

原子力発電所プレストレストコンクリート製格納容器(PCCV)の設計・施工・維持管理

尾崎 昌彦*1・竹内 賢次*2・北川 高史*3

1. はじめに

電力事業においても、アースアンカやプレキャスト梁部材といった一般的なものの他に、電力事業固有の土木建築の各分野で、主に内圧が作用する構造物にプレストレストコンクリート構造を採用している。代表的なものとしては、LNG タンク¹⁾や石炭サイロ²⁾などがあるが、もっとも特徴的なものとして、原子力発電所における格納容器(Containment Vessel：以下『CV』という)が挙げられる。

本報では、大飯発電所3・4号機において採用したプレストレストコンクリート製格納容器(Prestressed Concrete Containment Vessel：以下『PCCV』という)について、設計・施工・維持管理の概要を紹介する。

2. PCCV の概要

本章では原子力発電所 PCCV の概要について述べる。

2.1 格納容器(CV)の種類

国内の原子力発電所では、冷却材と減速材に軽水を用いる軽水炉が主に利用されており、加圧水型軽水炉(Pressurized Water Reactor：以下『PWR』という)と沸騰水型軽水炉(Boiling Water Reactor：以下『BWR』という)の2つに分けられる。本報で紹介する PCCV は、CV により高い耐圧機能が求められる PWR 特有のものである。図-1に国内原子力発電所の CV の種類を体系的に示す。

2.2 PCCV 採用の背景

PWR の設計において想定するもっとも過酷な状態の一つに、一次冷却材配管破断による冷却材喪失事故(Loss Of Coolant Accident：以下『LOCA』という)がある。これは一次冷却材配管の破断により、瞬間的に非常に高圧の蒸気が放出される状態を想定したものである。この蒸気が外部に漏出しないよう防護するための構造体が原子炉格納容器

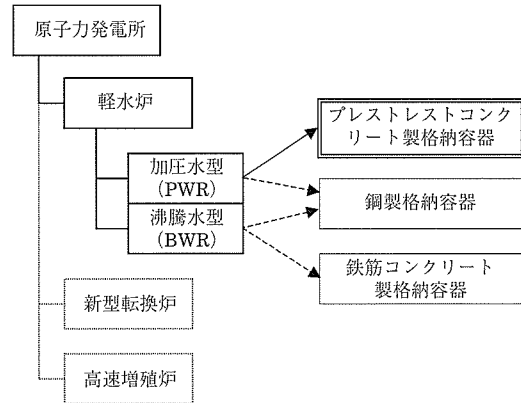


図-1 国内原子力発電所 CV の種類

であり、① LOCA 時の圧力(内圧)に耐える、②漏えいを防止する、という機能を CV に付与している。

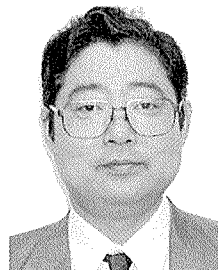
PWR の CV は従来、厚さ 40 mm 程度の鋼製 CV (以下『SCV』という)が採用されていた。発電出力の増大に伴い、より大きな機器類を格納し、LOCA 時の圧力を抑制するために大きな格納容器容積が必要となる。このことから SCV は耐震設計上不利と考えられ、さらに建屋建設施工上の成立性も考慮した結果、PCCV の採用に至ったものである。図-2に発電出力が大きいケースでの PCCV と SCV のイメージを比較して示す。耐圧性能に優れる PCCV を採用すれば、容積は大幅に抑えることができる。

PCCV は、LOCA 時の耐圧機能に関してはコンクリートにプレストレスを導入することにより、漏えい防止機能に関しては鋼製ライナプレートをコンクリートに内張りすることにより、それぞれの機能を有する。さらに、SCV ではその外側に遮へい機能を有する鉄筋コンクリート構造の外



*1 Masahiko OZAKI

関西電力(株) 土木建築室
チーフマネジャー



*2 Kenji TAKEUCHI

関西電力(株) 土木建築室
マネジャー



*3 Takashi KITAGAWA

関西電力(株) 土木建築室

表 - 1 国内原子力発電所（PWR）における PCCV 採用実績

設置者名	発電所名(設備番号)	所在地	認可出力 (万 kw)	運転開始年月	プレストレス 方式	バットレス ^{※1} 数
日本原子力発電(株)	敦賀(2号)	福井県敦賀市	116.0	1987-2	BBRV	3
関西電力(株)	大飯(3号)	福井県大飯郡大飯町	118.0	1991-12	VSL	2
関西電力(株)	大飯(4号)	福井県大飯郡大飯町	118.0	1993-2	VSL	2
九州電力(株)	玄海原子力(3号)	佐賀県東松浦郡玄海町	118.0	1994-3	BBRV	3
九州電力(株)	玄海原子力(4号)	佐賀県東松浦郡玄海町	118.0	1997-7	BBRV	2
日本原子力発電(株)	敦賀(3号)	福井県敦賀市	(153.8) ^{※2}	—	設計中	
日本原子力発電(株)	敦賀(4号)	福井県敦賀市	(153.8) ^{※2}	—		

