

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

山 本 勝 郎*

1. 緒 言

天然ガスは石油の埋蔵量に匹敵するほどありながら約10年前まではパイプラインで結ばれた範囲しか利用されていなかった。

しかし、天然ガスを産地で低温液化 (LNG) してこれを大気圧の状態で冷凍タンカーで運ぶ技術が完成してからはパイプラインで結ぶことのできない消費者に対して経済的に供給することができるようになってきた。

一方アメリカ、日本、ヨーロッパ諸国のごとき先進国においては、エネルギー不足をきたし、特に公害防止に必要なクリーンエネルギーの要望が著しくなってきた。特にわが国において清潔な燃料を求める声は日増しに強くなっている。

LNG はこの要求に答えるもっとも良質な燃料であるが残念なことに液化施設、冷凍タンカーなどの建造に多額の資金を要し、ガス源が近距離である場合を除いて、経済性において充分に需要者の要望に答えられる現状がない。

わが国に対し供給能力を持つガス源としては東南アジア、オーストラリア、シベリア、アラスカ、中東などがあるが、これらのガス源の中でなんといっても中東が現実的で最大の供給能力を持つことは疑いもない。

しかるに中東は距離がもっとも遠く、LNG の原価構成中占める海上運賃の割合が CIF コストの 50% にも達し、今後この値を軽減しなければ LNG の需要の飛躍的増加は危ぶまれる状況である。特に近年の造船コストの上昇割合はきわめて顕著で、現状では飛躍的新技術の出現も望み薄く、この面でのコストダウンはあまり期待できない。

したがって、LNG コストの飛躍的減少をはかるためにはどうしても現技術から離れた別の技術を探り込む必要がある。現存のものがなぜ高価につくかという点、保安面の要求が支配的である。それは LNG が可燃物であるということからではなく、むしろ低温である点に帰因

する。もちろん低温であることと可燃であることとは保安上密接な関係にあることはいうまでもない。

これをわかりやすくいうならば、LNG は -160°C という低温であるために LNG を入れる容器の材料として普通鋼は低温脆性をもたらずので使用できず、低温脆性を示さないアルミニウム、ステンレス、9%ニッケル鋼などの高価な材料が使用され、さらに容器本体が破壊した場合に LNG が外部にもれて、これが船殻構造物を冷やし船体の脆性破壊を起こしたりしないようにタンクの外側に 2 次防壁を備えなければならないというような要求にもとづくためである。このように LNG の場合は、造船コストそのものの割高とタンク材または 2 次防壁の要求による割高とが重なって船価全体を高くしている。

ここに PC は、低温脆性がなく強度も大きく経済性も高いので、あるいは LNG 船に応用できるのではないかとこの着想も生まれてくる。

次に LNG の液化、受入れの施設においては、貯蔵タンクを含めて合理化の余地は少ない。しかし陸上タンクにおいても万一タンクが破壊して LNG がもれ出て広がったら危険であるとの考えから、前述の 2 次防壁的な考えが採用されている。人口稠密地域においては保安上から全貯蔵量に等しい容積の防液壁が要求されている。この場合、低温脆性のない土壌またはコンクリートで防液堤を作るか、あるいはタンクを地中に埋める構造にする。いずれの場合でも PC を使用すれば低温脆性がなく、強度も大きく安全性も経済性も満足できる。

本文においては、上記の見地より PC の低温の性質と LNG のタンクに応用せられた例を紹介することにより、PC が LNG の飛躍的發展に寄与することを願う。

2. PC は LNG 貯槽用材料として優れている

LNG 貯槽材料に要求される条件として次のものがあげられる。

- 1) 使用温度 (-162°C) において充分なじん性と強度を有するもの。
- 2) 耐食性・耐火性に優れているもの。

* ブリヂストン液化ガス株式会社

- 3) 加工性が良く品質が安定しているもの。
- 4) 液密性、気密性を有するもの。
- 5) 経済性すなわち材料・工費を含めたコストが安いもの。

P C は以上の5条件のうち、気密性を除いた他の条件を十分満たすばかりでなく、1), 2), 3), 5), の条件は他の LNG 貯槽用材料と比較し優れた性質を保有している。ここでは LNG 貯槽用材料として特に重要な低温特性について述べる。

表—1 貯 蔵 状 態

試験番号	骨材	セメント量 (1 yd ³ あたりの袋数)	貯 蔵 状 態 (日数)				計
			噴霧養生	密閉	50%湿度	105°C	
1	砂と砂利	7.0	28	34	—	—	62
2	"	7.0	28	62	—	—	90
3	"	7.0	28	92	—	—	120
4	"	5.5	28	36	—	—	64
5	"	5.5	28	63	—	—	91
6	"	5.5	28	106	—	—	134
7	"	5.5	28	6	92	—	126
8	"	5.5	28	40	80	—	148
9	"	5.5	28	24	34	10	96
10	"	5.5	28	94	34	10	166
11	"	4.0	28	32	—	—	60
12	"	4.0	28	99	—	—	127
13	"	4.0	28	116	—	—	144
14	軽量	6.0	28	34	—	—	62
15	"	6.0	28	55	—	—	83
16	"	6.0	28	82	—	—	110

