

(解説)

LNGサテライト基地における冷熱の有効利用について

LNG Satellite Station Cold Energy Utilization



吉田 龍生*
Tatsuo Yoshida



中川 潤一*
Junichi Nakagawa



滝口 好美*
Yoshimi Takiguchi



大塩 章*
Akira Ohshio

Due to change in the power industry related to environmental issues, the trend in industrial fuels is slowly moving towards natural gas, as opposed to heavy oil or LPG. LNG satellite stations are also increasing. However, little of the LNG cold energy at these stations is being utilized. By utilizing this cold energy overall factory efficiency can be increased. This paper introduces two LNG satellite station cold energy utilization processes.

まえがき = 環境に対する関心の高まりから、産業用燃料として天然ガスへの転換が始まり、液化天然ガス (LNG) サテライト基地が建設されている。

現在、LNG サテライト基地では LNG 冷熱は無駄に捨てられている。その LNG 冷熱を有効利用すればエネルギー効率の向上が実現できる。

本稿では、産業用 LNG サテライト基地における LNG 冷熱の有効利用システムを紹介する。

1. LNG サテライト基地と冷熱利用状況

LNG サテライト基地は図 1 に示すようにローリ車で輸送された LNG をタンクに貯蔵し、気化器で気化する機能を有し、海外から輸入された LNG を貯蔵・気化する受入基地から導管で供給するには不経済なユーザへ天然ガスを供給する役目を持つ。現在、表 1 の当社建設実績に示すような都市ガス事業者向けの LNG サテライト基地の建設・稼動が進んでいる。また、この 1 ~ 2 年で産業用の LNG サテライト基地の建設計画が急速に高まり、数箇所まで建設が始まっている。

建設・稼動が進んでいる都市ガス事業者の LNG サテライト基地では夜間の需要量が非常に少ないため、一定の冷熱用 LNG 利用量を確保することが難しく、LNG 冷熱利用が行われていない。

LNG 冷熱利用は、年間 LNG 取扱量 25 万トン以上の受入基地において、冷熱発電・ボイルオフガス (BOG) 再液化・空気分離・液化炭酸・冷凍倉庫に限定的に利用されている。そこで利用される LNG 量は、4t/h (冷凍倉庫) から 50t/h (空気分離) までの一定量である。

建設計画が急速に高まっている産業用の LNG サテライト基地では一定の冷熱用 LNG 利用量を確保できるため、LNG 冷熱利用の可能性が高く、LNG 冷熱の有効利用システムの開発が期待されている。

当社が建設した LNG 冷熱利用設備の実績 (表 2) とと

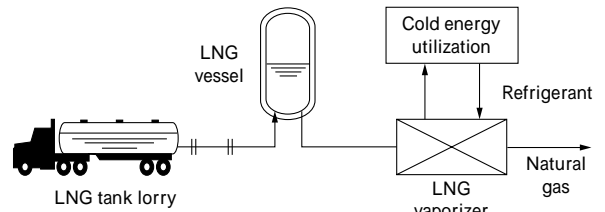


図 1 LNG サテライト基地
Fig. 1 LNG satellite station

表 1 LNG サテライト基地建設実績

Table 1 Constructions of LNG satellite station by Kobe Steel, Ltd.

Customer	Project name	Operation start
Osaka Gas Co., Ltd. Shiga-Higashi Branch	Shiga-Higashi satellite station (extension)	1994
Osaka Gas Co., Ltd. Himeji Branch	Nishi-Harima satellite station	1996
Osaka Gas Co., Ltd. Hyogo Business Headquarters	Nishi-Harima satellite station (extension of LPG vessel)	1999
Osaka Gas Co., Ltd. Shiga-Higashi Branch	Shiga-Higashi satellite station (extension)	2000

表 2 神戸製鋼の LNG 冷熱利用設備建設実績

Table 2 Constructions of plants utilizing LNG cold energy by Kobe Steel, Ltd.

Category	Operation start	System	Customer
Cold power generation	1979	1 450kW Rankin cycle	Osaka Gas Co., Ltd. Senboku LNG Terminal
Cold power generation	1982	6 000kW Rankin cycle + NG expansion	Osaka Gas Co., Ltd. Senboku LNG Terminal
Cold power generation	1982	9 400kW Rankin cycle + NG expansion	Kitakyushu LNG Terminal*1
Cold power generation	1987	2 800kW Rankin cycle	Osaka Gas Co., Ltd. Himeji LNG Terminal
BOG liquefaction	1997	BOG liquefaction system utilizing cold energy storage	Osaka Gas Co., Ltd. Senboku LNG Terminal
Cold power generation	2000	1 520kW NG expansion	Osaka Gas Co., Ltd. Himeji LNG Terminal

