

# 日本原子力発電敦賀2号機 PCCV の設計

戸 田 四 郎\*  
山 田 靖\*\*  
久 納 俊 雄\*\*\*

## 1. はじめに

敦賀2号機の原子炉格納容器はプレストレストコンクリート構造（PCCV）で、その設計は米国ベクテル社によって昭和52年8月～昭和55年7月の約3年間にわたって実施された。

我が国では、それまで10数年以上PCCVに関する諸研究が各方面で行われてきたが、実機への採用は敦賀2号機が初めてとあって、日本側で国内の法令、慣例などに合致するよう設計方針や設計条件を定めたり、設計結果のチェックアンドレビューを行うなど、ベクテル社と日本側の密接な連携で設計を進めた。

原子炉格納容器は仮想の一次冷却材喪失事故（LOCA）により放出される放射性物質を閉じ込める役目があり、その際格納容器内に発生する内圧、温度上昇が主要な設計荷重となる。この内圧が作用すると容器は膜引張力を受ける。したがって予めテンドンで格納容器であるコンクリートシェル中に配置し、コンクリートの硬化後締め付けてシェルに圧縮応力を生ぜしめておいて、発生する引張応力を少なくするか、または発生させないようにして格納容器の健全性を維持させようとしたものである。

PCCVのプレストレストコンクリート構造物としての特徴は、大規模な膜構造物にプレストレスを利用していること、容器が原子炉を内蔵していることから熱応力を受けること、また原子力発電所施設特有の厳しい耐震条件に対し十分な安全性を期することなどが挙げられ

る。

PCCVは仮想事故時の内圧上昇に対する耐圧容器としての機能をプレストレストコンクリート構造物が、漏れ防止の機能には内張りされた鋼製ライナが、およびしゃへい体としての機能にはコンクリートがそれぞれ対応しており、これらが一体化された構造物である。

本報告は、敦賀2号機PCCVの設計のうち、プレストレストコンクリート部を中心に述べ、ライナについては本誌の趣旨から割愛する。

## 2. 構造概要

原子炉格納容器は、原子炉建屋のほぼ中央部に位置し、エンクロージャビルと称する八角柱状の鉄骨構造物で覆われている。

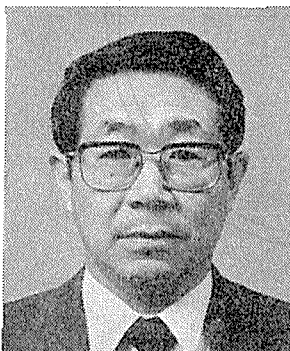
原子炉格納容器は、上部シェルのプレストレストコンクリート部分と底部基礎の鉄筋コンクリート部分からなり、これに気密性を確保する目的で容器内全面に鋼製ライナ（厚さ6.4mm）が内張りされている。

プレストレストコンクリートのシェル部は、内径43m、内高64.5mでシェル厚1.1mの半球型ドーム部と1.3mの円筒部からなっている（図-1）。

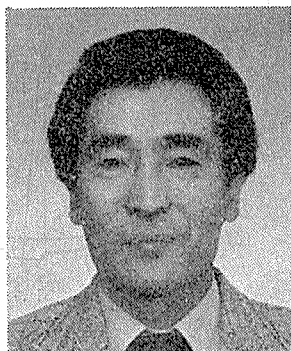
格納容器の寸法は、自由体積と仮想事故時に放出される蒸気による内圧との相関々数で定められるものであるが、運転保守面からのクレーンの吊代、点検スペースの確保なども考慮している。

コンクリート部にプレストレスを与えるテンドンは、径7mmのPC鋼線163本を束ねて1テンドンを構成しており、1テンドンの耐力は約1000t、定着工法はBBRV工法である。

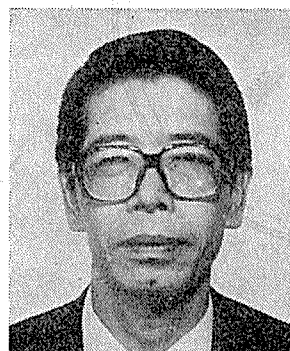
テンドンは図-2に示すとおり、ドーム上部から投影して格子状に配置し、両端は基礎版内に設けるテンドンギャラリに定着する逆Uテンドンと、方位角120°毎に設ける3本のバットレスに、フープ状に240°間に



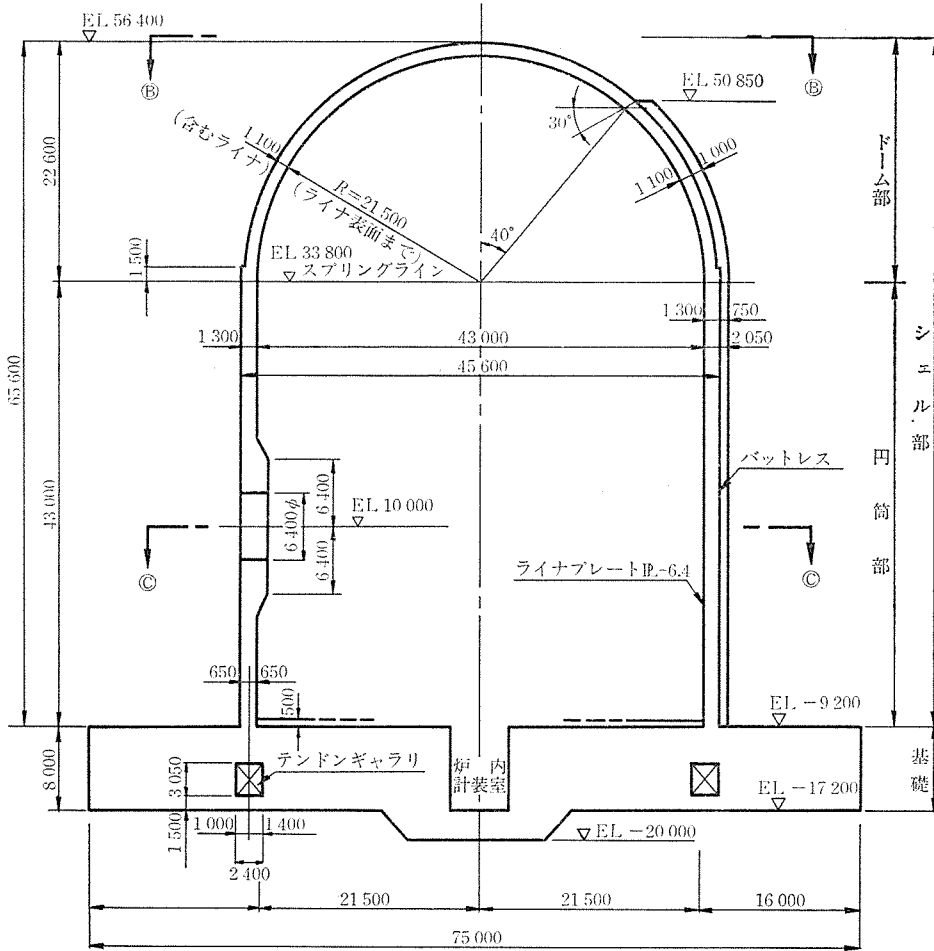
\* Shiro TODA  
三菱重工業（株）本社原子力プロジェクト部



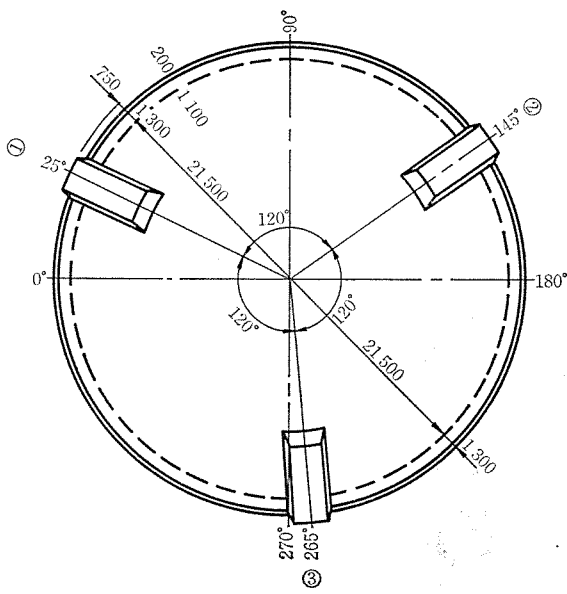
\*\* Yasushi YAMADA  
三菱重工業（株）神戸造船所格納容器設計課