※1：バットレス：緊張材の定着部
 ※2：（ ）内計画値

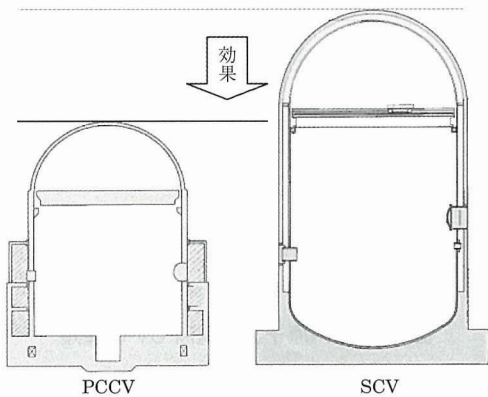


図-2 発電出力が大きいケースでのイメージ比較

部遮へい壁があるが、PCCVはコンクリート部が遮へい機能も有する。したがって、PCCVはSCVと外部遮へい壁の機能が一体化された合理的な構造体といえる。

2.3 PCCVの採用実績

PCCVは、欧米の原子力発電所において1960年代から採用されており、国内では日本原子力発電(株)敦賀発電所2号機において初めて採用された³⁾。表-1に国内原子力発電所(PWR)におけるPCCV採用実績を示す。現在建設が計画されている日本原子力発電(株)敦賀発電所3・4号機を含めると、全7ユニットとなる。

3. 大飯発電所3・4号機PCCVの設計・施工・維持管理

本章では、関西電力(株)大飯発電所3・4号機において採用したPCCVの設計・施工・維持管理の概要について述べる。

3.1 大飯発電所3・4号機の概要⁴⁾

大飯発電所3・4号機は1985年に準備工事に着手、3号機は1991年12月、4号機は1993年2月にそれぞれ営業運転を開始している。

PCCVを含む本館建屋の全景を写真-1に示す。

本PCCVの設計・施工は、「大飯発電所3、4号機用プレストレストコンクリート格納容器に関する技術指針(昭和62年2月 通商産業省資源エネルギー庁)」(以下『大飯3・4技術指針』という)に準拠した。



写真-1 本館建屋全景

3.2 PCCVの設計概要

(1) 構造の概要

PCCVの基本仕様を表-2に、PCCV概略立面および部分詳細を図-3に示す。PCCVは厚さ11.1mの基礎版、内径43m、高さ43mのシリンダー部および半径21.5mのドーム部から構成される容器である。上部構造のシリンダー部およびドーム部がプレストレストコンクリート構造である。内面の鋼製ライナプレートは、前述のとおり漏えい防止の機能を有しているとともに、コンクリート打設時の型枠にもなっている。緊張材(以下『テンドン』という)の容量は10MN(1000tf)級である。

テンダンの全体配置およびPCCV概略平衡面を図-4に示す。テンドンは、PCCVに箍(たが)をはめるように力が働く円周方向のフープテンドン(シリンダー部90本、ドーム部18本)と、PCCVを下に押しつけるように力が働く鉛直方向の逆Uテンドン(90本)で構成されている。円周方向を一周するフープテンドンは、バットレスと呼ばれる定着部に両端が定着される。バットレスは円周上の対角2箇所(筒所に設けられ、フープテンドンは、おのおののバットレスに交互に定着されるよう配置されている。逆Uテンドンは、45本ずつが平面的にみれば直交した格子状に配置され、

基礎版内にあるテンドンギャラリーの天井に定着される。
 プレストレス導入時の緊張力は、プラント供用期間中のコンクリートのクリープやPC鋼材のリラクゼーション等による緊張力の減退を勘案しても、LOCA時の膜応力が圧

表-2 PCCVの基本仕様

項目	仕様	
形状・構造・寸法	上部	
	形状 : 半球円筒型	
	構造 : プレストレストコンクリート構造	
	内径 : 43.0 m	
	内高 : 64.5 m	
形状・構造・寸法	底部	
	形状 : 平型基礎版	
	構造 : 鉄筋コンクリート構造	
プレストレス関係	版厚 : 11.1 m	
	バットレス数 : 2	
	プレストレス方式 : VSL方式(アンドボンド・防錆材充填)	
	緊張材(テンドン)	
	容量 : 10 MN級	
	本数(間隔)	逆Uテンドン : 90本 (@2°)
		シリンダーフープテンドン : 90本 (@450)
		ドームフープテンドン : 18本 (@2.5°)
	プレストレス導入時緊張力	逆Uテンドン : 7.05 MN (719 tf)
		フープテンドン : 7.19 MN (733 tf)
コンクリート	設計基準強度 44.1 N/mm ² (450 kgf/cm ²)	

