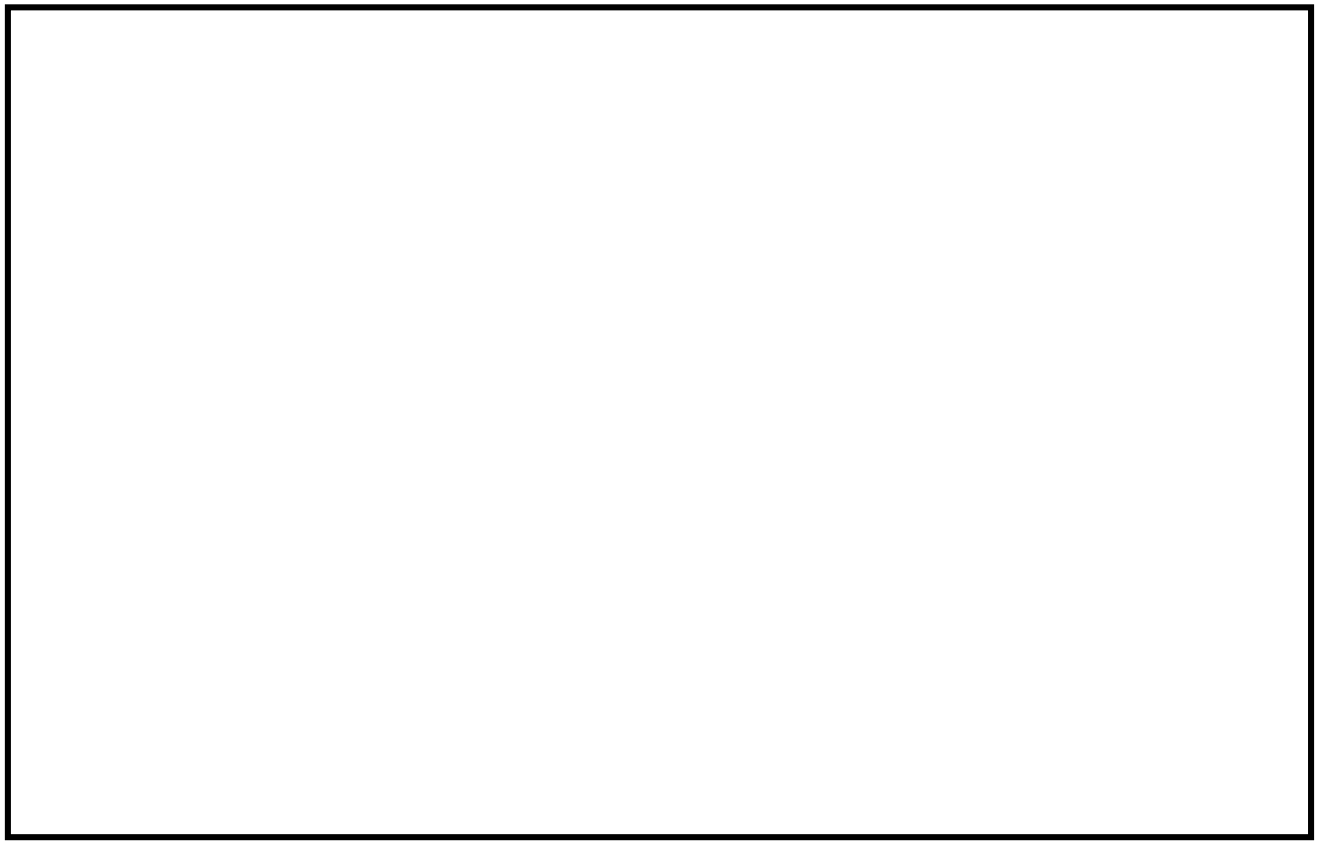
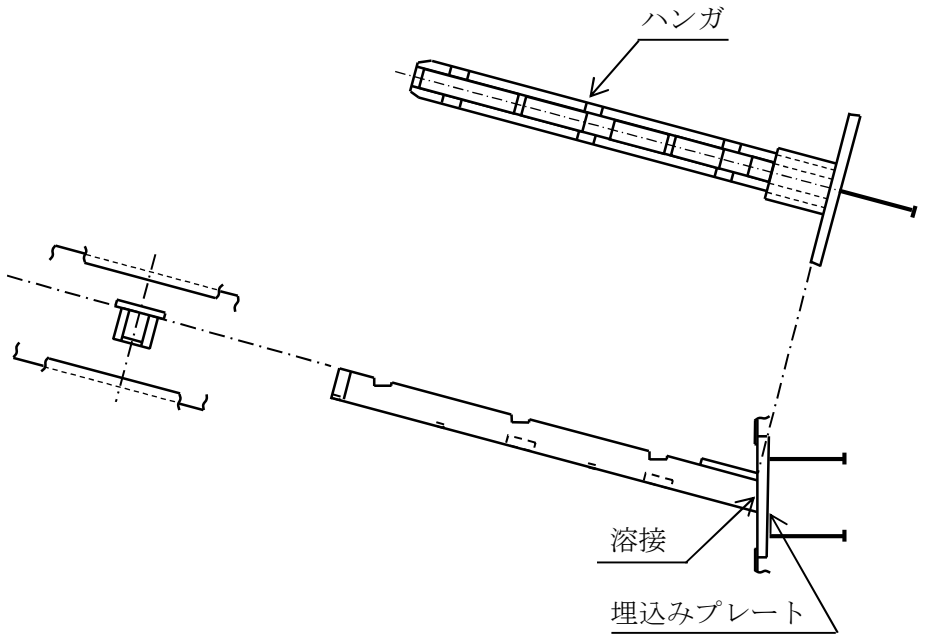


図 2-1　制御棒貯蔵ハンガの位置関係図

2.2　構造計画

ハンガの構造計画を表 2-1 に示す。

表 2－1　構造計画

主要区分	計画の概要		概略構造図
	基礎・支持構造	主体構造	
ハンガ	ハンガは，原子炉建屋の使用済燃料プールの壁の埋込みプレートに溶接で固定している。	ステンレス鋼製。 ハンガは 52 本あり，ハンガ先端側吊り掛け部（切り欠き部）を除き，制御棒を 2 本貯蔵する。	

2.3　評価方針

ハンガの応力評価は，V-2-11-1「波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」の「3. 耐震評価方針」に従い実施する。

評価については，「2.2　構造計画」にて示すハンガの部位を踏まえ，「3.　評価部位」にて設定する箇所において，「4.4　解析モデル及び諸元」及び「4.5固有周期」で算出した固有周期及び荷重に基づく応力等が許容限界内に収まることを，「4.　地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「5.評価結果」に示す。

ハンガの耐震評価フローを図 2-1 に示す。

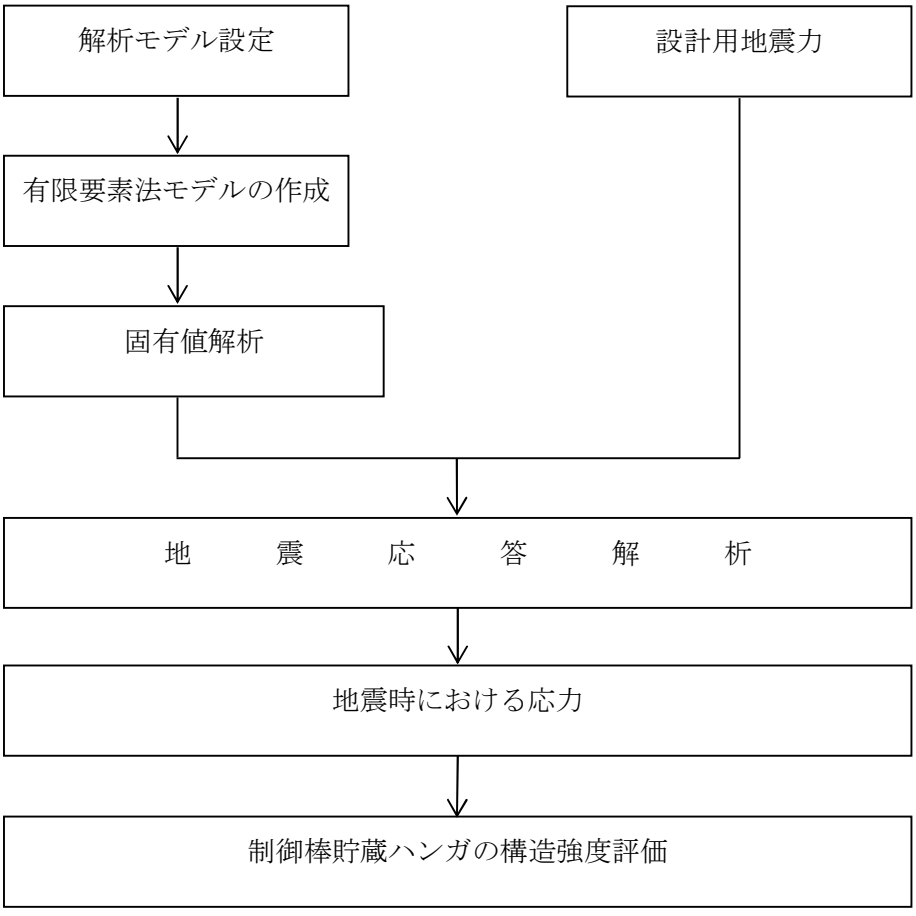


図 2－1　制御棒貯蔵ハンガの耐震評価フロー

2.4　適用基準

適用基準を以下に示す。

(1)　原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編　ＪＥＡＧ４６０１・補－1984 及びＪＥＡＧ４６０１－1987）（日本電気協会　電気技術基準調査委員会　昭和59 年 9 月及び昭和 62 年 8 月）

(2)　発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。））ＪＳＭＥ　Ｓ　ＮＣ１－2005/2007）（日本機械学会　2007 年 9 月）（以下「設計・建設規格」という。）

2.5　記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	部材の断面積	mm^2
A_y, A_z	部材のせん断断面積	mm^2
A_b	ネルソンスタッドの断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	－
C_V	鉛直方向設計震度	－
D	死荷重	N
E	縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格　SSB-3121.1 に定める値	MPa
F^*	設計・建設規格　SSB-3121.3 に定める値	MPa
F_x	部材及び埋込みプレートに働く引張力	N
F_y, F_z	部材及び埋込みプレートに働くせん断力	N
f_s	部材の許容せん断応力	MPa
f_{sb}	せん断力のみを受けるネルソンスタッドの許容せん断応力	MPa
f_t	部材の許容引張応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受けるネルソンスタッドの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受けるネルソンスタッドの許容引張応力	MPa
I_x, I_y, I_z	部材の断面二次モーメント	mm^4
ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3	埋込みプレート端から各ネルソンスタッドまでの距離	mm
M_D	機械的荷重	N
M_y, M_z	部材及び埋込みプレートに働く曲げモーメント	N･mm
m_{CR}	制御棒 1 本当たりの質量	kg
m_h	ハンガの質量	kg
N_m	M_y, M_zにより生じるネルソンスタッド 1 本当たりの最大引張力	N
n	ネルソンスタッドの全本数	－
n_1, n_2, n_3	ネルソンスタッドの各部の本数	－
P_D	最高使用圧力による荷重	N