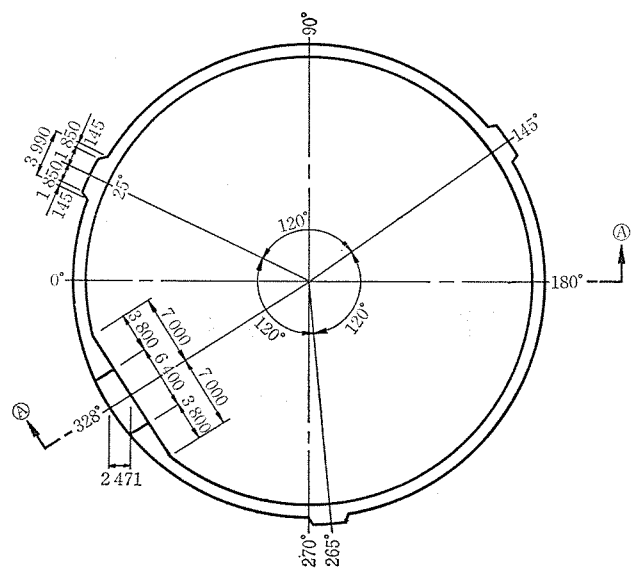
\*\*\* Toshio KUNO  
（株）大林組原子力本部技術部



① - ① 断面図



② - ② 矢視図



③ - ③ 断面図

図-1 PCCV の形状寸法概要図

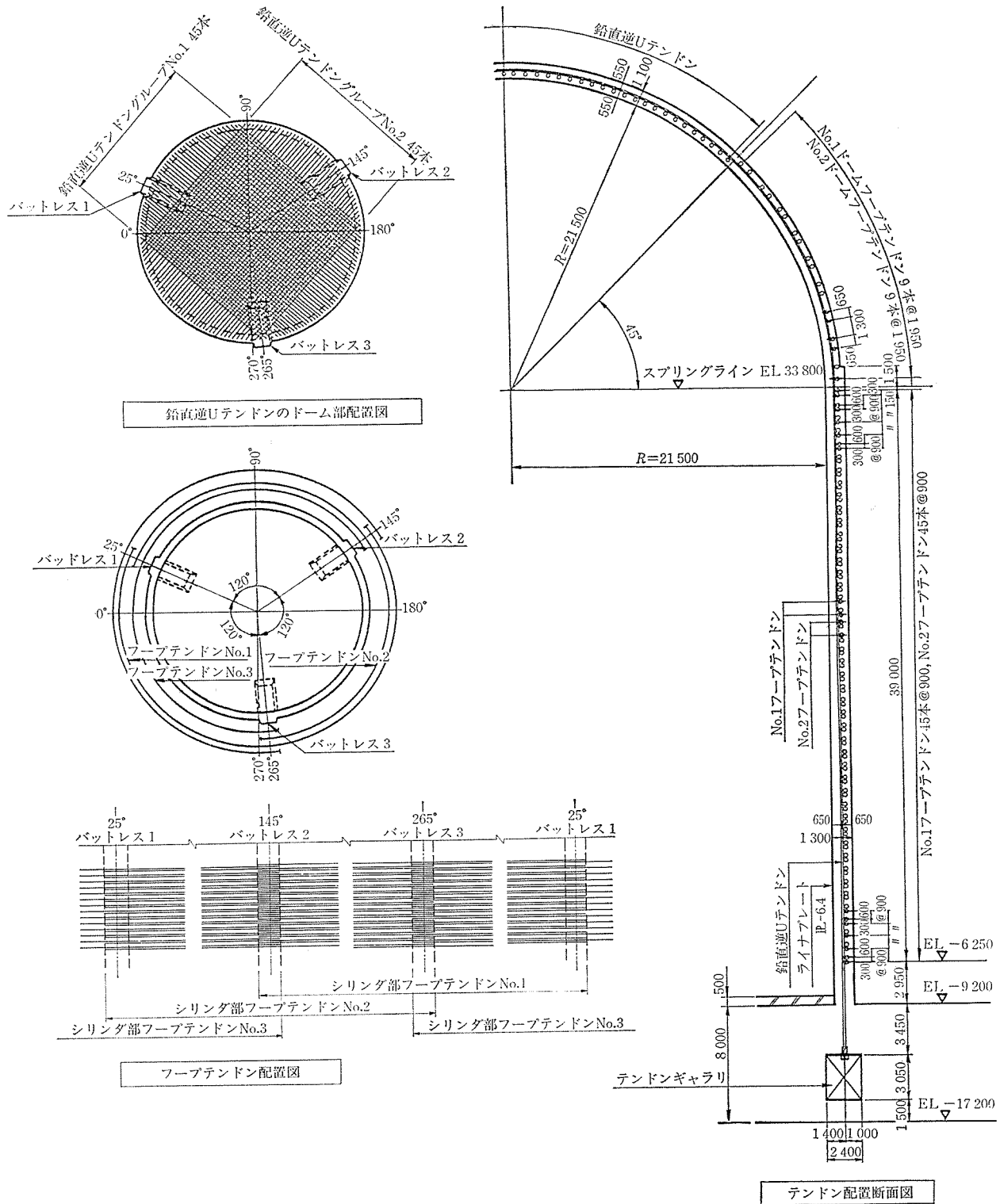


図-2 テンドン配置概要図

配置しバットレスに定着する水平方向テンドンから形成されている。

### 3. 適用基準・規格

敦賀2号機の PCCV の設計は、主として通産省資源エネルギー庁「原子力発電用コンクリート格納容器技術

基準（案）」を準拠している。

この基準は昭和 50 年 8 月、当時諸外国で既に多くの実績のあった原子力発電用コンクリート格納容器を我が国へ導入すべきであると機運の高まった事情を反映して、資源エネルギー庁に原子力発電用コンクリート容器技術基準検討会を発足させ、基準案の作成にあたって必

要な調査，資料収集にあたりとともに基準原案を作成し，これらを詳細に審議・検討し，昭和 52 年 4 月に取りまとめられた。

資源エネルギー庁は，さらに基準（案）の安全性を確認するために，昭和 53 年度と昭和 54 年度の 2 か年にわたって（財）電力中央研究所にコンクリートのせん断耐力と熱応力を主体とした基準確証実験を委託した。これらの実験結果を踏まえて基準（案）の見直しを基準検討会で行い，昭和 54 年 11 月基準（案）の改訂案をまとめた。その後，昭和 56 年 6 月資源エネルギー庁原子力発電技術顧問会の中にコンクリート格納容器基準検討会が発足し，上記基準（案）の内容を再検討するとともに，その後得られた成果も考慮し，昭和 56 年 11 月に「原子力発電用コンクリート格納容器技術基準（案）」としてまとめられた。

基準（案）全体は次の 6 章から構成されている。

第 1 章 主要な用語の定義および適用範囲

第 2 章 設計荷重の種類とその組合せ，各材料の設計許容値，構造解析法の基本的内容および詳細設計手法

第 3 章 鉄筋およびプレストレストコンクリート材料

第 4 章 鉄筋およびプレストレストコンクリート部分の施工および施工に関する試験，検査

第 5 章 ライナの設計，製作，施工および検査

第 6 章 材料の試験，検査方法のほかに格納容器の健全性（耐圧，漏えい）を確認するための試験

表—1 適用および参考基準・規格

1.	電気事業法および発電用原子力設備に関する技術基準を定める通商産業省令
2.	建築基準法および同施行令
3.	鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1979，日本建築学会
4.	プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，1975，日本建築学会
5.	プレストレストコンクリート標準示方書，土木学会
6.	ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE SECTION III-DIVISION 2 “Code for Concrete Reactor Vessels and Containments”
7.	BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR REINFORCED CONCRETE (ACI 318-77)
8.	CEB-FIP International Recommendations 3rd Edition 1978 Volumu II “Code for Concrete Structures”
9.	Specification for Prestressed Concrete Pressure Vessels for Nuclear Reactors (BS 4975-1973)

基準（案）の作成経過と並行して設計が進められたため，基準（案）の改訂の都度，設計の見直しを行うなど，最終的には基準（案）の要求事項をすべて満足している。

また，初めての PCCV とあって国内外の多くの関連法規，規準等も参考にしている（表—1）。

敦賀 2 号機の設計に用いる荷重および材料の許容値は，この基準（案）に基づいて設定したが，その概要を次節で述べる。

### 3. 荷重および材料の許容値

#### 3.1 荷 重

PCCV の設計で考慮する荷重は，プラント寿命中を通して現実に作用する，または想定する荷重を実情にあわ

表—2 荷 重 の 種 類

荷 重	摘 要
死 荷 重 (D)	コンクリート躯体重量およびライナ重量の総重量約 28300 t。
活 荷 重 (L)	ボークレーン重量を考慮。クレーン本体 440 t，走行ガータ 210 t およびクレーンブラケット 230 t の総計 880 t。
プレストレス荷重 (F)	有効プレストレス力が設計内圧の 1.2 倍以上の外圧相当量（本文参照）。
運 転 時 圧 力 (R <sub>1</sub> )	PCCV 内外の圧力差による荷重で 0.1 kg/cm <sup>2</sup> 程度の非常に微小であるので考慮しない。
運 転 時 温 度 荷 重 (T <sub>1</sub> )	
L 事 故 時 圧 力 (P <sub>2</sub> )	一次冷却材喪失事故 (L 事故) により PCCV 内部で上昇する圧力。 ・事故後 1 時間 [P <sub>2(t1)</sub> ] 4.0 kg/cm <sup>2</sup> ・事故後 24 時間 [P <sub>2(t24)</sub> ] 0.64 kg/cm <sup>2</sup>
L 事 故 時 温 度 荷 重 (T <sub>2</sub> )	圧力と同様，事故時の PCCV 内部の温度上昇。 最高雰囲気温度 144°C (事故後 10 秒)
ジェット力およびジェット反力 (R <sub>3</sub> )	配管破断に伴って噴出する高温・高圧のジェット流の力および反力。主蒸気管 640 t，主給小管 220 t。
試 験 時 圧 力 (P <sub>0</sub> )	運開前に実施する耐圧試験圧力。設計内圧の 1.15 倍。
S <sub>1</sub> 地震荷重 (K <sub>1</sub> ) および S <sub>2</sub> 地震荷重 (K <sub>2</sub> )	耐震設計審査指針に規定する基準地震動 S <sub>1</sub> ，S <sub>2</sub> による（本文参照）。

せて適切に評価した (表—2)。

特に、主要荷重であるプレストレス荷重、温度荷重および地震荷重について以下に記す。

(1) プレストレス荷重 ( $F$ )

プレストレス荷重は、プレストレス力をあらかじめ導入することによりコンクリートを膜圧縮状態にする内部応力であるが、設計では他の荷重同様外的荷重として扱う。

プレストレス荷重は、コンクリートのクリープ、乾燥収縮および鋼材のリラクセーションなど経時変化によるプレストレス損失量を考慮してなお設計内圧の 1.2 倍以上のプレストレス力を確保できるように設計されている (図—3)。

この設計プレストレス力に見合うよう tendon の本数および間隔を設定している。

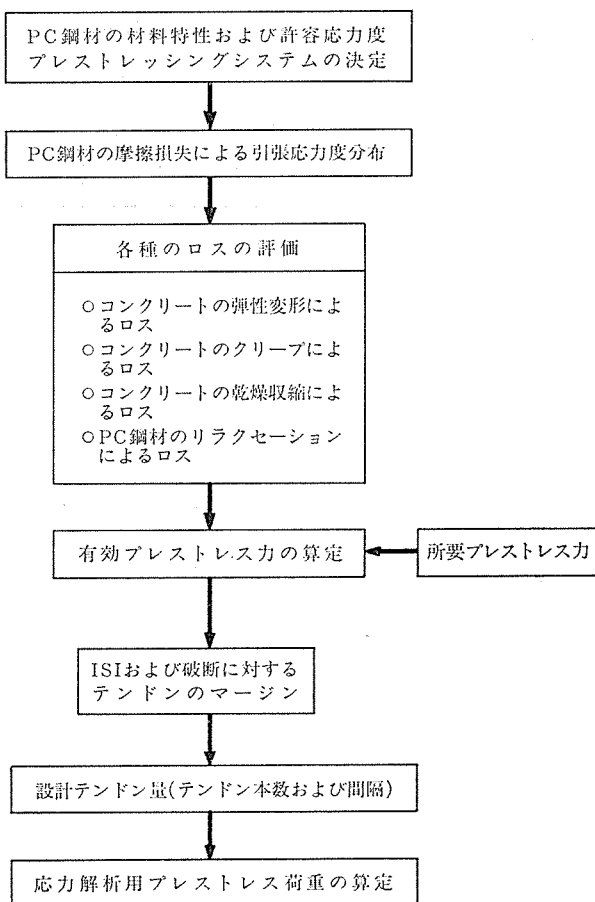
応力解析の荷重として扱うためには、Tendon の緊張力分布が必要で、敦賀 2 号機では下記のとおり定めた。

