

低温液化ガス貯槽の現状と問題点

田 村 富 雄*

1. ま え が き

PC低温貯槽の歴史は比較的新しく、世界初のアメリカのAGAのモデルタンクが完成したのが15年前である。その後世界各地で続々と建設されるようになってきた。この理由としては、PCの低温時の性質が優れていることが実験的にも運転経験からも認められてきたこととFEMなどの解析法が進歩してきたことなどがあげられる。

最近の傾向として危険物を貯蔵する容器である以上より高い安全性を追求することを無視できない状況にある。このような意味でPC低温貯槽は、十分に期待に堪えてくれるものであると確信している。本文が今後のPC低温貯槽の発展の一助となれば幸いである。

2. PC低温貯槽の特徴

PC製貯槽は数多くの優れた特徴を有しているが、すべてに万能というわけではない。PCの優れた性質をうまく利用して貯槽を設計することが必要である。以下にPC低温貯槽の特徴を他の材料方式と比較して述べる。

1) 地上式鋼製貯槽と比較して

イ) コンクリートは、それ自身優れた低温特性を有している。すなわちコンクリートは低温になるに従い引張強度、圧縮強度が数倍に増加する。鋼製貯槽の場合は、低温脆性の問題よりアルミ鋼、9% Ni鋼などの特殊な低温鋼材を使用しなければならない。

ロ) PC貯槽では25万kl以上の大容量が可能である。鋼製の場合は溶接性、経済性の点より15万klが最大である。

ハ) 貯槽構造によってはPC製外槽と防液堤を兼用することができ、用地費の節約、防液堤の省略が可能で経済的になる。

ニ) 隣接タンクの火災時に発生する熱輻射に対してPC貯槽は影響を受けにくい、またテロや軍事上の点で安全性が高い。

ホ) コンクリートは腐食しないので、メンテナンスが不要である。

2) 地下式貯槽の場合にRCと比較して

イ) PCはキレツが発生しないために止水性、液密性に優れ地下水が酸性土壌などの場合でも腐食に対して優れている。

ロ) PC貯槽では一般に壁厚を薄くできるので、壁内外の温度差による温度応力の発生が少なくすみ優利である。

3) 問題点

イ) 側壁と底盤との支承部の構造が複雑になる。

ロ) 構造により異なるが、一般に在来構造の貯槽と比較して建設費が割高となる。しかし、防液堤建設費用、用地費、メンテナンスなど全体的に考えれば経済的になるケースが多い。

ハ) 地下貯槽の場合に軟弱地盤や液深の大きい貯槽では土圧、水圧が大きくなり必ずしもPCが経済的になるとは限らない。

3. 設計、施工例について

PC低温貯槽の施工例は、国内において表-1に示す

表-1

場 所	北海道苫小牧市	石川県七尾市		
完成年度	1969年	1975年		
外槽	貯蔵液体	LPG(-43℃)	LPG(-43℃)	
	タンク形式	PCタンク	PCタンク	
	容量(kl)	5300×1基	60000×2基	
	有効液深(m)	11.5	22.0	
	内径(m)	24.0	55.7	
	壁厚(cm)	20	50	
	内気圧(t/m ²)	1.5	1.5	
内槽	メンブレン	BS式メンブレン	BS式メンブレン	
	メンブレン材質・厚さ	SM-41A (3.0t)	SUS-304 (1.0t)	
	断熱材	ドーム	グラスウール (100t)	グラスウール (100t)
		側壁	フェノール系樹脂(100t)	合板とグラスウール (100t)
底盤	〃 (100t)	フェノール系樹脂 (100t)		
凍上対策	砂置換	底部のみヒーティング		
プレストレス	円周方向	MDCストランド (12-7φ)	SEEEストランド (F70, F100, F130)	
	鉛直方向	PC鋼棒3種 24φ	PC鋼棒B種1号 φ27mm	

