

# プレストレストコンクリート製原子炉格納容器の設計について

牧 野 靖\*

## 1. はじめに

加圧水型原子力発電所には、原子炉の中で発生した熱から発電用タービンを駆動させる蒸気をつくるための一次冷却系があり、この系を構成する機器、配管等は原子炉格納容器の中に収納される。万一、配管破断などにより一次冷却材喪失事故が発生しても、この原子炉格納容器により周辺住民および運転員の安全が確保される。このように、原子力発電所の安全性確保に極めて重大な役割を果たしている格納容器は、これまで我が国に建設されたものはすべて鋼製であったが、海外では、コンクリート製のものが数多くみられる。

我が国においても、コンクリート製格納容器に関する諸研究が、十年来各方面で行われて来ており、設計を進める場合の指針として、資源エネルギー庁「原子力発

電用コンクリート格納容器に関する技術基準(案)」や日本建築学会「原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説」が作成された。一方、実機への採用も、発電出力の増大化につれ、真剣に検討されていたが、昭和54年3月に通産大臣宛設置許可申請を行った日本原子力発電(株)の敦賀2号機(加圧水型110万kW級)に、初めてプレストレストコンクリート格納容器(PCCV)が採用されることになった。

本稿では、この敦賀2号機を例に、前記指針類を参考にしつつ、プレストレストコンクリート製格納容器の設計のあらましを紹介してみる。

## 2. 構造概要

敦賀2号機の原子炉格納容器の断面図を図-1に、平面図を図-2に掲げる。

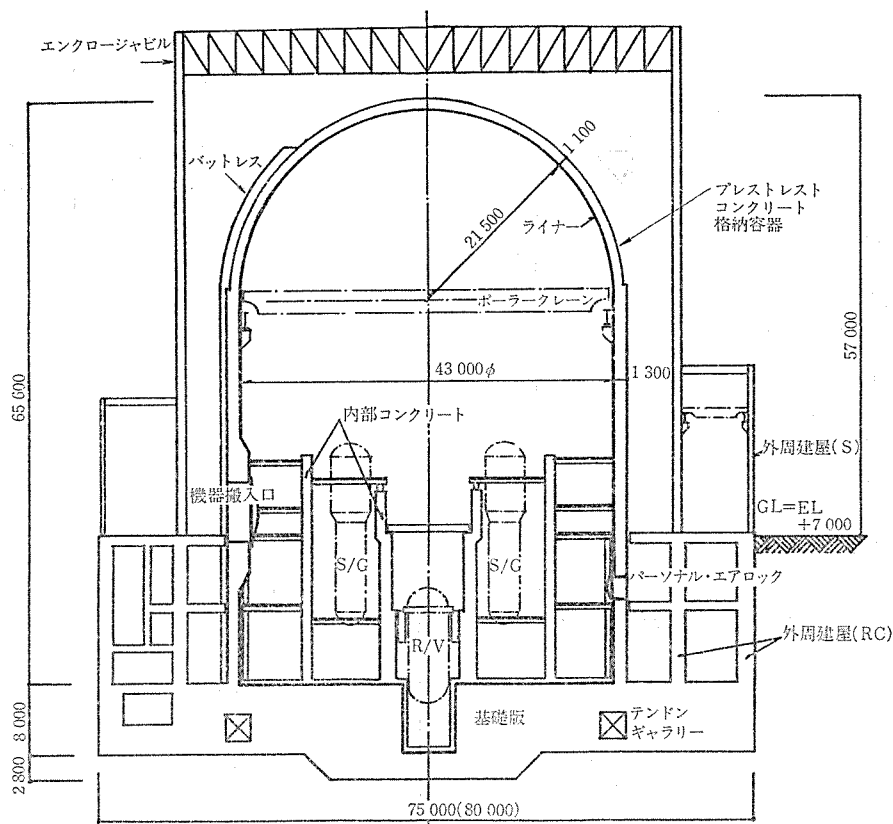


図-1 原子炉建屋断面図

\* 日本原子力発電(株)建設部土木建築課長

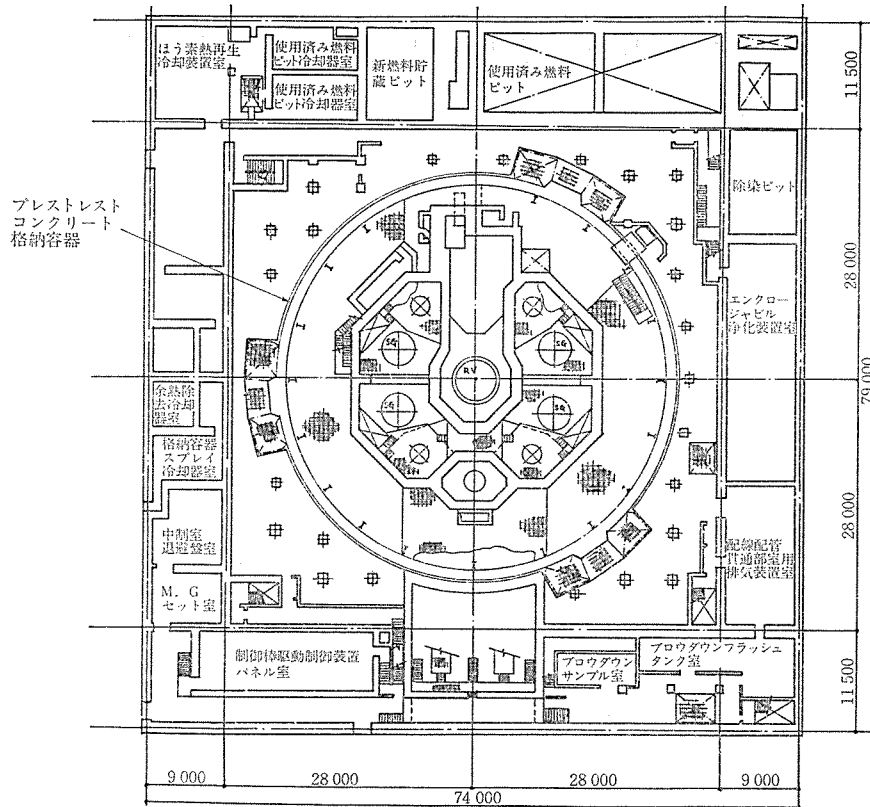
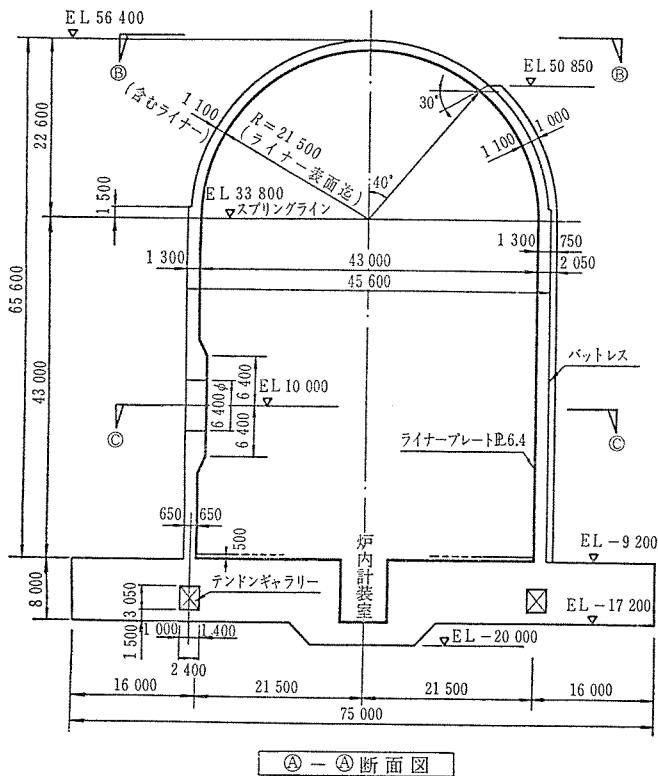
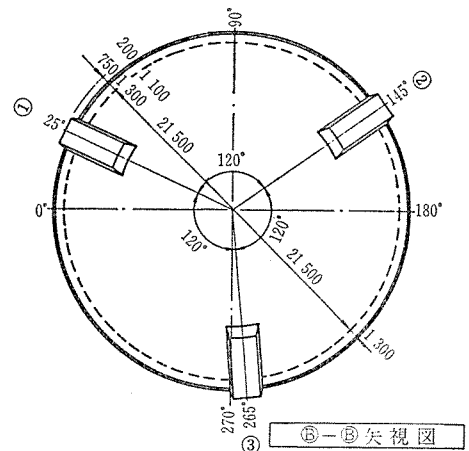


