

プレストレストコンクリート円形構造物

荒 川 敏 雄*
 齋 藤 雄 三**
 林 三 雄***

1. はじめに

円形、あるいは円筒系の構造物は、プレストレスを最も合理的に利用できる構造として広く知られている。

我が国におけるプレストレストコンクリート造の円形・円筒系構造物（以下PC円形構造物という）の経緯は、昭和34年に3基の水槽（内1基はプレロード方式）が完成した時期から始まるが、当時のヨーロッパでは既に大型の円錐形高架水槽やサイロが数多く造られており、PC構造の中では欧米に比べその普及が最も遅れている分野とされていた。その後の推移も昭和40年代の初期に至るまでは年間の発注件数が、全国でわずか数件から40件程度に微増したにすぎない状況であった。しかしながら、この頃より全国的規模で急速に普及が進んできた上水道事業の効率的な運営計画に乗って、PCタンクの需要が伸び始め、昭和40年代中ばには年間の発注件数が100数十件に達してきた。また特殊な用途としては、低温液化ガス（Refrigerated Liquefied Gases:

以下RLGという）に属するもので、我が国では第1号となった石油液化ガス（Liquefied Petroleum Gases: 以下LPGという）用PC容器がちょうどこの時期（昭和44年）に完成をみている。図一にタンク・サイロ類の発注件数の推移を示す。

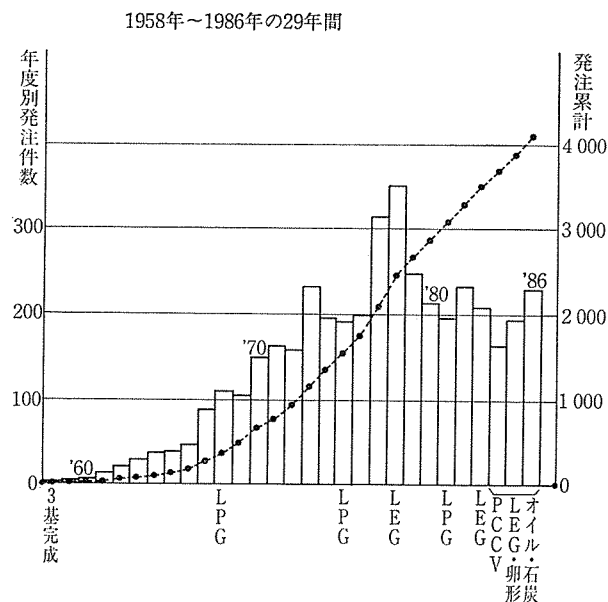
昭和40年末から起きた第一次オイルショック後の昭和50年代初期には、高成長から減速経済への移行もあって上水道事業用PCタンクの需要には大きな変化は起こらなかったものの、下水道事業の遅延により消化タンクのPC化に陰りがみえ、これが後に消化効率の高い卵形消化槽の実現に連なっている。また、この時期には時を追うごとにオイル（原油）コストのアップが続き、掘削コストの高い海底油田の開発が活発に行われ、ヨーロッパでは巨大な円筒PC構造物（Oil-Rig）が建造されている。一方、我が国では、エネルギーの石油依存を低下させるために大型の原子力発電プラントの建設に拍車がかかり、10年後の昭和61年には技術の粋を集めた原子炉格納容器（Prestressed Concrete Containment Vessel: 以下PCCVという）の完成をみるに至る。

この10年間は、前述した構造のほかにも大型のLPG容器や、 -100°C を超える液化エチレンガス（Liquefied Ethylene Gases: 以下LEGという）容器、セメントサイロ、石炭サイロ、ジェット燃料容器、液化天然ガス（Liquefied Natural Gases: 以下LNGという）用防液堤、卵形消化槽、超高煙突等が完成し、PC円形構造物が目覚ましい発展を遂げてきた。以下、本文はPC円形構造物の現状分布と今後の動向について報告するものである。

2. 円形構造物の現状と概要

PC円形構造物の多くは容器構造物として利用されているが、全方向に同等の剛性と高耐力を保持できる特徴を生かして超高の塔状構造物（タワー、煙突等）にも適用されている。

容器構造については、その内容物の性質（自然状態の）によって概ね液体用・粉体用（含粒体）・気体用（含RLG）・遮へい用（バリア）等に分けることができるが、その構造の持つ役割は複雑に交錯し区別し難いものがあ



