

# 技術展望

## 鉄筋コンクリートの歴史・エネルギー施設 (ガス)

HISTORICAL DEVELOPMENT OF REINFORCED CONCRETE GAS FACILITY

頼 千元

Chimoto RAI

正会員 工博 大阪ガス(株)近畿圏部理事  
(〒541 大阪市中央区平野町 4-1-2)

**Keywords :**

LNG, inground tank, above-ground, prestressed concrete, LNG tank

表一 主なガス施設の歴史

| 年 号    | 事 項  |
|--------|--|
| 1830年頃 | わが国で初めてガス灯がともる                                     |
| 1872年  | 横浜にガス工場建設<br>水平レトルト方式ガス発生装置設置 注①<br>有水式ガスホルダー設置 注② |
| 1910年頃 | コークス炉(コップース式)設置 注③                                 |
| 1930年頃 | 無水式ガスホルダー設置 注④                                     |
| 1952年  | オイルガス発生装置設置  |
| 1954年  | ガス事業法制定  |
| 1956年  | 球形ガスホルダー設置 注⑤                                      |
| 1967年  | ガス導管用シールド設置 注⑥                                     |
| 1969年  | わが国にLNGが初めて導入<br>LNG地上式貯槽(容量3.5万kl)設置              |
| 1970年  | ガス工作物の技術上の基準を定める省令制定<br>LNG地下式貯槽(容量1万kl)設置         |
| 1979年  | LNG地下式貯槽指針の制定                                      |
| 1981年  | LNG地上式貯槽指針の制定                                      |

### 1. はじめに

わが国で初めてガスが用いられたのは、1830年頃江戸亀井戸において南部藩医師島立甫が明かりとして用いたことによるとされている。明治になり、大阪の造幣寮において大規模なガス灯がともり、これに続き横浜、神戸東京において照明用のエネルギーとして広まっていった。

大正時代に入るとタングステン電球の普及により、ガスは照明用としての用途から商業用燃料、炊事を主とする家庭用の熱源としての役割が大きくなっていく。この頃までのガスは石炭の乾留時に発生する石炭ガスであり、製造設備は水平レトルト方式からコークス炉へと移行していった。また、ガスを安定供給するためにガスホルダーが設置されるようになった。

昭和30年頃には、「流体革命」の進行に伴い、ガスの原料は原油、LPG、ナフサ等石油系のものから製造されるようになった。

この間、鉄筋コンクリートはこれら設備の基礎として用いられ、一部の高温設備、大型構造に対しては特別な考慮がなされているが、基本的には当時の一般の鉄筋コンクリートの仕様に準じて用いられた。

1969年に東京ガスと東京電力の2社が、アラスカより液化天然ガス(LNG)の導入を開始してからは、発熱量が高くクリーンな天然ガスがガス原料の主流となっていく。LNGは原産地で-162°Cの極低温に冷却して液化されたメタンを主成分とする液化ガスで、体積を約600分の1に縮小し輸送効率、貯槽効率の優れた原料としてLNG専用船で輸送され、貯槽に低温貯蔵される。

この低温貯槽に用いられる鉄筋コンクリート構造物には、温度荷重という特徴的な荷重が考慮されるとともに耐低温特性等の特殊な性能が要求される。

### 2. 初期(1945年頃以前)の鉄筋コンクリート

初期のガス施設に用いられた鉄筋コンクリートは、基本的にその当時の一般の鉄筋コンクリートの仕様に準じている。この時期のガス施設として代表的な構造物について以下に述べる。

注① 水平レトルト方式ガス発生装置

ガス施設として最初の本格的な設備は、水平レトルト方式ガス発生装置であった。

水平レトルト式は円筒形またはカマボコ形の炉を水平に配置した乾留窯である。乾留窯は耐火レンガでできており、周囲から1000~1200°Cで加熱する構造となっている。

