

日本原子力発電敦賀2号機 PCCV の概要

牧野 靖*
 田村 誠也**
 河合 郁朗***

1. はじめに

敦賀発電所2号機では日本で初めてプレストレストコンクリート製格納容器 (PCCV) を採用した。

昭和52年に計画はスタートし、設計および各種手続きを終え、昭和57年4月に発電所本館の掘削工事が開始された。昭和57年10月に基礎版のコンクリート工事が始まり、その後、工事は順調に進捗し、本年2月にはPCCVの耐圧試験が実施された。その後4月には燃料装荷、6月には初発電と、来年春の営業運転開始を旨として順調に試運転が進んでいる。

PCCVの設計、摩擦実証試験、1/30モデルによるPCCVの水平耐力の実証試験については別に本誌で報告しているが、本稿では敦賀2号機のPCCVの概要を計画から設計、建設を含めて報告する。

2. 敦賀2号機の設備概要

敦賀発電所は図-1に示すように福井県敦賀市の敦賀半島の先端に位置し、2号機は既設の1号機と動燃ふげん発電所の間にある敷地に建設された出力116万kWのPWR型の発電所である。その設備概要を以下に示す。

地 点：福井県敦賀市明神町1番地
 電気出力：1160000kW (60ヘルツ)
 原子炉：濃縮ウラン、軽水減速、軽水冷却型国産改良標準型加圧水炉
 熱出力 約3423000kW

