

第6章 目次

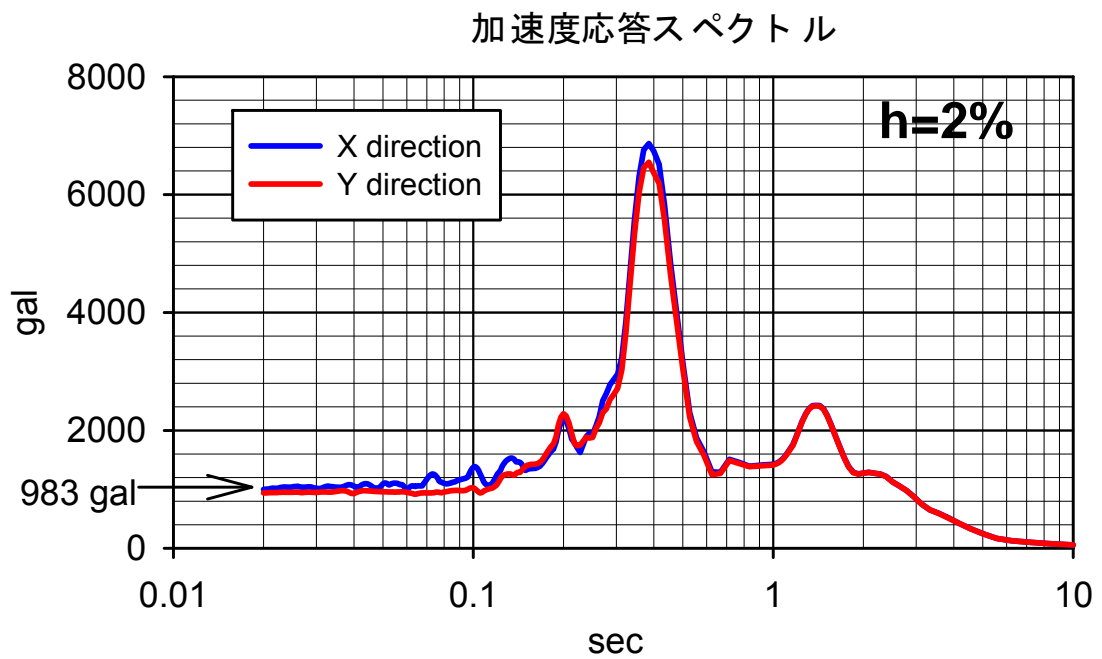
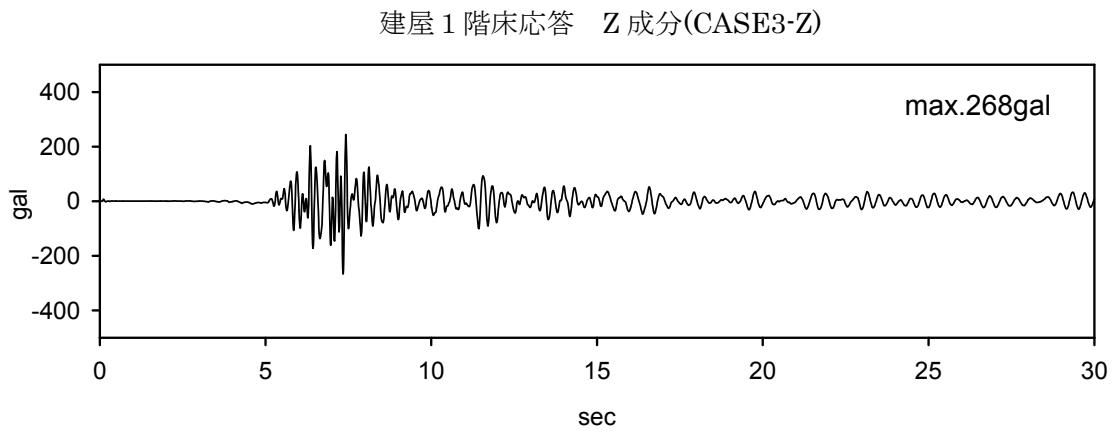
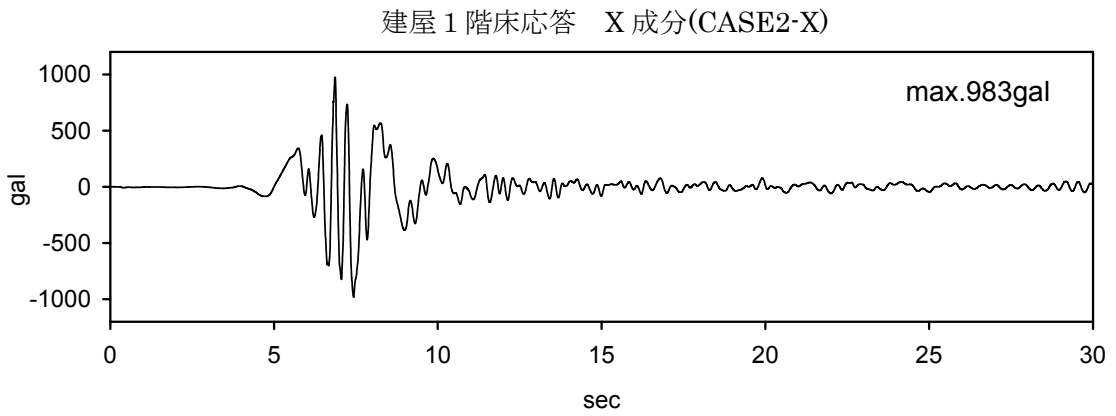
6. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価	6-1
6.1 評価方針	6-1
6.2 機器・配管のモデル化と評価方法	6-3
6.2.1 制御棒駆動装置案内管	6-3
6.2.2 制御棒取付金具	6-6
6.2.3 燃料要素	6-8
6.2.4 炉心直下一次冷却系配管	6-10
6.2.5 炉心支持構造物	6-15
6.3 評価基準	6-17
6.4 評価結果	6-18

6. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

6.1 評価方針

「耐震安全性評価実施計画書」に記載された安全上重要な機器・配管系（耐震 S クラス相当として選定）の耐震安全性評価は、第 5 章で評価した入力地震動に対する原子炉建屋 1 階床レベルの加速度応答（第 6.1-1 図）に基づき、対象とする設備・機器の安全機能の保持の観点から実施する。なお、炉心直下一次冷却水系配管は建屋地階に位置するが、配管の片側端部が建屋 1 階床と一体化した生体遮へい体に剛接合されているので入力地震動としては建屋地階床応答より大きな応答となる建屋 1 階床での加速度応答波形を用いる。