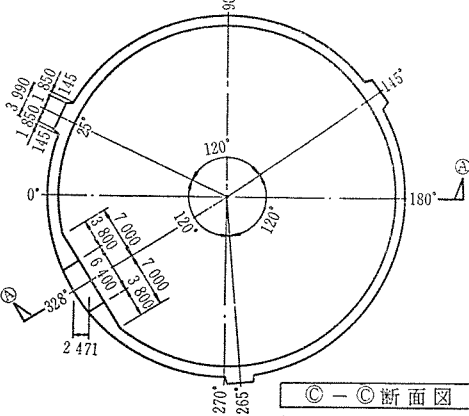
図-2 原子炉建屋平面図



①-①断面図



②-②矢視図



③-③断面図

図-3 形状寸法概要図

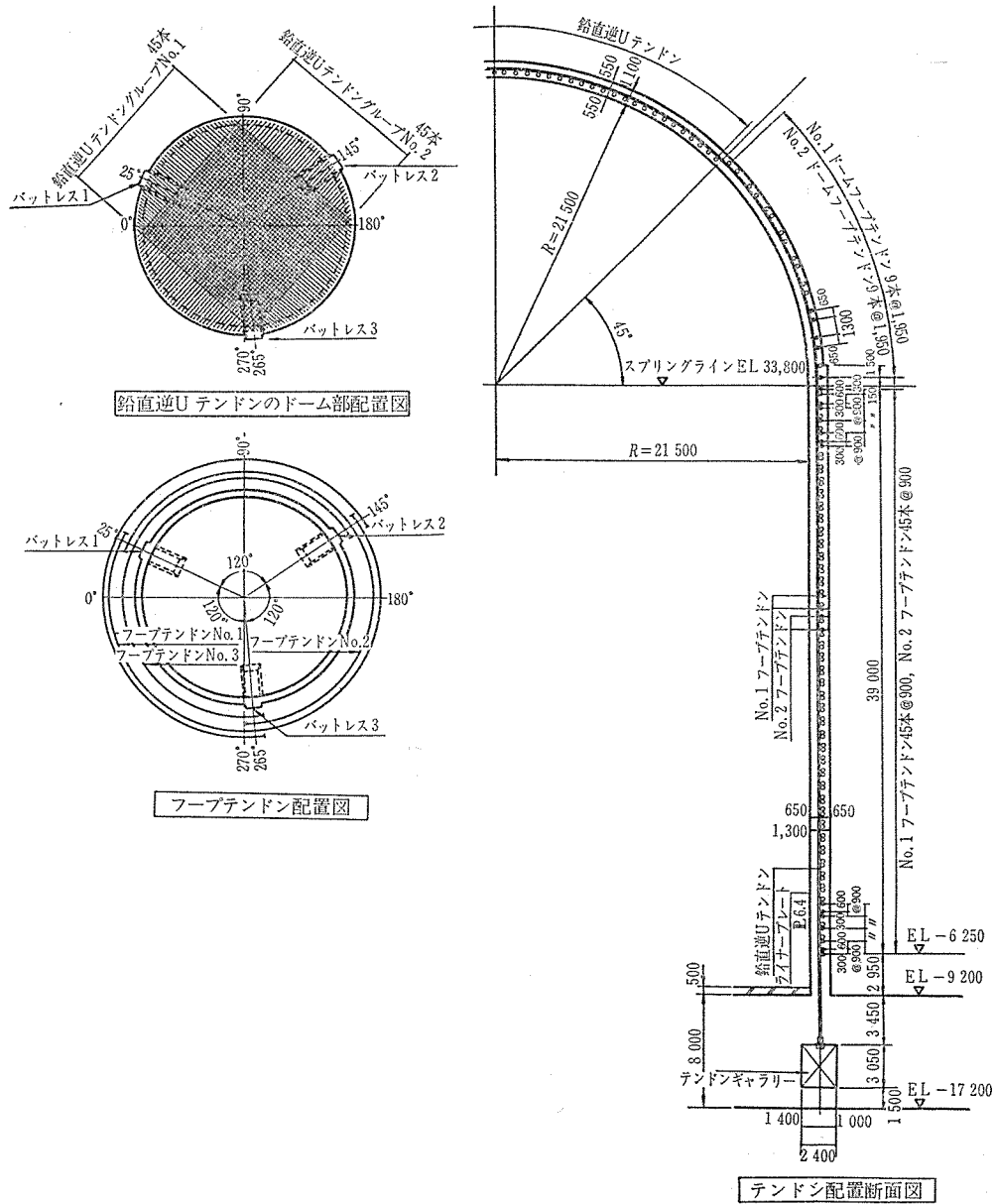


図-4 テンドン配置概要図

格納容器のコンクリート部分はさまざまな荷重を受け持つ構造材となるが、これは、上部が鉄骨造で下部が鉄筋コンクリートの原子炉建屋の中に設けられる。

コンクリート格納容器の上部シェルはプレストレストコンクリート部分で、底部基礎は鉄筋コンクリート部分から成る。これに気密性を確保する目的で容器内全面に鋼板製ライナー（厚さ 6.4 mm）が内張りされて全体が構成される。プレストレストコンクリートシェル部は、図-3 に示すように、内径 43 m、円筒部シェル厚 1.3 m とドーム部シェル厚 1.1 m である。

テンドンは BBRV 工法で、径 7 mm の PC 鋼線 163 本で構成する。この 1 本当りの耐力は約 1 000 t で

ある。テンドンは、図-4 に示すように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ーに定着する逆U形鉛直テンドンと、方位角 120° 毎に設ける 3 本のバットレスに、フープ状に 240° に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。

なお、このような半球ドーム、3 バットレス型、大容量テンドン採用の理由については、土木学会誌（1978 年 4 月号）のコンクリート格納容器の項に述べたので、本稿では省略するが、格納容器の寸法は、運転保守面からクレーンの吊代、点検スペースの確保等も詳細に検討して定めたものである。

# 設 計

## 3. 材 料

### 3.1 コンクリート

コンクリートの断面寸法と所要プレストレス力から検討し、設計基準強度を  $420 \text{ kg/cm}^2$  と定めた。部材厚さより見て打設時のコンクリートの硬化熱をできるだけ押さえることを目標とし、強度の発現に幅を持たせるために基準強度の材令は 91 日で管理することとした。これは全体工程からみて、コンクリート打設よりプレストレス力導入までの期間は最も短い個所でも 3 か月は確保できるので実現可能である。このように硬化中のコンクリート温度を低く押さえないこと、クリープ、乾燥収縮を少なくしてプレストレス力のロスを小さくしたいことから、できるだけ水量を少なくすることとしたが、ポンプ打ちによる必要水量に施工性の限度がある。この双方から打込み時のスランプを 8 cm、空気量を 4% にするという基本的配合条件を設定した。

表—1 コンクリート試験練要因

セメントの種類	普通, 中庸熱
フライアッシュ混入率 (%)	0, 15, 20, 25, 30
細骨材の種類	川砂, 砕砂+川砂, 砕砂+山砂
粗骨材の種類	川砂利, 山碎石
骨材最大寸法 (mm)	25, 40
水セメント比 (%)	35, 40, 45, 50, 55
スランプ (混練直後) (cm)	10, 14
混和剤の種類	AE 減水剤, 高分子減水剤

要因の組合せを表—1 のように整理し試験練を 50 種以上行った。これらの各種物性試験とともに、ポンプ圧送試験、パイプレーターによる締固め試験および実機の壁体で、鉄筋、テンドン、配管貫通孔などで錯綜している個所の現寸部分模型での打設試験などの施工性試験を行い、最終的にセメントは中庸熱ポルトランドセメント、水セメント比 45%、フライアッシュ混入率 20%、細骨材率 43% ならば、福井県内の碎石骨材で、前記基本的配合条件を充足できるとの見通しを得て、表—2 に示す基本配合を定めた。

表—2 コンクリート基本配合

設計基準強度	$420 \text{ kg/cm}^2$	中庸熱セメント	$290 \text{ kg/m}^3$
材 令	91 日	フライアッシュ	$72 \text{ kg/m}^3$
スランプ (打込時)	8 cm	水	$163 \text{ kg/m}^3$
水セメント比	45%	細 骨 材	$745 \text{ kg/m}^3$
骨材最大寸法	25 mm	粗 骨 材	$1\,014 \text{ kg/m}^3$
フライアッシュ混入率	20%	混 和 剤	$0.905 \text{ kg/m}^3$