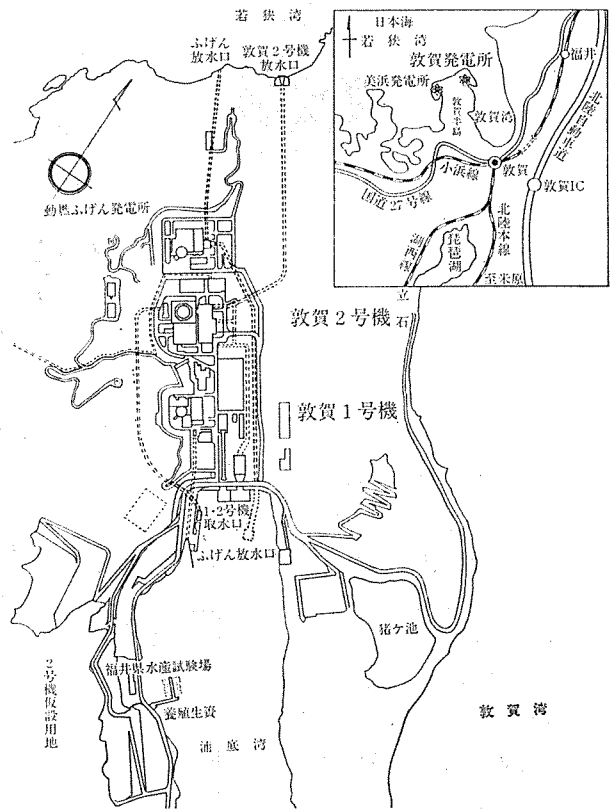


図-1 発電所施設配置図

原子炉容器：縦置円筒上下半球鏡容器型
 燃料：ウラン装荷量 約89t
 燃料集合体当り燃料棒数 264本
 燃料集合体数 193体

蒸気発生器：縦置U字管式熱交換器型 4基

原子炉格納容器：上部半球円筒型プレストレストコンクリート製、内面鋼板張り

タービン：串型4車室6分流排気再熱再生式

回転数 毎分1800回転
 出力 1160000kW

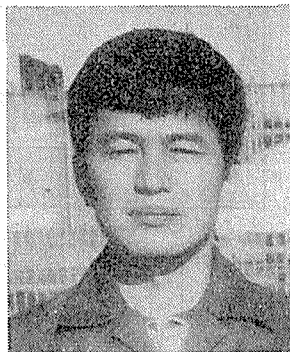
発電機：三相同期発電機
 容量 1300000kVA
 周波数 60ヘルツ



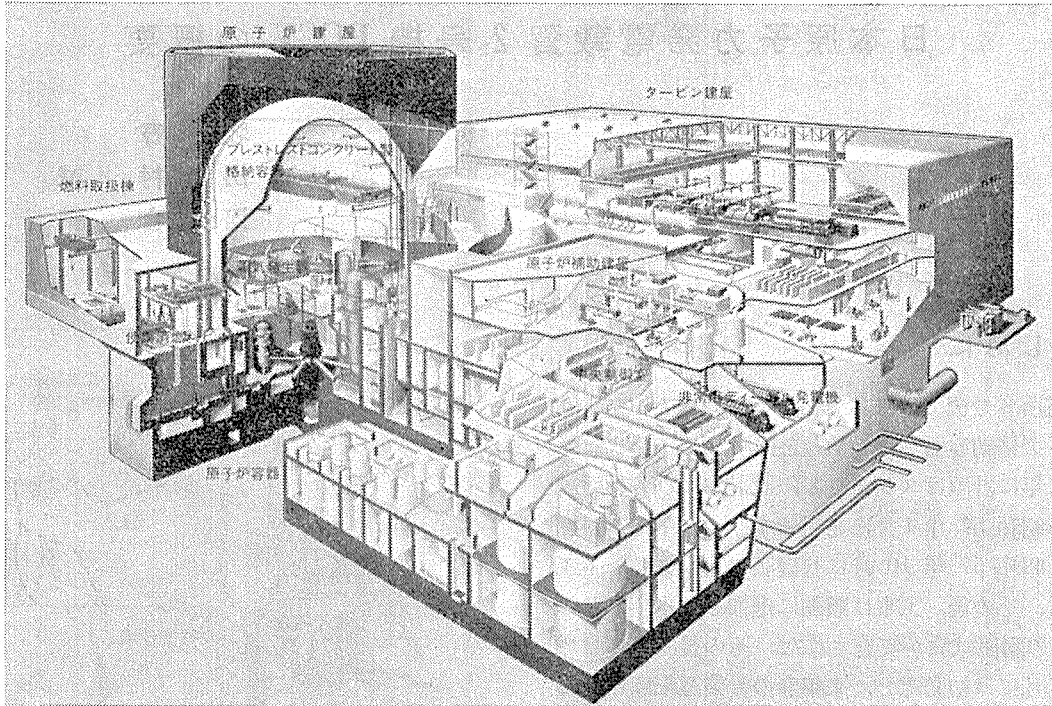
* Yasushi MAKINO
 日本原子力発電(株)もんじゅ
 工事監理事務所副所長



** Seiya TAMURA
 日本原子力発電(株)敦賀
 建設所次長



*** Ikuo KAWAI
 日本原子力発電(株)敦賀
 建設所建築課



図—2 敦賀2号機鳥かん図

出力 1160000 kW

主要な発電設備は原子炉建屋、原子炉補助建屋、タービン建屋の3建屋に設置されており、その状況を図—2に示す。

PCCVは原子炉建屋内にあり、PCCV内には原子炉容器、蒸気発生器、加圧器等が据え付けられている。

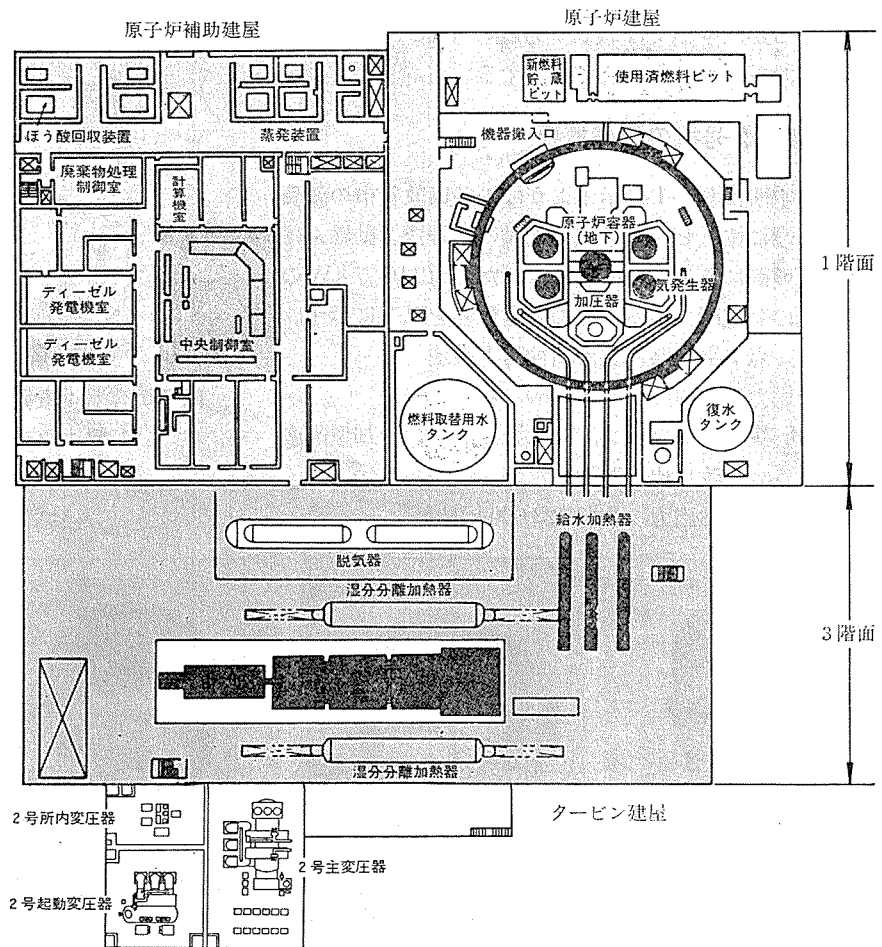
建屋の平面および断面を図—3、図—4に示す。

原子炉建屋は厚さ8mの基礎版を有し、地下部分は鉄筋コンクリート造、地上部は鉄骨造の建屋でその中央にPCCVが位置している。

3. PCCVの概要

3.1 構造

敦賀2号機のPCCVは、図—5に示すように厚さ8mの基礎版と内直径43m、厚さ1.3m、高さ43mの円筒部と内半径21.5m、厚さ1.1mの半球部で構成される容器である。図—6に円筒部の断面を示す。内