これらの基礎として、鉄筋コンクリートが用いられていた。

注② 有水式ガスホルダー

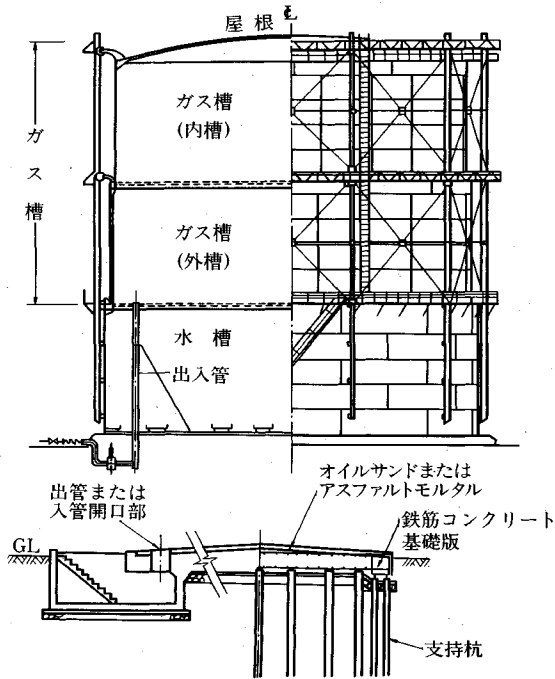


図-1 有水式ガスホルダーの例

ガス需要の増加に伴い、ガスを安定供給するためにガスホルダーが設置された。1900年頃には3万 $\text{m}^3$ の規模の有水ガスホルダーが設置されるようになった。これは、スエズ運河以東では当時としては最大級の大型構造物であった。

ホルダーは鋼製で鉄筋コンクリート製の円形基礎スラブ（杭は松杭）により支持されていた。

### 注③ コークス炉

水平レトルト方式に代わってコークス炉によるガスの製造が始まった。これは幅約40cm、高さ4～8m、長さ12～13mの炭化室と、それとほぼ同じ大きさの燃焼室が交互に鉄筋コンクリート製の床版（ノズルデッキ）上に配置されている。燃焼室、炭化室は高温となるため、その間に緩衝材として耐火レンガを設置した。

1940年頃に設置されたコークス炉に用いられたコンクリートの例では、一般部は強度が $135\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートを使用しているのに対し、高温となる箇所には $165\text{kgf/cm}^2$ のものを使用して高温対策としていた。

1950年頃に設置されたコークス炉ではコンクリートの表面温度 $100^\circ\text{C}$ （実測値）を考慮した熱応力設計が行われていた。

## 3. 近代（LNG時代まで）の鉄筋コンクリート

ガスの需要が大幅に増大するに伴い、ガスの製造設備、貯蔵設備、供給設備が数多く設置されるようになった。これらに用いられた鉄筋コンクリートも基本的にはその

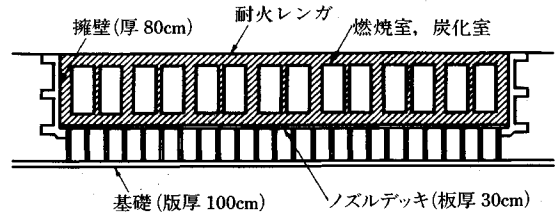


図-2 コークス炉の例

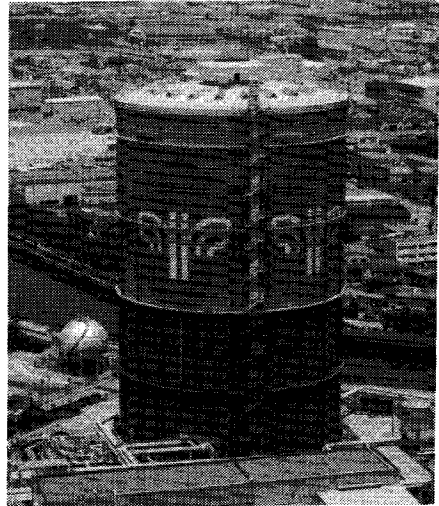


図-3 無水式ガスホルダー（MAN型）の例

当時のものと同じ考え方で使用されているが、鉄筋コンクリート構造物として代表的なものについて以下に述べる。

### 注④ 無水式ガスホルダー

無水式ガスホルダー（MAN型）は、直径約60m、高さ95mと、その当時としては目を奪うような大規模な構造物であった。

鉄筋コンクリートの基礎は柱基礎とその間を結ぶ環状梁と中央リングを結ぶ放射梁で構成され、環状梁のどこか1か所に損傷が生じても全体の安定が保つことができる高い安全性を有した構造となっている。なお、使用されたコンクリートの強度は $150\text{kgf/cm}^2$ 程度で、杭はベイマツ杭で環状梁には斜杭を打設して水平抵抗をもたせていた。