イ. PC 鋼材の摩擦損失による引張応力度分布

緊張端からの長さおよび角度変化に対する摩擦損失量は下式で評価している。

$$T_l = T_0 e^{-(\mu\alpha + \lambda l)}$$

ここで、



図—3 プレストレス荷重の算定手順

$T_l$ : tendon の緊張端から任意の距離  $l$  の tendon 張力

$T_0$ : 緊張端での最大張力

$\mu$ : tendon の角度変化による摩擦係数 (0.14/rad)

$\lambda$ : シースの波打ちによる摩擦係数 (0.001/m)

$l$ : 緊張端から  $l$  の位置までの tendon 全長さ

この場合の  $\mu=0.14$ ,  $\lambda=0.001$  は大容量 tendon であること、シース内処理をアンボンドにすることなどを考慮して、実績の多い米国の慣用値を用いた。

摩擦損失量算定後の逆 U およびフープ tendon の張力分布を図—4 に示す。この図で最大張力  $115.5 \text{ kg/mm}^2$  ( $0.7 f_{pu}$ ) および  $123.3 \text{ kg/mm}^2$  ( $0.85 f_{py}$ ) は、定着完了後および緊張中の基準 (案) 規定の許容値である。

ロ. 各種ロス

摩擦損失以外の経年変化による各種ロスは基本的に土木学会「プレレストコンクリート標準示方書」に基づいて評価している (表—3)。

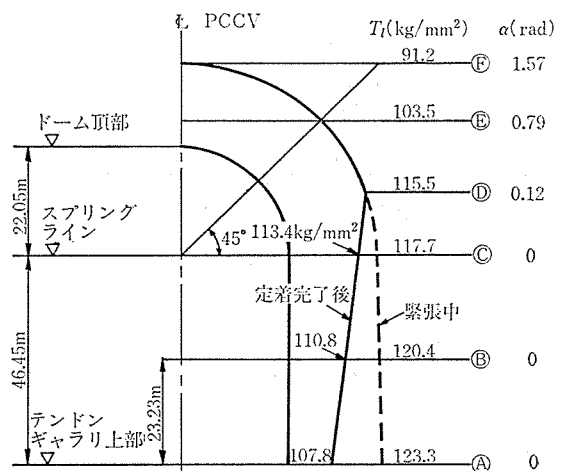
ハ. tendon 張力

tendon 定着完了後の初期張力から各種ロスを考慮した tendon 張力は表—4 に示すとおりである。tendon 張力を基準とすると、各種ロスの損失量はフープ tendon が 21%、鉛直逆 U tendon が 17% 程度である。

設計用プレストレス荷重は、表—4 の有効プレストレス力から ISI (供用期間中検査) 時に対するマージン、tendon 破断に対するマージンおよび開口部による tendon 局部曲がりの摩擦損失に対するマージンなどを考慮して定め、結果的に設計内圧に対する比率はフープ tendon  $1.29 P$  ( $P$  は設計内圧)、鉛直逆 U tendon はドーム頂部で  $1.34 P$  であった。

(2) 温度荷重

運転時、事故時温度荷重は、PCCV 内外面の温度差によって生ずる平均温度変化および温度勾配による荷重で



図—4 (a) 鉛直逆 U tendon 緊張中および定着完了後張力 ( $\mu=0.14$ )

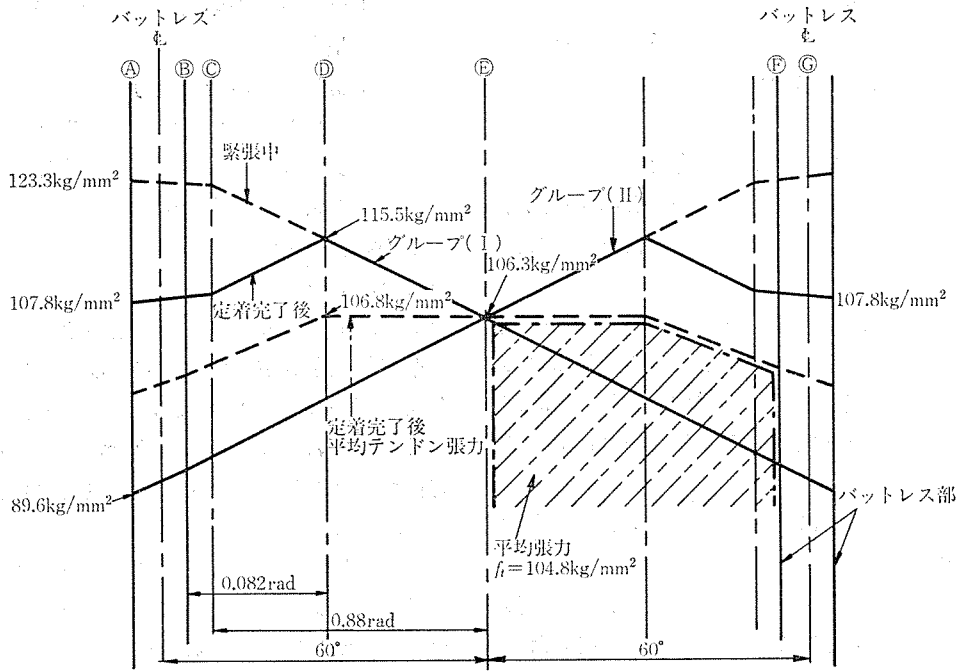


図-4 (b) フープテンドン緊張中および定着完了後張力 ( $\mu=0.14$ )

表-3 テンドン張力の各種ロス

種類	計算式	計算結果 (kg/mm <sup>2</sup> )	
		フープテンドン	逆Uテンドン
弾性変形ロス ( $\Delta f_i$ )	$\frac{1}{2} n \sigma_c$	3.7	2.6
リラクセーションロス ( $\Delta f_2$ )	$r \cdot f_i \left(1 - 2 \times \frac{\Delta f_3 + \Delta f_4}{f_i}\right)$	3.0	3.4
クリープロス ( $\Delta f_3$ )	$\frac{n \phi(t, t_0) \sigma_c}{1 + n \frac{\sigma_c}{f_i} \left[1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0)\right]}$	11.7	8.6
乾燥収縮ロス ( $\Delta f_4$ )	$\frac{E_p \cdot \epsilon_s(t, t_0)}{1 + n \frac{\sigma_c}{f_i} \left[1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0)\right]}$	3.2	3.3
合計		21.6	17.9
設計用		22.0	18.0

$f_i$ : 初期テンドン平均張力  
 $\sigma_c$ : 初期平均コンクリート応力  
 $E_p$ : テンドンの弾性係数  $2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$   
 $E_c$ : コンクリートの弾性係数  $3.04 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$   
 $n$ : ヤング係数比 6.58  
 $\phi(t, t_0)$ : クリープ係数 1.80  
 $\epsilon_s(t, t_0)$ : 乾燥収縮係数  $1.8 \times 10^{-6}$   
 $r$ : リラクセーション係数 0.04

40年後の有効プレストレスに対するロス

表-4 テンドン張力

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

		$F_i$	$\Delta f_e$	$F_e$	$\Delta f_e/F_i$ (%)
フープテンドン, ドームフープテンドン		104.8	22	82.8	21.0
鉛直逆Uテンドン	ドーム頂部	91.2	18	73.2	平均して約 17.1
	ドーム45°	103.5	18	85.5	
	スプリングライン	113.4	18	95.4	
	シリンダ部中点	110.8	18	92.8	
定着端		107.8	18	89.8	

$F_i$ : テンドン定着完了後の初期張力  
 $F_e$ : 40年後の有効張力  
 $\Delta f_e$ : 40年後の有効プレストレスに対するロス

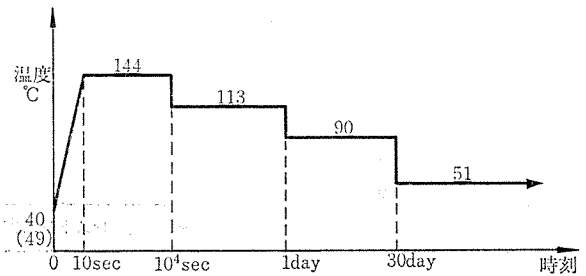


図-5 格納容器内温度

ある。PCCV の外部温度は季節変動に伴って変化するが、月平均外気温の最低値 (冬期) 1.2°C, 最高値 28.2°C (夏期) の2種類を設計用として設定した。運転時 PCCV 内部温度は冬期 40°C, 夏期 48°C で、海水温度に基づいて空調設備能力から安全側に定められた値である。L 事故時温度は 図-5 に基づいて温度分布解析を行い定めた。設計荷重は事故後の経過時間によって温度分布が変動するが、内圧の卓越する事故後1時間と温度が PCCV 断面内に蓄えられ熱応力が支配的となる事故

後 24 時間 (シェル部) と 30 日 (基礎部) の値とした (図-6)。

また、冬期、夏期のうち、内外温度差が大きく、熱応力が卓越する冬期を設計用としている。

(3) 地震荷重

発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針に基づいて、基準地震動  $S_1$  による動的解析を実施し、その最大