表—2 各種温度でのヤング係数

試験番号*	骨 材	セメント量 (1 yd ³ あたりの袋数)	動 弾 性 係 数 (10 ⁶ psi)					
			75°F	35°F	0°F	-75°F	-150°F	-250°F
2	砂と砂利	7.0	6.6	6.6	7.0	8.0	9.0	9.0
5(湿潤養生)	"	5.5	5.5	5.8	6.6	7.6	8.4	8.5
8(湿度50%)	"	5.5	5.0	5.1	5.1	5.1	5.3	5.4
10(乾 燥)	"	5.5	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
12	"	4.0	5.2	5.2	6.2	6.7	8.2	8.3
15	軽 量	6.0	3.0	3.0	3.3	3.8	4.2	4.3

* 貯蔵状態に関しては 表—1 を参照

表—3 各種温度における温度収縮

試験番号*	骨 材	セメント量 (1 yd ³ あたりの袋数)	収 縮 (10 ⁻⁶ in/in)					
			75°F	35°F	0°F	-75°F	-150°F	-250°F
3	砂と砂利	7.0	0	210	410	680	1 110	1 470
6(湿潤養生)	"	5.5	0	250	400	740	1 090	1 420
8(湿度50%)	"	5.5	0	210	420	770	1 020	1 280
10(乾 燥)	"	5.5	0	170	430	680	890	1 240
13	"	4.0	0	170	250	350	720	1 280
16	軽 量	6.0	0	180	390	220	510	1 060

(1) コンクリートの低温特性

P C タンクの主要な構成要素であるコンクリートの低温特性を IGT と Portland Cement Association の資料をもとにして述べてみたいと思う。この資料作成のため使用したコンクリートサンプルを表—1 に示す。

ヤング率はコンクリートタンクに大きな影響を与える熱応力の大きさに関係する重要な要素であるが、表—2 でわかるように、水分を含んでいるほど温度変化の影響が大きくなる。湿潤状態では 75°F から -250°F の間に 50% も増加しているが、乾燥状態ではほとんど変化しない。

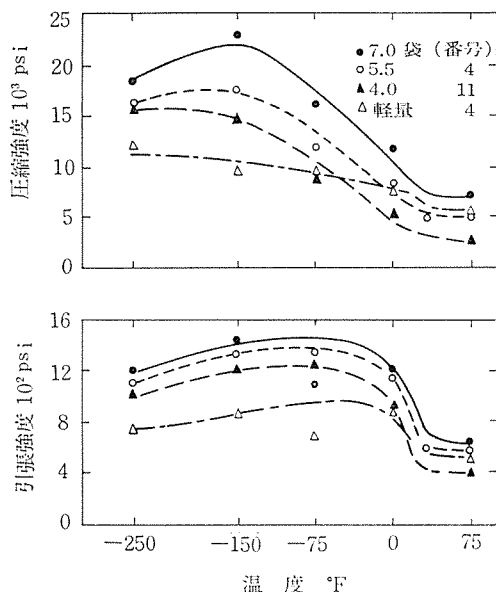
ヤング率と同様熱応力に影響を及ぼす要素としてコンクリートの熱膨張係数がある。表—3 は 75°F を基準点として温度低下に従って収縮する量を無次元化して示したものである。これより 75°F から -250°F の間の熱膨張係数は軽量骨材使用の場合は $3.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ 、砂と砂利を使用した場合は $4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ となる。他の LNG タンク材料 9% Ni 鋼 $5.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ 、アルミニウム $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ などよりコンクリートの熱膨張係数が小さいことがわかる。

図—1 は温度変化が湿潤状態のコンクリートの圧縮強度と引張強度に及ぼす影響を図示したものである。コンクリートの成分によらず大体同一傾向を示している。すなわち、圧縮強度については -75°F から -150°F で最高強度を示し、それから -250°F までなめらかに減少する。

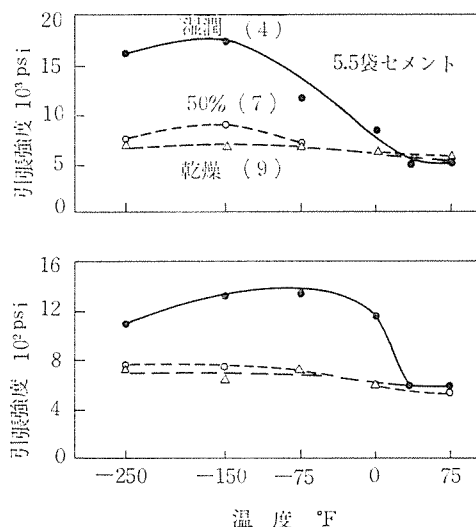
また引張強度については 70°F から 0°F の間で急激

に強度が上昇し、0°F から -75°F で最高強度を示し、-250°F までなめらかに減少する。-250°F で圧縮強度は常温時の3倍となり、引張強度は2倍程度上昇する。図—2 にコンクリートの含水率の影響を図示した。湿潤状態のコンクリートと異なり乾燥状態のコンクリートは温度変化によってほとんど強度が変化しないことがわかる。コンクリートが低温になって強度を増すおもな理由は、含まれている水分が氷を形成することによるものと思われる。