図一 年度別発注件数と累計（1958年～1986年の29年間）（PC建設業協会調べ）

* ピー・エス・コンクリート（株）技術部
 ** ピー・エス・コンクリート（株）原子力事業部
 *** ピー・エス・コンクリート（株）技術部

る。一般にひびわれの無いコンクリートは、一定の水密性とわずかな気密性を持つが、この特性をプレストレスによって持続させ、かつ地震等の一時的な荷重に対しても復元力で保持するというのが PC 構造を適用する場合の大きな狙いと考えられる。したがって要求される条件によって構造の役割が決まることになり、保護材を用いた複合構造も数多く存在する。

PC 円形構造物を要求される性能からみると、コンクリート自体で水密性・気密性を保持する構造と高い耐力・復元力に重点を置き、水密性・気密性については鋼板等(ライニングプレート)を用いて保持するものに分かれる。前者は上下水道タンク、プール、ポンド、サイロ等があり、後者はオイルタンク、RLG 容器、PCCV 等である。

ここでは便宜的に液体・粉体(含粒体)・気体(含液化ガス)・遮へい(バリア)・円筒塔状構造に分け、その概要並びに最近徐々に開発が進められているプレキャスト円形構造について述べるものとする。

2.1 構造物の用途別分類とその特徴

(1) 液体用容器

この分野で最も代表的なものは上水道タンクであり、数では PC 円形構造物の大半を占めている。この構造の役割は常時および地震時の荷重(含動水圧)に対する安全性と一定の水密性を要求される。傾向としては、居住区より高い位置に数多く建設されることから周辺の環境に違和感を起こさないようデザインに工夫をこらし、成熟期に入って久しい趣きを持っている(写真-1)。

一方、下水道用消化タンクは、数は少ないが槽の消化効率を高めるために卵形をしたユニークな構造が出現している。これにはその形状から耐震性能の確保と複雑な建設技術が要求される(写真-2)。

次にこの分類に属するものとしてオイルタンク等があり、既にジェット燃料用の貯油槽が完成している。これは高い水密性に加え、気密性が要求されることから槽内

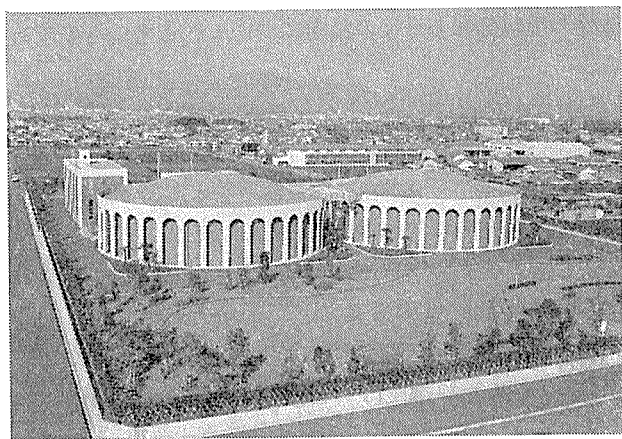


写真-1 都城一万場配水池

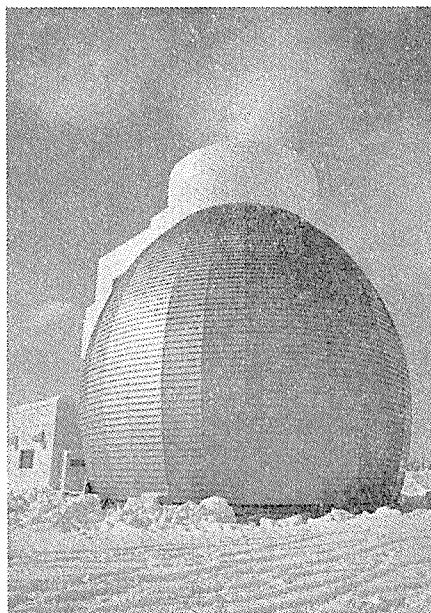


写真-2 卵形消化槽(岩見沢)

全面に鋼板ライニングが施され、PC 円形構造体はすべての荷重を受け持つ外殻として構成されている。

(2) 粉体用容器

粉体(含粒体)容器は通常サイロとして使用される円形構造物である。内容物が粉体の場合、エアを利用して貯蔵、払い出しが行われるため、構造自体一定の気密性が要求される。また粒体容器としてはクリンカーや石炭用サイロが建設されている。中でもクリンカー用サイロは、工場の付属設備として造られた場合、高温(200°C前後)貯蔵が考えられ、環境に対する特別な配慮が必要となる。これは粉体であるが、セメントサイロについても同様の配慮が若干必要とされる。