縮状態にあるよう考慮され、フープテンドンで7.19 MN (733 tf)、逆Uテンドンで7.05 MN (719 tf)である。

なお、PCCVは、建設後の供用期間中もその性能維持に問題が生じていないことを確認するため、定期的に供用期間中検査(In-Service Inspection:以下『ISI』という)として緊張力を測定する必要があることから、フープテンドン、逆Uテンドンのいずれもテンドンを躯体に定着させないアンボンド方式とし、シーす内に防錆材を充填させている。

(2) プレストレス方式の概要

プレストレス方式は10 MN級のVSL方式を採用している。10 MN級のVSL方式の諸元を表-3に、テンドン定着部の概要を図-5にそれぞれ示す。表-3、図-5には他発電所で採用されているBBRV方式を併せて示す。

VSL方式は、一本のテンドンがφ12.7 mmのPC鋼より線55本で構成されており、規格引張強度は10.09 MN (1028.5 tf)である。定着部はアンカヘッドに反力を取り、ジャッキによりPC鋼より線を緊張させ、くさびによりPC鋼より線をアンカヘッドに定着させる方式である。テンドンに与えられた緊張力は、アンカヘッドと支圧板を介してコンクリート構造体に圧縮力として導入される。D側(ディテンション側)定着部は緊張力の解除(以下『ディテン

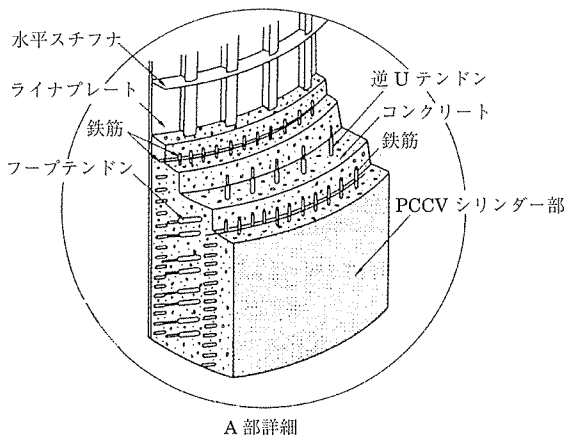
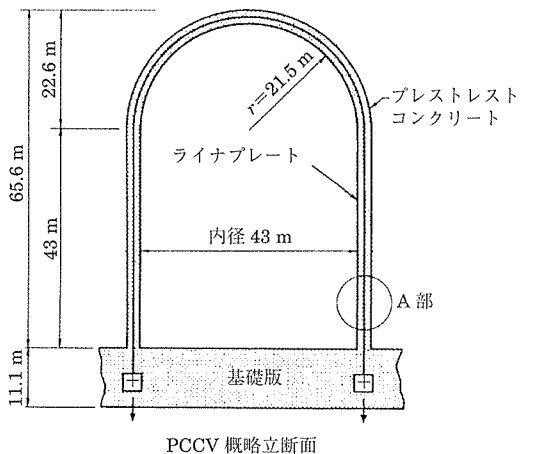


図-3 PCCV概略断面および部分詳細

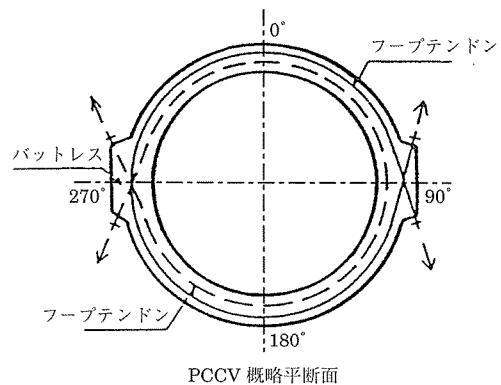
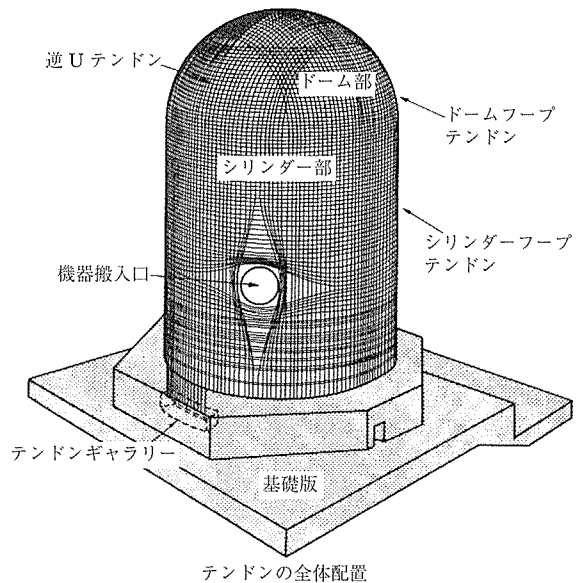