記号	記号の説明	単位
S_s	基準地震動S_sにより定まる地震力	N
S_u	設計・建設規格　付録材料図表　Part5　表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格　付録材料図表　Part5　表8に定める値	MPa
Z_y, Z_z	部材の断面係数	mm^3
σ_{fa}	部材に生じる組合せ応力	MPa
σ_{ft}	部材に生じる引張応力	MPa
σ_b	ネルソンスタッドに生じる引張応力	MPa
τ_f	部材に生じるせん断応力	MPa
τ_b	ネルソンスタッドに生じるせん断応力	MPa
P_{SAD}	重大事故等時の状態（運転状態Ⅴ）における運転状態等を考慮して当該設備に設計上定められた設計圧力による荷重	N
M_{SAD}	重大事故等時の状態（運転状態Ⅴ）における運転状態等を考慮して当該設備に設計上定められた機械的荷重	N
$Ⅳ_AS$	運転状態Ⅳ相当の許容応力を基準として，それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	－
$Ⅴ_AS$	運転状態Ⅴ相当の応力評価を行う許容応力状態を基本として，それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	－

2.6　計算精度と数値の丸め方

精度は6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2－2に示すとおりとする。

表2－2　表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
設計震度	－	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
最高使用温度	℃	－	－	整数位
質量	kg	－	－	整数位
長さ	mm	－	－	整数位*1
面積	mm^2	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
モーメント	N･mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁*2
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力*3	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記　＊1：設計上定める値が小数点以下第1位の場合は，小数点以下第1位表示とする。

＊2：絶対値が1000以上のときは，べき数表示とする。

＊3：設計・建設規格　付録材料図表に記載された温度の中間における設計引張強さ及び設計降伏点は，比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て，整数位までの値とする。

3.　評価部位

ハンガの耐震評価は，「4.1　地震応答解析及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき，ハンガ，ネルソンスタッドについて実施する。

4.　地震応答解析及び構造強度評価

4.1　地震応答解析及び構造強度評価方法

(1)　ハンガは，原子炉建屋の使用済燃料プールの壁（EL.39.312 m 及び EL.44.138 m）に埋め込まれた埋込金物に溶接され固定されるものとする。

(2)　ハンガの質量には，制御棒の質量とハンガ自身の質量のほか，制御棒及びハンガ部材の排除水質量*を考慮する。

(3)　地震力は，ハンガに対して水平方向から作用するものとする。

ここで，水平方向地震力は，ハンガの長辺方向に作用する場合と短辺方向に作用する場合を考慮する。

また，鉛直方向地震力は，水平方向地震力と同時に不利な方向に作用するものとする。

(4)　貯蔵本数は，制御棒 2 本とし，ハンガ先端側吊り掛け部（切り欠き部）を除いて貯蔵とする。

(5)　構造概要図を図 4－1 に示す。

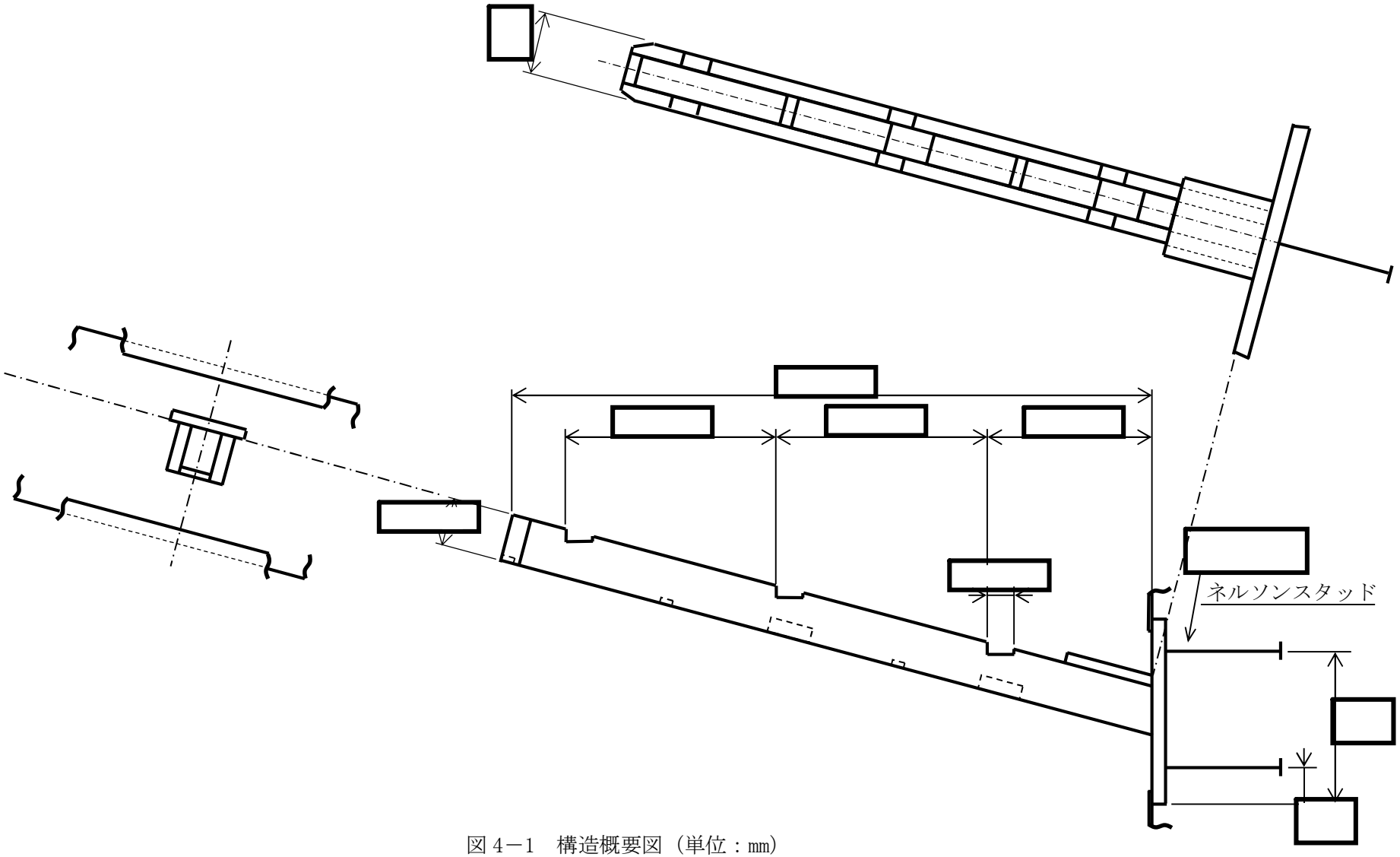


図 4－1　構造概要図（単位：mm）

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

ハンガの荷重の組合せ及び許容応力状態のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－1 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－2 に示す。

ラックは設計基準対処施設においてはＢクラス，重大事故等対処設備には該当しないが，上位クラスへの波及的影響を踏まえて，基準地震動S_sに対する荷重の組合せに対して，$Ⅳ_AS$及びV_ASによる評価を行う。

4.2.2 許容応力

ハンガの許容応力を表 4－3 に示す。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

4.2.3.1 ハンガの許容応力のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4－4 に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－5 に示す。

4.2.3.2 ネルソンスタッドの許容応力のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表4－6に，重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4－7 に示す。

表 4－1　荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震設計上の重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	制御棒貯蔵ハンガ	B	－*	$D+P_D+M_D+S_s$	$\mathrm{IV_AS}$

注記　＊：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

表 4－2　荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	制御棒貯蔵ハンガ	－	－*1	$D+P_{SAD}+M_{SAD}+S_s$	$\mathrm{V_AS}$ *2

注記　＊1：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

＊2：$\mathrm{V_AS}$として$\mathrm{IV_AS}$の許容限界を用いる。

表 4－3　許容応力（その他の支持構造物及び重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界（ボルト等以外）*1		許容限界（ボルト等）*1	
	一次応力		一次応力	
	引張り	せん断	引張り	せん断
$\mathrm{IV_AS}$	1.5・ft*	1.5・fs*	1.5・ft*	1.5・fs*
$\mathrm{V_AS}$（$\mathrm{V_AS}$として$\mathrm{IV_AS}$の許容限界を用いる。）	1.5・ft*	1.5・fs*	1.5・ft*	1.5・fs*

表 4－4　使用材料の許容応力評価条件（設計基準対象施設）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	S_y*1 (MPa)	S_u*1 (MPa)	S_y（RT） (MPa)
ハンガ	SUS304	周囲環境温度	[redacted]	－	188	479	205
ネルソンスタッド	SS400	周囲環境温度	[redacted]	－	234	385	－

表 4－5　使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	S_y*1 (MPa)	S_u*1 (MPa)	S_y（RT） (MPa)
ハンガ	SUS304	周囲環境温度	[redacted]	－	171	441	205
ネルソンスタッド	SS400	周囲環境温度	[redacted]	－	221	373	－

4.3　設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4－6 及び表 4－7 に示す。

基準地震動Ｓ$_S$による地震力は，「Ⅴ-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づく。

表 4－6　設計用地震力（設計基準対象施設）

耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		基準地震動Ｓ$_s$	
		水平方向	鉛直方向	水平方向設計震度	鉛直方向設計震度
B	原子炉建屋 EL. 38. 8*1, EL. 46. 5*1	[redacted]		C_H=1. 74	C_V = 1. 52

注記　＊1：基準床レベルを示す。

＊2：1 次のみを示す。2 次以降は「4.5　固有周期」に示す。

表 4－7　設計用地震力（設計基準対象施設）

設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		基準地震動Ｓ$_s$	
		水平方向	鉛直方向	水平方向設計震度	鉛直方向設計震度
－	原子炉建屋 EL. 38. 8*1, EL. 46. 5*1	[redacted]		C_H=1. 74	C_V = 1. 52

注記　＊1：基準床レベルを示す。

＊2：1 次のみを示す。2 次以降は「4.5　固有周期」に示す。

4.4　解析モデル及び諸元

4.4.1　解析モデル

ハンガの解析モデルは，はり要素を用いた有限要素モデルとする。

ハンガは，使用済燃料プールの壁の埋込みプレートに溶接で固定されており，ハンガ単体の部材として計算する。

ハンガの質量には制御棒の質量，ハンガ自身の質量，制御棒及びハンガ部材の排除水質量を考慮し，これらハンガ部材に含まれる水の質量及び排除水質量は，はり要素部に等分布に与える。

また，制御棒の質量及び排除水質量は，ハンガの吊り掛け部（切り欠き部）の節点に集中質量で与える。

ハンガの解析モデルを図 4－2 に示す。

また，計算に用いる設計条件を「4.3　設計用地震力」に，固有周期の算出及び部材の応力評価に用いる要目を「【制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算結果】2.　機器要目」にそれぞれ示す。