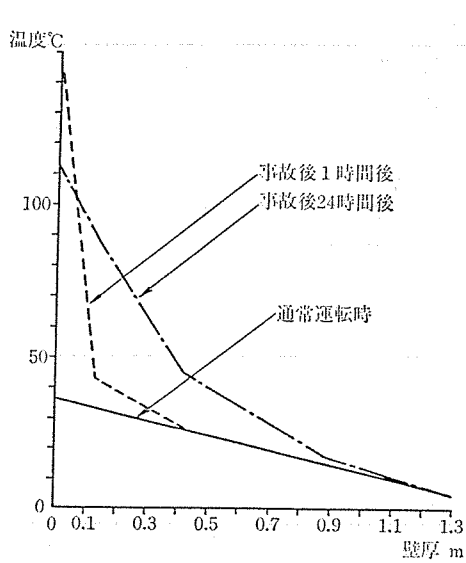


図-6 (a) 円筒部温度分布 (冬期)

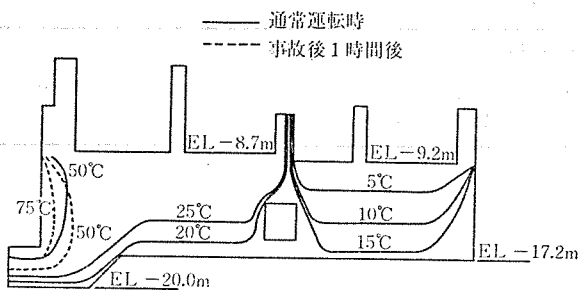


図-6 (b) 基礎版温度分布 (冬期)

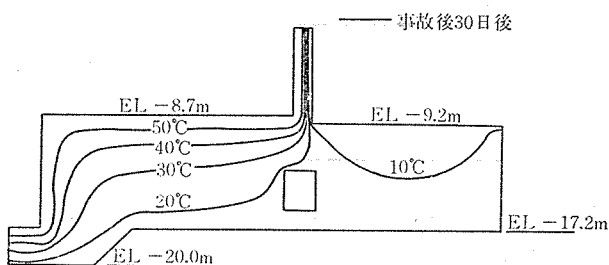


図-6 (c) 基礎版温度分布 (冬期)

応答値に安全余裕をみて設計用地震荷重とした(図-7)。なお、基準地震動  $S_2$  に対しては、弾塑性応答解析を行い、PCCV が耐力的に十分健全性を保持していることを確認している。

### 3.2 荷重の組合せ

次に、荷重の組合せは、基準(案)の規定に基づいて表-5 に示すとおりであるが、これらの荷重状態区分は、多種多様の荷重の起こる確率や他の荷重発生との同時性などを考慮したものである。

### 3.3 材料の許容値

PCCV を構成する材料は、コンクリート、PC 鋼材および鉄筋等である。コンクリートはプレストレスによっ

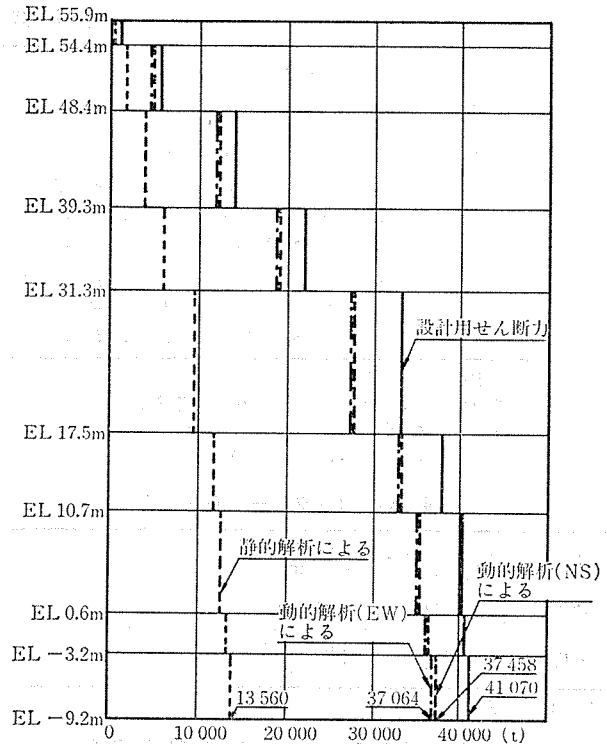


図-7 (a) 設計用せん断力 ( $S_1$  地震時)

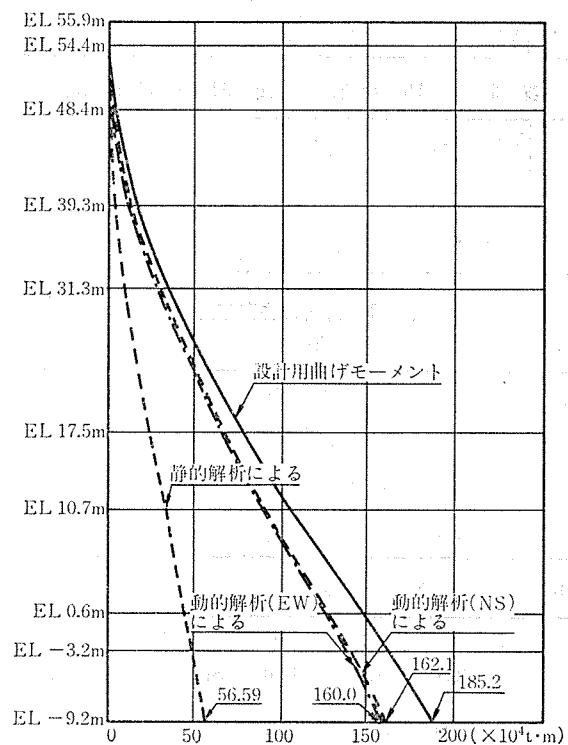


図-7 (b) 設計用曲げモーメント ( $S_1$  地震時)

て常時高圧縮応力下にあることから、設計基準強度  $420 \text{ kg/cm}^2$  の高強度コンクリートを使用する。

PC 鋼材は  $7 \text{ mm}$  径 PC 鋼線である。これは、PS システムが、供用期間中に、リフトオフ試験によるプレストレス力の経年変化、鋼材の抜取り強度試験による材料

表—5 荷重の組合せ

荷重状態	荷重時名称	応力状態 1	応力状態 2	設計方針
I	通常運転時	$D+L+F$	$D+L+F+T_1$	長期荷重時の許容応力度設計
II	試験時	$D+L+F+P_0$	—	
III	S <sub>1</sub> 地震時	$D+L+F+K_1$	$D+L+F+K_1+T_1$	短期荷重時の許容応力度設計
	L 事故時	$D+L+F+P_{2(1)}$	$D+L+F+P_{2(1)}+T_2$	
	L 事故+S <sub>1</sub> 地震時	$D+L+F+P_{2(24)}+K_1$	$D+L+F+P_{2(24)}+K_1+T_2$	
IV	L 事故時	$D+L+F+1.5 P_{2(1)}$	—	終局強度設計 ただし、応力状態 2 の温度荷重は無視する。
	J 事故時	$D+L+F+J$	—	
	L 事故+S <sub>1</sub> 地震時	$D+L+F+P_{2(1)}+K_1$	—	

荷重状態 I : 通常運転の状態  
 荷重状態 II : 通常運転時に気象荷重を考慮した状態および試験時の状態  
 荷重状態 III : S<sub>1</sub> 地震あるいは L 事故の発生による状態  
 荷重状態 IV : 格納容器の安全評価上想定する状態

表—6 (a) コンクリートの物性値

部位	設計基準強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比	線膨張率 (°C)
PCCV	420	$3.04 \times 10^6$	0.17	$1.0 \times 10^{-5}$
基礎版	420* 240	$3.04 \times 10^6$ * $2.30 \times 10^6$	0.17	$1.0 \times 10^{-5}$

\* テンドンギャラリ上部

表—6 (b) 鉄筋の物性値 (JIS G 3112 解説)

記号	引張強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	降伏点または耐力 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比	線膨張率 (°C)
SD 40	5700 以上	4000 以上	$2.1 \times 10^6$	—	$1.0 \times 10^{-5}$

表—6 (c) PC 鋼線の物性値 (JIS G 3536 解説)

呼び名	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張荷重 (kg/mm <sup>2</sup> )	0.2% 永久伸びに対する荷重 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	リラクゼーション係数 (40 年後) (%)	ヤング係数 (kg/cm <sup>2</sup> )
7 mm	38.48	165 以上	145 以上	4.5 以上	4.0	$2.0 \times 10^6$

表—7 材料の許容応力度

(a) 鉄筋の許容応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

荷重状態	引張および圧縮					
	SR24	SR30	SD30	SD35	SD40	溶接金網
I	1600	2000	2000	2000	2000	2000
II						
III	2400	3000	3000	3500	4000	—

(b) 底部の面外せん断補強筋に対する許容応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

荷重状態	せん断補強 (面外)					
	SR24	SR30	SD30	SD35	SD40	溶接金網
I	1600	2000	2000	2000	2000	2000
II						
III	2400	3000	3000	3000	3000	3000

(c) 鉄筋とコンクリートとの許容付着応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

荷重状態	丸 鋼	異形鉄筋
I	$\frac{6}{100} F_c$ かつ 13.5 以下	$\frac{1}{10} F_c$ かつ $13.5 + \frac{1}{25} F_c$ 以下
II		
III	1.5 × (同上)	1.5 × (同上)

(d) コンクリートの許容圧縮応力度

荷重状態	応力状態 1	応力状態 2
I	$0.33 F_c$	$0.45 F_c$
II		
III	$0.66 F_c$	$0.75 F_c$

$F_c$  : コンクリート設計基準強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

(e) 底部においてコンクリートの負担できる面外許容せん断応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

荷重状態	面外せん断応力度
I	$5 + \frac{F_c}{100}$
II	
III	$1.5 \times \left( 5 + \frac{F_c}{100} \right)$

(f) PC 鋼材の許容引張応力度 (表中の値のうち小さい方の値とする)