図-4 テンドンの全体配置およびPCCV概略平面

表 - 3 10 MN 級 VSL 方式の諸元

項 目		VSL 方式		BBRV 方式	
概要・構成	概 要	<ul style="list-style-type: none"> PC 鋼より線を用い、より線をウェッジ (くさび) により定着する方式 アンカ部は、D 側 (ディテンション側) と N 側 (ノーマル側) で一組となる 		<ul style="list-style-type: none"> PC 鋼線を用い、鋼線の両端を冷間加工したボタンヘッドにより定着する方式 アンカ部は、ショップ側とフィールド側で一組となる 	
	構 成	素線	JIS - G - 3536 ϕ 12.7 mm PC 鋼より線		JIS - G - 3536 解説級 ϕ 7 mm PC 鋼線
		規格引張強度	ϕ 12.7 mm \times 55 本 10.09 MN (1028.5 tf)		ϕ 7 mm \times 163 本 10.15 MN (1035 tf)
施工関係	テンドン加工	フープテンドン	逆 U テンドン	プーテンドン・逆 U テンドン	
	テンドン挿入方式	切り揃え	不要	要	要
		ツイスト	不要		要
		引込治具	不要	要	要
	テンドン挿入方式	プッシュスルー	プルスルー	プルスルー	
テンドン緊張方法	<ul style="list-style-type: none"> アンカヘッドに反力を取り、ジャッキにより PC 鋼より線を緊張 くさびにより、PC 鋼より線をアンカヘッドに定着 		<ul style="list-style-type: none"> PC 鋼線の端部を冷間でボタンヘッド加工 支圧板に反力を取り、アンカヘッドをジャッキで引き、PC 鋼線を緊張 支圧板とアンカヘッドの間にシムを挿入して定着 		

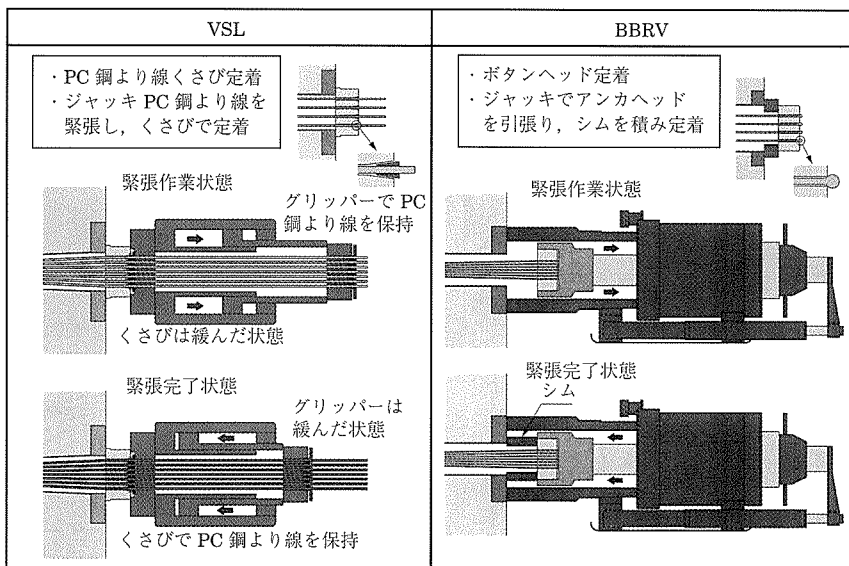
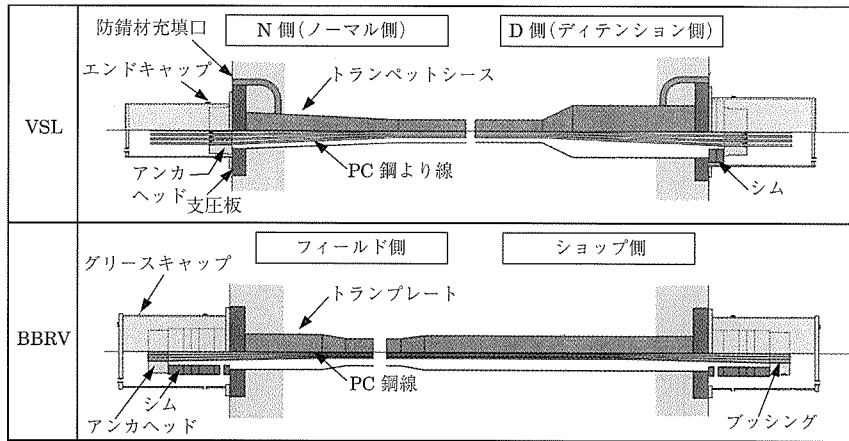


図 - 5 テンドン定着部の概要

ション』という)にも対応できるよう、トランペットシースの内径をコンクリート構造体内部まで拡張し、アンカヘッドがシース内に移動することにより緊張力が解除される機構となっている。供用中はアンカヘッドと支圧板の間にシムを挟み応力伝達を図っている。また、定着部はエンドキャップで覆われ、内部に防錆材を充填することにより、定着部内部への水分や空気の浸入を防止している。