### 注⑤ 球形ガスホルダー

球形ガスホルダーは高い圧力（一般に $5\sim 10\text{kg/cm}^2$ ）で貯蔵するため従来のホルダーに比べ大容量のガスが貯蔵できる。このため、以降に建設されるガスホルダーの中心となった。基礎の構造は、前述のMAN型無水式ガスホルダーの基礎と同様の考え方から柱基礎と環状梁、中央基礎および放射梁から構成されているのが主流である。

### 注⑥ ガス導管用トンネル

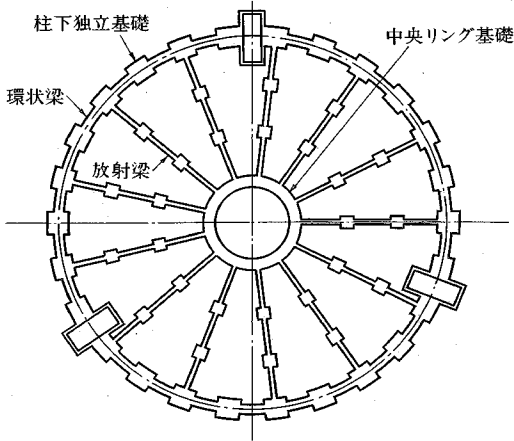


図-4 無水式ガスホルダー基礎 (MAN型) の例

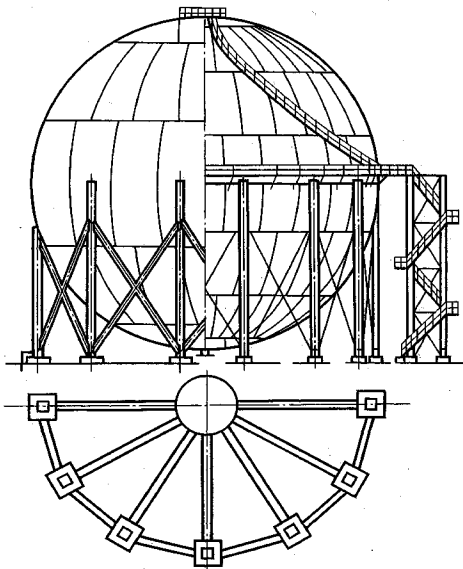


図-5 球形ガスホルダーの例

ガス設備における導管用トンネルは、1967年に延長384mのものが圧気シールド工法により設置されている。このトンネルは1次覆工がスチールセグメント構造、2次覆工が内径2.5m、巻厚35cmの鉄筋コンクリート構造であった。

現在では東京湾、大阪湾周辺をはじめとする導管専用トンネル、共同溝等のガス施設において広く利用されている。

#### 4. LNGの時代の鉄筋コンクリート

世界でLNGが家庭用や工業用として本格的に利用されたのは、ここ30~40年であり、比較的新しいエネルギー資源である。わが国では1969年からLNGの導入

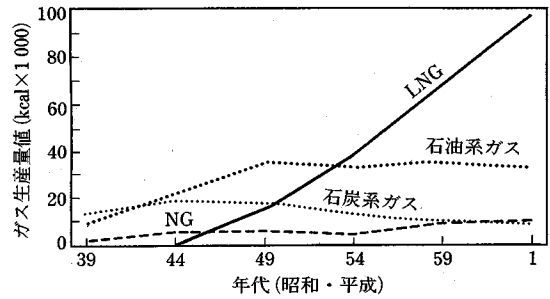


図-6 都市ガス原料の推移



図-7 LNG基地の例

が始まり、以後石油供給の先行不安、エネルギー資源の多様化あるいは環境面からのクリーンエネルギーの要請等の観点からLNGの導入が積極的に図られ、今後もさらにLNGの利用は拡大していくものとみられる。