評価対象とする設備・機器として、炉心本体を構成する「炉心支持構造物・燃料要素」に加え、原子炉を「止める」機能に相当する「制御棒取付金具・制御棒駆動装置案内管」および「冷やす」機能に相当する「一次冷却系配管(炉心直下部)」を選定している。なお、「炉心タンク」は「生体遮へい体」と一体化しており、また「使用済燃料貯蔵ラック」も「使用済燃料プール室プール」と一体化しているため、両設備機器の耐震安全性評価は既に 5 章で評価している「生体遮へい体」および「使用済燃料プール室プール」に準ずるものとする。次に、炉心支持構造物、一次冷却系配管は溶接等により接合されているが、接合部位は母材より十分な強度を保持しているため、評価は母材に対して行う。



第 6.1-1 図 建屋 1 階床応答波形と水平動加速度応答スペクトル

6.2 機器・配管のモデル化と評価方法

6.2.1 制御棒駆動装置案内管

制御棒駆動装置はアルミニウム合金製の案内管により保護されており、スペーサーにより案内管内側周面で固定されている。従って、地震時における制御棒駆動装置の耐震安全性は案内管により確保されていると考え、以下に案内管の耐震安全性について検討を行う。

案内管の水平地震力に対しては、連続体を質点系モデル（21 質点）に置き換えた解析（解析 1）と連続体（フレーム）モデルによる解析（解析 2）によって検討する。鉛直動に対しては剛体として取り扱う。質点系モデルと連続体モデルにおける水平方向（案内管の軸直行方向）の 1 次固有周期（0.311 秒）は一致している。解析 1 における地震荷重は原子炉建屋 1 階床応答の加速度応答スペクトル（2%減衰）から案内管の 1 次固有周期に対する応答加速度値に基づいて求めた水平震度と鉛直震度に、制御棒駆動装置を含む案内管重量を乗じることにより評価する。解析 2 における地震荷重は 3 次モードまで考慮した分布質量系による地震応答解析に基づいて評価する。

最大垂直応力度は曲げモーメントと軸力による垂直応力度の単純和とし、耐震評価は、この値が案内管の評価基準値（短期許容垂直応力度）以下となることを確認する。さらに、せん断力によって生じる最大せん断応力度が案内管の評価基準値（短期許容せん断応力度）以下となることを確認する。第 6.2.1-1 図に制御棒駆動装置と案内管及び解析 1 の多質点系モデルを、第 6.2.1-2 図に解析 2 の連続体モデルをそれぞれ示す。

各応力度の計算は以下となる。

断面諸量：

材質：アルミニウム合金A5052P-O
ヤング率： $E=6.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
断面積： $A=631 \text{ mm}^2$
断面2次モーメント： $I=355,000 \text{ mm}^4$
断面係数： $Z=10,140 \text{ mm}^3$

質点系モデル：

- ・水平応答加速度(2%減衰)=3,040gal
→水平震度 $C_H=3.5$
- ・鉛直震度 $C_v=0.4$ (炉体と同値)

