LNG の貯蔵, 輸送, 寒冷利用について

石 政 祐 三

東京瓦斯株式会社根岸工場 横浜市磯子区新磯子 34

(1968 年 3 月 1 日受理)

Storage, Transportation, Coldness Utilization of Liquefied Natural Gas

Yuzo ISHIMASA

(Tokyo Gas Co., Ltd., Negishi-kojo, 34 Shin-isogo, Isogo-ku, Yokohama)

(received March 1, 1968)

General description are given on the recent trends of storage, transportation and coldness utilization of liquefied natural gas.

Three different types of storage tanks.....namely above ground tank, insulated below ground tank and frozen earth tank...are constructed.

There are two alternative construction systems of cargotanks of LNG ocean tanker. One is self-supporting type and other is membrane type.

We can find many reports on the research and reviews on the coldness utilization of LNG, and no apparent commercial instances of it.

1. 緒 言

LNG は Liquefied Natural Gas の略語であり, その名の通り天然ガスを冷却して液化したものである。LNG が工業的なエネルギー資源として登場してきたのは, 1958 年米国ルイジアナ州 Lake Charles で開始された中規模の液化, 貯蔵, 輸送の実験からであり, 1964年には, アルジェリア国の地中海沿岸の Arzew に建設された液化基地から, 英国の London 近郊 Canvey 島 LNG 基地への年間約 70 万 t の大規模な輸出が始まった。この他にも仏国の Le Havre 基地へも輸出されている。

米国では, 天然ガスパイプラインの能力を補うために消費地に液化設備, 貯蔵設備をおき, ピーク需要を賄う目的の LNG プラントが建設中のものを含めて現在 11ヶ所ある。

わが国でも, 東京瓦斯(株)が東京電力(株)と共同で, アラスカ州より LNG を年間 96 万 t 輸入する計画が決定し, 1969 年春, 輸入開始を目標に現在受入, 貯蔵, 再ガス化プラントを, 横浜市磯子区の埋立地に建設

中である。またブルネイの LNG 導入の計画もある。

このように LNG は既にエネルギー資源として実用化の時代に入り今後さらに大量に輸入されるものと予想され, LNG 産業はますます生成するものと思われる。ここでは, LNG について貯蔵, 輸送, 寒冷利用などにつき概説したい。

2. LNG の貯蔵

LNG は天然ガスを液化して製造するが, 液化の前処理工程において, 不純物 (たとえば水分, 炭酸ガス, 硫黄化合物), 重質炭化水素を除去して液化工程に悪影響のないようにしているので, 原料天然ガスよりも CH_4 成分が多くなっている。第 1 表の LNG の組成例からわかる

第 1 表 LNG 組成例 (Mol %)

基 地	N_2	O_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}
CANVEY (英)	0.3		86.1	9.7	2.7	1.0	
LE HAVRE (仏)	0.7		87.5	8.3	2.4	0.9	0.1
根 岸	0.3		99.6	0.1			

第2表 LNG 成分物性

	メタン	エタン	プロパン	イソブタン	正ブタン
分子式	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀
分子量	16.04	30.07	44.09	58.12	58.12
分子容	22.36	22.16	21.82	21.77	21.49
融点 °C (1atm)	-182.5	-188.3	-187.7	-159.6	-138.3
沸点 °C (1atm)	-161.5	-88.6	-42.2	-11.7	-0.5
液体比重 (沸点 4°C)	0.425	0.550	0.580	常温 0.562	0.605
ガス比重 (空気=1)	0.554	1.038	1.522	2.006	2.006
臨界温度 °C	-82.1	32.4	96.8	135.0	152.0
臨界圧力 atm	45.8	48.3	42.0	36.0	37.5
蒸発潜熱 kcal/kg	121.8	116.9	101.7	87.5	92.1
融解潜熱 kcal/kg	14.0	22.2	19.1	—	18.0
空気混合 {上限 %	5.5	2.9	2.1	1.8	1.8
爆発限界 {下限 %	15.0	13.0	9.5	8.4	8.4
総発熱量 kcal/Nm ²	9,501	16,640	23,676	30,599	30,684
// kcal/kg	13,271	12,403	12,037	11,800	11,834
真発熱量 kcal/Nm ⁴	8,550	15,370	22,350	29,050	29,510
// kcal/kg	11,950	11,350	11,080	10,900	10,930
ガス比熱 CPkcal/kg°C	0.2929	0.2276	0.2159	0.2151	0.2171
// CVkcal/kg°C	0.224	0.191	0.191	0.196	0.198
CP/CV	1.307	1.192	1.131	1.097	1.096
液体比熱 kcal/kg°C	0.83 (-162°C)	0.58 (-89°C)	0.60 (-42°C)	0.549 (0°C)	0.57 (0°C)
蒸気圧kg/cm ² (3.77°C)	—	54.8	13.4	5.1	3.6
燃焼必要空気量 m ⁵ /m ⁴	9.55	16.71	23.87	30.03	31.03

