

柏崎刈羽原子力発電所 6 号機
機器・配管系の耐震安全性評価について

（指摘事項に関する回答）

平成 21 年 4 月 27 日

東京電力株式会社

コメント内容

サブレーションプールのスロッシングの影響を確認しているのか。

(平成 21 年 3 月 11 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 30 回))

回答

第 31 回構造 WG にて,サブレーションプールのスロッシングによる影響として, 液位変動が, 原子炉施設の安全機能に与える影響の評価について説明している。今回は動液圧による影響評価について説明する。

1. サブレーションプール保有水のスロッシングによる動液圧

サブレーションプール底面には, 主蒸気逃がし安全弁作動時に排気させる水蒸気等をプール水で凝縮するためのクエンチャ (図 1 参照) が設置されている。サブレーションプール保有水にスロッシングが発生すると, サブレーションプール内の機器及び壁面には動液圧が作用する。ここでは動液圧によるクエンチャの構造強度評価をおこなった。なお, 評価においては, 速度ポテンシャル法で算出されたサブレーションプール保有水のスロッシングによる最大波高時の動液圧を用いた。

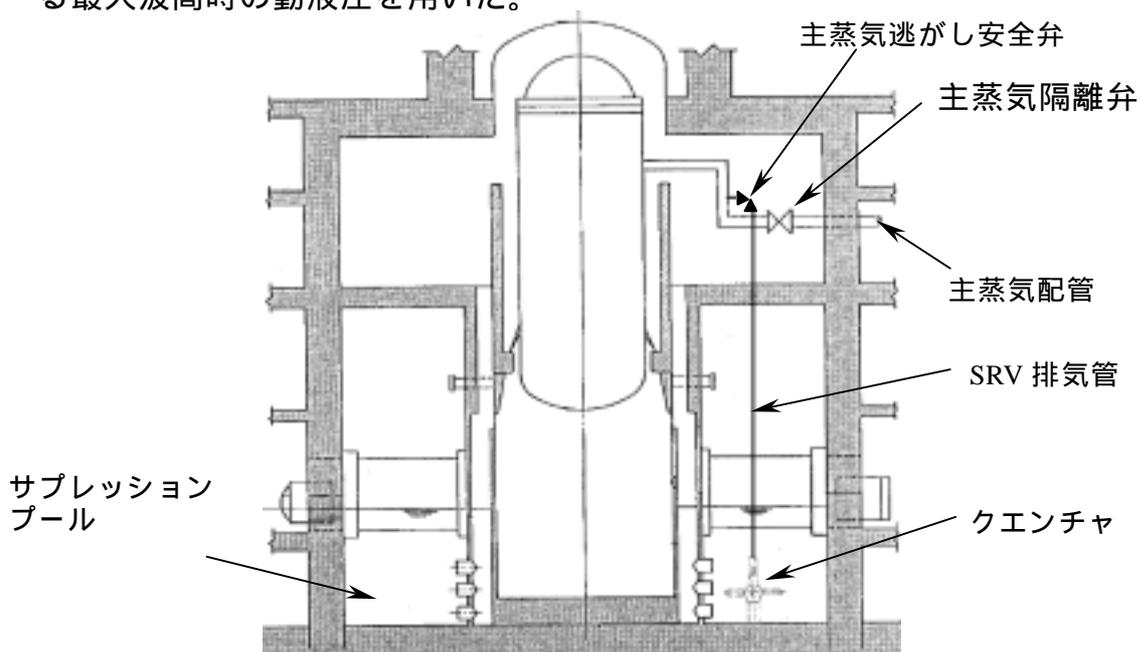


図 1 クエンチャ取付箇所

1.1 スロッシング時の最大波高の算出

速度ポテンシャル理論は、自由表面をもつ液体の振動解析法の一つであり、その方法は、タンク等の設備を剛体と仮定し、内容液の動的応答を計算し、当該設備の側面や底面の圧力分布および液面変位形状を求めるものである。

図 2 に示す多重円筒タンクを形成するアニュラス部の外槽半径 a 、内槽半径 b 、液高 H とし、 x 軸方向に変位加振を受ける場合を考える。液体は非圧縮性完全流体の渦無し流れであり側板は剛体と仮定した上で、側板における液体の r 方向速度は、側板の速度と一致すること、底板における液体の z 方向速度は 0 であること、自由液面の境界条件を考慮することにより、連続の式から速度ポテンシャル を導くことができる。その過程において求められる 1 次固有円振動数 ω_1 、波高 η_{\max} は下式のように表され、サプレッションチェンバのスロッシング評価には、それらを用いて算定している。