荷重状態	許容引張応力度
I	$0.75 F_u$ または $0.85 F_y$
II	
III	

$F_u$  : PC 鋼材の規格引張強度  
 $F_y$  : PC 鋼材の規格降伏点強度

劣化の有無を調べるに優位なアンボンド-BBRV 工法を採用したためである。

鉄筋は面外曲げ引張に対する補強に用いるが、大量の鉄筋を効果的に配筋するために、最大径 51 mm、材質は SD 40 の鉄筋を使用することにした。

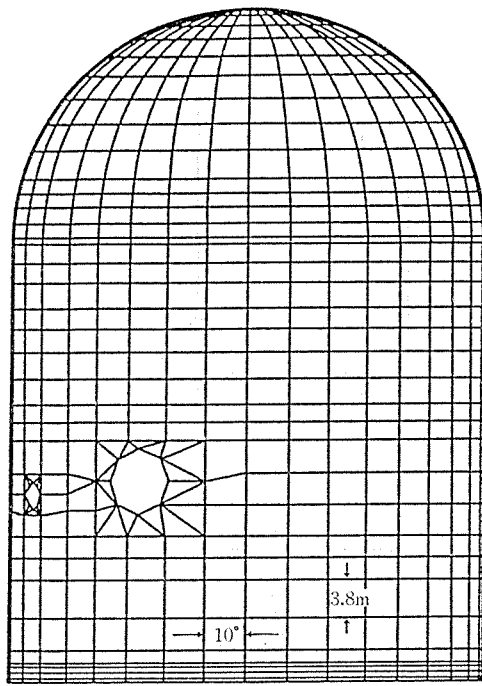
表—6 に材料の物性値、表—7 にこれら材料の許容値を示す。

#### 4. 応力解析

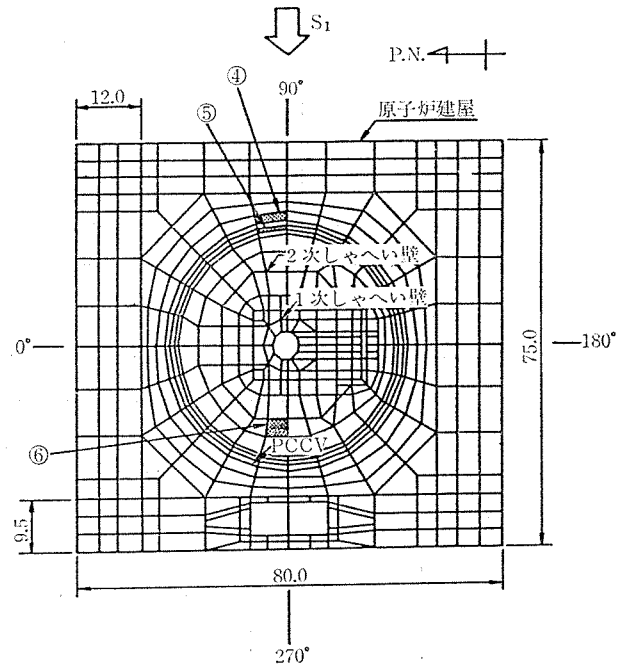
PCCV は、シェル部分 (ドームおよび円筒部) および基礎部分からなり、円筒部にはテンドンを定着するためのバットレス、大小 200 個近い貫通孔やポーラクレーンを支持するためのクレーンブラケットなどがある。

したがって、一般部の設計に対しては、180° 脚部固定モデルと、円筒脚部および基礎版の 360° 全体モデル、局部の設計に対しては、機器搬入口廻り、エアロック廻

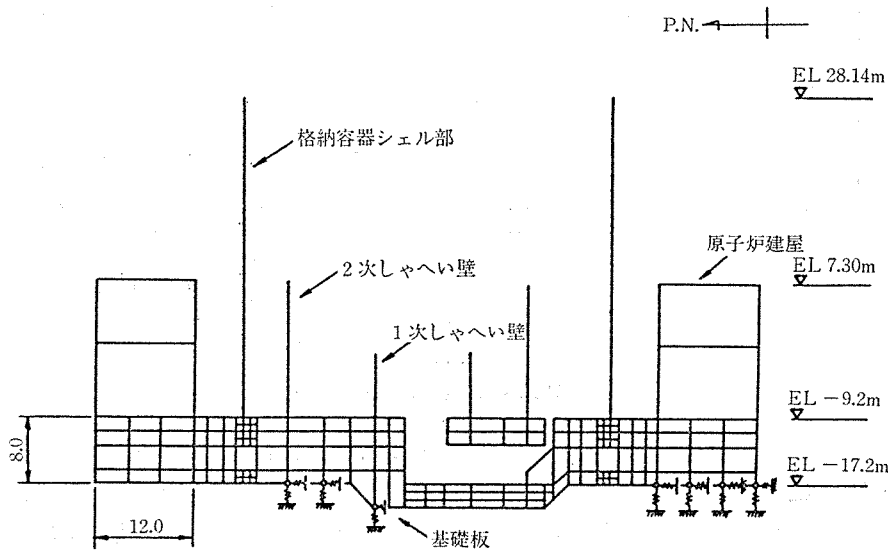




図—8 (a) 180° 脚部固定モデル



図—8 (b) 360° 全体モデル平面図



図—8 (c) 360° 全体モデル断面図

りおよびクレーンブラケット廻りなどの部分モデルに分けていずれも立体有限要素法応力解析を行った(図—8)。

応力解析は全断面コンクリートとする弾性解析に基づいており、ライナについてはその強度を部材の耐力算定に考慮しないので直接モデルに組み込まない。

設計フローを図—9に示すが、各々の荷重に対し単独荷重応力を求め、軸力、モーメントおよびせん断力等の断面力の形で、先の荷重組合せにしたがって応力を組み合わせる。この場合、基礎部に用いたソリッド要素についても各要素の応力度を部材の断面力に変換する。

温度荷重については温度分布解析結果より得られた断面内温度をシェル要素では等価な温度勾配と平均温度差を設定して入力し、基礎部のソリッド要素では断面内温度を節点荷重として入力する。

プレストレス荷重は、鉛直逆Uテンドンおよびドームフープテンドンによるドーム部荷重を圧力荷重と節点荷重とし、円筒部半径方向荷重を圧力荷重として入力する。また、地震荷重に対しては、特に360°モデルの場合、地震力が作用することにより生ずる転倒モーメントによって基礎が支持地盤から部分的に浮き上がる現象を考慮し、基礎下端に設定したばねを解放する配慮をして

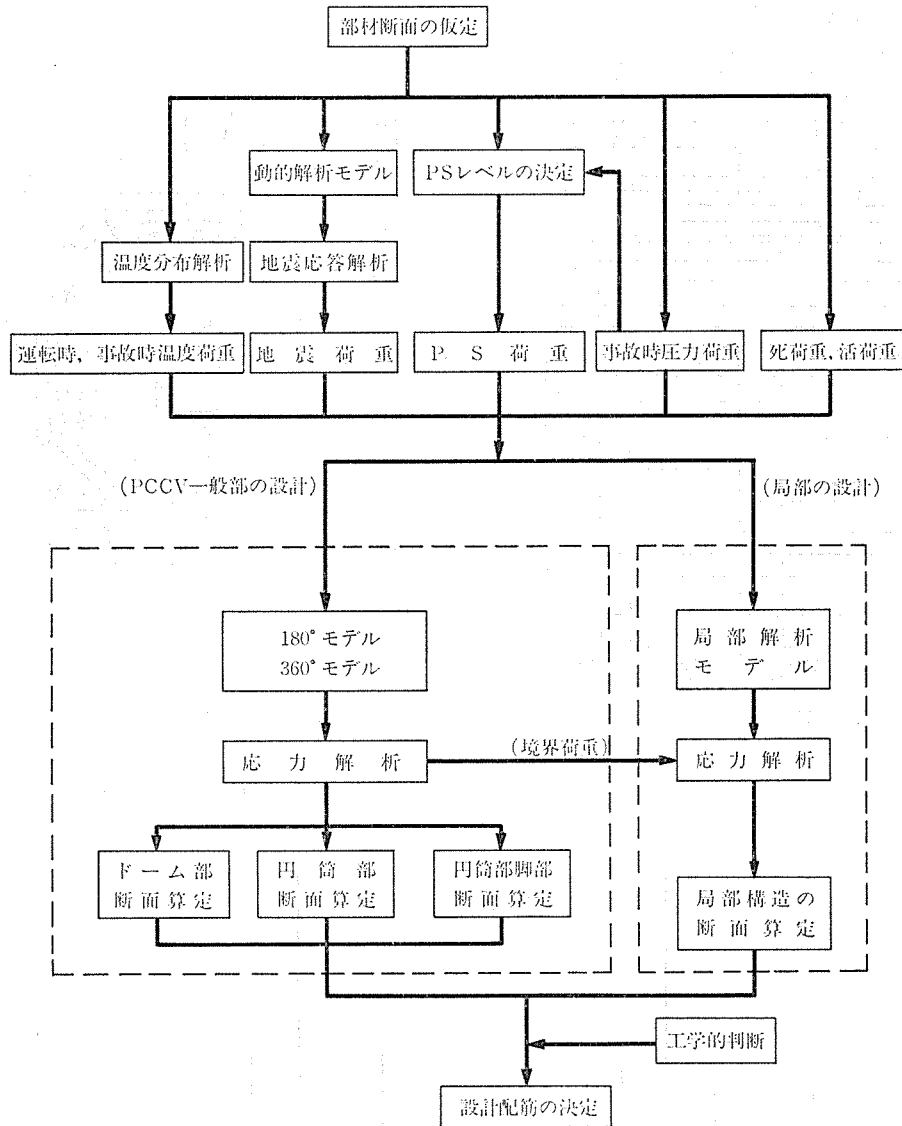


図-9 PCCV の設計フローチャート

いる。

応力解析結果の一例を 図-10 に示す。

応力の傾向は、プレストレス、内圧等の荷重に対しては膜力が卓越し、曲げモーメントは脚部等不連続部以外はほとんど発生していない膜構造の特徴を十分表わしている。例えば、プレストレス荷重による円筒一般部の円周方向膜圧縮応力度は約 85 kg/cm<sup>2</sup>、ドーム頂部鉛直方向膜圧縮力は約 50 kg/cm<sup>2</sup>、対して内圧によるものはそれぞれ膜引張応力度で約 65 kg/cm<sup>2</sup> および約 37.6 kg/cm<sup>2</sup> 等事故時でも全面膜圧縮状態にかつ許容応力度以下であることを示している。

次に、平均温度上昇熱応力は、PCCV が全体的に上部へ自由膨脹することから膜応力は生じないが、面外方向温度勾配に対しては、内側が変形拘束されるため曲げモーメントが卓越する。