固有周期は，計算機コード「ＳＡＰ－Ⅳ」を用いて求める。

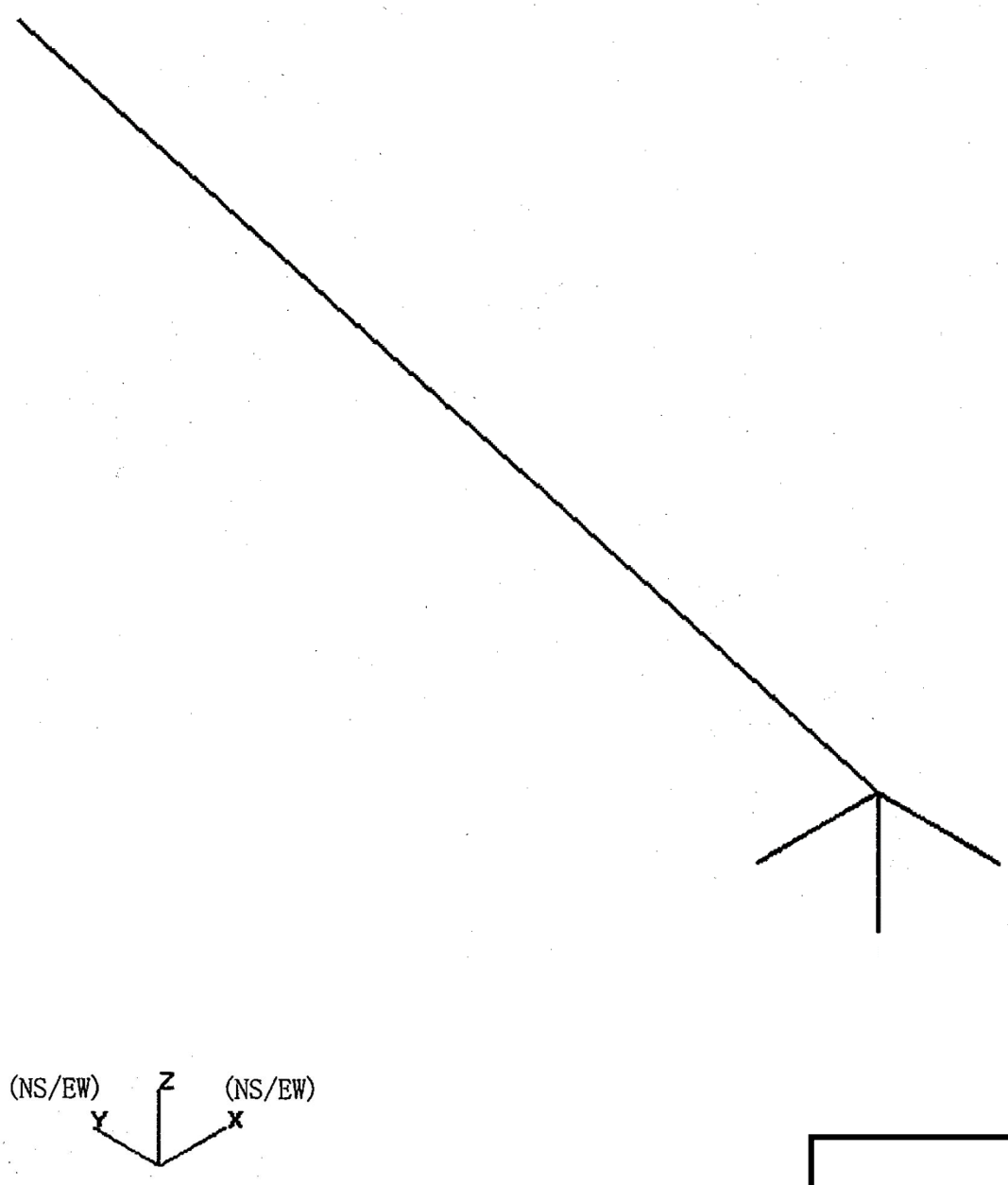


図 4－2　ハンガ解析モデル

4.4.2　機器諸元

機器の諸元を下記に示す。

(1)　材料，縦弾性係数

材料及び縦弾性係数を表 4－8 に示す。

表 4－8　部材物性

部材	使用材料	縦弾性係数（MPa）
ハンガ	SUS304	192000
ネルソンスタッド	SS400	－

(2)　死荷重

運転時質量‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ □ kg

4.5　固有周期

計算機コード「ＳＡＰ－Ⅳ」により求めた固有値解析の結果を表 4－9 に示す。

表 4－9　固有周期

部材	次数	固有周期(s)	方向
ハンガ	1	□	水平方向
	2		水平／鉛直方向
	3		水平方向

4.6　計算方法

4.6.1　部材の応力

応力計算は，図 4－2 の解析モデルにて，計算機コード「ＳＡＰ－Ⅳ」を使用して行い，引張力F_x，せん断力F_y，F_z及び曲げモーメントM_y，M_zを求め，本項に示す計算方法に従って計算する。

計算機コード内では，各部材の局所座標系及び引張力F_x，せん断力F_y，F_z及び曲げモーメントM_y，M_zの働く向きを図 4－3 に示すように設定している。

(1)　せん断応力

せん断力F_y，F_zにより部材に生じるせん断応力τ_fは，(4.6.1.1) 式より求める。

$$\tau_f=\sqrt{\left(\frac{F_y}{A_y}\right)^2+\left(\frac{F_z}{A_z}\right)^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.6.1.1)$$

(2)　引張応力

引張力F_x及び曲げモーメントM_y，M_zにより部材に生じる引張応力σ_{ft}は，(4.6.1.2) 式より求める。

$$\sigma_{ft}=\frac{F_x}{A}+\frac{M_y}{Z_y}+\frac{M_z}{Z_z} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.6.1.2)$$

(3)　組合せ応力

組合せ応力σ_{fa}は，(4.6.1.3) 式より求める。

$$\sigma_{fa}=\sqrt{\sigma_{ft}{}^2+3\cdot\tau_f{}^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.6.1.3)$$

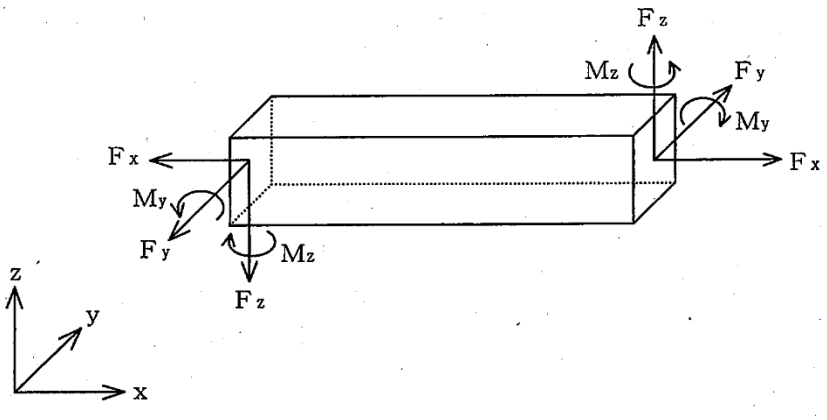


図 4－3　部材の応力計算モデル

4.6.2　ネルソンスタッドの応力

応力計算は，図 4－2 の解析モデルにて，計算機コード「ＳＡＰ－Ⅳ」を使用して行い，埋込みプレートに生じる反力及びモーメントを求め，本項に示す計算方法に従って計算する。

埋込みプレートの荷重状態を図 4－4 に示す。

(1)　引張応力

曲げモーメントM_y，M_zにより生じるネルソンスタッド 1 本当たりの最大引張力N_m及び引張力F_xより生じるネルソンスタッドの引張応力σ_bは，(4.6.2.1) 式より求める。

$$\sigma_b = \frac{N_m}{A_b} + \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.6.2.1)$$

ここで，

$$N_m = \frac{\ell_1 \cdot M_y}{n_1 \cdot \ell_1^2 + n_2 \cdot \ell_2^2} + \frac{\ell_3 \cdot M_z}{n_3 \cdot \ell_3^2}$$

(2)　せん断応力

ネルソンスタッドに生じるせん断応力τ_bは，(4.6.2.2) 式より求める。

$$\tau_b = \frac{\sqrt{F_y^2 + F_z^2}}{n \cdot A_b} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.6.2.2)$$

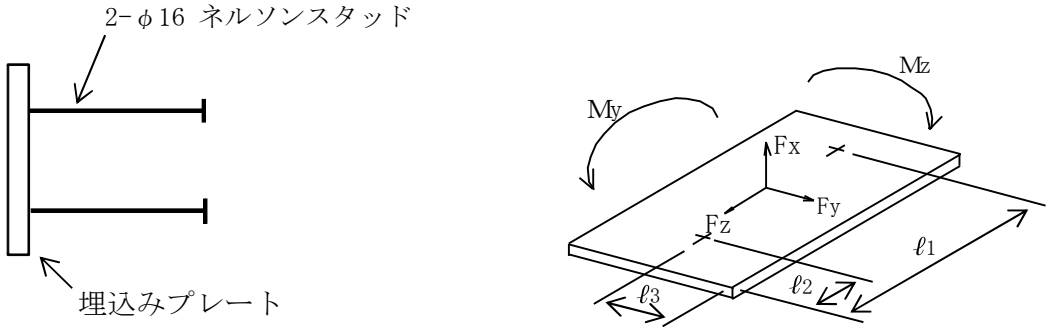


図 4－4　埋込みプレートの荷重状態

4.7　計算条件

応力解析に用いる荷重は，本計画書の【制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

4.8　応力の評価

4.8.1　部材の応力評価

「4.6.1　部材の応力」で求めた部材の引張応力σ_{ft}及び組合せ応力σ_{fa}が，許容引張応力f_t以下であること。

また，「4.6.1　部材の応力」で求めた部材のせん断応力τ_fが，許容せん断応力f_s以下であること。

ただし，f_t及びf_sは下表による。

	基準地震動S_s
許容引張応力f_t	$\frac{F^*}{1.5}$・1.5
許容せん断応力f_s	$\frac{F^*}{1.5\cdot\sqrt{3}}$・1.5

4.8.2　ネルソンスタッドの応力評価

ネルソンスタッドの許容応力はボルトの許容応力算出と同様とする。

「4.6.2　ネルソンスタッドの応力」で求めたネルソンスタッドの引張応力σ_bが，次式よりもとめた許容引張応力f_{ts}以下であること。

また，「4.6.2　ネルソンスタッドの応力」で求めたネルソンスタッドのせん断応力τ_bが，せん断力のみを受けるネルソンスタッドの許容せん断応力f_{sb}以下であること。

$$f_{ts}=1.4\cdot f_{to}-1.6\cdot\tau_b \quad \cdots\cdots (4.8.2.1)$$

かつ，

$$f_{ts}\leqq f_{to} \quad \cdots\cdots (4.8.2.2)$$

ただし，f_{to}及びf_{sb}は下表による。

	基準地震動S_s
許容引張応力f_{to}	$\frac{F^*}{2}$・1.5
許容せん断応力f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5\cdot\sqrt{3}}$・1.5