*1: Supply and installation of main equipments



写真1 冷熱発電設備（大阪ガス㈱）¹⁾
Photo 1 LNG cold power generation plant (Osaka Gas. Co., Ltd.)¹⁾



写真2 BOG再液化設備（大阪ガス㈱）²⁾
Photo 2 BOG re-liquefaction plant (Osaka Gas. Co., Ltd.)²⁾

もに、一例として冷熱発電、BOG再液化設備の全景写真（写真1、2）を示す。

2. 冷熱供給型気化器システム

産業用LNGサテライト基地は既存の設備エリアに建設されることが多く、設置エリアの制約を受けやすい。このため設置エリアが小さい温水式気化器が採用されている。

産業用LNGサテライト基地では、LNGがボイラやガスタービン、ガスエンジンの燃料に利用されるため、LNG気化器の稼働率が60～90%と高く、一定の冷熱用LNG利用量が確保できる。また、同一工場内にはプロセス用冷却水など冷熱利用先が多数存在し、特に冷水の需要が多い。



写真3 実証試験装置
Photo 3 Pilot plant

そこで産業用LNGサテライト基地の冷熱利用に対応するため、写真3に示す実証試験装置を用いて、冷水などの冷熱を供給できるとともに、信頼性があり、経済性の高い気化器システムを開発した。

本システムは、今までのシステムと比較して、次のような特徴がある。

- ・温水バス式気化器で実績のあるヘッダ構造を持った伝熱管を基本とし、コンパクトで省スペース化を実現できる。
- ・既存の冷凍機の代替として冷熱を供給することで、冷凍機動力を削減できる。
- ・気化熱を冷熱として利用することで、LNGの気化熱源（燃料）を削減できる。

2.1 開発の基本的な考え方

(1) 気化熱量

LNGサテライト基地では、図2に示すとおり、約750kJ/kgの冷熱量を取り出すことができる。しかし現状は、この熱量分を蒸気などの加温熱源で供給し、温水を介してLNGを気化している。このときのLNG気化器には、温水バス式気化器³⁾が利用されている。

温水バス式気化器では、LNGと温水が直接熱交換するためLNGの温度が低く、蒸発が最も激しいLNG入口部では薄く着氷している。しかし温水温度が65以上と高いため、氷の成長が起らず気化性能を保持している。

(2) 着氷の抑制

冷熱利用では温水が冷水に変わるため、次式の氷表面での伝熱式において温度差($T_w - T_{ice}$)は約1/6となる。

$$Q = h_o \cdot A_{ice} \cdot (T_w - T_{ice}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Q ：交換熱量、 h_o ：氷表面熱伝達率、 A_{ice} ：氷表面積、 T_w ：水温、 T_{ice} ：氷表面温度(=0)である。

図3に示すように、氷表面熱伝達率 h_o が温水バス式気

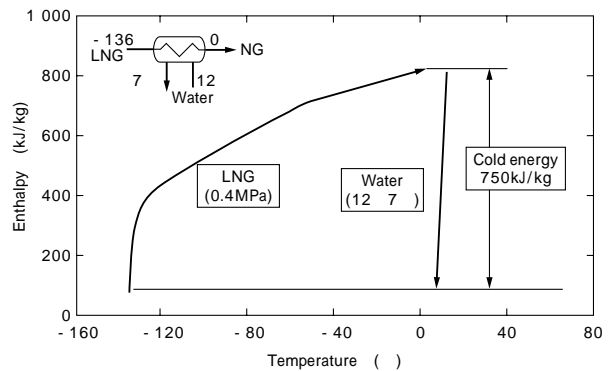


図2 LNGエンタルピ曲線
Fig. 2 LNG enthalpy curve

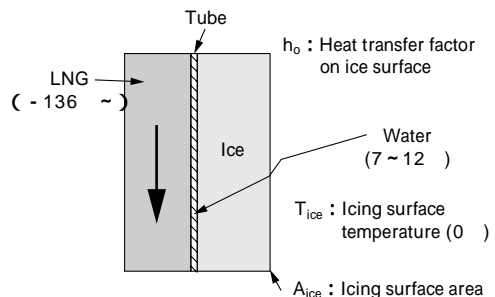


図3 着氷モデル
Fig. 3 Icing model

化器と同一の自然対流（図4）とすれば、氷表面積 A_{ice} が大きくなり、着氷厚さが増大することになる。この着氷厚さに対応するチューブピッチは、経済的な気化器のチューブピッチをはるかに越えるものである。