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g}{a} \xi_1 \tanh\left(\xi_1 \frac{H}{a}\right)} \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

$$\eta_{\max}(r) = \frac{a}{g} \cdot \omega_1 \cdot Q_1 \cdot G_1(r) \cdot S_V \quad \dots \dots \text{式(2)}$$

$\xi_1, Q_1, G_1(r)$: 表 1 により決定
 S_V : 速度応答スペクトル

表1 ξ_1, Q_1, G_1 の値

b/a	ξ_1	Q_1	$G_1(b)$	$G_1(a)$
0.1	1.80347	2.33761	0.11073	0.35300
0.2	1.70512	2.13973	0.21859	0.37336
0.3	1.58206	1.93653	0.31177	0.40240
0.4	1.46178	1.79035	0.38637	0.43551
0.5	1.35467	1.69426	0.44545	0.46995
0.6	1.26207	1.63530	0.49355	0.50443
0.7	1.18236	1.60073	0.53441	0.53843
0.8	1.11337	1.58187	0.57074	0.57180
0.9	1.05312	1.57312	0.60439	0.60451

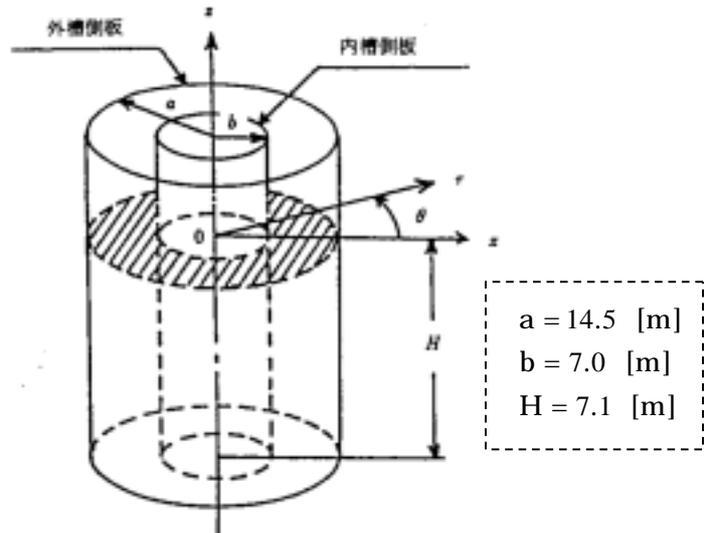


図2 多重円筒型分割タンク
アニュラス部

1.1.1 固有周期の算出

式(1)より,

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \sqrt{\frac{g}{a} \xi_1 \tanh\left(\xi_1 \frac{H}{a}\right)} \\ &= \sqrt{\frac{9.80665}{14.5} \times 1.37314 \times \tanh\left(1.37314 \times \frac{7.1}{14.5}\right)} \\ &= 0.738 \text{ [rad/sec]} \end{aligned}$$

$$\xi_1 = 1.37314$$

(b/a = 0.483 により定まる値(表1))

$$g = 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

よって1次固有周期は

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{0.738} = 8.51 \text{ [sec]}$$

1.1.2 スロッシング波高の算出

今回評価した中で波高が大きかった外筒側について, その波高の算出方法を以下に示す。サプレッションチェンバ内の床応答スペクトル(図3)からプール水の固有周期(1.1.1 にて求めた 8.51 [sec])に応じた加速度を読み取った上で, 式(2)を用いて算出した。

$$\begin{aligned}
 \eta_{\max}(a) &= \frac{a}{g} \cdot \omega_1 \cdot Q_1 \cdot G_1(a) \cdot S_V \\
 &= \frac{a}{g} \cdot \omega_1 \cdot Q_1 \cdot G_1(a) \cdot \frac{S_A}{\omega_1} \\
 &= \frac{14.5}{9.80665} \times 1.71083 \times 0.46402 \times 0.25 \times 9.80665 \\
 &= 2.88 \text{ [m]}
 \end{aligned}$$