(3) 気体(含 RLG)用容器

気体の場合、通常液化して貯蔵され、代表的なものとして RLG 容器が挙げられる。現在、我が国では数基の LPG・LEG 容器が PC 構造で建設されている。また LNG については、防液堤として PC 構造のものが建設されているが、本体構造はまだ実現していない。これらの容器は極低温の液体が貯蔵され、高い気密性と災害時の安全性確保から構造には材料の対温度特性を含む厳しい条件が課せられている。極く一般的であるが、通常液体に直接触れる金属製バリア、保冷材、荷重の分担並びに災害時のバリアとなる PC 容器により構成される。その方法はいくつか考えられ、欧州では既に建設されている。表-1 に RLG の大気圧での温度を示す。

表-1 RLG の温度

RLG の種類	大気中の温度
ブタン	-5°C
アンモニア	-33°C
プロパン	-45°C
エタン	-90°C
エチレン	-104°C
天然ガス	-164°C
窒素ガス	-196°C

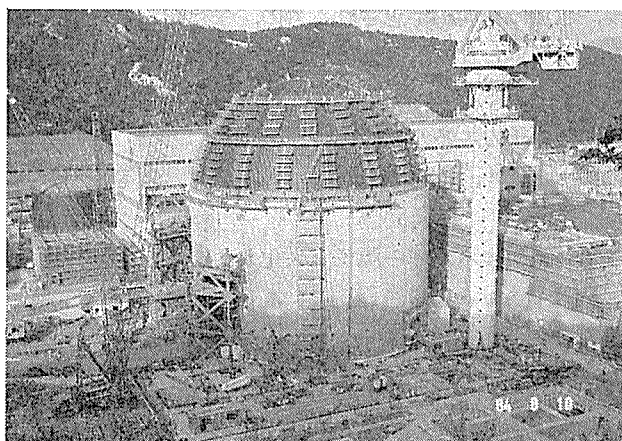


写真-3 PCCV (敦賀2号機)

(4) 遮へい用容器

遮へい用容器としては PCCV があり、既に1基が完成している。これは放射線の遮へいを目的とするもので、原子炉の最終バリアとして極めて重要な役割を担っている。構造は、容器の内面は鋼板のライナープレートで覆われ気密性の確保と放射線の漏洩を防止している。また緊急時の内圧および地震時の荷重は PC 構造が負担するシステムであり、現在我が国では新たに4基の PCCV が着工されている(写真-3)。

(5) 塔状構造

塔状構造には高架水槽の柱部シリンダー、PC 煙突、円筒形タワー等がある。我が国では高さ 169.5m の PC 煙突が1基建設されている(写真-4)。これらは通常円周方向は RC 構造で、高さ方向のみ PC 構造とする例が多い。また、この部門にはサージタンクもあり、高さ 50m のタンクが既に建設されている。これは(1)の液体用容器の分類にも属し、円周方向、高さ方向とも PC 構造で造られている。表-2 に用途別の分類表を示す。

2.2 プレキャスト化

PC 円形構造物の分野でも最近、プレキャスト化が進められている。円形構造物のプレキャスト化については、

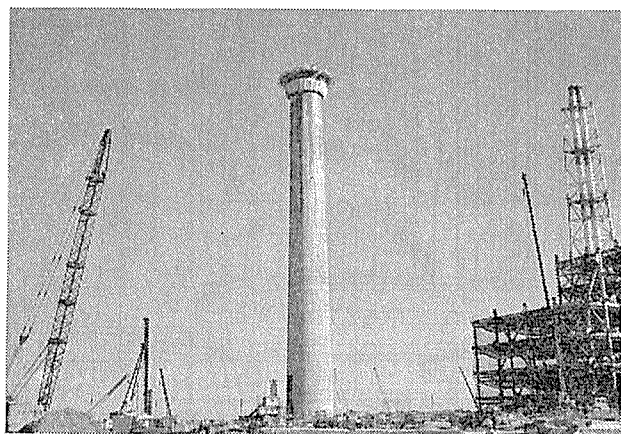


写真-4 石川火力 PC 煙突

表-2 円形構造物の用途別分類

用途別	実施構造例
液体用	上下水道タンク、オイルタンク等
粉体用	石炭、クリンカー、セメント、穀物サイロ等
気体用	LPG, LEG 容器等
遮へい用	PCCV 等
塔状構造	煙突、タワー、サージタンク等

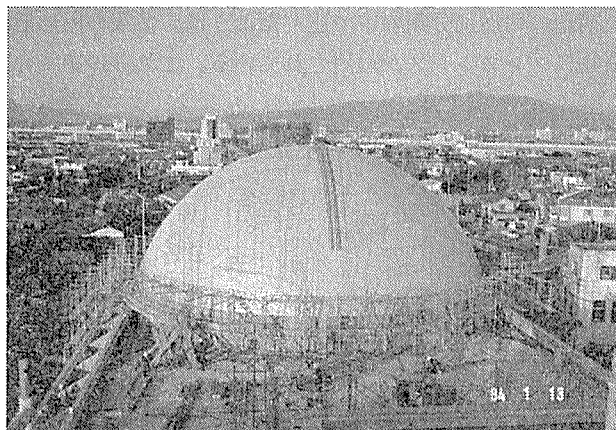


写真-5 PC ドーム (栃木子供館)