ように、LNG はメタンを主体としており、したがって LNG の性質も、液化メタンの性質に類似している。

メタンは常温常圧では無色無臭のガス体であり、液化した場合大気圧下では約 -162°C の沸点を持つ液体となる。

LNG は臨界温度が -82°C と常温よりはるかに低いので、常温加圧タンクに貯蔵することはできず、大気圧下の沸点約 -162°C の液として保冷タンクに貯蔵するのが普通である。そして保冷層を貫通して流入する熱により LNG の一部はたえず蒸発している。(これをボイルオフガスと呼んでいる。LNG 基地の性格により、もっとも経済的な保冷厚を選んでボイルオフガス量を決めるのが普通である。)

LNG の貯蔵方式は、現在実用に供されているものとして次の三方式がある。これらはいずれも一長一短があり、決定的な優劣はつけ難い。

2.1 地上金属製二重殻保冷タンク

地上 LNG 貯蔵タンクの構造は第1図の概念図に示すように、LNG と接する内槽と、保冷材を支える外槽より成っている。

第1図 地上金属製二重殻保冷タンク概念図
(容量 45,000kl)

内槽に用いられる -162°C の低温に耐えるような金属材料として、現在までに実用に供されているものは、Al 合金と 9% Ni 鋼である。経済的にはほぼ同等であるが溶接技術的にみて容量の大きなものでは、9% Ni 鋼がやや優れているようである。なお現在世界で最大のものは、米国 Louisiana 州 Memphis 市にある 47,700 kl のものであり、内槽は 9% Ni 鋼で作られている。

外槽は、保冷材を支える目的であり、大気と接触しているため、普通鋼材を用いる。内槽と外槽は完全に独立しており、液、ガスのノズルが外槽を貫通する部分は、

全て伸縮継手を用いて内外槽の熱収縮の差を吸収している。

内・外槽間の保冷層は1m程度の厚みがあり、ここに保冷材として粉状バーライトを充填する。この断熱材は吸湿性があり、水分を含むとLNGの寒冷で凍結してトラブルを生ずるために、この部分には乾燥した窒素ガスまたはメタンガスを封入してある。この型式のタンクでは自然入熱によるボイルオフガス量は0.05～0.07%/dayである。

LNGタンクの如き低温タンクは、基礎に特長がある。鋼管パイルとコンクリートスラブで基礎を作り、地面とスラブの間は若干のすきまができるようにした高床式基礎を用いて、タンク底面からの寒冷により土壤が凍結し凍上して地面を持ち上げることを無いようにする。または、底面への熱伝導量と見合う熱を与えるように電熱ヒーターを埋め込む方式もある。

この地上二重殻式タンクは、液体酸素用、液体窒素用として類似構造のものが用いられている。

地上二重殻式タンクの建設費は30,000～40,000klのもので、13,000円/kl～15,000円/kl程度でかなり高価なものである。

新しい型式の地上タンクとして、現在仏国NantesにあるGaz de Franceの実験所で、コンクリート製のタンク内面に保冷材を入れた合板製の箱を一面に取りつけ、この保冷箱にインバール(Invair: 36% Ni鋼)の薄板をとりつける方式の開発研究がかなり進んでいる。これはLNGタンカーのメムレン型と同じ発想になる類似の構造であり、建設費の低減が見込まれている。