* 三井建設(株)技術研究所主任研究員

ように2例しかないので、これらを中心に説明を行う。

1) 苫小牧の例

地下式のPC低温貯槽としては世界でも初めての例であり、計画、設計において当時としては未解決な点があったが、これらを慎重に実験、検討して作業を進めた。

基本的な設計思想として次の点を考えた。

- イ) 側壁のプレストレス量は、内液荷重、内気圧作用時に残留プレストレス量が $10(\text{kg}/\text{cm}^2)$ となるように決めた。
- ロ) PCとRC構造を比較した場合、耐海水性、耐低温性などの点よりPCが優れており、経済性の面より外圧(土圧、水圧など)が小さいためにPCの方が優利であった。
- ハ) タンク底盤のレベルを地下水位より上により、揚水圧を無視することができ底盤の厚さを薄くできる。
- ニ) タンク底盤に作用する凍上圧も凍上試験の結果と地下水(海水)の移動を考慮して無視した。

以上の結果、図-1に示す断面に決定した。

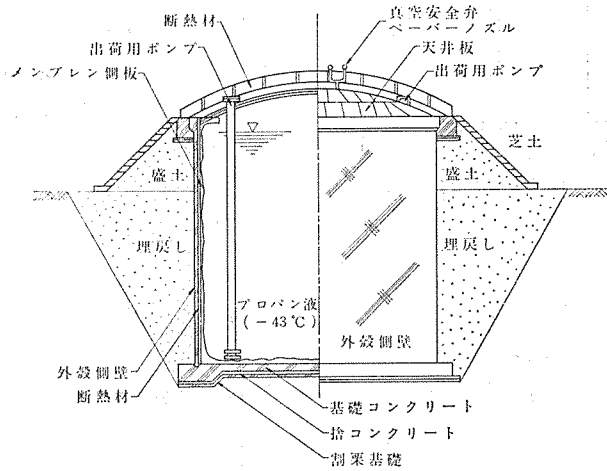


図-1 苫小牧のLPG低温貯槽

施工は、地下水位が低いために地盤を開削した後にPCタンクを建設し、周辺を埋戻した。この結果、PCタンクの施工は従来の地上式タンクと同様な施工法が可能となり、品質管理の面で優れたタンクが施工できた。

内槽についても次のような斬新な技術が取り入れられた。

- イ) 一次障壁として液密、ガス密なBS式フラットメンブレンを採用した。材質は溶接性の良いSM-

41A 材を使用した。

ロ) コンクリートと断熱材の間にコンクリート打設の際の型枠を兼ねてガスシール鉄板を使用した。本低温タンクが操業を開始して9年経過したが何らのトラブルもなく順調に稼働している。周辺地盤の凍結状況を図-2に示す。凍結進行は、ほぼ定常状態に達しており側壁部の最大凍結厚さは約2.0mであり、

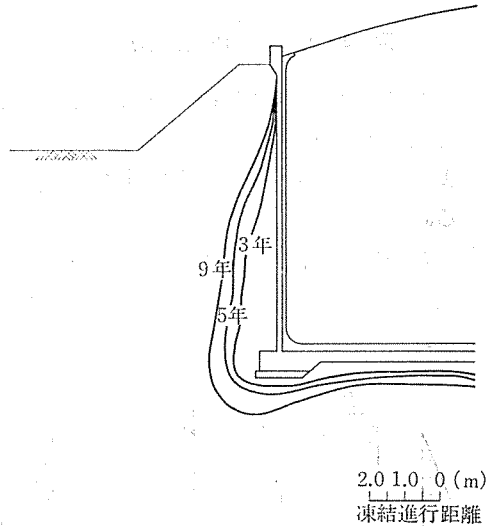


図-2 凍結領域の進行状況(苫小牧)

底部は地下水の移動による自然の熱交換のために約1.0mで停止している。これらは当初の設計の妥当性を裏付けている。

2) 七尾の例

イ) 概論

この低温貯槽は、容量が $60,000 \text{ m}^3$ と国内で施工されたPCタンクとしては最大級であり、PCを使用した地下貯槽としては世界最大である。

前述の苫小牧の経験を生かして設計が行われ、次の点を留意した。

- 地形が海に近い丘陵地帯であるので貯槽の配置、形状などについて地形を十分生かし、安全性、経済性を重視して決定した。
- 基本的には、苫小牧の場合とほぼ同じ構造とした。

一般図を図-3に示す。このように内径55.3m、高さ24mのPC貯槽の内部に断熱層、メンブレンの内槽材があり、これに -43°C のLPGが貯蔵される。

PC貯槽を採用した理由として次があげられる。

- 地盤が圧縮強度 $15(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 程度の洪積性泥岩(土丹)であるので掘削時の法面勾配を大きくでき、かつ地下水位が低いので掘削土量が少