5.　評価結果

5.1　設計基準対象施設としての評価結果

ハンガの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1)　構造強度評価結果

構造強度評価の結果を事項以降の【制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算結果】に示す。

5.2　重大事故等対処設備としての評価結果

重大事故等時の状態を考慮した場合の耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1)　構造強度評価結果

構造強度評価の結果を事項以降の【制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算結果】に示す。

【制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算結果】

1. 設計条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		方向	基準地震動Ｓｓ		最高使用温度 (℃)
			水平方向	鉛直方向		水平方向設計震度	鉛直方向設計震度	
ハンガ	B	原子炉建屋 EL. 38.8*1, EL. 46.5*1	[redacted]		ＮＳ／ＥＷ	C_H=1.74	C_V = 1.52	[redacted] (設計基準対象施設) [redacted] (重大事故等対処設備)

注記 ＊1：基準床レベルを示す。

＊2：1 次のみを示す。2 次以降は 8 章に示す。

2. 機器要目

2.1 固有周期の算出及び部材の応力評価に用いる要目

部材	材料	A*1 (mm²)	A_y*1 (mm²)	A_z*1 (mm²)	I_x*1 (mm⁴)	I_y*1 (mm⁴)	I_z*1 (mm⁴)	Z_y*1 (mm³)	Z_z*1 (mm³)	E*2 (MPa)
ハンガ	SUS304	1.036×10^3	3.453×10^2	6.907×10^2	6.769×10^4	1.182×10^5	6.137×10^5	6.389×10^3	1.980×10^4	192000

注記 ＊1：A，A_y，A_z，I_x，I_y，I_z，Z_y，Z_zは部材の長手方向をｘ軸とした局所座標系に従う。

＊2：最高使用温度（66 ℃）で算出

(設計基準対象施設)

部材	材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F* (MPa)
ハンガ	SUS304	188	205	479	205

注記 ＊1：最高使用温度（66 ℃）で算出

＊2：室温で算出

(重大事故等対処設備)

部材	材料	S_y*1 (MPa)	S_y*2 (MPa)	S_u*1 (MPa)	F* (MPa)
ハンガ	SUS304	171	205	441	205

注記 ＊1：最高使用温度（100 ℃）で算出

＊2：室温で算出

2.2 ネルソンスタッドの応力評価に用いる要目

部材	材料	m_h (kg)	m_{CR} (kg)	ℓ_1 (mm)	ℓ_2 (mm)	ℓ_3 (mm)	n_1	n_2	n_3	n	A_b (mm^2)
ネルソンスタッド	SS400										

短辺方向*					長辺方向*				
F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_y (N・mm)	M_z (N・mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_y (N・mm)	M_z (N・mm)
3.046×10^{-9}	3.447×10^{3}	4.992×10^{3}	1.433×10^{6}	9.892×10^{5}	3.447×10^{3}	6.253×10^{-14}	4.992×10^{3}	1.698×10^{6}	7.532×10^{-11}

注記 ＊：ハンガに対して作用する水平方向地震力の方向を示す。

(設計基準対象施設)

部材	材料	S_y* (MPa)	S_u* (MPa)	F* (MPa)
ネルソンスタッド	SS400	234	385	234

注記 ＊：最高使用温度（66 ℃）で算出

(重大事故等対処設備)

部材	材料	S_y* (MPa)	S_u* (MPa)	F* (MPa)
ネルソンスタッド	SS400	221	373	221

注記 ＊：最高使用温度（100 ℃）で算出

3. 計算数値

3.1 部材に生じる応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	基準地震動S_s
			ＮＳ／ＥＷ方向
ハンガ	SUS304	引張り σ_{ft}	107
		せん断 τ_f	7
		組合せ σ_{fa}	108

3.2 ネルソンスタッドに生じる応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	基準地震動S_s
ネルソンスタッド	SS400	引張り σ_b	60
		せん断 τ_b	15

4. 応力

4.1 応力（設計基準対象施設）

(1) 部材に生じる応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
ハンガ	SUS304	引張り	$\sigma_{ft}=107$	$f_t=205$
		せん断	$\tau_f=7$	$f_s=118$
		組合せ	$\sigma_{fa}=108$	$f_t=205$

すべて許容応力以下である。

(2) ネルソンスタッドに生じる応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
ネルソンスタッド	SS400	引張り	$\sigma_b=60$	$f_{ts}=175$
		せん断	$\tau_b=15$	$f_{sb}=135$

すべて許容応力以下である。

4.2　応力（重大事故等対処設備）

(1)　部材に生じる応力

制御棒貯蔵ハンガの重大事故等時の状態を考慮した場合の許容応力状態$\mathrm{IV_A S}$の評価は，「2.1　固有周期*の算出及び部材の応力評価に用いる要目」に示すＦ　の値よりS_sでの計算結果値を用いた設計基準対象施設の評価結果と同一であることから記載は省略する。重大事故等対処設備として算出応力はすべて許容応力以下である。

(2) ネルソンスタッドに生じる応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	算出応力	許容応力
ネルソンスタッド	SS400	引張り	$\sigma_b=60$	$f_{ts}=165$
		せん断	$\tau_b=15$	$f_{sb}=127$

すべて許容応力以下である。

東海第二発電所　工事計画審査資料	
資料番号	工認-762 改 0
提出年月日	平成 30 年 6 月 29 日

Ⅴ－5－28　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＣＯＮＤＳＬＩＰ

目次

1. はじめに.....1
1.1 使用状況一覧.....2
2. 解析コードの概要.....3
2.1 CONDSLIP Ver. 5.....3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）CONDSLIPについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-11-2-3	使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーンの耐震性について計算書	Ver.5

2. 解析コードの概要

2.1 CONDSLIP Ver.5

コード名 / 項目	CONDSLIP
使用目的	3次元はりモデルによる非線形時刻歴応答解析（部材力算定）
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	1995年
使用したバージョン	Ver.5
計算機コードの概要	CONDSLIPは，クレーン等の走行構造物に対して，すべり・浮き上がり・衝突の非線形現象を含めた地震応答解析に用いられているコードである。 本解析コードを用いて，すべり・浮き上がり・衝突現象を含む非線形時刻歴応答解析を実施し，すべり量・浮き上がり量・衝突力等の非線形力を算出することで，構造各部の変位や部材力を算出する。
検証（Verification）及び 妥当性確認 （Validation）	CONDSLIPは，上位クラス施設への波及的影響のおそれのある下位クラス施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーン等（以下「クレーン」という。）の地震応答解析に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証はVer.4について実施した。内容は次の通りである。 本解析では，クレーンをはり要素でモデル化している。クレーンのはり要素については，以下の通り，理論解との比較による検証を行い，計算機能が適正であることを確認している。 ・片持ちはりモデルに対して静的解析を行い，解析結果と理論解を比較し，誤差 1%以下で一致していることを確認している。 クレーン（車輪）とレールの接触面で生じる，すべり・浮き上がり・衝突等の非線形要素については，以下の通り，衝突要素試験による検証を行い，計算機能が適正であることを確認している。 ・衝突要素試験による地震応答検証試験での衝突事象の結果とそれらを考慮した解析モデルによる解析結果を比較し，非線形挙動はおおむね一致していることを確認している。 ・上記の衝突要素試験による地震応答検証結果については，機械学会論文集に投稿掲載している(2004年9月号（第70巻第

	697 号))。 【妥当性確認（Validation)】 本解析コードをクレーンの解析に用いることの妥当性について，以下の通り，クレーン供試模型による地震応答検証試験との比較を行い確認している。 ・クレーン供試模型を用いた地震応答検証試験によるすべり，浮上り，衝突事象の結果とそれらを考慮した解析モデルによる解析結果を比較し，非線形挙動はおおむね一致していることを確認している。 ・上記のクレーン供試模型による地震応答検証結果については，機械学会論文集に投稿掲載している（ 2004 年 9 月号（第 70 巻第 697 号))。 ・今回の解析には Ver.5 を用いているが，Ver.4 から Ver.5 へのバージョンアップにおいて，今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。 ・今回の工事計画で行う 3 次元はり要素モデルによる非線形時刻歴応答解析（部材力の算定）の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

本資料のうち，枠組みの内容は，
営業秘密また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-601　改0
提出年月日	平成30年6月29日

Ⅴ-2-5-8-1-1　管の耐震性についての計算書

目　　次

1.　概要 ····· 1
2.　概略系統図及び鳥瞰図 ····· 2
2.1　概略系統図 ····· 2
2.2　鳥瞰図 ····· 4
3.　計算条件 ····· 17
3.1　荷重の組合せ及び許容応力 ····· 17
3.2　設計条件 ····· 18
3.3　材料及び許容応力 ····· 31
3.4　設計用地震力 ····· 32
4.　解析結果及び評価 ····· 33
4.1　固有周期及び設計震度 ····· 33
4.2　評価結果 ····· 45
4.2.1　管の応力評価結果 ····· 45
4.2.2　支持構造物評価結果 ····· 48
4.2.3　弁の動的機能維持評価結果 ····· 49

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-9　機能維持の基本方針」，「Ⅴ-2-1-11　機器・配管の耐震支持設計方針」及び「Ⅴ-2-1-14-6　管の耐震性についての計算書作成の基本方針」に基づき，管，支持構造物及び弁が設計用地震力に対して十分な構造強度又は動的機能を有していることを説明するものである。

評価結果記載方法は以下に示す通りである。

(1)　管

工事計画記載範囲の管のうち，各応力区分における最大応力評価点の評価結果を解析モデル単位に記載する。また，各応力区分における最大応力評価点の許容値／発生値（裕度）が最小となる解析モデルを代表として記載する。