建築分野で、昭和40年代中ばより、プラネタリウム球殻を頂点より放射状に36枚(10°分割)、または24枚(15°分割)の二等辺球殻三角形に分割して製作し、現場で組立架設する方式で多数建設されてきた(写真-5)。

一方、PC 容器については、円筒殻が多く比較的容易にできる形状であるが、プレキャスト化が進まなかった。これらの理由としては、次のようなことが考えられる。

- ・水密性が要求されることが多く目地処理に難あり。
- ・底版および屋根(ドーム)部は場所打ち工法となる。
- ・高い製作精度と架設組立精度が要求される。
- ・コスト高となる。

等が挙げられる。したがって今まで実現しているものは、小型で2~3の円筒殻で簡単に組立てられる水槽、また円筒殻を縦割りにし、比較的背が低く屋根の無いポンド等であった。しかしながら最近では通常の上水用タンク等を円周方向、高さ方向とも多数の円筒殻に分割し、組み立てる手法が開発されている。プレキャスト化のメリットは次のとおりである。

- ・品質の安定した構造が得られる。
- ・現場でコンクリートを打設できないような場所にも造ることができる(必要な大きさに構造を分割できる)。
- ・工期が早い。

等が挙げられ、今後、発展が期待できる工法と考えられる。

3. 円形構造物の動向

PC 円形構造物の推移と現状は既に述べたとおりであるが、30年の歴史の中、この10年間は目覚ましい発展が見られる。現状を通して今後の発展が予測される構造および欧米を含む適用例とその特徴を紹介する。

3.1 各種構造物へのプレストレスの適用

構造の用途別分類の中で述べたように、多数の円形構造物にプレストレスが適用されている。これらの中で今

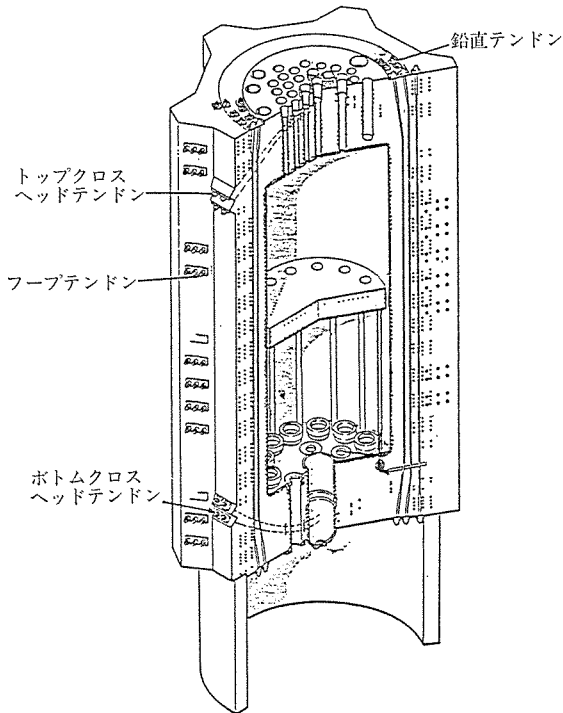


図-2 Fort St. Vrain PCRV

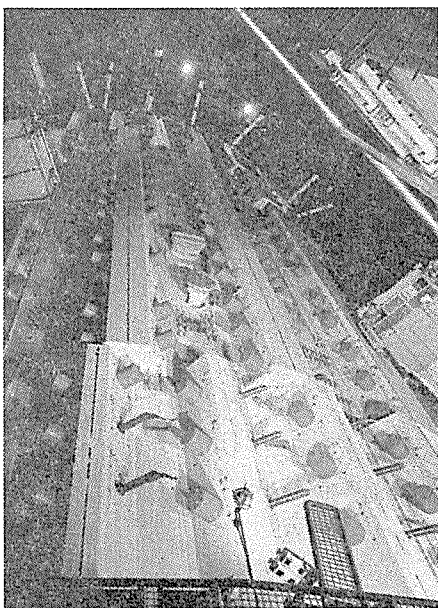


写真-6 施工中の Schmehausen の PCRV

後、さらに発展が予想されるもの、また新たに適用を試みると考えられる構造について、それらを整理すると次のようである。

- ① 原子力エネルギー源：原子炉圧力容器、格納容器
- ② オイル、RLG (LPG, LNG, 液化水素等) の貯蔵容器
- ③ 石炭エネルギー源：ガス化および骨化物の貯蔵容器
- ④ 熱水や圧縮空気のエネルギー貯蔵容器
- ⑤ 化学工業製品の貯蔵容器
- ⑥ 上下水、海水淡水化容器
- ⑦ 各種生産物用の容器 (タンクおよびサイロ)