$S_A = 0.25 \times 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$
 (加速度応答スペクトル (図 3) より)
 $G_1(a) = 0.46402$
 ($b/a = 0.483$ により定まる値 (表 1))
 $Q_1 = 1.71083$
 ($b/a = 0.483$ により定まる値 (表 1))

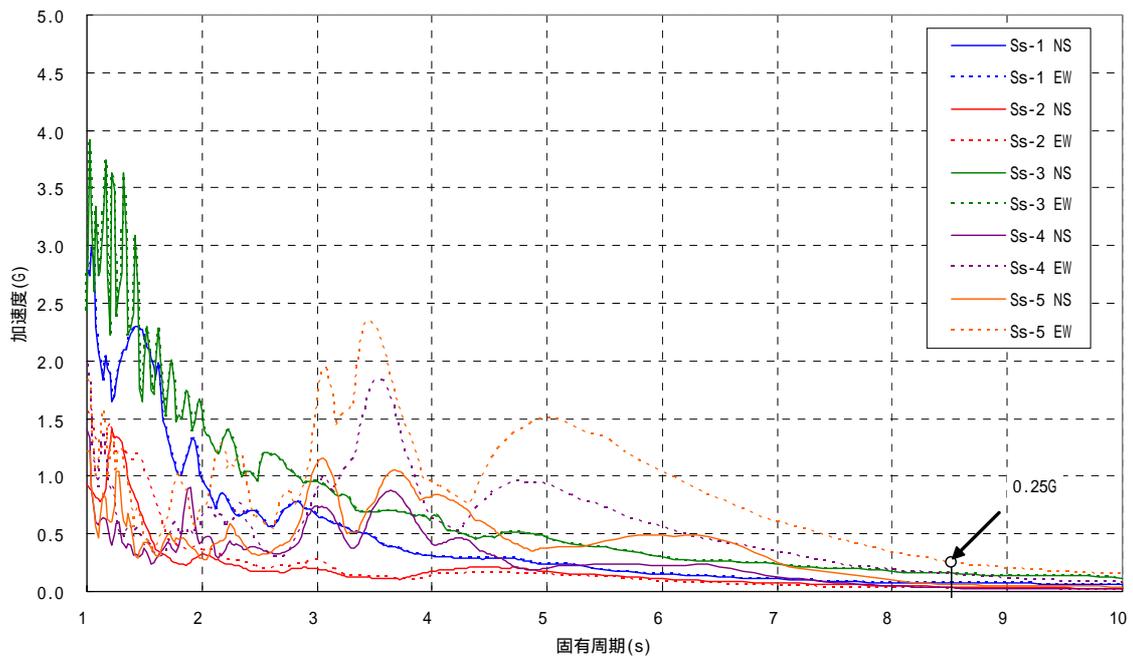


図 3 サプレッションプールの保有水のスロッシング評価用スペクトル

1.2 動液圧の算出

スロッシング時の波高 η_{\max} を生じるときの動液圧 p は、液体の密度を ρ とすると、次式で定義される。

$$p(r, z) = \rho \cdot g \cdot \eta_{\max}(r) \cdot C_1(z)$$

ここで、

$$C_1(z) = \frac{\cosh\left\{\xi_1\left(\frac{z}{a} + \frac{H}{a}\right)\right\}}{\cosh\left(\xi_1 \frac{H}{a}\right)}$$

以上より、 $r=a$ 、 $z=\eta_{\max}$ のとき動液圧は以下のように算出される。

$$\begin{aligned} p(a, \eta_{\max}) &= \rho \cdot g \cdot \eta_{\max}(a) \cdot C_1(\eta_{\max}) \\ &= 1000 \times 9.80665 \times 2.87774 \times 1.19920 \\ &= 34\text{kPa} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} C_1(\eta_{\max}) &= \frac{\cosh\left\{\xi_1\left(\frac{\eta_{\max}}{a} + \frac{H}{a}\right)\right\}}{\cosh\left(\xi_1 \frac{H}{a}\right)} \\ &= \frac{\cosh\left\{1.37314 \times \left(\frac{2.87774}{14.5} + \frac{7.1}{14.5}\right)\right\}}{\cosh\left(1.37314 \times \frac{7.1}{14.5}\right)} \\ &= 1.19920 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \\ g &= 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]} \\ \eta_{\max} &= 2.87774 \text{ [m]} \text{ (1.1.2より)} \\ \xi_1 &= 1.37314 \\ &\text{(} b/a=0.483 \text{ により定まる値(表1))} \end{aligned}$$