(2)　支持構造物

工事計画記載範囲の支持点のうち，種類及び型式ごとの反力が最大となる支持点の評価結果を代表として記載する。

(3)　弁

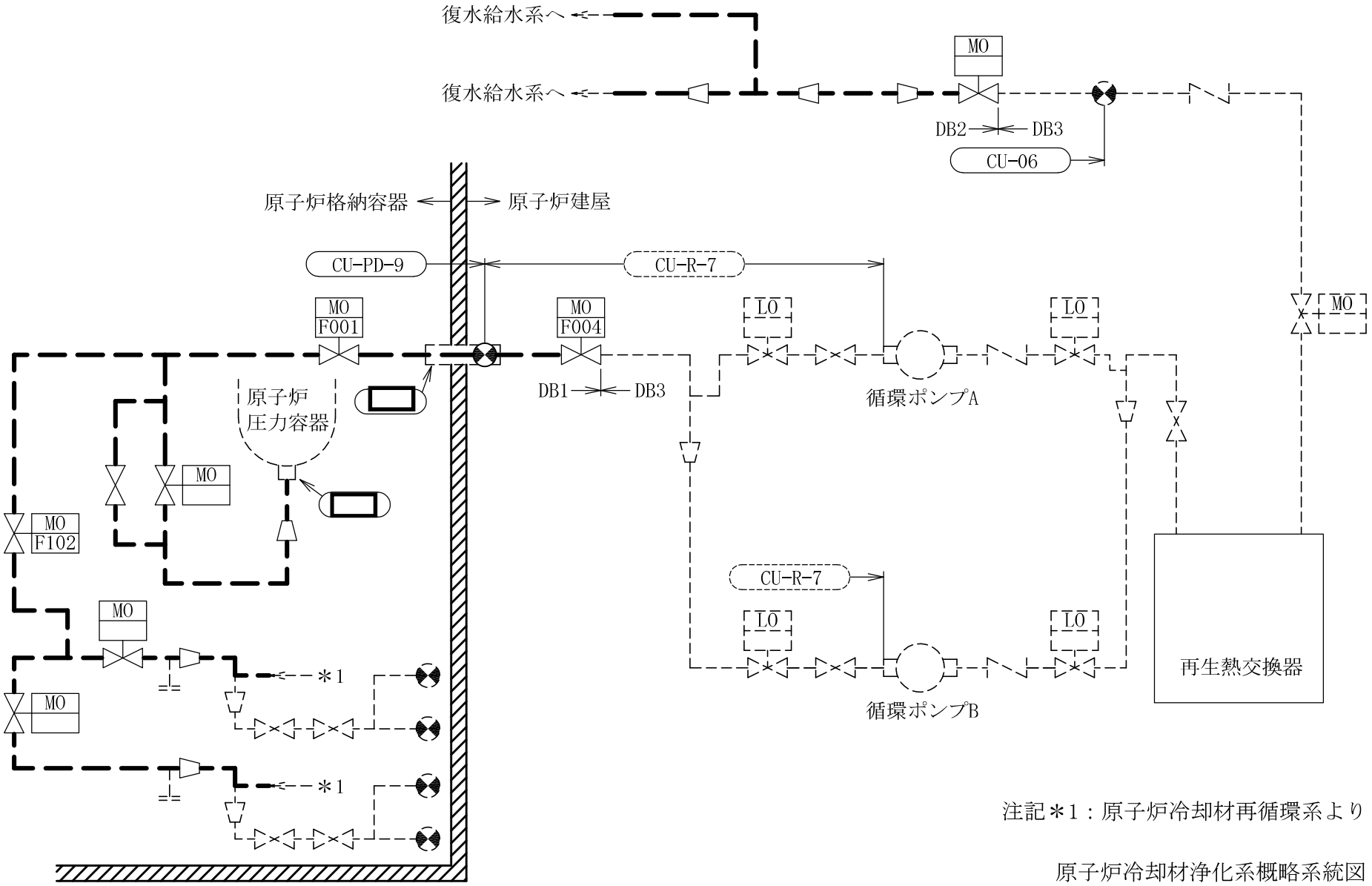
機能確認済加速度の応答加速度に対する裕度が最小となる動的機能維持要求弁を代表として評価結果を記載する。

2.　概略系統図及び鳥瞰図

2.1　概略系統図

概略系統図記号凡例

記　　号	内　　容
―――― （太線）	工事計画記載範囲の管のうち，本計算書記載範囲の管（重大事故等対処設備）
― ― ― （太破線）	工事計画記載範囲の管のうち，本計算書記載範囲の管（設計基準対象施設）
―――― （細線）	工事計画記載範囲の管のうち，本系統の管であって他計算書記載範囲の管
- - - - - - - - - （破線）	工事計画記載範囲外の管又は工事計画記載範囲の管のうち，他系統の管であって系統の概略を示すために表記する管
○○-○-○○	鳥瞰図番号（評価結果を記載する範囲）
○○-○-○○	鳥瞰図番号（評価結果の記載を省略する範囲）
⊗	アンカ
［管クラス］	
DB1	クラス１管
DB2	クラス２管
DB3	クラス３管
DB4	クラス４管
SA2	重大事故等クラス２管
SA3	重大事故等クラス３管
DB1/SA2	重大事故等クラス２管であってクラス１管
DB2/SA2	重大事故等クラス２管であってクラス２管
DB3/SA2	重大事故等クラス２管であってクラス３管
DB4/SA2	重大事故等クラス２管であってクラス４管

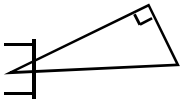
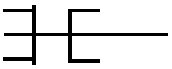
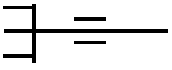
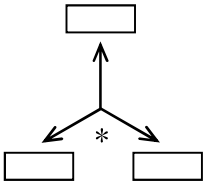


注記＊1：原子炉冷却材再循環系より

原子炉冷却材浄化系概略系統図

2.2　鳥瞰図

鳥瞰図記号凡例

記　　号	内　　容
━━━━（太線）	工事計画記載範囲の管のうち，本計算書記載範囲の管 （重大事故等対処設備の場合は鳥瞰図番号の末尾を「(SA)」，設計基準対象施設の場合は鳥瞰図番号の末尾を「(DB)」とする。）
――――（細線）	工事計画記載範囲の管のうち，本系統の管であって他計算書記載範囲の管
- - - - - -（破線）	工事計画記載範囲外の管又は工事計画記載範囲の管のうち，他系統の管であって解析モデルの概略を示すために表記する管
●	質　　点
⊗	ア　ン　カ
	レストレイント （本図は斜め拘束の場合の全体座標系における拘束方向成分を示す。スナッバについても同様とする。）
	スナッバ
	ハンガ
	リジットハンガ
	拘束点の地震による相対変位量(mm) （＊は評価点番号，矢印は拘束方向を示す。また，□内に変位量を記載する。）
	注：　鳥瞰図中の寸法の単位はmmである。

Y

11

3. 計算条件

3.1 荷重の組合せ及び許容応力

本計算書において考慮する荷重の組合せ及び許容応力を下表に示す。

施設名称	設備名称	系統名称	施設分類*1	設備分類*2	機器等の区分	耐震クラス	荷重の組合せ*3,4	許容応力状態*5
原子炉冷却系統施設	原子炉冷却材浄化設備	原子炉冷却材浄化系	DB	—	クラス１管 クラス２管 クラス３管	S	I_L+S_d	III_AS
							II_L+S_d	
							I_L+S_s	IV_AS
							II_L+S_s	
							$IV_L(L)+S_d$*6	
							$V_L(L)+S_d$*7,8	V_AS
							$V_L(LL)+S_s$*7	

注記＊1： ＤＢは設計基準対象施設，ＳＡは重大事故等対処設備を示す。

＊2： 「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

＊3： 運転状態の添字Lは荷重，（Ｌ）は荷重が長期間作用している状態，（ＬＬ）は（Ｌ）より更に長期的に荷重が作用している状態を示す。

＊4： 許容応力状態ごとに最も厳しい条件又は包絡条件を用いて評価を実施する。

＊5： 許容応力状態V_ASは許容応力状態IV_ASの許容限界を使用し，許容応力状態IV_ASとして評価を実施する。

＊6： クラス１管においてのみ考慮する。

＊7： プロセス条件に加え，重大事故時の原子炉格納容器バウンダリ条件として，重大事故時の原子炉格納容器限界温度及び圧力を考慮する。

＊8： 荷重の組合せV_L（Ｌ）＋S_dはV_L（ＬＬ）＋S_sに包絡されるため，評価を省略する。

3.2 設計条件

鳥瞰図番号ごとに設計条件に対応した管番号で区分し，管番号と対応する評価点番号を示す。

鳥 瞰 図 CU-PD-9

管番号	対応する評価点	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (℃)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料	耐震クラス	縦弾性係数 (MPa)
1	1A～6	8.62	302	165.2	11.0	SUS316LTP	S	
2	6～8,9～11 12～38,58～62 63～71,72～81 67～202,203～242	8.62	302	165.2	11.0	SUS316TP	S	
3	11～12	8.62	302	165.2	11.0	SUSF316	S	
4	38～58	8.62	302	165.2	11.0	SUS304TP	S	
5	82～83,83～162	8.62	302	114.3	8.6	SUS316TP	S	

設計条件

鳥瞰図番号ごとに設計条件に対応した管番号で区分し，管番号と対応する評価点番号を示す。

鳥　瞰　図　CU-PD-9

管番号	対応する評価点	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (℃)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料	耐震クラス	縦弾性係数 (MPa)
5	243～244,244～362	8.62	302	114.3	8.6	SUS316TP	S	
6	162～163N,362～363N	8.62	302	114.3	8.6		S	
7	51～401	8.62	302	76.3	7.0	SUS304TP	S	
8	401～402	8.62	302	76.3	9.5	SUS304TP	S	
9	402～426,427～430 439～464,425～507 508～429	8.62	302	76.3	9.5	STPT49	S	
10	430～439	8.62	302	76.3	9.5	STS49	S	
11	465～471N	8.62	302	60.5	8.7	STPT49	S	

配管の付加質量

鳥　瞰　図　CU-PD-9

質量	対応する評価点
	1A～4001
	4001～8, 9～20, 21～25, 26～50, 52～58 77～78, 80～81 161～163N
	20～21, 25～26
	50～52, 51～401
	58～62, 63～66, 68～71
	66～68, 67～201
	72～77
	78～80, 239～241
	82～83, 83～161, 243～244, 244～361
	201～202, 203～239, 241～242 361～363N
	401～409, 411～418, 439～464, 465～471N
	409～411
	418～424, 427～428, 433～439, 501～507, 508～509
	424～426, 425～501
	428～433, 509～429

弁部の寸法

鳥　瞰　図　CU-PD-9

評価点	外径(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)	評価点	外径(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)
8～8001				8001～8002			
8002～8003				8003～8004			
8001～9				62～6201			
6201～6202				6202～6203			
6203～6204				6204～6205			
6201～63				71～7101			
7101～7102				7102～7103			
7103～7104				7104～7105			
7101～72				202～2021			
2021～2022				2022～2023			
2023～2024				2024～2025			
2021～203				426～4261			
4261～4262				4262～4263			
4263～4264				4261～427			
507～508							

弁部の質量

鳥　瞰　図　CU-PD-9

質量	対応する評価点	質量	対応する評価点
[redacted]	8～8001, 8001～9	[redacted]	8, 9
	8001		8003, 7103, 2023
	8004		62～6201, 6201～63
	62, 63		6201
	6204		6205
	71～7101, 7101～72		71, 72, 202, 203
	7101, 2021		7105, 2025
	202～2021, 2021～203		426～4261, 4261～427
	426, 427		4261
	4263		4264
	507～508		