LNGの本格的利用に伴い、LNGの受入・貯蔵基地が世界各地で建設され、日本においても十数のLNG基地が建設され稼働している。LNG基地には通常、棧橋等の荷役設備、貯槽・防液堤等の貯蔵設備、気化器・取排水等の気化設備およびBOG圧縮機・ポンプ等の送出設備が設けられ、これら設備の基礎には鉄筋コンクリートが広く使用されている。

特に貯槽・防液堤等の貯蔵設備においては、LNGの $-162^{\circ}\text{C}$ という極低温に起因する温度荷重、凍結土圧等のこれまでの一般土木構造物の設計にあまりみられなかった低温関連の荷重が考慮されるとともに、保安強化の面から耐震性の向上も図られている。また、鉄筋やコンクリート等の使用材料の低温時における強度特性や熱的特性が設計に取り入れられている。

世界各地に設置されているLNG貯槽は、その構造形式により地上式、地下式およびその他の特殊貯槽に分類

表—2 LNG貯槽の歴史

| 年 号   | 日 本                                  | 年 号   | 世 界   |
|-------|--------------------------------------|-------|---|
|       |                                      | 1958年 | 地上式貯槽がイギリスのキャンベイ受入れ基地において建設された                              |
|       |                                      | 1965年 | 凍結土壌素掘式の地下貯槽がアルジェリアのアルゾー基地で建設された                            |
| 1969年 | わが国にLNGが初めて導入<br>地上式貯槽(3.5万kl)が建設された | 1969年 | スペインのバルセロナ基地でPCLNGタンク(4万kl)が建設された                           |
| 1970年 | 地下式貯槽(1万kl)が建設された                    |       |   |
| 1972年 | 地下式貯槽(6万kl)が建設された                    |       |   |
| 1979年 | LNG地下式貯槽指針が制定された                     |       |   |
| 1981年 | LNG地上式貯槽指針が制定された                     | 1981年 | 第1回低温コンクリート国際会議(英)  |
| 1982年 | 地上式貯槽(10万kl)が建設された                   | 1982年 | FIP「PC材料の極低温下挙動」に関する技術水準報告書刊行<br>FIP「低温液化ガス用PCタンク設計指針(案)」刊行 |
|       | 地下式貯槽(13万kl)が建設された                   |       |   |
| 1986年 | PC防液堤を有した地上式貯槽(8万kl)が建設された           |       |   |
| 1987年 | 液化窒素によるプレクーリング工法が開発実用化された            |       |   |
| 1989年 | 14万klの日本最大の地下式貯槽が建設された               |       |   |
| 1990年 | PCLNG地上式貯槽(14万kl)の建設開始               |       |   |

される。

### (1) 地下式貯槽

地下式貯槽は、1965年にアルジェリアのアルゾー基地で建設された3.3万klの側壁部が凍結土のみで構成された凍結土壌素掘式のものが最初である。

わが国においては、1970年に1万klの地下式貯槽が根岸基地で建設されたのが最初である。この貯槽は、安全性、耐震性を考慮して日本独自で開発されたものであり、鉄筋コンクリートの躯体、屋根、メンブレンおよび保冷層から構成されている。躯体の側壁および底版は、土圧、水圧、液圧等の荷重を支える構造部材として用いられている。メンブレンは液密・気密性を目的とし、保冷層は外部からの入熱を防止するためのものである。

地下式貯槽の構築方法には、開削順巻工法、開削逆巻工法、ケーソン工法等がある。開削工法においては土留壁として鉄筋コンクリート製の地下連続壁が多く用いられている。

周辺地盤の凍結形態による貯槽の方式には、ヒーターを設置しない方式、ヒーターを設置して凍結土を制御する方式、ヒーターを設置して凍結土を生じさせない方式があるが、最近では、すべて貯槽周囲にヒーターが設けられている。

底版は地下水の処理方法により、地下水による揚圧力に抵抗する強度版方式と、底部への浸出水の水抜きを行って底部に揚圧力を作用させない減圧底版方式とに分類される。強度版方式では5~8mの底版が、減圧底版方式では0.5m程度の薄い底版が設置されている例が多い。強度版方式の底版はマスコンクリートとなるため、コンクリート打設時の水和熱による温度ひびわれ対策として、水和熱発生が他のセメントに比べて小さく、水密