また、地震荷重に対しては、フランジ部がオーバータ

ーンモーメントによる膜力、ウェブ部は面内せん断力がそれぞれ卓越する特徴を示している。

基礎部については、熱応力および地震時応力が代表的応力である。熱応力は PCCV 内部の基礎部が圧縮、外部のそれが引張応力の発生する傾向であり、基礎版厚 (8 m) が厚いため弾性応力は高応力となっている。地震時応力は PCCV を含む原子炉建屋の転倒モーメントによる地反力から面外曲げモーメントが卓越する。

## 5. 断面設計

各部の断面は、膜力と曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート仮想柱として算定する。この場合、膜力は同時に作用する面内せん断力の影響を考慮して次のような等価膜力として評価する。

$$N_{\phi, \theta}^* = N_{\phi, \theta} \pm |Q_t|$$

ここで、N\*：等価膜力

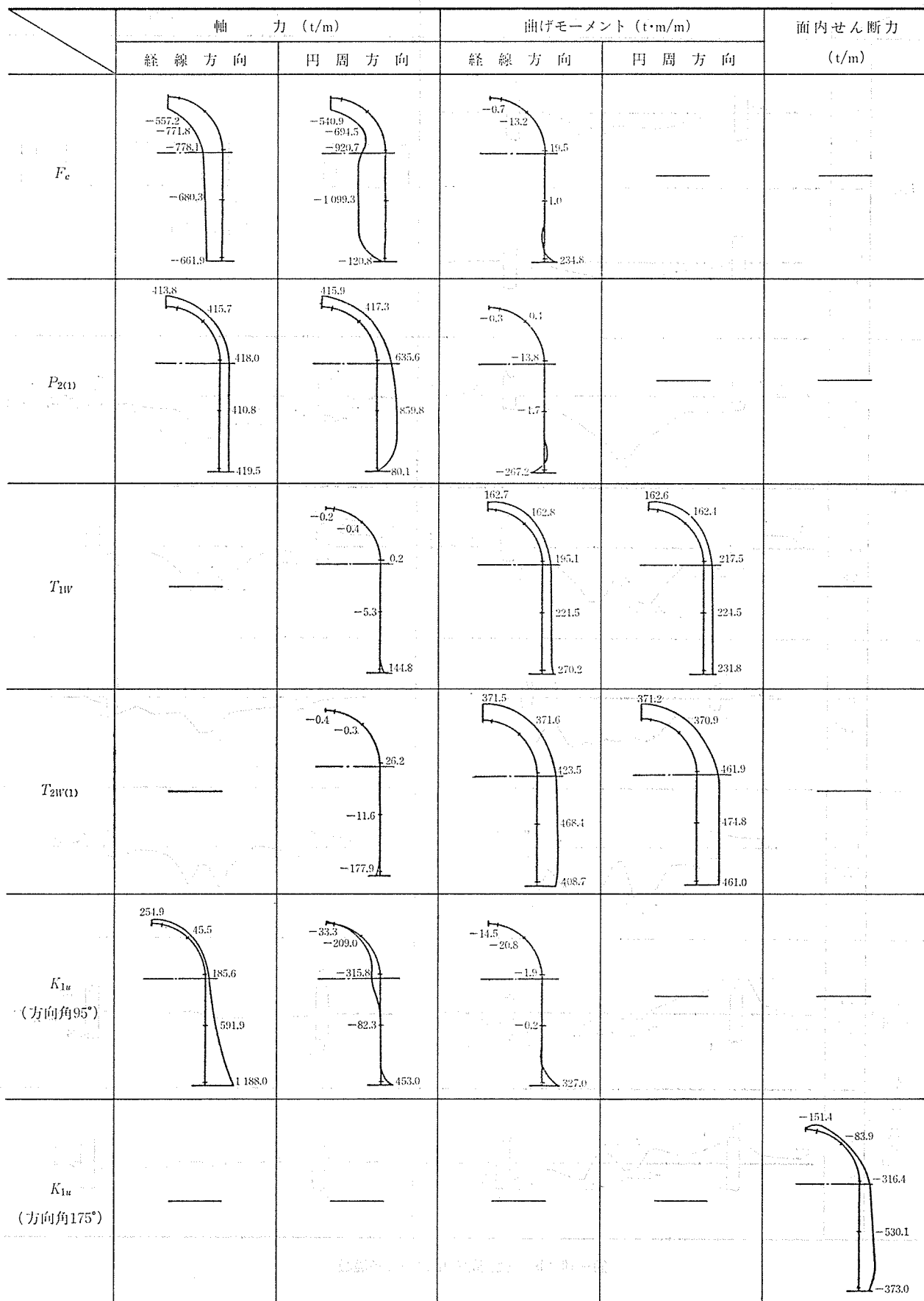
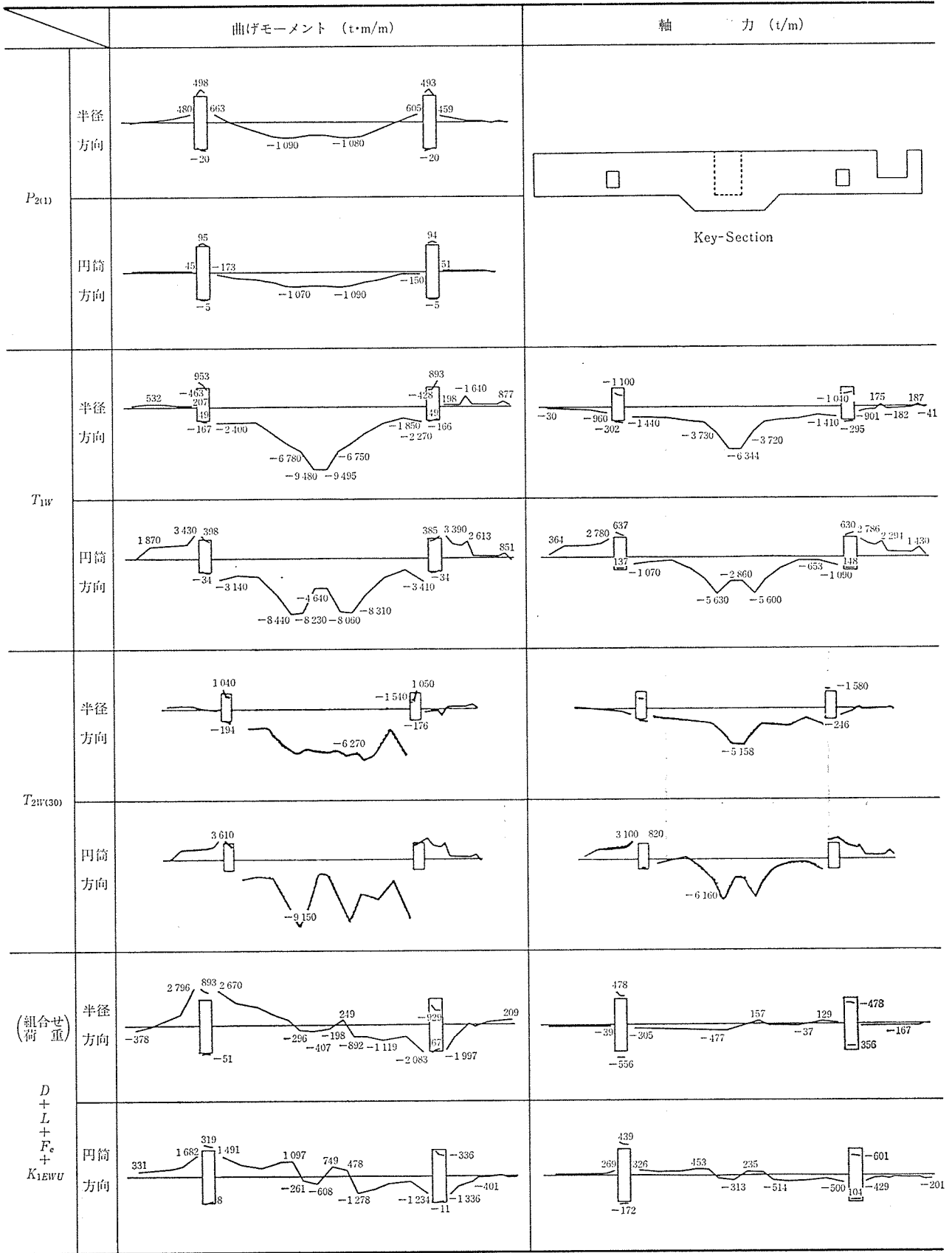


図-10 (a) 代表的な応力図 (PCCV)



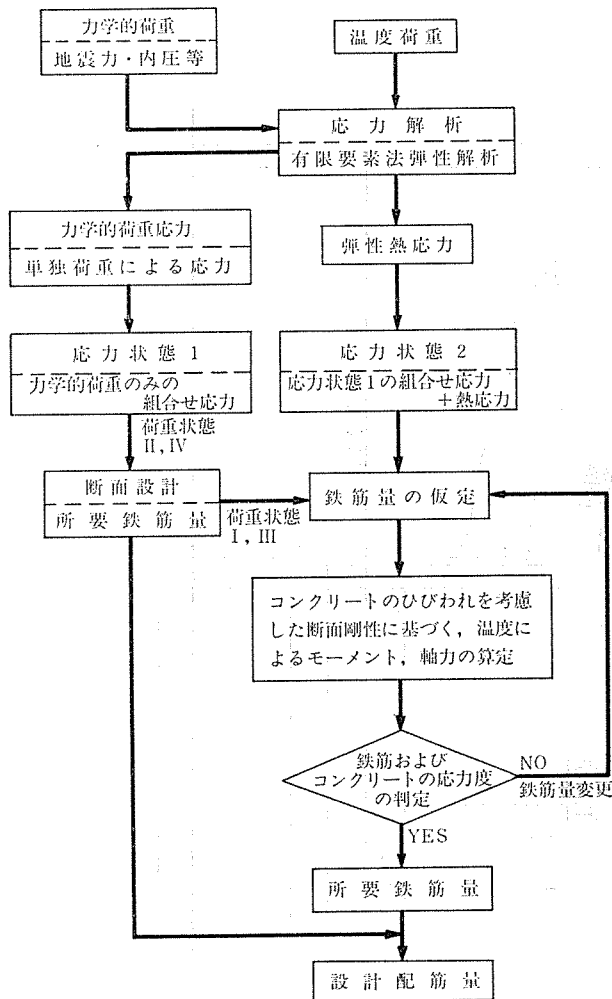
図—10 (b) 代表的な応力図 (基礎版)