### 3.2 PS システム

原子力発電所の設計では「安全上重要な構築物、系統および機器は、それらの健全性および能力を確認するた

めに、その重要度に応じ、原子炉の運転中に試験および検査ができるか、または、原子炉の定期点検停止時もしくは燃料取替え停止中に適切な方法により試験および検査ができる設計であること」が一つの重要な条件となる。

この条件をプレストレスコンクリートに適用した場合、格納容器の構造的健全性は所定のプレストレス力がプラント寿命中確実に導入されているか否かの確認が必須となり、米国においては完成後 1 年、3 年、5 年、10 年、以降 5 年毎に、数本のテンドンを任意に取り出し、リフト・オフ試験によるプレストレス力の経年変化、鋼線の抜取り強度試験による材料劣化の有無を調べることにしている。

敦賀 2 号機は、我が国最初の事例であることから考えて、このような米国流の使用中心試験を前提とすべきであるとの考えから、米国において最も実績の多いアンボンド—BBRV 工法を採用することとした。またテンドンの鋼材量を少なくすることが、コンクリートの打設性を良くすると判断から国内メーカーの製造実績を確認のうえ表—3 に示すとおり強度およびリラクセーション値の双方とも JIS 規格値より 1 ランク上の材料を使用することとした。

表—3 PC 鋼線物性値

引張強度	$165 \text{ kg/mm}^2$ 以上
降伏強度	$145 \text{ kg/mm}^2$ 以上
リラクセーション値	1.5% 以下 (1000 時間)

### 3.3 鉄 筋

PCCV は、荷重の種々の組合せを考慮した設計が要求されている。これらのすべてに対してフルプレストレス状態を確保することは不可能であり、鉄筋による補強が必要となる。

敦賀 2 号機では多い鉄筋量を効果的に配筋するために、最大径は 51 mm、材質は SD 40 の鉄筋を使用することとした。物性値を表—4 に示す。

表—4 鉄筋物性値 (JIS G 3112)

引張強度	$57 \text{ kg/mm}^2$ 以上
降伏強度	$40 \text{ kg/mm}^2$ 以上
伸 び	16% 以上 (2号試験片に準ずるもの)
	18% 以上 (3号試験片に準ずるもの)

### 3.4 許 容 値

許容値としてコンクリート、鉄筋、PC 鋼材では以下のものを用いている。許容値は次の状態に分類して適用する。

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

(1) コンクリート

表—5 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 II	0.33 $F_c$	0.45 $F_c$
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>)

応力状態 1: 温度以外の荷重による応力状態

応力状態 2: 温度を含む全荷重による応力状態

コンクリートの圧縮に対する許容応力度は表—5による。

(2) 鉄筋

鉄筋の許容応力度は表—6による。

表—6 鉄筋の許容応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

荷重状態	引張および圧縮 (kg/cm <sup>2</sup> )					
	SR24	SR30	SD30	SD35	SD40	溶接金網
I II	1600	2000	2000	2000	2000	2000
III	2400	3000	3000	3500	4000	—

(3) PC 鋼材

PC 鋼材の許容応力度は表—7による。

表—7 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	説明
I	0.75 $F_u$	$F_u$ : プレストレス鋼材の規格引張強度 $F_y$ : プレストレス鋼材の規格降伏点強度
II	または	
III	0.85 $F_y$	

4. 荷 重

敦賀2号機の格納容器は、原子炉建屋の一部であり、基礎版との接合部を除き、周囲の構造物と絶縁された状態で囲まれているため、雪、風、土圧による荷重は直接負荷されないため、設計上は次の荷重を考慮することとした。

(1) 死荷重—D

コンクリートシェル部の総重量はライナーを含めて約28300tである。

(2) 活荷重—L

クレーンガーダーおよびブラケットとして440t、クレーンブリッジおよびトロリー440t、計880tを活荷重と名付けているが、実質は死荷重であり、全体設計ではD+Lは一定として取り扱う。

(3) プレストレス荷重—F

PCCVの設計では、はじめに導入すべきプレストレス力を定める必要がある。

敦賀2号機では、建設直後の耐圧試験を、設計内圧の1.15倍とする必要があること、地震時の転倒モーメントによる鉛直方向引張力がかなり大きくなることから、最終的なプレストレス力は少なくともフープ方向は設計内圧の1.2倍以上、鉛直方向は1.3倍以上を保持することとした。したがって導入力はこれに各種のプレストレスロスを考慮のうえ40年後にも設計プレストレス力が確保できることを目的とした。

1) テンドン配置

設計プレストレス力から本数およびピッチを求めることと表—8のようになる。このテンドン配置の概要は図—4に示すとおりである。

表—8 テンドン本数

	本数	ピッチ
鉛直逆Uテンドン	90	2°ピッチ @ 77.3 cm
シリンダー部フープテンドン	135	@ 30 cm + 60 cm
ドーム部フープテンドン	27	@ 65 cm + 130 cm

2) テンドンの緊張力

有効プレストレス力は、下記のとおり定める。

a. 緊張中および定着完了後のPC鋼材の許容引張応力度

緊張中 0.75  $f_{pu}$  かつ 0.85  $f_{py}$  の小なる方  
(123.3 kg/mm<sup>2</sup>)

定着完了後 0.75  $f_{pu}$  かつ 0.80  $f_{py}$  の小なる方  
(115.5 kg/mm<sup>2</sup>)

b. 摩擦ロスを考慮したテンドン張力

摩擦ロスの評価は、下式による。

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

$T_l$ : テンドン緊張端から任意の距離  $l$  の位置のテンドン張力

$T_0$ : 緊張端での最大張力

$\mu$ : テンドンの角度変化による摩擦係数  
(0.14/rad)

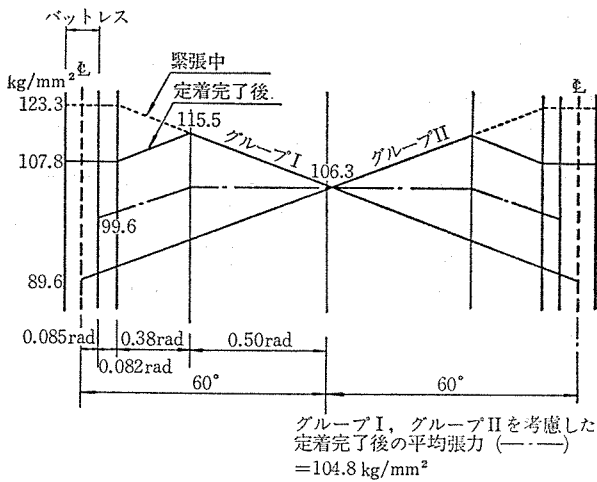
$\alpha$ : 緊張端から  $l$  の位置までのテンドンの全角度変化

$\lambda$ : シースの波打ちによる摩擦係数 (0.001/m)

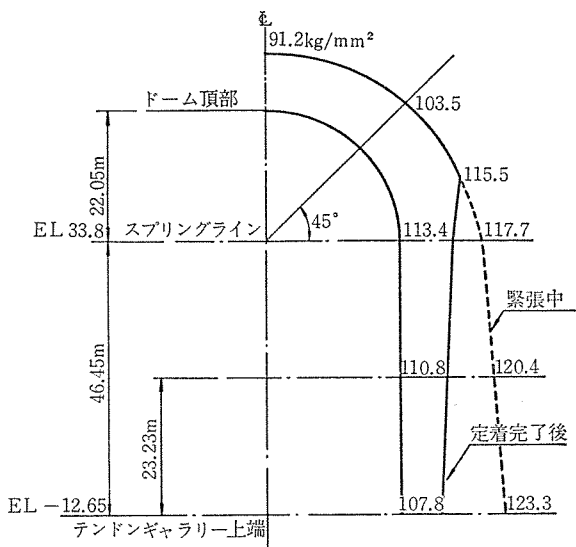
$l$ : 緊張端から  $l$  の位置までのテンドン全長さ  
摩擦ロス評価後のフープテンドンおよび鉛直逆Uテンドンの張力は、各々図—5および図—6のとおりである。

c. 弾性変形ロス、リラクセーションロス、クリープロス、乾燥収縮ロス

設 計



図—5 フープテンドン張力



図—6 鉛直逆Uテンドン張力

各々のロスに対する評価は下式による。

- コンクリートの弾性変形によるロス ( $\Delta f_1$ )

$$\Delta f_1 = \frac{1}{2} n \sigma_c$$

- ワイヤーのリラクセーションによるロス ( $\Delta f_2$ )

$$\Delta f_2 = r f_1 \left( 1 - 2 \times \frac{\Delta f_3 + \Delta f_4}{f_1} \right)$$