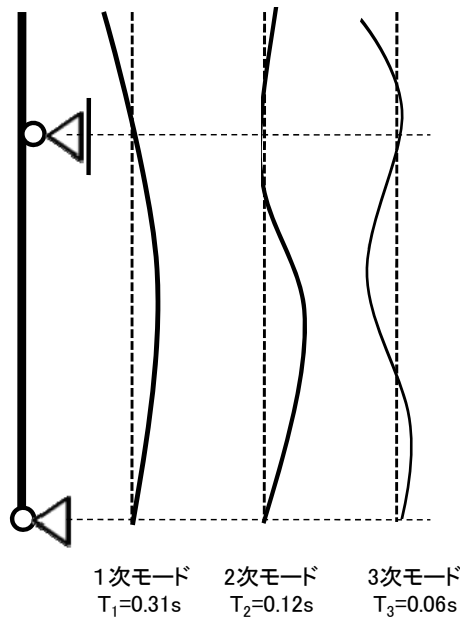
最大垂直応力度：

$$\sigma_{\max} = (1.0+0.4)(W_1+W_2)/A + M_{\max}/Z$$
$$= 44.0 \text{ N/mm}^2$$

最大せん断応力度：

$$\tau_{\max} = 2Q_{\max}/A$$
$$= 1.8 \text{ N/mm}^2$$

連続体モデル：

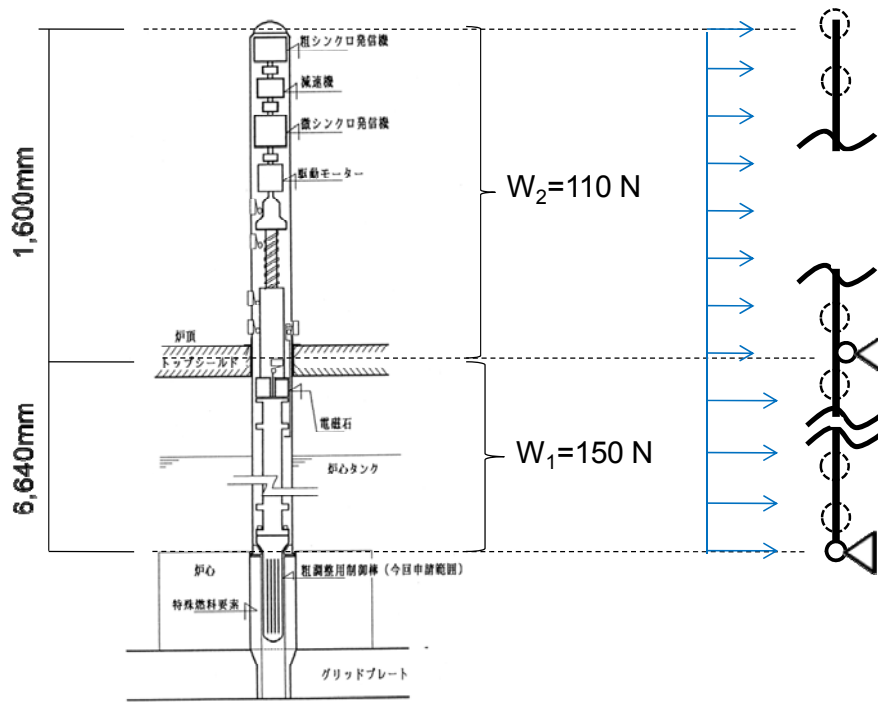


最大垂直応力度：

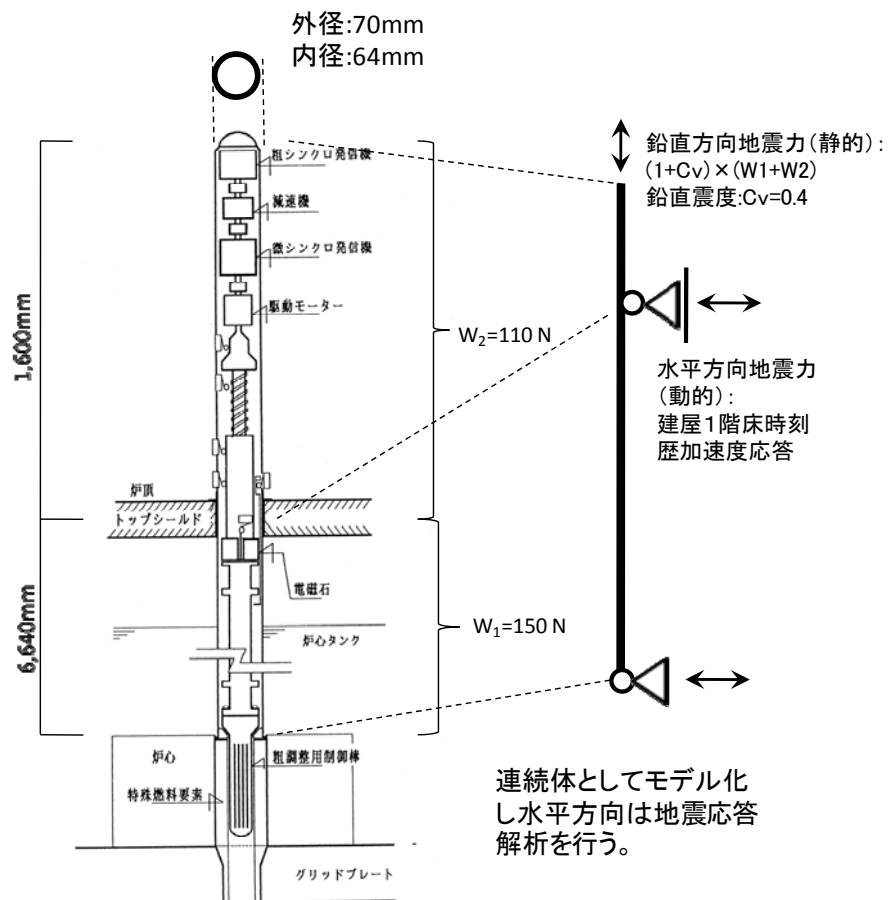
$$\sigma_{\max} = (1.0+0.4)(W_1+W_2)/A + M_{\max}/Z$$
$$= 19.2 \text{ N/mm}^2$$

最大せん断応力度：

$$\tau_{\max} = 2Q_{\max}/A$$
$$= 0.30 \text{ N/mm}^2$$



第 6.2.1-1 図 制御棒駆動装置と案内管及び多質点系モデル



第 6.2.1-2 図 制御棒駆動装置と案内管及び連続体モデル

6.2.2 制御棒取付金具

粗調整用制御棒及び微調整用制御棒は、「京都大学研究用原子炉(KUR)の変更に係る設計及び工事の方法の承認申請書」(平成7年2月13日)に基づき、片持ち梁としてモデル化する。等価な一質点系モデルより求めた固有周期は、粗調整用制御棒については0.012秒、微調整用制御棒については0.015秒となったので、両者とも剛体としてモデル化する。従って、制御棒の地震荷重は、原子炉建屋1階の床応答最大加速度の値から求めた水平及び鉛直震度に制御棒の重量を乗じることにより評価する。

最大垂直応力度は曲げモーメントと軸力による垂直応力度の単純和とし、耐震評価は、この値が取り付けボルト及び取り付け金具の評価基準値(短期許容垂直応力度)以下となることを確認する。さらに、せん断力によって生じる最大せん断応力度が同金具の評価基準値(短期許容せん断応力度)以下となることを確認する。第6.2.2-1図に粗調整用制御棒と計算モデル(片持ばり)、第6.2.2-2図に微調整用制御棒と計算モデル(片持ばり)を示す。応力度の計算は以下となる。

粗調整用制御棒：

材質：M12ボルトステンレス鋼SUS304
有効断面積： $A=84\text{mm}^2$
断面2次モーメント： $I=562\text{mm}^4$
断面係数： $Z=109\text{mm}^3$

最大垂直応力度：

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= (1.0+0.4)W/A + M_{\max}/Z \\ &= 180 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

最大せん断応力度：

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= 1.34Q_{\max}/A \\ &= 0.79 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

微調整制御棒：

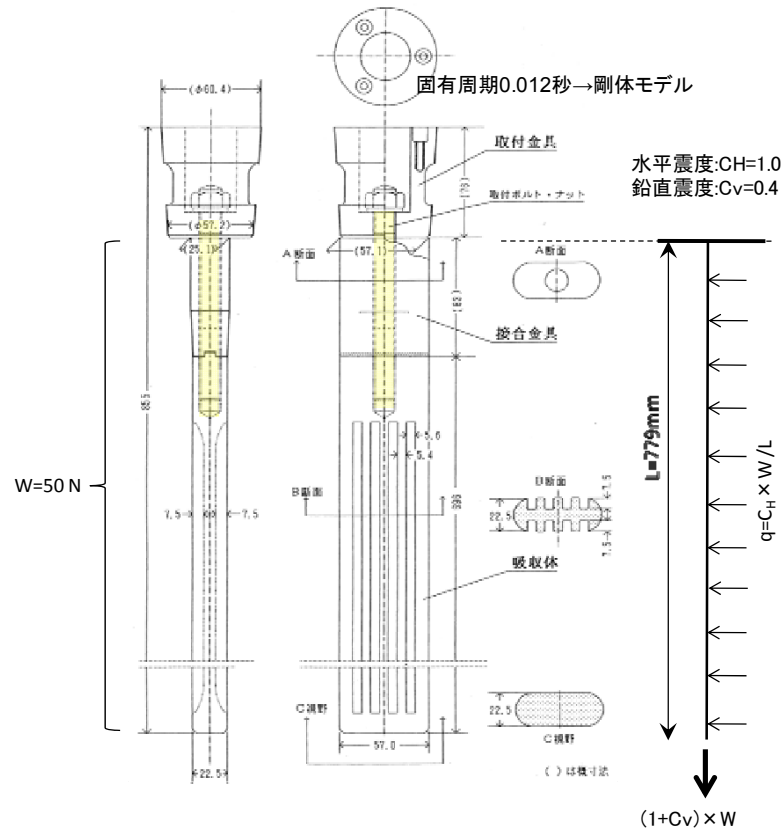
材質：アルミニウム合金A5052
断面積： $A=424\text{mm}^2$
断面2次モーメント： $I=39952\text{mm}^4$
断面係数： $Z=2497\text{mm}^3$