コンクリートを -250°F に冷却し、6時間この状態を維持し、除々に 75°F まで温度



図—1 湿ったコンクリートの強度に対する低温の影響



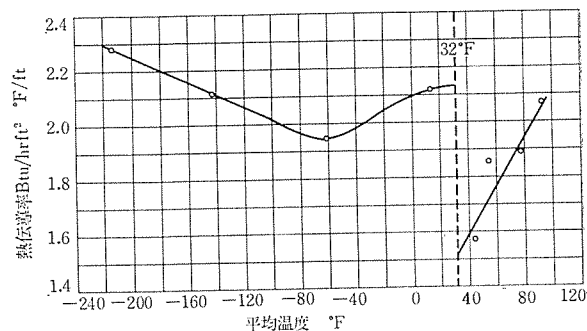
図—2 低温時の強度に対する温度の影響

を上昇させる。このような熱履歴を 10 回繰り返したのち圧縮強度と引張強度を測定したデータがある。測定結果はこのような履歴を経ないサンプルと比較してみると圧縮強度は 7%, 引張強度は 11% 程度上昇したにすぎず、このような熱履歴はコンクリートにあまり影響を及ぼさないといえる。

次に IGT によって測定された温度変化がコンクリートの熱伝導率に及ぼす影響を 図—3, 4 に示す。この測定に用いられたモルタルの成分は次のようである。

セメント Type 1 (AE)	重量比 1.00
Ottawa 砂	重量比 2.75
水	重量比 0.45

図—3 からわかるようにモルタルの平均熱伝導係数は 1.90 BTU/h-ft²°F であり、93°F から -214°F までの



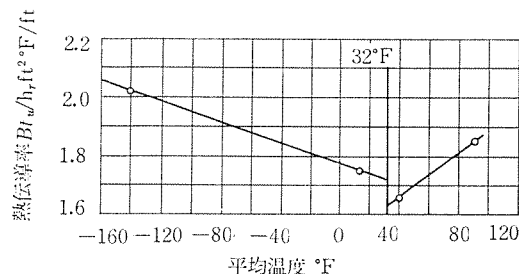
図—3 温度がモルタルの熱伝導係数に及ぼす影響

温度間で 93°F から氷点までの間の急減を含めてもその変化はわずか ±20% である。

図—4 は温度変化が通常のコンクリートの熱伝導率に及ぼす影響を示したものである。この図よりコンクリートの場合も同様温度変化に対し常温時の熱伝導係数より ±10% ほどしか変動しないことがわかる。

このようにコンクリートはそれ自身で断熱性を有するという他のタンク材料に見られない性質を有し、かつその熱伝導係数の温度による変動は少ない。

コンクリートの低温における諸性質を列記してきたが常温時に比較して強度が上昇する、熱膨張係数が少ない、断熱性を有する等低温材料として優れた諸性質を有していることがわかる。



図—4 温度がコンクリートの熱伝導率に及ぼす影響

(2) PC 鋼線の低温特性

PC 鋼線は液荷重と熱応力がコンクリートに加わった場合引張応力が生じないよう、あらかじめ圧縮応力を加えておくためのものである。PC 鋼線の低温における諸性質を以下で述べる。

表—4 は切欠き鋼線と切欠きがない鋼線の常温と低温における引張強度を示している。この表からいえることは、切欠きがない鋼線の場合は破断位置は一定しておらず、-320°F の低温になっても破断強度はあまり変化しないことである。切欠きを有する鋼線の場合、破断応力は常温において切欠き深さが増すに従って増加する。-320°F の超低温においても常温ほど顕著ではないが、切欠き深さの増加とともに破断応力が増加する傾向を示している。これらのデータは切欠きが存在することによ

表—4 PC 鋼線に対するノッチの影響 (直径0.172 in)

試験温度 (°F)	状 態	ノッチ直径 (in)	破断応力 (psi)	破 壊 位 置
70	ノッチなし	—	242 000	中 央
70	ノッチなし	—	243 000	中 央
70	ノッチあり	0.157	277 000	ノ ッ チ
70	ノッチあり	0.156	279 000	ノ ッ チ
70	ノッチあり	0.135	318 000	ノ ッ チ
70	ノッチあり	0.127	331 000	ノ ッ チ
70	継手あり	—	239 000	グリップ付近
-320*	ノッチなし	—	240 000	グリップ付近†
-320*	ノッチあり	0.151	242 000	グリップ付近†
-320*	ノッチあり	0.155	280 000	ノ ッ チ
-320*	ノッチあり	0.125	352 000	ノ ッ チ
-320*	ノッチあり	0.126	282 000	ノ ッ チ
-320*	継手あり	—	238 000	グリップ付近†