LNGタンクの出入の配管も、LNGに接触するために9% Ni鋼、ステンレス鋼、Al合金など低温に耐える材質を用い、タンク同様厚く保冷材をまいている。LNG配管、特に大口径管の設計・施工では、熱収縮に対する配慮、異種金属管のフランジ接合または、トランジションメタル接合、ガスケットの選定など常温・高温の配管と違った問題点が多い。

2.2 地中保冷タンク

これは、地下にPSコンクリート(Prestressed Concrete)のタンクを作り、その外側に保冷材を置いたものである。PSコンクリート壁はLNGに接しているが、気密では無いために保冷材との間にステンレスの薄板をはさんでいる。

この型式のタンクは、米国のIGT(Institute of Gas Technology)が開発した方法である。現在類似構造で96,000klのものが米国New Jerseyで建設中である。

第2図 地中保冷タンク概念図

建設費は、同容量の地上金属製二重殻式とほぼ同じである。

2.3 土壤凍結式地下タンク

土壤に穴を掘りLNGを入れると、土壤の水分が凍結して土粒子を結合しかなり強固なものとなると同時に、LNGの拡散に対しても不透過な壁を形成する。故に適当な屋根をつければ、LNGの貯蔵ができることになる。

第3図 土壤凍結式地下タンク概念図

この土壤凍結式地下タンクは、Conch International Methane社の開発したものであり、既にいくつか大容量のものが建設されている。

この方式は、土質にかなり影響されるようであり、施工もかなり高度の技術を要するが、地層を適当に選べば建設費は地上タンクよりも割安であるという利点がある。反面ボイルオフガス量が多く、また、使用開始から地中温度分布が安定するまでにかなり長時間を要するという不利な点もある。今後の研究開発にまつ点の多い貯蔵法である。

この他にLPGで実施されている洞坑内貯蔵法(Mined Cavern Storage)をLNGにも適用する方法が検討されているが、まだ基礎的研究の段階である。

第3表 低温用材料物理的性質

材 料	比重 (g/cc)	熱膨脹係数 ($\times 10^{-6}$)	縦弾性係数 ($\times 10^4$)	熱伝導度 ($\times 10^{-2}$)100°C
ステンレス鋼 (18—8)	7.93	17.3 (2~100°C)	1.97 (kg/mm ²)	3.89 (cal/cm ² /sec/°C)
Al 合金 (3.5Mg)	2.67	23.5 (")	0.7 (")	45 (")
9 % Ni 鋼	7.8	9.7~10 (")	2.1 (")	7 (")
INVAR (36% Ni)	8.15	1.5±0.5 (0~40°C)	1.5 (")	—
軟鋼 (SS41)	7.86	12.2 (0~100°C)	2.1 (")	12.2 (")

3. LNG の輸送—LNG タンカー

LNG の輸送には、LNG タンカーによる大量の海洋輸送、バージによる近距離輸送、ローリー車による輸送、パイプラインによる輸送などいくつかの分野があるが、ここでは LNG タンカーを主体に概説する。

LNG の海洋輸送は、LNG が低温であるために特に LNG のために設計された専用タンカーで行う必要がある。

LNG タンカーは、貯蔵タンク同様に、常圧下—162°C の沸点で静かな沸騰状態にある LNG を積載するものであり、次のような特徴がある。

① 積荷タンクは地上タンクの内槽と同様低温脆性を示すものは使用できず、Al 合金、9 % Ni 鋼、ステンレス鋼、インパールなど低温での強度の大きいものを使用する。液配管も同様である。

② 積荷タンクは、厳重に保冷して船体構造と熱的に絶縁し、船体構造が低温に曝されて脆性破壊を起こす危険を避けると同時に、積荷 LNG が自然入熱によりボイルオフする量をできるだけ小さくする。

