LNG 冷熱利用の現状と今後の展望

富 岡 孝 三 郎

東京瓦斯(株)技術開発室 東京都中央区八重洲 1-2-16

(1975年11月4日受理)

Present and Future Aspects of LNG Cold Utilization

Kosaburo TOMIOKA

Department of Technical Research and Development, Tokyo Gas Co., Ltd.

1-2-16, Yaesu, Chuo-ku, Tokyo

(Received Nov. 4, 1975)

Synopsis :

Utilization of LNG Cold is important from the view-point of saving energy since the amount of LNG used will be more increased in the future. So far only a part of the cold is used for an air separation plant and a super freezing warehouse in our country. Studies on other new applications like, for example, crushing of scrapped metals and tires at low temperature are being made by many engineers and some of them have been proved to be technically possible, though economic or other terms are not satisfactory. Therefore it is expected that utilization of LNG cold will go towards wide and large scale combination of such processes as storage, handling and distribution of foods and garbage disposition. This affords profits which are not available if those undertakings are schemed individually.

1. まえがき

いおう分を全く含まないクリーンな燃料である LNG は、昭和44年11月にわが国で初めて、アラスカから根岸基地に導入された。当時の輸入量は年間96万tであった。次いで昭和47年から48年にかけて、大阪府泉北および千葉県袖ヶ浦にも新受入基地が完成し、あらたにブルネイ産 LNG の受入が始まった。そして昭和50年における LNG 輸入量(見通し)は、約500万tに達するまでに至った。さらに、同年8月に発表された総合エネルギー調査会の中間答申によれば、これからも LNG の導入を積極的に進めるべきであるとし、昭和60年の輸入量を4,200万tと想定している。これはその時点でのわが国の1次エネルギー使用量の約8%を占める量である。このようにわが国における LNG 使用量は、今後ますます増大する。

LNG はメタンを主成分とする天然ガスを液化した

もので、大気圧下における沸点が約 -160°C という極低温の液体である。これが蒸発して常温の天然ガスに戻るといわれる再ガス化の過程で、周囲の接触する物質から熱を奪ってその物質を冷却する。この能力が冷熱エネルギーである。

この冷熱エネルギーの一部は後述のように、液体酸素・窒素の製造や冷凍倉庫に利用されている。しかしその量は全体からすれば僅かなものに過ぎず、大部分の LNG は再ガス化時に蒸発器において主として海水によって熱を与えられ、せっかくの冷熱エネルギーも海中に捨て去られているのが現状である。

エネルギー資源に乏しいわが国にあっては、省エネルギーの推進は重要な国家的課題の一つであるが、LNG 冷熱の利用分野の拡大を図ることによって、その利用度をより高めるべく努めることは、われわれ LNG ユーザーに課せられた責務であろう。

この冷熱利用については、LNG 導入計画と期を同

じくして検討が始められており、十数年前から種々のアイデアが提案されていたにもかかわらず、立地条件、負荷変動に対する適応性、経済規模のバランスなどに問題点があって、有効利用の達成度が低いのである。

本稿では冷熱利用の現状における問題点に力点を置いて紹介し、さらに将来の展望について解説する¹⁾。

2. LNG 冷熱の本質

2.1 保有冷熱量

LNG はメタンのほかに、種々の重質炭化水素や無機ガスを若干含んでいる。これらの含有割合は産地により多少異なる。現在輸入されているアラスカおよびブルネイ LNG の性状は表 1 のようである。

ここでは簡単のため、純メタンについて考えることとし、圧力と温度による状態変化を示すモリエ線図を図 1 に掲げる。

大気圧下の飽和液点① (温度 -162°C) から、同一圧

表 1 LNG 組成

	組 成 (%)					発 熱 量 (kcal/Nm ³)
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ +	その他	
アラスカ	99.8	0.1	—	—	0.1	9,550
ブルネイ	88.8	5.6	3.7	1.8	0.1	10,800