性に優れた混合セメントの採用や断熱材による表面養生等が行われている。

1970年代までは、ほとんどが6万kl程度の容量であったが、コンスタントなLNGの受入れに対して需要変動を吸収し、また有事の際にも安定した供給が可能な備蓄対策として、1977年から大容量化に関する技術開発が行われた。技術開発のポイントは、従来の施工性、精度の限界深さ(55m)を超える止水壁の大深度構築技術であった。

大深度構築工法として、連続地中壁止水壁工法、鋼管矢板止水壁工法、地盤凍結工法等の技術検討を行った結果、大容量化に必要な深さ100mの止水壁の構築工法として連続地中壁工法が採用された。この技術開発の結果をもとに1982年には13万klが、1989年には14万klのものが建設された。14万klの貯槽では、工期、工費の削減を図るため、連壁が側壁の一部として利用されている。図—8に大深度連壁を利用した大容量地下式貯槽と従来の6万kl貯槽の構造および地下水処理の概念を示す。地下式貯槽に関する開発技術の中でも、大深度連壁技術は日本でここ数年注目されている大深度地下開発計画に大きなインパクトを与えている。また、この技術はすでに日本の国家プロジェクトである石油の国家備蓄計画および東京湾横断道路計画の中で実際に応用されている。

なお1976年、災害防止および保安の確保の観点から貯槽の技術指針および保安対策指針を作成することを目的として、(社)日本ガス協会に液化天然ガス用貯槽保安調査委員会が設置された。本委員会では、モデルタンクによる凍結実験および耐震実験、鉄筋コンクリート、土および金属材料の低温特性試験ならびに国内および海