支持点及び貫通部ばね定数

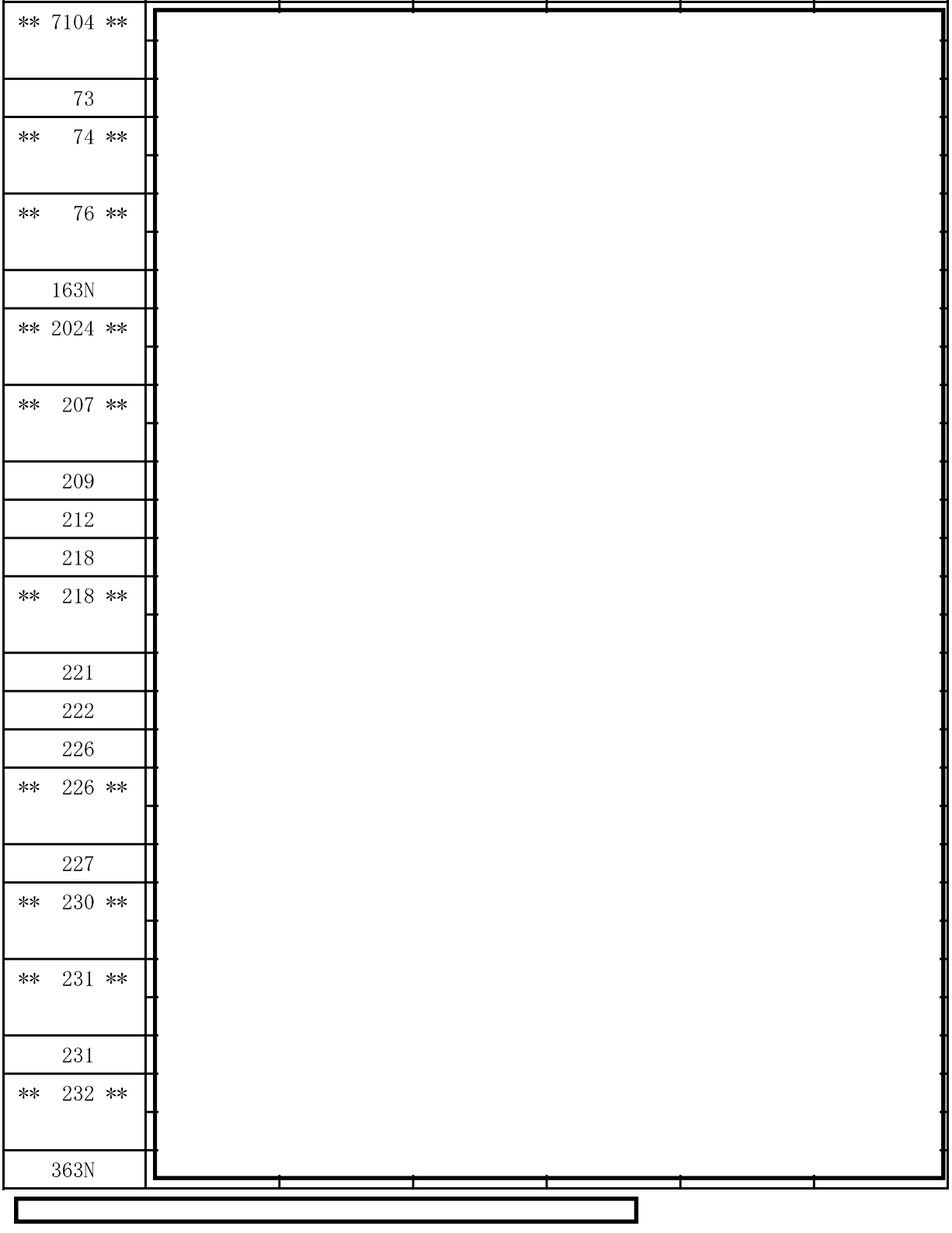
鳥　瞰　図　CU-PD-9

支持点番号	各軸方向ばね定数(N/mm)			各軸回り回転ばね定数(N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1A						
5						
** 8003 **						
** 8003 **						
14						
**　14 **						
31						
**　39 **						
40						
**　41 **						
49						
**　53 **						
**　57 **						
60						
61						
**　61 **						
** 6203 **						
** 6203 **						
65						
69						
70						

支持点及び貫通部ばね定数

鳥　瞰　図　CU-PD-9

支持点番号	各軸方向ばね定数(N/mm)			各軸回り回転ばね定数(N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
** 7104 **						
73						
**　74 **						
**　76 **						
163N						
** 2024 **						
**　207 **						
209						
212						
218						
**　218 **						
221						
222						
226						
**　226 **						
227						
**　230 **						
**　231 **						
231						
**　232 **						
363N						



支持点及び貫通部ばね定数

鳥　瞰　図　CU-PD-9

支持点番号	各軸方向ばね定数(N/mm)			各軸回り回転ばね定数(N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
410						
415						
416						
** 419 **						
421						
4263						
** 4263 **						
** 4263 **						
429						
435						
435						
438						
438						
** 4401 **						
446						
451						
454						
457						
463						
N1						
** 502 **						
505						
** 505 **						

設計条件

鳥瞰図番号ごとに設計条件に対応した管番号で区分し，管番号と対応する評価点番号を示す。

鳥　瞰　図　CU-06

管番号	対応する評価点	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (℃)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料	耐震クラス	縦弾性係数 (MPa)
1	80～81	9.80	302	165.2	11.0	STPT49	S	
2	82～84,90～92	8.62	302	165.2	11.0	STPT49	S	
3	85～89	8.62	302	267.4	15.1	STPA23	S	
4	93～108,91～162	8.62	302	114.3	8.6	STPT49	S	
5	108～109,162～163	8.62	302	114.3	11.1	STPT49	S	
6	109～111N,163～165N	8.62	302	114.3	11.1	ASTM A182F.11	S	

配管の付加質量

鳥　瞰　図　CU-06

質量	対応する評価点
[redacted]	80～81, 82～84, 90～92
	85～89
	93～111N, 91～165N

弁部の寸法

鳥　瞰　図　CU-06

評価点	外径(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)	評価点	外径(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)
81～8101				8101～8102			
8102～8103				8101～82			

弁部の質量

鳥　瞰　図　CU-06

質量	対応する評価点	質量	対応する評価点
[redacted]	81,82	[redacted]	8101
	8102		8103

支持点及び貫通部ばね定数

鳥　瞰　図　CU-06

支持点番号	各軸方向ばね定数(N/mm)			各軸回り回転ばね定数(N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
80						
88						
95						
95						
100						
104						
111N						
154						
158						
165N						

3.3　材料及び許容応力

使用する材料の最高使用温度での許容応力を下表に示す。

材　　料	最高使用温度 (℃)	許容応力 (MPa)			
		Ｓｍ	Ｓｙ	Ｓｕ	Ｓｈ
SUS316LTP	302	94	104	－	－
SUS316TP	302	118	130	－	－
SUSF316	302	118	130	－	－
SUS304TP	302	114	126	－	－
[redacted]	302	114	126	－	－
STPT49	302	138	209	423	－
STS49	302	138	209	－	－
STPA23	302	－	163	400	－
ASTM A182F.11	302	－	163	400	－

3.4　設計用地震力

本計算書において考慮する設計用地震力の算出に用いる設計用床応答スペクトルを下表に示す。

なお，設計用床応答スペクトルは「Ⅴ-2-1-7　設計用床応答曲線の作成方針」に基づき策定したものを用いる。また，減衰定数は「Ⅴ-2-1-6　地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

鳥瞰図	建物・構築物	標高	減衰定数(%)
CU-PD-9	ペデスタル		
CU-06	原子炉建屋		

4. 解析結果及び評価

4.1 固有周期及び設計震度

鳥 瞰 図 CU-PD-9

耐震クラス		S					
適用する地震動等		Sd及び静的震度			Ss		
モード	固有周期 (s)	応答水平震度		応答鉛直震度	応答水平震度		応答鉛直震度
		X方向	Z方向	Y方向	X方向	Z方向	Y方向
1 次							
2 次							
3 次							
4 次							
5 次							
6 次							
7 次							
8 次							
23 次							
24 次							
動 的 震 度							
静 的 震 度							

各モードに対応する刺激係数

鳥　瞰　図　CU-PD-9

モード	固　有　周　期 (s)	刺　激　係　数		
		X方向	Y方向	Z方向
1 次				
2 次				
3 次				
4 次				
5 次				
6 次				
7 次				
8 次				
23 次				

代表的振動モード図

振動モード図は，３次モードまでを代表とし，各質点の変位の相対量・方向を破線で図示し，次ページ以降に示す。

解析結果及び評価

固有周期及び設計震度

鳥　瞰　図　CU-06

耐震クラス		S					
適用する地震動等		Ｓｄ及び静的震度			Ｓｓ		
モード	固有周期 (s)	応答水平震度		応答鉛直震度	応答水平震度		応答鉛直震度
		Ｘ方向	Ｚ方向	Ｙ方向	Ｘ方向	Ｚ方向	Ｙ方向
1 次							
2 次							
3 次							
4 次							
5 次							
6 次							
7 次							
8 次							
14 次							
15 次							
動 的 震 度							
静 的 震 度							