最大垂直応力度：

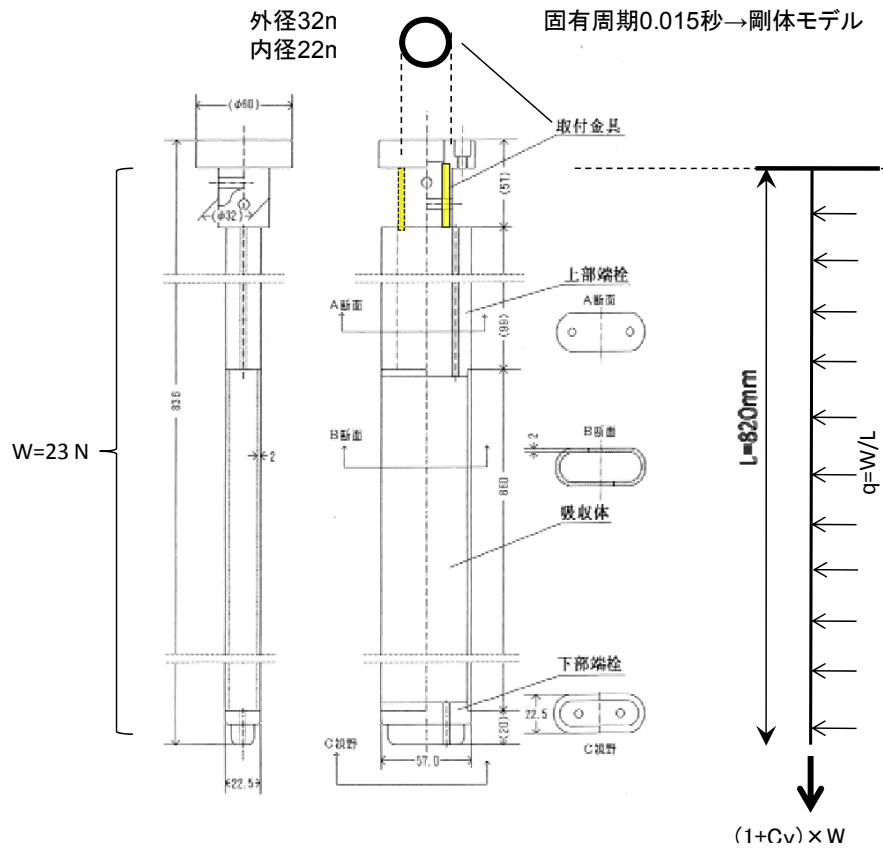
$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= (1.0+0.4)W/A + M_{\max}/Z \\ &= 3.9 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

最大せん断応力度：

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= 2.0Q_{\max}/A \\ &= 0.11 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$



第 6.2.2-1 図 粗調整用制御棒と片持ばりモデル



第 6.2.2-2 図 微調整用制御棒と片持ばりモデル

6.2.3 燃料要素

燃料要素は「京都大学研究用原子炉(KUR)の変更に係る設計及び工事の方法の承認申請書」(平成7年2月13日)に基づき、ノズル部分が固定された片持ち梁としてモデル化する。等価な一質点系モデルより求めた固有周期は0.012秒となり、剛体としてモデル化する。従って、燃料要素の地震荷重は、原子炉建屋1階の床応答最大加速度の値から求めた水平及び鉛直震度に燃料要素の重量を乗じることにより評価する。

最大垂直応力度は曲げモーメントと軸力による垂直応力度の単純和とし、耐震評価は、この値がノズル部分に挿入した燃料要素の側板の評価基準値(短期許容垂直応力度)以下となることを確認する。さらに、せん断力によって生じる最大せん断応力度が側板の評価基準値(短期許容せん断応力度)以下となることを確認する。第6.2.3-1図に燃料要素と計算モデル(片持ばり)を示す。各応力度の計算は以下となる。

材質:アルミニウム合金 (AG3NE)

ヤング率: $E=6.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

燃料要素重量: $W=58.8 \text{ N}$

断面積: $A=376.8 \text{ mm}^2$

断面2次モーメント:

$I_x=941,782 \text{ mm}^4$

$I_y=393,824 \text{ mm}^4$

$$F_v = W \cdot (1 + C_v) = 82.4 \text{ N}$$

$$F_H = W \cdot C_H = 58.8 \text{ N}$$

$$M_x = M_y = F_H \cdot (720.8/2) = 21,192 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

