

特集

原電敦賀PCCV



絶えざる研究による敦賀 PCCV 工事の成功

猪 股 俊 司*



* Shunji INOMATA
(株) 日本構造橋梁研究所

日本原子力発電(株)敦賀2号機 PC 格納容器が完成し、61 年始めに内圧による構造性能確認試験および漏洩率試験も無事完了、引き続き本格的試験運転状態にあることは誠に慶賀すべきことであり、大型コンクリート構造物への本格的プレストレッシング技術の適用例として我が国では最初のものであり、今後 PC 構造物発展への新しい第一歩と考えられる。計画当初より関係した者として誠に喜びに耐えない。

原子力発電に PC を適用する技術はフランス、イギリス、等にあつてガス冷却、グラファイト減速炉用圧力容器として古くから開発実用化されている。高温高压を受ける圧力容器として PC が経済的に利用できることが立証され多くのガス炉用圧力容器が建設された。

その後、原子力発電方式の進歩は、軽水炉方式へとその方向が転換され、原子力発電用圧力容器としての PC の使命は終了した。比較的発電容量の小さい軽水炉にあつては、事故時安全確保のための格納容器は鋼製で十分建設可能なため、鋼格納容器と鉄筋コンクリート製生体遮蔽シリンダーとの2重構造とすることが多かった。しかしながら発電容量の増加とともに事故時安全確保のために必要な格納容器内容積の急増により、格納容器寸法は非常に大きいものが必要となってきた。特に PW 方式軽水炉発電所にあつては格納容器内容積が非常に大きいので、鋼製格納容器では必要鋼板厚が信頼できる現場溶接の可能な厚さ以上となるため、再び PC の適用について検討され、現在は広く世界で利用されるに至っている。発展途上国にあつては、発電容量が比較的小さい場合でも、現場溶接技術の不足をカバーする目的で PC 格納容器を建設している所もある。敦賀2号機 PC 格納容器建設の可能性に関して日本原子力発電(株)より相談のあつたのは昭和 52 年末頃であつたと記憶している。諸外国での PC 格納容器利用状況に刺激され敦賀2号機建設を機に国内でも PC 格納容器を利用しようとした。進歩的発想に敬意を表しながらも、橋梁、タンク、等の経験しかない国内で、原子力発電所事故時安全確保のかなめである巨大な格納容器を地震国である我が国で建設可能であるか否か十分検討すべきことと考えられた。

しかしながら既に国内にあつては当時世界最大スパンである浜名大橋が PC で完成しており、構造寸法としては従来の国内構造物とは比較にならぬほど大きい。構造形状としては比較的単純であるので、当時の国内 PC 技術を結集すれば十分建設可能と判断し、その旨日本原子力発電(株)に答申した。勿論この答申によるものばかりではないが、最終的に PC 格納容器採用が決定されたが、その決断に敬意を表するものである。

PC 格納容器の設計自体は米国 ベクテル社が実施する

ものであるが、米国規準 ASME のみによることなく、通産省資源エネルギー庁技術基準案、建築学会、土木学会、等の関連規準、等を取り入れて日本固有の各種設計基本を反映させることとした。

設計基本条件決定にあたって次の4つが最も重要かつ論議のまとなった。

- (1) ドーム形状：当時 PC の格納容器は偏平ドーム、リングガーダー形式のものが多く、地震時応答解析結果は半球型ドームとする方が、応答値を偏平ドームの場合の約 84% とすることが可能であり、半球ドーム、逆Uテンドン配置（ベースマット内のテンドンギャラリを緊張端とし、側壁、半球ドームを連続配置される緊張材配置）方法を採用することが有利となり、この形式に決定された。これは当時としては最も進歩的な形状であった。
- (2) バットレスの数：シリンダ部水平円周方向テンドン定着用バットレスの数は、当時ベルギーで2とした例が知られているが、一般には3個以上である。一応3個以上の場合について比較検討を実施した結果、バットレス数を3とするのが有利と結論された。このバットレス数3もまた当時の先端を行くものであった。
- (3) テンドン容量：諸外国にあつては、PC 格納容器に 500 t 級および 1000 t 級の緊張材が利用されている。しかし (1)、(2) で決定したように半球ドーム、3バットレス構造とした場合 1000 t 級テンドンがより有利であるとの結論に達した。当時米国にあつて実績のある BBRV 方式の緊張材（7 mm PC 鋼線 163 本より構成）を採用することに決定された。製造された緊張材にツイストを加えることにより構成素線の引張応力均等化が可能であることなど細部にわたつての緊張材製造上の注意が要求された。
- (4) ダクト内処理方法：ヨーロッパ諸国、特にフランス PC 格納容器では常にセメントペースト注入が実施され、長い弯曲した緊張材、鉛直緊張材、等のダクト注入方法について数多くの実物試験が実施され、注入に関しては絶対的自信を持っていた。またセメントペーストを注入しなかった測定用緊張材引張力測定結果によると、その経時変化は設計計算結果とほとんど同じ傾向で安全側に変化していることなどから、セメントペーストを注入し、特に使用中の引張力変化測定は不要と考えていた。これに反し米国の規制当局は発電所運転期間中にリフトオフによるプレストレス力の検査、PC 鋼線腐食その他有害な影響の有無、等の検査を要求している。また万