これら容器の中には既に実施されているものもあるが、多くは、形状、規模、性能、荷重、安全性等、新たな技術開発を必要とする。したがって直ちに実現の方向に結びつかないが、次の項でいくつかの適用例を挙げて、その動向を探ることとする。

3.2 適用例とその特徴

PC 円形構造の容器は、在来の材料を用いて安価に任意な形状の構造体を造れる利点を生かし、厳しい環境 (高温、衝撃、放射線等) にも対応のきく特性から多くの分野で検討が行われ、いくつかの実用に供してきた。しかしながら最近ではさらに開発が進み、プレストレスの原理を生かし、鋳鉄や鋳鋼を用いて“PC 構造だけでは解決できない点”をカバーする複合構造体も研究が進んでいる。

3.2.1 原子炉容器

(1) 原子炉圧力容器

(PCRV : Prestressed Concrete Reactor Vessel)

圧力容器としては、高温ガス炉 (HTR : High Temperature Gas-cooled Reactor) 等の建設実績があり、現

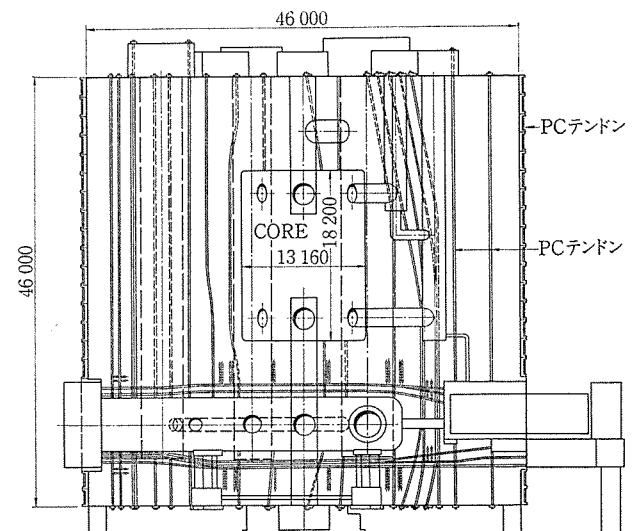


図-3 HTR 用 PCRV

在も稼働している。その実例としてアメリカの Fort St. Vrain, 西独の Schmehausen 等がある (図-2, 写真-6, 図-3)。また軽水炉の沸とう水型 (Boiling Water Reactor: BWR) にも応用が検討されている (図-4)。

(2) 原子炉格納容器 (PCCV)

アメリカ, フランスを中心に 100 基以上の建設が行われた PCCV は, 我が国においても, 従来鋼板で造られていた加圧水軽型水炉 (Pressurized Water Reactor: PWR) の改良標準型として原電敦賀 2 号機でその第 1 号が誕生したことは多くが知るところである。そしてほぼ同型式で現在, 関電大飯 3, 4 号機, 九電玄海 3, 4 号