図 1 メタンのモリエ線図

力下で加熱されると飽和蒸気点② (-162°C) を経て、 0°C の過熱ガス点③へと変化する。この場合のエンタルピー差は

$$\textcircled{3}-\textcircled{1}=202 \text{ kcal/kg-LNG}$$

$$\textcircled{2}-\textcircled{1}=122 \text{ kcal/kg-LNG}$$

すなわち、液化メタンの大気圧下での冷熱量は、蒸発潜熱のみで 122 kcal/kg、 0°C までの顕熱を加えて 202 kcal/kg であり、 0°C までの回収でなく例えば -65°C までの利用にとどまるならば、利用冷熱は 170 kcal/kg に減少する。さらに、冷熱の利用圧力はかなり高圧をとらざるをえないこともあり、その場合潜熱値は減少する。

メタンのほかに重質炭化水素を含む LNG では、重質分が増加するにつれて、同圧力下の飽和温度も上昇する。

このように LNG の保有する顕・潜熱のみの冷熱量を評価するならば、案外小さなものである。ちなみに年間 100 万 t の LNG が $-160^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$ で利用されるとして、200 kcal/kg にとっても 6,900 冷凍トン、実際には後述のようにベースロード的にしか使えないため、この割合を 20% とすれば、1,400 冷凍トン足らずになる。現在新宿副都心で行われている地域冷房²⁾ の設備能力が 20,000 冷凍トンであるから、LNG の冷凍能力がそれほど大きくないことは理解できよう。

2.2 極低温利用の価値

図 2 のような、断熱圧縮 (12) $\rightarrow$ 等温圧縮 (23) $\rightarrow$ 断熱膨張 (34) $\rightarrow$ 等温膨張 (41) を繰り返すことにより、外部から仕事を与えて低温源 (温度 T_1) から熱量 Q_1 を取出し、高温源 (温度 T_2) へ熱量 Q_2 を捨てる逆カルノーサイクルを考える。その間に行われる仕事 W は

$$W=J(Q_2-Q_1)$$

であらわされる。ここで J は熱の仕事当量である。一方、温度と熱量の間には、

$$Q_1/T_1=Q_2/T_2$$

の関係があり、これらの式より

$$W/J=Q_1(T_2/T_1-1)$$

が得られる。いま

$$Q_1=1 \text{ kcal}$$

$$T_1=-160^{\circ}\text{C}=113^{\circ}\text{K}$$

$$T_2=27^{\circ}\text{C}=300^{\circ}\text{K}$$

とすれば

$$W/J=1 \times (300/113-1)=1.65 \text{ kcal}$$

を要し、また

図 2 逆カルノーサイクル

図 3 低温と低温発生所要動力
(熱除去温度 26.7°C)

$$T_1 = 0^\circ\text{C} = 273\text{K}$$

とすれば

$$W/J = 1 \times (300/273 - 1) = 0.10 \text{ kcal}$$

に過ぎない。すなわち、同じ 1 kcal を汲上げるのに要する仕事量は、 0°C からを 1 とすれば、 -160°C からは約 17 倍を必要とする。さらに実際のプロセスでは温度レベルが低いほど機械効率が下がるため、冷却温度が低下するにつれて急増し、両者の仕事差はより大きくなる。

この関係を図示したのが図 3 で、これを見ても LNG 冷熱利用はできるだけ低温でなすべきことが理解できよう。

3. LNG 冷熱利用の目的

3.1 動力節減

シャルルの法則によれば、圧力が一定ならば気体の体積は絶対温度に反比例する。また気体を圧縮するのに要する動力は、体積に比例する。したがって一定重量の気体の圧縮に必要な動力は、絶対温度に反比例する。そこで圧縮すべき気体を冷却し体積を減少させれば、必要動力の節減がはかれる。

ところで一般に低温を作りだすためには、図 4 のように気体を断熱圧縮し温度が上昇したところで、冷却水などにより熱を奪って温度を低下させ（あるいは液化させ）、次に断熱膨張させるとする方法をとる。この断熱圧縮の段階で多くの動力が消費されるが、ここで LNG と熱交換させて低温の気体（または液体）を得ることにより、図の圧縮・冷却プロセスが省略または軽減でき、動力が節減されることになる。

空気分離による液体酸素・窒素の製造や、冷凍機によって低温を発生するプロセスにおいて、LNG 冷熱を利用するケースがこれに該当する。この場合、前に述べたように、できる限り低温に冷却するプロセスに LNG を利用するのが有利である。