2. クエンチャの構造強度評価

クエンチャの評価上、応力が高い箇所であるクエンチャサポート基礎ボルトについて、前項で算出された動液圧を考慮して構造強度評価を行う。

1.で算出された動液圧 34kPa がクエンチャ全体(図 4 に示す範囲)に作用すると仮定すると、クエンチャに作用する荷重 F は次式により算出される。

$$\begin{aligned} F &= p \times A_2 \\ &= 34 \times 2.60 \\ &= 88.40 \text{ kN} \end{aligned}$$

p : 動液圧 [1.より 34kPa]
 A_2 : クエンチャの投影面積
[$2.60 \times 10^6 \text{ mm}^2$]

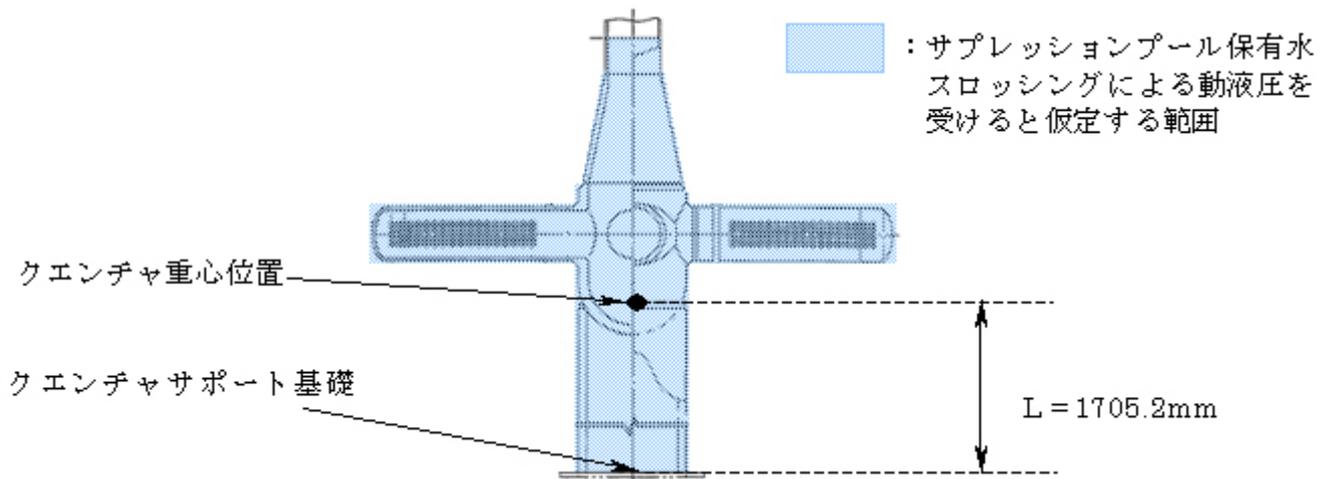


図 4 クエンチャが動液圧を受ける範囲

クエンチャに作用する動液圧による荷重 F とクエンチャサポート基礎部からクエンチャの重心までの距離 L により、クエンチャサポート基礎部のモーメント M は下式により算出される。

$$M = F \times L$$

$$= 88.40 \times 10^3 \times 1705.2 \times 10^{-3}$$

$$= 1.5074 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

L : 重心位置からクエンチャサポート基礎部までの距離(図 4)
[1705.2mm]

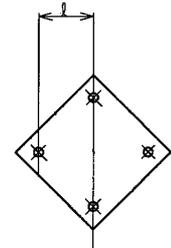
モーメント M によりクエンチャサポート基礎ボルトに作用する引張力 P は、下式により算出される。

$$P = \frac{M}{2l}$$

$$= \frac{1.5074 \times 10^5}{2 \times 473.8}$$

$$= 1.5908 \times 10^5 \text{ N}$$

l : クエンチャサポート基礎中心からボルト中心までの距離
[473.8mm]



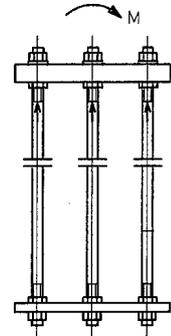
引張力 P によりクエンチャサポート基礎ボルトに発生する引張応力 σ は、下式により算出される。