機が建設中である (図-5, 6)。また, アメリカでは, BWR に PCCV が用いられた例として, La Salle 等がある (図-7)。

3.2.2 液化ガス貯蔵容器

PC 構造の LNG 容器は我が国ではまだ実績は無いが, フランス等の例を見ると, 地上式の LNG 容器はかな

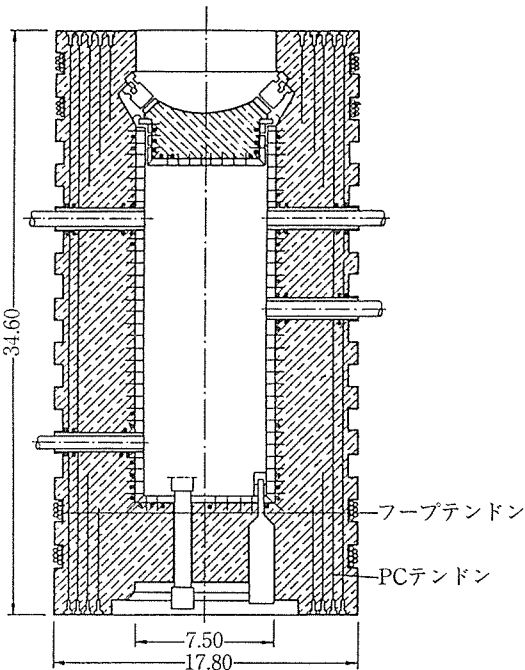


図-4 沸とう水型原子炉

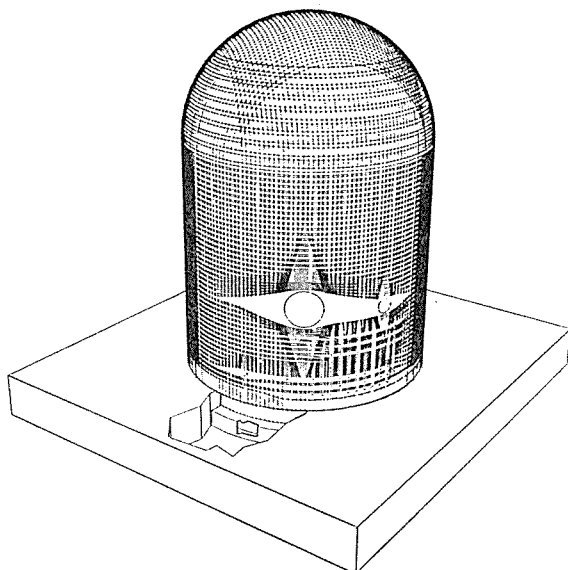
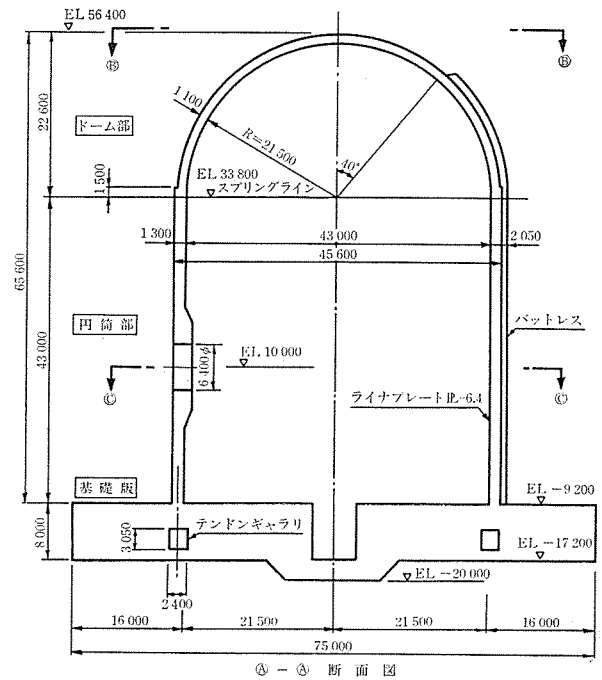
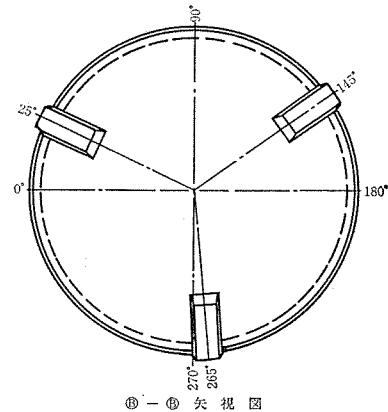


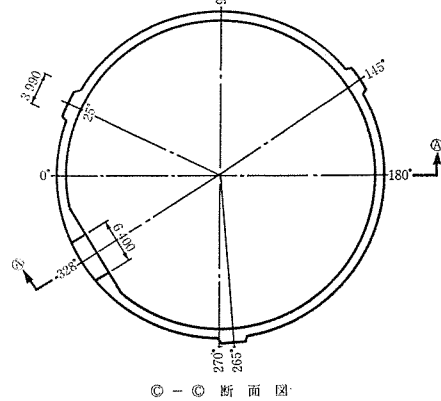
図-6 原電敦賀 2 号機 PCCV のテンドン配置図



④-③ 断面図



⑥-⑤ 矢視図



⑧-⑦ 断面図

図-5 原電敦賀 2 号機 PCCV 形状図

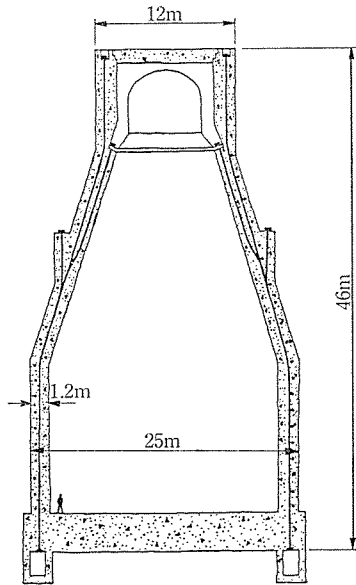


図-7 沸とう水型原子炉用 PCCV

りの文献等で知られている。今後、日本でもその需要が期待されるが、一例として代表的な概念図を図-8に示す。また地上式LPG容器は我が国でも既の実績はあるが、ここでは小容量の貯蔵容器が検討された例があるので図-9, 10に示す。これは他の目的にも応用の可能性が予想できる。なおこの容器は直径が小さいため、個別テンドンにて円周方向にプレストレスを与えるには無理があるためPC鋼線巻付け方式を採用している。