* ノッチおよび継手部のみ冷却

† -320°F 区間での破壊なし

‡ 応力度が 311 000 psi のノッチ部 (-320°F) では破壊なし

って生じる切欠き効果が、PC 鋼線の破断応力に及ぼす影響はマイナスでないことを示している。

PC 鋼線の衝撃強さについての資料として 表—5 を載せる。この表から明確なように超低温において、鋼線の衝撃強さは著しく低下し、遷移温度が存在することがわかる。

しかし、PC 鋼線に遷移温度が存在することと PC 鋼線がコンクリート内で破壊することには相関関係はないものと思われる。PC 内で PC 鋼線が脆性破壊したという例はない。

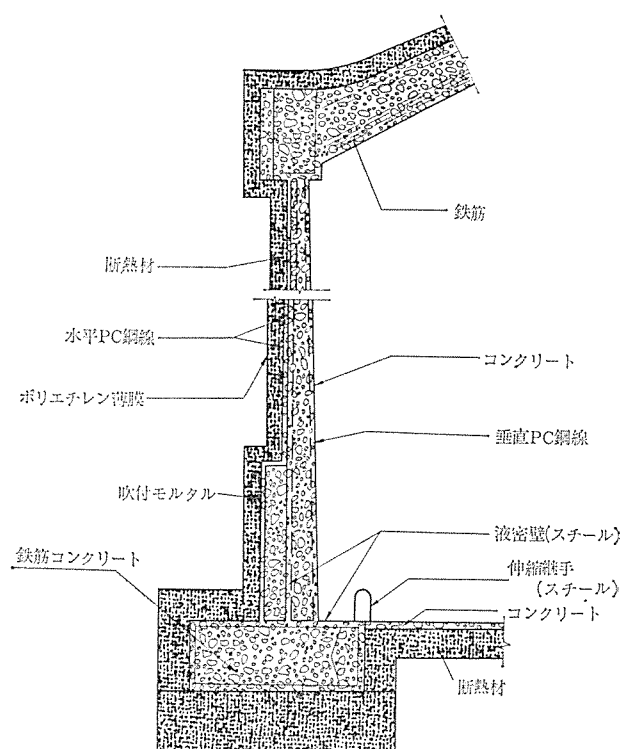
このおもな理由として、PC 鋼線はコンクリートでおおわれているので、たとえ衝撃力が加わっても緩和され鋼線自体には衝撃力として働かないこと、コンクリートに低温における脆化現象がないこと、PC 鋼線に鋭敏な切欠きが存在しないこと、拘束はわずかであり、荷重は PC 鋼線から PC 鋼線へコンクリートを媒体としてのみ伝えられること、などが挙げられる。また、たとえ PC 鋼線が脆性破壊したとしても鋼線と鋼線の間はコンクリートのみで結合されているので、近接した鋼線には応力

集中が生じないから、鋼板の場合のようなクラック伝播という現象は生じない。

PC 鋼線によってコンクリートに加えられる圧縮応力は低温になるに従って増加する。なぜなら、PC 鋼線の線膨張係数 $5.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($76^{\circ}\text{F} \sim -250^{\circ}\text{F}$) に対しコンクリートのそれは小さく、 $3.3 \sim 4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ 程度であることによる。

3. PC を使用した LNG タンク

PC を使用した LNG タンクの設計には種々のものがある。その中で American Gas Association の後援により Institute of Gas Technology が Preload 社に依頼して製作した 1 000 バレルのテストタンクを 図—5 に示しその概要を述べる。



図—5 LNG 用地下 PC タンク

表—5 PC 鋼線の引張強度および衝撃強さ

試験 番号	材 料	引 張 強 度			平均衝撃強さ (in-lb)	
		破断強度 (psi)	降伏強度 (psi)	伸び(%)	常 温	-320°F (LN ₂)
1	冷間引抜鋼線	80	65	30	31.7	1.9
2	マルテンサイト系鋼線	192	100	20	15.4	5.4
3	普通鋼線	195	160	20	11.6	3.0
4	高張力高炭素鋼	233 (70°F)	165	>10	24.7	14.1
		>234 (-320°F)	189			
5	再引抜高張力	244 (70°F)	172	>10	37.9	8.3△
	高炭素鋼	>247 (-320°F)	217			18.1†

△ LN₂ の温度で試験された供試体

† テスト中温度上昇を許された供試体

(1) PC

LNG タンクに使用される PC の設計にあたって考慮すべきことは、温度差によって生じる熱応力と液荷重による引張応力である。

PC は厚みをもっているため、この内外で温度差が生じる。外側のコンクリートは PC 鋼線と同一温度であるから圧縮されたままであるが

内側はより冷却されることにより収縮し引張応力が生じる。このような熱応力が最大となるのは、クールダウン時である。これよりあらかじめ加えておく P C 鋼線の圧縮応力は、クールダウン時に生じる最大熱応力を考慮しなければならない。たとえば、コンクリートの内外に 28°C の温度差があった場合、80.5 kg/cm² の圧縮応力をあらかじめ加えておかなければならない計算となる。このようにクールダウンは P C に大きな影響を及ぼすので、そのときの温度低下の割合は一般に限定される。クールダウンが終了し、液がタンクを満たした場合は、熱応力より液荷重による引張応力が大きくなる。これは簡単な構造計算より求められ、P C 鋼線の緊張力算出の主な要素となる。