図—3 建屋平面図

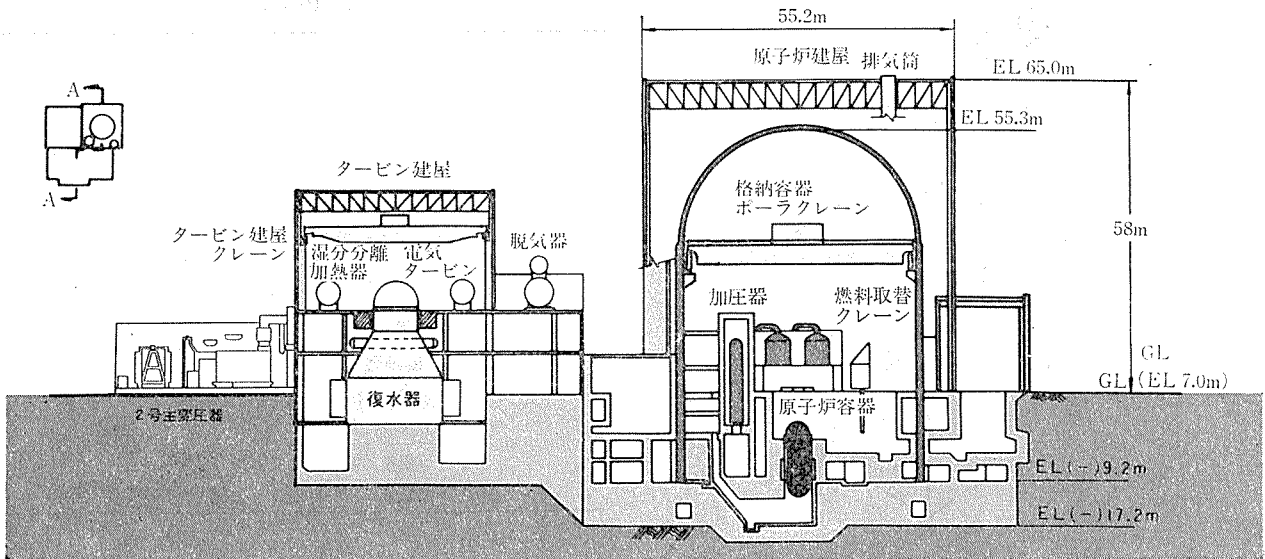


図-4 建屋断面図

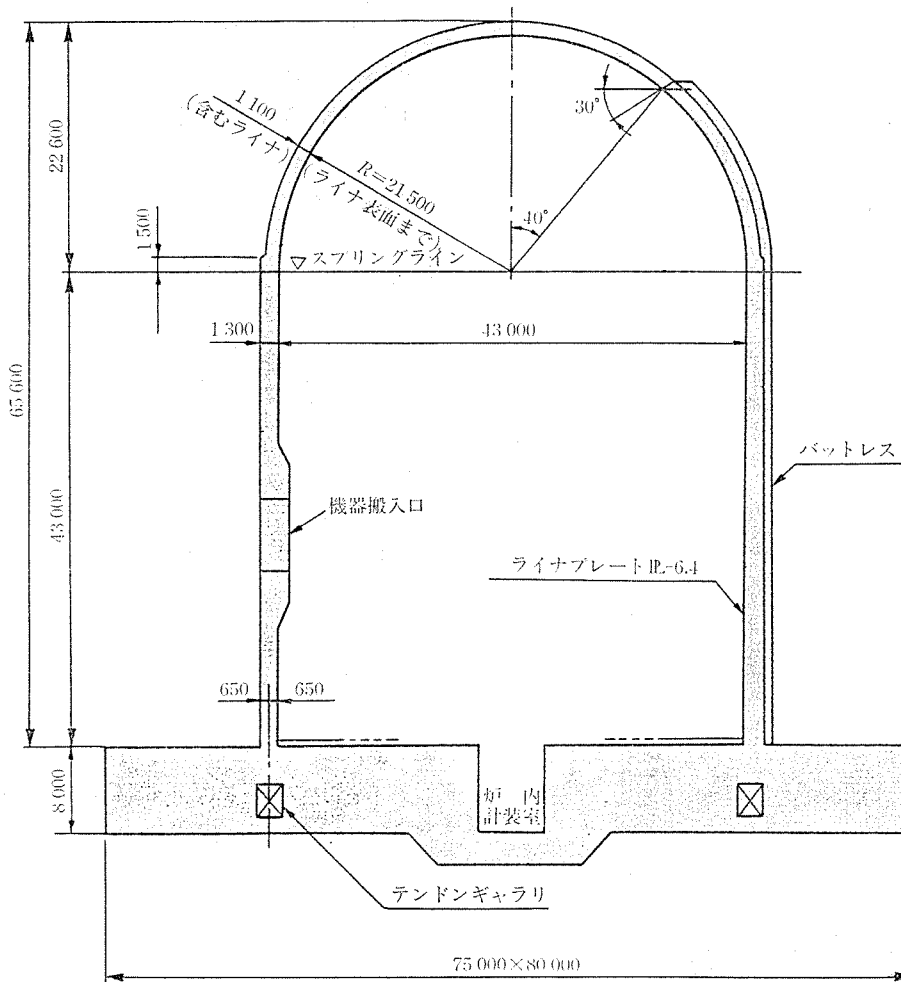


図-5 PCCV の形状寸法

面には厚さ 6.4 mm の鋼板のライナプレートがあり漏洩防止の役割を果たすとともにコンクリート打設時の型枠ともなっている。コンクリートの内外の表面付近には鉄筋が配置され、必要な補強がなされている。コンクリー