そこで、図5に示すように、水の流れを自然対流から強制対流に変え、氷表面熱伝達率 h_o を大きくすることにより着氷を抑制し、隣接する伝熱管が着氷で閉塞（ブリッジング）しないパッフル構造とした。

(3) 流れ分布

水の流れを強制対流としても、半径方向断面で伝熱管間隔が不均一であれば、偏流が生じ、流れにくい箇所の着氷厚さが増大する。そこで、流動解析シミュレーションを用いて流れ分布を検討し、邪魔板などの設置が有効であることを確認した。

2.2 冷水利用の効果

(1) エネルギー効率アップ

冷熱供給は、LNGの気化熱源を不要とし、同時に冷熱用冷凍機の代替を実現する。天然ガスは、約 $41.6\text{MJ}/\text{Nm}^3$ (LHV) の熱量を有し、コージェネレーションの場合、発電約30%、廃熱利用約50%、排ガス約20%の熱量バランスが例示される。

図6に示すように、コージェネレーションに冷熱利用を組合わせた場合、冷凍機代替熱量の約 $0.8\text{MJ}/\text{Nm}^3$ に加え、それと同量の加温熱源が不要となるため、約 $1.6\text{MJ}/\text{Nm}^3$ の利用熱量の増加となる。

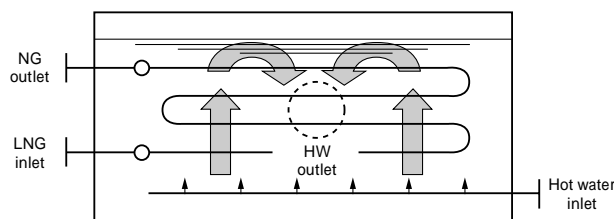


図4 自然対流が発生している温水式気化器
Fig. 4 Flow pattern for natural convection

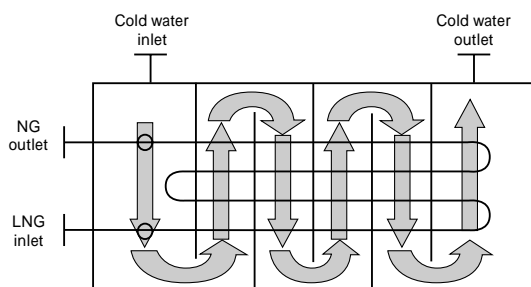


図5 強制対流の冷水式気化器
Fig. 5 Flow pattern for forced convection

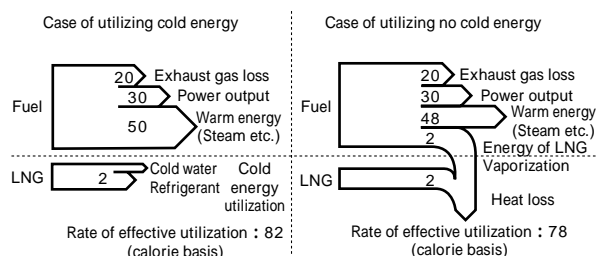


図6 エネルギー利用効率
Fig. 6 Total efficiency of energy on natural gas

表3 冷水利用したときの年間メリット
Table 3 Total gain for utilizing cold water

LNG flow rate	t/h	1.0	2.0
Gain for fuel	Thousand yen/y	4 900	9 800
Gain for power	Thousand yen/y	5 600	11 200
Total gain	Thousand yen/y	10 500	21 000

- * 1 Electricity charge = ¥10/kWh
- * 2 COP of refrigerator = 3.0
- * 3 Fuel cost = ¥2 000/t (eq. steam), Eff. of boiler = 85%
- * 4 Operation time = 8 400h/y

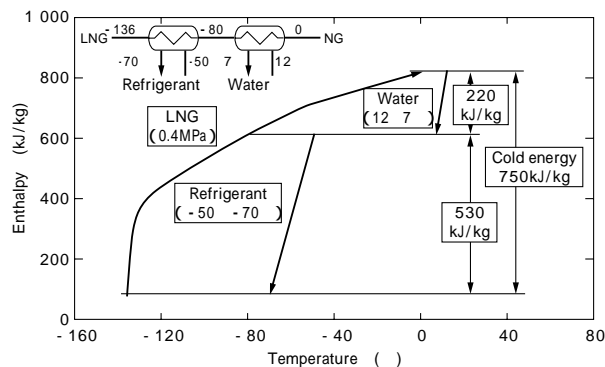


図7 LNGカスケード利用
Fig. 7 LNG enthalpy curve

この利用熱量は天然ガス保有熱量の約4%に相当する。言い換えれば、LNGの冷熱利用は天然ガスを利用する工場におけるエネルギー総合効率の約4%向上を実現する。

(2) システムメリット

約4%向上するエネルギー総合効率を金額で表すと表3となる。1t/hのLNG気化能力を有する冷水供給気化器システムの導入により年間約1000万円に近いメリットが得られる。