(2) タンクウォール

タンクウォールは図-5 に示されているように、タンクまわりの盛土・ポリエチレンなどの薄膜・インシュレーション・吹付モルタル・P C 鋼線・スチール製液密壁・コンクリートパネルより構成されている。

ポリエチレンシートはインシュレーションに対するモイスチュアバリアーの役目を果している。

スチール製液密壁はコンクリートとスチールの熱膨張係数が異なるので、伸縮継手が必要となる。材質としてはステンレス・9% Ni などの低温において高い衝撃力を有する鋼材が用いられてきたが、構造上衝撃力が加わらないから炭素鋼が使用されるようになってきている。将来はプラスチック系の材質がスチールにとってかわると思われる。

P C 鋼線は、前述のように高張力高炭素鋼線を用いてよく、緊張力を与えたあとは鋼線が腐食しないように吹付けモルタルでおおう必要がある。

(3) タンクベース

タンクの基礎は 2 つの部分よりなっている。タンク壁や屋根部分の自重を支えているアウターリングと液荷重を支えるだけでよいタンク底部の中央部がそれである。

タンクの底部中央は固められた土・砂・砂利・モイスチュアバリアーの役目を果たすプラスチックの膜・インシュレーション・薄いコンクリートスラブ・スチール製の液密壁より構成されている。

薄いコンクリートスラブの設計には、外圧・クールダウン時の熱応力を考慮していない。このような構造におけるインシュレーションは、液圧に耐えうるものでなければならない。アウターリング部は鉄筋コンクリートで強化され、タンクの自重を支えている。

金属製の液密壁は一般に耐低温性の材料を用い、側壁の P C の下部を通り、側部液密壁に接続してしている。底部液密壁にも低温時に無理なく収縮できるように伸縮

継手を設けている。

(4) タンクルーフ

タンク屋根部はモイスチュアバリアー、インシュレーション、スチールペーパーバリアー、P C のドームより構成されている。屋根部は P C 鋼線で補強されていないが、これを支持するドームリングは P C 鋼線で補強されている。屋根の支持部はスライド可能になっている。屋根部に P C 鋼線が入っていないのは、タンク内圧 1 psig 程度に耐えうる構造としているためである。

ペーパーバリアーはコンクリートとの間に温度差を生じさせないため、インシュレーションとコンクリートの間に設ける。

(5) インシュレーション

インシュレーションの主要な役目は 2 つあり、1 つは凍上などを防止するため LNG タンク周囲温度を低下させないことであり、いま 1 つはオペレーションを含めた経済上の観点より LNG の蒸発量を押えることである。LNG 蒸発量は 1 日あたり貯蔵量の 0.1~0.2% 程度が最適といわれている。インシュレーションと LNG 蒸発量との関係を述べてみる。LNG タンク周囲のインシュレーション（フォームグラス）の厚さを一定とし、凍上防止用ヒーターを底部と側部半分まで設けた場合を仮定し蒸発量の割合を算出したものを表-6 に示す。このときのヒーターよりの入熱量は表-7 をもとにしている。

表-6 底部および側部に加熱用コイルを配置した地下タンクの蒸発量
28 万 5 000 バレルタンク（直径 200 ft）
蒸発量（タンク容量%/日）

ホームグラス 厚み (in)	土 壌 厚 さ (ft)			
	2	5	10	20
3	0.61	0.50	0.36	0.24
6	0.33	0.29	0.24	0.18
12	0.17	0.16	0.14	0.12
18	0.12	0.11	0.10	0.09

* 熱伝導率: 0.3 Btu-in/h-sq-ft-°F

凍結土の熱伝導率（予測） 1.0 Btu-ft/h-ft-°F

表-7 タンク底部と側部の加熱用コイルからの入熱量
28 万 5 000 バレルタンク（直径 200 ft）
入熱量 (Btu/h)

ホームグラス 厚み (in)	2 ft 土壌	5 ft 土壌	10 ft 土壌	20 ft 土壌
3	1 320 000	1 057 000	795 000	528 000
6	720 000	635 000	528 000	359 000
12	378 000	354 000	318 000	267 000
18	267 000	246 000	220 000	200 000

* 熱伝導率: 0.3 Btu-in/h-sq-ft-°F

凍結土の熱伝導率（予測） 1.0 Btu-ft/h-ft-°F

表—8 加熱用コイルがない場合の
地下タンクの蒸発率の推移
28万5000バレルタンク（直径 200 ft）
蒸発量（タンク容量 %/日）

ホームグラス 厚さ (in)	オペレーションタイム				
	1週間	1か月	6か月	1年	2年
3	0.63	0.52	0.35	0.29	0.24
6	0.35	0.31	0.25	0.22	0.19
12	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13
18	0.13	0.12	0.11	0.10	0.10