BBRV方式は、PC鋼線の端部を冷間でボタンヘッド加工して支圧板に反力を取り、アンカヘッドをジャッキで引いてPC鋼線を緊張し、支圧板とアンカヘッドの間にシムを挿入することにより定着させる方式である。

3.3 PCCVの施工概要

(1) PS工事の施工方法

PS工事の概略施工フローを図-6に示す。本工事の簡単な流れとしては、支圧板やシース等の設置を鉄筋コンクリート工事と並行して行った後、コンクリート強度の発現(約3ヶ月)を待って、テンドンの挿入・緊張および防錆材の充填を行った。

テンドンの挿入は、フープテンドンでプッシュスルー方式を、逆Uテンドンでプルスルー方式を採用した。プッシュスルー方式は、プッシュスルー機によりあらかじめセッティングされたシース内にPC鋼より線を送り込む方式である。プッシュスルー方式の施工イメージを図-7に示す。PC鋼より線ごとに、1テンドンあたり55回繰り返して挿入した後、55本のより線端部を緊張に必要な長さを残して切断する。プルスルー方式は、あらかじめシース内に通してあるワイヤーロープを用いてテンドン牽き込み用のφ25mmのワイヤーロープをセッティングし、テンドンを接続した後、φ25mmのワイヤーロープを巻き取ってシース内

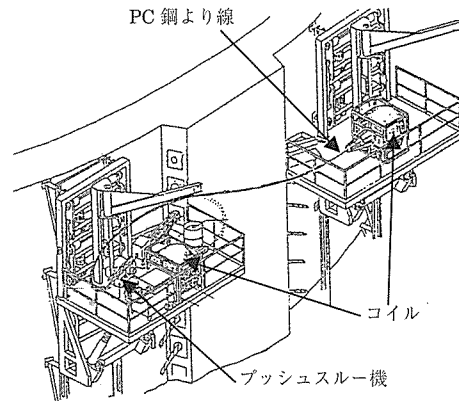


図-7 プッシュスルー方式の施工イメージ

にテンドンを牽き込む方式である。

テンドンの緊張順序の考え方を図-8に示す。この考え方に基づき緊張順序を決定した。

テンドンの緊張方法としては、図-5に示した定着部に緊張用ジャッキを取り付け、アンカヘッドに反力を取り、PC鋼より線を緊張した。写真-2にフープテンドンの緊張状況を示す。緊張手順は、N側(ノーマル側)より予備緊張を行った後、D側からの緊張、定着、N側からの緊張、定着を行った。