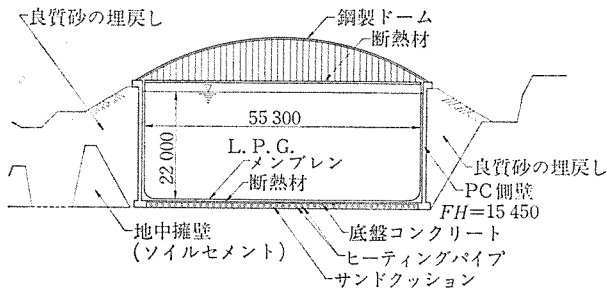


図-3 七尾のLPG低温貯槽

なくタンク側壁に作用する土圧、水圧を小さく評価でき、側壁断面が地震時の偏圧、内液圧により決まるためにRCに比べPCが経済的となる。

- 苫小牧の実績よりPCの耐低温性、耐食性に優れていること、安全性の高いことが証明された。

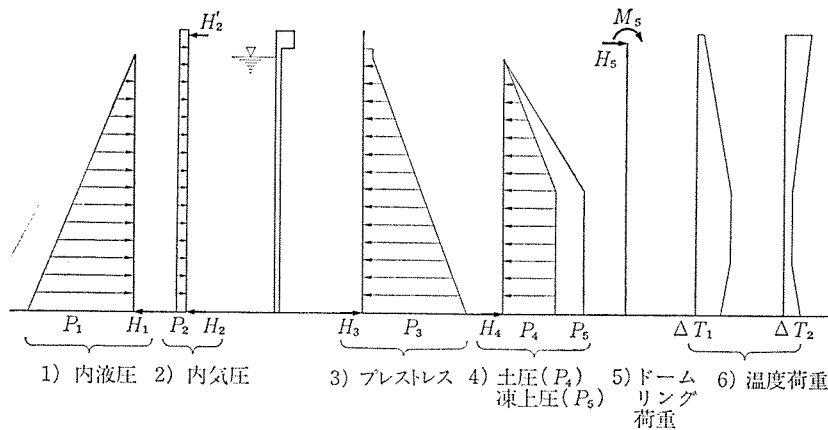


図-4 荷重モデル図

表-2 側壁に作用する最大荷重

荷重名	荷重
内液圧	$P_1=13.2$ (t/m ²)
	$H_1=5.7$ (t/m)
内気圧	$P_2=1.5$ (t/m ²)
	$H_2=0.65$ (t/m)
プレストレス	$P_3=14.7$ (t/m ²)
	$H_3=6.35$ (t/m)
土圧	$P_4=6.68$ (t/m ²)
	$H_4=2.88$ (t/m)
ドームリング自重	$H_5=6.19$ (t/m)
屋根荷重	$M_5=2.86$ (t・m/m)
温度荷重	温度低下 $\Delta T_1=45^\circ\text{C}$
	壁の内外温度差 $\Delta T_2=2.5^\circ\text{C}$
凍上圧	$P_5=10.0$ (t/m ²)

ロ) 設計

各荷重のモデル図を図-4に示し、最大荷重および重量を表-2, 3に示す。これよりタンクの内側の荷重より外側からの荷重の量が大きく、プレストレスが不用のようであるが、これは、外側よりの荷重、特に埋戻し土圧や凍上圧の不均一性などの要因

表-3 荷重および重量

コンクリート単位重量	プレストレスコンクリート	2.5 t/m ³
	鉄筋コンクリート	2.4 t/m ³
土の単位重量		1.6 t/m ³
LPGの単位重量		0.6 t/m ³
LPGの内気圧	常時	1.5 t/m ²
	耐圧試験時	2.25 t/m ²
外気圧		0.05 t/m ²
震度	水平	0.3
	鉛直	0.0