熱伝導率 0.3 Btu-in/h-sq-ft-°F

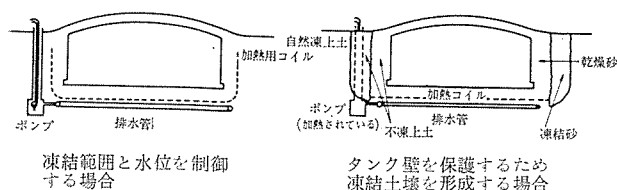
凍結土の熱伝導率（予側）1.0 Btu/h-ft-°F

最適なインシュレーションは表—6をもとにして、オペレーション・建造価格・蒸発量などを比較することによって得られる。表—8は地下式 LNG PC タンクの稼動時間の経過に従って変化する蒸発量の割合を示したものである。この表からも明確なように稼動時間の経過とともに LNG の蒸発量は減少する。これは LNG PC タンク周囲温度が稼動時間とともに低下していくことによって凍結土壌が広がり、このような土壌の質的变化によりタンクへの入熱量が低下するためである。

（6）凍上について

前述のように LNG タンク周囲温度は稼動時間の経過に従って低下していくが、それに伴い土壌も徐々に変動する。この土壌変動の原因は2つあって、湿った土壌が凍結することによって体積膨張する場合と水の結晶が分離することにより、土壌が凍上する場合がそれである。

前者の膨張は土壌の体積の2%増くらいであり、タンクへの影響は少ないが、後者は変位量が大きくタンクに大きな圧力を与える。水の結晶はレンズ状をしており、



図—6

アイスレンズと呼ばれている。アイスレンズは凍結していない土壌の水分が凍結している土壌へ吸い寄せられることにより生じる。凍上の程度は土壌の種類により左右されるが、防止方法の1つとしてヒーターを使用する場合がある。ヒーター使用の一例を図—6に示す。

4. PC タンクのコスト

図—6に示したような PC タンクの 10 万バレルから 45 万バレルまでの見積価格を表—9に示す。ここで注目すべきは 3/16 in の 9% Ni 鋼を使用した液密壁の

表—9 地下 PC LNG の見積価格（1962）
容量（バレル）（ ）は MMCF（LNG）

項 目	10 万 (356)	20 万 (712)	28 万 5 000 (1 000)	45 万 (1 600)
タ ン ク	\$ 245 000	\$ 417 000	\$ 530 000	\$ 760 000
断 熱 材*	176 000	211 500	241 000	277 000
人 件 費	84 000	113 000	175 000	232 000
加熱用コイル	8 000	12 000	14 000	21 500
ラ イ ナ ー	308 000	478 000	571 000	760 000
計†	821 000	1 252 000	1 531 000	2 061 500

バレルあたりの価格 \$ 8.22 \$ 6.21 \$ 5.38 \$ 4.58

カッコ内は (MMCF) (\$ 2.31)(\$ 1.76)(\$ 1.53)(\$ 1.53)

* インシュレーションの見積りは硬質ポリウレタンパネルを使用することとして計算している。蒸発量は 1 日あたりにタンク容量の 0.1% としており、10 万、20 万、28 万 5 000、45 万バレルのタンクに相当するホームグラスの厚さは 25.3、20.3、18.0、15.2 in である。

† 3/16 in の 9% Ni のライナーの全価格に占める割合は 40% であり、内部は、底部 32%、側部 30%、屋根部 38% である。

表—10 地上 LNG タンク（スチール製）
の建造見積価格（1962）

容 量 バレル	MMCF (LNG)	蒸 発 量 容量%/日	見 積 価 格*	
			\$/バレル	\$/MCF
4 万	143	0.10	\$8.70—11.00	\$2.45—3.10
8 万	185	0.08	7.15— 9.00	2.00—2.55
10 万	356	0.06	6.70— 8.70	1.90—2.35
15 万	534	0.05	6.20— 7.80	1.75—2.20
20 万	712	0.04	5.85— 7.50	1.65—2.10

* タンクの構成は圧密土壌、円環状の基礎、加熱用コイル、バーライト断熱材、土壌ダイクなどである。

コストが全タンクコストの 40% を占めていることである。

表—10 に Chicago Bridge and Iron Company と、US Steel が見積った二重殻構造の地上 LNG タンクの価格を載せる。内殻は 4 万バレルのタンクだけアルミニウムで他は 9% Ni を用いている。

表—9 と表—10 を比較して見ると、PC LNG タンクと通常の二重殻構造のタンクとの間で価格の差はあまりない。しかし前述のように、PC のタンク部分より 9% Ni を使用した液密壁のほうがコストが高いことから、高価な耐低温用鋼材の代りとなる低廉な液密壁を開発すればタンク価格を下げるができる。さしあたりこのような液密壁の開発が望まれる。