表-8 (a) 断面設計結果 (PCCV)

部 位 位 置	方 位 角	荷 重 状 態	荷 重 時 名 稱	応 力 状 態 1		弾 性 温 度		応 力 状 態 2		残 存 温 度		残 存 率		設 計 配 筋				
				N(t/m)	断面内応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	N <sub>T</sub> (t/m)	N(t/m)	断面内応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ΔN <sub>T</sub>	ΔN <sub>T</sub> /N <sub>T</sub>	外 側	内 側						
				M(t·m/m)		M <sub>T</sub> (t·m/m)	M(t·m/m)		M(t·m/m)	ΔM <sub>T</sub>			ΔM <sub>T</sub> /M <sub>T</sub>					
1	135° (経線方向)	I	通常運転時	-780	ASP (9.6)	-917	1	-779	110cm (内)	-143	1	1.00	5-D29 @4° (31.6 cm <sup>2</sup> /m)	5-D29 @6° (21.1 cm <sup>2</sup> /m)				
				-15	AS (11.4)	-1020	162	151	110cm (外)	-1427	166	1.03						
		S <sub>1</sub> 地震時	-825		-951	1	-824		-144	1	1.00							
			-22		-1103	162	144		-1460	166	1.03							
		III	L事故時	-342		-376	2	-341	47	-150	1	0.45						
				-15		-489	370	144		-735	159	0.45						
		(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	-617		-702	6	-614	56	-219	3	0.50							
			-22		-864	452	231		-1422	253	0.60							
		IV	(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	-219		-88	—	—	—	—	—	—						
				-22		-165	—	—	—	—	—	—						
		P C C V 2	135° (経線方向)	I	通常運転時	-772	(63.6)	-55	15	-758	130	-131			13	0.88	5-D51 @4° (65.5 cm <sup>2</sup> /m)	5-D41 @2° (86.7 cm <sup>2</sup> /m)
						3	(46.1)	-749	220	233		-1298			230	1.04		
S <sub>1</sub> 地震時	28				202	15	31	18	-26	3	0.20							
	3				324	220	33		116	30	0.14							
III	L事故時			-368		-26	32	-352	54	-137	15	0.47						
				2		-357	466	215		-836	214	0.46						
(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	92				805	41	98	14	-49	6	0.15							
	3				894	592	68		371	65	0.11							
IV	(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時			432		3969	—	—	—	—	—	—						
				1		3894	—	—	—	—	—	—						
3	115° (経線方向)			I	通常運転時	-871	(228)	-101	11	-864	76	-178	7	0.64	10-D51 @2° (262.2 cm <sup>2</sup> /m)	10-D51 @2° (262.2 cm <sup>2</sup> /m)		
						228	(257)	-1065	272	470		-1513	242	0.89				
		S <sub>1</sub> 地震時	437		-168	16	443	35	-230	7	0.42							
			544		-200	269	725		-455	182	0.68							
		III	L事故時	-428		-259	18	-417	61	-133	10	0.56						
				-40		-355	410	348		-952	401	0.98						
		(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	504		-150	33	518	34	-241	14	0.42							
			501		-43	395	767		-415	266	0.67							
		IV	(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	854		755	—	—	—	—	—	—						
				281		2654	—	—	—	—	—	—						

表-8 (b) 断面設計結果(基礎版)

部 位	方 向	荷 重 状 態	荷 重 時 名 稱	応力状態 1		弾性温度		応力状態 2		残存温度		残存率		設計配筋				
				N(t/m)	断面内応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	N <sub>T</sub> (t/m)	N(t/m)	断面内応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ΔN <sub>T</sub>	ΔN <sub>T</sub> /N <sub>T</sub>	上端	下端						
				M(t·m/m)		M <sub>T</sub> (t·m/m)	M(t·m/m)		ΔM <sub>T</sub>	ΔM <sub>T</sub> /M <sub>T</sub>								
4	周	I	通常運転時	-42	AS (118)	-8	2 780	69	(上) 569	111	0.04	D51 @300 2段 (135 cm <sup>2</sup> /m)	D51 @200 (101 cm <sup>2</sup> /m)					
				8	ASP (94)	-10 -1	3 430	241	(下) 22	233	0.07							
		II	S <sub>1</sub> 地震時	269		3 046	2 860	429	3 727	160	0.06							
				1 680	51	-300 -24	3 390	1 673	17	-10 -19	-7			0.01				
		III	L事故時	33		203	3 020	102	777	69	0.02							
				54		96	3 540	302	107	248	0.07							
			(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	269		3 046	3 550	439	3 775	170	0.05							
				1 680	51	-300 -24	3 610	1 676	15	4 -8	-4			0.01				
		IV	(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	336		3 456	—	—	—	—	—							
				1 750	49	-159 -22	—	—	—	—	—							
		5	径	I	通常運転時	-32	(170) 15	-24 -117	-1 060	-380	(上) 97 345cm			-65 -636	-348	0.33	3-D51 @2'3段 (239 cm <sup>2</sup> /m)	3-D51 @2'2段 (159 cm <sup>2</sup> /m)
						-176	(39)	1 048	-488	-662	1 088			-486	1.00			
II	S <sub>1</sub> 地震時			276		2 204	-1 040	45	1 733	-232	0.22							
				695	39	-360 -44	-485	800	67	-708 -66	105	0.22						
III	L事故時			184		1 191	-1 190	-264	571	-448	0.38							
				321	24	-62 -14	-528	618	125	-654 -54	297	0.56						
	(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時			276		2 204	-1 443	-123	1 371	-399	0.28							
				695	39	-360 -44	-960	850	87	-849 -74	155	0.16						
IV	(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時			498		4 000	—	—	—	—	—							
				1 260	42	-570 -80	—	—	—	—	—							
6	径			I	通常運転時	-49	(65)	-1 -15	-1 160	-754	(上) 339 560cm	-43 -719	-705	0.61	D51 @200 (101 cm <sup>2</sup> /m)	D51 @200 (101 cm <sup>2</sup> /m)		
						-1	(76)	-15	-1 850	-1 379	234	-1 378	0.74					
		II	S <sub>1</sub> 地震時	129	50	-35 -333	-1 140	-62	81	-66 -854	-191	0.17						
				-905		3 109	-1 850	-1 510	3 441	-605	0.33							
		III	L事故時	69		898	-1 090	45	351	-24	0.02							
				122		140	-2 200	-1	297	-123	0.06							
			(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	129	50	-35 -333	-1 431	-123	86	-82 -1 076	-252	0.18						
				-905		3 109	-3 688	-1 848	3 919	-943	0.26							
		IV	(L事故+S <sub>1</sub> 地震)時	254	177	-31 -289	—	—	—	—	—							
				-787		688	—	—	—	—	—							



図—11 熱応力設計手順

N: 膜力

$Q_t$ : 面内せん断力

各組合せ荷重時の力学的荷重による応力である応力状態1と温度を含む応力状態2のそれぞれの設計応力に対して、コンクリートおよび鉄筋の応力度が基準(案)の規定の許容応力度以下になるよう、引張および圧縮側鉄筋量を増減する反復計算を行い、最適な鉄筋量を求める。熱応力の扱いは、弾性熱応力を力学的荷重と組み合わせて得られる断面内応力分布からコンクリートの引張応力部分の剛性が解放されるとし、その部分の応力を低減するひびわれ断面設計法によった(図—11)。

断面算定の結果の一部を表—8に示すが、以下のように要約できる。

(1) シェル部

イ. ドーム部は一般に地震力による影響が少ないため、事故時内圧が設計配筋を決める要因となっている。しかしながら、プレストレス力が平均で内圧の1.5倍以上確保されているため、荷重状態IVの(LOCA)時に対しても最小鉄筋でおさまっている。

ロ. 円筒一般部は、鉛直方向が状態IV(LOCA+S<sub>1</sub>地震)が支配的で、円周方向では地震力による影響が少ないため、またプレストレス力が内圧の1.31倍程度であるため、状態IV(LOCA)時が支配的荷重となっている。

ハ. 円筒脚部は基礎版の拘束効果をうける。円筒方向はプレストレス力が基礎版上端に近づくにしたがって減少し、その結果膜引張力が卓越する状態IIIの(LOCA+S<sub>1</sub>地震)時が支配的となる。鉛直方向についても、状態IIIの(LOCA+S<sub>1</sub>地震)時応力が卓越するが、プレストレス力による局部曲げモーメントが更に累加されて、外側鉄筋量が決定される。また内側は通常運転時荷重でプレストレス力によってもともと圧縮応力場であり、さらに熱応力による曲げ圧縮力が累加され、圧縮鉄筋量が多く必要としている部位として、大開口廻り、脚部などがある。

(2) 基礎部

イ. S<sub>1</sub>地震時および状態IVの(LOCA+S<sub>1</sub>地震)時など地震荷重が支配的となっているが、基礎版が厚いため最小鉄筋量で決定されている部位が多い。

ロ. テンドンギャラリ上部は(S<sub>1</sub>地震)、(LOCA+S<sub>1</sub>地震)時にPCCVの引抜き、押し込みなどによって複雑な応力状態を呈する。この部位については特に詳細検討を行い、主応力度に沿って配筋している。

特に引抜き時の面外せん断応力度が30kg/cm<sup>2</sup>前後の高応力度下であり、D38@200×400と大量の補強を行っている。

ハ. PCCVの外周部円周方向では、PCCV内の温度上昇に対し、外部は低温度であるためPCCV内から外へ膨張しようとする動きを止めようとする。

そのため円周方向に非常に大きな軸引張力が発生しているが、コンクリートのひびわれにより解放され、鉄筋剛性分のみ残存し、ほぼ100%低減されている。

この部位は熱応力の特性をよく表わしている。

6. 設計配筋

PCCVの場合、PS tendonが膜引張力を打ち消すか低減させるために導入されているのに対し、鉄筋はシェルの面外曲げ引張に対する補強を主目的としている。

面外曲げモーメントは、熱応力に起因する場合は主で、その他不連続部に発生する。

敦賀2号機の場合、耐震条件が厳しいことによるせん断補強筋が多い特徴があるが、これら多い鉄筋量を効果的に配筋するため最大径51mm(D51)を用いている。設計配筋パターンを定めるにあたり、以下の配慮をしている。