を正確に把握できないために生じたものである。この結果プレストレス量は内側より作用する内液圧と内気圧の合計と同じ量である。

これらの荷重により生じる円周方向の軸力図、鉛直方向の曲げモーメント図を図-5, 6に示す。表-4にコンクリートの許容応力度を、表-5にPC鋼材の許容応力を示す。

ハ) 施工

施工はまず地盤の掘削から始まった。約13万m³の表土、土丹を掘削した。雨が深く掘削した土丹の軟弱化に苦しめられた。

掘削終了後、タンク地点に敷砂を敷き底盤コンク

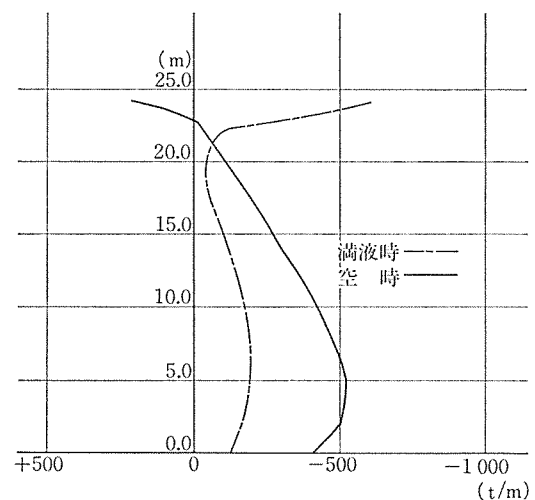


図-5 円周方向軸力図

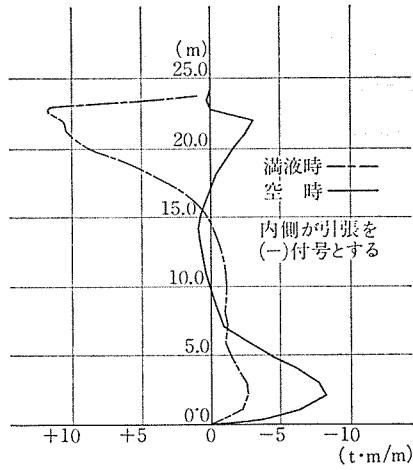


図-6 鉛直方向合成曲げモーメント図

表-4 プレストレストコンクリートの許容応力
 $\sigma_{ek}=350 \text{ kg/cm}^2$, 単位: kg/cm^2

許容曲げ圧縮応力度		許容軸方向圧縮応力度		許容支圧応力度	許容曲げ引張応力度	許容軸方向引張応力度	許容斜引張応力度
部材圧縮部	部材引張部	圧縮部材	引張部材				
125	160	95	127.5	105	0	0	9

表-5 PC鋼材の許容応力
 単位: kg/mm^2

材 料	応力度	引張強度 (σ_{pu})	降伏点 応力度 (σ_{py})	許容引張応力度		
				設計荷重時	プレストレス導入時	プレストレスプレッシング中
SEEEストランド		190	160	114	133	144
PC鋼棒B種1号		110	95	66	77	85.5

リートを打設した。その際、凍上防止のためのヒーティングパイプを埋込んでおいた。

次に側壁コンクリートが打設された。コンクリート打設高さは1段 1.5 m とし 16 段 24 m までの高さに打ち上げられた。側壁の内側には型枠兼用のガスシール鉄板 (厚さ 2.3 mm) がスタッドを介して張られている。側壁コンクリートが所定の強度に達した後、円周方向、鉛直方向にプレストレスが導入された (図-7, 8)。

側壁の完成後、タンクの底部で組み立てられた総重量 270 ton のドームが 30 台のジャッキを使用してリフトアップされた (図-9)。

次に内部に断熱材が取り付けられた。ドームにはグラスウール、側壁にはグラスウールと合板のハニカム、底盤にはフェノール系樹脂発泡体を使用された。

断熱材の内側にメンブレン (BS式) が取り付けられた。このメンブレンはステンレス鋼の 1.0 mm を使用し、鉛直方向のみコルゲーションのあるユニークな構造である。

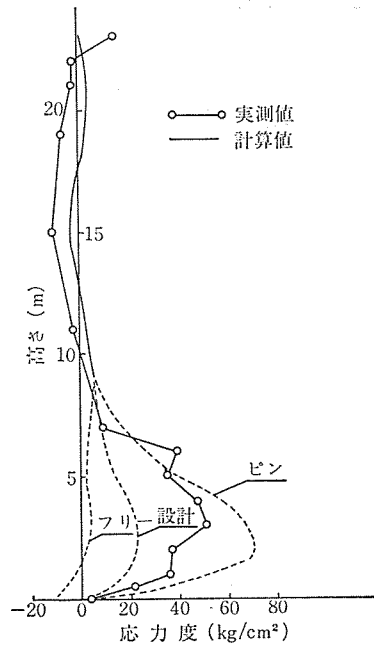


図-7 縦方向応力分布 (プレストレス導入後)