一セメントペーストを注入した場合には、埋込みゲージにより PC 格納容器応力およびひずみ変化を測定してプレストレス力の異常変化の有無を監視するか、あるいは内圧試験を実施して間接的にプレストレス力の変化、緊張材異常、等を調査するよう規定されている。したがって米国ではセメントペースト注入は使用中緊張材検査の点からは著しく不利な状態におかれていた。

以上 PC 格納容器建設について十分な経験を有している2先進国の意見が相反しているため、我が国にあつてはいずれの方法によるべきかについて多くの論議がかわされ、いずれとも決着をつけ難い状況にあつた。しかし我が国原子力発電技術に関する限り米国の有形無形の影響は絶大であり、使用中検査も国内で要求される当時としては、グリースを注入して、リフトオフ試験が全緊張材について可能なようにしておくのが当面は安全であるとの結論に達し全ダクトはグリースで注入されることとなった。

以上の基本条件決定とともに設計計算に用いるべきコンクリートクリープ係数、乾燥収縮ひずみおよび PC 鋼材レラクセーション率、等に関して国内各種規準、CEB—FIP 規準、国内での試験結果、等を参考として種々論議のうえ決定された。設計計算にあたり面内、面外のせん断に対する補強方法、温度応力によるひびわれ発生断面補強鉄筋量算定法、等、従来あまり問題とならなかった新しい設計上の問題が数多く出てきた。特に温度によるひびわれ発生断面の剛性評価をどのようにするのが適切であるか、についてベクテル社の設計方法について論議が集中した。すなわち国内規準による設計では鉄筋量がベクテル社の設計値に比して約 10% 増加となるからである。一応安全側とすることで一応の結論に達した。

また、模型試験を実施することで構造安全性を確かめることとなり、関西電力と共同で 1/8 縮尺模型試験を実施した。さらに静的水平加力試験と動的挙動との相関性を確かめるため日本原子力発電（株）は 1/30 縮尺模型を製作し、付加質量を取り付けて、振動台上で振動試験を実施し、その安全性を確認した。

施工面では多量の鉄筋が配置されている断面のコンクリート打ちの実物試験を実施した。またシース板厚、リブ形状とその間隔、等に関しては土木学会 PC 標準示方書（53 年度版）10.5 解説に示す試験を実施のうえ決定された。さらに現場曲げ作業性の確認試験も実施されている。BBRV 緊張材についての静的試験、低サイクルおよび高サイクル試験も実施され、またプレストレス時の摩擦損失を確認するため、逆Uテンドン、逆Uおよびドームフープテンドン、フープテンドンおよび大

開口部まわりテンドンの代表的形状寸法のものについて摩擦試験が実施され設計値の安全性が確かめられたほか、6本の緊張材について摩擦試験を実施し、 $\mu=0.10$ 、 $\lambda=0.0005$ が得られた。

プレストレス管理は多くの場合、計算伸びに対する測定伸びの誤差の百分率の限界を設けることで実施されている。この限界値を1本ごと、およびグループごとにかほどに定めるのがPC格納容器安全性のために適切であるかについて、諸外国での測定結果などを参照しながら理論的考察をもととして論議され最終決定に至った。

国内で最初のPC格納容器建設ということもあるが、これだけの各種試験と基本問題について論議の交わされた例は無いのではあるまいかと考えられる。目的を達成するため、発注者側、施工業者および筆者のようなコンサルタント側3者が常に緊密な協同作業を実施した結果、工事は誠に順調に進み、昭和61年2月に内圧を 4.5 kg/cm^2 まで上昇させ構造性能確認試験を実施するこ

とができた。昭和57年10月岩盤上レベルコンクリート完了から約40か月であった。

構造性能確認試験にあつてPC格納容器変形測定値は計算値とほとんど一致し、内圧変形関係は内圧長時間保持時のクリープ変形増を除けば完全な比例関係を示し、除圧時ほとんど残留変形はなく、完全に弾性的挙動を示し、その構造性能として力学的に健全であると判断された。

また漏洩率も非常に小さくPC格納容器として全く健全であると判定できた。

本工事に関係されたパイオニアとしての誇りと使命感とによって工事は完成させられたものと考えられる。将来さらに安全確実なPC格納容器設計・施工のため、設計上は温度応力に対する配筋法、面内力、面外力に対するより合理的補強方法、ダクト注入方法のより経済的解法、等とともに全体形状、全体構造クリープ解、等の研究が進められることを望んで止やまいものである。