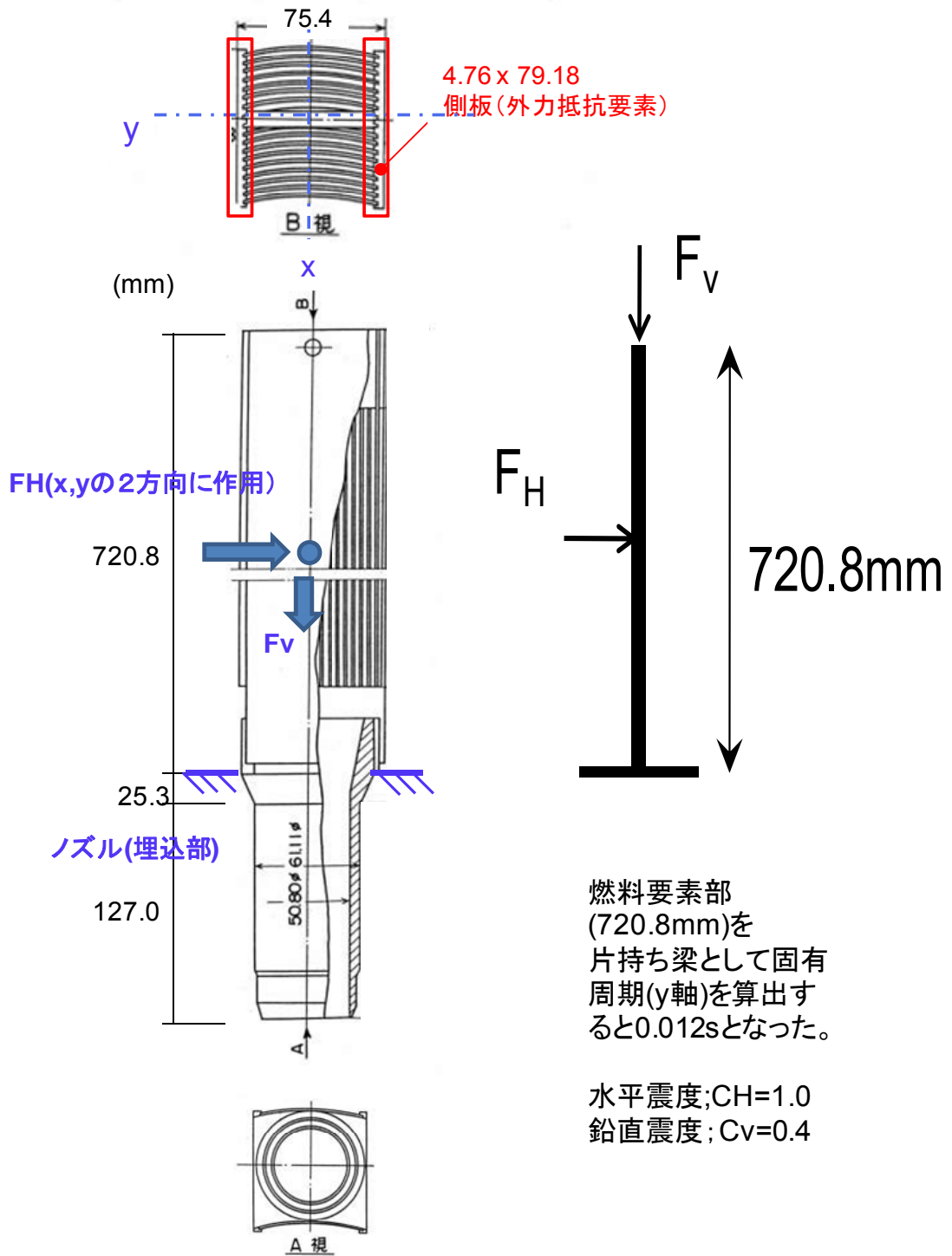
$$Q_x = Q_y = F_H = 58.8 \text{ N}$$

最大垂直応力度:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= F_v/2A + M_x/I_x \cdot (75.4/2) + M_y/I_y \cdot (79.18/2) \\ &= 0.11 + 0.85 + 2.14 \\ &= 3.10 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

最大せん断応力度:

$$\tau_{\max} = 1.5 Q/2A = 0.12 \text{ N/mm}^2$$



第 6.2.3-1 図 燃料要素と片持ばりモデル

6.2.4 炉心直下一次冷却水系配管

一次系冷却水配管（入口及び出口配管）は、炉心直下においてL字型に曲がっており、炉心底部と建屋地下1階床面（第1サポートと第2サポート）でそれぞれ支持されている。L字型の配管（炉心直下から第2サポートまで）の1次固有周期は、入口配管側が0.033秒、出口配管側が0.018秒となる。ここでは、炉心直下から第1サポートまでを直線上の単純ばりにモデル化した解析1と、炉心直下から第2サポートまでをL字型の形状を持つフレームにモデル化した解析2の二つのケースについて評価を行う。解析1の地震荷重は原子炉建屋1階の床応答最大加速度の値から求めた水平及び鉛直震度に配管の重量を乗じることにより評価する。解析2については原子炉建屋1階の床応答加速度波形(第6.1-1図の水平動がフレームモデルの水平2方向に作用する)による3方向の地震応答解析を個別に実施したときの地震荷重の単純和により評価する。

最大垂直応力度は曲げモーメントと軸力、それぞれによって生じる垂直応力度の単純和とし、この値が配管の評価基準値（短期許容垂直応力度）以下となっているかを確認する。さらに、最大せん断応力度が配管の評価基準値（短期許容せん断応力度）以下となっているかを確認する。第6.2.4-1図に解析1のモデル、第6.2.4-2図に解析2の入口側配管のモデル、第6.2.4-3図に解析2の出口側配管のモデルを示す。応力度の計算は以下となる。

断面諸量：

入口配管

材質:アルミニウム合金A5052
ヤング率: $E=6.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
断面積: $A=7,540 \text{ mm}^2$
断面2次モーメント: $I=1.1 \times 10^8 \text{ mm}^4$
断面係数: $Z=634,000 \text{ mm}^3$
断面極2次モーメント: $I_p=5.5 \times 10^7 \text{ mm}^4$
 $I_p/r(\text{外半径})=317 \text{ mm}^3$

出口配管

材質:アルミニウム合金A5052
ヤング率: $E=6.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
断面積: $A=7,540 \text{ mm}^2$
断面2次モーメント: $I=1.1 \times 10^8 \text{ mm}^4$
断面係数: $Z=634,000 \text{ mm}^3$
断面極2次モーメント: $I_p=5.5 \times 10^7 \text{ mm}^4$
 $I_p/r(\text{外半径})=317 \text{ mm}^3$

単純ばりモデル：

最大垂直応力度:

$\sigma_{\max} = Pv/A + M_{\max}/Z = 5.7 \text{ N/mm}^2$ (入口配管)
6.4 N/mm² (出口配管)

最大せん断応力度:

$\tau_{\max} = 2.0 \times P_H/A = 0.6 \text{ N/mm}^2$ (入口配管)
1.4 N/mm² (出口配管)

フレームモデル：

入口配管	加振方向	Qx(kN)	Qz(kN)	Ny(kN)	Mz (kN.mm)	Mx (kN.mm)	My (kN.mm)
	x	1.65	0	0.009	922	0	0
	z	0	1.44	0	0	513	49
	y	0.38	0	5.93	255	0	0
	計	2.03	1.44	5.94	1177	513	49
	断面諸量	τ_x (N/mm ²)	τ_z (N/mm ²)	σ_n (N/mm ²)	σ_{bz} (N/mm ²)	σ_{bx} (N/mm ²)	τ_t (N/mm ²)
	C(形状係数)	2	2				
	A(mm ²)	7540	7540	7540			
	Z(mm ³)				634000	634000	
	K(mm ³)						317000
応力度	0.54	0.38	0.79	1.86	0.81	0.15	

注)太字は自重を加算した値

出口配管	加振方向	Qx(kN)	Qz(kN)	Ny(kN)	Mz (kN.mm)	Mx (kN.mm)	My (kN.mm)
	x	2.02	0	0.03	958	0	0
	z	0	2.12	0	0	1109	76
	y	0.21	0	7.04	119	0	0
	計	2.23	2.12	7.07	1077	1109	76
	断面諸量	τ_x (N/mm ²)	τ_z (N/mm ²)	σ_n (N/mm ²)	σ_{bz} (N/mm ²)	σ_{bx} (N/mm ²)	τ_t (N/mm ²)
	C(形状係数)	2	2				
	A(mm ²)	7540	7540	7540			
	Z(mm ³)				634000	634000	
	K(mm ³)						317000
応力度	0.59	0.56	0.94	1.70	1.75	0.24	