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{1.5908 \times 10^5}{5.03 \times 10^3}$$

$$= 31.63 \text{ MPa}$$

A : 基礎ボルト 1 本当たりの断面積
[5.03 × 10³ mm²]



スロッシング時の動液圧によるクエンチャサポート基礎ボルトに発生する応力は、評価基準値 473MPa に対して十分小さい。

3. 参考文献

- ・ 吉田，石川：多重円筒型分割タンクの耐震設計，配管技術 '88.2，P.92-99

コメント内容

炉内構造物の水平方向解析モデルの，制御棒駆動機構ハウジングから原子炉本体基礎に接続されているバネについて，どのようなものか説明すること。

(平成 21 年 3 月 31 日 耐震・構造設計小委員会構造WG (第 31 回))

回 答

炉内構造物の水平方向解析モデル(図 1)において，制御棒駆動機構ハウジング(以下，「CRD ハウジング」)から原子炉本体基礎に接続されているバネは，CRD ハウジングラテラルレストレイント(K_2)および CRD ハウジングレストレイントビーム(K_3)に該当する。これらの設置位置を図 2 に示す。

CRD ハウジングラテラルレストレイントは，CRD ハウジング間および CRD ハウジング - CRD ハウジングレストレイントビーム間を支持する支持構造物である(図 3)。また CRD ハウジングレストレイントビームは，CRD ハウジング - 原子炉本体基礎間を支持する構造物であり，CRD ハウジング下端に取り付いている(図 4，図 5)。