3.2.3 その他の貯蔵容器

前記の構造以外にも広範囲な応用が試みられているが、多くの適用例を示すことは紙面の関係で難しいゆえ、特に高温で使用する産業用容器の一例を示す(図-11)。これは使用温度300°Cに対応して検討された試験モデルである。鑄鋼部材を組み立て、円周方向のプレストレスは鋼線巻付け方式とし、鉛直方向には個別テンドンを

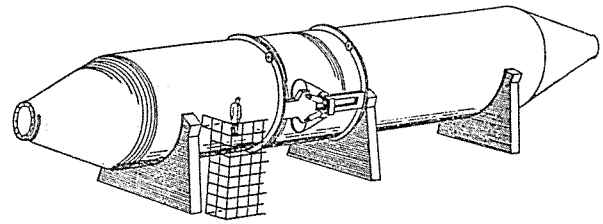


図-9 鋼線巻付け中のLPG貯蔵容器

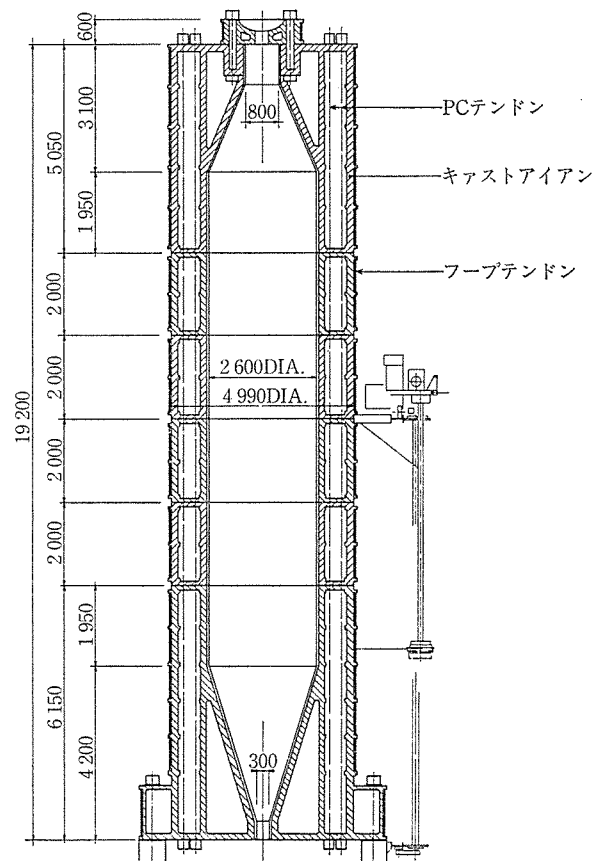


図-10 LPG貯蔵容器断面図

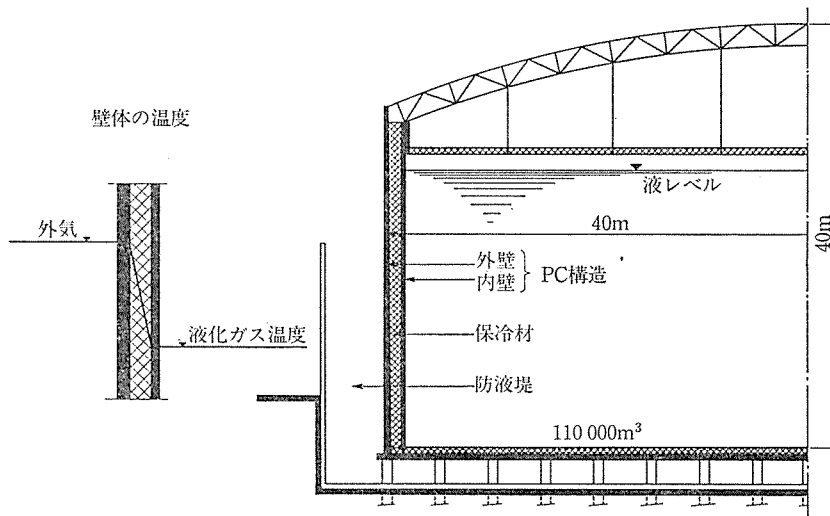


図-8 LNGタンク概念図(地上式)