トの中央部にはコンクリートを締め付けてプレストレスを与える PC 鋼線の束 (テンドン) が配置されている。1本のテンドンは直径 7 mm の PC 鋼線 163 本でできており、規格破断耐力は 1035 t である。その配置は

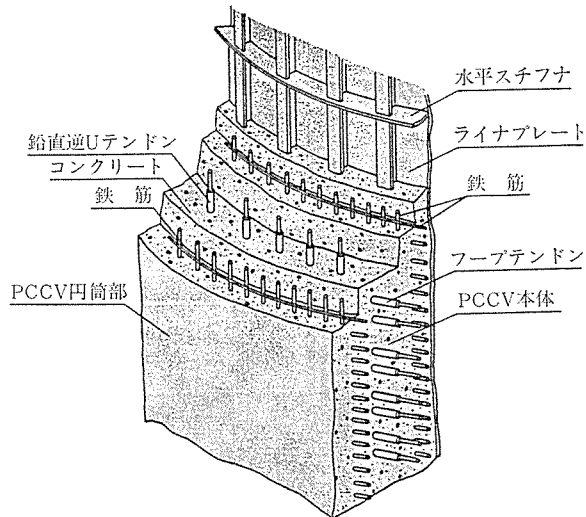


図-6 PCCV 構造体の概念

図-7 に示すように円周方向を締めるフープテンドン 162 本と鉛直方向を締める鉛直逆Uテンドン 90 本で構成されている。

フープテンドンは 120° 間隔に配置された 3 箇所のバットレスに定着され、1 本のフープテンドンは 240° 離れたバットレスに両端を定着される。

逆Uテンドンは 45 本ずつの 2 グループが平面的に見ると直交した格子状に配置され、基礎版内に設けられたテンドンギャラリの天井に定着される。

これらのテンドンを緊張することによりコンクリート中に圧縮力が導入されるが、設計内圧 4 kg/cm² の 1.2 倍の内圧を受けた場合に、コンクリートのクリープ等によるプラント寿命中のゆるみを差し引いても、なお膜応

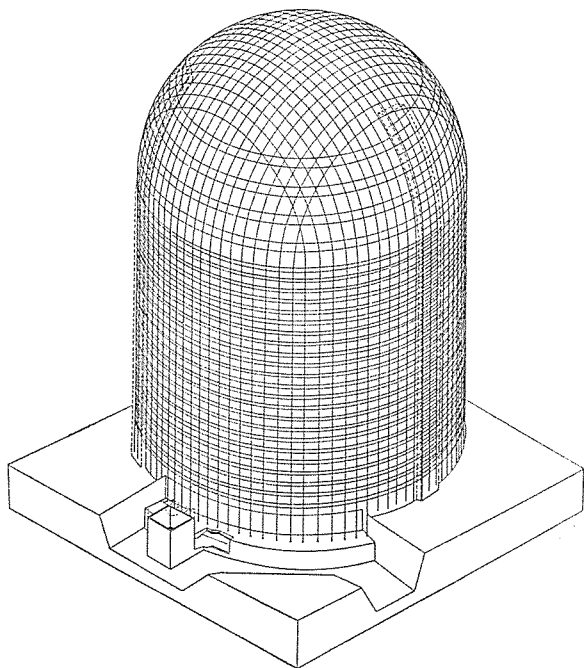


図-7 テンドンの配置

表-1 PCCV 諸元

項目	諸元		
形状寸法	内径：43.0 m		
	高さ：65.6 m		
	壁厚：円筒部 1.3 m 半球部 1.1 m		
	緊張固定部数：3		
	基礎版：75.0 m×80.0 m×8.0 m		
緊張テンドン関係	方式：BBRV 工法 (ポストテンション・アンボンド工法)		
	緊張テンドン本数および長さ：		
		本数	長さ (m)
	鉛直逆Uテンドン	90	142~162
フープテンドン	135	98	
ドームフープテンドン	27	70~97	
テンドン規模：直径7ミリ-163本			
テンドン容量：1000t級			

力が圧縮状態にあるようテンドンの配置を決めている。

このように、コンクリート部は耐圧機能を持つとともに在来の鋼製格納容器を囲んで設けている外部しゃへい壁と同じしゃへい機能も持っている。

表-1 に PCCV の諸元を示す。

3.2 PCCV 採用の理由

在来の 80 万 kW クラスの格納容器としては普通鋼円筒型のものが用いられている。高さは約 90 m 程度で、板厚は溶接部の現場焼鈍を必要としない 38 mm 以下の設計となっている。110 万 kW クラスの格納容器を同じ普通鋼円筒型で設計すると、内径 43 m、高さ約 120 m に及ぶ背の高い容器となり、施工は非常に困難が予想され、また、耐震上、設計不可能に近かった。

そこで、敦賀 2 号機の格納容器としては普通鋼球型、高張力鋼円筒型アイスコンデンサ方式、コンクリート製円筒型 (RCCV)、プレストレストコンクリート製円筒型 (PCCV) が考えられた。