CRD ハウジングに加わった地震力は CRD ハウジングラテラルレストレイントを介して CRD ハウジングレストレイントビーム，原子炉本体基礎へ伝達される。

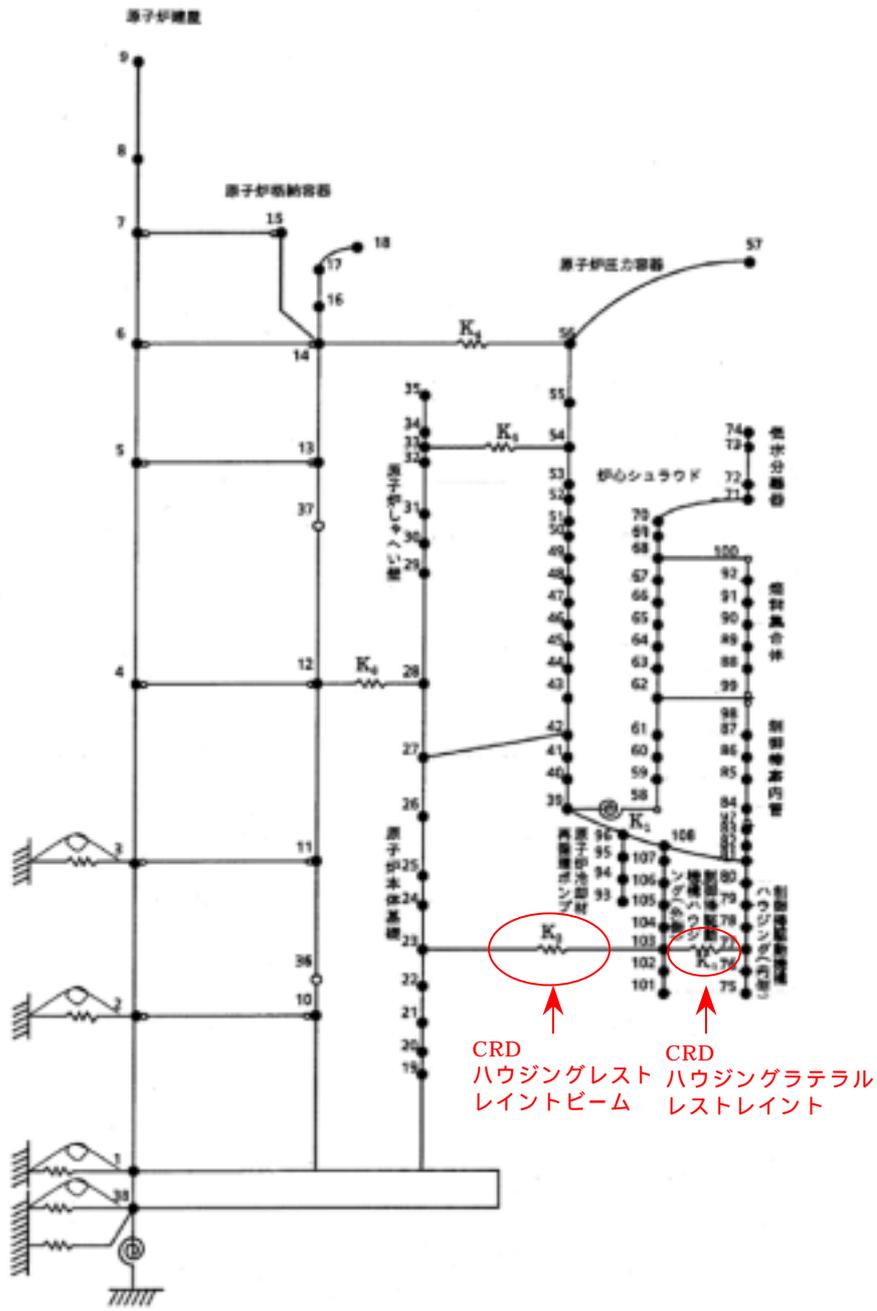


図1 炉内構造物水平方向解析モデル (NS 方向)