- コンクリートのクリープによるロス ( $\Delta f_3$ )

$$\Delta f_3 = \frac{n \times \phi(t, t_0) \times \sigma_c}{1 + n \times \frac{\sigma_c}{f_1} \left[ 1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0) \right]}$$

- コンクリートの乾燥収縮によるロス ( $\Delta f_4$ )

$$\Delta f_4 = \frac{E_p \times \epsilon_s(t, t_0)}{1 + n \times \frac{\sigma_c}{f_1} \left[ 1 + \frac{1}{2} \phi(t, t_0) \right]}$$

ここに、

$\sigma_c$ : 初期平均コンクリート応力度

$f_1$ : テンドンの初期平均張力

$n$ : ヤング係数比 ( $E_p/E_c$ )

$E_p$ : テンドンのヤング係数 ( $2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ )

$E_c$ : コンクリートのヤング係数 ( $3.04 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ )

$r$ : ワイヤーのリラクセーション係数 (40年後 4.0%)

$\phi(t, t_0)$ : コンクリートのクリープ係数 (40年後 1.80)

$\epsilon_s(t, t_0)$ : コンクリートの乾燥収縮係数 (40年後  $180 \times 10^{-6}$ )

40年後のテンドン有効張力に対するロス は表—9 に示すとおりである。

表—9 40年後のテンドン有効張力に対するロス (kg/cm<sup>2</sup>)

	フープテンドン	鉛直逆Uテンドン
弾 性 ロ ス	3.7	2.6
リラクセーションロス	3.0	3.4
ク リ ー プ ロ ス	11.7	8.6
乾 燥 収 縮 ロ ス	3.2	3.3
ロ ス の 合 計	21.6	17.9
設 計 用 ロ ス	22.0	18.0

d. 40年後の有効テンドン張力

40年後の有効テンドン張力は表—10 に示すとおりである。

表—10 40年後の有効テンドン張力 (kg/cm<sup>2</sup>)

	位 置	定着完了後のテンドン張力	ロス	40年後の有効張力
フテンドンブド	シリンダー部	104.8	22	82.8
	ドーム部	104.8	22	82.8
鉛直逆Uテンドン	ドーム頂部	91.2	18	73.2
	スプリングライン	113.4	18	95.4
	シリンダー中央	110.8	18	92.8
	定着部	107.8	18	89.8

e. 有効プレストレス力 ( $F_e$ )

有効プレストレス力によって PCCV に生じる概略平均外圧相当量は、円筒部フープテンドンおよび鉛直逆Uテンドン頂部について、各々表—11 に示すとおりである。下表に示すとおり設計内圧1.2倍以上のプレストレス力が導入されている。

表—11 有効プレストレス力

	フープテンドン (円筒部)	鉛直逆Uテンドン (ドーム頂部)	備考
設計内圧に対する比率	$1.29 P_2$	$1.34 P_2$	$1.2 P_2$
外圧相当量 (t/m <sup>2</sup> )	51.6	53.9	48.0

(4) 通常運転時温度荷重— $T_1$

通常運転時の壁体内温度分布は、図—7 に示すように、格納容器の内外の雰囲気温度の季節的変動に伴って

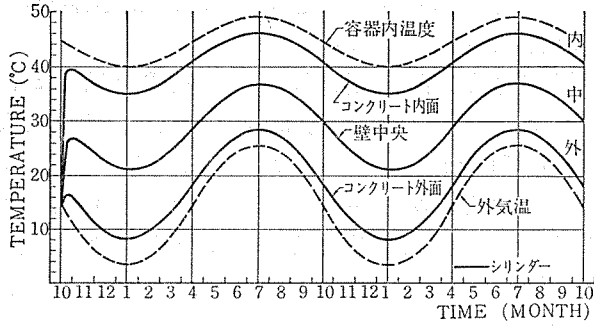


図-7 格納容器円筒脚部の運転時の温度変化

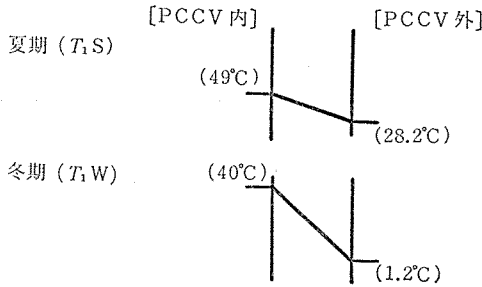


図-8 通常運転時温度荷重 (T<sub>1</sub>) の仮定

周期的に変化するが、設計上は、図-8のように安全側に単純化した温度分布を仮定する。このうち、温度勾配が大なる冬期を実質的には通常運転時温度荷重算定用の温度分布としている。

(5) 通常運転時内圧—P<sub>1</sub>

通常運転時には、格納容器内の換気系の給排气量の変動を考慮し、0.1 kg/cm<sup>2</sup>の内圧を考慮するが、この値は前述のPS荷重、後述の事故時内圧に比して極めて小さいため実設計の荷重組合せには含めない。ただし、配筋設計完了後、この荷重を考慮すべき事象で設計されている断面については、その影響の有無をチェックする。

(6) 事故時荷重

格納容器の第一義的な機能は、一次系配管の仮想的破断によって生ずる圧力、湿度に抵抗することにあるが、その現象を次のような設計荷重とに考慮している。

1) J事故時荷重—J

仮想配管破断荷重は図-9のように格納容器に作用するとして算出するが、敦賀2号機の場合は表-12の値を設計値としている。また、液体最高温度は約290°Cである。なお、この荷重は、局部的に載荷され

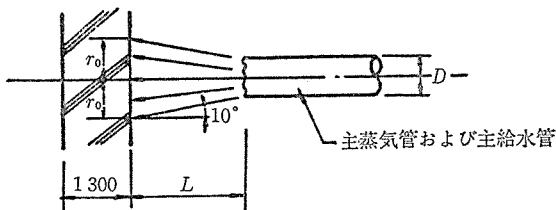


図-9 ジェット荷重の作用する部分

表-12 格納容器が受けるジェット荷重一覧表

破断想定配管	運転圧力 P <sub>0</sub> (abs)	放出液体	距離 L	破断口径 D	破断面積 A <sub>0</sub>	ジェット荷重 R <sub>s</sub>	作用直径 r <sub>0</sub>
(単位)	kg/cm <sup>2</sup>		cm	cm	cm <sup>2</sup>	t	cm
主蒸気管	77.8	蒸気	200	64.32	3249.	629.	134.8
主給水管	77.8	加圧水	150	36.36	1038.	201.	89.3

るのみなので、局部解析に用いることとし、全体設計の荷重の対象とはしない。

2) L事故時内圧 (設計内圧)—P<sub>2</sub>

一次冷却材そう失事故 (L事故) 後の格納容器内部の圧力変動を解析すると図-10のようになるが、これを余裕をみて単純化し、事故発生後1時間と24時間後を次のように仮定する。

$$P_2(1) = 4.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_2(24) = 0.64 \text{ kg/cm}^2$$

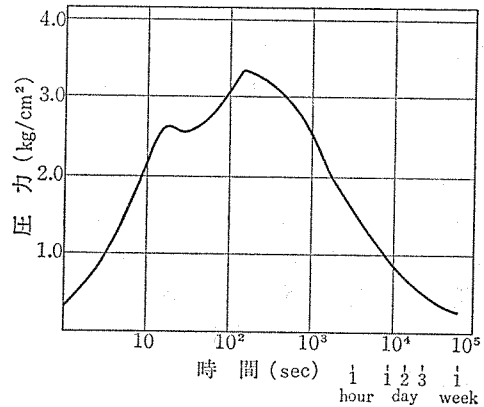


図-10 L事故後の格納容器内圧力の変化

3) L事故時温度荷重—T<sub>2</sub>

圧力と同様、事故後の格納容器内部の温度変動を解析すると図-11のようになるが、これを入力条件としてコンクリート壁体内部の温度分布解析を行い、設計用温度勾配として図-12のように仮定する。