5. PC の LNG タンクへの使用例

1950 年 Linde Division of Union Carbide Corp. が PC の耐低温性を実証するために液体酸素を用いて実

験を行なった。これが PC を低温液体貯蔵タンクに使用するための最初の試みであった。

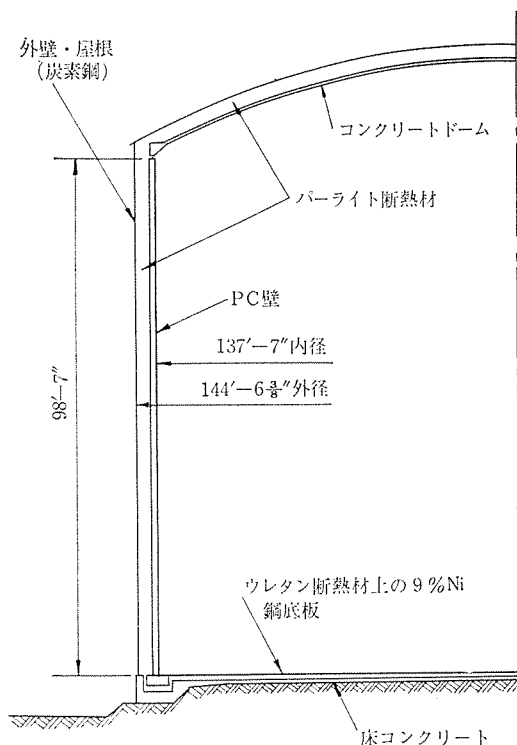


図-7 タンク断面図

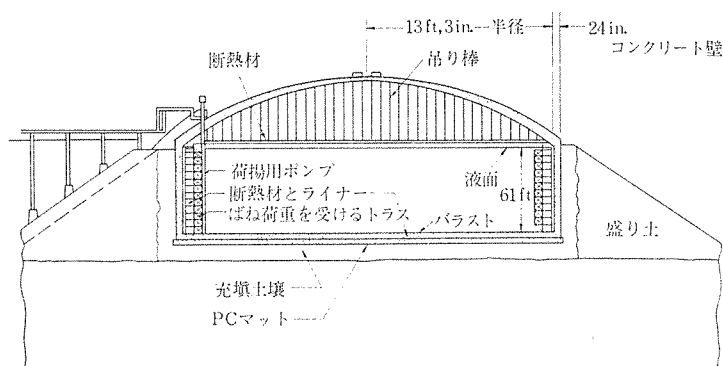


図-8 LNG タンク断面図

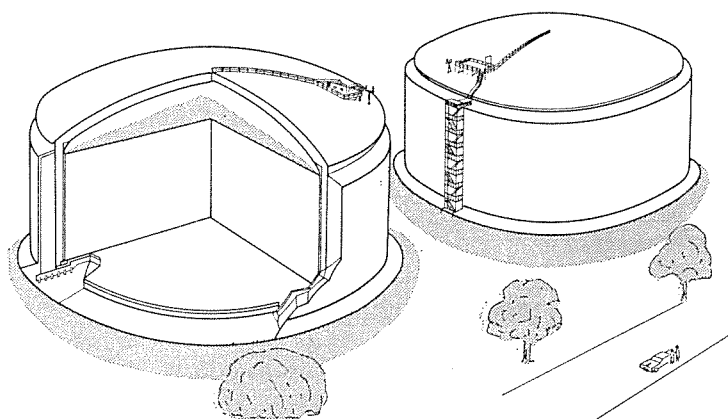


図-9 PC LGN タンク (Philadelphia Gas Works)

プレストレストコンクリート

この実験によって PC が低温において満足すべき性能を有することが実証された。この結果をもとにして、Linde は 2600 m³ のタンクを東シカゴのインディアナポリスに建造した。このタンクは内外殻とも PC の二重殻構造である。1953 年より稼動を開始し、その後も順調に運行している。

この実験を契機として、LNG 貯蔵タンクに PC を使用するための研究が行われ始めた。著名なものとして、1959 年 AGA が “Non-Conventional Storage of LNG” というプロジェクトを取り上げ LNG 貯蔵タンクへ PC を利用する研究を開始した。これと同じ時期に、PC について Texas Eastern Gas Transmission Corp. が Battelle Memorial Institute と共同調査を開始した。

その後 1963 年ニュージャージーで建造された 4 万 7700 m³ の地下貯蔵タンクの凍結土壌と屋根との間に直径 36 m × 高さ 3 m の PC が用いられたが、本格的に使用されたのは、1965 年 Gaz de France が Nantes に建造した PC LNG タンクである。

このタンクは直径 15 m × 高さ 13 m で、容量は 1900 m³ である。内部断熱方式を採用しており、外側の PC を 2 次防壁と考えている。

1968 年末リビアからの LNG を受け入れるため、スペインのバルセロナに Gas Naturel S.A. が建造した地上 PC LNG タンク 4 万 m³ 2 基がある。その概要を 図-7 に示す。タンク壁はあらかじめ垂直方向にプレストレスされており、円周方向は 4.8 mm の炭素鋼よりなる液密壁と一体にプレストレスする。7.9 mm の炭素鋼の外板と PC の間には 76 cm の断熱層がある。この中は粉末パーライトで満たされており、ドライメタンガスが充填されている。タンク内部圧力と断熱層圧力は均等に保たれている。