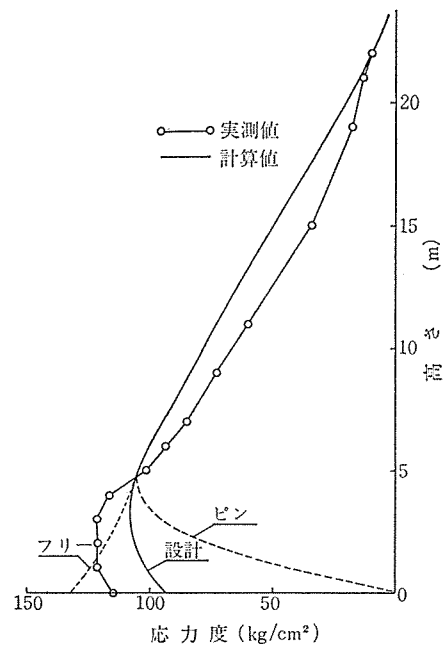


図-8 円周方向応力分布 (プレストレス導入後)

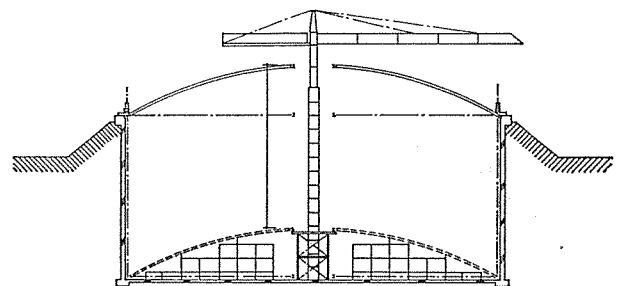


図-9 ドームの施工図

工事完成後、官庁（通産省・石川県）立合いのもとに耐圧気密テストを行った。テストの結果、異常は認められず、壁体に生じた応力もほぼ設計通りの値が得られた（図-10, 11）。

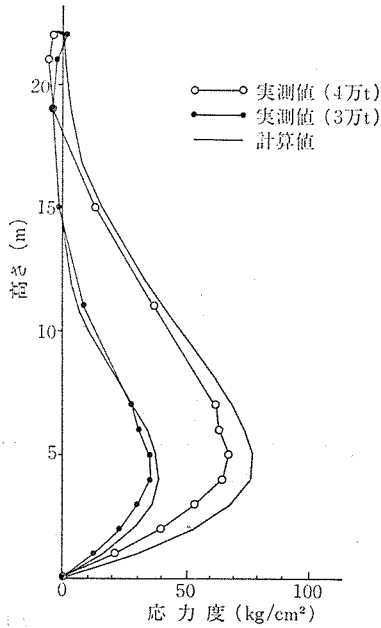


図-10 円周方向応力分布（耐圧試験）

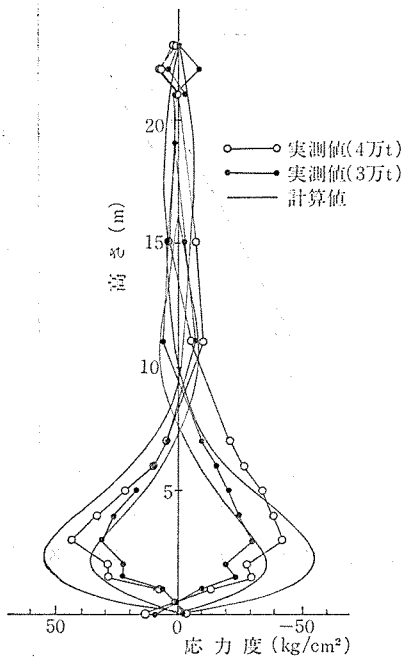


図-11 縦方向応力分布（耐圧試験時）

二) 現状

図-12 にタンク周辺の凍結状況を示す。側壁部の最大凍結距離は1.8mである。底部は1年後1.5mとやや大きかったがヒーター稼働後に凍結の進行は止まり解凍していった。

側壁に作用している凍上圧は2.0(kg/cm²)と当初

の予測値を上まわっている。今後の設計に当っては十分検討する必要がある。底部の凍結による凍上量を図-13に示す。このように貯液後約1年で15cmの凍上を生じた。ヒーターの稼働により現在は完全に元の状態に戻った。