注)太字は自重を加算した値

入口配管

最大垂直応力度:

$$\sigma_{\max} = 0.79 + 1.86 = 2.65 \text{ N/mm}^2$$

最大せん断応力度:

$$\tau_{\max} = 0.54 + 0.15 = 0.69 \text{ N/mm}^2$$

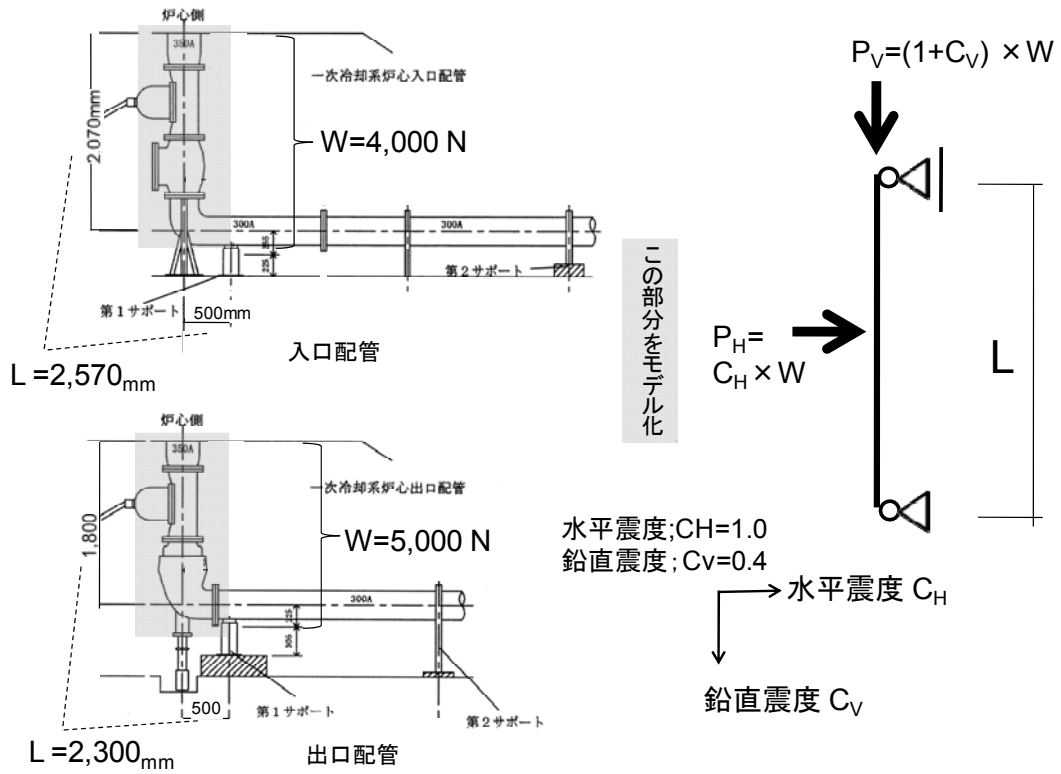
出口配管

最大垂直応力度:

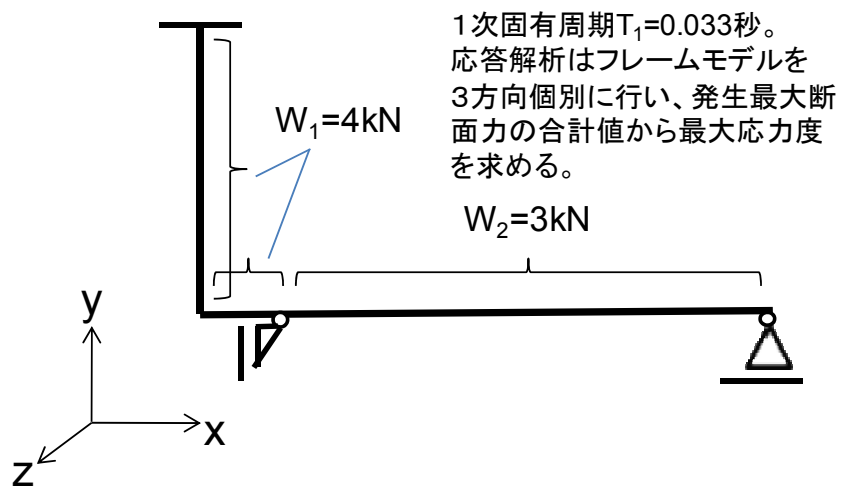
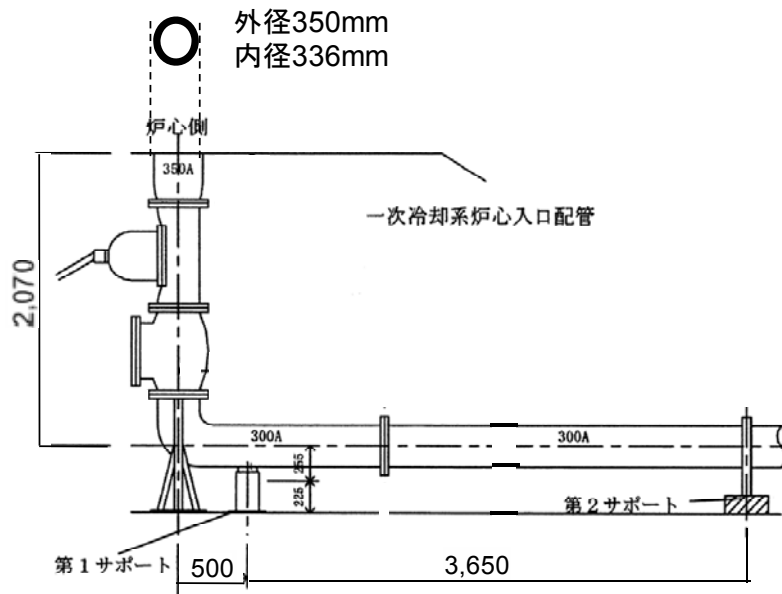
$$\sigma_{\max} = 0.94 + 1.75 = 2.69 \text{ N/mm}^2$$

最大せん断応力度:

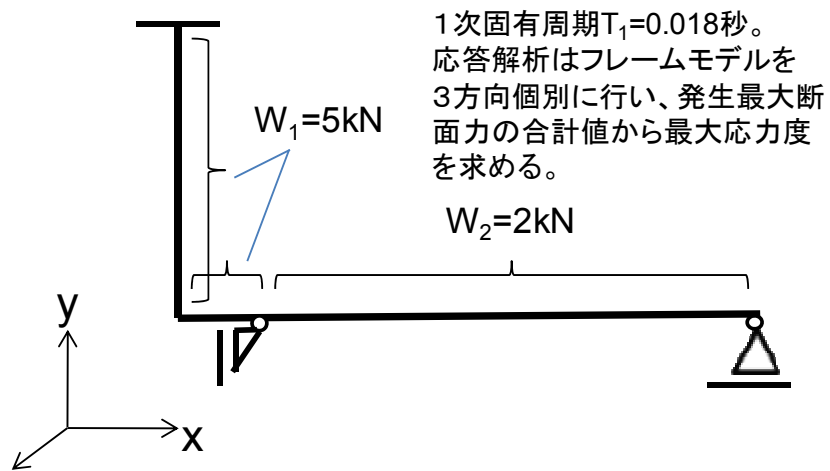
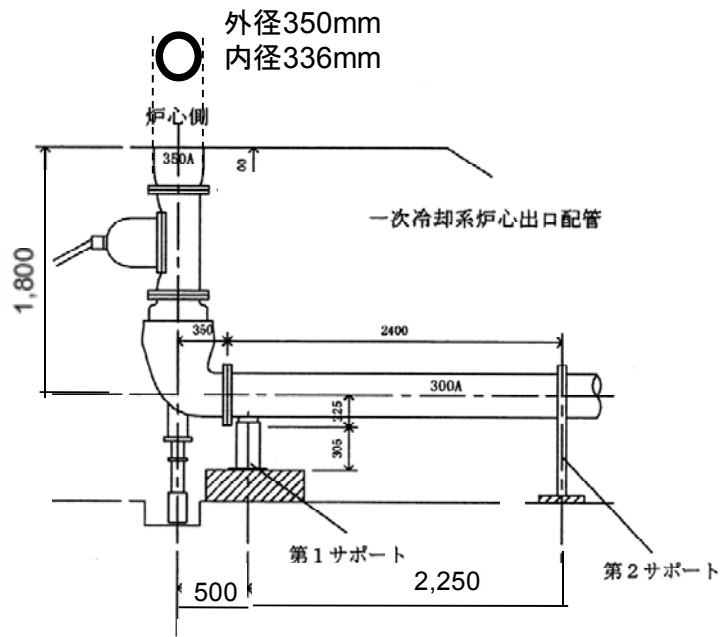
$$\tau_{\max} = 0.59 + 0.24 = 0.83 \text{ N/mm}^2$$



第 6.2.4-1 図 一次冷却水系配管及び単純ばりモデル



第 6.2.4-2 図 入口側配管とフレームモデル



第 6.2.4-3 図 出口側配管とフレームモデル

6.2.5 炉心支持構造物

炉心支持構造物は炉心タンク底面に固定された門型剛節骨組となっている。1次固有周期はX方向が0.013秒、Y方向が0.017秒となるので、剛体としてモデル化する。従って、炉心支持構造物の地震荷重は、原子炉建屋1階の床応答最大加速度の値から求めた水平及び鉛直震度に炉心支持構造物（本体及び燃料要素等を含む最大重量時）の重量を乗じることにより評価する。検討箇所は諸応力が最大となる炉心支持構造物と炉心タンク底版との接合部分とする。

最大垂直応力度は曲げモーメントと軸力、それぞれによって生じる垂直応力度の単純和とし、この値が上記接合部の評価基準値（短期許容垂直応力度）以下となっているかを確認する。さらに、最大せん断応力度が上記接合部の評価基準値（短期許容せん断応力度）以下となっているかを確認する。第6.2.5-1図に炉心支持構造物とモデルを示す。応力度の計算は以下となる。

耐食アルミニウム合金 A2P1(A5052P)

断面積 A: 58800 mm²

断面係数: Z_x = 2.52 × 10⁹ mm³

Z_y = 4.26 × 10⁹ mm³

圧縮応力: $\sigma_{max} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = 2.33 \text{ N/mm}^2$

せん断応力: $\tau_{max} = W \times Ch/Ae = 1.36 \text{ N/mm}^2$

Ae: 地震力の方向と平行な面の断面積
(511 × 25 × 2 mm²)

σ_x : x軸方向の地震力に対する曲げ応力
($\sigma_x = W \times Ch \times h/Z_x$)

σ_y : y軸方向の地震力に対する曲げ応力
($\sigma_y = W \times Ch \times h/Z_y$)

σ_z : 自重及び鉛直方向地震力に対する圧縮応力
($\sigma_z = W \times (1+C_v)/A$)