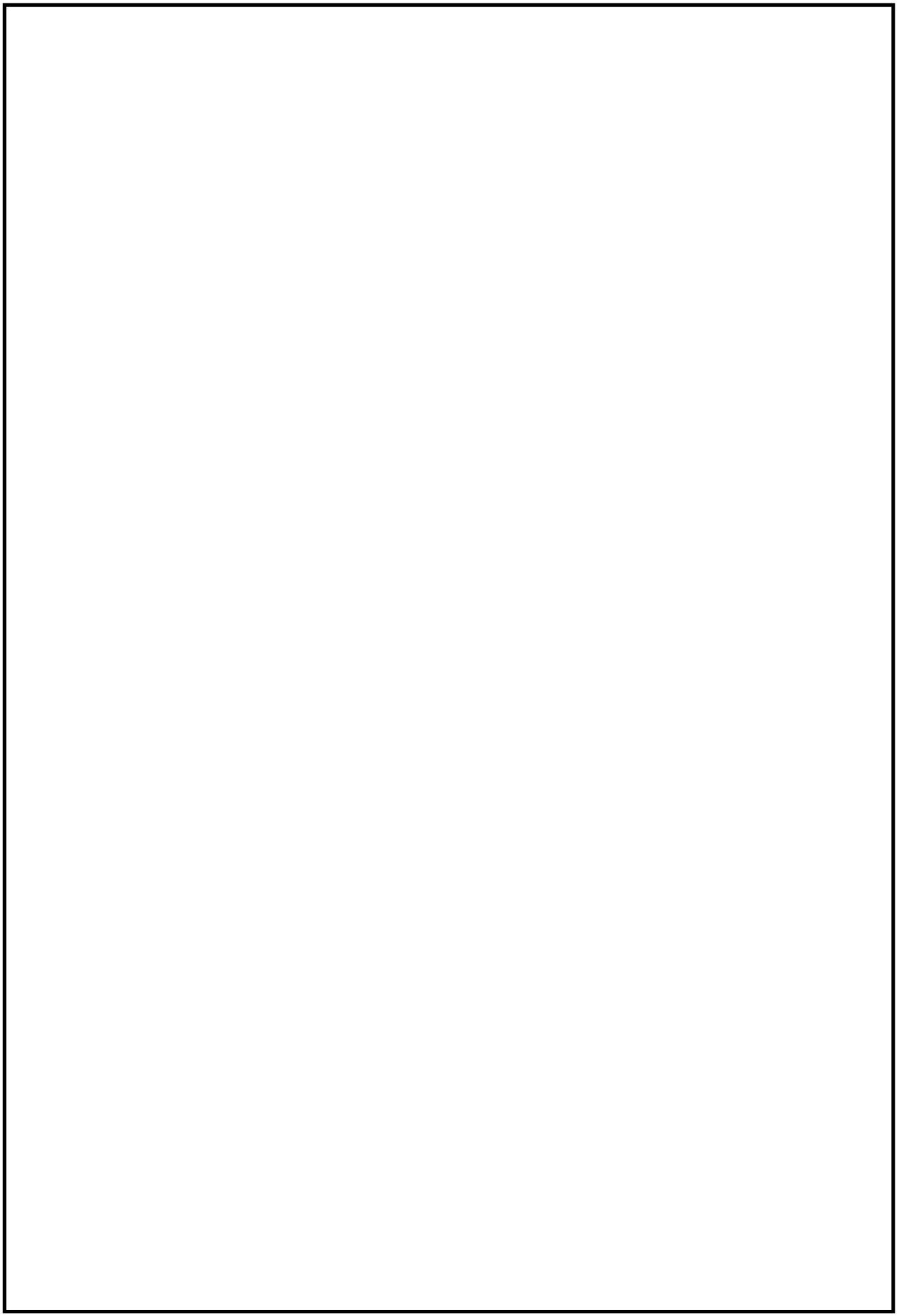
各モードに対応する刺激係数

鳥　瞰　図　CU-06

モード	固　有　周　期 (s)	刺　激　係　数		
		X方向	Y方向	Z方向
1 次				
2 次				
3 次				
4 次				
5 次				
6 次				
7 次				
8 次				
14 次				

代表的振動モード図

振動モード図は，３次モードまでを代表とし，各質点の変位の相対量・方向を破線で図示し，次ページ以降に示す。



4.2　評価結果

4.2.1　管の応力評価結果

下表に示すごとく最大応力及び疲労累積係数はそれぞれの許容値以下である。

クラス１管

鳥瞰図	許容応力状態（供用状態）	最大応力評価点	配管要素名称	最大応力区分	一次応力評価 (MPa)				一次＋二次応力評価 (MPa)		疲労評価
					一次応力 Sprm(Sd) Sprm(Ss)	許容応力 min(2.25Sm,1.8Sy) min(3Sm,2Sy)	ねじり応力 St(Sd) St(Ss)	許容応力 0.55Sm 0.73Sm	一次＋二次応力 Sn(Ss)	許容応力 3Sm	疲労累積係数 U+USs
CU-PD-9	III_AS	67	TEE	Sprm(Sd)	158	234	—	—	—	—	—
CU-PD-9	III_AS	75	ELBOW	St(Sd)	—	—	＊101	64	—	—	—
CU-PD-9	IV_AS	67	TEE	Sprm(Ss)	215	260	—	—	—	—	—
CU-PD-9	IV_AS	75	ELBOW	St(Ss)	—	—	＊142	86	—	—	—
CU-PD-9	IV_AS	83	TEE	Sn(Ss)	—	—	—	—	1013	354	0.5155
CU-PD-9	IV_AS	82	REDUCER	U+USs	—	—	—	—	—	—	0.5457

＊印はねじりによる応力が許容応力状態III_ASのとき0.55Sm，又は許容応力状態IV_ASのとき0.73Smを超える評価点を示し，次紙に曲げとねじりによる応力評価結果を示す。

下表に示すごとくねじりによる応力が許容応力状態III_AＳのとき0.55Ｓｍ，又は許容応力状態IV_AＳのとき0.73Ｓｍを超える評価点のうち曲げとねじりによる応力は許容値を満足している。

鳥瞰図	評価点	一次応力評価 (MPa)			
		ねじり応力 Ｓｔ(Ｓｄ) Ｓｔ(Ｓｓ)	許容応力 0.55Ｓｍ 0.73Ｓｍ	曲げとねじり応力 Ｓｔ＋Ｓｂ(Ｓｄ) Ｓｔ＋Ｓｂ(Ｓｓ)	許容応力 1.8Ｓｍ 2.4Ｓｍ
CU-PD-9	75	101	64	114	212
CU-PD-9	75	142	86	162	283

管の応力評価結果

下表に示すごとく最大応力及び疲労累積係数はそれぞれの許容値以下である。

クラス２以下の管

鳥瞰図	許容応力状態 (供用状態)	最大応力評価点	最大応力区分	一次応力評価 (MPa)		一次＋二次応力評価 (MPa)		疲労評価
				計算応力 Sprm（Sd) Sprm（Ss)	許容応力 Sy* 0.9Su	計算応力 Sn（Ss)	許容応力 2Sy	疲労累積係数 USs
CU-06	ⅢAS	80	Sprm（Sd)	65	209	—	—	—
CU-06	ⅣAS	80	Sprm（Ss)	78	380	—	—	—
CU-06	ⅣAS	93	Sn（Ss)	—	—	70	418	—

注記＊： オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については，Syと1.2Shのうち大きい方とする。

4.2.2　支持構造物評価結果

下表に示すごとく計算応力及び計算荷重はそれぞれの許容値以下である。

支持構造物評価結果（荷重評価）

支持構造物番号	種類	型式	材質	温度(℃)	評価結果	
					計算荷重(kN)	許容荷重(kN)
SNO-CU-59	オイルスナッバ	HSP-5	「Ⅴ-2-1-11機器・配管の耐震支持設計方針」参照		61.7	75.0
SH-CU-66	スプリングハンガ	VSA-L4			5.2	7.3
CH-CU-68	コンスタントハンガ	CSH-33			24.4	24.7

支持構造物評価結果（応力評価）

支持構造物番号	種類	型式	材質	温度(℃)	支持点荷重						評価結果		
					反力（kN）			モーメント（kN・m）			応力分類	計算応力(MPa)	許容応力(MPa)
					F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z			
AN-CU-61	アンカ	ラグ	SGV49 SS41	302	39.7	15.0	34.0	9.1	11.1	12.4	組合せ	17	136
RE-CU-46A	レストレイント	パイプバンド	SM400B	302	0	23.3	0	－	－	－	圧縮	67	115

4.2.3　弁の動的機能維持評価結果

下表に示すごとく応答加速度が機能確認済加速度以下又は計算応力が許容応力以下である。

弁番号	形式	要求機能	応答加速度＊ (×9.8 m/s^2)		機能確認済加速度 (×9.8 m/s^2)		構造強度評価結果 (MPa)	
			水平	鉛直	水平	鉛直	計算応力	許容応力
G33-F001	止め弁	α(Ss)	4.9	2.0	6.0	6.0	—	—

＊ 応答加速度は，打ち切り振動数を50Hzとして計算した結果を示す。

本資料のうち，枠組みの内容は，
営業秘密また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-604　改0
提出年月日	平成30年6月29日

Ⅴ-2-9-5-4-2　管の耐震性についての計算書

目　　次

1.　概要 ····· 1
2.　概略系統図及び鳥瞰図 ····· 2
2.1　概略系統図 ····· 2
2.2　鳥瞰図 ····· 5
3.　計算条件 ····· 6
3.1　荷重の組合せ及び許容応力 ····· 6
3.2　設計条件 ····· 7
3.3　材料及び許容応力 ····· 8
3.4　設計用地震力 ····· 9
4.　解析結果及び評価 ····· 10
4.1　固有周期及び設計震度 ····· 10
4.2　評価結果 ····· 11
4.2.1　管の応力評価結果 ····· 11
4.2.2　支持構造物評価結果 ····· 12
4.2.3　弁の動的機能維持評価結果 ····· 13

1. 概要

本計算書は，「Ⅴ-2-1-14-6　管の応力計算書及び耐震性についての計算書作成の基本方針」及び「Ⅴ-2-1-11　機器・配管の耐震支持設計方針」に基づき，管，支持構造物及び弁の耐震性についての計算を実施した結果を示したものである。

評価結果記載方法は以下に示す通りとする。

(1)　管

工事計画記載範囲の管のうち，各応力区分における最大応力評価点の評価結果を解析モデル単位に記載する。また，各応力区分における最大応力評価点の許容値／発生値（裕度）が最小となる解析モデルを代表として記載する。

(2)　支持構造物

工事計画記載範囲の支持点のうち，種類及び型式ごとの反力が最大となる支持点の評価結果を代表として記載する。

(3)　弁

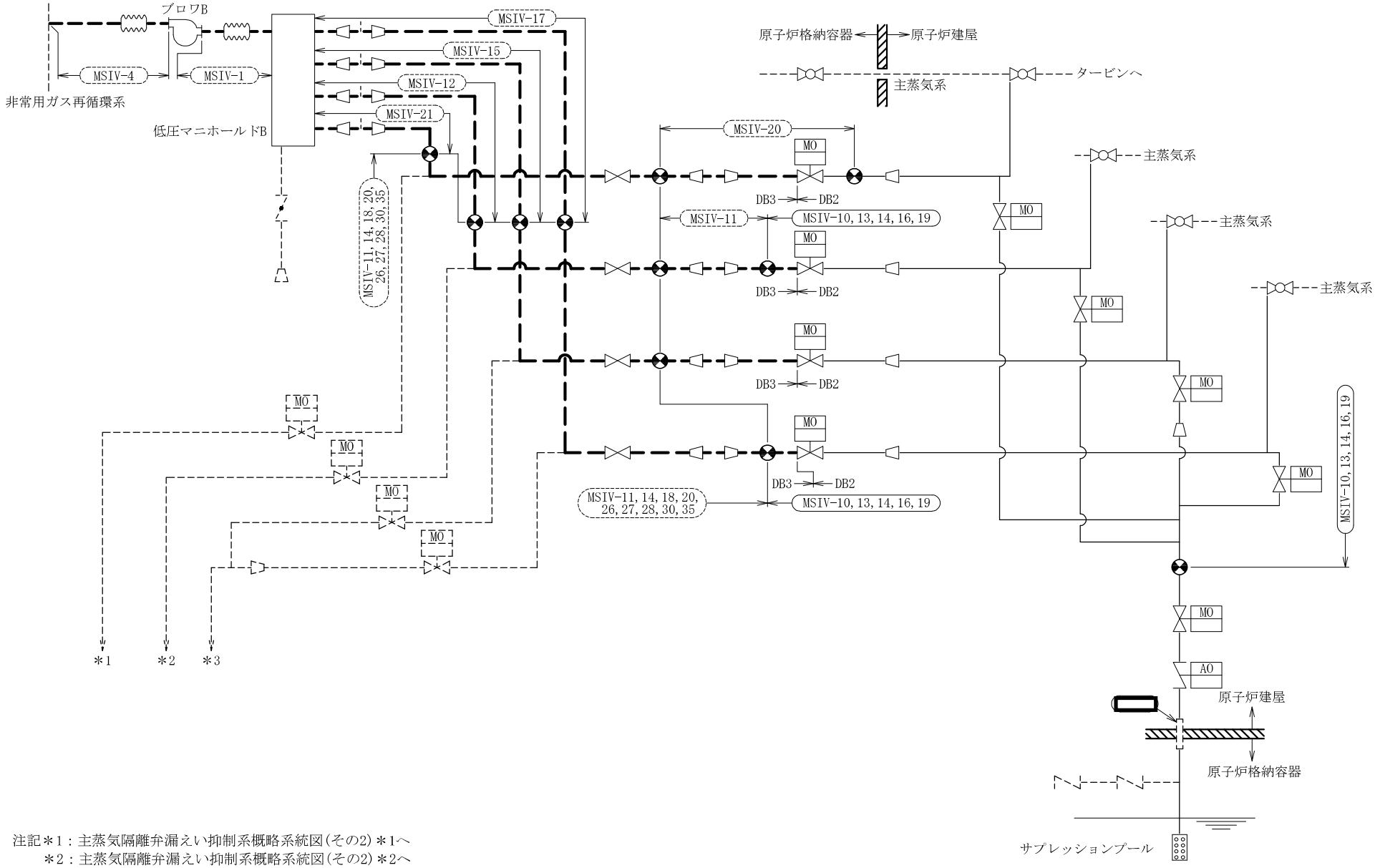
機能確認済加速度の応答加速度に対する裕度が最小となる動的機能維持要求弁を代表として評価結果を記載する。