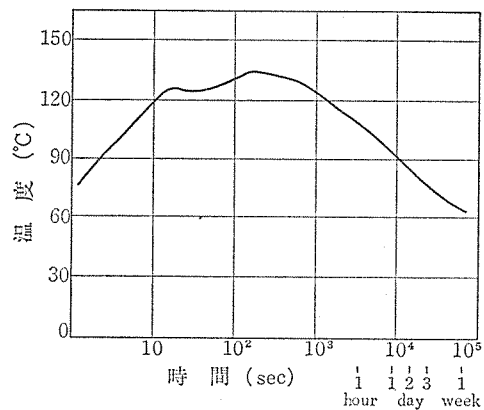
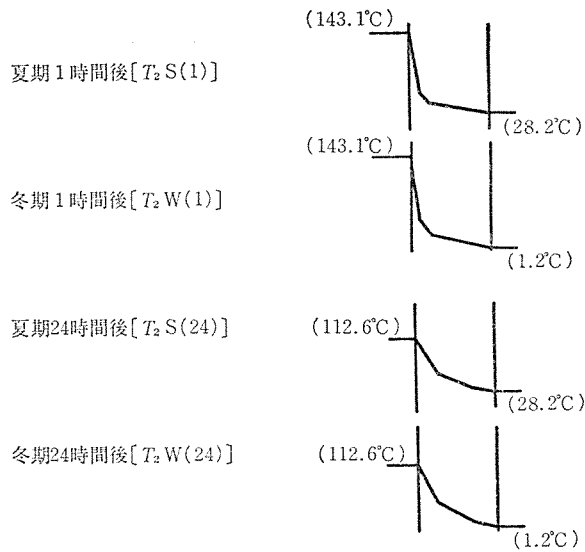


図-11 L事故後の格納容器内温度の変化



図—12 L事故時温度荷重 ( $T_2$ ) の仮定

(7) 試験時圧力— $P_0$

耐圧試験時に加圧する最大圧力は、設計内圧  $P_2(1)$  の 1.15 倍、すなわち、 $4.6 \text{ kg/cm}^2$  とする。

(8) 配管貫通部荷重

格納容器には、大小取り混ぜて 100 個以上の配管貫通部が設けられ、この部分に加わる荷重は、配管の種類大きさによりグループ分けして算定する。

(9) 地震時荷重— $S_1$  および  $S_2$

原子炉格納施設のように安全上重要な構造物の設計に際しては、最強地震  $S_1$  (起こることを予期することが適切と考えられる地震のうち敷地の基盤に最強の地震動を与える地震) と限界地震  $S_2$  (起こることが可能と考えられる地震のうち、敷地の基盤に最強の地震動を与える地震) の二つの地震動を考慮しなければならない。こ

れらを考慮して定められた地震動による動的応答解析により地震力が求められる。

敦賀 2 号機の子備設計に用いた地震荷重を 図—13 に示す。 $S_1$  のベースせん断力係数は 1.45 となり極めて大きな地震動を仮定している。なお、この予備設計の  $S_2$  は、減衰常数を  $S_1$  より大きく仮定した一種の等価線型応答解析値であるが、実施設計では、 $S_1$  地震、 $S_2$  地震双方に対し、さらに合理的な応答解析を行う予定である。

(10) 荷重組合せ

設計に用いる荷重の組合せおよび荷重係数は、表—13 による。

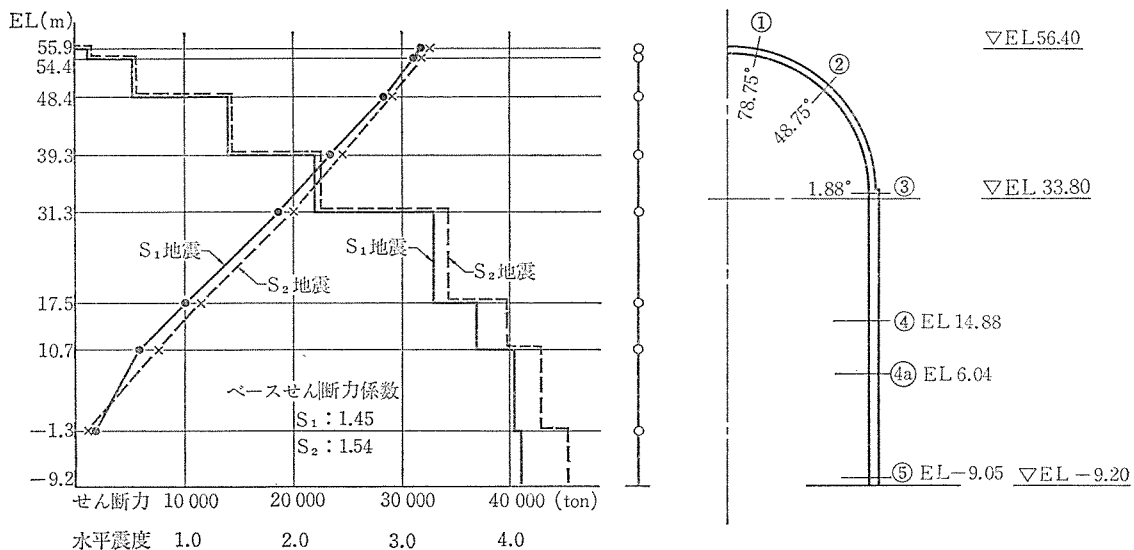
表—13 荷重の組合せ

荷重状態	荷重時称	応力状態 1	応力状態 2
I	通常運転時	$D+L+F$	$D+L+F+T_1$
II	試験時	$D+L+F+P_0$	—
III	$S_1$ 地震時	$D+L+F+K_1$	$D+L+F+K_1+T_1$
	L 事故時	$D+L+F+P_2$	$D+L+F+P_2+T_2$
IV	$S_2$ 地震時	$D+L+F+K_2$	—
	L 事故時	$D+L+F+1.5P_2$	—
	J 事故時	$D+L+F+J$	—
	L事故+ $S_1$ 地震	$D+L+F+P_2+K_1$	—

5. 応力解析と断面算定

5.1 解析法概要

応力解析は FEM モデルにより各種荷重を用いて行われている。FEM モデルは格納容器全部を対象とした全体モデルと、このうちから部分的にりと出し詳細解析に用いた部分モデルとを併用している。全体モデルの応力解析は立体有限要素法応力解析を用いる。その解析モデルは 図—14 に示すような円筒部および半球ドーム部



図—13 設計用地震力



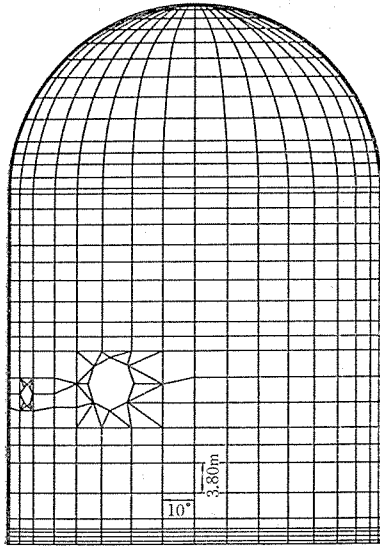


図-14 FEM 180° モデル図

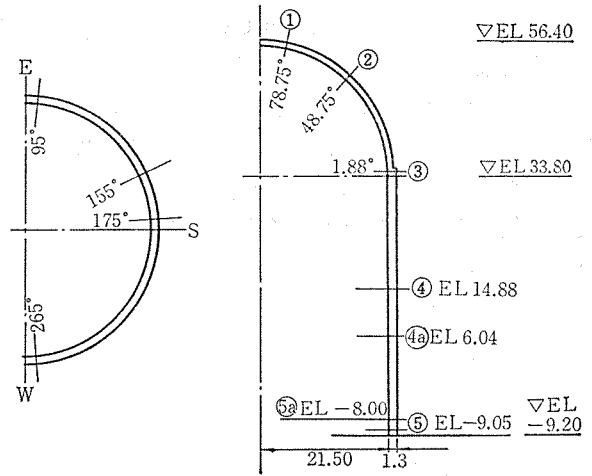
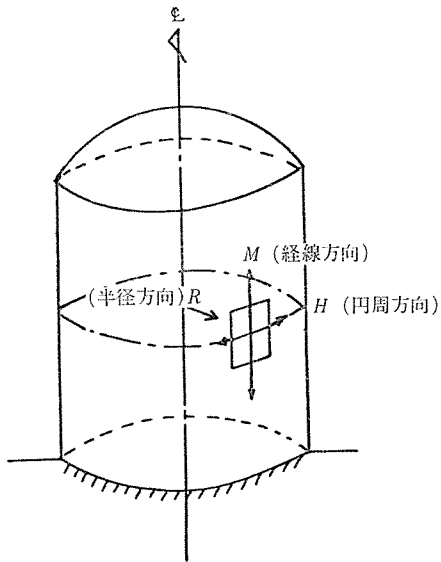
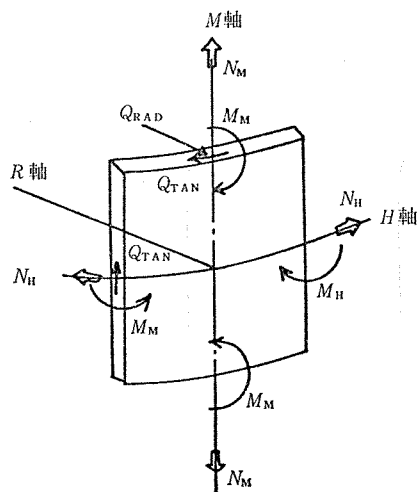