3.2 動力回収の媒体

図 5 のように、熱媒体液をポンプで昇圧し、温熱源により加熱して気化させた後、タービンで膨張させると、動力を回収できる。

LNG の沸点は常温よりはるかに低いから、例えば海水のような常温で豊富に存在する物質を、温熱源と

図 4 冷凍機による低温発生プロセス

図 5 膨張タービンによる動力回収プロセス

の適当な冷媒に一時的に貯蔵して、図7に示したようなプロセスで均一化したり³⁾、冷熱利用プラントを急速な稼動変動ができるものにすれば、より多くの LNG 冷熱の利用が可能となる。

4.2 温度・圧力

冷熱利用に供される LNG は一般的には、受入基地から冷熱利用プラントまで液配管により移送されるが、基地が広大なためこの移送配管が相当の長さになることが多い。したがって冷熱利用プラント入り口の LNG 温度は移送途中の入熱で上昇し、受入圧力は低下する。

また冷熱利用プラントで再ガス化した天然ガスは、ガス配管によって基地に返送されるが、ガスの戻り温度は配管材質などを考慮して一般に 0°C 以上とされるので、場合によっては冷熱使用後でなお零下数十度の低温の天然ガスを常温まで温度回復させるための加熱設備を必要とし、せっかくの利用効果が減殺されることもある。

温度回復に設備を設け、運転費をかけるのは損なので、例えば -100°C 位までを食品凍結、低温破碎に、 -60°C 位までを冷蔵に、残りを海水淡水化、循環水冷却に組込むというように、必要低温レベルごとに熱バランスを取って全体的に冷熱を無駄なく利用できるシステムを組立てられれば理想的である。

また LNG の圧力が高いと、図1のモリエ線図からも判るように、飽和温度が上るため冷熱利用に不利となり、圧力を下げて冷熱を十分に利用すれば、天然ガスを返送するのに必要な圧力まで昇圧する費用が増加することになる。

4.3 立地

前述のように、液配管により LNG を移送することを前提としている現状では、冷熱利用プラントはできる限り受入基地の近くに配置しないと経済的メリットが生まれない。

また空気分離、冷凍食品製造、冷凍倉庫など具体的な企業化にあたっては、製品流通の観点からの立地条件の制約をもあわせて考えなければならない。そして前者と後者の立地条件が相反する場合が少なくない。たとえば、冷熱を利用することによって製造原価が仮に20%安い液体窒素を作れたとしても、窒素需要家が遠隔地に点在しているならば、ローリー輸送で片道40 km も運べばメリットはなくなる。

4.4 安全性

LNG が可燃性物質であることも、その冷熱利用を難しくする制約条件である。冷熱を最大限に利用するためには、被冷却物質が固体なら LNG に直接浸漬する、または LNG を噴霧するといった冷却方式を採れば好ましいが、被冷却体の出入に伴って空気が天然ガス中に混入するのを防ぎ得ない。あるいは冷風を作り出すのにいきなり空気と LNG と熱交換させると、万一熱交換器に洩れが生じた場合に空気と天然ガスが混合して爆鳴気を生ずる可能性がある。

こういった危険を避けるために、LNG と被冷却体の間に窒素、フロンなどの不活性冷熱伝達媒体を1クッション入れるのが普通であり、そのために冷却システムが複雑になり、費用が高むうえ効率も落ちるので、冷熱利用メリットが減少する。

5. 冷熱利用の現状

5.1 液酸・液窒製造

東京液化酸素(株)は東京冷熱産業など5社の出資による合弁会社であるが、隣接する東京瓦斯根岸工場から8t/hのLNGの供給を受けて、この冷熱を利用して空気分離により $10,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ の液体酸素・窒素を製造している。空気は常圧では $-191.5^{\circ}\text{C}\sim-194.2^{\circ}\text{C}$ の温度で液化するから、LNG の低温を十分に利用している点で極めて有効な冷熱利用法である。実際にこの場合、通常法に比して、設備費は10%以上節約され、電力原単位は $1.3\text{ kWh}/\text{Nm}^3$ から $0.76\text{ kWh}/\text{Nm}^3$ へ低減している。