(1) シェル部

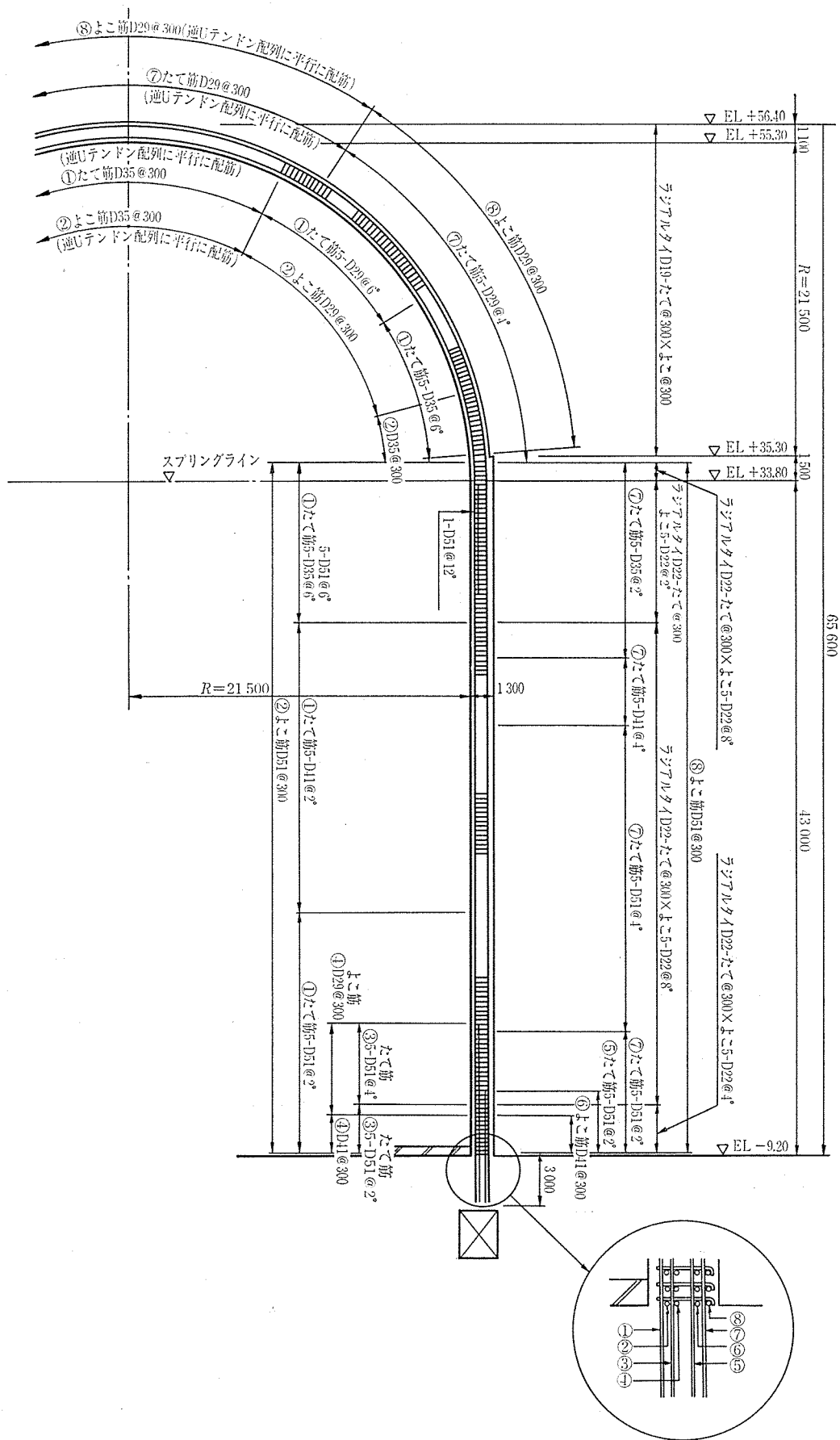
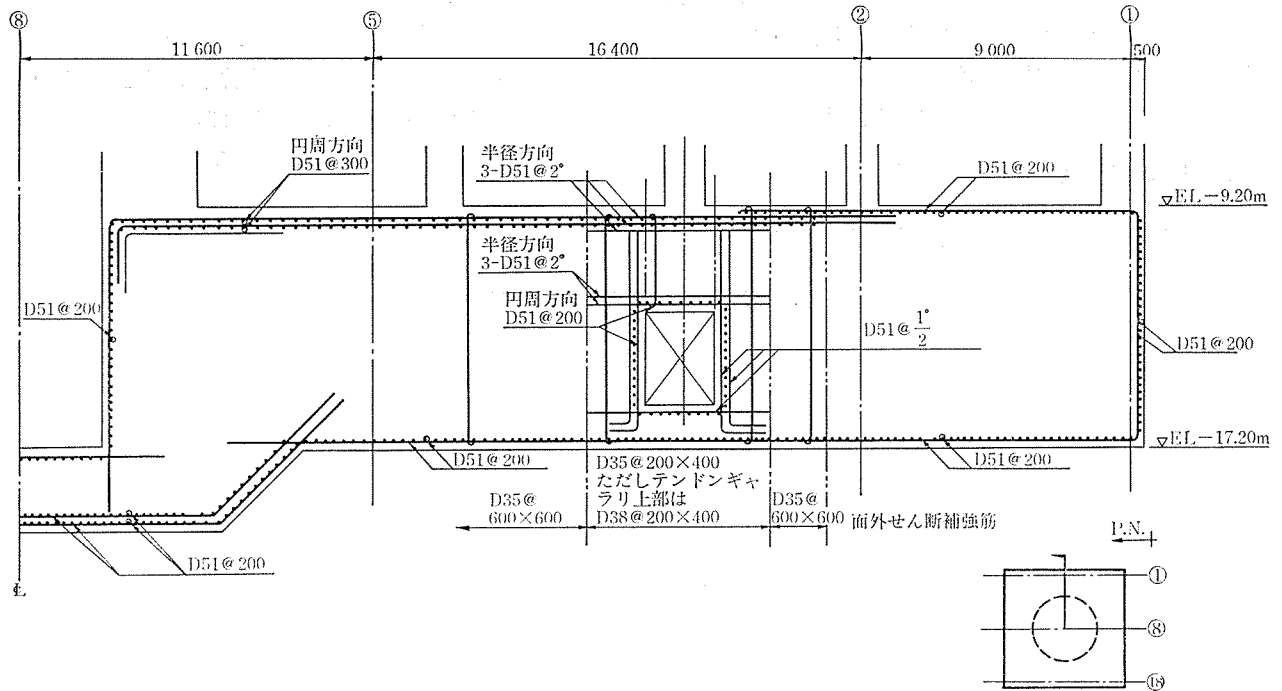


図-12 (a) 設計配筋概要図





図—12 (b) 基礎配筋概要図

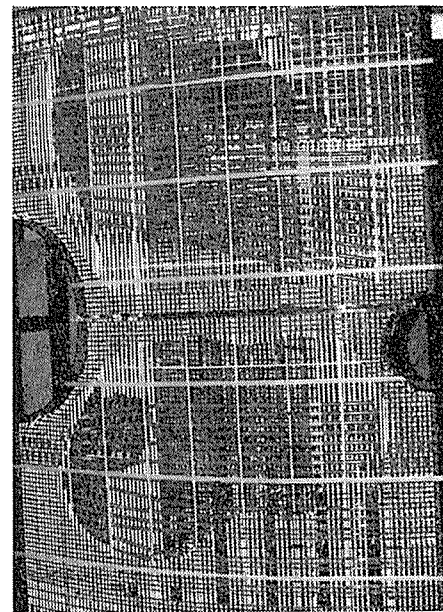
- イ. タテ筋は鉛直逆Uテンドン中心にして割り付け、2度に5本(約 @150)を基本パターンとする。
- ロ. ヨコ筋もタテ筋同様フープテンドン中心に割り付けテンドンピッチの @300, 600 交互であることから @300 を原則とする。
- ハ. タテ筋のサイズ切換えは断面算定位置より定着長を考慮し、また機械継手のカブラの制限から鉄筋のサイズ差を2ランク以下としている。
- ニ. ドーム頂部は仰角 45° までを放射、円周筋、それより上部はタテ、ヨコ筋とする(図—12 (a))。

(2) 基礎部

- イ. 上端筋は、PCCV 脚部からのタテ筋との干渉を避け、放射、円周筋を基本としている。なお下端筋はタテ、ヨコ筋とする。
- ロ. 上端筋は D 51@200-2 段、下端筋は D 51@200-1 段を基本とし、必要に応じ補強筋を追加する。

シェル部の大開口廻り、基礎版上端などは、太径鉄筋、テンドンシース、ライナアンカ金物、および機器のアンカボルトなどがコンクリート断面内に輻輳しており、これらの干渉回避が実施設計の苦勞とする所である。したがって鉄筋1本1本に番号をふり、その姿図を描くわけであるが、場合によっては実寸大で図面化したり、配筋模型を造り実機の施工手順を確認していくなど行った(写真—1)。

米国 PCCV の実績に比べ、敦賀2号機の鉄筋量が多い理由は、地震大国である我が国の場合、米国で最も耐



写真—1 開口部廻り模型写真

表—9 設計数量の比較

		コンクリート (m <sup>2</sup> )	鉄筋 (t)	テンドン (t)
日本	敦賀2号機	12000	2950	1470
米国	TROJAN	7800	1010	1021
	CALLAWAY	11000	1050	1220
	SAN ONOFRE	11200	1890	1000

震条件の厳しいサンオノフレにおいても、地震力が敦賀2号機の5割弱であり、地震力の差が設計配筋量に直接

影響していると考えられる。また熱応力を含む応力状態 2 のコンクリート圧縮許容応力度が米国より低いため、高圧縮応力度下の特に開口廻り、脚部など圧縮鉄筋で補強する必要が生じたためでもある（表—9）。

## 7. おわりに

本稿の諸資料は、日本原子力発電（株）の敦賀 2 号機

のために、三菱重工業（株）が米国ベクテル社に行わせた基本設計の資料に基づいて、三菱原子力工業（株）、（株）大林組、清水建設（株）、（株）竹中工務店が実施・作成した設計図書から要約したものである。多数の関係者に誌面を借りて深く感謝いたします。