鋼製球型配置は日本に実績がない、アイスコンデンサ方式は 80 万 kW クラスの経験の反映が困難、RCCV は PCCV に比して大きくなり耐震設計上不利との理由で、PWR 改良標準化計画では検討対象から除外していた。

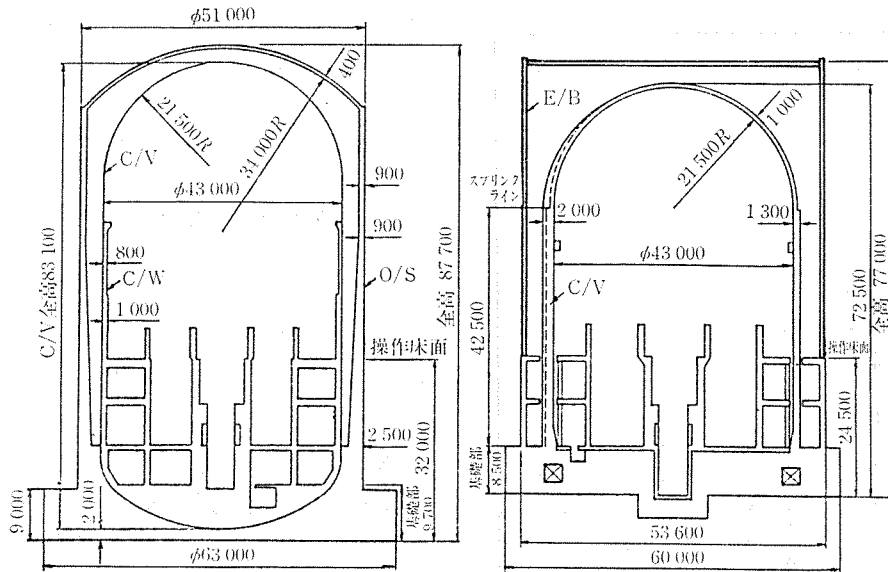
残る高張力鋼円筒型と PCCV について 図-8 に示す試設計を基に比較検討した。

検討の結果、耐震設計、建設費の面で PCCV が有利、工期は大差なしとの結論を得た。更に冬期の気象条件を考えると高張力鋼の場合は大規模溶接の品質管理上の困難も予想され、PCCV の採用を決定した。

なお、PCCV は米国、ヨーロッパ等に多くの実績があり、PWR 型では格納容器の主流となっている。

3.3 着工までの経緯

敦賀 2 号機の基本計画は昭和 52 年に開始した。基本計画開始から掘削工事開始までの経緯を 図-9 に示す。



図—8 300 ガル・110 万 kW 級 PWR プラント建屋の諸元

官庁手続きの関係では、昭和53年の後半に環境審査があり、年末の電源開発調整審議会で敦賀2号機の計画が審議され、承認された。

54年3月に設置変更許可申請を行い57年1月に許可を得、3月に第1回工事計画認可、4月に建築確認を得て掘削工事を開始した。

54年の設置変更許可申請直後のスリーマイルの事故、56年の敦賀問題等による審査の遅れもあったが、地元の建設同意が得られてから着工まで約5年かかっている。

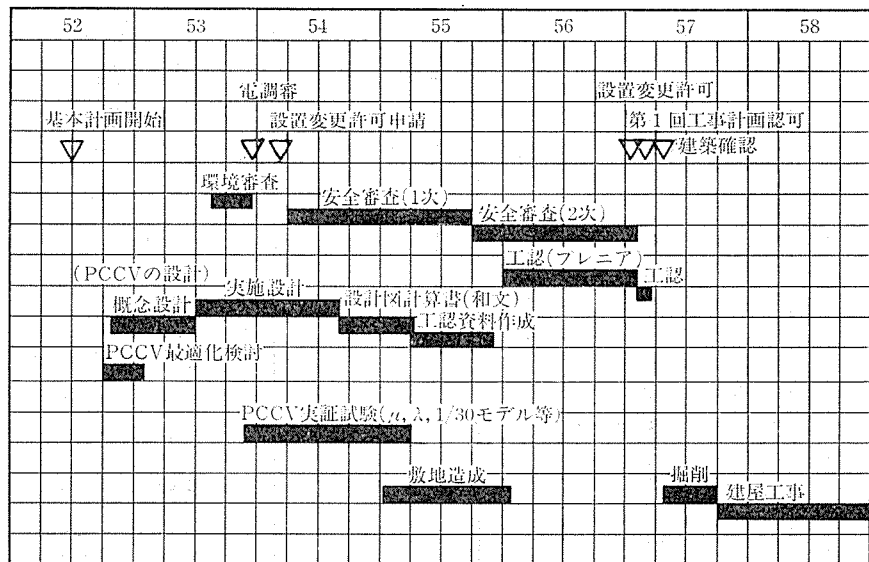
設計関係では、昭和52年の後半にPCCVの概念設計が開始された。PCCVを含めた原子炉建屋の設計は三菱重工業(株)の下で米国のベクテル社が担当した。