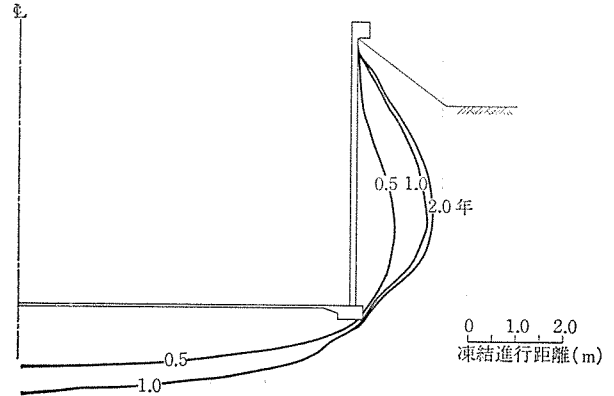


図-12 凍結進行図

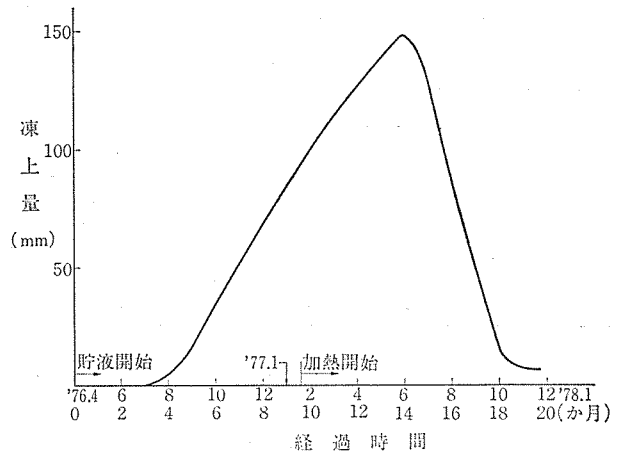


図-13 底盤の凍上量

4. 今後の発展

1) 地上式貯槽として

最近アメリカやヨーロッパなどにおいて従来の鋼製二重殻タンクの安全性に関して次のような疑問が投げかけられている。

イ) 二重殻の外槽材として普通軟鋼を使用しているために外部火災による熱幅射やテロ行為などの外部からの攻撃により容易に破壊しやすい。

ロ) 鋼製二重殻と称しているが外槽材に普通軟鋼を用いているので内槽よりの漏液により外槽は容易に破壊しやすく二次バリアの役目は果たさない。

正しくは鋼製一重殻である。

以上の理由により、特に都市部においては行政指導によりPCを外槽とする低温貯槽が増加している。

外槽材としてPCを使用すればコストは若干高くな

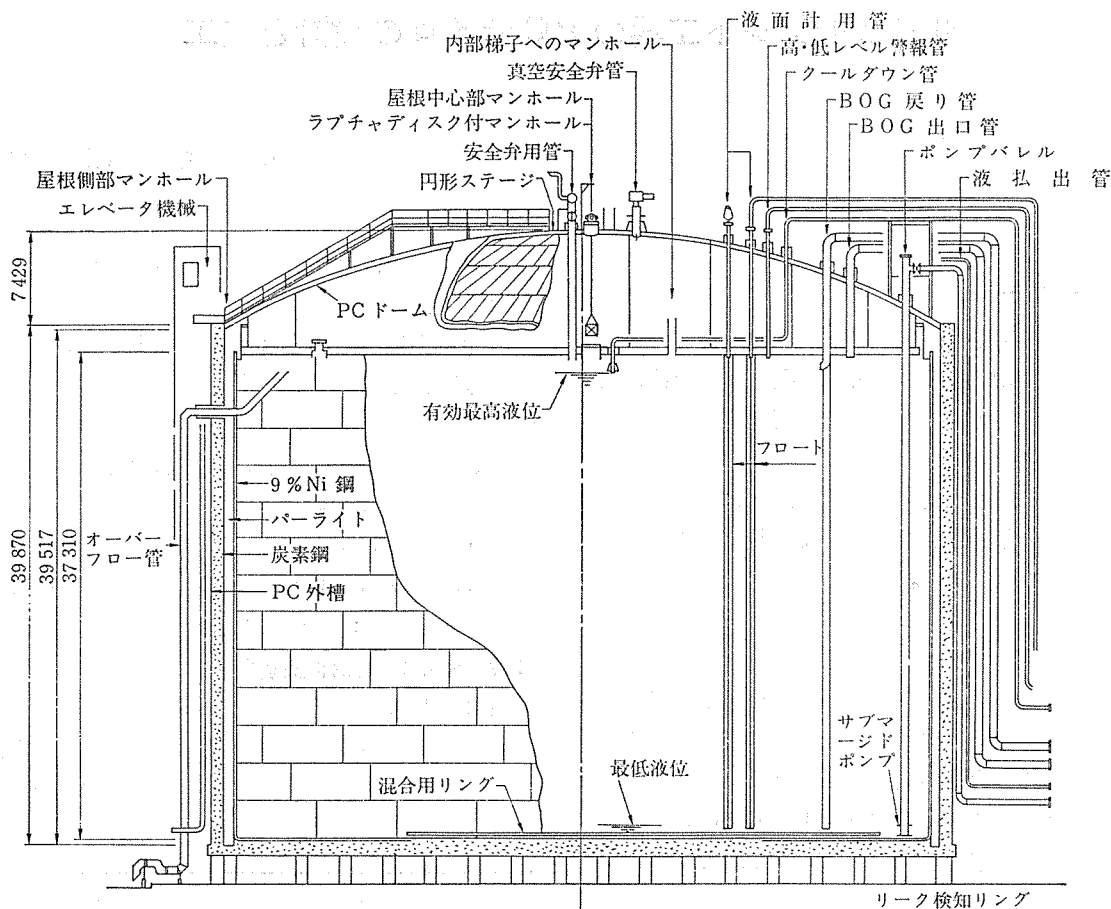


図-14 フランスガス公社・フォス基地の 80 000 kL LNG タンク

るが安全性の高い貯槽が可能となる。また PC を使用することにより内槽材としてメンブレンの採用が可能となりコストダウンができる。

最近完成したフランスガス公社フォス基地の 80 000 kL LNG タンクを 図-14 に示す。

2) 地下式貯槽として

苦小牧や七尾のように地盤が良い場合、または地上にタンクを作り埋戻すような盛土式貯槽の場合には PC は非常にメリットの多い構造である。これは埋戻し材料に良質土を使用でき側壁に作用する土圧を軽減でき、PC の特徴を有効に利用できるためである。

その他、埋立て地などの軟弱地盤において山留めを RC 構造とし、その内側に PC 貯槽を作る方法は、山留め壁を防液堤として利用でき、しかも貯槽間距離を地上式より短くでき用地費が節約できる。

参 考 文 献

(PC 低温貯槽に関する資料)

1) Hendriks, N.A.: "Nieuw Type Opslagtank voor vloeibaar Aardgas", Cement Vol. 28, No. 2.
 2) Hampe, E.: "Behälter Zur Speicherung von Flüssigerdgas", Zentralbl Ind. Vol. 21, No. 6.