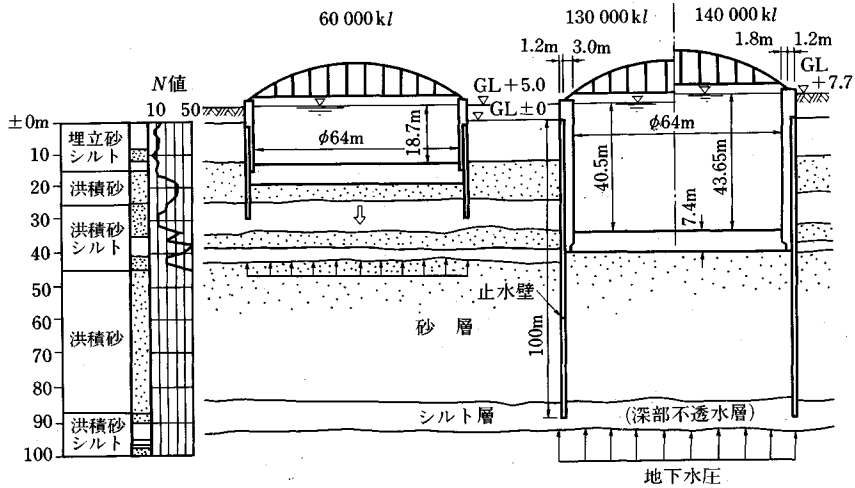


図-8 地下式貯槽と地下水処理の概念

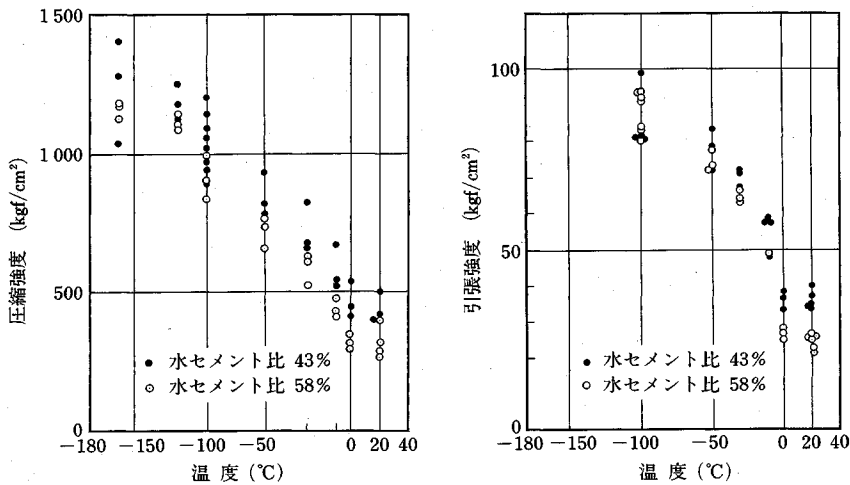


図-9 鉄筋コンクリートの低温特性

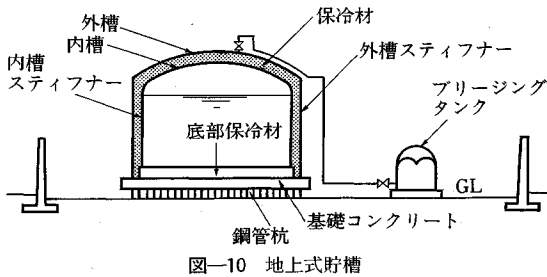


図-10 地上式貯槽

外 LNG 基地の現地保安調査等の実験，調査が行われ，1979年に LNG 地下式貯槽指針として制定された。

(2) 地上式貯槽

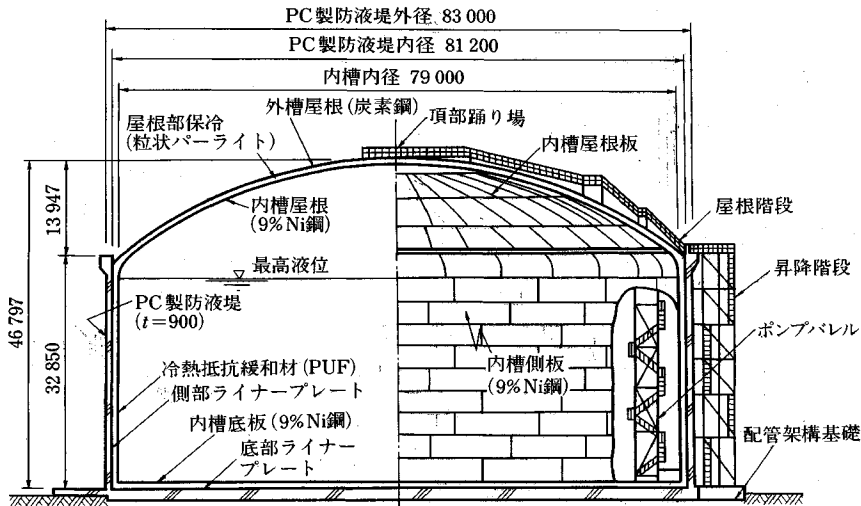
地上式貯槽は 1958 年に完成したイギリスのキャンベイ基地の 6.2 万 kl が受け入れ基地の貯槽としては最も古い。

わが国においては，1969 年に稼働開始した根岸基地

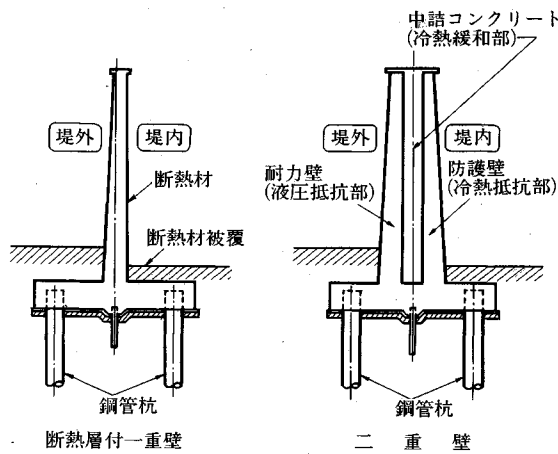
の 3.5 万 kl と 4.5 万 kl のものが最初である。以後順次大容量化が図られ，1976 年に袖ヶ浦基地で 6 万 kl が，同年に泉北基地で 7.5 万 kl が，1982 年には新潟基地で 10 万 kl のものが建設され，現在のところ日本ではこれが地上式貯槽としては最大容量である。