フープテンドンの挿入・緊張作業は、PCCVに1パットレスにつき2台設置したラックピニオン方式のエレベータを用いて行った。写真-3にPCCVエレベータを示す。な

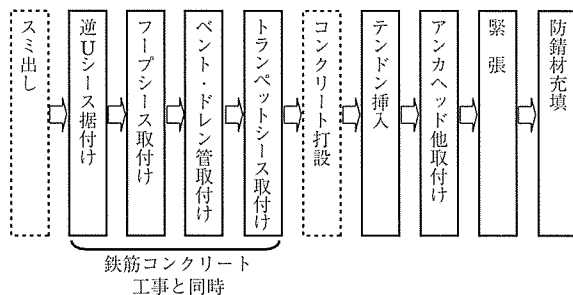


図-6 概略作業フロー

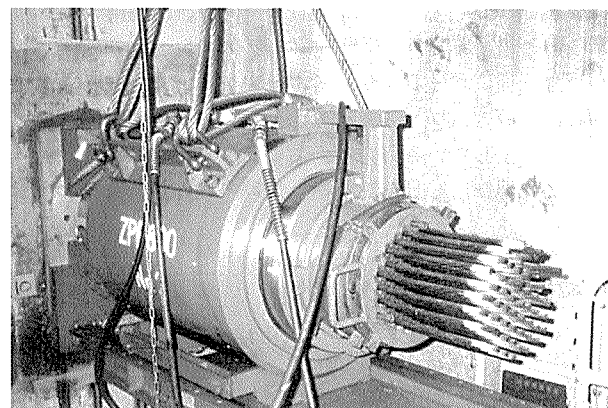


写真-2 フープテンドンの緊張状況

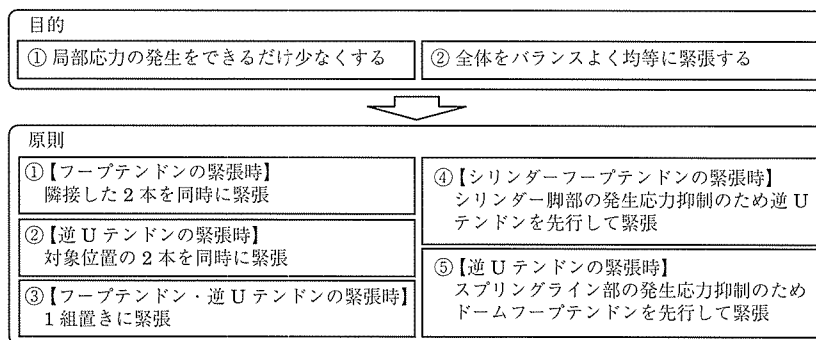


図-8 緊張順序の考え方

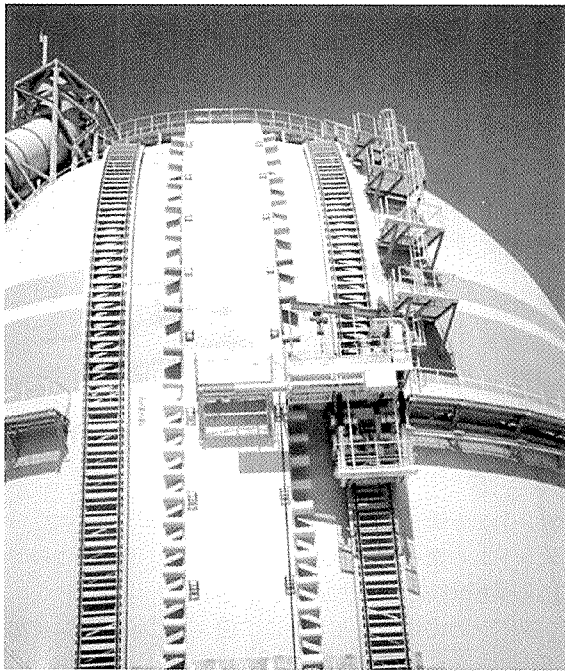


写真-3 PCCV エレベーター

お、本エレベータは ISI においても利用している。

緊張管理は、同時に 2 テンズンを緊張することと、開口を迂回することで 1 本ごとに異なるテンズン長さに対し緊張過程の各データを的確に把握することとした。このため、パーソナルコンピュータを用いた管理システムを構築し、一元管理を行うものとした。テンズン緊張管理システムの概要を図-9 に示す。プレストレス導入時の計測項目は、緊張力とテンズンの伸び出し量である。

緊張管理におけるリリースポイントは、大飯 3・4 技術指針に基づき、プレストレス導入時および定着完了時にテンズンに生じている応力度、およびプレストレス導入時のテンズン伸び出し量を設計値と比較することで設定し、管理した。

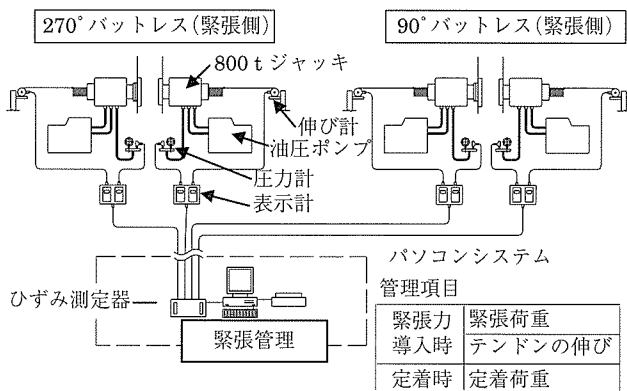


図-9 テンズン緊張管理システムの概要

防錆材は、定着部にエンドキャップを設置後、加熱したグリースをポンプによりシース内に充填した。

(2) コンクリート工事⁴⁾

コンクリートの調合を表-4 に示す。セメントは中庸熱ポルトランドセメントであり、混和材としてフライアッシュを用いている。コンクリートの設計基準強度は 44.1 N/mm² (450 kg f/cm²) である。PCCV の底版となる基礎版のコンクリートを除いて、ほぼすべて流動化コンクリートとした。また、高強度マスコンクリートの温度ひび割れ対策および夏季の構造体コンクリート強度の発現改善対策として、液体窒素によるプレクーリング工法を採用した。これは、生コン車アジテータ内へ液体窒素を直接噴射してコンクリート温度を下げるものである。

その他、施工に関する特色としては、①中性化等の劣化要因に対するコンクリートの耐久性向上を目的とした繊維型枠の採用、②シリンダー部で大型型枠と外部足場を一体化させて順次せり上げて施工するジャンピング型枠工法の採用、がある。

PCCV のコンクリートは、高強度マスコンクリートであるとともに原子力発電所の中でもとくに重要構造物であることから、強度の確保、温度ひび割れの防止、耐久性の確保等の各課題に対して工事着工前から事前検討を実施して工事に反映させるとともに、施工にあたっては綿密な品質管理を実施した。その結果、高品質のコンクリートを打設することができた^{5) 6) 7) 8)}。

(3) 構造性能確認試験

構造性能確認試験 (Structural Integrity Test : 以下『SIT』という) は、建設完了後の構造上の健全性を確認する目的で、実構造物に対して実施される試験である。本試験により、設計内圧の 1.125 倍の圧力に対する PCCV の構造性能を確認することにより、PCCV が設計内圧に対して十分な健全性を保持していることを確認している^{9) 10)}。

3.4 PCCV の維持管理

(1) 供用期間中検査 (ISI)