2.　概略系統図及び鳥瞰図

2.1　概略系統図

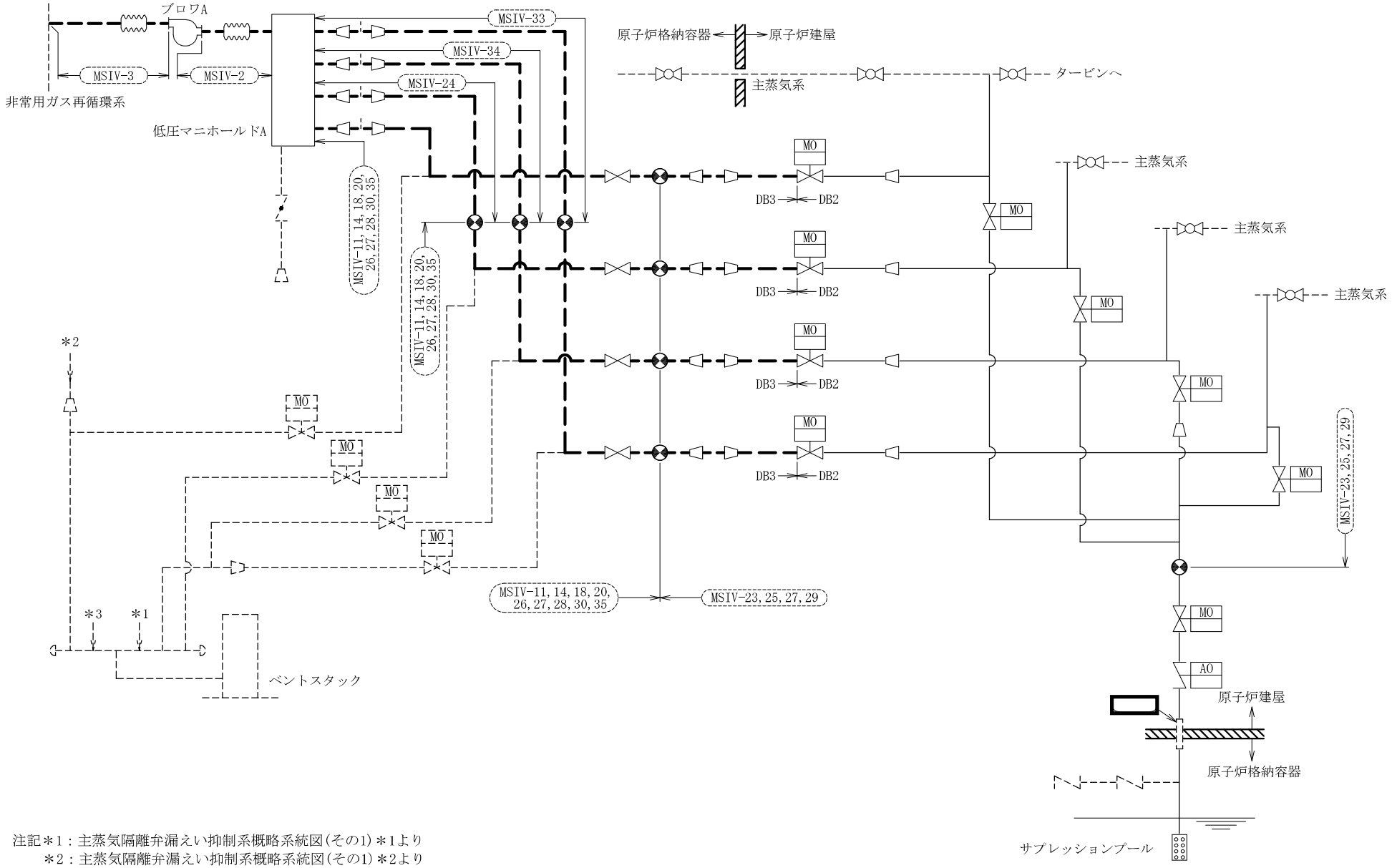
概略系統図記号凡例

記　　号	内　　容
━━━━━（太線）	工事計画記載範囲の管のうち，本計算書記載範囲の管（重大事故等対処設備）
━ ━ ━（太破線）	工事計画記載範囲の管のうち，本計算書記載範囲の管（設計基準対象施設）
―――――（細線）	工事計画記載範囲の管のうち，本系統の管であって他計算書記載範囲の管
- - - - - - - - -（破線）	工事計画記載範囲外の管又は工事計画記載範囲の管のうち，他系統の管であって系統の概略を示すために表記する管
○○-○-○○	鳥瞰図番号（評価結果を記載する範囲）
○○-○-○○	鳥瞰図番号（評価結果の記載を省略する範囲）
⊗	アンカ
［管クラス］	
DB1	クラス１管
DB2	クラス２管
DB3	クラス３管
DB4	クラス４管
SA2	重大事故等クラス２管
SA3	重大事故等クラス３管
DB1/SA2	重大事故等クラス２管であってクラス１管
DB2/SA2	重大事故等クラス２管であってクラス２管
DB3/SA2	重大事故等クラス２管であってクラス３管
DB4/SA2	重大事故等クラス２管であってクラス４管



注記＊1：主蒸気隔離弁漏えい抑制系概略系統図(その2)＊1へ
＊2：主蒸気隔離弁漏えい抑制系概略系統図(その2)＊2へ
＊3：主蒸気隔離弁漏えい抑制系概略系統図(その2)＊3へ

主蒸気隔離弁漏えい抑制系概略系統図(その1)



注記＊1：主蒸気隔離弁漏えい抑制系概略系統図(その1)＊1より
＊2：主蒸気隔離弁漏えい抑制系概略系統図(その1)＊2より
＊3：主蒸気隔離弁漏えい抑制系概略系統図(その1)＊3より

主蒸気隔離弁漏えい抑制系概略系統図(その2)

2.2　鳥瞰図

「Ⅴ-2-5-3-3-1　管の耐震性についての計算書」に含まれる。

3. 計算条件

3.1 荷重の組合せ及び許容応力

本計算書において考慮する荷重の組合せ及び許容応力を下表に示す。

施設名称	設備名称	系統名称	施設分類*1	設備分類*2	機器等の区分	耐震クラス	荷重の組合せ*3,4	許容応力状態
原子炉格納施設	圧力低減設備その他の安全設備	主蒸気隔離弁漏えい抑制系	ＤＢ	―	クラス３管	Ｓ	$\mathrm{I}_{L}+\mathrm{S}_{d}$	$\mathrm{III}_{A}\mathrm{S}$
							$\mathrm{II}_{L}+\mathrm{S}_{d}$	
							$\mathrm{I}_{L}+\mathrm{S}_{s}$	$\mathrm{IV}_{A}\mathrm{S}$
							$\mathrm{II}_{L}+\mathrm{S}_{s}$	

注記＊1： ＤＢは設計基準対象施設，ＳＡは重大事故等対処設備を示す。

＊2： 「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

＊3： 運転状態の添字Lは荷重が作用している状態を示す。

＊4： 許容応力状態ごとに最も厳しい条件又は包絡条件を用いて評価を実施する。

3.2　設計条件

鳥瞰図番号ごとに設計条件に対応した管番号で区分し，管番号と対応する評価点番号を示す。

鳥　瞰　図　MSIV-10,13,14,16,19

「Ⅴ-2-5-3-3-1　管の耐震性についての計算書」に含まれる。

3.3　材料及び許容応力

「Ⅴ-2-5-3-3-1　管の耐震性についての計算書」に含まれる。

3.4　設計用地震力

「Ⅴ-2-5-3-3-1　管の耐震性についての計算書」に含まれる。

4. 解析結果及び評価

4.1 固有周期及び設計震度

「Ⅴ-2-5-3-3-1 管の耐震性についての計算書」に含まれる。

4.2　評価結果

4.2.1　管の応力評価結果

「Ⅴ-2-5-3-3-1　管の耐震性についての計算書」に含まれる。

4.2.2　支持構造物評価結果

下表に示すごとく計算応力及び計算荷重はそれぞれの許容値以下である。

支持構造物評価結果（荷重評価）

支持構造物番号	種類	型式	材質	温度(℃)	評価結果	
					計算荷重(kN)	許容荷重(kN)
SNO-MSIV-R008	オイルスナッバ	SN-03	「V-2-1-11機器・配管の耐震支持設計方針」参照		0.7	4.5

支持構造物評価結果（応力評価）

支持構造物番号	種類	型式	材質	温度(℃)	支持点荷重						評価結果		
					反力（kN）			モーメント（kN・m）			応力分類	計算応力(MPa)	許容応力(MPa)
					F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z			
AN-MSIV-65	アンカ	ラグ	SM41A	302	3.1	0.6	0.6	0.1	0.2	0.1	組合せ	110	115
RE-MSIV-R069	レストレイント	Uプレート	SM400B	302	0.8	3.9	0	－	－	―	組合せ	37	201

4.2.3　弁の動的機能維持評価結果

下表に示すごとく応答加速度が機能確認済加速度以下又は計算応力が許容応力以下である。

弁番号	形式	要求機能	応答加速度 (×9.8 m/s^2)		機能確認済加速度 (×9.8 m/s^2)		構造強度評価結果 (MPa)	
			水平	鉛直	水平	鉛直	計算応力	許容応力
－	－	－	－	－	－	－	－	－