ベクテル社の概念設計に並行して、我が国で初めて建設するPCCVの形式はどのようなものが最適であるか検討し、以下の形式を決定した。

- ドームの形状：半球型
- バットレス数：3
- テンドンの容量：1000 t 級
- シースイ処理：アンボンド方式
- 定着工法：BBRV工法

PCCVの実施設計は「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)」に準拠して行った。

原子炉格納容器、原子炉圧力容器にコンクリート製容



図—9 着工までの経緯

器を利用する技術は諸外国で実用の段階に入っており、我が国でも原子力発電所への導入の機運が高まり、昭和50年8月に通産省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検討会が設立された。技術基準案の作成、試設計による検討を経て昭和52年4月に「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)」の成案を得た。この時点でせん断力および熱応力に対する設計方法については、さらに実験等による確認の必要があることが指摘された。53年から54年にかけてこれらの確証試験が実施され、試験結果を反映した技術基準(案)の改訂が54年11月に行われた。なおその後も見直しが続けられ、56年11月に改訂がなされている。

技術基準(案)の確証試験とはほぼ同時期に敦賀2号機PCCVの実証試験を実施した。試験の目的は設計で使

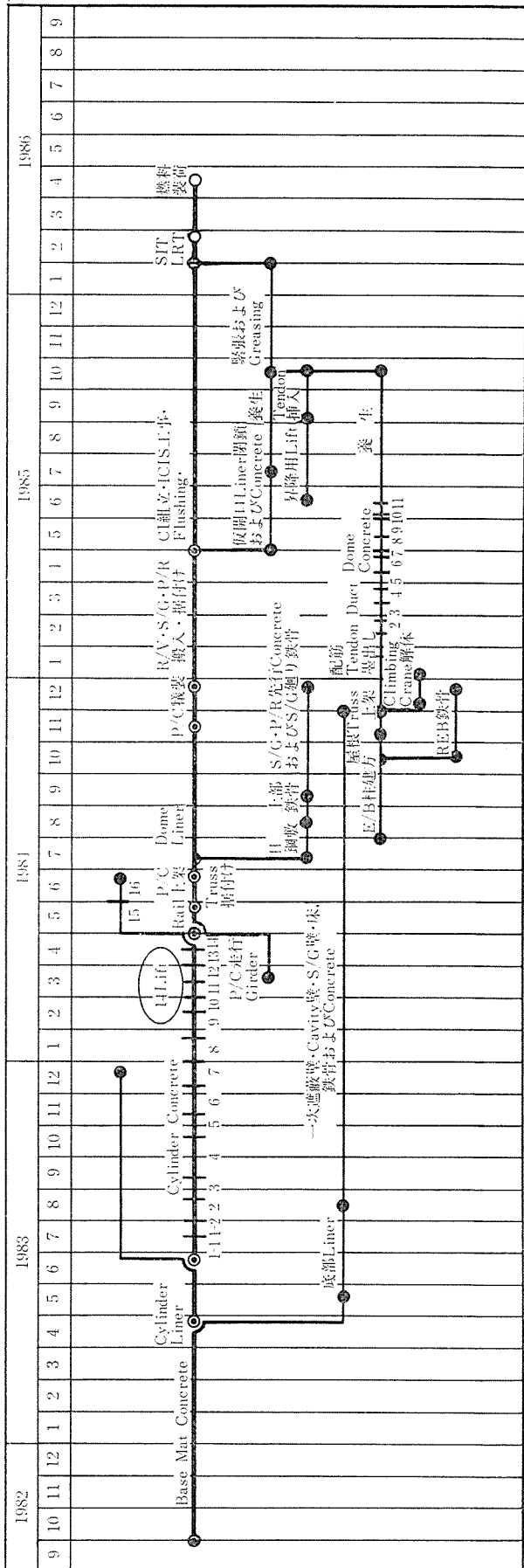


図 10

用している摩擦係数等の数値の実証, PCCV の水平耐力の確認, 施工法の検討等である。

摩擦係数については, アメリカでの実績からベクトル社は $\mu=0.14/\text{rad}$, $\lambda=0.001/\text{m}$ を提案し, 設計で採用していた。しかし, プレストレストコンクリートに関する土木学会の標準示方書, 建築学会の設計規準とも特別な試験に基づくものを除いては $\mu=0.25\sim 0.3$ を推奨している。そこで実大の試験ベッドを作製し, 実機と同じ tendon を用いて摩擦係数を測定して $\mu=0.12$, $\lambda=0.000075$ を得, 設計で採用している数値の妥当性を確認した。

PCCV の水平耐力については, 実機の 1/30 のモデル 2 基を作製し, 静的水平加力と大型振動台上での加振により破壊まで加力した。その結果, 教賀 2 号機 PCCV が想定される地震に対して十分な耐力を有することが確認された。

上記実証試験については, “プレストレストコンクリート” Vol. 23, No. 1 で既に報告している。

3.4 建設

図 10 に PCCV の工事工程を示す。図中の太線部分が全体の建設工程のクリティカルパスである。

ベースマット着工から燃料装荷までの 42.5 か月の中で 25 か月を PCCV 工事が占め, この中の 17 か月を鉄筋コンクリート工事が占めている。

また, 機器搬入用仮開口の閉鎖工事から緊張工事完了までの工程は, PCCV の耐圧・漏洩率試験につながるサブクリティカルパスであり, 特に緊張作業は国内で初めての大容量 tendon の緊張作業ということもあって注意を必要とした。表 2 に主要資材量を示す。