図-15 応力表示位置



記 号

- $N_M$  : 経線軸直交断面に働く経線方向の単位長さ当り軸力
- $N_H$  : 円周軸直交断面に働く円周方向の単位長さ当り軸力
- $Q_{TAN}$  : 経線軸直交断面に働く円周方向の単位長さ当りのせん断力および円周軸直交断面に働く経線軸方向単位長さ当りのせん断力
- $M_M$  : 経線軸直交断面に働く円周軸まわり単位長さ当りのモーメント
- $M_H$  : 円周軸直交断面に働く経線軸まわり単位長さ当りのモーメント
- $Q_{RAD}$  : 経線軸直交断面に働く半径方向の単位長さ当りのせん断力



符 号

- 軸力 + 引張
- 圧縮
- モーメント + 内面が圧縮となるモーメント
- 内面が引張となるモーメント

図-16 記号および符号の説明

設 計

を平面的に2分割した180°モデルである。バットレスおよび機器搬入口とパーソナルロックの開口部を含めてモデル化し、基礎版上端面におけるPCCV基部の境界条件は固定とする。なお、PCCV基部の応力は基礎版の拘束効果を考慮するため、基礎版の応力解析に用いる別のモデルに含めてモデル化し得られた結果を使用する。180°モデルに使用する有限要素は、PCCV一般部をシェル要素、バットレスを梁要素に置換し、これらの要素の集合体としてPCCV全体の立体有限要素モデルを作成する。荷重としては死荷重と活荷重についてはそれぞれ相当分を節点に入力する。プレストレス荷重については、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および節点荷重とし、また、円筒部半径方向荷重を圧力荷重として入力する。温度荷重については温度分布解析により定めるものとし、特に過渡時温度に対しては断面に生ずるモーメントおよび平均温度が等しくなるように等価な直線温度勾配を設定し入力する。地震荷重についてはPCCV各位置

で設計せん断力を生じるように節点荷重を定めて入力する。立体有限要素法応力解析により求める部材応力は、各荷重に対して軸方向力、曲げモーメント、ならびに面内および面外せん断力とする。詳細解析ではこの全体モデルのほかに大開口部に部分モデルが用いられている。応力解析は、このようなFEMモデルによるもののほか、理論計算各種実験などを参照して配管貫通部、PSシステム定着部などの局部応力を求めて設計を行っている。

5.2 応力計算

各荷重を単独に応力計算する。単独荷重の応力解析には、死+活荷重、プレストレス、圧力、温度、地震をそれぞれ別々に計算する。この応力解析の代表例を図-15、図-16、図-17(1)、(2)に示す。これらの単独応力を加え合わせて組合せ応力を作成する。この場合の組合せ方法および係数は、表-13に述べた数値によって行う。組み合わせられた数値に対し応力度の程度を示すために膜力と曲げについてコンクリートの全断面が有効とし