炉心重量：2694～5815N

プレナム重量：2112 N

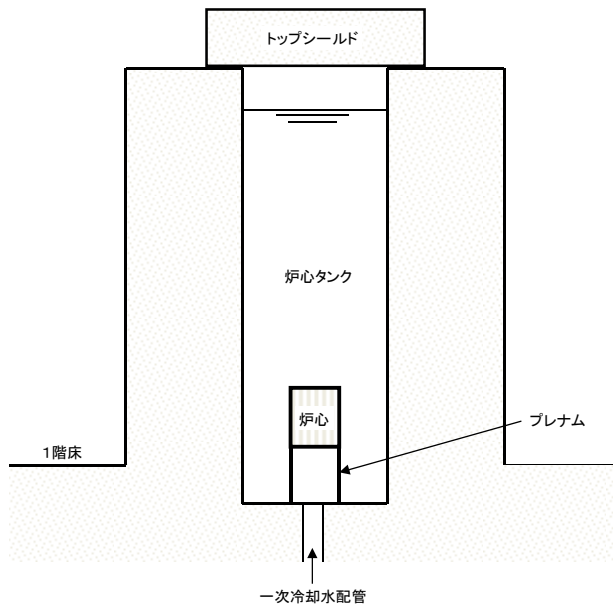
1次固有周期：

x 軸方向 0.009～0.013 s

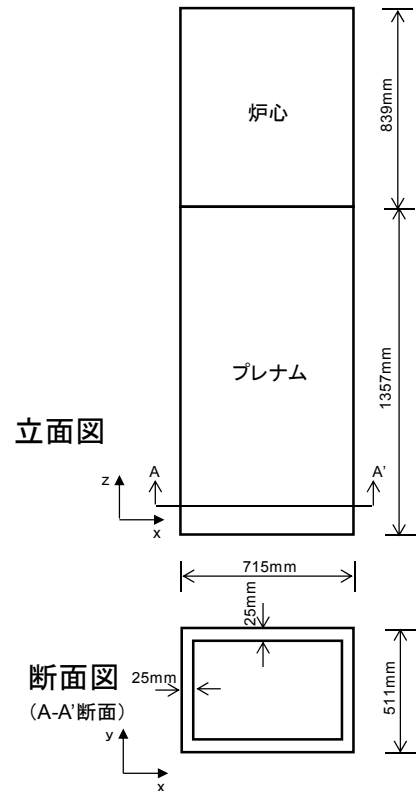
y 軸方向 0.012～0.017s

水平震度 Ch：1.0

鉛直震度 Cv：0.4



炉心及び炉心タンク断面図



炉心支持構造物(プレナム) 28

第 6.2.5-1 図 炉心支持構造物とモデルとフレームモデル

6.3 評価基準

安全上重要な機器・配管系の耐震安全性の評価にあたっては、検討対象部材の発生応力度の最大値が当該材料の評価基準値（短期許容応力度）を超えないことを確認する。使用材料の評価基準値は JIS および「京都大学研究用原子炉(KUR)の設計及び工事の方法の承認申請書」（昭和 37 年 6 月）、「京都大学研究用原子炉(KUR)の変更に係る設計及び工事の方法の承認申請書」（平成 7 年 2 月）に基づく値を用いる。検討対象各部材の評価基準値を第 6.3-1 表に示す。

第 6.3-1 表 機器・配管系の検討対象部材の評価基準値

評価施設・設備		使用材料名等	規格	評価基準値(N/mm ²)(短期荷重時或いはそれに準ずる耐震計算用許容値)		規格・基準等
制御棒	粗調整用制御棒 取付ボルト	ステンレス鋼M12	SUS304	引張	137	材料:設工認申請書 H7.1 許容値:設工認申請書 H7.1 (ミルシート有) (設工認の計算書記載の許容値)
				せん断	79	
	微調整用制御棒 取付金具	アルミニウム合金	A5052	引張	42	材料:設工認申請書 H7.1 許容値:設工認申請書 H7.1 (ミルシート有) (設工認の計算書記載の許容値)
				せん断	24.5	
	制御棒駆動装置	アルミニウム合金	A5052	引張	55	材料:A5052P-O (平成9年の計算書記載) 許容値:平成9年の計算書 (JIS H4000では 65N/mm ² 以上、平成9年の計算書では温度条件 65℃として5.6kg/mm ² としている)
				せん断	31	
燃料要素		アルミニウム合金	AG3NE (A5052)	引張	64(安全率4 とし1.6)	材料:設工認申請書H20.3.24
				せん断	34(安全率4 とし8.5)	
一次冷却系配管		アルミニウム合金	A2T1 (A5052)	引張	126	材料:設工認申請書(その2) S37.11及び強度計 算書 (許容値:平成9年の計算書の値)
				せん断	72	
炉心支 持構造 物	格子支持棒	アルミニウム合金	A2P1-F (A5052P-F)	引張	65	材料:設工認申請書(その2) S37.11 許容値:JIS H4000 (ミルシート有) (JIS H4000の 許容値)
				せん断	35	
	格子板	アルミニウム合金	A2P4-T6 (A6061P-T6)	引張	245	材料:設工認申請書(その2) S37.11 許容値:JIS H4000 (ミルシート有) (JIS H4000の 許容値)
				せん断	141	
	シュラウド	アルミニウム合金	A2P1-1/2H (A5052P-H14)	引張	180	材料:設工認申請書(その2) S37.11 許容値:JIS H4000 (ミルシート有) (JIS H4000の 許容値)
				せん断	104	

6.4 評価結果

検討対象機器・配管の各部材に生じる最大応力度は評価基準値以下となっており、耐震安全性が確保されることを確認した。検討対象の機器・配管部材に生じる最大応力度と評価基準値を第 6.4-1 表に示す。

第 6.4-1 表 機器・配管の構造強度評価結果

評価設備・機器	評価部位/応力度の種類		発生値(N/mm ²)		評価基準値 (N/mm ²)
			略算モデル	精算モデル	
制御棒	制御棒駆動装置 案内管	垂直	44.0	19.2	65.0
		せん断	1.80	0.30	37.5
	粗調整用制御棒 (取付ボルト)	垂直	180		210
		せん断	0.79		121
	微調整用制御棒 (取付金具)	垂直	3.90		42.0
		せん断	0.11		24.0
燃料要素	ノズル	垂直	3.10		16.0
		せん断	0.12		8.50
一次冷却系配管 (炉心直下)	入口配管	垂直	5.70	2.65	126
		せん断	0.60	0.69	31.0
	出口配管	垂直	6.40	2.69	126
		せん断	1.40	0.83	31.0
炉心支持構造物	炉心タンクとの接合部	垂直	2.33		60.0
		せん断	1.36		34.6

7. 地震随件事象に対する考慮

7.1 津波に対する安全性

京都大学原子炉実験所の敷地は標高約 60m に位置するため、津波の影響を考慮する必要はないと考えられる。

7.2 周辺斜面の安定性

7.2.1 周辺斜面の状況

京都大学原子炉実験所の敷地は、原子炉建屋基礎より高い位置に存在する崖や傾斜地は存在しない。また、原子炉建屋は丘陵部切土の堅固な地盤上に建設されている。

「3.3.2.2 敷地の地質及び地質構造」で述べたように敷地周辺の泉南・泉北地域の地層（大阪層群）は、北北西方向に3度～5度でゆるく傾斜し、基盤岩に近づくほど次第に傾斜が急になる傾向を示す。敷地の大阪層群は、概ね南南東に8度程度で傾斜している。

また、第4.2.2-6図に示すように、原子炉建屋の南西約40mに農業用水用の池が存在するが、池の最深部は標高約55m、一方、原子炉建屋基礎底は標高約56mとなっており、池の最深部は原子炉建屋基礎底位置から約1m低くなっているが、その標高はほぼ同じである。

7.2.2 周辺斜面の評価

原子炉建屋は丘陵部切土の堅固な地盤上に建設されており、周辺地表及び地層境界の傾斜も緩やかであること、原子炉建屋近傍に急な斜面がないことから、地盤の安定性は確保されていると考えられる。

また、第4.5.1-4図に示すように、20m以浅の地盤ではひずみは0.1～0.2%程度であるため液状化の発生はないものと考えられる。

8. まとめ

新耐震指針に従い、各種調査・評価の結果を踏まえ、検討用地震として内陸地殻内地震、プレート間地震、海洋プレート内地震を選定し、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」を評価し、震源モデルの不確かさにも配慮して基準地震動 S_s を策定した。

この基準地震動 S_s を用いて評価した結果、京都大学研究用原子炉（KUR）の原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する施設・設備の耐震安全性が確保されることを確認した。