摩擦係数実証試験の試験体作製等を利用して施工検討を行ったが, さらに施工上困難が予想される部分について配筋モデルを作製して施工法を検討した。

表 2 PCCV の資材量

コンクリート	11945 m ³
鉄筋	2905 t
ライナ	1800 t
PC 鋼線	1473 t

機器搬入口およびエアロックの周辺は開口補強筋により鉄筋が混雑する部分である。この部分の鉄筋およびシースの 1/10 のモデルを造り, 施工方法を検討し, 組立て手順を決めた。

内部コンクリートの縦筋と基礎版の上端筋との干渉回避についてもモデルを造り検討した。内部コンクリートの縦筋は基礎版上端の底部ライナによりさえぎられるため, ライナの上下両面にカプラを溶接し, 鉄筋を取り付けることにより, ライナを貫通せず, 力の伝達ができる設計となっている。したがってライナにかんざし状に取り付けた鉄筋を所定の位置に差し込む必要があり, 上端

筋の加工，据付けに厳しい精度が要求された。このため，上端筋に使用する D 51 の鉄筋に番号をつけ，1本ずつの加工図を作成して曲げ加工をするとともに，鉄筋架台上の墨に合わせて据え付けて精度を確保した。

PCCV に使用したコンクリートは設計基準強度 420 kg/cm²，スランプ 8 cm のコンクリートである。コンクリートは現場に設置した毎時 120 m³ の能力を持つパッチプラントにて製造した。コンクリートの打設には写真-1 に示すゲートバルブを 3 m 毎に設置して，コンクリートが均等に打ち上がるようにした。

ドーム部および仮開口のコンクリート工事完了後の昭和 60 年 9 月に tendon 挿入を開始した。最終のコンクリート打設 3 か月後の 10 月中旬には緊張グリージング作業も始め，翌 61 年の 1 月下旬には緊張工事を完了した。

tendon はピー・エス・コンクリート（株）の水島工

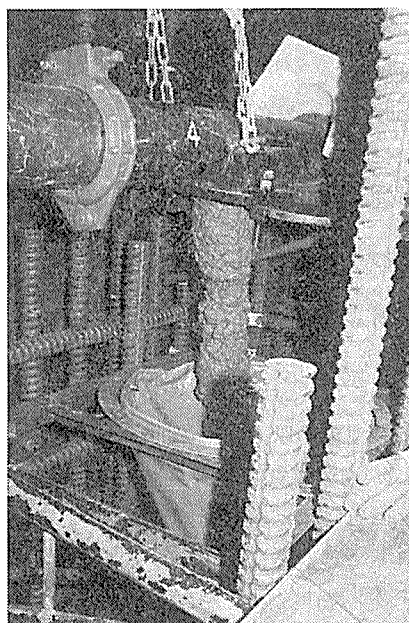


写真-1 ゲートバルブ

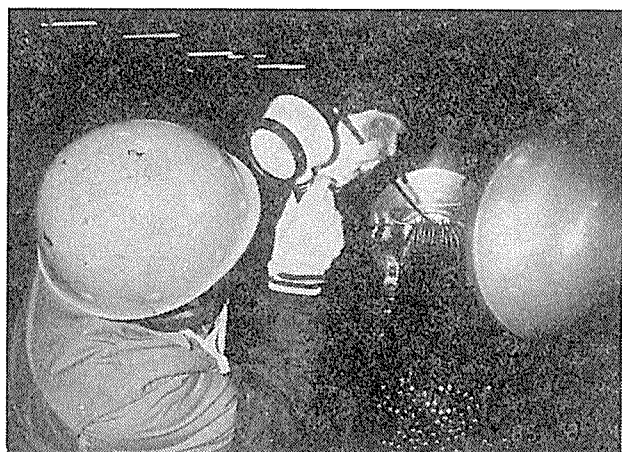


写真-2 ボタンヘッドの検査

場で製作した。PC 鋼線 163 本を切り揃え，一端にアンカーヘッドを取り付け，8 m に 1 回のゆるい撚りを与え，さらに現場への搬送のためにコイル状に巻いて梱包した。現場では tendon を巻き戻しながらシース中に挿入し，PC 鋼線の他端をアンカーヘッドに差し込み，ボタンヘッド加工をした。ボタンヘッドについては全数について形状およびひび割れの検査を行った（写真-2）。

フープ tendon は 6 台のジャッキで 3 本の tendon を，逆 U tendon は 4 台のジャッキで 2 本の tendon を両端からほぼ同時に緊張した。773 t で緊張し，この時の実測伸び長さが推定伸び長さの ±10% 以下となるよう管理した。

緊張・定着作業が完了した後，防錆のためのグリース注入を行った。グリースはグリースタンクで 90°C に加温しポンプで 5~8 kg/cm² に加圧して注入した。

各作業とも開始直後は機器の取扱いや作業の不慣れ等のため予定工程より若干遅れぎみであったが，作業が進むに従い順調に工程を消化し，当初の予定より早く工事を完了した。

3.5 構造性能確認試験

昭和 61 年 2 月の後半に耐圧・漏洩試験に並行して構造性能確認試験を実施した。

構造性能確認試験は ASME Sec III および「原子力発電用コンクリート格納容器技術基準（案）」に規定されているもので，加圧時に格納容器の変位，ひずみ等の計測およびコンクリート表面のひび割れの観測を実施して，格納容器の健全性を確認するものである。