③ ボイルオフガスを再液化化する冷凍装置をおくとすればかなり大規模なものとなるので、ボイラーで燃焼して船の動力源とする。ボイルオフガス量は積み荷の 0.2~0.3%/日 が普通であり、それ以上になると必要動力を超えてしまう。

④ 原油タンカーなどと異なって、空船時のバラストは、バラスト専用タンクに入れる。このために船体構造は必然的に二重構造となる。そして積載量の割に船型は大型となる。

LNG タンカーの実験船としては、1959 年に完成し、米国の Lake Charles より英国の Canvey 島まで数航海して実験に成功した Methane Pio-

neer 号 (2,200DWT) およびフランスの Beauvais 号がある。また商業規模のものとしては、アルジェリアから英国・フランスへ LNG を年間約 100 万 t 輸送している Methane Progress, Methane Princess, Joules Vernes の三隻がある。この三隻は 11,000~12,000t の積載量であるが、現在建造中の日本・アラスカ間に就航予定のものは 30,000t の積載量である。

LNG タンカーを構造的に大別すると、積荷タンクの支持方式に二種類あり、セルフサポータリング型 (自己支持型) とメンブレン型 (薄膜型) に分類できる。

3.1 セルフサポータリング型

この型の LNG タンカーでは、積荷タンクは船体構造

第4表 LNG タンカー諸元例

項 目	単 位	メタンプリ ンセス	ジュールベ ルヌ	*
全 長	m	188.5	201.25	249.5
垂線間長	m	175.3	188.25	—
深 さ	m	17.8	16.50	20.6
幅	m	24.9	24.76	3.4
吃 水	m	7.9	7.52	9.5
スカントリ ング 吃水	m	—	—	10.0
巡航速度	ノット	17.25	17	17
機関出力	SHP	12,500	12,800	20,000
LNG				
タンク数	個	9	7	6
タンク容積	kI	27,500	25,500	71,000
〃	(LNG t)	12,500	11,000	30,000
タンク形式	—	方形, 独立	円筒形独立	方形メンブレ ン
タンク材質	—	Al 合 金	9 % Ni 鋼	インパール
断 熱 材	—	バルサ・グラ スファイバー	PVC, パーライト	パーライト
操 作 圧 力	kg/cm ² G		1,050 mb (絶対圧制御)	1,060mb(絶対 圧制御) ±5
安全弁出力	//	3.5 lb/in ² G	0.240	0.242
シーリング ガス	—	窒 素	窒 素	窒 素
航 海 数	往復/年	29	33	16.5
航 海 日 数	往復日数	11.5日	10 日	20 日
造 船 所		Harland & woiff Ltd. Vichers- Armstrongs Ltd.	La Seine Maritime	スウェーデン コックムス造 船所

* 船名未定, 日本アラスカに就航予定

第4図 LNG タンカー Methane Progress 号

から完全に独立しており、積荷の荷重は、積荷タンクで完全に受けている。積荷タンクの他にバラストタンクを持っているので、二重の船殻構造の内にもう一つ船体に近い積荷タンクを作るような構造であるために、建造費は一般のオイルタンカーと比較して相当高価になる。(積載 1t 当り 330,000~400,000 円程度といわれている。)

現在就航している Methane Progress および Methane Princess は第5図のように方形の Al 合金製積荷タンクを持ち、断熱材としては、バラスト材の合板を主体としている。また Jules Vernes は円筒型の積荷タンクを持ち発泡塩化ビニル、パーライト粉末などで断熱している。保冷層には N_2 ガスを封じてあるのは陸上タンクの場合と同様である。

3.2 メンブレイン型

この型の特長は、低温脆性のないステンレス鋼その他

の特殊鋼の薄膜を用いて積荷タンクを作っている点である。積荷の荷重は、保冷材(粉状パーライト)を入れた合板の箱を介して船体内殻構造で受けている。第6図は船体の横断面および保冷箱取付けの概念図であるが、この図から判かるように積荷タンクは二重構造となっており、保冷層も二層になっている。この保冷層にも N_2 ガスを封じてあり、漏洩に対する検出を可能とすると同時に、安全性を大にしている。