フローシートを図8に示すが、在来型の空気分離装置で必要とされるフロン冷凍機、膨張タービンに代って、LNG と中圧循環窒素ガスの熱交換器が組込まれ

図8 LNG 冷熱利用空気分離プロセス

ている。この際冷却温度を下げるほど窒素側の凝縮圧力を下げられることから、LNG はほぼ常圧で蒸発させその冷熱をフルに窒素に与えている。ただし再ガス化した天然ガスは、戻し先である東京瓦斯の使用圧力 25 K まであらためて圧縮している。一般にはこれらの温度、圧力の選定は、全システムのケーススタディによって最有利点を求めるべきである。

空気分離への LNG 冷熱利用は、本質的に最も有利であるため、東京瓦斯が袖ヶ浦にもプラントの新設を検討しているほか、大阪瓦斯の関連会社であるコールドエアープロダクツ(株)でも泉北に建設すべく準備を進めている。このように冷熱利用からは有利な空気分離も、企業化にあたってはいろいろな問題点がある。

液酸・液窒の電力原単位を液化と分離の目的でわけると表 2 のようで、LNG 冷熱は液化に貢献するもので、ガス取りのみでは妙味がない。

ところで、酸素の使用量の大部分を占める製鉄業の需要はガス酸素であって、液酸素の需要はほとんどない。一方、窒素の需要は電子工業が約 50% を占め、冷凍食品用以外は(昭和 50 年で約 20%) 運搬のために液態をとっているわけであるが、製鉄用酸素のようなオンサイトの可能性はない。ローリーによる輸送費のために前述のように在来プラント品との競合が片道 40 km 以内であると、鉄道輸送によらない限り供給エリアはかなり限定される。

また液酸・液窒の関東圏の需要がさほど大きなものではなく、例えば液窒の昭和 52 年の需要合計は約 40 万

表 2 空気分離電力原単位 (kWh/Nm³)

	液	化	分	離	計
O ₂	0.9		0.4		1.3
N ₂	0.9		0.14		1.04

t と推定され、袖ヶ浦の能力を液酸・液窒各 7,500 Nm³/h と仮定すれば、100%稼働で液窒は約 7 万 t であるから、約 20% 弱であり、遠距離の需要家を除けば 20% を越えよう。このように業界として最大規模のプラントも、LNG 使用量は 12 t/h で、いっぽう使用可能量は当面 200 t/h あるから、関東圏のほぼ 2 倍の製造も容易である。国家的省エネルギーの見地からは、在来のプラントを順次廃止してでも再編成をはかるべきであろうが、私企業の連携、運営上は極めて困難である。

もちろん、液窒の新しい多量使用用途を開拓することも望まれるところである。

5.2 冷凍倉庫

東京瓦斯、三菱商事、国際水産の合弁会社である日本超低温(株)は、東京瓦斯根岸工場の隣接地に冷凍庫を建設していたが、昭和 49 年 10 月に営業を開始した。

公称能力 12,000 t、5 階建で 1～3 階が -50°C、4、5 階が -35°C レベルで、冷凍まぐろを主とした冷凍魚、冷凍食品を保管する。

フローシートは図 9 のようであるが、冷凍能力 120 冷凍トンで、庫内はフロン R-12 の液循環で冷却し、暖まったフロンを最大 4 t/h の LNG で冷却する。通

図 9 LNG 冷熱利用冷凍倉庫 (日本超低温)

- 1) 自動車、家電製品などの粗大廃棄物を前処理なしで処理できる。
- 2) 破砕機の所要動力が常法の $1/4$ 程度で済む。
- 3) 騒音、粉塵の発生が少ない。
- 4) 破砕品の高密度が大きい。

わが国ではジャパン・インチスクラップ社が、本方を普及させるべく研究・開発を進めているが、東京瓦斯も同社と打合せを行なった結果、私企業ベースでは採算に乗らないと判定した。主な問題点は次の通りである。

- 1) 液室（使用量 330 kg/t-スクラップ）のコストが高い。
- 2) スクラップ以外のごみの発生量が多く、その処理費が多額である。
- 3) 製品スクラップの価格が安く、しかも変動する。しかし今後粗大廃棄物の適切な処理、およびそれからの資源回収の必要性はますます高まるであろうから、国、地方自治体、製造業界のバックアップを受けて、実現化したいものである。