2.3 冷熱のカスケード利用

工場では、冷水以外に $-5 \sim -40$ の冷凍に冷熱が利用されている。媒体を水から凝固温度の低い冷媒に変えることで低温の冷熱供給が可能となる。

同一冷熱量の供給における冷凍機動力は、利用温度が低温になるほど増大するため、低温冷熱供給は冷水供給に比べてエネルギー削減量が拡大する。

図7に示すとおり、低温冷熱供給では、天然ガスの出口温度がマイナスとなるため、後段に冷水供給システムを組込むことで、天然ガスを0以上気化できる。この冷熱のカスケード利用により、低温と冷水が同時に取出せる。

また、熱媒体の選定により様々な温度域の冷熱を取出すことができるので、冷熱のカスケード利用により省エネルギー率の向上が可能となる。

3. 排熱・冷熱利用発電システム

ランキンサイクル冷熱発電（図8）は、LNG冷熱利用として最も多く利用されているが、40t/h以上のLNG利用量が必要であり、LNG利用量の少ないサテライト基地では発電量に占める機械ロス割合が大きくなるため経済性が成立しない。

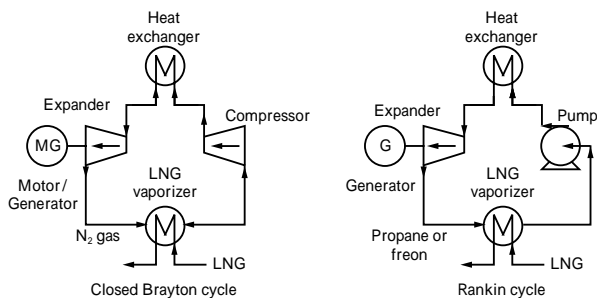


図8 システム原理
Fig. 8 System principle

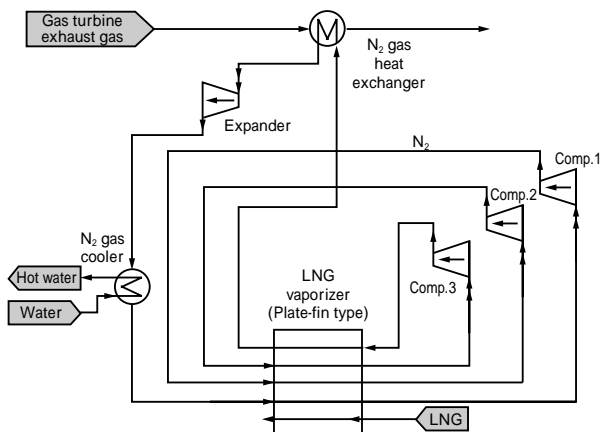


図9 システムフロー
Fig. 9 System flow

しかし、産業用 LNG サテライト基地ではガスタービンの排熱と LNG 冷熱を同時に利用でき、その大きな熱落差から高効率な発電と LNG の気化を実現できる。これに、機械ロスの小さいシステムを組み込んだ冷熱発電システムを開発している。本システムは、図8、図9に示すように、窒素を媒体とした閉ブレイトンサイクルで、以下の特徴を有している。

(1) タービン・圧縮機

タービン・圧縮機には、当社機械カンパニーが保有す

るタービン減速機一体型圧縮機（エコセントリ）を採用しているため、機械ロスが小さい。

(2) LNG 気化器

多流体の熱交換が可能なプレートフィン式熱交換器（ALEX）を用いることにより、圧縮機のアフタクーラと LNG 気化器の役目を一つの熱交換器で行うことができる。

本システム導入により、気化器代替、LNG 気化燃料の削減、発電が得られ、設備単純回収年数（＝設備費／年間メリット）が10年以下となる LNG 利用量は約8t/h以上である。LNG 利用量8t/hの LNG 当たりの発電原単位は50kWh/t-LNG である。

むすび＝ LNG サテライト基地を設置する工場では、エネルギー効率向上に寄与する LNG の冷熱利用が注目されている。冷凍機代替にならないまでも冷却塔代替として気化熱源を享受することに主眼を置いた冷熱利用方法が推進されることを期待する。

最後に、本研究にあたり、共同研究者として多くのご助言、ご指導を頂いた中国電力㈱の関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) TRI-EX 中間媒体式 LNG 気化器（当社製品カタログ）。
- 2) 伊藤 裕ほか：配管技術，1999年7月号（1999），p.46。
- 3) 浅田和彦ほか：配管技術，2002年1月号（2002），p.30。