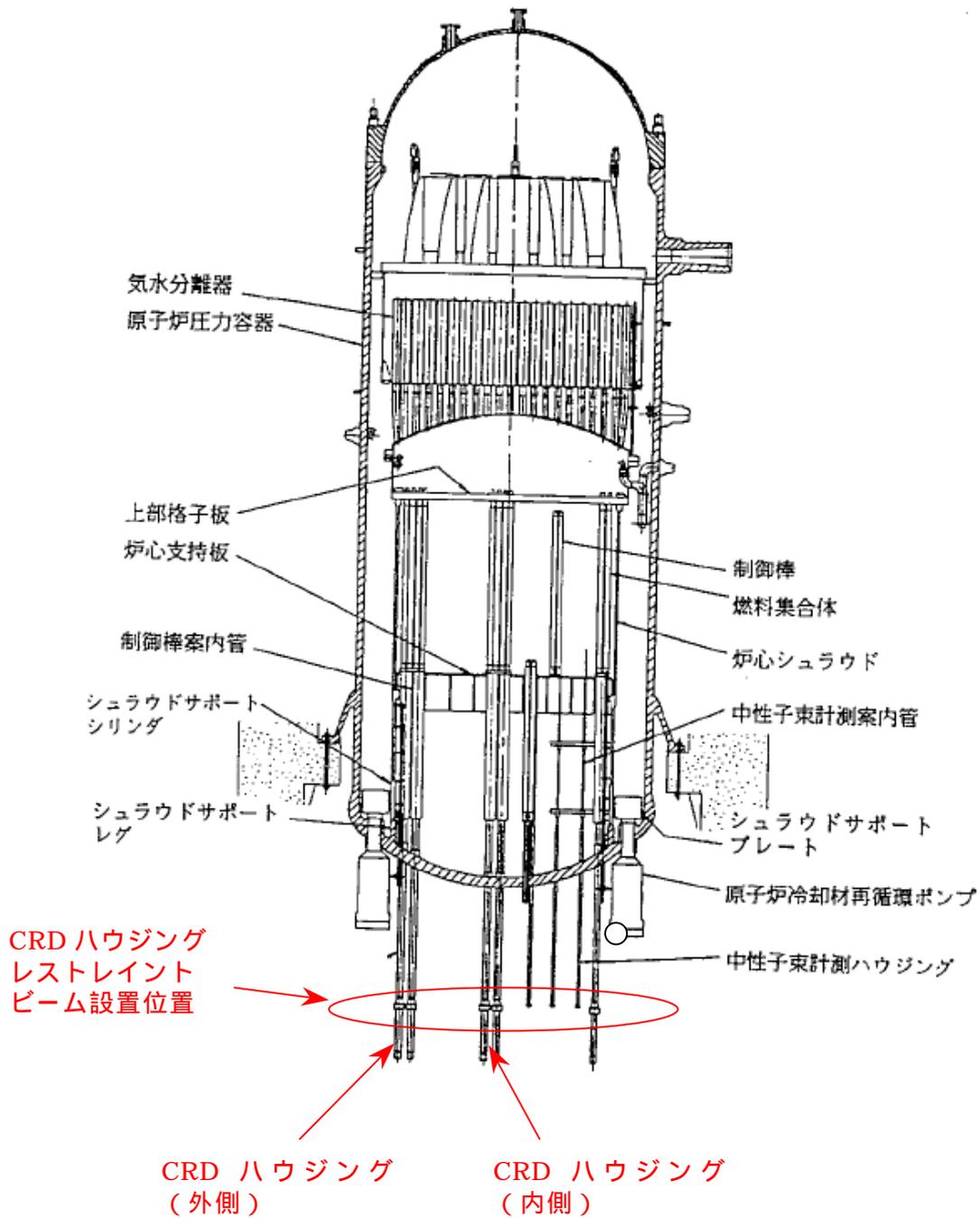


図 2 原子炉圧力容器内構造図

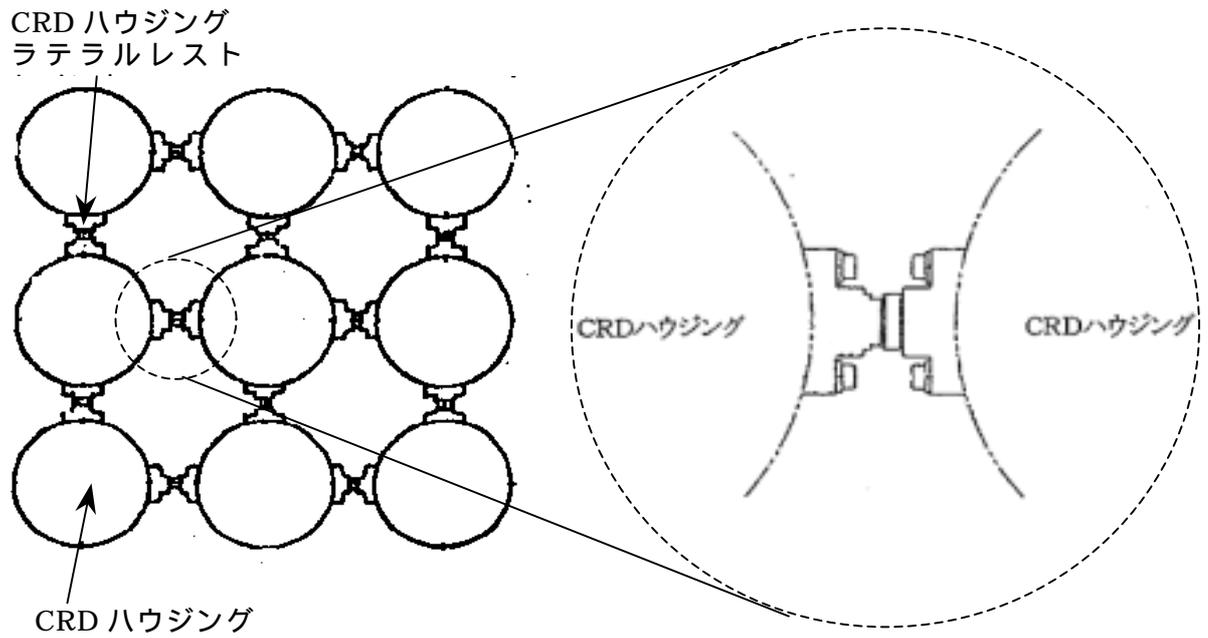


図3 制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレイント概略図