ISI は、発電所の運転期間中を通じて PCCV の機能が保持されているかどうかを確認する検査である。したがって建設以後、定期的に行うこととなっている。

ISI の主たる検査項目は、PCCV に導入されている緊張力の変化状況を把握するために行うリフトオフ力の計測である。他に防錆材中への水分浸水有無等を計測している。テンズンの緊張力は、コンクリートのクリープや PC 鋼材のリラクゼーション等により経時的に減退していくものと考えられている。そのため、抽出したテンズンに対し ISI 実施ごとにリフトオフ力を計測し、テンズン緊張力の経時変化を把握している。計測は、テンズン定着部にて実施している。図-10 に、フープテンズン (代表部位) の緊張力履歴を、予測値、設計要求値等と比較して示す。これまでに

表-4 コンクリートの調合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	単位重量 (kg/m ³)				
				セメント	フライアッシュ	水	細骨材	粗骨材
44.1	8 (15)	4	39	332	75	159	758	1003

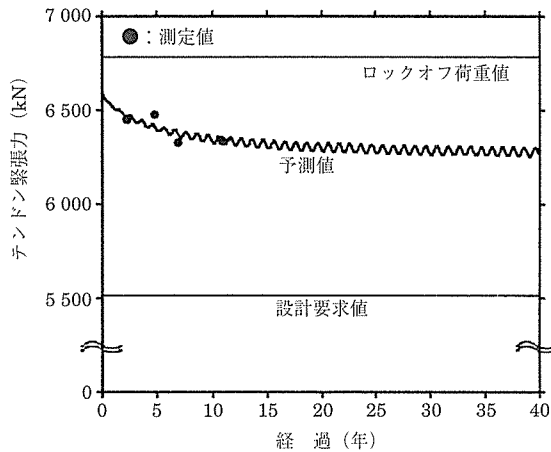


図-10 フープテンドン（代表部位）の緊張力履歴

行ったISIにより、PCCVは健全な状態であることが確認されている¹¹⁾。

(2) コンクリートのモニタリング

PCCVで打設したコンクリートと同じ調合のPCCV シリンダー部を模擬したコンクリート試験体を、躯体コンクリートの打設時期に合わせて製作した。その試験体を現地に暴露して長期的にモニタリングし、健全性確認のため、継続的に各種物性試験を行っている。表-5に試験項目と試験実施時期を示す。また、図-11に暴露10年目までの圧縮強度試験結果を示す。PCCVのコンクリートは建設以後も健全であることが確認されており、今後も継続的にモニタリングしていく予定である¹²⁾。

表-5 試験項目と試験実施時期

試験項目	試験実施時期						
	13週	6ヶ月	1年	2年	5年	10年	20年(予定)
圧縮強度	○	○	○	○	○	○	○
静弾性係数	○	○	○	○	○	○	○
動弾性係数	○	○	○	○	○	○	○
中性化深さ	○	○	○	○	○	○	○
塩化物含有量	○	○	○	○	○	○	○
鉄筋の性状	-	-	-	-	○	○	○
長さ変化	○	○	○	○	○	○	○

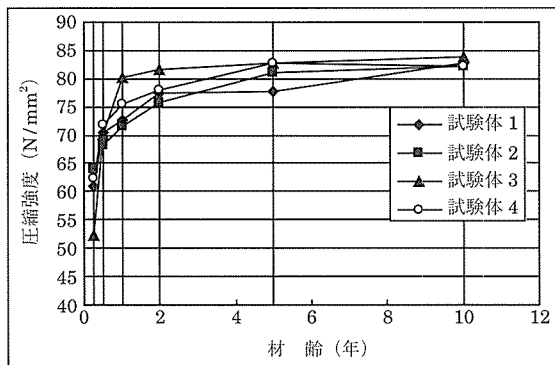


図-11 暴露10年目までの圧縮強度試験結果

4. 原子力発電所に係る技術基準

原子力発電所設計および建設に係る現行の主な法令を図-12に示す。本報でこれまで述べたPCCVの電気事業法に基づく体系の中で技術詳細は、「コンクリート製原子炉格納容器に関する構造等の技術基準（告示第452号）」（以下『告示452』という）に規定されている。告示452は大飯3・4技術指針の他、それまで運用されていた各プラントの既設PCCVの技術指針の内容を反映したものである。