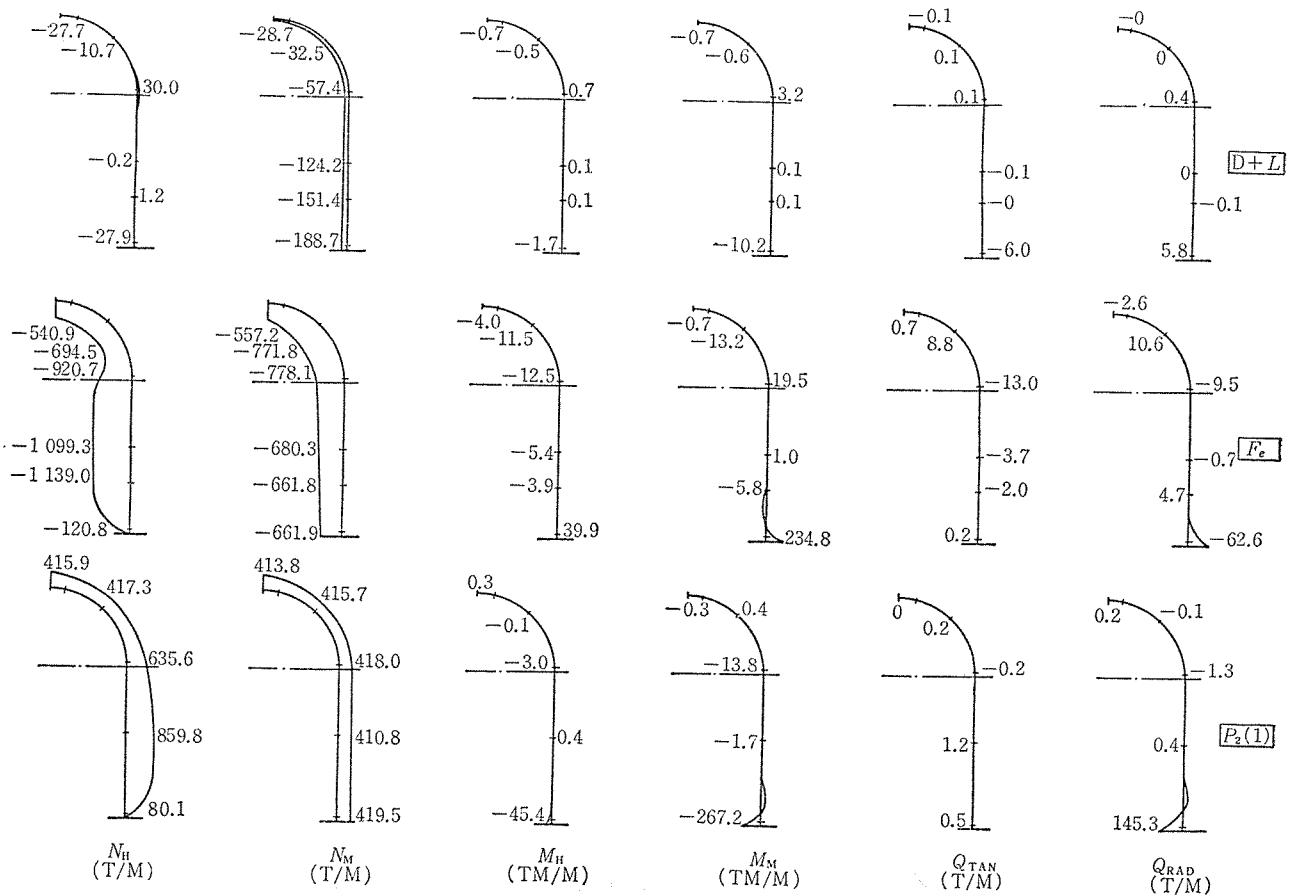


図-17(1) 単独荷重時応力

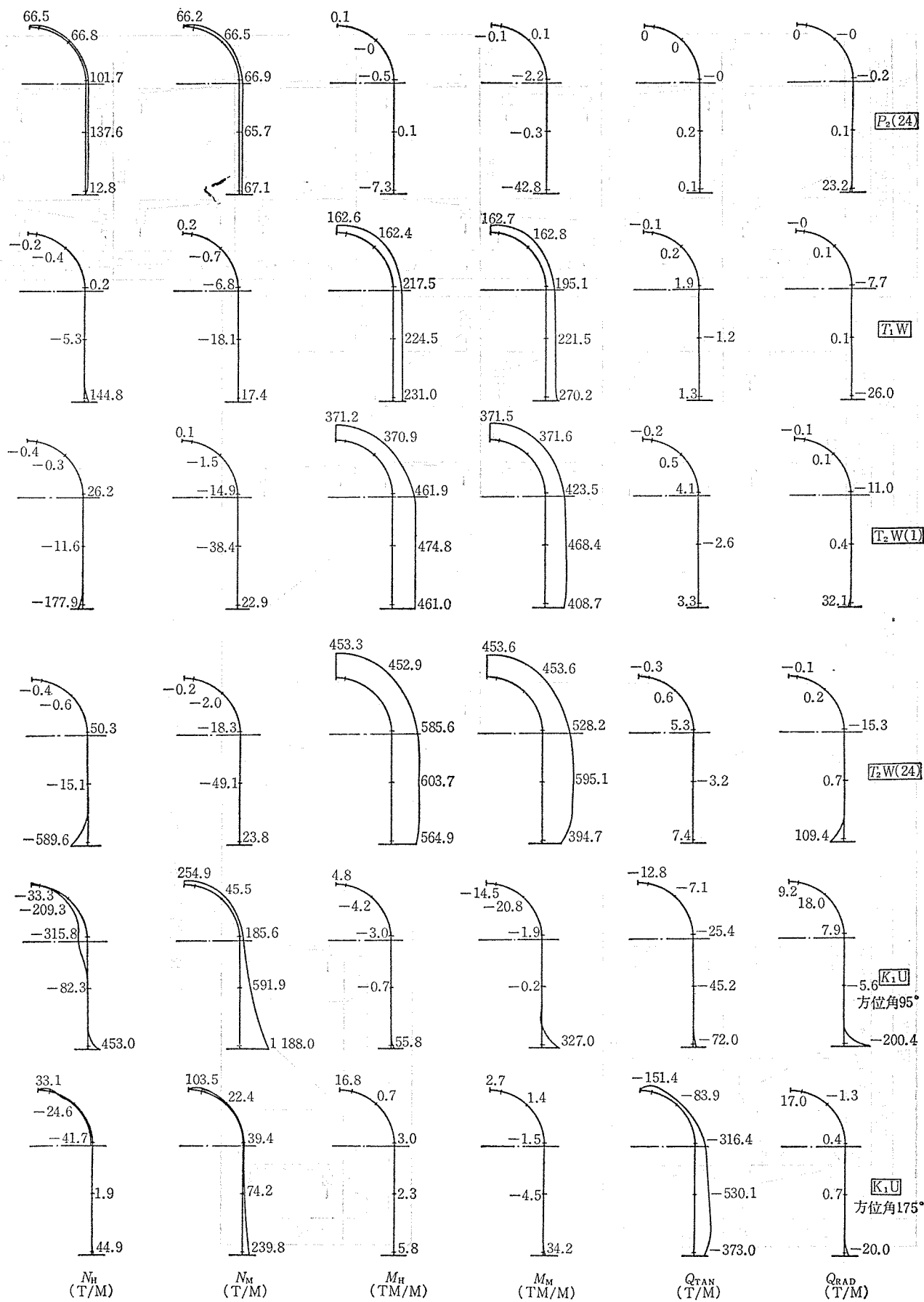


图-17(2) 单独荷重時応力

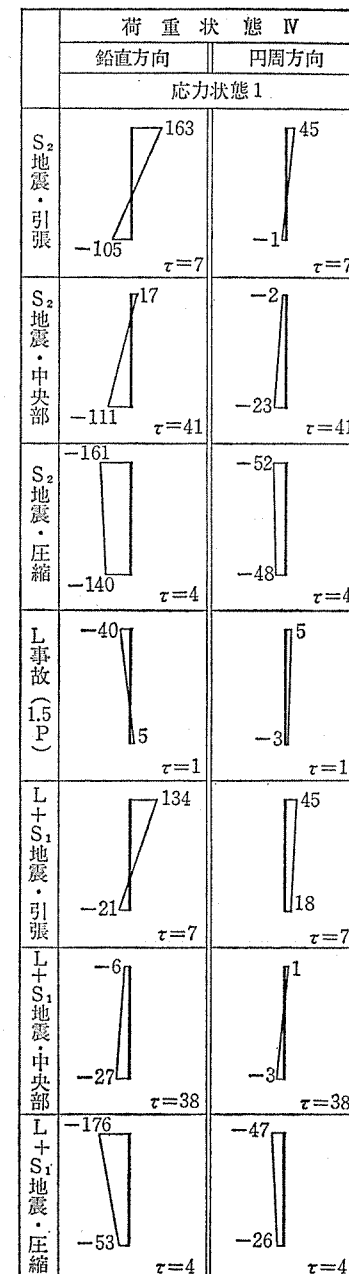
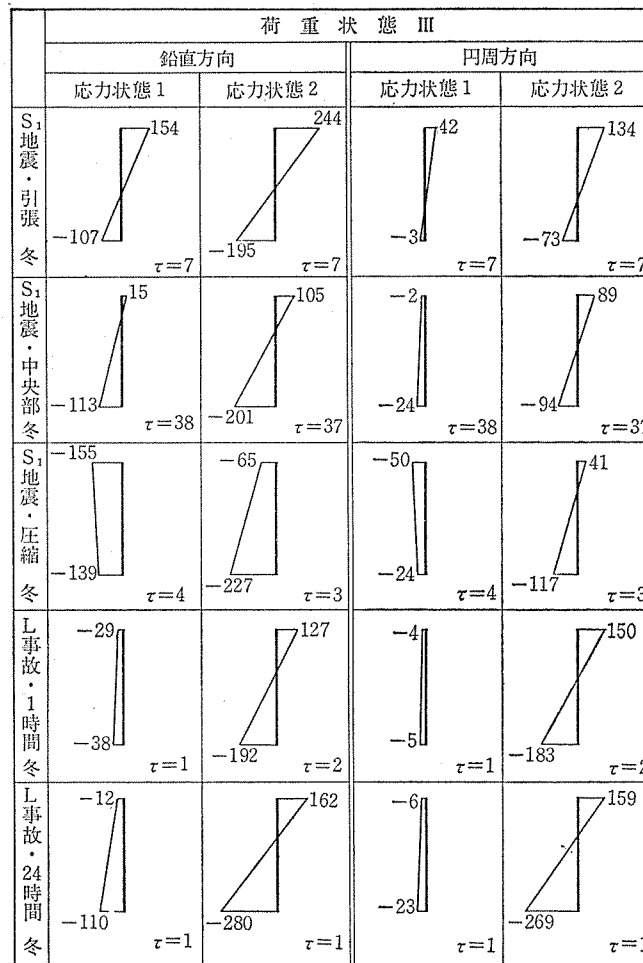
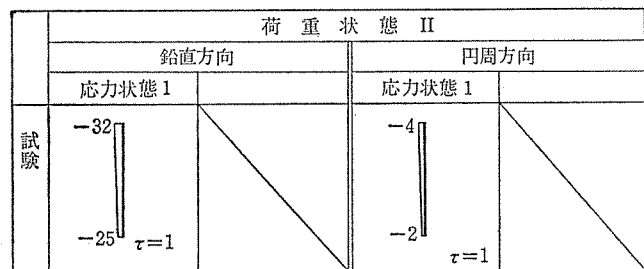
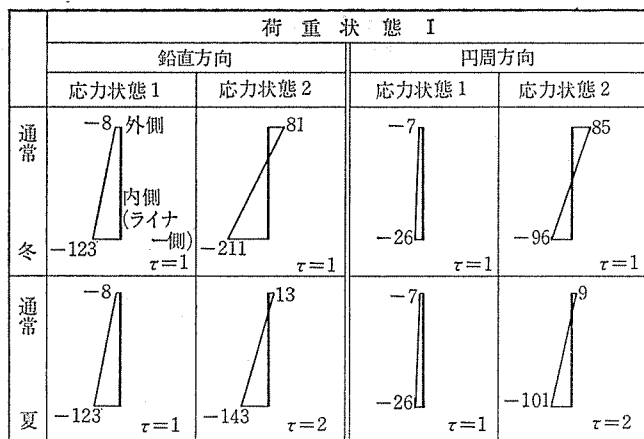


図-18 円筒部・脚部 (5a点) の応力度 (単位: kg/cm<sup>2</sup>)

て応力度を算定してみた。脚部の基礎上面より約 1.2m 上部、図-15 の位置 5a で求めたコンクリート応力度を図-18 に掲げる。

5.3 応力計算に対する考察と断面算定

(1) 応力状態 1 (熱なし) について

荷重状態 I ~ III に対しては、基礎版の拘束による局部応力の生ずる脚部を除くと、全面圧縮状態にあり、コンクリートの許容圧縮応力度以下である。荷重状態 IV の L 事故 + S<sub>1</sub> 地震時でドーム円周方向にわずかの引張縁応力度が、円筒部鉛直方向で全面引張が生じている。また L 事故 (1.5 P<sub>2</sub>) では円筒円周方向で全面引張が発生するが、断面設計では面内せん断力を引張の軸力として取り扱うため L+S<sub>1</sub> 地震時で設計は支配される。脚部では地震を含む荷重時に引張応力が生じている。