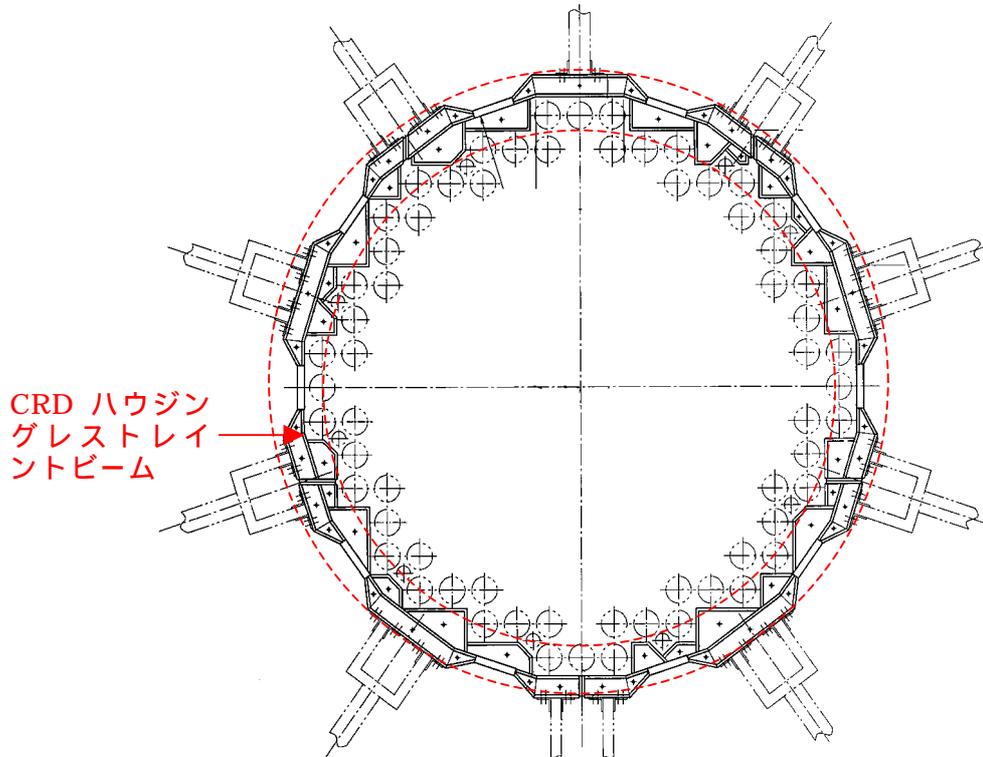


図4 制御棒駆動機構ハウジングレストレイントビーム外形図

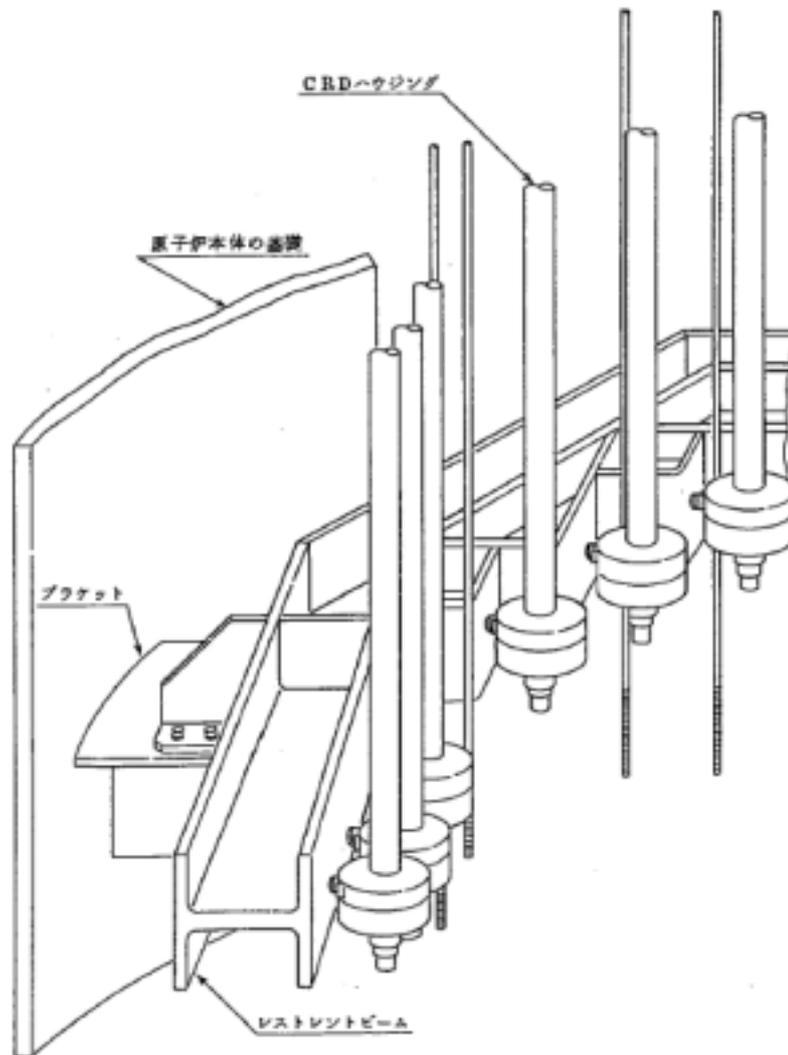


図5 制御棒駆動機構ハウジングレストレイントビーム概略図