地上式貯槽は，内槽，外槽および保冷材により構成される。日本における地上式貯槽の基礎は，地盤の凍結防止のために杭で支持された鉄筋コンクリートの一重または二重基礎版の高床式のものほとんどである。基礎版は貯槽を安全に保持するとともに，LNG の冷熱によって生じる基礎版の上下面の温度差に伴う温度応力に対しても安全であるよう設計されている。

地上式貯槽の周囲には，万一の貯槽からの流出による影響を局限化するために防液堤が設置されている。防液堤の構造形式には種々あるが，日本では鉄筋コンクリート製の断熱材付一重壁式や二重壁式のもの多く採用さ



図—11 防液堤の構造例



図—12 PCLNG 地上式貯槽

れている。防液堤の設計には $-162^{\circ}\text{C}$ に対する温度緩和、温度応力、壁体のジョイント部の止液対策が考慮されている。

防液堤の高さは、当初は3m程度であったが、1977年には7mのものが、1981年には14mの高防液堤が建設されている。

地上式貯槽においても地下式貯槽と同様に1979年（社）日本ガス協会に、LNG地上式貯槽専門委員会が設置され、LNG地上式貯槽の耐震性を中心に、設計から製作、運転、維持管理に至るまで広く調査研究がなされ、さらに保安についての実態調査等を含めた多面的な検討の結果、1981年にLNG地上式貯槽指針として制定された。

### (3) PCLNG 地上式貯槽

欧米では、早くからプレストレストコンクリート（PC）構造を貯蔵容器本体あるいは防液堤に適用した

LNG貯槽が数多く建設され、わが国でも最近になって実績が増えつつある。

PC構造の低温液化ガス貯蔵施設への適用は、1952年アメリカのUnion Carbide Linde社が建設した液化酸素（ $-183^{\circ}\text{C}$ ）を貯蔵するPC二重殻式貯槽（容量2600kl）が最初である。わが国で最初のPC橋である長生橋の建設が同年であり、PC構造の低温構造物はわが国のPC構造物と同じ約40年の歴史をもつ。

ガス施設に最初に適用されたのは、1969年エナガス社（スペイン）がバルセロナ基地に建設した4万klのLNG貯槽で、LNGに直接に接する内槽側壁にPC構造が採用された。以後、欧米各国で相次いでPC構造を適用したLNG貯槽の建設が進められ、現在までに約20数基の実績がある。

このような背景をもとに、国内でもPC構造をLNG貯蔵施設に適用しようとする気運が強まった。しかし、低温状態でのPC部材あるいは構成材料の安全性を確認するための試験方法および評価基準については国際的に確立されたものがなく、それぞれについて実験的に確かめてゆく必要があった。また、地震国であるわが国では、耐震性の確認が重要な技術課題となった。

これらの技術的諸問題を解決しつつ、1986年にLNG貯槽用PC製防液堤が姫路基地に建設された。その後、信頼性、経済性をさらに高めた貯槽の技術開発が進められ、従来の金属二重殻地上式貯槽とPC製防液堤を一体化した新しい貯槽形式：PCLNG地上式貯槽が実用化された。このPCLNG貯槽のコンクリート構造の設計には限界状態設計法を取り入れている。

このPCLNG地上式貯槽の実用貯槽第1号基が泉北基地に建設中で、1993年に完成の予定である。同貯槽は世界最大級の14万klの容量を有し、PC製防液堤は

内径が約 82 m, 高さは 33 m に及ぶ。

ガス施設における鉄筋コンクリートの歴史という本題から多少それるが, LNG の冷熱を利用して製造される液化窒素 ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) を用いたマスコンクリートの温度ひびわれ制御のためのプレクーリング工法が開発された。コンクリート構造物の信頼性, 耐久性の向上に貢献

しようとするものである。プレクーリングの方法としては, 極低温の液化窒素をアジテータ車内のフレッシュコンクリートに直接霧状に吹きかける方法や, 材料の一部を冷却する方法が実用化され, PCCV, 沈埋トンネル, LNG 貯蔵施設等の重要構造物で採用実績が着実に増加している。