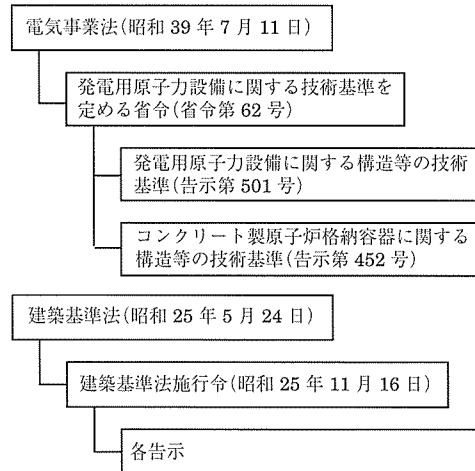


図-12 原子力発電所設計および建設に関する現行の主な法令

一方、社会における大きな流れとして、新たな知見の積極的導入による安全確保の実効性を高めるために「規制基準は要求性能を中心とした規定とし、その実現方法として学協会規格をはじめとする民間規格を積極的に活用する。」¹³⁾とされ、日本機械学会において平成15年12月に、原子力発電所のPCCVおよびRCCV（鉄筋コンクリート製格納容器）の材料および設計に関する規格である「発電用原子力設備規格 コンクリート製格納容器規格」¹⁴⁾（以下『CCV規格』という）が制定されるに至っている。

CCV規格の構成を図-13に示す。

- CVE-1000 総則
 - CVE-1100 適用範囲
 - CVE-1200 用語の定義
- CVE-2000 材料
 - CVE-2100 一般事項
 - CVE-2200 コンクリート
 - CVE-2300 鉄筋
 - CVE-2400 緊張材、定着具および防せい材
 - CVE-2500 ライナプレート、ライナアンカ等
 - CVE-2600 ナックルおよび胴アンカ
- CVE-3000 設計
 - CVE-3100 一般事項
 - CVE-3200 荷重および荷重の組合せ
 - CVE-3300 コンクリート部の解析手法
 - CVE-3400 コンクリート部の許容応力度
 - CVE-3500 コンクリート部の設計
 - CVE-3600 ライナプレート、ライナアンカ等の設計
 - CVE-3700 ナックルおよび胴アンカの設計

別表1~5

図-13 CCV規格の構成

CCV規格は、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（告示第501号）に対応して制定された「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」¹⁵⁾との整合を図って学協会規格としての体系化を目指しており、また、SI単位への対応、最新知見の盛り込み等に取り組んでいる。

5. おわりに

本報では、原子力発電所の重要設備である原子炉格納容器でのプレストレストコンクリート技術の活用状況について述べた。本報が、プレストレストコンクリートに携わる方々に多少なりとも参考となれば幸いである。

最後に、本報の作成にあたり貴重なご助言をいただきました東京電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)、(株)大林組、大成建設(株)、(株)ピーエス三菱に、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 柴田卓詞 他；堺 LNG センター建設工事の概要，電力土木，No. 306，pp.59～，電力土木技術協会，2003年7月
- 2) 浅野真一朗 他；10万トン級石炭サイロの設計と施工，日本建築学会技術報告集，Vol.17，pp.25～，日本建築学会，2003年6月
- 3) プレストレストコンクリート技術協会；日本原子力発電敦賀2号機 PCCV；プレストレストコンクリート，第28巻特別号，昭和61年12月
- 4) 山本貢 他；大飯原子力発電所3・4号機 PCCVにおけるコンクリート工事，コンクリート工学，Vol.29，No.2，pp.27～，コンクリート工学協会，1991年2月
- 5) 坂本哲郎 他；高強度マスコンクリートの部材強度特性に関する研究（その1～その7），日本建築学会大会学術講演便概集，pp.221～，日本建築学会，1987年10月
- 6) 永野徹 他；高強度マスコンクリートの部材強度特性に関する研究（その8～その9），日本建築学会大会学術講演便概集，pp.301～，日本建築学会，1988年10月
- 7) 浅野真一朗 他；高強度マスコンクリートの部材強度特性に関する研究（その10～その11），日本建築学会大会学術講演便概集，pp.537～，日本建築学会，1989年10月
- 8) 浅野真一朗 他；高強度マスコンクリートの部材強度特性に関する研究（その12～その13），日本建築学会大会学術講演便概集，pp.265～，日本建築学会，1990年10月
- 9) 桜井和夫 他；原子炉格納容器の構造性能確認試験（その1～その3），日本建築学会大会学術講演便概集，pp.1405～，日本建築学会，1991年9月
- 10) 萩尾浩也 他；原子炉格納容器の構造性能確認試験（その4），日本建築学会大会学術講演便概集，pp.1543～，日本建築学会，1991年9月
- 11) Toshihiro Ikeuchi · Masahiko Ozaki · Hiromi Ohashi · Katsuhiko Suzuki；STUDY ON EVALUATION METHOD FOR STRUCTURAL INTEGRITY OF PCCVS AT OHI NUCLEAR POWER STATION, THE FIRST fib CONGRESS 2002, Vol.2, pp.37～, Japan Presorted Concrete Engineering Association, Japan Concrete Institute, 2002
- 12) 尾崎昌彦 他；コンクリートの長期物性モニタリング試験，日本建築学会技術報告集，Vol.13，pp.9～，日本建築学会，2001年7月
- 13) 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会；原子力発電施設の技術基準の性能規定化と民間規格の活用に向けて，平成14年7月22日
- 14) 日本機械学会；発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格，2003年12月
- 15) 日本機械学会；発電用原子力設備規格 設計・建設規格，2001年8月

【2004年9月13日受付】