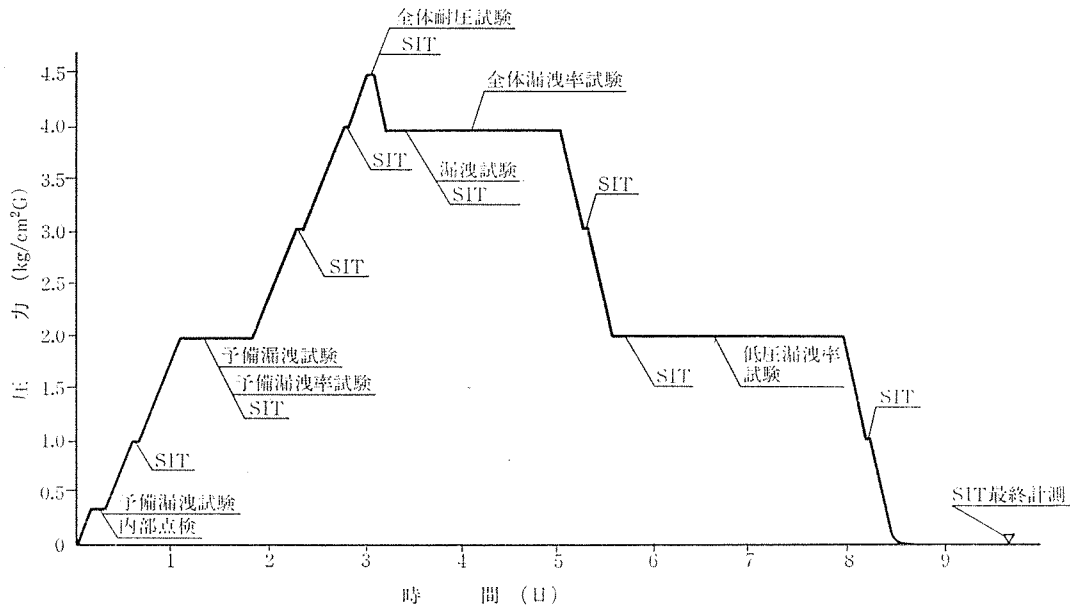
図-11 に加圧・減圧曲線を示す。加圧・減圧の各段階で変位，鉄筋のひずみ，コンクリートのひずみ，ライナのひずみを測定した。また 0, 3.0, 4.5, 0 kg/cm² の各段階でコンクリートのひび割れを観察した。

内圧に対する変位，ひずみの関係は最大加圧時までほぼ線形であり，弾性挙動を示した。変位，ひずみの測定値は，打設したコンクリートのテストピースの試験で得られたヤング係数等で設計予測値を修正すると，設計予測値と良い一致が見られた。最大変位は大開口周辺の半径方向に生じ 7.77 mm であり予測値の 130% 以下であった。鉄筋の最大ひずみは 200×10^{-6} 程度で許容値以下であった。観察されたひび割れはコンクリートの乾燥収縮等により加圧前に既に生じていたものであり，加圧によりひび割れ幅が広がったものもあるが，それらの変動量は微小であった。

以上の結果から，PCCV は最大加圧時においても構造健全性を確保していることが確認できた。

3.6 使用期間中検査 (In Service Inspection)

PCCV の構造性能に影響を与える恐れのある構造上



図—11 耐圧，漏洩，漏洩率試験加圧減圧曲線

の劣化の有無を調べるための使用期間中検査が「原子力発電用コンクリート格納容器技術基準（案）」およびアメリカ NRC の Regulatory Guide 1.35 に規定されている。

敦賀2号機の PCCV についても上記規定に準拠して使用期間中検査を現在計画中である。その概要を以下に記す。

(1) 実施時期

運転開始後1年目，3年目，5年目に各1回実施する。これ以降はそれまでの結果を検討して必要ある場合は別途実施を定める。

(2) 検査項目

- ① 緊張力の確認試験
- ② PC 鋼線の強度試験
- ③ グリースの化学試験
- ④ グリース漏洩の有無確認
- ⑤ 定着具の目視検査

(3) 試験数量

(2) ① の試験の対象とするテンドン数は逆 U，フープそれぞれについて5年目までは全体の4%とする。②については逆 U，フープ各1本の PC 鋼線とする。

4. おわりに

敦賀発電所2号機の PCCV は本年2月の耐圧・漏洩試験に合格し，日本で初めての PCCV として無事完成しました。

これは，計画着手以来9年の間御指導くださいました先生方および通産省資源エネルギー庁の方々並びに設計・工事を担当した三菱重工業（株），ベクテル社，（株）大林組，清水建設（株），（株）竹中工務店およびピー・エス・コンクリート（株）の方々の協力のおかげであると深く感謝しています。特に猪股俊司先生には計画当初から完成まで，たえず御指導頂きここにあらためて謝意を表します。