(2) 応力状態 2 (熱あり) について

各荷重時とも引張縁応力度が生じている。また円筒脚部の鉛直方向を除けば、圧縮応力度はコンクリートの許容応力度以下である。

(3) 所要鉄筋量

図-18 において最も大きな応力が生じている円筒脚部、鉛直方向について下記的前提で所要鉄筋量の概略算定を行ってみる。

① 前掲の温度荷重応力は、剛性を他荷重に対する応力算定時と同じ値とした弾性解析から得られたものである。実施設計ではこの値を初期条件として、コンクリートの引張耐力無視の、ひびわれによる断面剛性低下を考慮して応力計算を行う GURFINKEL 法を組み込んだ電算機コードにより、断面算定を行う予定であるが、ここでは各種実験から提案されている剛性低減法に従い前掲の温度荷重による応力を、荷重状態 I, II では 1/2, 荷重状態 III では 1/3 に低減して計算する。

② L 事故時の引張応力度は S<sub>1</sub> 地震時の引張応力度を下回っているため検討対象から除外し、下記 5 ケースについて概算する (表-14, 15, 16 参照)。

表-14

荷重状態	荷重時	応力状態 1	応力状態 2
I	通常運転時	—	$D+L+F+T_1W/2$
III	S <sub>1</sub> 地震時	$D+L+F+S_1$	$D+L+F+S_1+T_1W/3$
IV	S <sub>2</sub> 地震時	$D+L+F+S_2$	—
IV	L 事故+S <sub>1</sub> 地震時	$D+L+F+P_1+S_1$	—

表-15 円筒脚部、鉛直方向の所要鉄筋量

仮定断面	コンクリート厚	1.3m
外側配筋	D51 @250 ダブル (A <sub>S</sub> =162 cm <sup>2</sup> /m)	
内側配筋 (ライナー側)	D51 @250 シングル (A <sub>S</sub> =81 cm <sup>2</sup> /m)	

表-16 鉄筋およびコンクリートの応力

荷重組合せ	外側鉄筋引張応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	内側コンクリート圧縮応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )
I $D+L+F+T_1W/2$	150 (1800)	161 (189)
III $D+L+F+S_1$	3 119 (4 000)	146 (277)
III $D+L+F+S_1+T_1W/3$	3 685 (4 000)	186 (315)
IV $D+L+F+S_2$	3 303 (4 000)	140 (357)
IV $D+L+F+P_1+S_1$	3 436 (4 000)	2 130*(4 000)

\* 全面引張状態・内側鉄筋引張応力度 ( ) は許容値

鉄筋の許容応力度は荷重状態 I, II に対しては 1800 kg/cm<sup>2</sup>, III, IV に対しては 4000 kg/cm<sup>2</sup> である。この部分の配筋量を支配する荷重の組合せは、4000 kg/cm<sup>2</sup> に最も近い S<sub>1</sub> 地震時 (冬期運転中) であり仮定した配筋で充分である。また通常運転時内圧による鉄筋引張応力度の増加は 40 kg/cm<sup>2</sup> 程度であり、この配筋で充分である。

以上の断面算定の結果を含めて必要な設計配筋量および配筋を表-17 に示す。

表-17 設計配筋量

方 向	算定位置	EL (m)	断面諸元 (cm)		設計配筋 (cm <sup>2</sup> /m)	
			D	d	外側 (A <sub>S</sub> )	内側 (A <sub>S</sub> P)
経線方向	1	55.426	110	95	D29 @300 (21.4)	D35 @300 (31.9)
	2	50.378	110	95	5-D29@4° (31.6)	5-D29@6° (21.1)
	3	34.523	130	115	5-D35@2° (61.9)	5-D35, D51 @6° (64.3)
	4	14.880	130	115	5-D51@4° (65.5)	5-D41@2° (86.7)
	5	-9.05	130	115	10-D51@2° (262.2)	10-D51@2° (262.2)
円周方向	1	55.426	110	95	D29 @300 (21.4)	D35 @300 (31.9)
	2	50.378	110	95	D29 @300 (21.4)	D29 @300 (21.4)
	3	34.523	130	115	D51 @300 (67.6)	D51 @300 (67.6)
	4	14.880	130	115	D51 @300 (67.6)	D51 @300 (67.6)
	5	-9.05	130	115	D41, D51 @300 (112.3)	D41, D51 @300 (112.3)

5.4 せん断力に対する検討

せん断力について次のような検討を行う。

(1) 面内方向せん断応力について

面内方向せん断応力の許容値は、断面の終局面内せん断耐力に荷重状態 III では、係数 3/4 を、荷重状態 I, II については、係数 1/2 を乗じた値とする。荷重状態 IV に対する面内せん断応力は、断面の終局面内せん断応力以下とする。ただし、面内せん断応力度の上限は、 $3.5\sqrt{F_c}$ 。

## 設 計

とする。以上の方針に基づいて、膜力と面内せん断力の組合せ応力が卓越する位置、および面内せん断力が最大となる位置の両ケースについて検討を行う。

$$\tau_{ua} = P_t \cdot f_y + \sigma_{pe} - \sigma_0$$

ここで、

$\tau_{ua}$ : 終局面内せん断応力度

$P_t$ : 経線方向, 円周方向の鉄筋比

$\sigma_0$ : 外力により作用する膜引張応力度

$\sigma_{pe}$ : 有効プレストレス応力

$f_y$ : 鉄筋の規格降伏点 (4000 kg/cm<sup>2</sup>)

(2) 面外方向せん断応力について

① 軸対称荷重時の面外せん断応力について以下の検討を行う。面外方向せん断力の許容値は、断面の終局面外せん断力に荷重状態Ⅲでは係数3/4を、荷重状態Ⅰ, Ⅱでは係数1/2を乗じた値とする。荷重状態Ⅳに対する面外せん断応力は、断面の保有する円周方向鉄筋の抵抗に基づく終局面外せん断応力以下とする。

$$\tau_{s(H)} = 10 P_t(\theta) \cdot f_y / (13.2 \sqrt{\beta - \beta})$$

ここで、

$\tau_{s(H)}$ : 円筒筋の抵抗に基づく終局面外せん断応力度

$P_t(\theta)$ : 円周方向鉄筋比

$f_y$ : 鉄筋の規格降伏点 (4000 kg/cm<sup>2</sup>)

$\beta$ : PCCV の中心半径 ( $r_0$ )/壁厚 ( $t$ )

② 軸対称荷重時以外の荷重時における面外せん断力

について、荷重状態Ⅰ～Ⅲにおいては経線方向, 円周方向の面外せん断応力に対して以下の検討を行う。

$$\tau = \frac{Q}{t} < \alpha \cdot (P_t \cdot f_y - \sigma_0)$$

$$\text{かつ } < \alpha \cdot 3.5 \sqrt{F_c}$$

ここで、

$Q$ : 経線方向, 円周方向の単位長さ当りの面外せん断応力

$t$ : シェル厚

$P_t$ : 経線方向, 円周方向の鉄筋比

$\sigma_0$ : 経線方向, 円周方向の膜引張応力度 (引張りを正とする)

$\alpha$ : 荷重状態に対する係数

荷重状態Ⅰ, Ⅱ 1/2

荷重状態Ⅲ 3/4

## 6. 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れた設計から(株)大林組の協力を得て要約したものである。また設計全般の諸検討につき、三菱原子力工業(株)、清水建設(株)、(株)竹中工務店ならびに(株)日本構造橋梁研究所の御協力を得たことを付記し、謝辞に代える。

### ◀刊行物案内▶

## PC くい基礎の最近の進歩

—PC ぐいの正しい使い方—

体 裁: A4判 246 ページ

定 価: 2000 円 (会員特価 1800 円) 送 料: 800 円

内 容: 1) PC くい, 2) PC くい基礎の設計, 3) PC ぐいの施工, 4) 超高強度コンクリートくい, 超大径くい

お申込みは代金を添え、(社)プレストレストコンクリート技術協会へ

### ◀刊行物案内▶

## プレストレスト コンクリート 第7回 FIP 大会特集増刊号 (英文)

体 裁: B5判 117 頁

定 価: 1800 円 (会員特価 1500 円) 送 料: 250 円

内 容: 1974 年 5 月ニューヨークで開かれた FIP (国際プレストレッシング連盟) 大会にわが国より提出された論文 (英文) をとりまとめたもので、詳細は会誌 16 巻 2 号参照。