メンブレイン型のものは、まだ就航していないが、1969 年よりアラスカ・東京間に就航する LNG タンカーはこの方式のものであり、現在 Sweden で建造されている。また、1968 年秋には、メンブレイン型の LPG タンカーが不定期船として就航する予定になっている。

LNG タンカーの積荷タンクからは、自然入熱によりボイルオフガスが発生し、これをボイラーで燃焼することは前述したが、入港時・停泊時などエンジン出力を必要としない場合には、タンクを閉め切っても、タンク内圧が急速に上昇することはない。2 milibar/hr 程度の上昇が予想されるので、安全弁が作動するまでには、タンク閉め切りより 100 時間近くかかるといえる。

4. LNGの寒冷の利用

LNG を工業的目的のために使用するには、LNG に熱を与えて再ガス化する必要があるが、この再ガス化のプロセスを、他のプロセスと組合せて、LNG の寒冷を有効に利用できれば、LNG の経済性が高まるといえる。

図3 メタンプロGRESS号

第5図 メタンプリンス号

第 6 図 メンブレン型 LNG タンカー

現在までのところでは、LNG の寒冷は天然ガスの輸送、貯蔵の手段であってその有効な利用は全くなされていないが、いくつかのアイディアは出されている。しかし実用化までにはかなりの技術開発が必要である。

4.1 高圧メタンガスによる動力回収

この原理は火力発電と同じであって、水をボイラーで気化した高圧蒸気の代りに、高圧にした LNG を再ガス化した高圧メタンガスを使用し、これで膨張タービンを回して動力を回収し、発電などに用いる。この場合、熱源は海水など自然にあるものでよい。既存の技術では設備の割に回収される動力が小さいようである。

4.2 空気分離による酸素、窒素の製造への寒冷利用

空気を分離して、酸素、窒素を製造する場合には、空気を圧縮しておいて、断熱膨張させ、液化して、分留するのであるが、LNG の寒冷を利用し、動力を低減できる可能性がある。特に液体酸素、液体窒素を製造する場合に有利である。

4.3 海水の淡水化

寒冷を用いて海水を淡水化する方法には 2 つの方法がある。冷媒により海水中的の水だけを凍結させ、この氷から淡水を回収する方法と、プロパン、ブタンなどを用いて低温加圧下で水和物を作り、これを分離し、常温常圧で分解して淡水を作る方法である。

いずれも大量の寒冷を必要とするので、LNG の寒冷の利用の可能性がある。

4.4 化学工業への利用

化学工業にはエチレンの低温分離・キシレンの異性体分離など、低温での精製操作を用いるところが多く、LNG の寒冷利用により設備を大幅に節約できる可能性がある。

4.5 コールドチェーン

コールドチェーンは、生鮮食料品の流通体系の品質安定化対策として米国で発達したものである。生産から消費にいたる流通機構を低温におき、品質の保全を目的とするものである。LNG の寒冷の温度レベルはコールドチェーンの温度レベル (-30°C 程度) と比較して低すぎることはあるが、冷凍倉庫の寒冷源としては十分に利用できる可能性がある。

4.6 そ の 他

上記の他にも、LNG の低温レベルでの気化熱を利用して MHD 発電の際の磁極冷却を研究したり、超音速 Jet 機の燃料としての開発研究も進められており、さらにはスターリングサイクルなどの利用により効率の高い低温プロセスの開発なども今後の注目すべき課題と思われる。

5. 結 び

以上に LNG の貯蔵、輸送を主とした技術的概説を試みたが、今後も海外における LNG 輸送はますます活発化するすう勢にあり、液化技術の合理化も含めて、いわば低温工学の粋を集めた LNG 設備が数多く出現するものと考えられる。

LNG 設備は操業温度としてはむしろ中程度の低温領域にあるが、従来の空気液化プラントや石油化学プラントに比してきわめて規模の大きい液化、貯蔵設備を要するのが特長で、その意味から新しい Idea や優れた Engineering が大いに期待される。

本稿が低温工学 Engineer の何らかのお役に立てば幸いである。