5.5 廃タイヤ低温破砕

廃タイヤも廃棄物の一つとして問題になっているが、今でも一部は再生ゴムメーカーが常温破砕によって行っており、タイヤの原料に再生利用されている。

今後急増するスチールラジアルタイヤは常温破砕が困難で、低温法ならゴムとスチールコードが見事に分離する。ただタイヤを冷却するのに、液窒素によるしろ冷風によるにしろかなり冷却費がかかる結果、製品である粉末ゴムのコストが高くて適切な用途を見出せない。

5.6 海水淡水化

海水淡水化の主なものとしては蒸発法、冷凍法、逆浸透法、電気透析法がある。このうち蒸発法⁶⁾は生産される水の純度がきわめて高いために、実用プラントの全装置容量の90%以上を占めている。

冷凍法⁷⁾は熱的には有利(水の蒸発潜熱 540 kcal/kg に対して融解潜熱は 80 kcal/kg)であり、低温のため装置の腐食もほとんどないという利点があるが、原理上、氷結晶表面に海水が付着するため塩分が 300 ppm 以下には除去できない。したがって純淡水を得るためには電気透析法などもう一段の後処理を要する。

冷凍法による海水淡水化への冷熱利用は、利用温度 -5°C 程度と高いので、単独プラントよりもむしろ、他の低温天然ガスの温度回復手段として考えるべきであろう。図12にボタンを冷媒とした海水淡水化装置のフローシートを示す。

図12 冷凍式海水淡水化法

6. 今後の展望

LNG 冷熱の有効利用をはかるための各種の方法にはそれぞれ一長一短があり、それらの実現化がなかなか容易でないことは、今までの概説から理解いただけたと思う。しかし冷熱利用が現状の程度に止まらざるを得ないと速断してはなるまい。LNG 冷熱利用の歴史は未だ浅く、今は新しい研究開発や企業化の企画が、各方面で鋭意進められている最中である。事実、冷熱の利用を核にして食品保蔵・加工・流通、廃棄物処理・再資源化などをコンビナートの集約化する構想が出始めている。

袖ヶ浦基地の場合、幹線道路に面した隣接地に約10万 m² の冷熱利用用地を確保しており、ここに液酸・液窒製造プラントを建設するほか、廃棄物の低温破碎処理、冷凍倉庫、冷凍食品製造などの事業もあわせて検討されている。さらに道路をはさんで千葉県所有の土地約 10万 m² があるが、ここに低温食品流通センターをつくる構想も練られているとのことである。

大阪の泉北基地でも袖ヶ浦と同様の冷熱利用計画を検討、推進中である⁶⁾。

また大阪瓦斯、関西電力は兵庫県姫路に関西地区で2番目の受入基地の建設に着手しているが、そこに LNG 冷熱を利用した総合食糧基地をつくる計画⁹⁾ が具

体化している。昭和50年6月には「LNG 冷熱利用食糧基地建设促進協議会」という組織を発足させ、昭和54年スタートの目標で準備を進めている。

このように冷熱利用を個々の事業に切離して考えたとき採算上成り立たなくとも、これらを集約化することによって全体的にメリットを産み出し、今まで困難と言われていた障害を乗り越えることが可能になる。そこでこれからの LNG 冷熱利用事業は対象とする範囲が広く、また規模の大きな計画をまとめなければならない、それだけに LNG 技術者にとって取組みがいのある仕事なのである。

参 考 文 献

- 1) 前田：スチールデザイン，No. 138 (1974)
- 2) 東京瓦斯：日本瓦斯協会誌，Vol. 23，No. 1 (1970)
- 3) W. Förg：第2回国際 LNG 会議報告，Sess. 5，Paper 4 (1970)
- 4) 金丸，青木：三菱重工技報，Vol. 12，No. 2 (1975)
- 5) 帝国酸素，手塚興産：インチスクラップ法シンポジウム要録 (1973)
- 6) 石坂：化学経済，Vol. 21，No. 2 (1974)
- 7) 長島，前田：冷凍，Vol. 50，No. 570 (1975)
- 8) 中沢：超低温技術，No. 21 (1973)
- 9) 佐原：同上，No. 27 (1975)