タンク底部には 4.8 mm の 9 % Ni 鋼が敷かれており、側部 PC の下部をとり側部液密壁と接続されている。なお断熱部は 1 時間あたり 7 万 5600 kcal 以下に入熱量を押えるように設計されている。1969 年 Texas Eastern Transmission Corp. の容量 9 万 573 m³ の半地下 LNG タンクがニューヨークの Staten Island に建造された。このタンク建造は、Battelle Memorial Institute の数年に及ぶ研究の成果である。

タンク概略図を 図-8 に示す。タンクの直径は 82 m、高さは 19 m であり、タンク底

部はプレストレスされた床マットよりなっている。地下貯蔵の利点を備えるため、周囲は完全に土盛りしてありタンク側壁や底部には土壤の凍結を防ぐため不凍性充填物が用いられている。

液密はアルミはく、Dacron, Mylar で作られた柔軟なライナーで保っており、これが幾重もの断熱層の中に挟まれている。これを図-8のスプリング荷重のかかったトラス構造によって保持している。側壁と床マットの差動は側壁底部のテフロン製スライディングジョイントによって無理なく行なわれる。しかし、このタンクは上記の液密構造の欠陥が原因で、使用後まもなく液が洩れ出したので、最近内部の液を空にして補修工事を行っていたところなんらかの原因で爆発を起こし、P C 構造の屋根が壊れ落ちた。しかしこれは P C 構造とは直接関係はない。

Philadelphia Gas Works 社は、内径 70 m, 外径 80 m, 液高 24 m, 容量 9 万 2 700 m³ の地上二重殻 LNG タンク 2 基の建造を 1971 年 4 月より開始した。初期の設計では直径 57 m, 高さ 54 m, 容量 13 万 8 000 m³ の地下 P C タンクであったが、凍土法により凍結土壤を作ること失敗し、急ぎ地上 P C タンクに設計変更した。このような事情によって用地が狭く、タンク間距離が十

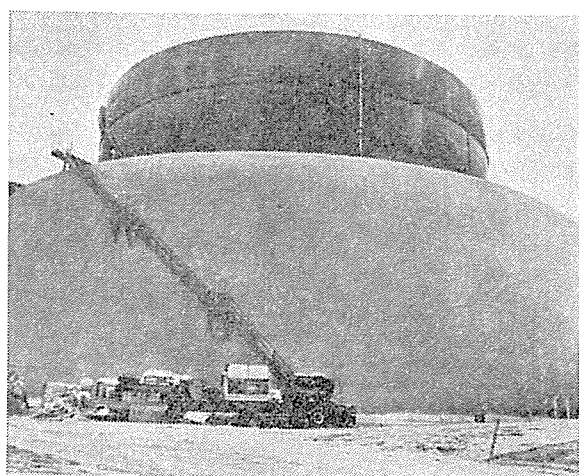


図-10 直径 216 in×高さ 59 in の LNG タンク用ダイク
(ペンシルベニア電気会社)

分に取れなかった。このためタンク構造は次のような丈夫な構造となっている。外壁を液圧を支えている内部 P C 壁と同じにし、内外壁間にパーライト断熱材とともに 3 m 幅のコンクリートを打設している。側部液密壁に普通鋼板を用い、底部に 9 % Ni 鋼を用いているのは Barcelona のタンクと同様である。概略図を図-9に示す。最近 Preload 社は LNG タンクの防液堤を図-10に示すような割合に背の高い P C 壁で作ったほうが液がもれて防液堤内に溜って蒸発したときに蒸発ガスが早く大気中に拡散して薄まるので安全であるとの提案をしている。

5. おわりに

P C タンクは低温材料として優れた性質を有しており、これからも LNG を含めた超低温貯槽用材料として広く使用されていくと思う。

従来の P C タンクは P C のもつ低廉さを生かしきれていなかった。この原因は、スチール製液密壁が高価なためである。将来はプラスチック製の液密シートがウェットインシュレーションを用いた低廉な P C タンクが開発されるであろう。

また本文では、P C タンカーの実例がないので、これについては述べなかったが、この陸上タンクの技術は、LNG の海上輸送用のバージおよびタンカーとして将来は利用されるであろう。

参 考 文 献

- 1) Eakin, B.E., Bair, W.G., Closner, J.J., Maroti, R. : "Belowground Storage of Liquefied Natural Gas in Prestressed Concrete Tanks", Institute of Gas Technology Report #8, July 1963.
- 2) Closner, J. J. : "LNG storage with prestressed concrete", 1st international conference on LNG.
- 3) Closner, J. J. : "Very large prestressed concrete tanks for LNG storage", 2st international conference on LNG.
- 4) "Prestressed Concrete for LNG Storage and Protection Systems", preload technology in corporation.
- 5) "LNG Information Book", July 1968.

1973.3.7・受付