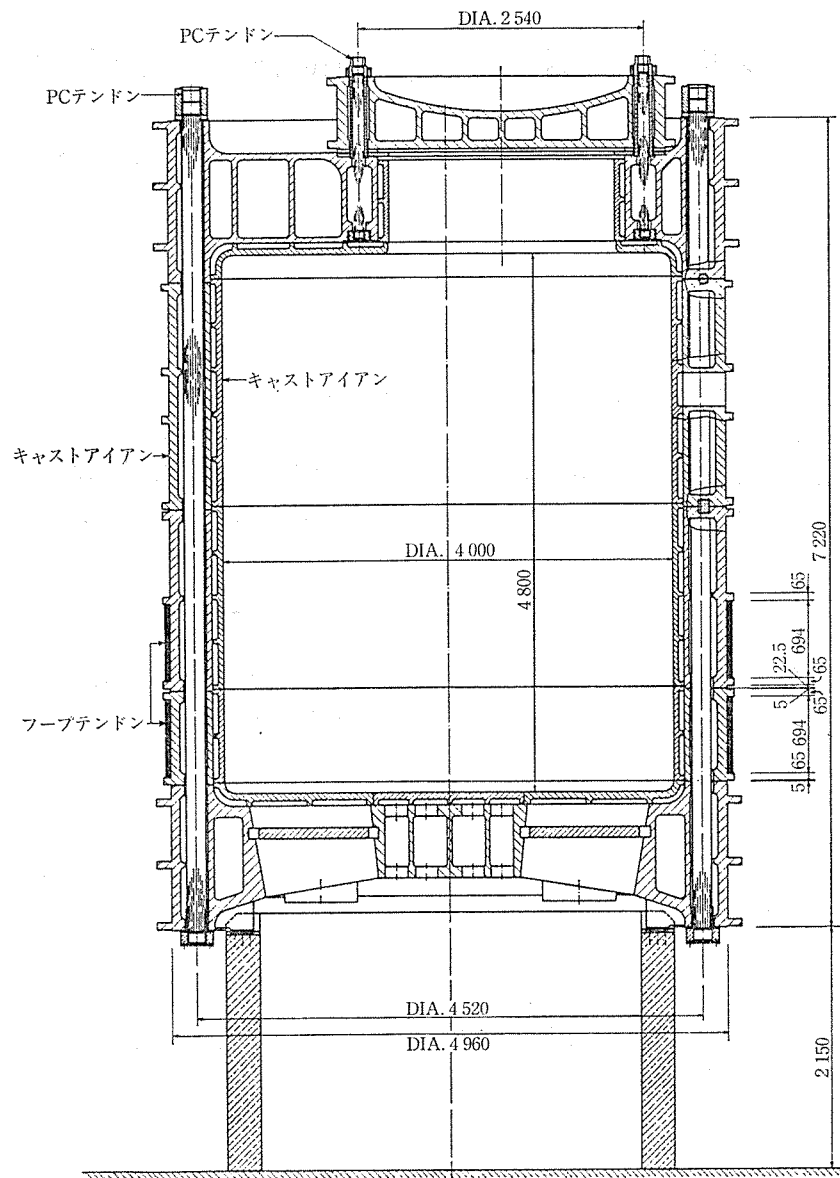


図-11 既製鑄鉄部材を用いた 300°C で使用する圧力容器の試験モデル

用いている。

3.3 緊張材と要求品質

これらの構造体、特にエネルギー関連容器では大容量の緊張力を有する tendon や逆に小半径の構造体に有効にプレストレスを与えられる方式が必要とされる。例として、既に引張強度が 2000t (BBR, 312-φ7) の tendon まで開発されている。また PC 鋼線 (φ5, φ7) や ストランドの巻付け機械も実用化されている。加えて品質面からこれらの容器には高品質の建設が要求され、さらに、応力導入時のプレストレス力の計測、構造物の耐用年数中の応力管理システム、品質管理の確認と調整等が一般構造物と異なる面も生じてくる。

4. あとがき

PC 円形構造物は極めて広範な拡がりを持ち、各分野

に浸透している。そしてそれらの分野で、各々特有の技術を確立し今も弛まぬ研究と改良・開発が続けられている。本稿執筆にあたり、それら固有の技術を紹介する予定であったが、紙面の関係で極く一般的な概要にとどめている。資料の提供を頂いた関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート, Vol. 24, No. 2, 水道用タンク特集
- 2) プレストレストコンクリート, Vol. 28, 特別号, 原電教賀 PCCV 特集
- 3) プレストレストコンクリート, Vol. 30, No. 2, 3, 4, RLG FIP 指針
- 4) プレストレストコンクリート建設業協会年鑑, 1960~1987

【1988年9月28日受付】