3) Saveur, J.: "Opslag van vloeibaar Gas in Voorgespannen Tanks", Int Harbour Congr. 6th/74.
 4) "Very Large Prestressed Concrete Tanks for LNG Storage", 2nd International Conference on LNG.
 5) "Preload Tanks for the Storage of LNG", Preload Technology, INC.
 6) 山本勝郎: "液化天然ガス (LNG) の貯蔵へのプレストレストコンクリートの応用", プレストレストコンクリート Vol. 15, No. 2.
 7) 田村富雄: "PC 製低温液化ガスタンクの世界の現状", プレストレストコンクリート Vol. 15, No. 3.

(PC 材料の低温特性に関する資料)

1) Trotter, H.G., Turner, F.H.: "Behaviour of Prestressed Concrete Materials at Very Low Temperatures", Build Int, Vol. 8, No. 1.
 2) "A Note on Some Physical Properties of Low-Relaxation Wire and Strand for Prestressed Concrete at Temperatures of -196°C ", FIP Symposium, Madrid, June, 1968.
 3) Monfore, G.E., Lentz, A.E.: "Physical Properties of Concrete at Very Low Temperatures", PCA 1962.
 4) 山根昭: "極低温コンクリート", セメントコンクリート No. 355, 1976.
 5) Akira Doi, Hiroyuki Tomioka, Yoshito Tanaka: "Physical Properties of Prestressing Wire at Low Temperature".